



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



HAVACILIK VE UZAY SANAYİNDE  
KULLANILAN AL2024-T3 MALZEMELERİ  
İÇİN SiO<sub>2</sub> NANOPARTİKÜL İLAVELİ  
YAPIŞTIRICILARIN ARAŞTIRILMASI

Mehmet SARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2017  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet SARI tarafından hazırlanan ‘‘Havacılık ve Uzay Sanayiinde Kullanılan AL2024-T3 Malzemeleri için SiO<sub>2</sub> Nanopartikül İlaveli Yapıştırıcıların Araştırılması’’ adlı tez çalışması 22/05/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı / oy okluğı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Ahmet SAMANCI

.....

#### Üye

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRÇİ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet COŐKUN  
FBE Müdürü

Bu tez alışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 171316002 nolu proje ile desteklenmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Lokman GEMİ bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet SARI

Tarih: 22.05.2017

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# HAVACILIK VE UZAY SANAYİNDE KULLANILAN AL2024-T3 MALZEMELERİ İÇİN SiO<sub>2</sub> NANOPARTİKÜL İLAVELİ YAPIŞTIRICILARIN ARAŞTIRILMASI

**Mehmet SARI**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Ahmet SAMANCI  
Yrd. Doç. Dr. Lokman GEMİ**

**2017, 125 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Ahmet SAMANCI  
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR  
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ**

Tez çalışması üç temel aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sırasıyla aşağıda özetlenmiştir.

Epoksi reçineye ağırlıkça farklı oranlarda (%0.5 – 3.5) SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave edilerek epoksi nanokompozitler hazırlanmıştır. Hazırlanan nanokompozitlerin mekanik özellikleri araştırılmış ve ağırlıkça %0.5 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinde maksimum çekme dayanımı bakımından en yüksek değer 88.98 MPa olarak elde edilmiştir. Kontrol numunesine göre, ağırlıkça %0.5 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli numunelerde çekme dayanımı %15.7 artış göstermiştir. Ağırlıkça %0.5 ilave oranından daha yüksek ilavenin yapıldığı nanokompozitlerde ilave miktarının çekme dayanımı ve statik tokluk değeri ile genel anlamda ters orantılı olduğu görülmüştür. Nanokompozitlerin hasar yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve partikül ilavesinin kırılma davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Ağırlıkça %2.0 ve daha yüksek SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave oranına sahip numunelerin hasar yüzeylerinde partikül kümeleşmeleri görülmüştür. Mekanik özelliklerde gerçekleşen bu düşüşün kümeleşme oluşumu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Nanokompozitlerin termal özellikleri DSC/TGA ile incelenmiştir. Bağ karakterizasyonu ise FTIR ile gerçekleştirilmiştir. Partikül ilavesinin termal kararlılığı iyileştirdiği görülmüştür. Termal kararlılıktaki iyileşmenin çapraz bağ yoğunluğu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Havacılık ve uzay sanayiinde yaygın kullanıma sahip Al2024-T3 malzemesinin yapıştırılan olarak kullanıldığı çalışmada, alüminyum numune yüzeyleri PAA, FPL dağlama, kumlama ve lazer olmak üzere dört farklı yöntemle hazırlanmıştır. Numuneler tek bindirmeli bağlantı yöntemi ile birleştirilmiş ve yüzey hazırlama yöntemlerinin kayma dayanımı ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. En iyi kayma dayanımına FPL dağlama yöntemi ile 22.04 MPa olarak ulaşılmıştır. FPL dağlama yöntemlerindeki yüksek kayma dayanımının yüzeyde oluşan ikincil çukurcuklar aracılığı ile sağlandığı düşünülmektedir.

Epoksi reçine içerisine ağırlıkça farklı oranlarda (%0.5 – 2.0) SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılarak hazırlanan nano yapıştırıcılar kullanılarak PAA ile yüzeyleri hazırlanmış olan Al2024-T3 numuneleri tek bindirmeli bağlantı yöntemiyle birleştirilmiştir. Partikül ilavesinin kayma dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmış ve ağırlıkça %1.0 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave oranına sahip yapıştırıcılarda en iyi kayma dayanımına 25.25 MPa olarak ulaşılmıştır. Kontrol numunesine göre, ağırlıkça %1.0 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcılarda kayma dayanımı %22.52 artış göstermiştir. Yapılan hasar yüzeyleri incelemelerinde görülen transfer bölgesinin kayma dayanımında etkili olduğu düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** hasar analizi, nanokompozit, SiO<sub>2</sub>, yapışma, yapıştırıcı, yüzey hazırlama

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

## **INVESTIGATION OF NANO-SiO<sub>2</sub> REINFORCED ADHESIVES USED FOR AL2024-T3 AEROSPACE MATERIAL**

**Mehmet SARI**

**The Graduate School Of Natural and Applied Science Of Necmettin Erbakan  
University**

**The Degree Of Master Of Science in Mechanical Engineering**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet SAMANCI  
Asst. Prof. Dr. Lokman GEMİ**

**2017, 125 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Dr. Ahmet SAMANCI  
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR  
Asst. Prof. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ**

The thesis work was carried out in three basic stages. These stages are summarized below respectively.

Epoxy nanocomposites were prepared by adding SiO<sub>2</sub> nanoparticles in different proportions by weight (0.5 - 3.5%) to epoxy resin. The mechanical properties of the prepared nanocomposites were investigated and the maximum value of maximum tensile strength was obtained as 88.98 MPa when 0.5 wt% SiO<sub>2</sub> nanoparticles were added. According to the control sample, the tensile strength increased by 15.7% in samples with 0.5 wt.% SiO<sub>2</sub> nanoparticles. It has been found that the addition amount of nanocomposites with higher than 0.5% addition ratio by weight is inversely proportional to the tensile strength and static toughness value in general. The damage surfaces of the nanocomposites were examined by SEM and the effect of particle addition on fracture behavior was also investigated. Particle clusters were observed on the damaged surfaces of the samples with a SiO<sub>2</sub> nanoparticle addition rate of 2.0% or more by weight. This decrease in mechanical properties is thought to be related to the formation of clusters. The thermal properties of nanocomposites were investigated by DSC / TGA. The bond characterization was performed with FTIR. Particle addition has been shown to improve thermal stability. The improvement in thermal stability is thought to be related to the cross-link density.

Aluminum sample surfaces have been prepared in four different ways as PAA, FPL etching, sandblasting and laser in studying Al2024-T3 material which is widely used in aerospace industry as adhesive. The specimens were combined with a single bridging method and the shear strength of the surface preparation methods and the effect on the surface morphology were investigated. The best shear strength was reached at 22.04 MPa by FPL milling method. It is thought that the high shear strength of the FPL etching methods is provided by secondary pits formed on the surface. Al2024-T3 specimens with PAA surfaces prepared using nano adhesives prepared by adding SiO<sub>2</sub> nanoparticles at different ratios (0.5 - 2.0%) to the epoxy resin were combined by a single clamp connection method. The effect of the addition of the particles on the shear strength was investigated and the best shear strength at 25.25 MPa was reached in adhesives having a 1.0 wt.% SiO<sub>2</sub> nanoparticle addition ratio. According to the control sample, the shear strength increased by 22.52% in adhesives with 1.0 wt% SiO<sub>2</sub> nanoparticles. It is considered that the transfer zone observed in the surface of damaged surfaces is effective in shear strength.

**Keywords:** adhesion, adhesive, damage analysis, nanocomposite, SiO<sub>2</sub>, surface treatment

## ÖNSÖZ

Çalışmalarında oluşan tıkanma noktalarımı açan ve benimle yakından ilgilenen danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Ahmet SAMANCI ve Yrd. Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Yüksek lisans çalışmamın genel kurgusunu oluşturan, bilgi ve tavsiyeleri ile araştırma ve bilimsel düşünce disiplini aşılayıp ufkumu açan Sayın Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e, deneylerin yapılması, numunelerin hazırlanması ve karakterizasyonu ve sonuçların yorumlanmasında desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Şakir YAZMAN'a hassaten teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım her aşamasında, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen babam Musa SARI'ya annem Aysel SARI'ya ve ablam Medine DOĞRU'ya, lise yıllarımdan beri yanımda olan ve varlığı ile beni cesaretlendiren Ayşe HARPUTLU'ya ve ayrıca ismini sıralayamadığım diğer aile üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmama 171316002 nolu proje ile maddi destek sağlayan Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürü bir borç bilirim.

Mehmet SARI  
KONYA-2017

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>4</b>
2.1. Yapışma Bağlantıları ve Etkileyen Faktörler.....	4
2.2. Nanopartiküllerin Polimerlerde Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı.....	9
<b>3. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>14</b>
3.1. Yapışma .....	14
3.1.1. Yapışma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları .....	15
3.1.2. Yapışma bağlantıları ve yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler .....	16
3.1.3. Yapışma teorileri.....	19
3.1.4. Yapışma bağlantılarındaki hasar mekanizmaları .....	26
3.1.5. Yapışma bağlantılarını etkileyen faktörler .....	27
3.1.6. Yapışma bağlantıları için yüzey hazırlama.....	28
3.2. Yapısal Yapıştırıcılar .....	37
3.2.1. Epoksiler .....	38
3.2.2. Poliüretanlar .....	39
3.2.3. Reaktif akrilikler .....	40
3.2.4. Toklaştırılmış akrilikler .....	40
3.2.5. Anaerobik akrilikler .....	40
3.2.6. Siyanoakrilatlar .....	41
3.2.6. Silikonlar.....	42
3.3. Nanopartikül İlaveli Yapıştırıcılar .....	43
3.3.1. Nanopartiküllerin matris içerisinde homojen dağıtımı .....	44
3.3.2. Nanopartiküllerin tokluk artırma mekanizmaları .....	45
3.4. Polimerler Malzemelerin Kırılma Yüzey Özellikleri .....	46
3.4.1. Mirror bölgesi .....	46
3.4.2. Mist bölgesi.....	46
3.4.3. RIB çizgileri bölgesi .....	47
3.4.4. Hackle bölgesi.....	47
3.4.5. River işaretleri bölgesi .....	47
3.4.6. Wallner Çizgileri.....	47
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>48</b>

4.1. Malzeme Özellikleri .....	49
4.1.1. Yapıştırıcı.....	49
4.1.2. Yapıştırılan malzeme .....	49
4.1.3. SiO <sub>2</sub> nanopartikül.....	50
4.2. Yapıştırıcının Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	51
4.2.1. Yapıştırıcı çekme testi deney numunelerinin üretimi .....	51
4.2.2. Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tespiti.....	53
4.3. Yüzey Hazırlama Yöntemleri ve Bağ Mukavemetine Etkisi.....	53
4.3.1. Alüminyum numune yüzeylerin hazırlanması .....	54
4.3.2. Yüzey hazırlama yöntemlerinin karşılaştırılması .....	58
4.3.3. Yüzey hazırlama yöntemlerinin kayma dayanımına etkisinin tespiti .....	58
4.4. SiO <sub>2</sub> İlavesinin Yapıştırma Bağlantısı Üzerindeki Etkisinin Tespiti.....	60
4.4.1. SiO <sub>2</sub> ilave miktarının kayma dayanımına etkisinin tespiti.....	60
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>61</b>
5.1. SiO <sub>2</sub> Nanopartikül İlavesinin Yapıştırıcı Performansına Etkisi .....	61
5.1.1. Yapıştırıcının mekanik özellikleri .....	61
5.1.2. Yapıştırıcının kırılma yüzeylerinin hasar analizi .....	64
5.1.3. Yapıştırıcının DSC/TGA analizleri .....	83
5.1.4. Yapıştırıcının FT-IR analizleri.....	86
5.2. Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin Bağlantı Performansına Etkisi.....	87
5.2.1. Tek bindirmeli bağlantıların kayma deneyi sonuçları .....	88
5.2.2. Yüzey hazırlama yöntemlerinin pürüzlülük ve morfoloji üzerindeki etkisi .	90
5.2.3. Yapışma yüzeylerinin hasar analizi .....	95
5.3. SiO <sub>2</sub> Nanopartikül İlavesinin Bağlantı Performansına Etkisi.....	99
5.3.1. Tek bindirmeli bağlantıların kayma deneyi sonuçları .....	99
5.3.2. Yapışma yüzeylerinin hasar analizi .....	102
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>110</b>
6.1. Sonuçlar .....	110
6.1.1. SiO <sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin yapıştırıcıların mekanik deney sonuçları.....	110
6.1.2. Yüzey hazırlama yönteminin kayma deneyi sonuçları .....	111
6.1.3. SiO <sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcıların kayma deneyi sonuçları.....	111
6.2. Öneriler .....	111
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>112</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>126</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Kısaltmalar

CNT	: Karbon nanotüp
DGEBA	: Bisfenol A diglisidil eter
DGEBF	: Bisfenol F diglisidil eter
TGA	: Termal gravimetrik analiz
FT-IR	: Fourier dönüşümlü infrared spektrofotometre
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
DD	: Dağlama ile hazırlanmış yüzey
AA	: Anodizasyon ile hazırlanmış yüzey
KK	: Kumlama ile hazırlanmış yüzey
LL	: Lazer ile hazırlanmış yüzey
S00	: SiO <sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılmamış epoksi reçine
S05	: Ağırlıkça %0.5 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
S10	: Ağırlıkça %1.0 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
S15	: Ağırlıkça %1.5 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
S20	: Ağırlıkça %2.0 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
S25	: Ağırlıkça %2.5 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
S30	: Ağırlıkça %3.0 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
S35	: Ağırlıkça %3.5 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi reçine
Y-S00	: SiO <sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılmamış yapıştırıcı ile birleştirme
Y-S05	: Ağırlıkça %0.5 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış yapıştırıcı ile birleştirme
Y-S10	: Ağırlıkça %1.0 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış yapıştırıcı ile birleştirme
Y-S15	: Ağırlıkça %1.5 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış yapıştırıcı ile birleştirme
Y-S20	: Ağırlıkça %2.0 SiO <sub>2</sub> ilavesi yapılmış yapıştırıcı ile birleştirme

## 1. GİRİŞ

Malzemelerin birleştirilmesi amacıyla kullanılan çokça materyal ve yöntem bulunmaktadır. Birleştirme amacıyla perçin ve cıvata gibi ürünler kullanılabilir gibi kaynak ve lehim gibi yöntemlerde kullanılabilir. Fakat, bu birleştirici malzemelere ve birleştirme yöntemlerine düşük üretim maliyeti, düşük tasarım ağırlığı ve kolay kullanımı ile üstünlük sağlayan materyal ve yöntemler de bulunmaktadır. Yapıştırıcılar diğer malzemelere göre üstünlüğe sahip birleştirme araçlarıdır. Yapıştırıcılar doğal veya sentetik kaynaklı olabilir. Yapıştırıcı, ASTM tarafından “yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde” olarak tanımlanmaktadır (ASTM D907 - 15, 2015). Yapıştırıcılar havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi endüstriyel birçok alanda kullanılmaktadır. Uçak sanayi, otomotiv sanayi, denizcilik ve makine parçaları gibi endüstriyel farklı uygulamalarda yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantılar görmek mümkündür (Adams, Comyn, & Wake, 1997; Hashim, Cowling, & Winkle, 1990; A. J. Kinloch, 1987; Tong & Steven, 1999). Örneğin, Boeing 747 uçağının yüzey alanının %62’si yapıştırıcı kullanılarak birleştirildiği ve Lockheed C-5A uçağının 3250 m<sup>2</sup> yapıştırılmış yapıya sahip olduğu belirtilmektedir (Vaidya, Gautam, Hosur, & Dutta, 2006).

Enerji tüketimini azaltma isteği gün geçtikçe artmaktadır. Enerji tüketiminin azaltma isteğini karşılamak amacıyla ağırlık azaltmak en önemli seçeneklerden birisidir. Yapıştırma bağlantılarının geleneksel birleştirme elemanlarına göre daha hafif bağlantılar kurulmasına olanak sağlaması sebebiyle gittikçe yaygınlaşmaktadır.

1900’den beri bitkisel yapıştırıcılar, kâğıt gibi gözenekli malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmasına rağmen, elli yıl öncesine kadar hayvansal esaslı olanlar, büyük öneme sahiptiler. Kasein yapıştırıcılar, I. Dünya Savaşı’nda ahşap uçak konstrüksiyonları için kullanılmış, ancak bu tip yapıştırıcıların neme karşı düşük mukavemet ve dirence sahip oldukları görülmüştür. Endüstride yapıştırıcıların kullanımında hızlı artış, doğal ürünlerde sınırlama tanımayan ve metalleri diğer metal olmayan gözeneksiz malzemelere bağlayabilen sentetik reçinelerin gelişmesinden kaynaklanmaktadır. En önemli ilk sentetik reçine, kerestelerin birleştirilmesinde kullanılan fenol formaldehittir. II. Dünya Savaşı esnasında uçaklarda yapısal metallerin bağlanması epoksi reçinelerin ve fenoliklerin kullanılmasıyla kendine önemli bir yer

edinmiştir. Bu yer edinme sayesinde gün geçtikçe dayanım ve uzama kabiliyeti artarak yorulma dayanımları da iyileştirilmiştir. Aynı zamanda titreşimi sönümleyen ve esneklik özelliklerinde iyileşmeler sağlanarak, her geçen gün daha iyi yapıştırıcılar ve yapışma bağlantıları elde edilmiştir (Şekercioğlu, 2001).

Yapıştırıcı kullanımında, diğer bağlama yöntemleri kadar tehlike söz konusu değildir. Ayrıca yapıştırıcı uygun bir bağlama yöntemi olduğu için çok özel işlemlere de gerek yoktur. İngiltere’de, Denizcilik Araştırma Kurumu tarafından rapor edilen bazı araştırmalara göre Kuzey Denizde kıydan çok uzaklarda, denizin ortasında yapıştırıcı kullanılarak çelik yapılar onarılmıştır (A. J. Kinloch, 1987). Bu tip onarımlarda yapıştırıcı kullanılmadan önce, hem bulk (mekanik özellikleri öğrenmek için çekme numunesi şeklinde kalıba dökülen yapıştırıcı malzemesi) yapıştırıcı ve hem de bağlantıdaki yapıştırıcının mekanik özelliklerine çevre ve ortamın etkilerinin iyi bir şekilde araştırılması ve bilinmesi gerekir. Aksi takdirde su altında yapıştırma bağlantılarının nasıl davranacağı bilinemez. Yapıştırıcılar katılaşmaları ile bağlama özelliğine sahip olan malzemelerdir. Yapıştırıcılar katılaşmaları için reaksiyon sağlayıcıya ihtiyaç duyup duymamalarına göre ve kaynaklarına göre sınıflandırılabilir. Reaksiyon sağlayıcılara ihtiyaç duymayan yapıştırıcıların katılaşması sıcaklık, basınç, kurutma veya temas ile sağlanabilir. Reaktifte ihtiyaç duyan yapıştırıcılar ise çok bileşenli ve tek bileşenli olarak ayrılabilir. Kaynaklarına bağlı olarak sınıflandırma ise doğal ve sentetik olarak ayrılır. Epoksi, akrilik ve üretan yapıştırıcılar çok bileşenli yapıştırıcılara örnek olarak verilebilir (A. J. Kinloch, 1987).

Yapıştırma bağlantıları, kullanılmadan önce bağlantı yapılacak koşullar iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bağlantının mukavemeti, maruz kalacağı yüke, uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırıcıya ait özelliklere, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine ve yapışma işleminin sağlıklı yapılıp yapılmadığına bağlıdır.

Bu çalışmanın ana amacı, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında epoksi yapıştırıcıya yapılan SiO<sub>2</sub> nano partikül ilavesinin, bağlantının kayma dayanımı üzerindeki etkisinin tespit edilmesidir. Yapıştırıcı olarak epoksi reçine (Bisfenol A Diglisidil Eter-DGEBA) ve yapıştırılan malzeme olarak ise Al2024-T3 levha kullanılmıştır. Çalışma üç temel aşamada gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşamada, SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin yapıştırıcının özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda ASTM D638–14 standartlarına uygun olarak çekme çubukları hazırlanmış ve ağırlıkça farklı oranlarda (%0.5 – 3.5) SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılmış yapıştırıcıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu aşamada yapıştırıcının mekanik özelliklerini iyileştiren katkı oranları yapıştırma bağlantısında kullanılmak üzere tespit edilmiştir. Ayrıca SiO<sub>2</sub> nanopartikülün kırılma mekanizması üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

İkinci aşamada, tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarına yüzey hazırlama yönteminin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda Al2024-T3 malzemeden kesilmiş numunelerin yüzeyleri dağlama, kumlama, anodizasyon ve lazer ile hazırlanarak ASTM D1002–10 standartlarına uygun olarak yapıştırma bağlantıları gerçekleştirilmiştir ve kayma dayanımına yüzey hazırlama yönteminin etkisi tespit edilmiştir.

Son aşamada, birinci ve ikinci aşamada elde edilen veriler kapsamında uygun yüzey hazırlama yöntemi ve uygun nanopartikül ilave oranları kullanılarak ASTM D1002–10 standartlarına uygun olarak tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı gerçekleştirerek nanopartikül ilavesinin yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hasar yüzeyleri taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) incelenerek nanopartiküllerin yapışma bağlantılarının hasar mekanizmaları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Ayrıca, yapıştırıcıların karakterizasyonu fourier dönüşümlü infrared spektrometre (FTIR), termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile gerçekleştirilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaynak araştırması iki kısımda sunulmuştur. Birinci kısımda yapışma bağlantıları ve yapışma bağlantılarını etkileyen faktörler üzerine yapılan çalışmalar sunulmuştur. İkinci kısımda ise nanopartiküllerin polimerlerde katkı malzemesi olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmalar sunulmuştur.

### 2.1. Yapışma Bağlantıları ve Etkileyen Faktörler

Yapışma bağlantılarında bağlantıyı etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin yapışma bağlantısında ne tür etkiler göstereceğinin ön görülmesi adına araştırmacılar bu alana yönelerek çalışmalar yapmışlardır. Özellikle yüzey hazırlama yöntemi, yapışma bölgesi genişliği, yapıştırıcı kalınlığı ve çevresel şartların etkisi üzerinde durulmuştur.

Venables (1984) tarafından yapılan derleme çalışmada yüzey hazırlama tekniklerine bağlı oluşan oksit tabakasının morfolojisi araştırılmıştır. Çalışmada alüminyum malzemelerin PAA anodizasyon ve FPL dağlama yöntemleri ile yüzey hazırlığı yapıldığı durumda oksit tabakaları incelenmiştir. Pürüzlü yüzeylerde mekanik kilitlenme kaynaklı mukavemet artışının olduğu ifade edilmiştir (Venables, 1984).

Kwon ve Lee (2000) tarafından yapılan çalışmada yapıştırıcı kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün yapışma bağlantısının yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 0.17 mm yapıştırıcı kalınlığının ve 3 mikrometre yüzey pürüzlülüğünün ideal olduğunu ifade etmişlerdir (Kwon & Lee, 2000).

Uehara ve Sakurai (2002) çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün yapışma bağlantısının mukavemeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çekme mukavemeti için optimum bir yüzey pürüzlülüğünün olduğunu ve bu değerinde 3 ile 6 mikrometre olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca 2 mikrometrenin altındaki pürüzlülük durumlarında mukavemette çok küçük bir artışa neden olduğu ifade etmişlerdir (Uehara & Sakurai, 2002).

Lunder ve ark. (2002) çalışmalarında yedi farklı yüzey hazırlama yöntemiyle hazırladıkları alüminyumların oksit kalınlıklarını incelemiştirlerdir. Çalışmada en az 4 saat anodizasyona tabi tutulan malzemede 0.1 mikrometre ve 12 saat anodizasyon işlemine tabi tutulan malzemede ise 0.22 mikrometre oksit kalınlığı elde etmişlerdir. Çalışmada yapıştırma bağlantısının kayma dayanımını da incelenmiştir. En iyi sonuçlar anodizasyon ile yüzey hazırlanmış numunelerden elde edilirken kromik asit ile hazırlanmış numunelerde ise bir miktar düşüş olmasına rağmen yakın sonuçlar alınmıştır (Lunder, Olsen, & Nisancioglu, 2002).

Shahid ve Hashim (2002) tarafından yapılan çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün çelik numunelerde ayrılma mukavemeti üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlarda uyum sağlanan çalışmada kaba pürüzlü yüzeylerde oluşan normal gerilmelerin cilalı yüzeylere göre %30 kadar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Shahid & Hashim, 2002).

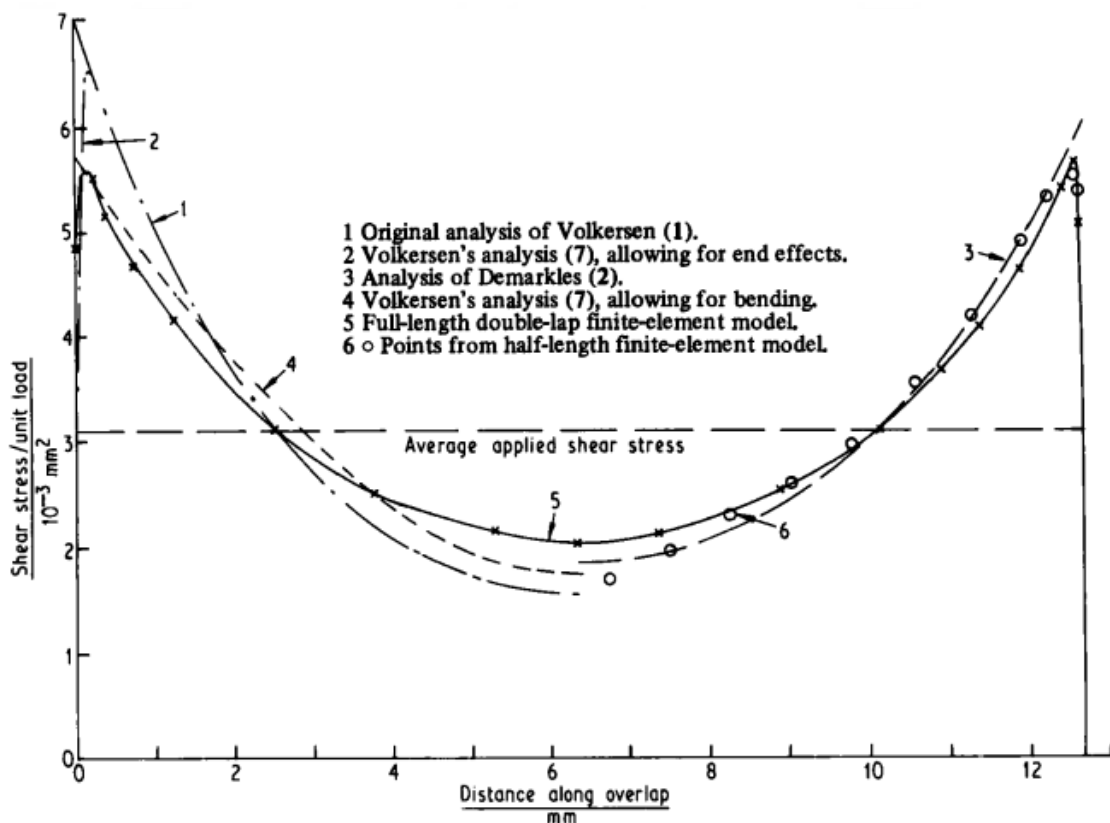
Şekercioğlu ve ark. (2003) yüzey pürüzlülük değerinin yapıştırma bağlantısı üzerindeki etkisini belirlemek için yaptıkları çalışmada optimum pürüzlülük araştırmıştır ve yüksek yapışma mukavemeti için yüzey pürüzlülüğü değerinin 1.5 – 2.5 µm olmasının uygun olduğunu ifade etmişlerdir (Şekercioğlu, Rende, Gülsöz, & Meran, 2003).

Prolongo ve Urena (2009), alüminyum/epoksi yapıştırma bağlantıları ve yapıştırıcılar üzerine yaptıkları çalışmada alüminyum yüzeylere uygulanan hazırlama tekniklerinin yapıştırıcı dayanımını belirleyen en önemli etken olduğunu ifade etmişlerdir. PAA anodizasyon işleminin FPL dağlamaya göre daha yüksek yapışma mukavemeti elde etmeyi sağladığını bununda oluşturduğu oksit tabakasının gözenek oranının daha yüksek olduğundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada yapışma mukavemetini belirleyen bir diğer etki olarak yapıştırıcının belli bir sıcaklık altındaki viskozitesinin ve çapraz bağ yoğunluğunun olduğu ifade edilmiştir (S. G. Prolongo & Ureña, 2009).

Leena ve ark. (2016) alüminyum alaşımların yüzeylerini üç farklı teknik ile hazırlayarak tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı yapmışlardır. Çalışmada yüzey hazırlama metotlarının; yüzey morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey enerjisi

üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. FPL dağlama yönteminin yapışma bağlantısının mukavemetini en fazla artıran yöntem olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca FPL dağlamanın ıslatma davranışında olumlu katkı sağladığını görmüşlerdir (Leena, Athira, Bhuvaneswari, Suraj, & Rao, 2016).

Adams ve Peppiatt (1974) yaptıkları çalışmada tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının genişlik ve uzunluk boyunca kayma gerilmelerindeki değişimi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kayma gerilmesinin bant genişliği boyunca düzgün bir değişim göstermediği ve gerilmelerin kenar bölgelerde yığıldığı görülmüştür (Adams & Peppiatt, 1974).



Şekil 2.1. Çift bindirme teorisi ve sonlu elemanlar modellerinden kayma gerilmesi dağılımları

Goglio ve Rossetto (2008) tek taraflı bindirme bağlantılarını darbe yüküne maruz bırakarak yaptıkları deneysel çalışmada bağlantılar statik ve dinamik yükler altında incelenmiştir. Çalışmada çelik numuneler epoksi yapıştırıcı vasıtasıyla birleştirilerek soyulma ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlarda bindirme uzunluğunun ve yapıştırılan-yapıştırıcı malzeme kalınlıklarının etkisi incelenmiştir.

Çalışma sonucunda ortalama kayma gerilmesi değerinin, yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme kalınlıklarının artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada dinamik yüklerin statik yüklere göre daha fazla gerilme meydana getirdiği ortaya konulmuştur (Goglio, Rossetto, & Dragoni, 2008).

Naito ve ark. (2012) ve Özel ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada tek taraflı bindirme ile yapıştırmada alt ve üst yapıştırılan malzeme olarak farklı malzeme türlerini kullanmışlardır ve çekme yüküne maruz bırakarak yapıştırma bağlantısının dayanımını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Yapıştırılan malzeme olarak çalışmada Al2024-T3 ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak ise DP460 yapısal epoksi yapıştırıcısı tercih edilmiştir. Çalışmada karbon elyafların oryantasyonunun, yapıştırılan malzeme kalınlıklarının ve binme mesafesinin kayma mukavemetini ve gerilim dağılımını etkilediği tespit edilmiştir (Naito, Onta, & Kogo, 2012; Ozel, Yazici, Akpınar, Aydın, & Temiz, 2014).

Cerny ve Morscher (2006) çalışmalarında uzay keşfindeki görevlerde kullanılacak olan ısı geri verme sistemlerindeki yapıştırma bağlantılarının yüksek sıcaklık dayanımlarını nasıl sağlayabileceği üzerine çeşitli deneysel incelemeler yapmışlardır. Çalışmada yapıştırma bağlantısının mikroskobik analizini esas almışlardır (Cerny & Morscher, 2008).

Frigione ve ark. (2006) çalışmalarında yapıştırma bağlantılarında su faktörünün üzerinde durmuşlardır. Suyun yapıyı mekanik ve fiziksel olarak olumsuz etkileyeceği bu etkinin yok edilmesi için yapıştırıcı modülünün ve bağ kuvvetinin artırılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Çalışmada suyun yapıştırıcı ara yüzey bağlanmasını zayıflattığı görülmüştür. Bu yüzden bağlantılarda çevresel şartlarının dikkat edilmesi gereken bir faktör olduğu belirtilmiştir (Frigione, Lettieri, & Mecchi, 2006).

Jarry ve Shenoï (2006) yaptıkları çalışmada denizcilikte kullanılan yapıştırıcıların su, sıcaklık ve mukavemet değerleri üzerine birtakım incelemelerde bulunmuşlardır. Çalışmalarında yapıştırıcı kalınlığının artmasının önemli mukavemet özellikleri kazandırdığını tespit etmişlerdir. Çalışmada zamanla çizgisel hataların oluştuğu ve bu durumun yüksek gerilme yığılmalarına neden olduğu, bağlantının koparak hasarlandığı görülmüştür (Jarry & Shenoï, 2006).



Underhill ve Duquesnay (2006) çalışmalarında kuru ve nemli sistemlerde epoksi reçinelerin kayma gerilmeleri ve yorulma ömürlerini incelemiştir. Çalışmada yorulma ömrünün nemli sistemde daha az olduğu ve yorulmanın kenara yakın bölgelerde olduğu görülmüştür. Yorulma hasar mekanizması incelendiğinde her ne kadar yapıştırıcı kaynaklı gibi görünse de hasarın kesme gerilmesi olduğu ifade edilmiştir (Underhill & Duquesnay, 2006).

Wang ve ark. (2006) yapıştırma ile birleştirilmiş kompozitlerin çalışmalarındaki ısıya karşı gösterdikleri dayanımı incelemiştir. Çalışmada 300–550 °C dayanım gösterildiği, 750 °C sıcaklıkta yapıştırılan inorganik silikatın 900 °C' ye kadar değişim göstermediği tespit edilmiştir. Bu dayanımın malzemede yer alan oksijen ve silikonun dağılımı ile ilgili olduğu ifade edilmiştir. Ancak desteklerden çekme yüküne maruz bırakılan bağlantıların yapıştırıcılarında bozulmalar olduğu görülmüştür (C. Wang, Huang, & Wang, 2006).

Sawa ve ark. (2000) çekme yüküne maruz tek bindirmeli yapıştırma bağlantısını iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak inceledikleri çalışmada ara yüzey gerilme dağılımının yapıştırılan malzeme kalınlığı, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırılan malzemenin elastisite modül farklarından ne şekilde etkilendiğini araştırmışlardır. Çalışmada yapıştırılan malzeme kalınlığının ve elastisite modülünün yapışma bölgesinin serbest uçlarındaki gerilme dağılımını belirleyen büyük bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır (Sawa, Liu, Nakano, & Tanaka, 2000).

Kadioğlu ve Es-Souni (2003) iki katlı yapıştırma bağlantısının çekme ve eğilme mukavemetlerini deneysel çalışmalar ile incelemiştir. Çalışmada yapıştırıcı plastisitesinin kopma üzerinde önemli bir etki sağladığını tespit etmişlerdir. Deneysel sonuçlar yüksek mukavemetli bir yapıştırma bağlantısı için yapıştırılacak parça, yapıştırıcı malzeme ve yükleme üçlüsünün birlikte düşünülerek elde edilebileceğini göstermiştir (Kadioğlu & Es-Souni, 2003).

Aydın ve ark. (2005) tek taraflı bindirme ile yapıştırılan malzemelerin hasar yüzeylerini incelemişler ve iki farklı bölgenin olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmada serbest uçlarda ayrılma orta bölgelerde ise kayma gerilmelerinin olduğu ifade edilmiştir. Yapıştırma kalınlığının artırılması durumunda kayma gerilme değerinin

büyüyeceği ve eş değer gerilmenin serbest uçlardan merkeze doğru yayılarak yapıştırma bağlantısının dayanımının artacağı sonucuna varmışlardır. Çalışmada çatlak oluşumunun kenardan başlayarak orta bölgeye doğru ilerlediği ve büyüdüğü görülmüştür (Aydın A; Temiz, S, 2005).

Kaftelen ve Baldan (2005) yapıştırıcı kullanılarak uygulanan kompozit yamalar üzerine çalışmışlardır. Çalışmada yapıştırıcı ile yamaya yükün aktarılması amaçlanmıştır. Bu gayenin nedeni yorulma ömrünün artırılmasıdır. Çalışmada tabaka sayısının artmasının ve bindirme yapışma mesafesinin artması ile yorulma ömrünün iyileştirebileceği tespit edilmiştir. Çalışmada ince tabakalarda binme mesafesinin yorulma ömrüne olumlu etki gösterdiği tespit edilse de kalın tabakalarda binme mesafesinin kayda değer bir etki göstermediği belirtilmiştir (Kaftelen & Baldan, 2005).

## **2.2. Nanopartiküllerin Polimerlerde Katkı Malzemesi Olarak Kullanımı**

Zhang ve ark. (2004) nanokompozit numuneleri sürünme testine tuttukları çalışmalarında nanopartiküllerin farklı sürekli yüklerde ve farklı sıcaklıklarda sürünme oranını önemli derecede düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Bu durumun nanopartiküllerin polimerin zincir hareketini, kaymasını ve yönlenmesini kısıtlamasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir (Q. H. Zhang & Chen, 2004).

Meguid ve Sun (2004) tarafından yapılan çalışmada karbon elyaf/epoksi kompozit ve Al6061-T6 malzemelerini homojen bir şekilde dağıtılmış farklı oranlarda CNT ve nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviyelendirilmiş epoksi yapıştırıcılar kullanarak tek taraflı bindirme yöntemiyle birleştirmişlerdir ve testlere tabi tutmuşlardır. Çalışma sonucunda farklı oranlarda nanopartikül ilavesinin ara yüzey ayrılma ve kayma özelliklerine %7-8 oranında katkı sağladığı ancak nanopartikül ilave oranının belli bir sınırı aşmasının ardından yapışma ara yüzey mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir (Meguid & Sun, 2004).

Zhang ve ark. (2006) çalışmalarında sikloalifatik epoksi reçineye nano SiO<sub>2</sub> ilavesi yaparak yalın epoksiye göre toklukta artış tespit etmişlerdir. Çalışmada %3 nano SiO<sub>2</sub> takviyeli kompozitlerde yük altında çatlak enerjisinde 2 kat artış gözlemlenmiştir.

Ayrıca ısı kararlılıkta da TGA ve DSC sonuçlarında %1-5 artış gözlemlenmiştir (X. Zhang, Xu, Xia, Zhang, & Yu, 2006a).

Zhai ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada yapıştırıcı içerisinde yer alan nanopartikül ilavesinin ve farklı yüzey pürüzlülük değerlerinin çelik malzeme ve epoksi yapıştırıcı arasındaki yapışmanın çekme mukavemeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada %2 oranında nano  $Al_2O_3$ , nano  $CaCO_3$  ve nano  $SiO_2$  içeren yapıştırıcı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğünün partikül ilavesinin olmadığı durumlarda etkisinin olmadığı ama partikül ilavesinin bulunduğu durumda belirleyici faktör olduğu tespit edilmiştir. 150 grid zımpara ile pürüzlendirilmiş yüzeyde nanopartikül ilaveli yapıştırıcı kullanılması durumunda yapışmanın çekme dayanımının %380 oranında arttığı görülmüştür (L. Zhai, Ling, Li, & Wang, 2006).

Yao ve ark. (2008)  $SiO_2$  takviyeli epoksi nanokompozitlerin makro ve mikroskobik kırılma karakteri deneysel olarak çalışılmıştır. Nanopartiküllerin kırılma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuçta ise ağırlıkça %3 nano  $SiO_2$  içeren kompozit malzemenin kırılma tokluğu ve şekil değiştirme direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür (Yao, Zhou, & Yeh, 2008).

Chen ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada nano  $SiO_2$  partikül ilaveli epoksi nanokompozit malzemenin termal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada ağırlıkça %10 oranından daha az nano  $SiO_2$  ilaveli kompozitlerin çekme modülünde %25 ve kırılma tokluğunda %30 artış elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca daha yüksek oranlarda nanopartikül ilavesinin kompozitlerde çekme modülünde artışa neden olduğu ancak mukavemet ve kırılma tokluğu üzerinde ise azaltıcı etki gösterdiği ifade edilmiştir (Y.-C. Chen, Lin, & Lee, 2003).

Zhai ve ark. (2008) çalışmalarında epoksi içerisine %1-5 oranında nano  $Al_2O_3$  ilavesi yaparak çelik malzemelerin yapıştırılmasında kullanmışlardır ve partikül oranının yapışma mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda partikül ilavesinin yapışma mukavemetini artırdığı, %2 nano  $Al_2O_3$  ilavesi durumunda maksimum yapışma mukavemetinin elde edildiği görülmüştür. Nanopartikül ilave oranının %2 üzerinde olmasının mukavemette düşüşe neden olduğu da tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak partikül miktarının artmasıyla

viskozitenin azalması ve böylece ıslanabilirliğin düşmesi ileri sürülmüştür (L. L. Zhai, Ling, & Wang, 2008).

Khoee ve Hassani (2010) epoksi reçine içerisine nanoelastomerik kopolimer ilavesi ile yapışma mukavemetini iyileştirmeye çalıştıkları çalışmada farklı oranlarda ilaveli ve ilavesiz olan epoksi yapıştırıcılar kullanılarak tek taraflı bindirme ile yapıştırma bağlantısı yapılmış ve deneylere tabi tutulmuştur. Çalışmada %20 nanopartikül takviyesinin yapışma mukavemetini yaklaşık %80 oranında artırdığı ve ayrıca kırılma tokluğunu iyileştirdiğini sonucuna varılmıştır (Khoee & Hassani, 2010).

Wei ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada basalt fiberleri, ağırlıkça %5 SiO<sub>2</sub> nanopartikülleri ile takviyelendirilmiş ve sonucunda çok filamentli basalt fiberlerin çekme mukavemetinde %30 ve tabakalar arası kayma mukavemetinde ise %15 artış gözlemlenmiştir (Wei, Cao, & Song, 2011).

Srivastava (2011) tarafından yapılan çalışmada kompozit numuneler ağırlıkça %3 CNT ilaveli epoksi reçine ile tek bindirmeli yapıştırma ile birleştirilmiştir. Çalışmada CNT ilavesinin yapıştırmanın mukavemetini yaklaşık %25 artırdığı tespit edilmiştir (Srivastava, 2011)

Dorigato and Pegoretti (2011) tarafından yapılan çalışmada %0.5-2 oranlarında kalsine edilmiş ve ısı işlem görmemiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikülleri epoksi yapıştırıcılar içerisine ilave ederek alüminyum numunelerin tek taraflı bindirme ile yapıştırılmasında kullanmışlardır. Hazırlanan yapışma numunelerinin mekanik deneyleri yapılarak partikül ilavesinin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada nanopartiküllerin alüminyum yüzey ıslanabilirliğine olumlu bir etki sağladığı ve ayrıca epoksi yapıştırıcının mekanik özelliklerini iyileştirerek yapışma bağlantısının dayanımını %28 artırdığı tespit edilmiştir (Dorigato & Pegoretti, 2011).

Gkikas ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada havacılık malzemelerinin hasar onarımında kullanılan yapıştırıcıların geliştirilmek için epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0.5-1 CNT ilavesi yaparak tek taraflı bindirme ile yapıştırma bağlantıları hazırlamışlar ve çalışmada yapışma dayanımının CNT ilavesi ile arttığı, hatta alüminyum korozyonunda da geciktirildiği ifade edilmiştir (Gkikas et al., 2012).

Mactabi ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada epoksi reçineye CNT ilavesi yapılarak alüminyum numuneler tek taraflı bindirme ile birleştirilmiştir. Çalışmada bağlantı yorulmaya maruz bırakılarak yapıştırıcının bütünlüğü araştırılmıştır. Ayrıca çalışmada yorulma yüklemesi sırasında bağlantının elektriksel direnci de çalışılmıştır ve partikül ilavesinin yorulma ömrünü arttırırken elektrik dirençte düşüşe neden olduğunu tespit etmişlerdir (Mactabi, Rosca, & Hoa, 2013).

Sydlik ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş CNT'ler epoksi reçine içerisine ilave edilerek tek taraflı bindirme bağlantısında yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle saf epoksi reçine kullanılmış sonrasında ağırlıkça %0.5-10 oranında fonksiyonelleştirilmiş olan ve olmayan CNT ilaveli iki farklı reçine kullanılmıştır. Ağırlıkça %1 oranında fonksiyonelleştirilmiş CNT ile takviyelendirilmiş olan epoksinin ağırlıkça %1 oranında fonksiyonelleştirilmemiş CNT ile takviyelendirilmiş epoksi reçineden %27 daha fazla, saf epoksi reçineden ise %36 daha fazla kayma mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca epoksi reçinenin çekme mukavemeti çalışmada incelenmiş olup ağırlıkça %1 oranında fonksiyonelleştirilmiş CNT ilavesinin saf epoksi reçinenin çekme mukavemetine %50 oranında bir artış sağladığı görülmüştür (Sydlik, Lee, Walish, Thomas, & Swager, 2013).

Tang ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada DGEBA yapıştırıcılarında kullanılan nano takviyelerin kopma uzaması, termal kararlılıkları araştırılmıştır. Çalışmada yapıştırmada kullanılmak üzere epoksi matris içerisine yapılan nano ilavelerin en iyi dispersiyonun ultrasonik ve mekanik karıştırmanın birlikte uygulandığı teknik olduğu sonucuna varılmıştır (Tang et al., 2013).

Molazemhosseini ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada nano SiO<sub>2</sub> ile yüzey modifiyesi yapılmış ve kısa karbon fiberle güçlendirilmiş poli-eter-eter-eton (PEEK) hibrit kompozitlerin aşınma performansı test edilmiştir. Çalışmada yapılan deneylerde nano SiO<sub>2</sub> partikülün çok iyi derecede sürtünme katsayısını düşürdüğü ve nanopartikül miktarının artırılması sürtünme katsayısının bütün durumlarda düştüğü görülmüştür (Molazemhosseini, Tourani, Khavandi, & Eftekhari Yekta, 2013).

Mansourian-Tabaei ve ark. (2014) çalışmalarında CNT, nano  $Al_2O_3$  ve nano  $SiO_2$  ilaveli epoksi reçineli yapıştırıcılar geliştirmişlerdir (Mansourian-Tabaei, Jafari, & Khonakdar, 2014).

Wernik ve Meguid (2014) CNT takviyeli epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada nanopartiküllerin uygun dağıtılması, yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanması, yapıştırıcı kalınlığının kontrolü ve kürleştirme koşulları hakkında bilgiler sunulmuştur. Ayrıca yapıştırmanın ve yapıştırıcının özelliklerini tayin etmede kullanılan dogbone (bulk / kütleli yapıştırıcı) çekme testi, yapıştırma kayma testi, çift bindirmeli yapıştırma bağlantısı ve çift konsol giriş kırılma tokluğu testleri çalışmada açıklanmıştır (Wernik & Meguid, 2014).

Ekrem ve ark. (2016) nano yapıştırıcıların elektriksel ve mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmada, Ag nanopartikül ve CNT kullanmışlardır. Epoksi reçine içerisine CNT ilave edildiğinde termal kararlılığın arttığını ancak Ag nanopartikülü ilave edildiğinde ise termal kararlılığı düşürdüğü tespit edilmiştir. Çalışmada yine kayma dayanımını partikül ilavesinin artırdığı tespit edilmiştir (Ekrem, Ataberk, Avcı, & Akdemir, 2016).

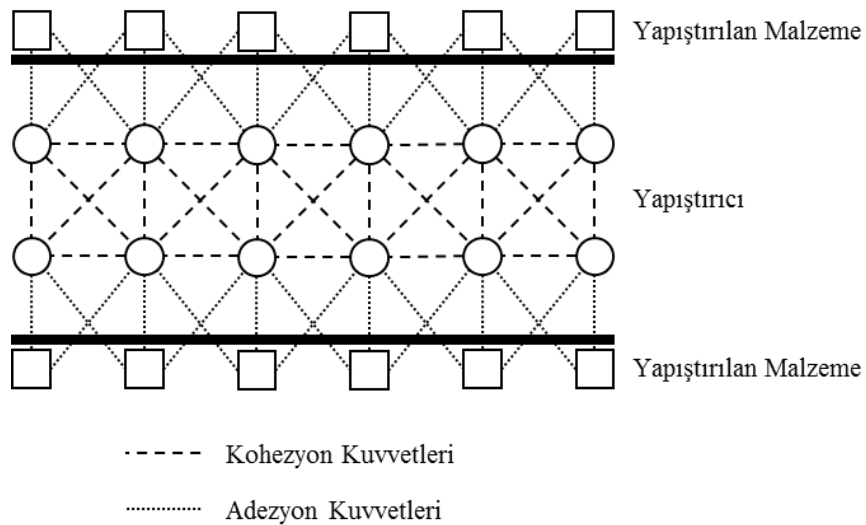
Demirci ve ark. (2017) kompozit malzemelerin reçinelerini  $SiO_2$  nanopartikül ile modifiye ederek deneylere tabi tutmuşlardır. Ağırlıkça %4  $SiO_2$  nanopartikül ilavesi ile halka çekme dayanımını yaklaşık %30 oranında artış elde etmişlerdir ve kırılma tokluğunun da %43-50 arttığını ifade etmişlerdir (Demirci, Tarakçıoğlu, Avcı, Akdemir, & Demirci, 2017).

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Yapışma

Yapışma terimi, maddeler arasındaki çekim gücünü ifade etmek için kullanılmaktadır (A. J. Kinloch, 1987). Yapışma terimi; yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme, yapıştırılan malzeme yüzey hazırlığı ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen ara fazı ifade etmektedir. Yapışma bağlantılarının fiziksel ve kimyasal dayanıklılığını değerlendirmek için; bu bileşenlerin dış yüklerle, mekanik ya da çevresel faktörlere karşı nasıl tepki vereceğinin iyi anlaşılması gerekir. Yapıştırma bağlantılarının performansı ve dayanıklılığı; bunların dışında malzeme ve yapıştırıcı özelliklerine, malzeme ve yapıştırıcı arasındaki fiziksel-kimyasal iç etkileşime, bağlantı şartlarına, bağlantı geometrisine, bağlantıdaki artık gerilmelere ve yapıştırma hattındaki kusurlara bağlıdır. İyi bir yapışma sağlayacak yapıştırıcı-malzeme kombinasyonu için yukarıdaki faktörlerin hesaba katılması gerekir (Parvatareddy, 1997).

Bağlantının mukavemeti iki ana olaya bağlıdır. Birincisi, yapıştırıcı maddenin molekülleriyle birbirine bağlanan parçaların yüzeyleri arasında meydana gelen ve fiziksel ve kimyasal bir nitelik taşıyan “adezyon” olayıdır. İkincisi ise yapıştırıcının iç mukavemetini tayin eden yapıştırıcı moleküllerinin kendi aralarındaki bağ kuvvetini anlamına gelen “kohezyon” olayıdır (Şekil 3.1.) (Rende, 2001).



Şekil 3.1. Yapışma bağlantılarında adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin temsili

İyi bir yapışma; uygun yapıştırıcının seçilmesi, iyi bir birleştirme tekniğinin belirlenmesi, yapıştırılacak yüzeyin temizliği, yapıştırılan yüzeylerin ıslanabilirliği ve uygun yapıştırıcının katılma ve kürleşme sürecine bağlıdır (R.-M. Wang, Zheng, & Zheng, 2011).

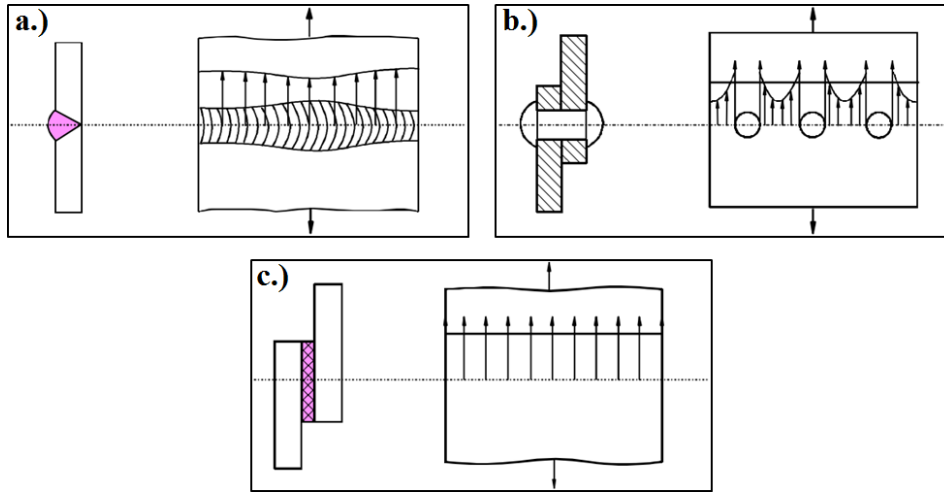
### 3.1.1. Yapışma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları

Yapışma sistemlerinin avantaj ve dezavantajları bilim adamlarının ilgisini çeken bir konu olmuştur ve bu konu ile ilgili olarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapışma bağlantılarına ait önemli avantaj ve dezavantajlar aşağıda ifade edilmiştir (Ebnesajjad, 2011).

#### Avantajlar:

- Herhangi bir şekle sahip ince ve kalın malzemeleri birleştirilebilir.
- Tüm yapışma alanı boyunca daha düzenli gerilme dağılımı elde edilebilir (Şekil 3.2.).
- Daha büyük yük taşıma alanı temin edilebilir (Petrie, 2000; Sharpe & Schonhorn, 1963).
- Aynı veya farklı malzemeler birleştirilebilir.
- Farklı malzemeler arasındaki elektrokimyasal (galvanik) korozyonu engeller veya en aza indirir.
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımına sahiptir.
- Yapıştırılan malzemelerin özellikleri bozulmaz.
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir.
- Isı transferi ve elektrik iletimine karşı yalıtıcıdır (bazı durumlarda yapıştırıcılar iletkenlik sağlamak için dizayn edilir).
- Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranına sahiptir.
- Maliyet yönünden etkili ve uygun bir tekniktir.
- Mekanik bağlama işlemi daha ucuz ve/veya daha hızlıdır.
- Daha pürüzsüz aerodinamik yüzeyler elde edilir.
- Ağırlığı azaltır.
- Yüksek darbe ve titreşim sönümleme kabiliyetine sahiptir.





**Şekil 3.2.** Birleştirme bağlantılarındaki gerilim dağılımları a.) kaynaklı b.) cıvatalı c.) yapıştırma (Dorn, 1994)

#### Dezavantajlar:

- Yapışma, yapıştırma alanını görsel olarak incelenmesine izin vermez (yapıştırılan malzeme şeffaf olmadıkça) (DeLollis, 1970).
- Dikkatli yüzey hazırlama, genellikle korozif kimyasallarına karşı yapıştırma dayanımı elde etmek için gereklidir.
- Uzun kürleşme süreleri gerekli olabilir, özellikle yüksek kürleşme sıcaklıklarında kullanılmazlar.
- Üst kullanma sıcaklıkları genellikle yaklaşık olarak 1770 °C ile sınırlıdır. Ama özel yapıştırıcılar 3710 °C' ye kadar sınırlı kullanım için uygundur fakat genellikle bu yapıştırıcılar daha pahalıdır.
- Yapıştırıcı bağlantıların kullanım ömrü maruz kaldığı çevreye bağlıdır.
- Yapıştırıcı çözücüsü veya temizlenmesinde kullanılan çözücülere maruz kalmak sağlık sorunlarına neden olabilir.
- Düşük soyulma dayanımı ve darbe dayanımı mevcuttur.

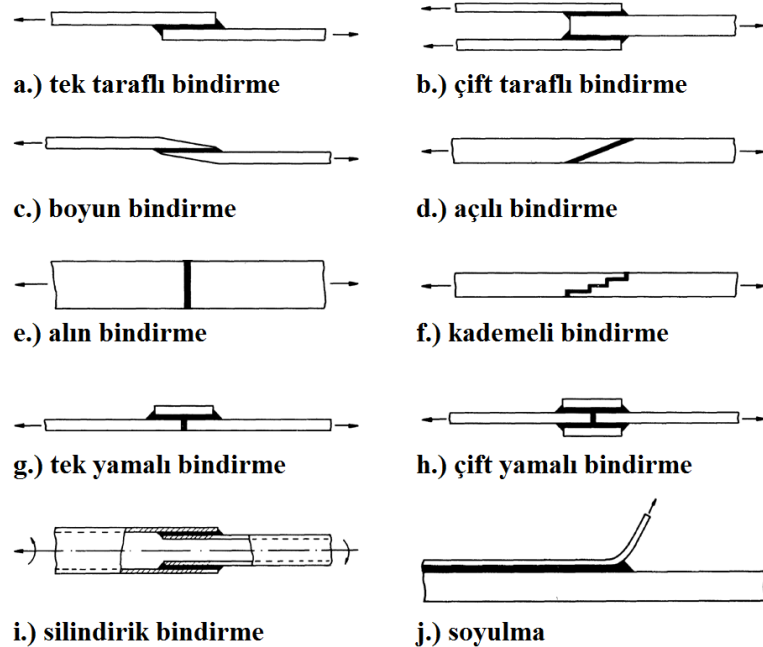
### **3.1.2. Yapışma bağlantıları ve yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler**

Yapısal mühendislik tasarımın temeli uygulamada karşılaşılabilecek olan muhtemel gerilmeleri tahmin edebilmektir. Yükleme sistemi genellikle fonksiyon tarafından öngörülür. Fakat bir mühendisin becerisi en iyi malzemeleri ve tasarım tekniklerini kullanarak uygun ve etkin bir maliyet ile çözüme ulaşmaktır. Mühendislerin pratik uygulamaları bir çok becerilerini geliştirmiş olsa da ortaya çıkan yeni ve zorlayıcı

ortamlar ile birlikte gelen teknolojik ilerlemeler modern mühendislikte yapısal yüklerin ve gerilimlerin ölçülebilmesi ihtiyacını doğurmuştur (Adams & Wake, 1984).

Yapıştırma bağlantılarında bağlantı şekli özel olarak belirlenmelidir. Bağlantı üzerine gelecek yükler göz önüne alınarak bağlantı biçimi belirlenmelidir. Ayrıca kürleme sırasında bağlantıyı bir arada tutacak olan sıkıştırma araçları da bağlantı için düşünülmelidir Genel olarak yapışma bağlantılarında birleştirme yapısı belirlenirken çalışma koşullarında sistemin taşıyacağı tüm kuvvetlerin yükleri ve yönleri belirlenmelidir. Buna ek olarak yapıştırma bağlantısının uygulanma kolaylığı da seçim kriteri içerisinde yer almalıdır. Bu durumda yapıştırıcının malzeme türüne bağlı olmaktadır (Shields, 1984).

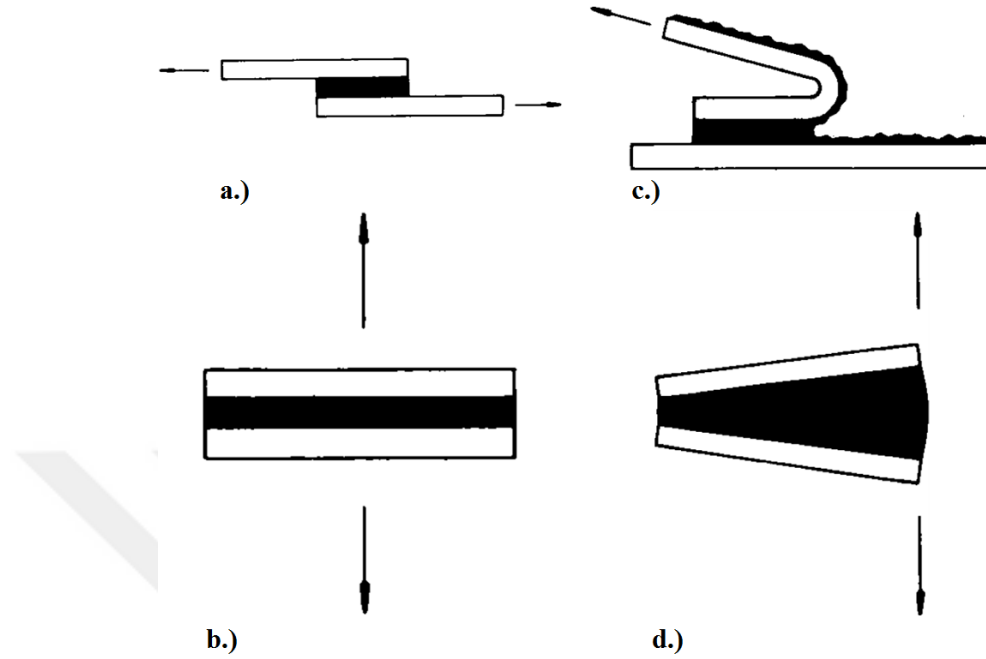
Yapıştırma bağlantıların doğru tasarım parametreleri ile tasarlandığı durumlarda geleneksel birleştirme yöntemlerine göre daha emniyetli birleştirmelerin gerçekleştirilebileceği bilinmektedir. Özellikle cıvata, perçin vb. gibi metotlarla sağlıklı birleştirmelerin sağlanamayacağı alanlarda büyük öneme sahiptir. Şekil 3.3.' de yapıştırma birleştirme şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Bazı yaygın yapıştırma bağlantı tipleri (Adams & Wake, 1984)

Yapıştırma bağlantılarında dört önemli gerilme etkili olur (Şekil 3.4.). Bunlar; a.) kesme (shear), b.) çekme (tensile), c.) soyulma (peel) ve d.) çekme-makaslama

(cleavage)' dir. Bağlantı mukavemetinden en yüksek verim elde etmek için bu gerilme çeşitleri göz önünde bulundurulmalıdır (Adin, 2007).



Şekil 3.4. Yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler a.) kayma b.) çekme c.) soyulma d.) çekme-makaslama

a.) Kesme gerilmesi

Kesme gerilmesi yapışma alan boyunca düzgün etki etmektedir. Kesme gerilemesinin yapışmanın tüm yüzey alanına etki etmesi bağlantının ömrünü artırarak ekonomik fayda sağlamaktadır. Yapıştırma bağlantılarının tasarlanmasında yükün büyük bir kısmının kesme yükü olarak iletilebileceği sistemler oluşturmalıdır (Adin, 2007).

b.) Çekme gerilmesi

Çekme gerilmesi durumunda yapıştırıcı tabakasına dik kuvvetler etki etmektedir. Yapıştırıcıya dik gelen bu kuvvetler gerilmenin yapışma alanında eşit şekilde dağılımını sağlamaktadır. Ancak bağlantının sadece bu tür bir yüklemeye maruz kaldığından emin olmak mümkün değildir. Eğer eksenden kaçık olarak etkileyen kuvvetler ortaya çıkarsa bu durumda gerilmenin eşit dağılımı oluşmayacaktır. Bu durumda bağlantının hasar görme ihtimalini kuvvetlendirecektir. Bu tür bağlantılarda bir diğer önemli faktör

yapıştırılan malzemenin kalın olması gerektiğidir. Eğer yapıştırılan malzeme yeterince kalınlıkta olmazsa maruz kaldığı yükün etkisi ile eğilmelerin oluşma ihtimali ortaya çıkacak ve gerilim dağılımında eşitlik sağlanamayacaktır (Petrie, 2000).

#### c.) Soyulma gerilmesi

Soyulma gerilmelerinin oluşumu esnek elemanların varlığına bağlıdır. Yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı ve/veya yapıştırılan malzeme esnek olduğunda bu tür gerilmeler gözlenebilir. Soyulma yüklemesi bağlantı sınırlarında yüksek gerilme yığılmaları oluşturmaktadır. Bu durumda bağlantının dayanımını olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz dayanım durumunun göz ardı edilebilmesi sadece çok geniş bağlantılar veya düşük yük değerlerinde mümkün olabilir. Aksi takdirde yapıştırma bağlantısının erken hasarlanması kuvvetli bir ihtimaldir. Soyulma gerilmelerinden mümkün oldukça kaçınılmalıdır (Ekrem, 2014).

#### d.) Çekme-makaslama Gerilmesi

Çekme-makaslama tipindeki yüklemeler genellikle eksende kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tür yüklemelerde yapışma alanında eşit olmayan gerilmeler oluşmaktadır ve bağlantının bir tarafında gerilim yığılmaları meydana gelmektedir. Gerilim yığılmalarının karşılanabilmesi için büyük yapışma alanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çekme-makaslama gerilmeleri çekme ve kesme gerilmelerine göre daha fazla yapışma alanına ihtiyaç duyduğu için bağlantı tasarımında maliyet gerekçesi ile tavsiye edilmemektedir (Adin, 2007; Akpınar, 2008; Ekrem, 2014).

### **3.1.3. Yapışma teorileri**

Yapışma (adezyon) mekanizmasını açıklamak amacıyla tarihsel süreç içerisinde mekanik kenetlenme, elektrostatik, difüzyon ve adsorpsiyon/yüzey reaksiyon gibi teoriler ortaya çıkmıştır. Günümüzde yapışma mekanizması için yeni teorilerde öne sürülmüştür. Yapışma mekanizmasının tek bir teori ile tamamen açıklanması oldukça zordur. Bu sebeple yapışma mekanizmasını açıklamak için farklı teorilerin kombinasyonunun kullanılması gerekir. Her bir teoride ortaya konulan mekanizmanın

kapsamı farklı yapıştırıcı sistemleri için farklılık gösterebilir. İleri sürülen yapışma teorileri farklı boyutsal ölçeklerde sunulmuştur. Teoriler ele alınırken yapıştırıcı ve yapıştırılan arasındaki etkileşim irdelenmelidir. Çizelge 3.1.'de bu mekanizmalar ve eylemsel ölçekleri gösterilmektedir. Ancak, yapıştırıcı–yapıştırılan etkileşiminin her zaman moleküler düzeyde gerçekleştiği unutulmamalıdır (Ebnesajjad, 2011).

**Çizelge 3.1.** Geleneksel ve güncel yapışma teorileri (Ebnesajjad, 2011)

Geleneksel teoriler	Güncel teoriler	Eylem ölçekleri
Mekanik kenetlenme	Mekanik kenetlenme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Adsorpsiyon	Islanabilirlik	Moleküler
	Kimyasal yapışma	Atomik
	Zayıf sınır tabaka	Moleküler

Mekanik kenetlenme teorisinde dikkat edilmesi gereken mikroskobik parametre, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin temas yüzeyidir. Yapıştırılan malzemenin spesifik yüzey alanı (birim ağırlık başına yüzey alanı) mekanik kenetlenme teorisi için bir ölçü olarak kabul edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü, mekanik kenetlenmeyi sağlayıcı olarak düşünülmektedir. Elektrostatik mekanizma ise yüzey yükü ile ilgilenen makroskobik bir teoridir. Difüzyon ve islanabilirlik teorileri sırasıyla moleküler ve atomik ölçekteki etkileşimi ifade etmektedir (Ebnesajjad, 2011).

### 3.1.3.1. Mekanik kenetlenme teorisi

Bu teoriye göre yapışma, yapıştırıcının yapıştırılan malzemenin yüzeyindeki gözeneklere, boşluklara ve diğer yüzey düzensizliklerine nüfuz etmesiyle oluşur. Yapıştırıcı ara yüzeyde yer alan havanın yerini alır. Böylece iki malzemenin yüzey pürüzlülüğüne nüfuz eden bir yapıştırıcı malzeme ile yapıştırma gerçekleştirilebilir. Yapıştırıcının bağlanma gücüne olumlu bir katkı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki "mekanik kenetlenme" ile yapılmaktadır. Yapıştırılan malzeme yüzeyini pürüzsüzleştirmekten ziyade çok gözenekli yapılar oluşturmak daha güçlü yapışma bağlantılarını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, bu teori her zaman kabul edilebilir bir teori değildir. Çünkü pürüzsüz yüzeyler arasında iyi yapışma bağlantılarının olduğu durumlarda söz konusudur (DeMejo, Rimai, & Sharpe, 1999).

Yapıştırılan malzeme yüzeyinin aşındırılması sonrası elde edilen yüksek yapışma bağlantısının mekanik kenetlenme, temiz yüzey, reaktif yüzey oluşumu ve artan temas yüzeyinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir (McBain & Hopkins, 1924). Yapıştırılan malzeme yüzeyindeki fiziksel ve kimyasal özellik değişikliklerinin yapışma mukavemetinde artışa neden olduğu inanılan bir görüştür (Petrie, 2002). Mekanik kenetlenmenin güçlü yapışma bağı oluşturup oluşturmadığı veya yapıştırılan malzeme temas yüzeyindeki artışın diğer mekanizmaları geliştirilip geliştirmediği tartışılabilir. Ancak, artan yüzey temas alanının iyi ıslanması ve geniş bir kimyasal bağlanma oluşturması beklenir (Ebnesajjad, 2011; Jennings, 1972).

Literatürde, yüzey pürüzlülük değerlerin artışı yapışma bağ kararlılığı ve mukavemetinin arttığını gösteren veriler (Israelachvili & Tabor, 1972; Tabor & Winterton, 1969) bulunmakta iken artan yüzey pürüzlülüğü ile yapışma bağ mukavemetinin düştüğünü gösteren veriler de bulunmaktadır (Allen, 1993). Ancak, endüstriyel yüzey hazırlama yöntemleri ile pürüzlendirilmiş yüzeylerde kaviteasyon oyuklarına benzer yapılar oluşmaktadır. Bu kaviteasyon oyukları benzeri yapılarda mekanik kilitlemenin ana yapışma mekanizması olmasını sağlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının anotlanması ve dağlanması durumunda, derin gözenekli bir topografya üretilmektedir ve bu durumda yapıştırıcı oluşan gözeneklerin dibine nüfuz ederek bileşik bir ara yüzey bölgesi oluşturmaktadır. Bu oluşan bileşik bölge, yapıştırıcı ile oluşturulan oksit arasında belirli bir mukavemete sahip olacaktır ve bu da yapışma bağlantısının dayanımını ve tokluğunu artırmaktadır. Ancak bu durum oluşturulan oksitlerin gevrek olmadığı durumlar için söz konusudur (A. J. Kinloch, 1987).

### **3.1.3.2. Elektrostatik teori**

Bu teori, yapışmanın yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki elektrostatik etkiler nedeniyle gerçekleştiğini ifade etmektedir (Derjaguin, Muller, & Toporov, 1975; Possart, 1988). Burada elektronik bant teorisinin aksine yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında elektron transferinin gerçekleşmesi öngörülür. Böylece, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin ara yüzeyinde elektrostatik kuvvetler oluşmaktadır. Bu kuvvetler, ayrılma eğilimine karşı bir direncin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu teori, yapıştırıcının yapıştırılan malzeme yüzeyinden soyulduğunda ortaya çıkan elektrik deşarj gerçeğini desteklemektedir (Ebnesajjad, 2011; Petrie, 2002).

Elektrostatik teori, özellikle polimer-metal yapışma bağları için kabul edilebilirdir. Bu teorinin metalik olmayan sistemlerdeki yapışmaya katkısı hesaplanmış ve kimyasal bağlanmaya kıyasla küçük olduğu bulunmuştur (Ebnesajjad, 2011; Parker & Attard, 1992).

### 3.1.3.3. Difüzyon teorisi

Bu teori, yapışmanın yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında moleküler difüzyonu yoluyla gerçekleştiğini ifade etmektedir. Difüzyon teorisi, öncelikle hem yapıştırıcının hem de yapıştırılan malzemenin uzun hareket edebilen moleküler yapısı olması durumunda söz konusu olmaktadır (Voyutskii, 1963). Malzemelerin yapısı ve yapışma koşulları difüzyonun oluşup oluşmadığını ve ne derece etkileyeceğini belirleyen durumlardır. Dağılan ara yüzey (ara faz) tabakası tipik olarak 1-100 nm aralığında bir kalınlık değerine sahiptir. Termoplastiklerin solvent ile birleştirilmesi veya ısı kaynağı moleküler difüzyona örnek olarak gösterilebilir (Petrie, 2002).

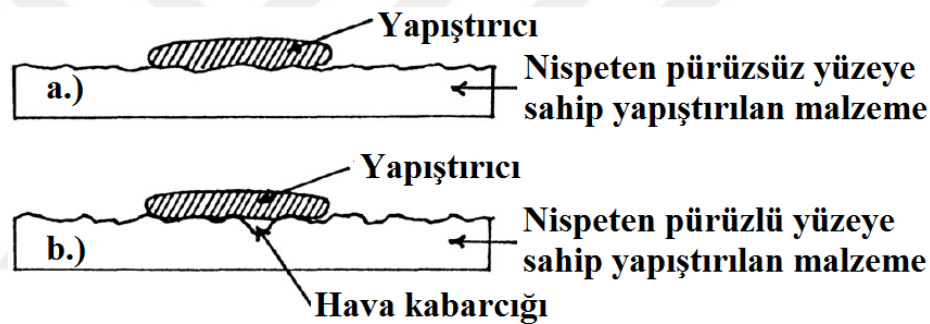
### 3.1.3.4. Islanabilirlik teorisi

Islanabilirlik teorisine göre, iki malzeme arasındaki moleküler temastan ortaya çıkan yüzey kuvvetlerinden kaynaklandığını ifade etmektedir (Green, Davies, Roberts, & Tendler, 1999; A. J. Kinloch, 1987). Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında ara yüzey kuvvetlerinin geliştirilmesi yapışmanın oluşumundaki ilk adımdır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki sürekli temas kurulumu işlemi ıslatma olarak isimlendirilir. Bir yapıştırıcının bir katı yüzeyini ıslatması için, yapıştırıcının yüzey geriliminin yapıştırılan malzemenin yüzey geriliminden daha düşük olması gerekir. Bu durum plastiklerin yüzey hazırlığının nedenidir ve böylece yüzey enerjisi ve polaritesi artırılabilir (Ebnesajjad, 2011).

Şekil 3.5.'de bir yüzeye yayılmış yapıştırıcının tam ve eksik ıslatma durumları gösterilmektedir. Yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme yüzeyinde yer alan çatlaklara ve vadilere aktığında iyi bir ıslatma gerçekleşir. Ancak yapıştırıcı, vadiler üzerinde köprü oluşturur ise zayıf ıslanma meydana gelir. Bu durumda, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki asıl temas alanı azalır ve düşük mukavemete neden olur (Petrie,

2002). Özetle, eksik ıslatma ara yüzey kusurlarını oluşturarak yapıştırıcının bağ mukavemetini azaltır. Tam ıslatma durumunda ise yüksek bağ mukavemeti elde edilir.

Metal malzemelerin yapıştırılmasında çoğu organik yapıştırıcı iyi ıslatma özellikleri gösterir. Öte yandan, katı organik yapıştırılan malzemelerin çoğunun yüzey gerilimi yaygın yapıştırıcıların yüzey geriliminden düşüktür. İyi ıslanma, yapıştırılan malzemenin yüzey geriliminin yapıştırıcı malzemenin yüzey geriliminden daha yüksek olmasını gerektirir. Bu durumda organik yapıştırıcıların metaller ile neden iyi yapıştığını ancak polietilenler ve polipropilenler gibi yüzey ön hazırlığı yapılmamış malzemelerin neden kötü yapıştığını açıklar (Petrie, 2002). Ancak plastik yüzeylerin yüzey enerjisi, ıslanmaya izin vermek için çeşitli işleme teknikleriyle yükseltilebilir (Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2006).



Şekil 3.5. Yapıştırıcının yüzeye a.) iyi ve b.) kötü yayılmış örnekleri (Petrie, 2002)

### 3.1.3.5. Kimyasal yapışma teorisi

Bu teori, yapışma bağının oluşumunu yüzey kimyasal kuvvetleri ile ilişkilendirir. Teoriye göre, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arası oluşan hidrojen, kovalent ve iyonik bağ kuvvetleri ayrılma kuvvetlerinden daha güçlüdür. Tablo 3.2.'de bu kuvvetlerin örnekleri ve büyüklükleri gösterilmektedir. Genel olarak, kimyasal yapışma esnasında ortaya çıkan dört etkileşim türü vardır. Bu etkileşimler, kovalent bağlar, hidrojen bağları, Lifshitz-van der Waals kuvvetleri ve asit baz etkileşimleri olarak kabul edilir (Ebnesajjad, 2011).

Kovalent ve iyonik bağlar, ikincil kuvvetlerden daha yüksek yapışma değerleri sağlayan kimyasal bağlara örnektir. İkincil değerlik bağları, hidrojen bağlarıyla örneklenen zayıf fiziksel kuvvetlere dayanmaktadır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan



malzemeyi bir arada tutan etkileşimler, diğer teori mekanizmalarından da katkılar alabilir (Ebnesajjad, 2011).

**Çizelge 3.2.** Lifshitz-van der Waals etkileşimlerinin ve kimyasal bağların enerji örnekleri (Ebnesajjad, 2011)

Tür	Örnek	E (kJ/mol)
Kovalent	C – C	350
İyon – iyon	Na <sup>+</sup> ... Cl <sup>-</sup>	450
İyon – dipol	Na <sup>+</sup> ... CF <sub>3</sub> H	33
Dipol – dipol	CF <sub>3</sub> H ... CF <sub>3</sub> H	2
Londra dağılım	CF <sub>4</sub> ... CF <sub>4</sub>	2
Hidrojen yapışma	H <sub>2</sub> O ... H <sub>2</sub> O	24

Moleküller arası etkileşimlerin tanımları aşağıda verilmiştir (Ebnesajjad, 2011).

- Dipol (polar molekül): Çakışmayan pozitif yük merkezi ve negatif yük merkezi tarafından yük dağılımını temsil edebilen moleküldür.
- Dipol – dipol kuvvetleri: Bir molekülün pozitif ucunun bir başka molekülün negatif ucuna yakın olacak şekilde polar moleküllerin kendilerini hizalama eğiliminden kaynaklanan molekül içi kuvvettir.
- Hidrojen yapışma: Küçük, oldukça elektronegatif bir atoma (en yaygın olarak F, O, N veya S) yapışan bir hidrojen atomu başka bir molekülün yalnız elektron çiftlerine çekildiğinde oluşan asal özellikli dipol – dipol etkileşim türüdür.
- Londra dağılım kuvvetleri (dağılım kuvvetleri): Çekirdekler etrafındaki hareketleri sırasında elektronların değişen pozisyonları nedeniyle oluşan küçük, anlık dipollerden (indüklenmiş dipollerden) kaynaklı molekül içi kuvvetlerdir.
- Polarizlenebilirlik, bir atomun veya molekülün elektron bulutunun çarpıtılma kolaylığı olarak ifade edilebilir. Genel olarak polarizlenebilirlik, bir atomun boyutu ve bir atomdaki elektron sayısı ile artar. Londra dağılım kuvvetlerinin önemi, atom boyutu ve elektron sayısı ile birlikte artmaktadır.

Kovalent kimyasal bağlar ara yüz boyunca oluşabilirler ve çapraz bağlı yapıştırıcılarda ve termoset kaplamalarda ortaya çıkması muhtemel bağlardır. Bu tür bağlar genellikle en güçlü ve dayanıklı bağ türüdür. Bununla birlikte, karşılıklı tepki veren kimyasal grupların varlığını gerektirir. Önceden kaplanmış ahşap, kompozit ve bazı plastiklerin yüzeyleri uygun koşullar altında yapıştırıcı malzeme ile kimyasal bağlar üretebilen çeşitli işlevsel gruplar içerir. Korona ve alev yüzey ön işleme gibi

tekniklerle plastiğin yüzey hazırlığı yapmak kasıtlı olarak bu uygun koşulları üretmenin yollarındandır (Ebnesajjad, 2011).

Kimyasal bağ, bir epoksi kaplama ile bir selüloz ara yüzü bir ana malzeme arasındaki güçlü yapışmayı açıklar. Bir epoksi reçinesinin epoksi grupları, ara yüzdeki selüloz hidroksil gruplarıyla reaksiyona girer (Ebnesajjad, 2011).

### 3.1.3.6. Zayıf sınır tabaka teorisi

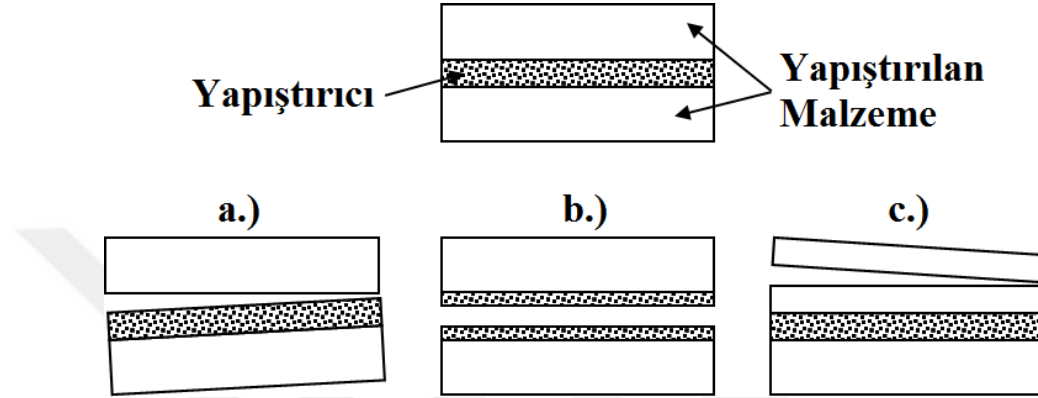
Bu teori, zayıf sınır tabakasının ara yüzdeki bağ kopukluğuna neden olduğunu ifade etmektedir. Zayıf sınır tabakaları, yapıştırıcı, yapıştırılan, çevre veya bu faktörlerin kombinasyonundan meydana gelebilir (Bikerman, 1967).

Eğer yabancı bir madde yapışma yüzeyinin yakınında yoğunlaşırsa ve alt tabakaya zayıf bir bağ oluşturursa yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme alanında zayıf sınır tabakaları meydana gelebilir. Kırılma gerçekleştiğinde başarısız olan zayıf sınır tabakasıdır. Ancak kırılma yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gibi gözükmemektedir (Ebnesajjad, 2011).

Polietilen ve metal oksitler zayıf sınır tabaka içerebilecek malzemelere örnektir. Polietilenin zayıf, düşük molekül ağırlıklı bir bileşene sahiptir. Bu bileşen polimer boyunca eşit olarak dağılır. Bu zayıf sınır tabakası ara yüzeyde yer alır. Polietilen yapıştırıcı veya yapıştırılan malzeme olarak kullanıldığında düşük gerilmede kırılmaya neden olur. Bazı metal oksitler zayıf metallerine bağlanırlar. Bu malzemelerle yapılan yapışma bağlantılarının kırılması koheziv olarak oksit içinde gerçekleşir. Alüminyum oksit gibi belirli oksitler çok güçlüdür ve yapışma mukavemetini önemli ölçüde bozmamaktadır. Zayıf sınır tabakalarının giderilmesi yüzey işlemleri ile sağlanabilir. Zayıf sınır tabakalarının oluşumu genellikle yapışma ortamındaki havadan kaynaklanmaktadır. Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi ara yüzeyde zayıf sınır tabakası (hava) sıkışır ise yapıştırıcı alt tabakayı ıslatamaz ve bu durumda yapışma mukavemetinin azalmasına neden olur (Mittal & Lee, 1997; Petrie, 2002).

### 3.1.4. Yapışma bağlantılarındaki hasar mekanizmaları

Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Yapışma bağlantılarında genel olarak üç tip hasar oluşumu görülmektedir. Bu hasarlar yapısal, adezyon ve kohezyon hasarları olarak sınıflandırılabilir.

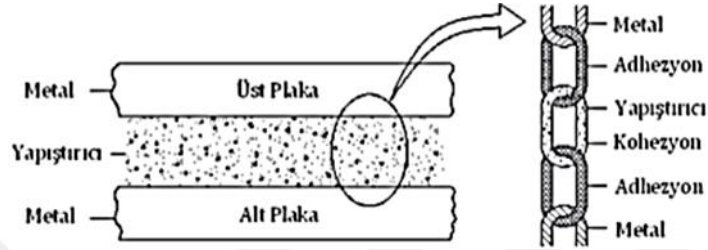


Şekil 3.6. Yapışma bağlantılarında hasar modeli a. adezyon hasarı b. kohezyon hasarı c. yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı

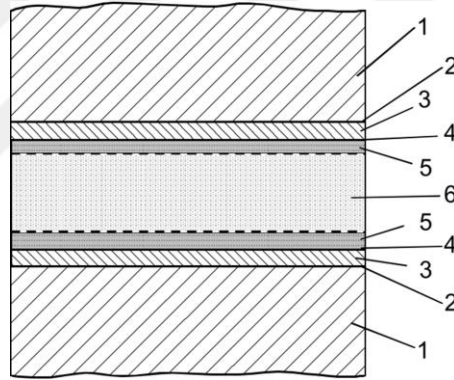
Yapışma bağlantılarında adezyon veya kohezyon hataları olabilir. Adezyon hasarı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın olduğu kopma olayıdır. Çünkü yapışmanın en zayıf olduğu noktalar bu temas yüzeyidir. Eğer yapıştırıcı, mekanik olarak zımparalanmış yüzeylere tam olarak ıslatmazsa, moleküllerin çekim gücü azalır. Islatmanın gerçekleşebilmesi yapıştırıcının nüfuz etmesi ve yapıştırılacak olan yüzeyleri ıslatabilmesi ile mümkündür. Bu nedenle ıslatmanın sağlanabilmesi için yapıştırma önce yüzeyin uygun bir yöntem ile hazırlanması gerekir (Ekrem, 2014)

Kohezyon hasarı, bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın olduğu kopma şeklidir. Moleküler arası çekim ve polimer moleküllerin kendi arasında kenetlenmesi kohezyon kuvvetlerine etki eder. Kopma işlemi sonucunda artık yapıştırıcı genellikle her iki yüzeyde de bulunur (Ekrem, 2014). Yapıştırılan malzeme yapıştırıcıdan önce koptuğu zaman, yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı olarak bilinir. Yapıştırılan malzemenin kendi atomları arasında meydana gelebilecek hasar şeklidir. Yapıştırıcının atomları arasındaki bağ

kuvvetinin malzemenin atomları arasındaki bağ kuvvetlerinden daha büyük olduğu zaman ortaya çıkar. Yapıştırıcının veya yapıştırılan malzemelerin içindeki kohezyon hasar mekanizmasının ideal tipidir. Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen adezyon ve kohezyon modeli ile bir yapıştırıcı bağlantının yapısı Şekil 3.7. ve 3.8.' de gösterilmiştir. Genellikle yapıştırıcı ile bağlanmış bağlantılarda bu hasar tiplerinin iki veya daha çok kombinasyonları bir arada görülür (Temiz, 2003).



Şekil 3.7. Metal-metal yapışma bağlantısının zincir modelinin şematik görünüşü (Davis, 1993)



Şekil 3.8. Teorik yapıştırma sisteminde oluşan tabakalar 1. ana malzeme 2. ana malzeme alt yüzey sınırı (ana malzeme oksit tabakası gibi) 3. ana malzeme alt yüzey (oksit) tabakası 4. ana malzeme alt yüzeyi ile yapıştırıcı sınır tabakası 5. yapıştırıcı tabakanın sınırındaki ara yüzü 6. yapıştırıcının kohezyon tabakası (Dorn, 1994)

### 3.1.5. Yapışma bağlantılarını etkileyen faktörler

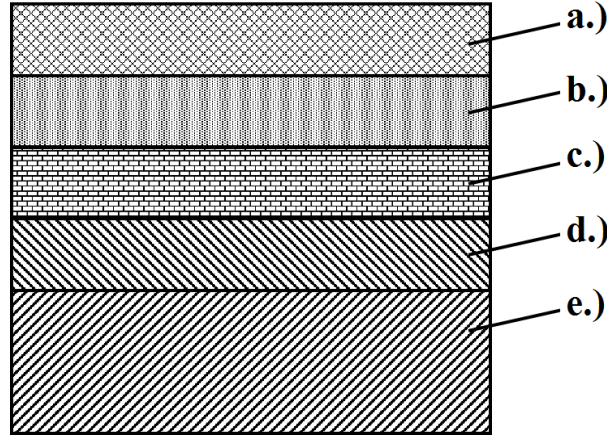
Yapışma yöntemi, ince yapıların bağlantısında çok etkin bir biçimde kullanılabilir. Yapışma ile aktarılan yük, tüm yapışma alanına dağıldığı için noktasal kuvvetler oluşmamaktadır. Bu yüzden mekanik bağlantı yerine ince yapılarda yapışma tercih edilebilir. Ancak yapışma bağlantıları birçok etkenden etkilenebilir. Yapışma bağlantıları tasarlanırken bu etkilerin göz önüne alınması gerekir. Yapışma bağlantılarında dikkat edilmesi gereken bazı önemli etkenler

aşağıda verilmektedir. Bu etkenler yapıştırıcı yapıştırılan malzeme ikilisine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

- a.) Sıcaklık
- b.) Basınç
- c.) Zaman
- d.) Katalizör
- e.) Oksijen
- f.) Çözücü
- g.) Nem ve su

### **3.1.6. Yapışma bağlantıları için yüzey hazırlama**

Yapışma bağlantılarında yüzey hazırlama yöntemleri yapışma bağlantısının performansında büyük öneme sahiptir. Yüzey hazırlığında amaçlanan yapıştırılacak malzemenin yüzey enerjisinin artırılarak yapıştırıcının yüzey enerjisinden daha yüksek bir değere ulaştırmak ve böylelikle yüzey ıslatma teorisinde bahsedildiği gibi iyi bir yapışma bağlantısı tesis etmektir. Yüzey ne kadar homojen olursa ve istenilen ıslatma bilirliliğe ulaşırsa yapışma performansı artırılabilir. Özellikle alüminyum malzemelerin yüzeyinin hazırlanmasında güçlü bir oksit tabakasının oluşturulması ile mekanik tutunma teorisinde belirtilen kilitleme mekanizması elde edilebilir. Yapışma bağlantısı yapılacak parçaya uygun yüzey hazırlama tekniğinin seçilmesi bu aşamada önem kazanmaktadır. Zayıf sınır tabaka olarak isimlendiren boya, pas ve kir kalıntıları yapışma performansını olumsuz etkilemektedir. Yapıştırıcı yapıştırılacak malzeme yüzeyleri ile temas kurabilmesi için yüzey hazırlama yöntemlerinde bu tabakanın da ortadan kaldırılması gerekmektedir.



**Şekil 3.9.** Yapıştırılan malzeme yüzeyinde oluşan tabakalar a.) kirlilikler b.) bağlı su tabakası c.) kimyasal reaksiyon (oksit) tabakası d.) soğuk haddelenmiş yüzey tabakası e.) ana malzeme

Mekanik olarak (kumlama, zımparalama), kimyasal olarak (eloksal, asitle dağlama) veya enerjik olarak (plazma, lazer) gibi yüzey işlemlerinin birçok türleri vardır. Her durumda, en uygun yüzey işlemleri, yapıştırılacak malzemenin malzemesi, şekil ve boyut, yapıştırıcı ve üretim ile ilgili diğer koşulları dikkate alınarak seçilmelidir

Etkili sulu sistemler geliştirilmesine rağmen, metal yüzeyleri örneğin trikloreten, aseton, izopropilen vb. organik bir çözücüyle buharlı yağ giderme ile temizlenir. Bu işlem, metal yüzeyi pürüzlendirilerek yapıştırıcının temas yüzey alanını artırmak için kumlama veya zımparalama gibi yöntemler takip edilir. Kimyasal dağlama metal yüzeyinden zayıf bağlı oksitler kaldırır ve yüzeye güçlü olarak bağlanmış bir oksit oluşturur. Başka yararlı bir adım yüzeyinin ıslatılabilirliğini geliştirmek ve oksidasyondan korumak için malzemenin yüzeyinde astar oluşturur (Ebnesajjad, 2011).

En çok kullanılan yüzey hazırlama metotları (Snogren, 1974);

- a.) Aşındırma
- b.) Çözücüyle silme
- c.) Buharla yağ giderme
- d.) Ultrasonik buharla yağ giderme
- e.) Dağlama (etching)

### 3.1.6.1. Aşındırma

Yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerinde etkili olan parametrelerin biriside yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğün etkisi artan yüzey alanı ile oluşmaktadır. Yüzey alanının artması ise yapıştırıcının yapıştırılan malzeme arasındaki etkileşimin yani kimyasal bağların artışına neden olur.

En yaygın kullanılan aşındırma yöntemleri kum püskürtme, zımparalama ve taşlamadır. Kum püskürtmede ince ve temiz kum kullanımı önemlidir. Yine kumlama hava basıncı, tane çeşitliliği ve tane büyüklüğü önemlidir. Bu parametrelerin seçiminde kumlama yüzeyinin sertliği de önem kazanmaktadır. Kum püskürtme, zımparalama veya taşlama gibi aşındırmada kullanılan yöntemlerdir.

Kum püskürtme yönteminde yüzey profilleri, 2.5 µm değerinin üzerinde önerilir ve sık sık 5.1 ile 6.5 µm arasında kullanılır. Sert yüzeylerde 40 ile 80 numaralı alüminyum oksit kum, genellikle 5.8 ile 7.3 kg/cm<sup>2</sup> arasında değişen basınçlarda havalı tabanca ile kullanılır. Alüminyum ve pirinç malzemelerin yapıştırılmasında genel olarak 5.8 ile 7.3 kg/cm<sup>2</sup> arasında değişen ya da altındaki hava basınçları kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik malzemelerinde maksimum hava basıncı 7.3 kg/cm<sup>2</sup> aşabilir (Ekrem, 2014).

Yaygın olarak yüzey pürüzlülüğü ölçen cihaz ile ölçülen profiller sadece profilin derinliğini gösterdiği unutulmamalıdır. Yüzey pürüzlülük cihazları ne tekdüzelik veya kumun kapsama bölgesi ne de doruklarındaki keskinliğini ölçer. Kum püskürtülmüş bütün alan düz bir açı ile bakıldığı zaman metal yüzeyinde parlaklığın eksikliğiyle gösterilir (Ekrem, 2014).

Püskürtme için seçilecek aşındırıcılar genellikle alüminyum oksit (alümina), silisyum karbür, cam bilye, silikon dioksit (kum, silika) ve kuartz gibi kumlama araçlarıdır. Genel olarak alüminyum oksit ve silikon karbid, 16 ile 240 taneli boyut aralığında ve taneleri keskin kenarlıdır. Silisyum karbür alüminyum oksitten daha fazla kırılğan son derece sert, keskin taneciklerdir. Silisyum karbür son derece sert malzemelerin kumlanmasında kullanılır ve pahalıdır (Ebnesajjad, 2011).

Zımparalama ise geniş yüzeyleri temizlemek için iyi bir yöntemdir. Literatürde zımparalamada tane büyüklüğü 100 ile 180 numaralı silisyum karbür kum zımpara kâğıdı ve yüzey pürüzlülüğünün ise 1.5 ile 2.5  $\mu\text{m}$  arasında olması önerilmektedir (L. Zhai et al., 2006). Çok parlak yüzeylerde, yapıştırıcının tutunması azaldığı için mukavemet değerleri azalmaktadır. Pürüzlülük değeri  $R_a > 5\mu\text{m}$ 'den büyük olan değerler, ıslatma ve adezyon olayı sağlanmadığından ve bağlantıdaki boşluklar oluşturacağından aynı durum söz konusudur. Bu pürüzlülüklerde oluşan hava kürleşen yapıştırıcı içinde kalabilir (Şekercioğlu & Özenç, 2012). Yüzey zımparalama izleri ise kama etkisi oluşturmak için çekme yönüne dik olarak hazırlanmalıdır. Yine zımparalama işleminde bir diğer problem de yüzeyde dalgalanma oluşturma tehlikesidir. Bu sebep ile uygulamada yüzeylerde dalga oluşumunun önlenmesi gerekir.

### 3.1.6.2. Çözücü ile silme

En çok kullanılan fakat en az başarılı olduğu düşünülen bir metottur. Yüzeyler, üzerine temiz çözücü damlatılmış bir bez veya kağıtla silinerek temizlenir. Silinen yüzeylerde çizgi oluşması bezin veya çözücünün temiz olmadığını gösterir. Temizleme işleminde kullanılan çözücüler tolüen, metil etil keton, etilen ve asetondur. Küçük parçalar için çözücü içinde ultrasonik banyoda 30 dakika çalkalama ve daha sonra fırında 800 °C' de 15 dakika kurutma silme işleminde daha etkili olacaktır (Ekrem, 2014).

### 3.1.6.3. Çözücü buharıyla yağ giderme

Buharla yağ giderme, özellikle de sıvı yağlar, gresler ve mumlar, talaşlar ve parçacık maddeler gibi metalik ve metalik olmayan parçalara yapışan çözünür kirlerin çıkarılması için bir çözücü temizlik işlemidir. Buhar yağ gidermenin temel prensibi sıcak çözücü buharları ile yüzeyleri temizlemedir. Çözücü buharının sıcaklığı kaynama noktasındadır ve yaygın olarak trikloroetilen (870 °C) veya perkloroetilen (1210 °C) çözücüler kullanılır. Trikloroetilen buharına bir dakika daldırma, metallerin yağının tam olarak temizlenmesi için yeterlidir (Snogren, 1974).



#### **3.1.6.4. Ultrasonik buharla yağ giderme**

Buhar yağ gidericiler temiz çözücü durulama tankına yerleştirilmiş ultrasonik dönüştürücüler mevcuttur. Parçalar ilk olarak ya buhar durulamaya ya da kaynamış bir çözücü içine daldırma yoluyla temizlenir. Daha sonra parçalar buhar veya spreyli buhar ile yıkanır ve ardından ultrasonik yıkama içine daldırılır. Ultrasonik yıkama sırasında hızlı çalkalama ve çukurlaşma üretilerek, duyulamayacak kadar hafif yüksek frekanslı ses dalgaları (saniyede 18000 devirden daha fazla), parçalar çözücüyle iletir. Parçacıklı malzeme, çözünmeyen maddeler ve yapıştırılacak malzemenin güçlü kirleri, hızlı bir şekilde parçaların yüzeylerden ve kör deliklerden çıkarılır. Optimum temizlik için ultrasonik frekans ve yoğunluğu test ile seçilmelidir. Çıkarılan kir, özellikle temizlenen parçanın türüne ve sistemdeki çözücüye bağlıdır. Bazı ultrasonik yağ gidericiler, değişken frekans ve güç kontrollerine sahiptirler. Ultrasonik temizleme için en yaygın frekans aralığı saniyede 20000 ile 50000 devir arasındadır (Ekrem, 2014).

#### **3.1.6.5. Dağlama ve anodizasyon**

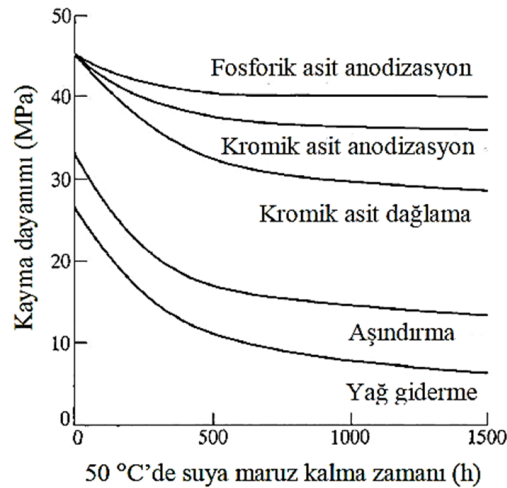
Kimyasal çözelti ile yapıştırma öncesi yüzeylerin hazırlanması en etkili yöntemdir. Yapıştırılacak malzemenin türüne bağlı olarak kullanılacak kimyasal yöntem belirlenir. Buna bağlı olarak belirlenen yöntem için yapıştırılacak malzeme asit çözelti içerisinde çeşitli proseslere maruz bırakılarak yüzeyler hazırlanır.

Yüzeylerin yapıştırma öncesi hazırlanması yapışma bağlantısının performansı için büyük önem içermektedir. Çizelge 3.3.' de çok sayıda metalik yapıştırılan malzemelerin yapıştırıcı bağlantıların dayanımına yüzey hazırlamanın etkisini göstermektedir. Yüzey hazırlama ile sağlanan yapışma performansı, kullanılan yapıştırıcı türüne bağlı olduğu kadar yapıştırılan malzeme türüne de bağlıdır.

**Çizelge 3.3.** Yapışma bağlantılarda yüzey hazırlama tekniğinin yapıştırıcıya göre etkileri (Petrie, 2000)

Malzeme	Yüzey hazırlama	Yapıştırıcı	Kayma dayanımı (MPa)
Alüminyum	Temizlenmemiş	Epoksi	3,06
Alüminyum	Buharla yağ giderme	Epoksi	5,77
Alüminyum	Aşındırma	Epoksi	12,10
Alüminyum	Asitle dağlama	Epoksi	19,00
Alüminyum	Temizlenmemiş	Vinil fenolik	16,80
Alüminyum	Yağ giderme	Vinil fenolik	19,90
Alüminyum	Asitle dağlama	Vinil fenolik	35,70
Paslanmaz çelik	Temizlenmemiş	Vinil fenolik	36,00
Paslanmaz çelik	Yağ giderme	Vinil fenolik	43,50
Paslanmaz çelik	Asitle dağlama	Vinil fenolik	49,70
Soğuk haddelenmiş çelik	Temizlenmemiş	Epoksi	20,00
Soğuk haddelenmiş çelik	Buharla yağ giderme	Epoksi	19,90
Soğuk haddelenmiş çelik	Aşındırma	Epoksi	29,60
Soğuk haddelenmiş çelik	Asitle dağlama	Epoksi	30,80

Yüzey işlemleri, yapıştırmadan önce alt-tabaka yüzeyi kontrol etmek ve korumak ve uygulama yerinde bağlantı montajı yapıldıktan sonra değişikliklerden yüzeyi korur. Bu nedenle, yüzey hazırlıkları başlangıç dayanımının yanı sıra bağlantının kalıcılığını etkiler. Şekil 3.10.' de 50 °C' de su içinde yaşlanmaya tabi tutulmuş alüminyum alaşımli epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının performansını yüzey ön işlemlerinin etkisini göstermektedir (Ekrem, 2014).

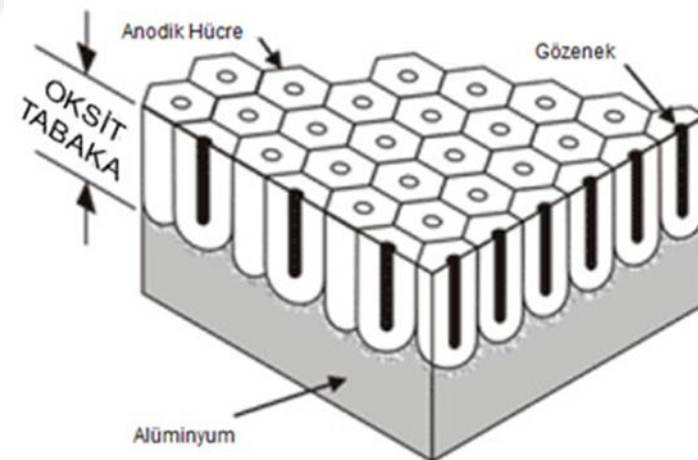


**Şekil 3.10.** 50 °C' de su içinde yaşlanmaya tabi tutulmuş alüminyum alaşımli epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının performansını yüzey ön işlemlerinin etkisini (A. J. Kinloch, 1987)

Alüminyum yüzeyler ya dağlama (etching) ya da asit solüsyon içinde anodizasyon yaparak havacılık uygulamalarında yapıştırmak için hazırlanılır. Daha az mukavemet ve dayanıklılık gereksinimleri için mekanik aşındırma yeterlidir. En yaygın

olarak kullanılan yüzey hazırlama, en iyi genel bağlanma dayanımı elde etmek için gösterilmiş olan yapıştırılacak malzemenin morfolojisinin mikro-pürüzlüğü neden olur. Dört çeşit yüzey hazırlama Forest Products Laboratory (FPL), P2 dağlama işlemleri, Fosforik Asit Anodizasyon (PAA) ve Kromik Asit Anodizasyon (CAA) tanımlanmaktadır (ASTM D2651 - 01(2016), 2016; ASTM D2674 - 72(2012), 2012; ASTM D3933 - 98(2010), 2010).

Alüminyum yüksek derecede aktif bir metal olduğundan, yüzeyi havayla temas ettiği anda ince bir oksit filmiyle kaplanır ve bu film zarar gördüğü takdirde hızla kendini yeniler. Alüminyumun kullanım alanlarının bu denli kapsamlı olmasının nedeni, aktif bir metal olmasına karşın yüzeyinde kolaylıkla oluşan bu koruyucu oksit filmidir. Bu oksit filmin önemli özelliklerinden biri metalik alüminyuma göre hacminin daha fazla olması ve koruyucu bir nitelikte olmasıdır (Sulka, Stroobants, Moshchalkov, Borghs, & Celis, 2002). Şekil 3.11.' de gözenekli anodik oksit tabakasının yapısı detaylarıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Anodik oksit yapısı (Alpay, 2009)

Alüminyum anot olarak kullanıldığında ve elektrotlar arasında gerilim uygulandığında, anotta oksijen salınımı meydana gelir. Bu durumda, serbest bırakılan oksijen anodu üzerinde kaplama oluşturur. Böylece alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) yapısı meydana gelir ve bu işleme anodizasyon denir. Diğer yüzey hazırlama yöntemlerinin aksine anodizasyon ile hazırlanmış olan alüminyumlar metalik görünümlerini devam ettirirler. Bu reaksiyon sonunda oluşan poroz oksit karakteri, elektrolit tipine, uygulanan

gerilimin şiddetine, anodizasyon banyosunun sıcaklığına, işlem süresine ve reaksiyona giren ürünlerin tipine göre farklılıklar göstermektedir (Akolkar, Landau, Kuo, & Wang, 2004).

En eski anodizasyon işlemi olarak bilinen anodizasyon yöntemi, kromik asit ile yapılan anodizasyondur. Kromik asit 0.5-18 µm kalınlığında film oluşturur. Oluşan filmler yumuşak, sünek ve opak filmlerdir. Boyanması diğer yöntemlerde olduğundan daha zordur çünkü oluşan porların çapı daha küçüktür. Yine de 30 nm çapını bulan por boyutları boyama öncesi önışlem olarak uygulanılacak seviyededir. Korozyon direnci oldukça iyidir. Ancak yumuşaklığından dolayı aşınma direnci düşüktür ve film kolayca zarar görür. Anodizasyondan sonra metal koyu gri renk alır (Comrie et al., 2005).

1940'lı yıllarda, alüminyumun yapıştırıcı bağlanması İngiltere uçak endüstrisi tarafından ortaya atılmıştır. Bu alandaki yoğun çalışmalar sonucunda, metal ve yapışan arasındaki bağlanmayı, ilk olarak organik çözücüler veya alkali çözeltilerde yağdan arındırıp ardından kromik-sülfürik asit çözeltilerinde dağlayarak sağlamak istemişlerdir ancak uygulanan bu yöntemde bazı korozyon bölgelerinde bağlanamayan alanlar gözlemlenmiştir. Kromik asit anodizasyonunu (CAA) önışlem yöntemi olarak kullanmaları ile birlikte istenilen sünek ve yapışkan oksit tabakası elde edilmiş olmasına rağmen, bu tabakada oluşan kromat maddesinin zehirli olmasından ötürü, daha farklı metotlar arama yoluna gidilmiştir. Birçok deneme sonucunda, sıcak alternatif akım anodizasyonu geliştirilmiştir (Bjørgum, Lapique, Walmsley, & Redford, 2003).

Sıcak alternatif akım anodizasyonu, yapısal yapıştırıcı bağlanmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir alüminyum önışlem yöntemidir. Sülfürik ve fosforik asit sıcak alternatif akım anodizasyonları ile, uzun vadeli yapışma özelliklerine sahip yüzeyler yaratma konusunda büyük yol alınmıştır. Bu yöntemde, yüksek sıcaklıklarda alternatif akım kullanılması, alternatif akımın katodik döngüsü sırasında yüzeyden yayılan hidrojen sayesinde etkili temizlenme sağlanır. Bu durumda, sıcak alternatif anodizasyonu öncesinde dağlama ve yağ giderme işlemlerini yapmak gerekmemektedir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, yüksek akım yoğunlukları da kullanılabilirdiğinden ötürü, önışlem süresi 20 saniyeye kadar indirilmiştir (Bernt B. Johnsen, Lapique, & Bjørgum, 2004; Lapiqueir, Bjørgum, Johnsen, & Walmsley, 2003; Proenca et al., 2008).

Düşük sıcaklıklarda anodizasyon yapıldığında yüzeyde sert ve kırılğan oksit film oluşmaktadır. Oysa ki, yüksek sıcaklıklarda daha yumuşak ve daha sünek filmler oluşturmak mümkündür. Bu sünek oksit filmleri metal malzeme ile yapışan arasında yapısal yapıştırıcı bağlanmasına büyük katkı sağlamaktadır (Lapiqueir et al., 2003).

Sıcak alternatif akım anodizasyonu sonrası sıcak doğru akım anodizasyonu uygulaması ile de alüminyuma istenilen özellikleri vermek mümkündür. Bu durumda sıcak alternatif akım anodizasyonu, sıcak doğru akım anodizasyonu öncesi yapılan sodyum hidroksit ve nitrik asit önışlemleri yerine kullandığı takdirde, uygulanan işlemin daha düşük maliyete sahip olduğunu söylemek mümkündür (Bjørgum et al., 2003).

Sülfürik asit ve fosforik asiti ayrı ayrı kullanmaktansa, aynı asit banyosuna belirli oranlarda sülfürik asit ve fosforik asit karıştırmak, daha uzun ömürlü ve daha yapışkan bir yapı elde edilmesini sağlamaktadır. Bu alanda SPAA yöntemi geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, elektrolite katılan fosforik asitin oluşacak oksit yapısında, daha büyük gözenekler görülebilmesini sağlamaktadır (Bjørgum et al., 2003).

Sülfürik asit anodizasyonu, işlem sonrası malzemeye estetik bir görüntü sağlaması, düşük maliyeti olması ve kusursuz korozyon dayanımına olanak vermesi nedeniyle alüminyum için en çok tercih edilen anodizasyon yöntemidir. Anodizasyon sonrası boyama işlemi oldukça kolay olduğundan, mimaride özellikle dekoratif renklendirmelerde kullanılmaktadır (Luksepp & Kristiansen, 2009; Saenz de Miera, Curioni, Skeldon, & Thompson, 2008; Sulka et al., 2002).

Fosforik asit yöntemi ile kıyaslandığında, sülfürik asit anodizasyonu işlemi sonrasında daha küçük porlar ve daha kalın bir kaplama oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu durum sonucunda da korozyon direnci fosforik asit anodizasyonu ile anodize edilmiş numunelerden daha yüksek ancak yapışma özelliği daha düşüktür (Alpay, 2009).

Doğru akım fosforik asit anodizasyonu ilk olarak, uçak parçalarında uygulanmak üzere, Boeing İşlemi olarak ortaya çıkmıştır. Fosforik asit anodizasyonu sonrasında, çok ince sayılabilecek 400 nm kalınlığında, yüksek oranda gözenekli yapılar oluşur. Bundan ötürü de yüzey pürüzlülüğü fazladır. Oluşan bu yapının yapışma özellikleri ve boya

tutma yönü çok iyidir. Kromik asit ve diğer anodizasyon yöntemleriyle kıyaslandığında, oluşan hücre duvarları fosforik asit yönteminde çok daha incedir. Bu ince oluşum, korozyon direncinin istenilen düzeyde sağlanamamasına sebep olmaktadır (Alpay, 2009; Comrie et al., 2005). Yapılan incelemeler sonucunda, yüzeyde gözlemlenen fosfatın, neme karşı kaplamanın direncini arttırdığı görülmüştür (Alpay, 2009). Ancak fosforik asitin sülfürik asite göre 5 kat daha pahalı olması, PAA işleminin en büyük dezavantajlarından biridir (Arrowsmith & Clifford, 1986).

### 3.2. Yapısal Yapıştırıcılar

Yapısal yapıştırma bağlantılarında dünya genelinde bulunan ticari yapıştırıcıların sayısının tahmini oldukça zordur. Büyük bir ihtimalde dünya genelinde farklı ticari isimlerce birkaç yüz yapısal yapıştırıcı bulunmaktadır. Bu durum bazı özel formasyonlar, isim değişiklikleri veya dolgu maddesi ilaveleri gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Bir yapısal yapıştırıcının seçimi sırasında hangi tür yapıştırıcının seçileceği ele alındığında önümüzde yüzlerce seçenek önümüzde durmaktadır. Neyse ki, yapıştırıcıların sınıflandırılmasında sistematik bir yaklaşım belirlenmiştir. Böylece seçim birkaç önemli parametre ele alındığında basitleşmiştir.

Yapısal yapıştırıcıların çoğunluğu altı temel kimyasal bileşime dayalıdır (Ewen J.C., 2010):

- a.) Epoksi
- b.) Poliüretan
- c.) Reaktif akrilik
- d.) Toklaştırılmış akrilik
- e.) Anaerobik akrilik
- f.) Siyanoakrilat
- g.) Silikon

Her bir kimyasal tür, bir dizi özellikler sunmaktadır. Çoğu kez bu özellikler birbirleri ile aynı olmak ile birlikte bazı özelliklerde de benzersiz nitelikler sunmaktadır. Son yıllarda, kimyagerler tarafından yapıştırıcıların birbirleri arasındaki

olumsuzlukların ortadan kaldırılması amacıyla hibrit (melez) yapıştırıcılar formüle edilmiştir.

### 3.2.1. Epoksiler

Yapısal yapıştırıcı formülasyonlarının en önemlisi epoksilerdir. Epoksi yapıştırıcılar metallerin, seramiklerin ve termoplastikler de dahil olmak üzere birçok polimerin yapıştırılmasında kullanılabilir. Kimyasallara karşı gösterdikleri iyi direnç, kür esnasında az miktarda uçucu madde salınımı ve düşük büzülme değerleri üstün yönleridir. Bu nedenle, epoksi yapıştırıcılar iyi hazırlanmış yapıştırma sistemlerinde son derece güçlü ve dayanıklı bağlar oluşturabilmektedir. Ancak soyulma mukavemetleri nispeten düşüktür (Ebnesajjad, 2011; Ewen J.C., 2010). Kimyanın doğasına ve kür reaksiyonuna bağlı olarak, birçok farklı reçine ve sertleştirici olduğundan formülasyonlar ile çok yönlülük elde edilebilir. Düşük viskoziteli sıvılardan katı macunlara veya filmlere kadar çok çeşitli formlarda bulunurlar. Toklaştırılmış formülasyonların geliştirilmesi, zorlu uygulamalarda kullanılabilirliğini artırmıştır. Tüm varyasyonlar için kür mekanizması aynıdır. Bu mekanizma, belirli bir miktarda reçine ve sertleştirici gerektirir. Mekanizma için karışım doğru oranlarda gerçekleştirilmelidir. İki parçalı sistemlerde reçine ve sertleştiricinin iyi karıştırılması önemlidir. Oranların yanlış kullanımı ve karıştırmanın gerçekleştirilmemesi sertleşmeyi olumsuz etkileyerek daha düşük olan mukavemet, sertlik ve çevre direncine sahip olmasına neden olacaktır (Ewen J.C., 2010).

İki bileşenli epoksi yapıştırıcılar, iki bileşen karıştırıldıktan sonra ortam sıcaklığında reaksiyona girmeye başlarlar. Bu yapıştırıcılar oda sıcaklığında kürleşen yapıştırıcılar olarak isimlendirilir. Reaksiyon hızı, reaksiyon sıcaklığından çok büyük bir oranda etkilenmektedir. Her 10 °C sıcaklık artışı için reaksiyon süresi iki katına azalmaktadır. Yine tersinden ifade edersek, sıcaklık 10 °C düşürüldüğünde kür süresi iki katına çıkacaktır. İki bileşenli sistemler için ortam sıcaklıklarında tam kürlenme süreleri birkaç dakika ile birkaç gün arasında değişmektedir. Özel istisnalar haricinde, 10 °C altındaki sıcaklıklarda kürleşme hızı önemli ölçüde azalır ve çapraz bağlanma (cross-linking) seviyesi tehlikeye düşebilir. Çapraz bağlanmada seviyelerindeki düşüş, düşük kohezyon kuvveti ve agresif ortamlara karşı daha düşük dirence neden olmaktadır (Ewen J.C., 2010).

Tek bileşenli epoksi yapıştırıcılar sıvı, macun veya film formunda olabilir. Bu yapıştırıcılar kür için ısıya ihtiyaç duyarlar. Reçine ve sertleştirici önceden karıştırılır ancak katalizör oda sıcaklığında inaktif bir formda olduğunda kürlenme meydana gelmez. Sıcaklık yükseltildiğinde (genellikle 100 °C' yi aştığında) reaktif olur. Sıcaklık arttıkça tepkime hızı da artmaktadır. Bazı durumlarda 10 dakikadan daha kısa bir sürede tepkime oluşabilmektedir (Ewen J.C., 2010).

### 3.2.2. Poliüretanlar

Üretan polimerleri, esnek ve katı köpükler, kriyojenik yalıtımlar ve aşınma dirençli kaplamalarda kullanılmaktadır. Yapıştırıcı olarak kullanımı da genişlemektedir (Frisch, 2002).

Poliüretanların temel kullanımı, genellikle birbirine benzemeyen malzemeler veya metallere bağlanması zor plastiklerin birleştirilmesidir. Kürlenmiş üretanlar, hafif bir şekilde çapraz bağlı termoset reçinelerdir, hatta neredeyse termoplastiktir. Bu da onlara esnek bir özellik kazandırır. Sahip oldukları bu esneklik, iyi yapışma ile birlikte soyulma mukavemetinin önemli olduğu esnek plastiklerin iyi bir şekilde yapışmasını sağlar. Üretanların olağanüstü özelliği ise kriyojenik sıcaklıklarda sağladığı yüksek mukavemettir (Ebnesajjad, 2011; Ewen J.C., 2010).

PU yapışkanları, bir veya iki parçalı sistemler olabilen, kimyasal olarak reaktif formülasyonlardır. İki parçalı sistemler için, kür az miktarda katalist ile kontrol edilebilir ve kürleşme süresi birkaç saatten birkaç saniyeye kadar değişebilir. Tek bileşenli formülasyonlar, atmosferik neme maruz bırakılarak kür başlatılıncaya kadar kısmen polimerize edilir ve kimyasal olarak kararlı hale gelir. Kür oranı difüzyon kontrollüdür ve nispeten yavaştır. Tam kürleşme genellikle saatler ile günler arasında değişmektedir. Poliüretanlar cam elyaf takviyeli plastiklerin yapıştırılmasında, otomobil camlarında, izolasyon panellerinin laminasyonunda ve esnek ambalaj malzemelerinde sıklıkla kullanılırlar. Ayrıca inşaat ve denizcilik endüstrisinde yapıştırıcı ve sızdırmazlık elemanı olarak yaygın kullanıma sahiptir (Ewen J.C., 2010).



### 3.2.3. Reaktif akrilikler

Bu yapıştırıcılar, viskoz bir reçine içeren iki bileşenli sistemler ve düşük hacimli aktivatör olarak sağlanmaktadır. Aktivatör genellikle uygulama üzerinde yanıp sönen uçucu bir çözücü içerisinde taşınırlar. Reçine yapıştırılacak yüzeye uygulanır ve iki yüzey bir araya getirildiğinde birkaç dakika içerisinde hızlı bir kürleşme gerçekleşir. Bu durum, birleştirme işleminin nihai montajında zamandan kazanmayı sağlamaktadır. Reaktif akrilik yapıştırıcılar, akrilonitril butadien stiren (ABS), polikarbonat, poli (metil metakrilat) (PMMA) gibi plastik sistemlerin yapıştırılmasında tercih edilirler. Ancak bazı durumlarda oluşabilecek gerilme kırılmalarından kaçınmak için özen gösterilmelidir (Ewen J.C., 2010).

### 3.2.4. Toklaştırılmış akrilikler

Toklaştırılmış akrilik yapıştırıcılar nispeten hızlı sertleşen (dakika ile saat arasında) sistemlerdir. Yüksek mukavemet ve tokluk sunmalarının yanında birçok yaygın epoksiden daha fazla esnekliğe sahiptirler. Plastikler başta olmak üzere geniş bir malzeme yelpazesinin birleştirilmesinde kullanılabilmesi ve minimum yüzey hazırlıklarına toleranslı olmaları önemli özelliklerindedir. Esas olarak iki bileşenli olarak oluşturulan yapıştırıcılar, epoksiler için görülenle benzer şekilde veya dağıtım noktasında (karışım gerekli olabilir veya olmayabilir) birleştirilir. Kür mekanizması (serbest radikal kimyasına dayalıdır), akriliklerin eksik karışım oranlarına toleranslı olduğu gibidir. Toklaştırılmış akrilikler, birçok özellik bakımından epoksiler ile ya aynı ya da daha iyi olmalarına karşın, yine de kürleşme sırasında çok daha yüksek çekme gerilmeleri sergilerler. Bu mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilecek bir etkidir. Ayrıca bu durum, çok yüksek seviyede dolgu ilavesi yapılmadıkça boşluk doldurmanın sınırlı olduğunu da ifade etmektedir (Ewen J.C., 2010).

### 3.2.5. Anaerobik akrilikler

Anaerobik yapıştırıcılar genellikle "kilitleme bileşikleri" olarak bilinirler. Vida ve benzeri döndürülerek kapatılan parçaları sabitlemek, sızdırmazlık sağlamak ve güvenli hale getirmek amacıyla kullanılırlar. Aynı zamanda koaksiyel montajların birleştirilmesinde ve flanş yüzeylerinin sızdırmazlıklarının sağlanmasında da

kullanılırlar. Yapıştırılacak bileşenlerinden birinin metalik olması gerekmektedir. Akrilik yapıştırıcı ailesinin bir üyesi olarak, pastil veya tiksotropik sistemler halinde formüle edilebilmelerine rağmen çoğunlukla düşük viskoziteli sıvı formundalardır. Bu sistemler, oksijen veya hava dışlandığında kürleşen tek bileşenli sistemlerdir. Bu nedenle anaerobik olarak isimlendirilirler. Anaerobik koşulların etkisi altında tek başına kürleşme hızı oldukça yavaştır. Metal varlığında kürleşme hızı artmaktadır. Bu durum, metal parçaların yakından uyduğu sınırlı durumlarda kullanımına neden olmuştur. Sıkı bir şekilde birleştirme hava metal yüzeyini dışlayarak kür hızının ticari olarak kullanılabilir bir hale getirir. Bu yapıştırıcılar, bağlantı haricindeki malzemenin sertleşmemesi ve montaj ardından silinebilmesi bakımından avantajlıdır. Yapıştırıcılar arasında benzersizlerdir. Çünkü, büyük parçaların sökülmesini kolaylaştıran nispeten zayıf mukavemetli olmalarından daimi sabitlemeler için çok güçlü mukavemetlere sahip olabilmelerine değişebilen formülasyonlara sahiptirler. Her bir mukavemet bandında, aynı mukavemetli seviyede farklı aralıkların doldurulmasına izin veren genellikle farklı viskozitelere sahip formülasyonları bulunmaktadır. Soyulma ve darbe değerlerini büyük oranda artırmak amacıyla toklaştırılabilirler (Ewen J.C., 2010).

### 3.2.6. Siyanoakrilatlar

Bu yapıştırıcılar, yapıştırılacak yüzeylere absorbe edilen ince nemli film tabakası ile reaksiyona girerek kürleşirler. Sıkı birleştirme bağlantılarına ihtiyaç duyarlar ve genellikle saniyeler içerisinde katılırlar. Bu neden ile "süper yapıştırıcılar (Türkiye'de Japon yapıştırıcısı olarak bilinir)" olarak isimlendirilmektedirler. Yapıştırılabilecek malzemeler arasında en gözeneksiz malzemeler bulunmaktadır. Özellikle plastiklerin ve kauçukların yapıştırılmasında kullanımı uygundur.

Kürleşme, çoğu yüzeyde bulunan nemin nötr veya hafif alkalın olmasını gerektirir. Herhangi bir asidik ana malzeme örneğin sert ağaçlar gibi, kürleşmeyi engelleme eğiliminde olacaktır. Yapıştırıcı aslında çok düşük molekül ağırlıklı monomer veya oligomer bileşenleri içerdiğinde kütleme reaksiyonu polimerizasyon olarak adlandırılmaktadır. Dolayısı ile siyanoakrilatlar termoplastik sistemlerdir ve yüksek sıcaklıkta sürünmeye karşı duyarlıdırlar. 100 °C üzerindeki sıcaklıkta nadiren bulunabilirler. Buna ek olarak, çapraz bağlanmanın olmaması bazı organik çözücülere

ve neme maruziyet durumlarına karşı duyarlılığa neden olabilmektedir (Ewen J.C., 2010).

Yapıştırıcı türlerinin çoğu düşük viskoziteli sıvılar olduğundan dolayı boşluk dolgu maddesi olarak işlev görmezler. Bu nedenle, bu tür yapıştırıcılar kullanılacağı sistemlerde sıkı birleştirme bağlantıları istenir. Bununla birlikte, yeni çalışmalar ile jel haline getirilmiş türleri daha geniş boşluklarda ve dikey yüzeylere uygulamalarda kür imkanı sağlamıştır (Ewen J.C., 2010).

### 3.2.6. Silikonlar

Silikonlar, silikon atomlarının türlerine veya organik gruplara ve polimer zincirler arasındaki çapraz bağın derecesine bağlı olarak sıvı, elastomerik veya reçine olarak olabilen yarı inorganik polimerlerdir (Ebnesajjad, 2011; Marsden, 1990; Shields, 1984). Bu polimerler alışılmadık özelliklere sahiptirler. Yapışmayı hızlandırmak veya önlemek için kullanılabilirler (Ebnesajjad, 2011). Silikon yapıştırıcılar yüksek mukavemetleri ile bilinmekle birlikte esneklik ve geniş sıcaklık aralıklarında (kriyojenik koşullardan 250 °C' nin üzerindeki sıcaklıklara) işlev yapabilme kabiliyetleri ile dikkat çekmektedirler (Ebnesajjad, 2011; Ewen J.C., 2010). Silikon reçineleri, yüksek sıcaklıktaki kararlılığını güçlü silikon oksijenetikon bağlarına borçludur (Ebnesajjad, 2011; Harper, 2002).

Reçine sistemleri, çapraz bağlanma derecesi ve monomer molekülü içindeki radikal türü nedeniyle fiziksel özellik bakımından önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu bakımdan, ana radikaller metil, fenil veya vinil gruplarıdır (Ebnesajjad, 2011; Harper, 2002). Tek veya iki bileşenli formları mevcuttur. Bunlar, epoksiler ve toklaştırılmış akrilikler gibi diğer iki parçalı sistemlere benzer şekilde karıştırılır. Bir kısmı tek bileşenli poliüretanlar gibi davranır. Yani, atmosferik nemin difüzyonu ile kürleşirler. Bununla birlikte, poliüretanları aksine, kürleşme mekanizması türde yoğunlaşma ve alkol veya asit (genellikle asidik) gelişir. (Ewen J.C., 2010).

Silikonlar, yüksek maliyetlerinden ötürü toplam tüketim hacmine göre yapıştırıcı olarak geniş kullanım bulmamıştır. Uygulamaları sayısız ve çeşitlidir. Silikonlar organik materyallerin (karbon bazlı) çevresel koşullara maruz kalmaya direnemediği, üstün

güvenilirliğin gerekli olduğu veya dayanıklılıklarının ekonomik avantajlar sağladığı durumlarda uygulanır (Ebnesajjad, 2011; Ewen J.C., 2010).

### 3.3. Nanopartikül İleveli Yapıştırıcılar

Nano dolgu malzemelerinin etkili bir şekilde polimer matris içinde dağıtıldığı nanokompozitlerde yapının mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini çok yönlü olarak iyileştirdiği bilinmektedir. Küçük boyutları ve geniş yüzey alanı sayesinde nanopartikül ilaveleri, mikrometre boyutlarına sahip geleneksel dolgu malzemeleri ile ulaşılamayacak eşsiz özellik kombinasyonları sağlayabilmektedir. Ancak bu kombinasyonların oluşturulabilmesinde nanopartiküllerin yüksek parçacık birikme (aglomera) eğiliminde olması olumsuz bir durum yaratmaktadır. Bu olumsuzluğun giderilmesi için partiküllerin matris içerisinde dağılımı büyük önem taşımaktadır.

Nanopartiküllerin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi nano boyutta yapıştırıcıların özelleştirilmesinde yeni olanaklar sağlamıştır. Nano yapıştırıcılara ilave edilen partiküllerin geniş yüzey alanlarının etkisiyle nanokompozit yapıştırıcının özelliklerinde önemli değişiklikler elde edilmektedir. Bu değişiklikleri sağlamak için az miktarda partikül ilavesi yeterli olmaktadır. Mekanik, termal, elektriksel ve termo-mekanik özelliklerin kombinasyonu ile yeni nesil yapıştırıcılar elde edilebilmektedir. Bu yeni nesil yapıştırıcılar ile hem yapışma bağlantısının dayanımı iyileştirilebilmekte hem de yapıştırıcının nem emme oranının düşürülmesi ve yaşlanma özelliklerinin artırılması gibi çevresel faktörlere karşı dayanıklılık sağlanabilmektedir (Chan, Wu, Li, & Cheung, 2002; Liang, Wan, Zhang, Wei, & Yin, 2004).

Nano malzemelerin varlığı yeni nesil nano yapıştırıcı formüllerinin oluşturulması için umut vermektedir. İlave edilen nanopartiküller ile matris ara yüzeyi arasında oluşan kimyasal ve fiziksel etkileşimler nano yapıştırıcıların özelliklerinde değişimler sağlamaktadır. Bu değişimler ile mekanik, elektriksel ve termal davranışlarda iyileşmeler elde edilmektedir.

### 3.3.1. Nanopartiküllerin matris içerisinde homojen dağıtımı

Nanopartikül ilaveli yapıştırıcılarda yapıştırıcının özelliklerini belirleyen partikül türü, boyutu, geometrisi, yüzey özellikleri gibi parametrelerin yanı sıra en önemli parametrelerden biriside partikülün matris içerisinde homojen dağılımının elde edilmesidir. Partiküllerin matris içerisinde homojen dağıtılabilmesi için çeşitli teknikler kullanılmalıdır. Mekanik karıştırma, ultrasonik banyo ile ultrasonik karıştırma, metal uçlu sonikatör ile ultrasonik karıştırma ve sol-jel yöntemi kullanılan en yaygın karıştırma yöntemleridir.

Sol-jel yönteminin diğer tekniklerden farkı kimyasal bir teknik olmasıdır. Sol-jel yönteminde nanopartiküller bir sol-jel imalat işlemi sırasında yerinde oluşturulmakta ve böylelikle homojen dağılım sağlanmaktadır ( a. J. Kinloch et al., 2003a; Liu, Lin, Chen, & Jeng, 2003). Sol-jel ile homojen dağılımın sağlandığı nanokompozitlerde partikül ilavesinin termal kararlılığı ve mukavemeti artırdığı görülmüştür ( a. J. Kinloch et al., 2003a). Ayrıca nanopartikül üretim ve dağılımın sol-jel yöntemi ile oluşturulduğu çalışmalarda ortam sıcaklığında ve kriyojenik koşullarda kırılmak tokluğunda ve diğer mekanik özelliklerde belirgin bir artış sağlandığı görülmüştür (Huang et al., 2005; A. J. Kinloch et al., 2005).

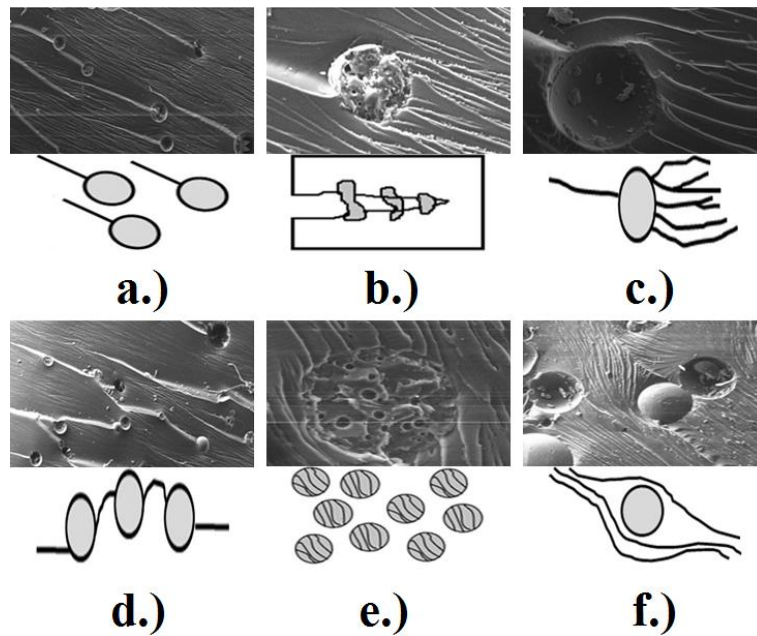
Diğer dağıtım yöntemlerinin bir arada kullanımı literatürde yaygın bir yer almaktadır. Özellikle bu karıştırma yöntemlerinin uygulanmasında süre parametresi üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Ancak metal uçlu sonikatör ile ultrasonik karıştırma tekniğinin diğer tekniklere göre daha kolay uygulanabilirliğe sahip, pratik ve etkili bir yöntem olduğu ifade edilmiştir (Arabli & Aghili, 2013; Demirci, 2015; Taşyürek, 2014).

Ultrasonik karıştırma yönteminde sonikatörün oluşturulduğu basınç dalgaları sıvı reçine içerisinde dağılmakta ve bu dalgaların dağılımı esnasında yüksek ve düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır. Düşük basınç bölgelerinde yüksek şiddetli ses dalgalarının varlığı küçük vakum boşluklarının oluşmasını sağlamakta ve bu boşluklar genişleyerek kritik hacimlerine ulaştıklarında yüksek basınç bölgelerinde patlamaktadırlar. Bu olay ultrasonik kaviteasyon olarak ifade edilmektedir. Bu kaviteasyonların neden olduğu yüksek sıcaklık ve basınç ortaya çıkmaktadır. Ayrıca

patlamalar yüksek hızlı sıvı jetlerinin oluşumu sağlamaktadır. Oluşan sıvı jetleri yüksek enerjiye sahip olduğunda ilave edilen nanopartiküllerin kendi içlerindeki çekim kuvvetini yenerek matriste homojen dağılımın oluşması sağlanmaktadır (Suslick, 2000).

### 3.2.2. Nanopartiküllerin tokluk artırma mekanizmaları

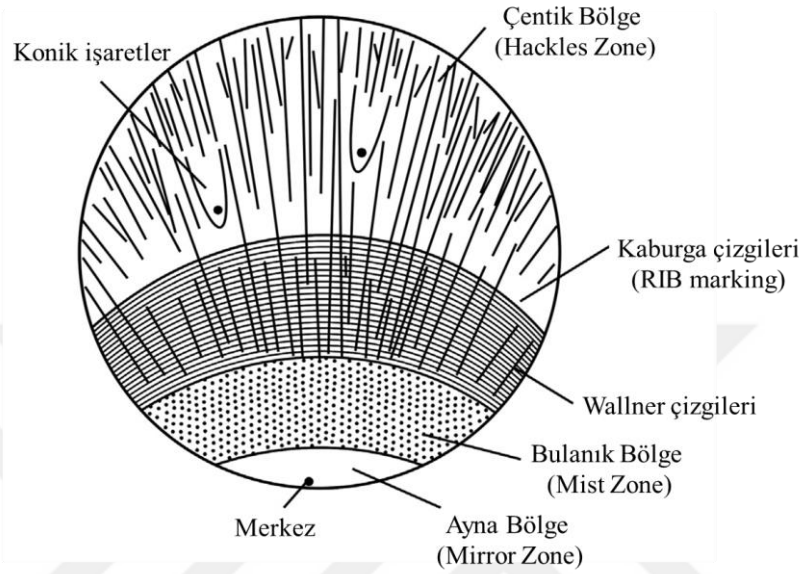
Yeni nesil yapısal yapıştırma uygulamalarında (havacılık vb. gibi) yapıştırıcılardan titreşim ve yorulma direncinin yanı sıra yüksek sıcaklıktaki ortamlarda kararlı olması beklenmektedir. Genel olarak nanopartikül ilavesi mukavemeti ve elastiklik modülünü artırmaktadır. Ancak yapıştırma bağlantılarında önemli olan kırılma tokluğunu diğer mekanik özellikleri azaltmadan artırabilmesidir. Genellikle polimer matrisin kırılma tokluğunun artırılmasında kauçuk parçaları kullanılmaktadır. Kauçuk ilavesi ile kırılma tokluğu her ne kadar artırılabilse de diğer mekanik özellikler bozulmaktadır. Ancak nanopartikül ilavesi ile elde edilen çatlak ve nanopartikül etkileşimi kırılma enerjisi yutucu mekanizmaları oluşturmakta ve toklukta artışı sağlamaktadır (S. Prolongo, Gude, & Ureña, 2010). Çatlak ve partikül arasındaki oluşan mekanizmalar Şekil 3.12.' de gösterilmiştir.



**Şekil 3.12.** Çatlak ve partikül arası oluşan tokluk artırıcı mekanizmalar a.) iğneleme (pinning) mekanizması b.) köprüleme (bridging) mekanizması c.) micro/nano çatlak mekanizması d.) çatlak yolu saptırma mekanizması e.) kayma bandı mekanizması f.) çatlak eğme (bowing) mekanizması (Chaudhary, Parthasarathy, Kumar, Rajagopal, & Roy, 2014)

### 3.4. Polimerler Malzemelerin Kırılma Yüzey Özellikleri

Kırılma nedeninin belirlenmesinde kırılma başlangıç noktasının tespiti kırılma yüzey incelenmesinde yapılacak olan ilk adımdır. Şekil 3.13.' de polimer malzemelerde gözlenen kırılma yüzeyleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.13. Kırılma yüzeylerinde görülen çeşitli yapıların şematik gösterimi (Hayes, Edwards, & Shah, 2015)

#### 3.4.1. Ayna (mirror) bölgesi

Mirror (ayna) bölgesi, kırılma merkezinin yakınında bulunan düz ve ayna gibi bir bölgedir. Tipik olarak epoksi gibi termoset reçinelerde bulunur. Ayna bölgesi yüksek büyütmelelerde bile genellikle özelliiksiz olarak görülür (Hayes et al., 2015).

#### 3.4.2. Bulanık (mist) bölgesi

Mist (bulanık-sis) bölgesi camsı polimerlerde yaygın olarak görülür. Genellikle ayna bölgesine bitişik olarak bulunur. Sis bölgesi, yalnızca yüzey dokusunda mikroskobik bir değişiklik olduğunda ayna bölgesinden farklıdır. Ayna bölgesi gibi pürüzsüz olmak yerine, puslu bir görünüme sahiptir. Oluşumu, hızlı çatlak büyümesinden hemen önce çatlak ivmesi ile ilişkilendirilebilir (Hayes et al., 2015).

### 3.4.3. Kaburga (RIB) çizgileri bölgesi

RIB (kaburga) çizgileri bölgesi genellikle görsel olarak gözlemlenen belirgin kavisli çatlak ön işaretleridir. Ayrıca beach (sahil) çizgileri ve çatlak tutma çizgileri olarak isimlendirilir. Bu işaretler çatlak hızındaki ani değişimlerde veya çatlak tutulmalarında ortaya çıkar. Rastgele aralıklarda oluşan bu çizgilerin dış bükey normalleri çatlak büyüme yönlerini işaret etmektedir (Hayes et al., 2015).

### 3.4.4. Çentik (hackle) bölgesi

Hackle (çentik) bölgesi tipik olarak kaba görünümlüdür ve kırılma orijininin dışarıya doğru yayılmış farklı çizgilerden oluşur. Bunlar kırık kökenini bulmak için muhtemelen en güvenilir kırılma yüzeyi özellikleridir. Kırık bölgeler kırık yüzeyinde yerel plastik deformasyona bağlı olarak yüksek enerji dağılımı ile ilişkilidir. Bunlar, yüksek çatlak hızı, stres alanındaki hızlı değişimler ve kesintisiz kırılma yolları bulduran bölgelerdir (Hayes et al., 2015). Çatlak bölgeler büyük, düzensiz yönlendirilmiş görüntüler sergiler ve çatlakların yüksek hızda yayılımı nedeniyle mikro çatallanma ile ilişkilidir (Hull, 1999). Hackle bölge gevrek kırılma yüzeylerinde daha geniş bir alanda görülürler (Hayes et al., 2015).

### 3.4.5. River işaretleri bölgesi

River (nehir) işaretleri bölgesi gevrek malzemelerin kırılma yüzeylerinin en belirgin özelliğidir. Yarı gevrek malzemelerin kırılma yüzeylerinde de benzer şekiller oluşabilmektedir (Hull, 1999). River işaretleri hem hızlı gevrek kırılmalarda hem de yavaş sünek kırılmalarda gözlemlenmiştir (Hayes et al., 2015).

### 3.4.6. Wallner çizgileri

Wallner çizgileri, yavaş hareket eden kırıklarda ortaya çıkan yorulma çizgilerinin aksine, hızlı hareket eden kırıklarla ilişkili pürüzsüz kırık yüzeylerdeki hafif çizgilerdir. Periyodik aralıklarla yorulma çizgilerini andırırlar, ancak numune sınırlarından veya serbest yüzeylerden yansıyan stres dalgaları yayılım yapan çatlak ön ile etkileşime girdiğinde oluşurlar (Hayes et al., 2015).



#### 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapıştırma bağlantılarını etkileyen en önemli parametrelerinden birisi yapıştırıcıya ait özellikleridir. SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ilavesi yapılacak olan epoksi yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tespiti ve buna bağlı olarakta % ağırlıkça partikül ilavesinin yapıştırıcının mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin tespiti büyük önem içermektedir.

Çalışmada, epoksi yapıştırıcı içerisine literatürden alınan bilgiler doğrultusunda ağırlıkça %0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 ve 3.5 ilave oranlarında SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ilave edilerek ASTM D638–14 standartlarına uygun olarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Partikülün epoksi yapıştırıcı üzerindeki termo-kimyasal etkisinin tespiti için ise FTIR, DSC ve TGA analizleri yapılmıştır. Kırılma yüzeylerinin SEM ile incelenmiştir. Testler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek yapıştırma bağlantısında kullanılacak olan % ağırlıkça SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave oranları tespit edilmiştir.

% ağırlıkça SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave oranlarının yapıştırıcı özelliklerine etkisinin tespitinden sonra yapıştırma bağlantılarında bir diğer önemli parametre olan yüzey özellikleri üzerinde durulmuştur. Çalışmada, yapıştırılan Al2024-T3 malzemeleri için farklı yüzey hazırlama tekniklerinin yüzey morfolojisi ve yapıştırma bağlantısının kayma mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı teknikler ile yapıştırma yüzeyleri hazırlanmış ve nanopartikül ilavesi yapılmamış olan epoksi yapıştırıcılar ile yapıştırma bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hazırlama tekniklerinin yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü üzerine olan etkisi AFM ile tespit edilmiştir. ASTM D1002–10 standardına uygun olarak hazırlanan yapıştırma bağlantısı yine aynı standarta göre teste tabi tutulmuş ve kayma dayanımı tespit edilmiştir.

Yüzey hazırlama tekniklerinin bağlantının kayma dayanımına olan etkisi tespit edildikten sonra uygun olan yüzey hazırlama tekniği seçilerek nanopartikül ilaveli yapıştırıcılar ile ASTM D1002–10 standardına uygun olarak yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve partikül ilavesinin bağlantının kayma dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapıştırma hasar yüzeyleri optik mikroskop ve SEM ile incelenmiştir.

## 4.1. Malzeme Özellikleri

### 4.1.1. Yapıştırıcı

Tez çalışmasında kullanılan epoksi yapıştırıcı ticari olarak bulunabilen ve Hexion markasına ait olan MGS-L285 laminasyon reçinesidir. Bu reçine 600–900 mPas viskoziteli ve iki fazlı olup (%80–90 diglisidil eter bisfenol A ve %10–20 alifatik diglisidil eter karışımı) kürleştiricisi/sertleştiricisi ise yine Hexion markasına ait olan MGS-H285 (%70–90 sikloalifatikamin ve %10–30 polioksil alkilamin karışımı)' dir. MGS-H285' in viskozitesi 50–100 mPas' dır. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri Çizelge 4.1.' de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Yapıştırıcı epoksi reçinenin mekanik özellikleri (Hexion, n.d.)

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	1.18 – 1.20
Eğilme mukavemeti	N/mm <sup>2</sup>	110 – 120
Çekme mukavemeti	N/mm <sup>2</sup>	70 – 80
Basma mukavemeti	N/mm <sup>2</sup>	120 – 140
Darbe mukavemeti	N/mm <sup>2</sup>	45 – 55
Elastiklik modülü	kN/mm <sup>2</sup>	3.0 – 3.3
Kopma uzaması	%	5.0 – 6.5

### 4.1.2. Yapıştırılan malzeme

Seykoç Alüminyum firmasından satın alınan Al2024-T3 malzemesi yapıştırma bağlantısında kullanılmıştır. Bu malzemenin yüksek dayanıma, yüksek işlenebilirlik özelliğine ve iyi yüzey kalitesine sahip olması bu alaşımın yapısal uygulamalarda; uçak sanayi, otomotiv, askeri ve makine sektörlerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Yüksek dayanımlı yapıştırma bağlantılarına ihtiyaç duyan havacılık sanayinde Al2024-T3 malzemesinin yaygın kullanılması tez çalışması için belirleyici bir kriter olmuştur. Al2024-T3 malzemesinin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.2. ve 4.3.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Al2024-T3 Malzemesinin kimyasal kompozisyonu (ASM Aerospace Specification Metals Inc., n.d.)

Bileşenler	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
% Ağırlık	90.9-93.2	0,1	3.8-4.9	0,50	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.15	0.25

**Çizelge 4.3.** Al2024-T3 Malzemesinin mekanik özellikleri (ASM Aerospace Specification Metals Inc., n.d.)

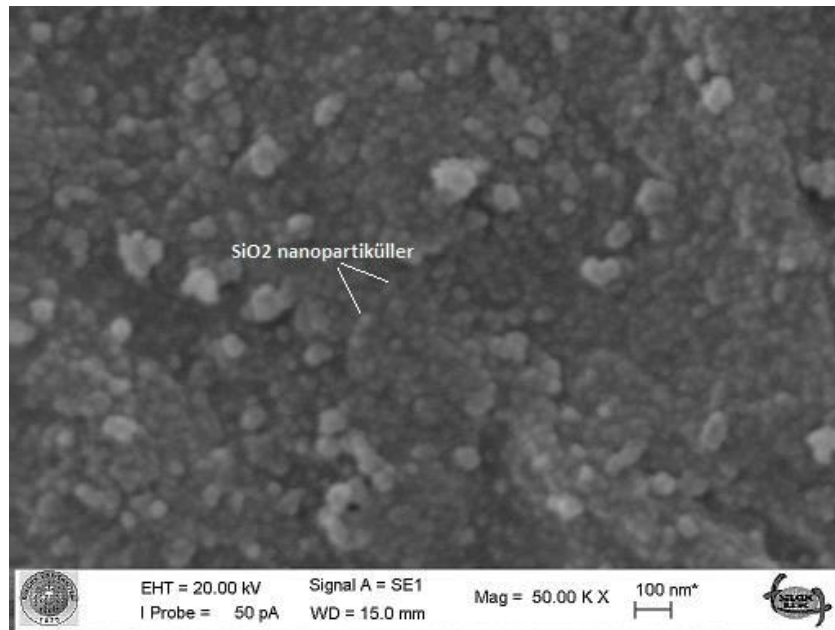
Mekanik Özellikler	Birim	Değer
Akma dayanımı	N/mm <sup>2</sup>	348
Çekme dayanımı	N/mm <sup>2</sup>	450
Kopma uzaması	%	18
Elastiklik modülü	GPa	73.1
Poisson oranı	-	0.33
Kayma modülü	GPa	28

#### 4.1.3. SiO<sub>2</sub> nanopartikül

Tez çalışmasında kullanılan SiO<sub>2</sub> nanopartiküller Mknano Kanada firmasından yüzeyi hazır silan modifikasyonuna uğramış şekilde satın alınmıştır. Kullanılan SiO<sub>2</sub> nanopartikülün fiziksel özellikleri Çizelge 4.4.' de sunulmuştur.

**Çizelge 4.4.** SiO<sub>2</sub> nanopartikül fiziksel özellikleri (MKnano, n.d.)

Özellik	Değer/Durum
Saflık Yüzdesi	%99.5
Kaynama Noktası	2300 °C
Erime Noktası	1610 – 1728 °C
Özgül Yüzey Alanı	650 g/m <sup>2</sup>
Kristal yapısı	Düzensiz (Amorphous)
Morfolojisi	Küresel, Gözenekli
Ortalama Partikül Boyutu	15 nm
Görünüm Rengi	Beyaz
Yoğunluk	2.2 – 2.6 gr/cm <sup>3</sup>
Yüzey Modifikasyonu	Silanlama



**Şekil 4.1.** SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerin SEM görüntüsü (Demirci, 2015)

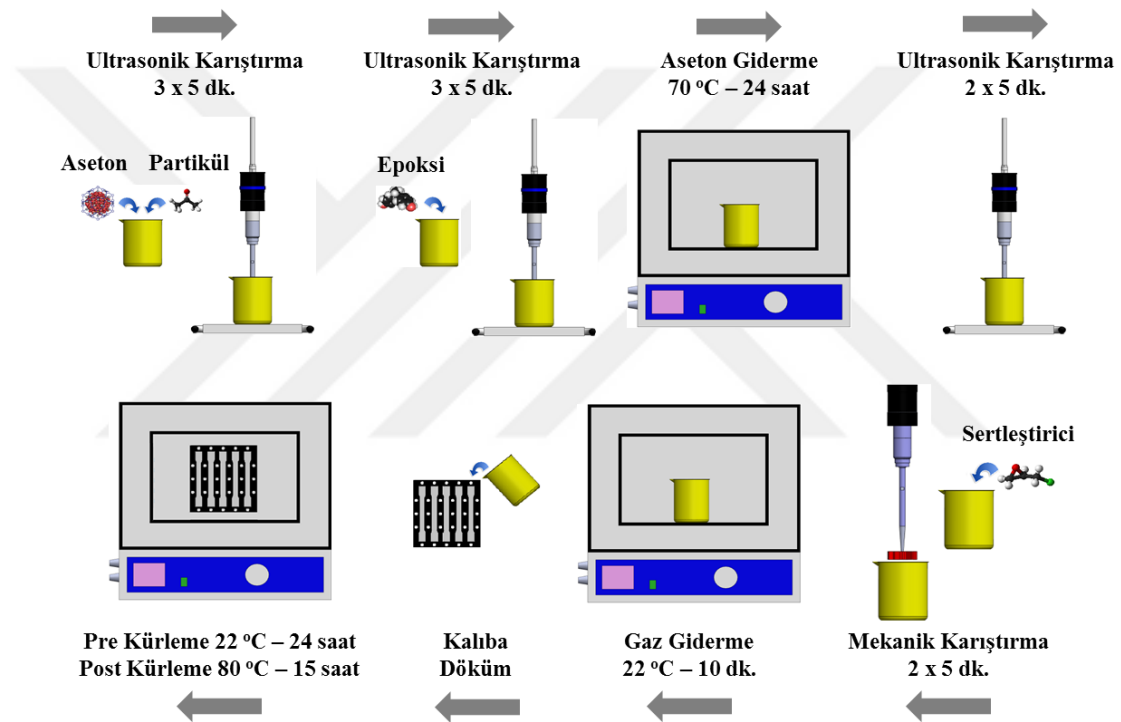
## 4.2. Yapıştırıcının Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Öncelikle yapıştırıcının mekanik özellikleri belirlenmiş ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi yapıştırıcının yalın mukavemetindeki iyileşmelerin yapıştırma bağlantısı üzerindeki etkilerini doğru tespit edebilmektir.

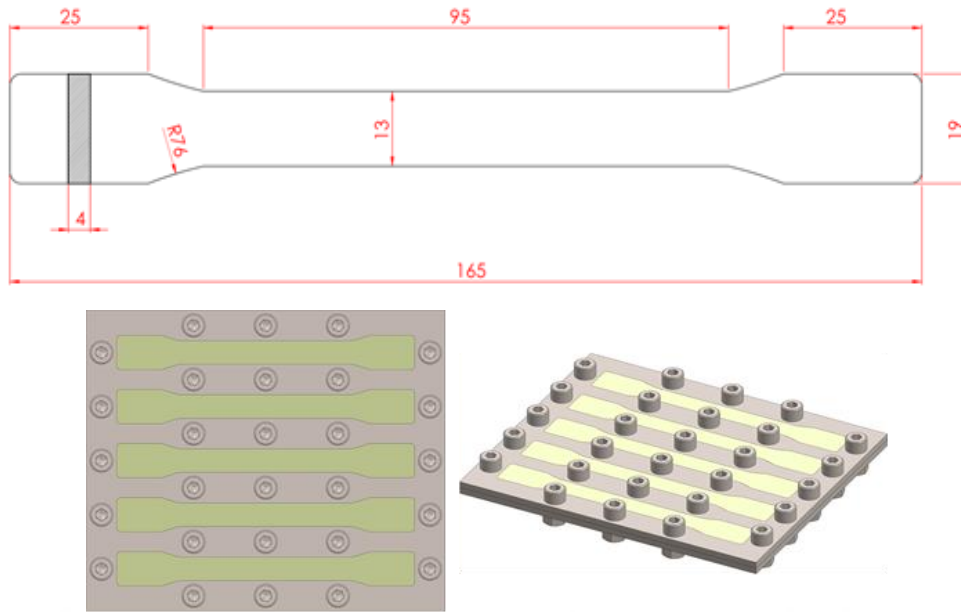
### 4.2.1. Yapıştırıcı çekme testi deney numunelerinin üretimi

Tez çalışmasında SiO<sub>2</sub> nanopartikülü farklı oranlarda ilave edilerek SiO<sub>2</sub> nano partikülün yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 10:4:1 oranı epoksi-sertleştirici-aseton için kullanılmıştır. SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ise yapıya epoksi reçinenin ağırlıkça %0.5–3.5 oranları arasında ilave edilmiştir. Literatürde çalışmalarda ağırlıkça %1.0–5.0 arası kullanılması önerilmektedir (Tzetzis, Mansour, Tsiafis, & Pavlidou, 2013). İncelenen çalışmalarda daha yüksek oranda ilavenin yapılması durumunda “aglomera” adı verilen topaklanmaların olduğu görülmüştür. Bu topaklanmalarında çalışmalarda mekanik özelliklerde zayıflamalara neden olduğu belirtilmiştir (S Deng, Rosso, Ye, & Friedrich, 2007; Shiqiang Deng, Ye, & Friedrich, 2007). Bu yüzden ilave oranı ağırlıkça %3.5’ a kadar belirlenmiştir. SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcının deney numunelerinin üretim adımları Şekil 4.2.’ de yer almaktadır. Üretimde öncelikle epoksi reçine tartılmış ve buna bağlı olan SiO<sub>2</sub> nanopartikül ağırlığı hesaplanmıştır. Hesaplanan ağırlıktaki SiO<sub>2</sub> nanopartikül belirtilen orandaki aseton ile ultrasonik homojenizatör aracılığıyla 15 dk. boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra tartılan epoksi reçine ve aseton/partikül karışımı birleştirilmiştir. Birleştirilen karışım 20 dakika boyunca ultrasonik homojenizatör ile karıştırılmıştır. Elde edilen homojen aseton/partikül/epoksi karışımı içerisindeki asetonun uçurulması amacıyla karışım, etüve alınarak 70 °C sıcaklık altında 24 saat bekletilmiştir. Asetonun uçurulmasıyla elde edilen epoksi/partikül karışımı buz banyosu içerisinde 10 dakika ultrasonik homojenizatör ile tekrar karıştırıldıktan sonra belirtilen oranda sertleştirici ilave edilerek 10 dakika mekanik karıştırma buz banyosu içerisinde yapılmıştır. Hazırlanan yapıştırıcı vakumlu etüve alınarak (22 °C, 0.75 bar vakum, 10 dk.) oluşan gaz kabarcıkları giderilmiştir. Kabarcıkları alınmış yapıştırıcı malzeme ASTM D638–14 standardında belirtilen çekme test numuneleri ölçülerine uygun olarak hazırlanmış olan kalıplara dökülmüştür (Şekil 4.2). Kalıplara aktarılan yapıştırıcı malzeme 24 saat boyunca 22 °C’ de kütleme işlemine ve daha sonra 15 saat boyunca 80 °C’ de post-kütleme işlemine

tabi tutulmuştur. Nanopartikül ilavesinin olduğu yapıştırıcıların üretilmesinde asetonun kullanılmasının amacı reçinenin viskozitesini düşürerek nanopartiküllerin homojen dağılımının daha kolay olmasını sağlamaktır. Çalışmada karıştırma işlemlerinde ultrasonik homojenizatör kullanılması amaçlanan, SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerin birbirleri ile olan çekim kuvvetlerini yenerek kümeleşme oluşturmadan mümkün olduğunca homojen olarak epoksi reçine içerisinde dağıtımının sağlanmasıdır (Suslick, 2000). Yapıştırıcının yapıştırma bağlantısında kullanılacak olması durumunda gaz giderme sonrası yüzeylere uygulanması gerekmektedir. Pre kürlenme ve post kürlenme yapıştırma bağlantısına aynı koşullar altında uygulanmalıdır.



Şekil 4.2. Partikül ilaveli yapıştırıcı çekme deney numunelerinin üretim aşamaları



Şekil 4.3. Polimer çekme numunesi numune ölçüleri (ASTM D638 - 14, 2014) ve çoklu numune kalıbı

#### 4.2.2. Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tespiti

SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılmış olan yapıştırıcıların çekme özelliklerinin tespiti ve yapıştırma bağlantısında kullanılacak en uygun nano partikül ilave oranının belirlenmesi için önemlidir. Çekme deneyleri ASTM D638-14 standardına uygun olarak universal çekme test cihazında (Instron 8801) 2 mm/dk. sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Deney tekrar sayısı beş olarak uygulanmıştır. Deney sonucunda ağırlıkça %0.5–3.5 arasında SiO<sub>2</sub> ilavesi yapılmış epoksi yapıştırıcıların ve partikül ilavesi yapılmamış epoksi yapıştırıcıların mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

#### 4.3. Yüzey Hazırlama Yöntemleri ve Bağ Mukavemetine Etkisi

Yapıştırma bağlantılarının dayanımını yapıştırıcının özellikleri kadar yapıştırılacak malzemenin özelliklerini de belirler. Bu özelliklerden en önemli olanlardan birisi de yüzey özellikleridir. Yapıştırılacak malzemenin yüzey morfolojisi, yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey enerjisi iyi bir yapıştırma bağlantısı için kritik önem taşır. Tez çalışmasında bu durumun bağlantı mukavemeti üzerindeki etkisinin tespitinin araştırılması için, Al2024-T3 malzemesinin yüzeyleri farklı yöntemlerle hazırlanarak yüzey özelliklerinin bağlantı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

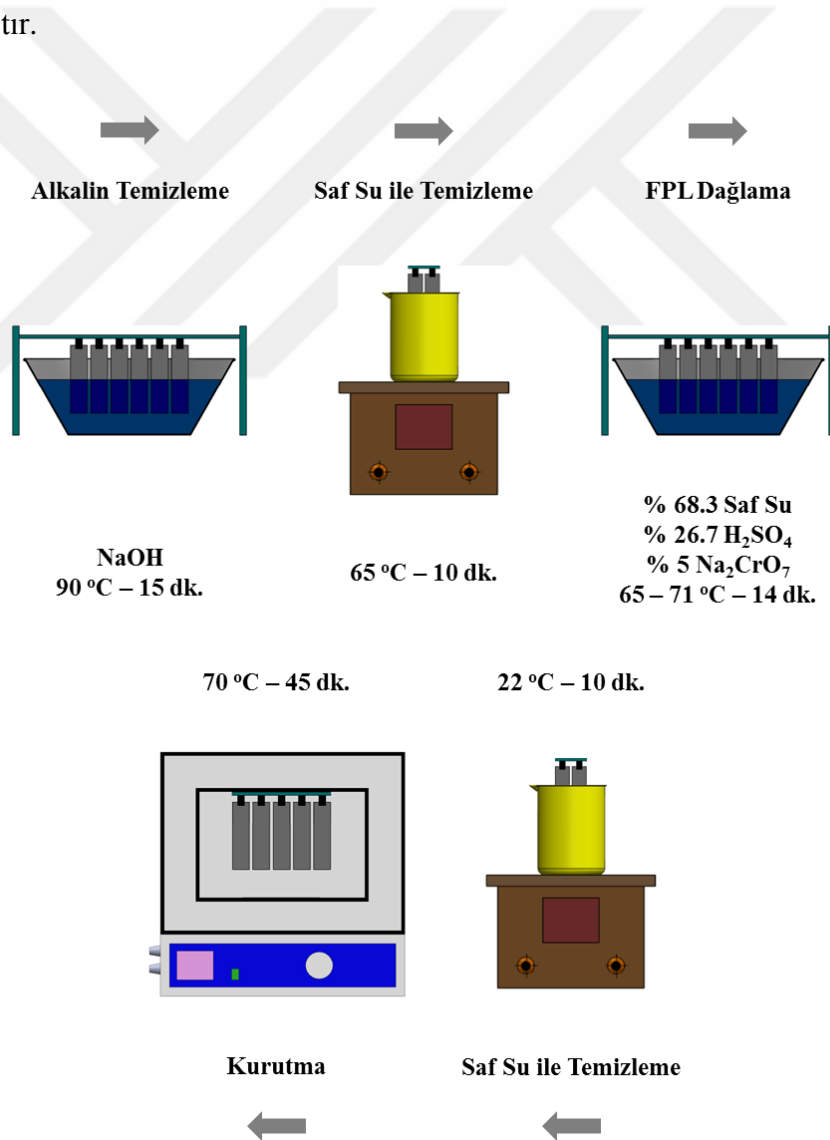
### 4.3.1. Alüminyum numune yüzeylerin hazırlanması

Alüminyum ve alaşımlarının özellikle yüksek nem ortamı gibi zor çevresel şartlara maruz kalacaksa, korozyondan korunma alüminyum yüzeylerinin hazırlığında düşünülmesi gereken en önemli faktördür. Çözeltiyle temizleme ve mekanik aşındırma gibi yöntemler korozyon dayanımı oluşturmadıklarından havacılık ve uzay sanayisi gibi çevresel şartların önemli olduğu alanlar için uygun değildir. Bu yüzden alüminyum yüzeylerin hazırlanmasında kimyasal ve elektrokimyasal işlemler daha verimli sonuçlar vermektedir. Tez çalışmamızda Al2024-T3 malzemesinden ASTM D1002–10 standartlara uygun olarak hazırlanan yapıştırma numunelerin yüzeyleri dört farklı yöntem ile hazırlanmıştır. Yüzey hazırlama yöntemlerinin belirlenmesinde gerek standart olarak sektörde kullanıla gelen yöntemler incelenmiş gerekse akademik çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelenmiştir. İncelemeler neticesinde yaygın olarak kullanılan iki farklı teknik görülmüştür. Standartlaşmış olan bu tekniklerden birisi ASTM D2651–01 standartlarınca uygulanan kimyasal olarak asitle dağlama tekniğidir. Bir diğeri ise ASTM D3933–98 standartlarınca elektrokimyasal olarak anotlama tekniğidir. Ayrıca, akademik çalışmalar incelendiğinde lazer ile hazırlanan yüzeylerde yapışma mukavemetinin iyileştiği görülmüştür ve lazer ile hazırlanan yüzeylerde düzgün yüzey pürüzlülüğü ve morfolojisi elde edilmektedir (Alfano, Lubineau, Furguele, & Paulino, 2012). Bu durumlar göz önüne alınarak, FPL dağlama, PAA anodizasyon ve lazer le yüzeylerin hazırlanmasına karar verilmiştir. Bunlara ilave olarak her ne kadar korozyon açısından bizim çalışmamız için uygun bir teknik olmasa da kumlama yöntemi de geniş yüzeylere kolay uygulanabilirliği açısından tez çalışmamızda inceleyeceğimiz bir yüzey hazırlama yöntemi olacaktır.

#### 4.3.1.1. FPL dağlama ile yüzeylerin hazırlanması

Asitle dağlama yöntemi alüminyum ve alaşımlarının yüzeylerinin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılan, kontrol edilebilir ve güvenli bir yöntemdir. Hazırlanan çözeltiyle yapılan dağlama işlemi ile yüzeyde bulunan oksit tabakası çözünür ve ardından ince yeni bir oksit tabakası oluşur. Bu oluşan yeni ince tabaka ağsı yapıda, gözenekli ve çıkıntıları olan bir yapıya sahiptir. Oluşan bu gözeneklilik yapıştırma bağlantısı için kilitlemeyi sağlayarak olumlu bir etki yaratır (Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2006; Pocius, 2012). ASTM D2651–01 standardına uygun olarak

uygulanan FPL dağlama ile yzeylerin hazırlanmasında izlenen adımlar Şekil 4.4.' te gösterilmiştir. Yzey hazırlama işleminde önce ASTM D1002–10 standardında belirtilen ölçülerde (101.6mm x 25.4mm x 2mm) kesilen tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı numunelerinin kesim çapakları temizlenmiş ve saf su ile yıkanmıştır. Daha sonra, numuneler yaklaşık 90 °C sıcaklıkta 15 dakika boyunca NaOH ile alkalın temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Alkalın temizlemenin sonrasında saf suda numuneler tekrar yıkanmıştır. Ardından sülfürik asit/sodyum dikromat solüsyonu (%26.7 Sülfürik asit + %5 Sodyum dikromat + %68.3 Saf su) ile FPL dağlama işlemi 14 dakika 65–71 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Dağlama sonrası numuneler saf suda yıkanmış ve ardından vakumlu fırında 70 °C sıcaklıkta 45 dakika kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numuneler 72 saat süre geçmeden yapıştırma bağlantısında kullanılmıştır.

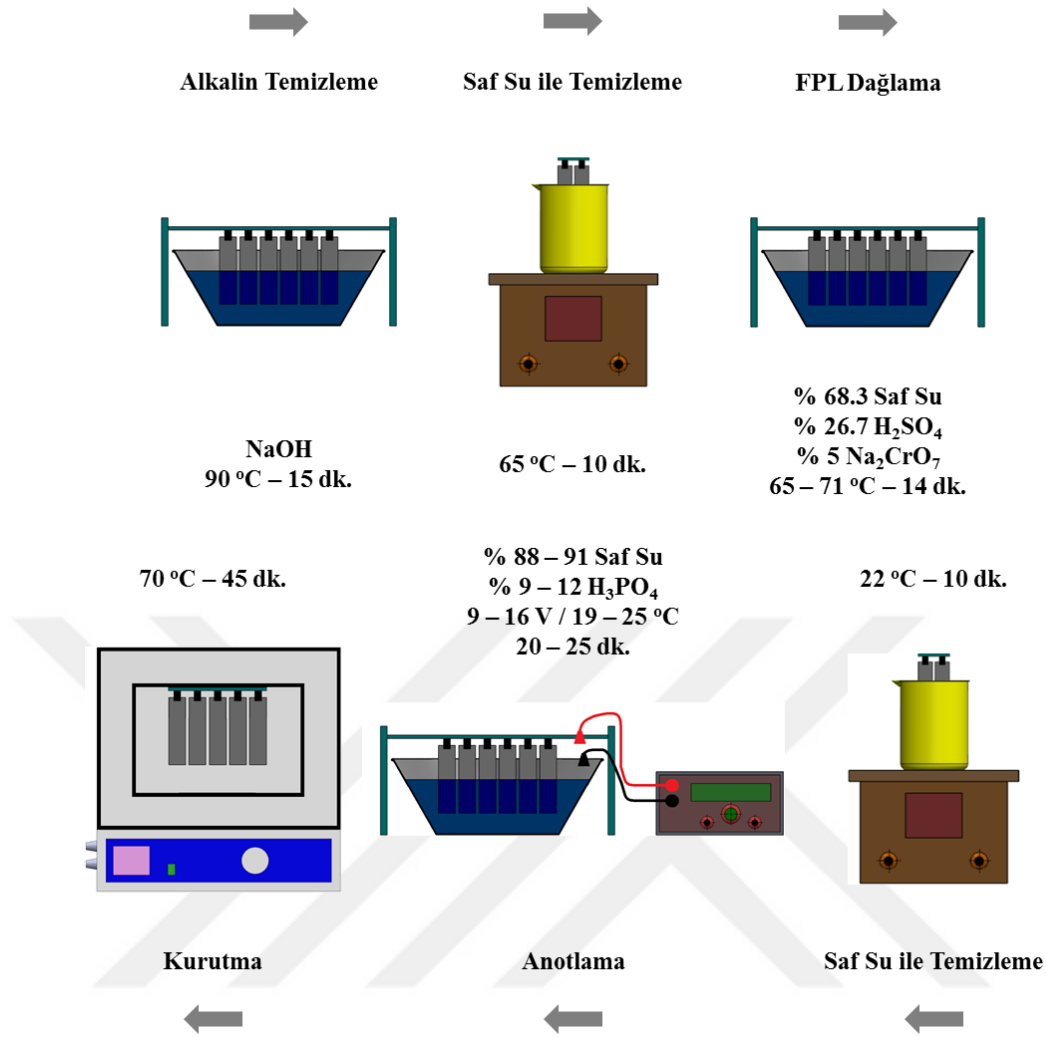


Şekil 4.4. FPL Dağlama yzey hazırlanma sürecinin şematik gösterimi (ASTM D2651 - 01(2016), 2016)



#### 4.3.1.2. PAA anotlama ile yüzeylerin hazırlanması

Anotlama yönteminde ASTM D3933–98 standartlarınca verilen Boeing şirketi tarafından geliştirilmiş olan fosforik asit anodizasyonu tercih edilmiştir. PAA ile yüzeyi hazırlanmış ve yapıştırılmış bağlantılar FPL ile hazırlanarak yapıştırılmış bağlantılara nazaran nemli ortamlarda daha iyi dayanım sergilemektedir ayrıca uygulamada FPL kadar hassasiyet gerektirmemesi nedeniyle havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Pocius, 2012). Ayrıca anotlama ile elde edilen oksit tabakası dağlamayla elde edilen tabakadan daha kalın ve korozyon direnci daha üstündür (Ebnesajjad & Ebnesajjad, 2006). ASTM D3933–98 standartlarına uygun olarak PAA anotlama ile yüzeyin hazırlanmasında izlenen adımlar Şekil 4.5.' te gösterilmiştir. Yüzey hazırlama işleminden önce ASTM D1002–10 standardında belirtilen ölçülerde (101.6mm x 25.4mm x 2mm) kesilen tek bindirmeli yapıştırma bağlantısı numunelerinin kesim çapakları temizlenmiş ve saf su ile yıkanmıştır. Ardından numuneler yaklaşık 90 °C sıcaklıkta 15 dakika boyunca NaOH ile alkalın temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Alkalın temizlemenin sonrasında saf suda numuneler tekrar yıkanmıştır. Ardından sülfürik asit/sodyum dikromat solüsyonu (%26.7 Sülfürik asit + %5 Sodyum dikromat + %68.3 Saf su) ile FPL dağlama işlemi 14 dakika 65–71 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Dağlama sonrası numuneler saf suda yıkanarak fosforik asit anodizasyon işlemine geçilmiştir. Ağırlıkça %9–12 fosforik asit ve %88–91 oranında saf su içeren solüsyona 9–16 volt arası voltaj verilerek artı kutup ile bağlanmış olan numuneler solüsyona daldırılmıştır. Daldırılan numuneler 19–25 °C solüsyon içerisinde 20–25 dakika bekletildikten sonra saf su ile yıkanmış ve ardından vakumlu fırında 70 °C sıcaklıkta 45 dakika kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numuneler 72 saat süre geçmeden yapıştırma bağlantısında kullanılmıştır.



Şekil 4.5. PAA Anotlama yüzey hazırlanma sürecinin şematik gösterimi

#### 4.3.1.3. Lazer ve kumlama ile yüzeylerin hazırlanması

Kimyasal ve elektrokimyasal olarak uygulanan yüzey hazırlama yöntemlerinde kullanılan çözücülerin çevreye veya insan sağlığına zararlı etkiler oluşturması lazer yöntemi ile ortadan kaldırılabilir. Aynı zamanda lazer ile yüzeyin hazırlanması malzemenin türüne özel olmayıp her malzeme için uygulanabilir niteliktedir. Lazer uygulamasıyla metal dış yüzeyinden organik kalıntılar tamamen kaldırılmakta ve yüzey morfolojisi değiştirilebilmektedir. Bu sayede yapıştırıcı ile malzeme yüzeyi arasında adezyon kuvveti artmaktadır. Yani dolayısıyla bağlantı mukavemeti artmaktadır (Spadaro, Sunseri, & Dispenza, 2007).

Kumlama, işlenecek malzeme yüzeyine yüksek hızlarda parçacıkların püskürtülmesi, fırlatılması temeline dayanan bir mekanik yüzey işleme yöntemidir. Kumlama sanayide yüzey temizleme, boyama, kaplama veya bir yapıştırma öncesi pas, tufal, eski boya ve diğer artıkların temizlenmesi, yüzeyin pürüzlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca yüzeyde basma gerilmeleri oluşturma, yüzey gerilimlerini homojen hale getirme, yüzey alanını arttırma ve malzemelerin şekillendirilmesi amacıyla da kullanılır.

Tez çalışmasında lazer ve kumlama ile de yapıştırma yüzeyleri hazırlanmıştır. Lazer ve kumlama parametreleri daha önce yapılmış olan ön çalışmalara göre belirlenmiştir. Lazer tarama hızı 200 mm/s ve etkin güç 10 W seçilmiştir. Kumlama işlemi, 25-35 AFS çapında silis kumlar kullanılarak 90 derece açı 8 mm nozul ile uygulanmıştır. Lazer ve kumlama işlemi sonrası sonra saf su ile yıkanan numuneler vakumlu fırında 70 °C sıcaklıkta 45 dakika kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numuneler 72 saat süre geçmeden yapıştırma bağlantısında kullanılmıştır.

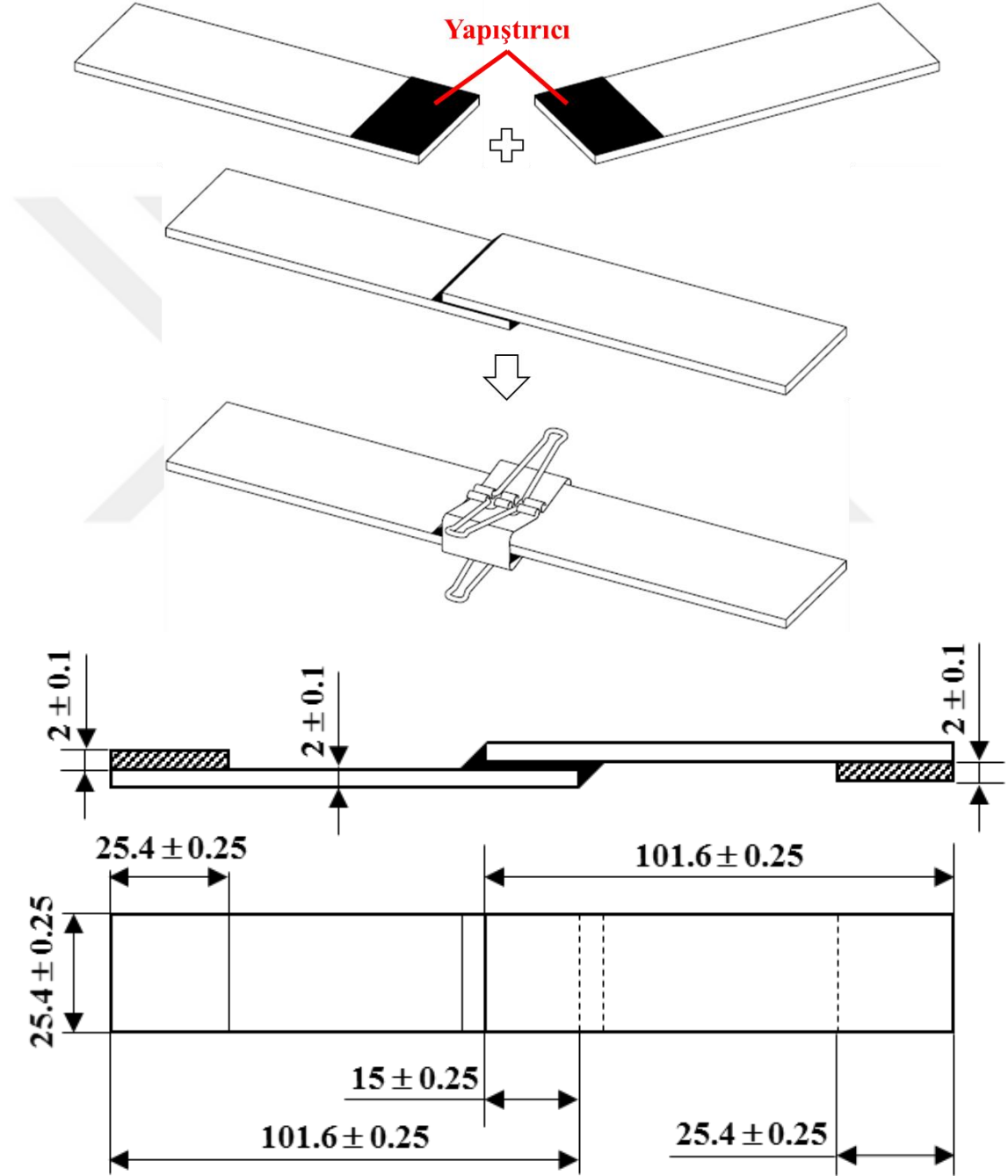
#### **4.3.2. Yüzey hazırlama yöntemlerinin karşılaştırılması**

Farklı yüzey hazırlama yöntemleri ile elde edilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri, yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında (Mohr Perthometer M1) ölçülmüştür. Her ölçüm için üç farklı numune seçilmiş ve bu üç farklı numunenin farklı bölgelerinden en az üç adet pürüzlülük değeri alınmıştır. Hazırlanan yüzeylerin makro ve mikro fotoğrafları çekilmiş ve ayrıca AFM ile yüzey morfolojisi incelenmiştir.

#### **4.3.3. Yüzey hazırlama yöntemlerinin kayma dayanımına etkisinin tespiti**

ASTM D1002–10 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin genişlikleri 25 mm ve boyları ise 101.6 mm' dir. Numunelerin kalınlıkları ise 2 mm' dir. Yapıştırıcı kalınlığı 0.20 mm' dir. Yapıştırıcı bağlantılarında yapıştırma kalınlığını elde etmek için cam bilyeler kullanılmıştır. Ayrıca klipsler yardımıyla yapışma bölgesine eşit basınç uygulanmıştır. Üst üste bindirme uzunluğu 15±0.2 mm'dir. Çekme esnasında meydana gelecek eğilme momentini en aza indirmek ve çekme düzlemini cihaz ile aynı doğrultuda bağlamak için numunelere karşılıklı olarak numuneler ile aynı kalınlıkta desteklerle tutturulmuştur. Her bir numune türü için en az beş numune çekme deneyine

maruz bırakılmıştır. Çekme deneylerinde çekme hızı ilgili standarda uygun olarak 1 mm/dk. olacak şekilde çekme deneyleri yapılmıştır. Kayma deneyleri universal çekme test cihazında (Instron 8801) gerçekleştirilmiş olup numunelerin uzamaları dinamik ekstansometre (Instron 2630-602) ile ölçülmüştür. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının hazırlanması ve tek bindirmeli yapıştırma bağlantısına ait ölçülendirmeler Şekil 4.6.' da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının hazırlanması ve birleştirme ölçüleri

#### **4.4. SiO<sub>2</sub> İlavesinin Yapıştırma Bağlantısı Üzerindeki Etkisinin Tespiti**

Tez çalışmasında yapıştırıcının mekanik özellikleri ve yüzey özelliklerinin bağlantı üzerindeki etkisi tespit edildikten sonra SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin yapıştırma bağlantısının dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

##### **4.4.1. SiO<sub>2</sub> ilave miktarının kayma dayanımına etkisinin tespiti**

SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave miktarının kayma dayanımına etkisinin tespiti, yüzey hazırlama yöntemlerinin kayma dayanımına etkisinin tespiti ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir (Bkz. Bölüm 4.3.3.).



## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. SiO<sub>2</sub> Nanopartikül İlavesinin Yapıştırıcı Performansına Etkisi

Bu bölümde, SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozit yapıştırıcıların mekanik özellikleri, hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri, DSC/TG analizleri ve FT-IR spektrumu incelenmiştir.

#### 5.1.1. Yapıştırıcının mekanik özellikleri

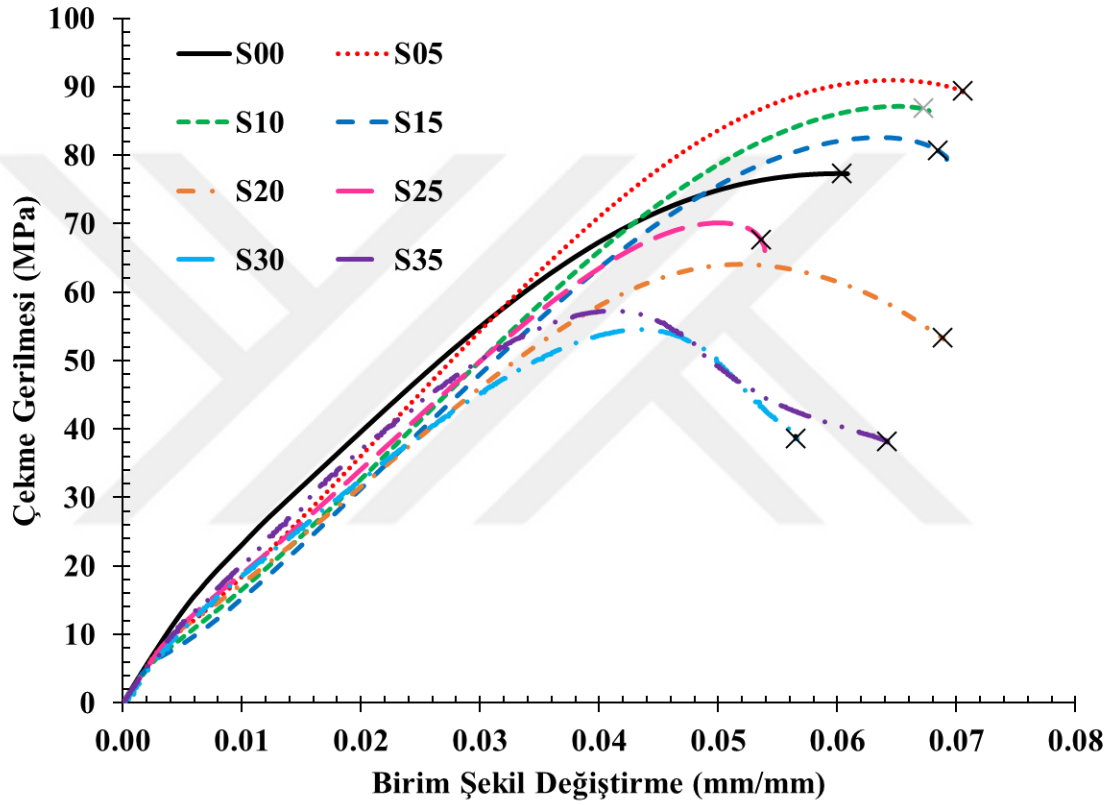
Çekme deneyleri sonucu elde edilen maksimum çekme dayanımı–birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.1.' de verilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen maksimum çekme dayanımı, % çekme uzaması ve tokluk grafikleri Şekil 5.2.' de gösterilmektedir. Kontrol numunesi olan saf epoksiye ait özelliklere göre mekanik özelliklerde meydana gelen değişim oranları Çizelge 5.1.' de verilmiştir.

Maksimum çekme dayanımı açısından en yüksek değer saf epoksiye göre %15.70 artış ile ağırlıkça %0.5 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli numunede gerçekleşmiştir. Ağırlıkça % nanopartikül ilave oranının artmasıyla mukavemette düzenli bir düşüşün gerçekleştiği görülmüştür. Ağırlıkça %3.0 ve %3.5 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinde sırasıyla %29.41 ve %27.82 azalış ile en düşük sonuçlar elde edilmiştir. SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerin ağırlıkça %0.5 ve 1.0 oranlarında en iyi homojen dağılımı göstermesi ve elde edilen homojen dağılımla nano partiküllerin epoksi matris ile kuvvetli bir ara yüzey oluşturmasının mukavemeti arttırıcı bir etki yaptığı düşünülmektedir. Bununla birlikte epoksi reçinenin içerisindeki SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerin varlığı termal bir etki yaparak makro moleküller arasındaki serbest alanı daraltıp çapraz bağ yoğunluğunu arttırmıştır. Çapraz bağ yoğunluğunun artması ile doymamış bağ yoğunluğunu azalttığı ve bu durumun mukavemeti arttırdığı düşünülebilir. Nanopartikül miktarının artması ile nanopartiküllerin aglomera olması, epoksi reçine ile partikül etkileşimi düşürerek mukavemetin azalmasına yol açmıştır.

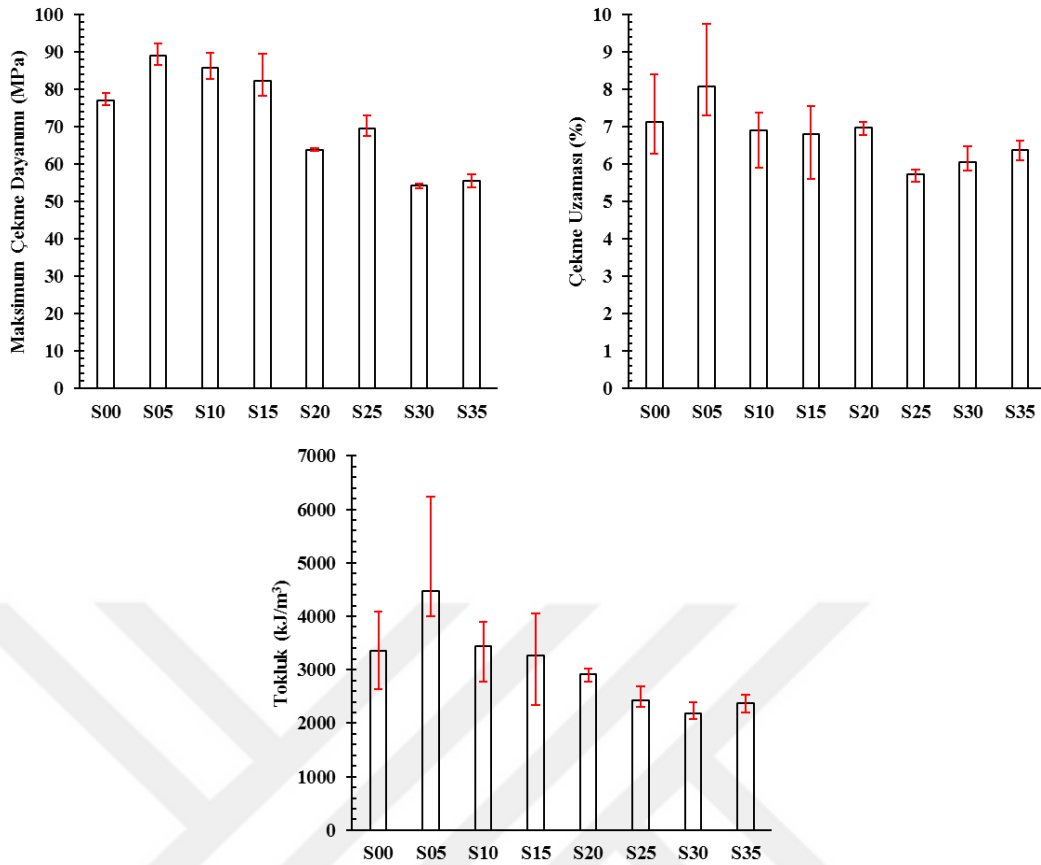
% çekme uzamaları dikkate alındığında %2.0 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave oranına kadar değişmediği varsayılabilecek kadar küçük bir oranda azaldığı, partikül ilave oranı arttığında ise büyük oranda düşüşün gerçekleştiği görülmektedir. Ağırlıkça %0.5 SiO<sub>2</sub>

ilave oranında %13.19 oranı ile tek yükselme gerçekleşmiştir. En büyük düşüş ise %19.69 oranında, ağırlıkça %2.5 nanopartikül ilaveli numunede görülmüştür.

Tokluk açısından değerlendirildiğinde, ağırlıkça %0.5 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilave oranında değerler %33.66 arttığı ancak ilave oranı arttıkça tokluğun azaldığı görülmüştür. En düşük değer %34.94 azalış ile ağırlıkça %3.0 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli numunelerde görülmüştür.



Şekil 5.1. Partikül ilaveli yapıştırıcıların çekme gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.2. Partikül ilaveli yapıştırıcıların mak. çekme dayanımı, % çekme uzaması ve tokluk grafikleri

Çizelge 5.1. Saf epoksiye göre SiO<sub>2</sub> ilave oranına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişim

Numune	Maks. Çekme Dayanımı		Çekme Uzaması		Tokluk	
	(MPa)	% Değişim	(%)	% Değişim	(kJ/m <sup>3</sup> )	% Değişim
S00	76,91	—	7,14	—	3350	—
S05	88,98	+ 15,70	8,08	+ 13,19	4480	+ 33,66
S10	85,79	+ 11,55	6,89	- 03,46	3430	+ 02,45
S15	82,17	+ 06,85	6,80	- 04,79	3260	- 02,77
S20	63,90	- 16,91	6,97	- 02,34	2910	- 13,06
S25	69,65	- 09,43	5,73	- 19,69	2420	- 27,80
S30	54,29	- 29,41	6,06	- 15,07	2180	- 34,94
S35	55,51	- 27,82	6,38	- 10,67	2370	- 29,30

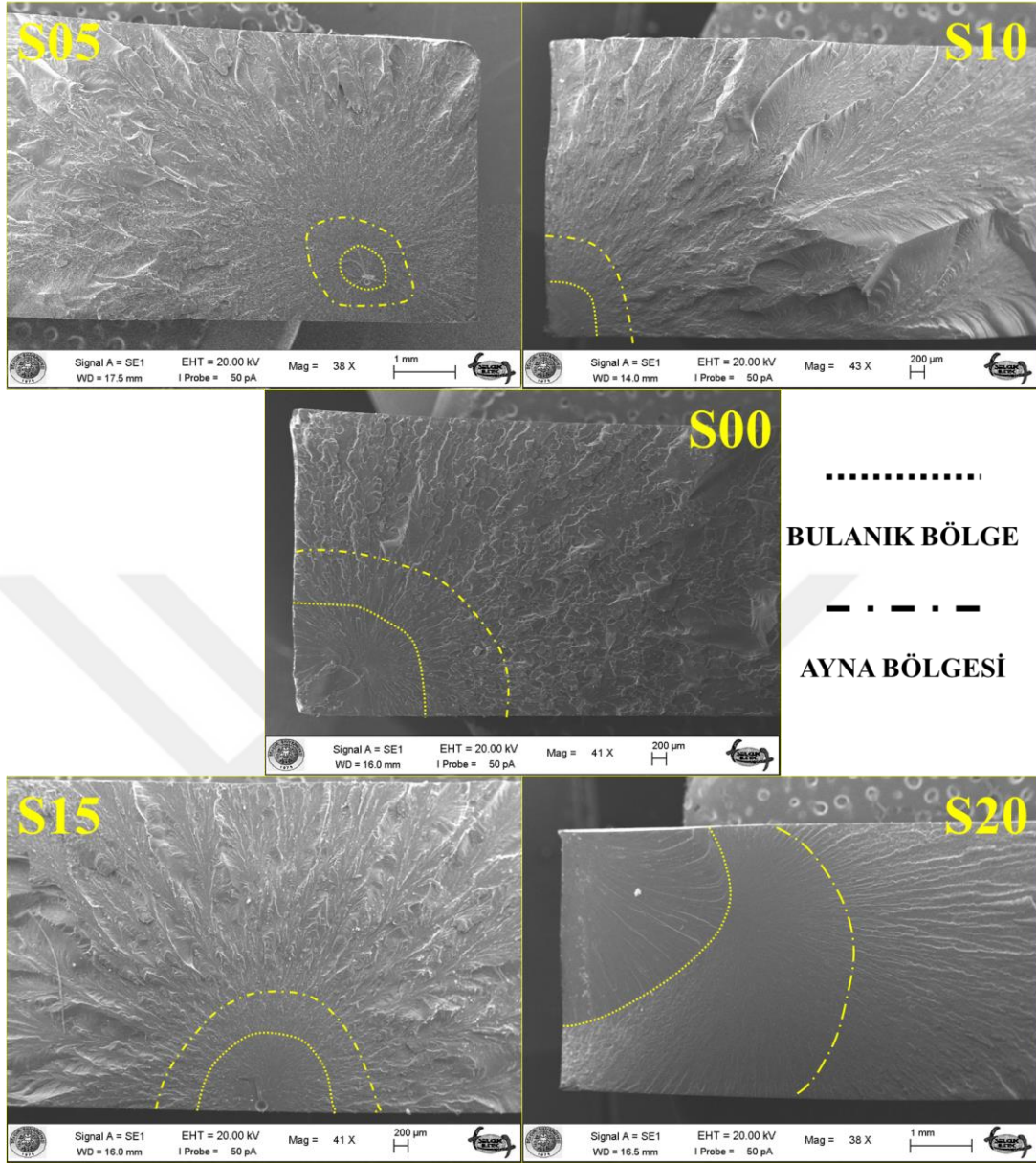
DGEBA ve DGEBF reçinelerinin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalarda çekme dayanımı 55–60 MPa aralığında verilmiştir (W. Chen, Shen, Auad, Huang, & Nutt, 2009; Y.-C. Chen et al., 2003; Demirci, 2015; Gojny, Wichmann, Köpke, Fiedler, & Schulte, 2004; Mohan, Kumar, & Velmurugan, 2006; Zhao & Luo, 2008). Çalışmamızda kullanmış olduğumuz epoksi reçine DGEBA olup üretici tarafından verilen çekme dayanımları ile yapmış olduğumuz deneyler örtüşmüştür. Üretici tarafından 70 – 80 MPa olarak verilen dayanım değeri deneylerimizde ortalama



olarak 76.91 MPa bulunmuştur. Çalışmamızda ağırlıkça %0.5 ve %1.0 SiO<sub>2</sub> nanopartikülü ile en iyi dayanım değerleri elde edilirken literatürde genellikle ağırlıkça %3-5 ilave oranında en iyi çekme dayanımı sonuçlarına ulaşılmakla birlikte ağırlıkça %1.0 ilave oranında da en iyi çekme dayanımının olduğu çalışmalar bulunmaktadır (Battistella et al., 2008; Demirci, 2015; F. H. Su, Zhang, & Liu, 2007; Ulus et al., 2014; Zhao & Luo, 2008). Ağırlıkça %0.5 ilave oranında kontrol numunesine göre %16 artış ve ağırlıkça %1.0 ilave oranında kontrol numunesine göre %12 artış çekme dayanımlarında elde edilirken literatürdeki çalışmalarda daha yüksek ilave oranlarında çekme dayanımında %10-15 artış elde edildiği görülmüştür. Çalışmamızda daha düşük ilave oranlarında benzer artış değerlerinin elde edilmesinin nedeni olarak materyal ve yöntemdeki farklılıklar düşünülmektedir. Kür parametrelerinin ve karıştırma proseslerinin dayanım değeri üzerinde etkili olduğu, ayrıca partikülümüzde bulunan silan modifikasyonunun da çekme dayanımı üzerinde etkiye sahip olduğu kanaati tarafımızda oluşmuştur.

### **5.1.2. Yapıştırıcının kırılma yüzeylerinin hasar analizi**

Şekil 5.3.' de saf epoksi ve epoksi/nanokompozit yapıştırıcıların çekme testleri sonucu elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerini verilmiştir. Genel olarak termoset polimerlerin çekme kırılma yüzeylerinde ayna (mirror), bulanık (mist) ve çentik (hackle) kırılma bölgeleri oluşmaktadır (Goyat, Suresh, Bahl, Halder, & Ghosh, 2015). Yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerinde bu üç bölge gösterilmiştir (Şekil 5.3.). Kırılmanın başlangıç aşamasında, çatlak büyümesi çok yavaş bir şekilde başlarken daha sonra hızlanmakta ve ayna bölgesi ismi verilen nispeten pürüzsüz bir yüzey oluşturmaktadır. Ayna bölgesi, biraz daha pürüzlü ve çok ince bir bölge olan bulanık bölgeyle çevrelenmiştir. Çatlak ilerlemesinin en hızlı düzeye ulaştığı ve çatlakların çatallaşma formunda enerji yığılma dağılımının yoğunlaştığı durumda bulanık bölge çok daha geniş bir çentik bölge ile çevrelenmiştir (Roulin-Moloney, 1989).

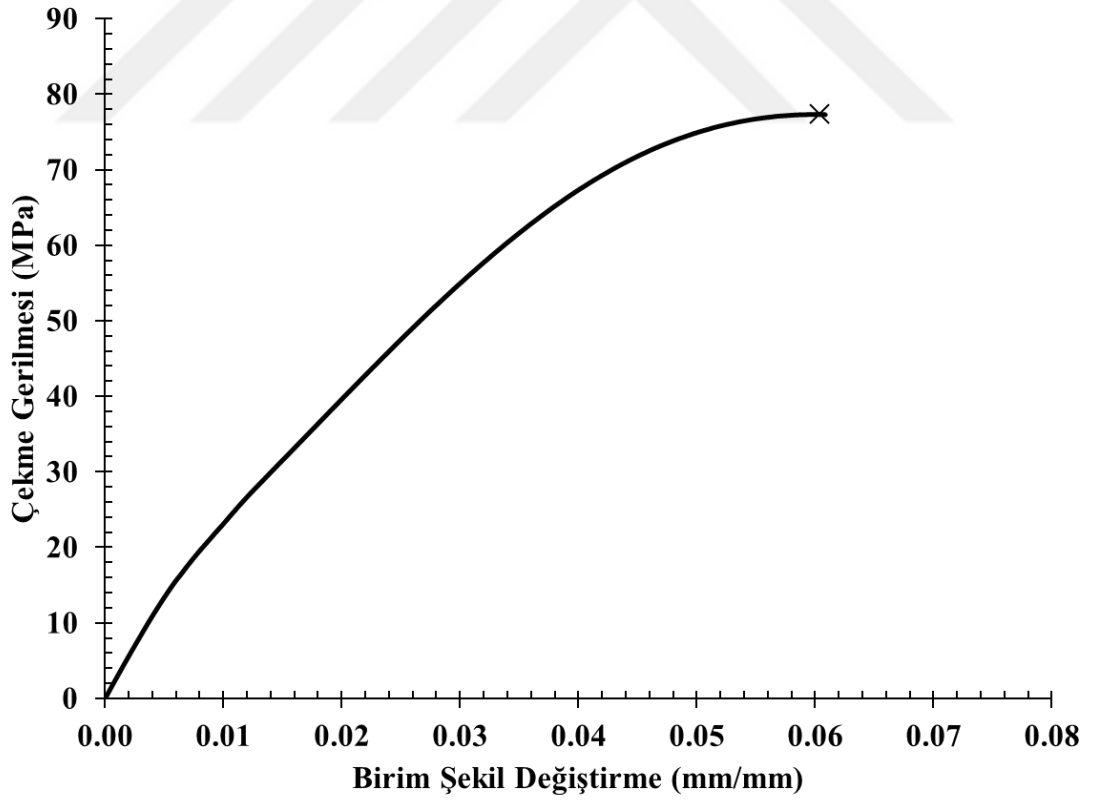
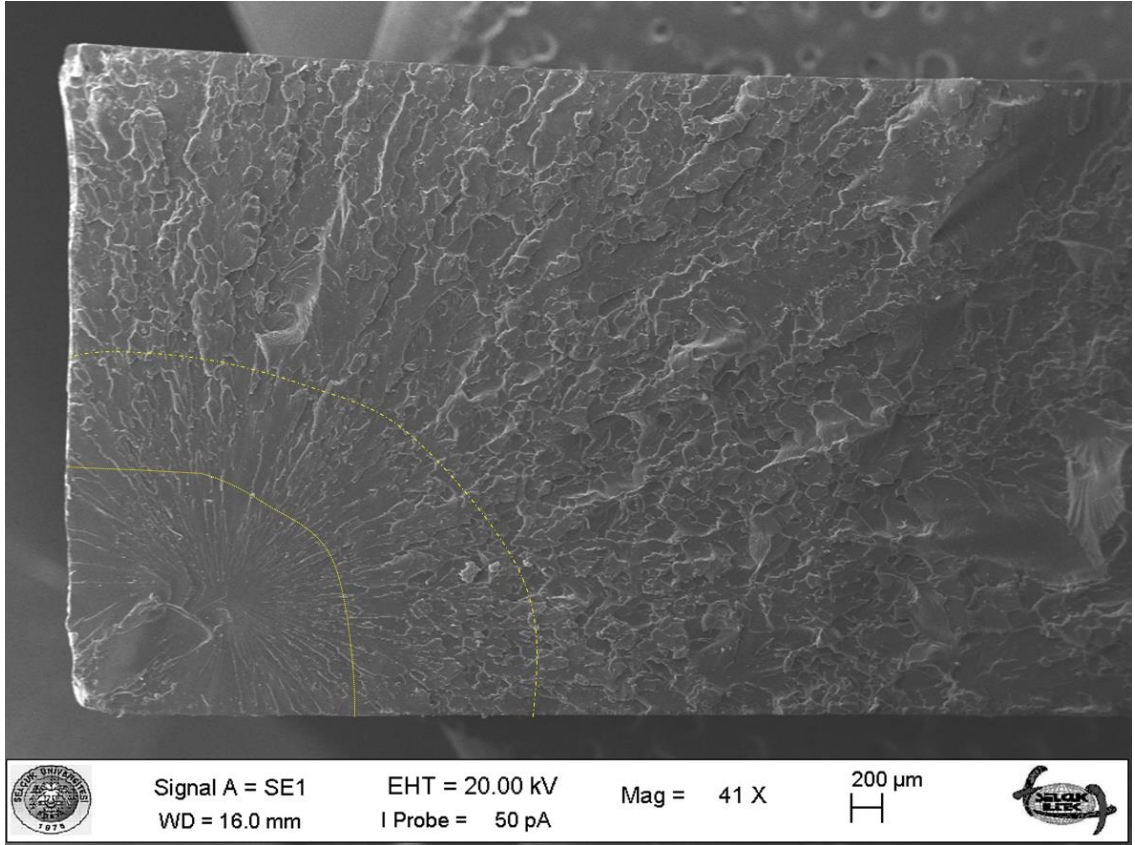


**Şekil 5.3.** Çekme numunesi hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

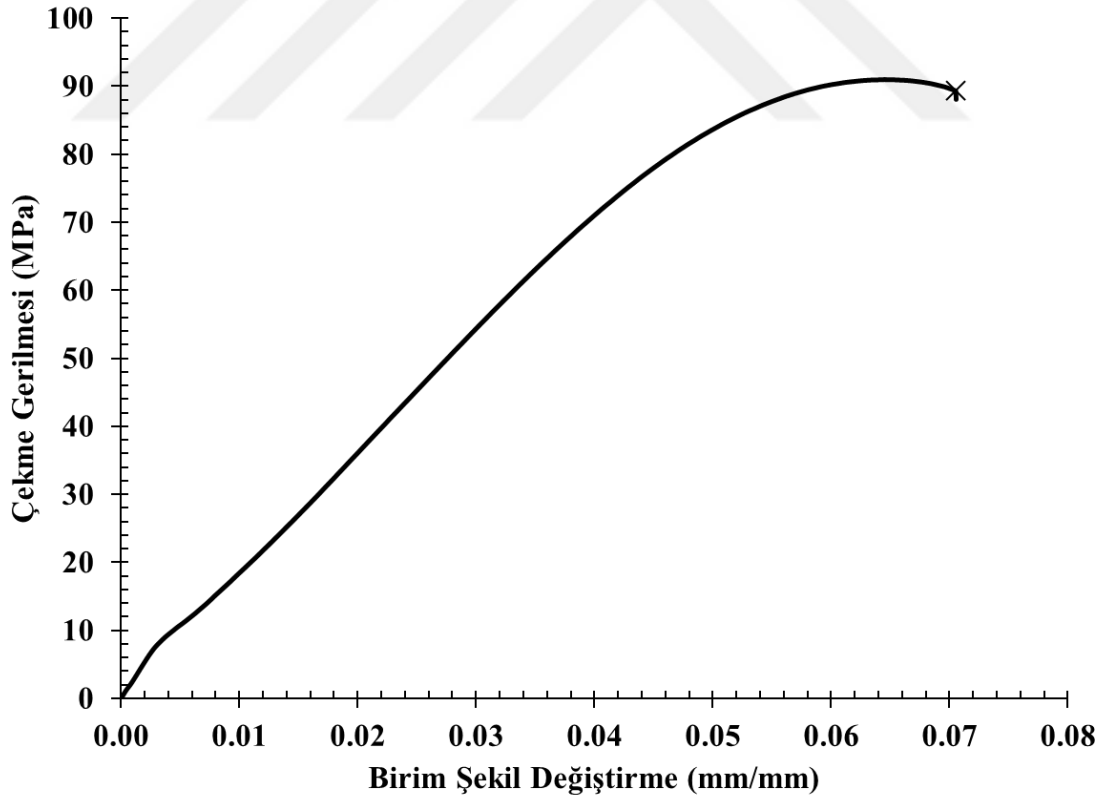
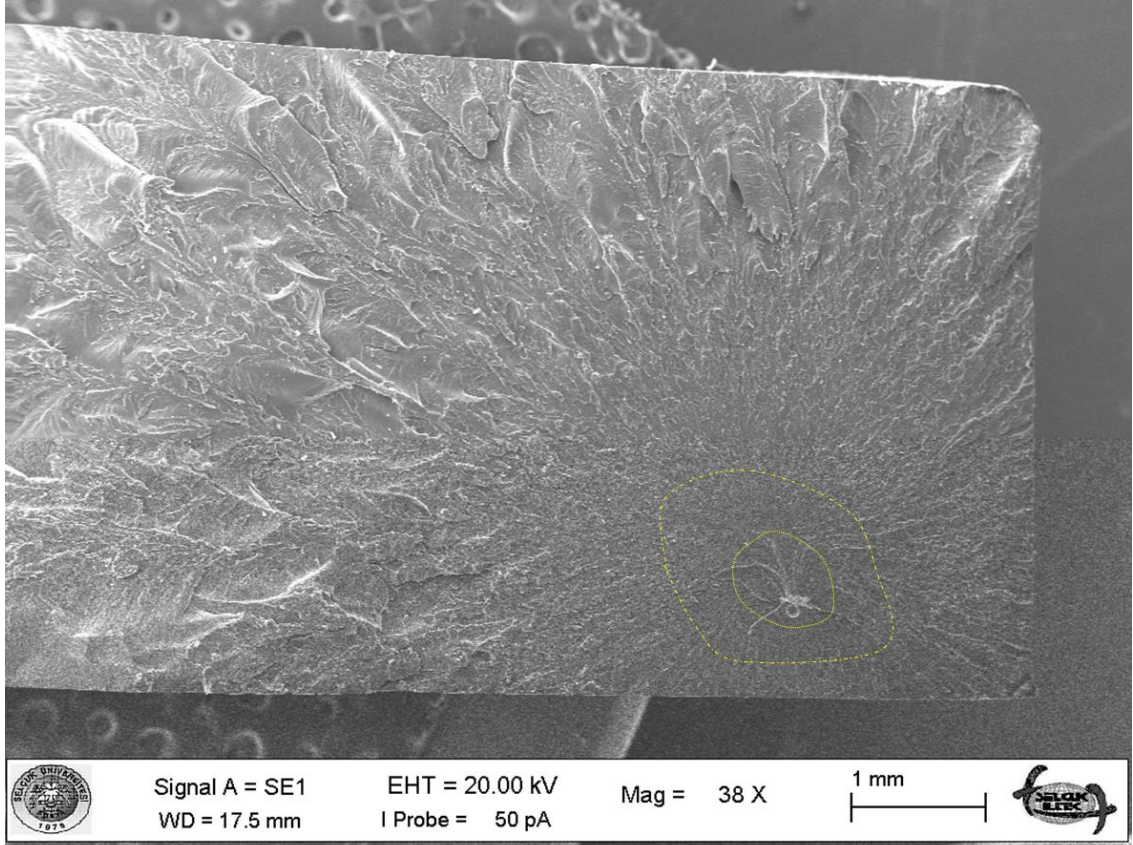
Şekil 5.3.'te gösterilen hasar yüzeylerinde S00 numunesinin ayna bölgesinin geniş bir bölge kaplandığını görüyoruz. S05 ve S10 numunelerinde çok dar alanda ayna bölgesi oluşurken S15 numunesinin ayna bölgesi S00 numunesine yakın gerçekleşmiştir. S20 numunesinde ise ayna bölgesi S00 numunesinden daha geniş bir bölge kaplamaktadır. Bulanık bölgeler için de aynı durum geçerlidir. Çizelge 5.1.'de gösterilen çekme dayanımı değerleri ile bu bölgeler karşılaştırıldığında uyumlu olduğunu görmekteyiz. Çentik bölgelerine baktığımızda en az pürüzlülüğün S20 numunesinde gerçekleşirken S05, S10 ve S15 numunelerinin çentik bölgeleri S00 numunesine kıyasla daha pürüzlü gerçekleşmiştir. Ayrıca nehir çizgilerinin kırma

boyunca oluştuğu ve nehir çizgilerinin S20 numunesinde görülmeyen bir Şekilde dallandığı görülmektedir. Bölge genişlikleri, pürüzlülükleri ve hasar yn çizgilerinin dallanmasının partikül ilavesinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Partiküllerin hasar yüzeyleri üzerinde oluşumuna neden olduğu bu yapıların mekanik özelliklerle ilişkilisi kurulabilir (Gao et al., 2008).

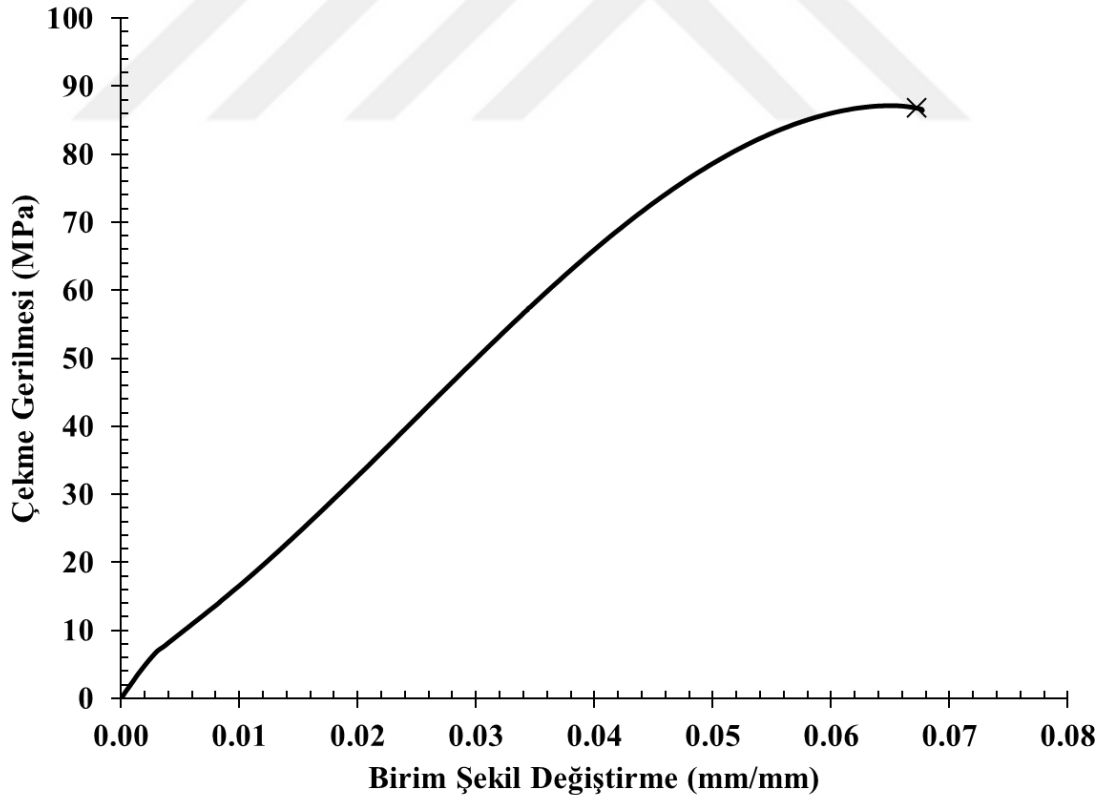
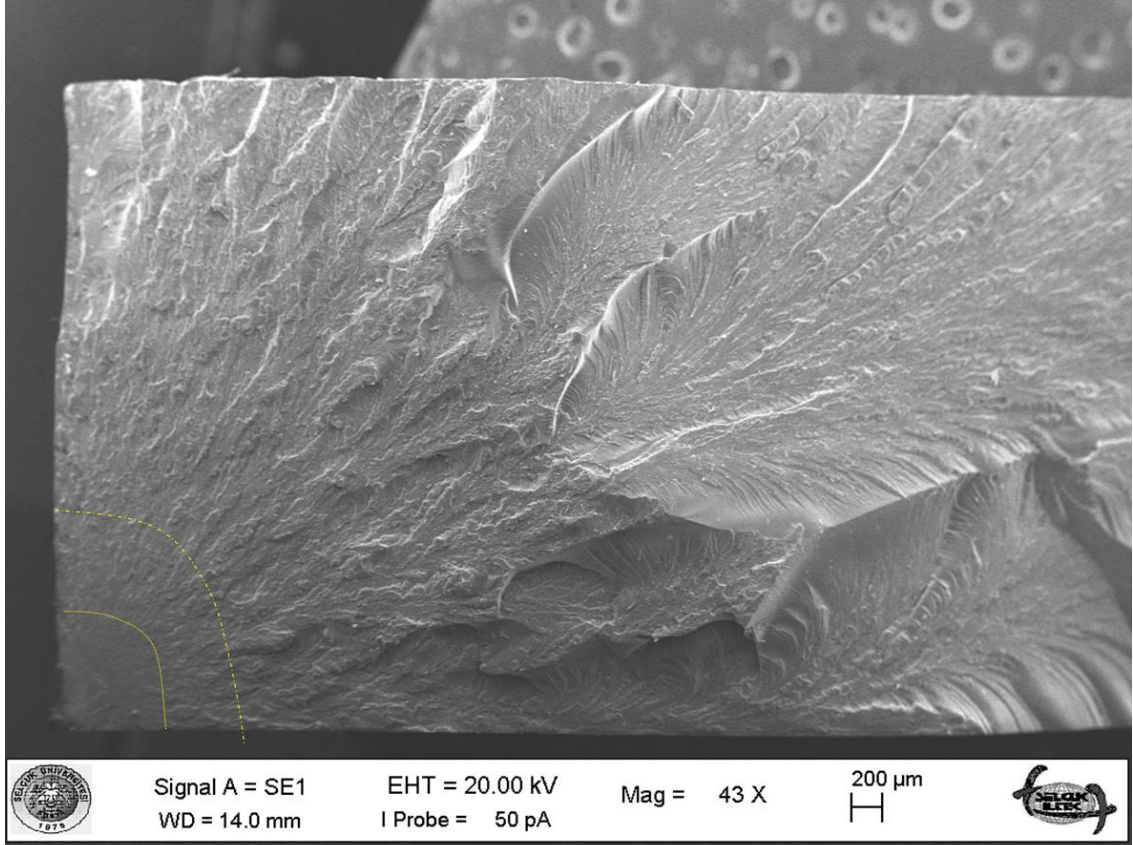




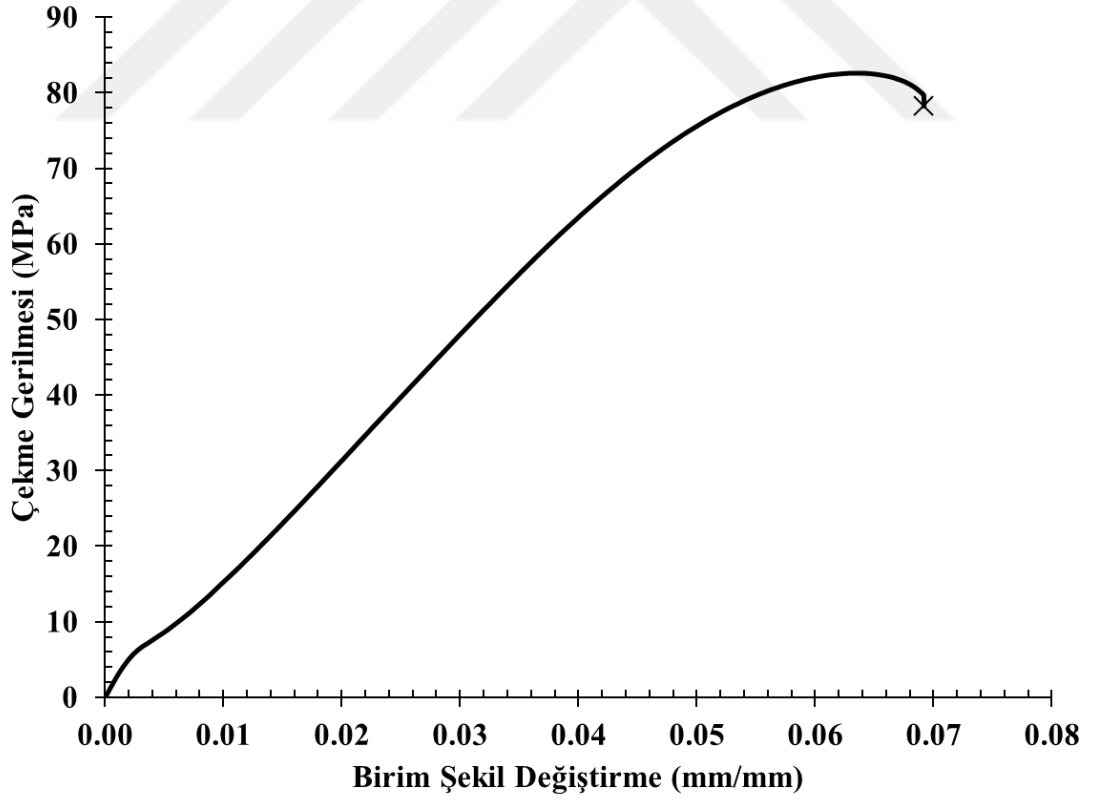
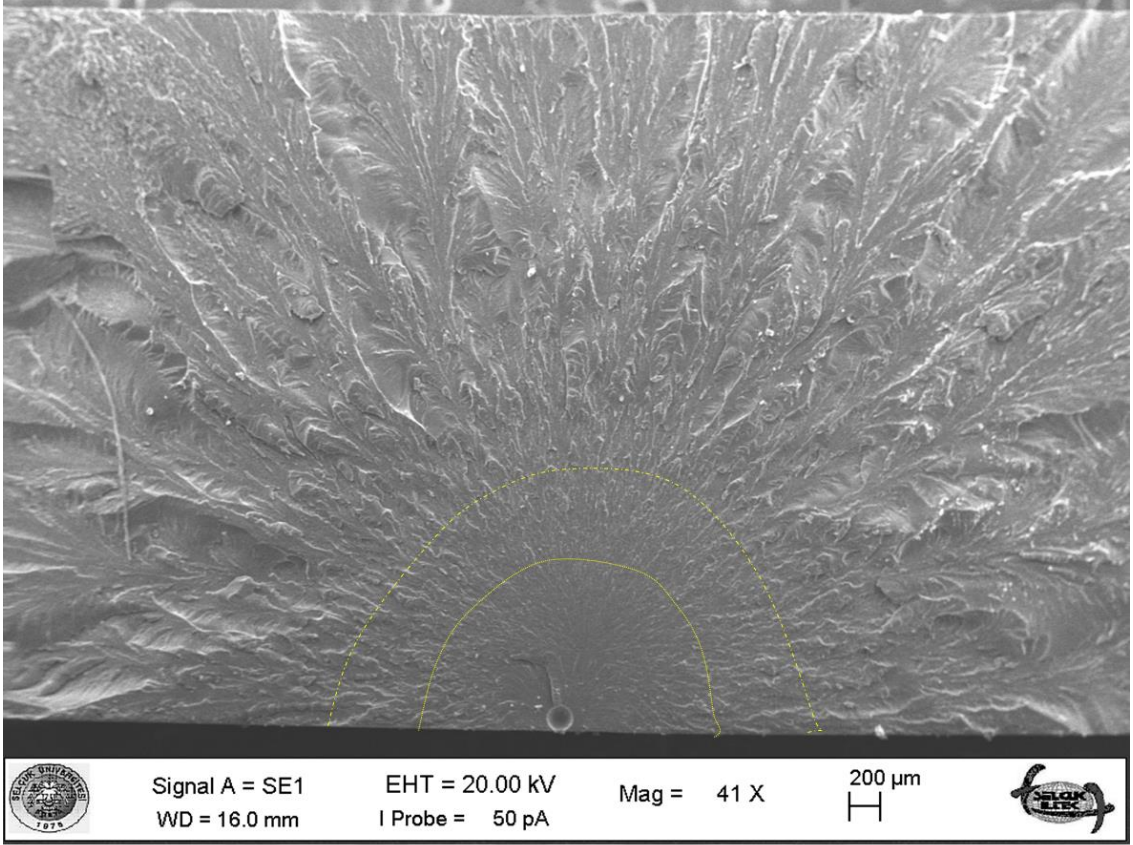
Şekil 5.4. S00 – Çekme numunesi hasar yüzeyi ve çekme dayanımı-birim şekil değişirme grafiği



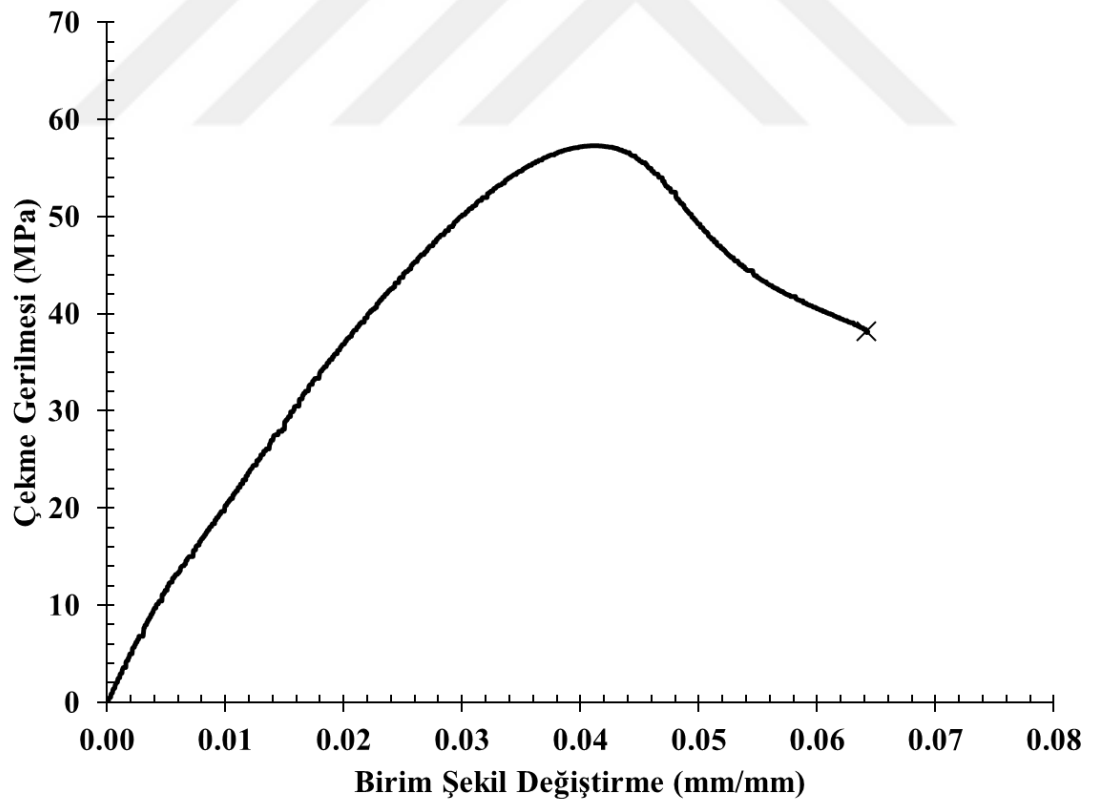
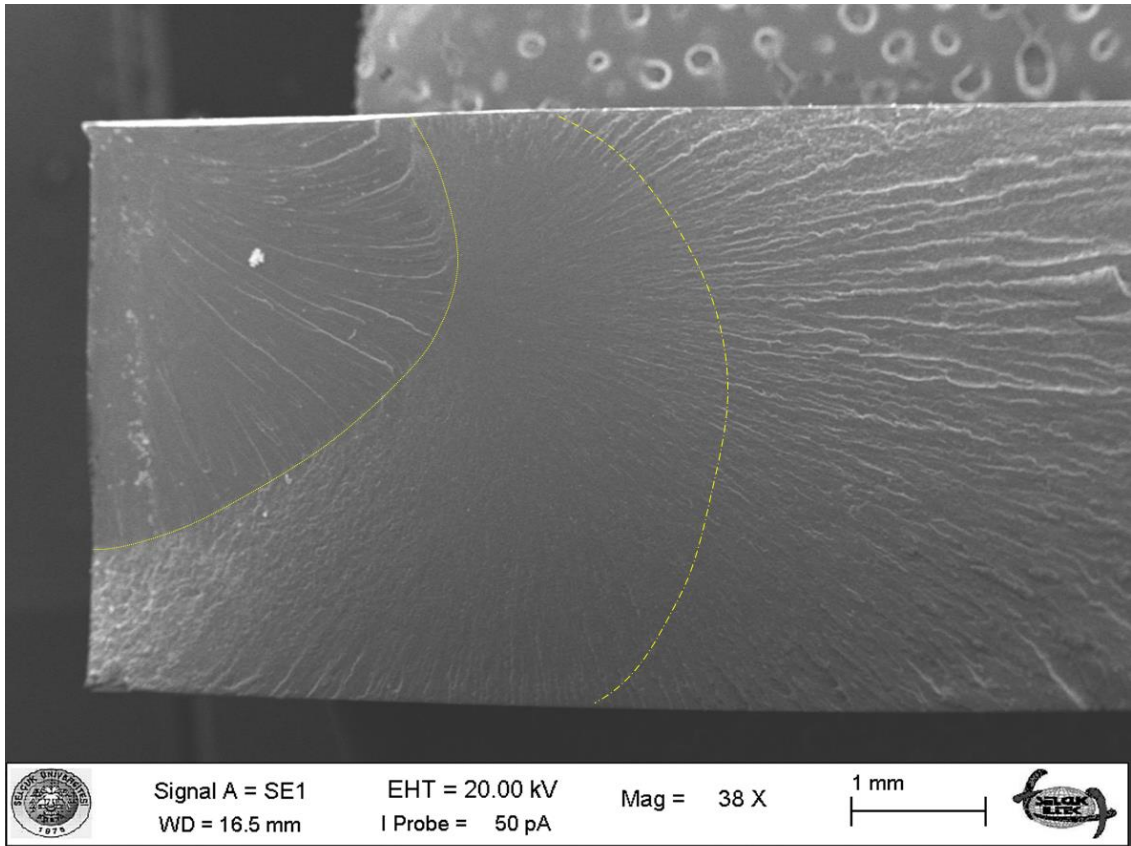
Şekil 5.5. S05 – Çekme numunesi hasar yüzeyi ve çekme dayanımı-birim şekil değişirme grafiği



Şekil 5.6. S10 – Çekme numunesi hasar yüzeyi ve çekme dayanımı-birim şekil değiştirme grafiği

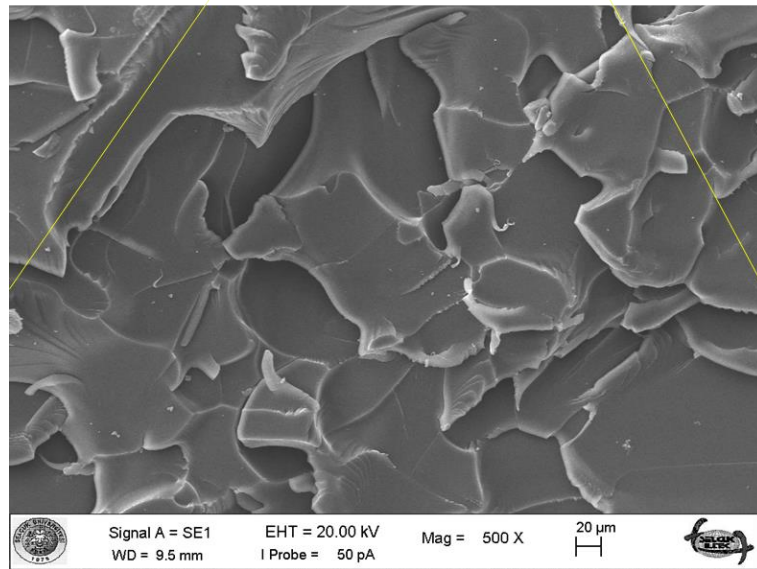
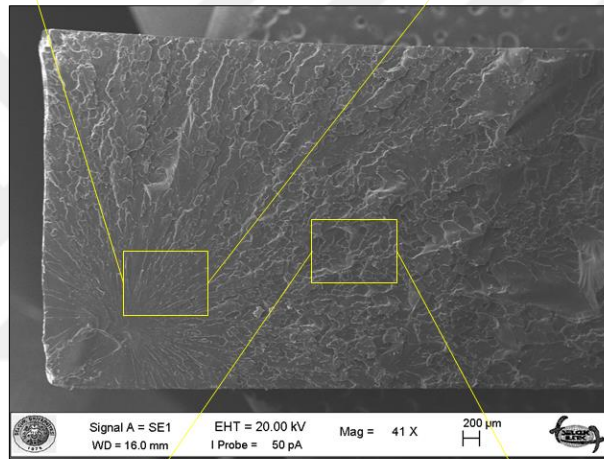
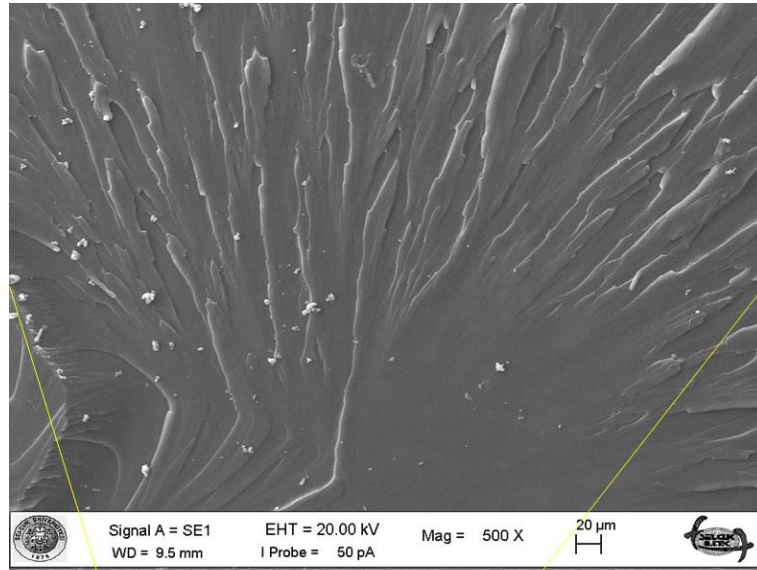


Şekil 5.7. S15 – Çekme numunesi hasar yüzeyi ve çekme dayanımı-birim şekil değıştirme grafiği



Şekil 5.8. S35 – Çekme numunesi hasar yüzeyi ve çekme dayanımı-birim şekil değıştirme grafiği

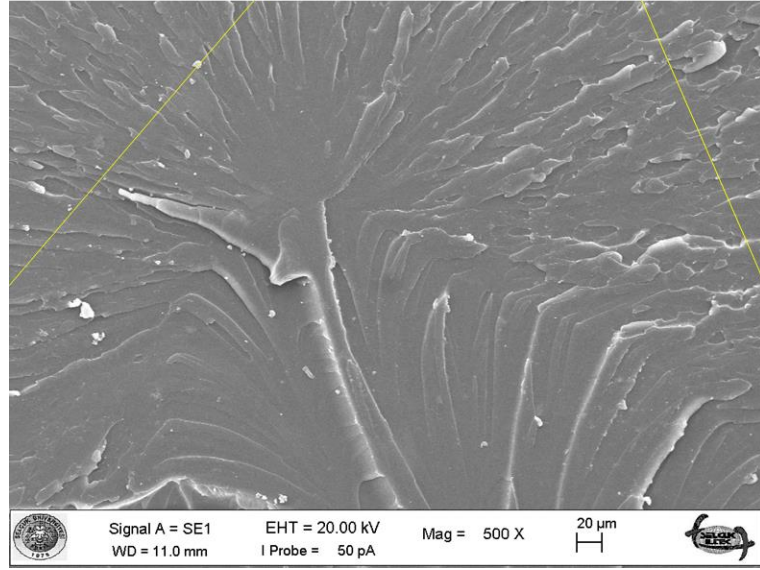
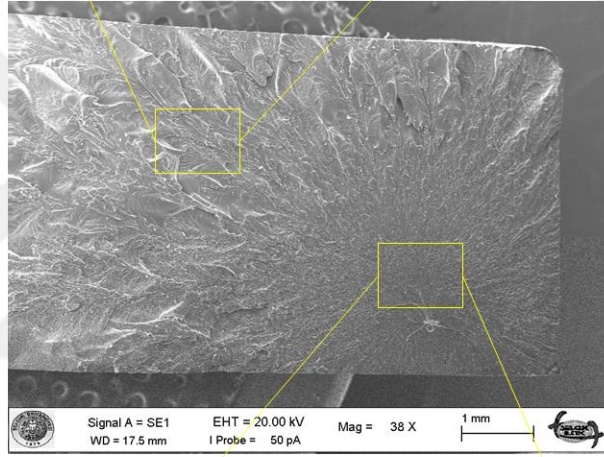
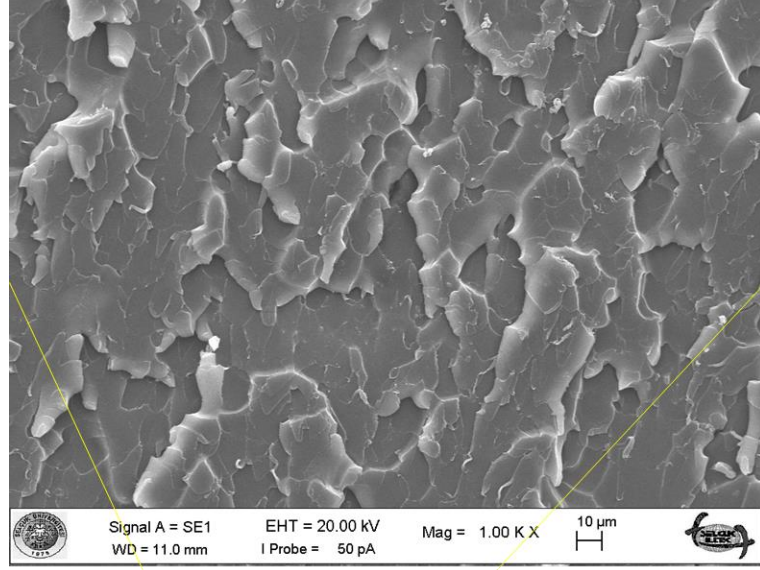




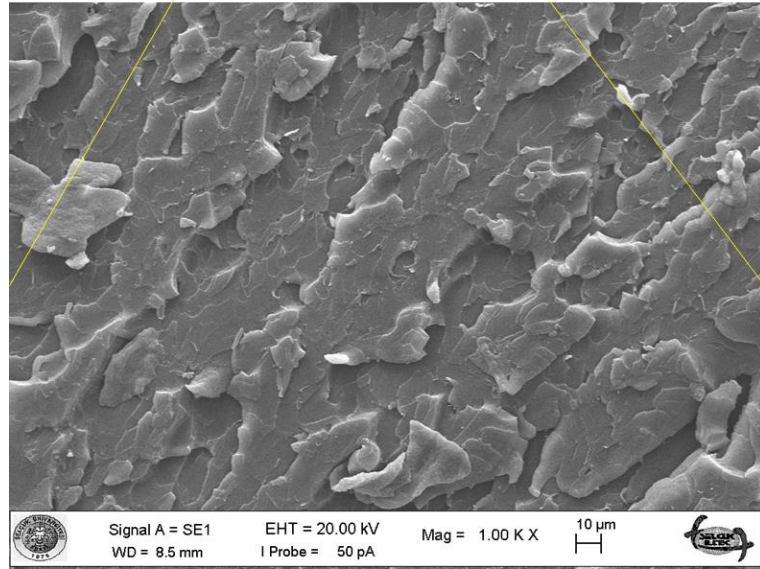
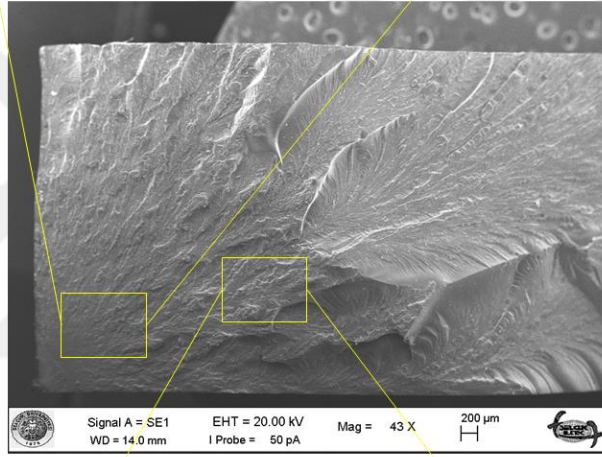
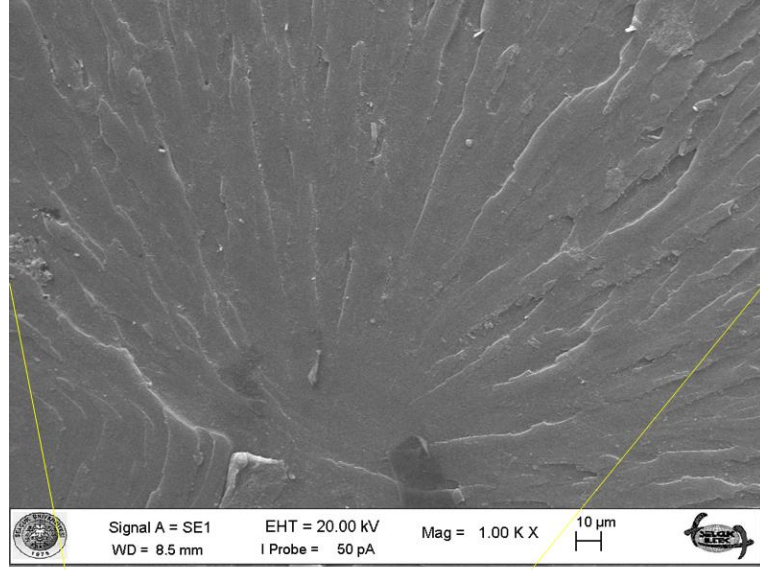
Şekil 5.9. S00 – Çekme numunesi bölgesel hasar yüzeyi

S00 numunesine ait hasar yüzeyleri incelendiğinde kırılma çizgilerinin aralarında vadilerin olduğu ve oldukça pürüzsüz bir yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 5.9.). Kırılma yüzeylerinde kırılma çizgilerinin keskin hatlara sahip olması ve yüzeylerin pürüzsüz olması kırılmanın ilerlemesi halinde plastik deformasyona uğramadığı ve gevrek bir kırılmanın kanıtı olduğu yorumu yapmayı sağlamaktadır (Brunner et al., 2006; Demirci, 2015; Manjunatha, Taylor, Kinloch, & Sprenger, 2010; X. Zhang, Xu, Xia, Zhang, & Yu, 2006b; Zheng, Zheng, & Ning, 2003a).

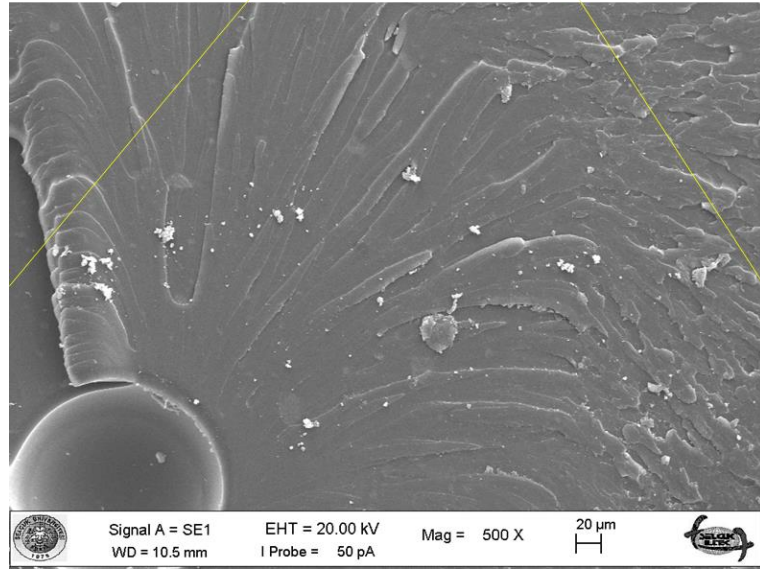
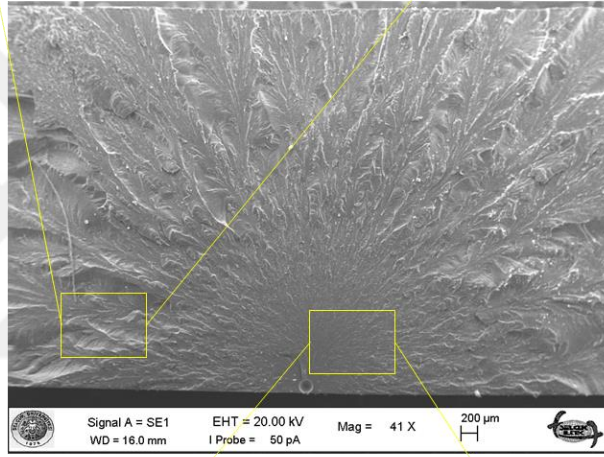
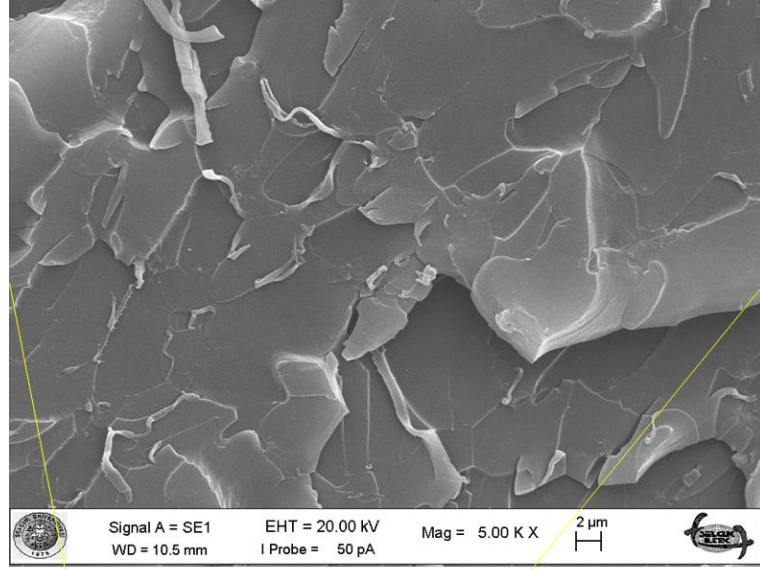




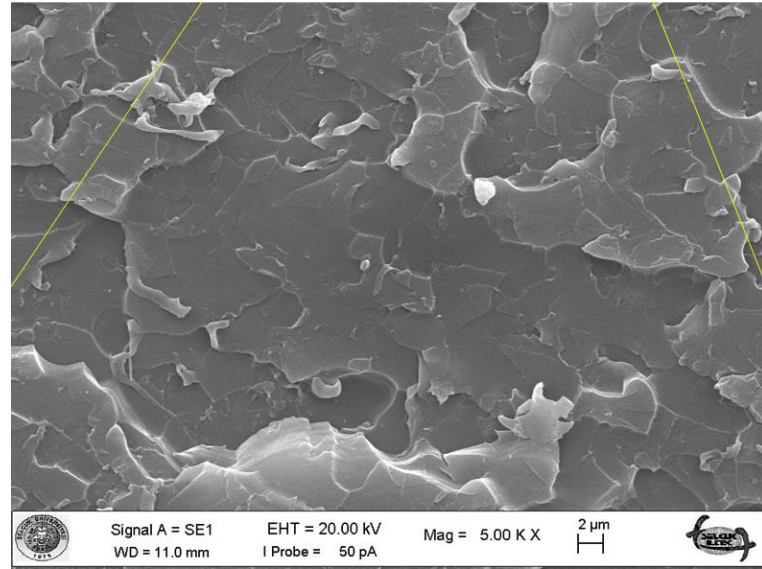
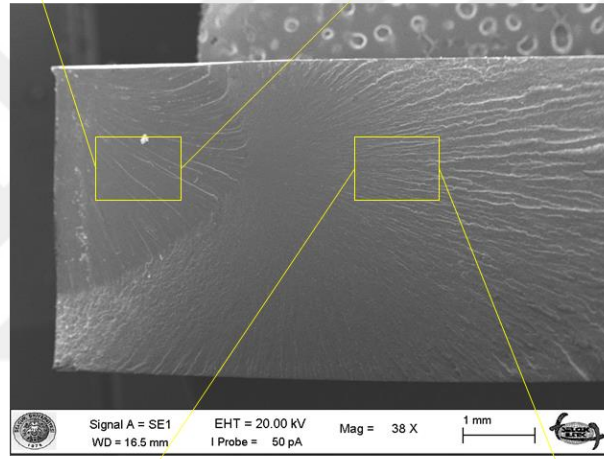
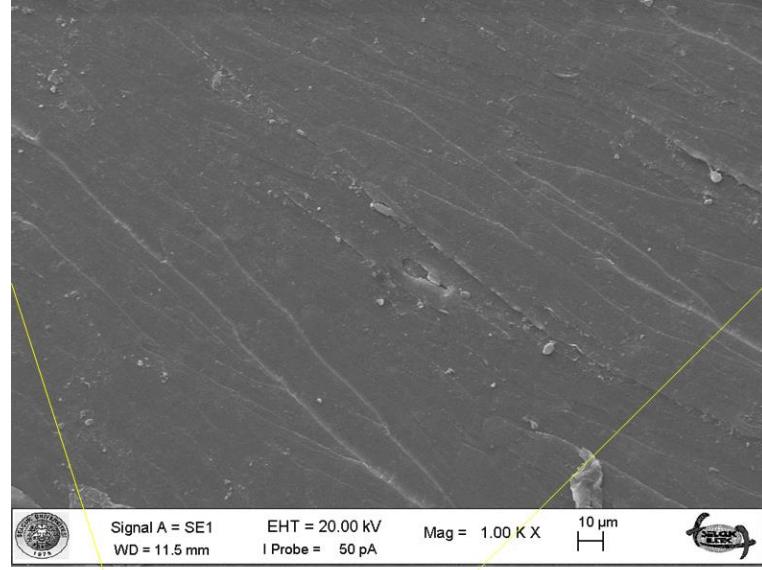
Şekil 5.10. S05 – Çekme numunesi bölgesel hasar yüzeyi



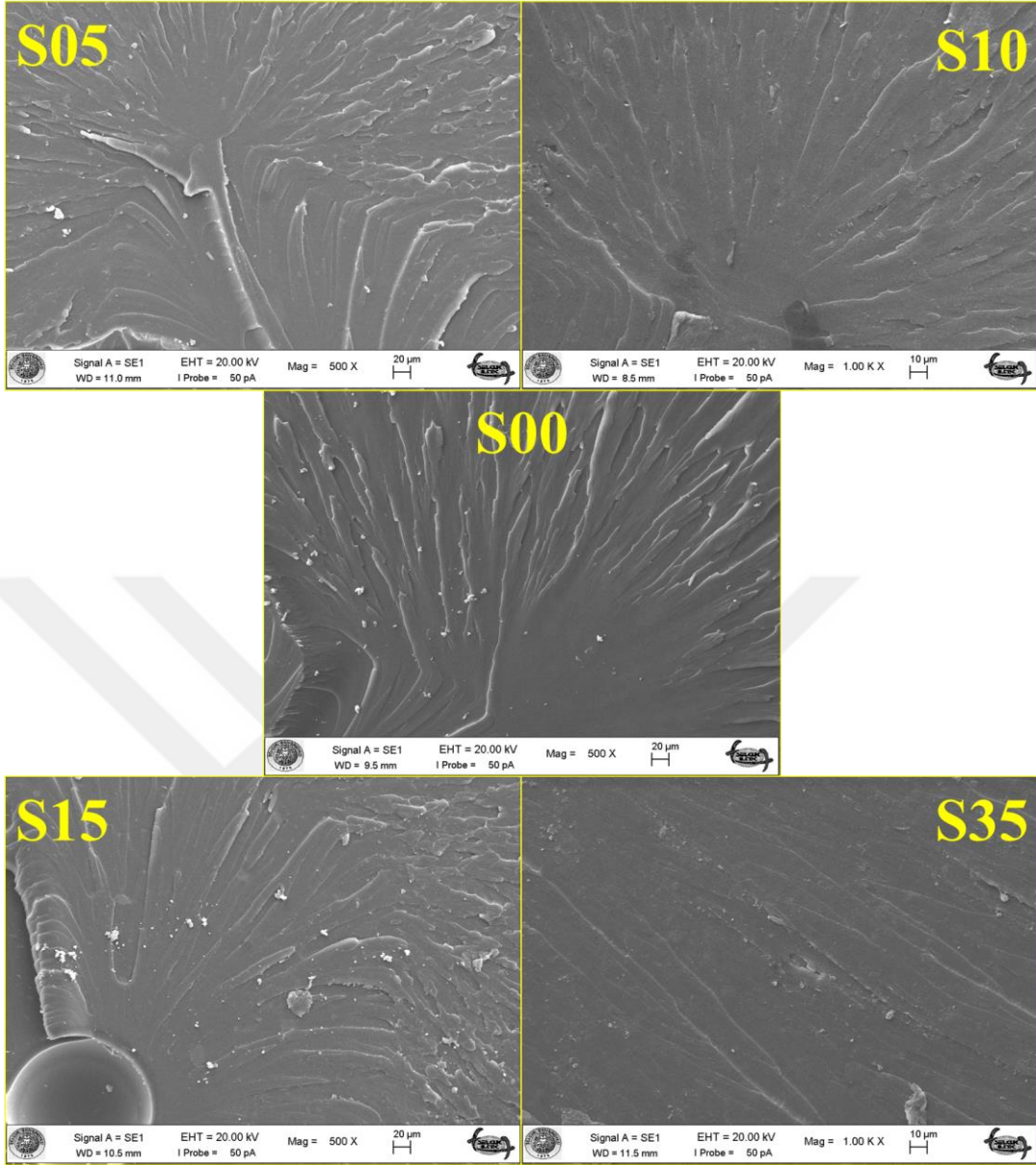
Şekil 5.11. S10 – Çekme numunesi bölgesel hasar yüzeyi



Şekil 5.12. S15 – Çekme numunesi bölgesel hasar yüzeyi

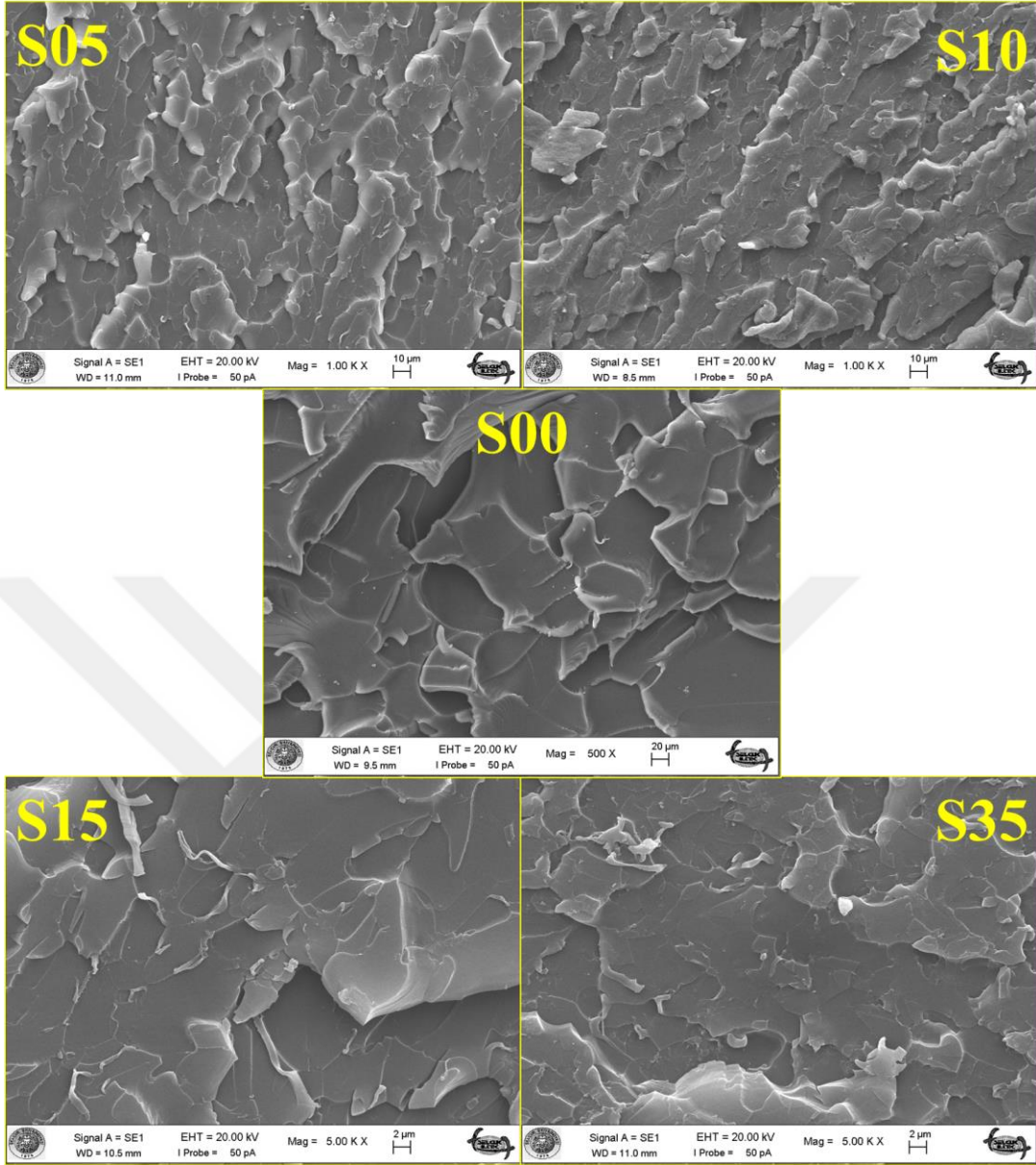


Şekil 5.13. S35 – Çekme numunesi bölgesel hasar yüzeyi



**Şekil 5.14.** Çekme numunesi hasar yüzeyi – ayna/bulanık bölge karşılaştırma

Ağırlıkça %0.5 partikül ilave miktarına sahip olan S05 numunesinden ağırlıkça %1.5 partikül ilave miktarına sahip olan S15 numunesine kadar olan ilave miktarlı numunelerde ayna bölgesinden başlayan çatlaklar bulanık bölgeden çentik bölgesine geçerken yöneldikleri, S00 ve S35 numunelerinde bu yönelmenin oluşmadığı ve S15 numunesinde ise yönelme açısının düştüğü görülmüştür (Şekil 5.14.). Yönelme açısının çekme dayanımı üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir.



**Şekil 5.15.** Çekme numunesi hasar yüzeyi – çentik bölgesi karşılaştırma

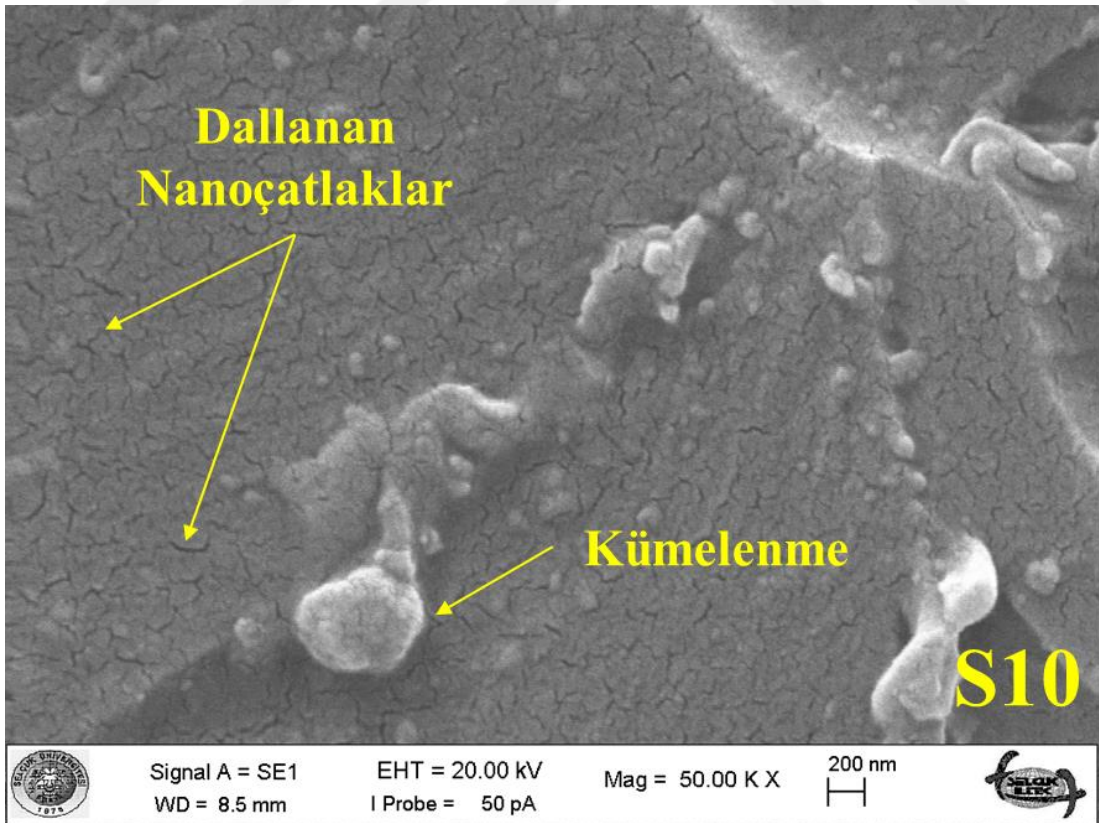
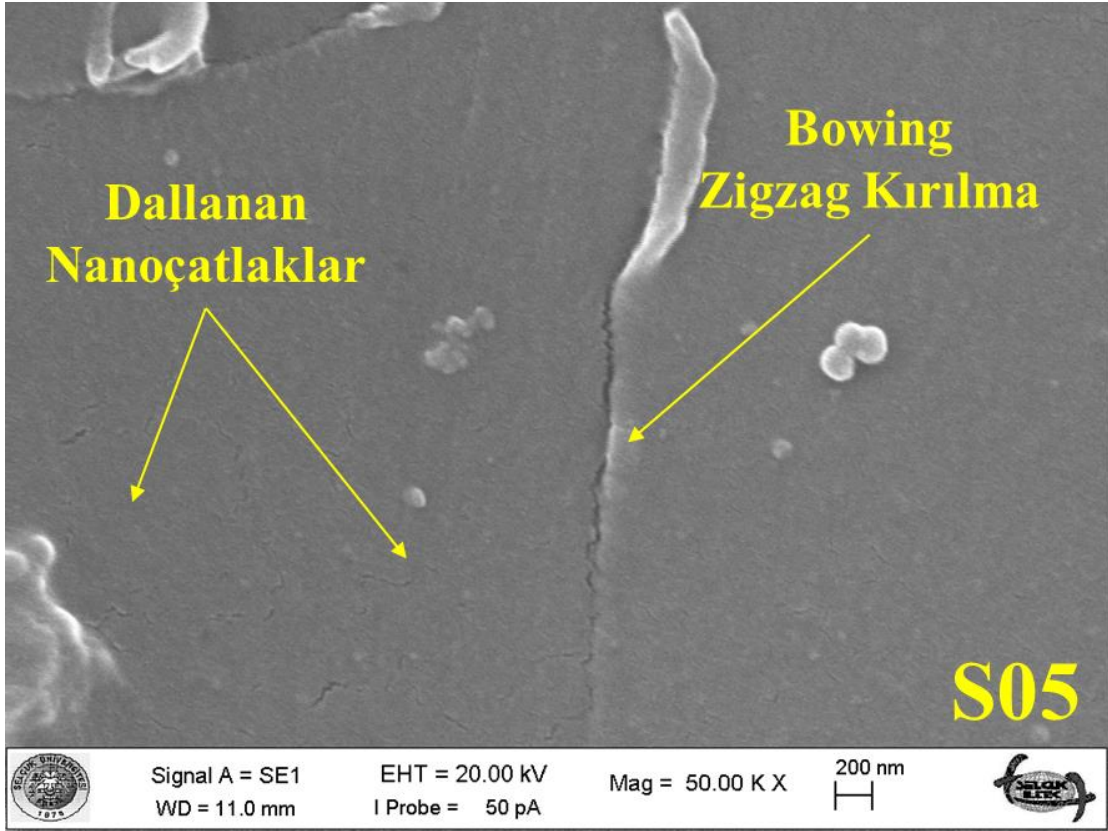
Çentik bölgesinde meydana gelen oyuk pürüzlülüklerinin S00 numunesinde düşük olduğu ve gevrek kırılma bölgelerinin olduğu görülmektedir (Şekil 5.15.). En büyük pürüzlülük ise S05 ve S10 numunelerinde oluşmuştur.

Nanopartikül ilaveli numunelerin çentik bölgelerinde rasgele çatlak yönlenmelerin olduğu görülmüştür (Shiqiang Deng et al., 2007; X. Zhang et al., 2006a). Bu rastgele çatlak yönlenmeleri, yük transferinin zayıf epoksi matristen daha mukavemetli nanopartiküllere aktarılması ile açıklanabilir. Bu da epoksi reçine içerisinde nanopartiküllerin oldukça iyi dağılımı ve epoksi reçine ile iyi bir ara yüzey

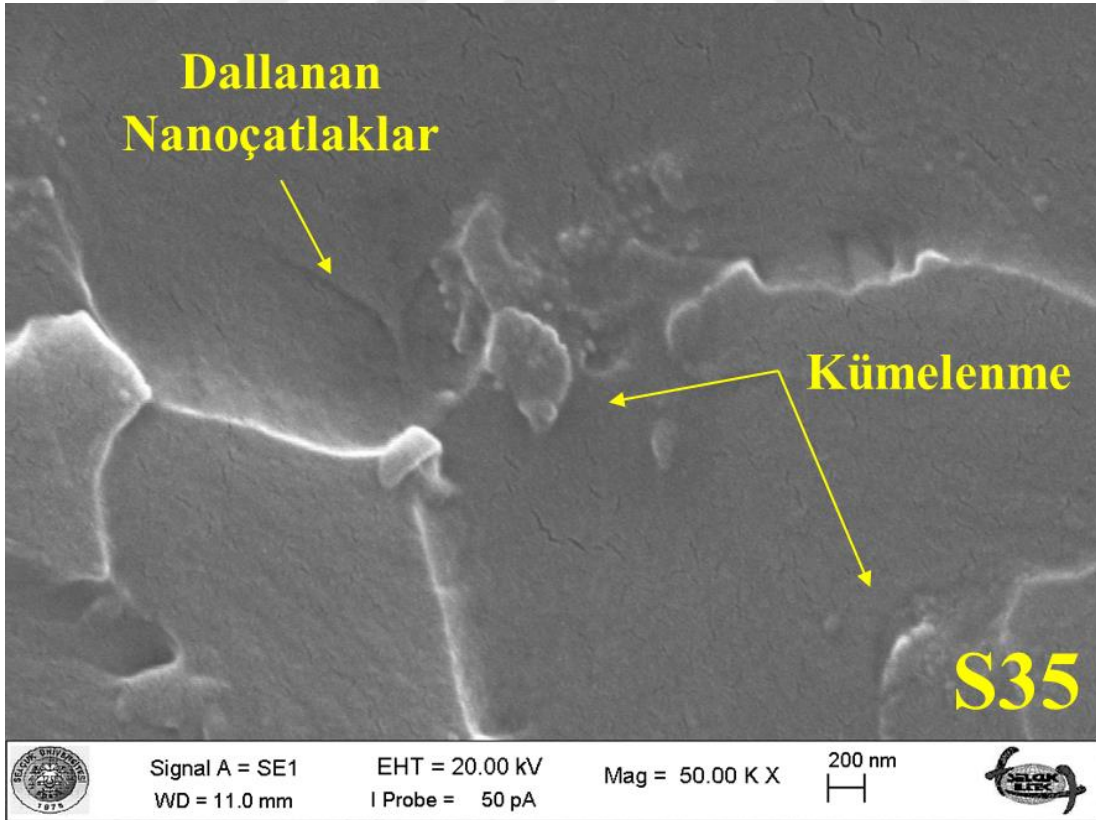
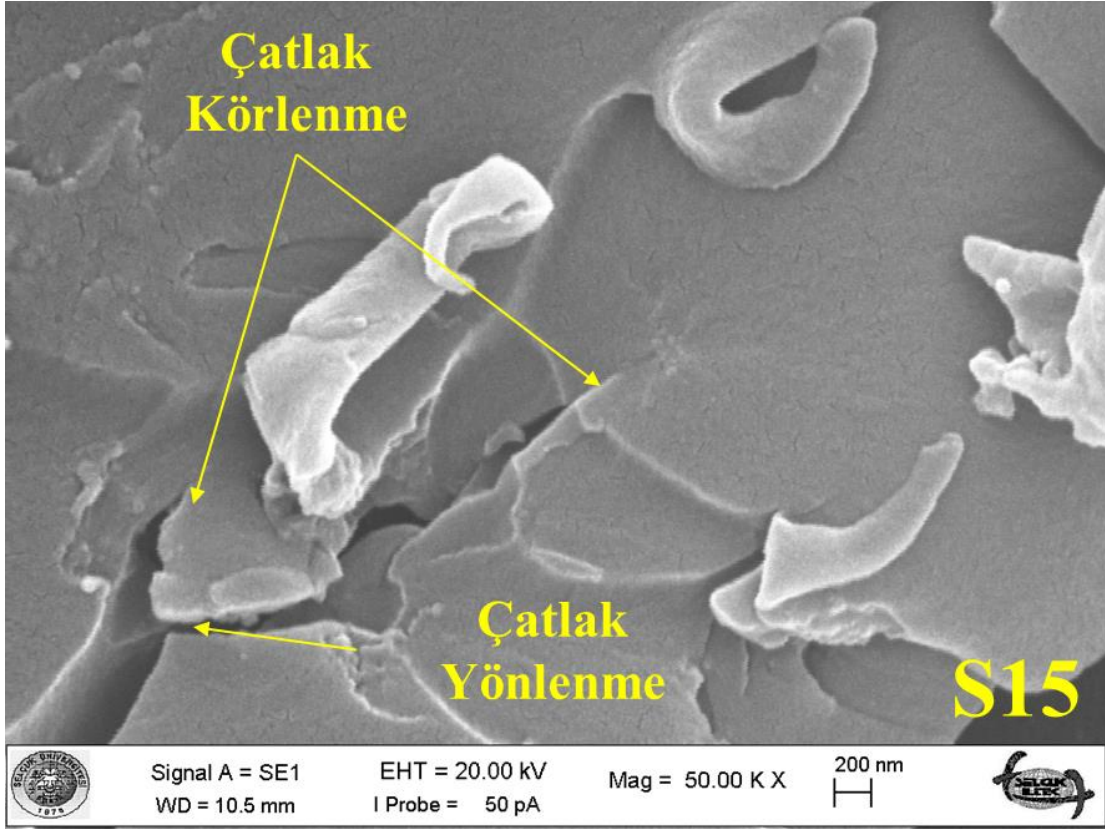


oluşturduğunu göstermektedir. Nanopartiküllerin bu etkisi ile mekanik özelliklerde artışın sağlandığı düşünülmektedir.





Şekil 5.16. SiO<sub>2</sub> nanopartikül etkileri – 1



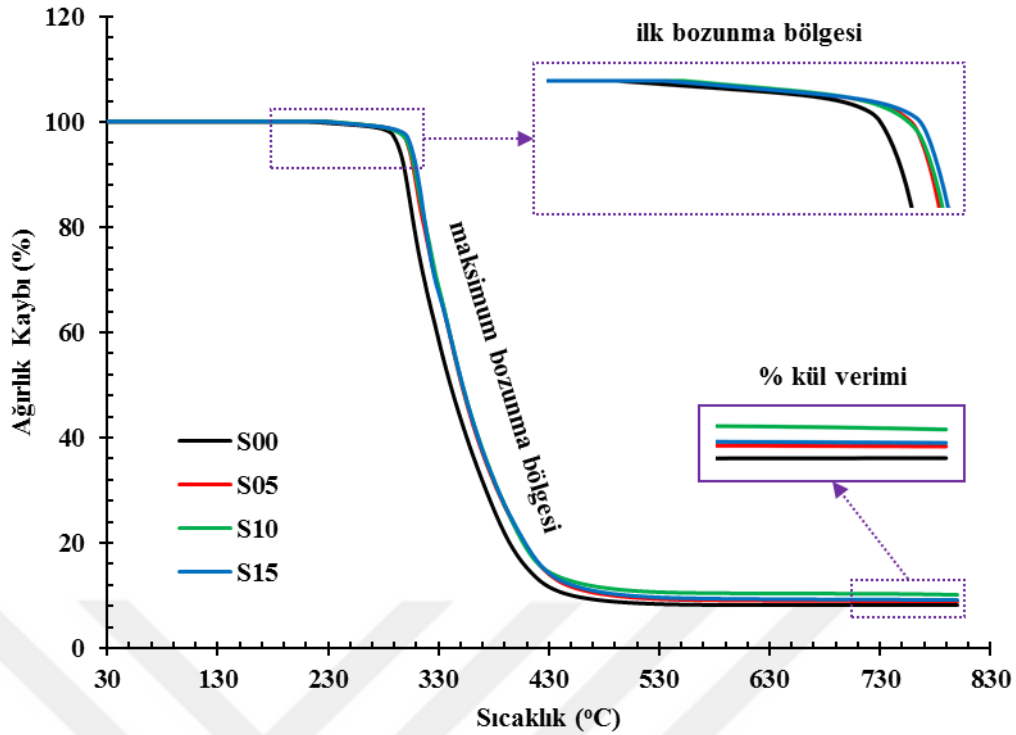
Şekil 5.13. SiO<sub>2</sub> nanopartikül etkileri – 2

Şekil 5.12. ve Şekil 5.13.'te gösterildiği gibi partikül ilavesinin olduğu numunelerde nanoçatlak oluşumlarının olduğu görülmüştür. Bu nano çatlak yapılarının SiO<sub>2</sub> nanopartikülün bir mekanizması olduğu düşünülmektedir (Chan et al., 2002; Dorigato & Pegoretti, 2011; Ekrem et al., 2016; B.B. Johnsen, Kinloch, Mohammed, Taylor, & Sprenger, 2007; Wetzel, Rosso, Hauptert, & Friedrich, 2006; Yao et al., 2008; L. L. Zhai et al., 2008; L. Zhai et al., 2006; Zheng, Zheng, & Ning, 2003b). Partikül ilavesi ile birlikte çatlak dallanmalarının ve çatlak yönünde partikül yerleşimlerinin olduğu görülmüştür. Çatlak yönlenme (bowing) mekanizmasının ve çatlak körlenme mekanizmalarının oluşumunun tokluk ve maksimum çekme dayanımını arttırdığı düşünülmektedir (Şekil 5.12. ve Şekil 5.13.) (Battistella et al., 2008; Han & Cho, 2006; X. Zhang et al., 2006a).

Numunelerde yer alan partikül oranının artmasıyla birlikte kümeleşme oluşumları tespit edilmiştir. S05 numunesinde kümeleşme oluşumuna rastlanmazken S10, S15 ve S35 numunelerinde kümeleşme oluşumları görülmüştür.

### 5.1.3. Yapıştırıcının DSC/TGA analizleri

Saf ve SiO<sub>2</sub> ilaveli epoksi yapıştırıcı numunelerinin termal kararlılıkları TGA grafikleri ile tespit edilmiştir (Şekil 5.14.). Şekil 5.14.'da görüldüğü gibi SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcılar daha yüksek sıcaklıklarda bozunmaktadır. Bu sonuç, epoksi reçinenin SiO<sub>2</sub> nanopartiküller ile modifikasyonunun kimyasal kararlılığa neden olduğunu göstermektedir. TGA analizinde elde edilen karakteristik davranışlar sayısal sonuçlara dönüştürülmüştür (Çizelge 5.2.). Çizelge 5.2.'de görüldüğü gibi %5, %10 ve %50 kütle kaybının gerçekleştiği sıcaklıklar nanopartikül ile modifiye edilmiş yapıştırıcılarda daha yüksektir. Ayrıca bozunmaya başlama sıcaklıkları (IDT) partikül ilavesi ile birlikte artmıştır. Bu sonuç partikül ilavesinin kimyasal kararlılığı arttırdığını göstermektedir.



Şekil 5.14. Yapıştırıcı numunelerinin TGA grafiği

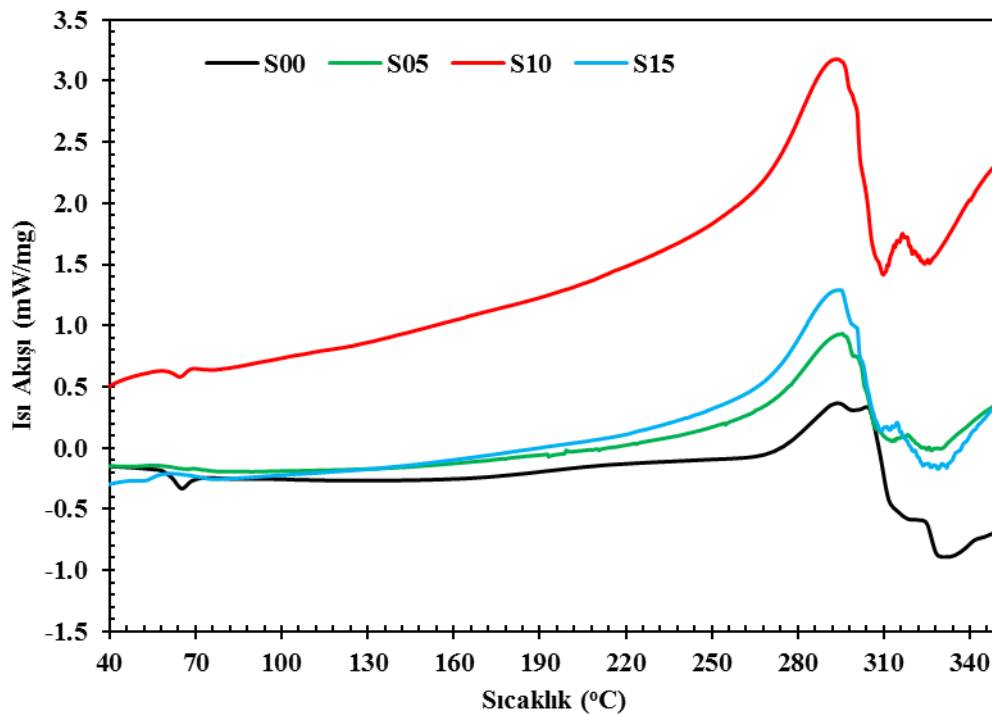
Çizelge 5.2. Yapıştırıcı numunelerinin TGA verileri

Numune	IDT (°C)	Kütle Kaybındaki Sıcaklık (°C)		
		5%	10%	50%
S00	209.33	293,67	299,67	340,33
S05	225.67	302,67	308,00	350,67
S10	229.33	303,33	309,00	351,33
S15	223.67	305,00	310,67	351,33

Cam geçiş sıcaklığı ve özgül ısı kapasitesi 20 ml/dakika azot akışı koşulları altında, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC, Perkin Elmer Instruments) ile incelenmiştir. Test sıcaklığı 40 °C' den 350 °C' ye kadar 10 °C/dk. ısıtma hızıyla test edilmiştir.

SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozit yapıştırıcıların camsı geçiş sıcakları DSC sonuçlarına göre belirlenmiştir. Şekil 5.15.' de saf epoksi yapıştırıcı ve ağırlıkça % 0.5, 1.0 ve 1.5 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli epoksi yapıştırıcıların DSC eğrileri gösterilmektedir. Polimer matrisin camsı geçiş sıcaklıkları (T<sub>g</sub>) polimerin serbest hacmine bağlıdır. Kütle halinde moleküllerin hareketi boşluk veya boşlukların varlığı ile

ilişkilidir (Abdalla, Dean, Robinson, & Nyairo, 2008; Jana & Zhong, 2007). Tüm yapıştırıcılar endotermik reaksiyon göstermiştir.



Şekil 5.15. Yapıştırıcı numunelerinin DSC eğrileri

Çizelge 5.3.' de saf epoksi yapıştırıcı ve SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozit yapıştırıcıların camısı geçiş sıcaklıkları verilmiştir. Camısı geçiş sıcaklığının nanopartikül ilavelisi ile birlikte arttığı görülmüştür. Bu durum partikül ilavesinin çapraz bağ yoğunluğunu arttırdığını göstermektedir (Lau et al., 2005).

Çizelge 5.3. Yapıştırıcı numunelerine ait camısı geçiş sıcaklıkları

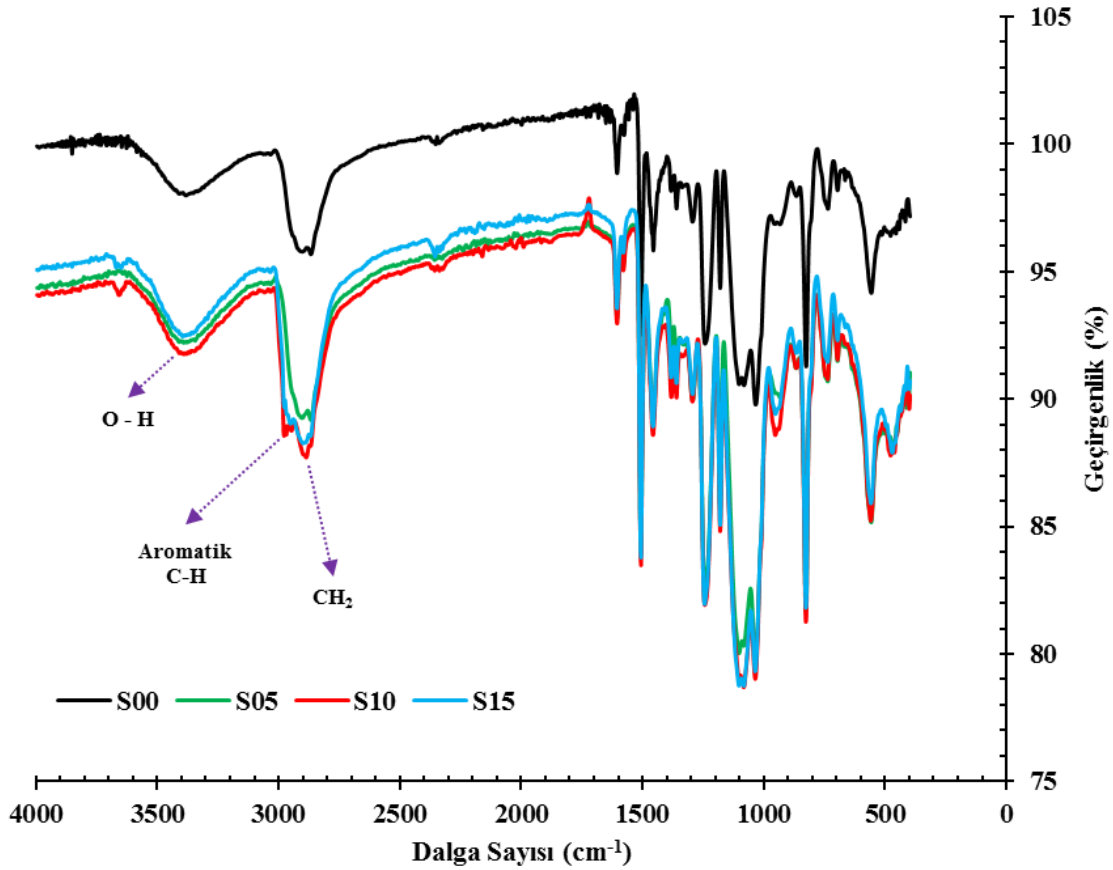
Numune	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
S00	61.67
S05	67.42
S10	68.15
S15	69.08

#### 5.1.4. Yapıştırıcının FT-IR analizleri

Fourier Dönüşümü Infrared (FT-IR) spektrum ölçümleri, BRUKER-Vertex 70 spektrometre ile gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler 500 ile 4000  $\text{cm}^{-1}$  arasında, oda sıcaklığında ve 2  $\text{cm}^{-1}$  hassasiyet bulunmuştur.

Ağırlıkça %0.5, 1.0 ve 1.5 oranlarında  $\text{SiO}_2$  nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozit yapıştırıcılara ve epoksi reçineye ait FT-IR spektrumların karakteristik pikleri Şekil 5.16.' gösterilmiştir. Pik bölgelerinin tespiti Çizelge 5.4.'e göre yapılmıştır.

$\text{SiO}_2$  nanopartiküllerin silan modifikasyonunun matris içerisinde dağılımında etkinliği FTIR ile araştırılmış ve etkinliği görülmüştür. Partikül yüzeylerinde bulunan Si-O-Si fonksiyonel grupları ve -OH grupları ile epoksi arasında iyi bir bağ oluşarak etkileşime girdiği anlaşılmıştır. Ağırlıkça % nanopartikül ilavesi fonksiyonel gruplar arasında meydana gelen kimyasal etkileşimi sağlayarak polimerleşmede etkili olmuştur. Bu durum,  $\text{SiO}_2$  nanopartikül ve epoksi arasında kuvvetli adezyon ve esnek bir ara yüzey kazanılarak, ara yüzeylerde dayanımı ve kırılma tokluğunu arttırdığı kanısını oluşturmuştur (Demirci, 2015; Jalili, Moradian, Dastmalchian, & Karbasi, 2007; Phonthammachai, Chia, & He, 2012; F.-H. Su, Zhang, & Liu, 2007) Bu etkileşimin özellikle kırılma esnasında çatlak önlerinde lokal plastik deformasyonu sağlayarak kırılma tokluğunu ve mekanik özellikleri iyileştirmede önemli faktör olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.16. Yapıştırıcı numunelerinin FT-IR spektrumları

Çizelge 5.4. Orta kızılötesi dalga boyunda DGEBA epoksi reçine karakteristik grupları (González-González, Cabanelas, & Baselga, 2012)

Dalga Sayısı (cm <sup>-1</sup> )	Karakteristik Grup
3500	O-H esnemeleri
3057	Oksiran halkasının C-H esnemesi
2965 – 2873	CH <sub>2</sub> ve CH'nin aromatik ve alifatik C-H bağ esnemeleri
1608	Aromatik halkanın C=C esnemesi
1509	Aromatik C-C esnemesi
1036	Eterin C-O-C esnemesi
915	Oksiran grubun C-O esnemesi
831	Oksiran grubun C-O-C esnemesi
772	CH <sub>2</sub> salınımı

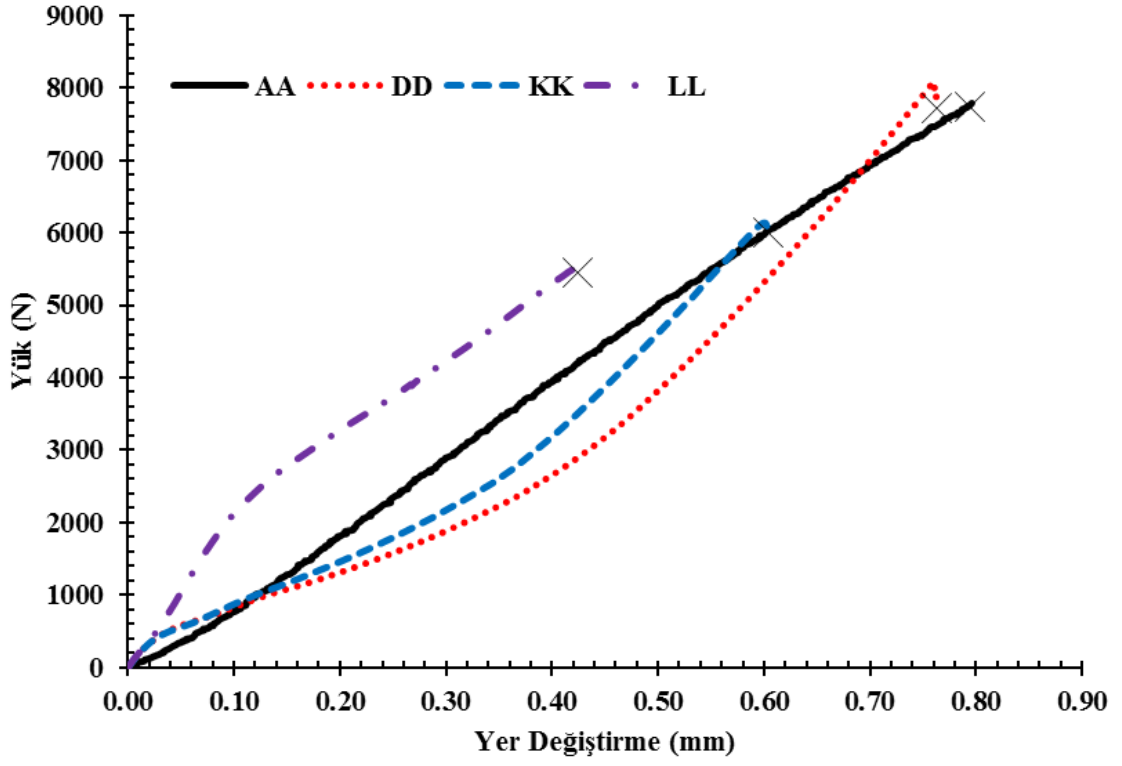
## 5.2. Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin Bağlantı Performansına Etkisi

Yüzey hazırlama yöntemlerinin bağlantı performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesinde tek bindirmeli kayma testi sonuçları ve hasarlı yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir.

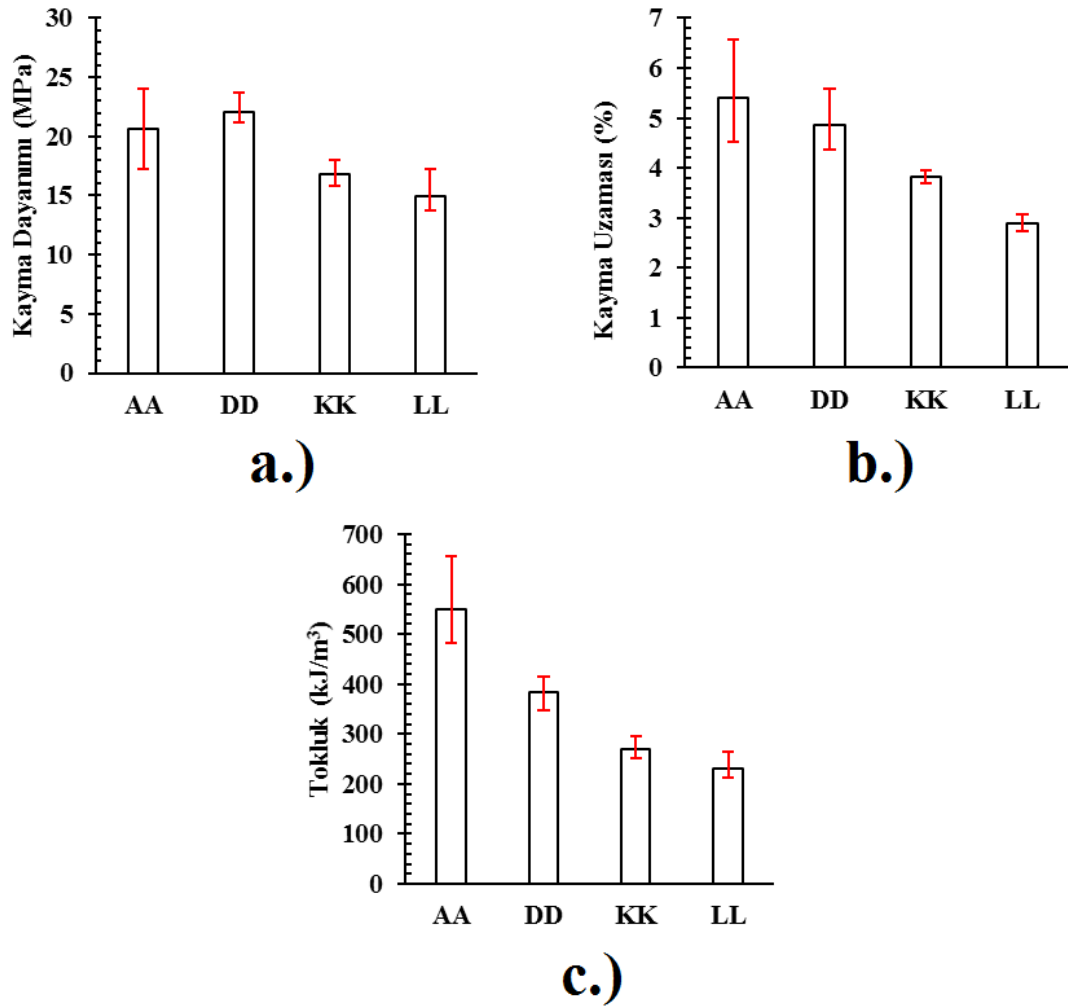


### 5.2.1. Tek bindirmeli bağlantıların kayma deneyi sonuçları

Deneyler sonucunda elde edilen kayma gerilmesi – % kayma uzaması grafiği Şekil 5.17.'de ve kayma dayanımı, % kayma uzaması ve kayma tokluk grafikleri Şekil 5.18.'de verilmiştir. Kayma mukavemeti açısından en yüksek değer FPL dağlama ile hazırlanmış yüzeylerin yapıştırma bağlantısından elde edilmiştir (22.04 MPa). Kayma mukavemeti açısından en düşük değer lazer ile hazırlanmış yüzeylerin yapıştırma bağlantısından elde edilmiştir (14.96 MPa). % uzama açısından en yüksek değer PAA anodizasyon ile hazırlanmış yüzeylerin yapıştırma bağlantısından elde edilmiştir (%5.40). % uzama açısından en düşük değer lazer ile hazırlanmış yüzeylerin yapıştırma bağlantısından elde edilmiştir (%2.88). PAA anodizasyon ve FPL dağlama teknikleri ile hazırlanmış yüzeylerin yapıştırma bağlantılarından alınan sonuçlar diğer teknikler ile yüzeyleri hazırlanan numunelerden alınan sonuçlarla karşılaştırıldığında elektrokimyasal yüzey hazırlama tekniklerinin aşındırma ile yüzey hazırlama teknikleri karşısında yüksek bir üstünlüğe sahip olduğu görülmektedir. FPL dağlama ve PAA anodizasyon tekniğiyle hazırlanan yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisinde yer alan ikincil çukurcuk hücreleri ile yüzey alanı arttırılmış ve yapıştırıcının daha iyi ıslatması sağlanmıştır. Böylece alüminyum malzeme yüzeyi ile yapıştırıcı arasında daha kuvvetli ara yüzey oluşarak bağlantı mukavemetinde artış sağlanmıştır. Ayrıca FPL dağlama ve PAA anodizasyon işleminden sonra alüminyum yüzeyinde oluşan yaklaşık 0.004–0.22  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tabakası mekanik kilitlemeyi arttırıcı bir etkiye neden olmuştur (Lunder et al., 2002).



Şekil 5.17. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının yük – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.18. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının a.) kayma dayanımı, b.) % kayma uzaması c.) tokluk grafikleri

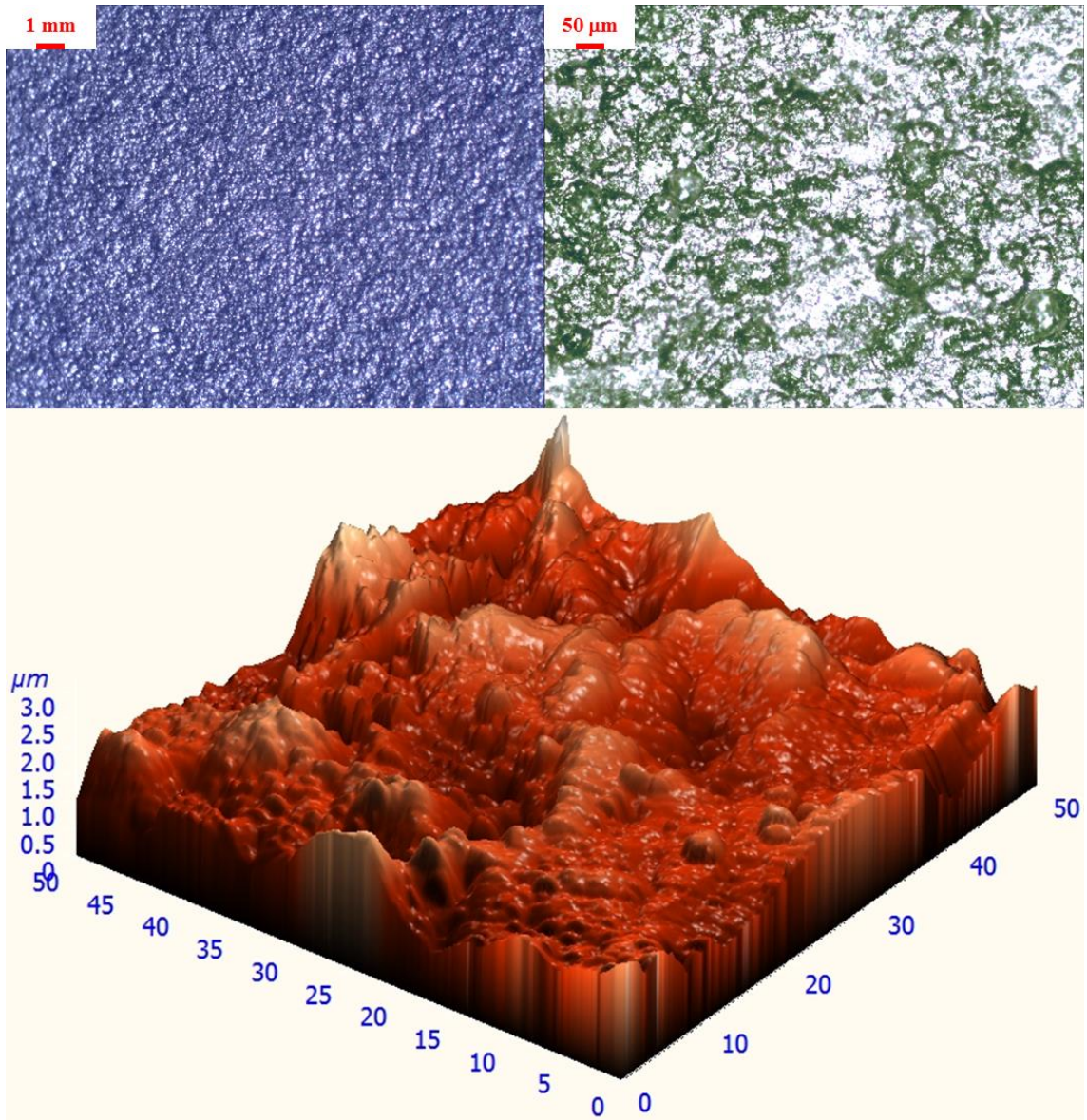
Çizelge 5.5. Yüzey hazırlama yöntemlerinin kayma dayanımı üzerindeki etkisi

Numune	Max. Kayma Dayanımı (MPa)	Kayma Uzaması (%)	Tokluk (kJ/m³)
AA	20.61	5.40	549.70
DD	22.04	4.85	383.64
KK	16.77	3.83	268.67
LL	14.96	2.88	230.54

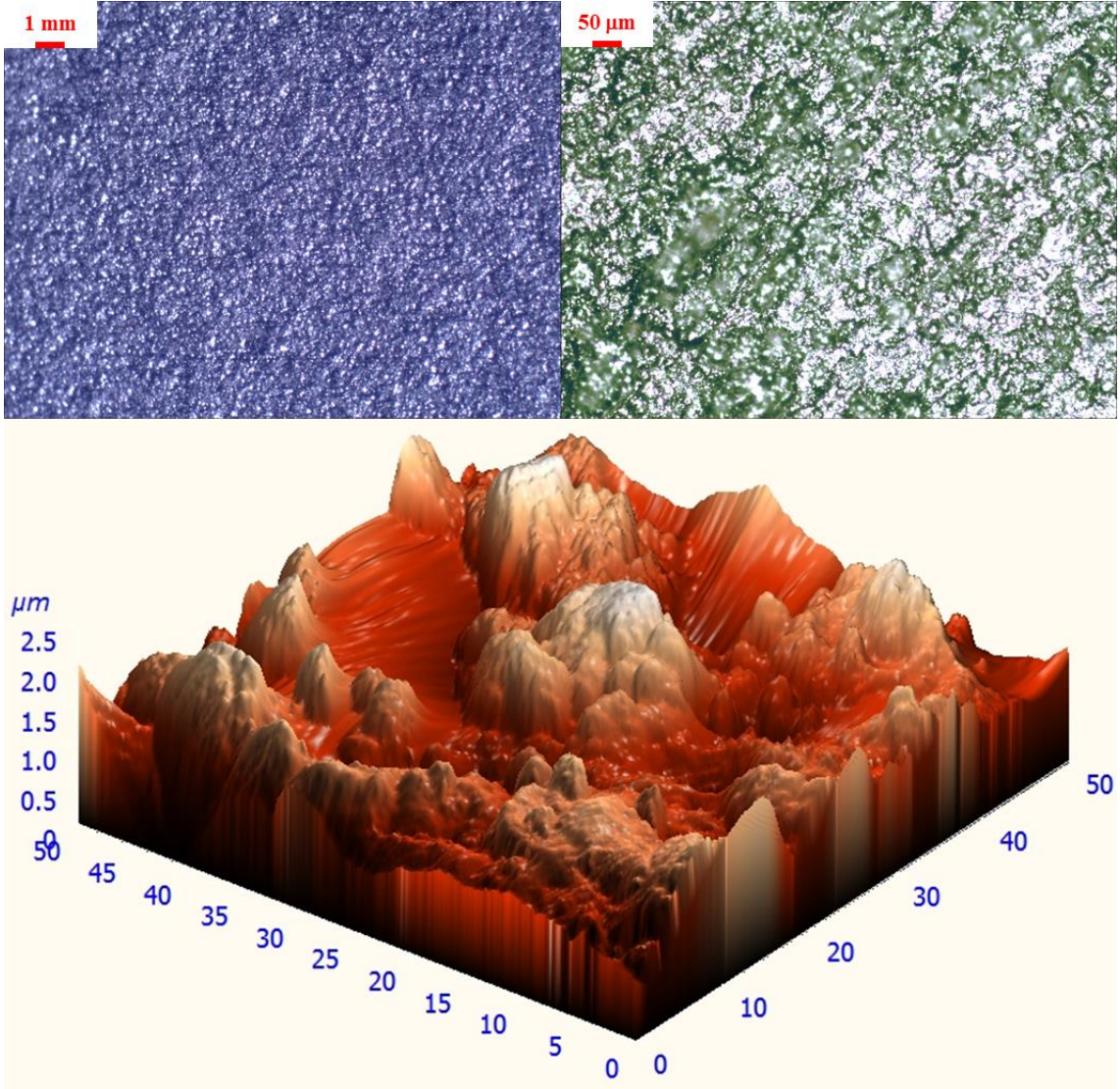
## 5.2.2. Yüzey hazırlama yöntemlerinin pürüzlülük ve morfoloji üzerindeki etkisi

Şekil 5.19., 5.20., 5.21. ve 5.22.' de farklı yüzey hazırlama yöntemleri sonrası yüzey morfolojileri gösterilmektedir. Şekil 4.23.'da yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. En büyük ve düzensiz pürüzlülük değerleri kumlama işleminden sonra elde edilen numunelerin yüzeylerinden en düşük ve stabil pürüzlülük değerleri ise lazerle

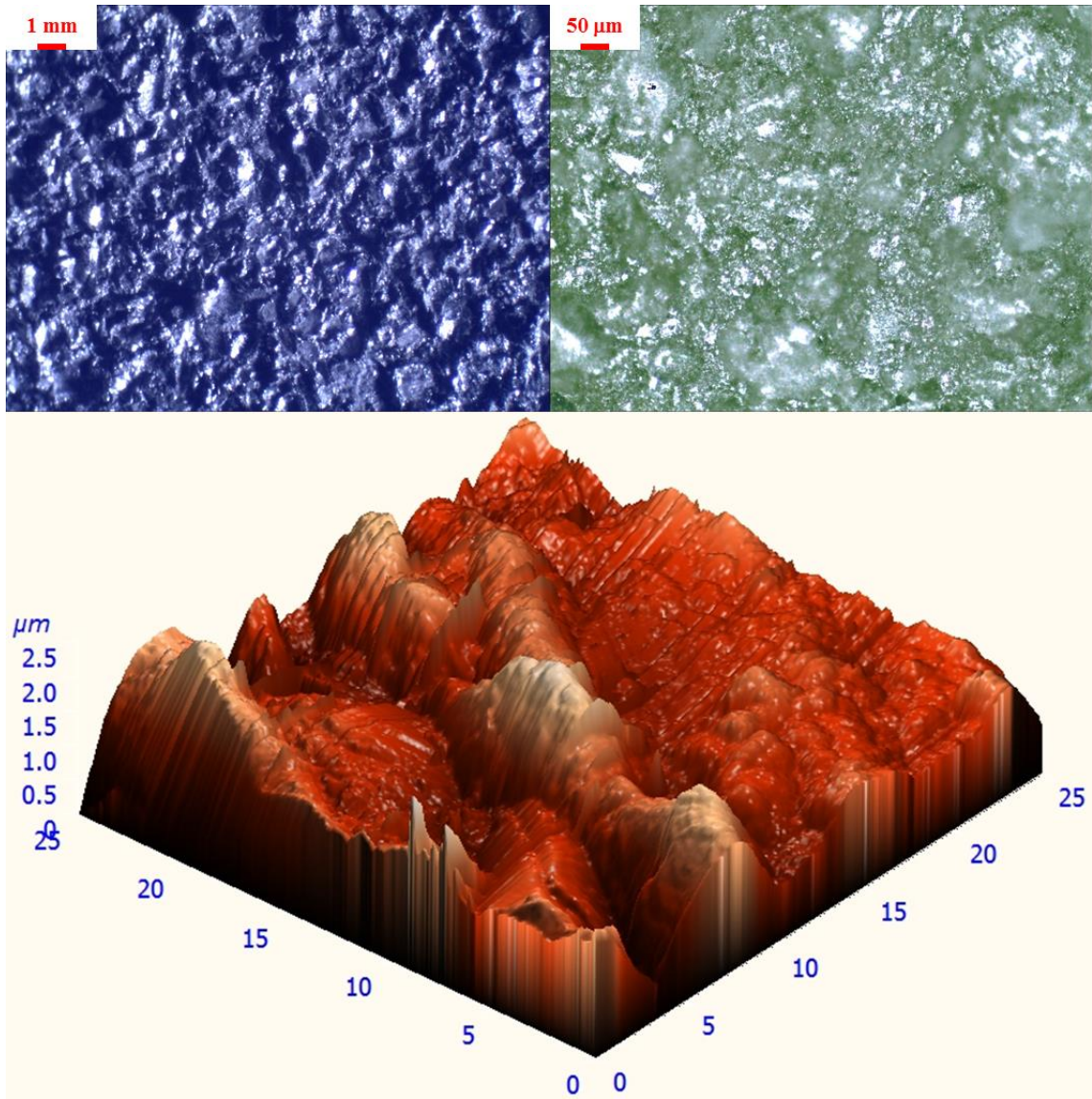
hazırlanmış yüzeylerden ölçülmüştür. Kumlama ile hazırlanan yüzeylerin morfolojisi incelendiğinde düzensiz rastgele derin ve farklı boyutlarda çukurcukların oluştuğu görülmüştür. Lazerle, dağlama ve anotlama ile elde edilen yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın olduğu ölçülmüştür. Lazerle elde edilen pürüzlülüklerin birbirlerine paralel dalgalı nehir çizgilerine benzer çukurcuklar şeklinde olduğu, dağlamada çukurcukların oluştuğu ve bu çukurcukların içinde de ikincil daha küçük çukurcuk hücrelerinin oluştuğu, anotlanmış yüzeyde ise dağlama ile oluşan yüzeye benzer fakat daha derin ve geniş çukurların oluştuğu görülmüştür. Anotlama ve dağlama sonucu oluşan ikincil çukurcuklar yapıştırma yüzey alanını artırıcı bir etki yapmıştır.



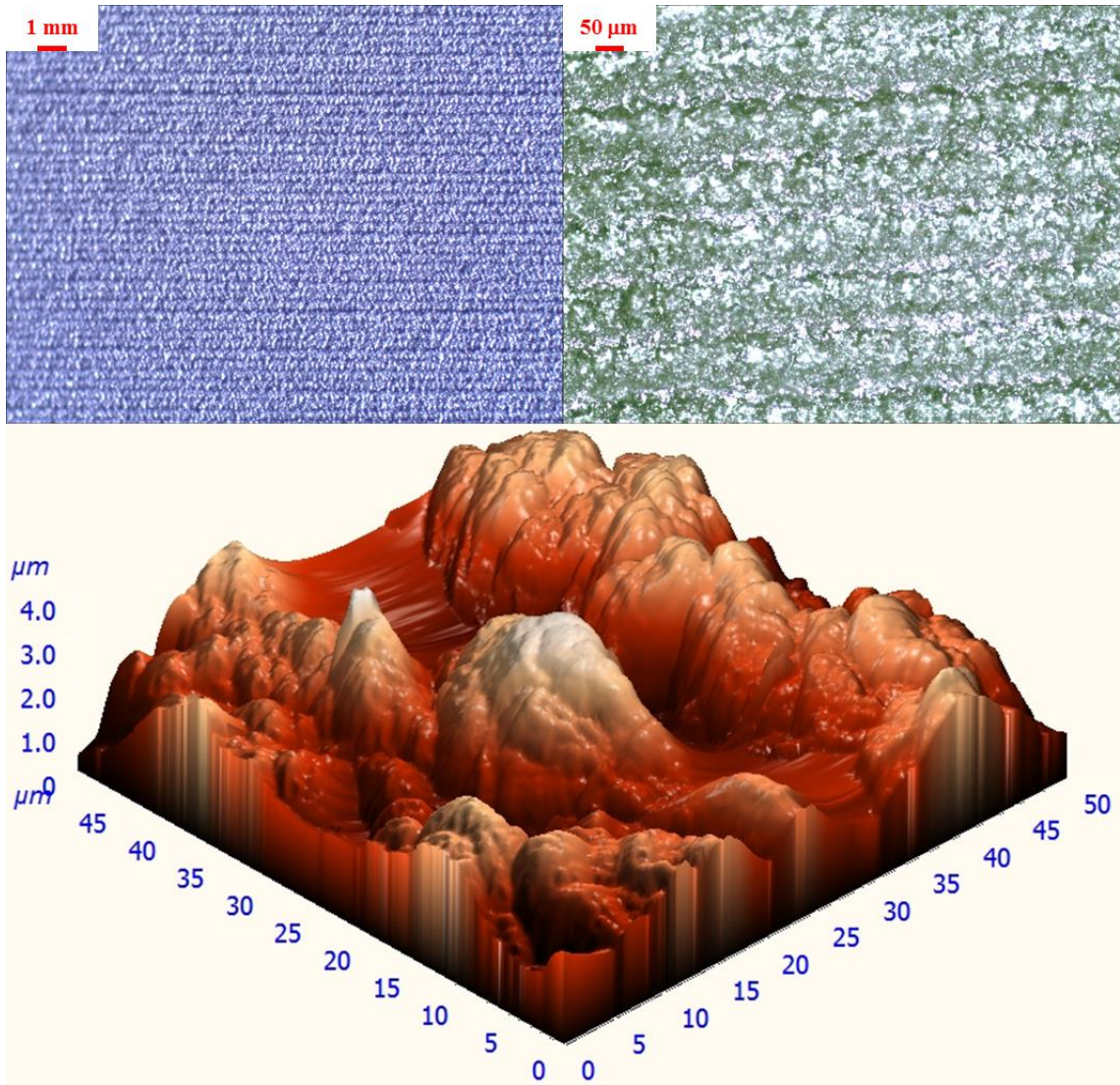
Şekil 5.19. PAA anotizasyon ile hazırlanan yüzeylerin makro, mikro ve AFM görüntüsü



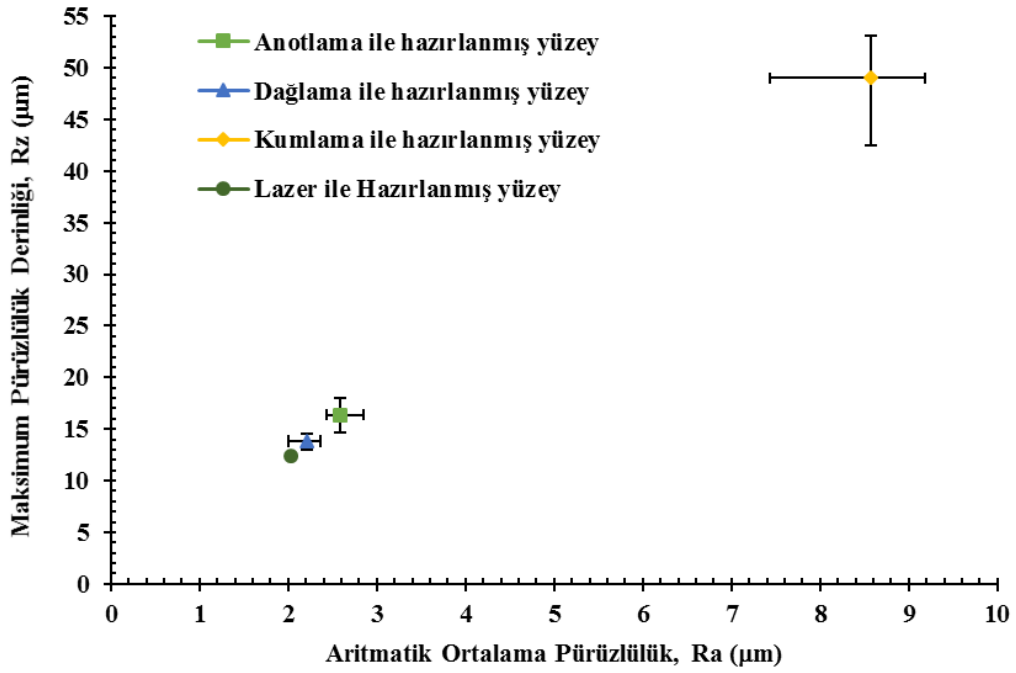
Şekil 5.20. FPL dağlama ile hazırlanan yüzeylerin makro, mikro ve AFM görüntüsü



Şekil 5.21. Kumlama ile hazırlanan yüzeylerin makro, mikro ve AFM görüntüsü



Şekil 5.22. Lazer ile hazırlanan yüzeylerin makro, mikro ve AFM görüntüsü

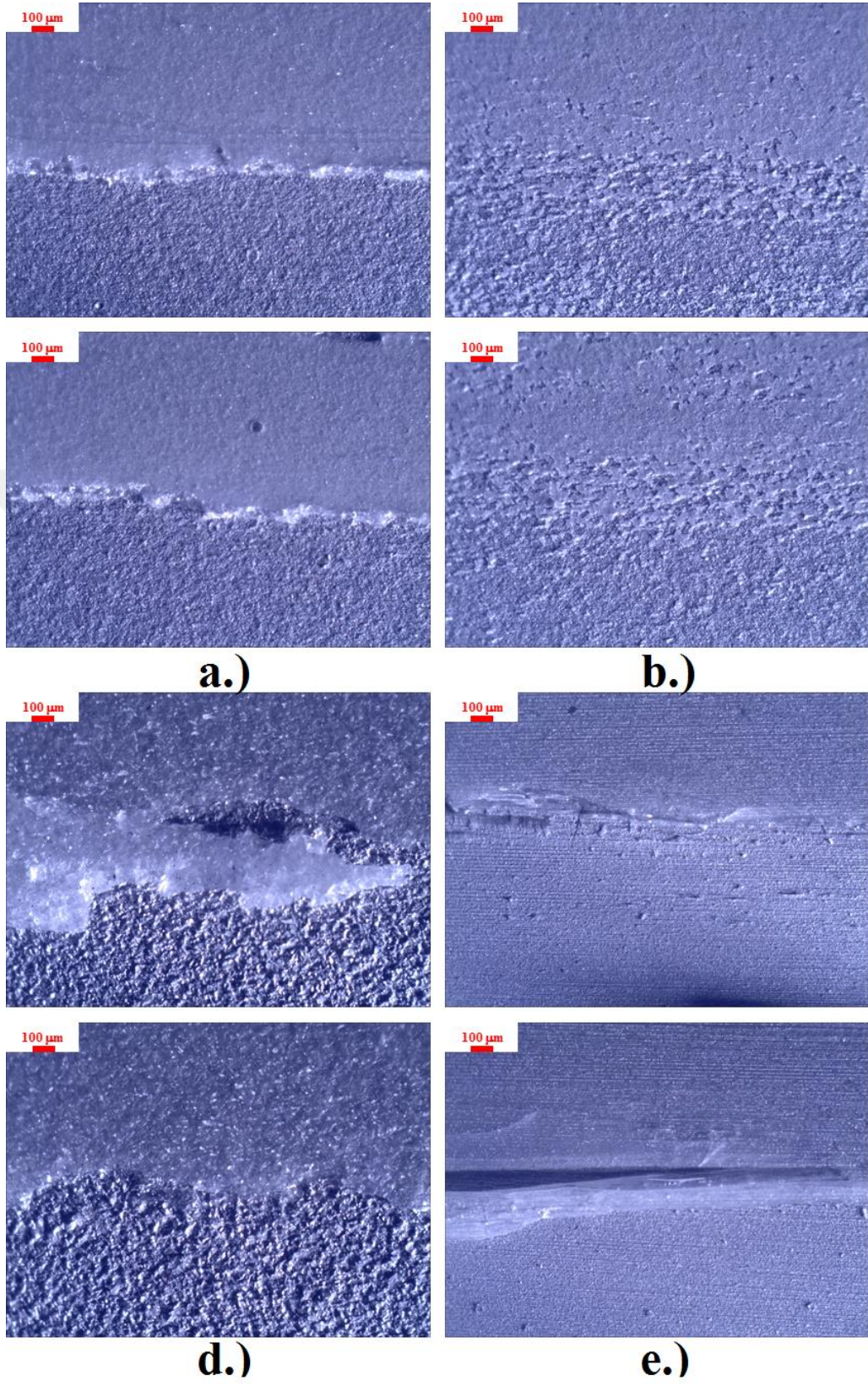


Şekil 5.23. Yüzey hazırlama yöntemlerine göre  $R_a$  ve  $R_z$  pürüzlülük değerleri

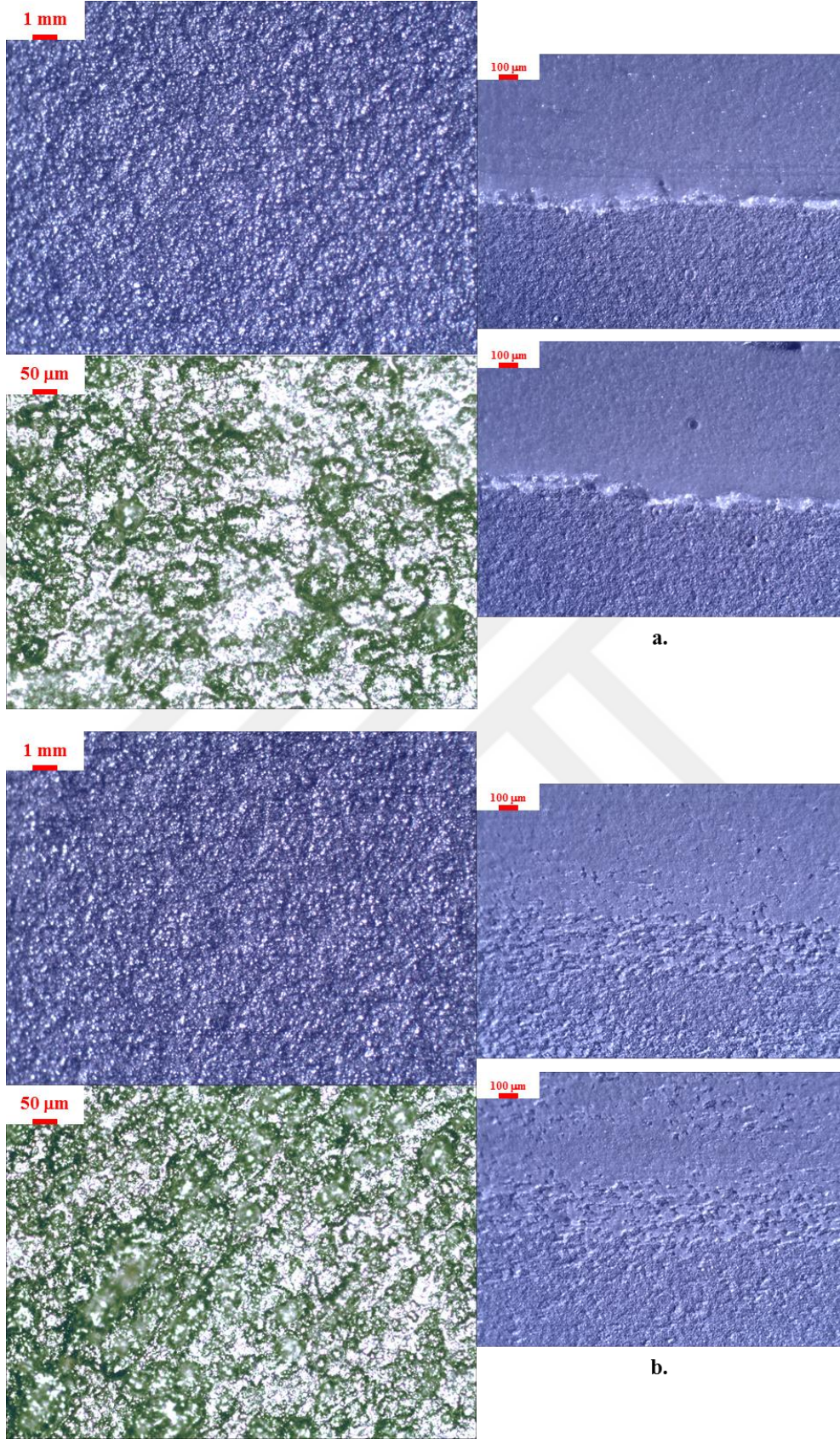
### 5.2.3. Yapışma yüzeylerinin hasar analizi

Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının kayma deneyi sonrası oluşan hasar yüzeyleri Şekil 5.24.' de gösterilmiştir. Yüzey hazırlama sonrası yüzey mikro yapısı ve yapıştırma bağlantısı hasarı sonrası görüntüler kıyaslanabilmesi amacıyla PAA, FPL dağlama, Kumlama ve Lazer yöntemleri için sırasıyla Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da gösterilmiştir. Kumlama ve lazer ile yüzeyi hazırlanmış numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde yapıştırıcının hemen hemen soyulduğu ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki ara yüzeyin zayıf olduğu görülmüştür. Dolayısı ile mekanik kilitlenmenin zayıf olmasına neden olduğu için bağlantı mukavemetinin zayıflığı buna bağlı olarak açıklanabilir. Çalışmada hasarın transfer olduğu bölgede transferin ani bir geçiş yaptığı da belirlenmiştir. PAA anodizasyon ve FPL dağlama ile hazırlanmış yüzeylerin kopma sonrası hasar yüzeyleri incelendiğinde transfer bölgesine kadar epoksi yapıştırıcının alüminyum yüzey ile kuvvetli bir ara yüzey oluşturduğu ve bu durumun mekanik kitlemenin de buna bağlı olarak arttığı, transfer bölgesine geçişin kademeli ve geniş bir alanda gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, PAA anodizasyon ve FPL dağlama ile elde edilen alüminyum yüzeylerde epoksi reçinenin daha iyi bir ıslatma ve nüfuziyet gerçekleştirdiği söylenilebilir.

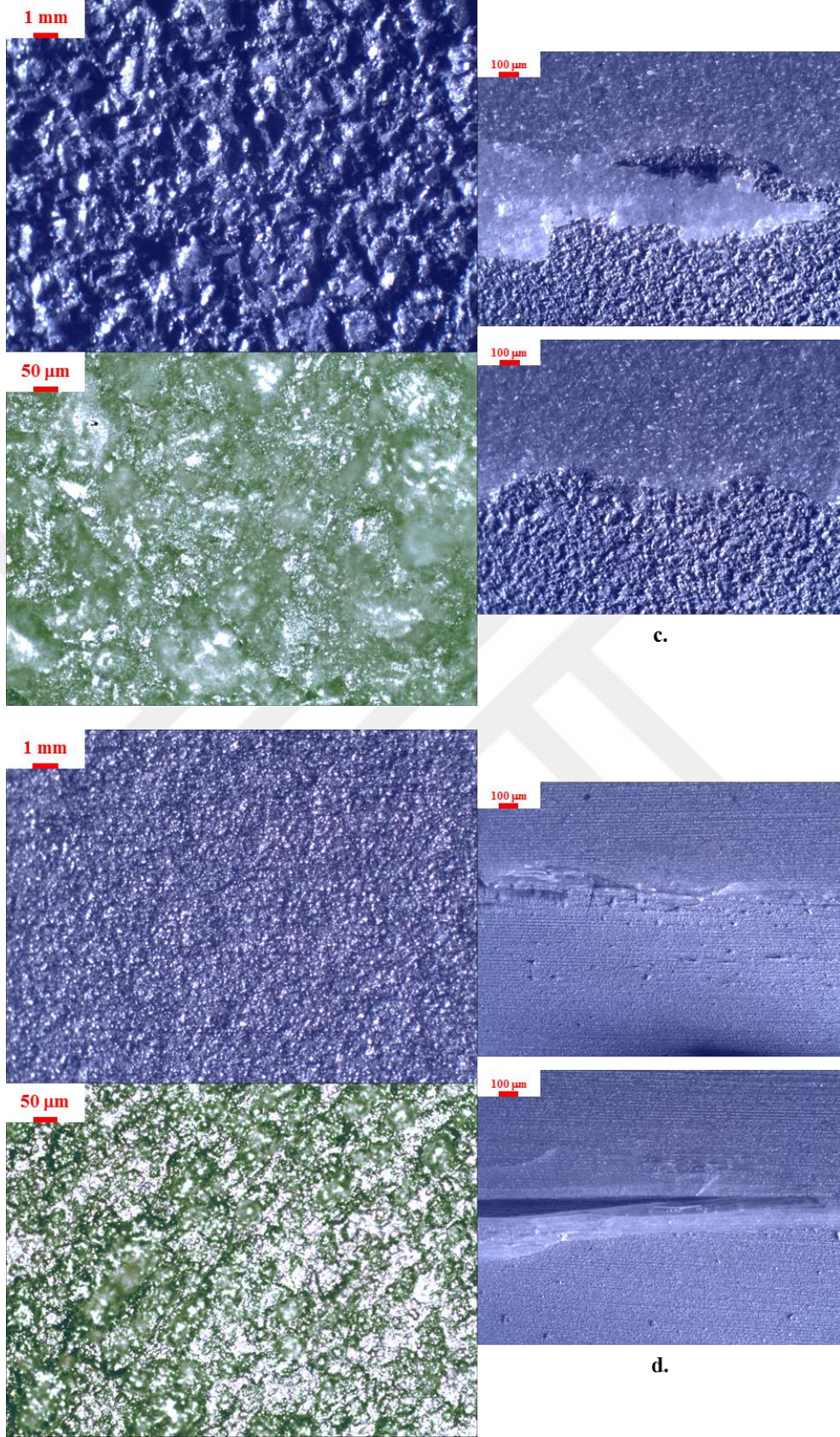




**Şekil 5.24.** Hasar yüzeyleri a.) PAA ile hazırlanmış b.) FPL ile hazırlanmış c.) kumlama ile hazırlanmış d.) lazer ile hazırlanmış



Şekil 5.25. Yüzey hazırlama sonrası mikro yapı ve hasar yüzeyleri a.) PAA ile hazırlanmış b.) FPL ile hazırlanmış



Şekil 5.26. Yüzey hazırlama sonrası mikro yapı ve hasar yüzeyleri c.) kumlama ile hazırlanmış d.) lazer ile hazırlanmış

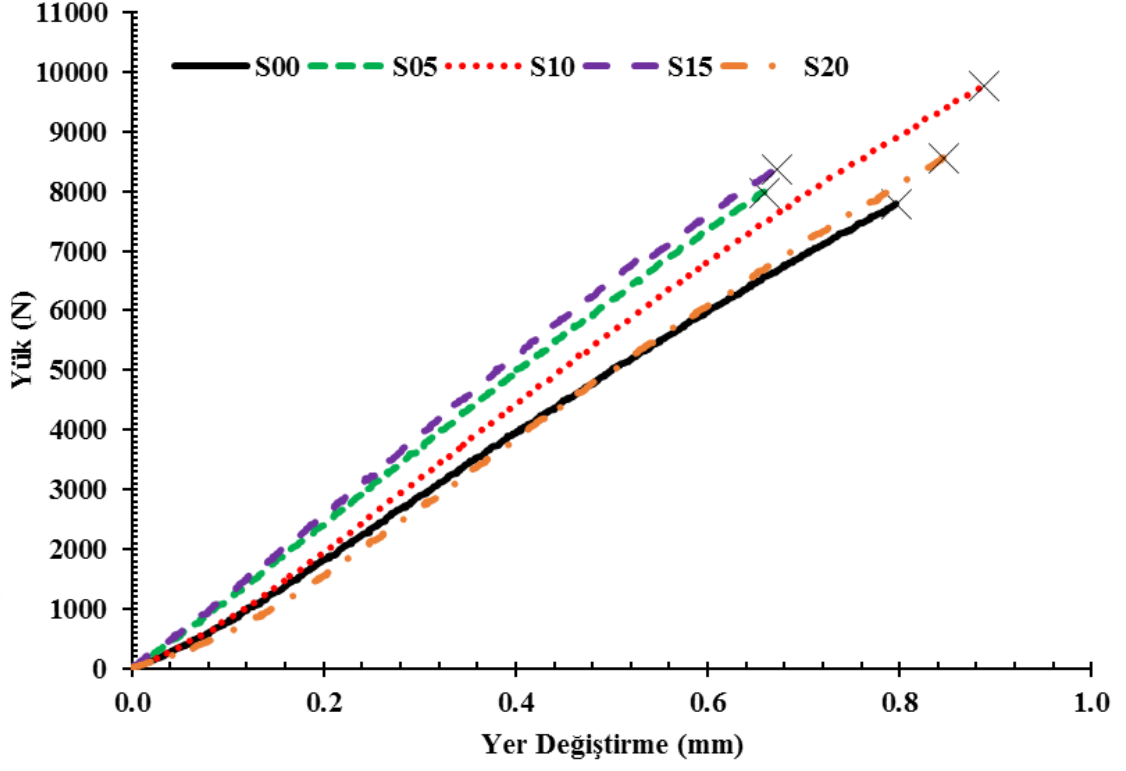
### 5.3. SiO<sub>2</sub> Nanopartikül İlavesinin Bağlantı Performansına Etkisi

SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi oranının tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesinde tek bindirmeli kayma testi sonuçları ve hasarlı yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiştir.

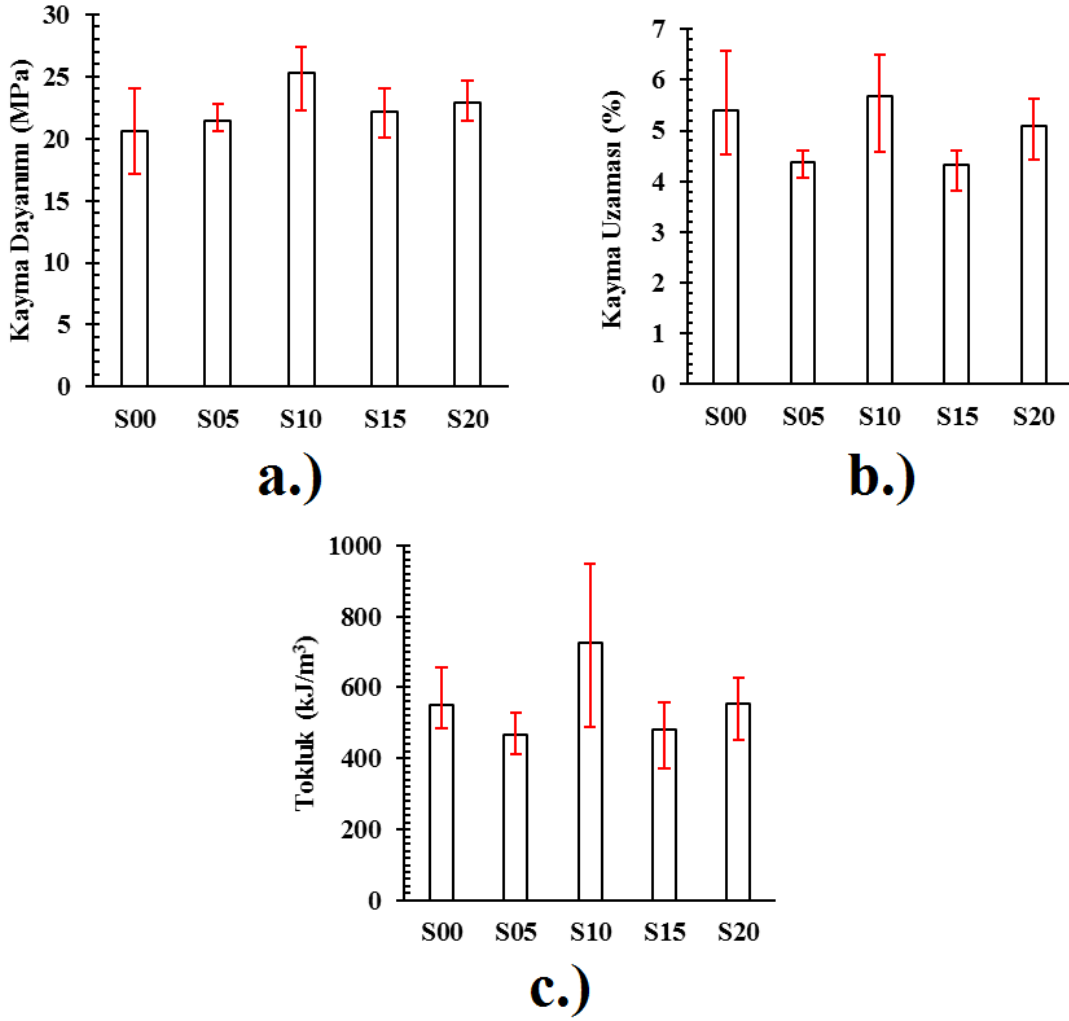
#### 5.3.1. Tek bindirmeli bağlantıların kayma deneyi sonuçları

SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozit yapıştırıcıyla tek bindirmeli bağlantı tekniğinde birleştirilen Al2024-T3 malzemelerinin kayma deneyi sonrası elde edilen değerler incelenmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 5.27.' de kayma deneyi sonrası elde edilen yük – yer değiştirme grafiği verilmiştir. Çizelge 5.6.' da kayma deneyi sonrası elde edilen kayma dayanımı, % kayma uzaması ve tokluk değerlerinin nanopartikül ilavesi yapılmamış olan reçineye göre değişimleri verilmiştir. Kayma dayanımı, % kayma uzaması ve tokluk açısından numuneler incelenmiş ve Şekil 5.28.' de gösterilmiştir. Çizelge 5.5. kayma gerilmesi açısından incelendiğinde ağırlıkça %1.0 oranında SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılmış olan yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantısının nanopartikül ilavesi yapılmamış olan yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantısına oranla %22.52 daha mukavemetli olduğu tespit edilmiştir. Genel anlamda yapıştırma bağlantısının dayanımının SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi ile artırıldığı görülmüştür. Yüzde uzama açısından incelendiğinde ağırlıkça %1.0 oranında SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılmış olan yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantısının nanopartikül ilavesi yapılmamış olan yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantısına oranla %5.33 daha fazla yüzde uzamanın olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel sonuçlar, SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantısının karakteristik kayma davranışının partikül ilavesine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcı ile tek bindirmeli yapışma bağlantısı gerçekleştirildiğinde partikül ilavesi kayma dayanımını iyileştirmektedir.



Şekil 5.27. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının yük – yer değiştirme grafiği



Şekil 5.28. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı, % kayma uzaması ve tokluk grafikleri

Çizelge 5.6. Saf epoksiye göre SiO<sub>2</sub> ilave oranına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişim

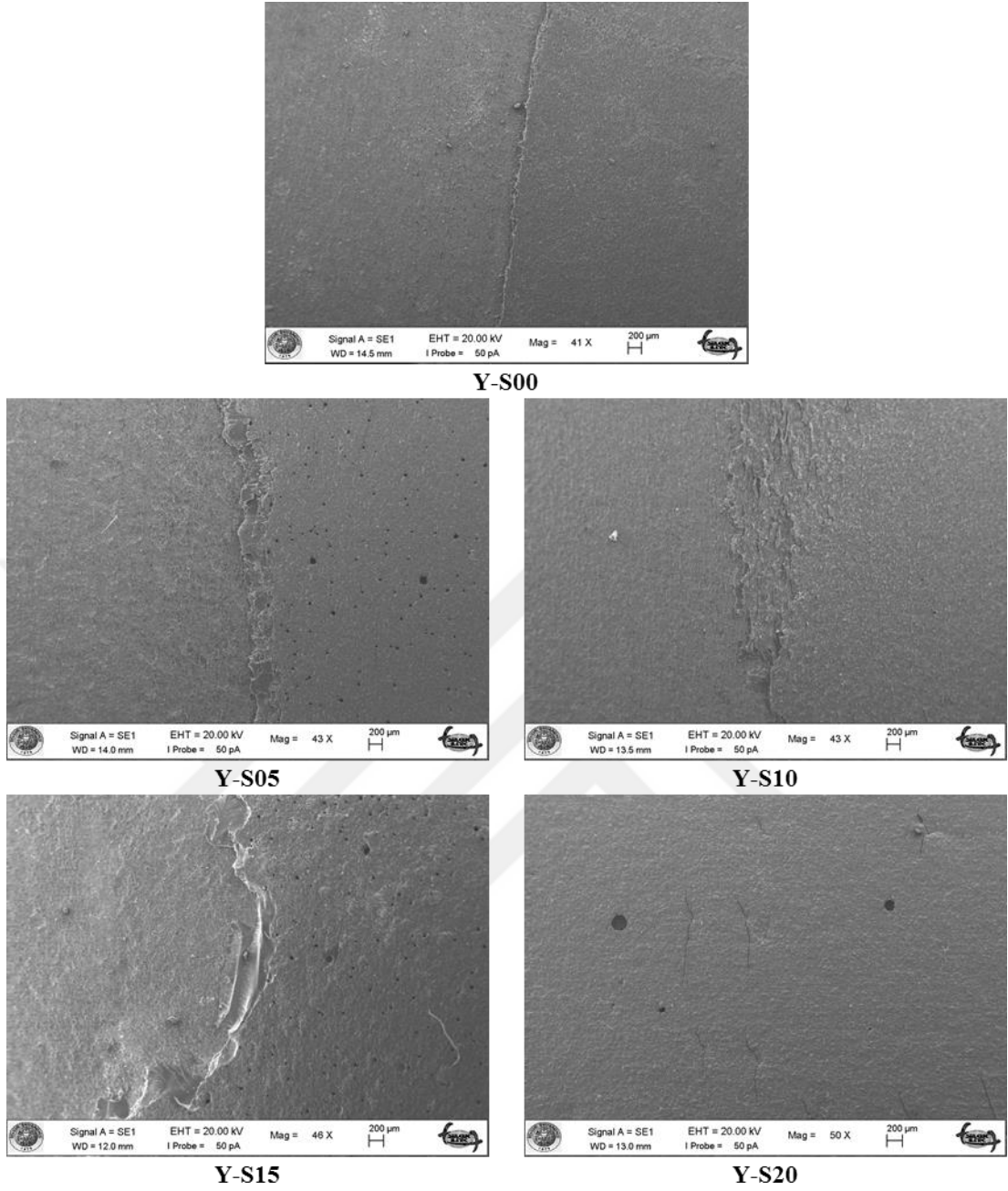
Numune	Kayma Dayanımı		Uzama		Tokluk	
	(MPa)	% Değişim	(%)	% Değişim	(kJ/m <sup>3</sup> )	% Değişim
S00	20.61	—	5.40	—	549.70	—
S05	21.48	+ 04.20	4.37	- 19.12	466.09	- 15.21
S10	25.25	+ 22.52	5.69	+ 05.33	726.54	+ 32.17
S15	22.13	+ 07.38	4.33	- 19.85	479.68	- 12.74
S20	22.85	+ 10.87	5.10	- 05.65	554.91	+ 00.95

Al2024-T3 plakaların CNT ve Ag nanopartikül ile yapıştırıldığı bir çalışmada partikül ilavesi yapılmamış yapıştırıcılar ile hazırlanan kayma numunesinin dayanımını 18.76 MPa olarak bulmuşlardır. Ağırlıkça %1 CNT ilave ettikleri yapıştırıcı ile birleştirdikleri durumda ise 23.96 MPa kayma dayanımına ulaşmışlardır. Ayrıca çalışmada, iki farklı nanopartikülün bir arada kullanıldığı yapıştırıcı ile yapılan

birleştirmenin kayma dayanımını 25.17 MPa olarak tespit etmişlerdir (Ekrem et al., 2016). POSS ile hazırlanan yapıştırıcının kullanıldığı bir çalışmada ise modifiye edilmemiş yapıştırıcı ile 21 MPa kayma dayanımı elde edilirken modifiyeli yapıştırıcı kullanılması durumunda 24 MPa kayma dayanımına ulaşılmıştır (Dodiuk, Kenig, Blinsky, Dotan, & Buchman, 2005). SiO<sub>2</sub> nanopartikülünün yapıştırıcının modifikasyonu için kullanıldığı iki farklı çalışmada ağırlıkça %4.1, 2.1, 10 ve 20 değerleri kullanılmıştır. Ağırlıkça %4.1 ve 2.1 SiO<sub>2</sub> kullanılan çalışmalarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-T3 malzemesi yapıştırılmıştır. Nanopartikül modifiyesi yapılmamış yapıştırıcı kullanılan numunelerde kayma dayanımı 20.8 MPa olarak bulunmuştur. Nanopartikül modifiyesi yapılmış olan yapıştırıcı kullanılan numunelerde ağırlıkça %4.1 ve 2.1 ilave oranları için sırasıyla 23 ve 22 MPa kayma dayanımı elde etmişlerdir ( a. J. Kinloch et al., 2003b). Ağırlıkça %10 ve %20 SiO<sub>2</sub> ilavesi yapılan çalışmada ise çelik plakalar yapıştırılmıştır. Nanopartikül ilavesi yapılmamış yapıştırıcı yapıştırılmış olan numunelerde kayma dayanımını 17.83 MPa olarak tespit etmişlerdir. Sırasıyla ağırlıkça %10 ve 20 SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesi yapılan yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerde ise sırasıyla 21.34 ve 21.52 MPa kayma dayanımını ulaşımlardır (Zhou et al., 2015). Tez çalışmasında elde edilen değerlerin bu değerlerin aralığında olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu olmak ile birlikte yüksek dayanım çalışmamızda sağlanmıştır.

### 5.3.2. Yapışma yüzeylerinin hasar analizi

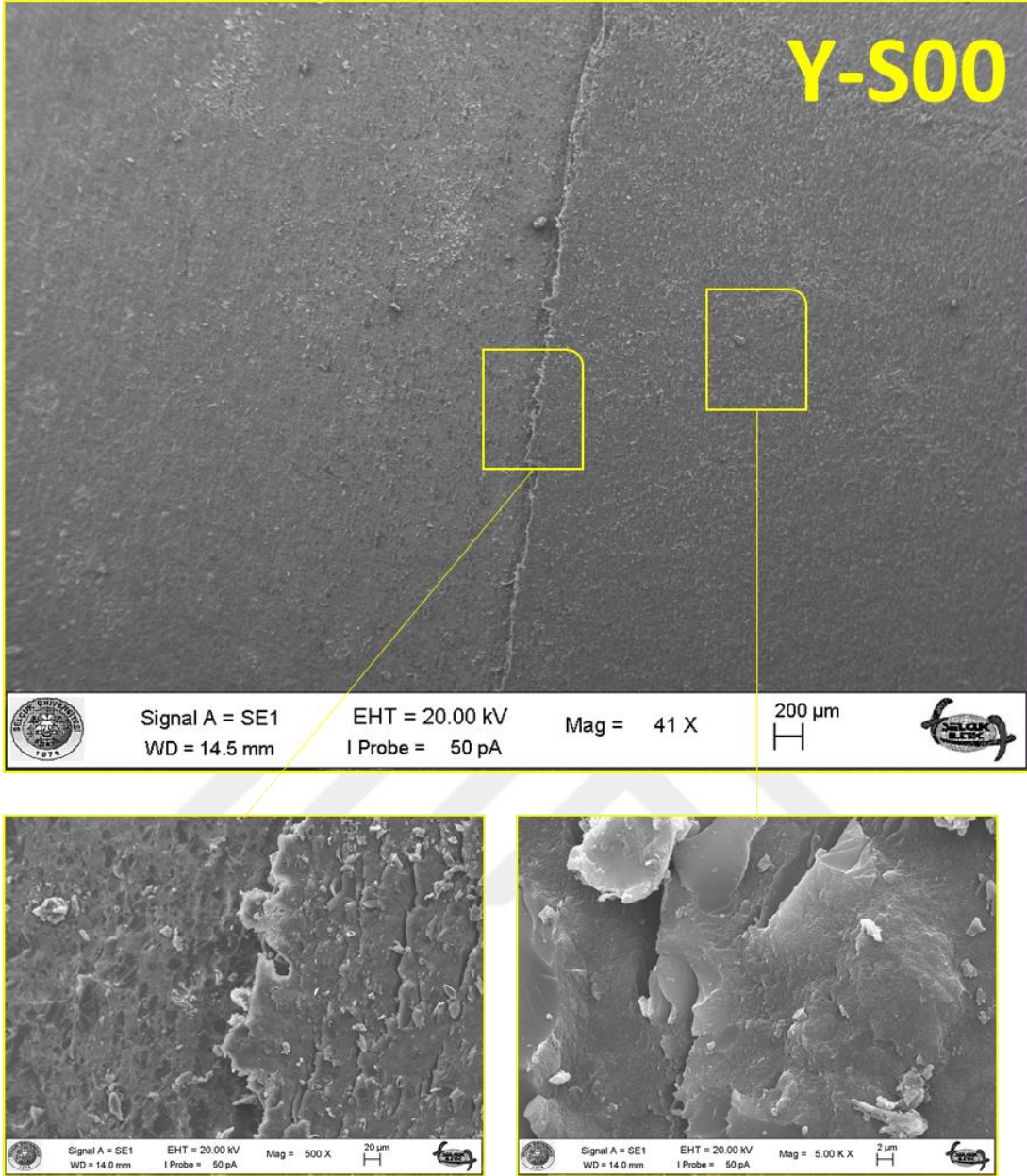
Şekil 5.29.'da kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Y-S00 numunesinde transfer geçişi dar bir alanda gerçekleşirken nanopartikül ilave edilmiş olan bağlantılarda geniş bir transfer bölgesi oluşmuştur. Bu durum kayma dayanımında artışa neden olmuştur. Y-S20 numunesinde belirgin transfer oluşmazken mikro deformasyonlar kayma dayanımında Y-S00 numunesine göre bir miktar artış sağlamıştır.



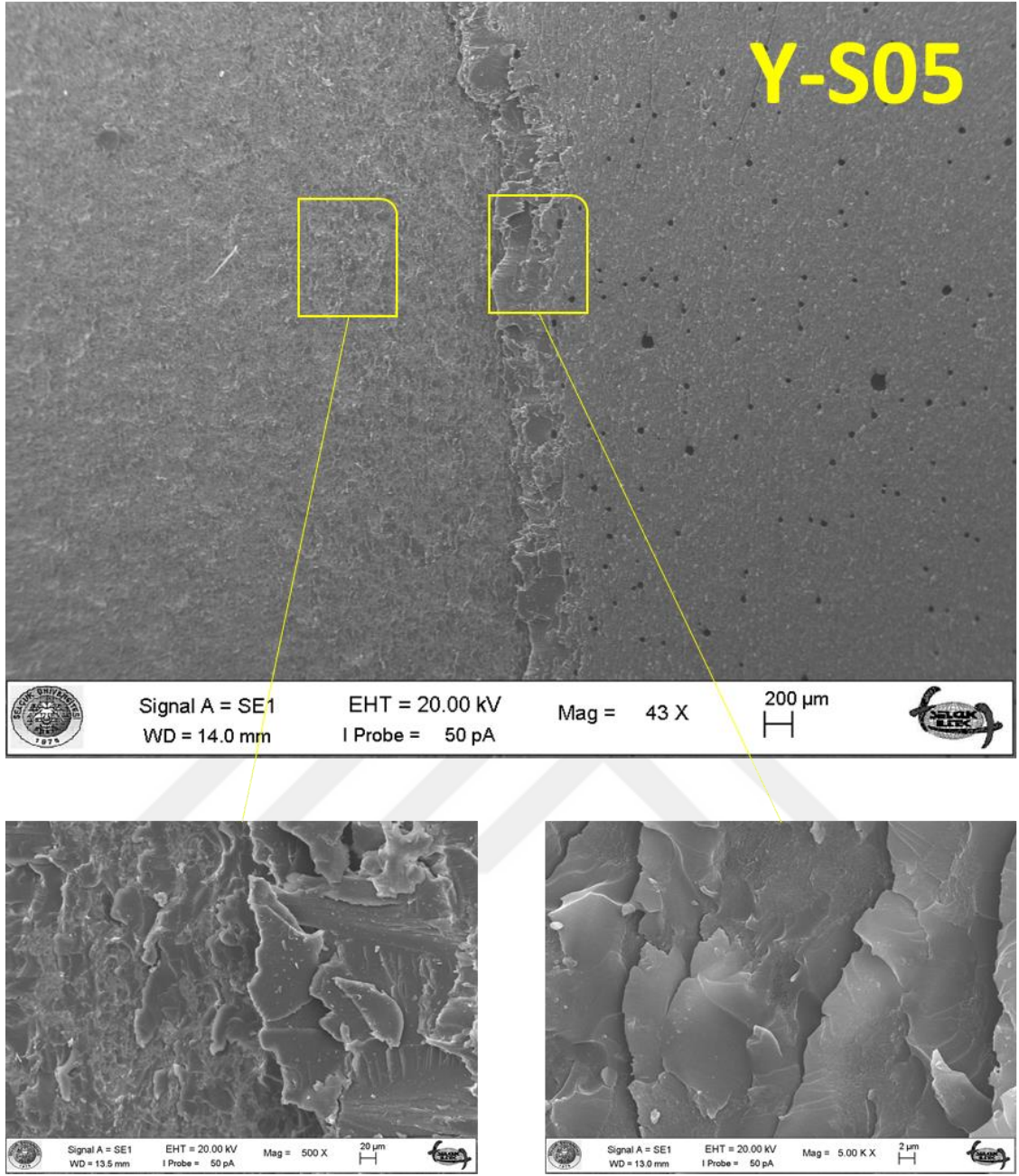
**Şekil 5.29.** Kayma yüzeylerinin SEM görüntüleri

Şekil 5.30., 5.31., 5.32., 5.33. ve 5.34.'de sırasıyla S00, S05, S10, S15 ve S20 numunelerinin kayma yüzeylerinin detay görüntüleri gösterilmektedir.

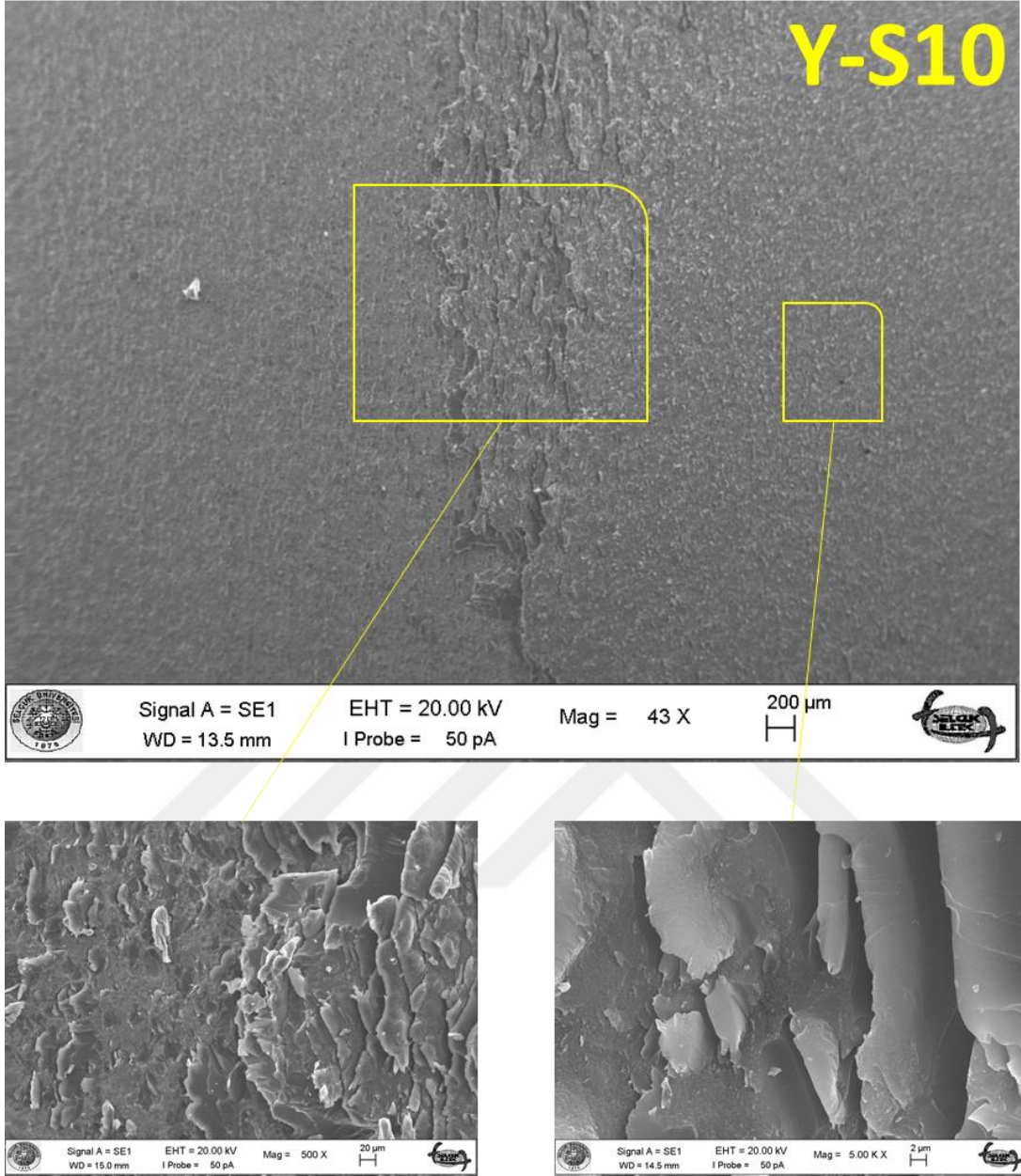




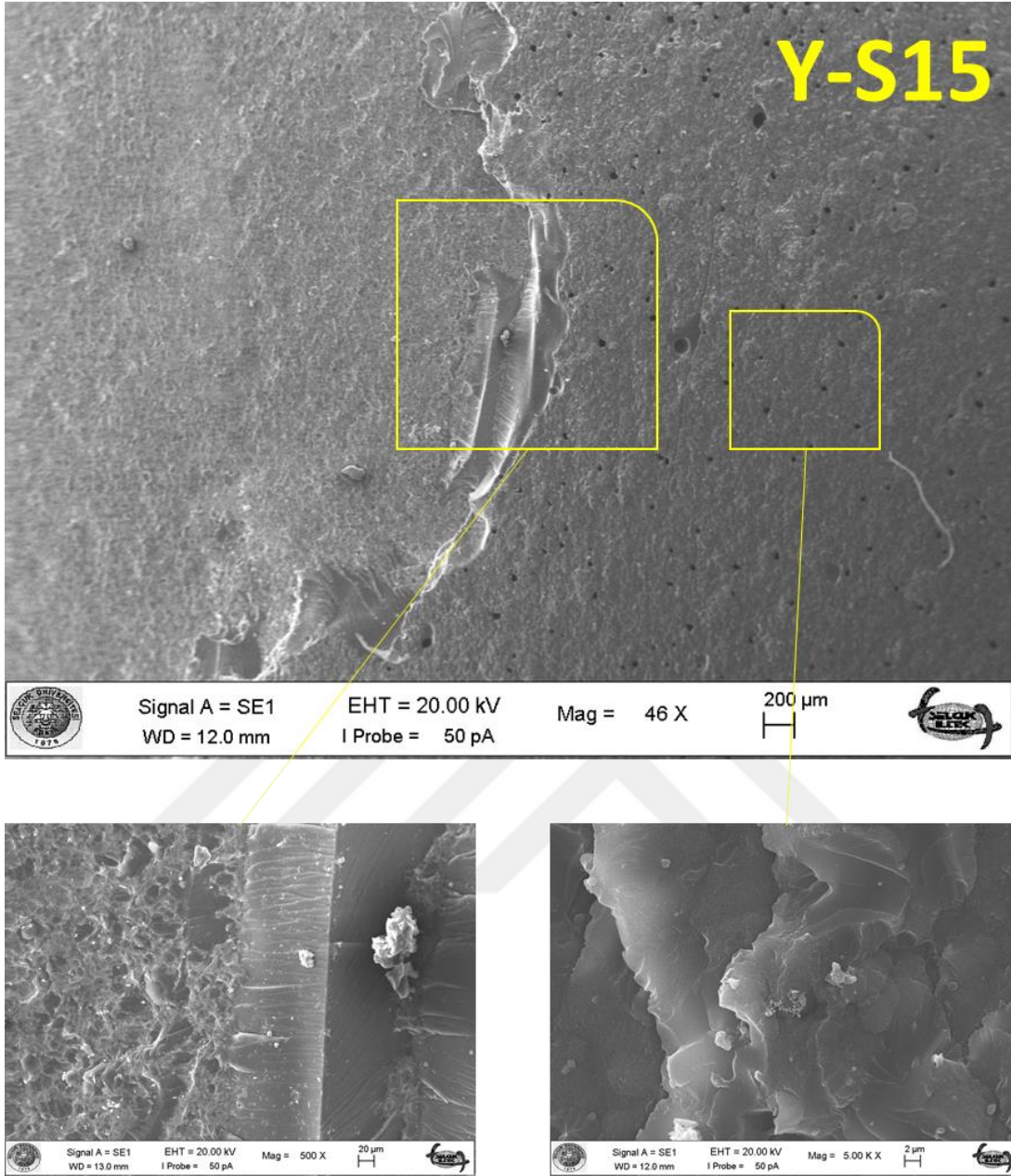
Şekil 5.30. Kayma yüzeylerinin detaylı SEM görüntüleri – Y-S00



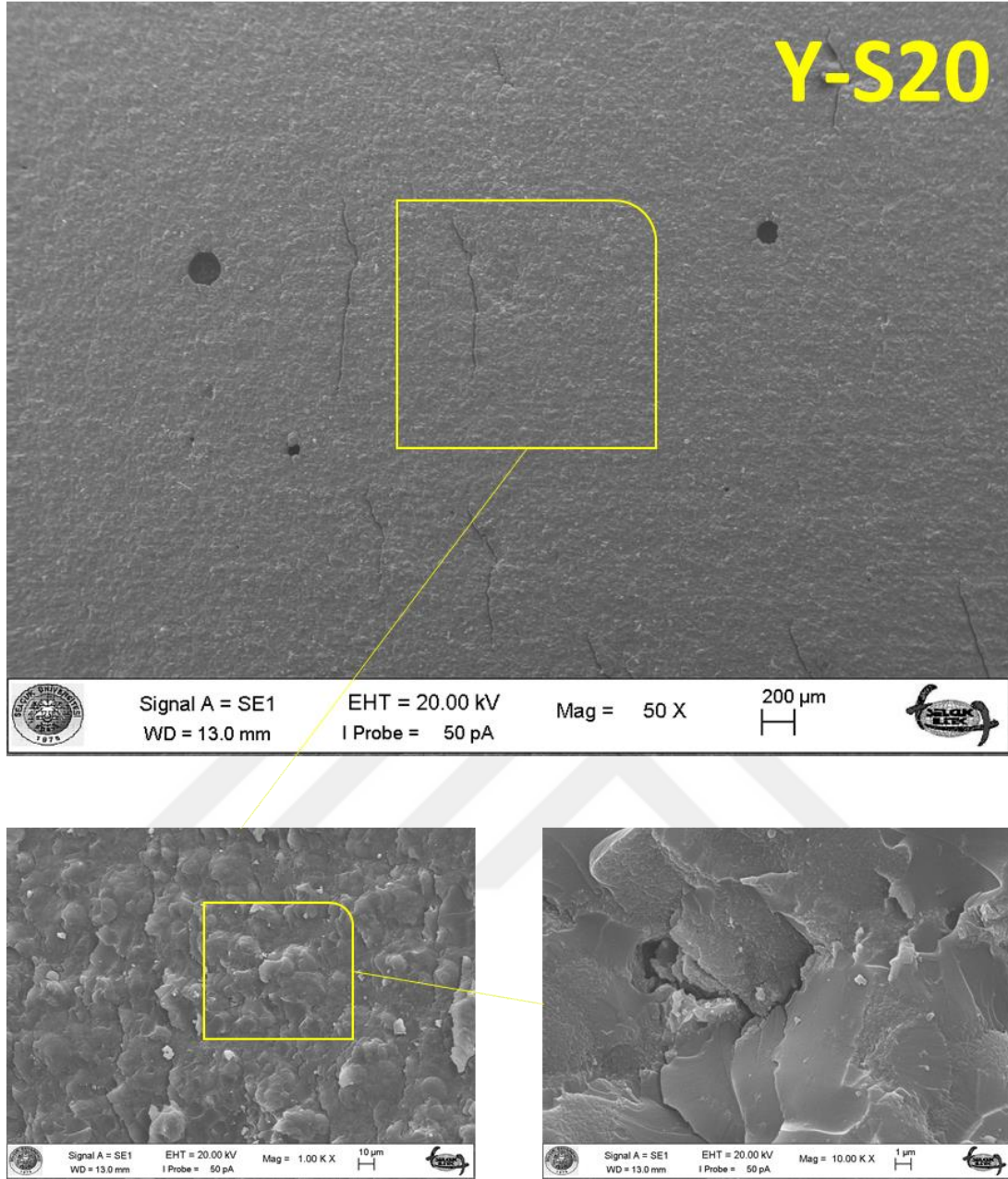
Şekil 5.31. Kayma yüzeylerinin detaylı SEM görüntüleri – Y-S05



**Şekil 5.32.** Kayma yüzeylerinin detaylı SEM görüntüleri – Y-S10



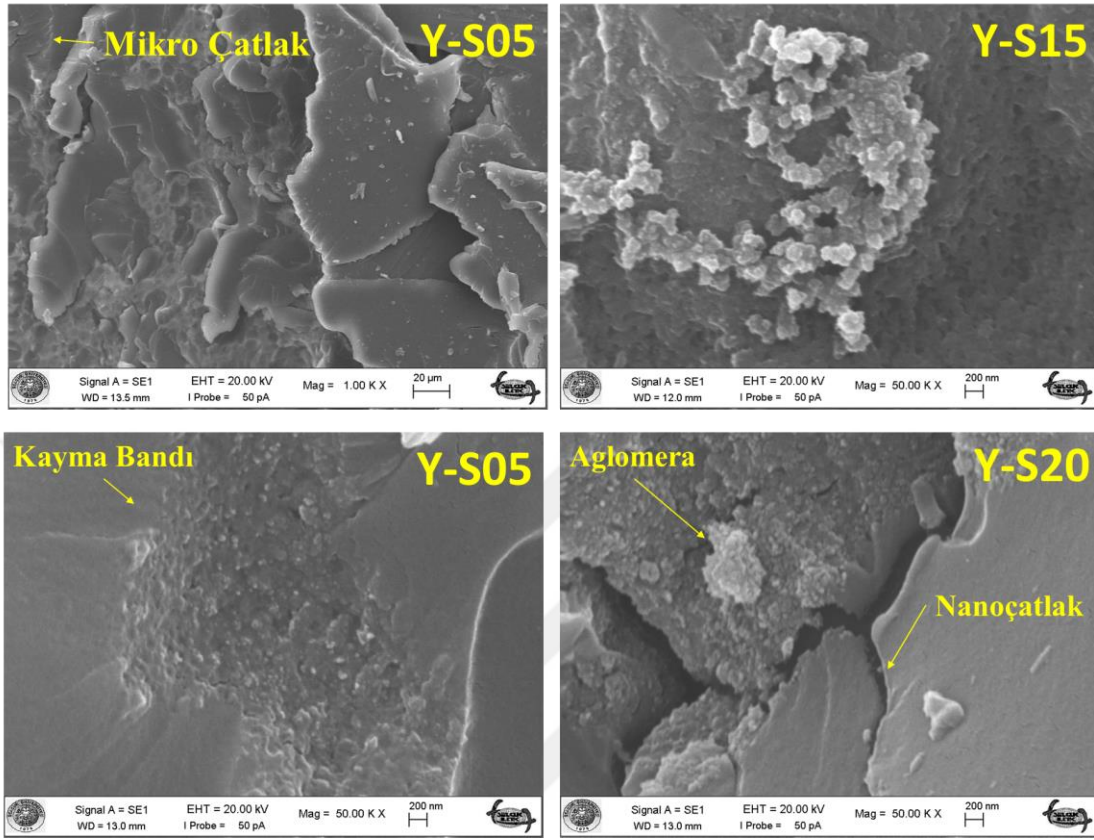
Şekil 5.33. Kayma yüzeylerinin detaylı SEM görüntüleri – Y-S15



Şekil 5.34. Kayma yüzeylerinin detaylı SEM görüntüleri – Y-S20

Y-S00 numunesine ait görüntülerde epoksinin oksit tabakasına çok iyi tutunarak mekanik kenetlenme oluşturduğu görülmektedir. Mekanik kenetlenme ise genel anlamda kayma dayanımını artırıcı etki göstermiştir. Y-S05, Y-S10, Y-S15 ve Y-S20 numunelerinde tutunma Y-S00'a göre daha iyi olmakla birlikte bu durum nanopartikül ilavesinden kaynaklanmıştır. Ancak nanopartikül ilavesi yapılmamış yapıştırıcılar ile birleştirilmiş olan Y-S00 numunesinde görülen tutunma anodizasyon tekniğinin üstünlüğünü de ortaya koymaktadır. Y-S10 numunesinin kayma yüzey resimlerinde epoksi bölgesinin pürüzlülük değerleri tokluk artışı ile örtüşmektedir. Y-S15

numunesinde yer alan pürüzsüz gevrek kırılma bölgeleri tokluğun düşmesine neden olmuştur.



Şekil 5.35. Yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinde görülen partikül mekanizmaları

Y-S05 numunesine ait görüntülerde görülen kayma bandı ve mikro çatlak mekanizmaları tokluk artışı sağlamıştır. (Şekil 5.35.). Ayrıca, Şekil 5.35.'de gösterilen Y-S15 numunesinde ait görüntüde bulunan homojen dağılmamış nanopartiküller de tokluk değerindeki düşüşte pay sahibi olmuştur. Y-S20 numunesinde ise aglomera ve mikro çatlaklar oluşumları gösterilmiştir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli ve ilavesiz yapıştırıcılar ile oluşturulmuş tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının kayma dayanımının tespiti amaçlanmıştır.

En uygun ağırlıkça % SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin tespiti için ağırlıkça %0.5–3.5 ilave oranlarında SiO<sub>2</sub>/Epoksi nanokompozitler hazırlanarak çekme dayanımları tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre yapıştırma bağlantısında uygulanacak ilave oranları tespit edilmiştir.

Yine yapıştırma uygulamasında en iyi dayanımın elde edileceği yüzey hazırlama yönteminin bulunabilmesi amacıyla dört farklı yüzey hazırlama yöntemi ile yapıştırma yüzeyleri hazırlanarak tek bindireli yapıştırma bağlantısı hazırlanmış ve kayma dayanımı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcılar ile yapılacak olan birleştirmede kullanılacak olan yüzey hazırlama yöntemi belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde başlıklar altında sıralanmıştır.

#### 6.1.1. SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilavesinin yapıştırıcıların mekanik deney sonuçları

- SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerin ağırlıkça %0.5 katkı oranında ilavesiyle yapıştırıcıların çekme dayanımında %5.7'lik bir artış elde edilmiştir. Aynı zamanda çekme tokluğunun artmasını sağlamıştır.
- Partikül ilaveli numunelerin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, ilavesiz numunelerin kırılma yüzeylerine göre farklı olarak oldukça pürüzlü olduğu ve konkavı geometrik şekillerde çukurcukların bu pürüzlü kırılma yüzeylerini oluşturduğu görülmüştür.

### 6.1.2. Yüzey hazırlama yönteminin kayma deneyi sonuçları

- En iyi kayma dayanımı FPL dağlama ile hazırlanan yüzeylerden elde edilmiştir (22.04 MPa).
- En dağınık ve yüksek yüzey pürüzlülük değerleri kumlama ile hazırlanan yüzeylerde, en stabil ölçümler ise lazer ile hazırlanan yüzeylerde ölçülmüştür.
- AFM ile yapılan yüzey görüntülemesinde PAA ve FPL yöntemlerinde çukurcukların içinde ikincil çukurcukların oluştuğu ve böylece yapışma alanının arttığı tespit edilmiştir.

### 6.1.3. SiO<sub>2</sub> nanopartikül ilaveli yapıştırıcıların kayma deneyi sonuçları

- En yüksek kayma dayanımı değerine safaya göre %22.52 artışla ağırlıkça %1.0 ilaveli oranında ulaşılmıştır.
- Hasar analizinde yapıştırıcının çekme sonuçlarına benzeyen değer almakla birlikte transfer bölge oluşumları tespit edildi.

## 6.2. Öneriler

- Çalışmamızda kullanılan reçine düşük viskoziteye sahiptir Orta veya yüksek viskoziteli reçine kullanılarak çalışma yürütülebilir. Partikül dağılım mekanizması değişeceği için orta veya yüksek viskoziteli reçinelere partikül ilavesi yapılarak dağılım incelenebilir.
- Yeterli parametrenin belirlenmesi halinde istatistiksel analiz gerçekleştirilebilir.
- Çalışmamızda lazerle yüzey hazırlamada tek bir parametre kullanılmıştır. Farklı lazer parametreleri ile yüzey hazırlanarak yapıştırma bağlantısının dayanımı araştırılabilir.
- Çalışmamızda kumlama ile yüzey hazırlamada tek bir nozul, açı ve kum kullanıldı. Kum, nozul, kumlama açısı ve hızı değiştirilebilir.



**KAYNAKLAR**

- Abdalla, M., Dean, D., Robinson, P., & Nyairo, E. (2008). Cure behavior of epoxy/MWCNT nanocomposites: The effect of nanotube surface modification. *Polymer*, 49(15), 3310–3317. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.05.016>
- Adams, R. D., Comyn, J., & Wake, W. C. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Springer Science & Business Media. Retrieved from [https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=M7sRAwNHhdsC&oi=fnd&pg=PR11&ots=rIWD4njqFo&sig=xXnkjjw80KdzpNrlAlbMrvUSR2M&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=M7sRAwNHhdsC&oi=fnd&pg=PR11&ots=rIWD4njqFo&sig=xXnkjjw80KdzpNrlAlbMrvUSR2M&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Adams, R. D., & Peppiatt, N. A. (1974). Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 9(3), 185–196. <https://doi.org/10.1243/03093247V093185>
- Adams, R. D., & Wake, W. C. (1984). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-5616-2>
- Adin, H. (2007). *Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzeme Bağlantılarının Mekanik Analizi*. Fırat Üniversitesi.
- Akolkar, R., Landau, U., Kuo, H., & Wang, Y.-M. (2004). Modeling of the current distribution in aluminium anodization. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34(8), 807–813. <https://doi.org/10.1023/B:JACH.0000035611.87036.36>
- Akpınar, S. (2008). *Kaymaya Maruz Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi*. Atatürk Üniversitesi.
- Alfano, M., Lubineau, G., Furgiuele, F., & Paulino, G. H. (2012). Study on the role of laser surface irradiation on damage and decohesion of Al/epoxy joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 39, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.03.002>
- Allen, K. W. (1993). Some reflections on contemporary views of theories of adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 13(2), 67–72. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(93\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0143-7496(93)90015-2)
- Alpay, N. (2009). *Farklı Önışlem Yöntemlerinin Alüminyum Anodizasyonu Üzerindeki Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Arabli, V., & Aghili, a. (2013). Effect of Silica Nanoparticles on the Curing Kinetics of Epoxy Vinyl Ester Resin. *Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties*, 2(3), 2–5.

- Arrowsmith, D. J., & Clifford, A. W. (1986). Surface pretreatment of aluminium and aluminium alloys prior to adhesive bonding, electroplating or painting. Washington: United States Patent and Trademark Office. Retrieved from <http://www.google.ch/patents/US4624752>
- ASM Aerospace Specification Metals Inc. (n.d.). Aluminum 2024-T3. Retrieved from <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t3>
- ASTM D2651 - 01(2016). (2016). *Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D2651-01R16>
- ASTM D2674 - 72(2012). (2012). *Standard Methods of Analysis of Sulfochromate Etch Solution Used in Surface Preparation of Aluminum*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D2674-72R12>
- ASTM D3933 - 98(2010). (2010). *Standard Guide for Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing)*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D3933-98R10>
- ASTM D638 - 14. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- ASTM D907 - 15. (2015). *Standard Terminology of Adhesives*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D0907-15>
- Aydin A; Temiz, S, M. D. O. (2005). The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(8), 8. <https://doi.org/10.1163/1568561054890499>
- Battistella, M., Cascione, M., Fiedler, B., Wichmann, M. H. G., Quaresimin, M., & Schulte, K. (2008). Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(12), 1851–1858. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.010>
- Bikerman, J. J. (1967). CAUSES OF POOR ADHESION: WEAK BOUNDARY LAYERS. *Industrial & Engineering Chemistry*, 59(9), 40–44. <https://doi.org/10.1021/ie51403a010>
- Bjørgum, A., Lapique, F., Walmsley, J., & Redford, K. (2003). Anodising as pre-treatment for structural bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(5), 401–412. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(03\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(03)00071-X)
- Brunner, A. J., Neola, A., Rees, M., Gasser, P., Kornmann, X., Thomann, R., & Barbezat, M. (2006). The influence of silicate-based nano-filler on the fracture

- toughness of epoxy resin. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(16), 2336–2345. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.05.004>
- Cerny, J., & Morscher, G. (2008). Adhesive Bonding of Titanium to Carbon-Carbon Composites for Heat Rejection Systems. In R. Tandon, A. Wereszczak, & E. Lara-Curzio (Eds.), *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics II: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 27, Issue 2* (pp. 125–131). The American Ceramics Society. <https://doi.org/10.1002/9780470291313.ch12>
- Chan, C.-M., Wu, J., Li, J.-X., & Cheung, Y.-K. (2002). Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites. *Polymer*, 43(10), 2981–2992. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00120-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00120-9)
- Chaudhary, S., Parthasarathy, S., Kumar, D., Rajagopal, C., & Roy, P. (2014). Simple toughening of epoxy thermosets by preformed thermoplastics. *SPE Plastics Research Online*, 10–12. <https://doi.org/10.2417/spepro.005409>
- Chen, W., Shen, H., Auad, M. L., Huang, C., & Nutt, S. (2009). Basalt fiber-epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(8), 1082–1089. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.027>
- Chen, Y.-C., Lin, H.-C., & Lee, Y.-D. (2003). The Effects of Filler Content and Size on the Properties of PTFE/SiO<sub>2</sub> Composites. *Journal of Polymer Research*, 10(4), 247–258. <https://doi.org/10.1023/B:JPOL.00000004620.71900.16>
- Comrie, R., Affrossman, S., Hayward, D., Pethrick, R. a., Zhou, X., & Thompson, G. E. (2005). Ageing of Adhesive Bonds with Various Surface Treatments, Part 3: Aluminium–Dicyandiamide Cured Aluminium Filled Epoxy Joints. *The Journal of Adhesion*, 81(12), 1199–1215. <https://doi.org/10.1080/00218460500371756>
- Davis, G. D. (1993). Contamination of surfaces: Origin, detection and effect on adhesion. *Surface and Interface Analysis*, 20(5), 368–372. <https://doi.org/10.1002/sia.740200507>
- DeLollis, N. J. (1970). *Adhesion theory review and critique*. Albuquerque, NM: Sandia Corp.
- DeMejo, L. P., Rimai, D. S., & Sharpe, L. H. (1999). *Fundamentals of Adhesion and Interfaces*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Demirci, M. T. (2015). *SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkısının yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların yorulma davranışlarına etkisi*. Selçuk

Üniversitesi.

- Demirci, M. T., Tarakçioğlu, N., Avcı, A., Akdemir, A., & Demirci, İ. (2017). Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO<sub>2</sub> nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method. *Composites Part B: Engineering*, *119*, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.045>
- Deng, S., Rosso, P., Ye, L., & Friedrich, K. (2007). Interlaminar fracture of CF/EP composites modified with nano-silica. *Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena*, *121–123*(PART 2), 1403–1406. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.121-123.1403>
- Deng, S., Ye, L., & Friedrich, K. (2007). Fracture behaviours of epoxy nanocomposites with nano-silica at low and elevated temperatures. *Journal of Materials Science*, *42*(8), 2766–2774. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-1420-x>
- Derjaguin, B. ., Muller, V. ., & Toporov, Y. . (1975). Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, *53*(2), 314–326. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(75\)90018-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(75)90018-1)
- Dodiuk, H., Kenig, S., Blinsky, I., Dotan, A., & Buchman, A. (2005). Nanotailoring of epoxy adhesives by polyhedral-oligomeric-sil-sesquioxanes (POSS). *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *25*(3), 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2004.07.003>
- Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2011). The role of alumina nanoparticles in epoxy adhesives. *Journal of Nanoparticle Research*, *13*(6), 2429–2441. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-0130-0>
- Dorn, L. (1994). *Adhesive Bonding - Terms and Definitions*. <https://doi.org/2238>
- Ebnesajjad, S. (2011). *Handbook of Adhesives and Surface Preparation Technology, Applications and Manufacturing*. Burlington, MA: William Andrew - Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4461-3.10022-7>
- Ebnesajjad, S., & Ebnesajjad, C. (2006). *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*. Waltham, MA: William Andrew - Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-26435-8.00014-9>
- Ekrem, M. (2014). *Yapıştırıcı bağlantıların kırılma davranışlarına nano partiküllerin etkisi*. Selçuk Üniversitesi.
- Ekrem, M., Ataberk, N., Avcı, A., & Akdemir, A. (2016). Improving electrical and mechanical properties of a conductive nano adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *4243*(October), 1–14.

- <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1229881>
- Ewen J.C., K. (2010). Key issues in selecting the right adhesive. In *Advances in Structural Adhesive Bonding* (pp. 3–19). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845698058.1.3>
- Frigione, M., Lettieri, M., & Mecchi, a. M. (2006). Environmental Effects on Epoxy Adhesives Employed for Restoration of Historical Buildings1. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(5), 715–722. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:5\(715\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:5(715))
- Frisch, K. C. (2002). Chemistry and technology of polyurethane adhesives. In *Adhesion Science and Engineering* (pp. 759–812). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451140-9/50016-0>
- Gao, X., Meng, X., Wang, H., Wen, B., Ding, Y., Zhang, S., & Yang, M. (2008). Antioxidant behaviour of a nanosilica-immobilized antioxidant in polypropylene. *Polymer Degradation and Stability*, 93(8), 1467–1471. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.009>
- Gkikas, G., Saganas, C., Grammatikos, S. A., Maistros, G. M., Barkoula, N.-M., & Paipetis, A. S. (2012). Dispersion monitoring of carbon nanotube modified epoxy systems. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 8345(September), 83454R–1–8. <https://doi.org/10.1117/12.915486>
- Goglio, L., Rossetto, M., & Dragoni, E. (2008). Design of adhesive joints based on peak elastic stresses. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(8), 427–435. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.04.001>
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Köpke, U., Fiedler, B., & Schulte, K. (2004). Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: Enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. *Composites Science and Technology*, 64(15 SPEC. ISS.), 2363–2371. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.04.002>
- González-González, M., Cabanelas, J. C., & Baselga, J. (2012). Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. *University Carlos III of Madrid*, 2, 261–284. <https://doi.org/10.5772/2055>
- Goyat, M. S., Suresh, S., Bahl, S., Halder, S., & Ghosh, P. K. (2015). Thermomechanical response and toughening mechanisms of a carbon nano bead reinforced epoxy composite. *Materials Chemistry and Physics*, 166, 144–152.

- <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.09.038>
- Green, R. J., Davies, M. C., Roberts, C. J., & Tendler, S. J. B. (1999). Competitive protein adsorption as observed by surface plasmon resonance. *Biomaterials*, *20*(4), 385–391. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(98\)00201-4](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(98)00201-4)
- Han, J. T., & Cho, K. (2006). Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range. *Journal of Materials Science*, *41*(13), 4239–4245. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-6219-2>
- Harper, C. A. (2002). *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Hashim, S. A., Cowling, M. J., & Winkle, I. E. (1990). Design and assessment methodologies for adhesively bonded structural connections. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *10*(3), 139–145. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(90\)90096-G](https://doi.org/10.1016/0143-7496(90)90096-G)
- Hayes, M. D., Edwards, D. B., & Shah, A. R. (2015). *Fractography in Failure Analysis of Polymers*. *Fractography in Failure Analysis of Polymers*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-24272-1.00005-2>
- Hexion. (n.d.). Laminating resin MGS® L 285. Retrieved from [http://www.cozybuilders.org/ref\\_info/MGS\\_L285\\_properties.pdf](http://www.cozybuilders.org/ref_info/MGS_L285_properties.pdf)
- Huang, C. J., Fu, S. Y., Zhang, Y. H., Lauke, B., Li, L. F., & Ye, L. (2005). Cryogenic properties of SiO<sub>2</sub>/epoxy nanocomposites. *Cryogenics*, *45*(6), 450–454. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2005.03.003>
- Hull, D. (1999). *Fractography: observing, measuring and interpreting fracture surface topography*. Cambridge, United Kingdom: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Israelachvili, J. N., & Tabor, D. (1972). The Measurement of Van Der Waals Dispersion Forces in the Range 1.5 to 130 nm. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *331*(1584), 19–38. <https://doi.org/10.1098/rspa.1972.0162>
- Jalili, M. M., Moradian, S., Dastmalchian, H., & Karbasi, A. (2007). Investigating the variations in properties of 2-pack polyurethane clear coat through separate incorporation of hydrophilic and hydrophobic nano-silica. *Progress in Organic Coatings*, *59*(1), 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.01.018>
- Jana, S., & Zhong, W.-H. (2007). FTIR study of ageing epoxy resin reinforced by reactive graphitic nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, *106*(5), 3555–3563. <https://doi.org/10.1002/app.26925>

- Jarry, E., & Sheno, R. A. (2006). Performance of butt strap joints for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(3), 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.01.010>
- Jennings, C. W. (1972). Surface Roughness and Bond Strength of Adhesives. *The Journal of Adhesion*, 4(1), 25–38. <https://doi.org/10.1080/00218467208072208>
- Johnsen, B. B., Kinloch, A. J., Mohammed, R. D., Taylor, A. C., & Sprenger, S. (2007). Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers. *Polymer*, 48(2), 530–541. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.11.038>
- Johnsen, B. B., Lapique, F., & Bjørgum, A. (2004). The durability of bonded aluminium joints: a comparison of AC and DC anodising pretreatments. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(2), 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.003>
- Kadioglu, F., & Es-Souni, M. (2003). Use of thin adherends in adhesively bonded joints under different loading modes. *Science and Technology of Welding and Joining*, 8(6), 437–442. <https://doi.org/10.1179/136217103225009080>
- Kaftelen, H., & Baldan, A. (2005). Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Repaired Aircraft Structures. In *Proceedings of 7th International Fracture Conference* (pp. 203–212). Kocaeli: Kocaeli University.
- Khoe, S., & Hassani, N. (2010). Adhesion strength improvement of epoxy resin reinforced with nanoelastomeric copolymer. *Materials Science and Engineering A*, 527(24–25), 6562–6567. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.013>
- Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7764-9>
- Kinloch, A. J., Mohammed, R. D., Taylor, A. C., Eger, C., Sprenger, S., & Egan, D. (2005). The effect of silica nano particles and rubber particles on the toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers. *Journal of Materials Science*, 40(18), 5083–5086. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1716-2>
- Kinloch, a. J., Lee, J. H., Taylor, a. C., Sprenger, S., Eger, C., & Egan, D. (2003a). Toughening structural adhesives via nano- and micro-phase inclusions. *The Journal of Adhesion*, 79(8–9), 867–873. <https://doi.org/10.1080/00218460309551>
- Kinloch, a. J., Lee, J. H., Taylor, a. C., Sprenger, S., Eger, C., & Egan, D. (2003b). Toughening structural adhesives via nano- and micro-phase inclusions. *The Journal of Adhesion*, 79(8–9), 867–873. <https://doi.org/10.1080/00218460309551>
- Kwon, J. W., & Lee, D. G. (2000). The effects of surface roughness and bond thickness

- on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(8), 1085–1102. <https://doi.org/10.1163/156856100743095>
- Lapiqueir, F., Bjorgum, A., Johnsen, B., & Walmsley, J. (2003). Hot AC anodising as a Cr(IV)-free pre-treatment for structural bonding of aluminium. *Adhesion and Interface*, 4(2), 2.
- Lau, K., Lu, M., Chun-ki Lam, Cheung, H., Sheng, F.-L., & Li, H.-L. (2005). Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotube bundle-reinforced epoxy nanocomposites: the role of solvent for nanotube dispersion. *Composites Science and Technology*, 65(5), 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.005>
- Leena, K., Athira, K. K., Bhuvanewari, S., Suraj, S., & Rao, V. L. (2016). Effect of surface pre-treatment on surface characteristics and adhesive bond strength of aluminium alloy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.07.012>
- Liang, Z.-M., Wan, C.-Y., Zhang, Y., Wei, P., & Yin, J. (2004). PVC/Montmorillonite Nanocomposites Based on a Thermally Stable, Rigid-Rod Aromatic Amine Modifier. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(1), 567–575. <https://doi.org/10.1002/app.20041>
- Liu, Y. L., Lin, Y. Lo, Chen, C. P., & Jeng, R. J. (2003). Preparation of Epoxy Resin/Silica Hybrid Composites for Epoxy Molding Compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(14), 4047–4053. <https://doi.org/10.1002/app.13159>
- Luksepp, T., & Kristiansen, K. (2009). The influence of water when bonding with heat-curing epoxy adhesives on sealed sulphuric acid-anodised aluminium. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(3), 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.07.007>
- Lunder, O., Olsen, B., & Nisancioglu, K. (2002). Pre-treatment of AA6060 aluminium alloy for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(2), 143–150. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00049-5)
- Mactabi, R., Rosca, I. D., & Hoa, S. V. (2013). Monitoring the integrity of adhesive joints during fatigue loading using carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 78, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.01.020>
- Manjunatha, C. M., Taylor, A. C., Kinloch, A. J., & Sprenger, S. (2010). The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy



- composite. *Composites Science and Technology*, 70(1), 193–199.  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.10.012>
- Mansourian-Tabaei, M., Jafari, S. H., & Khonakdar, H. A. (2014). Lap shear strength and thermal stability of diglycidyl ether of bisphenol a/epoxy novolac adhesives with nanoreinforcing fillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6), 1–8.  
<https://doi.org/10.1002/app.40017>
- Marsden, J. G. (1990). Organofunctional Silane Coupling Agents. In I. Skeist (Ed.), *Handbook of Adhesives* (pp. 536–548). Boston, MA: Springer US.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9\\_31](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9_31)
- McBain, J. W., & Hopkins, D. G. (1924). On Adhesives and Adhesive Action. *The Journal of Physical Chemistry*, 29(2), 188–204.  
<https://doi.org/10.1021/j150248a008>
- Meguid, S. A., & Sun, Y. (2004). On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces. *Materials and Design*, 25(4), 289–296.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.10.018>
- Mittal, K. L., & Lee, K. W. (1997). *Polymer Surfaces and Interfaces: Characterization, Modification and Application*. Utrecht, Netherlands: VSP.
- MKnano. (n.d.). SiO<sub>2</sub>-amorphous, 15 nm, Hydrophobic. Retrieved from [http://mknano.com/Nanoparticles/Single-Element-Oxides/Silicon-Oxide-Nanopowder/SiO<sub>2</sub>-amorphous-15nm-Hydrophobic.asp](http://mknano.com/Nanoparticles/Single-Element-Oxides/Silicon-Oxide-Nanopowder/SiO2-amorphous-15nm-Hydrophobic.asp)
- Mohan, T. P., Kumar, M. R., & Velmurugan, R. (2006). Thermal, mechanical and vibration characteristics of epoxy-clay nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 41(18), 5915–5925. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0278-2>
- Molazemhosseini, A., Tourani, H., Khavandi, A., & Eftekhari Yekta, B. (2013). Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica. *Wear*, 303(1–2), 397–404.  
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.03.019>
- Naito, K., Onta, M., & Kogo, Y. (2012). The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 36, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.03.007>
- Ozel, A., Yazici, B., Akpınar, S., Aydın, M. D., & Temiz, Ş. (2014). A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Composites Part B: Engineering*, 62, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.001>
- Parker, J. L., & Attard, P. (1992). Deformation of surfaces due to surface forces. *The*

- Journal of Physical Chemistry*, 96(25), 10398–10405.  
<https://doi.org/10.1021/j100204a053>
- Parvatareddy, H. (1997). *Durability of Polyimide Adhesives and Their Bonded Joints for High Temperature Applications*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Petrie, E. M. (2000). *Handbook of Adhesives and Sealants Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*. New York: McGraw-Hill.
- Petrie, E. M. (2002). Plastics and adhesives as adhesives. In C. A. Harper (Ed.), *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Phonthammachai, N., Chia, H., & He, C. (2012). One-Step Synthesis of Oval Shaped Silica/Epoxy Nanocomposite: Process, Formation Mechanism and Properties. In *The Delivery of Nanoparticles*. InTech. <https://doi.org/10.5772/34800>
- Pocius, A. V. (2012). *Adhesion and adhesives technology: an introduction* (3rd ed.). Munich: Hanser Publications - Cincinnati.
- Possart, W. (1988). Experimental and theoretical description of the electrostatic component of adhesion at polymer/metal contacts. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 8(2), 77–83. [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(88\)90027-9](https://doi.org/10.1016/0143-7496(88)90027-9)
- Proenca, M. P., Sousa, C. T., Leitao, D. C., Ventura, J., Sousa, J. B., & Araujo, J. P. (2008). Nanopore formation and growth in phosphoric acid Al anodization. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(47–51), 5238–5240. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2008.04.055>
- Prolongo, S. G., & Ureña, A. (2009). Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminium joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(1), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.01.001>
- Prolongo, S., Gude, M., & Ureña, A. (2010). Nanoreinforced Adhesives. In *Nanofibers* (pp. 39–68). Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/nanofibers/nanoreinforced-adhesives>
- Rende, H. (2001). *Makine Elemanlari*. SEÇ YAYIN DAĞITIM.
- Roulin-Moloney, A. C. (1989). *Fractography and failure mechanisms of polymers and composites*. Elsevier Applied Science.
- Saenz de Miera, M., Curioni, M., Skeldon, P., & Thompson, G. E. (2008). Modelling the anodizing behaviour of aluminium alloys in sulphuric acid through alloy analogues. *Corrosion Science*, 50(12), 3410–3415.

- <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.019>
- Sawa, T., Liu, J., Nakano, K., & Tanaka, J. (2000). A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(1), 43–66. <https://doi.org/10.1163/156856100742104>
- Shahid, M., & Hashim, S. A. (2002). Effect of surface roughness on the strength of cleavage joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(3), 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00059-8)
- Sharpe, L. H., & Schonhorn, H. (1963). Theory Gives Direction to Adhesion Work. *Chemical & Engineering News*, 41(15), 67–88. <https://doi.org/10.1021/cen-v041n015.p067>
- Shields, J. (1984). Joint design. In *Adhesives Handbook* (pp. 7–22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01356-7.50007-0>
- Snogren, R. C. (1974). *Handbook of Surface Preparation*. New York: Palmerton Publishing Company.
- Spadaro, C., Sunseri, C., & Dispenza, C. (2007). Laser surface treatments for adhesion improvement of aluminium alloys structural joints. *Radiation Physics and Chemistry*, 76(8–9), 1441–1446. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.02.047>
- Srivastava, V. K. (2011). Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and C/CSiC ceramic fibre composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(6), 486–489. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.03.006>
- Su, F.-H., Zhang, Z.-Z., & Liu, W.-M. (2007). Tribological and mechanical properties of Nomex fabric composites filled with polyfluo 150 wax and nano-SiO<sub>2</sub>. *Composites Science and Technology*, 67(1), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.029>
- Su, F. H., Zhang, Z. Z., & Liu, W. M. (2007). Tribological and mechanical properties of Nomex fabric composites filled with polyfluo 150 wax and nano-SiO<sub>2</sub>. *Composites Science and Technology*, 67(1), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.029>
- Sulka, G. D., Stroobants, S., Moshchalkov, V., Borghs, G., & Celis, J.-P. (2002). Nanostructuring of aluminium and synthesis of porous aluminium membranes by anodizing. *Bulletin Du Cercle d'Etudes Des Métaux*, 17(6), 1–8.

- Suslick, K. S. (2000). Sonochemistry. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, (9), 1–21. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1982.197778>
- Sydlik, S. A., Lee, J. H., Walish, J. J., Thomas, E. L., & Swager, T. M. (2013). Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives. *Carbon*, 59, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.02.061>
- Şekercioğlu, T., Rende, H., Gülsöz, A., & Meran, C. (2003). The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components. *Journal of Materials Processing Technology*, 142(1), 82–86. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00463-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00463-1)
- Şekercioğlu, T. (2001). *Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi.
- Şekercioğlu, T., & Özenç, M. (2012). Metallerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin incelenmesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(627), 43–50.
- Tabor, D., & Winterton, R. (1969). The Direct Measurement of Normal and Retarded van der Waals Forces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 312(1511), 435–450. <https://doi.org/10.1098/rspa.1969.0169>
- Tang, L.-C., Wan, Y.-J., Peng, K., Pei, Y.-B., Wu, L.-B., Chen, L.-M., ... Lai, G.-Q. (2013). Fracture toughness and electrical conductivity of epoxy composites filled with carbon nanotubes and spherical particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.012>
- Taşyürek, M. (2014). *Yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55o filaman sarım CNT takviyeli CTP kompozit boruların mekanik özelliklerinin ve iç basınç etkisi altındaki yorulma davranışlarının araştırılması*. Selçuk Üniversitesi.
- Temiz, Ş. (2003). *Yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri üzerine çevresel faktörlerin etkisinin incelenmesi*. Atatürk Üniversitesi.
- Tong, L., & Steven, G. P. (1999). *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*. Boston, MA: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5133-1>
- Tzetzis, D., Mansour, G., Tsiafis, I., & Pavlidou, E. (2013). Nanoindentation measurements of fumed silica epoxy reinforced nanocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(3), 160–173. <https://doi.org/10.1177/0731684412463978>
- Uehara, K., & Sakurai, M. (2002). Bonding strength of adhesives and surface roughness of joined parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2), 178–181.

- [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00122-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00122-X)
- Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö. S., Avci, A., & Ekrem, M. (2014). Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties. *Applied Surface Science*, 318, 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.070>
- Underhill, P. R., & Duquesnay, D. L. (2006). The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(1–2), 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.03.006>
- Vaidya, U. K., Gautam, A. R. S., Hosur, M., & Dutta, P. (2006). Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(3), 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.03.013>
- Venables, J. D. (1984). Adhesion and durability of metal-polymer bonds. *Journal of Materials Science*, 19(8), 2431–2453. <https://doi.org/10.1007/BF00550796>
- Voyutskii, S. S. (1963). *Autohesion and adhesion of high polymers (Polymer Reviews)*. New York: Wiley.
- Wang, C., Huang, Y. D., & Wang, B. (2006). Study on heat-resistant property of adhesive/carbon-carbon composites joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(4), 206–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.03.003>
- Wang, R.-M., Zheng, S.-R., & Zheng, Y. G. (2011). *Polymer Matrix Composites and Technology*. Woodhead Publishing Limited.
- Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2011). Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(1), 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.09.010>
- Wernik, J. M., & Meguid, S. A. (2014). On the mechanical characterization of carbon nanotube reinforced epoxy adhesives. *Materials & Design*, 59, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.034>
- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F., & Friedrich, K. (2006). Epoxy nanocomposites - fracture and toughening mechanisms. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(16), 2375–2398. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.05.018>
- Yao, X. F., Zhou, D., & Yeh, H. Y. (2008). Macro/microscopic fracture characterizations of SiO<sub>2</sub>/epoxy nanocomposites. *Aerospace Science and Technology*, 12(3), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.03.005>
- Zhai, L. L., Ling, G. P., & Wang, Y. W. (2008). Effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on adhesion

- strength of epoxy adhesive and steel. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(1–2), 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.03.005>
- Zhai, L., Ling, G., Li, J., & Wang, Y. (2006). The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive. *Materials Letters*, 60(25–26), 3031–3033. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.02.038>
- Zhang, Q. H., & Chen, D. J. (2004). Percolation threshold and morphology of composites of conducting carbon black/polypropylene/EVA. *Journal of Materials Science*, 39(5), 1751–1757. <https://doi.org/10.1023/B:JMISC.0000016180.42896.0f>
- Zhang, X., Xu, W., Xia, X., Zhang, Z., & Yu, R. (2006a). Toughening of cycloaliphatic epoxy resin by nanosize silicon dioxide. *Materials Letters*, 60(28), 3319–3323. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.04.023>
- Zhang, X., Xu, W., Xia, X., Zhang, Z., & Yu, R. (2006b). Toughening of cycloaliphatic epoxy resin by nanosize silicon dioxide. *Materials Letters*, 60(28), 3319–3323. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.04.023>
- Zhao, R., & Luo, W. (2008). Fracture surface analysis on nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy composite. *Materials Science and Engineering A*, 483–484(1–2 C), 313–315. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.151>
- Zheng, Y., Zheng, Y., & Ning, R. (2003a). Effects of nanoparticles SiO<sub>2</sub> on the performance of nanocomposites. *Materials Letters*, 57(19), 2940–2944. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01401-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01401-5)
- Zheng, Y., Zheng, Y., & Ning, R. (2003b). Effects of nanoparticles SiO<sub>2</sub> on the performance of nanocomposites. *Materials Letters*, 57(19), 2940–2944. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01401-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01401-5)
- Zhou, H., Liu, H., Zhou, H. M., Zhang, Y., Gao, X. P., & Mai, Y. (2015). on the Adhesive Properties of Nano-Silica / Epoxy Bonded Single-Lap Joints. *Materials and Design*, 95(July), 19–24.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Mehmet SARI  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Konya / 10.12.1991  
**Telefon** : +90 (553) 273 53 83  
**e-mail** : m.sari@outlook.com.tr

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Cemil Keleşoğlu Lisesi, Karatay, Konya	2010
Üniversite	: Selçuk Üni., Müh. Fakültesi, Selçuklu, Konya	2015
Yüksek Lisans	: N. Erbakan Üni., Fen Bil. Enst. Meram, Konya	
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2015	Sekizli Makina ve Vinç San. Tic. A.Ş.	Makine Mühendisi
2015-2016	FMC Hidrolik Sist. San. Tic. Ltd. Şti.	Makine Mühendisi

### UZMANLIK ALANI

Epoksi-nanokompozitler, yapıştırma bağlantıları, kompozit malzemeler

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Sarı, M., Ş. Yazman, L. Gemi ve A. Akdemir, "Effect of Surface Morphology and Roughness on Bonding Strength at Adhesive Bonding of Al2024-T3 Aerospace Material," 16th International Materials Symposium IMSP'2016, Denizli, 2016 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Sarı, M., L. Gemi, Ş. Yazman ve A. Akdemir, "Investigating Mechanical Properties of SiO<sub>2</sub> Nanoparticle Reinforced Epoxy/Nanocomposites," 16th International Materials Symposium IMSP'2016, Denizli, 2016 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)