

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO MALZEME TAKVİYELİ EPOKSİNİN ALÜMİNYUM
YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA HİGROTERMAL
YAŞLANDIRMAYA VE HİBRİT TAKVİYENİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ELANUR OZUN

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO MALZEME TAKVİYELİ EPOKSİNİN ALÜMİNYUM
YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA HİGROTERMAL
YAŞLANDIRMAYA VE HİBRİT TAKVİYENİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ELANUR OZUN

Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından FYL-2021-2722 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Elanur OZUN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izimle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Elanur OZUN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde pek çok sektörel uygulamalarda, deneysel çalışmalarda ya da sosyal hayatta karşılaştığımız yapıştırma bağlantıları sunduğu hafif konstrüksiyonlar dolayısıyla cazip bir birleştirme yöntemi konumundadır. Özellikle 21. yüzyılın başından itibaren yapıştırıcı içerisine takviye edilen nano boyutlu malzemelerle yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarının kayda değer şekilde iyileşmesi araştırmacıları bu konu üzerine yoğunlaştırmıştır. Umut vadeden sonuçların elde edilmesiyle çalışmaların kapsamı genişletilerek, nano malzeme esaslı minimum maliyete sahip verimi yüksek yeni malzemelere ulaşmak hedef haline gelmiş ve tüm bu gelişmeler yapıştırma yönteminin de yücelmesine öncülük etmiştir.

Bu amaçla bu tez çalışmasında farklı nano malzeme takviyelerinin alüminyum yapıştırma bağlantılarının mekanik performansları üzerindeki etkisi üzerinde durulmuş ve nano malzeme takviyelerinin bilhassa higrotermal yaşlandırma koşullarında mekanik dayanım üzerinde nasıl bir rol oynadığı incelenmiştir. Ek olarak, hibrit nano malzeme takviyesi stratejisi kullanılarak sinerjik etkiden yararlanıp maliyet ve ağırlık parametrelerine oranla maksimum mekanik dayanım performansı sunan yapıştırma bağlantılarına ulaşmak hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın oluşmasına imkan sağlayarak [FYL-2021-2722] proje numarasıyla destekleyen Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne teşekkür ederim. Tüm tez sürecim boyunca hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen, yapıcı eleştirileriyle yoluma ışık tutan, mükemmel bir öğretici olmasının yanında iş ahlakıyla da her zaman örnek alacağım kıymetli hocam Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez konumun oluşmasında ilham kaynağı olan, fikirleri ve yaklaşımlarıyla ufku genişleterek hep daha iyiye teşvik eden değerli hocam Doç. Dr. Onur ÇOBAN'a ve sağladığı laboratuvar imkanlarının yanında motivasyon ve destekleriyle beni cesaretlendiren değerli hocam Arş. Gör. Dr. Togayhan KUTLUK'a teşekkürü bir borç bilirim. Laboratuvar imkanlarını kullanmama olanak sağlayan Doç. Dr. Mustafa TÜMER'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın her aşamasında bana yol arkadaşlığı yaparak yükümü hafifleten, güler yüzüyle sinerjik etkiyi sosyal hayatımda mümkün kılan pamuk arkadaşım Reyhan CEYLAN'a, samimiyeti ve neşesiyle her daim motivasyon kaynağı olan Şaban CEYLAN amcama yürekten teşekkür ederim. Hayatım boyunca aldığım her kararda ve her anımda varlıklarını daima yanımda hissettiğim, en büyük armağanlarım canım annem Melek OZUN'a, canım babam Mustafa OZUN'a ve biricik ablam Elif OZUN'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Daha iyi bir insan olma yolunda hayatıma dokunan herkese teşekkür ederim.

Haziran – 2022

Elanur OZUN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Yapıştırma Bağlantılarının Geleneksel Bağlantı Yöntemleriyle Karşılaştırılması	5
2.2. Yapıştırma Bağlantılarının Uygulama Alanları	7
2.3. Yapışma Olayı	10
2.3.1. Yapışma Teorileri	12
2.3.1.1. Mekanik teori.....	12
2.3.1.2. Elektrostatik Teori	13
2.3.1.3. Difüzyon Teorisi	14
2.3.1.4. Islatabilirlik Teorisi	14
2.3.1.5. Kimyasal Bağlanma Teorisi	15
2.3.1.6. Zayıf Sınır Tabakası Teorisi	16
2.4. Metal Yapıştırma Bağlantılarında Ön Yüzey İşlemi Uygulamalarının Önemi	17
2.4.1. Yağ Alma	19
2.4.2. Mekanik Ön Yüzey İşlemleri	20
2.4.3. Kimyasal Ön Yüzey İşlemleri	21
2.4.4. Elektrokimyasal Ön Yüzey İşlemleri	23
2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Türleri	25
2.6. Yapıştırma Bağlantılarının Çevresel Koşullar Altında Özellikleri	26
2.7. Nano Malzeme Takviyesinin Yapıştırma Bağlantılarının Performanslarına Etkisi	29
2.8. Tezin Önemi ve İçeriği	33
2.9. Literatür Taraması	36
2.9.1. Ön Yüzey İşlemi Uygulanmış Metal-Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Literatür Çalışmaları	36
2.9.2. Nano Malzeme Katkılı Epoksi Yapıştırıcıyla Oluşturulmuş Metal-Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Literatür Çalışmaları	41
2.9.3. Higrotermal Yaşlandırmaya Maruz Bırakılmış Nano Malzeme Takviyeli Metal/Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Çalışmalar	50
2.9.4. Hibrit Nano Malzeme Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Metal-Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Çalışmalar	55
3. MALZEME VE YÖNTEM	61
3.1. Malzemeler	61
3.2. AA7075-T6 Alüminyum Plakaların Kimyasal Ön Yüzey İşlemi	62

3.3. AA7075-T6 Alüminyum Yüzeylerin Optik Mikroskop ve Temas Açısı Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi	64
3.4. Takviyesiz ve Nano Malzeme Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıların Hazırlanması	64
3.5. Yapıştırma Bağlantılarının Oluşturulması	65
3.6. Takviyesiz ve Nano Malzeme Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Higrotermal Yaşlandırma Prosesi	66
3.7. Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Testlerinin Gerçekleştirilmesi	67
3.8. Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin SEM Analizleriyle İncelenmesi	68
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	69
4.1. Kimyasal Ön Yüzey İşleminin Alüminyum Yüzey Morfolojisi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi	69
4.2. Tekil Nano Malzeme Takviyesinin Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi	71
4.2.1. Tekil Nano Malzeme Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin İncelenmesi	75
4.3. Higrotermal Yaşlandırma Koşullarının Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Performansına Etkilerinin İncelenmesi	78
4.3.1. Higrotermal Yaşlandırma İşlemine Maruz Kalmış Yapıştırma Bağlantılarının Su Alımı Değerlerinin İncelenmesi	78
4.3.2. Higrotermal Yaşlandırma İşleminin Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımına Etkilerinin İncelenmesi	80
4.3.2.1. Higrotermal Yaşlandırmaya Maruz Kalmış Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin İncelenmesi	83
4.4. Hibrit Nano Malzeme Takviyesinin Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi	88
4.4.1. Hibrit Nano Malzeme Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin İncelenmesi	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	100
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	109
ÖZGEÇMİŞ	110

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Perçin ve yapıştırma ile birleştirilmiş yüzeylerin görünüşleri	6
Şekil 2.2.	a) Kaynak, b) perçin ve c) yapıştırma bağlantıları için gerilim dağılımları	6
Şekil 2.3.	Mekanik bağlantı yöntemlerinde görülen galvanik korozyon örnekleri	7
Şekil 2.4.	A380 yolcu uçağında kullanılan yapıştırma bağlantıları	8
Şekil 2.5.	Otomobillerde kullanılan yapıştırma bağlantısı bölgeleri	9
Şekil 2.6.	Demir yolu taşıtlarının a) iç ve b) dış bölümlerinde yapıştırma bağlantılarının kullanım yerleri	10
Şekil 2.7.	Yapıştırma bağlantısını oluşturan ana parametreler	11
Şekil 2.8.	Yapıştırma bağlantılarında oluşan adhezyon ve kohezyon mekanizmaları	11
Şekil 2.9.	Mekanik kilitleme mekanizması	13
Şekil 2.10.	Elektrostatik teori	14
Şekil 2.11.	Difüzyon teorisi	14
Şekil 2.12.	Islatma teorisine göre iyi ve kötü ıslatma mekanizması örnekleri	15
Şekil 2.13.	Zayıf sınır tabakaları	17
Şekil 2.14.	a) Ön yüzey işlemi uygulanmış ve b) ön yüzey işlemi uygulanmamış metal yapışma yüzeyleri	17
Şekil 2.15.	Mekanik ön yüzey işlemi sonrasında yapıştırma bölgesinde gerçekleşen değişimlerin şematik gösterimi	21
Şekil 2.16.	Hidroksil yoğunluğunun arayüz bölgesine etkisi	22
Şekil 2.17.	Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen hasar mekanizmaları	25
Şekil 2.18.	Yapıştırma bağlantılarının uzun süreli dayanım performanslarına etki eden çevresel etmenler	27
Şekil 2.19.	Arayüz bölgesinde hapsedilmiş su molekülleri	28
Şekil 2.20.	Nano partikül takviyesinin yapıştırıcının polimerik ağ yapısı üzerindeki etkileri	31
Şekil 2.21.	Nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarında çatlak sapma mekanizması oluşumunun şematik gösterimi	32
Şekil 2.22.	İşlemsiz ve farklı ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi-yer değiştirme eğrileri	36
Şekil 2.23.	İşlemsiz ve farklı ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar mekanizmaları	37
Şekil 2.24.	İşlemsiz ve ön yüzey işlemi uygulanmış yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları ve yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması	38
Şekil 2.25.	Farklı ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi	39
Şekil 2.26.	a) Yağ alma, b) FPL-dağlama ve c) astarlama ön yüzey işlemleri uygulanmış yapıştırma bağlantılarının temas açısı ölçümlerinin sonuçları	40

Şekil 2.27.	Yağ alma, FPL-dağlama ve astarlama ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	40
Şekil 2.28.	Karbon esaslı farklı nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları	42
Şekil 2.29.	Hasar yüzeylerine ait SEM görüntüleri (a) %0,2 CNT takviyesi, (b) %0,5 CNT takviyesi, (c) %1 CNT takviyesi, (d) %2 CNT takviyesi	43
Şekil 2.30.	Takviyesiz ve BNNT takviye edilmiş epoksi ile oluşturulan yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	44
Şekil 2.31.	Takviyesiz (sol) ve BNNT takviyeli (sağ) yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri	44
Şekil 2.32.	Takviyesiz ve BNNS takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	45
Şekil 2.33.	Farklı ağırlık oranlarında MWCNT takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	46
Şekil 2.34.	Takviyesiz ve MWCNT, SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	47
Şekil 2.35.	a) Takviyesiz, b) MWCNT takviyeli ve c) SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar görüntüleri	48
Şekil 2.36.	Farklı ağırlık oranları için ANP ile takviyelendirilmiş epoksi yapıştırıcının alüminyum yüzeylerdeki temas açısı ölçümleri	48
Şekil 2.37.	ANP takviyesinin değişken ağırlık oranları için oluşturulmuş gerilim-gerinim eğrileri	49
Şekil 2.38.	a) %0, b) %0,5, c) %1, d) %1,5 ve e) %2 ANP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri	49
Şekil 2.39.	SNP takviyeli higrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış yapıştırma bağlantılarının kopma dayanımı değerleri	51
Şekil 2.40.	Yapıştırma bağlantılarına uygulanan higrotermal yaşlandırma çevrimi	51
Şekil 2.41.	Higrotermal yaşlandırma uygulanmış yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	52
Şekil 2.42.	Farklı higrotermal yaşlandırma sürelerinde epoksi yapıştırıcıların su emilimi değerleri	53
Şekil 2.43.	a) Düşük, b) orta ve c) yüksek takviye oranlarında SiC ve MWCNT ile takviyelendirilmiş yapıştırma bağlantılarının yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki kayma dayanımı değerleri	54
Şekil 2.44.	a) Takviyesiz, b) MWCNT takviyeli ve c) SiC takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri	55
Şekil 2.45.	a) Takviyesiz, b) %0,5 MWCNT takviyeli, c) %0,8 SNP takviyeli ve d) %0,8 MWCNT- SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri	56
Şekil 2.46.	a) Takviyesiz ve b) %0,8 MWCNT-SNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri	57
Şekil 2.47.	Grafen ve grafen+BN hibrit takviyeleriyle oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri	57

Şekil 2.48.	Farklı takviye oranlarında MWCNT+BNNP hibrit takviyeleriyle oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının yük-yer değiştirme eğrileri	58
Şekil 2.49.	Takviyesiz, tekil ve hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi-yer değiştirme eğrileri	59
Şekil 2.50.	CNT ve C30B hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantısının TEM görüntüleri	59
Şekil 3.1.	Epoksi yapıştırıcıya takviye edilen nano malzemeler	62
Şekil 3.2.	AA7075-T6 alüminyum plakalara uygulanan FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işlemi yönteminin aşamaları	63
Şekil 3.3.	a) Optik mikroskop ve b) temas açısı ölçüm cihazı	64
Şekil 3.4.	Takviyesiz ve nano malzeme takviyeli epoksi yapıştırıcıların hazırlanma aşamaları	65
Şekil 3.5.	a) Yapıştırma bağlantısı düzeneği ve b) yapıştırma bağlantısı Ölçüleri	66
Şekil 3.6.	a) Yapıştırma bağlantılarının örnek test numuneleri b) kayma testlerinin gerçekleştirilmesi	67
Şekil 3.7.	a) Cressington Sputter Coater 108 Auto altın kaplama makinesi ve b) Tescan Vega3 SEM cihazı	68
Şekil 4.1.	a) İşlemsiz ve b) FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri	69
Şekil 4.2.	a) Ön yüzey işlemi uygulanmamış ve b) FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin temas açısı değerleri	70
Şekil 4.3.	Takviyesiz ve farklı ağırlık oranlarında a) BNNP, b) MWCNT ve c) SNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri	73
Şekil 4.4.	Herhangi bir nano malzeme takviye edilmemiş a) işlemsiz ve b) FPL-dağlanmış yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri	76
Şekil 4.5.	BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının farklı takviye oranları için hasar yüzeyleri	77
Şekil 4.6.	Higrotermal yaşlandırma süresine karşı takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının yüzde su alımları	79
Şekil 4.7.	Higrotermal yaşlandırma süresine karşı takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri	81
Şekil 4.8.	Higrotermal yaşlandırma sonrasında takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri	84
Şekil 4.9.	Higrotermal yaşlandırma öncesinde (0 hafta yaşlandırılmış) ve 2 haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kopma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri	86
Şekil 4.10.	Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri	89
Şekil 4.11.	Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri	95

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Yapışma teorileri	12
Tablo 2.2.	Yapışma olayında meydana gelen etkileşimlerin enerji Karşılaştırması	16
Tablo 2.3.	Farklı ön yüzey işlemleri yöntemlerinin maliyet ve kalite esaslarına göre kıyası	18
Tablo 2.4.	Yağ alma işleminde kullanılan solventler ve özellikleri	20
Tablo 2.5.	Çeşitli ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum yapıştırma bağlantılarının dayanım performansları	22
Tablo 2.6.	Yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine göre yapılan çıkarımlar	26
Tablo 2.7.	Farklı ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum yapıştırma bağlantılarının yüzey pürüzlülükleri ve kayma dayanımı değerleri	39
Tablo 3.1.	AA7075-T6 alüminyum plakalar ve Loctite EA 9396 AERO epoksi yapıştırıcının özellikleri	61
Tablo 3.2.	Takviye nano malzemelerinin özellikleri ve maliyetleri	62
Tablo 4.1.	Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının özgül dayanım ve dayanım/maliyet değerleri	92

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
CaCO_3	: Kalsiyum karbonat
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
H_2O	: Su
H_2SO_4	: Sülfürik asit
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
M_t	: Su alımı yüzdesi, (%)
nm	: Nanometre
$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	: Sodyum dikromat
μm	: Mikrometre
R_a	: Yüzey pürüzlülüğü, (μm)
SiC	: Silisyum karbür
SiO_2	: Silisyum dioksit
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
TiO_2	: Titanyum dioksit
W_0	: Başlangıçtaki numunenin kütlesi, (g)
W_t	: Yaşlandırma zamanına bağlı numunenin kütlesi, (g)
θ	: Kontak açısı, ($^{\circ}$)

Kısaltmalar

AA	: Aluminium Alloy (Alüminyum Alaşımı)
ANP	: Alumina Nanoparticle (Alümina Nano Partikül)
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
BNNP	: Boron Nitride Nanoplatelets (Bor Nitrür Nano Levha)
CAA	: Chromic Acid Anodization (Kromik Asit Anodizasyonu)
CNF	: Carbon Nanofiber (Karbon Nanofiber)
CNH	: Carbon Nanohorn (Karbon Nanohorn)
FPL-Etch	: The Sulfuric-Chromic Acid Etch (Sülfürik-Kromik Asit Dağlama)
GNP	: Graphene Nanoplatelets (Grafen Nano Levhalar)
HAMAG	: Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı
MWCNT	: Multi Walled Carbon Nanotubes (Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler)
PAA	: Phosphoric Acid Anodization (Fosforik Asit Anodizasyonu)
P2-Etch	: Sulfo Ferric Etch (Sulfo Ferrik Dağlama)
RH	: Relative Humidity (Bağıl Nem)
SNP	: Silica Nanoparticle (Silika Nano Partikül)
UV	: Ultraviolet (Mor Ötesi Işıklar)

NANO MALZEME TAKVİYELİ EPOKSİNİN ALÜMİNYUM YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA HİGROTERMAL YAŞLANDIRMAYA VE HİBRİT TAKVİYENİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ÖZET

Mühendislik uygulamalarında sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek dayanım, geri dönüştürülebilirlik gibi mükemmel özelliklerden ötürü alüminyum malzemeler sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde havacılık ve otomotiv gibi sektörel uygulamalarda alüminyum malzemelerin birleştirilmesinde sergilediği yüksek özgül dayanım performansları dolayısıyla öne çıkan yapıştırma yöntemi, ağırlık ve yakıt tüketiminin azaltılması gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Mekanik performansların artırılması amacıyla yapıştırıcı içerisine üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip malzemeler takviye edilmekte olup özellikle nano boyutlu takviye malzemeleri kayda değer katkıları dolayısıyla bu alandaki çalışmalara yön veren konuma gelmiştir. Nano malzeme takviyeleriyle, zorlu servis koşullarında sıcaklık ve nem etmenlerinden önemli ölçüde etkilenen yapıştırma bağlantılarının performanslarının iyileştirilmesi önemli bir kazanç olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, FPL-dağlanmış AA7075-T6 alüminyum plakalar tek tesirli olarak epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Yapıştırıcı içerisine farklı ağırlık oranlarında nano boyutlu bor nitrür (BNNP), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve silika (SNP) malzemeleri takviye edilerek ASTM D1002-99 standardına göre gerçekleştirilen kayma testleri sonrasında nano malzeme türünün ve takviye oranlarının yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, uzun süreli dayanım performansı açısından farklı nano malzeme takviyelerinin etkilerinin incelenmesi amacıyla yapıştırma bağlantıları oluşturulmuş ve 6 haftaya kadar higrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Tekil takviyelerin yanı sıra oluşturulan hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarıyla hibrit takviye stratejisinin mekanik özelliklere etkileri maliyet ve ağırlık parametreleri ile ilişkilendirilerek incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Yapıştırma Bağlantıları, Higrotermal Yaşlandırma, Kayma Dayanımı, Nano Malzeme, Sinerjik Etki.

THE EFFECT OF NANOMATERIAL REINFORCED EPOXY ON HYGROTHERMAL AGING AND HYBRID REINFORCEMENT ON MECHANICAL PROPERTIES IN ALUMINIUM ADHESIVE JOINTS

ABSTRACT

Aluminium materials are often preferred in engineering applications due to their excellent properties such as low density, high strength, recyclability. The bonding method, which stands out due to its high specific strength performance in joining aluminium materials in sectoral applications such as aviation and automotive, offers various advantages such as reducing weight and fuel consumption. In order to increase the mechanical performances, materials with superior physical and chemical properties are reinforced into the adhesive, and especially nano sized materials are in a leading position in this field due to their remarkable contributions. With nanomaterial reinforcements, it is seen as important gain to improve the performance of adhesive joints, which are significantly affected by temperature and humidity factors in harsh service conditions.

In this study, FPL-etched AA7075-T6 aluminium plates were bonded with epoxy adhesive as a single lap joint. Nano sized boron nitride (BNNP), multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and silica (SNP) materials with different weight ratios were reinforced into the adhesive, and the effects of nanomaterial type and reinforcement ratios on the shear strength of adhesive joints were investigated after shear tests performed according to ASTM D1002-99. In order to examine the effects of different nanomaterial reinforcements in terms of long-term durability performance, the adhesive joints exposed to hygrothermal aging for up to 6 weeks. In addition to the individual reinforcements, with the hybrid nanomaterial reinforced adhesive joints manufactured and the effects of the hybrid reinforcement strategy on the mechanical properties were investigated by associating with cost and weight parameters.

Keywords: Aluminium Adhesive Joints, Hygrothermal Aging, Shear Strength, Nanomaterial, Synergistic Effect.

1. GİRİŞ

İlk zamanlardan beri benzer ya da farklı malzemeleri birleştirme ihtiyacı insanoğlu için kaçınılmaz olmuş ve ilerleyen zamanlarda da buna duyulan ihtiyaç artmıştır. Birleştirme, montaj oluşturmak için bir bileşeni diğerine bağlama işlemi olarak tanımlanmaktadır. Başlangıçta basit malzemelerle başlayan bu süreç daha sonrasında komplike malzemelerin birbirlerine bağlanmasıyla devam etmiştir. Birleştirilecek malzemelerin ne olduğu, bu malzemelerin hangi yöntemle birleştirileceği, birleştirildikten sonra hangi özelliklerde nasıl bir performans beklendiği mühendislik açısından önem arz etmektedir. İstenilen bir fonksiyonun yalnızca bir malzemeyle karşılanamaması, yekpare bir parça ile makul bir şekilde üretilmeyecek kadar büyük yapıların imal edilmesi, birbirleriyle göreceli hareket halinde çalışan parçaların üretilmesi gibi durumlarda maliyet ve yapıların verimliliği de göz önünde bulundurulursa bağlantı oluşturmak adına parçaların birleştirilmesi bir seçenek olmaktan çıkmaktadır (Messler ve Savage, 1993). Bu bağlantılardan yüksek kalitede, oldukça dayanıklı, hafif ve en ekonomik yolla tekrarlanabilir bir şekilde üretilabiliyor olmaları beklenmektedir. Yapı elemanlarının birleştirilme süreci bahsedildiği üzere birçok parametreye bağlı olduğundan en iyi birleştirme metodunun tayini de mevcut koşullarda istenilen özelliklere bağlı olarak tasarımcı tarafından yapılmalıdır.

Birleştirme işlemi mekanik bir mekanizma oluşturarak, termal enerjiyle ya da kimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Bağ oluşturmak için arayüz boyunca ısı ve/veya basınç ile malzemeleri birleştirme esasına dayanan, sökülemeyen bağlantı tiplerinden olan ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilen kaynak yöntemi genellikle metal malzemelerin birleştirilmesi için kullanılmakta olup bu yöntemle iki farklı malzemeyi birleştirmek mümkün değildir. Metalürjik olarak uyumsuz yüzey malzemelerinin termal genleşme katsayıları, kimyaları veya ısıl dirençleri; ergime sonucu oluşan iç gerilmeler ve çarpılmaların varlığı gibi durumlar geleneksel kaynak metodunun kullanımını sınırlamaktadır (Petrie, 2007). Isı etkisiyle iki metal malzemeyi birleştiren lehimleme yönteminde ise lehim malzemesinin pahalı olması, yüksek sıcaklıktaki işletme koşullarının bu yöntemle uygun olmaması ve göreceli dayanım düşüklüğünden ötürü birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Cıvata, perçin, vida gibi birleştirme elemanları ile oluşturulan ve yüzyıllardır sıklıkla uygulanmakta olan mekanik bağlantıların en büyük

avantajları bileşenlere zarar vermeden bakım, onarım veya yeniden üretim gibi sebeplerle rahatlıkla sökülüp takılabiliyor olmaları ve birleştirilen parçaların malzemelerinin kimyasal bileşimini veya mikro yapılarını değiştirmemeleridir (Petrie, 2007); (Abbas ve diğ., 2018). Buna karşın mekanik bağlantıların ana dezavantajları, bağlantı elemanı çevresinde büyük bölgesel gerilim konsantrasyonları oluşması ve gelen yükü eşit şekilde dağıtmamalarıdır.

Geleneksel metotların yukarda bahsi geçen sınırlılıklarına ek olarak endüstriyel alanlarda enerji ve malzeme tüketimini azaltma isteği, hafif yapıların tasarımına duyulan ihtiyacın artması gibi sebeplerden ötürü aynı ya da farklı malzemelerden oluşan yüzeyleri (adherend) bir yapıştırıcı (adhesive) aracılığıyla birleştirerek elde edilen ve bir yüzeye gelen yükü diğer yüzeye aktarma elemanı olarak görev yapan yapıştırma ile birleştirme metodu havacılık başta olmak üzere otomotiv, denizcilik, inşaat, elektrik-elektronik gibi sektörlerde tercih edilen bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Yapıştırma bağlantıları homojen yük dağılımı, yapısal değişikliklere sebep olmadan farklı malzemeleri birleştirme yeteneği, elektrik ve ısı yalıtımı, titreşim, darbe ve ses sönümleme kabiliyeti, sızdırmazlık (Kozuh ve diğ., 1997) gibi birçok faydalı özellik sunarak özellikle hava araçlarının yapısal parçalarında yaygın olarak kullanılan perçinli ve/veya cıvatalı bağlantılara karşın iyi bir alternatif olarak göze çarpmaktadır. Uygulandıkları malzemelerin dayanımında artışa sebep olan ve yük taşıyan yapısal yapıştırıcılar farklı sektörlerde yapıştırıcı tercihi olarak sıklıkla kullanılmakla birlikte bu grup içinde en büyük paya epoksi esaslı yapıştırıcılar sahiptir (Gupta ve Veeranjanyulu, 2017). Yapısal yapıştırıcılar ile kayma (shear), basma (compression) ve çekme (tension) yüklemelerine karşı dayanımı yüksek bağlantılar elde edilirken soyulma (peel) ve yırtılma (cleavage) yüklemeleri altında nispeten zayıf bağlantılar elde edilebilmektedir. Bu sebeple oluşturulan bağlantılarda yükleme gerilmeleri, yüksek dayanım sunan hatlar boyunca yönlendirilecek şekilde tasarlanarak soyulma ve yırtılma gerilmeleri en aza indirilmelidir (Adderley, 1988).

Yapıştırma bağlantıları sağladığı tüm avantajlara karşın değişken sıcaklıklara duyarlı olmaları, nemli ortamlardaki suyu emme eğilimlerinin yüksek olması, nem, kimyasal sıvılar, dış hava koşulları gibi birçok yaygın ortamdan etkilenmeleri sebebiyle bazı dezavantajlar barındırmaktadırlar (Davis, 2008). Yapıştırma bağlantılarının sıklıkla

kullanıldığı hava araçları poliol içeren buz çözücü sıvılara, kanat bölgeleri uçağın yakıtına ve hidrolik sıvıya, gövde kısımları diklorometan içeren boya sıyrıcılara veya su gibi çeşitli nem etmenlerine maruz kalmaktadır (Doyle ve Pethrick, 2009). Tüm bu sebeplerden ötürü uzun süreli nem, termal değişimler ve mekanik yüklemeler gibi zorlu çevresel faktörlere maruz kalan yapıştırma bağlantılarının bu şartlar altında performanslarını koruyarak kararlı davranış sergilemeleri gerekmektedir.

Bir yapıştırma bağlantısının nihai dayanımında adhezif ve kohezif kuvvetler olmak üzere iki farklı mekanizma rol oynamaktadır. Adhezif kuvvetler iki malzemeyi temas yüzeylerinde bir arada tutarken kohezif kuvvetler tek bir malzemenin komşu moleküllerini bir arada tutmaktadır. Hem adhezif hem de kohezif kuvvetler, moleküller arasında var olan kuvvetlerin sonucudur. Moleküller arası kuvvetlerin en zayıf olduğu yerde bağlantı hasarlanarak kopma gerçekleştiğinden yapıştırılan bağlantının dayanımının değerlendirilmesinde yalnızca adhezif kuvvetlerin değil kohezif kuvvetlerin de üzerinde durulmasının gerekliliği önemli bir husustur (Petrie, 2007). Yapışma performansının artırılması için yapıştırıcının da iyileştirilmesi gerekmekte olup hem kohezif hem de adhezif yapışmanın gelişmesi adına yapıştırıcının modifiye edilmesi fikri kaçınılmazdır. Bu bağlamda uygulanan gözde yöntemlerden biri yapıştırıcı içerisine organik/inorganik nano boyutlu partiküller takviye ederek yapıştırma bağlantılarının özelliklerinin iyileştirilmesidir. Nano partiküllerin yüzeyindeki fonksiyonel grupların epoksi reçine ile uyumluluğu daha güçlü bir arayüzey oluşmasını sağlayarak yapıştırıcının termal kararlılığını ve tokluk özelliklerini bozmadan dayanımı yüksek yapıştırıcı ve dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları elde edilmesine öncülük etmektedir (Ahmadi, 2019).

Tüm bu bilgiler ışığında bu tez çalışmasında AA7075-T6 alüminyum plakalar FPL-dağlama (FPL-etch) kimyasal ön yüzey işlemine tabi tutulmuş ve ASTM D1002-99 standardına göre tek tesirli olarak yüksek dayanım özellikleri sergileyen epoksi esaslı yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Yapıştırıcıyı güçlendirmek ve yapışma performansını artırmak amacıyla epoksi matris içerisine hegzagonal bor nitrür (BNNP), -COOH fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve silika (SiO₂-SNP) nano malzemeleri belirli oranlarda tekil olarak ve sinerjik etkidenden faydalanılması fikriyle hibrit şekilde takviye edilmiştir. Aynı zamanda endüstriyel kullanım koşullarında sıcaklık etkisi

altında yüksek oranda neme maruz kalan yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma etkisi altındaki dayanım performanslarının incelenmesi elzem görüldüğünden tekil nano malzeme takviye edilerek oluşturulmuş AA7075-T6 yapıştırma bağlantıları higrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. ASTM D1002-99 standardına göre hazırlanan tek tesirli yapıştırma bağlantıları higrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrası yapışma dayanımlarının tespiti için aynı standarda bağlı olarak tek tesirli kayma testine tabi tutulmuş ve yapıştırma bağlantılarının dayanım değerleri tespit edilmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Yapıştırma Bağlantılarının Geleneksel Bağlantı Yöntemleriyle Karşılaştırılması

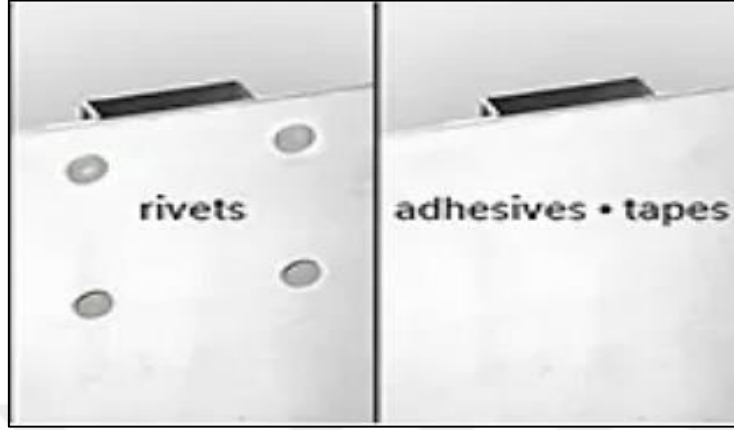
Yapıştırma bağlantıları geleneksel bağlantı yöntemlerine kıyasla korozyon direnci, hafiflik ve bağlantı elemanı montaj deliği nedeniyle gerilim konsantrasyonunun ortadan kaldırılması gibi avantajlar sağladıkları için imalat süreçlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer faydaları arasında iyileştirilmiş sertlik, rijitlik, darbe davranışı ve enerji Emilimi, daha az titreşim ve ses yalıtım özellikleri yer almaktadır (Boutar ve diğ., 2016).

Kaynak gibi termal birleştirme yöntemlerinin sarf malzemelerinin maliyetli olmaması, kürlenme süresinin olmaması dolayısıyla hızlı bir proses sunmaları ve iyi bir şekilde uygulandıklarında bağlantıya sızdırmazlık özelliği sağlamaları nedeniyle endüstriyel açıdan cazip bir birleştirme tekniğidir. Ancak tüm bunlara karşın yapıştırma bağlantıları termal birleştirmeye kıyasla bir dizi avantaj sağlamaktadır (URL-1):

- Farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlamaktadır.
- İyi bir bağlantı oluşturmak için daha az iş gücü gerektirdiğinden ve kalifiye eleman ihtiyacı olmadığından iş gücü maliyetini düşürmektedir.
- Malzemeye fiziksel bir zarar vermediğinden daha ince malzemelerin birleştirilmesi mümkündür.
- Kaynak işleminden sonra oluşan izler gibi bir durum söz konusu olmadığından zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır.
- Termal birleştirmenin yüksek enerji tüketimine kıyasla daha az enerji tüketimi sunmaktadır.
- Kaynak işleminde olduğu gibi ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe sebebiyet vermediğinden ısı gerilmeler ve gevreklemeler meydana gelmemekte ve gerilme dağılımı her noktada yaklaşık olarak eşit olduğundan sürekli mukavemette kopma tehlikesi azalmaktadır (Koç, 2012).

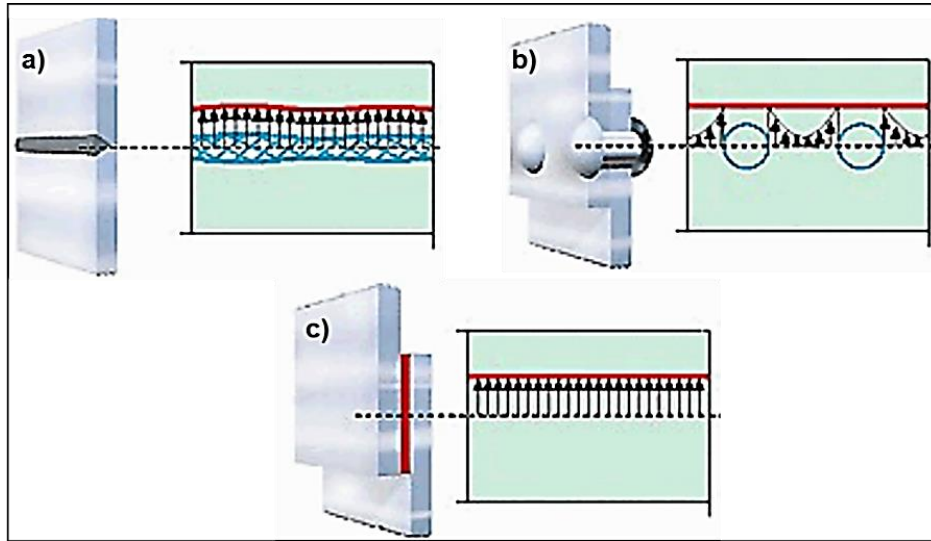
Oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan mekanik birleştirme yönteminde genellikle metali metal ile birleştirmek makul bir çözüm olarak görülse de bu durum her zaman en iyi seçenek olmayabilmektedir. Mekanik bağlantılar ile kıyaslandığında yapıştırma ile birleştirmenin sağladığı önemli faydalar dikkat çekmektedir:

- Mekanik bağlama elemanlarının (pim, cıvata, perçin vb.) oluşturduğu delikler söz konusu olmadığından daha pürüzsüz yüzeyler oluşmakta ve estetik bir görünüm sağlanmaktadır (Şekil 2.1) (URL-1).



Şekil 2.1. Perçin ve yapıştırma ile birleştirilmiş yüzeylerin görünümü (URL-2)

- Yapıştırma bağlantıları yapışma hattı boyunca çok daha homojen gerilim dağılımı oluşturmakta ve ekstra bir bağlantı elemanı içermediğinden mekanik bağlantılara kıyasla daha hafif bir bağlantı seçeneği sunmaktadır (Adams ve diğ., 1997). Şekil 2.2’de geleneksel birleştirme yöntemleri (kaynak ve perçin) ve yapıştırma bağlantılarında gözlenen gerilim dağılımları verilmiştir.

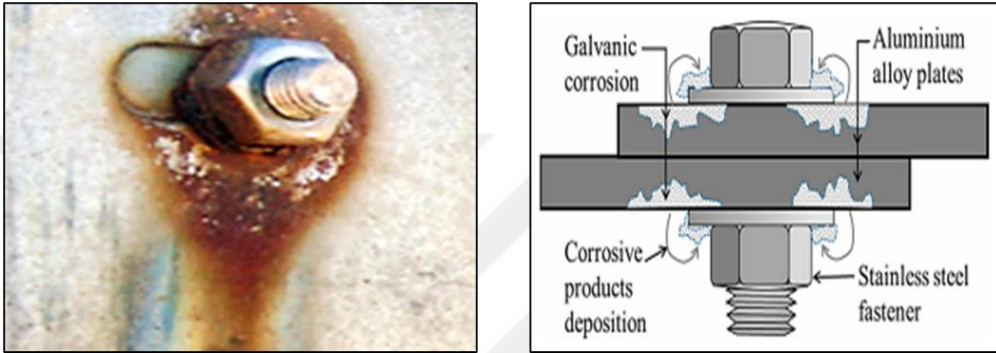


Şekil 2.2. a) Kaynak, b) perçin ve c) yapıştırma bağlantıları için gerilim dağılımları (Aslanlar, 2009)

- İki farklı malzemeyi birleştirme kabiliyeti yapıştırma bağlantılarının sunduğu büyük avantajlardan biridir. Bu şekilde oluşturulan bağlantılardaki malzemelerin termal

genleşme katsayıları arasındaki farklar yapıştırıcı tarafından tolere edilmektedir (Jeevi ve diğ., 2019).

- Mekanik birleştirmede kullanılan belirli bağlantı elemanları metal olmayan yüzeylerle iyi uyum sağlamayabilmekte ve iki farklı metalin temasından kaynaklı galvanik korozyon riski oluşmaktadır (URL-1). Ayrıca dış ortama açık olan bağlantı bölgesi nem gibi çevresel koşullara maruz kalmakta ve bu durum korozyon oluşumunu desteklemektedir. Şekil 2.3'te mekanik bağlantılarda görülen tipik galvanik korozyon örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.3. Mekanik bağlantı yöntemlerinde görülen galvanik korozyon örnekleri (URL-3); (Mrema ve diğ., 2019)

- Mekanik bağlantılarda oluşan titreşim hareketlerinin olumsuz etkilerine karşın viskoelastik özellik gösteren yapıştırıcılar enerjiyi absorbe edip darbe ve titreşimleri sönümleyerek yorulma performansını iyileştirmektedir (Jeevi ve diğ., 2019).

- Mekanik birleştirme yönteminde bağlantı elemanları başlı başına bir ağırlık kaynağıdır. Ağırlığın büyük önem arz ettiği havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde yapıştırma bağlantıları kullanılarak çok daha hafif konstrüksiyonlar elde edilmektedir (Jeevi ve diğ., 2019).

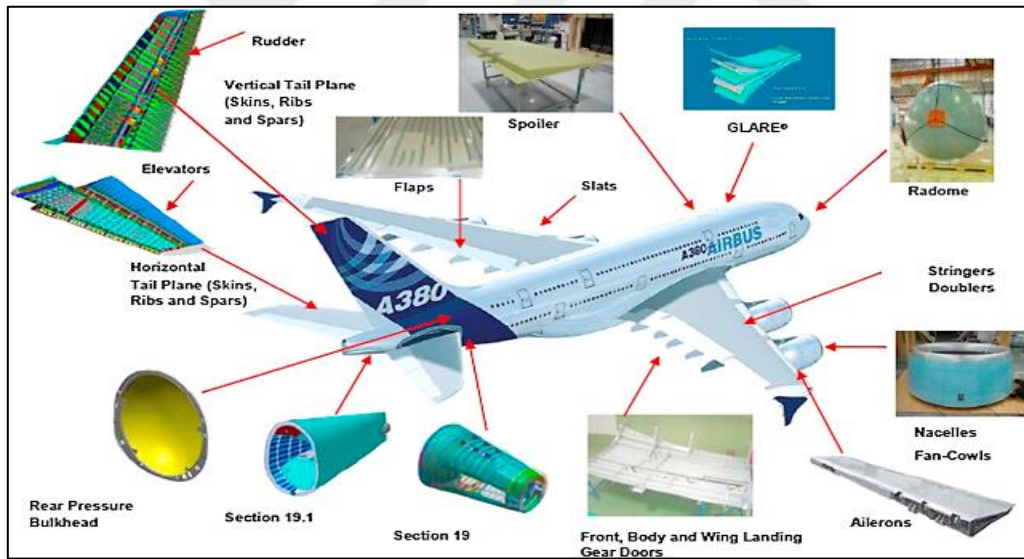
- Mekanik bağlantıların düşük sızdırmazlık özelliklerine karşın yapıştırma bağlantıları son derece sızdırmazdır (Jeevi ve diğ., 2019)

2.2. Yapıştırma Bağlantılarının Uygulama Alanları

Yüzeyler arasına uygulanan bir yapıştırıcının katılaşarak yapışkan bağ oluşturduğu bir malzeme birleştirme tekniği olan yapıştırma bağlantıları; yüksek dayanım/ağırlık oranı, tasarım esnekliği ve imalat kolaylığı gibi potansiyel avantajlara sahip olduğundan havacılık, otomotiv, denizcilik, elektronik gibi yüksek teknoloji endüstrilerinden inşaat

ve ambalajlama gibi geleneksel endüstrilere kadar çeşitli alanlarda uygulama fırsatı sunmaktadır (Banea ve da Silva, 2009).

Havacılık sektöründe perçin gibi mekanik birleştirme teknikleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte 1950'lerden beri yapıştırma ile birleştirme tekniği de bu sektörde önemli bir pay sahibidir. Hava araçlarında genellikle bal peteği konstrüksiyonlarında, kanat, kuyruk ve gövde panellerinde, kargo bölümlerinde, kokpit bölgesi ve iç zemin döşemeleri gibi birçok kısımda yapıştırma bağlantıları kullanılmaktadır (URL-4). İş jeti sınıfı yolcu uçakları olan Fokker F-27 ve F-28'in kanat ve yatay stabilizer hücum hattı, basınç bölmesi ve kokpit bölgesi gibi kısımlarında; SAAB 340 uçağının kanat, kuyruk ve gövde panellerinde; Cessna Citation III uçağında frame/longeron arayüzeyinin birleştirilmesinde ve Boeing 747 uçağının metal yapıştırma bölgelerinin bal peteği yapıları yapıştırma bağlantılarına örnek olarak verilebilir (Hart-Smith, 2018). Şekil 2.4'te A380 yolcu uçağında kullanılan yapıştırma bağlantıları görülmektedir.



Şekil 2.4. A380 yolcu uçağında kullanılan yapıştırma bağlantıları (Katsiropoulos ve diğ., 2012)

Otomotiv endüstrisinde yapıştırma bağlantıları temel olarak daha hafif araç potansiyeli, yakıt tasarrufu ve azaltılmış emisyonlar nedeniyle son yıllarda önemli ölçüde artmıştır (Loureiro ve diğ., 2010). Karayolu taşıtları tasarımcıları daha ekonomik ve hafif ürünler üretmeye çalışırken yeni ve farklı malzemeleri birleştirmeyi mümkün kılmayı da amaçlamışlardır. Otomotiv endüstrisindeki ana birleştirme yöntemi olan nokta kaynağının bağlantının her iki tarafına da erişim gerektirmesi, korozyon direncini

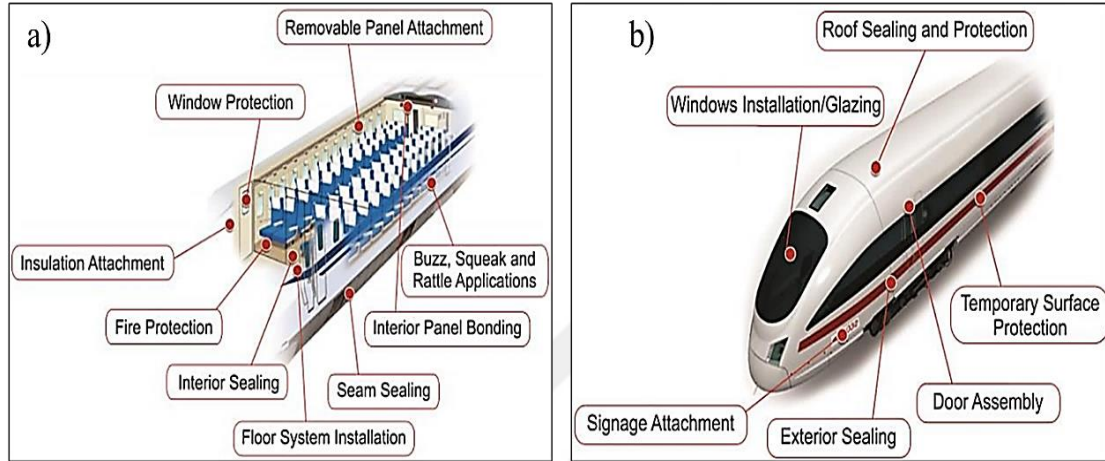
iyileştirmek adına metal parçalara yapılan kaplamalara zarar vermesi gibi birtakım dezavantajları bulunmaktadır (Banea ve diğ., 2017). Tüm bu sebeplerden ötürü Şekil 2.5'te de görüldüğü üzere otomotiv sektöründe araçların elektronik aksamlarında, kapı bölgelerinde, far kısımlarında, çamurluk ve diğer birçok bölümlerinde yapıştırma bağlantılarına rastlanmaktadır.



Şekil 2.5. Otomobillerde kullanılan yapıştırma bağlantısı bölgeleri (URL-5)

Yapıştırma ile birleştirme yönteminin gözde olduğu bir diğer sektör ise demir yolu taşımacılığı olup perçin ve kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemlerine ciddi bir alternatif haline gelmiştir. Oluşturulan bağlantıların otuz yıla varan ömürleri, dinamik yüklere karşı yüksek dirençleri, -40 °C ile +80 °C aralığındaki ortamlarda yüksek dayanım özellikleri sergilemeleri, yeni tasarım olanakları, daha az korozyon riski taşımaları yapıştırma bağlantılarını bu endüstride cazip bir konuma getirmiştir. Bu sayede modern demir yolu tasarımları daha hafif yapılar ve şık tasarımlarla daha hızlı, daha aerodinamik ve enerji açısından daha verimli taşıtların üretilmesine imkan sağlamaktadır. Demir yolu taşımacılığında daha düşük titreşim ve daha iyi ses yalıtımı ile seyahat konforunun artırılması önemli bir husustur. Demir yolu taşıtlarının iç kısımlarındaki

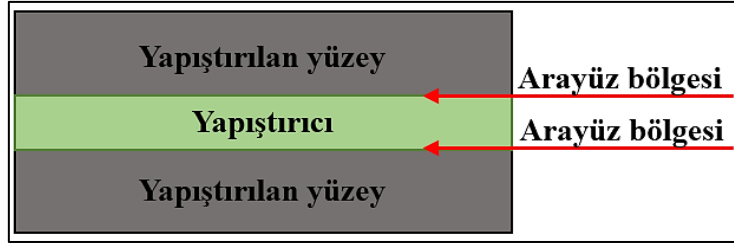
paneller, braketler, alt montaj bölümleri ve aydınlatma sistemleri yapıştırma bağlantılarıyla güvenilir bir şekilde oluşturulmaktadır. Öte yandan dış cephede kapı montajlarında, sızdırmazlık ve tavan koruma kısımlarında yapıştırma bağlantıları kullanılmaktadır (Zdravković ve diğ., 2018). Demir yolu taşıtlarının iç ve dış bölümlerinde yapıştırma bağlantılarının kullanım yerleri Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Demir yolu taşıtlarının a) iç ve b) dış bölümlerinde yapıştırma bağlantılarının kullanım yerleri (Zdravković ve diğ., 2018)

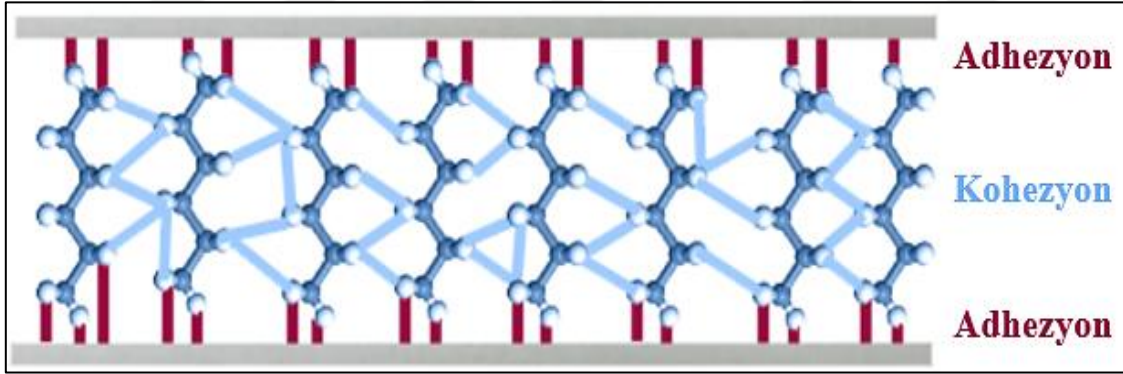
2.3. Yapışma Olayı

En az iki yüzeyi güçlü ve kalıcı olacak şekilde bir arada tutabilen madde olarak tanımlanan yapıştırıcılar, kullanım süreleri boyunca statik ve değişken yükleri taşımak ve gelen yükü yapıştırılacak yüzeylere aktararak dağıtma görevine sahiptirler. Moleküller arası kuvvetler aracılığıyla gerçekleşen yapışma olayında yapıştırılacak bileşenleri ısıtıp yüzeydeki boşlukları dolduran yapıştırıcılardan, dayanımı yüksek bağlantılar oluşturmaları için yapıştırılacak yüzeylerle uyumlu bir şekilde çalışıyor olmaları beklenmektedir. Yapışma olayı; uygulanmış bir "yapıştırıcı", aynı ya da farklı malzemelerden oluşan ve yapıştırıcı vasıtasıyla birleştirilen en az iki bileşen ve yapıştırıcıyla yapıştırılan bileşenler arasında oluşan "arayüz (interface)" bölgesini içeren bir montaj olup bu parametrelerin kombinasyonu "yapıştırma bağlantısı" olarak adlandırılmaktadır. Arayüz bölgesi, yapıştırıcı-yapıştırılan yüzey noktasına yakın ince bir bölge olmakla birlikte yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeylerden farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olup yapıştırma bağlantısının özelliklerini ve kalitesini belirlemede kritik bir faktördür (Petrie, 2007). Şekil 2.7’de tipik bir yapıştırma bağlantısını oluşturan üç ana faktör görülmektedir.



Şekil 2.7. Yapıştırma bağlantısını oluşturan ana parametreler

Yapıştırma bağlantılarında adhezyon ve kohezyon mekanizmaları yapışma performansını açıklamak adına önemli kavramlardır. İki farklı malzemenin molekülleri arasındaki çekim gücünden kaynaklanan adhezyon mekanizmasını oluşturan kuvvetler adhezif olarak adlandırılmakla birlikte yalnızca tek bir malzemenin kendi molekülleri arasındaki çekimi ifade eden kohezyon mekanizmasını oluşturan kuvvetler ise kohezif kuvvetler olarak adlandırılmaktadır. Yapıştırma bağlantıları özelinde ifade edilecek olursa Şekil 2.8’de de görüldüğü üzere yapıştırılan yüzey ve yapıştırıcı arasında adhezif kuvvetler oluşarak adhezyon yapısı meydana gelirken yapıştırıcı malzemesinin kendi moleküllerinin birbirleri arasında oluşturduğu kuvvetler kohezif olup kohezyon mekanizması ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.8. Yapıştırma bağlantılarında oluşan adhezyon ve kohezyon mekanizmaları (Dorworth ve Dillingham, 2017)

Hem adhezif hem de kohezif kuvvetler, atomlar veya moleküller arasındaki farklı yük çekimlerinin sonucudur. Bu kuvvetler kısa veya uzun menzilli moleküler etkileşimlere atfedilebilmekte ve birincil veya ikincil bağlar olarak da adlandırılmaktadır. Birincil moleküler etkileşimler kovalent, iyonik ve metalik kuvvetleri içermektedirler. Her yapışma olayında nispeten zayıf fiziksel etkileşimlerden oluşan ikincil veya van der Waals kuvvetleri oluşmakta olup arayüz hattında oluşabilecek bağ türleri aşağıdaki gibidir (Petrie, 2007):

- Van der Waals kuvvetleri (fiziksel tutunma- physical adsorption)
- Hidrojen bağları (güçlü polar bağları)
- İyonik, kovalent bağlar (kimyasal tutunma- chemisorption)

2.3.1. Yapışma Teorileri

Yapışma tek bir mekanizma ile açıklanamayacak kadar komplike bir kavram olup bu konuda üretilen birçok teori olmuş ve şu anda birkaç temel mekanizmayla tanımlanmaktadır. Yapışma teorileri; adsorpsiyon (adsorption), mekanik kilitleme (mechanical interlocking), difüzyon (diffusion), elektrostatik etkileşim (electrostatic interaction) ve zayıf sınır tabakalarına (weak boundary layer) dayanmaktadır. Genellikle yapıştırma bağlantısının kullanılacağı yere ve yapışmanın etkileşim ölçeğine göre bu teorilerin kombinasyonu şeklinde yapışma mekanizması açıklanmaktadır (Ebnesajjad, 2008). Tablo 2.1 bahsi geçen her bir yapışma teorisinin ilgili olduğu ölçekle ilgili bilgileri içermektedir.

Tablo 2.1. Yapışma teorileri (Ebnesajjad, 2008)

Geleneksel	Güncel	Ölçek
Mekanik kilitleme	Mekanik kilitleme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Adsorpsiyon	Islatabilirlik	Moleküler
	Kimyasal bağlanma	Atomik
	Zayıf sınır tabakası	Moleküler

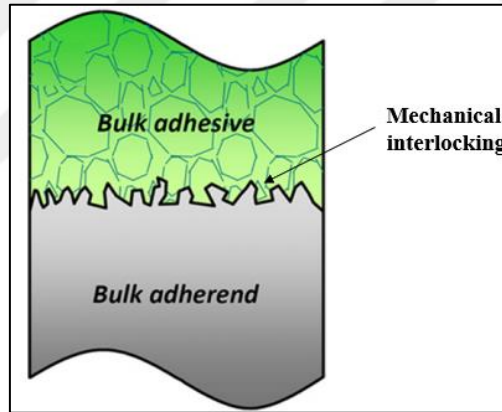
2.3.1.1. Mekanik Teori

Bu teoriye göre yapışma, yapıştırıcının yapıştırılan yüzeydeki gözeneklere, boşluklara, diğer yüzey düzensizliklerine nüfuz etmesiyle oluşmakta olup daha sonrasında katılan yapıştırıcı, arayüzde hapsolan havayı uzaklaştırmakta ve mekanik olarak yapıştırılacak yüzeyleri kenetleyerek yapıştırma bağlantısının performansına olumlu yönde etki etmektedir. Mekanik kilitlemede ilgilenilen mikroskobik parametre, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin temas yüzeyidir. Yapıştırılan malzemenin spesifik yüzey alanı bu tür bir ölçümün örneğidir.

Pürüzlülük veya mikro çıkıntılar, yapıştırıcının plastik olarak deforme olmasını ve enerjiyi emmesini sağlayarak yapıştırma bağlantısının dayanımını artırmaktadır.

Mekanik kilitlemenin bir başka yararı ise pürüzlü yüzeyin, çatlak oluşma durumunda bariyer kurarak çatlak ilerlemesini saptırıcı yönde iş yapması ve enerjiyi dağıtarak bağlantı performansını artırıcı yönde etki etmesidir. Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzey arasında etkin temas alanını da artırarak adhezyon kuvvetlerini geliştirerek yapıştırma bağlantısının dayanımını artırmaktadır.

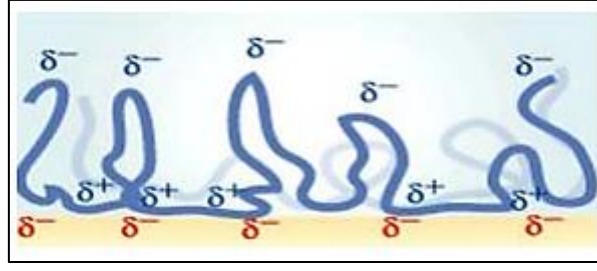
Sonuç olarak yapıştırılmış bir yüzeyin aşındırılmasından sonra artan yapışma; mekanik kitleme, temiz ve reaktifliği yüksek bir yüzey oluşumu ya da temas yüzeyi alanındaki bir artıştan kaynaklanabilmektedir. Yapıştırılan yüzeyin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişikliklerin, bağlantı dayanımında bir artışla sonuçlandığı bilinmekte olup daha kapsamlı ıslanma ve daha kapsamlı kimyasal bağlanma, artan temas yüzey alanının beklenen sonuçlarıdır (Ebnesajjad, 2008). Şekil 2.9'da aşındırma işleminden sonra yüzeydeki tepe, çukur, gözenek ve yarıkların oluşturduğu pürüzlü yapının meydana getirdiği mekanik kitleme mekanizmasının temsili bir resmi görülmektedir.



Şekil 2.9. Mekanik kitleme mekanizması (Choi, 2010)

2.3.1.2. Elektrostatik Teori

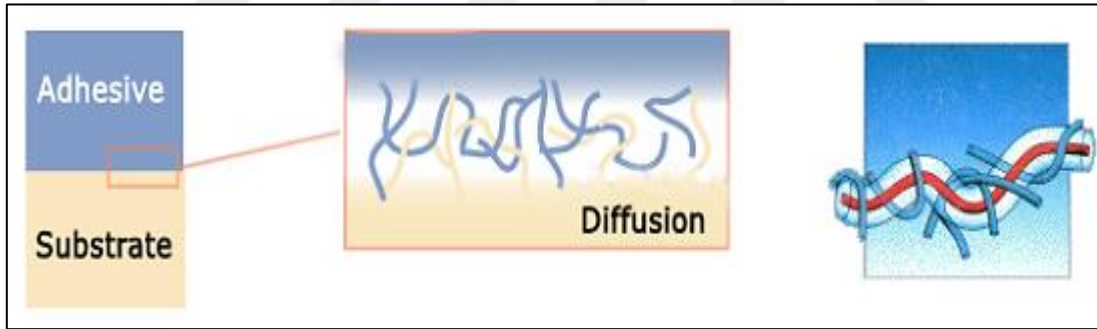
Yapıştırılan yüzeyler ve yapıştırıcı arasında elektrostatik etkiler olduğunu öne süren ve yapışma olayının bu etkilerden kaynaklandığını ifade eden bu teoride yapıştırıcı ile yapıştırılan bileşenlerin arayüz bölgesinde bir elektron transferi gerçekleşmekte ve yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzeyler arasında elektriksel bir çift katman oluşmaktadır. Şekil 2.10'da şematik resmi görülen elektrostatik teoriye göre, polar moleküller veya kalıcı dipol bağları içeren yapıştırıcılar ve yüzeylerin arasında elektrostatik bağlar oluşmasının daha olası olmasının yanı sıra polimerler yalıtkan olduklarından, bu teoriyi yapıştırıcılara uygulamak zor görünmektedir (Cavezza ve diğ., 2020).



Şekil 2.10. Elektrostatik teori (Schaubroeck, 2015)

2.3.1.3. Difüzyon Teorisi

İnterdifüzyon yoluyla yapışmayı açıklayan bu teori yalnızca yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeylerin birbirlerine uyum göstermesi durumunda ve polimerler arası difüzyon söz konusu olduğunda meydana gelmektedir. Polimer zincirlerinin hareketliliğine büyük ölçüde bağlı olan ve zincir uzunluğundan büyük ölçüde etkilenen difüzyon teorisi (Şekil 2.11) bunun yanı sıra esas olarak termal faktörlerden ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Sisteme daha fazla termal enerji vermek teorik olarak daha fazla interdifüzyona ve dolayısıyla daha güçlü yapışmaya yol açmaktadır (Freund ve diğ., 2019).

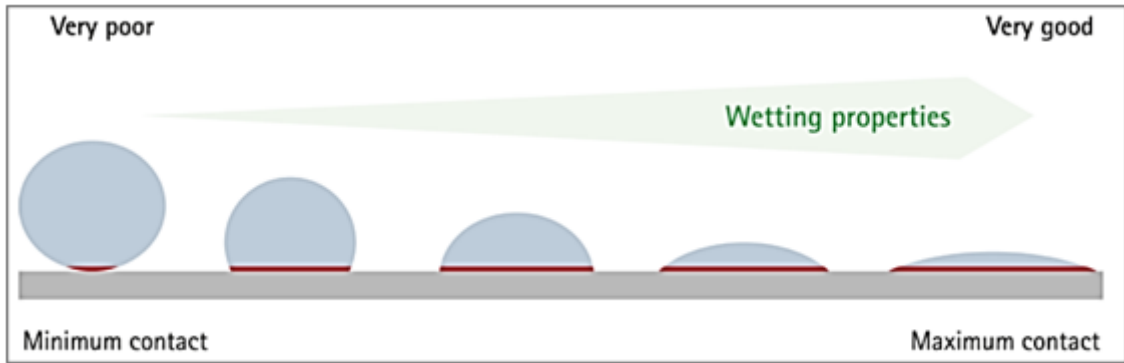


Şekil 2.11. Difüzyon teorisi (Schaubroeck, 2015)

2.3.1.4. Islatabilirlik Teorisi

Yapışmanın yapıştırıcı ve yapıştırılan bileşenler arasında gelişen yüzey kuvvetleri arasındaki moleküler temastan kaynaklandığını savunan bu teoride yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında sürekli temas kurma işlemine “ıslatma” denmektedir. Bir yapıştırıcının katı bir yüzeyi ıslatması için yapıştırıcının, yapıştırılacak yüzeyin kritik yüzey geriliminden daha düşük bir yüzey gerilimine sahip olması gerekmektedir. Bu durum, plastiklerin yüzey enerjilerini ve polaritelerini artıran yüzey işlemlerinin nedeni olarak da açıklanmaktadır. Van der Waals kuvvetleri, moleküller arasındaki mesafeye aşırı derecede duyarlı olup ıslatma mekanizması iyileştirildikçe bu kuvvetlerin oluşumu

da desteklenerek daha iyi bir yapışma elde edilebilmektedir. Yapıştırıcının; substrat yüzeyindeki çukur ve yarıkları doldurması daha iyi ıslatma ile sonuçlanırken, substrat yüzeyindeki çukurlar üzerinde köprü oluşturması yapıştırıcı ile substrat arasındaki etkin temas alanının azalmasına neden olarak kötü bir ıslatma ve daha düşük bağlantı dayanımına sebep olmaktadır. Eksik ıslatma arayüzey kusurlarına ve bölgesel gerilim yoğunlaşmalarına neden olarak bağlantı dayanımını azaltırken bu durumun aksine tam ıslatma, en yüksek bağlantı dayanımını sağlamaktadır. Şekil 2.12’de iyi ve kötü ıslatma örnekleri görülmektedir. Yapıştırıcının yapıştırılacak bileşenlerden daha düşük bir yüzey gerilimine sahip olması gerekliliği iyi ıslatma kriterlerinden biri olduğundan epoksi gibi organik yapıştırıcılar metallerle mükemmel yapışma yüzeyleri oluştururken polietilen, polipropilen gibi düşük yüzey enerjisine sahip işlenmemiş polimerik substratlar ile zayıf yapışma yüzeyleri oluşturarak nispeten dayanımı düşük yapıştırma bağlantıları meydana gelmektedir. Yapıştırıcının yapıştırılan yüzeyi ıslatma ve yayılma özelliğinin önemine çok önem verilmekte ve temas açısı ölçümleri ile yüzeyin ıslatabilirliğinin nicel değerlerine ulaşılmaktadır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzeyler arasındaki temas açısının sıfır veya 90°’den az olması aralarındaki çekim kuvvetinin yüksek olduğunu ifade etmekte ve bu da performansı yüksek bir yapıştırma bağlantısını meydana getirmektedir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeyler arasındaki temas açısının 90°’den büyük olması ise zayıf bir yapışma sunmaktadır (Ebnesajjad, 2008).



Şekil 2.12. Islatma teorisine göre iyi ve kötü ıslatma mekanizması örnekleri (URL-6)

2.3.1.5. Kimyasal Bağlanma Teorisi

Yapışma bağının oluşumunu yüzey kimyasal kuvvetlerine bağlayan bu mekanizma, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzeyler arasında oluşan kovalent bağlar ve iyonik bağların dispersiyon kuvvetlerinden daha güçlü olduğunu ifade etmekte ve Tablo 2.2’de bu

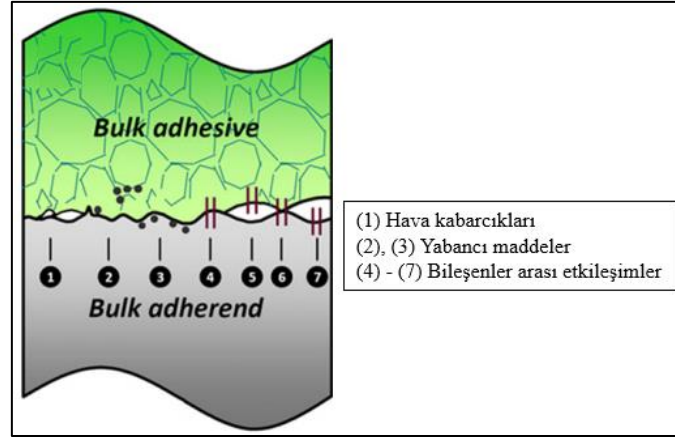
bağların enerji karşılaştırılması görülmektedir. Yapıştırma bağlantılarının kimyasal etkileşimi, arayüzün kimyasal bileşimine bağlı olmakla birlikte kovalent ve iyonik bağların sağladığı yapışma performansı van der Waals bağları ve hidrojen bağları gibi fiziksel kuvvetlere dayanan ikincil kuvvetler tarafından sağlanan yapışmadan çok daha yüksektir. Yapıştırıcıyı ve yapıştırılan yüzeyleri bir arada tutan etkileşimler aynı zamanda mekanik kilitleme, difüzyon veya elektrostatik teori mekanizmalarından da destek alabilmektedirler. Güçlü ve dayanıklı kimyasal etkileşime sahip olan kovalent bağlar, arayüz boyunca oluşabilmekte ve çapraz bağlı yapıştırıcılarda ve termoset kaplamalarda oluşması muhtemel görülmektedir.

Tablo 2.2. Yapışma olayında meydana gelen etkileşimlerin enerji karşılaştırması (Ebnesajjad, 2008)

Type	Example	<i>E</i> (kJ/mol)
Covalent	C-C	350
Ion-Ion	Na ⁺ ... Cl ⁻	450
Ion-dipole	Na ⁺ ... CF ₃ H	33
Dipole-dipole	CF ₃ H ... CF ₃ H	2
London dispersion	CF ₄ ... CF ₄	2
Hydrogen bonding	H ₂ O ... H ₂ O	24

2.3.1.6. Zayıf Sınır Tabakası Teorisi

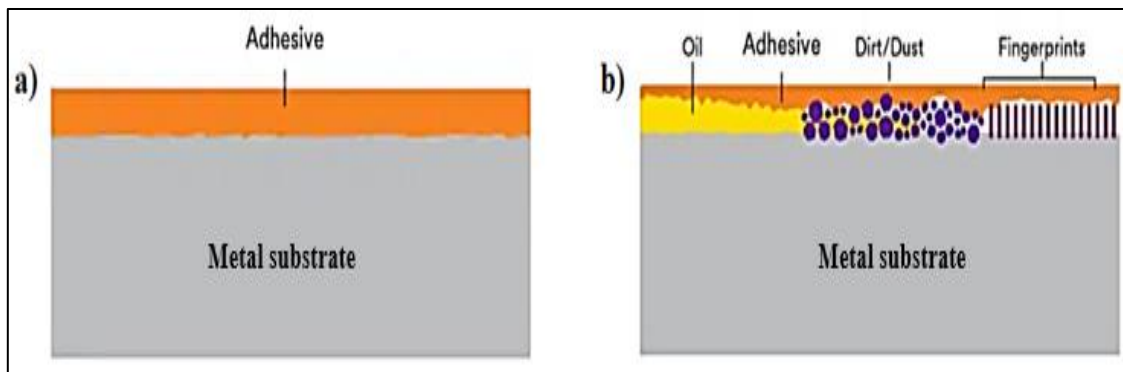
Arayüzey hasarının nadiren meydana geldiğini öne süren bu teori, bağ kopmasının arayüzeyde gerçekleşmiş gibi görünse dahi hasar mekanizmasının aslında arayüzeyin çok yakınında meydana geldiğini ve genellikle sünek plastik deformasyon veya zayıf bir sınır tabaka malzemesinin kohezif olarak ayrılmasından ötürü kaynaklandığını savunmaktadır. Zayıf sınır tabakaları yapıştırıcıdan, yapıştırılan yüzeylerden, çevresel etmenlerden ya da bunların kombinasyonlarından oluşmaktadır. Yapıştırıcı veya yapıştırılan yüzeyin yakınında bir kirliliğin yoğunlaşması zayıf sınır tabakalarına işaret etmekte ve bu durum dayanımı düşük yapıştırma bağlantılarıyla sonuçlanmaktadır. Arayüz bölgesinde oluşan ve Şekil 2.13'te görülmekte olan zayıf sınır tabakaları yapıştırıcının uygulanması, kürlenmesi veya yapıştırma bağlantısının hizmette olduğu süre boyunca çevresel nem gibi faktörlerin maruziyetiyle gelişebilmektedir. Bu sebeple yapıştırıcı uygulanmadan önce zayıf sınır tabakalarının uzaklaştırılması önemli bir husustur (Petrie, 2007).



Şekil 2.13. Zayıf sınır tabakaları (Choi, 2010)

2.4. Metal Yapıştırma Bağlantılarında Ön Yüzey İşlemi Uygulamalarının Önemi

Metalik yüzeyler genellikle Şekil 2.14'te de görüldüğü üzere toz, gres, adsorbe edilmiş su ve kırılgan oksit tabakaları gibi çeşitli kirliliklerle kaplı olmakla birlikte yapıştırılacak yüzey malzemesinden bağımsız olarak iyi bir yapıştırma işleminde temiz ve kararlı bir yüzey oluşturmak elzemdir. Alüminyum malzemelerin yapıştırılmasında bahsi geçen gres, toz, kir dahil olmak üzere hem organik hem de inorganik kirleticiler bulunmakla birlikte su ve gaz gibi aktif olmayan adsorpsiyon tabakası bulunmaktadır. Birden fazla yüzey topografyası gösteren doğası gereği kararsız ve homojen olmayan bir oksit tabakasına sahip alüminyum yüzeylerdeki bu safsızlıklar yapıştırma öncesinde malzeme yüzeyinden uzaklaştırılmalıdır [URL-7].



Şekil 2.14. a) Ön yüzey işlemi uygulanmış ve b) ön yüzey işlemi uygulanmamış metal yapışma yüzeyleri (URL-8)

Fizikokimyasal etkileşimler içeren yapışma olayı yüksek bir yüzey enerjisi ve mekanik kilitleme mekanizması oluşması için belirli bir yüzey pürüzlülüğünü gerektirmektedir. Yapıştırma bağlantıları polimerik yapıştırıcının yapıştırılan yüzey ile mekanik olarak

kenetlenmesi ya da polimer moleküllerinin metal oksit ile kimyasal olarak bağlanması ile elde edilmektedir (Molitor ve diğ., 2001). Epoksi-metal yapıştırma bağlantılarında, metalik yüzey iyonları proses esnasında epoksi aminleriyle etkileşime girerek anlık ve uzun süreli dayanım performansı açısından değerlendirildiğinde bulk epoksiden farklı özelliklere sahip bir arayüz bölgesi oluşturmaktadır (Golaz ve diğ., 2013). Bu bağlamda, güçlü bağlantılar elde etmek için temas yüzeyinin hazırlanması önemli bir husus olup aksi takdirde yapıştırıcının, yapıştırılacak yüzey yerine zayıf sınır tabakalarına yapışması söz konusu olmaktadır (Petrie, 2007). Ayrıca yapısal yapıştırıcılarla birleştirilmiş yapıştırma bağlantılarının, hava ortamında %65 kritik bağıl nemde mekanik performansları önemli ölçüde zayıflamakta ve özellikle arayüz bölgesinde yıkıcı sonuçlar doğmaktadır. Bununla birlikte, metal yapıştırma bağlantılarında metal yüzeylere uygulanan ön yüzey işlemleri, bağlantıların nem emme kabiliyetini büyük ölçüde iyileştirebilmekte (Ashcroft ve diğ., 2017) ve uygulanan ön yüzey işlemleri ile malzeme yüzeyi, mümkün olan en iyi yapıştırma koşullarını sağlayacak şekilde değiştirilmektedir. Başarılı bir yapıştırma için hangi yüzey işleminin gerekli olduğu yapıştırılacak malzemeler, tercih edildiği sektöre uygunluk, bütçe ve zaman, oluşturulan bağlantının performans gereksinimleri gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tablo 2.3'te metal yüzeylere uygulanan çeşitli ön yüzey işlemlerinin maliyet ve kalite açısından karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı ön yüzey işlemi yöntemlerinin maliyet ve kalite esaslarına göre kıyası (Duncan ve Broughton, 2001)

Ön Yüzey İşlemi	Maliyet	Kalite
Yağ Alma	Ucuz	Zayıf
Buharlı Yağ Alma		
Zımparalama		
Plazma		
Kimyasal dağlama		
Anodizasyon	Pahalı	Mükemmel

Tatmin edici olmayan yüzey hazırlığı, yapıştırıcı/yapıştırılan arayüzünde erken ve öngörülemeyen kopmalara sebebiyet vereceğinden yüzey işleminin optimize edilmesi için büyük çaba harcanmaktadır. Ön yüzey işlemleri; yüzey gerilimini artırmak, yüzey pürüzlülüğünü artırmak ve yüzey kimyasını değiştirmek gibi faktörler olmak üzere çeşitli

yollarla yapıştırılacak malzeme yüzeyini değiştirerek bağlantı dayanımını artırmaktadır (Molitor ve diğ., 2001).

Metaller için mikro veya makro mekanik, fiziksel, kimyasal veya elektrokimyasal olarak sınıflandırılacak çeşitli ön yüzey işlemleri bulunmaktadır (Correia ve diğ., 2018). Yağ alma ve mekanik ön yüzey işlemleri yapıştırılacak yüzeyi temizleyerek yüzey kimyasını değiştirmeden zayıf sınır tabakalarını giderirken; kimyasal dağlama, kimyasal anodizasyon gibi ön yüzey işlemleriyle yüzeydeki kirlilikler giderilip yüzey pürüzlülüğünün artırılmasının yanı sıra fonksiyonel gruplar vasıtasıyla malzeme yüzeyinin kimyası değiştirilerek reaktifliği artırılmaktadır. Yağ alma ve mekanik ön yüzey işlemlerinin birlikte uygulanmasında ise yüzeydeki kirlilikler giderilmekte ve oluşturulan yüzey pürüzlülüğü ile yapışma alanında artış sağlanmaktadır. Gerçekleştirilen ön yüzey işlemlerinin, yalnızca yapıştırılacak malzemenin ince bir yüzey tabakasının morfolojisini etkilemesi ve malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirmemesi önem arz etmektedir. Ön yüzey işlemlerinin ardından kontaminasyonlara sebebiyet vermemek için yapıştırılacak malzemeler kontrolsüz atmosferik ortama bırakılmamalı ve yapıştırılacak bölgelere fiziksel temasta bulunulmamalıdır. Ayrıca yapışma performansını maksimize etmek için ön yüzey işlemlerinden sonra kısa süre içerisinde yapıştırma işlemi gerçekleştirilmelidir (Duncan ve Broughton, 2001).

2.4.1. Yağ Alma

Yağ alma ön yüzey işlemin amacı, kararsız oksit/hidroksit film tabakasını çıkarmak ve yapışma yüzeylerindeki yağları ve gresleri temizlemektir (Prolongo ve Urena, 2009). Yapıştırılacak malzeme yüzeylerinde bulunan toz, yağ, gres ve diğer kirlilikler solventler aracılığıyla yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Yağ alma işleminde kullanılan solventler ve özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir. Oldukça yaygın olan buharlı yağ alma yönteminde solvent kaynama noktasına kadar ısıtılarak buharlaştırılmaktadır. Buharlaşmış solventle temas eden soğuk parçalar solvent yüzeyinde yoğunlaşarak yüzeydeki kir ve pas gibi parçacıkları temizlemektedir. Yağ alma işleminde kullanılan bir başka yöntem olan deterjanla temizlemede genellikle alkalin esaslı deterjanlar tercih edilmekte olup yapıştırılacak malzemeler temizleme işleminin hemen ardından saf suda yıkanmaktadır. Bu yöntemde kullanılan deterjanın işlem后会 sonra yüzeyden uzaklaştırılması önemli bir

kriter olmakla birlikte aksi takdirde bu durum yapışma dayanımında düşüş gerçekleşmesine sebep olmaktadır (Şekercioğlu ve Özenç, 2014).

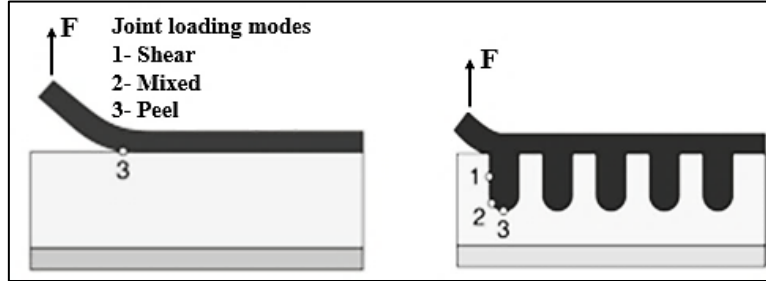
Tablo 2.4. Yağ alma işleminde kullanılan solventler ve özellikleri (Şekercioğlu ve Özenç, 2014)

Solvent	Temizleme Kapasitesi	Yanıcı veya Parlayıcı
Hidrokarbonlar (İzoparafinler)	İyi	Evet
Ketonlar (Aseton)	İyi	Evet
Alkoller (İzopropanol)	Orta	Evet
Su bazlı	İyi	Hayır

2.4.2. Mekanik Ön Yüzey İşlemleri

Zımparalama, kum püskürtme, fırçalama, taşlama gibi yöntemleri içeren mekanik ön yüzey işlemleriyle yapıştırılacak yüzeydeki safsızlıkların uzaklaştırılması, yapısal yüzey kusurlarının giderilmesi, temas yüzey alanı artırılarak etkin yüzey alanının artırılması amaçlanmaktadır. Mekanik ön yüzey işlemlerinde yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerinin pürüzlülüğü artırılarak bu yüzeylerin yapıştırıcı tarafından daha iyi ıslatılması ve daha geniş bir temas yüzey alanı sağlanması esastır. Ayrıca yapıştırılacak malzemeler ve yapıştırıcı arasındaki mekanik kuvvetler vasıtasıyla makroskobik boyutta ortaya çıkan etkileşimler yüzey morfolojisinde değişiklikler ortaya koymaktadır. Mekanik ön yüzey işlemleri sonucunda gerçekleşen bir olgu olan mekanik kilitleme mekanizması sayesinde arayüzde daha iyi gerilim dağılımı sağlanmakla birlikte oluşan hasarların yayılması durdurulmaktadır. Şekil 2.15'te mekanik ön yüzey işlemi sonrasında artan etkin temas alanı ve yüzey pürüzlülüğü görülmektedir (Marques ve diğ., 2020). Uygun yüzey pürüzlülüğü yapıştırma bağlantılarının dayanımlarında büyük bir rol oynamakla birlikte metal yapışma yüzeyleri için en uygun yüzey pürüzlülüğü $R_a = 1,5-2,5 \mu m$ 'dir. Çok parlak yüzeylerde yapıştırıcının yüzeye tutunması zorlaşmakta ve yapıştırma bağlantılarının dayanımı olumsuz yönde etkilenmektedir (Şekercioğlu ve Özenç, 2014). Aşırı pürüzlü yüzeyler yapıştırıcı tarafından tam olarak ıslatılamamakta ve bunun sonucunda oluşan gerilim konsantrasyonları nedeniyle hasar başlama noktaları olarak hareket edebilen boşluklar oluşmaktadır (Marques ve diğ., 2020). Mekanik ön yüzey işlemlerinin yüzeyde bıraktığı kalıntılar ve yapıştırılacak yüzeyde oluşan mekanik hasar yapıştırma bağlantıları için tehlikeli olabilmekte ve bu bağlantıların uzun süreli dayanım

performansları düşük olmaktadır. Mekanik ön yüzey işlemleri veya alkali ile temizleme yöntemleri bu açıdan yetersiz kalmakta olup uygun bir oksit tabakası oluşturmak için kimyasal veya elektrokimyasal işlemler uygulanmaktadır.

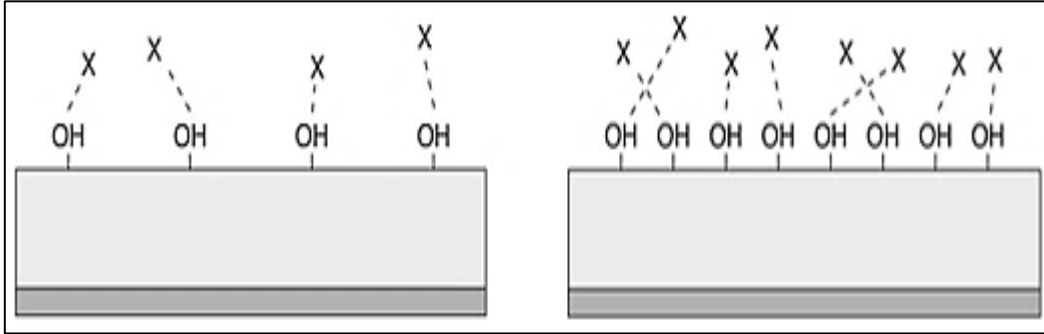


Şekil 2.15. Mekanik ön yüzey işlemi sonrasında yapıştırma bölgesinde gerçekleşen değişimlerin şematik gösterimi (Marques ve diğ., 2020)

2.4.3. Kimyasal Ön Yüzey İşlemleri

Mekanik ön yüzey işlemlerindeki artıkların temizlenmesi zor olmakta ve solvent temizliği gereksinimine yol açmaktadır. Yapıştırma olayı, yüzeyin kimyasal aktifliğine ve kirliliklerin olmamasına bağlı olduğundan, mekanik aşındırmadan sonra solvent temizliği, kirleticileri kısmen çözerek yüzey üzerine yaymayı başarmakta ancak aktif yüzeyin etkinliğini azaltmaktadır (Baldan, 2004). Alternatif bir ön yüzey işlemi yöntemi olan kimyasal ön yüzey işlemlerinde ise yüzeyi temizleme veya zayıf sınır tabakalarını ortadan kaldırmanın yanı sıra doğal yüzey kimyasının değişimi söz konusudur. Kimyasal ön yüzey işlemleriyle yüzeyin ıslanabilme kabiliyeti iyileştirilebilmekte ya da yapışma performansını artırmak için zayıf sınır tabakası değiştirilmektedir. Ayrıca kimyasal ön yüzey işlemleriyle mekanik yapışmayı artıran mikro ölçekte yüzey pürüzlülüğü oluşumu mümkün olmaktadır. Oksitler, sülfürler, klorürler, asit tuzları, nem, yağ ve atmosferik gazları içeren zayıf sınır tabakalarını ihtiva eden metal malzemelerin kimyasal ön yüzey işlemleri, genellikle önceden belirlenmiş tipte bir oksit tabakasının veya güçlü, kararlı ve yapıştırıcıya uyumlu yüzey yapısının oluşumuna zemin hazırlayan kimyasal işlemleri kapsamaktadır. Uygulanan kimyasal ön yüzey işlemleriyle malzeme yüzeyindeki bahsi geçen zayıf sınır tabakaları uzaklaştırılmakta, daha düzgün ve yapışmaya uygun bir yüzey yapısı oluşturulmaktadır (Petrie, 2007). Yüzeyin kimyasal modifikasyonu, seçilen yapıştırıcı ile uyumlu fonksiyonel gruplar (silanlar, hidroksitler vs.) sağlamakta ve/veya bu fonksiyonel grupların yoğunluğunu artırarak, yüzeyin polimerik yapıştırıcı ile kimyasal bağ oluşturma kabiliyetini geliştirmektedir (Marques ve diğ., 2020). Şekil

2.16’da uygulanan kimyasal ön yüzey işleminin arayüz bölgesindeki fonksiyonel grup yoğunluğuna etkisi görülmektedir.



Şekil 2.16. Hidroksil yoğunluğunun arayüz bölgesine etkisi (Marques ve diğ., 2020)

Alüminyum malzemeler oldukça reaktif olmakla birlikte özellikle oksijenle yüksek afiniteye sahiptir. Bu sebeple hava ortamına maruz kaldığında alüminyum malzeme yüzeyinde ince bir alüminyum oksit (Al_2O_3) tabakası oluşmaktadır. Bu oksit tabakasında gerçekleşen hidroksilasyon reaksiyonu sayesinde oluşan bazik yapıdaki alüminyum hidroksitler polimerik yapıdaki yapıştırıcının asidik bölgeleriyle etkileşime girerken bu olgunun aksi durumunda üst yüzeyde daha zayıf bazik bölgeler oluşarak yapışma performansını olumsuz etkilemektedir (Marques ve diğ., 2020). Bu sebeple uygulanan kimyasal ön yüzey işlemleriyle oluşturulan daha kararlı oksit tabakasıyla dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları elde edilmektedir. Tablo 2.5’te çeşitli ön yüzey işlemlerine maruz bırakılmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının dayanım performanslarının karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 2.5. Çeşitli ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum yapıştırma bağlantılarının dayanım performansları (Petrie, 2007)

Surface treatment	Type of bond
Solvent wipe (MEK, MIBK, trichloroethylene).....	Low to medium strength
Abrasion of surface, plus solvent wipe (sandblasting, coarse sandpaper, etc.)	Medium to high strength
Hot-vapor degrease (trichloroethylene).....	Medium strength
Abrasion of surface, plus vapor degrease.....	Medium to high strength
Alodine treatment	Low strength
Anodize	Medium strength
Caustic etch*	High strength
Chromic acid etch (sodium dichromate–sulfuric acid)†	Maximum strength

Kimyasal ön yüzey işlemlerindeki katkı maddelerinin konsantrasyonu, banyo sıcaklığı ve yapıştırılacak metallerin iyon içeriği gibi işlem koşullarındaki parametre değişiklikleri bu prosesleri daha karmaşık hale getirmektedir. Asitle dağlama ve anodizasyon metotları, metal yapışma yüzeylerini işlevselleştirmek için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Uygulamada, kimyasal ve mekanik katkılar birbiriyle ilişkili olduğundan yüzey pürüzlülüğündeki artış, moleküler ve atomik etkileşimler açısından etkin temas yüzey alanında da artışa yol açmaktadır. Kimyasal dağlama prosesleri mikro yapıdaki kusurlar nedeniyle bozulmaya ve kararsızlığa eğilimli metal yüzey katmanlarını ortadan kaldırmanın yanı sıra, yapıştırma için uygun yeni ve daha kararlı bir oksit hazırlamayı amaçlamaktadır (Marques ve diğ., 2020). FPL-dağlama olarak da bilinen kromik-sülfürik asitle dağlama yaygın olarak kullanılan kimyasal işlemlerin başında yer almaktadır. Bu yöntem, yapıştırılacak yüzeyin sülfürik asit (H_2SO_4) ve dikromat çözeltisine daldırılmasından oluşan etkili ve güvenli bir yöntemdir. Farklı FPL-dağlama prosesleri bulunmakta olup bu prosesler bileşik konsantrasyonu, kullanılan sıcaklık ve daldırma süresi bakımından farklılıklar göstermektedir. Orijinalinde düşük kromat konsantrasyonları ve kısa işlem süreleri içeren FPL-dağlama işlemi havacılık ve otomotiv endüstrilerinde bağımsız bir işlem olarak veya anodizasyon işleminden önce ön işlem olarak kullanılmaktadır (Prolongo ve Urena, 2009). Hazırlanan sülfürik asit-dikromat çözeltisiyle uygulanan FPL-dağlama işlemiyle yapıştırılacak malzeme yüzeyinde bulunan oksit tabakası uzaklaştırılıp yeni ve kararlı ince oksit tabakası oluşturularak yüzey morfolojisi değiştirilmektedir (Şekercioğlu ve Özenç, 2014). FPL oksit tabakası, gözenekli mikro yapılardan oluşmakta ve yüzey yaklaşık 40 nm kalınlığında ince bir oksit tabakası ile değiştirilmektedir (Park ve diğ., 2010). Oluşan gözenekli yapı yapıştırıcı ve oksitlenmiş yüzey arasında mekanik kilitleme mekanizması oluşturmak için yeterli görülmektedir. FPL-dağlama yöntemine genel anlamda benzeyen sülfürik asit-ferrik sülfat çözeltisi kullanılan P2 kimyasal ön yüzey işleminde ise FPL-dağlama prosesinde kullanılan zararlı ve tehlikeli sodyum dikromat yerine oksitleyici madde olarak ferrik sülfat kullanılmaktadır (Şekercioğlu ve Özenç, 2014).

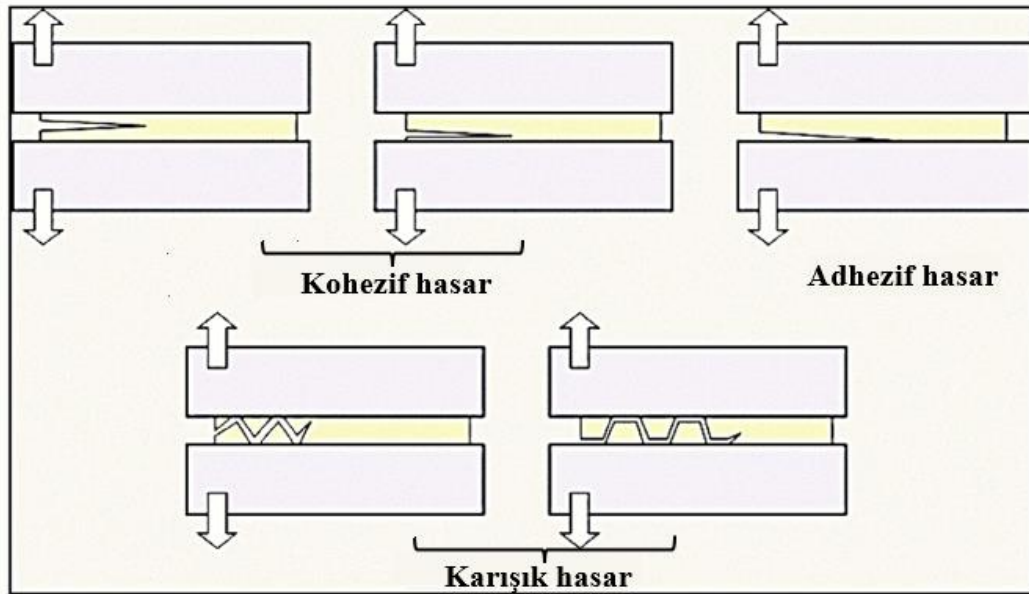
2.4.4. Elektrokimyasal Ön Yüzey İşlemleri

Özellikle havacılık uygulamalarında tercih edilen anodizasyon işlemleri, elektrolitin doğasının ve çalışma koşullarının yapıştırma yüzeyinin nihai kimyasal ve morfolojik

özelliklerini değiştiren karmaşık bir yöntemdir. Anodizasyon işlemleri alüminyum yapışma yüzeyleri üzerinde gözenekli anodik oksit film tabakaları oluşturmak için en iyi yöntemlerden biridir. Bu film tabakaları, yapıştırıcının yüzeye nüfuz etmesi için nano gözenekli bir ortam oluşturarak yapışma ve arayüz kararlılığını artırmaktadır (Marques ve diğ., 2020). İlk uygulamalar, alüminyum yüzeylere uygulanan yağ alma ve ardından FPL-dağlama ön yüzey işlemleriyle metal yüzeyler ve yapıştırıcı arasında iyi bir yapışma elde edilebileceğini göstermiştir. Ancak korozyon oluşumunun söz konusu olduğu durumlarda bu yöntemlerin yetersiz kaldığı tespit edilerek alüminyum yüzeylere, FPL-dağlama ön yüzey işleminden sonra anodizasyon işlemi uygulanmış ve korozyon duyarlılığının azaldığı fark edilmiştir. Elektrokimyasal ön yüzey işlemleri sonucu elde edilen yüksek yapışma performansı, oksit filmin gözenekli morfolojisiyle yüksek adsorpsiyon gücüne, anotlanmış tabakanın kimyasal ve elektriksel kararlılığına ve sağladığı korozyon ve aşınma direnci gibi özelliklerle açıklanmaktadır (Björgum ve diğ., 2003). Havacılık endüstrisinde yaygın olarak fosforik asit anodizasyonu (PAA) veya kromik asit anodizasyonu (CAA) kullanılmaktadır. Bu ön yüzey işlemleri havacılıkta birincil yapıların yapıştırma bağlantısı uygulamaları için yeterli görülmektedir. Otomotiv uygulamalarında ise daha basit, daha ekonomik ve daha çevre dostu prosesler gerekli görülmektedir (Lunder ve diğ., 2002). PAA anodizasyon yöntemine göre daha kalın oksit tabakası oluşturan CAA anodizasyon yöntemi çok daha az hassas bir yöntem olmasının yanı sıra daha iyi korozyon koruması sağlamaktadır. CAA prosesinin en büyük dezavantajı hegzavalent krom içeriğinden ötürü çevre dostu olmamasıdır. Alüminyum için bahsi geçen CAA ve PAA anodizasyon işlemleri genellikle yapıştırma bağlantılarına iyi bir başlangıç dayanımı ve uzun süreli dayanım performansı sağlamaktadır. Genellikle otomotiv uygulamalarında kullanılan sülfürik asit anodizasyonunda (SAA) gözenekler daha dar (10 nm) olmakta ve bu nedenle yapıştırıcı, yüzeye tam olarak nüfuz edemediğinden nispeten dayanımı daha düşük arayüz bölgeleri oluşmaktadır. Sünek yapıştırıcılarla birleştirilen endüstriyel uygulamalarda başarıyla uygulanan sülfürik asit anodizasyonu dar gözenek yapısından ötürü rijit yapıştırıcılar için uygun bir yöntem olarak görülmemektedir. Alüminyumun anodizasyon işlemleri nispeten karmaşık ve pahalı bir proses olduğundan genellikle, havacılık endüstrisi dışındaki uygulamalarda ekonomik bir tercih olarak görülmemektedir (Kwakernaak ve diğ., 2012).

2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Türleri

Bir yapıştırma bağlantısı yapışmanın en zayıf olduğu yerde hasara uğramaktadır. Herhangi bir yapıştırma bağlantısı adhezif bir şekilde, kohezif bir şekilde veya ikisinin kombinasyonu şeklinde hasarlanarak kopmaktadır. Yapıştırıcının yapıştırılan yüzeylerden sadece birinde kaldığı ve diğer yüzeyin yapıştırıcı içermediği adhezif hasar türü, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasındaki arayüz hattında gerçekleşmektedir. Kohezif hasar, yapıştırıcı tabakanın kalınlığı boyunca hasar mekanizması ilerleyerek kopma gerçekleştiğinde meydana gelmekte ve her iki yapıştırılan yüzeyde yapıştırıcı kalıntıları oluşmaktadır. Bazen yapıştırılan yüzeyler yapıştırıcıdan önce hasara uğramakta ve bu durum yapıştırılan yüzeyin kohezif hasarı olarak bilinmektedir. Hasar kısmen arayüz bölgesinde ve kısmen de yapıştırıcı ve/veya yapıştırılan yüzeyde oluştuğunda ise karışık hasar mekanizması gözlenmektedir. Şekil 2.17’de hasar mekanizmalarının yapıları görülmektedir.



Şekil 2.17. Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen hasar mekanizmaları (Zotti ve diğ., 2016)

Kohezif hasar; kayma ve soyulma ya da bu iki gerilmenin kombinasyonu ile meydana gelebilmektedir. Tipik olarak kohezif türdeki bir hasar mekanizması yapıştırma bağlantısının tasarımındaki bazı hatalardan (aşırı soyulma gerilimi, yetersiz örtüşme alanı vb.) ve yapıştırıcının yapısındaki boşlukların varlığından kaynaklanabilmektedir (Gursel ve diğ., 2019). Arayüz bölgesinde oluşan adhezif hasar ise yapıştırılan malzemelerin

yüzey kalitelerinin kötü olmasından ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemeler arasındaki kimyasal bağların hidratlaşmasından kaynaklanmaktadır. Arayüz ya da adhezif hasarlanma zaman zaman oluşan kontaminasyonlar nedeniyle meydana gelse de yapıştırma bağlantısının hizmet ömrü sırasında adhezif hasarlanmanın en yaygın nedeni, uygulanan ön yüzey işleminin yetersizliğinden kaynaklanan zayıf çevresel direnç olarak görülmektedir. Yaşlanma sürecine maruz kalmayan yapısal bağlantıların hasar yüzeyleri genellikle kohezif mekanizmaları içerirken çevresel faktörlere maruz kalan bağlantılardaki hasar mekanizmaları genellikle yapıştırıcı ve metalik yüzey arasındaki arayüzde veya çok yakınında meydana gelmektedir (Baldan, 2004).

Oluşmuş bir bağlantı hasarının arayüzde gerçekleşmesi yapıştırıcı malzemesinin bulk yapışma dayanımının moleküller arası yapışma dayanımından daha büyük olduğunu göstermektedir. Öte yandan hasarın kohezif bir mekanizma şeklinde gerçekleşmesi bağ kuvvetlerinin, yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvetlerden daha güçlü olduğuna işaret etmektedir (Petrie, 2007). Bu durum Tablo 2.6’da açık bir şekilde görülmektedir.

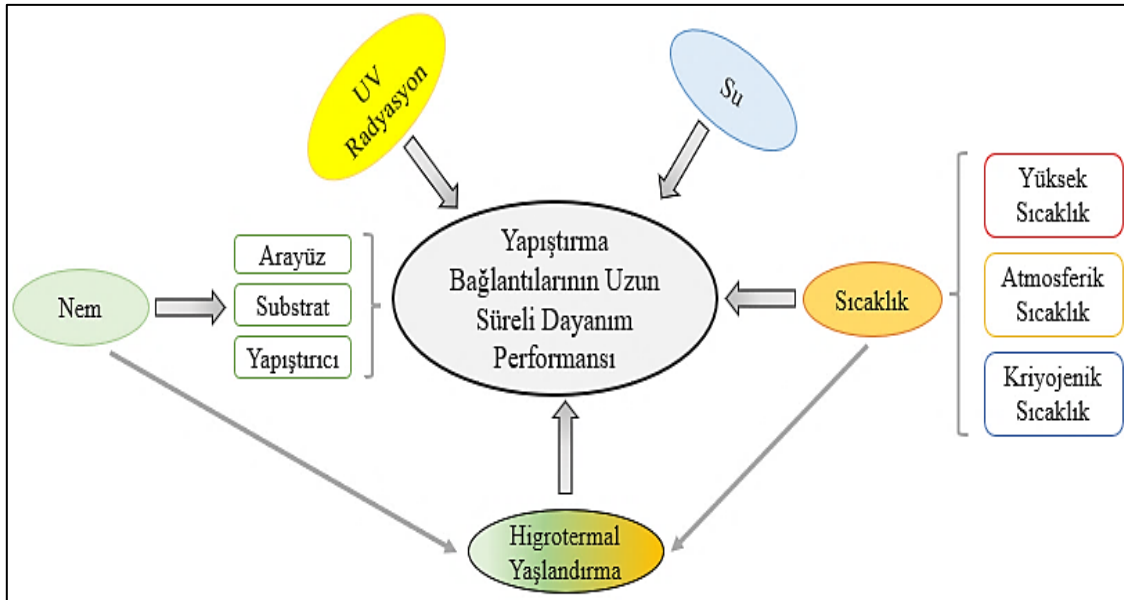
Tablo 2.6. Yapıştırma bağlantılarının hasar türlerine göre yapılan çıkarımlar (Petrie, 2007)

Failure mode	Inference
Adhesive failure (interfacial)	Cohesive strength > interfacial strength
Cohesive failure (bulk)	Interfacial strength > cohesive strength
Adhesives/cohesive (mixed failure mode)	Interfacial strength $\approx$ cohesive strength

2.6. Yapıştırma Bağlantılarının Çevresel Koşullar Altında Özellikleri

Mühendislik yapılarının tasarımında dayanım, sertlik ve ömür en önemli mekanik özellikler olarak kabul edilmektedir. Bu özelliklerin minimum ağırlıkta maksimize edildiği hem metalik hem de metalik olmayan yapıların birleştirilmesi için en etkili yöntem yapıştırma ile birleştirme metodu olmakla birlikte özellikle hafifliğin büyük önem arz ettiği havacılık ve otomotiv gibi sektörlerin belirli uygulamalarında sağladığı avantajlar sayesinde tercih edilmektedir (Hirulkar ve diğ., 2020). Bununla birlikte termal çevrimler, nem ve Ultra-Violet (UV) radyasyonu gibi önemli çevresel etkilerin yapıştırıcıların dayanımını etkilediği bilinmektedir (Ozdemir ve Oztoprak, 2017).

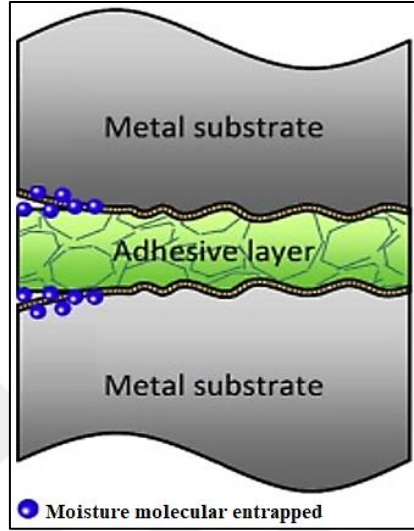
Polimerik yapıştırıcılar bu koşullar altında olumsuz olarak etkilenmekte ve yapıştırma bağlantılarının zamana bağlı dayanımları da düşüş göstermektedir. Şekil 2.18’de yapıştırma bağlantılarının uzun süreli dayanımına etki eden çevresel koşullar görülmektedir. Yapıştırıcılar nem varlığında ortam sıcaklığında bile suyu emme eğiliminde olduğundan bu durum yapıştırma bağlantıları için büyük tehlike arz etmekte ve yapıştırma bağlantılarının uygulama alanlarını sınırlandırmaktadır. Birincil erişim yolu olarak yapıştırıcı ya da arayüz bölgesi tarafından difüzyon yoluyla giren su; yapıştırıcının, yapıştırılan yüzeylerin ve kimyasal bağların bozunmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 2.18. Yapıştırma bağlantılarının uzun süreli dayanım performanslarına etki eden çevresel etmenler (Budhe ve diğ., 2017)

Absorbe edilen su, genellikle plastikleşmeye (plasticization) ve şişmeye (swelling) neden olarak ya da arayüz hattındaki bağları keserek mekanik mukavemeti azaltıcı yönde etki etmektedir. Plastikleşme, plastik deformasyonu tetikleyerek camı geçiş sıcaklığını (T_g) ve elastiklik modülünü düşürürken; şişme, yapıştırıcı matris içerisindeki serbest hacmi doldurarak polimer zincirlerini germekte, bağlar arası mesafeyi artırmakta ve artık gerilmelere sebep olmaktadır. Yüksek enerjili substrat ve yapıştırıcı arasındaki kuvvet etkileşimleri sonucu oluşan adhezyon mekanizması da suyun varlığından etkilenmekte olup bu bölgede yapıştırıcı ile su yer değiştirerek yapının bozunmasına yol açmaktadır. Plastikleşme ve şişme mekanizmaları tersinir olmakla birlikte yapıştırıcıya nüfuz eden su, mikro çatlak ve arayüzde hidroliz olaylarına sebep olarak mekanik, termal ve fizyo-

kimyasal özellikleri bozucu etki oluşturup kalıcı hasar oluşumuna neden olmaktadır. En kritik hasar mekanizması genellikle arayüz bölgesi boyunca meydana gelmektedir (Hirulkar ve diğ., 2020); (Bowditch, 1996). Şekil 2.19’da su moleküllerinin metal-metal yapıştırma bağlantılarının arayüz bölgesi hattından bağlantı bölgesine girişi görülmektedir.



Şekil 2.19. Arayüz bölgesinde hapsolmuş su molekülleri (Park ve diğ., 2020)

Öte yandan, sıcaklık değişiminin endüstriyel uygulamalarda en yaygın parametrelerden biri olduğu ve bu alanlarda çeşitli çevresel koşullara karşı direnç göstermesi beklenen ürünler üretilmesi gerektiği açıktır. Yapısal yapıştırıcıların neredeyse tamamı polimer esaslı olduğundan sıcaklığa karşı duyarlı olup özellikle yüksek sıcaklıklara dayanma konusunda yetersiz performans sergilemektedir (Marques ve diğ., 2015). Bu bağlamda, yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığı önemli bir faktör olmakla birlikte bu sıcaklığın üzerinde mekanik özelliklerde büyük değişiklikler meydana gelmekte ve yapışma performansı düşerek bağlantıların dayanım özellikleri olumsuz etkilenmektedir.

Yapıştırma bağlantılarının, değişken sıcaklıklarda mekanik yüklemeler karşısında ve su, petrol, diğer organik çözücüler gibi bozucu etkiye sahip ortam koşulları altında tatmin edici dayanım özellikleri sergilemeleri ve uzun vadede güvenilir olmaları beklenmekte olup birçok durumda bu koşulların kombinasyonları yaşanabilmektedir. Örneğin, bir hava aracının gökyüzünde yaklaşık olarak 30000 feet-40000 feet arasında yani -30 °C sıcaklıklarda seyahat ettiği ve yaz aylarında yerdeki sıcaklığın yaklaşık 35 °C olduğu düşünüldüğünde atmosfer ortamında, nem etkisiyle sıcaklık değişimlerinden ötürü termal

yüklemelerle de karşı karşıya kalan hava araçlarının bu koşullara direnç göstermeleri beklenmektedir. Orta derecede artan sıcaklıkların veya mekanik gerilimlerin yapıştırma bağlantıları üzerinde olumsuz bir etkisi olmamakla birlikte, suyun mevcudiyetinde artan sıcaklıklar yapının hasarlanmasını hızlandırmakta ve suyun artan difüzyonu ile birlikte yıkıcı sonuçlar doğmakta olup özellikle döngüsel yüklemeler karşısında daha büyük hasarlar meydana gelmektedir (URL-7). Ayrıca higrotermal bir ortama maruz kalan yapıştırıcıların T_g değeri azaldığından servis sıcaklığı değişmektedir. Kıstas olarak sıcaklık ve nemin yanı sıra maruz kalma süresi de T_g değerine etki ederek yapıştırma bağlantılarının dayanımı üzerinde rol oynamaktadır (Budhe ve diğ., 2018).

Çevresel faktörlerden bir diğeri ise dış ortamlarda hizmet eden yapıştırma bağlantılarının uzun süreler boyunca doğrudan güneş ışığına maruz kalmalarından ötürü ortaya çıkan UV radyasyonudur. Yüksek enerjili kısa dalga boyları (290 ila 400 nm) aracılığıyla polimer malzemenin yapısal zinciri aşamalı olarak ayrılarak renk değişikliği ile etkileşim süreci başlamakta ve UV maruziyeti ile oksijeni de içeren karmaşık bir kimyasal modifikasyon sürecine girerek yapıştırma bağlantılarının özelliklerinde kayıp yaşanmasına sebep olmaktadır (Amorim ve diğ., 2018).

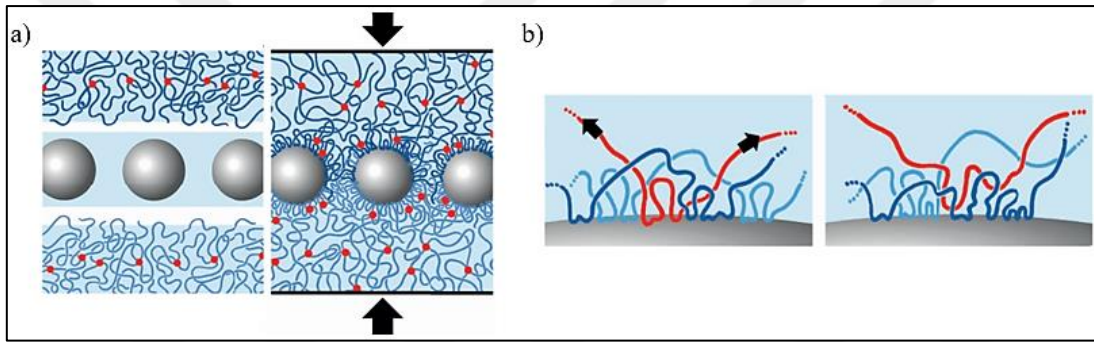
Yapıştırma bağlantılarının bahsedildiği üzere birçok zorlu çevresel etkiler altında performans sergilemelerinden ötürü bu koşullar altındaki performanslarının bilinmesi gerektiği aşikardır. Bu sebeple yapıştırma bağlantılarının anlık dayanımlarından çok nem ve sıcaklık gibi olumsuz çevre koşulları altındaki uzun süreli dayanım performanslarının incelenmesi gerektiği elzemdir. Bu amaçla gerçekleştirilen higrotermal yaşlandırma testleri sonucunda yapıştırma bağlantılarının zorlu çevresel şartlar altında uzun süreli dayanım performansları tespit edilmekte ve bu durum yapıştırma bağlantılarının endüstriyel uygulamalarda güvenilir bir kullanım alanı oluşturmaya olanak sağlamaktadır.

2.7. Nano Malzeme Takviyesinin Yapıştırma Bağlantılarının Performanslarına Etkisi

Mühendislik uygulamalarında ve yüksek teknoloji endüstrilerinde ihtiyaç duyulan yüksek performans ve hafif yapı tasarımları gerekliliği yapıştırma bağlantılarının kullanımını ön plana çıkarırken yüksek yapışma dayanımına sahip, hafif, düşük maliyetli, yorulma

direnci yüksek ve kimyasala karşı dirençli epoksiler yapıştırıcı seçimi olarak endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Tüm bu avantajlarının yanı sıra amorf yapıda ve yüksek çapraz bağ yapısına sahip epoksi yapıştırıcılar kırılma davranış sergilemekte ve hasar başlangıcına ve ilerlemesine karşı düşük direnç göstererek yapıştırma bağlantılarının hizmet ömrünü sınırlamaktadır (Wang ve diğ., 2021a). Bununla birlikte, her geçen gün büyüyen ve gelişen yapıştırıcı endüstrisi formülasyonlar ve kürleme süreçleri, yeni uygulama ve çalışma koşullarını içeren kayda değer değişikliklere imza atarak yapıştırıcıları ve dolayısıyla yapıştırma bağlantılarının performanslarını iyileştirici sonuçlar elde etmektedir. Bu bağlamda, epoksi yapıştırıcılar yüksek servis sıcaklıklarına ve termal döngülere karşı direnç gibi özelliklere sahip olmaları amacıyla epoksi yapıştırıcıların özelliklerini iyileştiren yöntemlere başvurulmaktadır. Bu hedefle gerçekleştirilen uygulamalardan biri de epoksi yapıştırıcı içerisine makro, mikro ve nano boyutlarda takviye malzemeleri katarak yapıştırma bağlantılarının nihai özelliklerini geliştirmektir (Ahmadi, 2019). Yapıştırıcıya yapılan takviyeler mekanik özellikleri büyük ölçüde etkileyen takviye boyutu, içeriği ve matris ile arayüzey yapışması gibi bazı parametrelere sahiptir (Giv ve diğ., 2018). Son yıllarda, takviye malzemelerinin boyutu mikro ölçekten nano ölçeğe kaymış olup nano partiküllerin olağanüstü özellikleri bu alanda yaygın araştırmalara öncülük etmiştir. Nano malzemeler, mikro boyutlu takviyelere kıyasla ince yapışma hatlarına izin vermesi ve sonuç olarak bulk yapıştırıcı içerisinde gevrekleşme riskini azaltarak daha yüksek performanslara yol açması gibi avantajlarından ötürü ön plana çıkmaktadır (May ve diğ., 2010). Bu duruma yapıştırma bağlantısında oluşabilecek küçük bir hasarın sadece birkaç mikro partikülü geçmek yerine birçok nano partikül ile etkileşime gireceği göz önünde bulundurulması da örnek verilebilmektedir. Nano partiküller yapıştırıcı matrise oldukça yüksek spesifik yüzey alanı sağlayarak, benzersiz özellikler ve bulk epoksi haricinde yeni bir malzeme davranışı kazandırmaktadır (Wetzel ve diğ., 2003). Yüksek yüzey enerjisine, geniş spesifik yüzey alanına ve benzersiz yapıya sahip nano partiküller polimer zincirleri arasındaki boşlukları doldurarak bağların yüzeye itilmesi ile yüzeyde daha fazla kimyasal bağın oluşmasına katkıda bulunmaktadır. Nano partiküller, polimer malzeme içerisinde homojen olarak dağıtıldıklarında yapı içerisindeki zayıf mikro yapıları doldurarak polimer-nano partikül arayüzeyinde oluşan etkileşim kuvvetleri ile mekanik özellikleri artırmaktadır. Polimer malzeme içerisine nano partiküllerin takviye edilmesi ile polimer

ağ zincirleri nano partiküller üzerinde adsorbe edilmekte ve bu yapı içerisinde partiküller tutunmaktadır. Yapıştırma esnasında uygulanan basınç ile yapıştırıcı içerisindeki nano partiküller Şekil 2.20’de kırmızı, açık ve koyu mavi iplikler ile sembolize edilen polimer ağlarına tutunmaktadırlar (Şekil 2.20-a). Dengede veya gerilim altında nano partikül yüzeyinden ayrılan bir monomer zincir (kırmızı iplik), aynı veya farklı bir ağ ipliğine (koyu mavi iplik) ait bir monomerle değiştirilebilmektedir (Şekil 2.20-b). Bu sayede yapıştırıcı tabakadaki nano partiküller polimer zincirleri arasında bağlantı görevi görmektedirler. Yapıştırıcı, birleştirilecek olan malzemelere yapıştırıldığı zaman adsorbe edilmiş monomerler nano partiküllerden ayrılarak yüzeye çıkmakta ve bu da yapı içerisindeki gerginliği azaltmaktadır (Rose ve diğ., 2014).



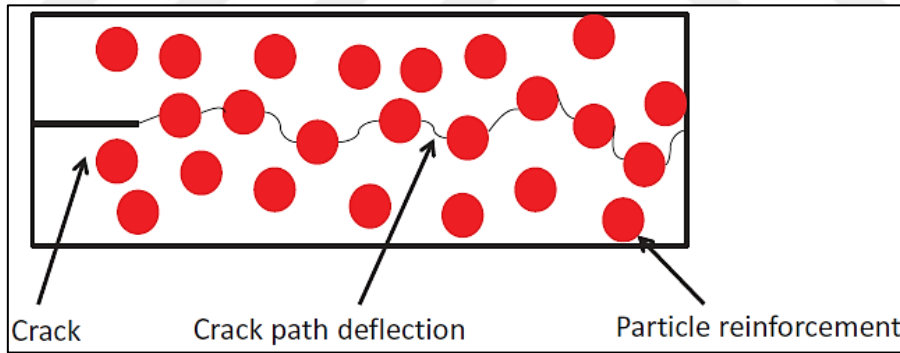
Şekil 2.20. Nano partikül takviyesinin yapıştırıcının polimerik ağ yapısı üzerindeki etkileri (Rose ve diğ., 2014)

Nano partikül türüne ve fonksiyonlarına bağlı olarak epoksi yapıştırıcı içerisine sadece birkaç nano partikül içeriğinin takviye edilmesiyle yapıştırma bağlantılarının kürlenme reaksiyonlarında, çekme, tek tesirli kayma ve basma dayanımlarında, camsı geçiş sıcaklıklarında, termal kararlılıklarında iyileşmeler kaydedilerek performanslarında kayda değer gelişmeler elde edilmektedir. Nano partikül takviyesiyle epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi temelde iki nedene atfedilmektedir:

- 1- Yüzeylerinde reaktif fonksiyonel gruplara sahip nano partiküller epoksinin kürlenme reaksiyonuna dahil olarak çapraz bağ yoğunluğunu artırıp mekanik dayanımdaki artışa öncülük etmektedir.

- 2- Epoksi matris içerisinde homojen dağılan nano partiküller, epoksi matris üzerine gelen gerilimlerin epoksi matristen nano partiküllere aktarılmasını sağlamakta ve bu sayede yapışma dayanımını artırarak mekanik performansı iyileştirmektedir.

Nano partikül takviyesinin tüm faydalarına karşın bazı durumlarda epoksi matris içerisinde nano partiküllerin varlığı mekanik performansı olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu durum nano partiküllerin topaklaşarak (agglomeration) bölgesel gerilim lokasyonları oluşturmaya, karıştırma işlemi sırasında yapıştırıcı içerisinde hava kabarcığı ve boşlukların oluşmasına ya da sonikasyon gibi karıştırma yöntemleri esnasında nano partiküllerin yapısının tahrip olmasına bağlanmaktadır. Bu faktörlerin yanı sıra nano partiküller, şekillerine ve işlevlerine bağlı olarak, kürlenme reaksiyonu yoluyla epoksi çapraz bağ oluşumunu engelleyebilmekte ve çapraz bağ yoğunluğunu azaltarak camsı geçiş sıcaklığını ve yapışma dayanımını azaltabilmektedir (Ahmadi, 2019). Partikül morfolojisi, en-boy oranı, hacim oranı ve partiküllerin matrise dağılımı gibi bazı özellikler yapıştırma bağlantılarının kırılma tokluğunu artırmada önemli rol oynamaktadır. Çatlak sapma mekanizması olarak adlandırılan ve Şekil 2.21’de şematik olarak görünen bu olayda oluşan çatlak, partiküllerle karşılaşarak orijinal yolundan sapmaktadır. Böylece çatlak yönündeki bu değişiklik kırılma pürüzlülüğünün artmasına yol açarak nihai kopmayı geciktirmekte ve takviyeli yapıştırma bağlantılarının kırılma tokluğunu artırmaktadır (Giv ve diğ., 2018).



Şekil 2.21. Nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarında çatlak sapma mekanizması oluşumunun şematik gösterimi (Giv ve diğ., 2018)

Nem emilimi, yapıştırma bağlantılarının performansının büyük ölçüde etkilenmesine neden olan olumsuz etkilere sahiptir. Difüzyon yoluyla yapışma bölgesine nüfuz ederek yayılan su molekülleri polimer zincirlerini bozabilmekte ve yapıştırıcının mekanik özellikleri üzerinde geri dönüşü olmayan zararlı etkilere sebep olabilmektedir. Yapıştırıcıya yapılan nano malzeme takviyesi, yapıştırıcı malzemesinin nem emme kabiliyetini iyileştirerek nem faktörünün yapıştırma bağlantılarının dayanımları üzerindeki olumsuz özelliklerini minimize etmektedir (Khoramishad ve diğ., 2018). Nano

partiküllerin morfolojisi ve hidrofobikliği gibi çeşitli etmenler nem bariyerleri oluşturarak polimerik yapıdaki yapıştırıcının nem geçirgenliğini azaltmaktadır. Karbon esaslı nano malzemeler doğaları gereği hidrofobik yapıda olduklarından nem nüfuziyetini önemli ölçüde önlerken küresel şekilli nano malzemeler eşit en/boy oranına sahip olduklarından daha yüksek nem emme eğilimi göstererek diğer nano partiküllere kıyasla daha az etkili olmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarını iyileştirmek amacıyla en yaygın olarak kullanılan nano takviye malzemelerinin başında karbon esaslı nano malzemeler gelmektedir. Küresel (nano elmas), silindirik (karbon nanotüp-CNT, çok duvarlı karbon nanotüp-MWCNT, karbon nanofiber-CNF) ve iki boyutlu (grafen nanolevhalar) olmak üzere genel olarak üç farklı biçimde ele alınan karbon nano malzemelerinde küresel yapıda olanlar çeşitli malzemelerin yüzey morfolojisini iyileştirmek için tercih edilirken, en yaygın kullanılan silindirik şekilli karbon nano malzemelerinin takviyesiyle mekanik, elektriksel ve termal özelliklerde kayda değer iyileşmeler elde edilmektedir. Polimerlerin alev geciktirici özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan nispeten ekonomik nano killer ise mekanik özellikleri iyileştirmeleri ve gaz geçirgenliğinde bariyer oluşturmaları gibi sebeplerden ötürü cazip nano malzeme tercihi olmaktadır. Kararlılıkları, düşük toksisiteleri ve çeşitli moleküller ve polimerler ile işlevsel hale getirilebilen silika nano malzemeleri çok sayıda hidroksil grubu ve doymamış kalıntı bağları barındırabilen gözenekli ve nispeten geniş yüzeylere sahiptir. Yapıya dayanım, esneklik ve uzun süreli dayanım kararlılığı katan nano silika takviyesi bu açıdan etkili bir nano takviye grubu olarak görülmektedir (Giv ve diğ., 2018). Takviye edildiği malzemeye termal iletkenlik, elektriksel yalıtkanlık, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal inertlik gibi iyileştirici özellikler kazandıran BNNP malzemesi (Jiang ve diğ., 2015) başka bir gözde nano malzeme türüdür.

2.8. Tezin Önemi ve İçeriği

Bölüm 2’de bahsedildiği üzere metal malzemelerin birleştirilmesi amacıyla çeşitli avantajlarından ötürü tercih edilen yapıştırma bağlantılarından yüksek mekanik performanslar beklenmekte olup uzun yıllardır konuyla ilgili yapılan çalışmalarda tasarım kısmında, proses aşamasında ya da yapıştırıcı içerisinde yapılan müdahalelerle yüksek dayanımlı yapıştırma bağlantıları elde edilmektedir. Bu bağlamda, yapıştırılacak malzeme ve yapıştırıcı seçimlerinin yanı sıra yapıştırma işlemi öncesinde uygulanacak ön

yüzey işleminin seçimi de yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarını etkileyen hususların başında gelmekte olup özellikle metal yüzeylerin yapıştırılmasında yüzeylerdeki kirlilikleri gidermek ve kararsız oksit tabakasını değiştirmek amacıyla mekanik, fiziksel, kimyasal ya da elektrokimyasal olmak üzere birçok ön yüzey işlemi yöntemi uygulanmaktadır. Hedef sektördeki kullanım yerlerine, uygulama koşullarına, maliyete ve zamana bağlı olarak ön yüzey işlemi tercihleri de değişkenlik göstermektedir. Lakin, ön yüzey işlemleri arasında özellikle yüksek dayanım performansı sunan kimyasal ön yüzey işlemleri arasında FPL-dağlama ön yüzey işlemi en bilinen ve yüksek performans sağlayan yöntem olarak uygulanmaktadır. Ek olarak, endüstriyel uygulamalarda özellikle atmosfer ortamında yüksek neme ya da değişken sıcaklıklara maruz kaldığı bilinen yapıştırma bağlantılarının bu şartlar altında ilk günden ziyade bilhassa uzun süreli dayanım performansları ön plana çıkmakta olup zorlu dış faktörler etkisinde yapıştırma bağlantılarının yüksek mekanik dayanım göstermesi elzem görülmektedir. Zorlu koşullar altında performans sergileyen ve birçok parametreden etkilenen yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik performansları çeşitli uygulamalarla maksimize edilerek dayanım değerleri optimum düzeyde tutulabilmekte ve yapıştırma bağlantılarının hizmet ömrü uzatılabilmektedir. Bu hedef doğrultusunda son yirmi yıldır yapıştırıcı içerisine nano boyutlu takviye malzemeleri ilave edilerek gerek yapıştırıcı içerisindeki kohezif kuvvetler gerek yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasındaki adhezif kuvvetler güçlendirilmekte ve mekanik performansta kayda değer iyileşmeler elde edilerek dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları elde edilmektedir. Bu konuda CNT ve grafen nanolevhalar gibi karbon esaslı nano malzemeler araştırmacılar tarafından ilgi çekici bulunmuş olup bunlara ek olarak grafene benzeyen yapısından ötürü “beyaz grafen” olarak da bilinen hegzagonal bor nitrür nano malzemesi (BNNP) ve nispeten daha ekonomik olan silika (SiO_2 -SNP), alümina (Al_2O_3) ve titanyum dioksit (TiO_2) nano malzemeleri de mekanik performansların geliştirilmesi adına tercih edilen alternatif nano takviye malzemeleri konumunda bulunmaktadır.

Literatürde tekil nano malzeme takviyeli epoksi yapıştırıcı ile oluşturulmuş yapıştırma bağlantıları ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak sıcaklık ve neme karşı duyarlı olan ve endüstriyel uygulamalarda yüksek nem ve sıcaklığa maruz kalan yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma etkisi altındaki performanslarının incelenmesi gerekliliği aşikar olup yapılan literatür incelemelerinde higrotermal yaşlandırma koşulları

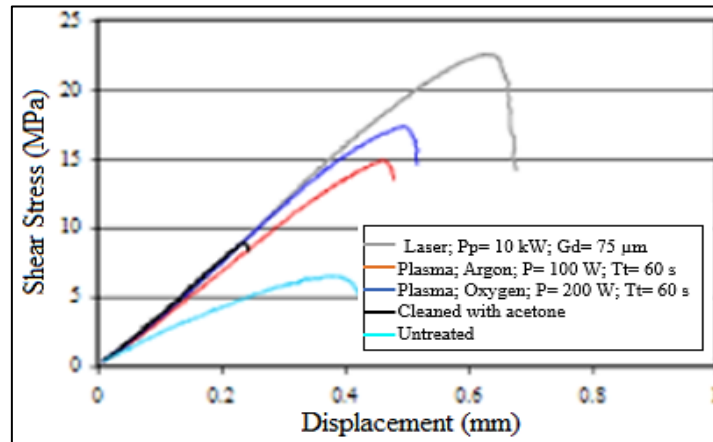
altında nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarının oldukça sınırlı sayıda çalışmada irdelendiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, ilgili konuyla alakalı çalışmalara yön veren farklı nano malzemelerin hibrit olarak yapıştırıcı içerisine takviye edilmesiyle ortaya çıkan sinerjik etkiden faydalanılıp yapıştırma bağlantılarının performanslarının artırıldığı sınırlı sayıda çalışma tespit edilmiş olup bu çalışmalarda, günümüzde ve gelecekte hibrit nano malzeme takviyesiyle yapıştırma bağlantılarının performanslarının geliştirilmesi adına umut vadeden sonuçların elde edildiği saptanmıştır. Bu bağlamda, farklı nano malzeme takviyelerinin higrotermal yaşlandırma koşulları altında yapıştırma bağlantılarının mekanik dayanımlarına etkisinin incelenmesi ve hibrit takviye metodunun yapıştırma bağlantılarının mekanik dayanımlarına etkisinin tespit edilmesinin gerekliliği fikirleri bu tez çalışmasının ana özgünlüğünü oluşturmuştur.

Bu bilgiler ışığında bu tez çalışmasında, alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek dayanıma sahip 7xxx serisi alaşımlardan AA7075-T6 alüminyum plakalar tek tesirli olarak epoksi esaslı yapıştırıcıyla birleştirilmiştir. Yapıştırma işlemi öncesinde alüminyum plakaları yapıştırma prosesine hazırlamak amacıyla FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işlemi uygulanmıştır. Yapıştırma bağlantılarının mekanik dayanımlarını artırmak amacıyla epoksi yapıştırıcı içerisine -COOH ile fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT), hegzagonal bor nitrür (BNNP) ve silika (SNP) nano malzemeleri tekil olarak takviye edilmiş ve ASTM D1002-99 standardına göre gerçekleştirilen kayma testleri sonrasında optimum takviye oranları tespit edilmiştir. Bununla birlikte, higrotermal yaşlandırma koşulları altında nano malzeme takviyelerinin yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarına etkilerinin tespit edilmesi hedefiyle takviyesiz ve belirlenen optimum takviye oranlarına sahip alüminyum yapıştırma bağlantıları oluşturulmuş ve 6 haftaya kadar 60 °C’de %100 bağıl nemde (RH) higrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmışlardır. Ayrıca, ağırlık ve maliyet parametrelerinin optimizasyonlarıyla yüksek mekanik performanslar sergileyen yapıştırma bağlantıları elde etmek amacıyla ikili hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantıları oluşturularak mekanik dayanımları incelenmiştir. Kayma testleri sonrasında dijital kamera vasıtasıyla hasar yüzeylerinden alınan görüntülerle yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarının yorumlanması desteklenmeye çalışılmıştır.

2.9. Literatür Taraması

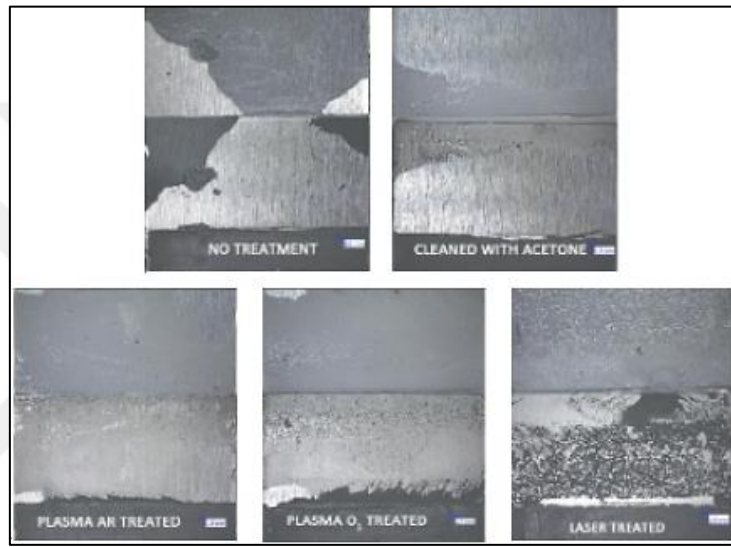
2.9.1. Ön Yüzey İşlemi Uygulanmış Metal-Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Literatür Çalışmaları

Metaller yüksek enerjili yüzeylere sahip olmaları dolayısıyla ortamda buhar halinde bulunabilecek yağların yanı sıra toz ve yabancı partiküller gibi diğer kontaminasyonları da absorbe etmektedirler. Bu sebeple metal yüzey temizlenmeden güçlü bir yapıştırma bağlantısı elde etmek mümkün değildir (Brezinová ve diğ., 2018). Zımparalama, plazma, kum püskürtme, lazer ablasyon, kimyasal dağlama vb. gibi ön yüzey işlemi yöntemleriyle iyi yüzey aktivasyonu, yüzey ıslanabilirliği, mekanik kilitleme, ince oksit tabakasının ve kontaminasyonların giderilmesi sağlanarak etkin temas alanı artırılıp dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları elde edilebilmektedir (dos Reis ve diğ., 2017). Bu bağlamda Mandolino ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada epoksi esaslı yapıştırıcı ile tek tesirli olarak birleştirdikleri 6061 alüminyum plakaları farklı ön yüzey işlemlerine tabi tutmuşlar ve ön yüzey işlemlerinin yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Argon ve oksijen plazma yöntemi, lazer yöntemi ve asetonla temizleme ön yüzey işlemleri uygulanan alüminyum plakalarla oluşturulmuş yapıştırma bağlantıları işlemsiz yapıştırma bağlantılarıyla karşılaştırılmış ve kayma dayanımında kayda değer iyileştirmeler kaydedilmiştir. Şekil 2.22’de işlemsiz ve ön yüzey işlemi uygulanmış 6061 alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi-yer değiştirme eğrileri görülmekte olup en yüksek kayma dayanımına lazer ön yüzey işlemi uygulanmış numunelerde ulaşıldığı belirtilmiştir.



Şekil 2.22. İşlemsiz ve farklı ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi-yer değiştirme eğrileri (Mandolino ve diğ., 2015)

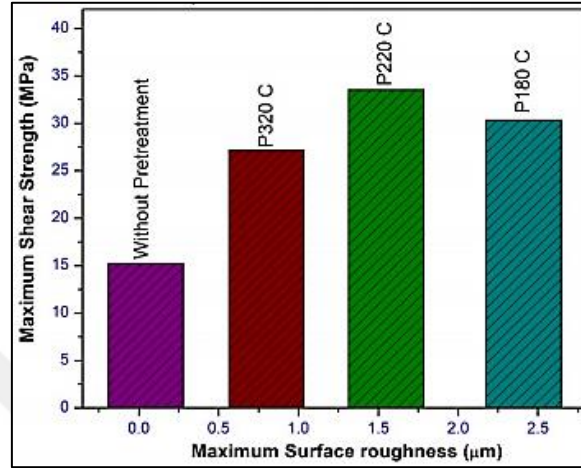
Araştırmacılar kayma testleri sonrasında, işlemsiz ve ön yüzey işlemi uygulanmış yapıştırma numunelerinde oluşan hasar mekanizmalarının da kayma dayanımı sonuçlarını destekler nitelikte olduğunu belirtmiş olup işlemsiz numunelerde adhezif hasar yapısı tespit ederken herhangi bir ön yüzey işlemine maruz bırakılmış numunelerde kısmi kohezif hasar türü tespit etmişlerdir. Uygulanan ön yüzey işlemleriyle yapıştırıcı ve alüminyum plakalar arasında daha iyi bir arayüzey oluşturularak dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları elde edilmiştir. Kayma testleri sonrası işlemsiz ve ön yüzey işlemi uygulanmış numunelerde gözlemlenen hasar türleri Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. İşlemsiz ve farklı ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar mekanizmaları (Mandolino ve diğ., 2015)

Bu amaçla yapılmış bir başka çalışmada, mekanik aşındırmanın kayma dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen Abid ve diğ. (2020) 6061-T6 alüminyum plakalar ve epoksi esaslı yapıştırıcıyla ASTM D1002 standardına göre tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturmuşlar ve alüminyum plakaları farklı tanecik boyutlarına sahip (P320 C, P220 C ve P180 C) silisyum karbür (SiC) kağıtlarıyla zımparalayarak optimum yüzey pürüzlülüğünü tespit edip dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları elde etmeyi hedeflemişlerdir. Yapılan kayma testleri sonucunda işlemsiz yapıştırma bağlantılarının kayma dayanım değeri 15,23 MPa ölçülürken tüm ön yüzey işlemi durumları için yapıştırma bağlantılarının mekanik performansları belirgin bir şekilde gelişmiş ve P220 C SiC kağıdıyla mekanik ön yüzey işlemine tabi tutulmuş numunelerde kayma dayanımı 34,45 MPa değerine yükselerek çalışmadaki maksimum kayma dayanımına %126 artışla ulaşılmıştır. Kritik bir yüzey pürüzlülüğünden sonra yüzey işlemi uygulanması,

alüminyum plakaların zayıflamasına yol açarak kayma dayanımında düşüşe sebep olmuştur. İşlemsiz ve mekanik ön yüzey işlemi uygulanmış yapıştırma bağlantılarının maksimum kayma dayanımları ve maksimum yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki Şekil 2.24'te görülmektedir.



Şekil 2.24. İşlemsiz ve ön yüzey işlemi uygulanmış yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları ve yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırılması (Abid ve diğ., 2020)

Yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde ise ön yüzey işlemi uygulanmamış numunelerde yapıştırıcı, alüminyum plakalardaki boşlukları dolduramamış ve adhezif hasar oluşmuştur. Alüminyum plakalara uygulanan mekanik ön yüzey işlemleriyle birlikte yüzey pürüzlülüğünün artması, yapıştırıcının alüminyum plakalardaki boşlukları doldurarak yüzeyi tamamen ıslatmasını sağlamış ve bu durum adhezif-kohezif karışık hasar mekanizması oluşumuyla sonuçlanmıştır.

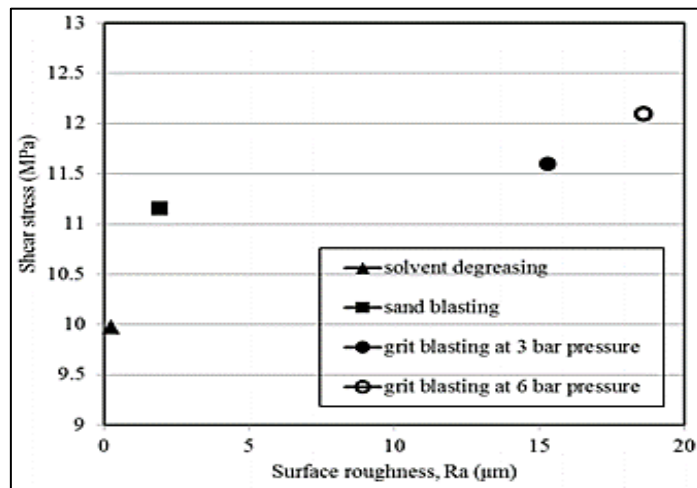
Dos Reis ve diğ. (2017) ise 1200 H14 alüminyum plakaları epoksi yapıştırıcıyla tek tesirli olarak birleştirdikleri çalışmalarında alüminyum plakalara yağ alma (G1), zımparalama (G2), düşük basınçta kum püskürtme (3 bar-G3) ve yüksek basınçta kum püskürtme (6 bar-G4) olmak üzere farklı ön yüzey işlemleri uygulamışlar ve oluşturdukları yapıştırma bağlantılarının dayanım performanslarını yağ alma ön yüzey işlemi uygulanmış numuneleri referans alarak kıyaslamışlardır. Artan yüzey pürüzlülüğünün daha iyi mekanik kilitlemeye yol açmasıyla kayma dayanımında artış eğilimi sergilediğini gözlemleyen araştırmacılar, 1 mm/dk hızında gerçekleştirdikleri kayma testleri sonucunda yağı giderilmiş numunelere kıyasla maksimum iyileşmeyi %21,36 artışla yüksek basınçta kum püskürtülmüş yapıştırma bağlantılarında elde ettiklerini

bildirmişlerdir. Numunelerin hasar yüzeylerini incelediklerinde ise referans numunelerde adhezif-kohezif karışık hasar gözlemlerken ön yüzey işlemi uygulanmış yapıştırma bağlantılarında kohezif hasar türü oranının arttığı belirtilmiş ve yüksek basınçta kum püskürtülmüş yapıştırma bağlantıları için en yüksek kohezif hasar oranı tespit edilmiştir. Yapıştırma bağlantılarının yüzey pürüzlülükleri ve kayma dayanımı değerleri Tablo 2.7’de görülmektedir.

Tablo 2.7. Farklı ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum yapıştırma bağlantılarının yüzey pürüzlülükleri ve kayma dayanımı değerleri (dos Reis ve diğ., 2017)

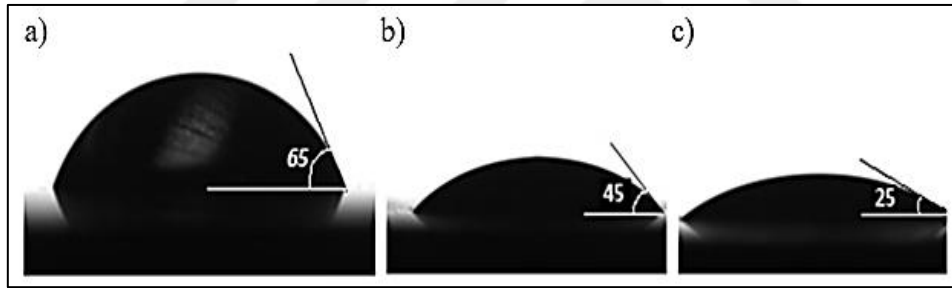
Surface treatment	Ra [μm]	Shear strength $\bar{\tau}$ [MPa]	Increase in shear strength [%]
G1	0.25 ± 0.15	9.97 ± 0.55	-
G2	1.91 ± 0.21	11.16 ± 0.17	11.93
G3	15.27 ± 0.66	11.60 ± 0.32	16.34
G4	18.57 ± 1.64	12.10 ± 0.45	21.36

Ayrıca yüzey pürüzlülük değeri ile yapıştırma bağlantısı dayanımı arasında doğrudan bir ilişki olmadığını ifade eden araştırmacılar temas açısı, ıslanabilirlik ve yüzey enerjisi gibi kayma dayanımını etkileyen diğer parametrelerin varlığından söz ederek bu parametrelerin arasında bir denge olması gerektiğini belirtmişler ve bağlantı performanslarının yalnızca yüzey pürüzlülüğü ile tespit edilemeyecek kadar komplike bir kavram olduğunu da belirtmişlerdir (dos Reis ve diğ., 2017). Şekil 2.25’te çalışmada oluşturulan çeşitli ön yüzey işlemleri uygulanmış yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi ve yüzey pürüzlülükleri arasındaki ilişki görülmektedir.

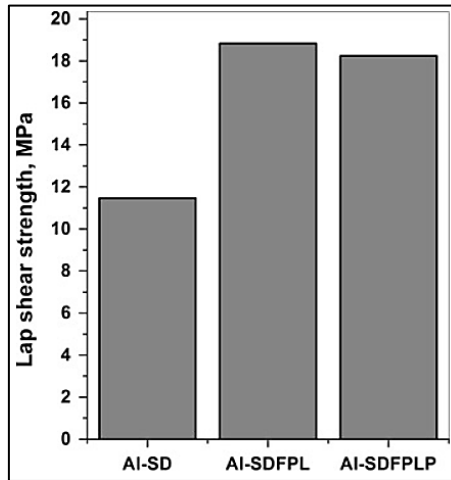


Şekil 2.25. Farklı ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi ve yüzey pürüzlülüğü ilişkisi (dos Reis ve diğ., 2017)

Leena ve diğ. (2016) solventle yağ alma (Al-SD), FPL-dağlama (Al-SDFPL) ve astarlama (Al-SDFPLP) olmak üzere üç farklı ön yüzey işlemi uygulanmış B51 SWP alüminyumları epoksi yapıştırıcıyla birleştirmişler ve ardından tek tesirli kayma testine tabi tutmuşlardır. Maksimum kayma dayanımı değerleri gözenekli alüminyum oksit tabakası oluşumu sayesinde iyi yüzey ıslanabilirliği, yüksek yüzey pürüzlülüğü, yüksek yüzey enerjisi sunan FPL-dağlama işlemine maruz bırakılmış yapıştırma bağlantılarında görülmüştür. Astarlanmış yapıştırma bağlantılarındaki dayanım iyileşmelerinin sebebi yüzey enerjisinden ziyade epoksi ve alüminyum yüzeyleri arasındaki arayüzey etkileşimlerine atfedilmiş olup bu durum Şekil 2.26'da görülen temas açısı ölçümleriyle desteklenmiştir. Farklı ön yüzey işlemleri uygulanmış yapıştırma bağlantılarına ait kayma dayanımı değerleri Şekil 2.27'de görülmekte olup en düşük kayma dayanımı değerleri zayıf sınır tabakalarının varlığından ötürü hidrofobik yüzey karakteristiği, düşük yüzey ıslanabilirliği ve yüzey pürüzlülüğü sunan yağ alma işlemi uygulanmış yapıştırma bağlantılarında tespit edilmiştir.



Şekil 2.26. a) Yağ alma, b) FPL-dağlama ve c) astarlama ön yüzey işlemleri uygulanmış yapıştırma bağlantılarının temas açısı ölçümlerinin sonuçları (Leena ve diğ., 2016)



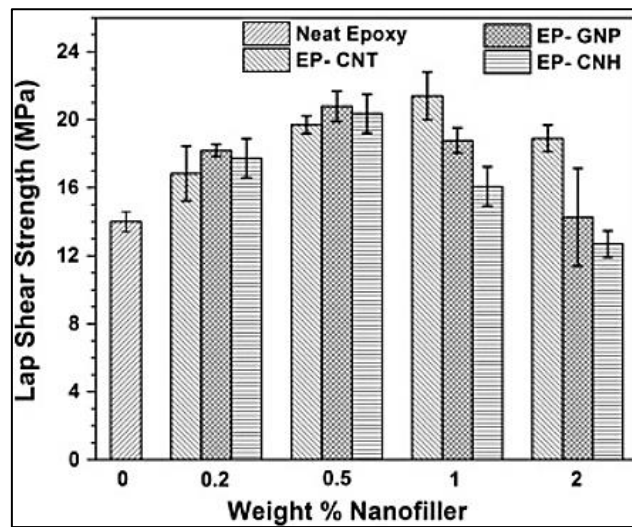
Şekil 2.27. Yağ alma, FPL-dağlama ve astarlama ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Leena ve diğ., 2016)

2.9.2. Nano Malzeme Katkılı Epoksi Yapıştırıcıyla Oluşturulmuş Metal-Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Literatür Çalışmaları

Epoksi esaslı yapıştırıcıyla oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının sunduğu pek çok faydalı özelliklere rağmen mekanik bağlantı yöntemlerine göre daha düşük dayanım performansı sergilemeleri ve bu durumun epoksi yapıştırıcının dayanımı ile sınırlı olması araştırmacıları yapıştırıcı malzemesinin özelliklerini geliştirmeye yöneltmiştir. Bu bağlamda karbon nanotüp (CNT), grafen nanolevhalar (GNP), alümina, silika, bor nitrür, kalsiyum karbonat (CaCO_3), titanyum dioksit (TiO_2) gibi nano boyutlu çeşitli takviye malzemeleri epoksi yapıştırıcı içerisine dahil edilerek yapıştırma bağlantılarının dayanım performansları iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalardan birinde Aradhana ve diğ. (2018) asitle dağlanmış alüminyum plakalar ve epoksi yapıştırıcıyla oluşturdukları tek tesirli yapıştırma bağlantılarında epoksi içerisine 5-50 nm çap aralığında, 1-12 μm boyunda ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve aynı oranlarda nano kil (C30B) takviye ederek oluşturdukları yapıştırma bağlantılarını 1,27 mm/dk hızında kayma testine tabi tutmuşlar ve tüm takviye durumları için dayanım değerlerinde artış gözlemlemişlerdir. Takviyesiz yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında ağırlıkça %0,5 ve %1 MWCNT takviyesinde kayma dayanımında sırasıyla %24,7 ve %48,2'lik iyileşme kaydedilmiş olup dayanım performansındaki bu gelişmeler yüksek çap boy oranlarına sahip MWCNT'nin epoksiyle iyi bir etkileşim kurarak çatlak oluşumunda köprüleme mekanizması oluşturmasına atfedilirken ağırlıkça %1,5 MWCNT takviyesi için MWCNT partiküllerinin topaklaşmasına bağlı olarak dayanımdaki iyileşme oranının azaldığı belirtilmiştir. Nano kil takviyesi için de benzer bir dayanım artışı eğilimi elde eden araştırmacılar, ağırlıkça %0,5 ve %1 nano kil takviyesinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla kayma dayanımında sırasıyla %43 ve %52 oranında artış elde etmişler ve bu artışın nanolevhaların epoksi sistemi içinde boşluklara girmesinden ve yüksek temas alanı oluşturmasından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Ayrıca, %1,5 nano kil takviye oranında nano malzeme topaklaşmış ve bu da düşük bir temas alanına yol açarak kayma dayanımı artışında düşüşe sebep olmuştur. Nano malzemelerin epoksi içerisine dahil edilerek yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olduğunu tespit eden araştırmacılar herhangi bir hasar oluşumunda, çatlağın ilerlemesi için nano malzemelerin arasından geçerek daha fazla enerji harcaması gerektiği belirterek uzun silindirik şekillere sahip MWCNT'lerin hasar

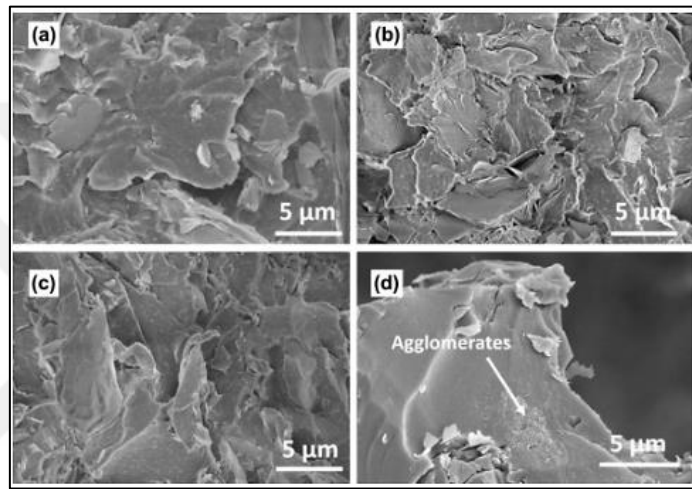
bölgelerinde çatlak köprüleme ve çatlak sapması mekanizmaları oluşturarak takviyesiz yapıştırma bağlantılarına göre kayma dayanımında iyileşmelere sebep olduğunu belirtmişlerdir. Nano kil takviyesi durumunda ise bir çatlak bir nano kil partikülüyle karşılaştığında yoluna devam etmeden önce geniş yüzey alanına sahip nano kil katmanlarının yüzey alanı boyunca daha uzun bir yol kat etmek zorunda kalmış ve böylece nano kil takviyesiyle modifiye edilmiş yapıştırma bağlantılarında çatlak sapmaları oluşarak kayma dayanımında iyileşme kaydedilmiştir.

Nano malzeme takviyesinin yapıştırma bağlantılarının performansları üzerindeki etkilerini inceleyen bir diğer çalışmada Gkikas ve diğ. (2012) AA2024-T3 alüminyum plakaları ağırlıkça %1 MWCNT (10-15 nm çapında, 500 nm boyunda) takviyeli epoksi yapıştırıcıyla tek tesirli olarak birleştirmişler ve kayma dayanımında takviyesiz epoksi ile birleştirilmiş bağlantılara göre yaklaşık %50 oranında artış kaydetmişlerdir. Benzer sonuçlar Jojibabu ve diğ. (2016) tarafından kum püskürtülmüş AA6061 alüminyum plakaları epoksi yapıştırıcı ile tek tesirli olarak birleştirdikleri ve yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %0,2-%2 aralığında farklı oranlarda CNT, GNP ve karbon nanohorn (CNH) olmak üzere karbon esaslı nano malzemeler takviye ettikleri çalışmada kaydedilmiştir. 1,3 mm/dk hızında gerçekleşen kayma testleri sonucunda edilen dayanım değerleri Şekil 2.28’de görülmekte olup maksimum kayma dayanımına ağırlıkça %1 MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarında takviyesiz yapıştırıcı ile oluşturulan bağlantılara kıyasla %54 artış ile ulaşılmıştır.



Şekil 2.28. Karbon esaslı farklı nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları (Jojibabu ve diğ., 2016)

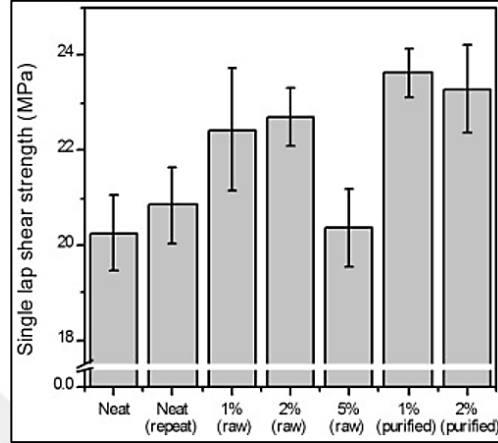
Çalışmada, daha düşük takviye oranlarında karbon nano malzemelerinin epoksi içerisinde homojen olarak dağıldığı belirtilirken epoksi matris ile nano malzemeler arasında etkili yük transferini sağlayan güçlü bir arayüzey bağı olduğu tespit edilmiştir. Karbon nano malzemelerinin daha yüksek takviye oranları için epoksi ile zayıf bir arayüze sahip olması beklenen topaklaşma oluşumları nedeniyle nano malzemelerin yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisi azalmaya başlamıştır. Şekil 2.29'da tüm CNT takviyesi durumları için çekilen hasar yüzeyleri SEM görüntülerinde yüksek CNT takviye oranında kayma dayanımı düşüşüne sebep olan nano malzemelerin topaklaşma eğilimi görülmektedir.



Şekil 2.29. Hasar yüzeylerine ait SEM görüntüleri (a) %0,2 CNT takviyesi, (b) %0,5 CNT takviyesi, (c) %1 CNT takviyesi, (d) %2 CNT takviyesi (Jojibabu ve diğ., 2016)

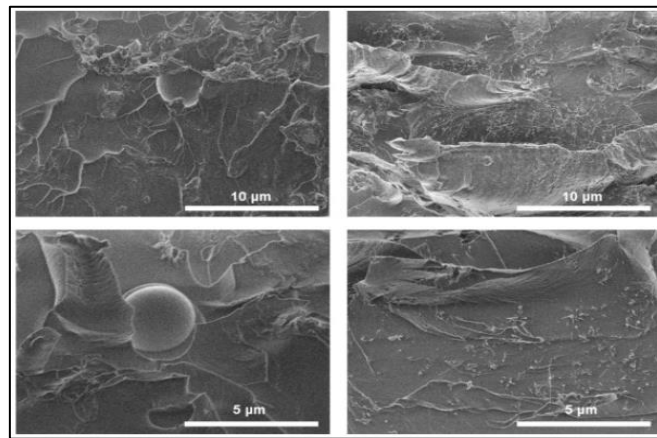
Bir başka çalışmada Jakubinek ve diğ. (2018), içerisine ağırlıkça %1, %2, %5 oranlarında ve yaklaşık 5 nm çapında bor nitrür nanotüp (BNNT) takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı ile sol-jel ve kum püskürtme ön yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum plakaları ASTM D1002 standardına göre tek tesirli olarak birleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen kayma testleri sonrasında epoksi içerisine ağırlıkça %2 oranına kadar yapılan BNNT takviyesi ile dayanım değerleri sürekli olarak artış göstermiş ve bu durum yapıştırıcıya eklenen nano takviye malzemesinin yalnızca yapıştırıcı özelinde bir iyileşmeye sebep olmadığını aynı zamanda arayüzey etkileşimlerinin artışına yol açarak yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarını geliştirdiğine atfedilmiştir. Ağırlıkça %5 BNNT takviyesinde ise yapıştırıcının artan viskozitesine bağlı olarak dayanım değerlerinde düşüş gözlenmiş olup takviyesiz yapıştırma bağlantılarının dayanım değerlerine yakın sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Bu problemi çözmek amacıyla yalnızca ağırlıkça %1 ve %2 takviye oranları için yüzey saflığı artırılmış BNNT (p-BNNT) kullanan araştırmacılar ağırlıkça

%1 p-BNNT içeren yapıştırma bağlantılarında çalışmadaki en yüksek kayma dayanımı değerlerini takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla %15'lik bir artışla kaydetmişlerdir. Çalışmada kaydedilen yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri Şekil 2.30'da görülmektedir.



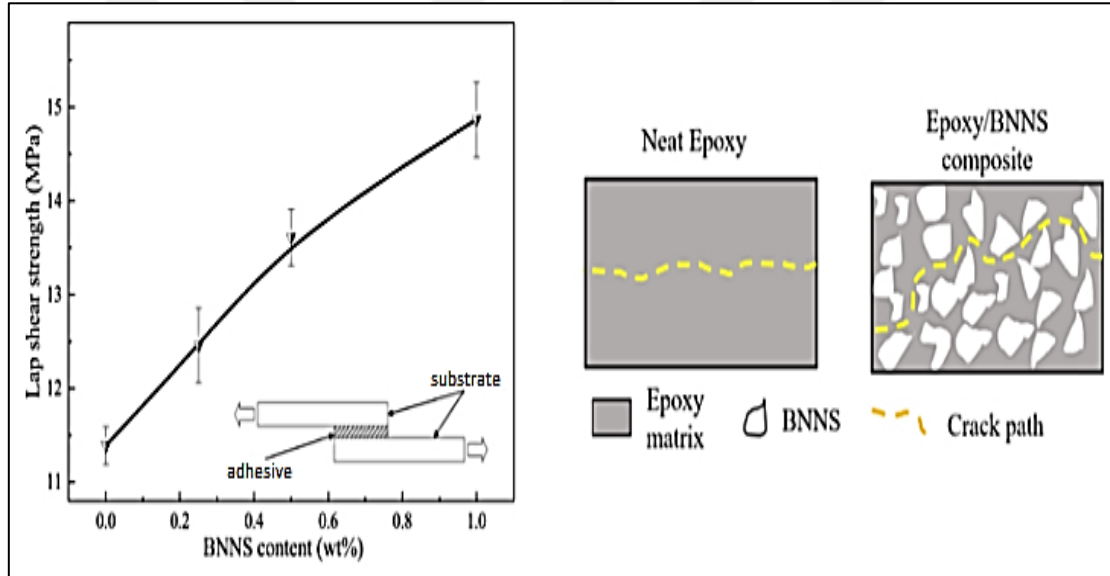
Şekil 2.30. Takviyesiz ve BNNT takviye edilmiş epoksi ile oluşturulan yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Jakubinek ve diğ., 2018)

Kayma testleri sonrasında hasar yüzeylerini makroskobik olarak inceleyen araştırmacılar epoksi içerisindeki kohezif kuvvetlerin alüminyum yüzeyler ve epoksi arasındaki bağlardan daha kuvvetli olduğunu belirtmişler ve genel olarak tüm numunelerde adeziv hasar türü gözlemlenmiştir. Hasar yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde (Şekil 2.31) yüzeylerde hasar yönünde hizalanmış birçok BNNT nano partiküllerinin bulunduğu ve nano boyutlu bu partiküllerin yüzeye doğru çekilerek (pull out) hasarın ilerlemesine karşı direnç oluşturdukları saptanmıştır.



Şekil 2.31. Takviyesiz (sol) ve BNNT takviyeli (sağ) yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri (Jakubinek ve diğ., 2018)

Bir başka çalışmada (Wang ve diğ., 2021b) içerisinde yanıl boyut aralığı 2-5 μm ve %99 saflıktaki ağırlıkça %0,25-%1 hegzagonal bor nitrür nano levha (boron nitride nano sheet-BNNS) takviye edilen epoksi yapıştırıcı ile 6061 alüminyum plakalar tek tesirli olarak birleştirilerek yapıştırma bağlantılarının mekanik performansları incelenmiştir. şekil 2.32’de de görüldüğü üzere artan BNNS takviye oranına paralel olarak yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri artış göstermiş olup çalışmadaki en yüksek kayma dayanımı değer %1 BNNS takviyesinde elde edilerek takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla 11,39 MPa değerinden 14,87 MPa değerine yükselmiştir. Dayanım değerlerindeki bu artış BNNS’lerin yapıştırıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve epoksi molekülleri içinde köprü ve çapraz bağ görevi görmesi olmak üzere iki ana nedene atfedilmiştir.

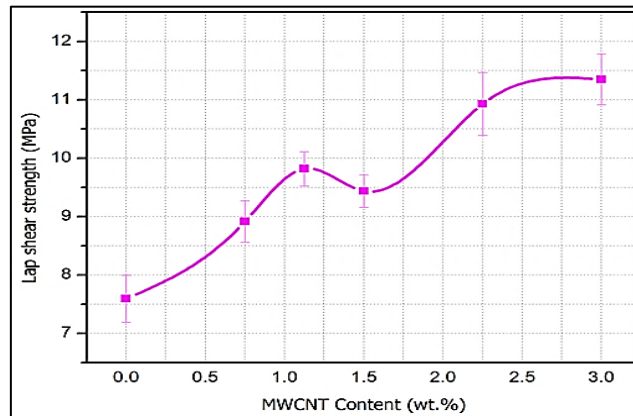


şekil 2.32. Takviyesiz ve BNNS takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Wang ve diğ., 2021b)

Rijit, tok ve sünek epoksi içerisinde ağırlıkça %0,25-%3 aralığında farklı oranlarda CNT-COOH (10-20 nm çapında, 10-30 μm boyunda) takviye ederek birleştirdikleri zımparalama ön yüzey işlemi uygulanmış AA2024-T3 alüminyum plakaları tek tesirli kayma testine tabi tutan Akpınar ve diğ. (2017) hasar yükü değerlerini incelediklerinde; rijit yapıştırıcıyla oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarında %1 ve %2 CNT-COOH takviyesinin, bağlantıların hasar yükü değerlerini sırasıyla %148 ve %130 oranlarında kayda değer bir şekilde artırdığını gözlemlemişler ve CNT-COOH takviyesinin bağlantıların yer değiştirme kabiliyetini geliştirip bağlantıdaki hasar oluşumlarını absorbe

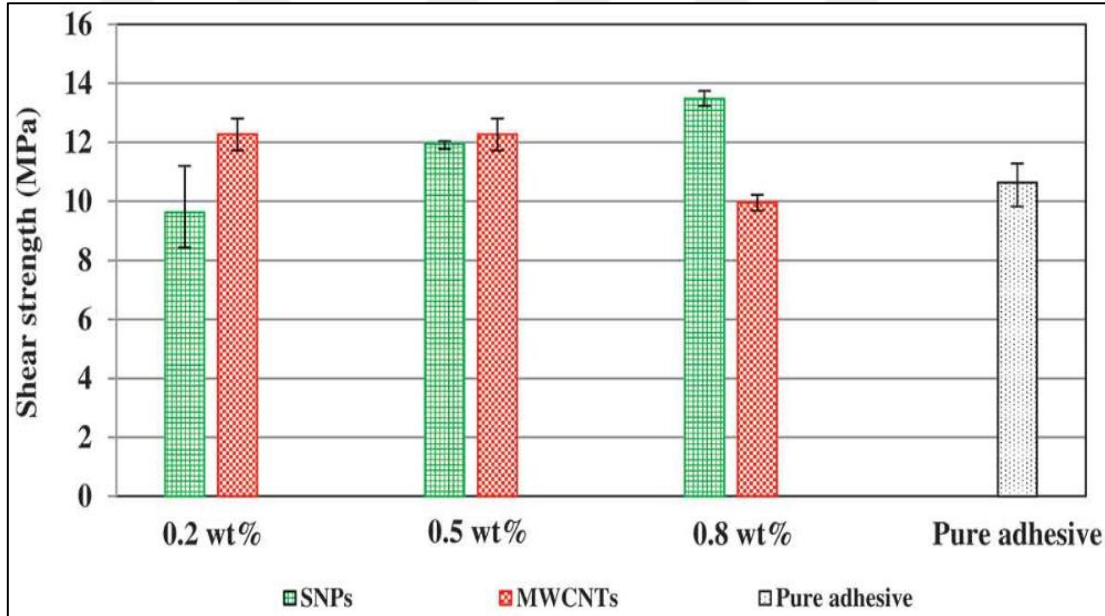
ederek yapıştırma bağlantılarının hasar yükünü artırdığını belirtmişlerdir. Tok epoksi yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda ise hasar yükündeki en büyük iyileşme takviyesiz bağlantılara kıyasla ağırlıkça %1 CNT-COOH takviyesinde %19 oranında kaydedilmiştir. Ayrıca sünek yapıştırıcı ile oluşturulmuş bağlantılar üzerinde CNT-COOH takviyesinin önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Tabaei ve diğ. (2013) ise epoksi yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %1,125-%3 aralığında farklı oranlarda MWCNT (10-30 nm çapında, 10-15 µm boyunda) takviye ettikleri ve zımparalanmış AA2024-T3 alüminyum plakaları tek tesirli olarak birleştirerek oluşturdukları yapıştırma bağlantılarında MWCNT takviyesiyle tüm ağırlık oranları için bağlantıların kayma dayanımının arttığını, maksimum artışın ağırlıkça %3 MWCNT takviyeli bağlantılarda gözlemlendiğini ve takviyesiz bağlantılara kıyasla %50 oranında artış olduğunu bildirmişlerdir. MWCNT varlığının epoksi reçinenin çapraz bağlanma derecesinin artırılması üzerinde olumlu etkileri olduğunu ve bunun da yapıştırma bağlantılarının dayanım performanslarına katkı sağladığını belirten araştırmacılar MWCNT'lerin polimer zincirlerinin çapraz bağlı ve çapraz bağlı olmayan bölgeleri arasında köprü görevi gördüğünü belirtmişlerdir. Çalışmada yüksek MWCNT içeriğinde (ağırlıkça %1,5) partiküllerin topaklaşması sebebiyle dayanım düşüşü görülmüştür. Ağırlıkça %2,25 ve ağırlıkça %3 takviye durumlarında ise MWCNT topaklaşmalarının boyutu arttığından partiküller arasında sürtünme etkileri gelişimi sıcaklık artışıyla sonuçlanmış ve bu da çapraz bağlanma yoğunluğunu artırarak dayanım değerlerini olumlu yönde etkilemiştir. Her bir takviye oranı için MWCNT içeriğinin yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 2.33'te görülmektedir.



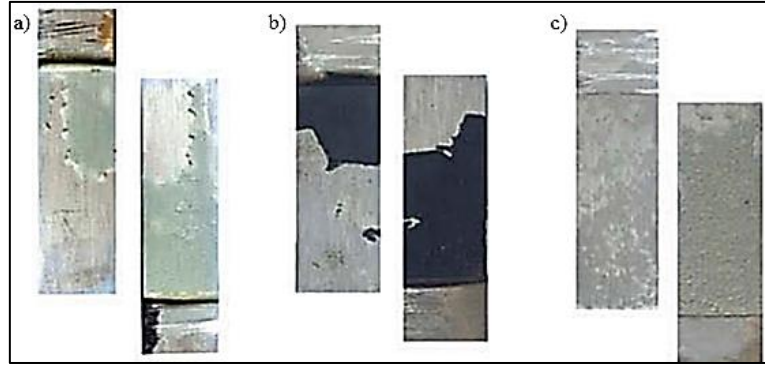
Şekil 2.33. Farklı ağırlık oranlarında MWCNT takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Tabaei ve diğ., 2013)

Diğer bir çalışmada ise Ayatollahi ve diğ. (2017) epoksi yapıştırıcı içerisine %0,2, %0,5 ve %0,8 ağırlık oranlarında MWCNT ve SNP nano malzemelerini takviye ederek FPL-dağlama yüzey işlemine tabi tutulmuş 7075-T6 alüminyum plakalar ile tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturmuşlardır. Şekil 2.34'te görüldüğü üzere özellikle düşük ağırlık oranlarında MWCNT takviyesinde daha yüksek kayma dayanımı değerleri sunan yapıştırma bağlantıları elde edilmiş ve bu durum artan hasar yükü ve yer değiştirme değerlerine atfedilmiştir. Daha yüksek ağırlık yüzdesinde (%0,8), partiküller topaklaşarak bölgesel gerilim konsantrasyonları oluşturmuşlar ve kayma dayanımı değerlerinde düşüş yaşanmıştır. SNP takviyesi durumunda ise farklı bir eğilim gözlemlenmiş ve artan SNP takviye oranına bağlı olarak dayanım değerlerinde sürekli olarak iyileşme kaydedilerek maksimum kayma dayanımına ağırlıkça %0,8 SNP takviyesinde ulaşılmıştır.



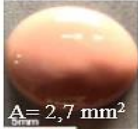
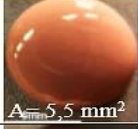
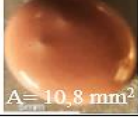
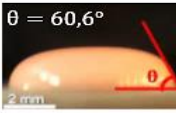
Şekil 2.34. Takviyesiz ve MWCNT, SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Ayatollahi ve diğ., 2017)

Kayma testleri sonrasında yapışma yüzeylerinden alınan hasar görüntüleri incelendiğinde (Şekil 2.35) MWCNT ve SNP nano malzeme takviyelerinin yapıştırıcı ve yapıştırılan arayüzünü iyileştirdiği sonucuna varılırken MWCNT takviyesinde artan takviye ağırlık oranlarında partiküllerin topaklaşmasına bağlı olarak arayüz bozulmuş ve baskın olarak adhezif hasar gözlemlenmiştir. SNP takviyesinde ise geliştirilen arayüz kuvvetleri dolayısıyla kohezif hasar baskın olmak üzere adhezif-kohezif karışık hasar gözlemlenmiştir.



Şekil 2.35. a) Takviyesiz, b) MWCNT takviyeli ve c) SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar görüntüleri (Ayatollahi ve diğ., 2017)

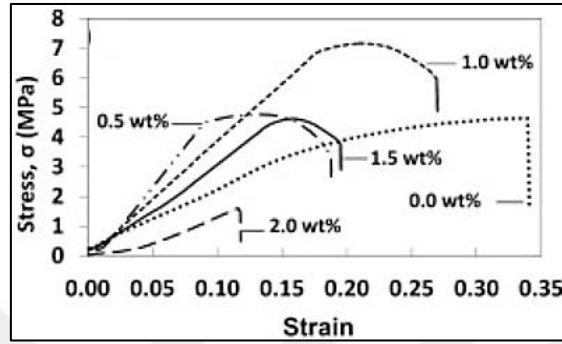
Epoksi yapıştırıcıya yapılan nano alümina (ANP) takviyesinin yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkilerini inceleyen Khalil ve diğ. (2019) aşındırıcı püskürtme ön yüzey işlemi uygulanmış AA1100 alüminyum plakaları ağırlıkça %0,5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında ANP takviye edilen epoksi yapıştırıcı ile ASTM D-1002 standardına göre tek tesirli olarak birleştirmişlerdir. ANP takviyeli yapıştırıcının alüminyum yüzeyleri ıslatabilme kabiliyetini tayin etmek amacıyla temas açısı ölçümleri yapılmış ve Şekil 2.36'da da görüldüğü gibi ANP takviye oranının artmasıyla yapıştırıcının temas açısı değerlerinde düşüş gözlemlenerek nano malzeme takviyesiyle yapıştırıcının ıslatma kabiliyetinin geliştirilebildiği tespit edilmiştir.

ANP Takviye Oranı	Yayılma Alanı (A)	Temas Açısı (θ)
%0	 $A = 2,7 \text{ mm}^2$	 $\theta = 101,4^\circ$
%1	 $A = 5,5 \text{ mm}^2$	 $\theta = 77,4^\circ$
%2	 $A = 10,8 \text{ mm}^2$	 $\theta = 60,6^\circ$

Şekil 2.36. Farklı ağırlık oranları için ANP ile takviyelendirilmiş epoksi yapıştırıcının alüminyum yüzeylerdeki temas açısı ölçümleri (Khalil ve diğ., 2019)

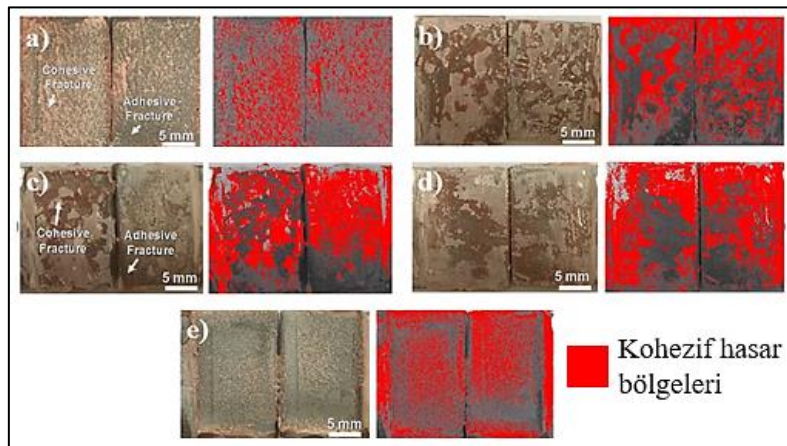
Gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda Şekil 2.37'de verilmiş olan gerilim-gerinim eğrilerinden görüldüğü üzere maksimum kayma gerilimi değerlerine takviyesiz yapıştırma bağlantılarına göre ağırlıkça %1 ANP takviyesinde %54,2'lik bir iyileştirmeye ulaşılmıştır. Bu gelişme, ağırlıkça %1 takviye oranında ANP'nin arayüz

hattının miktarını artırmasına atfedilmiş olup böylece gerilim dağılımlarının iyileşmesine bağlı olarak daha yüksek yapışma performansına yol açtığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca alüminyum yüzeylerindeki düzensizlikler ve gözenekler ile ANP arasında oluşan mekanik kilitleme etkisi arayüz bölgesindeki yapışma performansının iyileşmesini desteklemiştir.



Şekil 2.37. ANP takviyesinin değişken ağırlık oranları için oluşturulmuş gerilim-gerinim eğrileri (Khalil ve diğ., 2019)

Değişken oranlarda ANP ile takviyelendirilmiş yapıştırma bağlantılarının incelenen hasar yüzeylerinde (Şekil 2.38) ANP takviye oranından bağımsız olarak tüm yapıştırma bağlantılarında adhezif ve kohezif hasarların kombinasyonu olan karışık hasar türü gözlemlenmiştir. Yapıştırma bağlantılarında kullanılan malzemelerin maksimum dayanımına ulaşıldığının işareti olması dolayısıyla ideal hasar türü olarak bilinen kohezif hasar türünün ağırlıkça %1 ANP takviyeli yapıştırma bağlantılarında diğer takviye oranlarına kıyasla daha baskın olduğu belirtilmiş ve bu durum mekanik testler sonucu elde edilen bulguları destekler nitelikte olmuştur.

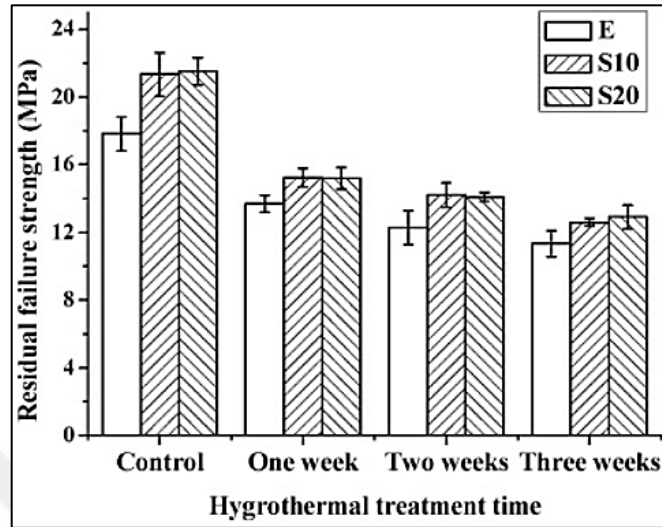


Şekil 2.38. a) %0, b) %0,5, c) %1, d) %1,5 ve e) %2 ANP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri (Khalil ve diğ., 2019)

2.9.3. Higrotermal Yaşlandırmaya Maruz Bırakılmış Nano Malzeme Takviyeli Metal/Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Çalışmalar

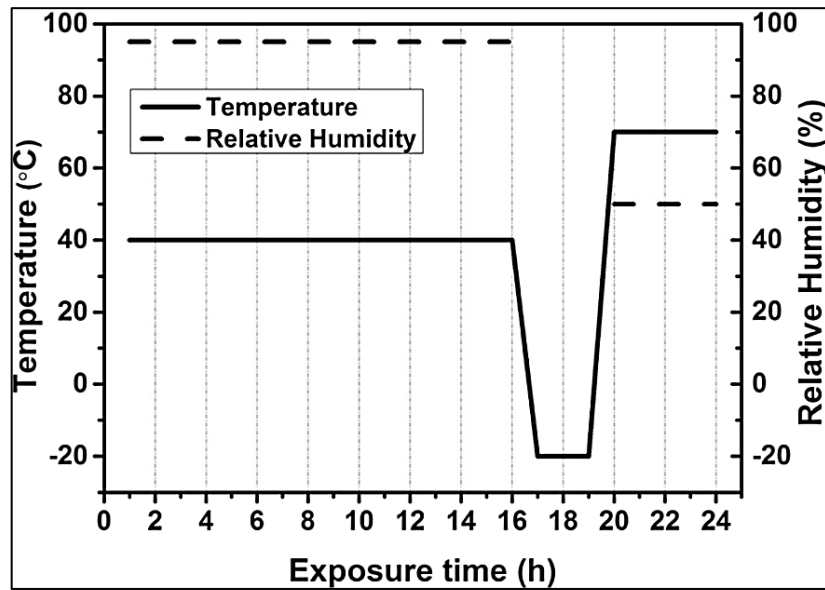
Polimerik yapıdaki yapıştırıcıların uygulama alanlarını kısıtlayan en önemli iki etmen nem ve sıcaklıktır. Yapıştırıcılar düşük ya da yüksek servis sıcaklıklarına ve neme karşı savunmasız olmalarından ötürü yapıştırma bağlantıları da bu iki parametreye karşı oldukça duyarlıdır. Özellikle difüzyon yoluyla yapıştırma bağlantılarının içerisine nüfuz eden su molekülleri, polimer zincirlerini bozarak yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinde geri dönüşü olmayan zararlı etkilere sebep olmaktadır. Farklı endüstrilerin gereksinimlerini karşılamak amacıyla bahsi geçen dezavantajları minimize edebilecek yüksek performanslı yapıştırıcıların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla başvuru alan yaklaşımlardan biri yapıştırıcıya nano malzeme takviye ederek yapıştırma bağlantılarının nem emme kabiliyetlerini iyileştirip nem difüzyonuna karşı güçlü yapıştırma bağlantıları oluşumunu mümkün kılmaktır (Yu ve diğ., 2010). Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalardan birinde Zhou ve diğ. (2016) ağırlıkça %10 ve %20 SNP takviye ettikleri epoksi yapıştırıcı ve yağ alma ön yüzey işlemi uygulanmış paslanmaz çelik plakalardan oluşturdukları tek tesirli yapıştırma bağlantılarını 3 haftaya kadar farklı süreler boyunca bir iklimik kabin içerisinde 60°C'de %100 RH'de (bağıl nem) higrotermal yaşlandırmaya tabi tutmuşlardır. Yaşlandırma işlemi öncesi yapılan tek tesirli kayma testleri sonuçlarına göre takviyesiz epoksi (E) ile oluşturulan yapıştırma bağlantılarına göre ağırlıkça %10 (S10) ve %20 (S20) SNP takviyesinde numunelerin dayanımlarının %20 artırıldığı görülmüştür. Ancak ağırlıkça %40 SNP takviyesiyle, viskozite artışına bağlı olarak plakaların ıslanabilirliği kötüleştiği için dayanımındaki artış miktarının %9'a düştüğü belirtilmiştir. Şekil 2.39'da higrotermal yaşlandırma süresine karşı tek tesirli yapıştırma bağlantılarının kopma dayanımı değerleri verilmiştir. Birinci hafta sonunda dayanım sonuçlarında kayda değer bir düşüş gözlemleyen araştırmacılar artan higrotermal yaşlandırmaya maruz kalma süresi ile dayanımdaki düşüş oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Üç haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında, yapıştırma bağlantılarının dayanım değerleri E, S10 ve S20 numuneleri için sırasıyla 11,3 MPa, 12,6 MPa ve 12,9 MPa olarak tespit edilmiştir. Tüm maruz kalma süreleri için, SNP takviye edilmiş numuneler higrotermal yaşlandırma işleminden sonra takviyesiz epoksi ile oluşturulan numunelerden daha iyi dayanım değerleri sergilemişlerdir. Bu iyileşmeler hidroksil gruplarla yüzeyi modifiye edilmiş SNP'nin su moleküllerini absorbe ederek

epoksi matrisindeki yapısal bölümler arasındaki köprüyü güçlendirmesine atfedilmiştir (Zhou ve diğ., 2016).



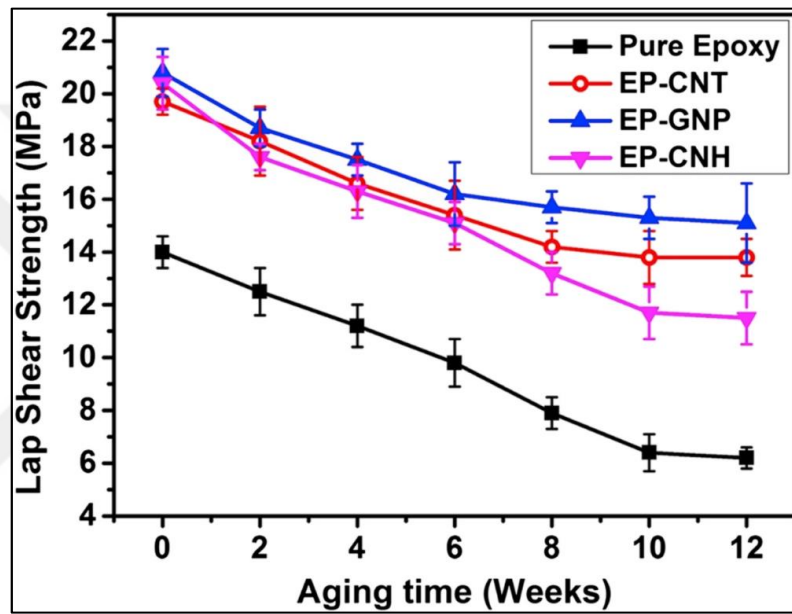
Şekil 2.39. SNP takviyeli higrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış yapıştırma bağlantılarının kopma dayanımı değerleri (Zhou ve diğ., 2016)

Benzer bir başka çalışmada Jojibabu ve diğ. (2017) kum püskürtülmüş AA6061 alüminyum plakalar ve ağırlıkça %0,5 oranında karbon esaslı nano malzemelerle (CNT, GNP ve CNH) takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı ile tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturmuşlardır. Oluşturulan yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma prosesi 12 haftaya kadar Şekil 2.40'ta görülen çevrim uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.40. Yapıştırma bağlantılarına uygulanan higrotermal yaşlandırma çevrimi (Jojibabu ve diğ., 2017)

12 haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında Şekil 2.41’de de görüldüğü üzere 12 hafta sonrasında takviyesiz, CNH, CNT ve GNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinde sıfıncı haftaya kıyasla sırasıyla %55, %43, %30 ve %27 düşüş gözlemlenmiştir. Karbon nano malzemelerinin su alma eğilimlerini karşılaştırmak amacıyla epoksi numuneleri hazırlayıp oda sıcaklığındaki suyun içerisine daldıran araştırmacılar, kayma dayanımı değerlerini destekler nitelikte sonuçlar elde etmişler ve takviyesiz epoksi için %1,82 olarak ölçtükleri su emilimi değerini CNH, CNT ve GNP takviyeli numunelerde sırasıyla %1,58, %1,53 ve %1,45 olarak tespit etmişlerdir.

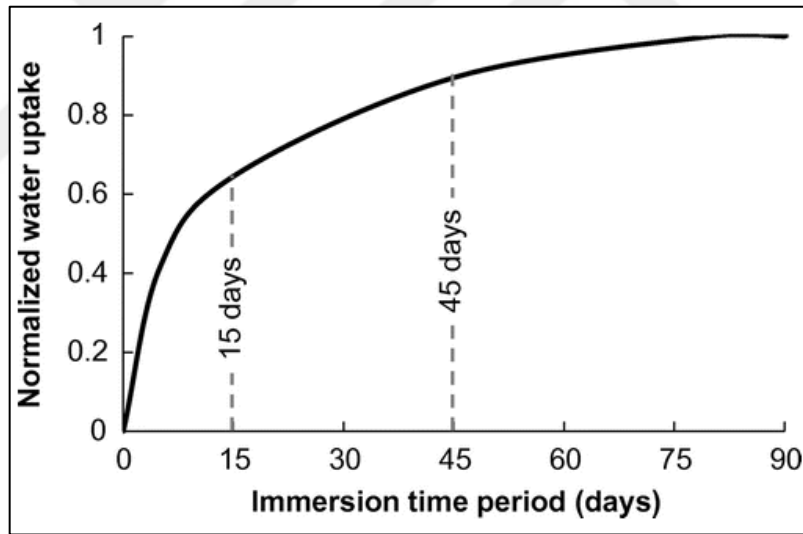


Şekil 2.41. Higrotermal yaşlandırma uygulanmış yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Jojibabu ve diğ., 2017)

Higrotermal yaşlandırma etkilerine karşı nano malzeme takviyeleriyle elde edilen olumlu sonuçlar nano takviye malzemelerinin epoksi içerisindeki serbest hacmi işgal edip higrotermal yaşlandırma süresince su emilimi miktarını azaltarak polimer zincirlerinin hareketini kısıtlamasına ve su moleküllerinin epoksi polimeri tarafından difüzyonuna karşı bariyer görevi sağlamasına atfedildiği belirtilmiştir. GNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarındaki etkili sonuçlar CNT ve CNH'nin gözenekli yapılarına kıyasla GNP'nin plaka benzeri morfolojisinden ötürü su moleküllerinin difüzyonunu azaltmada daha etkili olmasına atfedilmiştir. Ayrıca GNP'nin düşük bağl geçirgenliği dolayısıyla düşük difüzyon katsayısına sahip olması bir başka etkili olgu olup istenmeyen şişme

mekanizmasına karşı daha güçlü bir direnç sergilemesine sebep olarak çalışmadaki faydalı sonuçların doğmasına sebep olan bir başka etmen olarak belirtilmiştir.

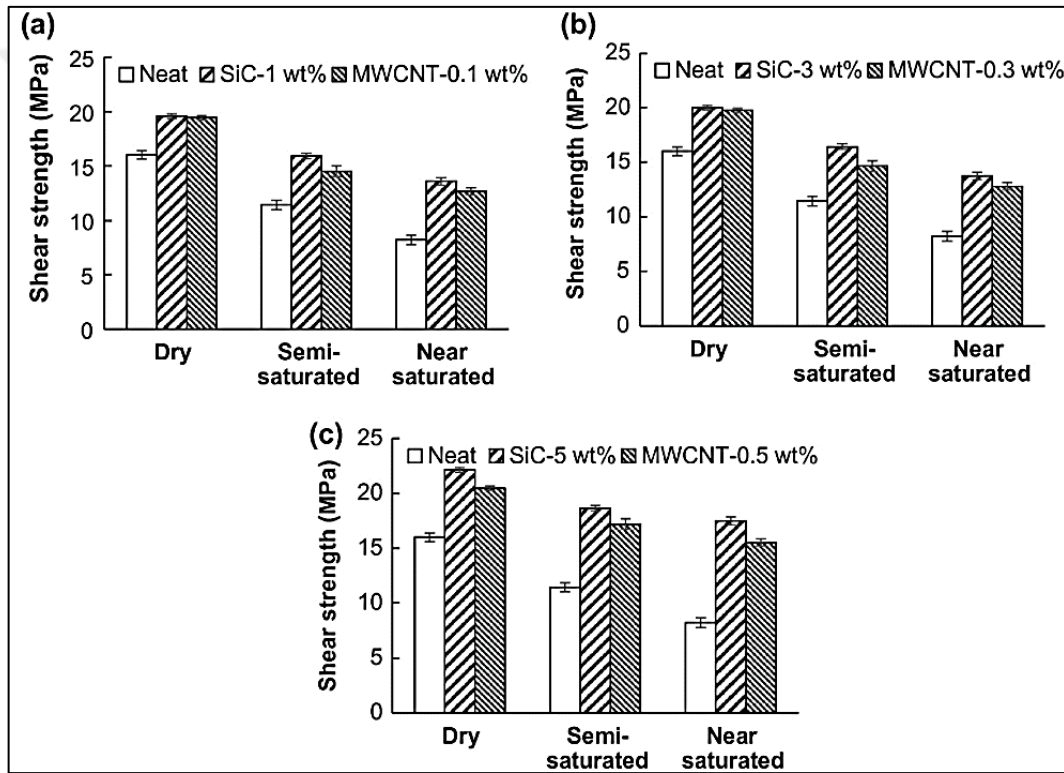
Higrotermal yaşlandırma koşullarının yapıştırma bağlantılarının performanslarına etkilerini inceleyen bir başka çalışmada Khoramishad ve diğ. (2018) FPL-dağlanmış 6061-T6 alüminyum plakaları ağırlıkça %0,1, %0,3 ve %0,5 MWCNT ve ağırlıkça %1, %3 ve %5 silisyum karbür (SiC) takviye ettikleri epoksi esaslı yapıştırıcıyla tek tesirli olarak birleştirmişlerdir. Oluşturulan yapıştırma bağlantılarını 45 güne kadar 60 °C sıcaklıkta deiyonize su içerisine daldıran araştırmacılar 45 günün sonrasında yapıştırma bağlantılarının neredeyse %90 doygunluğa (near saturated) ulaştığını belirtmişlerdir. Tam doygunluğun %60'ına karşılık gelen 15 günlük higrotermal yaşlandırma süresi sonrasında ise yapıştırma bağlantılarının yarı doygunluk (semi-saturated) aşamasında olduğu bildirilmiştir. Şekil 2.42'de higrotermal yaşlandırma sürelerine karşı epoksi yapıştırıcının su alım değerleri görülmektedir.



Şekil 2.42. Farklı higrotermal yaşlandırma sürelerinde epoksi yapıştırıcıların su emilimi değerleri (Khoramishad ve diğ., 2018)

Higrotermal yaşlandırma koşullarına maruz bırakılmış farklı takviye oranlarındaki MWCNT ve SiC nano malzemeleriyle takviyelendirilmiş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinin tespiti amacıyla gerçekleştirilen kayma testleri sonrasındaki sonuçlar Şekil 2.43'te görülmektedir. Artan yaşlandırma sürelerinde tüm yapıştırma bağlantılarının kalıntı dayanımları azalmakla birlikte en kayda değer düşüş takviyesiz yapıştırma bağlantılarında gözlemlenmiştir. Düşük (Şekil 2.43-a) ve orta (Şekil 2.43-b)

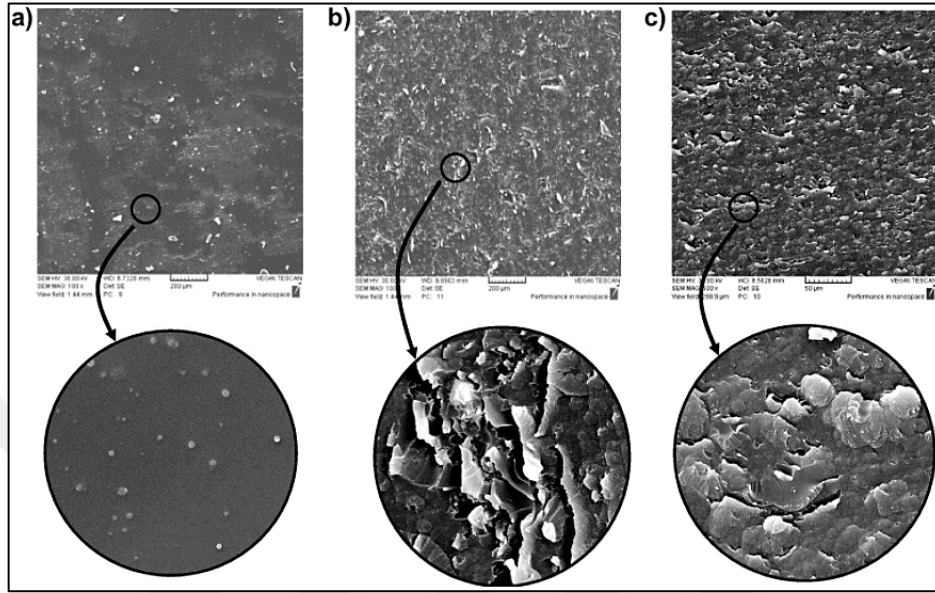
ağırlık oranlarında yaklaşık benzer sonuçlar bildiren araştırmacılar SiC takviyesinin hidrotermal yaşlandırılmış yapıştırma bağlantıları üzerinde daha etkili olduklarını vurgulayarak özellikle yüksek ağırlık oranlarında (Şekil 2.43-c) SiC takviyesinin MWCNT takviyesine nazaran kayma dayanımı değerlerinde %10 daha olumlu sonuçlar elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ağırlıkça %5 SiC takviyesi durumunda takviyesiz yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında kuru, yarı doymuş ve tam doymuş yapıştırma bağlantılarında sırasıyla %38,1, %63,2 ve %113,2'ye varan iyileştirmeler kaydedilmiş olup %0,5 MWCNT takviyesinde aynı koşullardaki iyileşmeler %27,8, %50,5 ve %89,1 olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.43. a) Düşük, b) orta ve c) yüksek takviye oranlarında SiC ve MWCNT ile takviyelendirilmiş yapıştırma bağlantılarının yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki kayma dayanımı değerleri (Khoramishad ve diğ., 2018)

Yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerini değerlendirmek ve nano malzemelerin güçlendirme mekanizmalarının tayini için takviyesiz ve takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinden alınan SEM görüntüleriyle analizler yapılmıştır. Şekil 2.44'te görülen SEM görüntüleri incelendiğinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarında (Şekil 2.44-a) daha pürüzsüz hasar yüzeyleri gözlemlenirken yapıştırıcı içerisine yapılan MWCNT (Şekil 2.44-b) ve SiC (Şekil 2.44-c) takviyeleriyle hasar yüzeyleri pürüzlü bir

hala bürünmüştür. Herhangi bir hasarın ilerlemesi için daha yüksek enerji gerekliliğine ve dolayısıyla yüksek dayanım değerlerine işaret eden bu durum nano malzeme takviyesinin olumlu sonuçlarından biridir.

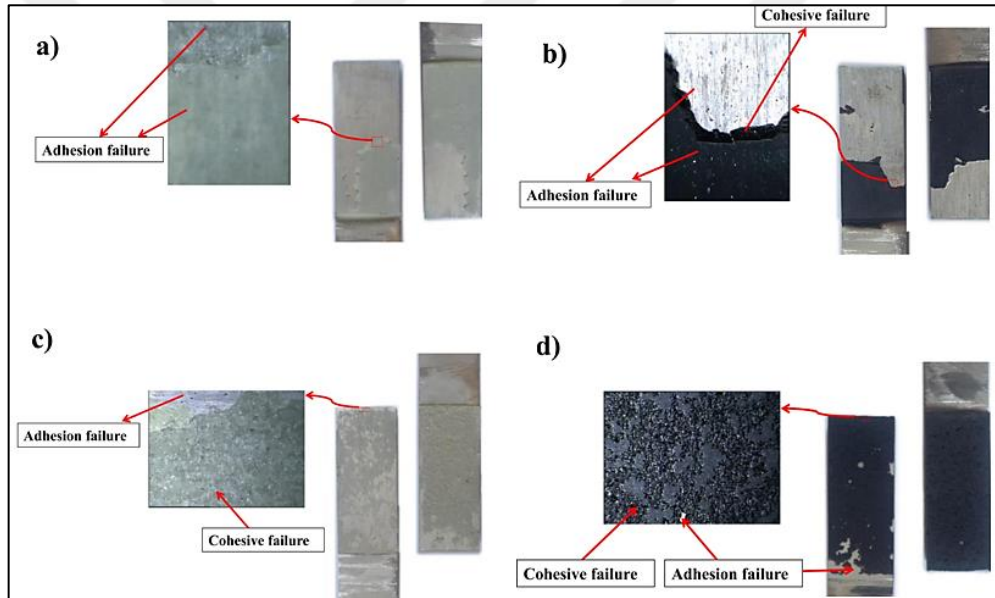


Şekil 2.44. a) Takviyesiz, b) MWCNT takviyeli ve c) SiC takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri (Khoramishad ve diğ., 2018)

2.9.4. Hibrit Nano Malzeme Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Metal-Metal Yapıştırma Bağlantılarıyla İlgili Çalışmalar

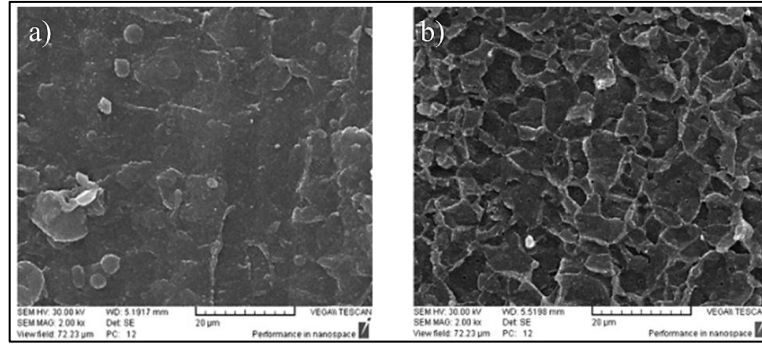
Hibrit nano malzeme takviyelerinin yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen Razavi ve diğ. (2018), FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyum plakaları ağırlıkça %0,2, %0,5 ve %0,8 oranlarında MWCNT ve SNP nano malzemeleriyle tekil olarak takviye edilen epoksi yapıştırıcıyla tek tesirli olarak birleştirdikten sonra aynı takviye oranları için 1:1 oranında MWCNT ve SNP nano malzemelerini hibrit olarak epoksi içerisine katmışlardır. Özellikle düşük takviye oranlarında MWCNT nano malzemesi ön plana çıkarken yüksek takviye oranında SNP nano malzemesi mekanik özelliklerin geliştirilmesinde daha etkili olduğu belirtilmiştir. MWCNT-SNP hibrit nano malzeme takviyesi durumunda ise incelenen tüm ağırlık oranları için tekil MWCNT veya SNP takviyelerine kıyasla dayanım değerlerindeki hafif artışın yanı sıra kopma noktasındaki uzama değerleri kayda değer bir şekilde artarak yapıştırma bağlantılarının tokluk değerlerinin iyileşmesine yol açmıştır. Kayma dayanımı değerlerindeki en yüksek artış %0,8 MWCNT-SNP hibrit takviyesinde

%28,3 iyileşmeyle kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarında (Şekil 2.45-a) arayüz hasarı olarak da bilinen adhezif hasar gözlemlenmiştir. MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarında (Şekil 2.45-b) adhezif hasar baskın olurken SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında (Şekil 2.45-c) adhezif-kohezif karışık hasar türü tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Şekil 2.45-d’de görüldüğü gibi MWCNT ve SNP nano malzemelerinin hibrit takviyesiyle yapıştırıcı ve alüminyum yüzeyler arasındaki yapışma olayı gelişerek hasar türünün baskın olarak kohezif yönde olmasını sağlarken araştırmacılar bu durumu, hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımındaki iyileşmeye yönelik sebeplerden biri olabileceği şeklinde yorumlamışlardır.



Şekil 2.45. a) Takviyesiz, b) %0,5 MWCNT takviyeli, c) %0,8 SNP takviyeli ve d) %0,8 MWCNT- SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri (Razavi ve diğ., 2018)

Şekil 2.46’da takviyesiz ve %0,8 MWCNT-SNP hibrit takviyesiyle oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Takviyesiz yapıştırma bağlantılarında (Şekil 2.46-a) daha pürüzsüz ve düz bir yüzey morfolojisi bulunurken Şekil 2.46-b’de görüldüğü üzere hibrit takviye durumunda hasar yüzeylerinde oluşan yüzey pürüzlülüğü, daha fazla enerji absorpsiyonuna ve dolayısıyla hasar oluşum sürecinde daha yüksek yük kapasitesiyle sonuçlanan kayma bantlarının oluşumunu içermektedir. Bahsi geçen sebeplerden ötürü hibrit takviye durumunda daha yüksek kayma dayanımı ve tokluk değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 2.46. a) Takviyesiz ve b) %0,8 MWCNT-SNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri (Razavi ve diğ., 2018)

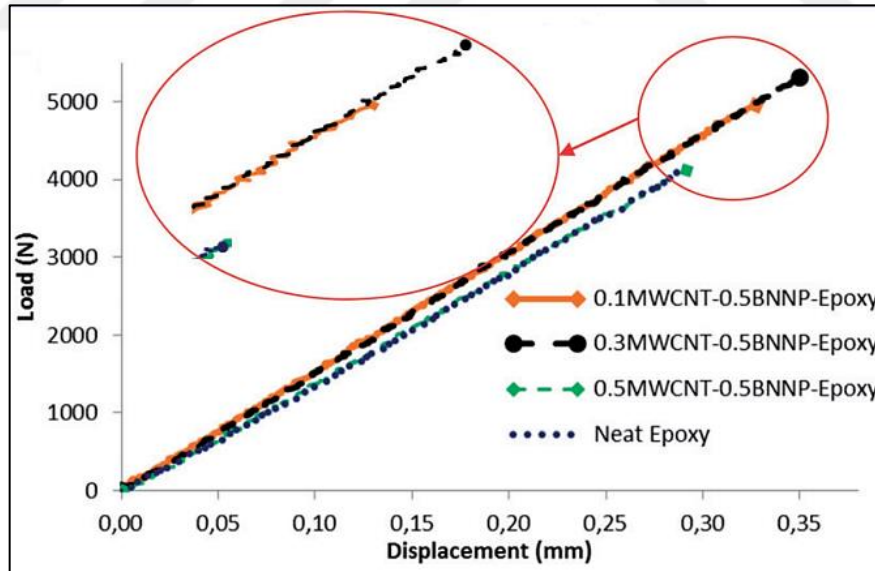
Singh ve diğ. (2017), epoksi yapıştırıcı için yüksek termal iletkenlik sağlamak amacıyla ağırlıkça %1, %2, %5 ve %8 oranlarında tekil olarak takviye ettikleri grafenin yanı sıra hibrit olarak ağırlıkça %10 BN partikülünü katarak alüminyum plakaları ASTM D1002 standardına göre birleştirmişler ve yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değişimlerini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen kayma testleri sonucunda Şekil 2.47’de görüldüğü üzere takviyesiz yapıştırma bağlantılarında 4,05 MPa olarak tespit edilen kayma dayanımı değerini %5 grafen takviyesi ile 6,50 MPa’ya çıkardıklarını bildiren araştırmacılar %5 grafen ve %10 BN’nin hibrit takviyesi ile çalışmadaki en yüksek kayma dayanımı değerini 6,80 MPa olarak elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Bu durum, BN partiküllerinin grafen tabakasını doldurarak sinerjik etki yaratmasıyla yapışma dayanımını artırıcı yönde etki ettiğine atfedilebileceği belirtilmiştir. Ek olarak grafenin yanında BN ilavesi ile daha geniş yüzey alanı oluşumu ve dolayısıyla epoksi matrisin içinde bağlantı köprüleri oluşumu ile hasar oluşumunun önlendiği de vurgulanmıştır.

Sample type	Lap shear strength (MPa)
Epoxy	4.05 ± 0.35
Epoxy/1% graphene	4.98 ± 0.55
Epoxy/2% graphene	5.62 ± 0.88
Epoxy/5% graphene	6.50 ± 0.08
Epoxy/8% graphene	6.28 ± 0.09
Epoxy/5% graphene/10% BN	6.80 ± 0.07

Şekil 2.47. Grafen ve grafen+BN hibrit takviyeleriyle oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Singh ve diğ., 2017)

Bir başka çalışmada epoksi yapıştırıcıyı ağırlıkça farklı takviye oranlarında bor nitrür nano levhalar (BNNP) ve MWCNT ile hibrit şekilde takviye eden Ekrem ve diğ. (2017),

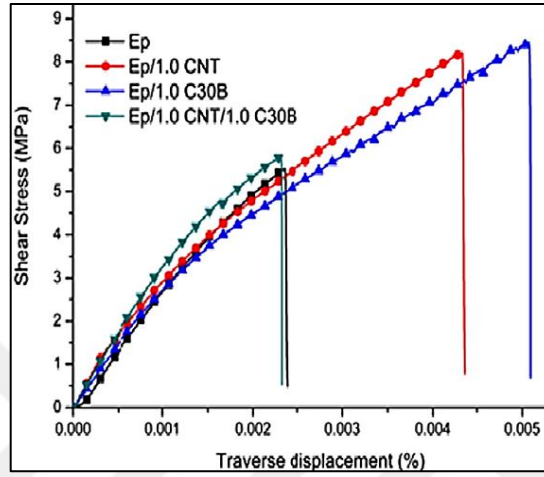
FPL-dağlanmış 2024-T3 alüminyum plakaları tek tesirli olarak birleştirmişler ve hibrit nano malzeme takviyesinin yapıştırma bağlantılarının dayanımına etkilerini incelemişlerdir. ASTM D1002-10 standardına göre gerçekleştirilen kayma testleri sonucunda en yüksek kayma dayanımı %0,3 MWCNT+%0,5 BNNP hibrit takviye durumunda kaydedilmiştir. Bu iyileşmenin hibrit nano malzeme takviyesiyle nano malzemeler ve epoksi polimer zincirleri arasındaki adhezif kuvvetlerin oluşturduğu mekanik kilitleme mekanizmasına atfedilebileceği bildirilmiştir. Ağırlıkça %0,1 MWCNT+%0,5 BNNP hibrit takviyesinde kayma dayanımı değerlerinde bir miktar iyileşme gözlemlenirken %0,5 MWCNT+%0,5 BNNP hibrit takviyesinde takviyesiz epoksi ile oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarıyla neredeyse aynı dayanım sonuçları elde edildiği belirtilmiştir. Ağırlıkça %0,5 MWCNT+%0,5 BNNP hibrit takviyesinde kayma dayanımı değerlerindeki iyileşmedeki düşüş optimum nano malzeme takviye oranının üzerinde nano malzemelerin topaklaşmasına atfedilmiştir. Şekil 2.48’de yapıştırma bağlantılarının yük-yer değiştirme eğrileri verilmiş olup hibrit nano malzemesiyle yapıştırma bağlantılarının yer değiştirme kabiliyetlerinin de geliştirilerek tokluk değerlerini artırdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.48. Farklı takviye oranlarında MWCNT+BNNP hibrit takviyeleriyle oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının yük-yer değiştirme eğrileri (Ekrem ve diğ., 2017)

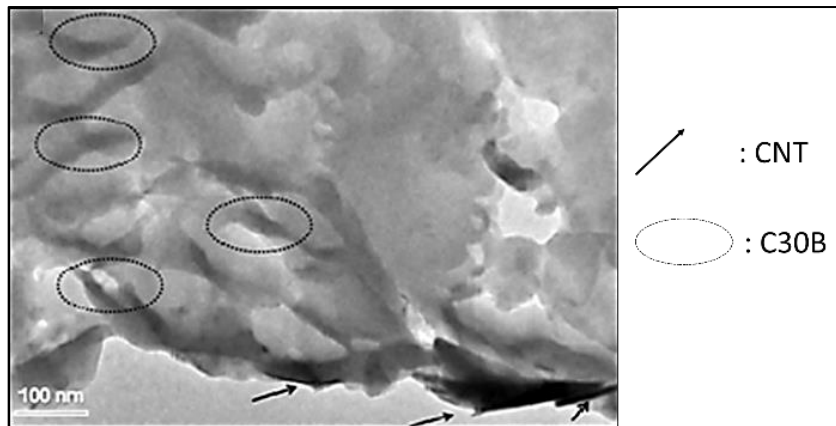
Aradhana ve diğ. (2018) asitle dağlanmış alüminyum plakalar ve içerisine hibrit olarak ağırlıkça %1 CNT ve ağırlıkça %1 nano organokil (C30B) takviye ettikleri epoksi yapıştırıcıyla oluşturdukları tek tesirli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı

değişimlerini incelemişlerdir. Takviyesiz yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında tekil olarak CNT takviyesiyle %48,1 iyileştirdikleri kayma dayanımı değerlerini C30B takviyesiyle %52,7 iyileştirirken %1 CNT+%1 C30B hibrit takviye durumunda bu iyileşme oranı %4,7 olarak bildirilmiştir. Kayma testleri sonrasında elde edilen sonuçlar Şekil 2.49’da görülmektedir.



Şekil 2.49. Takviyesiz, tekil ve hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma gerilimi-yer değiştirme eğrileri (Aradhana ve diğ., 2018)

Hibrit nano malzeme takviyesinde kayma dayanımındaki iyileşmede kaydedilen düşüşün sebebi yapıştırma bağlantısı içerisinde yalnızca CNT'lerin veya C30B'nin bulunduğu bölgeler arasında zayıf bir sınır olabileceğinden ve bağlantıya gelen yüklerin bu bölgede düzgün bir şekilde aktarılamayarak çok daha düşük yüklerde hasarın başlayarak kopmanın gerçekleşebileceğine atfedilmiş olup varılan bu sonuç Şekil 2.50’de görülen TEM görüntüleriyle desteklenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.50. CNT ve C30B hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantısının TEM görüntüleri (Aradhana ve diğ., 2018)

Epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal/metal yapıştırma bağlantılarının çeşitli yönlerden incelendiği yukarıdaki literatür çalışmaları sonucunda, alüminyum malzeme yüzeyine uygulanan çeşitli ön yüzey işlemlerinin bulunduğu ve özellikle FPL-dağlama gibi kimyasal ön yüzey işlemleriyle yapışma olayı için gözenekli ve kimyasal olarak aktif yüzeyler meydana gelmesi sağlanarak yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarının kayda değer bir şekilde iyileştirildiği tespit edilmiştir. Ayrıca epoksi yapıştırıcı içerisine yapılan nano boyutlu malzeme takviyeleriyle hem yapıştırıcı içerisindeki kohezyon kuvvetlerinin hem de yapıştırılan yüzeyler ve epoksi yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvvetlerinin geliştirildiği ve yapıştırma bağlantılarında epoksi yapıştırıcıya gelen yüklerin bu nano takviye malzemeleri tarafından karşılanarak mekanik performansların artırıldığına yönelik birçok çalışma saptanmıştır. Buna karşın nano malzeme takviyesiyle elde edilen bu pozitif etkilerin özellikle nem ve sıcaklığın aynı anda etki ettiği higrotermal yaşlandırma koşulları altında yapıştırma bağlantılarına ne derece katkıda bulunduklarına yönelik oldukça sınırlı sayıda çalışma tespit edilmiş ve bu konunun irdelenmesinin gerekliliği açık olarak görülmüştür. Ayrıca, kendilerini kanıtlamış tekil nano malzeme katkılarının faydalarına ek olarak literatürde oldukça sınırlı sayıda çalışmada yer verilmiş olan hibrit nano malzeme takviyesi stratejisiyle yapıştırma bağlantılarının mekanik dayanım ve maliyet gibi hususları üzerinde iyileştirmelere gidilebileceğine yönelik çıkarımlarda bulunulmuştur. Özgünlüğünü ve güncelliğini koruyan hibrit takviye metodu üzerinde çalışmanın bilimsel açıdan değerli olduğu düşünülmüştür.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

ASTM D1002-99 standardına uygun olarak hazırlanan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının oluşturulması amacıyla yapıştırılacak malzeme olarak havacılık, savunma ve kalıp gibi sanayilerde yüksek akma ve çekme dayanımına sahip oldukları için sıklıkla tercih edilen Seykoç Alüminyum firmasından temin edilmiş AA7075-T6 alüminyum alaşımı plakalar kullanılmış ve Demirsan Lazer firmasından alınan lazer kesim hizmetiyle standarda uygun olarak 1,6 mm x 114,3 mm x 25,4 mm boyutlarına getirilmiştir. AA7075-T6 alüminyum plakaların FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işleminde Penalab firmasından satın alınmış sülfürik asit (H_2SO_4), sodyum dikromat ($Na_2Cr_2O_7$) ve aseton kullanılmış olup tüm kimyasal sarf malzemeleri analitik saflıktadır. Yapıştırıcı olarak düşük viskoziteli, yüksek dayanım özelliklerine sahip iki bileşenli (A-epoksi esaslı, B-amin esaslı) Loctite EA 9396 AERO epoksi yapıştırıcısı kullanılmış olup hem AA7075-T6 alüminyum plakaların hem de epoksi yapıştırıcının özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. AA7075-T6 alüminyum plakalar ve Loctite EA 9396 AERO epoksi yapıştırıcının özellikleri (URL-9); (Henkel adhesive, 2013)

Özellikler			AA7075-T6	Loctite EA 9396
			Alüminyum Plakalar	AERO Epoksi
Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)			530-570	35,2
Maksimum uzama (%)			10	3,4
Sertlik			140-160 (Brinel)	80 (Shore D)

Epoksi yapıştırıcı içerisindeki kohezyon kuvvetlerini geliştirmek, epoksi yapıştırıcı/alüminyum plakalar arasındaki arayüzü iyileştirerek adhezyon kuvvetlerini geliştirmek ve dolayısıyla yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla epoksi yapıştırıcı içerisine nano boyutlu hegzagonal bor nitrür (BNNP), -COOH fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve silika (SNP) malzemeleri takviye edilmiş olup nano malzemeler Nanografi Nano Teknoloji A.Ş

firmasından temin edilmiştir. Takviye nano malzemelerinin görünüşleri Şekil 3.1’de ve nano malzemelerin özelliklerinin ve maliyetlerinin kıyası Tablo 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Epoksi yapıştırıcıya takviye edilen nano malzemeler

Tablo 3.2. Takviye nano malzemelerinin özellikleri ve maliyetleri

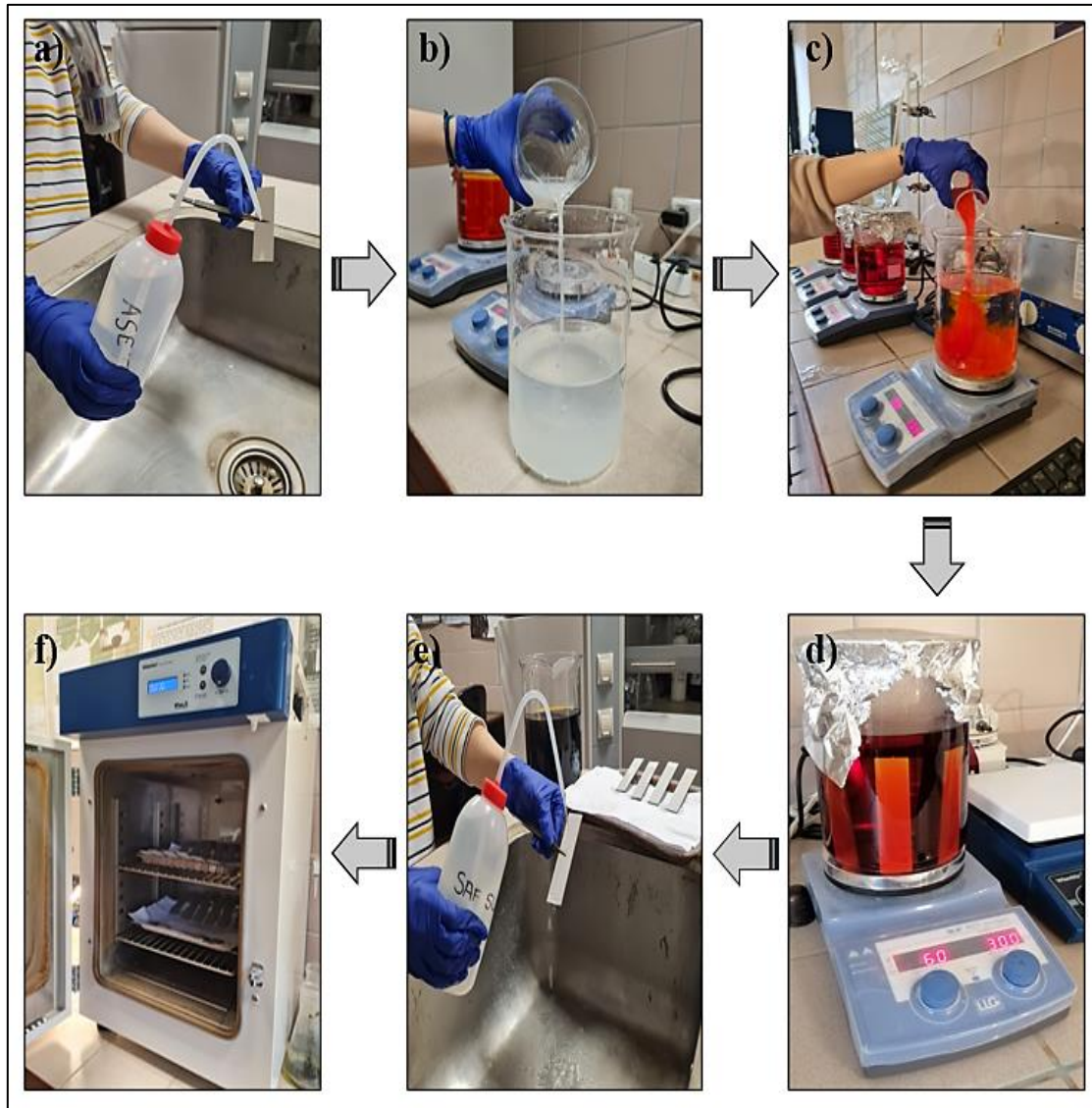
Nano Malzemeler	Boyut	Safılık	Maliyet
BNNP	65-75 nm	> %99,85	**
MWCNT	4-16 nm (Dış çap)	> %96	***
SNP	15-35 nm	> %99,5	*

(* ucuz, ** orta, *** pahalı)

3.2. AA7075-T6 Alüminyum Plakaların Kimyasal Ön Yüzey İşlemi

Alüminyum malzemelerin doğaları gereği yüzeylerinde oluşan kararlı olmayan oksit tabakasını kararlı bir oksit tabakasıyla değiştirmek, yüzeydeki kontaminasyonları gidermek ve yapışma için gözenekli ve kimyasal olarak aktif bir yüzey oluşturmak amacıyla AA7075-T6 alüminyum plakalara FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işlemi uygulanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak AA7075-T6 alüminyum plakalara ekstra saf aseton ile yağ alma (degrease) işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.2-a). Asetonla yağ alma işleminin ardından bir beher içerisinde FPL-dağlama çözeltisi (1253 ml su, 246,24 ml H₂SO₄ ve

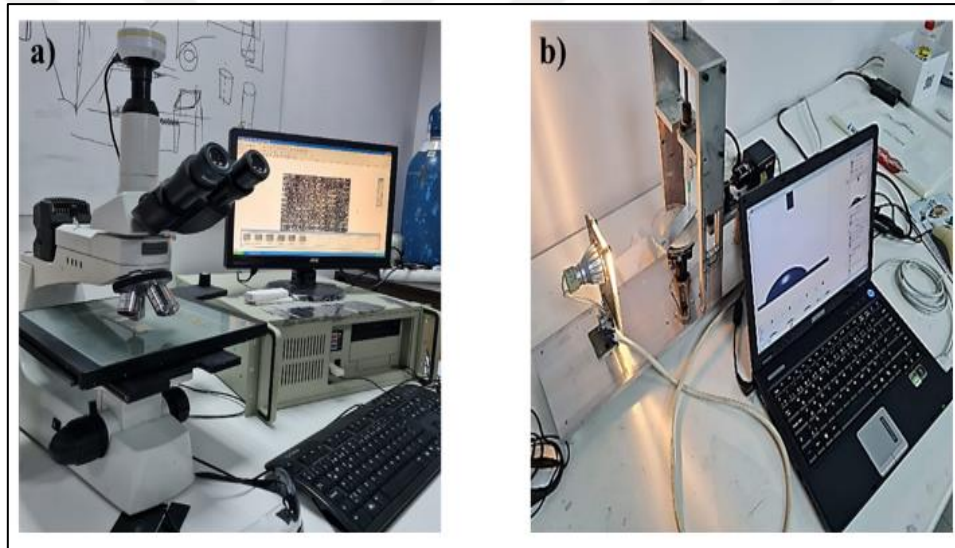
45,75 gr $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ hazırlanmış (Şekil 3.2-b-c) ve çözelti homojen olana kadar ve 60 °C sıcaklığa ulaşana dek 350 rpm’de manyetik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır. Her bir çözelti içerisinde altı adet numune olacak şekilde alüminyum plakalar, 60 °C’de 300 rpm’de 20 dk süreyle bekletilmiştir (Şekil 3.2-d). Daha sonrasında, AA7075-T6 alüminyum plakalar FPL-dağlama çözeltisinden çıkarılmış ve saf su ile yıkanmıştır (Şekil 3.2-e). Son olarak, alüminyum plakalar kurumaları için 60 °C’lik etüv içerisinde yaklaşık 20 dk boyunca tutulmuştur (Şekil 3.2-f). FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işleminin tüm aşamaları Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü’nde bulunan Biyoteknoloji Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. AA7075-T6 alüminyum plakalara uygulanan FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işlemi yönteminin aşamaları

3.3. AA7075-T6 Alüminyum Yüzeylerin Optik Mikroskop ve Temas Açısı Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Herhangi bir ön yüzey işlemi uygulanmamış ve FPL-dağlama kimyasal yüzey ön işlemine maruz bırakılmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin morfolojilerini görüntülemek ve birbirleriyle kıyaslamak amacıyla Olympus SZX16 Stereo optik mikroskobu (Şekil 3.3-a) vasıtasıyla alüminyum yüzeylerden görüntüler alınmıştır. Bunun yanı sıra FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işlemi sonrasında alüminyum yüzeylerin ıslanabilirliklerinin ne derece değiştiğini tespit etmek amacıyla AA7075-T6 alüminyum yüzeylerden temas açısı ölçüm cihazı (Şekil 3.3-b) aracılığıyla $\pm 2^\circ$ sapma ile 6 tekrarlı temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

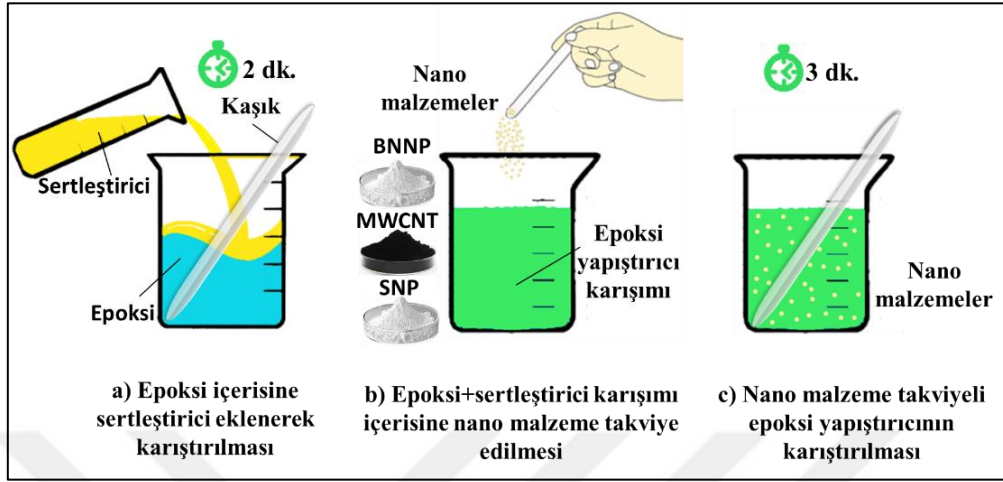


Şekil 3.3. a) Optik mikroskop ve b) temas açısı ölçüm cihazı

3.4. Takviyesiz ve Nano Malzeme Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıların Hazırlanması

Epoksi yapıştırıcı, teknik veri sayfasında (technical data sheet) belirtilen epoksi reçine:sertleştirici (hardener) oranı 100:30 (ağırlıkça/ağırlıkça) dikkate alınarak hazırlanmıştır. Epoksi ve sertleştirici karışımı belirtilen oranlarda boş bir kaba konulmuş ve 2 dk boyunca bir kaşık vasıtasıyla manuel olarak karıştırılmıştır. Ardından, gerçekleştirilen literatür taramaları sonucunda tespit edilen ortak takviye oranları baz alınarak ağırlıkça %0,5, %0,75, %1, %2 ve %4 BNNP, ağırlıkça %0,5, %0,75, %1, %2 ve %4 MWCNT ve ağırlıkça %2, %4, %6, %10, %15 ve %20 SNP nano malzemeleri epoksi+sertleştirici karışımına tekil olarak takviye edilerek 3 dk boyunca bir kaşık

yardımıyla manuel olarak karıştırılmıştır. Şekil 3.4'te yapıştırıcı hazırlama aşamaları şematik olarak verilmiştir.



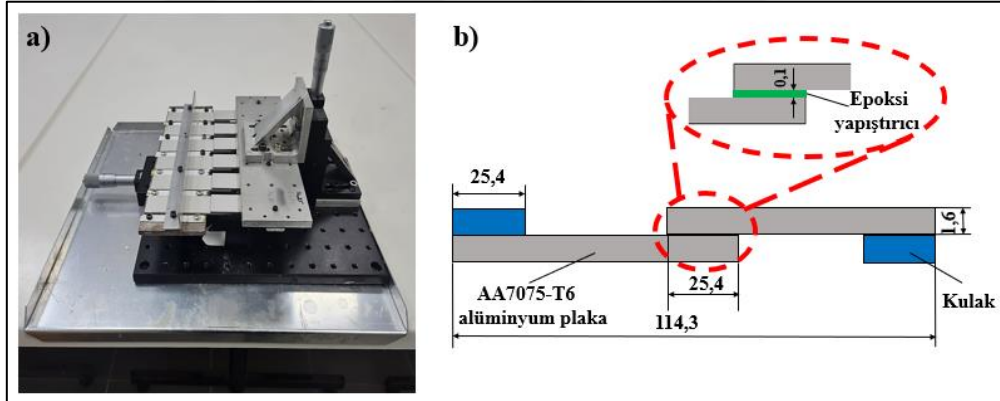
Şekil 3.4. Takviyesiz ve nano malzeme takviyeli epoksi yapıştırıcıların hazırlanma aşamaları

Hibrit nano malzeme takviyesi stratejisinin uygulanması amacıyla MWCNT ve BNNP, BNNP ve SNP, MWCNT ve SNP nano malzemelerinin hibrit olarak epoksi yapıştırıcı içerisine takviye edildiği yapıştırıcı karışımları hazırlanmıştır. MWCNT ve BNNP hibrit takviyesinde hem iki nano malzemenin de yüksek oranlarda topaklaşma eğiliminde olmaları hem de göreceli daha yüksek maliyetli olan bu iki nano malzemeden minimum maliyetle maksimum faydayı sağlamak amacıyla daha düşük ağırlık oranlarında takviyeler gerçekleştirilirken yüksek ağırlık oranlarında daha etkili olan ve maliyeti çok daha düşük SNP takviyesinde daha yüksek ağırlık oranları takviye edilmiştir. Bu bağlamda hazırlanan epoksi+sertleştirici içerisine ağırlıkça farklı takviye oranlarında MWCNT (%0,5 ve %0,75) ve BNNP (%0,5 ve %0,75), BNNP (%0,5 ve %0,75) ve SNP (%2, %4 ve %6) hibrit takviyelerinin yanı sıra MWCNT (%0,5 ve %0,75) ve SNP (%2, %4 ve %6) içeren ikili hibrit nano malzemeler takviye edilmiştir. Tekil takviyelere benzer şekilde ikili hibrit karışımlarda da nano malzemeler eklendikten sonra homojen bir karışım oluşuncaya dek (yaklaşık 3 dk) manuel olarak bir kaşık vasıtasıyla yapıştırıcı karıştırılmıştır.

3.5. Yapıştırma Bağlantılarının Oluşturulması

FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyumların yapıştırma bağlantıları tek tesirli olarak Şekil 3.5-a'da görülen üç eksenli düzenek kullanılarak 25,4

mm x 25,4 mm'lik bir örtüşme alanında oluşturulmuştur. Yapıştırıcı kalınlığı $100 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ olarak ayarlanmış ve her bir yapıştırma bağlantısı için altı adet numune hazırlanmıştır. Oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının boyutları Şekil 3.5-b'de verilmiştir. Takviyesiz ve nano malzeme takviyeli olarak hazırlanan yapıştırma bağlantıları 66°C 'ye ayarlanmış bir fırına alınarak 1 saat boyunca kürlenmesi için bekletilmiştir. Kürlenme sürecinin ardından fırından çıkarılan yapıştırma bağlantıları oda sıcaklığında başka bir fırına alınarak tam kürlenmenin sağlanması amacıyla 24 saat bekletilmiştir. Kayma testleri esnasında yapıştırma bağlantılarında oluşan eksantriklikleri ve soyulma gerilmelerini önlemek için test öncesinde yapıştırma bağlantılarının uç kısımlarına Şekil 3.5-b'de görülen AA7075-T6 alüminyum malzemelerden kesilen kulaklar yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı hazırlama ve yapıştırma bağlantılarının oluşturulmasını içeren proses aşamalarının tümü Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde bulunan HAMAG Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. a) Yapıştırma bağlantısı düzeneği ve b) yapıştırma bağlantısı ölçüleri

3.6. Takviyesiz ve Nano Malzeme Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Higrotermal Yaşlandırma Prosesi

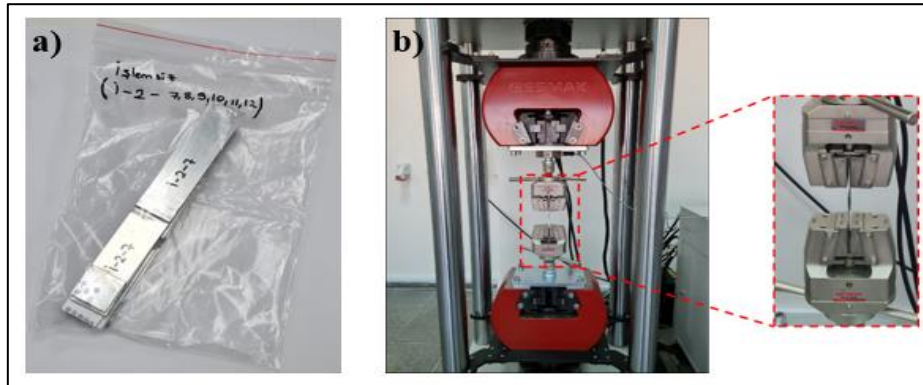
Yapıştırma bağlantılarının endüstriyel kullanım alanlarında nem ve sıcaklık faktörlerine maruz kaldıkları ve sıcaklık varlığında yapıştırıcıların neme karşı ekstra duyarlı oldukları düşünülerek takviyesiz ve takviyeli yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma koşulları altındaki performanslarının incelenmesinin gerekliliği duyulmuştur. Bu amaçla, takviyesiz ve her bir nano malzeme türü için yaşlandırma öncesindeki kayma testleri sonrasında belirlenmiş olan optimum takviye oranlarına sahip yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Çeşme suyu doldurulmuş boş bir kap içerisine daldırılan yapıştırma

bağlantıları 60 °C ve %100 RH’de bir fırın içerisinde 1, 2, 4 ve 6 haftalık süreler boyunca higrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Her bir yaşlandırma süresi sonrasında 50 °C’lık başka bir fırına alınan yapıştırma bağlantıları kuruyana kadar (yaklaşık 20 dk) bekletilmiştir. Takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının su alma eğilimlerini karşılaştırmak amacıyla higrotermal yaşlandırılmış tüm yapıştırma bağlantılarının yaşlandırma öncesinde ve her bir yaşlandırma süresi sonrasında dijital terazi vasıtasıyla kütle ölçümleri yapılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının yüzde (%) su alma oranlarının (M_t) hesaplanmasında Denklem (3.1)’den (Liu ve diğ., 2005) yararlanılmış olup yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma süresi öncesindeki kütle değerleri (W_0) ve “t” hafta sonrasındaki kütle değerleri (W_t) olarak ifade edilmiştir;

$$M_t(\%) = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

3.7. Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Testlerinin Gerçekleştirilmesi

AA7075-T6 yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerini belirlemek için ASTM D1002-99 (American Society for Testing and Materials, 1999) standardı baz alınarak Şekil 3.6-a’da görülen test numunelerinin universal bir test cihazında (Şekil 3.6-b) 1,3 mm/dk hızla tek tesirli kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapıştırma bağlantılarının kayma testleri Kocaeli Üniversitesi Uzunçiftlik Nuh Çimento Meslek Yüksekokulu’nda bulunan Tahribatlı Muayene Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Tek tesirli kayma testleri sonrasında kopan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen hasar türlerinin tespiti ve analizleri, dijital kamera vasıtasıyla kopma yüzeylerinden alınan görüntülerle yapılmıştır.



Şekil 3.6. a) Yapıştırma bağlantılarının örnek test numuneleri b) kayma testlerinin gerçekleştirilmesi

3.8. Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin SEM Analizleriyle İncelenmesi

Higrotermal yaşlandırma koşullarının takviyesiz ve farklı nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarını ne derece etkilediğini saptamak amacıyla yaşlandırılmamış ve 2 hafta higrotermal yaşlandırma uygulanmış yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinden 10 mm x 10 mm olacak şekilde numuneler kesilerek SEM görüntüleri alınmıştır. SEM analizleri Sakarya Üniversitesi bünyesinde yapılmış olup öncelikle numuneler Cressington Sputter Coater 108 Auto cihazı ile altın kaplanmış (Şekil 3.7-a) ve ardından Tescan Vega3 cihazı vasıtasıyla 250X büyütme ile görüntüler alınmıştır (Şekil 3.7-b).

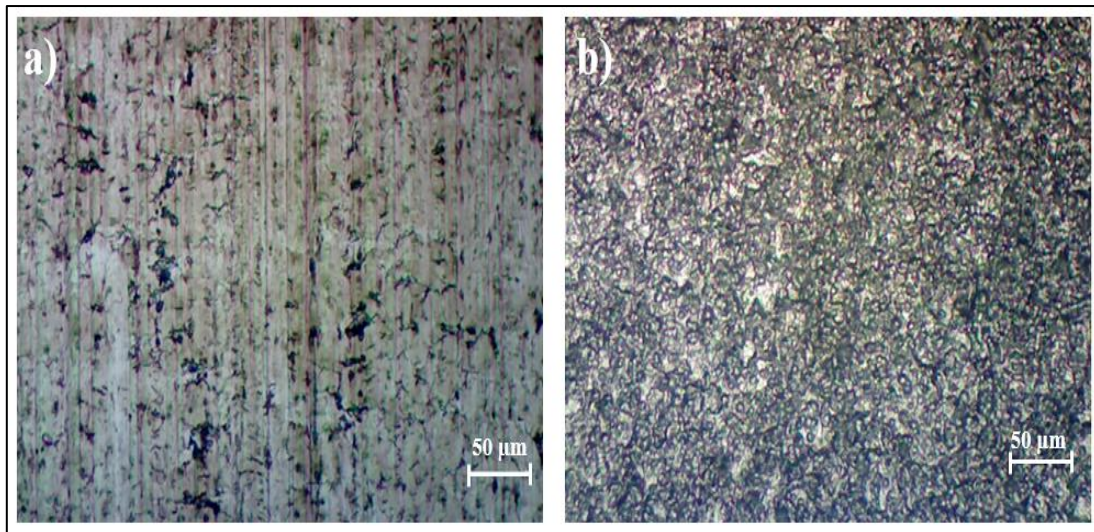


Şekil 3.7. a) Cressington Sputter Coater 108 Auto altın kaplama makinesi ve b) Tescan Vega3 SEM cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Kimyasal Ön Yüzey İşleminin Alüminyum Yüzey Morfolojisi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

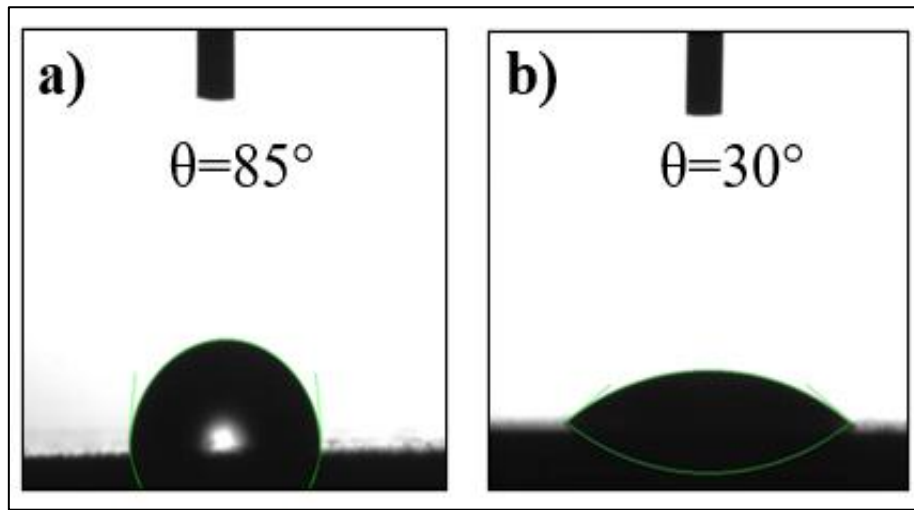
Alüminyum yapıştırma bağlantılarında alüminyum yüzeylere uygulanan ön yüzey işlemi, yapıştırma prosesinin ilk ve en önemli aşamalarından biri olarak görülmektedir. Bu amaçla bu tez çalışmasında, AA7075-T6 alüminyum plaka yüzeylerini yapıştırma prosesine uygun hale getirerek mekanik açıdan daha yüksek performans sergileyen yapıştırma bağlantıları oluşturmak amacıyla AA7075-T6 alüminyum plakalara FPL-dağlama kimyasal ön yüzey işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ön yüzey işlemi sonrasında gerçekleştirilen optik mikroskop ve temas açısı ölçümleri vasıtasıyla alüminyum yüzey morfolojisindeki değişimler ve yüzey ıslanabilirlik kabiliyetinin ne derece değiştiği tespit edilmiştir. Şekil 4.1’de ön yüzey işlemi uygulanmamış ve FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerinden 20X büyütmeyle alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. FPL-dağlanmış alüminyum yüzeylerde girinti ve çıkıntıların yoğun olarak meydana geldiği ve dolayısıyla ön yüzey işlemi uygulanmamış yüzeylere göre çok daha pürüzlü ve homojen bir yüzeyin mevcudiyeti saptanmıştır. Yüzeye uygulanan yapıştırıcının oluşturulan homojen pürüzlü yüzeydeki girinti ve çıkıntılara daha iyi tutunarak daha yüksek performanslı yapıştırma bağlantılarının oluşumuna öncülük ettiği çıkarımında bulunulmuştur.



Şekil 4.1. a) İşlemsiz ve b) FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri

Benzer sonuçlar bildiren bir çalışmada (Prolongo ve Urena, 2009) 1050 ve 2024 alüminyum alaşımı plakalara FPL ve P2 kimyasal dağlama işlemleri uygulayan araştırmacılar, kimyasal ön yüzey işlemleriyle birlikte daha pürüzlü ve homojen yüzeyin eldesi ile birlikte yüksek oranda gözenekli oksit tabakasının temas alanının artmasını sağlayıp mekanik kilitleme mekanizmasını teşvik ettiğini belirtmişlerdir.

Gerçekleştirilen temas açısı ölçümleri sonucunda optik mikroskop görüntülerini destekler nitelikte sonuçlarla karşılaştırarak yüzey pürüzlülüğünün temas açısı değerlerini büyük ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır. Artan yüzey pürüzlülüğü ile birlikte yüzeyin ıslanma kabiliyetinin artmasına paralel olarak temas açısı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, ön yüzey işlemi uygulanmamış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin temas açısı değeri $85^{\circ} \pm 1^{\circ}$ olarak gözlemlenerek FPL-dağlanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylere göre daha hidrofobik bir karakter sergilediği tespit edilmiştir (Şekil 4.2-a). FPL-dağlanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin temas açısı değeri $30^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (Şekil 4.2-b) olarak ölçülmüş olup yapıştırılacak yüzeylerden beklenen daha hidrofilik davranış elde edilerek yüzey ıslanabilirliği iyileştirilmiştir. Uygulanan ön yüzey işleminin alüminyum alaşımı plakanın yüzey karakteristiği üzerindeki etkilerini inceleyen Leena ve diğ. (2016) yağ alma işlemiyle 76° olarak tespit ettikleri temas açısı değerini FPL-dağlama ön yüzey işlemiyle 32° olarak ölçerek daha hidrofilik bir yüzey elde etmişler ve yüzeyin ıslanabilirliğini artırarak yapıştırıcının yüzey gözeneklerine daha fazla nüfuz etmesine neden olabilecek bir yüzey etmişlerdir.



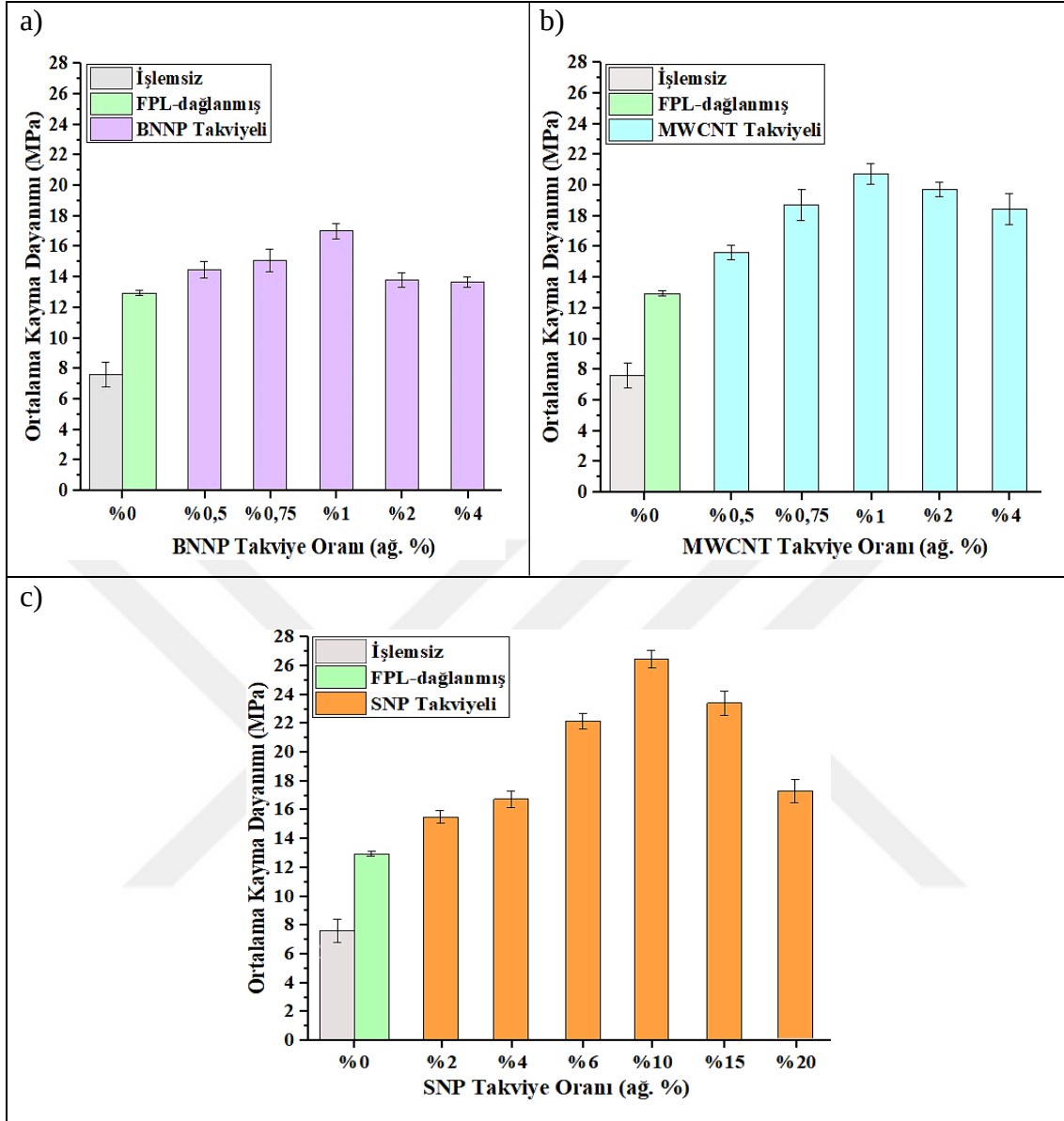
Şekil 4.2. a) Ön yüzey işlemi uygulanmamış ve b) FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 alüminyum yüzeylerin temas açısı değerleri

4.2. Tekil Nano Malzeme Takviyesinin Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış ve farklı ağırlık oranlarında BNNP, MWCNT, SNP takviye edilmiş alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımlarının tespiti ve her bir nano malzeme takviyesinin yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımlarına ne derece etki ettiğini saptamak amacıyla tek tesirli kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te işlemsiz ve FPL-dağlanmış takviyesiz alüminyum yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerlerinin yanı sıra FPL-dağlanmış alüminyum plakalarla oluşturulmuş BNNP (Şekil 4.3-a), MWCNT (Şekil 4.3-b) ve SNP (Şekil 4.3-c) takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri görülmektedir. Optik mikroskop ve temas açısı ölçümlerinin sonuçları da göz önünde bulundurulduğunda, FPL-dağlama ön yüzey işlemiyle elde edilen uygun yüzey pürüzlülüğü ve geliştirilmiş yüzey ıslanabilirliği sayesinde uygulanan ön yüzey işleminin kayma dayanımı üzerinde etkin bir rol oynadığı saptanarak daha yüksek kayma dayanımı değerleri tespit edilmiştir. Bu bağlamda, herhangi bir ön yüzey işlemi uygulanmamış yapıştırma bağlantılarında 7,64 MPa olarak tespit edilen ortalama kayma dayanımı değeri FPL-dağlama işlemiyle %69 iyileşmeyle 12,96 MPa değerine ulaşmıştır. Aynı amaçla gerçekleştirilmiş bir çalışmada (Leena ve diğ., 2016) alüminyum plakalara uygulanan FPL-dağlama işlemi sayesinde kayma dayanımı değerlerinde işlemsiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla %65 iyileşme kaydeden araştırmacılar, mekanik açıdan tespit edilen bu önemli iyileşmeyi FPL-dağlama işlemiyle alüminyum yüzeyinde oluşan gözenekli alüminyum oksit tabakasına ve dolayısıyla iyi yüzey ıslanabilirliğine ve yüksek yüzey pürüzlülüğüne atfetmişlerdir.

Uygulanan ön yüzey işleminin kayma dayanımı üzerindeki pozitif etkilerinin saptanmasının ardından ikinci aşama olarak ağırlıkça farklı oranlarda BNNP, MWCNT ve SNP nano malzeme takviyelerinin yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı üzerindeki etkilerini tayin etmek amacıyla tek tesirli kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3-a'da ağırlıkça %0,5-%4 BNNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri görülmektedir. BNNP takviyesiyle birlikte yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri belirli ölçüde iyileştirilmiş ve maksimum kayma dayanımı değerine %31 iyileşmeyle ağırlıkça %1 BNNP takviyesinde ulaşılmıştır.

Benzer şekilde alüminyum plakalar ve hegzagonal bor nitrür takviyeli epoksi yapıştırıcıyla tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturan Wang ve diğ. (2021b) ağırlıkça %1 bor nitrür takviyesinde maksimum kayma dayanımı değerine yaklaşık %30 iyileşmeyle ulaştıklarını bildirmişlerdir. Kayma dayanım değerlerinin artışı bor nitrürün, epoksi molekülleri içerisinde köprü ve çapraz bağ görevi görmesine bağlanmıştır. Bor nitrür nano takviyesinin alüminyum yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı üzerindeki etkilerini inceleyen bir başka çalışmada Jakubinek ve diğ. (2018), ağırlıkça %1-%7 aralığında farklı oranlarda bor nitrür nanotüp (BNNT) takviye ettikleri yapıştırma bağlantılarında ağırlıkça %1 yüzeyi saflaştırılmış BNNT takviyesinde %15'lik bir artışla maksimum kayma dayanımını elde etmişlerdir. Kayma dayanımındaki artış; bor nitrür takviyesiyle sadece epoksinin özelliklerinin değil, aynı zamanda epoksi-alüminyum arayüzünün de gelişmesine atfedilmiştir. Yüksek ağırlık oranlarında kayma dayanımında düşüş tespit eden araştırmacılar artan yapıştırıcı viskozitesine bağlı olarak bağlantı içerisinde homojen olarak dağılmayan BNNT takviyesinin bu duruma yol açtığı kanaatine varmışlardır. Bu tez çalışmasında da benzer şekilde optimum BNNP takviye oranının (ağırlıkça %1) ötesinde kayma dayanımı değerlerindeki iyileşmede düşüş gözlemlenmiştir. Hegzagonal yapılu BNNP nano takviye malzemeleri, kimyasal olarak inert davranış sergilemelerinin ve yüksek yüzey enerjisine sahip olmalarının yanı sıra bor ve azot atomlarının elektronegatifliklerindeki farklılıktan ötürü güçlü kovalent bağ oluşturmaları dolayısıyla güçlü topaklaşma eğilimine sahiptirler (Zheng ve diğ., 2018). Bu sebepten ötürü bu tez çalışmasındaki MWCNT ve SNP malzemelerine nispeten daha düşük kayma dayanımı değerleri sunan BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarındaki ana nedenin kaynağı hegzagonal yapıdaki BNNP malzemesinin çok daha fazla topaklaşma eğilimi olduğu düşünülmektedir. Ağırlıkça %0,5-%4 MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri incelendiğinde Şekil 4.3-b'de de görüldüğü üzere ağırlıkça %1 MWCNT takviyesine kadar kayma dayanımı değerleri kayda değer bir şekilde sürekli olarak artış göstermiş ve en yüksek kayma dayanımı değerine 20,74 MPa ile takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla %60 iyileşme kaydedilerek ulaşılmıştır. En düşük kayma dayanımı değeri ise ağırlıkça %0,5 MWCNT takviyesinde 15,63 MPa olarak yaklaşık %20 iyileşmeyle gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %1 olarak tespit edilen optimum ağırlık oranından sonra kayma dayanımı iyileşmesinde bir miktar düşüş kaydedilmiştir.



Şekil 4.3. Takviyesiz ve farklı ağırlık oranlarında a) BBNP, b) MWCNT ve c) SNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri

Benzer şekilde Aradhana ve diğ. (2018) içerisine ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında MWCNT takviye ettikleri epoksi yapıştırıcı ve alüminyum plakalarla oluşturdukları yapıştırma bağlantılarına tek tesirli kayma testi uygulayarak bağlantıların kayma dayanımlarını tespit etmişlerdir. Takviyesiz numunelerle kıyaslandığında ağırlıkça %1 MWCNT takviyesinde maksimum kayma dayanımı %48,2'lik artış ile elde edilerek bu artışın sebebi MWCNT'lerin yüksek çap-boy oranlarından ötürü epoksiyle iyi etkileşim kurmasına atfedilmiştir. Ağırlıkça daha yüksek MWCNT takviyesindeki kayma dayanımı değerlerindeki düşüş hasar başlangıcına ve kolay yayılmasına neden olan partiküllerin

topaklaşmasına atfedilmiştir. Öte yandan Jojibabu ve diğ. (2016), AA6061 alüminyum plakaları %0,2-%2 aralığında farklı ağırlık oranlarında MWCNT takviye ettikleri epoksi yapıştırıcı ile tek tesirli olarak birleştirmişler ve farklı ağırlık oranlarındaki MWCNT takviyelerinin kayma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmadaki maksimum kayma dayanımına ağırlıkça %1 MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarında ulaşıldığı kaydedilmiştir. Daha düşük ağırlık oranlarında, MWCNT'lerin homojen olarak dağılarak epoksi matris ile etkin yük transferini sağlayan güçlü bir arayüzey bağı oluşturdıkları belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında da literatür çalışmalarına uyumlu olarak optimum MWCNT takviye oranı ağırlıkça %1 olarak tespit edilmiş olup daha yüksek takviye oranlarında dayanım iyileşmesinde bir miktar düşüş tespit edilmiştir. Literatürde, yüksek takviye oranlarında MWCNT takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarındaki düşüşün sebebi, spesifik olarak MWCNT'lerin güçlü van der Waals etkileşimleri bulundurarak dolaşmış demetler halinde birbirleri arasında topaklaşmasına neden olarak homojen dağılım durumlarının engellenmesine ve zayıf arayüzey bağının MWCNT'ler ve polimer arasındaki yük transferinin engellenmesine atfedilmiştir (Sydlik ve diğ., 2013). Topaklaşan MWCNT'ler, epoksi yapıştırıcının mekanik özelliklerini zayıflatarak gerilim konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Bu sebeple MWCNT'lerin dağılımını iyileştirmek ve MWCNT'ler ile epoksi polimeri arasındaki arayüzey bağını geliştirmek için MWCNT'lerin fonksiyonelleştirilmesi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Cui ve diğ., 2013). Öyle ki, bu tez çalışmasında optimum MWCNT takviye oranının ötesinde bariz bir kayma dayanımı düşüşünün olmaması -COOH ile fonksiyonelleştirilmiş MWCNT'lerin kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

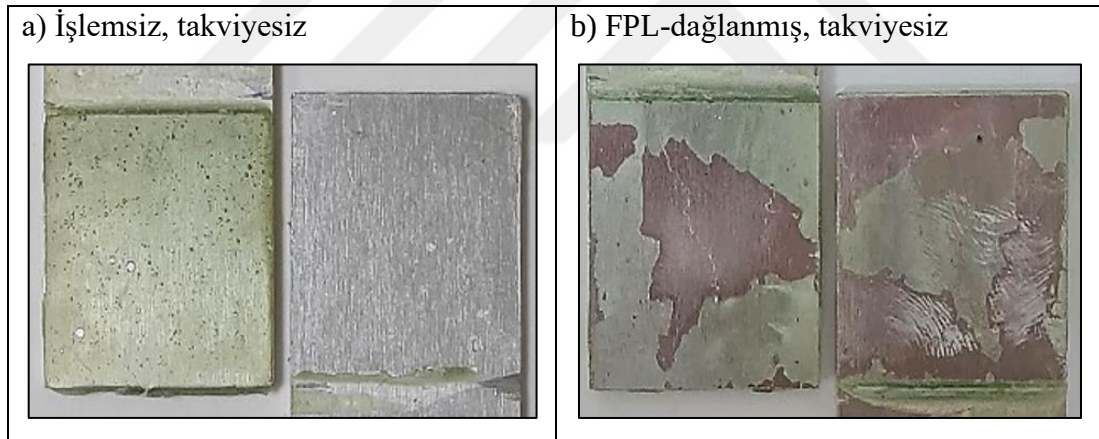
Şekil 4.3-c'de epoksi içerisine ağırlıkça %2-%20 oranlarında SNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri verilmiştir. BNNP ve MWCNT'nin aksine SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında kayma dayanımında gözlemlenen iyileşme yüksek takviye oranlarında çok daha kayda değer olmuştur. Yalnızca SNP takviyesinde değil aynı zamanda çalışmadaki tüm tekil takviyeli yapıştırma bağlantıları içerisinde en yüksek kayma dayanımı değerine ağırlıkça %10 SNP takviyesinde FPL-dağlanmış takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla %104 iyileştirmeye birlikte 26,48 MPa değeriyle ulaşılmıştır. SNP takviyesi durumunda yapıştırma bağlantılarının kopma yükünün yanı sıra kopma uzamaları geliştirilerek hasar gecikmiştir. Bu sebeple, yüksek kayma dayanımı değerleri eldesi SNP'nin, takviye

edildiği yapıştırma bağlantılarını toklaştırmaya atfedilmiştir. BNNP ve MWCNT takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarına kıyasla SNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının kopma uzaması değerleri özellikle ağırlıkça yüksek takviye oranlarında ön plana çıkmıştır. İncelenen literatür çalışmalarında (Saraç ve diğ., 2019); (Dittanet ve Pearson, 2012); (Liang ve Pearson, 2010) tokluğu önemli ölçüde artırdığı saptanan SNP'nin epoksi yapıştırıcıya takviye edilmesiyle bu tez çalışmasında özellikle ağırlıkça %10 takviye oranında dikkate değer bir kopma uzaması artışı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Ayatollahi ve diğ. (2017), 7075-T6 alüminyum plakaları ağırlıkça %0,2, %0,5 ve %0,8 SNP takviye ettikleri epoksi yapıştırıcı ile birleştirmişler ve en yüksek kayma dayanımı değerine %0,8 SNP takviyesinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla %26 iyileştirmeye ulaşmışlardır. Araştırmacılar, kayma dayanımı değerlerindeki bu pozitif gelişmeyi SNP takviyesiyle birlikte yapıştırma bağlantılarının kopma uzaması ve kopma yükü değerlerinin iyileşmesine atfetmişlerdir. Ağırlıkça %10 olarak tespit edilen optimum SNP oranının ötesinde ağırlıkça %15 ve %20 SNP takviyelerinde epoksi yapıştırıcının viskozitesi önemli ölçüde artarak alüminyum yüzeyi ıslatabilirliği büyük ölçüde azalma göstermiştir. Bu bağlamda, kayma dayanımı değerlerindeki iyileşmede düşüş gözlemlenmesi artan yapıştırıcı viskozitesine bağlanmıştır. Zhou ve diğ. (2016) benzer sonuçlar bildirdikleri çalışmalarında paslanmaz çelik plakaları ağırlıkça %10, %20 ve %40 SNP ile takviyelendirdikleri epoksi yapıştırıcı ile birleştirmişler ve %10 ve %20 SNP takviyesinde maksimum kayma dayanımı değerine %20 iyileştirmeye ulaşmışlardır. Ağırlıkça %40 SNP takviyesinde yapıştırıcının viskozitesinin önemli ölçüde artarak paslanmaz çelik yüzeyleri ıslatamadığı eklenerek düşen kayma dayanımı iyileşmesi bu duruma atfedilmiştir.

4.2.1. Tekil Nano Malzeme Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin İncelenmesi

Gerçekleştirilen kayma testlerinin ardından, takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar türlerinin tayini amacıyla kopma yüzeylerinden dijital kamera vasıtasıyla alınan görüntüler sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülmektedir. Şekil 4.4-a'da görülen herhangi bir ön yüzey işlemi uygulanmamış, takviyesiz yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyi incelendiğinde, epoksi yapıştırıcının alüminyum plakaların yalnızca birinin yüzeyinde kaldığı ve diğer yüzeyde yapıştırıcı bulunmadığı yani

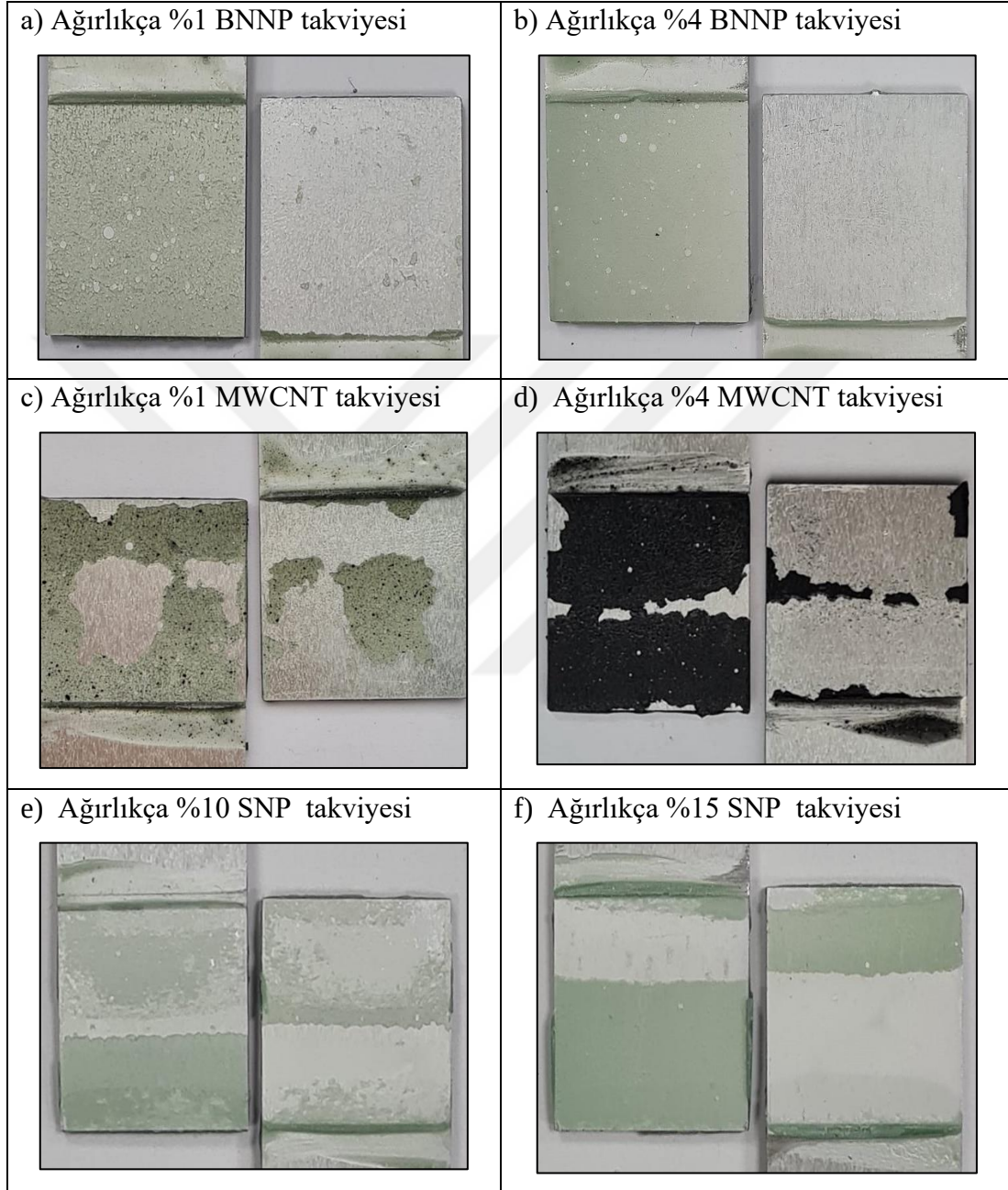
tamamen adhezif olarak hasarlandığı tespit edilmiştir. Prolongo ve Urena'nın (2009) çalışmalarında belirttikleri gibi epoksi yapıştırıcı yapıştırılan yüzeyleri tam olarak ıslatamadığında iyi bir yapışma sağlanamaz. Bu durum gerçekleştirilen temas açısı ölçüm sonuçlarıyla da örtüşmekte olup alüminyum yüzey tam olarak ıslatılamadığı için hasar alüminyum/epoksi arayüzünde oluşarak adhezif olarak meydana gelmiştir. Öte yandan, FPL-dağlanmış alüminyumlarla oluşturulmuş takviyesiz yapıştırma bağlantılarında (Şekil 4.4-b) bölgesel olarak her iki alüminyum yüzeyinde de yapıştırıcının tutunduğu, yapıştırıcının alüminyum plaka yüzeylerini daha iyi ıslattığı ve dolayısıyla işlemsiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla adhezif hasarın daha az baskın olduğu tespit edilmiştir. Ön yüzey işleminin alüminyum yapıştırma bağlantılarının mekanik performansı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmada (Abid ve diğ., 2020) uygulanan ön yüzey işleminin birlikte takviyesiz yapıştırma bağlantısının aksine alüminyum yüzeyindeki boşlukların yapıştırıcı tarafından doldurulduğu ve yapıştırma bağlantılarında görülen hasarın adheziften adhezif-kohezif karışık hasara döndüğü belirtilmiştir.



Şekil 4.4. Herhangi bir nano malzeme takviye edilmemiş a) işlemsiz ve b) FPL-dağlanmış yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri

Şekil 4.5-a'da optimum BNNP takviye oranına (ağırlıkça %1) sahip yapıştırma bağlantısının Şekil 4.5-b'de ise optimum takviye oranının ötesinde (ağırlıkça %4) takviye oranına sahip yapıştırma bağlantısının kopma yüzeyi görülmektedir. Her iki BNNP takviye oranı için de hasarın epoksi yapıştırıcı ve alüminyum arayüzünde kaldığı dolayısıyla adhezif hasarın öne çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum BNNP takviyesi durumunda nispeten daha düşük kayma dayanımı değerlerini doğrular nitelikte olmuştur. Jakubinek ve diğ. (2018), %1-%5 ağırlık oranlarında BNNT takviye ettikleri tüm

yapıştırma bağlantılarında, epoksinin dayanımının epoksi-alüminyum arayüzünün dayanımından daha yüksek olduğunu belirterek esas olarak adhezif hasar gözlemlediklerini belirtmişlerdir.



Şekil 4.5. BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının farklı takviye oranları için hasar yüzeyleri

Şekil 4.5-c’de ağırlıkça %1 MWCNT takviyeli ve Şekil 4.5-d’de ağırlıkça %4 MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri görülmektedir. Ağırlıkça %1

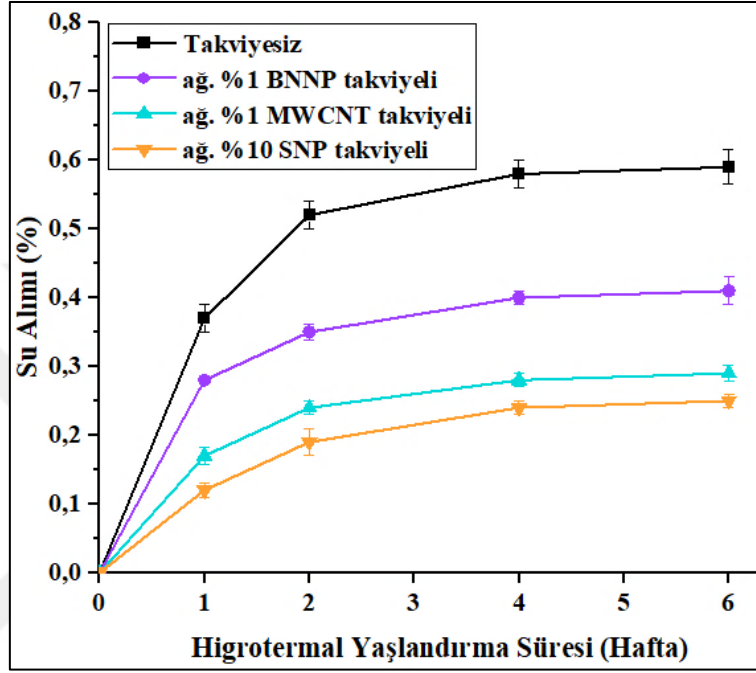
MWCNT takviyesinde yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunduğu ve yapıştırıcının alüminyum yüzeyleri arasında paylaşıldığı görülürken ağırlıkça %4 MWCNT takviyesinde adhezif bölgelerin çok daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Akpınar ve diğ. (2017) ağırlıkça %0,25-%3 CNT-COOH takviye ettikleri yapıştırma bağlantılarında optimum olarak tespit ettikleri ağırlıkça %1 CNT-COOH takviyesinde hasarın yapışma bölgesinin kenarlarından merkezine doğru yavaşça ilerlediğini ve bu durumun hasar yükünün artmasına pozitif etki ettiğini belirterek kopma yüzeylerinde yapıştırıcı tabakasının yapıştırılan yüzeylerin her iki tarafında eşit olmadığını ve özel kohezif hasar oluştuğunu belirtmişlerdir. Ağırlıkça %10 SNP takviyeli yapıştırma bağlantısının hasar yüzeyi (Şekil 4.5-e) incelendiğinde ise SNP takviyesiyle birlikte epoksi-alüminyum arayüzünün önemli ölçüde iyileştirildiği tespit edilmiş ve epoksi yapıştırıcının çoğunlukla her iki alüminyum yüzeyinde kalarak kohezif hasarın baskın olduğu adhezif-kohezif karışık hasar türünün meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, tekil takviyeli yapıştırma bağlantıları arasında en yüksek kayma dayanımı değerlerinin ağırlıkça %10 SNP takviyesinde elde edilmesini destekleyici olmuştur. Benzer sonuçlar bildiren Ayatollahi ve diğ. (2017), SNP takviyesiyle birlikte yapıştırma bağlantısındaki adhezyon kuvvetlerinin geliştiğini buna bağlı olarak kohezif baskın hasar yüzeyleri elde edildiğini bildirmişlerdir. Ağırlıkça %15 SNP takviyeli yapıştırma bağlantısının hasar yüzeyi (Şekil 4.5-f) gözlemlendiğinde yapıştırıcının artan viskozitesine bağlı olarak alüminyum yüzeylerinin ıslanması zorlaşmış ve bu durum hasar mekanizmalarına yansarak daha adhezif hasar yüzeyi oluşumuna yol açmıştır.

4.3. Higrotermal Yaşlandırma Koşullarının Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Performansına Etkilerinin İncelenmesi

4.3.1. Higrotermal Yaşlandırma İşlemine Maruz Kalmış Yapıştırma Bağlantılarının Su Alımı Değerlerinin İncelenmesi

Higrotermal yaşlandırma öncesinde tekil nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı sonuçları baz alınarak belirlenen optimum takviye oranlarına (ağırlıkça %1 BNNP, ağırlıkça %1 MWCNT ve ağırlıkça %10 SNP) sahip yapıştırma bağlantıları hazırlanarak 6 haftaya kadar 60 °C ve %100 bağıl nemde higrotermal yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Her bir yaşlandırma süresinin ardından kayma testine tabi tutulmadan önce yapıştırma bağlantılarının yüzde su alım oranları

tespit edilmiş ve Şekil 4.6'da her bir higrotermal yaşlanma süresi için takviyesiz ve BNNP, MWCNT, SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının su alım oranları görülmektedir. Su alım oranlarından da görüldüğü üzere 2 haftalık higrotermal yaşlandırma süresinin ardından yapıştırma bağlantılarının belirli bir doygunluk seviyesine ulaştığı açıktır.



Şekil 4.6. Higrotermal yaşlandırma süresine karşı takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının yüzde su alımları

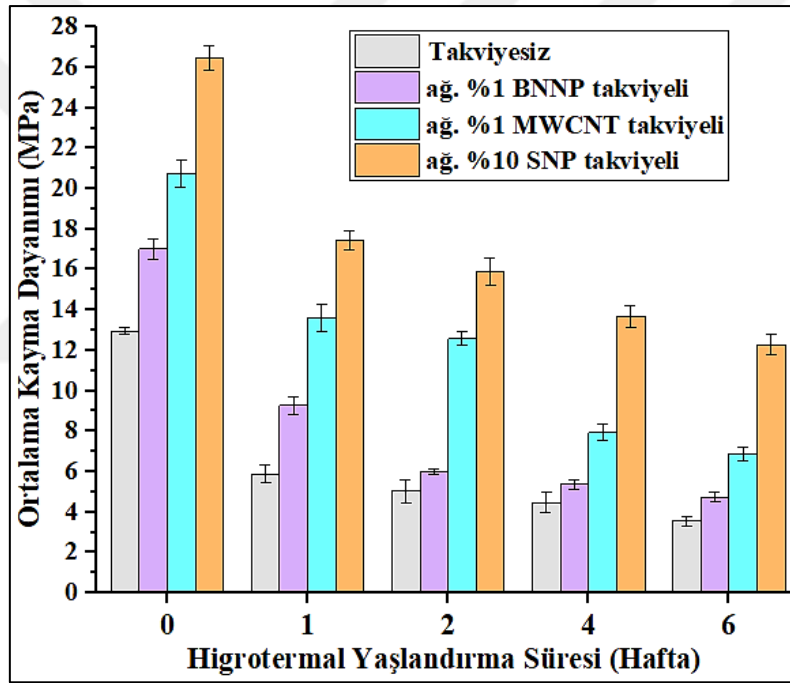
Takviyesiz yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında epoksi içerisine BNNP, MWCNT ve SNP malzemelerinin takviye edilmesi yapıştırma bağlantılarının su nüfuziyetini sınırlandırmıştır. Bu bağlamda, 2 haftalık yaşlandırma süresi sonrasında BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının su alım oranları takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla sırasıyla yaklaşık %33, %54 ve %63 oranında düşmüştür. Ek olarak, 6 haftalık higrotermal yaşlanmanın ardından BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının su alım oranları takviyesiz yapıştırma bağlantılarına nazaran sırasıyla yaklaşık olarak %31, %51 ve %58 daha düşük olarak belirlenmiştir. Yapıştırma bağlantılarının su alımı sonuçlarından da görüldüğü üzere nano malzeme türünden bağımsız olarak epoksi yapıştırıcıya yapılan nano malzeme takviyeleri sonucunda higrotermal yaşlandırma koşulları altında yapıştırma bağlantılarının nem difüzyonuna olan dirençleri artmıştır. Nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantıları

arasında ise su molekülleri ile BNNP'nin bor ve azot atomları arasında oluşan hidrojen bağları nedeniyle en yüksek su alımı BNNP takviyesinde elde edilmiştir. MWCNT takviyesinde ise takviyesiz ve BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarına kıyasla daha düşük su alımı gerçekleşmiştir. Starkova ve diğ. (2013) suyun difüzyon hızının, polimere takviye edilen nano boyutlu hidrofobik malzemelerle azaltılabildiğini ve yüksek en/boy oranına sahip takviye malzemelerinin difüze olan su moleküllerinin yol uzunluğunu artırması dolayısıyla polimer yapı içerisine suyun taşınmasına karşı etkili bariyerler olduklarını belirtmişlerdir. Bu çalışma kapsamında da doğası gereği hidrofobik olan MWCNT (Bal ve diğ., 2015) takviyeli yapıştırma bağlantılarının geliştirilmiş su emme direnci hem MWCNT'nin yüksek çap/boy oranına hem de hidrofobik doğasına atfedilmiştir. Moleküler dinamik simülasyon kullanılarak benzer uzunluk ve çaptaki bor nitrür nanotüp ve CNT'lerin su geçirgenliklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada (Won ve Aluru, 2007) bor nitrürün hidrofilik karakter sergilediği ve su geçirgenliğinin CNT'den daha yüksek olduğu bildirilmiştir. BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının su alma oranları karşılaştırıldığında, SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının BNNP ve MWCNT takviyelerine kıyasla su emmeye karşı daha etkili olduğu belirlenmiştir. Aslında doğası gereği hidroksil gruplarına sahip olan ve bu sebeple daha fazla su alma eğilimi sergilemesi beklenen SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının beklenilenin aksine daha az su emilimi gerçekleştirmesinin sebebi epoksi içerisine BNNP ve MWCNT'ye nazaran çok daha yüksek oranda (ağırlıkça %10) SNP takviye edilmesi olmuştur. Nispeten daha yüksek oranda SNP takviyesi sayesinde epoksi içerisindeki serbest hacim SNP'ler tarafından işgal edilmiş ve polimerin moleküler hareketliliği kısıtlanarak yapıştırma bağlantılarının daha az su alması kaçınılmaz olmuştur.

4.3.2. Higrotermal Yaşlandırma İşleminin Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımına Etkilerinin İncelenmesi

Higrotermal yaşlandırma koşullarının yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek üzere gerçekleştirilen kayma testleri sonucunda 6 haftaya kadar varan higrotermal yaşlandırma öncesi ve sonrasında takviyesiz ve BNNP (ağırlıkça %1) MWCNT (ağırlıkça %1), SNP (ağırlıkça %10) takviyeli yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Higrotermal yaşlandırılmış yapıştırma bağlantılarının kayma testi sonuçları incelendiğinde, genel olarak kayma

dayanımı değerlerinin su alımı değerlerine paralel şekilde 2 haftalık higrotermal yaşlandırma süresine kadar lineer olarak hızlı bir şekilde azaldığı ve daha sonra daha stabil bir eğri eğiliminde olduğu saptanmıştır. Bu bilgiler ekseninde, 2 haftalık higrotermal yaşlandırmanın ardından takviyesiz yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değeri yaklaşık %65 oranında azalırken, BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları sırasıyla yaklaşık %61, %39 ve %40 oranında azalmıştır. Öte yandan, 6 haftalık higrotermal yaşlandırma süresinin ardından takviyesiz yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değeri yaklaşık %72 oranında azalırken, BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımları sırasıyla yaklaşık %72, %67 ve %54 oranında düşüş sergilemiştir.



Şekil 4.7. Higrotermal yaşlandırma süresine karşı takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri

Kayma dayanımı açısından değerlendirildiğinde, tüm higrotermal yaşlandırma sürelerinde nano malzeme türü gözetmeksizin daha yüksek kayma dayanımı değerleri elde edilmiştir. Nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantıları arasında ise ağırlıkça %1 BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma koşulları karşısında pek varlık gösteremediği tespit edilmiştir. Literatür araştırmalarında, hegzagonal BNNP'nin hidrofilik (Agrawal ve Chandrakar, 2020); (Lee ve diğ., 2009); (Cui ve diğ., 2013) ve hidrofobik (Navaneethakrishnan ve diğ., 2020); (Ayoob ve diğ., 2018)

özelliklere sahip olduğunu gösteren farklı çalışmalara rastlanılmış olup bu konuda ortak bir kanı olmadığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında kullanılan BNNP'nin yüksek su alma eğilimi sergilemesi ve buna paralel olarak MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarına kıyasla daha düşük kayma dayanımı değerleri sunması dolayısıyla hidrofilik karakterde olduğu düşünülmüştür. Karbon esaslı bir nano malzeme olan MWCNT'nin hidrofobik yapısı ve bariyer özellikleri (Prolongo ve diğ., 2012) sayesinde geliştirilmiş su emme direnci sonucunda MWCNT takviyesinde kayma dayanımı değerlerinde daha etkili sonuçlar elde edilmiştir. Aynı amaçla gerçekleştirilmiş bir çalışmada Jojibabu ve diğ. (2017), ağırlıkça %0,5 karbon esaslı nano malzemeler takviye ettikleri epoksi yapıştırıcı ile oluşturdukları alüminyum yapıştırma bağlantılarını 12 haftaya kadar higrotermal yaşlandırma prosesine maruz bırakmışlardır. Higrotermal yaşlandırma sonrasında takviyesiz yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinde %55 düşüş gözlemlerken MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinde yalnızca %30 oranında bir azalma gözlemlenmişler ve bu durumu epoksi yapıştırıcıya yapılan nano malzeme takviyesinin polimer zincirlerinin hareketlerini kısıtlayarak MWCNT'lerin su absorpsiyonuna karşı etkili bir bariyer görevi gördüğünü belirtmişlerdir.

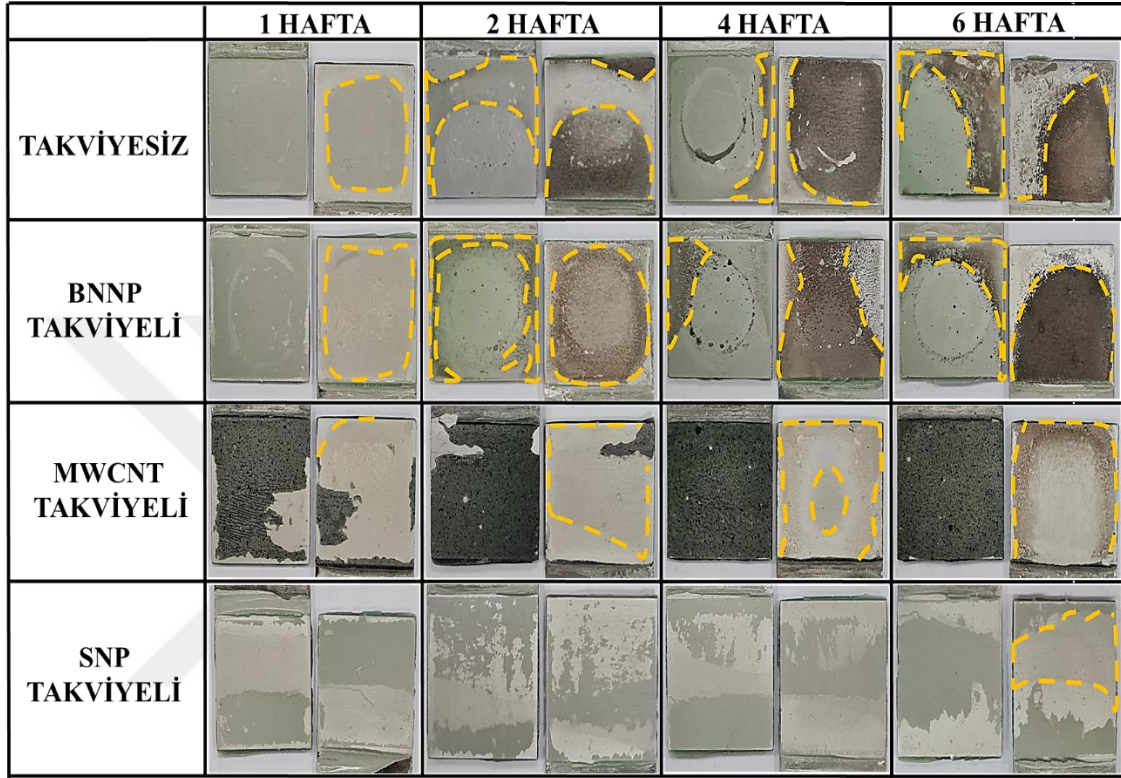
Higrotermal yaşlandırılmış yapıştırma bağlantıları arasında en yüksek kayma dayanımı değerleri sunan ve bu açıdan ön plana çıkan nano malzeme SNP olmuştur. SNP takviye edilmiş yapıştırma bağlantılarının su alma değerleriyle de ilişkilendirildiğinde suyun difüzyonuna karşı gösterdiği direnç sayesinde higrotermal yaşlandırma koşullarından en az etkilenen yapıştırma bağlantıları SNP takviyeli olanlar olmuştur. SNP'nin sahip olduğu hidroksil gruplarından ötürü hidrofilik karakter sergileyerek daha yüksek su absorpsiyonu ve daha düşük mekanik performans sunması beklense de çalışmada (Khoramishad ve diğ., 2022) belirtildiği üzere bazı durumlarda epoksi matrislere hidrofilik nano malzemelerin takviye edilmesi, özellikle nano boyutlu gözeneklerde polimerlerin polaritesini artırarak su molekülleri nano gözenekler içindeki polar segmentlere daha kolay bağlanabilmekte ve biriken su molekülleri nano gözenekleri tıkayarak daha fazla suyun nüfuziyetini sınırlandırmaktadır. Bu tez çalışmasında da epoksi içerisine yüksek oranda (ağırlıkça %10) SNP takviye edilmesiyle epoksinin polar bölgelerine tutunan su molekülleri suyun geçiş yolunun daralmasına sebep olmuş ve böylece daha az su emilimi sayesinde daha yüksek kayma dayanımı sonuçları elde

edilmiştir. Benzer bir çalışmada (Zhou ve diğ., 2016) ağırlıkça %10 ve %20 SNP takviye ettikleri epoksi yapıştırıcı ve paslanmaz çelik plakalarla oluşturdukları tek tesirli yapıştırma bağlantılarını 3 haftaya kadar 60°C'de higrotermal yaşlandırmaya tabi tutmuşlardır. Tüm higrotermal yaşlandırma süreleri boyunca takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla daha iyi kayma dayanımı değerleri elde edilen SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında gözlemlenen pozitif katkılar yüzeyi hidroksil gruplarla modifiye edilmiş SNP'nin su moleküllerini absorbe ederek epoksinin segmentleri arasındaki köprüyü güçlendirmesine atfedilmiştir. Başka bir çalışmada (Khoramishad ve diğ., 2018) alüminyum plakaları ağırlıkça %0,1, %0,3 ve %0,5 MWCNT ve ağırlıkça %1, %3 ve %5 silisyum karbür (SiC) takviye ettikleri epoksi esaslı yapıştırıcıyla tek tesirli olarak birleştirmişlerdir. Yapıştırma bağlantılarını 45 güne kadar 60 °C sıcaklıkta deiyonize suda bekleten araştırmacılar kayma dayanımı değerlerini incelediklerinde, tüm yaşlandırma sürelerinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarının en düşük performansı gösterdiklerini ve daha düşük takviye oranlarında her iki nano malzeme takviyesinde de yaklaşık sonuçlar elde edilirken yüksek takviye oranında SiC takviyeli yapıştırma bağlantılarının öne çıkarak MWCNT takviyeli yapıştırma bağlantılarına kıyasla %10 daha yüksek kayma dayanımı değerleri sunduklarını belirtmişlerdir.

4.3.2.1. Higrotermal Yaşlandırmaya Maruz Kalmış Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin İncelenmesi

Takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının 1, 2, 4 ve 6 haftalık higrotermal yaşlandırma işlemi sonrasında hasar yüzeylerinden dijital kamera ile alınan görüntüler Şekil 4.8'de verilmiştir. Higrotermal yaşlanmaya maruz kalan yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde, suyun yapıştırma bağlantıları tarafından difüzyonu nedeniyle azalan kayma dayanımı değerlerini destekleyen sonuçlar elde edilmiştir. Bu bağlamda, özellikle daha uzun higrotermal yaşlandırma sürelerinde yapıştırma bağlantılarının kenar bölgelerinden giren su moleküllerinin epoksi yapıştırıcıyı hidrolize uğratarak bozduğu ve epoksi-alüminyum arayüzünün de suyun absorpsiyonu dolayısıyla negatif yönde etkilenecek özellikle bağlantıların merkez bölgesinde hidroliz dolayısıyla hasara sebebiyet verdiği saptanmıştır. Şekil 4.8'de higrotermal yaşlandırma sonrasında yapıştırma bağlantısı içerisine giren su moleküllerinden etkilenen ve oksitlenen bölgeler sarı çizgilerle ifade edilmiştir. Bir

derleme çalışmada (Pethrick, 2014) higrotermal yaşlandırma etkisiyle yapışma dayanımının azalması, yapıştırma bağlantılarının daha yüksek gerilime maruz kalan kenar bölgelerinin artan nem geçirgenliğine ve akabinde yapıştırma bağlantılarının merkez bölgelerine yakın yapıştırıcının hidrolizi sonucu arayüzün hasarlanmasına atfedilmiştir.



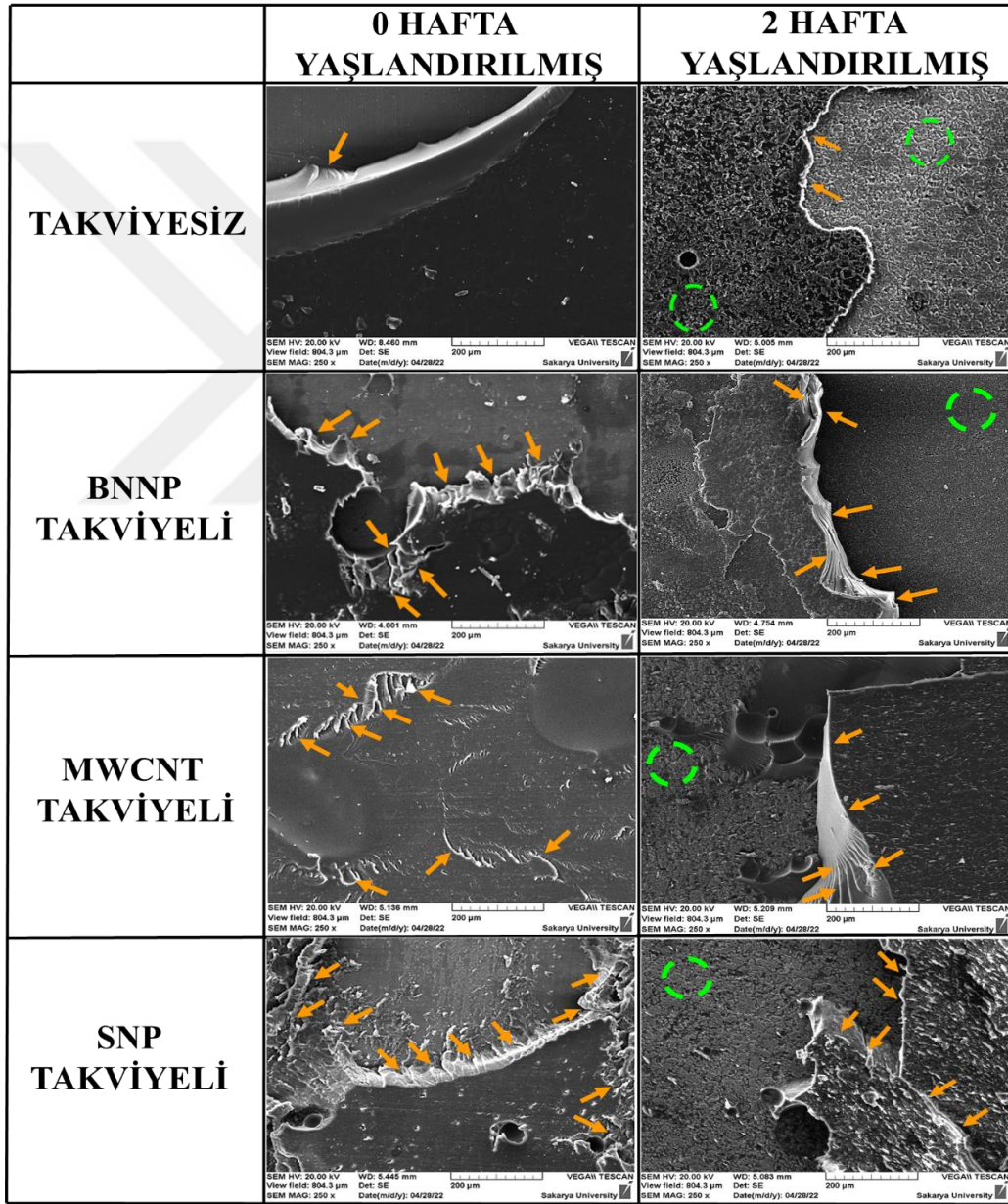
Şekil 4.8. Higrotermal yaşlandırma sonrasında takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri

Nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantıları, su absorpsiyonuna karşı takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla daha yüksek direnç göstermiş olup bu durum hasar yüzeylerinde de bariz bir şekilde görülmektedir. Kayma dayanımında öne çıkan SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinin higrotermal yaşlandırma koşullarından daha az etkilendiği görülürken SNP'yi sırasıyla MWCNT ve BNNP takviyeli yapıştırma bağlantıları takip etmiştir. Hasar yüzeyleri incelemelerinde suyun yapıştırma bağlantılarını ne derece etkilediğine dair ipuçlarına rastlanmıştır. Öyle ki, yapıştırma bağlantılarının neredeyse doygunluğa ulaştığı 2 haftalık higrotermal yaşlandırma işleminden sonra hasar yüzeyleri incelendiğinde takviyesiz ve BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının çok daha fazla su absorbe ettiği açıkça görülmektedir. Hatta takviyesiz ve BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının hidrolize

uğradığı ve alüminyum plakaların su moleküllerinin nüfuziyetinden ötürü oksitlenerek kararmaya başladığı gözlemlenmiştir. Benzer bir çalışmada yapıştırma bağlantılarını 60 °C’lik musluk suyu içerisinde 40 güne kadar bekleten araştırmacılar (Zheng ve diğ., 2021) alüminyumun yüzeyinin oksitlenerek alüminyum plakanın renginin griden siyaha döndüğünü belirtmişlerdir. 2 haftalık higrotermal yaşlandırmanın ardından, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının su absorpsiyonuna karşı kararlı bariyerler oluşturarak suya karşı direnç gösterdiği tespit edilmiş olup en az hasara ise SNP takviyeli yapıştırma bağlantısında rastlanmıştır. Aynı amaçla gerçekleştirilmiş bir çalışmada yapıştırıcı içerisine karbon esaslı nano malzeme takviye eden Jojibabu ve diğ. (2017), 12 haftaya kadar higrotermal çevrime maruz bıraktıkları alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerini incelediklerinde, yaşlandırma öncesinde tüm yapıştırma bağlantılarında tamamen kohezif hasar gözlemlerken higrotermal yaşlandırma sonrasında epoksinin nem absorpsiyonuyla şişmesi nedeniyle bozularak arayüz gerilimlerine yol açtığını belirtip hasarın adhezif dönüşüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca nano malzeme takviyesinin hem su alımını azalttığını hem de epoksi yapıştırıcının dayanımını artırarak şişme eğilimini azalttığını eklemişlerdir. 6 haftalık higrotermal yaşlandırmadan sonra, tüm yapışkan bağlantıların kırılma yüzeylerinde önemli bir su varlığı gözlemlenmiş olup özellikle takviyesiz ve BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının yüksek su absorpsiyonu dolayısıyla katastrofik bir şekilde hasara uğradığı gözlemlenmiştir. MWCNT takviyesinde ise yapıştırma bağlantısının kenarlarından merkezine doğru belirgin bir şekilde su girişinin olduğu ve bu durumun arayüzü olumsuz yönde kayda değer bir şekilde etkilediği görülmüş olup kayma dayanımı değerlerindeki bariz düşüşü de destekleyici bir sonuçla karşılaşılmıştır. 6 hafta higrotermal yaşlandırılmış SNP takviyeli yapıştırma bağlantısının hasar yüzeyinde de belirli ölçüde suyun varlığına rastlanılmış olsa da kendisinden sonra en iyi performansı sergileyen MWCNT’nin 2 haftalık yaşlandırılmış yapıştırma bağlantısından bile çok daha iyi bir hasar yüzeyi görüntüsü sunmuştur.

Dijital kamerayla makro boyutta yapılan hasar tespitlerinin sonrasında daha detaylı hasar analizi yapabilmek ve su varlığında yapıştırma bağlantılarının davranışlarını tayin etmek amacıyla higrotermal yaşlandırma öncesinde (0 hafta) ve neredeyse doygunluğa ulaşılan 2 haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında yapıştırma bağlantılarının kopma yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmış olup Şekil 4.9’da görülmektedir. Higrotermal yaşlandırma öncesinde yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde

takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantıları arasındaki en net fark takviyesiz yapıştırma bağlantısında daha pürüzsüz bir hasar yüzeyinin görülmesi ve nano malzeme takviyesiyle birlikte pürüzlülük seviyesinin artması olmuştur. Bu bölgeler Şekil 4.9’da turuncu renkli oklarla işaretlenmiş olup artan pürüzlülükle birlikte hasar başlangıcı geciktirilmiş yahut ilerlemesi sınırlandırılmıştır. Özellikle SNP takviyeli yapıştırma bağlantısında bu durum çok daha aşikar olup yüksek kayma dayanımı sonuçlarıyla da birbirini destekler sonuçlar doğmuştur.



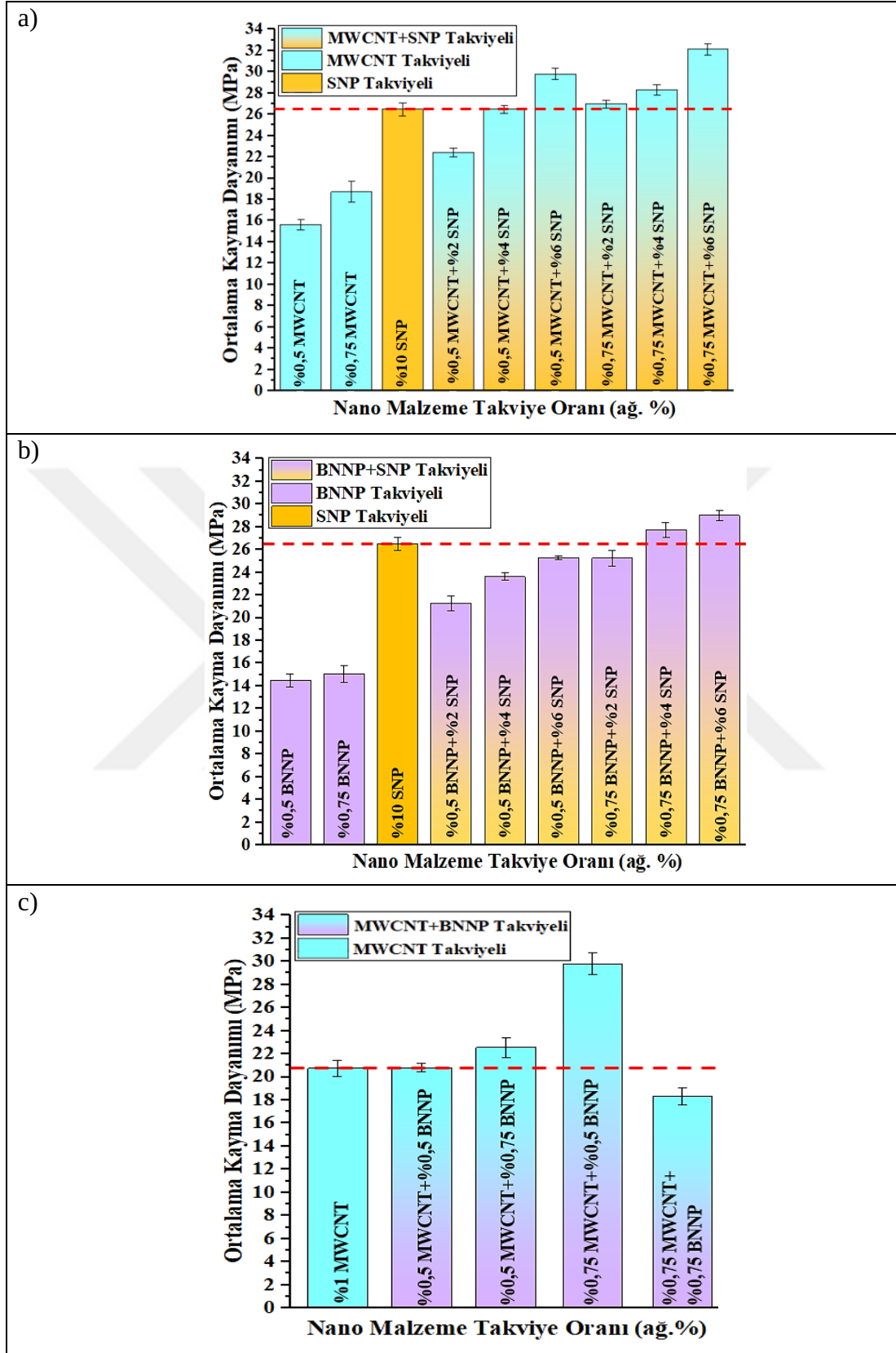
Şekil 4.9. Higrotermal yaşlandırma öncesinde (0 hafta yaşlandırılmış) ve 2 haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında takviyesiz ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kopma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Benzer şekilde Ayatollahi ve diğ. (2017), SEM analizi yardımıyla inceledikleri MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla daha pürüzlü bir yapı oluşumunun daha kompleks hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasını teşvik ettiğini ve dolayısıyla hasar ilerlemesi sırasında daha yüksek enerji absorpsiyonuyla daha yüksek kayma dayanımı eğilimine yol açtığını bildirmişlerdir. SNP takviyesinin yapıştırma bağlantılarının mekanik performansları üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışmada (Zhou ve diğ., 2016), hasar yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde nano malzeme takviyesiyle birlikte hasar yüzeyinde oluşan pürüzlülük sayesinde kayma dayanımı artışına yol açan plastik deformasyonun takviyesiz duruma kıyasla daha yoğun olduğu bildirilmiştir. 2 haftalık higrotermal yaşlandırmanın sonrasında ise epoksi yapıştırıcının hidroliz olayı ile bozulduğu tespit edilmiş olup temsili hidroliz bölgeleri yeşil renkli dairelerle işaretlenmiştir. Nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında takviyesiz yapıştırma bağlantılarındaki hidrolizin çok daha belirgin olduğu görülmüştür. Takviyesiz yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma koşullarına karşı çok daha küçük bir dirence sahip olduğu ve nano malzeme takviyelerinin bağlantı içerisine girmeye çalışan su moleküllerine karşı bariyer oluşturarak daha yüksek oranda direnç gösterdiği kanaatine varılmıştır. Bu bağlamda, epoksi içerisine yapılan nano malzeme takviyelerinin yalnızca ilk gün değil aynı zamanda uzun süreli dayanım konusunda da yapıştırma bağlantılarının performanslarına pozitif yönlü etki ettiği saptanmıştır. Özellikle hem higrotermal yaşlandırma öncesinde hem de 2 haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında bu durum açıkça görülmektedir. Hegzagonal yapıli bor nitrür ve bor karbür takviye edilmiş alüminyum yapıştırma bağlantılarını 40 °C’lik distile edilmiş suyun içerisine daldıran ve higrotermal koşullara karşı performanslarını inceleyen Korkmaz ve Gültekin (2022), 60 günlük higrotermal yaşlandırma sonrasında SEM analizleriyle epoksideki değişimleri incelediklerinde, epoksi içerisine giriş yapan su moleküllerinin yapı içerisinde mikro gözenekler ve daha sonrasında da mikro çatlaklar oluşturduğunu belirtmişlerdir. Takviyesiz epoksi yapıştırıcının yapısında hidroliz etkisiyle büyük ölçekli boşluklar ve çatlaklar görülürken nano malzeme takviyesiyle birlikte epoksideki boşlukların işgal edildiğini ve mikro çatlakların büyümesine direnç göstererek epoksi matrisin dayanımını artırdığını bildirmişlerdir. Benzer olarak bu tez çalışmasında da Şekil 4.9’da görülen yeşil dairelerle

işaretlenmiş bölgelerde takviyesiz yapıştırma bağlantılarında çok daha büyük mikro çatlaklar oluştuğu ve nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarındaki mikro çatlakların daha küçük boyutlarla sınırlı kaldığı görülmüştür. Nano malzeme takviyesi sonucunda hasar yüzeylerinde görülen bu olumlu katkılar, kayma testi sonuçlarına da yansiyarak daha yüksek kayma dayanımı değerleri elde edilmiştir.

4.4. Hibrit Nano Malzeme Takviyesinin Yapıştırma Bağlantılarının Kayma Dayanımı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Tekil BNNP, MWCNT ve SNP takviyelerinin ardından yapıştırma bağlantılarının hem mekanik hem de maliyet performanslarının geliştirilip sinerjik etkiden faydalanılması amacıyla epoksi yapıştırıcı içerisine ağırlıkça farklı oranlarda BNNP, MWCNT ve SNP takviyelerinin ikili kombinasyonları takviye edilmiş olup Şekil 4.10'da kayma testi sonrasında elde edilen ortalama kayma dayanımı değerleri verilmiştir. Hibrit nano malzeme takviyesi fikrinin amaçlarından biri tekil nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarında elde edilen kayma dayanımı iyileştirmelerinin daha da artmasını sağlamak olduğundan gerçekleştirilen her bir hibrit nano malzeme takviye kombinasyonunda hedef olarak bir tekil nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değeri koyulmuş olup bu dayanım değerleri Şekil 4.10'da kırmızı renkli kesikli çizgilerle sembolize edilmiştir. MWCNT ve SNP hibrit takviyesiyle oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri (Şekil 4.10-a) incelendiğinde, özellikle ağırlıkça %0,5 MWCNT+%6 SNP ve ağırlıkça %0,75 MWCNT+%6 SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının ön plana çıktığı görülmekte olup ağırlıkça %10 SNP takviyesinde 26,48 olarak elde edilen kayma dayanımı değerleri sırasıyla 29,81 MPa ve 32,12 MPa değerlerine yükselmiştir. Hibrit takviye metoduyla epoksi yapıştırıcının performanslarını geliştirmeye yönelik bir çalışmada (Tang ve diğ., 2013) epoksi içerisine ağırlıkça %1 MWCNT+%10 SNP takviye edilmiş ve ardından çekme testine tabi tutulmuştur. Tekil MWCNT takviyesi durumunda takviyesiz epoksiye nazaran uzama değerlerinde bir miktar düşüş gözlemlenirken MWCNT ve SNP hibrit takviyesinde yapıştırıcının hem gerilme hem de uzama değerlerinde kayda değer bir artışla karşılaşılmıştır. Bu durum SNP takviyesiyle epoksinin viskozite artışına bağlı olarak kürlenme esnasında MWCNT'lerin hareketlerini ve dolayısıyla topaklaşmalarını sınırlandırmasına atfedilmiştir.



Şekil 4.10. Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının ortalama kayma dayanımı değerleri

MWCNT ve SNP hibrit takviyeleri sonrasında epoksi yapıştırıcının tokluk değerlerinin değişiminin incelendiği bir başka çalışmada (Hsieh ve diğ., 2011) ise ağırlıkça %0,06-%0,18 MWCNT ve ağırlıkça %2-%6 SNP olmak üzere farklı takviye oranlarında nano malzemeler epoksiye takviye edilmiştir. Artan MWCNT ve SNP takviye oranlarıyla doğru orantılı bir şekilde epoksinin tokluğunun arttığının bildirilmesinin yanı sıra SNP'lerin epoksi içerisinde homojen olarak dağıldığı ve artan SNP takviye oranının MWCNT dağılımını önemli ölçüde etkilemediği eklenmiştir. Bu bilgiler ışığında bu tez çalışmasındaki ağırlıkça yüksek MWCNT ve SNP takviye oranlarındaki kayma dayanımındaki olumlu gelişmeler MWCNT ve SNP nano malzemelerinin sinerji oluşturarak artan SNP takviye oranıyla birlikte MWCNT'lerin topaklaşmalarının engellenmesine ve yapıştırma bağlantılarının tokluk değerlerinin artışına atfedilmiştir. Benzer şekilde hibrit nano malzeme stratejisiyle sinerjik etkiden faydalanmayı hedefleyen bir çalışmada (Razavi ve diğ., 2018) epoksi yapıştırıcı içerisine 1:1 oranında ağırlıkça toplam %0,8 MWCNT ve SNP takviye ederek oluşturdukları yapıştırma bağlantılarında çalışmadaki maksimum kayma dayanımı %28 artışla tespit edilmiş olup MWCNT ve SNP hibrit takviyesiyle yapıştırma bağlantılarının tokluğunun arttığı bildirilmiştir. Şekil 4.10-b'de görülen BNNP ve SNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri incelendiğinde, her iki nano malzemenin de daha düşük oranda hibrit takviyeleri durumunda (ağırlıkça %0,5 ve %2) daha düşük kayma dayanımı değerleri elde edilirken artan nano malzeme takviye oranlarıyla birlikte kayma dayanımı değerleri de artış göstermiştir. Bu bilgiler ışığında, maksimum kayma dayanımına 29,00 MPa ile ağırlıkça %0,75 BNNP+%6 SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında ulaşılarak 26,48 MPa olan ağırlıkça %10 SNP takviyesinin üzerinde bir dayanım değeri elde edilmiştir. Benzer amaçla gerçekleştirilen bir çalışmada (Singh ve diğ., 2017) epoksi içerisine ağırlıkça %5 grafen+%10 bor nitrid takviye eden araştırmacılar oluşturdukları alüminyum yapıştırma bağlantılarında takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla kayma dayanımı değerlerinde %68'e varan iyileşmeler kaydetmişlerdir. Hibrit takviye durumunda komşu partiküller arasındaki çekim kuvvetlerinin engellenip nano malzemelerin topaklaşmasının önüne geçildiği belirtilmiş olup homojen nano malzeme dağılımının olduğu bildirilmiştir. MWCNT ve BNNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri incelendiğinde (Şekil 4.10-c) ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,75 BNNP hibrit takviyesi haricinde

optimum tekil MWCNT takviye oranı olarak belirlenen ağırlıkça %1 takviyesinde elde edilen 20,74 MPa değerinin üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek kayma dayanımı değerine MWCNT içeriğinin daha yüksek ve BNNP içeriğinin daha düşük olduğu ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,5 BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında 29,81 MPa ile ulaşılmıştır. MWCNT ve BNNP hibrit karışım kombinasyonundaki ağırlıkça en yüksek takviye içeriği olan %0,75 MWCNT+%0,75 BNNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında ise kayma dayanımı değerlerinde bariz bir düşüş yaşanmıştır. Epoksi yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %0,1-%0,5 aralığında farklı takviye oranlarında MWCNT+BNNP takviye eden Ekrem ve diğ. (2017), çalışmadaki en yüksek kayma dayanımına ağırlıkça %0,3 MWCNT+%0,5 BNNP takviyesinde ulaşmış olup MWCNT ve BNNP hibrit takviyesinin sinerjik etki yaratarak yapıştırma bağlantılarının kopması için daha yüksek enerji gereksinimi oluşturduğunu belirtmişlerdir. Optimum takviye oranının ötesinde kayma dayanımı değerinde önemli bir iyileşme kaydedemeyen araştırmacılar literatürde MWCNT ve BNNP takviyeleri için eşik değerler bulunduğunu ve hibrit takviye durumunda bu eşik değerlerin değişebileceğini belirterek nispeten daha yüksek takviye oranlarında bu eşik değerlerin aşılması nano malzemelerin topaklaşmasına bağlı olarak homojen dağılım durumlarını engelleyeceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da benzer şekilde takviye oranının eşik değerinin üzerine çıkılmasından ve nano malzemelerin topaklaşma olasılıklarının yüksek takviye oranlarında kayma dayanımında düşüşe sebebiyet verdiği değerlendirilmiştir.

Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarında genel olarak yüksek kayma dayanımı değerleri elde edilmiş olsa da ağırlık ve maliyet parametrelerine oranla ne derece bir değişimin elde edildiğini saptamak amacıyla her bir hibrit takviyeli nano malzeme kombinasyonlarının özgül dayanım ve maliyet/dayanım değerleri hesaplanarak Tablo 4.1’de sonuçlar verilmiştir. Tekil takviyeler arasında maksimum kayma dayanımını ağırlıkça %10 takviyesinde sunan SNP’nin epoksi yapıştırıcı içerisindeki oranının azaltılıp (%2, %4 ve %6) ek olarak hibrit olarak ağırlıkça %0,5 ve %0,75 MWCNT ve BNNP nano malzemelerinin takviyeleriyle ağırlık ve maliyet faktörlerine oranla yüksek dayanım sunan yapıştırma bağlantıları elde etmek hedeflenmiştir. Özellikle MWCNT ve SNP hibrit takviyelerinde ağırlık ve maliyet değerlerine oranla dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları eldesine ulaşılmış olup %0,5 MWCNT+%2 SNP takviyesi haricinde tüm takviye durumlarında ağırlıkça %10 SNP’nin üzerine çıkılmıştır.

Tablo 4.1. Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının özgül dayanım ve dayanım/maliyet değerleri

MWCNT+SNP HİBRİT TAKVİYESİ		
Ağırlıkça Nano Malzeme Takviye Oranları	Kayma Dayanımı/Yapıştırıcı Kütlesi (MPa/gr)	Kayma Dayanımı/Maliyet (MPa/TL)
%0,5 MWCNT	3,99	0,49
%0,75 MWCNT	4,77	0,58
%10 SNP	6,17	0,80
%0,5 MWCNT + %2 SNP	5,61	0,70
%0,5 MWCNT + %4 SNP	6,50	0,81
%0,5 MWCNT + %6 SNP	7,18	0,89
%0,75 MWCNT + %2 SNP	6,74	0,82
%0,75 MWCNT + %4 SNP	6,94	0,85
%0,75 MWCNT + %6 SNP	7,72	0,94
BNNP+SNP HİBRİT TAKVİYESİ		
%0,5 BNNP	3,70	0,48
%0,75 BNNP	3,84	0,50
%10 SNP	6,17	0,80
%0,5 BNNP + %2 SNP	5,33	0,68
%0,5 BNNP + %4 SNP	5,79	0,74
%0,5 BNNP + %6 SNP	6,09	0,78
%0,75 BNNP + %2 SNP	6,31	0,80
%0,75 BNNP + %4 SNP	6,79	0,86
%0,75 BNNP + %6 SNP	6,97	0,88
MWCNT+BNNP HİBRİT TAKVİYESİ		
%1 MWCNT	5,27	0,63
%0,5 MWCNT + %0,5 BNNP	5,28	0,65
%0,5 MWCNT + %0,75 BNNP	5,71	0,70
%0,75 MWCNT + %0,5 BNNP	7,55	0,91
%0,75 MWCNT + %0,75 BNNP	4,62	0,55

Özellikle MWCNT ve SNP hibrit takviyelerinde ağırlık ve maliyet değerlerine oranla dayanımı yüksek yapıştırma bağlantıları eldesine ulaşılmış olup %0,5 MWCNT+%2 SNP takviyesi haricinde tüm takviye durumlarında ağırlıkça %10 SNP'nin üzerine çıkmıştır. Kayma dayanımı değeri göz ardı edildiğinde ağırlıkça %0,75 MWCNT+%6 SNP takviyesi tüm hibrit takviye kombinasyonları içerisinde kütlesi en yüksek seçenek olarak görülse de sunduğu yüksek mekanik performansla hem maliyet hem de ağırlık performansları açısından çalışmadaki en yüksek verime sahip hibrit takviye kombinasyonu olarak öne çıkmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %0,5 MWCNT+%6 SNP takviyesi

de ağırlık ve maliyet baz alındığında yüksek performans sergileyerek göze çarpan bir başka hibrit takviye kombinasyonu olmuştur. BNNP ve SNP hibrit takviyelerinde ağırlıkça %0,5 BNNP oranının sabit olduğu yapıştırma bağlantılarının hem özgül dayanım hem de maliyet başına düşen dayanım değerlerinde ağırlıkça %10 SNP takviyesinin altında kaldıkları gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0,75 BNNP takviyesiyle birlikte yapıştırma bağlantılarının ağırlık ve maliyet performansları iyileşmiş olup özellikle artan SNP içeriğiyle de bu iyileşme oranları doğrusal bir şekilde artarak ağırlık ve maliyet faktörleri altında ağırlıkça %0,75 BNNP+%6 SNP takviyeli yapıştırma bağlantısında maksimum performanslar elde edilmiştir. MWCNT ve BNNP hibrit takviyesi durumunda ise MWCNT nispeten yüksek maliyetli bir nano malzeme seçeneği olduğundan epoksi yapıştırıcı içerisindeki MWCNT içeriğinin düşürülüp BNNP'nin de yapıya dahil edildiği hibrit yapıştırma bağlantılarında mekanik dayanımdan da ödün verilmeyecek şekilde özellikle maliyetin azaltıldığı ve en az ağırlıkça %1 MWCNT tekil takviyeli yapıştırma bağlantılarının özgül dayanım ve maliyet/dayanım değerleri kadar performans göstermesi beklenen yapıştırma bağlantıları oluşturulması hedeflenmiştir. Ağırlık ve maliyet faktörleri birlikte gözetildiğinde ağırlıkça %0,5 MWCNT+%0,5 BNNP takviyesinde neredeyse ağırlıkça %1 MWCNT takviyesiyle aynı performanslar gözlemlenirken bu hibrit takviye grubunda diğer takviye durumlarına nazaran her iki performans parametresi için de bariz bir şekilde ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,5 BNNP takviyesi ön plana çıkmıştır. Ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,75 BNNP hibrit takviyesinde ise hem özgül dayanım hem de dayanım/maliyet durumları değerlendirildiğinde ağırlıkça %1 MWCNT takviyesinin altında performanslar sergilemesinin yanı sıra hibrit takviyeli yapıştırma bağlantıları içerisinde de en düşük performansa sahip hibrit takviye kombinasyonu olmuştur.

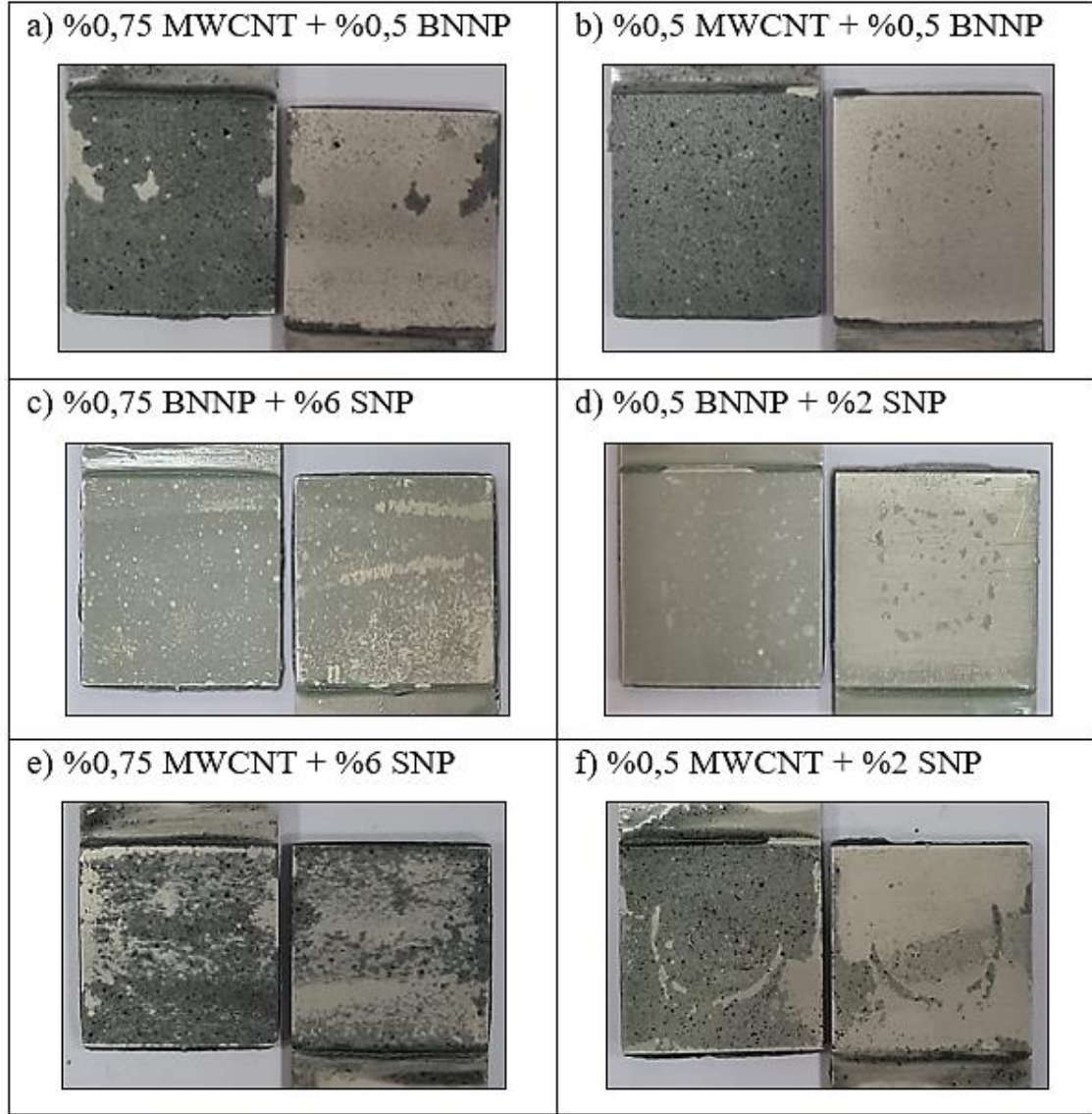
4.4.1. Hibrit Nano Malzeme Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Hasar Yüzeylerinin İncelenmesi

Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma testlerinin ardından dijital kamerayla her hibrit nano malzeme kombinasyonlarının en yüksek ve en düşük kayma dayanımı sunan yapıştırma bağlantılarının hasar görüntüleri alınmış olup Şekil 4.11'de verilmiştir. Ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,5 BNNP takviyeli yapıştırma bağlantısında (Şekil 4.11-a) yapıştırıcının alüminyum yüzeye nispeten daha iyi tutunduğu

gözlemlenirken ağırlıkça %0,5 MWCNT+%0,5 BNNP takviyeli yapıştırma bağlantısında (Şekil 4.11-b) arayüz bölgesinden yapıştırma bağlantısının koptuğu ve tamamen adhezif hasar meydana geldiği saptanmış olup kayma dayanımı değerleriyle de ilişkilendirildiğinde daha düşük kayma dayanımı değerlerini destekleyici bir sonuç olmuştur. Benzer bir çalışmada (Aradhana ve diğ., 2018) MWCNT ve nano kil hibrit takviyeli yapıştırma bağlantıları oluşturulmuş ve gerçekleştirilen hasar analizlerinde geniş en/boy oranına sahip nano kilin MWCNT'lerin çatlak köprüleme etkisini gölgeleyerek çatlak sapma mekanizması oluşumunu sınırlandırabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan BNNP'lerin de fiziksel olarak geniş en/boy oranına sahip olmaları dolayısıyla MWCNT'lerin çatlak köprüleme kabiliyetini kısıtlamış olabileceği değerlendirilmiş olup hem MWCNT+BNNP hibrit takviyesi durumunda kayma dayanımı değerlerinin diğer hibrit takviye kombinasyonlarına göre daha düşük değerlerde kalması ve dar bir değer bandında sınırlı kalması hem de hasar yüzeylerindeki adhezif bölgelerin daha yoğun olması bu durumla ilişkilendirilmiştir.

Öte yandan, ağırlıkça %0,75 BNNP+%6 SNP (Şekil 4.11-c) ve %0,75 MWCNT+%6 SNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarında (Şekil 4.11-e) mevcut çalışmadaki kohezif hasar oranı en yüksek yapıştırma bağlantıları tespit edilmiştir. Öyle ki, yapıştırıcının alüminyum yüzeyleri oldukça iyi ıslattığı ve kopmanın epoksi yapıştırıcı içerisinden gerçekleşerek kohezif hasarın meydana geldiği saptanmıştır. Bu sebeple, ağırlıkça %0,75 BNNP+%6 SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında yalnızca hibrit takviye durumunda değil çalışmadaki tüm yapıştırma bağlantıları arasındaki en yüksek kayma dayanımı değerlerinin elde edilmesi de olağan olarak görülmüştür. Sinerjik etki oluşturulması amacıyla MWCNT ve SNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantıları oluşturulan bir çalışmada (Razavi ve diğ., 2018) hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarında takviyesiz ve tekil nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarına kıyasla daha kohezif hasar mekanizmaları gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0,5 BNNP+%2 SNP takviyeli yapıştırma bağlantısında (Şekil 4.11-d) adhezif türde bir hasarın olduğu gözlemlenmiş olup ağırlıkça %0,5 MWCNT+%2 SNP takviyesinde (Şekil 4.11-f) ise bölgesel olarak kohezif hasar mevcut olsa da adhezif baskın bir hasar yüzeyi gözlemlenmiştir. Genel olarak tekil nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerinde kohezif bölgelerin daha yoğun bir şekilde

bulunması daha iyi bir yapışmanın işareti olarak daha yüksek kayma dayanımı değerlerinin de oluşmasını beraberinde doğurmuştur.



Şekil 4.11. Hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, epoksi yapıştırıcı içerisine tekil olarak farklı ağırlık oranlarında BNNP, MWCNT ve SNP takviye edilerek FPL-dağlama ön yüzey işlemi uygulanmış AA7075-T6 plakalarla oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının ilk gün yapışma performansı incelenmiş olup daha sonrasında sıcaklık ve nem faktörleri altında yapıştırma bağlantılarının uzun süreli dayanım performanslarını tespit etmek amacıyla her bir nano malzeme için belirlenen optimum takviye oranlarıyla hazırlanan yapıştırma bağlantıları 6 haftaya kadar higrotermal yaşlandırmaya (60 °C ve %100 RH) maruz bırakılmıştır. Ardından, sinerjik etkiden faydalanıp mekanik performans ve maliyet parametrelerini optimize etmek amacıyla ikili hibrit nano malzeme takviyeleriyle yapıştırma bağlantıları oluşturularak kayma dayanımı ve maliyet performansları açısından değerlendirmelerde bulunulmuştur. Tüm değerlendirmeler sonrasında elde edilen sonuçlar ve çıkarımlar aşağıda verilmiştir;

- Takviyesiz yapıştırma bağlantılarında FPL-dağlama ön yüzey işlemiyle birlikte işlemsiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla kayma dayanımı değeri %69 artmıştır. FPL-dağlama ön yüzey işlemi maliyetli ve karmaşık bir prosese sahip olsa da sektörel kullanım yerine göre mekanik performans açısından güçlü bir seçenek olarak görülmüştür.
- Gerçekleştirilen nano malzeme takviyeleriyle yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerlerinde kayda değer bir artış gözlemlenmiştir. Tekil nano takviyesi durumunda SNP malzemesi öne çıkmıştır. Bu bağlamda, tekil nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantıları içerisinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla maksimum kayma dayanımı iyileşmesi ağırlıkça %1 BNNP takviyesinde %31 iken ağırlıkça %1 MWCNT takviyesinde %60 ve ağırlıkça %10 SNP takviyesinde %104 olarak tespit edilmiştir.
- Maliyet açısından değerlendirildiğinde, SNP takviye malzemesinin maliyeti BNNP ve MWCNT'den çok daha düşüktür. BNNP ve MWCNT takviyelerinde ağırlıkça %1 olarak tespit edilen optimum takviye oranları, SNP takviyesinde ağırlıkça %10 olarak daha yüksek olsa da sunduğu maksimum kayma dayanımı değerine ek olarak halen daha ekonomik bir nano malzeme takviyesi seçeneğidir.

- Yapılan nano malzeme takviyeleriyle yapıştırma bağlantılarının higrotermal yaşlandırma koşullarına karşı bir direnç oluşturduğu saptanmıştır. Öyle ki, yapıştırma bağlantılarının neredeyse doygunluk seviyesine ulaştığı higrotermal yaşlandırma prosesinin 2 haftalık zaman diliminin sonrasında su alım oranları incelendiğinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarıyla kıyaslandığında BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının sırasıyla yaklaşık %33, %54 ve %63 oranlarında daha az su molekülü ihtiva ettiği saptanmıştır. Aynı zamanda, 6 haftalık higrotermal yaşlandırma süresinin ardından takviyesiz yapıştırma bağlantılarına göre BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının su alımlarının sırasıyla %31, %51 ve %58 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- Higrotermal yaşlandırmaya maruz kalmış yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri incelendiğinde su alma oranlarına paralel sonuçlar elde edilerek tüm yaşlandırma sürelerinde takviyesiz yapıştırma bağlantılarına kıyasla nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarında daha yüksek kayma dayanımı değerleri elde edilmiştir. Yapıştırma bağlantılarının neredeyse doygunluğa ulaştığı 2 haftalık higrotermal yaşlandırma sonrasında takviyesiz yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değeri %65 oranında azalırken BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı değerleri sırasıyla yaklaşık %61, %39 ve %40 oranında düşmüştür. Higrotermal yaşlandırmanın 6 haftalık süresinin ardından gerçekleştirilen kayma testleri sonrasında takviyesiz yapıştırma bağlantısının kayma dayanımı değerinde %72 azalma tespit edilmiş olup BNNP, MWCNT ve SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarında bu azalma sırasıyla yaklaşık %72, %67 ve %54 değerleriyle sınırlı kalmıştır.
- Higrotermal yaşlandırma sonrasında hem su alma oranları hem de kayma dayanımı değerlerinin saptanmasının ardından nano malzeme takviyeleri arasında higrotermal yaşlandırma koşulları altında en az etkin olan BNNP takviyesinin bahsi geçen zorlu şartlar altında pek varlık gösteremediği saptanmış olup takviyesiz yapıştırma bağlantılarıyla yakın davranışlar sergilemiş olduğu incelenen hasar yüzeylerinde de tespit edilmiş ve kopma yüzeylerinde büyük oranda su nüfuz ettiği görülmüştür. Higrotermal yaşlandırmanın 2 haftalık süresine kadar SNP kadar etkin olan MWCNT takviyesinin 2 haftalık sürecin ardından higrotermal yaşlandırma koşullarına gösterdiği direncin kayda değer bir şekilde azaldığı tespit edilmiş olup hasar

mekanizmalarında da yapıştırıcının hidrolize uğradığı ve alüminyum plakaların oksitlendiği bölgeler bu durumun bir sonucudur. Özellikle SNP nano malzemesinin ön plana çıktığı gözlemlenmiş olup hasar yüzeylerinde de SNP takviyeli yapıştırma bağlantılarının sıcaklık etkisi altında su moleküllerinin girişine karşı bariyer görevi gördüğü gözlemlenmiştir. Endüstriyel uygulamalarda su ve sıcaklık faktörlerine maruz kalan yapıştırma bağlantılarının uzun süreli dayanım performansları değerlendirildiğinde daha yüksek ve kararlı mekanik performansların amaçlandığı özellikle yapıştırıcı sektöründeki firmalar ve yapıştırma bağlantılarının önem arz ettiği sektörel uygulamalar için ekonomik de bir tercih olan SNP malzemesinin cazip bir seçenek konumunda olduğu düşünülmektedir.

- Sektörel olarak özellikle havacılık ve otomotiv uygulamalarında sunduğu hafif konstrüksiyonlar sebebiyle yapıştırma bağlantılarının ön plana çıktığı ve maliyetin de her zaman için önemli bir faktör olduğu göz önünde bulundurulduğunda, hibrit nano malzeme takviyeli yapıştırma bağlantılarıyla maliyet ve ağırlık gibi parametrelerin optimize edildiği yüksek mekanik performanslar sunan yapıştırma bağlantıları elde etmek hedeflenmiştir. Bu bağlamda, sinerjik etkinin bariz bir şekilde vuku bulduğu MWCNT ve SNP hibrit takviyelerinde özellikle %0,75 MWCNT+%6 SNP takviyeli yapıştırma bağlantısı 32,12 MPa ile çalışmadaki en yüksek kayma dayanımı değerini sunmasının yanı sıra yapıştırıcı kütlesi ve maliyet parametreleriyle de oranlandığında verimi en yüksek hibrit takviye kombinasyonu olmuştur. BNNP ve SNP hibrit takviye durumunda ağırlıkça %0,75 BNNP içeren yapıştırma bağlantılarında hem ağırlık hem de maliyet parametrelerine oranlandığında eşik olarak belirlenen %10 SNP takviyesinin sergilediği performansın önüne geçilmiş ve özellikle hem BNNP hem de SNP malzemelerini nispeten yüksek oranda barındıran ağırlıkça %0,75 BNNP+%6 SNP takviyeli yapıştırma bağlantısında bu hibrit kombinasyonu içerisindeki en faydalı sonuçlara olmuştur. Buna karşın, ağırlıkça %0,5 BNNP içeren BNNP-SNP hibrit yapıştırma bağlantılarında özgül dayanım ve maliyet açısından %10 SNP değerinin altında değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında, SNP içeren hibrit nano malzeme takviyelerinde hem MWCNT ve BNNP hem de SNP'nin nispeten yüksek takviye oranları için ağırlık ve maliyet faktörleri altında daha verimli yapıştırma bağlantılarına ulaşılmıştır. Mekanik dayanımdan ödün vermeden maliyeti yüksek olan MWCNT malzemesinin takviye oranının azaltılarak ekonomik yapıştırma

bağlantıları elde etmek amacıyla oluşturulan MWCNT-BNNP hibrit takviyeli yapıştırma bağlantılarında ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,5 BNNP takviyesinde hem ağırlık hem de maliyet parametrelerine oranla mekanik performansı en yüksek yapıştırma bağlantısı elde edilmiştir. Ağırlıkça %0,75 MWCNT+%0,75 BNNP takviyesinin ise tüm hibrit takviyeleri arasında ağırlık ve maliyete oranla mekanik performansı en düşük yapıştırma bağlantısı içeriği olduğu tespit edilmiştir.

- Hibrit takviye stratejisiyle sinerjik etkiden faydalanılarak özgül dayanım ve dayanım/maliyet performanslarında verimli sonuçlar elde edilmiş olup birim yapıştırıcı kütlesi ve maliyete göre maksimum mekanik performanslar elde edilebilecek hibrit takviye kombinasyonlarına ulaşılmıştır. Mekanik dayanım performansı yüksek, daha hafif ve ekonomik yapıştırıcılar oluşturulması konusunda hibrit nano malzeme takviye strateji üzerinde çalışılmasının literatürdeki mevcut çalışmalar ve yapıştırıcı endüstrisindeki uygulamalar açısından faydalı olduğu ve gelecekteki çalışmalara yön verebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas, M. K. G., Sakundarini, N., Kong, I. (2018). Optimal Selection for Dissimilar Materials using Adhesive Bonding and Mechanical Joining, *1st International Postgraduate Conference on Mechanical Engineering (IPCME2018)*, Pahang, Malezya, 31 Ekim 2018.
- Abid, J., Raza, H., Akhtar, A., Gohar, G.A., Ullah, S., Akram, M., Raza, Y., Bukhari, M.D. (2020). Effect of Surface Roughness on Shear Strength of Bonded Joints of Aluminum AL 6061 T6 substrate. *VW Applied Sciences*, 2(2), 87-91.
- Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C. (1997). INTRODUCTION. Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C. (Ed.), *Structural Adhesive Joints in Engineering* (2nd ed.) (1-13). Cornwall: Chapman & Hall.
- Adderley, C.S. (1988). Adhesive Bonding. *Materials & Design*, 9(5), 287-293.
- Agrawal, A., Chandrakar, S. (2020). Influence of particulate surface treatment on physical, mechanical, thermal, and dielectric behavior of epoxy/hexagonal boron nitride composites. *Polymer Composites*, 41, 1574-1583.
- Ahmadi, Z. (2019). Nanostructured epoxy adhesives: A review. *Progress in Organic Coatings*, 135, 449-453.
- Akpınar, I.A., Gültekin, K., Akpınar, S., Akbulut, H., Ozel, A. (2017). Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures. *Composites Part B: Engineering*, 110, 420-428.
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (1999). *ASTM D1002-99 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joints Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)* (ASTM D1002-99). United States.
- Amorim, F.C., Reis, J.M.L., Souza, J.F.B., da Costa Mattos, H.S. (2018). Investigation of UV exposure in adhesively bonded single lap joints. *Applied Adhesion Science*, 6(2), 1-9.
- Aradhana, R., Mohanty, S., Nayak, S.K. (2018). High performance epoxy nanocomposite adhesive: Effect of nanofillers on adhesive strength, curing and degradation kinetics. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 238-249.
- Ashcroft, I., Comyn, J., Mubashar, A. (2017). Effect of Water and Mechanical Stress on Durability. *Handbook of Adhesion Technology*, 787-822.
- Aslanlar, S. (2009). *KAYNAK TEKNOLOJİSİ ve UYGULAMALARI*, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü, <http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/kaynak-teknolojisi-salim-aslanlar.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2021).

- Ayatollahi, M.R., Giv, A.N., Razavi, S.M.J., Khoramishad, H. (2017). Mechanical properties of adhesively single lap-bonded joints reinforced with multi-walled carbon nanotubes and silica nanoparticles. *The Journal of Adhesion*, 93(11), 896-913.
- Ayoob, R., Alhabill, F.N., Andritsch, T., Vaughan, A.S. (2018). The effect of water absorption on the dielectric properties of polyethylene hexagonal boron nitride nanocomposites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(6), 065307.
- Bal, S., Saha, S. (2015). Effect of sea and distilled water conditioning on the overall mechanical properties of carbon nanotube/epoxy composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 26(5), 758-770.
- Baldan, A. (2004). Review Adhesively-bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials: Mechanical and environmental durability performance. *Journal of Materials Science*, 39, 4729-4797.
- Banea, M.D., da Silva, L.F.M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L Journal of Materials Design and Applications*, 223(1), 1-18.
- Banea, M.D., da Silva, L.F.M., Carbas, R., Campilho, R.D.S.G. (2017). Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive joints for the automotive industry. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(6), 663-676.
- Björgum, 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.
- Boutar, Y., Naïmi, S., Mezlini, S., Ali, M.B.S. (2016). Effect of surface treatment on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints for automotive applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, 38-43.
- Bowditch, M.R. (1996). The durability of adhesive joints in the presence of water, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16(2), 73-79.
- Brezinová, J., Guzanová, A., Draganovská, D. (2018). Surface Mechanical (Physical) Treatments Prior to Bonding. Pizzi, A., Mittal, K.L. (Ed.), *Handbook of Adhesive Technology* (3rd ed.) (19-67). Florida: CRC Press.
- Budhe, S., Banea, M.D., de Barros, S. (2018). Bonded repair of composite structures in aerospace application: a review on environmental issues. *Applied Adhesion Science*, 6(3), 1-27.
- Budhe, S., Banea, M.D., de Barros, S., da Silva, L.F.M. (2017). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72, 30-42.

- Cavezza, F., Boehm, M., Terryn, H., Hauffman, T. (2020). A Review on Adhesively Bonded Aluminium Joints in the Automotive Industry. *Metals*, 10(6), 730.
- Choi, H.S. (2010). Effects of surface pre-treatments and void content on the GLARE laminate process characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(8), 1008-1016.
- Correia, S., Anes, V., Reis, L. (2018). Effect of surface treatment on adhesively bonded aluminium-aluminium joints regarding aeronautical structures. *Engineering Failure Analysis*, 84, 34-45.
- Cui, H.W., Li, D.S., Fan, Q., Lai, H.X. (2013). Electrical and mechanical properties of electrically conductive adhesives from epoxy, micro-silver flakes, and nano-hexagonal boron nitride particles after humid and thermal aging. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44, 232-236.
- Cui, L.J., Wang, Y.B., Xiu, W.J., Wang, W.Y., Xu, L.H., Xu, X.B., Meng, Y., Li, L.Y., Gao, J., Chen, L.T., Geng, H.Z. (2013). Effect of functionalization of multi-walled carbon nanotube on the curing behavior and mechanical property of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Materials & Design*, 49, 279-284.
- Davis, G. (2008). Durability of Adhesive Joints. Ebnesajjad, S. (Ed.), *Adhesives Technology Handbook* (2nd ed.) (231-272). New York: William Andrew.
- Dittanet, P., Pearson, R.A. (2012). Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy. *Polymer*, Volume 53(9), 1890-1905.
- Dorworth, L.C., Dillingham, G. (2017). *Fundamentals of Adhesive Bonding of Composite Materials*. Aerodef Manufacturing, <https://www.aerodefevent.com/wp-content/uploads/2017/03/AeroDef-2017-Fundamentals-of-Adhesive-Bonding-of-Composite-Materials.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 7 Eylül 2021).
- dos Reis, M., Banea, M. D., Budhe, S., de Barros, S. (2017). Effect Of Adherend Surface Preparation On The Mechanical Properties Of Aluminium Bonded Joints. *The Annals of Dunarea de Jos University of Galati. Fascicle XII: Welding Equipment and Technology*, 28, 39-44.
- Doyle, G., Pethrick, R.A. (2009). Environmental effects on the ageing of epoxy adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(1), 77-90.
- Duncan, B., Broughton, B. (2001). Preparation and Testing of Adhesive Joints. *National Physical Laboratory*, No. 47, 9-13.
- Ebnesajjad, S. (2008). *Adhesives Technology Handbook* (2nd ed.) New York: William Andrew.

- Ekrem, M., Sahin, Ö.S., Karabulut, S.E., Avcı, A. (2017). Thermal stability and adhesive strength of boron nitride nano platelets and carbon nano tube modified adhesives. *Journal of Composite Materials*, 52(11), 1557-1565.
- Freund, R., Watschke, H., Heubach, J., Vietor, T. (2019). Determination of Influencing Factors on Interface Strength of Additively Manufactured Multi-Material Parts by Material Extrusion. *Applied Sciences*, 9(9), 1782.
- Giv, A.N., Ayatollahi, M.R., Ghaffari, S.H., da Silva, L.F.M. (2018). Effect of reinforcements at different scales on mechanical properties of epoxy adhesives and adhesive joints: a review. *The Journal of Adhesion*, 94(13), 1082-1121.
- Gkikas, G., Sioulas, D., Lekatou, A., Barkoula, N.M., Paipetis, A.S. (2012). Enhanced bonded aircraft repair using nano-modified adhesives. *Materials and Design*, 41, 394-402.
- Golaz, B., Michaud, V., Lavanchy, S., Månson, J.A.E. (2013). Design and durability of titanium adhesive joints for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 45, 150-157.
- Gupta, M.S., Veeranjanyulu, K. (2017). Fabrication and Analysis of Adhesive joints Used in Aircraft Structures. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8279-8286.
- Gursel, A., Mohamad, A.A., Nazeri, A.F.M. (2019). Adhesion Mechanism and Failure Modes In Adhesively Bonded Joints, 4. *International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC)*, Ankara, Türkiye, 18-20 Ekim 2019.
- Hart-Smith, L.J. (2018). Adhesively Bonded Joints in Aircraft Structures. da Silva, L.F.M., Öchsner, A., Adams, R.D. (Ed.), *Handbook of Adhesion Technology* (2nd ed.) (1101-1147). İsviçre: Springer Nature.
- Henkel Adhesive (2013). *Loctite EA 9396 AERO Epoxy Paste Adhesive Technical Data Sheet*. Henkel Adhesive Technologies, https://www.henkel-adhesives.com/vn/en/product/industrial-adhesives/loctite_ea_9396_aero.html (13.03.2022).
- Hirulkar, N.S., Jaiswal, P.R., Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M. (2020). Effect of hygrothermal aging and cyclic thermal shocks on the mechanical performance of single-lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 99, 102584.
- Hsieh, T.H., Kinloch, A.J., Taylor, A.C., Sprenger, S. (2011). The effect of silica nanoparticles and carbon nanotubes on the toughness of a thermosetting epoxy polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 119, 2135-2142.

- Jakubinek, M.B., Ashrafi, B., Martinez-Rubi, Y., Rahmat, M., Yourdkkhani, M., Kim, K.S., Laqua, K., Yousefpour, A., Simard, B. (2018). Nanoreinforced epoxy and adhesive joints incorporating boron nitride nanotubes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 194-201.
- Jeevi, G., Nayak, S.K., Kader, M.A. (2019). Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(14), 1497-1520.
- Jiang, X.F., Weng, Q., Wang, X.B., Li, X., Zhang, J., Goldberg, D., Bando, Y. (2015). Recent Progress on Fabrications and Applications of Boron Nitride Nanomaterials: A Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(6), 589-598.
- Jojibabu, P., Jagannatham, M., Haridoss, P., Ram, G.D.J., Deshpande, A.P., Bakshi, S.R. (2016). Effect of different carbon nano-fillers on rheological properties and lap shear strength of epoxy adhesive joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 53-64.
- Jojibabu, P., Janaki Ram, G.D., Deshpande, A.P., Bakshi, S. (2017). Effect of carbon nano-filler addition on the degradation of epoxy adhesive joints subjected to hygrothermal aging. *Polymer Degradation and Stability*, 140, 84-94.
- Katsiropoulos, Ch.V., Chamos, A.N., Tserpes, K.I., Pantelakis, Sp.G. (2012). Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 240-248.
- Khalil, N.Z., Johanne, M.S., Ishak, M. (2019). Influence of Al₂O₃ nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 172, 9-15.
- Khoramishad, H., Alizadeh, O., da Silva, L.F.M. (2018). Effect of multi-walled carbon nanotubes and silicon carbide nanoparticles on the deleterious influence of water absorption in adhesively bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(16), 1795-1808.
- Khoramishad, H., Bayati, H., Kordzangeneh, D. (2022). The deleterious effect of cyclic hygrothermal aging on nanocomposite adhesives. *The Journal of Adhesion*, 98(5), 507-525.
- Koç, E. (2012). *Makina Elemanları Cilt: 1* (5. baskı). Ankara: Akademisyen Kitabevi.
- Korkmaz, Y., Gültekin K. (2022). Improvement of structural, thermal and mechanical properties of epoxy composites and bonded joints exposed to water environment by incorporating boron nanoparticles. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 116, 103141.
- Kozuh, Z., Kralj, S., Zvirn, Z. (1997). Advantages and Application Possibilities of Adhesive Bonding. *Traffic Engineering Review*, 9(1-2), 33-40.

- Kwakernaak, A., Hofstede, J., Poulis, J., Benedictus, R. (2012). Improvements in bonding metals for aerospace and other applications. Chaturvedi, M.C. (Ed.), *Welding and Joining of Aerospace Materials* (1st ed.) (235-287), Illinois: Woodhead.
- Lee, C.H., Drelich, J., Yap, Y.K. (2009). Superhydrophobicity of Boron Nitride Nanotubes Grown on Silicon Substrates. *Langmuir*, 25(9), 4853-4860.
- Leena, K., Athira, K.K., Bhuvaneswari, 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.
- Liang, Y.L., Pearson, R.A. (2010). The toughening mechanism in hybrid epoxy-silica-rubber nanocomposites (HESRNs). *Polymer*, 51(21), 4880-4890.
- Liu, W., Hoa, S.V., Pugh, M. (2005). Fracture toughness and water uptake of high-performance epoxy/nanoclay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 65, 2364-2373.
- Loureiro, A.L., da Silva, L.F.M., Sato, C., Figueiredo, M.A.V. (2010). Comparison of the Mechanical Behaviour Between Stiff and Flexible Adhesive Joints for the Automotive Industry. *The Journal of Adhesion*, 86(7), 765-787.
- 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.
- Mandolino, C., Lertora, E., Genna, S., Leone, C., Gambaro, C. (2015). Effect of laser and plasma surface cleaning on mechanical properties of adhesive bonded joints. *Procedia CIRP*, 33, 458-463.
- Marques, A.C., Mocanu, A., Tomić, N.Z., Balos, S., Stammen, E., Lundevall, A., Abrahams, S.T., Günther, R., de Kok, J.M.M., de Freitas, S.F. (2020). Review on Adhesives and Surface Treatments for Structural Applications: Recent Developments on Sustainability and Implementation for Metal and Composite Substrates. *Materials*, 13(24), 5590.
- Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., Banea, M.D., Carbas, R.J.C. (2015). Adhesive Joints for Low- and High- Temperature Use: An Overview. *The Journal of Adhesion*, 91(7), 556-585.
- May, M., Wang, H.M., Akid, R. (2010). Effects of the addition of inorganic nanoparticles on the adhesive strength of a hybrid sol-gel epoxy system. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(6), 505-512.
- Messler, R.W., Savage, W. (1993). *Joining of Advanced Materials* (1st ed.). Butterworth-Heinemann: Elsevier.

- Molitor, P., Barron, V., Young, T. (2001). Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(2), 129-136.
- Mrema, E., Itoh, Y., Kaneko, A. (2019). Galvanic corrosion of aluminium alloy members of bridge guidrails under severe atmospheric exposure conditions. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 54(2), 163-173.
- Navaneethakrishnan, G., Karthikeyan, T., Saravanan, S., Selvam V. (2020). Influence of boron nitride on morphological, mechanical, thermal and wear characteristics of epoxy nanocomposites. *Materials Research Innovations*, 24(5), 257-262.
- Ozdemir, O., Oztoprak, N. (2017). An investigation into the effects of fabric reinforcements in the bonding surface on failure response and transverse impact behavior of adhesively bonded dissimilar joints. *Composites Part B: Engineering*, 126, 72-80.
- Park, S.Y., Choi, W.J., Choi, H.S., Kwon, H., Kim, S.H. (2010). Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review. *The Journal of Adhesion*, 86(2), 192-221.
- Park, S.Y., Choi, W.J., Yoon, B.C. (2020). Analysis of effects of process factors on corrosion resistance of adhesive bonded joints for aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 116412.
- Pethrick, R.A. (2014). Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding – A review. *Proc IMechE, Part L: J Materials: Design and Applications*, 0(0), 1-31. DOI: 10.1177/1464420714522981.
- Petrie, E.M. (2007). *Handbook of adhesives and sealants* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Prolongo, S.G., Gude, M.R., Ureña, A. (2012). Water uptake of epoxy composites reinforced with carbon nanofillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(12), 2169-2175.
- Prolongo, S.G., Urena, 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.
- Razavi, S.M.J., Ayatollahi, M.R., Giv, A.N., Khoramishad, H. (2018). Single lap joints bonded with structural adhesives reinforced with a mixture of silica nanoparticles and multi walled carbon nanotubes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 80, 76-86.
- Rose, S., PrevotEAU, A., Elzière, P., Marcellan, A. & Leibler, L. (2014). Nanoparticle solutions as adhesives for gels and biological tissues. *Nature*, 505, 382-385.

- Saraç, İ., Adin, H., Temiz, Ş. (2019). Investigation of the effect of use of Nano-Al₂O₃, Nano-TiO₂ and Nano-SiO₂ powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, Volume 166, 472-482.
- Schaubroeck, D. (2015). Surface modifications of epoxy resins to improve the adhesion towards electroless deposited copper. Doktora Tezi, Gent Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Gent.
- Singh, A.K., Panda, B.P., Mohanty, S., Nayak, S.K., Gupta, M.K. (2017). Synergistic effect of hybrid graphene and boron nitride on the cure kinetics and thermal conductivity of epoxy adhesives. *Polymers Advanced Technologies*, 28, 1851-1864.
- Starkova, O., Chandrasekaran, S., Prado, L.A.S.A., Tölle, F., Mülhaupt, R., Schulte, K. (2013). Hydrothermally resistant thermally reduced graphene oxide and multi-wall carbon nanotube based epoxy nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 98(2), 519-526.
- 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.
- Şekercioğlu, T., Özenç, M. (2014). Metallerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 53(627), 43-50.
- Tabaei, M.M., Jafari, S.H., Khonakdar, H.A. (2013). 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), 40017 (1-8).
- Tang, L.C., Wan, Y.J., Peng, K., Pei, Y.B., Wu, L.B., Chen, L.M., Shu, L.J., Jiang, J.X., 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.
- URL-1: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/bonding-and-assembly-tr/substrate/metal/, (Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2021).
- URL-2: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/bonding-and-assembly-tr/substrate/, (Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2021).
- URL-3: <https://www.belmontmetals.com/galvanic-and-electrolytic-corrosion-reducing-damage-with-zinc-anodes/>, (Ziyaret Tarihi: 7 Nisan 2021).
- URL-4: <http://www.proximatape.com/wp-content/uploads/settori-industriali/3M%20Aereospace.pdf>, (Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2021).
- URL-5: <https://www.plastics.gl/automotive/structural-adhesives-for-the-joining-of-similar-and-dissimilar-substrates/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2021).

- URL-6: https://www.lohmann-tapes.at/files_db/1578323178,0001__6.pdf, (Ziyaret Tarihi: 7 Eylül 2021)
- URL-7: https://www.european-aluminium.eu/media/1524/9-adhesive-bonding_2015.pdf, (Ziyaret Tarihi: 9 Ağustos 2021).
- URL-8: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/bonding-and-assembly-tr/training-education/science-of-adhesion/changing-surface-properties/, (Ziyaret Tarihi: 17 Eylül 2021).
- URL-9: <https://www.seykoc.com.tr/icerik/7075?dil=tr>, (Ziyaret Tarihi: 13 Mart 2022).
- Wang, S., Chao, M., Chong, F., Xue, H., Li, X., Zhao, C. Cui, X. (2021). Mechanical and thermal properties of graphene and carbon nanotube reinforced epoxy/boron nitride adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(19), 2142-2158.
- Wang, S., Xue, H., Araby, S., Demiral, M., Han, S., Cui, C., Zhang, R., Meng, Q. (2021). Thermal conductivity and mechanical performance of hexagonal boron nitride nanosheets-based epoxy adhesives. *Nanotechnology*, 32, 355707.
- Wetzel, B., Hauptert, F., Zhang, M.Q. (2003). Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance. *Composites Science and Technology*, 63(14), 2055-2067.
- Won, C.Y., Aluru, N. R. 2007. Water Permeation through a Subnanometer Boron Nitride Nanotube, *Journal of the American Chemical Society*, 129, 2748-2749.
- Yu, S., Tong, M.N., Critchlow, G. 2010. Use of carbon nanotubes reinforced epoxy as adhesives to join aluminum plates. *Materials & Design*, 31(1), 126-129.
- Zdravković, N., Anđelković, B., Milčić, D., Milčić, M., Pavlović, V. (2018). Adhesive Bonding of Railway Vehicles and Parts, *XVIII International Scientific-expert Conference on Railways*, Niš, Sırbistan, 11-12 Ekim 2018.
- Zheng, G., He, Z., Wang, K., Liu, X., Luo, Q., Li, Q., Sun, G. (2021). On failure mechanisms in CFRP/Al adhesive joints after hygrothermal aging degradation following by mechanical tests. *Thin-Walled Structures*, 158, 107184.
- Zheng, Z., Cox, M., Li, B. (2018). Surface modification of hexagonal boron nitride nanomaterials: a review. *Journal of Materials Science*, 53, 66-99.
- Zhou, H., Liu, H.Y., Zhou, H., Zhang, Y., Gao, X., Mai, Y.W. (2016). On adhesive properties of nano-silica/epoxy bonded single-lap joints. *Materials and Design*, 95, 212-218.
- Zotti, A., Zuppolini, S., Zarrelli, M., Borriello, A. (2016). Fracture Toughening Mechanisms in Epoxy Adhesives. Rudawska, A. (Ed.), *Adhesives Applications and Properties* (1st ed.) (237-269). Rijeka: InTech

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Ozun E., Ceylan R., Bora M.Ö., Çoban O., Kutluk T., Effect of Mechanical and Chemical Surface Pretreatments on the Shear Strength of MWCNT-COOH Reinforced Aluminium Adhesive Joints, *3rd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology* (EurasianSciEnTech 2021), Ankara, Türkiye, 15 Aralık 2021, ss. 606-613.

Ceylan R., **Ozun E.**, Bora M.Ö., Çoban O., Kutluk T., Investigation of Adhesive Shear Strength for Various Nanomaterial Reinforced AA7075-T6 Adhesive Joints, *3rd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology* (EurasianSciEnTech 2021), Ankara, Türkiye, 15 Aralık 2021, ss.598-605.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2016 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2020 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2020 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini sürdürmektedir.

