

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**BOR NANOPARTİKÜLLERİ KATKILI YAPIŞTIRMA
BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mustafa Enes YAZICI

Danışman

Dr.Öğr. Üyesi Kürşat GÜLTEKİN

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (Proje No: 119M939) ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimi (Proje No: PYO.MUH.1904.20.015) tarafından desteklenmiştir.

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa Enes YAZICI tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Kürşat GÜLTEKİN danışmanlığında hazırlanan “**Bor Nanopartikülleri Katkılı Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 6.7.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret
Üye	Doç. Dr. İlhan ÇELİK Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret
Üye (Danışman)	Dr. Öğr. Üyesi Kürşat GÜLTEKİN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

İmza

14 /06/ 2021

Mustafa Enes YAZICI

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Bor Nanopartikülleri Katkılı Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 14.06.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 8

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

14 /06/ 2021

Dr. Öğretim Üyesi Kürşat GÜLTEKİN

ÖZET

BOR NANOPARTİKÜLLERİ KATKILI YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mustafa Enes YAZICI

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Haziran/2021

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kürşat GÜLTEKİN

Geleneksel birleştirme yöntemlerine kıyasla, sahip olduğu avantajlar nedeniyle yapıştırma bağlantılarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayisinde, geleneksel bağlantılar yerine sıklıkla kullanılan yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi önem arz etmektedir.

Bu amaçla, sunulan tez çalışmasında, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için iki farklı yapıştırıcı içerisine hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve bor karbür (h-B₄C) nanopartikülleri ilave edilerek üretilen tek tesirli bağlantıların mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bor nitrür ve bor karbür partiküllerinin epoksi içerisinde homojen dağılımı ve arayüzey etkileşimini arttırmak amacıyla silan bileşikler ile modifiye edilmiştir. Modifiye edilen nanopartiküller %0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında epoksi içerisine katılarak yeni yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen yapıştırıcılar, havacılık alanında kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve karbon fiber kumaş takviyeli kompozit numuneler kullanılarak tek tesirli bağlantı numuneleri üretilmiştir.

Bor nanopartiküllerinin yapıştırıcı içerisindeki dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM), tek tesirli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri ise çekme testi ile belirlenmiştir. Ayrıca, yapışma yüzeyleri deney sonrasında incelenerek hasar tipleri (kohesiv, adheziv) tespit edilmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde, yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin; yapıştırıcının viskozitesine, yapıştırıcı içerisine ilave edilen bor nanopartiküllerinin türüne ve ağırlıkça katkı oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Tek tesirli alüminyum yapıştırma bağlantılarında, yüksek viskoziteli yapıştırıcıya ağırlıkça %1, düşük viskoziteli yapıştırıcıya ise ağırlıkça %2 oranında fonksiyonelleştirilmiş h-BN eklenmesiyle hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinde maksimum değer elde edilmiştir. Benzer şekilde, yapıştırıcılara ağırlıkça %2 oranında fonksiyonelleştirilmiş f-B₄C nanopartiküllerinin eklenmesiyle, alüminyum yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin maksimum artış sergilediği gözlemlenmiştir. Tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantılarda ise, yapıştırıcılar içerisine %2 oranında fonksiyonelleştirilmiş h-BN ve h-B₄C katkısıyla ortalama hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinde en iyi artış elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bor nanopartikülleri, tek tesirli yapıştırma bağlantısı, mekanik özellikler, çekme deneyi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF BORON NANOPARTICLES DOPED ADHESIVE JOINTS

Mustafa Enes YAZICI

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Master, July/2021

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kürşat GÜLTEKİN

The use of adhesives and bonding joints is growing day by day owing to their advantages over traditional joining methods. It is important to improve the mechanical properties of adhesive bonded joint which are frequently used instead of traditional joint, especially in the aviation and space industry.

For this purpose, in the presented thesis study, so as to enhance the mechanical properties of adhesive bonding joints, single lap joints produced by adding hexagonal boron nitride (h-BN) and boron carbide (h-B₄C) nanoparticles into two different adhesives. The mechanical properties of this produced single lap joints were investigated experimentally. It has been modified with silane compounds to increase the homogeneous distribution and interfacial interaction of boron nitride and boron carbide particles in epoxy. New adhesives were produced by adding the modified nanoparticles 0.5%, 1%, 2%, 3%, 4% and 5% into epoxy. Single lap joint samples were manufactured by using the produced adhesives, AA2024-T3 aluminum alloy which uses in aviation and carbon fiber fabric reinforced composite samples.

The distribution of boron nanoparticles in the adhesive was determined by scanning electron microscope (SEM), and the mechanical properties of single lap adhesive bonding joints were determined by tensile test. In addition, the types of failure (cohesive, adhesive) were determined by examining the adhesion surfaces after the experiment.

When the experimental results are examined, the mechanical properties of adhesive joints; it has been observed that the viscosity of the adhesive varies depending on the type of boron nanoparticles added into the adhesive and the additive ratio by weight.

In single lap aluminum bonding joints, the maximum value in failure load and displacement values was obtained with adding functionalized h-BN at a ratio of 1% weight to high viscosity adhesive and 2% weight to low viscosity adhesive. In single lap composite bonding joints, the best increase in average failure load and displacement values was obtained with 2% functionalized h-BN and h-B₄C additives in the adhesives.

Keywords: Boron nanoparticles, single lap adhesive joint, mechanical properties, tensile test

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım süresince bana katkıda bulunan tüm hocalarıma ve yüksek lisans tez çalışmalarımnda bilgi birikimlerini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kürşat GÜLTEKİN'e çok teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 119M939) ve Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimine (Proje No: PYO.MUH.1904.20.015) maddi olarak verdiği desteklerden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Benim bugünlere gelmem için her türlü fedakarlığı yapan ve bir an olsun desteğini ihmal etmeyen sevgili aileme şükranlarımı sunuyorum.

Mustafa Enes YAZICI

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	5
2.1. Yapışma Olayı.....	5
2.2. Yapışma Teorileri.....	5
2.2.1. Difüzyon teorisi	6
2.2.2. Mekanik kilitlenme teorisi	6
2.2.3. Zayıf sınır tabaka teorisi.....	7
2.2.4. Elektrostatik teorisi	7
2.2.5. Adsorpsiyon (yüzeyde tutunma) teorisi	8
2.3. Yapıştırıcıların Gruplandırılması.....	8
2.4. Yapıştırma Bağlantıları.....	9
2.4.1. Çift tesirli bağlantı	12
2.4.2. Tek tesirli bağlantı	13
2.4.3. Tek takviyeli alın bağlantı	13
2.4.4. Çift takviyeli alın şerit bağlantı	13
2.4.5. Kademeli yapıştırma bağlantısı	13
2.4.6. Pah bağlantı	14
2.4.7. Silindir (tüp) şeklinde bağlantı	14
2.4.8. Alın bağlantı	14
2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler	14
2.5.1. Basma ve çekme gerilmesi	15
2.5.2. Kayma gerilmesi.....	16
2.5.3. Soyulma gerilmesi	16
2.5.4. Ayrılma gerilmesi	17
2.6. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Türleri.....	17
2.7. Yapıştırma Bağlantılarının Dayanımında Etkili Olan İşlemler	19
2.7.1. Yüzey temizliği	19
2.7.2. Islatma	19
2.7.3. Uygun yapıştırıcı seçimi	20
2.7.4. Bağlantı tasarımı	20

2.8. Yapıştırma Bağlantıları için Yüzey Hazırlama Teknikleri	20
2.8.1. Yapıştırılacak yüzeylerin yağ ve kirliliklerden arındırılması	22
2.8.2. Mekanik aşındırma tekniği ile yüzey hazırlama	22
2.8.3. Kimyasal ile yüzey hazırlama.....	23
2.8.4. Diğer yüzey hazırlama teknikleri.....	24
2.9. Nanoteknoloji	24
2.10. Bor Partikülü	25
2.10.1. Bor nitrür partikülleri	25
2.10.2. Bor karbür partikülleri.....	29
2.11. Partiküllerin Yüzey Modifikasyonu	31
2.12. Literatür Özetleri	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39
3.1. Kullanılan Yapıştırıcılar ve Özellikleri.....	39
3.2. Yapıştırılan Malzeme.....	39
3.3. Kullanılan Nanopartiküller ve Özellikleri.....	41
3.4. Bor Nanopartiküllerinin Yüzey Modifikasyonu için Kullanılan Bileşikler	42
3.5. Bor Partiküllerinin Yüzey Modifikasyon İşlemi	42
3.6. Katkisız ve Bor Nanopartikülü Katkılı Yapıştırıcıların Hazırlanması.....	45
3.7. Yapıştırma Bağlantısı Numunelerinin Yüzey Temizliği.....	46
3.8. Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantısı Numunelerinin Hazırlanması	47
3.9. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	49
3.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS)	50
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1. Yapıştırılan Malzemenin (AA2024-T3) Dağlama İşlemi	51
4.2. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Nitrür Nanopartiküllerinin (f-BN) Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi	52
4.3. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Nitrür Nanopartiküllerinin (f-BN) Kompozit Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi	58
4.4. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Karbür Nanopartiküllerinin (f-B ₄ C) Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi	63
4.5. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Karbür Nanopartiküllerinin (f-B ₄ C) Kompozit Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi	70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
6. KAYNAKÇA	80
EKLER.....	86
ÖZGEÇMİŞ	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
B	: Bor
B ₄ C	: Bor karbür
BN	: Bor nitrür
B ₂ O ₃	: Bor Trioksit
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
cm ³	: Santimetreküp
eV	: Elektron volt
GPa	: Gigapaskal
g	: Gram
J	: Jul
m	: Metre
MPa	: Megapaskal
SiO ₂	: Silisyum dioksit
sn	: Saniye
TPa	: Terapaskal
µm	: Mikrometre

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BNNT	: Bor Nitrür Nanotüp
ÇDBNNT	: Çok Duvarlı Bor Nitrür Nanotüp
ÇDKNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
h-BN	: Hekzagonal Bor Nitrür
k-BN	: Kübik Bor Nitrür
KNT	: Karbon Nanotüp
OH	: Hidroksil
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PVB	: Polivinil Bütiral
TDBNNT	: Tek Duvarlı Bor Nitrür Nanotüp

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yapıştırma bağlantılarındaki kohezyon ve adezyon kuvvetleri	5
Şekil 2.2. Polimer moleküllerde gerçekleşen difüzyon olayı.....	6
Şekil 2.3. Mekanik kilitlenme mekanizması.....	7
Şekil 2.4. Elektrostatik çekim olayı	7
Şekil 2.5. Birleştirme bağlantılarında oluşan gerilme dağılımları a) cıvata b) yapıştırma c) kaynak ..	11
Şekil 2.6. Çift tesirli bağlantı.....	12
Şekil 2.7. Çift tesirli bağlantıda yapıştırıcıda oluşan gerilmeler	12
Şekil 2.8. Tek tesirli bağlantı.....	13
Şekil 2.9. Tek takviyeli alın bağlantı	13
Şekil 2.10. Çift takviyeli alın şerit bağlantı	13
Şekil 2.11. Kademeli bağlantı.....	13
Şekil 2.12. Pah bağlantı.....	14
Şekil 2.13. Silindir şeklinde bağlantı	14
Şekil 2.14. Alın bağlantı.....	14
Şekil 2.15. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında kayma ve soyulma gerilmesi dağılımı (a) Yükleme yokken, (b) Yükleme varken, (c) Gerilme dağılımı grafiği	15
Şekil 2.16. Basma ve çekme gerilmesi.....	16
Şekil 2.17. Kayma (kesme) gerilmesi	16
Şekil 2.18. Soyulma gerilmesi.....	17
Şekil 2.19. Ayrılma gerilmesi.....	17
Şekil 2.20. Yapıştırıcının, malzeme üzerinde yayıldığı alanı ıslatması.....	19
Şekil 2.21. (a) Hekzagonal bor nitrür, (b) Kübik bor nitrür atomik yapısı	27
Şekil 2.22. (a) (10, 5) BNNT kiral; (b) (7, 7) BNNT arm-chair; (c) (10, 0) BNNT zig zag geometrisi	28
Şekil 2.23. Bor karbürün kristal yapısı.....	30
Şekil 2.24. Bor (B)-Karbon (C) İkili Denge Diyagramı.....	31
Şekil 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşımının gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	40
Şekil 3.2. Bor nanopartiküllerinin SEM görüntüleri (a) Bor nitrür, (b) Bor karbür	42
Şekil 3.3. Hekzagonal bor nitrür (h-BN) nanopartiküllerinin yüzey modifikasyon aşamaları (a) Karıştırma, (b) Balon, (c) Refluks, (d) Santrifüj.....	43

Şekil 3.4. Hekzagonal bor karbür (h-B ₄ C) nanopartiküllerinin yüzey modifikasyon aşamaları (a) Karıştırma, (b) Refluks, (c) Santrifüj, (d) Yıkama.....	44
Şekil 3.5. Bor nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların hazırlanması	46
Şekil 3.6. AA2024-T3 alüminyum alaşımı için yüzey hazırlık aşamaları	47
Şekil 3.7. Alüminyum ve kompozit bağlantı numunelerinin oluşturulması	48
Şekil 3.8. Alüminyum bağlantı numunelerinin geometrisi.....	48
Şekil 3.9. Kompozit bağlantı numunelerinin geometrisi	48
Şekil 3.10. (a) Sınır şartları (b) Alüminyum alaşımlı yapıştırma bağlantısı çekme deneyi (c) Kompozit yapıştırma bağlantısı çekme deneyi	49
Şekil 4.1. AA2024-T3'ün yüzeyi; (a) 1200 tane boyutlu (grit) zımpara kağıdı ile zımparalanmış, (b) Dağlanmış	51
Şekil 4.2. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükündeki değişim	53
Şekil 4.3. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükündeki değişim	55
Şekil 4.4. Araldite 2011'in SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-BN, (b) ağ. %5 f-BN (1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen.....	56
Şekil 4.5. MGS-LR285'in SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-BN, (b) ağ. %5 f-BN (1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen.....	57
Şekil 4.6. (a) f-BN katkılı Araldite 2011, (b) f-BN katkılı MGS-LR285 alüminyum bağlantıların hasar yüzeyi.....	58
Şekil 4.7. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükündeki değişim.....	60
Şekil 4.8. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükündeki değişim.....	61
Şekil 4.9. Araldite 2011 yapıştırıcısına f-BN ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri.....	62
Şekil 4.10. MGS-LR285 yapıştırıcısına f-BN ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri.....	63
Şekil 4.11. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-B ₄ C) bağlı olarak alüminyum bağlantıların hasar yükündeki değişimi	65
Şekil 4.12. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-B ₄ C) bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükündeki değişim	67
Şekil 4.13. Araldite 2011'in SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-B ₄ C, (b) ağ. %5 f-B ₄ C (1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen.....	68
Şekil 4.14. MGS-LR285 SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-B ₄ C, (b) ağ. %5 f-B ₄ C (1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen.....	68

Şekil 4.15. (a) f-B ₄ C takviyeli Araldite 2011, (b) f-B ₄ C takviyeli MGS-LR285 yapıştırıcılarıyla oluşturulan alüminyum bağlantıların hasar yüzeyleri	69
Şekil 4.16. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-B ₄ C) bağlı olarak kompozit bağlantıların hasar yükündeki değişim	71
Şekil 4.17. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-B ₄ C) bağlı olarak kompozit bağlantıların hasar yükündeki değişim	73
Şekil 4.18. Araldite 2011 yapıştırıcısına f-B ₄ C ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri.....	74
Şekil 4.19. MGS-LR285 yapıştırıcısına f-B ₄ C ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri.....	74

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 2.1. Yapıştırma bağlantılarında görülen yaygın hasar türleri (ISO 10365).....	18
Tablo 2.2. KNT, Grafen ve BNNT’lerin sahip olduğu özelliklerin karşılaştırılması	29
Tablo 3.1. Yapıştırıcıların kurluşme koşulları, bileşenleri ve fiziksel özellikleri.....	39
Tablo 3.2. AA2024-T3 alüminyum alaşımının bileşenleri	40
Tablo 3.3. AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri	40
Tablo 3.4. Kompozit malzemenin özellikleri	41
Tablo 3.5. Bor nanopartiküllerinin özellikleri	41
Tablo 3.6. Çekme kuvvetine maruz kalan tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri için deneysel parametreler.....	50
Tablo 3.7. Çekme kuvvetine maruz kalan tek tesirli kompozit bağlantı numuneleri için deneysel parametreler.....	50
Tablo 4.1. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	52
Tablo 4.2. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	54
Tablo 4.3. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	59
Tablo 4.4. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	61
Tablo 4.5. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-B ₄ C katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	64
Tablo 4.6. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-B ₄ C katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	66
Tablo 4.7. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-B ₄ C katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	70
Tablo 4.8. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-B ₄ C katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri	72

1. GİRİŞ

Yapıştırıcılar, malzemelerin yüzey temasıyla birbirlerine tutunabilmesini sağlayan maddelerdir (ASTM D907-03). Yapıştırıcı ve yapıştırılacak olan malzemelerin birbirine temas etmesi sağlanarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantı (yapıştırma bağlantısı) elde edilir. Son zamanlarda yapıştırma bağlantıları sahip olduğu avantajlardan dolayı; havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv, vb. endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır.

Yapıştırma bağlantılarının tasarımında ve kullanımında bir takım avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. Farklı veya aynı türdeki malzemelerin birleşmesini sağlaması, kaynak, cıvata veya perçin gibi bağlantı yöntemlerinden daha hızlı ve hafif olması, diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla maliyetinin düşük olması, düzgün gerilme dağılımı ve sürekli yükleme altında makine elemanlarının yorulma ömrünü arttırması, yapıştırma bağlantılarının avantajları olarak sıralanabilir. Yapıştırma bağlantılarının dezavantajları ise; üretiminde ve kullanımında birçok faktörün (çevre, sağlık, güvenlik vb.) dikkate alınmasının zorunlu olması, yüzey hazırlama işlemlerinin hassas olması, darbe ve soyulma mukavemetinin düşük olmasıdır. Araştırmacılar, söz konusu gerilmelerin etkisini azaltarak bağlantı mukavemetini arttırmak için bindirme uzunluğunun ve yapıştırılan malzeme kalınlığının artırılması, bağlantının serbest uçlarına yapıştırıcı ile dolgu yapımı, ikili yapıştırıcı kullanımı ve artık gerilme kullanımı gibi yöntemlere başvurmuştur. Son yıllarda nanoteknoloji, bu yöntemlere alternatif olarak yapıştırma bağlantılarının dayanımını arttırmak için kullanılmaya başlanmıştır.

Geçmişten günümüze kadar olan süreçte, temel bilimlerde meydana gelen gelişmeler, farklı bilim ve teknoloji alanlarını olumlu yönde etkilemiştir. Bilim insanları, insanların ihtiyaçları doğrultusunda yeni ürünler üretmişler veya mevcut ürünlerin performansını artırmışlardır. Nanoteknoloji, farklı fiziksel özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirmeyi ve tasarlamayı amaçlayan bilim dalıdır (İşçi, 2006). Son yıllarda, özellikle nanoteknoloji alanında yaşanan gelişmeler birçok bilim dalını etkilemiştir. Bu gelişmelerden malzeme ve mekanik bilim dallarında etkilenecek, polimer bilimine farklı bir düşünce kazandırmıştır. Bu bakış açısından yola çıkarak daha önce kullanılan polimer malzemeler yerine nanopartikül ilavesi ile oluşturulan yeni nesil polimerler kullanılmaya başlanılmıştır.

Litetatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, karbon nanotüp, grafen, TiO_2 , Al_2O_3 vb. nanopartiküllerin polimer malzemelerle etkileşiminin iyi olduğu ve bu nanopartiküllerin polimer matrisin içine ilave edilmesi ile fiziksel, termal ve mekanik özelliklerin iyileştiği görülmektedir. Yue vd (2014), tarafından yapılan çalışmada; epoksi matris içerisine karbon nanotüp ve grafen eklenerek elde edilen kompozit malzemelerin mekanik ve elektiriksel özellikleri incelenmiştir. Karbon nanotüp ve grafen partiküllerinin eklenmesiyle kompozitin eğilme rijitliğinin arttığını, elektriksel sızmanın azaldığını belirlemişlerdir. Moghanian vd (2017), titanyum dioksit (TiO_2) partiküllerini bakır matris içerisine ekleyerek geliştirdikleri kompozitin, mekanik ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Matris içerisine TiO_2 eklenmesi sonucunda; sertlik, aşınma oranı ve elektrik direncinin azaldığı gözlemlemişlerdir. Zaiemyekheh vd (2019), ağırlıkça %5 oranda Al_2O_3 nanopartikülü katkısının, kompozit malzemenin mukavemetini ve enerji absorpsiyon kapasitesini artırdığını gözlemlemişlerdir. Bahsedilen partiküllerin dışında bor nanopartiküllerinin de polimer malzemelerle etkileşiminin iyi olduğuna yönelik kısıtlı çalışmalar bulunmaktadır.

Dünyada yaygın olarak bulunan 51. element olan bor, ilk kez Fransız kimyacı Jacques Thenard ve Gay-Lussac ile İngiliz kimyacı Davy tarafından 1808 yılında bor oksitin (B_2O_3) potasyum ile ısıtılması sonucunda elde edilmiştir (Oganov ve Solozhenko, 2009). Bor, doğada serbest halde bulunmayıp, diğer elementler ile bileşik halinde çeşitli allotropik formlarda bulunmaktadır. Bileşik halinde bulunan bor, metal dışı bileşiklerle benzer özellikler göstermezken, saf haldeki bor metaller gibi elektriği iletir.

Bor bileşikleri, ileri teknolojik malzeme ve ürünlerin üretilmesinde ham madde olarak kullanılmaktadır. Bor rezervlerinin büyük bir kısmına sahip olan ülkemiz için bu zenginliği teknolojik alanlarda kullanabilmek önem arz etmektedir. Bor bileşikleri üstün mekanik, fiziksel ve ısı özelliklere sahiptir. Bor ve bor katkılı ürünler, sahip olduğu bu avantajlar nedeniyle plastik ve kauçuk sanayisinden nükleer sanayiye kadar çeşitli sektörlerde tercih edilmektedir.

Literatürde yapılan olan çalışmalar incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine karbon nanotüp, grafen kil, $CaCO_3$, SiO_2 , Al_2O_3 vb. gibi farklı nanopartiküllerin eklenmesinin yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Han vd (2019), yapmış oldukları çalışmada, grafen ve karbon nanotüp katkılı yapıştırma bağlantılarının mekanik ve elektriksel özelliklerini deneysel ve nümerik

olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, Hacimce %0.125 grafen katkılı yapıştırma bağlantılarının çekme mukavemetinde %20, hacimce %0.25 karbon nanotüp katkılı yapıştırma bağlantılarının çekme mukavemetinde ise %23 artış gözlemlenmiştir. Akpınar vd (2018), yapmış oldukları çalışmada, farklı karakterdeki yapıştırıcılar içerisine farklı özelliklerde nano killer katılarak yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Çalışma sonucunda, nanokil katkısıyla yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinde iyileşme olduğunu ifade etmişlerdir. Saraç vd (2019), tarafından yapılan bir çalışmada ise, nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-TiO₂ ve partikülleri katılan yapıştırıcı ile birleştirilen, beş farklı bindirme uzunluğuna sahip tek tesirli bağlantı numunelerinin hasar yüklerindeki değişimi incelemiştir. Bu çalışma sonucunda, 20 mm bindirme uzunluğunda, ağırlıkça %4 oranında nano-Al₂O₃ katkısının hasar yükünü %97 oranında artırdığı belirlenmiştir. Kaybal vd (2017), yapmış oldukları çalışmada, ağırlıkça farklı oranlarda CaCO₃ nanopartikülü katkılı yapıştırma bağlantıları üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, CaCO₃ nanopartikülü katkı oranına bağlı olarak kayma mukavemetindeki değişimi incelemiştir. Ağırlıkça %2 CaCO₃ nanopartikülü katkılı tek tesirli yapıştırma bağlantısının kayma mukavemetinde %28 artış gözlemlenmiştir. Bahsedilen nanopartiküllerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır ancak bor nanopartikülleri ile (hekzagonal bor nitrür ve bor karbür) güçlendirilmiş yapıştırma bağlantıları ile ilgili çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Literatür araştırmaları, bor nitrür (BN) ve bor karbür (B₄C) katkılı kompozit malzeme üretimi üzerine çalışmaların olduğu, fakat BN ve B₄C katkılı yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantıları ile ilgili çalışmaların henüz yaygınlaşmadığını göstermektedir. Literatürde; yapıştırıcılara eklenen nano katkıların genellikle grafen, fulleren, karbon nanotüp, Al₂O₃, SiO₂ partikülleri olması, BN ve B₄C katkılı yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının henüz incelenmemiş olması, tez çalışmasının özgün bir değere sahip olduğunu ve bu konunun araştırılmaya değer olduğunu göstermektedir.

Sunulan tez çalışmasında, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için iki farklı yapıştırıcı (Araldite 2011 ve MGS-LR285) içerisine hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve bor karbür (h-B₄C) nanopartikülleri farklı oranlarda ilave edilerek tek tesirli bağlantıların mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bor nitrür ve bor karbür partiküllerinin epoksi içerisinde homojen

dağılımı ve arayüzey etkileşimini arttırmak amacıyla silan bileşikleri (3-aminopropyl triethoxysilane ve 3-glycidyloxypropyl trimethoxysilane) ile modifiye edilmiştir. Modifiye edilen nanopartiküller %0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında epoksi içerisine katılarak yeni yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen nano yapıştırıcılar, havacılık alanında kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve karbon fiber kumaş takviyeli kompozit numuneler kullanılarak tek tesirli bağlantı numuneleri üretilmiştir.

Bor nanopartiküllerinin yapıştırıcı içerisindeki dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM), tek tesirli yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri ise ASTM D1002-10 standartına uygun olarak çekme testi ile belirlenmiştir. Ayrıca, yapışma yüzeyleri deney sonrasında incelenerek hasar tipleri (kohesiv, adheziv) tespit edilmiştir.

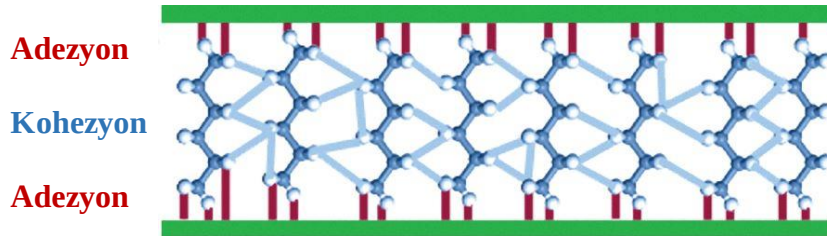
2. KURAMSAL TEMELLER VE LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Yapışma Olayı

Malzemelerin birbirlerine tutunacak şekilde bağlı kalmasını sağlayan maddeye yapıştırıcı denir. Yapıştırılacak olan malzemelerin yüzeylerinin çekim kuvvetleriyle birbirlerinden ayrılmasını engelleyen dirence ise yapışma denir (Troughton, 2008). Moleküller arasındaki çekim ve yüzeye tutunma (Van der Waals), kohezyon ve adezyon kuvvetleri yapışma olayının gerçekleşmesinde etkilidir.

Farklı türden maddelerin yapışmasını sağlayan çekim kuvvetine adezyon denir. Adezyon kuvveti, malzemenin yapıştırılacak yüzeyi ve yapıştırıcı arasında meydana gelmektedir.

Aynı türden maddelerin arasındaki çekim kuvvetine kohezyon denir. Yapıştırıcıdaki bileşenlerin fiziksel (van der Waals) ve kimyasal (monomerler arasındaki bağ) kuvvetlerle birbirlerine tutunması kohezyon kuvvetiyle gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, kohezyon kuvvetinin büyüklüğü ile yapıştırma bağlantısının mukavemeti arasında doğru orantı bulunmaktadır. Yapıştırma bağlantılarındaki kohezyon ve adezyon kuvvetleri Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



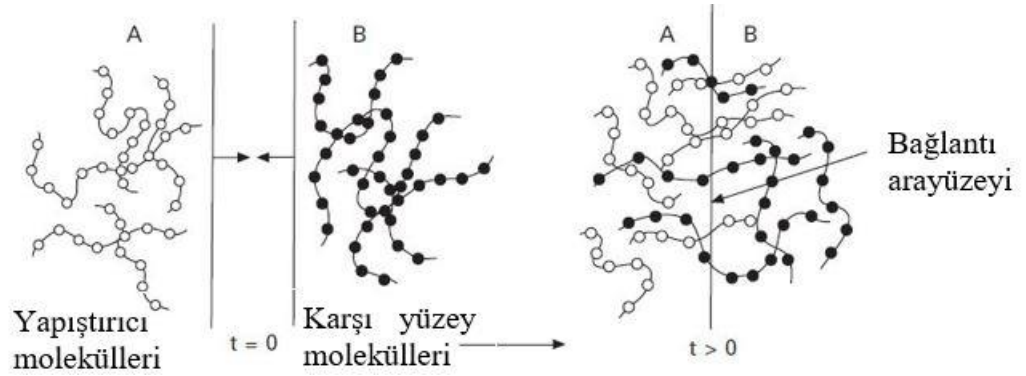
Şekil 2.1. Yapıştırma bağlantılarındaki kohezyon ve adezyon kuvvetleri (Zotti vd, 2016)

2.2. Yapışma Teorileri

Araştırmacılar, yapışma olayını açıklamak için yapıştırıcıların ilk kullanıldığı zamandan günümüze kadar olan süreçte çeşitli teoriler ortaya atmıştır. Yapışma teorilerden en kapsamlı olanları; mekanik kilitleme, elektrostatik, difüzyon, adsorbsiyon (yüzey tutunması) ve zayıf sınır tabaka teorileridir (Silva vd, 2018). Bu teorilerden hiçbirisi tek başına yapışma olayını açıklamamaktadır. Bu nedenle, bahsedilen teoriler, yapışma mekanizmasını tüm yönleriyle anlayabilmek için bir arada kullanılmalıdır.

2.2.1. Difüzyon teorisi

Birbirleriyle temas haline geçen moleküllerin karşılıklı etkileşimi difüzyon olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.2). Difüzyon teorisi, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasındaki yüzey boyunca moleküllerin difüzyonuyla yapışmanın gerçekleştiğini öne süren teoridir (Petrie, 2013). Hareket yeteneğine sahip yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen bu teori, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcının polimer yapıda olması halinde geçerlidir.



Şekil 2.2. Polimer moleküllerde gerçekleşen difüzyon olayı (Petrie, 2013)

2.2.2. Mekanik kilitlenme teorisi

Mekanik kilitlenme teorisi, ilk defa McBain ve Hopkins tarafından 1925 yılında ortaya atılmıştır. McBain ve Hopkins yapmış oldukları çalışma sonucunda, malzemenin yüzeyine yapıştırıcı sürüldükten sonra bu yapıştırıcının yapışma yüzeylerinde bulunan girintileri, çıkıntıları ve gözenekleri doldurmasıyla mekanik kilitlenmenin oluşacağını belirtmişlerdir (Şekil 2.3). Mekanik kilitlenme üzerinde etkili olan faktörler; yüzey pürüzlülüğü ve düzensizliği, yapıştırıcının yüzeyleri (yapıştırılan malzemelerin) ıslatmasıdır (Packham, 1992). Mekanik kilitlenme teorisinde amaç, yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamak olduğu için yapıştırılan malzemelerin yüzeyinin pürüzlü olması gerekmektedir. Çünkü, pürüzlü yüzeylerde temas alanı, düz (parlak) yüzeylere kıyasla daha fazladır. Bu teorisinin yalnızca pürüzlü yüzeylerde meydana geliyor olması, kullanım alanını daraltmaktadır.



Şekil 2.3. Mekanik kilitlenme mekanizması (Mattson, n.d.)

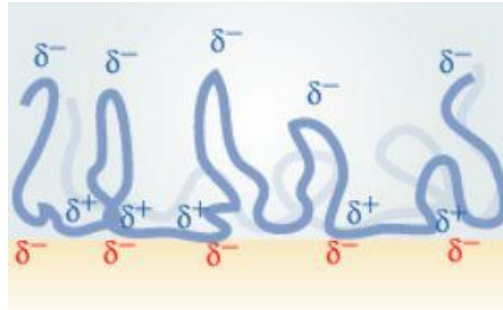
2.2.3. Zayıf sınır tabaka teorisi

Zayıf sınır tabaka teorisi, kuvvetli bir yapışma işleminin gerçekleşebilmesi için yapıştırılacak yüzeylerin temiz olması gerektiğini ifade etmektedir. Yapıştırılacak yüzeylerde pas, yağ gibi kirlilikler bulunabilir. Bu kirletici maddelerin, yapıştırıcı ile bağ kurması halinde zayıf sınır tabakası oluşur.

Bikerman (1967), zayıf sınır tabakalarının; yapıştırılan malzeme, yapıştırıcı, ortam (nem, sıcaklık vb.) veya bunların bir arada gözlemlenmesi sonucu oluştuğunu ifade etmiştir. Gerekli yüzey işlemleri uygulanarak malzeme yüzeyinin temizlenmesi, bu tabakaların oluşmasını önleyerek yapışmanın daha mukavemetli olmasını sağlar. Bu nedenle malzemelerin yapıştırılmadan önce temizlenmesi önem arz etmektedir.

2.2.4. Elektrostatik teorisi

Derjaguin ve Smilga tarafından 1967 yılında ortaya konulan elektrostatik teorisine göre katı haldeki iki malzemenin arayüzeyinde elektriksel tabaka oluşmaktadır. Bu tabakada meydana gelen elektriksel çekim, yapışma kuvvetinin görülmesine neden olur (Şekil 2.4). Yapıştırıcı ile malzemenin yapıştırılan yüzeyi arasında gerçekleşen elektronların taşınımı, malzemelerin birbirinden kopmasını engelleyerek yapışma gerçekleşir.



Şekil 2.4. Elektrostatik çekim olayı (Mattson, n.d.)

2.2.5. Adsorpsiyon (yüzeyde tutunma) teorisi

Van der Waals kuvvetleriyle komşu yüzeyler arasında bir çekim kuvveti oluştuğunu öne süren teoriye adsorpsiyon teorisi denilmektedir. Bu teoriye göre, atomlar ve moleküller arasında meydana gelen çekim kuvveti, malzemelerin birbirlerine yapışmasını sağlar. Günümüzde yapıştırma bilimine yönelik yapılan çalışmalarda geçerliliği bulunan ve uygulanabilir bir teoridir.

2.3. Yapıştırıcıların Gruplandırılması

Yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutan yapıştırıcılar; günümüzde inorganik, organik veya hibrit yapıda karşımıza çıkmaktadır. Mühendislik biliminde yapıştırıcıların sınıflandırılmasında dikkat edilmesi gereken hususlar (Ebnesajjad ve Landrock, 2015):

- Yapıştırıcının sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri,
- Yapıştırılacak malzemenin türü,
- Yapıştırma bağlantısının mukavemet özellikleri,
- Yapıştırma bağlantısının kullanıldığı çevre koşulları (nem ve sıcaklık gibi),
- Yapıştırıcının kullanım yerinin belirlenmesidir.

Yapıştırıcıların kullanıldıkları yere göre sınıflandırılması (Kaya, 2004):

1. Tabakalı Yapıştırıcılar: Malzemenin yüzey alanının büyük bir kısmını yapışma bölgesi oluşturur. Bu bölgelere binen yükler genellikle düşüktür. Tabakalı yapıştırıcılar; ciltleme, etiketleme ve elektronik paketleme gibi alanlarda kullanılmaktadır.
2. Basınca Duyarlı Yapıştırıcılar: Taşıyabileceği yük kapasitesi düşük olan bu yapıştırıcılar; kolay uygulanabilirliğinin yanı sıra yapışma olayı kısa sürede gerçekleşmektedir.
3. Yapısal Yapıştırıcılar: Yük taşıma kapasiteleri genellikle yüksektir. Malzemenin yüzey alanının küçük bir kısmını yapışma bölgesi oluşturur. Bu yapıştırıcılar, aynı zamanda mühendislik yapıştırıcıları olarak da isimlendirilmekte ve uçak, otomobil ve mobilya endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Mühendislik uygulamalarında karşımıza çıkan yapısal yapıştırıcıların kimyasal yapısına göre sınıflandırılması (Temiz, 2003):

1. Poliüretan Yapıştırıcılar: Tek ve iki bileşenli (reçine ve sertleştirici) kullanımı yaygındır. Epoksi yapıştırıcılar ile karşılaştırıldığında ortam koşullarına (sıcaklık, nem vb.) göre daha hassastır ve çalışma ömürleri daha kısadır. Yüksek mukavemet değerlerine düşük sıcaklıklarda ulaşmakta olup, elastik ve tok yapıya sahiptir.
2. Epoksi yapıştırıcılar: Yüksek mukavemetli yapıda olması mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanı sağlar. İki bileşenden (reçine ve sertleştirici) meydana gelir. Bu iki bileşenin kullanım öncesi homojen dağılması gerekmektedir. Kurlenme süresi (oda sıcaklığında) birkaç dakika sürebileceği gibi bu süre birkaç güne kadar artabilir. Genellikle gevrek yapıdadır ve çevresel faktörlere uzun süre maruz kaldıklarında mukavemetinde azalma gözlemlenebilir.
3. Akrilikler: Poliüretanlar ve epoksiler ile benzer karaktere sahiptir. Ortamın nemli olmasına karşı direnç gösterirler. Bu nedenle nemden kaynaklı olarak bağlantı dayanımında ciddi bir düşüş görülmez.
4. Anaerobikler: Kurlenebilmesi için ortamdaki oksijenin uzaklaştırılmasına ihtiyaç duyulan yapıştırıcı çeşidi olarak isimlendirilmektedir.

2.4. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırıcı ile yapıştırılacak malzemenin birbirlerine temas etmesiyle yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı sistemi oluşur. Bu bağlantı sisteminin, mukavemetinin yüksek olabilmesi için özel tasarlanmış bağlantı türleri kullanılmalıdır. Yapıştırma bağlantılarının mukavemeti ile bu bağlantılardaki gerilmelerin dağılımı hakkında yeteri kadar bilgiye sahip olmak, uygun bağlantı tasarımının oluşturulabilmesi için gereklidir.

Üretimi kolay olduğundan dolayı tek tesirli bağlantı geometrisi diğer bağlantı şekillerine göre daha yaygın bir şekilde kullanılmakta ve geniş bir şekilde analiz edilmektedir. Volkersen 1938 yılında yapmış olduğu çalışmada, yapıştırıcı ile malzemelerin birleştirilmesini analitik olarak ilk kez incelemiştir. Volkersen; tek taraflı bindirme bağlantısında, yapıştırıcının bulunduğu bölgenin uçlarında kayma gerilmesinin en yüksek değere ulaştığı sonucuna varmıştır. Bu değere ulaşırken

eksantrik yüklemekten dolayı oluşan eğilme momentinin etkisini göz önünde bulundurmamıştır.

Goland ve Reissner (1944), tek tesirli yapıştırma bağlantısını analiz ederken eksantrik yüklemekten dolayı oluşan eğilme momentini hesaba katmıştır. Hart ve Smith (1973), Goland ve Reissner (1944) ve Volkersen (1938)'den farklı olarak plastisiteyi hesaba katarak tek ve çift tesirli yapıştırma bağlantılarının analizini yapmışlardır. Yaptıkları bu analizde plastik kayma gerilmeleri ile elastik soyulma gerilimini kullanmışlardır.

Hadjez ve Necib (2018), havacılık sektöründe kullanılan nano yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal analizini yapmışlardır. Yapıştırıcılara ağırlıkça %2 oranda grafen takviyesi yaparak; mekanik performansı iyileştirmeyi, gerilmeleri bağlantı boyunca uniform dağıtmayı ve yapının ağırlığını azaltmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, grafen katkısının yapıştırma bağlantılarının mekanik performansını iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğunun, yapıştırma bağlantılarının mekanik performansını etkilediğini ifade etmişlerdir.

Öz ve Özkan (2016) yapmış oldukları çalışmada, hibrit ve tekil yapıştırıcılar kullanarak yapıştırma bağlantıları elde etmişlerdir. Hibrit yapıştırma bağlantısında kayma mukavemeti en yüksek değere yapıştırma bölgesinin orta kısmında, tekil yapıştırma bağlantısında ise yapıştırıcı tabakasının en uç noktalarında ulaştığını ifade etmişlerdir. Optimum yapıştırıcı/bindirme uzunluğu oranına sahip yapıştırma bağlantılarında ani hasar oluşumunun önlenilebileceğini ve yapıştırılan malzemeler arasında yükün daha emniyetli iletilebileceğini vurgulamışlardır.

Barbosa vd (2018), çeşitli yapıştırma bağlantısı türleri ve üç farklı yapıştırıcı kullanarak deneyler ve nümerik analizler yapmışlardır. Yapıştırıcı seçiminin yapıştırma bağlantılarının performansını etkilediğini gözlemlemişlerdir. Tek tesirli, çift tesirli, kademeli ve pah bağlantılarda, bağlantı mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerden birinin bindirme uzunluğu olduğunu ifade etmiştir.

Yapıştırma bağlantılarının özelliklerine etki eden parametreler (Budhe vd, 2017):

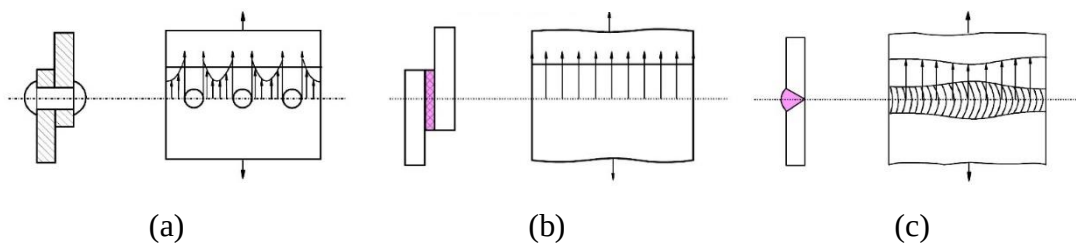
- a) Geometrik parametreler (yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırılan malzemelerin üst üste bindiği kısmın uzunluğu),
- b) Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin sahip olduğu parametreler,

- c) Çevresel parametreler (nem ve sıcaklık),
- d) Üretim yöntemi,
- e) Yüzey hazırlığında kullanılan metotlar,
- f) Kırılma modlarıdır.

Yapıştırma bağlantılarının sahip olduğu avantajlar aşağıda sıralanmıştır (Habenicht, 2009; Harper ve Petrie, 2003):

- Farklı ya da aynı türdeki malzemelerin birleşmesini sağlaması,
- Kalın ve ince malzemelerin birleştirilmesi,
- Kaynak, cıvata veya perçin gibi bağlantı yöntemlerinden daha hızlı ve hafif olmasına karşın maliyetinin az olması,
- Hafif olmasının yanı sıra mukavemetinin iyi olması,
- Sürekli yüklem altında makine elemanlarının yorulma ömrünü ve emniyetini arttırması,
- Farklı çevresel koşullara karşı bağlantıda yalıtımı sağlaması,
- Galvanik (elektrokimyasal) korozyonun azaltılması veya önlenmesini sağlaması,
- Farklı alanlarda (havacılık, uzay, otomotiv, gemi vb.) kullanılabilir olması,
- Termal ve mekanik birleştirme yöntemlerinde düzensiz gerilme dağılımı gözlemlenirken yapıştırma bağlantılarında düzenli dağılım gözlemlenmesidir.

Bu birleştirme bağlantılarında oluşan gerilme dağılımları Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Birleştirme bağlantılarında oluşan gerilme dağılımları a) cıvata b) yapıştırma c) kaynak (Dorn, 1994)

Yapıştırma bağlantılarının sahip olduğu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır (Habenicht, 2009; Harper ve Petrie, 2003):

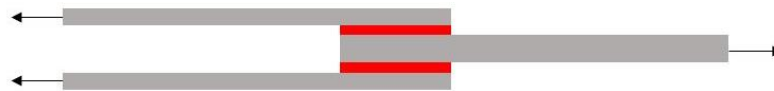
- Korozi kimyasallarına karşı kuvvetli yapışma mukavemeti sağlanabilmesi için yüzey hazırlama işlemlerinin dikkatle yapılması gerekir,

- Güçlü yapışma mukavemeti oluşturmak için kürleşme süresinin ve sıcaklığın iyi belirlenmesi gerekmektedir,
- Darbe ve soyulma mukavemeti düşüktür,
- Yapıştırıcı, yapıştırılan malzemenin yüzeyine düzgün bir şekilde yayılmaması durumunda yapışma mukavemeti düşmektedir,
- Ortam şartları (nem, sıcaklık vb.) yapıştırma bağlantılarının kullanım ömrünü azaltıcı yönde etki edebilir,
- Üretiminde ve kullanımında birçok faktörün (çevre, sağlık, güvenlik vb.) dikkate alınması gerekmektedir.

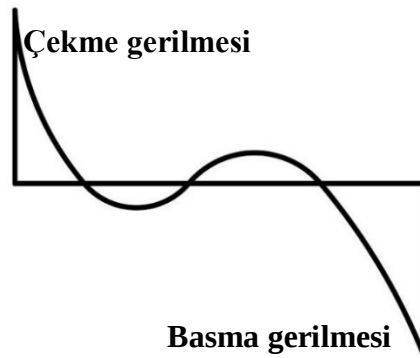
Malzemelerin yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesindeki hedeflerden biri, yapıştırılacak malzemeler arasındaki yükün emniyetli bir şekilde taşınmasını sağlamaktır. Yapıştırıcı kullanılarak birleştirme yapılmasının diğer bir hedefi ise maliyet/mukavemet oranı optimum değerde olan yapıştırma bağlantısı tasarlamaktır. Yapıştırma bağlantılarında, bağlantı geometrisini belirlemek bu nedenle oldukça önemlidir. Sıklıkla kullanılan yapıştırma bağlantısı çeşitleri aşağıda anlatılmıştır.

2.4.1. Çift tesirli bağlantı

Merkezde (iç kısımda) bulunan malzemenin, farklı veya aynı türden iki malzeme ile üst ve alt kısmından birleştirilmesiyle elde edilen bağlantıya çift tesirli bağlantı denir. Çift tesirli bağlantı geometrisi Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bu bağlantıda oluşan gerilmeler ise Şekil 2.7'deki gibidir.



Şekil 2.6. Çift tesirli bağlantı (Adams ve Wake, 1986; Troughton, 2008)



Şekil 2.7. Çift tesirli bağlantıda yapıştırıcıda oluşan gerilmeler (Adams ve Wake, 1986)

2.4.2. Tek tesirli bağlantı

Tek tesirli bağlantı, aynı veya farklı türden malzemelerin Şekil 2.8'deki gibi konumlandırılıp yapıştırılmasıyla elde edilir. Üretimi kolay olduğu için sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 2.8. Tek tesirli bağlantı (Adams ve Wake, 1986; Troughton, 2008)

2.4.3. Tek takviyeli alın bağlantı

Aynı veya farklı türden iki ana malzemenin, altında veya üstünde kalacak biçimde bir takviye malzemesi yerleştirilmesiyle tek taraflı takviyeli alın bağlantısı oluşturulur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Tek takviyeli alın bağlantı (Adams ve Wake, 1986; Troughton, 2008)

2.4.4. Çift takviyeli alın şerit bağlantı

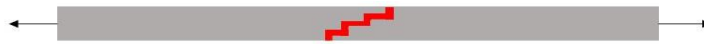
Aynı veya farklı türden iki ana malzemenin altında ve üstünde kalacak biçimde iki takviye malzemesi yerleştirilmesiyle çift takviyeli alın şerit bağlantısı üretilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Çift takviyeli alın şerit bağlantı (Adams ve Wake, 1986; Troughton, 2008)

2.4.5. Kademeli yapıştırma bağlantısı

Aynı veya farklı türden iki malzemenin merdiven basamakları biçimindeki boşlukların yapıştırıcıyla dolması sonucu oluşan bağlantıya kademeli bağlantı denir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Kademeli bağlantı (Adams ve Wake, 1986)

2.4.6. Pah bağlantı

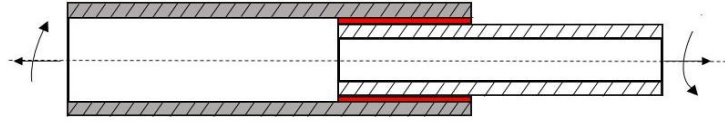
Pahlı bağlantı, malzemelerin karşılıklı açısı oluşturacak şekilde konumlandırılıp, yapıştırılmasıyla elde edilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Pah bağlantı (Adams ve Wake, 1986)

2.4.7. Silindir (tüp) şeklinde bağlantı

Yapışma alanının artırılması için silindirik malzemenin kullanıldığı bağlantı çeşididir (Şekil 2.13). Bu sayede, bağlantıda oluşan eğilme gerilmeleri azaltılmaktadır.



Şekil 2.13. Silindir şeklinde bağlantı (Adams ve Wake, 1986)

2.4.8. Alın bağlantı

Aynı veya farklı türden iki malzemenin alın kısımlarından birbirlerine yapıştırıldığı bağlantı türüne alın bağlantı denir (Şekil 2.14).



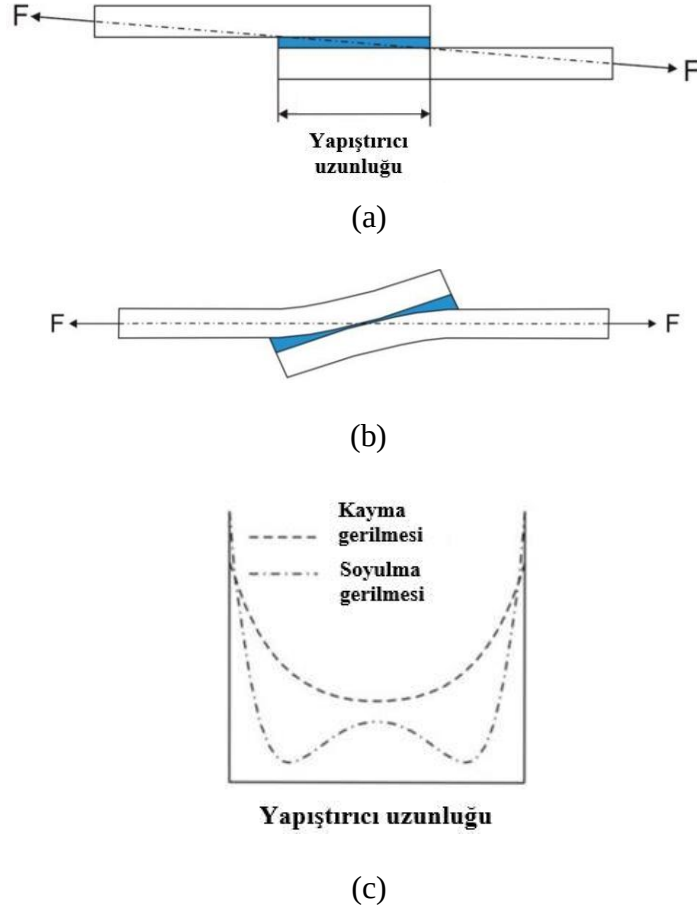
Şekil 2.14. Alın bağlantı (Adams ve Wake, 1986)

2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler

Yapıştırma bağlantılarında; çekme ve basma, soyulma, ayrılma ve kayma gerilmeleri görülmektedir. Bu gerilmeler tek başına görülebileceği gibi birlikte de görülebilir. Yapıştırma bağlantılarında oluşan bu gerilmeler yapıştırıcı yardımıyla yüzeyler arasında aktarılır.

Kayma veya çekme gerilmesi uygulanan yapıştırıcılar, maksimum yapışma mukavemeti gösterir. Çünkü; bu gerilmelerle yapıştırma bağlantısının bozulabilmesi için, yapıştırıcıdaki moleküler bağların eş zamanlı olarak bağlantının bulunduğu yüzey alanı boyunca deformasyona uğraması gerekir.

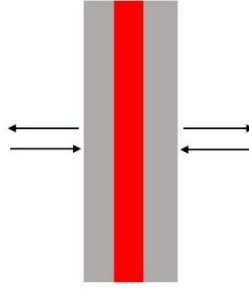
Yapıştırma bağlantısının aşamalı olarak deforme olmasını sağlayan gerilmeler ayrılma ve soyulmadır. Yapıştırma bağlantıları oluşturulurken mutlaka bu gerilmelerin etkisi iyi analiz edilmelidir. Şekil 2.15'te tek tesirli yapıştırma bağlantılarında meydana gelen kayma ve soyulma gerilmelerinin analizi görülmektedir.



Şekil 2.15. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında kayma ve soyulma gerilmesi dağılımı
(a) Yükleme yokken, (b) Yükleme varken, (c) Gerilme dağılımı grafiği
(Özer, 2018)

2.5.1. Basma ve çekme gerilmesi

Basma ve çekme gerilmelerinin oluşabilmesi için yapıştırılacak malzemenin kesit merkezi ile aynı doğrultuda, ters yönlerde iki kuvvet uygulanmalıdır (Şekil 2.16). Basma ve çekme gerilmelerinin malzemeye eksenden kaçık (eksantrik) bir şekilde etki etmesi durumunda bu gerilmeler bağlantının olduğu alana uniform yayılmaz. Bu nedenle yapıştırma bağlantısının kopma olasılığı artar.



Şekil 2.16. Basma ve çekme gerilmesi (Troughton, 2008)

2.5.2. Kayma gerilmesi

Yapıştırıcının bulunduğu düzleme etki eden kuvvetler sebebiyle, yüzeyler birbiri üzerinde kayarak yapıştırılan malzemeyi ayırmaya çalışır. Bu durumunda oluşan gerilmeye kayma gerilmesi denir (Şekil 2.17). Yapıştırıcı düzleminin uç kısımlarında gerilme yığılması gözlemlenir. Bu uç kısımlara etki eden kuvvetin büyük olması durumunda bağlantı hasara uğrayabilir. Emniyetli yapıştırma bağlantısı oluşturmak için bahsedilen gerilme yığılmaları azaltılmalıdır.



Şekil 2.17. Kayma (kesme) gerilmesi (Troughton, 2008)

2.5.3. Soyulma gerilmesi

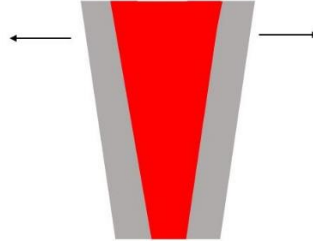
Soyulma gerilmesi, yapıştırılan malzemelerden birinin veya ikisinin esnek yapıda olması halinde gerçekleşir (Şekil 2.18). Soyulma kuvvetleri, gerilmeleri çok küçük bir alanda yoğunlaştırır. Yapıştırma bağlantısında kuvvetin uygulandığı yere yaklaştıkça bu gerilme artmaktadır. Yapıştırma bağlantısına etki eden kuvvetin şiddetinin büyük olması veya bağlantı yüzey alanının çok geniş olması durumunda bağlantı çabuk deforme olur. Araştırmacılar, soyulma gerilmesinin etkisini azaltmak için çeşitli yöntemlere başvurmuştur. Pinto vd (2014), yapmış oldukları çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında soyulma gerilmesinin etkisini azaltmak için bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki malzeme kalınlığını azaltılmıştır. Çalışma sonucunda, soyulma gerilmesinin azaldığını ve bağlantı mukavemetinin arttığını gözlemlemiştir. Çalik (2016), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemenin bindirme uçlarındaki şekil değişikliğinin, kayma ve soyulma gerilmelerini düşürdüğünü ifade etmiştir.



Şekil 2.18. Soyulma gerilmesi (Troughton, 2008)

2.5.4. Ayrılma gerilmesi

Yapıştırma bağlantısının yalnızca bir bölgesinde meydana gelen ve yapıştırıcı birleşiminin ayrılması doğrultusunda oluşan gerilme çeşitidir. Momentin veya eksantrik çekme kuvvetinin etkisiyle ayrılma gerilmesi oluşur (Şekil 2.19). Yapışma alanı boyunca oluşan gerilmeler uniform değildir.



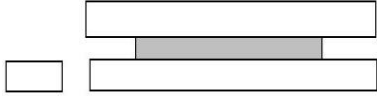
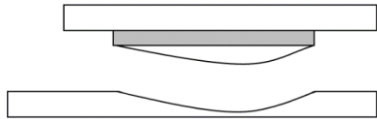
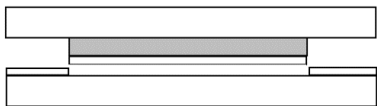
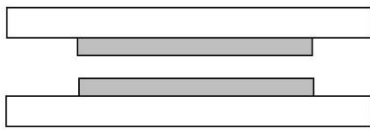
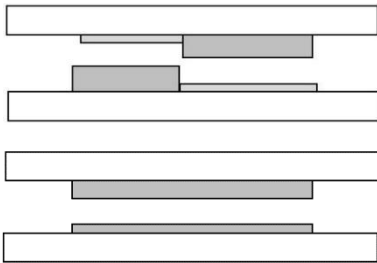
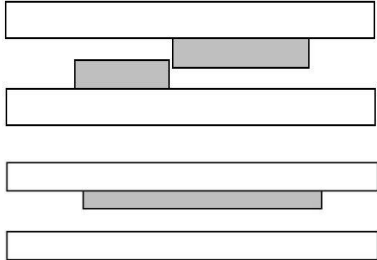
Şekil 2.19. Ayrılma gerilmesi (Troughton, 2008)

2.6. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Türleri

Yapıştırılan malzemelere uygulanan kuvvetler sonucunda, yapıştırma bağlantıları hasar görmektedir. Bu hasarın etkisinin gözlemlenmesi ve yürütülen deneylerden elde edilen sonuçların yorumlanması önemlidir. Bu gözlem ve yorumlar sayesinde yapıştırma bağlantılarını hasara uğratan faktörler belirlenmektedir. Öz ve Özer (2016), yapmış oldukları çalışmada, yapıştırma bağlantılarındaki kayma gerilmesinin uniform bir şekilde dağılmasının ve soyulma gerilmesi konsantrasyonun azaltılmasının ani hasar oluşumunun önüne geçebileceğini ifade etmiştir.

Tablo 2.1’de görüldüğü üzere, yapıştırma bağlantılarında kohezyon ve adezyon olarak adlandırılan iki tür temel hasar tipi (ISO 10365) bulunmaktadır. Yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasındaki yüzeyde görülen kopma, adezyon hasarı olarak adlandırılmaktadır. Bu kopmanın sebebi yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasındaki bağın yeterli olmamasıdır. Yapıştırma bağlantısına uygulanan çekme kuvveti sonucunda ayrılan her iki malzemede yapıştırıcının görüldüğü hasar tipi ise kohezyon hasarı olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.1. Yapıştırma bağlantılarında görülen yaygın hasar türleri (ISO 10365)

	Hasar Türleri	Tanımı
Yapıştırılan Malzeme		YH: Yapıştırılan malzemelerin birinde veya her ikisinde oluşan hasar
		KYH: Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı
		DH: Kalkma (Deleminasyon) yoluyla meydana gelen hasar
Yapıştırıcı		KH: Kohezyon hasarı
		ÖKH: Özel kohezyon hasarı
		AH: Adezyon hasarı

2.7. Yapıştırma Bağlantılarının Dayanımında Etkili Olan İşlemler

Yapıştırma bağlantılarının dayanımında etkili olan işlemler (Müller vd, 2018):

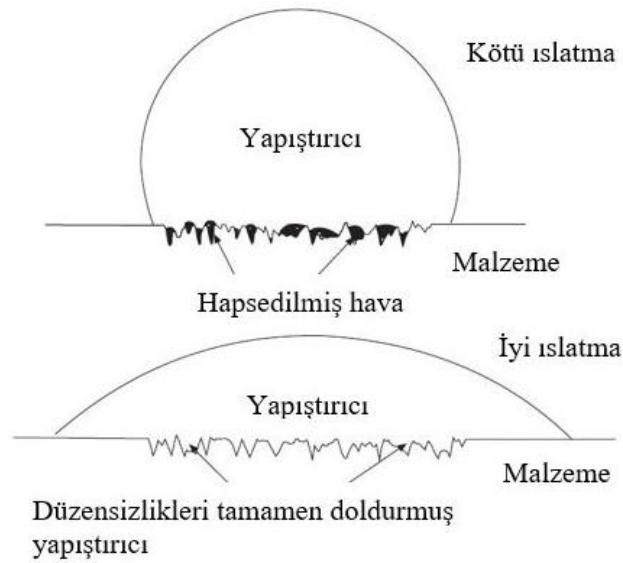
- Yüzey temizliği,
- Islatma,
- Uygun yapıştırıcı seçimi,
- Bağlantı tasarımıdır.

2.7.1. Yüzey temizliği

Kuvvetli bir yapıştırma bağlantısı oluşturmak için yüzey temizliği önemli bir etkindir. Temizlemenin yeteri kadar iyi olmaması durumunda yapıştırıcıyla yapıştırılan malzemeler arasında zayıf sınır tabakaları oluşur. Yapıştırıcı bu tabakalara yapışacağı için bağlantı mukavemetinde ciddi düşüş gözlemlenir.

2.7.2. Islatma

Yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasındaki havanın veya diğer gazların bir sıvı ile yer değiştirerek devamlı olarak temas kurmasına ıslatma denir (Ebnesajjad ve Landrock, 2015; Petrie, 2013). Yapıştırıcının, yapıştırılacak malzemenin yüzeyinde bulunan gözenekleri ve düzensizlikleri doldurması ile ıslatma gerçekleşmektedir. Islatmanın iyi bir şekilde gerçekleşmesi durumunda, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcının arasındaki temas alanını artırır. Yapıştırıcının, malzeme üzerinde yayıldığı alanı iyi ve kötü ıslatmasının örneği Şekil 2.20’de görülmektedir.



Şekil 2.20. Yapıştırıcının, malzeme üzerinde yayıldığı alanı ıslatması (Petrie, 2013)

2.7.3. Uygun yapıştırıcı seçimi

Yapıştırıcı seçiminde yapıştırılacak olan malzemelerin kullanılacağı alanın çalışma koşulları önemlidir. Çünkü, yapıştırıcıların performansı türlerine göre farklılık göstermektedir. Kimyasal ve biyolojik faktörler, gerilme durumu (soyulma, ayrılma, kayma, çekme) yapıştırıcı seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer hususlardır.

2.7.4. Bağlantı tasarımı

Yapıştırma bağlantılarının yaygınlaşmasındaki ana nedenlerinden biri, gerilme dağılımının diğer geleneksel birleştirme yöntemlerine kıyasla daha düzgün (üniform) olmasıdır. Ancak, yapıştırma bağlantılarında da gerilme dağılımı mükemmel değildir. Soyulma ve ayrılma gerilmeleri yapıştırma bağlantılarını olumsuz etkilemektedir. Güçlü bağlantı tasarımı için bu gerilmelerin etkisini azaltmak önem arz etmektedir. Gerilme yığılmalarını en aza indirerek bağlantı dayanımını artırmak için gerekli olan uygulamalar aşağıda belirtilmiştir (Silva vd, 2018):

- Düşük elastisite modülüne ve sünek davranışa sahip bir yapıştırıcı kullanımı,
- Yapıştırılan malzemelerin aynı olması, eğer bu mümkün değilse malzemelerin sertlik değerinin birbirine yakın olması,
- Yapıştırıcı kalınlığının ince olması,
- Geniş yapıştırma alanı kullanılmasıdır.

Araştırmacılar, yapıştırma bağlantılarının dayanımını arttırmak için çeşitli yöntemler ortaya koymuştur. Adams ve Peppiatt, 1974 yılında yapmış olduğu çalışmada, bağlantının uç kısımlarına dolgu yaparak gerilme yığılmalarını azaltmıştır. Zhao vd (2011), yapıştırılan malzemelerin köşelerine farklı geometrik şekiller vererek sonlu eleman analizi yapmışlardır. Analiz sonucunda, yapıştırılan malzemelerin köşelerinin yuvarlatılması, bu köşelerin etrafındaki gerilmelerin büyüklüğünü azalttığını bildirmişlerdir.

2.8. Yapıştırma Bağlantıları için Yüzey Hazırlama Teknikleri

Yapıştırma bağlantılarının yüksek mukavemete sahip olması için uygun yüzey hazırlama prosedürü araştırılmalı ve kullanılmalıdır. Yapıştırılan malzemeler mikroskop altında incelendiğinde yüzeylerinin uygun pürüzlülük değerinde ve düzensizlikte olmadığı görülmektedir. Ancak bu malzemeler çıplak göz ile

incelendiğinde yüzey temiz gibi görünür. Bu nedenle malzemeler yapıştırılmadan önce mikroskop altında incelenmelidir.

Yüzey hazırlığı ile kirli malzeme yüzeylerin yapıştırma bağlantısını bozma ihtimalini azaltmak amaçlanmaktadır. Yüzey hazırlama prosedürlerinin uygulanması sonucunda malzemelerin yüzey enerjisi artırılarak iyi bir yapışma elde edilir. Yüzey hazırlama prosedürlerinin uygulanması sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar (Wegmanand ve Van Twisk, 2012) aşağıda ifade edildiği gibidir:

- Yapıştırılan malzemenin sahip olduğu yüzey özellikleri ve nasıl imal edildiği bilinmelidir,
- Kimyasal temizlik malzemeleri ile işlem yaparken gerekli sağlık ve güvenlik tedbirlerinin alınması gerekmektedir,
- Yapıştırılacak malzemelerin temizliği yapılırken sentetik maddeler kullanılmamalıdır. Bunun yerine parçaları silmek için az miktarda organik bağlayıcı içeren veya hiç organik bağlayıcı içermeyen kağıt havlular veya temiz pamuklu bezler kullanılmalıdır,
- Yapıştırılan malzeme olarak güvenliği daha önceden test edilip kanıtlanmamış kompozit kullanılması durumunda, buharlı yağ giderme veya sıcak çözücü ile yıkama işlemleri yapılmamalıdır,
- Yüzey temizleme işlemini gerçekleştirecek olan personel yeterli bilgi ve birikime sahip olmalıdır,
- Yüzey temizleme işlemi yapılırken kimyasal çözeltinin sıcaklığına, durulama esnasında kullanılacak suyun saf olmasına dikkat edilmelidir. Son aşama olan kurutma işlemi de kontrollü olarak yapılmalıdır.

Yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcının yüzeylerinin temasının sağlanması için aralarında bulunabilecek kir, boya ve pas kalıntılarının yüzey temizliği ile ortadan kaldırılması gerekmektedir. Çünkü bu kalıntıların oluşturduğu zayıf sınır tabaka yapışma olayının verimini düşürür. Yüzey işlemleri kimyasal (asitle dağlama), mekanik aşındırma (kumlama, zımparalama), kir ve yağ alma olacak şekilde üç gruba ayrılır.

Genellikle yüzey hazırlığı prosedüründe uygulanan işlemler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

- Yapıştırıcıyla temas halinde bulunan yüzeyler buharla yağ giderme metodu ile temizlenir. Bu metot ile yapılan temizleme işleminde yaygın olarak kullanılan yağ çözücüler, aseton ve trikloretilendir.
- Yapıştırılacak yüzeylerin alanını artırmak amacıyla mekanik aşındırma (kumlama veya zımparalama) yöntemi uygulanır,
- Metal bir malzeme yapıştırılacak ise, bu malzemenin yüzeyine kimyasal dağlama işlemi uygulanır. Böylelikle metal yüzeyindeki zayıf oksit tabakaları kaldırılır yerine güçlü oksit tabakası oluşur. Eğer yapıştırılacak malzeme yalıtkan ise yüzey pürüzlendirme ve temizleme işlemleri yapılır.

Yüzey hazırlığı metotlarından en çok tercih edilenler: buhar ile yağ giderme, çözücü yardımıyla silme, mekanik aşındırma, asitle dağlama ve ultrasonik buharla yağ giderme işlemleridir (Ebnesajjad ve Landrock, 2015).

2.8.1. Yapıştırılacak yüzeylerin yağ ve kirliliklerden arındırılması

Yapıştırılacak malzeme yüzeylerindeki yağ ve kirlerin ortadan kaldırılması işlemi için malzemede bir farklılığa yol açmadan buharlaşabilen çözücüler kullanılmaktadır. En iyi yağ çözücüler aseton ve trikloretilendir. Bu çözücü solüsyonlar ile ıslatılan malzeme yüzeyleri daha sonra kurulanır ve çözücünün malzemeden tamamen buharlaşabilmesi için bir süre beklenir. Çözücüyle yapılan kimyasal temizliğin daha iyi sonuç vermesi için malzeme fırçalanabilir ya da bir bezle ovulabilir.

2.8.2. Mekanik aşındırma tekniği ile yüzey hazırlama

Genellikle yapıştırılacak metal yüzeyler kirlidir ve üzerlerinde bir oksit tabakası bulunur. Bu oksit tabakaları tek başına yağ alma yöntemiyle temizlemek yeterli olmaz. Bu nedenle kirli alanların temizlenmesi ve bağlantı bölgesinin alanını arttırabilmek için mekanik aşındırma metodu kullanılmaktadır. Zımparalama, taşlama ve kumla püskürtme mekanik aşındırmada en çok kullanılan yöntemlerdendir.

Zımparalama metodu ile malzeme yüzeylerinin temizlenmesi ve bağlantı alanlarının genişletilmesi sağlanılarak yapıştırma bağlantısının dayanımı arttırılır. Prolongo (2012), yapmış olduğu çalışmada, yapıştırılan malzemenin (alüminyum) yüzey pürüzlülüğünün yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerindeki etkisini

incelemiştir. Çalışma sonucunda, pürüzlülük değeri 0-3 μm aralığında arttıkça yapıştırma bağlantısının mukavemetinin de arttığını, 3 μm 'den sonra ise mukavemetin sabit kaldığını gözlemlemiştir. Ghumatkar vd (2016), P50, P80 ve P120 zımpara kağıtlarını kullanarak alüminyum alaşımını zımparalamıştır. Farklı pürüzlülük değerlerinin, yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerine etkisini irdlemiştir. P120 zımpara kağıdı kullanarak 2,05 μm pürüzlülük elde etmiş ve en yüksek kayma mukavemeti değerine bu pürüzlülük değerinde ulaşmıştır.

2.8.3. Kimyasal ile yüzey hazırlama

Kimyasal ile yüzey hazırlama metodu, diğer yüzey hazırlama yöntemlerine kıyasla, yapıştırma bağlantısının kalitesini arttıran en etkili metottur. Uygulanacak olan kimyasal işlemler malzemenin çeşidine göre farklılık gösterebilir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu yöntemde uygulanan prosedürün genel olarak aşağıdaki gibi olduğu görülmüştür.

Malzemenin yapıştırılmak istenen yüzeyi asit çözeltisi içerisine daldırılır ve yüzeyde bulunan kirliliklerin çözünmesi için bekletilir. Bir süre beklendikten sonra çıkarılan malzemenin üzerinde kalmış olabilecek çözeltiden arınabilmesi için saf suya daldırılır. Son olarak saf su içerisinde bekleyen malzeme çıkarılır ve kurulanır. Bu uygulama sonucunda temizlenen malzeme gözenekli yapıda olmaktadır. Yapıştırıcı bu gözenekleri doldurarak mekanik kilitlenme gerçekleşir. Pocius (1983), alüminyum 2024-T3 ve alaşımının dağlama banyosuna daldırılmasıyla yapıştırma bağlantısının dayanımının arttığını ifade etmiştir. Arrowsmith vd (1988), yapmış oldukları çalışmada, yapıştırma bağlantılarında kullanılan alüminyum 5251 alaşımına farklı çözeltilerle dağlama işlemi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, fosforik asit ve güçlü oksitleyici katkılı sodyum hidroksit bazlı çözeltilerin bağlantı mukavemetini arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Birden fazla malzemenin aynı çözeltiliye tekrarlı olarak daldırılması durumunda çözeltinin zamanla kirlenebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Kirlenen çözeltinin sürekli değiştirilmeye ihtiyaç duyulması ve hızlı gerçekleştirilen bir işlem olmaması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlardan dolayı endüstride kullanım alanı kısıtlıdır. Bu üç ana yüzey hazırlama tekniğinin haricinde ultrasonik buharla yağ giderme ve anotlama tekniği de kullanılmaktadır.

2.8.4. Diğer yüzey hazırlama teknikleri

Ultrasonik buharla yağ giderme tekniği, kimyasal bir çözücüyle temizlenen ve buhar ile yağı giderilen yüzeylerin ultrasonik banyoda yeniden temizlenmesidir. Ultrasonik yıkamada yüksek frekansa sahip ses dalgaları (18000 dev/sn'den fazla) ile malzemenin yüzeyindeki çözünemeyen yabancı maddeler ve kirler, çalkanmayla giderilir (Ebnesajjad ve Landrock, 2015).

Yüzey hazırlamada anotlama tekniği oldukça etkili olmasına karşın uzun zaman alması, karışık ve maliyetinin yüksek olması dezavantajlarına sahiptir. Malzemelere (özellikle Al ve Al alaşımı) uygulanarak korozyona uğramasını engelleyen etkili bir işlemdir. En çok kullanılan elektrokimyasal yüzey hazırlama teknikleri; sülfirik, kromik ve fosforik asit anodizasyonudur.

2.9. Nanoteknoloji

Geçmişten günümüze kadar insanların ihtiyaçlarını karşılayabilmek ve hayatlarını kolaylaştırabilmek adına diğer alanlarda olduğu gibi mühendislik alanında da birçok çalışma yapılmıştır. Nanoteknoloji de bu amaca yönelik çalışmalardan birisidir. Nanoteknoloji, farklı fiziksel özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirmeyi ve tasarlamayı amaçlayan bilim dalıdır (İşçi, 2006).

Nanoteknoloji biliminin hedefleri (Lorusso, 2013):

- Nanometre boyutundaki (10^{-9} m) malzemelerin incelenmesi,
- Nanometre ölçeğindeki malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi,
- Geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahip, hassas ve daha hızlı üretimin yapılması,
- Hem hafif hem de mukavemeti yüksek malzemelerin imal edilmesi,
- Enerji ve malzeme kullanımını minimuma indirilmesi şeklinde sıralanabilir.

Nanoteknolojideki son gelişmeler, özel olarak tasarlanmış fonksiyonel özelliklere sahip ileri teknoloji malzemelerin imalatına yeni bir bakış açısı getirmiştir. Özellikle polimer kompozitlere çeşitli nanoyapılı malzemelerin ve nanofabrikasyon tekniklerinin entegre edilmesiyle, birçok endüstriyel/imalat sektörünün talebini etkin bir şekilde karşılayabilecek “nanokompozitler” olarak adlandırılan yeni malzeme sınıflarının geliştirilmesi sağlanmıştır (Moniruzzaman ve Winey, 2006). Demiroglu vd

2017, nanoteknolojinin fiber takviyeli kompozitlerin arayüzeyindeki adhezyonu artırdığını ifade etmiştir. Ayrıca nanoteknolojinin, matrislerin ve fiber yüzeylerin modifikasyonu da dahil olmak üzere yeni nesil malzemelerde kritik bir rol oynadığını; kendi kendini iyileştirme, alev geciktirici ve radyasyon kalkanı gibi çeşitli fonksiyonel özellikleri bulunduğunu belirtmiştir.

Nanoteknolojinin temelini oluşturan nanopartiküller, boyutları 10^{-7} m ve altında olan parçacıklardır. Nanopartiküller boyutlarının küçük olması sebebiyle yüksek yüzey/hacim oranına ve benzersiz karaktere sahiptir (Somasundaran vd, 2010). Nanopartiküller; organik, inorganik (altın, bakır, gümüş vb.) ve karbon bazlı (grafen, karbon) olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Bu nanopartiküllerin haricinde bor nanopartiküllerinin kullanımı son zamanlarda yaygınlaşmaya başlamıştır.

2.10. Bor Partikülü

Bor; doğada serbest halde bulunmayıp, diğer elementler ile bileşik halinde çeşitli allotropik formlarda bulunmaktadır. Bileşik halinde bulunan bor, metal olmayan bileşiklerle benzer özellikler göstermezken, saf haldeki bor metaller gibi elektriği iletir. Bor bileşikleri, ileri teknolojik malzeme ve ürünlerin üretilmesinde ham madde olarak kullanılmaktadır.

Dünyada yaygın olarak bulunan 51. element olan bor, ilk kez Fransız kimyacı Jacques Thenard ve Gay-Lussac ile İngiliz kimyacı Davy tarafından 1808 yılında bor oksitin (B_2O_3) potasyum ile ısıtılması sonucunda elde edilmiştir (Oganov ve Solozhenko, 2009). Borun kimyasal özellikleri; tane büyüklüğü ve morfolojisine bağlıdır (Özkan vd, 2016). Amorf yapıdaki bor reaksiyona kolay girerken, kristal yapıdaki bor kolay reaksiyona girmemektedir.

2.10.1. Bor nitrür partikülleri

Molekül formülü BN olan bor nitrür, eşit sayıda azot (N) ve bor (B) elementlerinin bir araya gelmesiyle oluşan bileşiktir. Azot ve bor elementleri tabakalaşma gösterecek şekilde kovalent bağ ile birbirlerine bağlıdır. Bu tabakalar arasında görülen moleküller arası etkileşim kuvveti Van der Waals kuvvetidir. Doğada bulunmayan bor nitrür yapay olarak bordan (B), bor trioksitten (B_2O_3) veya borik asitten (H_3BO_3) üretilmektedir. İlk defa 1840 senesinde W.H. Balmain tarafından bor nitrür üretimi yapılmıştır. Balmain, bor nitrür üretimini gerçekleştirirken, ergimiş potasyum siyanür (KCN) ile borik asit kullanmıştır. Bilim insanları, ilk üretildiğinde

kararsız yapıda olan bor nitrür bileşimini, kararlı hale getirebilmek için çeşitli çalışmalar yapmışlardır. 1950’li senelerde Union ve Carborundum şirketleri bor nitrür tozunu endüstriyel anlamda üretmeyi başarmış ve ticari anlamda kullanılabilmesini sağlamak için sıcak pres yöntemiyle bor nitrür tozunu işleme tabi tutmuşlardır.

Bor nitrür (BN), yüksek ısı direnç, elektriksel yalıtkanlık ve kimyasal kararlılık gibi üstün özelliklere sahip bir bileşiktir. Sıcaklık artışından fazla etkilenmemesinden dolayı performansı yüksek olan uçak frenlerinde, seramik kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesinde bor nitrür sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca, yağlama ve soğutma işlemlerinde ideal katkı malzemesi olarakta kullanımı yaygındır.

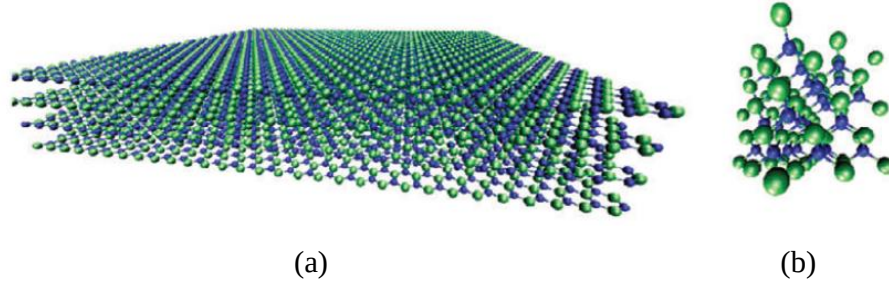
Bor nitrürün yaygın olarak bilinen iki yapısı bulunmaktadır. Bu yapılar: kübik bor nitrür (k-BN) ve hekzagonal bor nitrür (h-BN)’dür. Hekzagonal bor nitrürün (h-BN) yapısı grafiti, kübik bor nitrürün (k-BN) yapısı ise elması andırır. Hekzagonal bor nitrürün (h-BN) sahip olduğu dikkat çekici özellikler aşağıda sıralanmıştır.

- Band aralığının geniş olması (5.5 eV),
- Isıl iletkenliğinin,
- Oksitlenme sıcaklığının,
- Elektriksel direncinin,
- Hidrojen depolama kapasitesinin,
- Kimyasal kararlılığının yüksek olmasıdır (Lipp vd, 1989).

Bu üstün özellikleri nedeniyle h-BN’nin kimya, elektronik ve metalurji alanlarında kullanımı yaygındır. Kübik bor nitrür (k-BN), kısa bağ mesafelerine sahip olması nedeniyle sert bir yapıya sahiptir. Kübik bor nitrürün (k-BN) sahip olduğu dikkat çekici özellikler ise:

- Isı iletkenliğinin iyi olması,
- Düşük sürtünme katsayısına sahip olması,
- Aşınma ve elektrik direncinin yüksek olması,
- Kimyasal kararlılığı,
- Sert bir yapıda olmasıdır (Kaftanoğlu ve Dökmetaş, 2012).

Şekil 2.21’de kübik bor nitrürün ve hekzagonal bor nitrürün atomik yapısı görülmektedir.



Şekil 2.21. (a) Hekzagonal bor nitrür, (b) Kübik bor nitrür atomik yapısı (Arenal ve Lopez, 2015)

BN tabakalarının arasındaki bağ kuvvetinin düşük olması sebebiyle tabakalaşmanın düzensiz olması olası bir durumdur. Tabakaların birbirlerine paralel veya dik bir şekilde rastgele dizilmesiyle aralarında boşluklar görülmektedir. Bu boşlukların oluşması malzemenin ani sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklı olmasını sağlar. Bu dayanıklılık termal şok direnci olarak adlandırılmaktadır. BN'nin gözenekli yapıda olması, ısı iletkenliğinin ve ısı genleşmesinin yüksek olması termal şok direncini arttıran faktörlerdendir. Bor nitrür, sahip olduğu üstün fiziksel, mekanik ve termal özellikler nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır.

60 adet karbon atomunun birleşmesiyle küre şeklinde oluşan molekülere fulleren denir (Thakral ve Mehta, 2006). Tek boyutlu silindire benzeyen fullerenler olarak adlandırılan nanotüpler, BNNT (Bor nitrür nanotüp) ve KNT (Karbon nanotüp) olmak üzere iki çeşittir.

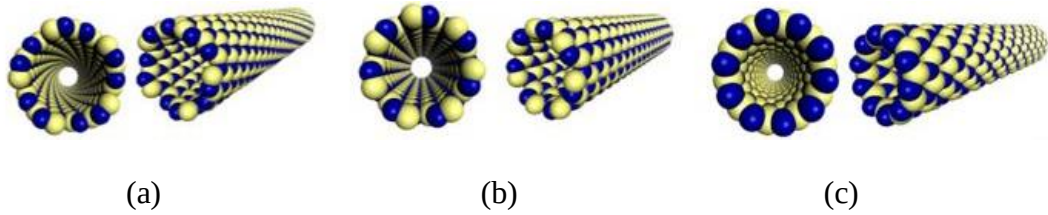
Azot ve bor elementlerinin birleşmesiyle oluşan yalıtkan özellikteki nanotüplere BNNT denir. BNNT'ler birçok kullanım alanı bulunan KNT'lerin alternatifi haline gelmiştir. Sahip oldukları üstün malzeme özellikleri ve yapıları sebebiyle bilim insanları tarafından ilgi görmektedir. Rubio, 1994 senesinde BNNT'leri keşfetmiştir. Bu keşfin ardından, Chopra 1995 senesinde BNNT'lerin sentezini gerçekleştirmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, BNNT'lerin, üstün mekanik özelliklere sahip olduğu ve takviye malzemesi olarak kullanım potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir. BNNT'lerin elastisite modülü değerini; Chopra vd (1998) 1.22 TPa, Suryavanshi vd (2004) ise 722 GPa olarak belirlemiştir. Ayrıca, Wei vd, 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada, çekme mukavemetinin 33 GPa olduğunu belirtmiştir. Meng vd (2014), BNNT'lerin KNT'lere benzer mekanik özelliklerinin olduğunu ve BNNT'lerin, polimerlerin mukavemetini ve sertliğini arttırdığını ifade etmiştir.

BNNT'lerin üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra çok iyi termal ve fiziksel özellikleri bulunmaktadır (Meng vd, 2014). Sıcaklık yüksek değerlere ulaşması durumunda dahi oksidasyona karşı dirençlidir. BNNT'ler, KNT'lerin tersine yarı iletken özelliktedirler. Sıcaklık ortalama değerlerdeyken KNT'ler daha kuvvetlidir ancak yüksek sıcaklık veya uzun deformasyon sürelerinde BNNT'ler daha kuvvetlidir. Ayrıca, BNNT'ler daha kararlı bir yapıda bulunmaktadır.

BNNT'lerin sahip olduğu özellikler göz önünde bulundurulduğunda kompleks sistemlerde işe yarayabileceği düşünülmektedir. Nano ölçeğin kullanıldığı endüstri alanlarında malzemelerin (nano seramik gibi) üretiminde BNNT'ler sıklıkla kullanılmaktadır.

BNNT'lerde bulunan azot ve bor elementleri KNT'lerdeki karbon elementi olarak düşünülebilir. Şekil 22'de (a) (10, 5) BNNT kiral (chiral); (b) (7, 7) BNNT arm-chair; (c) (10, 0) BNNT zig zag geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.22. (a) (10, 5) BNNT kiral; (b) (7, 7) BNNT arm-chair; (c) (10, 0) BNNT zig zag geometrisi (Zhi vd, 2010)

Geometrik yapısı ve mekanik özellikleri açısından benzerlik gösteren KNT'ler ve BNNT'ler arasında fonksiyonel farklılıklar vardır. Tablo 2.2'de KNT, grafen ve BNNT'lerin sahip olduğu özellikler karşılaştırılmıştır. Tablo 2.2'den BNNT'lerin elastisite modülünün yüksek olduğu ancak, KNT'lere kıyasla biraz düşük değerde olduğu görülmektedir. Ayrıca, Meng vd. 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada, BNNT'lerin ısı iletkenliğinin KNT ve grafene kıyasla daha düşük olduğunu, BNNT'lerin ısı iletkenlik değerinin katkı oranına bağlı olarak arttığını ifade etmişlerdir.

Tablo 2.2. KNT, Grafen ve BNNT’lerin sahip olduğu özelliklerin karşılaştırılması (Meng vd, 2014)

Özellikler	Partiküller		
	KNT	Grafen	BNNT
Mekanik Özellikler	Elastisite modülü: 1.09-1.25 TPa (teorik), 0.27-0.95 TPa (deneysel)	Elastisite modülü: 1TPa (deneysel)	Elastisite modülü: 0.784-0.912 TPa, (teorik); 1.22±0.24 TPa (deneysel)
Isıl iletkenlik (W/mK)	6000 (TDKNT, teorik); 3000 (deneysel ÇDKNT)	3000-5000 (tek katmanlı)	180-300 (teorik TDBNNT); 180-300 (ÇDBNNT)
Bağ türü	Kovalent	Kovalent	Kovalent
Renk	Siyah	Siyah	Beyaz

2.10.2. Bor karbür partikülleri

Bor elementinin diğ er en önemli bileş iğ i olan bor karbür (B_4C), ilk kez 1858 senesinde keş fedilmiştir. Daha sonra 1883’te Joly tarafından B_3C , 1894’te ise Moissan tarafından B_6C olarak adlandırılmış tır. Bor karbürün kimyasal formülü 1934 senesinde B_4C olarak belirlenmiştir (Hvizdoš ve Vencl, 2021). Bor karbür; bor oksit (B_2O_3) veya borik asitin (H_3BO_3) elektrik ark fırınlarında belirli bir sıcaklıkta karbon ile indirgenmesiyle elde edilmektedir.

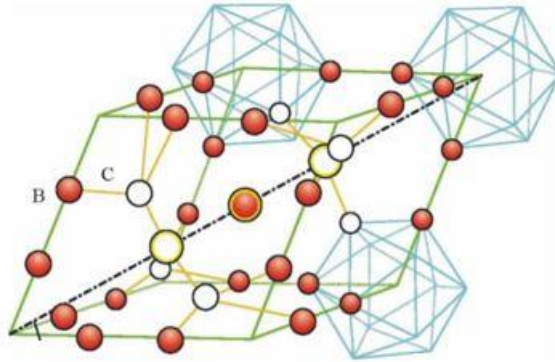
Siyah elmas olarak da adlandırılan B_4C , 2350 °C ergime sıcaklığ ı ve 2.51-2.73 g/cm³ yoğunluğ a sahiptir (Yeş ilkaya ve İbiş oğ lu, 2003). B_4C , kübik bor nitrür ve elmastan sonra doğ ada bulunan en sert (9.36 Mosh sertliğ i) malzemedir. Bu üstün özelliklerin aksine, kırılma tokluğ unun düşük olması sinterlenmesinin zor olması B_4C ’nin kullanım alanını kısıtlamaktadır.

Bor karbürün sahip olduğu özellikler aşağıda sıralanmıştır.

- Kristal yapıdadır ve molekülleri arasındaki kovalent bağ sağlamdır,
- Sert malzemelerdir,
- Elastisite modülü yüksektir,
- Yoğunluğu düşüktür,
- Nötron Emilimi yüksektir,
- Aşındırma kabiliyeti yüksektir,
- Ergime noktası yüksektir,
- Korozyona karşı dirençlidir (Gosset, 2020).

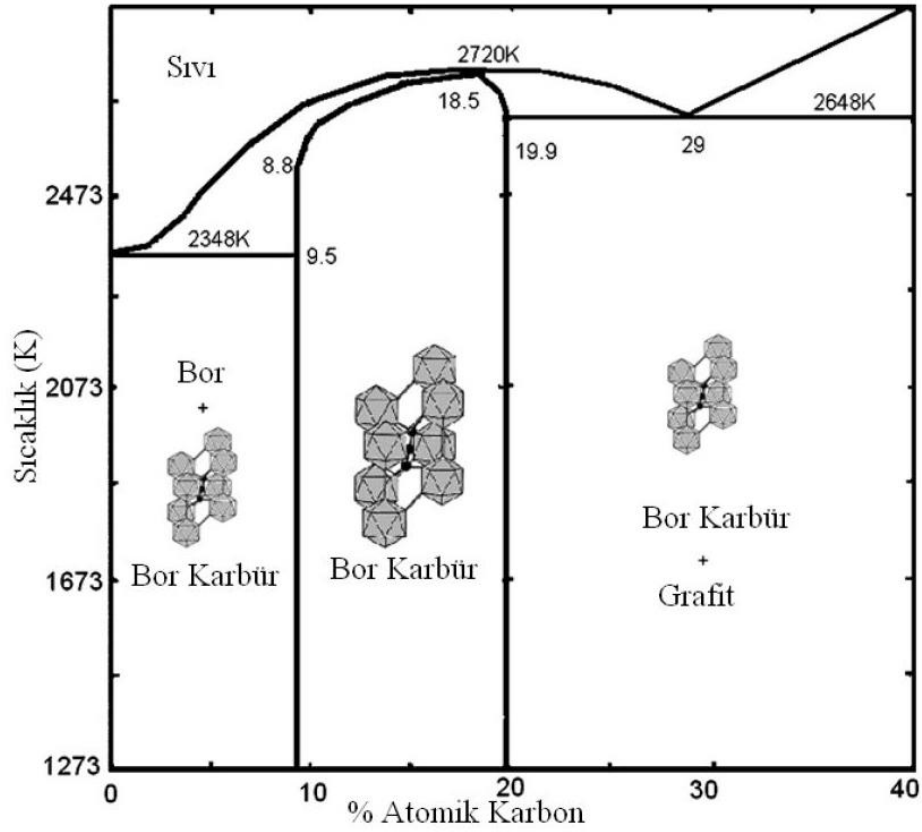
Bor karbür, sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle çok geniş kullanım alanına sahiptir. Bor karbür; malzeme yüzeyinin işlenmesinde, ateşe dayanıklı uygulamalarda, zırhlı taşıtlarda ve giyilebilir zırhlarda, katı yakıt olarak roketlerde, malzemeleri korumak için taşıt fren disklerine uygulanan ince film kaplamasında, nükleer çalışmalarda vb. kullanılmaktadır.

Şeki 2.23'te görüldüğü üzere, B_4C 'nin kristal yapısı rombohedraldir. Bu yapı incelendiğinde her C atomu, dört veya daha fazla B atomuyla bağlı olduğu görülmektedir. B_4C 'nin yapısındaki C oranı yaklaşık olarak %8.8 ile %20 arasında değişmektedir (Conde vd, 2000).



Şekil 2.23. Bor karbürün kristal yapısı (Kovziridze vd, 2013)

Bor-karbon ikili denge diyagramı Şekil 2.24'te görülmektedir. B_4C bileşiklerinin veriminin yüksek olması için B/C oranının kontrol edilmesi gereklidir. Niihara vd (1984) yapmış oldukları çalışmada, en yüksek sertlik değerine B/C oranı 4 iken ulaşmıştır. Bor içeriği arttıkça sertlik değerinin düştüğünü ifade etmişlerdir.



Şekil 2.24. Bor (B)-Karbon (C) İkili Denge Diyagramı (Mohanty vd, 2007)

2.11. Partiküllerin Yüzey Modifikasyonu

Nanopartiküller ile polimer matris ile arasındaki arayüz etkileşimini geliştirmek için nanopartiküllere yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmaktadır. Literatürde yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, polimer matrislerin sahip olduğu (düşük ağırlık ve kolay şekil verilebilme vb.) özelliklerle, nanopartiküllerin benzersiz özelliklerinin kombine edildiği görülmektedir. Yüzey modifikasyon işlemleri, nanopartiküllerin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Bu şekilde elde edilen nanokompozitler; optik, mekanik, elektriksel, manyetik yangın geciktirme gibi çeşitli özelliklere sahiptirler (Breiner ve Mark, 1998).

Nanopartiküllerin modifikasyonu, genellikle yüzey aktif maddeler veya makromoleküller yardımıyla gerçekleşmektedir. Yüzey etkinleştirici maddelerdeki polar gruplar, elektrostatik etkileşimler sonucu nanopartikül yüzeyine absorbe olmaktadır. Bu nedenle yüzey etkinleştirici madde ile modifiye edilmiş nanopartiküller, polimer matrisler için nano dolgu malzemesi olarak kullanılabilir.

Yüzey modifikasyonu işlemi sırasında görülen en büyük problem partikül yüzeyindeki yüksek enerji ve polimer matrislerle nanopartiküllerin yüzeyindeki uyumsuzluk nedeniyle topaklanmasıdır. Topaklanma (aglomerasyon), görüldüğü takdirde partiküller sahip oldukları özellikleri kaybederler.

Partiküllere uygulanan yüzey modifikasyon işlemleri için kullanılan yöntemler: silan bağlayıcı ajanlar ile silanizasyon, esterifikasyon, aş polimerizasyonu, polimer adsorpsiyonudur (Gellermann vd, 1997). Bu yöntemler arasında en çok tercih edilen silan bağlayıcı ajanların kovalent bağ ile partikül yüzeyine bağlanmasıdır. Silan bağlayıcı ajanların birbirinden farklı fonksiyonel gruplara sahip olması, nanopartiküllerin yüzey özelliklerinin modifiye edilmesini sağlamaktadır. Allen (1992), polimer kompozitlerdeki cam elyaf ile epoksi reçine arasındaki bağı güçlendirmek için silan bileşiği kullanarak kapsamlı araştırmalar yapmış ve daha sonra metal-yapıştırıcı bağı geliştirmek için başarıyla uygulamıştır. Metal yüzey, nem varlığında oksidasyona ve hidrasyona uğramakta ve bu durum hidroksil gruplarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu gruplar daha sonra bir siloksan bağı oluşturmak için silanla reaksiyona girer.

Kango vd (2013), polimer kompozitlerin sahip olduğu özellikleri iyileştirmek için kullanılan inorganik nanopartiküllere yüzey modifikasyon işlemi uygulamıştır. Yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış nanopartikül katkısı ile üretilen kompozitlerin; tokluk, yangın geciktirme, optik, elektrik vb. özelliklerinde artış gözlemlenmiştir.

Jang vd (2017), yapmış oldukları çalışmada, silan bileşiği ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış BN nanopartikülleri katkılı epoksi kompozit üretmişlerdir. Yüzey modifikasyonu işlemi ile BN nanopartiküllerinin homojen dağıldığını bunun sonucunda, ara yüzeyde daha yüksek adezyonun olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, kompozit malzemenin termal iletkenliğinin arttığını gözlemlenmişlerdir.

Daneshmehr vd (2021), yapmış oldukları çalışmada, silan bileşiği (3-glisitoksipropiltrimetoksisilan) ile BN partiküllerine yüzey modifikasyon işlemi uygulamıştır. Yüzey modifikasyonu uygulanmış BN partikülü katkılı epoksi kompozitlerde termal iletkenliğin arttığını gözlemlenmişlerdir.

Hou vd (2014), yapmış oldukları çalışmada, h-BN partiküllerini silan bağlayıcı madde (3-aminopropil trietoksi silan) ile modifiye etmiştir. Modifiye edilen h-BN partiküllerini epoksi matris içeresine ilave ederek epoksi/BN kompozitler üretmişlerdir. Ağırlıkça %30 modifiye edilmiş h-BN partikülü katkılı kompozitlerin termal iletkenliğinin, saf haline kıyasla 6.14 kat daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, silan bileşiği ile yüzey modifikasyonunun, epoksi içerisinde BN partiküllerinin homojen dağılmasını sağladığını ve ıslanabilirliğin arttığını gözlemlemişlerdir.

2.12. Literatür Özetleri

BNNT katkısı ile üretilen yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik literatürde yapılmış çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Jakubinek vd (2018) yapmış oldukları çalışmada, epoksi içeresine farklı oranlarda (%1-7) BNNT katkısının, epoksi reçinenin; kırılma tokluğu, viskozite ve gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, BNNT katkısıyla birlikte epoksi reçinenin viskozitesinde artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Epoksilere ağırlıkça %5'e kadar BNNT ilave edilmesi sonucunda, elastisite modülü ve kırılma tokluğu değerlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, ağırlıkça %2'ye kadar BNNT ilavesiyle tek tesirli bağlantı numunelerinin mekanik özelliklerinin iyileştiğini belirtilmiştir. BNNT eklenmesinin sadece epoksi reçinenin özelliklerini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda epoksi-alüminyum arayüzünün gücünü de arttırdığını ifade etmişlerdir.

Rahmat vd (2019) yapmış oldukları çalışmada, epoksi yapıştırıcı içeresine ağırlıkça %0-2 oranlarda BNNT ilave ederek ürettikleri yapıştırıcı ve çift taraflı yapıştırma bağlantılarını farklı şekil değiştirme hızlarında test etmişlerdir. Test sonucunda elastisite modülü, kayma mukavemeti, kırılma deformasyonu ve enerjisi değerlerini elde etmişlerdir. Yaklaşık olarak, gerilme mukavemeti değerinde en yüksek %7, elastisite modülü değerinde ise en yüksek %16 artış olduğunu belirlemişlerdir. Epoksiye BNNT ilavesi kayma özelliklerinde minimum değişikliğe yol açmıştır. Yapıştırma bağlantısındaki kayma mukavemetinin, numunelerin test edildiği şekil değiştirme hızından çok etkilenmediğini ifade etmişlerdir. Dinamik testler esnasında kayma numuneleri yüksek gerilme altında kırılmıştır. Ancak, bu kırılma hızının, kuvvetin yavaşça uygulandığı (yarı statik) rejimde, BNNT'lerin

eklenmesiyle kaybolduğunu belirtmişlerdir. Kırılmaları inceleyerek nanotüplerin normal gerilme altında kayma gerilmesinden daha iyi sonuç verdiğini bildirmişlerdir.

Barus vd (2020) yapmış oldukları çalışmada, BN partiküllerinin farklı oranlarda (ağ. %0, 6, 12, 18) epoksi içerisine eklenmesiyle oluşturulan çift taraflı yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapıştırıcı içerisindeki BN partikülü oranı arttıkça bağlantıların hasar yükü düşmektedir. Bu sebepten dolayı, yapıştırıcı içerisine eklenen BN partiküllerinin ağırlıkça belirli bir yüzdeyi geçmemesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Yapıştırma bağlantısı için en yüksek mekanik özelliklere, yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %6 oranında BN partikülü ilave edilmesiyle ulaşıldığını ifade etmişlerdir.

Degrazia vd (2017) yapmış oldukları çalışmada, dental (diş) yapıştırıcılara dolgu maddesi olarak BNNT eklemişlerdir. Elde ettikleri yeni yapıştırıcıların kimyasal ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %0.075, 0.1 ve 0.15 BNNT eklenmesi sonucunda dental yapıştırıcıların, çözücü bozunma dayanımının ve mikro sertliğinin arttığını gözlemlemiştir. Dental yapıştırıcılara BNNT katkısı (%0.15'e kadar), yapıştırıcıların mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirdiği ifade edilmiştir.

Kompozit malzemelere BNNT katkısı ile fiziksel, termal ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimin incelenmesine yönelik literatürdeki çalışmalar aşağıda yer almaktadır.

Chen vd (2015) yapmış oldukları bir çalışmada, polimer matrisli nanokompozitlere iki farklı nanopartikül (BNNT ve KNT) ilavesi yaparak; partikül çeşidinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. PMMA (Polimetil metakrilat)-BNNT ve epoksi-BNNT arayüzlerinin kırılma enerjisini sırasıyla 0.29 ve 0.47 J/m², kayma mukavemetlerini ise sırasıyla 219 ve 323 MPa değerinde olduğunu deneysel ölçümler sonucunda belirlemişlerdir. BNNT'lerin, KNT'lere kıyasla polimer yapıdaki malzemeler ile daha kuvvetli yapışma yüzeyi oluşturduğunu ve BNNT'lerin polimer matrisli nanokompozitler için son derece iyi takviye malzemesi olduğunu ifade etmişlerdir. Polimer-BNNT arayüzlerinin mükemmel yük transfer kapasitesine sahip olmasının iki nedeni olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bunlar; arayüzlerdeki elektriksel kuvvet (Coulomb) etkileşimleri ve Van der Waals bağlarının kuvvetli olmasıdır.

Guan vd (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, amino (NH_2) ve hidroksil (OH) ile BNNT'leri fonksiyonelleştirmiş (f-BNNT) ve saf BNNT/f-BNNT katkılı epoksi nanokompozitler üretmişlerdir. Üretmiş oldukları nanokompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırdıklarında; sertlik, kırılma şekil değiştirmesi, çekme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin f-BNNT epoksi nanokompozitlerde, saf BNNT epoksi nanokompozitlere kıyasla daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Mekanik özelliklerde gözlemlenen bu artışın nedenin epoksi ile OH ve NH_2 arasındaki kovalent bağlar olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca; epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerindeki artışı sağlayan optimum katkı oranının ağırlıkça %2-3 f-BNNT katkısı olduğunu bildirmişlerdir.

Navaneethakrishnan vd (2020) yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5, %1, %2) BN partiküllerini epoksi nanokompozitlere ilave etmiş ve elde ettikleri yeni epoksi/BN nanokompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nanokompozitlerin mekanik özelliklerinde (darbe dayanımı, mikro sertlik, çekme ve eğilme mukavemeti) artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, bu artış BN partikülü katkısı ağırlıkça %1 olana kadar gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %1 BN partikülü içeren epoksi/BN nanokompozitlerinin sürtünme katsayısı ile aşınma miktarının en az olduğunu belirlemişlerdir. BN partiküllerinin yük taşıma kapasitesi özelliği ile nanokompozitlerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azalması arasında bir ilişki olduğunu ifade etmişlerdir.

Ashrafi vd (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, epoksi içerisine ağırlıkça %1-2 KNT ve ağırlıkça %1-5 BNNT ilave edilmesi ile üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, BNNT'lerin epoksi reçinelerle etkileşiminin daha iyi olduğunu ve BNNT ilave edilerek üretilen kompozitlerin, KNT ilave edilerek üretilen kompozitlere göre elastisite modülünün daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca; ağırlıkça %5 BNNT ve ağırlıkça %2 KNT içeren kompozitlerin çekme mukavemeti ve elastisite modülünün en yüksek değerde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Meng vd (2014) yapmış oldukları çalışmada, BNNT katkılı polivinil bütiral (PVB) ve polikarbonat (PC)/BNNT kompozitleri üretmişlerdir. Çalışma sonucunda, ağırlıkça düşük oranda BNNT ilave edilmesi sonucunda polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinde artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, bu oranın %5'in üstünde olması durumunda BNNT'lerin polimer içerisinde homojen dağılmadığını,

dolayısıyla arayüzey etkileşiminin ve polimer kompozitin mekanik özelliklerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Mostovoy vd (2020) yapmış oldukları çalışmada, γ -aminopropiltrietoksisilan ile yüzeyi modifiye edilmiş, ağırlıkça düşük oranlarda, h-BN'yi epoksi kompozitlere ilave etmişlerdir. Bu modifiye işlemi sonucunda polimer matris ile dolgu arayüzeyi arasında kuvvetli kimyasal bağların oluştuğunu belirtmişlerdir. Yüzey modifikasyonu yöntemi uygulanmış epoksi nanokompozitler, modifiye edilmemiş haline kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere (elastisite modülü, eğilme dayanımı, Brinell sertliği ve tokluk) sahip olduğu ifade edilmiştir.

Hemmatian vd (2019), BNNT'lerin üstün mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahip olduğunu ve bu özelliklerin onları nanokompozitler için uygun bir takviye elamanı yaptığını ifade etmişlerdir. Epoksi matrisin içerisine BNNT ilave edilmesinin nanokompozit malzemenin çatlak yayılmasını engellediğini ve gerilme yoğunluğu faktörlerini azalttığını gözlemlemişlerdir.

Yan vd (2014) yapmış oldukları çalışmada, BN nanoparçacıkları ve BN nano levhaları ile takviye edilmiş polimer kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %1 oranda BN ve BN nano levhaların polimer kompozite ilave edilmesi sonucunda, elastisite modülü %57 ve termal iletkenliği %95 artmıştır. Epoksi içerisinde BNNT ve BN levhalarının düzgün bir şekilde yayıldığını, gözlemlemişlerdir.

Zhi vd (2008) yapmış oldukları çalışmada, polimetil metakrilat (PMMA)/BNNT kompozit filmleri üretmiş ve mekanik özelliklerin BNNT katkı oranına bağlı olarak nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Ağırlıkça %1 oranında BNNT katkısı sonucunda kompozit filmin elastisite modülünde %19 artış gözlemlemişlerdir. Ayrıca, BNNT katkısının mukavemet ve yüzde uzamayı düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Gültekin vd (2021), yapmış oldukları çalışmada, epoksi matrise farklı oranlarda (%0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5) silan bileşiği ile modifiye edilmiş h-BN nanopartikülleri ekleyerek yapısal yapıştırıcının mekanik, termal ve yapısal özellikleri incelemiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde; yapıştırıcı içerisine fonksiyonelleştirilmiş nano h-BN partiküllerinin eklenmesiyle termal ve mekanik özelliklerinin arttığını ifade etmişlerdir.

Nanokompozit malzemelerde katkı malzemesi olarak B₄C kullanımının mekanik özellikler üzerindeki etkisine yönelik literatürdeki çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Durairaj vd (2015), farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3) B₄C katkılı cam/epoksi kompozitleri ürettikleri çalışmada; bor karbür parçacıklarının epoksi matrise eklenmesinin cam/epoksi kompozitin çekme ve akma dayanımını artırdığını gözlemlemişlerdir.

Bhatia vd (2020), farklı oranlarda B₄C partikülü katkılı polimer kompozitler ürettikleri çalışmada; kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlemişlerdir. Bor karbür takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı katkısız haline kıyasla daha düşük olduğunu ve B₄C partiküllerinin katkısı ile epoksinin elastisite modülünün arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca; polimer kompozitlerin B₄C partikülleri katkısı ile sertliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Partikül boyutu ve epoksi türünün kayma ve eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Rodrigues ve Broughton (2013) yapmış oldukları çalışmada, B₄C parçacıkları ile takviye edilmiş epoksi kompozitler üretilmiştir. Epoksi-B₄C parçacıkları arasındaki dağılımı homojen hale getirmek ve yapışmayı güçlendirmek için silanla B₄C parçacıkların yüzeyini modifiye etmiştir. Bu sayede, çekme ve kayma mukavemetinde artış sağlandığı ifade edilmiştir.

Kharat ve Sidhu (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, B₄C ve tungsten disülfür (WS₂) katkılı epoksi kompozitler üretilmiştir. Üretilmiş oldukları kompozitlerin; sertlik, çekme dayanımı, darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini test etmişlerdir. Sertlik ve çekme mukavemeti değerlerinin ağırlıkça %2.5 B₄C ve %4 WS₂ katkısıyla arttığını ifade etmişlerdir.

Saravanan vd (2015) yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5-3) nano B₄C katkılı cam-epoksi nanokompozitler üretilmiştir. B₄C partikülü katkısının kompozitlerin çekme mukavemetini artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, optimum katkı oranının ağırlıkça %1 B₄C olduğunu ifade etmişlerdir.

Arslan vd (2001), B₄C/Al kompozitlerin üretimi ve karakterize edilmesi üzerine yaptığı çalışmada, üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin B₄C katkısıyla arttığını ve B₄C/Al kompozitlerin çoklu çarpmalara dayanıklı zırh malzemesi olarak kullanım potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, B₄C partiküllerinin boyutunun kompozitin mukavemeti üzerinde etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ubaid vd (2017) tarafından yapılan çalışmada ise, farklı oranlarda B₄C nanopartikülü katkısının Al-B₄C nanokompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Ağırlıkça %B₄C nanopartikülü oranının artmasıyla kompozitlerin elastisite modülü, çekme ve basma gerilmesi, sertlik değerlerinde artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Wang vd (2018), epoksi kaplama ile B₄C nanopartikül arasında bulunan kimyasal etkileşimleri iyileştirmek ve epoksi kaplama içerisinde B₄C nanopartiküllerin eşit dağılabilmesini sağlamak için B₄C nanopartiküllerinin yüzeyini silan bileşiği ile fonksiyonize etmişlerdir. Sonuç olarak, silan bileşiğinin epoksi reçinesi ile B₄C partikülleri arasındaki kimyasal etkileşimi arttırdığını ve epoksi reçinenin antikorozyon performansını geliştirdiğini ifade etmişlerdir.

Gültekin vd (2021) yapmış oldukları çalışmada, hekzagonal B₄C nanopartikülleri 3-(glycidyloxypropyl trimethoxysilane) bileşiği ile fonksiyonelleştirilmiştir. Fonksiyonelleştirdikleri B₄C nanopartiküllerini epoksi reçine içerisine farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5) ilave ederek epoksi kompozitler üretmiş ve bu kompozitlerin yapısal, termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu özellikleri artıran optimum B₄C katkı oranının ağırlıkça %2 olduğunu ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Yapıştırıcılar ve Özellikleri

Tez çalışması kapsamında kullanılmak üzere Araldite 2011 (Huntsman A.Ş.) ve MGS-LR 285 (Hexion A.Ş.) epoksi yapıştırıcıları tedarik edilmiştir. Yapıştırıcılar çift bileşenli (epoksi/sertleştirici) olup, kürleşme koşulları, bileşenlerinin oranları ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Araldite 2011 yapıştırıcısı yüksek, MGS-LR 285 yapıştırıcısı ise düşük viskoziteye sahiptir. Bu yapıştırıcılar, malzemelerin gözeneklerini doldurabilme, yüzey ıslanabilirliği, dinamik yüklemeye karşı iyi direnç gibi mükemmel özelliklere sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir. Ayrıca, bu yapıştırıcılar alüminyum ve kompozit malzemelerin birleştirilmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Tablo 3.1. Yapıştırıcıların kürleşme koşulları, bileşenleri ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Yapıştırıcı çeşiti	
	Araldite 2011	MGS-LR285
Viskozite (mPas)	30000-45000	600-900
Camsı geçiş sıcaklığı (°C)	~45	~80
Bileşen oranı (Epoksi:A/Sertleştirici:B)	A:B=1:0.8	A:B=1:0.4
Kürleşme süresi/Sıcaklık	75 dk/60°C	50 dk/80°C

3.2. Yapıştırılan Malzeme

Yapıştırılan malzeme olarak havacılık alanında kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve karbon fiber kumaş takviyeli kompozit malzemeler kullanılmıştır.

Mühendislik uygulamalarında çelik ve dökme demirden sonra yaygın olarak kullanılan malzeme alüminyumdur. Alüminyum alaşımları, hafif aynı zamanda mukavemeti yüksek, korozyon oluşumuna karşı dayanıklı, üstün mekanik ve fiziksel özellikler gibi bir çok avantaja sahiptir. Bu avantajlar nedeniyle; uçak ve savunma sanayi, otomotiv vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Çeşitli uluslararası standartlar (ISO 4587, ASTM D1002) yapıştırma bağlantılarının incelenmesinde AA2024-T3 alüminyum alaşımının kullanılmasını önermektedir. Bu çalışmada, bahsedilen üstün

özelliklerinden dolayı alüminyum alaşımlarından biri olan AA2024-T3 alüminyum alaşımı yapıştırılan malzeme olarak tercih edilmiştir.

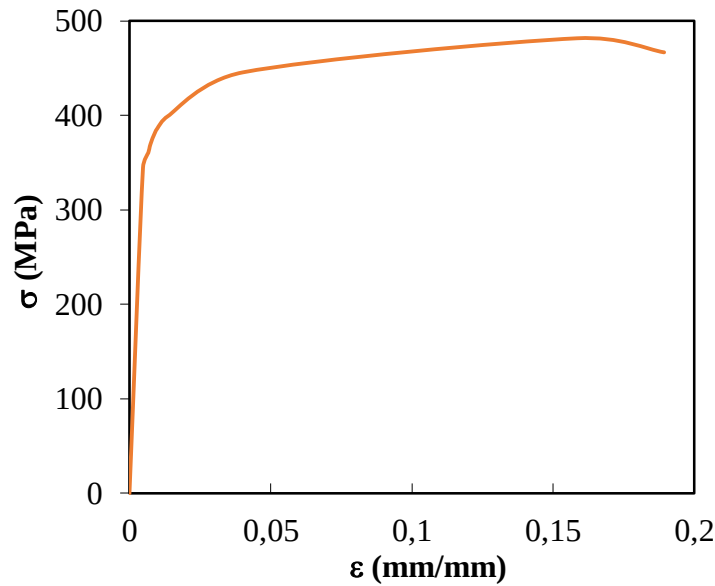
AA2024-T3 alaşımının; bileşenleri Tablo 3.2, mekanik özellikleri Tablo 3.3 ve gerilme şekilme değiştirme eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.2. AA2024-T3 alüminyum alaşımının bileşenleri (Beden vd, 2010)

Bileşenler	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Cr	Diğer
Ağırlık (%)	90.7-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	Maks 0.5	Maks 0.5	Maks 0.15	Maks 0.1	Maks 0.15

Tablo 3.3. AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Akpınar, 2012)

Elastisite modülü (E)	72.4 GPa
Akma dayanımı (σ_y)	345 MPa
Çekme dayanımı (σ_{max})	485 MPa
Poisson oranı (ν)	0.33



Şekil 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşımının gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Akpınar, 2012)

Bir diğer yapıştırılan malzeme olarak ise; karbon fiber kumaş takviyeli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Kompozit malzemeler, düz dokuma konfigrasyonunda olmakla beraber, 245 g.m² 3k (elyaf başına 3000 filament) karbon fiber oranına

sahiptir. Vakum infüzyon tekniğiyle Fibermak (İzmir, Türkiye) firması tarafından üretilen kompozit malzemeler, 100 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca kürleştirilmiştir. Tablo 3.4’te, tez çalışması kapsamında kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4. Kompozit malzemenin özellikleri (Akpınar vd, 2017)

E_1	72 ± 2.8 GPa
E_2	72 ± 2.8 GPa
G_{12}	5 ± 0.3 GPa
ν_{12}	0.1
σ_{12}	650 ± 28 MPa
τ_{12}	90 ± 4.5 MPa
Tabaka Kalınlığı	0.25 ± 0.05 mm

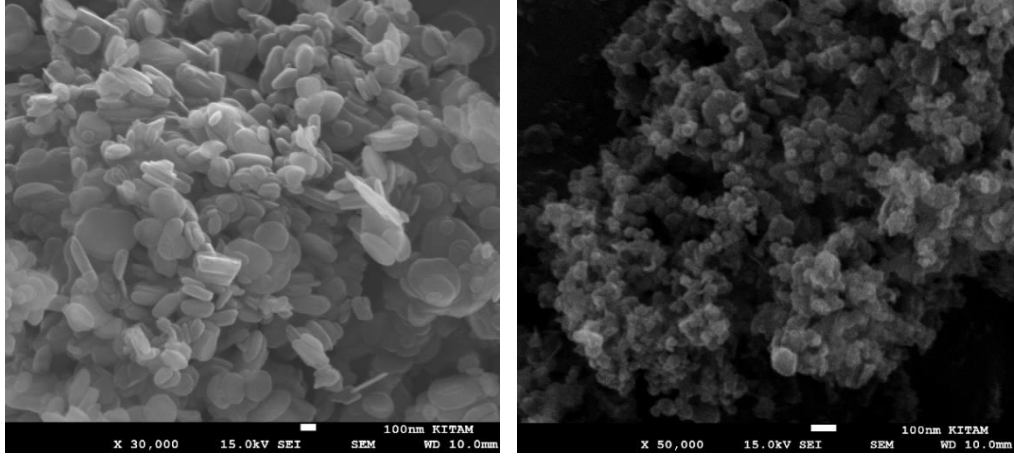
E: Elastisite modülü, ν : Poisson oranı, σ : Çekme dayanımı, τ :Kayma dayanımı

3.3. Kullanılan Nanopartiküller ve Özellikleri

Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcıları içerisine ilave edilecek nanopartikül olarak hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve hekzagonal bor karbür (h-B₄C) nanopartikülleri kullanılmıştır. h-BN nanopartikülleri BORTEK A.Ş.’den (Eskişehir, Türkiye) ve h-B₄C nanopartikülleri Nanografi A.Ş. (Ankara, Türkiye)’den temin edilmiştir. Tablo 3.5’te çalışmada kullanılan bor nanopartiküllerinin fiziksel özellikleri, Şekil 3.2’de ise SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 3.5. Bor nanopartiküllerinin özellikleri

Özellikler	Nanopartiküller	
	Bor Nitrür	Bor Karbür
Kristal Faz	Hekzagonal	Hekzagonal
Form	Toz	Toz
Saflık	%99.97	%99.5
Partikül Boyutu	50-120 nm	40-60 nm
Erime Noktası	3000 °C	2540 °C
Yoğunluk	2.3 g/cm ³	0.1 g/cm ³
Elastisite Modülü	865 GPa	445 GPa



(a)

(b)

Şekil 3.2. Bor nanopartiküllerinin SEM görüntüleri (a) Bor nitrür, (b) Bor karbür

3.4. Bor Nanopartiküllerinin Yüzey Modifikasyonu için Kullanılan Bileşikler

Bağlayıcı maddeler (coupling agents), biri organik (yapıştırıcı, polimer vb.) diğeri inorganik (cam, metal vb.) olmak üzere iki farklı malzeme arasındaki adezyonu artırmak için kullanılan kimyasallardır. Bu çalışmada, bağlayıcı madde olarak silan bağlayıcılar (silane coupling agents) tercih edilmiştir.

Birbirinden farklı fonksiyonel gruplara sahip olan silan bağlayıcılar, kovalent bağ ile partikül yüzeyine bağlanarak nanopartiküllerin yüzey özelliklerinin modifiye edilmesini sağlar. Tez çalışması kapsamında, h-BN nanopartikülleri ile epoksi arasındaki adezyonu iyileştirmek ve bu partiküllerin homojen dağılımını sağlamak için 3-(aminopropyl) triethoxysilane (APTES) silan bileşiği kullanılmıştır. Silan bileşiğinin sahip olduğu amin grupları aracılığı ile h-BN partikülleri fonksiyonelleştirilmiştir. h-B₄C nanopartiküllerini fonksiyonelleştirmek için 3-(glycidyloxypropyl) trimethoxysilane (GPS) bileşiği kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan silan bağlayıcı kimyasallar, Evonik Industries'den (İstanbul, Türkiye) temin edilmiştir.

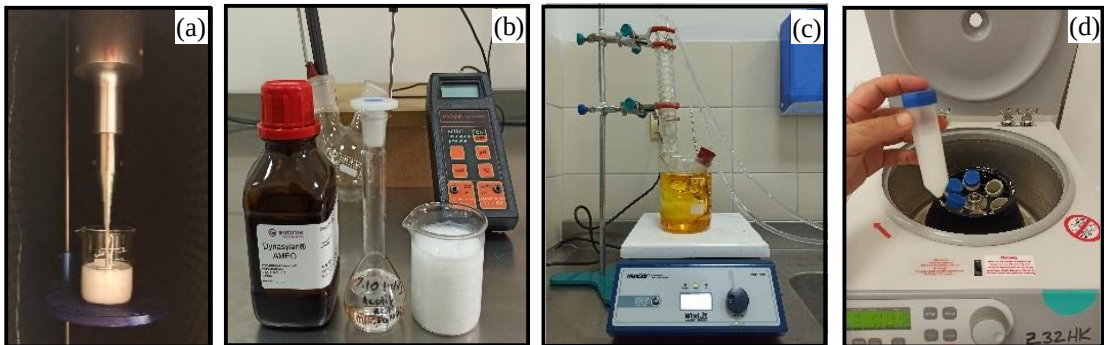
3.5. Bor Partiküllerinin Yüzey Modifikasyon İşlemi

Silan bileşikleri epoksi reçine içerisindeki adezyonu arttırmak ve inorganik nanopartiküllerin yüzeylerini modifiye etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bileşikler, reçine ve nanopartikül arasında kimyasal bir köprü oluşturarak gerilme aktarımını sağlar. Ayrıca, epoksi reçine içerisinde nanopartiküllerin daha iyi

(homojen) dağılmasını sağlar. Bu amaçla, nanopartikül katkılı epoksi yapıştırıcılar üretilmeden önce bor nanopartiküllerinin (h-BN ve h-B₄C) yüzeyleri silan bağlayıcılar ile modifiye edilmiştir.

h-BN nanopartiküllerini (3-aminopropil) trietoksisilan (APTES) bileşiği ile fonksiyonelleştirmek için yapılan işlemler sırasıyla aşağıda verilmiştir (Gültekin vd, 2021; Mostovoy vd, 2020). Şekil 3.3'te h-BN nanopartiküllerinin yüzey modifikasyon aşamaları verilmiştir.

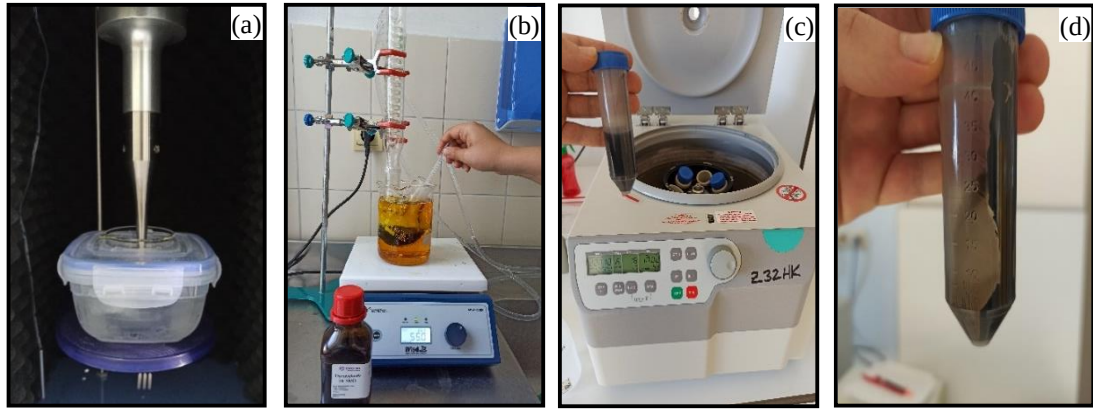
- Partiküllerin yüzeyine hidrofilik (su emebilen) özellik kazandırabilmek amacıyla, h-BN nanopartiküllerine 1000 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca ısıtılma işlemi (tavlama) uygulanmıştır.
- Tavlama işlemi sonrası 0.5 gr h-BN nanopartiküllerinin üzerine 30 ml saf su ilave edilmiş ve nanopartiküller arasındaki aglomerasyonu engellemek amacıyla ultrasonik karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Saf su + h-BN karışımı üzerine hacimce %5 (3-aminopropil) trietoksisilan bileşiği içeren 70 ml fonksiyonelleştirme çözeltisi ilave edilmiş ve 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır.
- Karıştırma işlemi yapılırken hacimce %10 asetik asit çözeltisi (CH₃COOH) karışıma ilave edilerek pH değerinin 5 olması sağlanmıştır.
- Ardından, karışım balona alınarak 80 °C sıcaklıkta ve 100 dev/dk hızda, 12 saat süre ile reflüks (geri soğutma) işlemi yapılmıştır.
- Karışım ultrasantrifüj yöntemi kullanılarak saf suyla yıkanmış, böylelikle silan bileşikler ortadan kaldırılmıştır.
- Son olarak, fonksiyonelleştirilmiş h-BN nanopartikülleri 80 °C sıcaklıkta 5 saat boyunca etüvde kurutulmuştur.



Şekil 3.3. Hekzagonal bor nitrür (h-BN) nanopartiküllerinin yüzey modifikasyon aşamaları (a) Karıştırma, (b) Balon, (c) Refluks, (d) Santrifüj

h-B₄C nanopartiküllerini 3-(glycidyloxypropyl) trimethoxysilane (GPS) bileşiği ile fonksiyonelleştirmek için yapılan işlemler sırasıyla aşağıda verilmiştir (Gültekin vd, 2021; Wang vd, 2018). Şekil 3.4'te h-B₄C nanopartiküllerinin yüzey modifikasyon aşamaları verilmiştir.

- Beherglası konulan 0.5 g h-B₄C nanopartikülü üzerine 50 ml, 1:1 oranda saf su/etanol ilave edilmiş ardından, 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır.
- Karıştırma işlemi ile partiküller birbiri içerisinde dağıldıktan sonra h-B₄C + saf su/etanol karışımı üzerine 6 ml silan bileşiği (GPS) damla damla eklenmiştir.
- Daha sonra, pH değerini 7 olarak ayarlamak için karışımın üzerine hacimce %10'luk CH₃COOH çözeltisi ilave edilmiştir.
- Elde edilen karışım bir balon içerisine alınarak, ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda, 40 °C sıcaklıkta 5 saat boyunca karıştırılmıştır.
- Daha sonra, karışım, ultrasantifürüj yöntemiyle saf su ve etanol ile yıkanmıştır.
- Son olarak, fonksiyonelleştirilmiş h-B₄C nanopartikülleri etüv içerisinde kurutulmuştur.



Şekil 3.4. Hekzagonal bor karbür (h-B₄C) nanopartiküllerinin yüzey modifikasyon aşamaları (a) Karıştırma, (b) Refluks, (c) Santrifüj, (d) Yıkama

Modifiye edilmiş hekzagonal bor nitrür nanopartikülleri f-BN ve hekzagonal bor karbür nanopartikülleri ise f-B₄C olarak isimlendirilmiştir.

3.6. Katkısız ve Bor Nanopartikülü Katkılı Yapıştırıcıların Hazırlanması

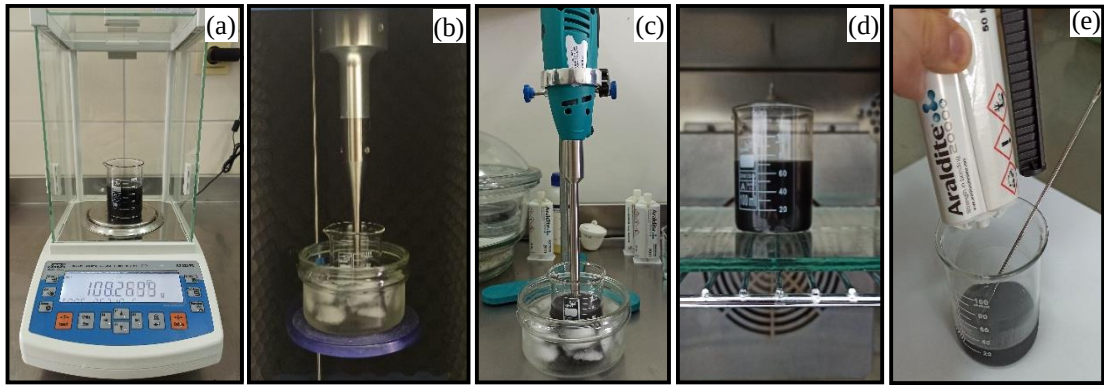
Bor nanopartikülleri katkısı sonucunda yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimi incelemek için katkısız ve farklı oranlarda bor nanopartikülü katkılı yapıştırıcılar hazırlanmıştır.

Bor nanopartikülü katkısız yapıştırıcıların hazırlanması için ilk olarak belirlenen miktarda epoksi üzerine 75 ml aseton ilave edilmiştir. Elde edilen epoksi + aseton karışımı ilk önce ultrasonik karıştırıcıda, ardından yüksek kayma mikserinde 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra karışım etüv içerisine konulmuştur. Bu esnada, karışım içerisindeki asetonun uçup uçmadığını anlayabilmek için hassas terazi kullanılarak ağırlık kontrolü yapılmıştır. Ağırlık kontrolü ile başlangıçta eklenen asetonun tamamen buharlaştığı anlaşıldıktan sonra, epoksi içerisine Tablo 3.1’de verilen epoksi/sertleştirici oranına göre sertleştirici ilave edilmiştir. Son olarak, epoksi + sertleştirici karışımı 10 dk boyunca el ile karıştırılmıştır.

Nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen dağıtılması, nanopartikül katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında oldukça önemli bir husustur. Bahsedilen homojen dağılımı sağlayabilmek için farklı oranlarda (%0,5, %1, %2, %3, %4 ve %5) bor nanopartikülü (h-BN ve h-B₄C) katkılı yapıştırıcılar, aşağıda maddeler halinde verilen şekilde hazırlanmıştır (Gültekin vd, 2021). Bor nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında gerçekleştirilen işlemler Şekil 3.5’te verilmiştir.

- Temiz ve boş bir beherglasa, yapılması düşünülen miktarda nanopartikül eklenir. h-BN/h-B₄C nanopartiküllerin dağılmasını sağlayabilmek için nanopartiküller üzerine aseton ilave edilerek ultrasonik karıştırıcıda 15 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Ardından, belirlenen miktarda epoksi, aseton içerisinde dağılmış olan nanopartiküller üzerine ilave edilmiştir.
- Elde edilen aseton + h-BN/h-B₄C nanopartikülü + epoksi karışımı, ilk önce ultrasonik karıştırıcıda, ardından yüksek kayma mikserinde 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sırasında meydana gelen ısı, epoksi ve bor nanopartiküllerine zarar verebilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için karıştırma işlemi beherglasın altına yerleştirilen buz banyosu içerisinde yapılmıştır.

- Daha sonra, bu karışımdan asetonun buharlaşmasını sağlamak için camsı geçiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta etüv içerisine konulmuştur. Karışım içerisindeki asetonun uçup uçmadığını anlayabilmek için hassas terazi kullanılarak ağırlık kontrolü yapılmıştır.
- Ağırlık kontrolü ile başlangıçta eklenen asetonun tamamen buharlaştığı anlaşıldıktan sonra, h-BN/h-B₄C nanopartikülü + epoksi karışımına Tablo 3.1’de verilen epoksi/sertleştirici oranına göre sertleştirici ilave edilmiştir.
- Son olarak, elde edilen h-BN/h-B₄C nanopartikülü + sertleştirici + epoksi karışımı, 10 dakika boyunca el ile karıştırılmıştır.



Şekil 3.5. Bor nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların hazırlanması

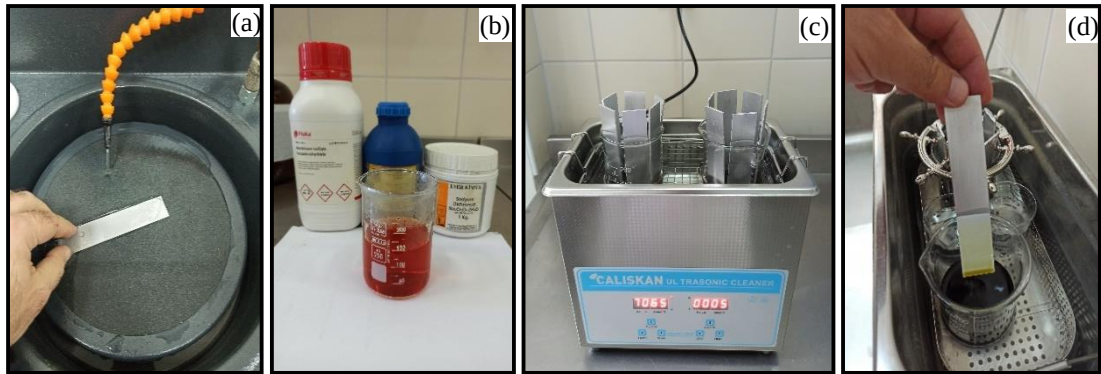
3.7. Yapıştırma Bağlantısı Numunelerinin Yüzey Temizliği

Yapıştırılan malzemenin yüzey durumu, bağlantıların mukavemeti üzerinde etkili olan bir faktördür. Yüzey pürüzlülüğü ve kalitesi bağlantının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bor nanopartikülleri katkısının tek tesirli yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisini doğru bir şekilde belirleyebilmek için tüm yüzeylerin aynı olması gereklidir. Aksi halde, yapıştırılan malzemenin yüzey özelliği farklı bir parametre olarak karşımıza çıkar.

AA2024-T3 alüminyum alaşımlı levha, ASTM 1002 standartında belirtilen ölçülerde hassas lazer kesim ile kesildikten sonra uygulanan yüzey hazırlama işlemi sırasıyla aşağıda verilmiştir (Şekil 3.6).

- AA2024-T3 alaşımı numuneler, ilk önce alkalin esaslı bir deterjan ile temizlenmiştir. Temizlenen numuneler, üzerinde deterjan artıkları kalmaması için saf su ile yıkanmıştır.

- Ardından bu numuneler aseton ile temizlenerek, yüzeyinde lazer kesim işleminden kalan; yağ, kir vb. gibi kirletici maddeler çözünmüştür.
- Daha sonra, AA2024-T3 alüminyum alaşımının yüzeyi farklı boyutlara sahip (P320, P600, P800, P1200) silisyum karbür (SiC) zımpara ile zımparalanmıştır.
- Zımparalanan numuneler, saf su ile yıkanmış, 10 dk süre ile asetonunda bekletilmiştir. Daha sonra, bu numuneler 80 °C'de etüvde kurutulmuştur. Böylelikle, mekanik temizleme işlemi sona ermiş ve kimyasal yüzey temizliği aşamasına geçilmiştir.
- Optimize edilmiş sülfürik asit/sodyum dikromat çözeltisi; 28.8 ml H₂SO₄, 160 ml saf su, 5.28 gr Na₂Cr₂O₇, 0.24 gr Al ve 0.16 gr Cu tuzu ile hazırlanmıştır.
- AA2024-T3 numuneleri, hazırlanan dağlama çözeltisi içerisinde 70 °C sıcaklıkta, 15 dk süre ile dağlanmıştır.
- Daha sonra, dağlanan numuneler saf su ve etanol ile yıkanmış, etüv içerisinde kurutulmuştur.



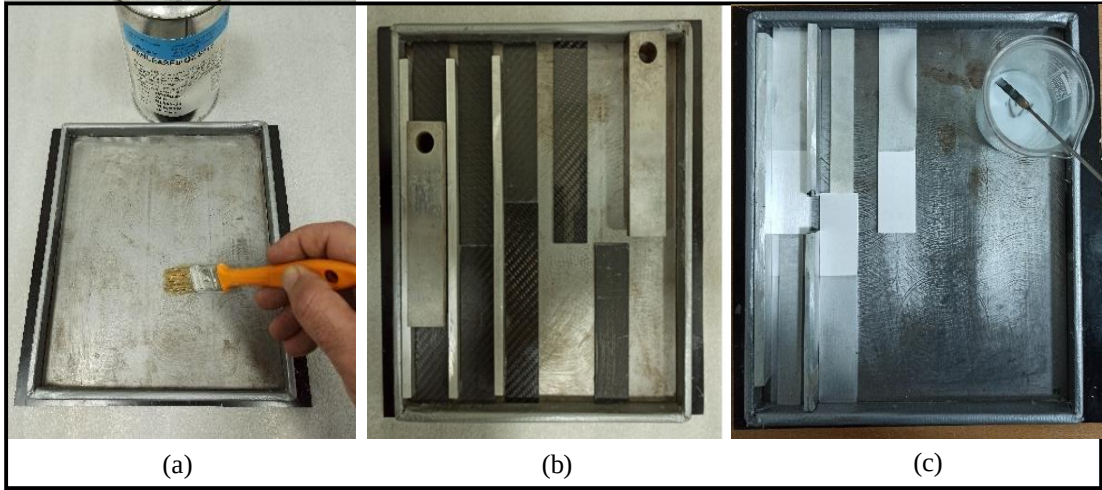
Şekil 3.6. AA2024-T3 alüminyum alaşımı için yüzey hazırlık aşamaları

Karbon fiber kumaş takviyeli düz dokuma kompozitlerin yüzey hazırlığında ise yapıştırılacak kompozit malzemeler ilk önce alkalın esaslı bir deterjan ile temizlenmiştir. Temizlenen malzemeler üzerinde deterjan artıkları kalmaması için saf su ile yıkanmıştır. Ardından numuneler aseton içerisinde 10 dk boyunca bekletilmiştir. Son olarak, numuneler 80 °C sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur.

3.8. Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantısı Numunelerinin Hazırlanması

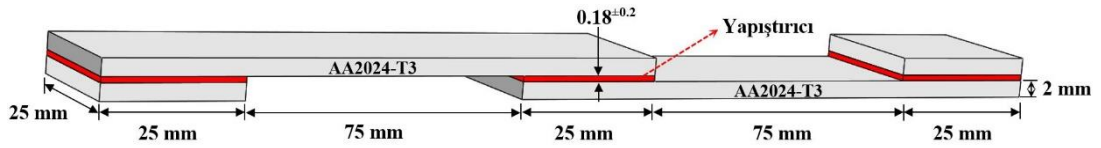
Yapıştırıcı hazırlığı ve yapıştırılan malzemenin yüzey temizliği işlemi tamamlandıktan sonra, yapıştırılan malzemenin konumunu ve yapıştırıcı kalınlığını ayarlamak için Şekil 3.7b ve Şekil 7c'deki kalıp ve kalıp aparatları kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretilmiştir. Bu amaçla ilk önce; üretilecek tek tesirli

bağlantı numunelerinin kalıptan rahat bir şekilde ayrılması için kalıp üzerine silikon yağlayıcı (Şekil 3.7a) ile ince bir film tabaka oluşturulmuştur. Daha sonra, katkısız ve farklı oranlarda f-BN ve f-B₄C katkılı yapıştırıcılar, bir spatül ile AA2024-T3 ve kompozit numunelerinin yüzeyine uygulandıktan sonra Tablo 3.1'de belirtilen sıcaklık ve sürede kürleşme işlemi için etüve konulmuştur. Kürleştikten sonra tek tesirli bağlantı numuneleri oda sıcaklığında soğutulmuştur. Daha sonra, elde edilen bu numunelerdeki yapışma alanı dışına taşan yapıştırıcılar temizlenmiştir.

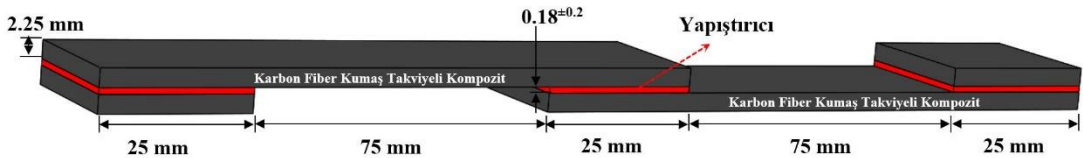


Şekil 3.7. Alüminyum ve kompozit bağlantı numunelerinin oluşturulması

Katkısız ve f-BN ve f-B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcılar kullanılarak, her bir değişken için üç adet tek tesirli AA2024-T3 alüminyum alaşımlı ve kompozit bağlantı numunesi üretilmiştir. Üretilen alüminyum ve kompozit bağlantı numunelerinin boyutları ve geometrisi Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



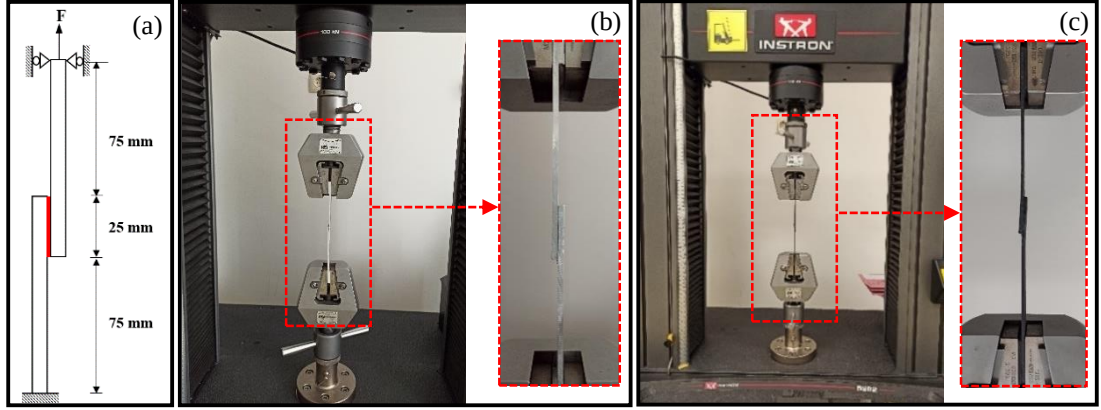
Şekil 3.8. Alüminyum bağlantı numunelerinin geometrisi



Şekil 3.9. Kompozit bağlantı numunelerinin geometrisi

3.9. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen alüminyum ve kompozit tek tesirli bağlantı numunelerinin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında, tüm testler, oda sıcaklığında (25 °C ve %45 bağıl nem) 100 kN yük hücresine sahip INSTRON marka universal çekme testi cihazında 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen hasar yükü ve yer değiştirme değerleri her bir parametre için ayrı ayrı kaydedilmiştir. Bunun yanı sıra, her bir bağlantı numunesi yakından incelenerek oluşan hasarın tipi belirlenmiştir. Şekil 3.10’da tek tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numunelerine uygulanan sınır şartları, kuvvetler ve çekme deneyi gösterilmiştir.



Şekil 3.10. (a) Sınır şartları (b) Alüminyum alaşımlı yapıştırma bağlantısı çekme deneyi (c) Kompozit yapıştırma bağlantısı çekme deneyi

AA2024-T3 alaşımı numuneleri, iki farklı yapıştırıcıya (Araldite 2011 ve MGS-LR285) %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında fonksiyonelleştirilmiş bor partikülleri (f-BN ve f-B₄C) ilave edilerek üretilmiştir. Kompozit numuneler ise, %0.5, %1, %2, %3 oranlarında f-BN ve f-B₄C ilave edilerek elde edilmiştir. Alüminyum ve kompozit bağlantı numunelerine ait deneysel parametreler Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.6. Çekme kuvvetine maruz kalan tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri için deneysel parametreler

Araldite 2011			MGS-LR285		
Partikül	Katkı oranı (%)	İsim	Partikül	Katkı oranı (%)	İsim
Katkısız	0	A0	Katkısız	0	M0
f-BN	0.5	A/f-BN/0.5	f-BN	0.5	M/f-BN/0.5
f-BN	1	A/f-BN/1	f-BN	1	M/f-BN/1
f-BN	2	A/f-BN/2	f-BN	2	M/f-BN/2
f-BN	3	A/f-BN/3	f-BN	3	M/f-BN/3
f-BN	4	A/f-BN/4	f-BN	4	M/f-BN/4
f-BN	5	A/f-BN/5	f-BN	5	M/f-BN/5
f-B ₄ C	0.5	A/f-BC/0.5	f-B ₄ C	0.5	M/f-BC/0.5
f-B ₄ C	1	A/f-BC/1	f-B ₄ C	1	M/f-BC/1
f-B ₄ C	2	A/f-BC/2	f-B ₄ C	2	M/f-BC/2
f-B ₄ C	3	A/f-BC/3	f-B ₄ C	3	M/f-BC/3
f-B ₄ C	4	A/f-BC/4	f-B ₄ C	4	M/f-BC/4
f-B ₄ C	5	A/f-BC/5	f-B ₄ C	5	M/f-BC/5

Tablo 3.7. Çekme kuvvetine maruz kalan tek tesirli kompozit bağlantı numuneleri için deneysel parametreler

Araldite 2011			MGS-LR285		
Partikül	Katkı oranı (%)	İsim	Partikül	Katkı oranı (%)	İsim
Katkısız	0	A/0	Katkısız	0	M/0
f-BN	0.5	A/f-BN/0.5	f-BN	0.5	M/f-BN/0.5
f-BN	1	A/f-BN/1	f-BN	1	M/f-BN/1
f-BN	2	A/f-BN/2	f-BN	2	M/f-BN/2
f-BN	3	A/f-BN/3	f-BN	3	M/f-BN/3
f-B ₄ C	0.5	A/f-BC/0.5	f-B ₄ C	0.5	M/f-BC/0.5
f-B ₄ C	1	A/f-BC/1	f-B ₄ C	1	M/f-BC/1
f-B ₄ C	2	A/f-BC/2	f-B ₄ C	2	M/f-BC/2
f-B ₄ C	3	A/f-BC/3	f-B ₄ C	3	M/f-BC/3

3.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS)

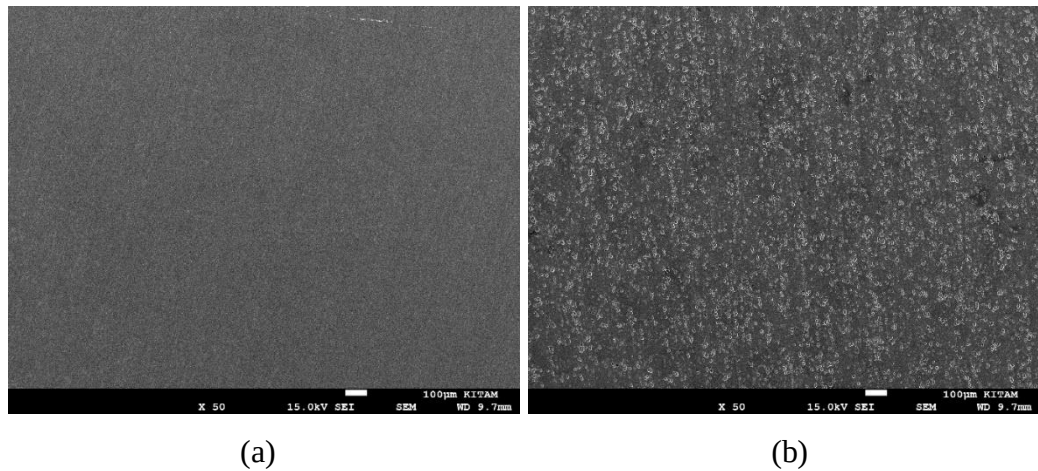
Fonksiyonelleştirilmiş bor nanopartiküllerinin (f-BN ve f-B₄C), Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılar içerisinde homojen dağılıp dağılmadığını gözlemlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında, SEM-EDS analizini gerçekleştirmek için JEOL JSM-7001F marka cihaz kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Farklı viskozite değerine sahip iki epoksi yapıştırıcıya katkısız ve altı farklı oranda (ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5) bor nitrür ve bor karbür (f-BN ve f-B₄C) ilave edilmesiyle elde edilen tek tesirli alüminyum (AA2024-T3) yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yükü ve yer değiştirme değerleri çekme testi ile belirlenmiştir. Benzer şekilde, katkısız ve dört farklı oranda (ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3) f-BN ve f-B₄C katkılı tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yükü ve yer değiştirme değerleri çekme testi ile belirlenmiştir. Her bir değişken için 3 adet alüminyum ve kompozit bağlantı numunesi test edilmiştir. Nanopartikül türüne, katkı oranına ve yapıştırıcı çeşidine göre mekanik özelliklerde meydana gelen değişim incelenmiştir.

4.1. Yapıştırılan Malzemenin (AA2024-T3) Dağlama İşlemi

Optimize edilmiş sülfürik asit/sodyum dikromat çözeltisi ile kimyasal yüzey hazırlama sürecinde dağlanmış ve zımparalama işlemine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Numunelere dağlama işlemi uygulanması sonucunda, yüzeydeki oksit tabakasının çözündüğü ve yeni ince bir oksit tabakasının meydana geldiği gözlemlenmiştir. AA2024-T3 yüzeyinde oluşan ağısı ve gözenekli yapı, yapıştırıcı ile yüzey arasında mekanik kilitlenmeyi sağlamaktadır. Ayrıca, tüm dağlanmış numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), bir yüzey profilometresi (PCE-RT 2000, Almanya) kullanılarak ölçülmüş ve $0,922 \pm 0,01 \mu\text{m}$ değerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1. AA2024-T3'ün yüzeyi; (a) 1200 tane boyutlu (grit) zımpara kağıdı ile zımparalanmış, (b) Dağlanmış

4.2. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Nitrür Nanopartiküllerinin (f-BN) Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi

Katkısız ve ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarında f-BN katkılı Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcıları kullanılarak elde edilen tek tesirli alüminyum yapıştırma bağlantılarının her bir değişkeni (yapıştırıcı ve nanopartikül katkı oranı) için üç numune test edilmiş ve elde edilen hasar yükü ve yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir.

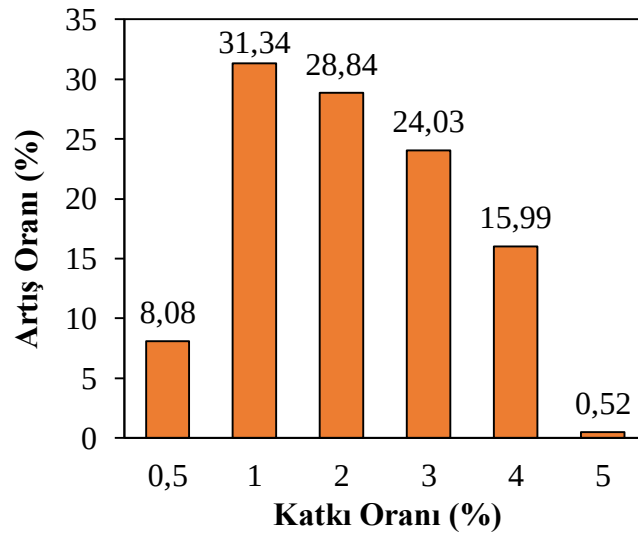
Tablo 4.1’de verilen çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, Araldite 2011 yapıştırıcılara fonksiyonelleştirilmiş bor nitrür (f-BN) eklenmesi ile elde edilen tüm tek tesirli yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir.

Tablo 4.1. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
A0	A0-1	12680	12387 ^{±251}	2.309	2.294 ^{±0.034}
	A0-2	12414		2.255	
	A0-3	12067		2.319	
A/f-BN/0.5	A/f-BN/0.5-1	13295	13388 ^{±203}	2.671	2.664 ^{±0.049}
	A/f-BN/0.5-2	13249		2.611	
	A/f-BN/0.5-3	13621		2.709	
A/f-BN/1	A/f-BN/1-1	16133	16269 ^{±118}	3.360	3.177 ^{±0.159}
	A/f-BN/1-2	16350		3.080	
	A/f-BN/1-3	16324		3.090	
A/f-BN/2	A/f-BN/2-1	15955	15960 ^{±155}	2.794	2.824 ^{±0.030}
	A/f-BN/2-2	16118		2.823	
	A/f-BN/2-3	15809		2.854	
A/f-BN/3	A/f-BN/3-1	15671	15363 ^{±286}	2.848	2.822 ^{±0.026}
	A/f-BN/3-2	15314		2.821	
	A/f-BN/3-3	15105		2.797	
A/f-BN/4	A/f-BN/4-1	14530	14368 ^{±353}	2.879	2.738 ^{±0.254}
	A/f-BN/4-2	14612		2.891	
	A/f-BN/4-3	13963		2.445	
A/f-BN/5	A/f-BN/5-1	11384	12451 ^{±924}	2.517	2.758 ^{±0.256}
	A/f-BN/5-2	13009		3.028	
	A/f-BN/5-3	12960		2.728	

Ek 1’de katkısız ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5-%5) f-BN katkılı Araldite 2011 yapıştırıcısıyla üretilen yapıştırma bağlantılarının çekme deneyi sonuçlarından elde edilen hasar yükü/yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Hem Tablo 4.1’deki değerler hem de Ek 1’de verilen eğriler incelendiğinde, katkı oranına bağlı olarak hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir.

Şekil 4.2’de katkısız bağlantılara kıyasla, katkı oranına bağlı olarak ortalama hasar yükünde meydana gelen değişim yüzdesel olarak kıyaslanmıştır. Ağırlıkça %0.5 f-BN katkısı ile hasar yükü %8.08 oranında artmaktadır. Hasar yükünde en yüksek artış (%31.34) ağırlıkça %1 f-BN katkısı ile gerçekleşirken bu değerden sonra artış yüzdesi azalmıştır. Ağırlıkça %2, %3 ve %4 f-BN katkısıyla ortalama hasar yükü sırasıyla; %28.84, %24.03, %15.99 oranlarında artmıştır. Ayrıca, %5 f-BN katkısında belirgin bir artış (%0.52) gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.2. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükündeki değişim

Araldite 2011 yapıştırıcılarına f-BN katkısı ile üretilen alüminyum bağlantıların ortalama yer değiştirme değerleri incelendiğinde, katkısız haline kıyasla bu değerlerin, ağırlıkça %0.5 f-BN katkısıyla %16.13, %1 f-BN katkısıyla %38.49 arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %2, %3, %4, %5 f-BN katkısıyla ise ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla %23.1, %23.01, %19.35 ve %20.23 oranda artmıştır.

Hasar yükü ve yer değiştirme değerleri birlikte değerlendirildiğinde, Araldite 2011 yapıştırıcısı için optimum f-BN katkı oranının ağırlıkça %1 olduğu gözlemlenmiştir.

Benzer şekilde, katkısız ve farklı oranlarda f-BN katkı MGS-LR285 yapıştırıcısıyla tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretilmiş ve çekme testi uygulanmıştır. Hasar yükü katkısız bağlantılara kıyasla, tüm f-BN katkı oranlarında (ağırlıkça %0.5-%5) artmıştır. Çekme testi sonucu elde edilen hasar yükü ve yer değiştirme değerleri Tablo 4.2’de, hasar yükü/yer değiştirme eğrileri ise Ek-2’de verilmiştir.

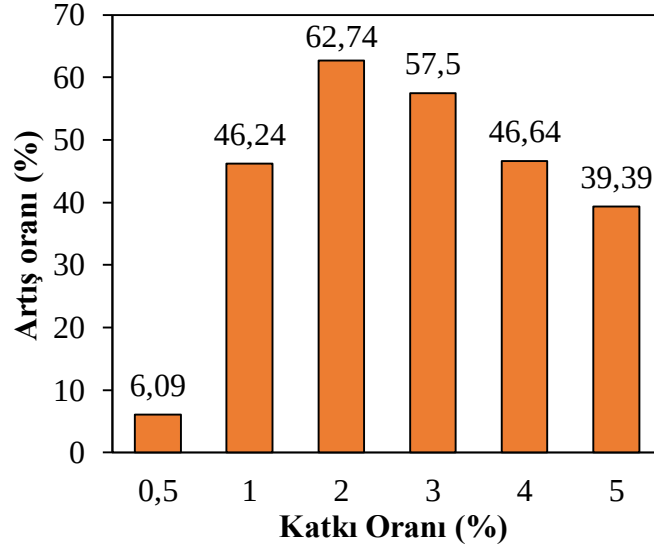
Tablo 4.2. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
M0	M0-1	10654	10659 ^{±108}	1.735	1.731 ^{±0.025}
	M0-2	10554		1.703	
	M0-3	10769		1.753	
M/f-BN/0.5	M/f-BN/0.5-1	11306	11309 ^{±220}	1.936	1.915 ^{±0.129}
	M/f-BN/0.5-2	11091		1.777	
	M/f-BN/0.5-3	11530		2.033	
M/f-BN/1	M/f-BN/1-1	15451	15588 ^{±281}	2.592	2.620 ^{±0.038}
	M/f-BN/1-2	15402		2.663	
	M/f-BN/1-3	15912		2.605	
M/f-BN/2	M/f-BN/2-1	17211	17346 ^{±226}	4.126	3.877 ^{±0.221}
	M/f-BN/2-2	17220		3.804	
	M/f-BN/2-3	17607		3.701	
M/f-BN/3	M/f-BN/3-1	16933	16788 ^{±814}	3.533	3.441 ^{±0.080}
	M/f-BN/3-2	17520		3.404	
	M/f-BN/3-3	15912		3.386	
M/f-BN/4	M/f-BN/4-1	15536	15631 ^{±209}	2.976	3.102 ^{±0.140}
	M/f-BN/4-2	15487		3.253	
	M/f-BN/4-3	15871		3.077	
M/f-BN/5	M/f-BN/5-1	14428	14858 ^{±553}	2.733	2.660 ^{±0.163}
	M/f-BN/5-2	14666		2.473	
	M/f-BN/5-3	15482		2.774	

Tablo 4.2’deki değerler ve Ek 2’de verilen eğriler birlikte incelendiğinde, katkı oranına bağlı olarak hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %2 oranda f-BN ilave edilmesiyle üretilen bağlantı numunelerinin (M/f-BN/2) maksimum hasar yükü ve yer değiştirme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ağırlıkça %2 f-BN katkı oranından sonra bağlantı numunelerinin hasar yükü ve yer değiştirme değerleri doğrusal olarak azalmaya

başlamıştır ancak yine de bu değerler katkısız yapıştırıcı (M0) ile oluşturulmuş bağlantılara kıyasla daha yüksektir.

Şekil 4.3'te M0 numunesine kıyasla, ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında f-BN katkılı numunelerin ortalama hasar yükü sırasıyla %6.09, %46.24, %62.74, %57.5, %46.64, %39.39 oranda arttığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükündeki değişim

Benzer şekilde, ortalama yer değiştirme değerleri katkısız numuneye kıyasla, MGS-LR 285 yapıştırıcısına ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN ilave edilmesiyle sırasıyla %10.63 ve %51.36 artmıştır. Ortalama yer değiştirme değerinde en yüksek artış (%123.97), %2 f-BN katkı oranında gerçekleşmiştir. Bu katkı oranından sonra artış yüzdesi düşmeye başlamıştır. Ağırlıkça %3, %4 ve %5 oranlarda f-BN katkısıyla ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla %98.78, %79.2 ve %53.67 oranda artmıştır.

Her iki yapıştırıcı (Araldite 2011 ve MGS-LR285) için tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, f-BN katkısının tek tesirli alüminyum yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinde dikkat çekici bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. h-BN nanopartiküllerinin kendine has üstün fiziksel ve mekanik özellikleri, fonksiyonelleştirme işlemiyle nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen dağılması, f-BN ile epoksi arasındaki adezyonun iyileşmesi, bağlantıların mekanik özelliklerindeki artışın üzerinde etkili olan faktörlerdir.

Araldite ve MGS-LR285 yapıştırıcılar içerisinde f-BN nanopartiküllerinin homojen dağılımının sağlanması ile yapıştırıcılar içerisindeki mikro boşluklar dolmuş

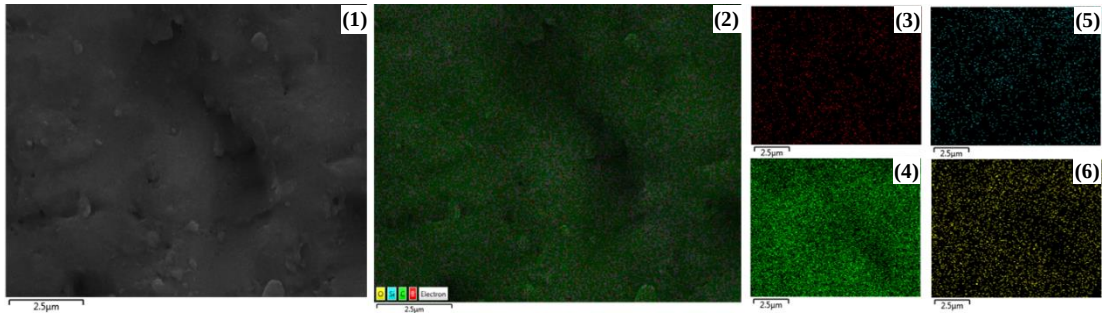
ve epoksi reçine ile etkileşim iyileşmiştir. Ayrıca, f-BN nanopartiküllerinin homojen dağılımı, epoksi ile nanopartikül arasında yük aktarımını sağlamaktadır. Yük aktarımı sayesinde çatlak oluşumu gecikmiştir. Bu durum neticesinde, nanopartikül katkılı yapıştırma bağlantılarının hasar yükü artmıştır.

Şekil 4.4 ve 4.5'te verilen Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılarının SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde, f-BN nanopartiküllerinin yapıştırıcılar içerisinde homojen dağıldığı görülmektedir. Nanopartiküllerin homojen dağılımı ve yapıştırıcı ile nanopartiküller arasındaki adezyon, tek tesirli yapıştırma bağlantısı numunelerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için oldukça önemli bir konudur. Nanopartiküller ve yapıştırıcı arasındaki etkileşimi artırmak için silan birleştirme maddesi (APTES) fonksiyonelleştirme işleminde kullanılmıştır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülen silisyum elementinin varlığı, nanopartiküllerin yüzeyinin fonksiyonelleştiğini kanıtlamaktadır.

SEM-EDS haritasındaki renk skalasında bor elementinin dağılımı incelendiğinde, bu dağılımın homojen olduğu görülmektedir. Ayrıca, çekme deneyi sonucunda elde edilen hasar yükü değerlerinin standart sapmasının düşük olması da bu durumu kanıtlamaktadır (Gültekin vd, 2016).

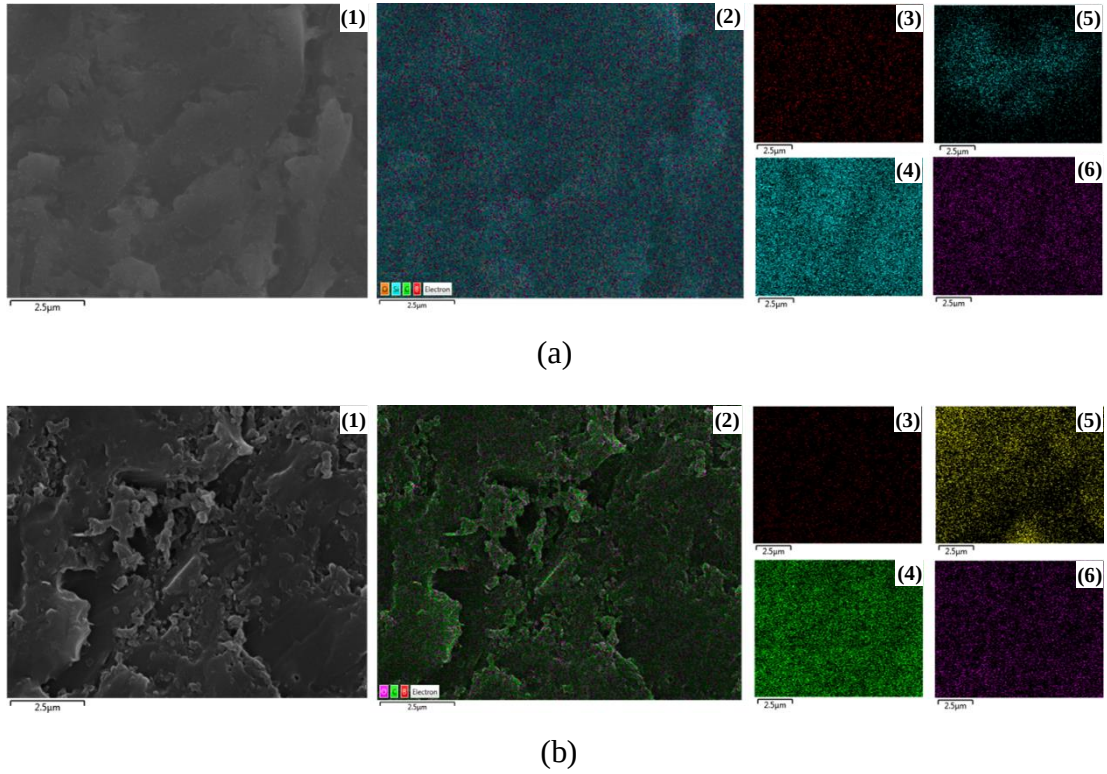


(a)



(b)

Şekil 4.4. Araldite 2011'in SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-BN, (b) ağ. %5 f-BN (1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen

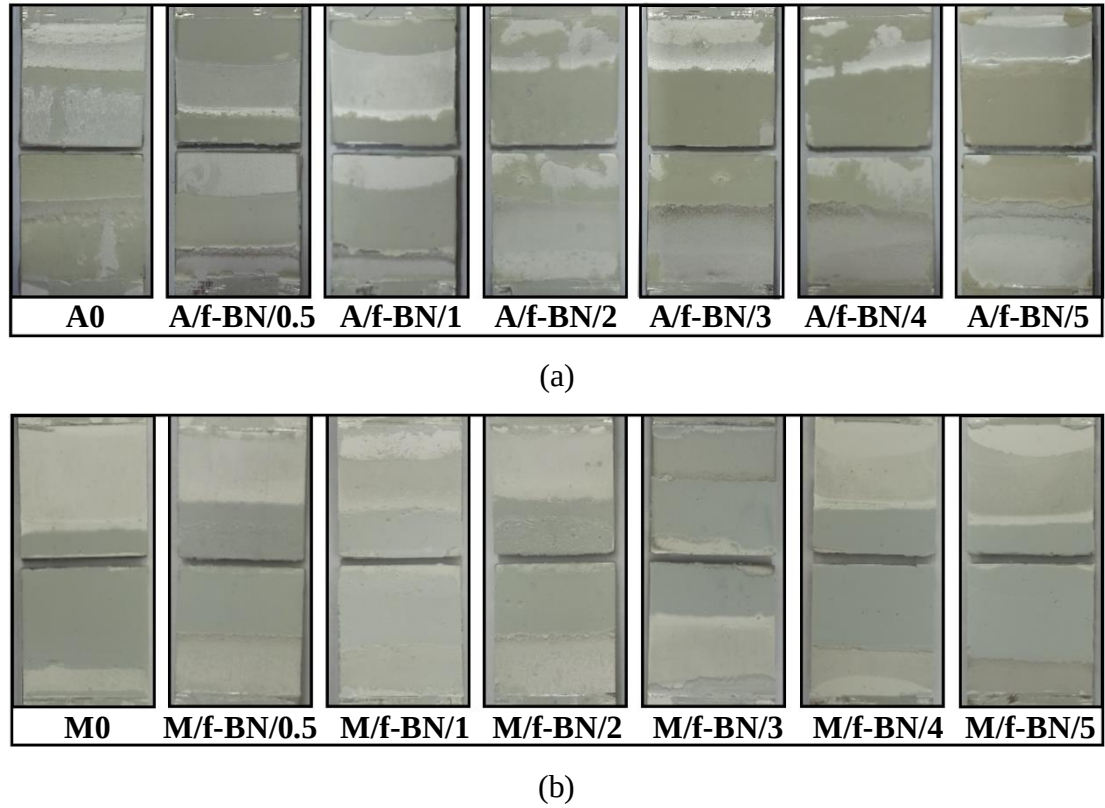


Şekil 4.5. MGS-LR285'in SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-BN, (b) ağ. %5 f-BN
(1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen

Ağırlıkça (%) f-BN katkı oranının artması yapıştırıcının viskozitesini artırmakta ve nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde kısmi topaklanmasına neden olmaktadır. Topaklanmış f-BN nanopartiküllerinin varlığı, yapıştırıcı tabakasında gerilme yığılmasına neden olmakta ve tek tesirli yapıştırma bağlantısının hasar yükünü azaltmaktadır. Çekme deneyinden elde edilen sonuçlardan Araldite 2011 yapıştırıcıda ağırlıkça %1, MGS-LR285 yapıştırıcıda %2 f-BN katkı oranının sınır değer olduğu ve bu orandan sonra hasar yükünün azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. Benzer durum, yer değiştirme değerlerinde de yaşanmıştır. Araldite 2011 yapıştırıcısına ağırlıkça %1, MGS-LR285 yapıştırıcısına ağırlıkça %2 f-BN katkı oranından sonra alüminyum bağlantıların yer değiştirme kapasitesi azalmıştır. Yer değiştirme kapasitesinin düşmesiyle birlikte bağlantıların hasar sönmüleme kabiliyeti dolayısıyla hasar yükü değerleri azalmıştır.

Şekil 4.6'da, katkısız ve farklı oranda f-BN katkılı Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılarıyla oluşturulmuş tek tesirli bağlantı numunelerinin, hasar yüzeyleri verilmiştir. Bu yüzeyler, ISO 10365 standardı dikkate alınarak incelendiğinde, tüm

numunelerde özel koheziv hasar gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapıştırılan malzemelerin her iki tarafında yapıştırıcı miktarının eşit olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.6. (a) f-BN katkılı Araldite 2011, (b) f-BN katkılı MGS-LR285 alüminyum bağlantıların hasar yüzeyi

Katkısız bağlantı numunesine kıyasla, f-BN nanopartikülü katkılı bağlantılarda yapışmanın daha iyi gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, nanopartikül katkısı olmadan hazırlanan bağlantı numunelerinde hasara neden olan çatlakın bindirme alanının uçlarından başladığı görülmektedir. Ancak, f-BN katkılı bağlantı numunelerinde, f-BN katkı oranına bağlı olarak çatlak, merkeze yakın bir noktada başlamaktadır. Bu durum, bağlantıların hasar yükünün artmasında etkili olmuştur.

4.3. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Nitrür Nanopartiküllerinin (f-BN) Kompozit Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi

Katkısız ve ağırlıkça %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında f-BN katkılı Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcıları kullanılarak üretilen tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantılarının her bir değişkeni (yapıştırıcı ve nanopartikül katkı oranı) için üç numune test edilmiş ve elde edilen değerler kaydedilmiştir. Her bir numuneden elde edilen hasar yükü, yer değiştirme değerleri ve bu değerlerin ortalamaları Tablo

4.3'te verilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen hasar yükü/yer değiştirme değerleri Ek-3'te verilmiştir.

Tablo 4.3'te ve Ek-3'te verilen çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, Araldite 2011 yapıştırıcısına fonksiyonelleştirilmiş bor nitrür (f-BN) eklenmesi ile elde edilen tüm tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir.

Tablo 4.3. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

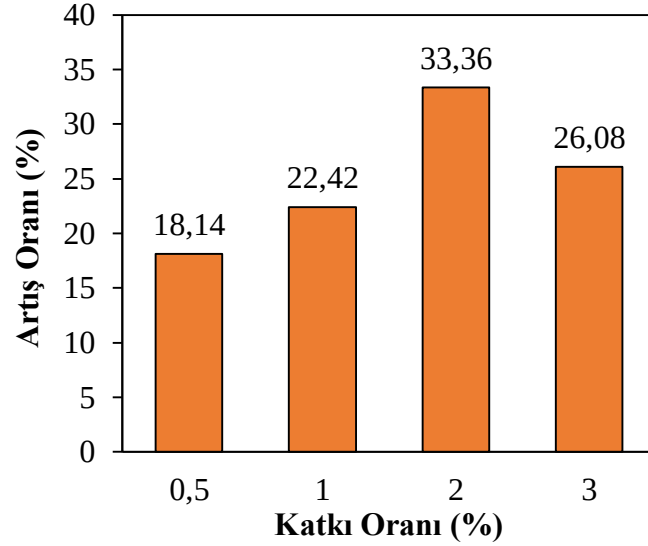
Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
A/0	A/0-1	12525	12368 ^{±323}	2.541	2.484 ^{±0.052}
	A/0-2	12583		2.472	
	A/0-3	11997		2.439	
A/f-BN/0.5	A/f-BN/0.5-1	14710	14612 ^{±145}	2.681	2.747 ^{±0.058}
	A/f-BN/0.5-2	14446		2.777	
	A/f-BN/0.5-3	14681		2.785	
A/f-BN/1	A/f-BN/1-1	15320	15142 ^{±187}	3.562	3.592 ^{±0.035}
	A/f-BN/1-2	15159		3.631	
	A/f-BN/1-3	14947		3.585	
A/f-BN/2	A/f-BN/2-1	16200	16494 ^{±330}	3.981	3.977 ^{±0.045}
	A/f-BN/2-2	16851		4.021	
	A/f-BN/2-3	16431		3.931	
A/f-BN/3	A/f-BN/3-1	15866	15594 ^{±402}	3.938	3.870 ^{±0.070}
	A/f-BN/3-2	15132		3.875	
	A/f-BN/3-3	15785		3.798	

Şekil 4.7'de katkısız haline kıyasla, farklı oranlarında f-BN nanopartikülü katkılı kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yüklerinde meydana gelen değişim yüzdesel olarak verilmiştir. Şekil 4.7 ve Tablo 4.3 birlikte değerlendirildiğinde, ağırlıkça %0.5 oranda f-BN katılmasıyla hasar yükü %18.14, %1 oranda f-BN katılmasıyla %22.42, %2 oranda f-BN katılmasıyla %33.36 ve %3 oranda f-BN katılmasıyla %26.08 artmıştır.

Hasar yüklerinde katkı oranına bağlı olarak meydana gelen değişime benzer şekilde, ortalama yer değiştirme değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Katkısız (A/0) numuneye kıyasla, ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN katkılı numunelerin ortalama yer değiştirme değerleri, sırasıyla %10.58 ve %44.6 oranda artmıştır. Ağırlıkça %2 f-BN

katkı oranında, yer değiştirme maksimum oranda (%60.1) artmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %3 f-BN katılmasıyla ortalama yer değiştirme %55.79 oranda artmıştır.

Hasar yükü ve yer değiştirme değerleri birlikte değerlendirildiğinde, Araldite 2011 yapıştırıcısıyla üretilen kompozit bağlantıların mekanik özelliklerini iyileştirmek için optimum katkı oranının ağırlıkça %2 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükündeki değişim

Tablo 4.4'te MGS-LR285 yapıştırıcılarına farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5, %1, %2 ve %3) f-BN nanopartikülleri ilave edilmesiyle elde edilen kompozit tek tesirli yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri, Ek-4'te ise hasar yükü yer değiştirme eğrileri verilmiştir.

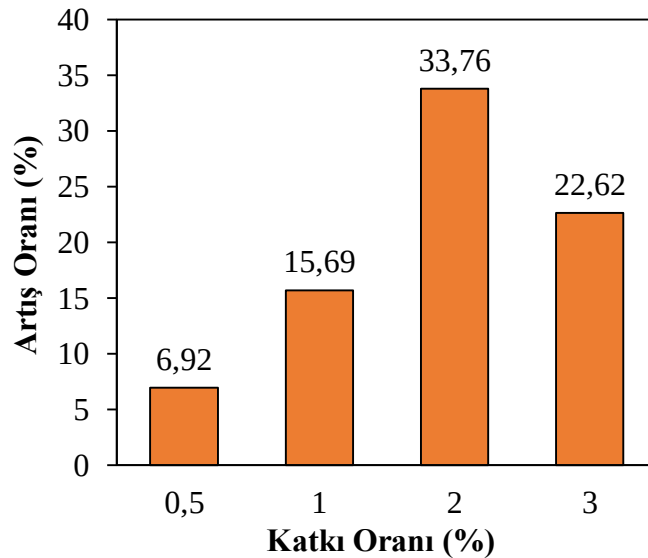
Ek-4'te verilen hasar yükü/yer değiştirme eğrileri ve Tablo 4.4 birlikte incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine f-BN ilave edilmesiyle birlikte, kompozit bağlantı numunelerinin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Katkısız kompozit yapıştırma bağlantılarına kıyasla MGS-LR285 yapıştırıcılarına dört farklı oranda f-BN ilave edilmesinin ortalama hasar yüküne etkisi yüzdesel olarak Şekil 4.8'de verilmiştir. Ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN katkı oranında ortalama hasar yükü sırasıyla %6.92 ve %15.69 oranda artmıştır. En yüksek artış oranı (%33.76), ağırlıkça %2 f-BN katkısıyla elde edilmiştir. Ağırlıkça %3 f-BN katkı oranında ise ortalama hasar yükü %22.62 oranda artmıştır.

Tablo 4.4. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-BN katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
M/0	M/0-1	7062	7188 $\pm$ 109	1.417	1.458 $\pm$ 0.074
	M/0-2	7257		1.415	
	M/0-3	7245		1.544	
M/f-BN/0.5	M/f-BN/0.5-1	7474	7686 $\pm$ 185	1.908	1.966 $\pm$ 0.058
	M/f-BN/0.5-2	7766		1.966	
	M/f-BN/0.5-3	7818		2.024	
M/f-BN/1	M/f-BN/1-1	8243	8316 $\pm$ 255	1.829	1.957 $\pm$ 0.164
	M/f-BN/1-2	8107		2.143	
	M/f-BN/1-3	8600		1.899	
M/f-BN/2	M/f-BN/2-1	9720	9615 $\pm$ 331	2.479	2.263 $\pm$ 0.234
	M/f-BN/2-2	9882		2.297	
	M/f-BN/2-3	9245		2.014	
M/f-BN/3	M/f-BN/3-1	9098	8817 $\pm$ 407	2.092	2.121 $\pm$ 0.026
	M/f-BN/3-2	9003		2.127	
	M/f-BN/3-3	8350		2.143	

Benzer şekilde, ağırlıkça %0.5, %1 ve %3 f-BN katkısıyla ortalama yer değiştirme değerleri %34.84, %34.22 ve %45.47 artmıştır. Ortalama yer değiştirme değerinde en yüksek artış (%55.21), MGS-LR285 yapıştırıcısı için optimum katkı oranı olan ağırlıkça %2’de gerçekleşmiştir.

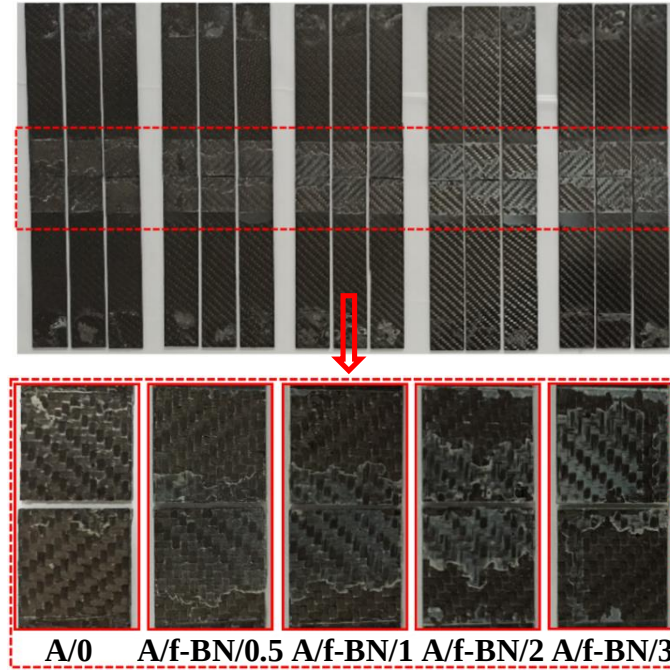


Şekil 4.8. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-BN) bağlı olarak kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükündeki değişim

Katkı oranına bağılı olarak yer değıştirme değerlerinde meydana gelen artışın nedeni, yer değıştirme kapasitesinin artmasıyla hasarın absorbe edilmesidir. Fonksiyonelleştirme işlemi ile birlikte h-BN nanopartikülleri ve epoksi arasındaki adezyon iyileştirilmiş, yapıştırıcı ile nanopartiküller arasında yük aktarımı sağlanmıştır. Yük aktarımı sayesinde çatlak oluşumu gecikmektedir. Bu durum neticesinde, nanopartikül katkılı yapıştırma bağlantılarının hasar yükü artmaktadır. f-BN katkılı Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılarıyla üretilen alüminyum ve kompozit bağlantıların sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, kompozit bağlantıların alüminyum bağlantılarla benzer bir davranış sergilediğı görülmektedir.

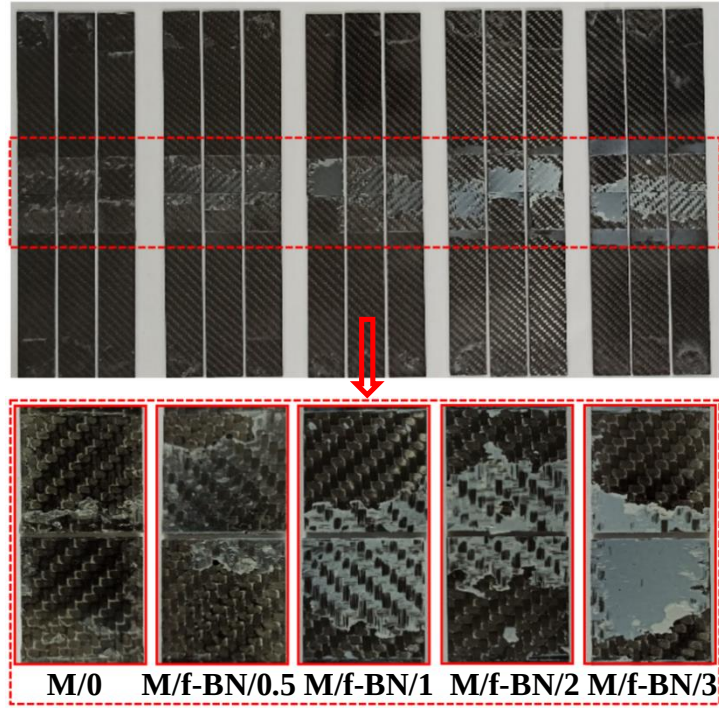
Farklı oranlarda f-BN katkılı kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yüklerindeki standart sapma, Araldite 2011 yapıştırıcılarda %1-%3, MGS-LR285 yapıştırıcılarda %1-%4 arasındadır. Buradan, yapıştırıcı içerisindeki f-BN nanopartikülleri dağılımının homojen olduğı ve epoksi reçineyle etkileşimin iyileştiğı anlaşılmaktadır.

Katkısız ve farklı oranlarda f-BN katkılı yüksek viskoziteli Araldite 2011 ve düşük viskoziteli MGS-LR285 epoksi yapıştırıcılarıyla üretilen kompozit tek tesirli yapıştırma bağlantılarının çekme testi sonrası oluşan hasar yüzeyleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Araldite 2011 yapıştırıcısına f-BN ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri

Katkısız ve farklı oranlarda f-BN katkılı düşük viskoziteli MGS-LR285 epoksi yapıştırıcılarıyla üretilen kompozit tek tesirli yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri ise Şekil 4.10'da verilmiştir. Yapıştırma bağlantıları için ISO 10365 standartında belirtilen hasar türleri göz önünde bulundurulduğunda, iki farklı yapıştırıcıyla üretilen tüm katkı oranlarında özel koheziv hasarın meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.10. MGS-LR285 yapıştırıcısına f-BN ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri

4.4. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Karbür Nanopartiküllerinin (f-B₄C) Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi

Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılarına ağırlıkça %0.5-%5 oranlarında f-B₄C nanopartiküllerinin eklenmesiyle elde edilen tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapıştırıcılara f-B₄C nanopartiküllerinin eklenmesiyle, yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinde önemli değişiklikler meydana gelmiştir.

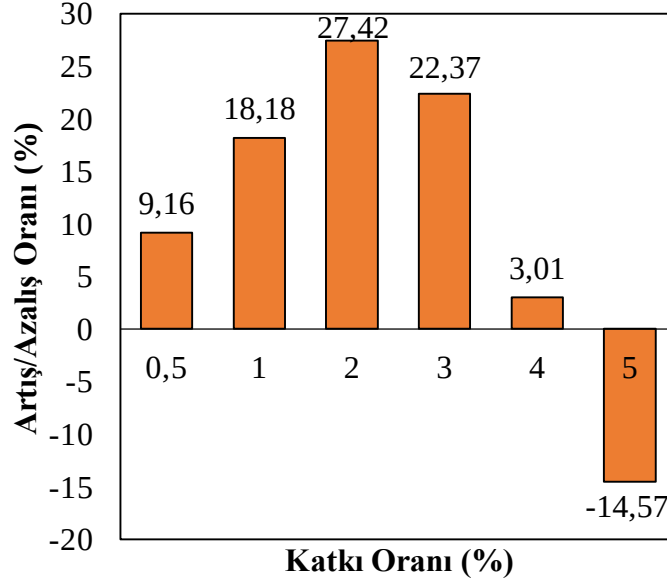
Katkısız ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5-%5) f-B₄C katkılı Araldite 2011 yapıştırıcıyla oluşturulan bağlantıların çekme deneyi sonucu elde edilen hasar yükü/yer değiştirme eğrileri Ek-5'te verilmiştir. Bu eğrilerden, f-B₄C katkısı ile ağırlıkça %5 katkı oranı hariç diğer katkı oranlarında hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-B₄C katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
A0	A0-1	12680	12387 ^{±251}	2.309	2.294 ^{±0.034}
	A0-2	12414		2.255	
	A0-3	12067		2.319	
A/f-BC/0.5	A/f-BC/0.5-1	13671	13522 ^{±131}	2.755	2.741 ^{±0.049}
	A/f-BC/0.5-2	13426		2.783	
	A/f-BC/0.5-3	13469		2.686	
A/f-BC/1	A/f-BC/1-1	14832	14640 ^{±284}	2.748	2.718 ^{±0.026}
	A/f-BC/1-2	14314		2.708	
	A/f-BC/1-3	14775		2.698	
A/f-BC/2	A/f-BC/2-1	15665	15783 ^{±132}	3.591	3.529 ^{±0.056}
	A/f-BC/2-2	15760		3.519	
	A/f-BC/2-3	15925		3.479	
A/f-BC/3	A/f-BC/3-1	15463	15159 ^{±263}	3.338	3.387 ^{±0.043}
	A/f-BC/3-2	15004		3.406	
	A/f-BC/3-3	15012		3.419	
A/f-BC/4	A/f-BC/4-1	12858	12760 ^{±674}	3.563	3.400 ^{±0.148}
	A/f-BC/4-2	12043		3.367	
	A/f-BC/4-3	13380		3.271	
A/f-BC/5	A/f-BC/5-1	10563	10581 ^{±435}	2.340	1.991 ^{±0.363}
	A/f-BC/5-2	11026		2.020	
	A/f-BC/5-3	10155		1.615	

Şekil 4.11'de katkısız bağlantılara kıyasla katkı oranına bağlı olarak hasar yükünde meydana gelen değişim yüzdesel olarak kıyaslanmıştır. Ağırlıkça %0.5 ve %1 f-B₄C nanopartikülü katkısı ile ortalama hasar yükü sırasıyla, %9.16 ve %18.18 oranda artmıştır. Hasar yükünde en yüksek artışın (%27.42), %2 f-B₄C katkısı ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Araldite 2011 yapıştırıcısı içerisine ağırlıkça %3 ve %4 f-B₄C katkısıyla ise alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükü sırasıyla %22.37, %3.01 oranda artmıştır. Bunun yanı sıra, ağırlıkça %5 f-B₄C katkısıyla ortalama hasar yükünde %14.57 düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüşün nedeni, f-B₄C nanopartiküllerinin yapıştırıcı içerisinde topaklanması olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.11. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-B₄C) bağlı olarak alüminyum bağlantıların hasar yükündeki değişimi

Katkısız alüminyum numunelerine kıyasla, Araldite 2011 yapıştırıcısına ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4 f-B₄C nanopartikülü ilave edilmesiyle ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla; %19.49, %18.49, %53.84, %47.65, %48.21 oranda artmıştır. Yapıştırıcı içersine ağırlıkça %5 oranda f-B₄C ilave edilmesiyle ise ortalama yer değiştirme değeri %13.2 oranda azalmıştır.

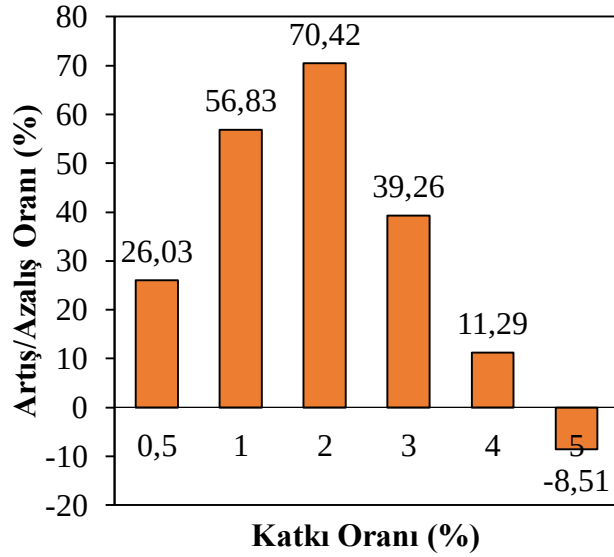
Katkısız ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5-%5) f-B₄C katkılı MGS-LR285 yapıştırıcıyla oluşturulan yapıştırma bağlantılarının çekme deneyi sonucunda elde edilen hasar yükü/yer değiştirme eğrileri Ek-6 verilmiştir. Tablo 4.6’da ise hasar yükü ve yer değiştirme değerleri sayısal olarak verilmiştir. Ağırlıkça %5 f-B₄C katkı oranı hariç diğer tüm oranlarda hasar yükünün arttığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %2 f-B₄C katkı oranından sonra bağlantının hasar yükü doğrusal olarak azalmaya başlamıştır.

Tablo 4.6. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-B₄C katkısı ile üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
M0	M0-1	10654	10659 ^{±108}	1.735	1.730 ^{±0.025}
	M0-2	10554		1.703	
	M0-3	10769		1.753	
M/f-BC/0.5	M/f-BC/0.5-1	13742	13428 ^{±380}	2.515	2.558 ^{±0.062}
	M/f-BC/0.5-2	13005		2.530	
	M/f-BC/0.5-3	13537		2.629	
M/f-BC/1	M/f-BC/1-1	16847	16709 ^{±161}	3.504	3.498 ^{±0.011}
	M/f-BC/1-2	16750		3.507	
	M/f-BC/1-3	16532		3.485	
M/f-BC/2	M/f-BC/2-1	18239	18157 ^{±208}	4.544	4.494 ^{±0.050}
	M/f-BC/2-2	17921		4.494	
	M/f-BC/2-3	18311		4.444	
M/f-BC/3	M/f-BC/3-1	14585	14837 ^{±296}	2.331	2.524 ^{±0.176}
	M/f-BC/3-2	15164		2.674	
	M/f-BC/3-3	14764		2.569	
M/f-BC/4	M/f-BC/4-1	11865	11857 ^{±558}	2.203	2.255 ^{±0.090}
	M/f-BC/4-2	12411		2.202	
	M/f-BC/4-3	11296		2.359	
M/f-BC/5	M/f-BC/5-1	9818	9747 ^{±72}	1.850	1.807 ^{±0.065}
	M/f-BC/5-2	9674		1.733	
	M/f-BC/5-3	9750		1.840	

Şekil 4.12’de katkısız bağlantılara kıyasla f-B₄C nanopartikülü katkı oranına bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükünde meydana gelen değişim yüzdesel olarak kıyaslanmıştır. Ağırlıkça %0.5 ile %4 aralığında, katkı oranına bağlı olarak ortalama hasar yükünde sırasıyla %26.03, %56.83, %70.42, %39.26, %11.29 artış, ağırlıkça %5 katkı oranında ise hasar yükünde nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde topaklanmasından dolayı %8.51 azalış olduğu gözlemlenmiştir.

Katkısız haline kıyasla, MGS LR-285 yapıştırıcılara ağırlıkça %0.5, %1, %2, %3, %4, %5 oranlarda f-B₄C katkısıyla üretilen alüminyum bağlantı numunelerinin ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla %47.86, %102.19, %159.77, %45.89, %30.35 ve %4.45 oranda artmıştır.



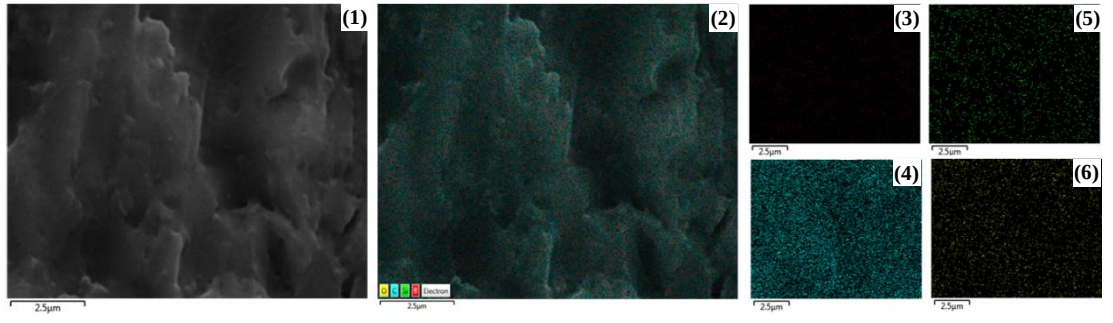
Şekil 4.12. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-B₄C) bağlı olarak alüminyum bağlantıların ortalama hasar yükündeki değişim

Her iki yapıştırıcı için tüm sonuçlar birlikte incelendiğinde, f-B₄C takviyesi ile tek tesirli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini iyileştiren optimum katkı oranının ağırlıkça %2 olduğu gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı içerisindeki f-B₄C nanopartiküllerinin homojen dağılımı ile yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri, dolayısıyla hasar yükü artmaktadır.

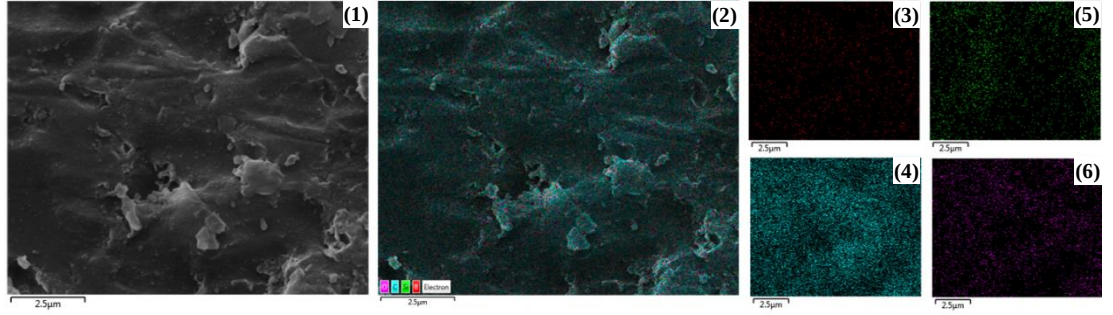
Nanopartiküllerin (f-B₄C) 3-glycidyloxypropyl trimethoxysilane bileşiği ile modifiye edilmesi sonucu, nanopartikül ile epoksi arasındaki etkileşim artmış ve homojen dağılım elde edilmiştir. Hasar yüklerindeki standart sapmanın düşük olması (%1-%4 arasında) bu durumu desteklemektedir.

Yapıştırıcının viskozitesi f-B₄C katkı oranının artmasıyla artmakta ve f-B₄C nanopartiküllerinin yüksek yüzey enerjisine sahip olması nedeniyle yapıştırıcıda kısmi aglomerasyon oluşmaktadır. Nanopartiküllerin aglomerasyonu yapıştırıcı tabakasında çentik etkisi yaratmakta ve yapıştırma bağlantılarının hasar yükünün azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde, ağırlıkça %2 oranında homojen bir dağılım olduğu görülürken ağırlıkça %5 katkı oranında kısmi aglomerasyon olduğu görülmektedir.

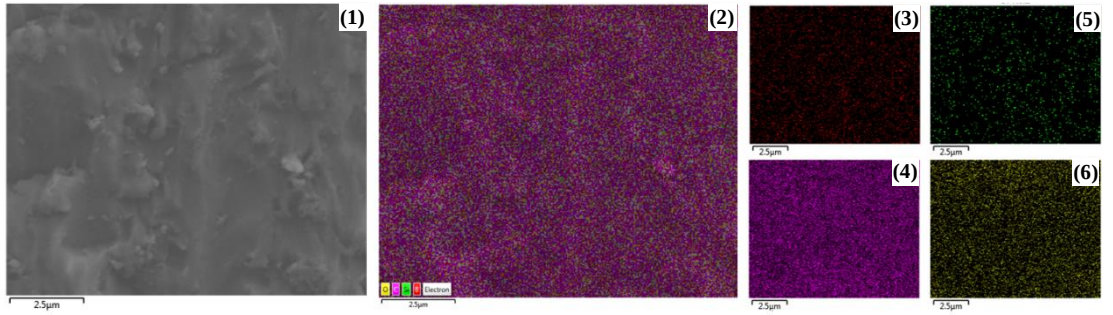


(a)

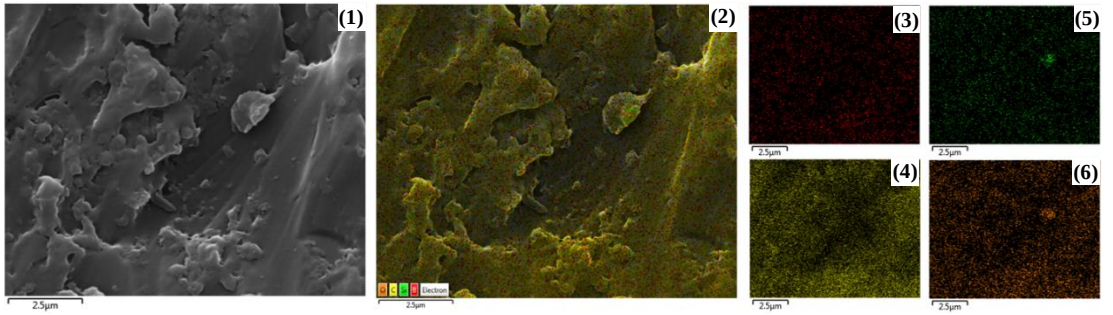


(b)

Şekil 4.13. Araldite 2011'in SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-B₄C, (b) ağ. %5 f-B₄C
(1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen



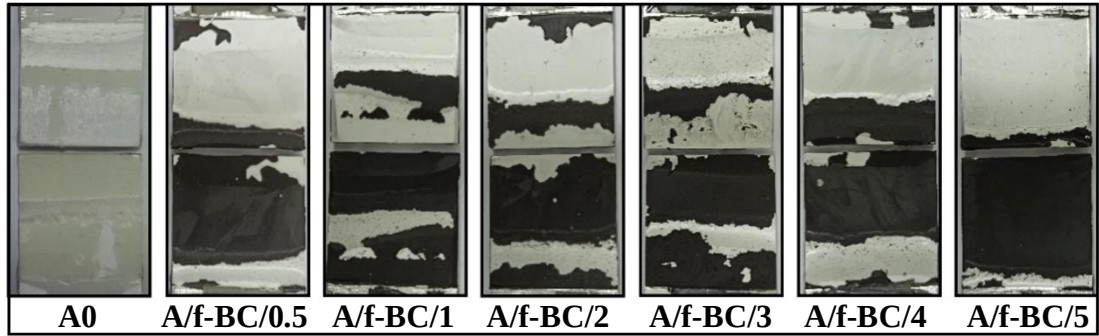
(a)



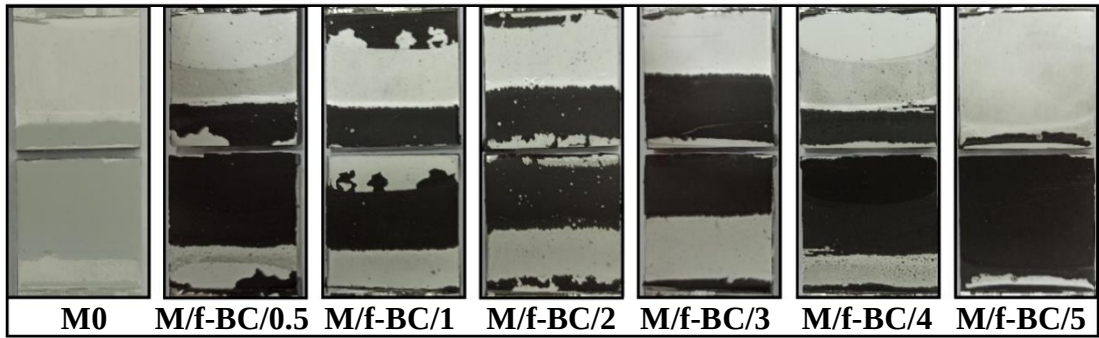
(b)

Şekil 4.14. MGS-LR285 SEM-EDS görüntüleri (a) ağ. %2 f-B₄C, (b) ağ. %5 f-B₄C
(1) SEM görüntüsü, (2) EDS haritası, (3) Bor, (4) Karbon, (5) Silisyum, (6) Oksijen

Her iki yapıştırıcıda yer değiştirme değerlerinin, hasar yüklerinin davranışına benzer şekilde arttığı görülmüştür. En yüksek yer değiştirme değeri, her iki yapıştırıcı için en yüksek hasar yüküne sahip ağırlıkça %2 f-B₄C katkılı yapıştırma bağlantılarında gözlemlenmiştir. Yer değiştirme kapasitesi arttıkça bağlantı uçlarında oluşan soyulma gerilmelerinin etkisi azalmıştır. Bu durum, çatlak başlangıcını geciktirmekte ve yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini artırmaktadır. Şekil 4.15'te verilen ağırlıkça farklı oranlarda f-B₄C katkılı iki yapıştırıcının hasar yüzeyleri bu durumu desteklemektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.15. (a) f-B₄C takviyeli Araldite 2011, (b) f-B₄C takviyeli MGS-LR285 yapıştırıcılarıyla oluşturulan alüminyum bağlantıların hasar yüzeyleri

Tüm tek tesirli yapıştırma bağlantılarında hasarın, yapıştırıcı bindirme bölgesinin serbest uçlarında meydana geldiği ve merkeze doğru yayıldığı görülmektedir. Katkı oranına (%f-B₄C) bağlı olarak epoksi içerisindeki nanopartiküller, çatlak oluşumunu geciktirerek çatlakların bindirme bölgesinin merkezine yakın bir noktada başlamasını sağlamaktadır. Bu durum, yapıştırma bağlantılarının hasar yükünde önemli ölçüde artışa neden olmaktadır.

ISO 10365'teki hasar türleri dikkate alındığında, tüm bağlantı numunelerinde özel koheziv hasar meydana geldiği görülmektedir. Katkı oranına bağlı olarak yapıştırıcılara f-B₄C nanopartiküllerinin ilave edilmesiyle, yapıştırıcıların ıslanabilirliğinin arttığı ve malzeme yüzeylerine daha iyi yapıştığı sonucuna varılmıştır.

4.5. Fonksiyonelleştirilmiş Bor Karbür Nanopartiküllerinin (f-B₄C) Kompozit Yapıştırma Bağlantılarına Etkisi

Araldite 2011 ve MGS-LR285 epoksi yapıştırıcılarına farklı oranlarda (%0.5, %1, %2 ve %3) f-B₄C nanopartikülleri ilave edilmesiyle oluşturulan tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantılarının, her bir değişkeni için üçer numune üretilmiştir. Üretilen numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Tablo 4.7'de deney sonucunda elde edilen hasar yükü, yer değiştirme değerleri ve bu değerlerin ortalamaları verilmiştir.

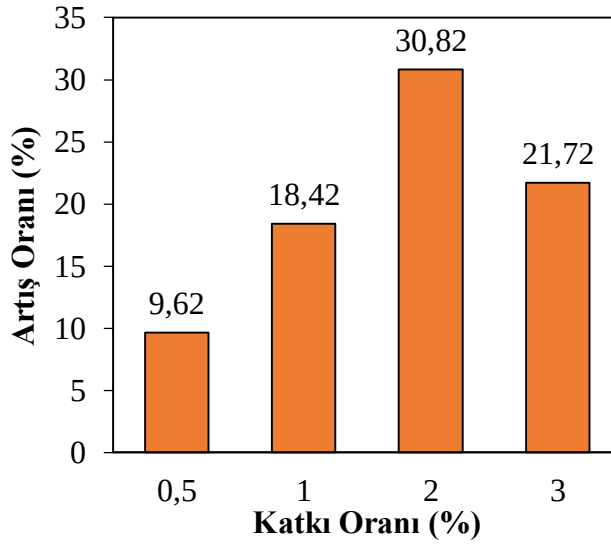
Tablo 4.7. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-B₄C katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
A/0	A/0-1	12525	12368 ^{±323}	2.541	2.484 ^{±0.052}
	A/0-2	12583		2.472	
	A/0-3	11997		2.439	
A/f-BC/0.5	A/f-BC/0.5-1	13370	13558 ^{±250}	3.841	3.927 ^{±0.105}
	A/f-BC/0.5-2	13462		3.896	
	A/f-BC/0.5-3	13842		4.045	
A/f-BC/1	A/f-BC/1-1	14392	14647 ^{±315}	4.126	4.018 ^{±0.097}
	A/f-BC/1-2	15000		3.937	
	A/f-BC/1-3	14548		3.991	
A/f-BC/2	A/f-BC/2-1	16053	16180 ^{±321}	4.116	4.177 ^{±0.054}
	A/f-BC/2-2	15943		4.193	
	A/f-BC/2-3	16546		4.222	
A/f-BC/3	A/f-BC/3-1	15668	15055 ^{±572}	3.787	3.786 ^{±0.195}
	A/f-BC/3-2	14535		3.591	
	A/f-BC/3-3	14964		3.982	

Ek-7'de f-B₄C katkılı Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısına ait kompozit bağlantı numunelerinin hasar yükü/yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Tablo 4.7 ve Ek-7'deki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, yapıştırıcı içerisine f-B₄C nanopartiküllerinin ilave edilmesiyle, kompozit bağlantıların hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin

önemli oranda iyileştiği görülmektedir. Buradan, ağırlıkça %2 f-B₄C katkı oranının tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantıları için optimum değer olduğu anlaşılmaktadır.

Ağırlıkça %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında f-B₄C nanopartikülü katkısıyla elde edilen kompozit bağlantıların katkısız haline kıyasla hasar yüklerinde meydana gelen değişim yüzdesel olarak Şekil 4.16’da verilmiştir. Araldite 2011 yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %0.5 ve %1 oranlarında f-B₄C ilave edilmesiyle ortalama hasar yükü değerlerinde sırasıyla %9.62 ve %18.42 artış sağlanmıştır. Bağlantının mekanik özelliklerindeki en yüksek artış (%30.82), yapıştırıcı içerisine %2 oranda f-B₄C eklenmesiyle elde edilmiştir. Ağırlıkça %3 f-B₄C katkılı numunelerin ortalama hasar yükündeki artış ise %21.72’dir.



Şekil 4.16. Yapıştırıcı olarak Araldite 2011 kullanıldığında katkı oranına (%f-B₄C) bağlı olarak kompozit bağlantıların hasar yükündeki değişim

Benzer şekilde, katkı oranına bağlı olarak ortalama yer değiştirme değerleri de artmıştır. Araldite 2011 yapıştırıcısına ağırlıkça %0.5 ve %1 oranda f-B₄C ilave edilmesiyle ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla %58.01 ve %61.75 oranda artmıştır. Ortalama yer değiştirme değerindeki maksimum artış ağırlıkça %2 katkı oranında olup, bu artış %68.15’tir. Ağırlıkça %3 katkı oranında ise ortalama yer değiştirme %52.42 artmıştır.

A/f-BC/2 numunelerinde nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen bir şekilde dağılması mekanik özelliklerin iyileşmesinde etkili olmuştur. Hasar yükü değerlerinde standart sapmanın düşük (%1-%5) olması da nanopartiküllerin homojen dağıldığını desteklemektedir.

MGS-LR285 yapıştırıcısı kullanılarak elde edilen katkısız ve f-B₄C nanopartikülü katkılı tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerine çekme testi uygulanması sonucu elde edilen hasar yükü ve yer değiştirme değerleri sayısal olarak Tablo 4.8’de verilmiştir. Ek-8 verilen hasar yükü/yer değiştirme eğrileri ve Tablo 4.8’deki veriler birlikte değerlendirildiğinde; f-B₄C katkı oranına bağlı olarak bağlantıların hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir.

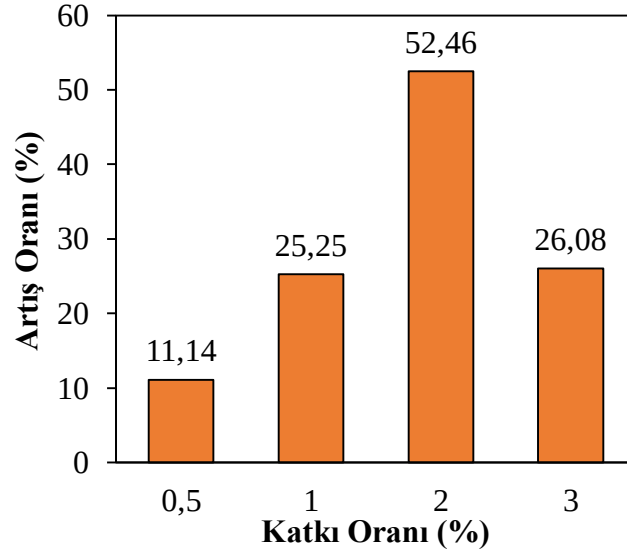
Tablo 4.8. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-B₄C katkısı ile üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerleri

Bağlantı adı	Numune adı	Hasar Yükü (N)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Yer Değiştirme (mm)	Ortalama Yer Değiştirme (mm)
M/0	M/0-1	7062	7188 ^{±110}	1.417	1.458 ^{±0.073}
	M/0-2	7257		1.415	
	M/0-3	7245		1.544	
M/f-BC/0.5	M/f-BC/0.5-1	8162	7989 ^{±200}	2.048	1.952 ^{±0.086}
	M/f-BC/0.5-2	7769		1.882	
	M/f-BC/0.5-3	8036		1.926	
M/f-BC/1	M/f-BC/1-1	8980	9003 ^{±139}	2.451	2.487 ^{±0.072}
	M/f-BC/1-2	9152		2.441	
	M/f-BC/1-3	8877		2.571	
M/f-BC/2	M/f-BC/2-1	11306	10955 ^{±434}	2.518	2.370 ^{±0.136}
	M/f-BC/2-2	11091		2.345	
	M/f-BC/2-3	10469		2.249	
M/f-BC/3	M/f-BC/3-1	9506	9063 ^{±453}	2.049	2.030 ^{±0.087}
	M/f-BC/3-2	9084		1.935	
	M/f-BC/3-3	8600		2.108	

Şekil 4.17’de MGS-LR285 yapıştırıcısına ağırlıkça %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarda f-B₄C ilave edilmesiyle hasar yükünde meydana gelen değişim yüzdesel olarak verilmiştir. Şekil 4.16 ve Tablo 4.8 birlikte değerlendirildiğinde, yapıştırıcı içeresine ağırlıkça %0.5 ve %1 oranda f-B₄C nanopartikülü ilave edilmesiyle ortalama hasar yükü değerlerinde sırasıyla, %11.24 ve %25.25 artış sağlandığı görülmüştür. Ortalama hasar yükü değerinde maksimum artış ağırlıkça %2 katkı oranında olup, bu artış %52.46’dır. Ağırlıkça %3 oranda f-B₄C nanopartikülü katkısıyla ise ortalama hasar yükü %26.08 artmıştır.

MGS-LR285 yapıştırıcıları kullanılarak üretilen numunelerin ortalama yer değiştirme değerleri, f-B₄C katkı oranına bağlı olarak artmıştır. Katkısız numunelere kıyasla, ağırlıkça %0.5, %1, %2 ve %3 f-B₄C katkısıyla üretilen numunelerin ortalama

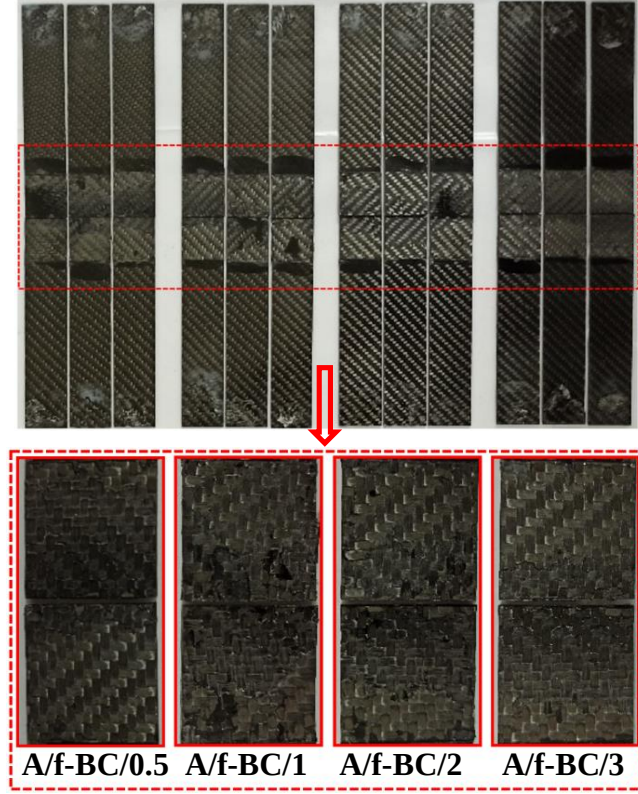
yer değiştirme değerleri, sırasıyla %33.88, %70.58, %62.55 ve %39.23 oranda artmıştır. Yapıştırıcı içerisinde homojen dağılan f-B₄C nanopartikülleri sayesinde, yapıştırıcı ve nanopartiküller arasında yük aktarımı sağlanarak, tek tesirli kompozit bağlantı numunelerinin mekanik özellikleri iyileştirilmiştir.



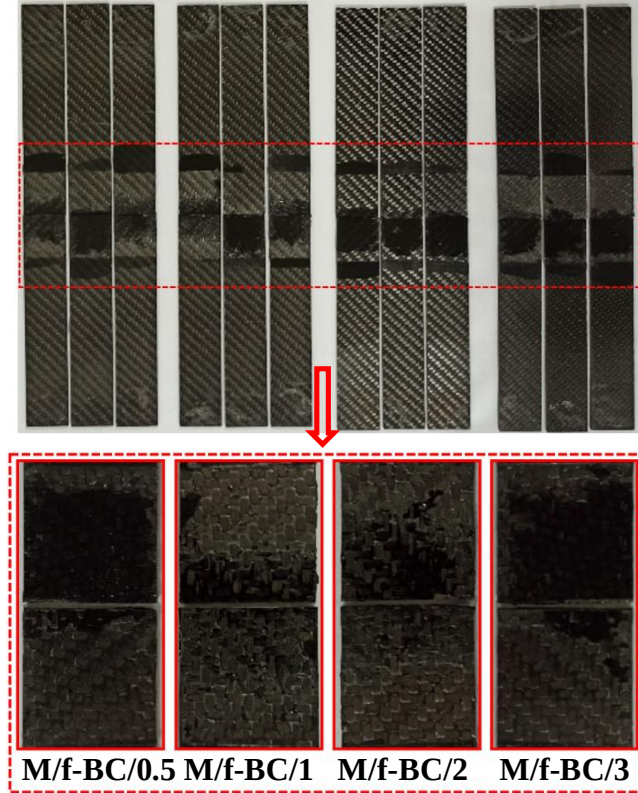
şekil 4.17. Yapıştırıcı olarak MGS-LR285 kullanıldığında katkı oranına (%f-B₄C) bağlı olarak kompozit bağlantıların hasar yükündeki değişim

şekil 4.18’de Araldite 2011 ve şekil 4.19’da MGS-LR285 yapıştırıcılarına f-B₄C ilave edilmesiyle üretilen bağlantıların hasar yüzeyleri verilmiştir. Bu yüzeyler incelendiğinde, tüm bağlantılarda özel koheziv hasarın oluştuğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, f-B₄C katkısıyla elde edilen yapıştırıcıların, kompozit malzemelerin yüzeyini iyi ıslattığı ve kompozit malzemelerle arasındaki ara yüzey etkileşiminin güçlü olduğu sonucuna varılmıştır. Bahsedilen hasar yüzeylerine ait gözlemler ile çekme deneyi sonrasında elde edilen kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yer değiştirme değerlerinin uyumlu ve birbirini kanıtlar nitelikte olduğu söylenebilir.

BN katkılı kompozit bağlantılara benzer şekilde, f-B₄C katkılı bağlantılarda, hasara neden olan çatlak, katkı oranıyla orantılı olarak bindirme bölgesinin uç kısımlarından orta kısmına doğru ilerlemektedir. Bu durum, çatlağın başlamasını geciktirerek hasar yükü değerlerinin artışına neden olmuştur.



Şekil 4.18. Araldite 2011 yapıştırıcısına f-B₄C ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri



Şekil 4.19. MGS-LR285 yapıştırıcısına f-B₄C ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantısı numunelerinin hasar yüzeyleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sunulan tez çalışmasında, epoksi ile nanopartiküller arasındaki adezyon kuvvetini artırmak ve nanopartiküllerin homojen dağılmasını sağlamak için hekzagonal bor nitrür (h-BN) nanopartikülleri, 3-(aminopropyl) triethoxysilane bileşiği; hekzagonal bor karbür (h-B₄C) nanopartikülleri ise 3-(glycidyoxypropyl) trimethoxysilane bileşiği ile fonksiyonelleştirilmiştir. Fonksiyonelleştirilen bor nanopartikülleri (f-BN ve f-B₄C) kullanılarak yeni yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen yeni yapıştırıcılar ile alüminyum (AA2024-T3) ve kompozit tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretilmiştir. Bu bağlantıların hasar yükü, yer değiştirme değerleri ve hasar yüzeyleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen tüm sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Araldite 2011 yapıştırıcısı içerisine ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN nanopartikülü ilave edilmesiyle üretilen alüminyum bağlantılar incelendiğinde, ortalama hasar yükü katkısız numuneye kıyasla sırasıyla; %8.08 ve %31.34 oranda arttığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %2, %3 ve %4 katkı oranında ise ortalama hasar yükü %28.84, %24.03, %15.99 oranda artmıştır. Ağırlıkça %5 f-BN katkısıyla ortalama hasar yükünde belirgin bir artış (%0.52) gözlemlenmemiştir. Ortalama yer değiştirme değerlerinde ise; ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN katkısıyla, %16.13 ve %38.49 oranda artış gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %2, %3, %4 ve %5 f-BN ilave edilmesiyle ise ortalama yer değiştirme değerleri katkısız numuneye kıyasla; %23.1, %23.01, %19.35 ve %20.23 oranda artmıştır.

Katkısız ve farklı oranlarda (%0.5-%5) f-BN katkılı MGS-LR285 yapıştırıcısıyla üretilen tek tesirli alüminyum yapıştırma bağlantılarına çekme deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda katkısız numuneye kıyasla, ortalama hasar yükü, ağırlıkça %0.5 f-BN katkısıyla %6.09 ve %1 f-BN katkısıyla ise %46.24 oranda arttığı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %3, %4 ve %5 f-BN katkısıyla ise sırasıyla; %57.5, %46.64 ve %39.39 oranda artış gözlenmiştir. En yüksek artış (%62.74), ağırlıkça %2 katkı oranında gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN katkısıyla ortalama yer değiştirme değerleri, katkısız numuneye kıyasla sırasıyla; %10.63 ve %51.36 oranda artmıştır. Ağırlıkça %2 f-BN katkısıyla, ortalama yer değiştirme değerinde en yüksek artış (%123.97) gerçekleşmiştir.

İki farklı yapıştırıcı içerisine f-BN ilave edilmesiyle üretilen tek tesirli alüminyum bağlantılar birlikte değerlendirildiğinde, yüksek viskoziteli Araldite 2011 yapıştırıcısı için optimum katkı oranının %1 ve düşük viskoziteli MGS-LR285 yapıştırıcısı için optimum katkı oranının %2 olduğu gözlemlenmiştir. Her iki yapıştırıcının SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde, f-BN nanopartiküllerinin yapıştırıcılar içerisinde homojen dağıldığı görülmektedir. Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılar içerisinde f-BN nanopartiküllerinin homojen dağılımının sağlanması ile yapıştırıcılar içerisindeki mikro boşluklar dolmuş ve epoksi reçine ile etkileşim iyileşmiştir. Ayrıca, f-BN nanopartiküllerinin homojen dağılımı, epoksi ile nanopartikül arasında yük aktarımını sağlamaktadır. Bu yük aktarımı sayesinde, çatlak oluşumu için geçen süre uzamakta dolayısıyla yapıştırma bağlantısının hasar yükü artmaktadır. Ayrıca, Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcısıyla üretilen tüm alüminyum bağlantı numunelerinde özel kohesiv hasar meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Araldite 2011 yapıştırıcısı içerisine katkısız ve ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN nanopartikülü ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükü değerleri, katkısız numuneye kıyasla sırasıyla; ağırlıkça %0.5 oranda f-BN katılmasıyla %18.14, %1 oranda f-BN katılmasıyla %22.42, %2 oranda f-BN katılmasıyla %33.36 ve %3 oranda f-BN katılmasıyla %26.08 artmıştır. Ortalama yer değiştirme değerleri ise katkısız numuneye kıyasla, ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN katkısıyla sırasıyla, %10.58 ve %44.6 oranda artmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %2 f-BN katkısıyla %60.1, %3 f-BN katkısıyla ise %55.79 oranda artmıştır.

MGS-LR285 yapıştırıcısı içerisine ağırlıkça %0.5 ve %1 f-BN ilave edilmesiyle üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükü değerleri, katkısız numuneye kıyasla sırasıyla; %6.92 ve %15.69 oranda artmıştır. Ağırlıkça %2 ve %3 f-BN katkısıyla ise sırasıyla; %33.76 ve %22.62 oranda artış gözlenmiştir. Ağırlıkça %0.5 ve %1 oranda f-BN nanopartikülü katkısıyla ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla, %33.84 ve %34.22 oranda artmıştır. Ağırlıkça %2 ve %3 katkısıyla ise %55.21 ve %45.47 oranda artmıştır.

İki farklı yapıştırıcı içerisine f-BN ilave edilmesiyle üretilen tek tesirli kompozit bağlantılar birlikte değerlendirildiğinde, her iki yapıştırıcı için optimum katkı oranının %2 olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı oranlarda f-BN katkılı kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yüklerindeki standart sapma, Araldite 2011 yapıştırıcılarda %1-

%3, MGS-LR285 yapıştırıcılarda %1-%4 arasındadır. Buradan, yapıştırıcı içerisindeki f-BN nanopartikülleri dağılımının homojen olduğu ve epoksi reçineyle etkileşimin iyileştiği anlaşılmaktadır.

f-BN katkılı Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılarıyla üretilen alüminyum ve kompozit bağlantıların sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, kompozit bağlantıların alüminyum bağlantılarla benzer bir davranış sergilediği görülmektedir.

Araldite 2011 yapıştırıcısına ağırlıkça %0.5, %1 oranda f-B₄C nanopartikülleri ilave edilmesi sonucunda tek tesirli alüminyum yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükü değerleri katkısız numuneye kıyasla sırasıyla, %9.16, %18.18 oranda artmıştır. Ağırlıkça %2 katkı oranında ise ortalama hasar yükünde maksimum artış (%27.42) gözlemlenmiştir. %3 ve %4 katkı oranında ise %22.37 ve %3.01 oranda artış gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, ağırlıkça %5 f-B₄C katkısıyla ortalama hasar yükünde %14.57 düşüş gerçekleşmiştir. Katkısız numunelere kıyasla, yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %0.5 ve %1 f-B₄C nanopartikülü ilave edilmesiyle ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla, %19.49 ve %18.49 oranda artmıştır. Ortalama yer değiştirme değerinde en yüksek artış (%53.84), ağırlıkça %2 katkı oranında gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %5 oranda f-B₄C ilave edilmesiyle ise ortalama yer değiştirme değeri %13.2 oranda azalmıştır.

Katkısız ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5-%5) f-B₄C katkılı MGS-LR285 yapıştırıcısıyla üretilen alüminyum yapıştırma bağlantılarına çekme testi uygulanmıştır. Ağırlıkça %0.5 ve %1 aralığında, katkı oranına bağlı olarak, ortalama hasar yükünde sırasıyla %26.03 ve %56.83 oranda artış gözlemlenmiştir. En yüksek artış (%70.42), ağırlıkça %2 f-B₄C katkısıyla gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %5 katkı oranında ise %8.51 azalış olduğu gözlemlenmiştir. Katkısız haline kıyasla, MGS LR-285 yapıştırıcılara ağırlıkça %0.5-%5 oranlarda f-B₄C katkısıyla üretilen alüminyum bağlantı numunelerinin ortalama yer değiştirme değerleri sırasıyla %47.86, %102.19, %159.77, %45.89, %30.35 ve %4.45 oranda artmıştır.

Her iki yapıştırıcı için tüm sonuçlar birlikte incelendiğinde, f-B₄C takviyesi ile tek tesirli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini iyileştiren optimum katkı oranın ağırlıkça %2 olduğu gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı içerisindeki f-B₄C nanopartiküllerinin homojen dağılımı ile yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri, dolayısıyla hasar yükü artmaktadır. Yapıştırıcının viskozitesi f-B₄C katkı oranının artmasıyla artmakta ve f-B₄C nanopartiküllerinin yüksek yüzey enerjisine

sahip olması nedeniyle yapıştırıcıda kısmi aglomerasyon oluşmaktadır. Nanopartiküllerin aglomerasyonu yapıştırıcı tabakasında çentik etkisi yaratmakta ve yapıştırma bağlantılarının hasar yükünün azalmasına neden olmaktadır. Hasar yüzey yüzeyleri incelendiğinde, f-B₄C nanopartikülleri katkılı tüm numunelerde özel kohesiv hasarın olduğu gözlemlenmiştir.

Araldite 2011 yapıştırıcısına ağırlıkça %0.5 ve %1 f-B₄C nanopartikülleri ilave edilmesiyle kompozit bağlantıların ortalama hasar yükü değeri katkısız numuneye kıyasla sırasıyla; %9.62 ve %18.42 oranda artmıştır. Ağırlıkça %2 ve %3 f-B₄C katkısıyla ise sırasıyla; %30.82, %21.72 artış gerçekleşmiştir. Ortalama yer değiştirme değerleri katkısız numunelere kıyasla, ağırlıkça %0.5 f-B₄C katkısıyla %58.01, %1 f-B₄C katkısıyla %61.75, %2 f-B₄C katkısıyla %68.15 ve %3 f-B₄C katkısıyla ise %52.42 oranda artmıştır.

Katkısız ve farklı oranlarda (ağırlıkça %0.5-%3) f-B₄C katkılı MGS-LR285 yapıştırıcısıyla üretilen kompozit yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükü katkısız numunelere kıyasla sırasıyla; %11.14, %25.25, %52.46 ve %26.08 oranda artmıştır. Ortalama yer değiştirme değerleri ise sırasıyla; %33.88, %70.58, %62.55 ve %39.23 oranda artış göstermiştir.

İki farklı yapıştırıcı (Araldite 2011 ve MGS-LR285) içerisine ağırlıkça %2 f-B₄C ilave edilmesiyle kompozit bağlantıların mekanik özelliklerinde maksimum artış elde edilmiştir. Bu katkı oranından sonra bağlantının hasar yükünde azalma olduğu deney sonuçlarından görülmektedir.

Çekme deneyi sonrasında elde edilen tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeylerine bakıldığında, katkısız ve f-B₄C katkılı bütün bağlantı numunelerinde özel koheziv hasarın olduğu görülmektedir. f-BN ve f-B₄C katkılı kompozit bağlantılarda, hasara neden olan çatlak, katkı oranıyla orantılı olarak bindirme bölgesinin uç kısımlarından orta kısmına doğru ilerlemektedir. Bu durum, çatlağın başlamasını geciktirmekte, hasar yükü değerlerinin artışına neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasının devamında; bor partiküllerinin farklı boyutlarda olmasının ve farklı silan bileşikleriyle bor partiküllerinin yüzeyinin modifiye edilmesinin yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması hedeflenmektedir.

Bor nitrür ve bor karbür nanopartikülleri diğer nanopartiküllerden (grafen, fulleren, karbon nanotüp vb.) farklı sahip oldukları özellikler ve tez çalışması kapsamında bor nanopartikülü ilavesiyle üretilen yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinde meydana gelen artış göz önünde bulundurulduğunda, havacılık ve uzay sanayisinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Ülkemizin büyük oranda rezervlerine sahip olduğu borun teknolojik alanlarda kullanılması kendi kaynaklarımızdan faydalanabilmek adına önem arz etmektedir.

6. KAYNAKÇA

- Adams, R. D., & Peppiatt, N. A. (1974). Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 9(3), 185–196. <https://doi.org/10.1243/03093247V093185>
- Adams, R. D., & Wake, W. C. (1986). *Structural Adhesive Joint in Engeneering* (15th ed.). Elsevier.
- Akpınar, I. A., Gültekin, K., Akpınar, S., Akbulut, H., & Ozel, A. (2017). Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joints. *Composites Part B: Engineering*, 126, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.016>
- Akpınar, I. A., Gültekin, K., Akpınar, S., Gürses, A., & Ozel, A. (2018). An experimental study on composite adhesives reinforced with different types of organo-clays. *Journal of Adhesion*, 94(2), 124–142. <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1255606>
- Akpınar, S. (2012). *Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-bağlantılarında üç boyutlu gerilme analizi*.
- Allen, K. W. (1992). Silane coupling agents. In *International Journal of Adhesion and Adhesives* (2nd ed., Vol. 12, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(92\)90011-j](https://doi.org/10.1016/0143-7496(92)90011-j)
- Arenal, R., & Lopez-bezanilla, A. (2015). *Boron nitride materials : an overview from 0D to 3D (nano) structures*. <https://doi.org/10.1002/wcms.1219>
- Arrowsmith, D. J., Moth, D. A., & Vickery, C. M. (1988). Etching aluminium for adhesive bonding. *Transactions of the IMF*, 66(1), 112–115. <https://doi.org/10.1080/00202967.1988.11870819>
- Arslan, G., Kara, F., & Turan, S. (2001). Mechanical properties of melt infiltrated boron carbide-aluminium composites. *Key Engineering Materials*, 206–213(II), 1157–1160. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.206-213.1157>
- Ashrafi, B., Jakubinek, M. B., Martinez-Rubi, Y., Rahmat, M., Djokic, D., Laqua, K., Park, D., Kim, K. S., Simard, B., & Yousefpour, A. (2017). Multifunctional fiber reinforced polymer composites using carbon and boron nitride nanotubes. *Acta Astronautica*, 141, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.09.023>
- Barbosa, N. G. C., Campilho, R. D. S. G., Silva, F. J. G., & Moreira, R. D. F. (2018). Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures. *Applied Adhesion Science*, 6(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s40563-018-0116-1>
- Barus, M., Weleman, H., Nassiet, V., Fazzini, M., & Batsale, J. C. (2020). Boron nitride inclusions within adhesive joints: Optimization of mechanical strength and bonded defects detection. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102531>
- Beden, S. M., Abdullah, S., Ariffin, A. K., & Al-Asady, N. A. (2010). Fatigue crack growth simulation of aluminium alloy under spectrum loadings. *Materials and Design*, 31(7), 3449–3456. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.039>
- Bhatia, S., Angra, S., & Khan, S. (2020). A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite. *Advanced Composite Materials*, 1–31. <https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1759482>
- Bikerman, J. J. (1967). Causes of Poor Adhesion: Weak Boundary Layers. *Industrial & Engineering Chemistry*, 59(9), 40–44. <https://doi.org/10.1021/ie51403a010>
- Breiner, J. M., & Mark, J. E. (1998). Preparation, structure, growth mechanisms and properties of siloxane composites containing silica, titania or mixed silica-titania phases. *Polymer*, 39(22), 5483–5493. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(97\)10276-2](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(97)10276-2)

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>
- Çalik, A. (2016). Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint. *Engineering Review*, 36(1), 29–34.
- Chen, X., Zhang, L., Park, C., Fay, C. C., Wang, X., & Ke, C. (2015). Mechanical strength of boron nitride nanotube-polymer interfaces. *Applied Physics Letters*, 107(25). <https://doi.org/10.1063/1.4936755>
- Conde, O., Silvestre, A. J., & Oliveira, J. C. (2000). Influence of carbon content on the crystallographic structure of boron carbide films. *Surface and Coatings Technology*, 125(1–3), 141–146. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00594-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00594-0)
- Daneshmehr, S., Román, F., & Hutchinson, J. M. (2021). The surface modification of boron nitride particles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(1), 151–163. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09160-1>
- Degrazia, F. W., Leitune, V. C. B., Samuel, S. M. W., & Collares, F. M. (2017). Boron nitride nanotubes as novel fillers for improving the properties of dental adhesives. *Journal of Dentistry*, 62(December 2016), 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.05.013>
- Demiroglu, S., Singaravelu, V., Seydibeyoğlu, M. Ö., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2017). The use of nanotechnology for fibre-reinforced polymer composites. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 277–297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00013-8>
- Derjaguin, B. V., & Smilga, V. P. (1967). Electronic theory of adhesion. *Journal of Applied Physics*, 38(12), 4609–4616. <https://doi.org/10.1063/1.1709192>
- Dorn, L. (1994). Adhesive Bonding - Terms and Definitions. In *Training in Aluminium Technologies*. <http://core.materials.ac.uk/repository/eaat/4701.pdf>
- Durairaj, S., Chandramohan, P., & C.R, R. (2015). Evaluation of mechanical properties of B4C filled glass-epoxy composites. *Int.J. ChemTech Res.*, 8, 1997–1981.
- Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015). Introduction and Adhesion Theories. *Adhesives Technology Handbook*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-35595-7.00001-2>
- Gellermann, C., Storch, W., & Wolter, H. (1997). Synthesis and Characterization of the Organic Surface Modifications of Monodisperse Colloidal Silica. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 8(1–3), 173–176. <https://doi.org/10.1007/BF02436836>
- Ghumatkar, A., Budhe, S., Sekhar, R., Banea, M. D., & De Barros, S. (2016). Influence of adherend surface roughness on the adhesive bond strength. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(13), 2356–2370. <https://doi.org/10.1590/1679-78253066>
- Goland, M. and Reissner, E. (1944). *The Stresses in Cemented Joints*, *Journal of Applied Mechanics*. 11, A17–A27.
- Gosset, D. (2020). Basic properties of boron carbide. *Comprehensive Nuclear Materials*, 539–553. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11638-8>
- Guan, J., Ashrafi, B., Martinez-Rubi, Y., Jakubinek, M. B., Rahmat, M., Kim, K. S., & Simard, B. (2018). Epoxy resin nanocomposites with hydroxyl (OH) and amino (NH₂) functionalized boron nitride nanotubes. *Nanocomposites*, 4(1), 10–17. <https://doi.org/10.1080/20550324.2018.1457764>

- Gültekin, K., Akpınar, S., Gürses, A., Eroglu, Z., Cam, S., Akbulut, H., Keskin, Z., & Ozel, A. (2016). The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 98, 362–369. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.039>
- Gültekin, K., Uğuz, G., & Özel, A. (2021). Improvements of the structural, thermal, and mechanical properties of structural adhesive with functionalized boron nitride nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, November 2020, 1–16. <https://doi.org/10.1002/app.50491>
- Gültekin, K., Uğuz, G., Topcu, Y., & Özel, A. (2021). Structural , thermal and mechanical properties of silanized boron carbide doped epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.51244>
- Habenicht, G. (2009). *Applied Adhesive Bonding* (Vol. 4, Issue 1). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Hadjez, F., & Necib, B. (2018). Experimental characterization and numerical modelling analyses of nano-adhesive-bonded joints. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 12(44), 94–105. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.44.08>
- Han, S., Meng, Q., Araby, S., Liu, T., & Demiral, M. (2019). Mechanical and electrical properties of graphene and carbon nanotube reinforced epoxy adhesives : Experimental and numerical analysis. *Composites Part A*, 120, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.02.027>
- Harper, C. A., & Petrie, E. M. (2003). Appendix J: Sources of specifications and standards for plastics and composites. *Plastics Materials and Processes*, 823–829. <https://doi.org/10.1002/0471459216.app10>
- Hart-Smith, L. J. (1973). Adhesive bonded single lap joints. *Langley Research Center Hampton, Virginia*, 114.
- Hemmatian, H., Reza Zamani, M., & Jam, J. E. (2019). Investigation of crack resistance in epoxy/boron nitride nanotube nanocomposites based on multi-scale method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*, 57(1), 207–219. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.57.1.207>
- Hou, J., Li, G., Yang, N., Qin, L., Grami, M. E., Zhang, Q., Wang, N., & Qu, X. (2014). Preparation and characterization of surface modified boron nitride epoxy composites with enhanced thermal conductivity. *RSC Advances*, 4(83), 44282–44290. <https://doi.org/10.1039/c4ra07394k>
- Hvizdoš, P., & Vencl, A. (2021). Ceramic matrix composites with carbon nanophases: development, structure, mechanical and tribological properties and electrical conductivity. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11858-2>
- İşçi, C. (2006). What Is Nano Technology? *Yaşar University*, 1(3), 173–180. <https://doi.org/10.19168/jyu.04659>
- Jakubinek, M. B., Ashrafi, B., Martinez-Rubi, Y., Rahmat, M., Yourdkhani, 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(March), 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.03.008>
- Jang, I., Shin, K. H., Yang, I., Kim, H., Kim, J., Kim, W. H., Jeon, S. W., & Kim, J. P. (2017). Enhancement of thermal conductivity of BN/epoxy composite through surface modification with silane coupling agents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 518, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.01.011>

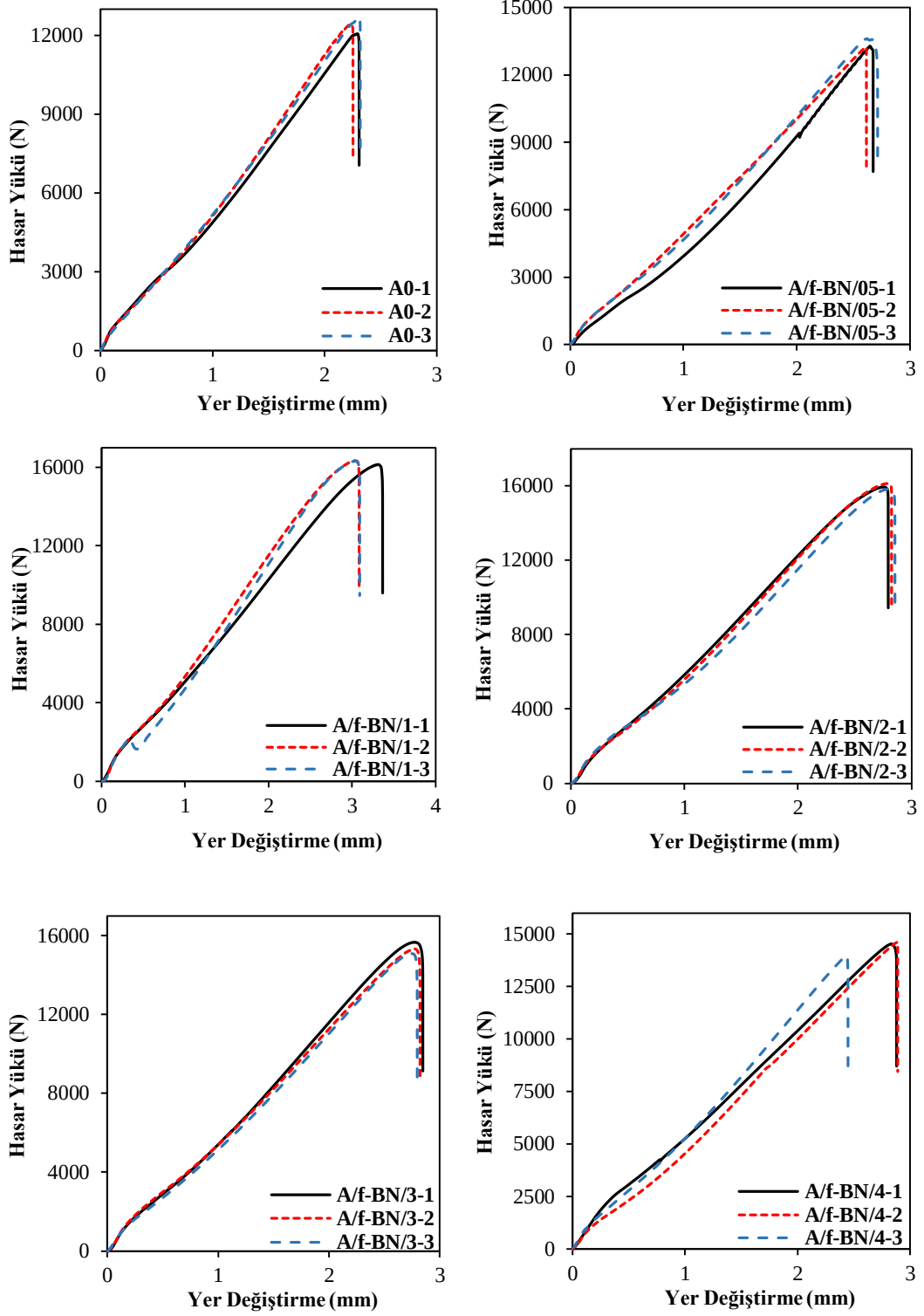
- Kaftanoğlu, B., & Dökmetaş, N. (2012). *Kübik bor nitrür (c-BN) kaplamalar*. 4–5.
- Kango, S., Kalia, S., Celli, A., Njuguna, J., Habibi, Y., & Kumar, R. (2013). Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites-A review. *Progress in Polymer Science*, 38(8), 1232–1261. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003>
- Kaya, F. (2004). *Ana Hatları ile Yapıştırıcılar*. Birsen Yayınevi.
- Kaybal, H. B., Ulus, H., & Avcı, A. (2017). Influence of nano-CaCO₃ particles on shear strength of epoxy resin adhesives. *Uluslararası Muhendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi, December*, 29–35. <https://doi.org/10.29137/umagd.371119>
- Kharat, W. S., & Sidhu, J. S. (2016). Development of epoxy based composites filled with Boron Carbide (B₄C), Tungsten Disulphide (WS₂) and evaluation of its mechanical properties. *International Journal of Mechanical Engineering Research*, 6(1), 19–30. <http://www.ripublication.com>
- Kovziridze, Z. D., Mestvirishvili, Z., Tabatadze, G., Nizharadze, N. S., Mshvildadze, M., & Nikoleishvili, E. (2013). Improvement of Boron Carbide mechanical properties in B₄C-TiB₂ and B₄C-ZrB₂ systems. *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 03(02), 43–48. <https://doi.org/10.4236/jectc.2013.32006>
- Lipp, A., Schwetz, K. A., & Hunold, K. (1989). Hexagonal boron nitride: Fabrication, properties and applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 5(1), 3–9. [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(89\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0955-2219(89)90003-4)
- Lorusso, L. (2013). Nanotechnology , aims, and values. *Ethics & Politics*, 15, 272–302.
- Mattson, C. (n.d.). *The Physics of Adhesives*. http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Connor_Mattson/connor_mattson/physics.html
- Meng, W., Huang, Y., Fu, Y., Wang, Z., & Zhi, C. (2014). Polymer composites of boron nitride nanotubes and nanosheets. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(47), 10049–10061. <https://doi.org/10.1039/c4tc01998a>
- Moghanian, A., Sharifianjazi, F., Abachi, P., Sadeghi, E., Jafarikhorami, H., & Sedghi, A. (2017). Production and properties of Cu/TiO₂ nano-composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 698, 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.180>
- Mohanty, R. M., Balasubramanian, K., & Seshadri, S. K. (2007). Multiphase formation of boron carbide in B₂O₃-Mg-C based micropyrretic process. *Journal of Alloys and Compounds*, 441(1–2), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.09.069>
- Moniruzzaman, M., & Winey, K. I. (2006). Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *Macromolecules*, 39(16), 5194–5205. <https://doi.org/10.1021/ma060733p>
- Mostovoy, A. S., Vikulova, M. A., & Lopukhova, M. I. (2020). Reinforcing effects of aminosilane-functionalized h-BN on the physicochemical and mechanical behaviors of epoxy nanocomposites. *Scientific Reports*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67759-z>
- Müller, M., Hrabě, P., Chotěborský, R., & Herák, D. (2018). Evaluation of factors influencing adhesive bond strength. *Research in Agricultural Engineering*, 52(1), 30–37. <https://doi.org/10.17221/4877-rae>
- 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. <https://doi.org/10.1080/14328917.2019.1641346>

- Niihara, K., Nakahira, A., & Hirai, T. (1984). The effect of stoichiometry on mechanical properties of boron carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, 67(1), C-13-C-14. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1984.tb19158.x>
- Oganov, A. R., & Solozhenko, V. L. (2009). Boron: A hunt for superhard polymorphs. *Journal of Superhard Materials*, 31(5), 285–291. <https://doi.org/10.3103/S1063457609050013>
- Öz, Ö., & Özer, H. (2016). Hibrit yapıştırma düzeninin bindirme bağlantı mukavemetine etkileri. In *Mühendis ve Makina* (Vol. 57, Issue 679, pp. 63–72).
- Özer, H. (2018). Introductory Chapter: Structural Adhesive Bonded Joints. In *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74229>
- Özkan, Ş. G., Tombal, T. D., Ünver, İ. K., & Erdal, O. A. (2016). Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi. *Bor Dergisi*, 1(2), 86–95. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/boron/issue/24508/259751%0A>
- Packham, D. E. (1992). The mechanical theory of adhesion-changing perceptions 1925-1991. *The Journal of Adhesion*, 39(2–3), 137–144. <https://doi.org/10.1080/00218469208026545>
- Petrie, E. M. (2013). Adhesive bonding of textiles: Principles, types of adhesive and methods of use. In *Joining Textiles: Principles and Applications*. <https://doi.org/10.1533/9780857093967.2.225>
- Pinto, A. M. G., Ribeiro, N. F. Q. R., Campilho, R. D. S. G., & Mendes, I. R. (2014). Effect of adherend recessing on the tensile strength of single lap joints. *Journal of Adhesion*, 90(8), 649–666. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.766132>
- Pocius, A. V. (1983). The relationship of sulfuric-chromic acid (FPL) etch composition to the surface properties of 2024T-3 Aluminum alloy. *Adhesion Aspects of Polymeric Coatings*, 173–174.
- Prolongo, S.G. G, R., & A, U. (2012). Study of the effect of substrate roughness on adhesive joints by SEM image analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology*, April 2015, 37–41. <https://doi.org/10.1163/156856106777144345>
- Rahmat, M., Naftel, A., Ashrafi, B., Jakubinek, M. B., Martinez-Rubi, Y., & Simard, B. (2019). Dynamic mechanical characterization of boron nitride nanotube-epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*, 40(6), 2119–2131. <https://doi.org/10.1002/pc.24995>
- Rodrigues, D. D., & Broughton, J. G. (2013). Silane surface modification of boron carbide in epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 46, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.05.014>
- 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*, 166(February), 472–482. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.007>
- Silva, L. F. M. da, Öchsner, A., & Robert D. Adams. (2018). Handbook of Adhesion Technology. In *Handbook of Adhesion Technology :Second Edition*.
- Somasundaran, P., Fang, X., Ponnurangam, S., & Li, B. (2010). Nanoparticles: Characteristics, mechanisms and modulation of biotoxicity. *Kona Powder and Particle Journal*, 28, 38–49. <https://doi.org/10.14356/kona.2010007>
- Suryavanshi, A. P., Yu, M. F., Wen, J., Tang, C., & Bando, Y. (2004). Elastic modulus and resonance behavior of boron nitride nanotubes. *Applied Physics Letters*, 84(14), 2527–2529. <https://doi.org/10.1063/1.1691189>

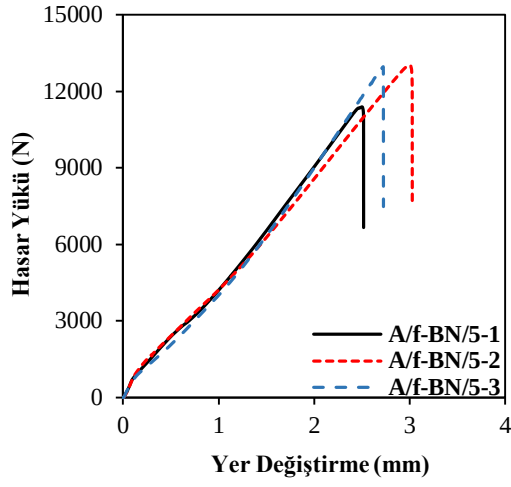
- Temiz, Ş. (2003). *Yapıştırıcı bağlantılarının mekanik özellikleri üzerine çevresel faktörlerin etkisinin incelenmesi*. Erzurum Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Thakral, S., & Mehta, R. (2006). Fullerenes: An introduction and overview of their biological properties. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 68(1), 13–19. <https://doi.org/10.4103/0250-474X.22957>
- Troughton, M. (2008). *Handbook Of Plastics Joining* (2nd ed.). William Andrew Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1581-4.50019-6>
- Ubaid, F., Matli, P. R., Shakoor, R. A., Parande, G., Manakari, V., Amer Mohamed, A. M., & Gupta, M. (2017). Using B4C nanoparticles to enhance thermal and mechanical response of aluminum. *Materials*, 10(6), 2–13. <https://doi.org/10.3390/ma10060621>
- Volkersen, O., 1938. (1938). Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten Mit Konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, 41–47.
- Wang, J., He, Y., Xie, Z., Chen, C., Yang, Q., Zhang, C., Wang, B., Zhan, Y., & Zhao, T. (2018). Functionalized boron carbide for enhancement of anticorrosion performance of epoxy resin. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(2), 758–766. <https://doi.org/10.1002/pat.4181>
- Wegmanand, R. F., & Van Twisk, J. (2012). Surface preparation techniques for adhesive bonding: Second edition. In *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding: Second Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02158-8>
- Wei, X., Wang, M. S., Bando, Y., & Golberg, D. (2010). Tensile tests on individual multi-walled boron nitride nanotubes. *Advanced Materials*, 22(43), 4895–4899. <https://doi.org/10.1002/adma.201001829>
- Yan, H., Tang, Y., Su, J., & Yang, X. (2014). Enhanced thermal-mechanical properties of polymer composites with hybrid boron nitride nanofillers. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 114(2), 331–337. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8149-6>
- Yeşilkaya, B., & İbişoğlu, G. (2003). *Bor karbür ön fizibilite etüdü*.
- Yue, L., Pircheraghi, G., Monemian, S. A., & Manas-Zloczower, I. (2014). Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets - Dispersion and synergy effects. *Carbon*, 78(November), 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.07.003>
- Zaiemyekheh, Z., Liaghat, G. H., Ahmadi, H., Khan, M. K., & Razmkhah, O. (2019). Effect of strain rate on deformation behavior of aluminum matrix composites with Al₂O₃ nanoparticles. *Materials Science and Engineering A*, 753(March), 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.052>
- Zettl, C. N. and. (1998). Measurement of the elastic modulus of a multi-wall boron nitride nanotube. *Solid State Communications*, 105(5), 297–300.
- Zhao, X., Adams, R. D., Silva, L. F. M., Adams, R. D., Silva, L. F. M., & Lap, S. (2011). Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 4243(25), 819–836. <https://doi.org/10.1163/016942410X520871>
- Zhi, C., Bando, Y., Tang, C., & Golberg, D. (2010). Boron nitride nanotubes. *Materials Science & Engineering R*, 70(3–6), 92–111. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2010.06.004>
- Zhi, C. Y., Bando, Y., Wang, W. L., Tang, C. C., Kuwahara, H., & Golberg, D. (2008). Mechanical and thermal properties of polymethyl methacrylate-BN nanotube composites. *Journal of Nanomaterials*, 2008(1). <https://doi.org/10.1155/2008/642036>
- Zotti, A., Zuppolini, S., Zarrelli, M., & Borriello, A. (2016). Fracture toughening mechanisms in epoxy adhesives. *Adhesives-Applications and Properties*. <https://doi.org/10.5772/65250>

EKLER

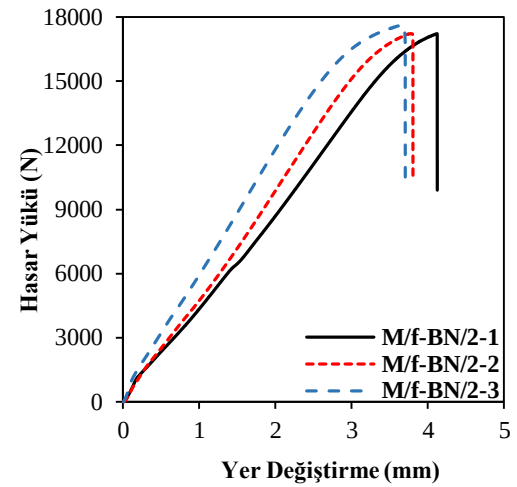
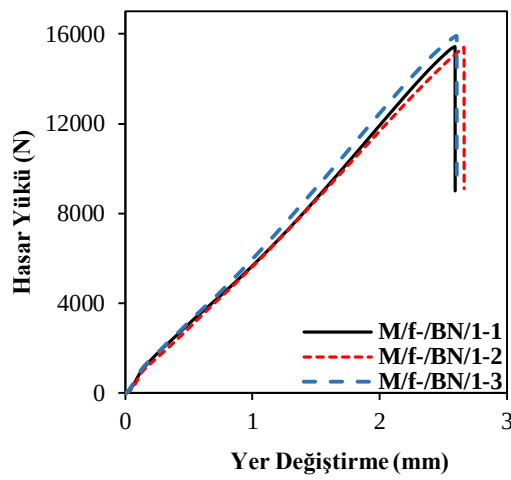
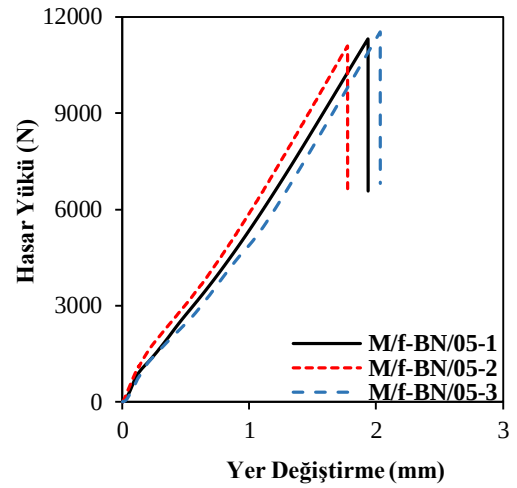
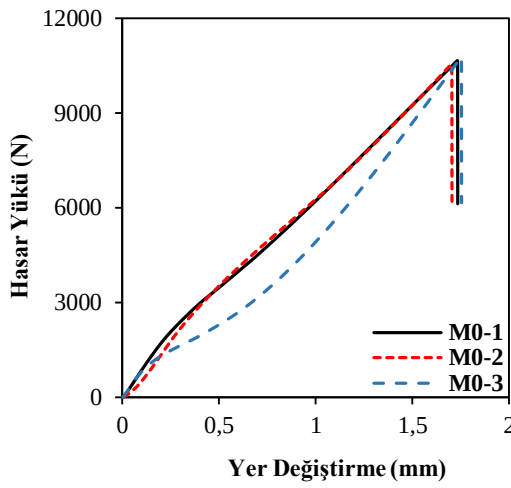
EK 1. Katkısız ve Araldite 2011 yapıştırıcılara f-BN ilavesi ile üretilen alüminyum bağlantıların hasar yükü/yer değıştirme eğrileri



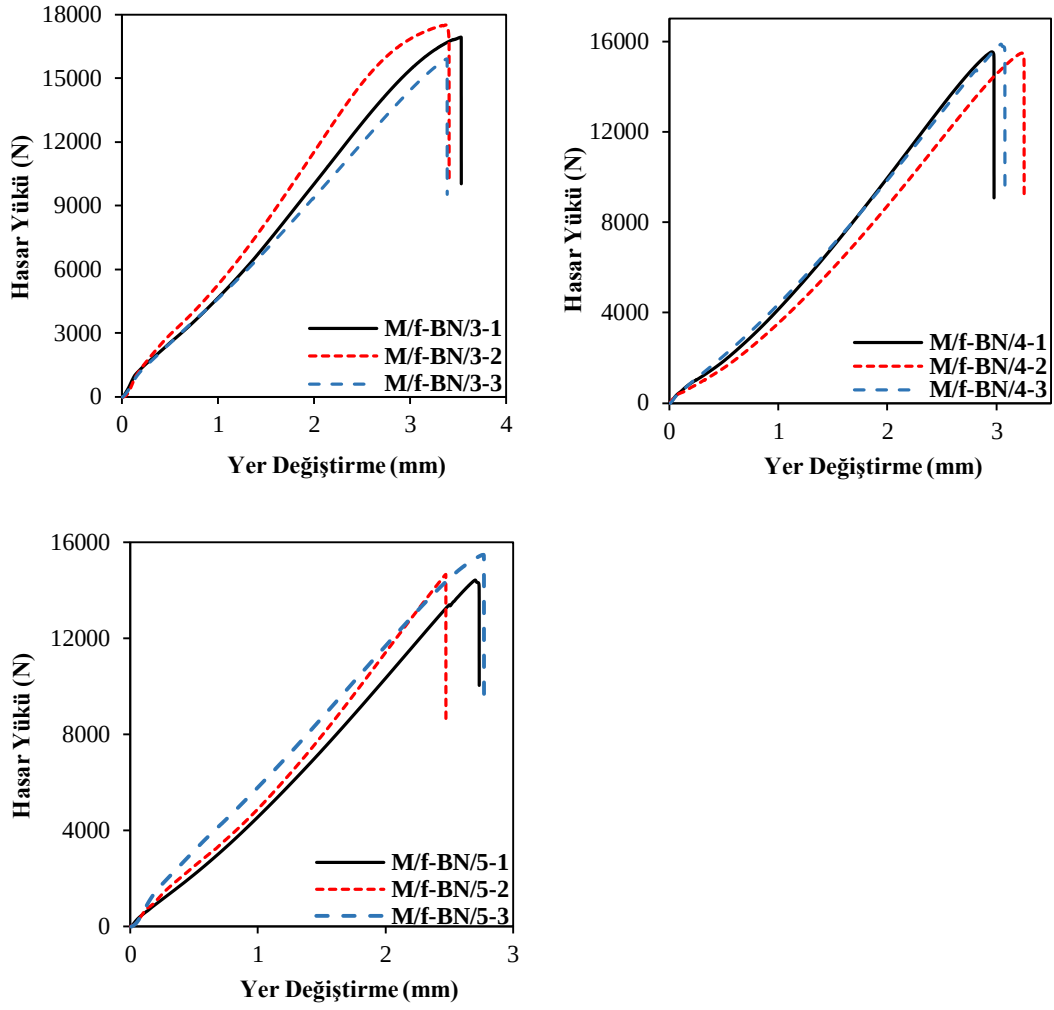
Ek 1 (devam)



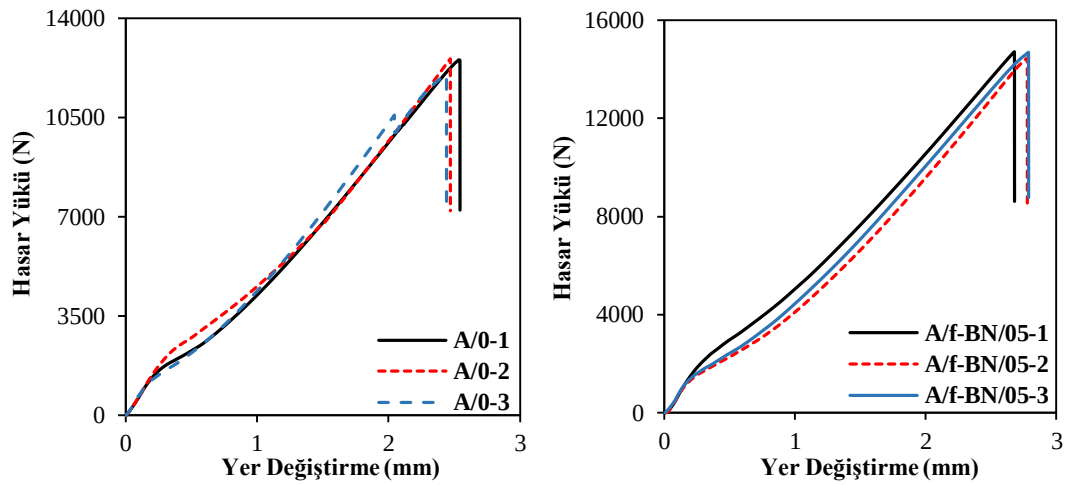
EK 2. Katkısız ve MGS-LR285 yapıştırıcılara f-BN ilavesi ile üretilen alüminyum bağılantıların hasar yüğü/yer değıştirme eğışleri



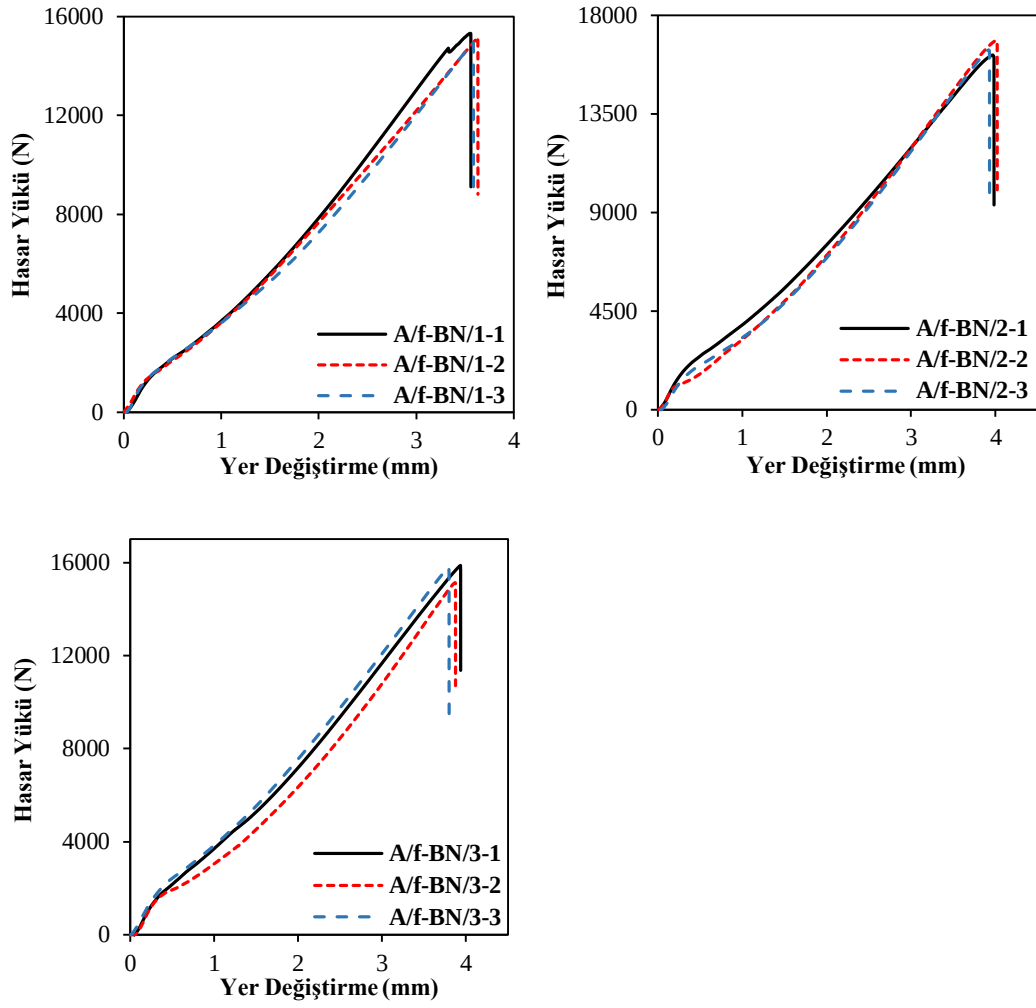
Ek 2 (devam)



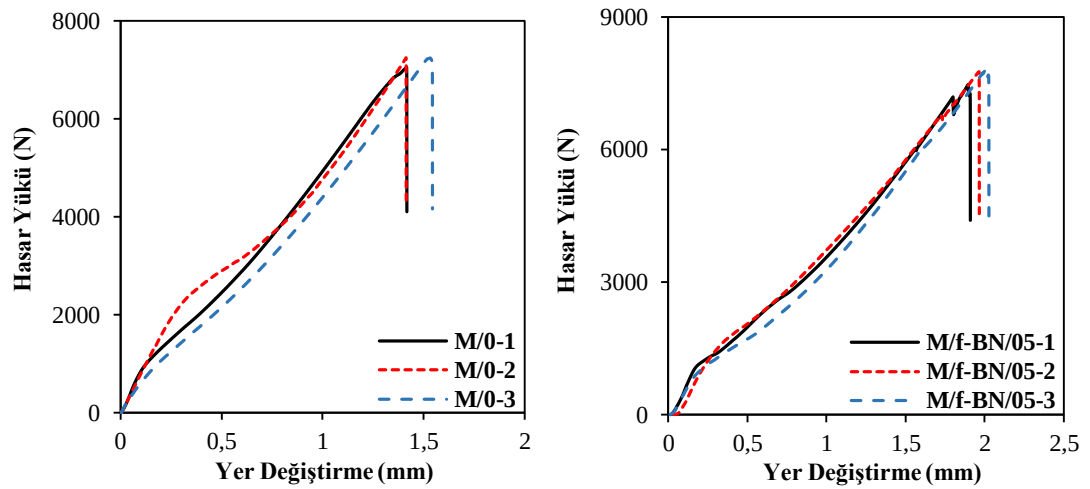
EK 3. Katkısız ve Araldite 2011 yapıştırıcılara f-BN ilavesi ile üretilen kompozit bağlantıların hasar yüğü/yer değiştirme eğrileri



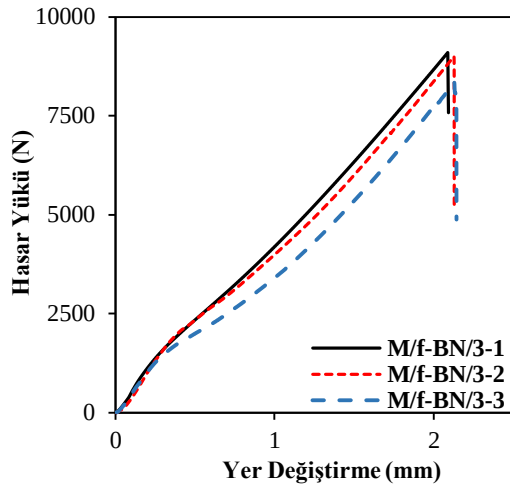
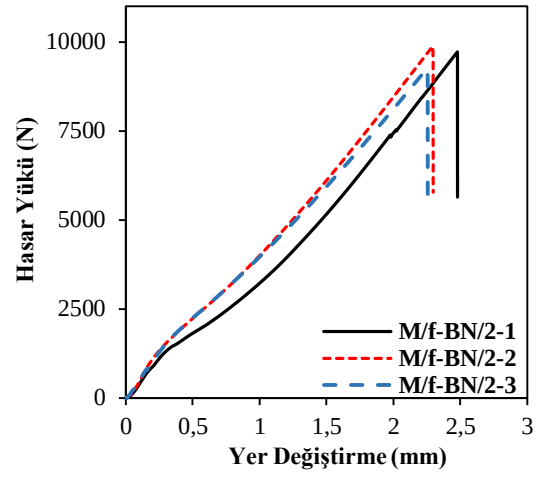
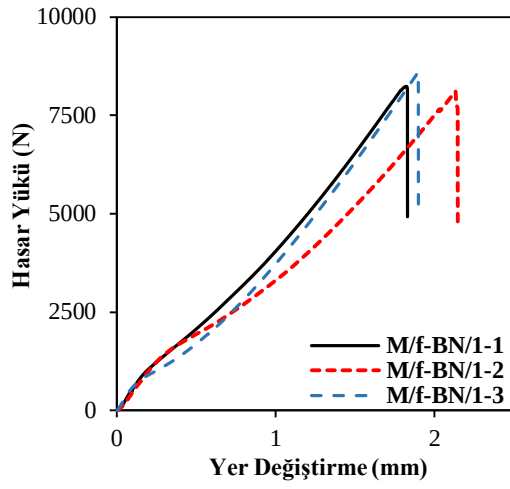
Ek 3 (devam)



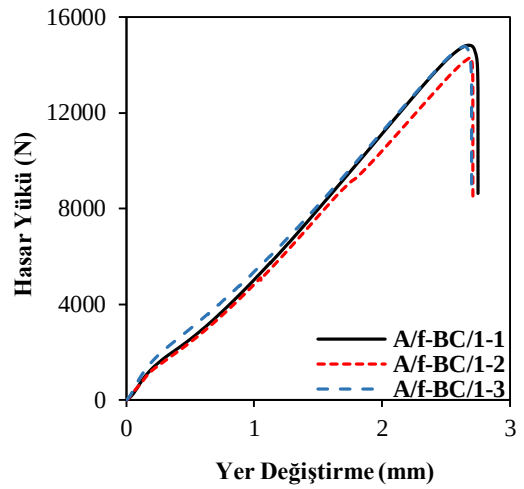
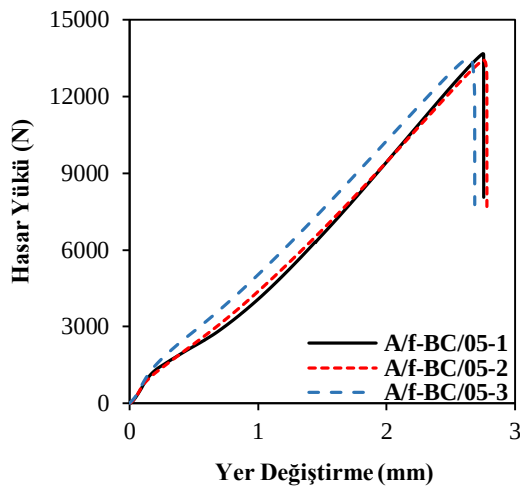
EK 4. Katkısız ve MGS-LR285 yapıştırıcılara f-BN ilavesi ile üretilen kompozit bağlantıların hasar yükü/yer değiştirme eğrileri



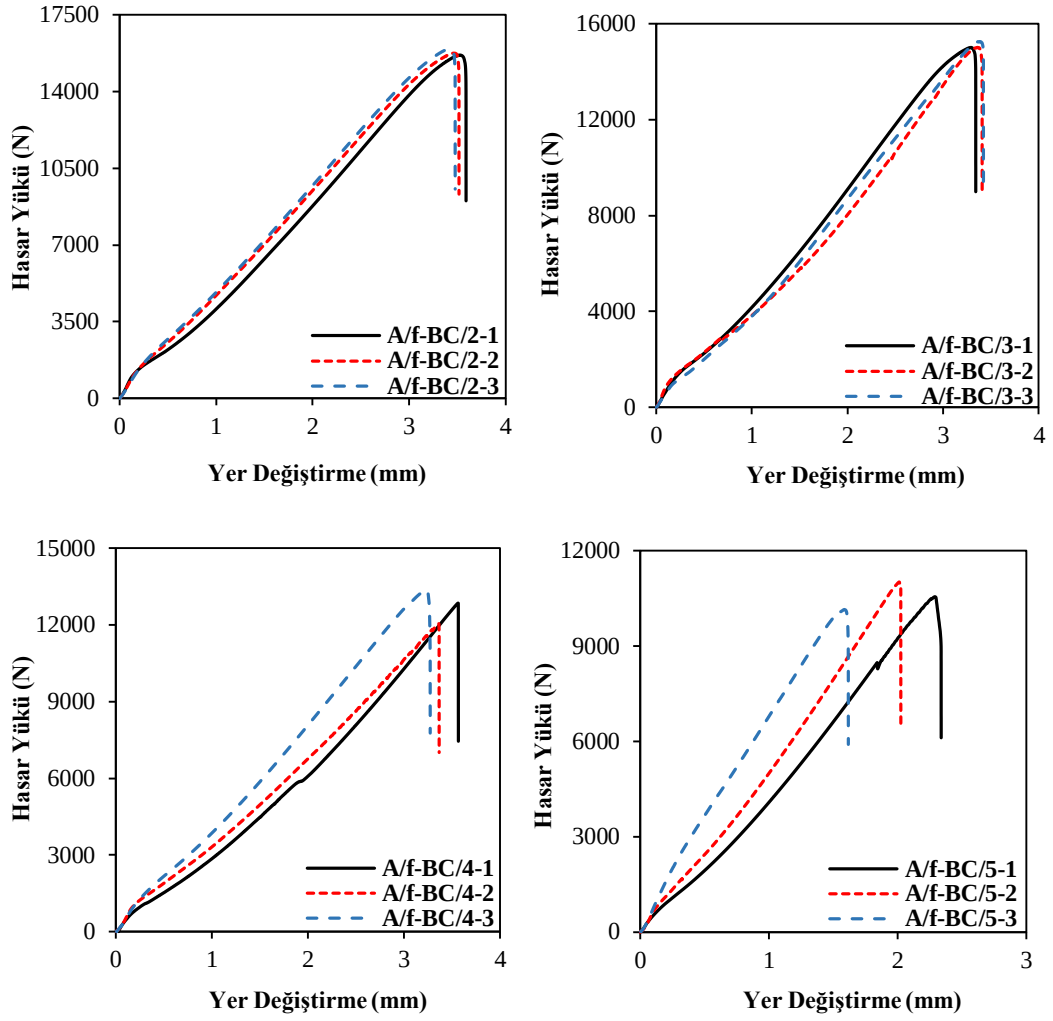
Ek 4 (devam)



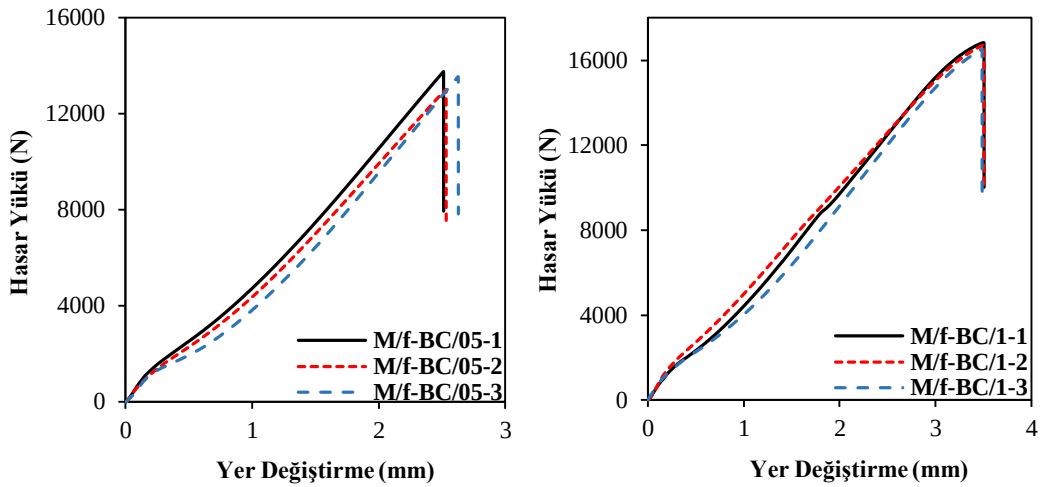
EK 5. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-B₄C ilavesi ile üretilen alüminyum bağlantıların hasar yüğü/yer değıştirme eğışleri



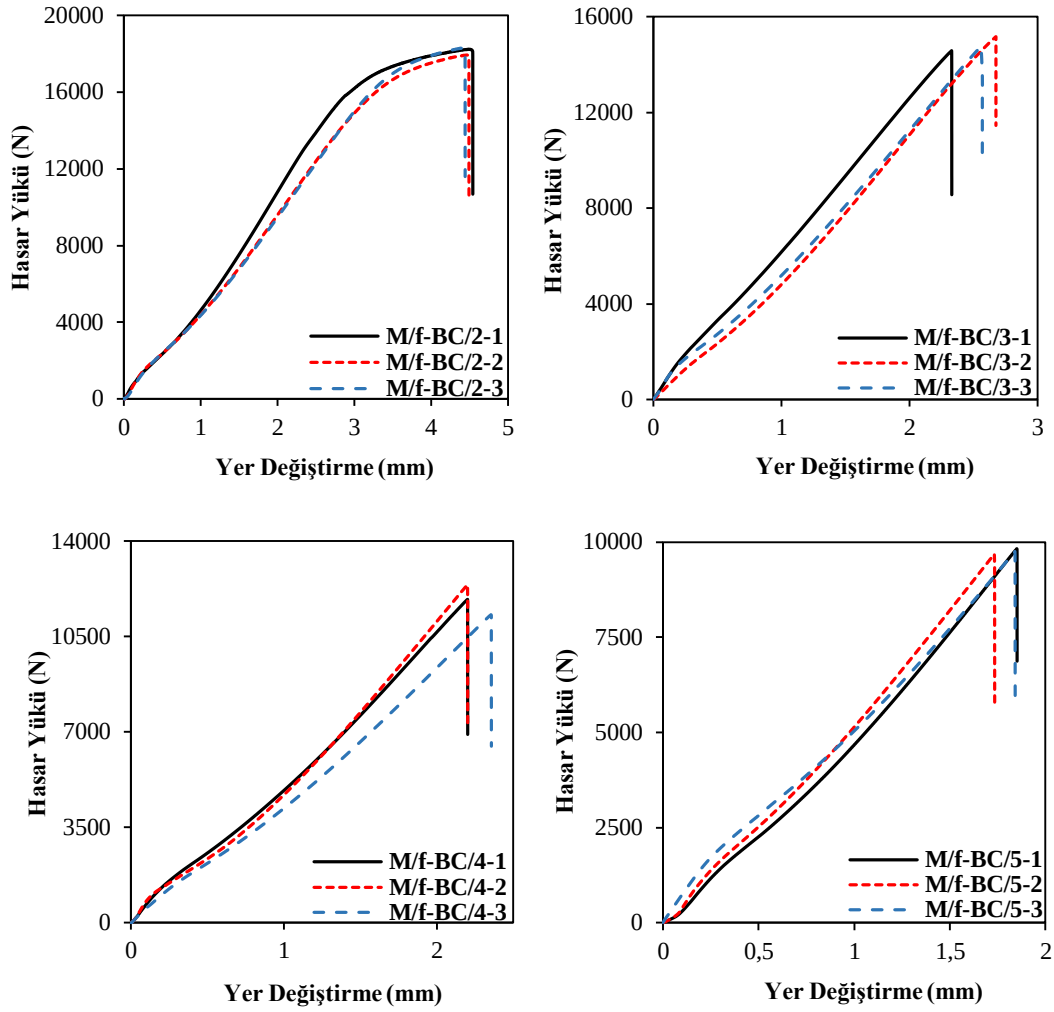
Ek 5 (devam)



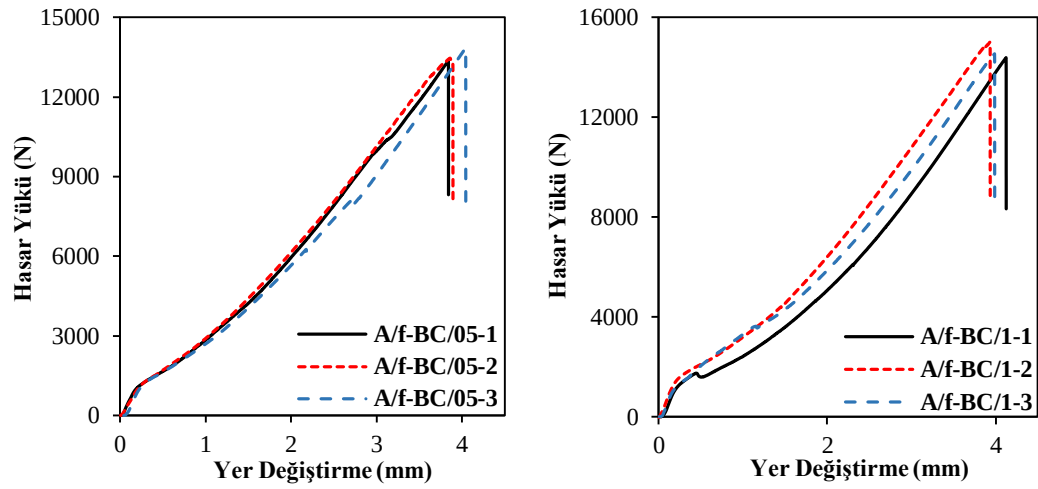
EK 6. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-B₄C ilavesi ile üretilen alüminyum bağlantıların hasar yüğü/yer değıştirme eğışleri



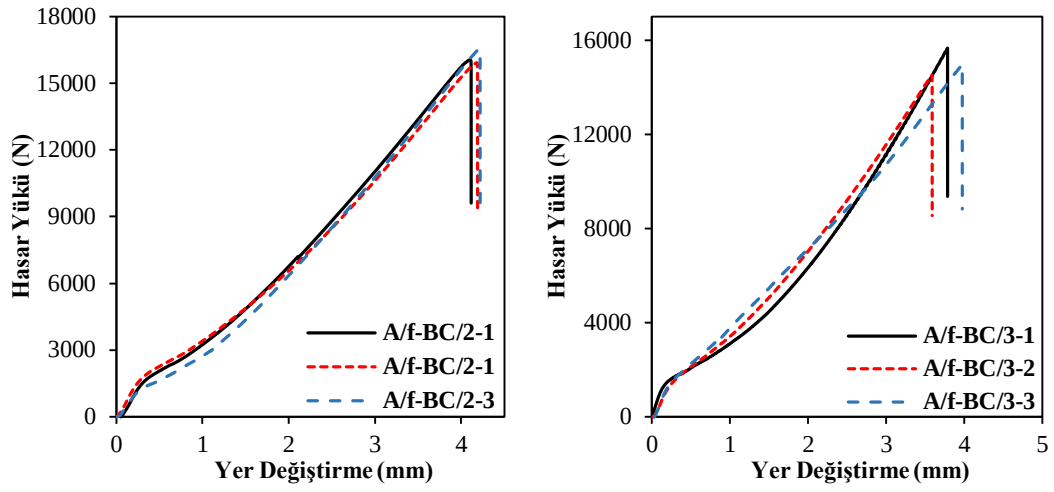
Ek 6 (devam)



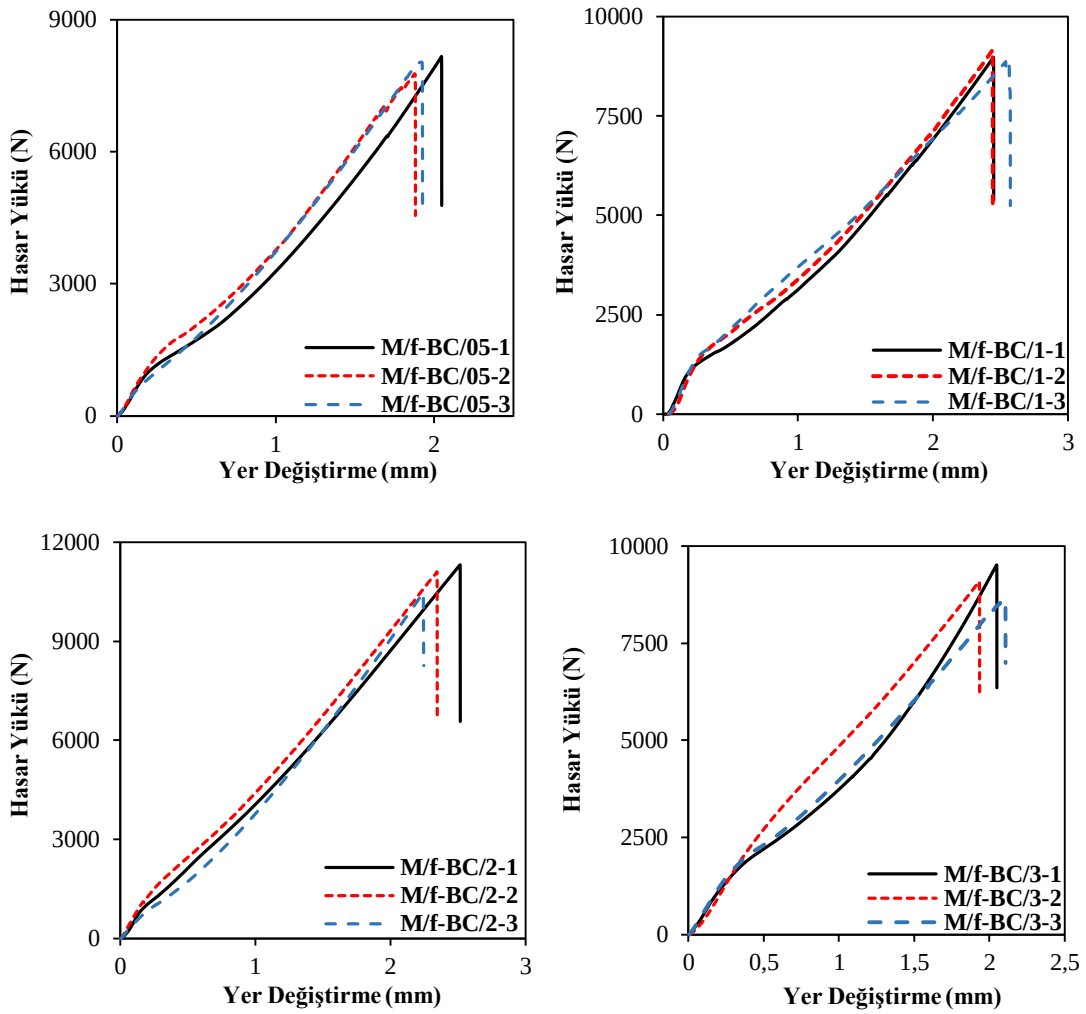
EK 7. Araldite 2011 yapıştırıcılara f-B₄C ilavesi ile üretilen kompozit bağlantıların hasar yüğü/yer değıştirme eğrileri



Ek 7 (devam)



EK 8. MGS-LR285 yapıştırıcılara f-B₄C ilavesi ile üretilen kompozit bağıştılarının hasar yüğü/yer değıştirme eğışleri



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Enes YAZICI, Kahramanmaraş'ta doğdu. Samsun 19 Mayıs Lisesi'ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden 2019 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2019 yılında OMÜ Makine Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID: 0000-0001-9225-8647

Yayınlanmış Çalışmalar:

1. Temiz H., Yazıcı M.E., Şahin F., Dengiz C.G., Yıldızlı K., Namlı L., “Üç boyutlu yazıcılar için filament ekstruder üretimi”, *Uluslararası 19 Mayıs Multidisipliner Çalışmalar Kongresi*, 17-19 Mayıs 2019, Samsun, Türkiye
2. Gültekin K., Yazıcı M.E. (Kabul edilme tarihi: 18.05.2021). Fonksiyonelleştirilmiş bor nanopartiküllerinin yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli kompozit bağlantılar üzerinde etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (Proje No: 119M939), Araştırmacı bursiyer