

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN BOR KATKILI
TERMOSET KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRME
YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Adnan KALAYCI

Danışman

Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN

Bu tez Türkiye, Enerji ve Maden Araştırmalar Kurumu (TENMAK) Bor Araştırma Enstitüsü tarafından desteklenmiştir.

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Adnan KALAYCI tarafından, Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN danışmanlığında hazırlanan “Havacılık Uygulamaları İçin Bor Katkılı Termoset Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 25.8.2021 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 (Danışman)	Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi İbrahim İNANÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği		☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği		☒ 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 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

09 / 09 / 2021

Adnan KALAYCI

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: Havacılık Uygulamaları İçin Bor Katkılı Termoset Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 13/07/2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 23

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

09 / 09 / 2021

Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN

ÖZET

HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN BOR KATKILI TERMOSET KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Adnan KALAYCI
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Ağustos/2021
Danışman: Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN

Bu çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılan termoset kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinde bor katkısı araştırılmıştır. Birleştirme yöntemi olarak yapıştırırmalı birleştirme yöntemi seçilmiştir. Yapıştırırmalı birleştirme yönteminde havacılık uygulamalarında da kullanılan cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli termoset kompozit malzemeler ile hegzagonal bor nitrür (hBN) kullanılmıştır. Kullanılan cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Yapıştırırmalı birleştirme yönteminde yapıştırıcıya ağırlıkça % 0, 1, 2 ve 3 oranlarında hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısı yapılmıştır. Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkılı yapıştırıcının cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozit malzemelere olan etkisi incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda termoset kompozit malzemelerin yapıştırırmalı birleştirmesinde yapıştırıcıya katılan hBN katkısının ağırlıkça % 2 oranında olduğu durumda en iyi tek bindirmeli çekme gerilmesine sahip olduğu anlaşılmıştır. En yüksek tek bindirmeli çekme gerilmesi değerine “0°cam%2hbn” kodlu cam elyaf takviyeli 0° yönlendirilmiş ağırlıkça % 2 hBN katkılı yapıştırırmalı numunelerde görülmüştür. Karbon elyaf takviyeli termoset kompozit numunelerde en yüksek tek bindirmeli çekme gerilmesine “0°karbon%2hbn” kodlu 0° yönlendirilmiş % 2 hBN katkılı numunelerde görülmüştür. Bu araştırma sonucunda termoset kompozit malzemelerin yapıştırırmalı birleştirmesinde yapıştırıcıya katılan hBN katkısının ağırlıkça % 2 oranında olduğu durumda en iyi tek bindirmeli çekme gerilmesine sahip olduğu anlaşılmıştır. Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının, karbon elyaf takviyeli numunelerde, cam elyaf takviyeli numunelere göre daha çok etki gösterdiği anlaşılmıştır. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme gerilmelerinde, 0° yönlendirilmiş kompozit numunelerin, 90° yönlendirilmiş numunelerden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.

Anahtar Sözcükler: Termoset kompozitler, bor katkılı (bor nano malzemeler), birleştirme yöntemleri, yapıştırırmalı birleştirme, hegzagonal bor nitrür (hBN)

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF JOINING METHODS OF BORON INTEGRATED THERMOSET COMPOSITE MATERIALS FOR AEROSPACE APPLICATIONS

Adnan KALAYCI

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Material Science and Engineering

Master, August 2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Özgür DEMİRCAN

In this study, boron contribution was investigated in the joining methods of thermoset composite materials used in aviation applications. The bonding method was chosen as the joining method. In the bonding joining method, glass fiber and carbon fiber reinforced thermoset composite materials with epoxy matrix were used in this study. The glass fiber and carbon fiber reinforced thermoset composite materials used were produced by vacuum infusion method. Samples from manufactured composite materials were prepared in accordance with ASTM D5868-01 standards. Hexagonal boron nitride (hBN) additive adhesive was applied to the prepared glass fiber and carbon fiber reinforced thermoset composite samples. As a result of this research, it was understood that the by weight of 2% hBN contribution to epoxy adhesive had the best test results from the single lap shear test. The highest single lap shear test value was obtained in 0° directional glass fiber reinforced composites with the code of "0°cam%2hbn" in the adhesive samples with a 2% hBN contribution. In the case of carbon fiber reinforced thermoset composite samples, the highest single lap shear test value was obtained in 0° directional carbon fiber reinforced composites with the code of "0°carbon%2hbn" in the adhesive samples with a 2% hBN contribution. In the combination of glass fiber and carbon fiber reinforced composites, it was observed that glass fiber reinforced composites had better single-lap shear test results than carbon fiber reinforced composites. It was found that the integration of hexagonal boron nitride (hBN) in epoxy adhesive had more positive effects in carbon fiber reinforced composites than glass fiber reinforced ones. The results of single-lap shear tests of 0° oriented composites of glass and carbon fibers were found to be higher than 90° oriented ones.

Keywords: Thermoset composites, boron nano materials, boron additive, joining methods, adhesively bonded joints, hexagonal boron nitride (hBN)

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, destek olan ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Özgür Demircan'a ayrıca destekleri ve ilgileriyle her zaman bana yardımcı olan Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı hocalarıma tümüne teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamda bana yardımcı olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamı 2019-30-06-30-003 numaralı proje ile destekleyen Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu Bor Araştırma Enstitüsü'ne teşekkür ederim.

Adnan KALAYCI

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT.....	IV
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	4
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	5
TABLolar DİZİNİ.....	7
1. GİRİŞ	8
1.1. Giriş.....	8
1.2. Amaç ve Kapsam	10
1.3. Literatür Araştırması.....	11
2. GENEL BİLGİLER.....	20
2.1. Kompozit Malzemeler	20
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	21
2.2.1. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler	22
2.2.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	22
2.2.1.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	22
2.2.1.3. Yapısal Kompozit Malzemeler	23
2.2.2. Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler.....	23
2.2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	24
2.2.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler.....	24
2.2.2.3. Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler	24
2.2.2.3.1. Termosetler	25
2.2.2.3.2. Termoplastikler	26
2.2.2.3.3. Elastomerler	26
2.2.2.4. Karbon Matrisli Kompozit Malzemeler	27
2.2.3. Yapısal Kompozit Malzemeler.....	28
2.2.3.1. Nanokompozit Malzemeler.....	28
2.2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	29
2.2.4.1. Elyaf Yatırma Yöntemi	29
2.2.4.2. Püskürtme Yöntemi.....	30
2.2.4.3. Reçine Transfer Yöntemi.....	31
2.2.4.4. Soğuk Presleme Yöntemi	32
2.2.4.5. Helisel Sarma Yöntemi	33
2.2.4.6. Tabakalı Birleştirme Yöntemi.....	34

2.2.4.7. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi	35
2.2.4.8. Profil Çekme Yöntemi.....	35
2.3. Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemleri	36
2.3.1. Yapıştırımlı Birleştirme Yöntemi	37
2.3.2. Mekanik Birleştirme Yöntemleri.....	38
2.3.2.1. Kaynak Yöntemiyle Birleştirme.....	39
2.4. Bor Minerali.....	39
2.4.1. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN).....	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM	44
3.1. Kullanılan Malzemeler	44
3.1.1. Cam Elyaf Kumaş	44
3.1.2. Karbon Elyaf Kumaş	45
3.1.3. Termoset Epoksi Reçine	46
3.1.4. Kalıp Ayrıcı.....	47
3.1.5. Temizleyici Solüsyon	47
3.1.6. Yapıştırıcı Solüsyon	48
3.1.7. Yapıştırıcı Epoksi.....	49
3.1.8. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN).....	49
3.1.9. Vakum İnfüzyon Seti	50
3.2. Kullanılan Makine ve Araçlar	51
3.2.1. Vakum İnfüzyon Sistemi	51
3.2.2. Ultrasonik Homojenizasyon Cihazı.....	52
3.2.3. Kompozit Kesme Makinesi.....	52
3.2.4. Hassas Terazî.....	53
3.2.5. Plastik Beher Kaplar.....	53
3.2.6. Epoksi Yapıştırıcı Tabancası	53
3.2.7. Kül Fırını.....	54
3.2.8. Manyetik Karıştırıcı.....	55
3.2.9. Vakum Fırını	55
3.3. Kullanılan Yöntemler	56
3.3.1. Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Kompozit Plaka Üretimi.....	56
3.3.2. Yapıştırıcı Solüsyonun Hazırlanması	57
3.3.3. Yapıştırıcının Ultrasonik Homojenizasyon ile Karıştırılması.....	59
3.3.4. Tek Bindirmeli Çekme Numunelerin Hazırlanması.....	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	63

4.1. Malzeme Karakterizasyonu.....	63
4.1.1. Tek Bindirmeli Çekme Testi.....	63
4.1.2. Optik Mikroskop Testi	70
4.1.3. Numunelerin Kırılma Analizleri	72
4.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKÇA.....	78
ÖZ GEÇMİŞ.....	83



SİMGELER VE KISALTMALAR

F	Kuvvet
A	Yapışma Yüzey Alanı
S	Tek Bindirmeli Çekme Gerilmesi
hbn	Hegzagonal Bor Nitrür
mm ²	Mili Metre Kare
mm ³	Mili Metre Küp
mpa	Mega Pasgal
gpa	Giga Pascal
g	Gram
cm ³	Santimetre Küp
ml	Mili Litre
ASTM	Uluslararası Amerikan Test Ve Materyalleri Topluluğu
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
PES	Poli Eter Sülfür
PPS	Poli Propilen Sülfür
PA	Poli Amid
RTM	Reçine Transfer Metodu
PEEK	Poli Eter Eter Keton
P	Basınç
B	Bor
BN	Bor Nitrür
CNT	Karbon Nano Tüp
W	Watt
°C	Santigrad Derece
0°	0 Derece
90°	90 Derece
Ω	Direnç Ohm
K	Kelvin Sıcaklık
Å	Angstron
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
N	Newton
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
KİTAM	Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin genel yapısı (Kaya, 2016).....	9
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin matris ve elyaf fazı görüntüsü (Engin, vd., 2015).....	20
Şekil 2.2. Takviyeli kompozitlerin sınıflandırılması (Karakter, 2016).....	22
Şekil 2.3. Yapısal kompozitlerin genel görünümü (Ulus, vd., 2018).....	23
Şekil 2.4. Termoset matrisli kompozit reçineler (Didim, 2014).....	25
Şekil 2.5. Termoplastik malzemelerin görüntüsü (Karagöz, vd., 2016).....	26
Şekil 2.6. Elastomer malzemeye bir örnek (Mayıs, vd., 2020).....	27
Şekil 2.7. Karbon matrisli kompozit malzemelerin yapısı (Şenel, vd., 2015).....	27
Şekil 2.8. Nanokompozit malzemelerin oluşumu (Erdem, vd., 2015).....	28
Şekil 2.9. Elyaf yatırma yöntemi (Bingöl, vd., 2016).....	30
Şekil 2.10. Elyaf püskürtme yöntemi (Olgun, vd., 2018).....	31
Şekil 2.11. Reçine transfer yöntemi (Demircan, vd., 2019).....	32
Şekil 2.12. Soğuk presleme yöntemi (Deniz, 2005).....	33
Şekil 2.13. Helisel sarma yöntemi (Deniz, 2005).....	33
Şekil 2.14. Vakum torbalama yöntemi (Baştekel, 2020).....	34
Şekil 2.15. Enjeksiyon makinesi.....	35
Şekil 2.16. Profil çekme yöntemi (Sarıbyık, vd., 2007).....	36
Şekil 2.17. Yapıştırıcı, perçin ve kaynaklı birleştirmelerin gerilmeleri (Loctite, 1998).....	37
Şekil 2.18. Yapıştırıcı ve yüzey arasındaki bağlantı yapısı (Okkaloğlu, vd., 2014).....	37
Şekil 2.19. Bor minerali görüntüsü (Töre, 2006).....	41
Şekil 2.20. Hegzagonal bor nitürün (hBN) kimyasal bağ yapısı (Öz, 2016).....	42
Şekil 3.1. LT 450 cam elyaf kumaş.....	45
Şekil 3.2. +/-090 Biaxial karbon elyaf kumaş.....	46
Şekil 3.3. DTE 1200 Duratek epoksi reçine ve DTS 1151 sertleştirici.....	47
Şekil 3.4. Xtend 1080 kalıp ayırıcı.....	47
Şekil 3.5. Isolab marka % 99,99 saflıkta aseton.....	48
Şekil 3.6. Isolab marka %99,99 saflıkta etanol.....	48
Şekil 3.7. Araltide 2011 marka epoksi yapıştırıcı.....	49
Şekil 3.8. Nano boyutta hegzagonal bor nitür (hBN).....	50
Şekil 3.9. Hegzagonal bor nitür (hBN) nano tozun SEM görüntüleri, (a) 50000x büyütme, (b) 30000x büyütme.....	50
Şekil 3.10. Vakum infüzyon seti; vakum naylonu, reçine akış filesi ve sıyırma kumaşı.....	51
Şekil 3.11. Vakum infüzyon seti; kalıp sistemi, vakum pompası, kalıp ısıtıcı ve havalandırma sistemi.....	51
Şekil 3.12. Biobase marka ultrasonik homojenizasyon cihazı.....	52
Şekil 3.13. Sulu kompozit kesme makinesi.....	52
Şekil 3.14. Hassas terazi.....	53
Şekil 3.15. Isolab marka plastik 50 ml beher kab.....	53
Şekil 3.16. Araldite 2000 marka epoksi yapıştırıcı tabancası.....	54

Şekil 3.17. Proterm marka kül fırını.....	54
Şekil 3.18. Manyetik mekanik karıştırıcı.....	55
Şekil 3.19. Vakum fırını.....	56
Şekil 3.20. Vakum infüzyon ile kompozit plaka üretim görselleri	56
Şekil 3.21. Cam ve karbon elyaf kumaşların dizilimi (Al-darkazali, vd., 2018).....	57
Şekil 3.22. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit plakalar	57
Şekil 3.23. Yapıştırıcı solüsyonun karıştırma şeması	58
Şekil 3.24. Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkılı ethanollü yapıştırıcı solüsyonun hazırlanması.....	59
Şekil 3.25. Yapıştırıcının ultrasonik homojenizasyon cihazı ile karışımı	59
Şekil 3.26. Sertleştiricisi ilave edilmiş hBN katkılı yapıştırıcı epoksi.....	60
Şekil 3.27. ASTM D5868-01 standartlarındaki numuneler.....	61
Şekil 3.28. Cam elyaf ve karbon elyaf tek bindirmeli çekme testi öncesi numuneleri.....	62
Şekil 4.1. Instron marka çekme cihazı	64
Şekil 4.2. Cam elyaf takviyeli numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonrası görüntüleri.....	65
Şekil 4.3. Karbon elyaf takviyeli numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonrası görüntüleri.....	65
Şekil 4.4. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli bağlantı dayanımı grafiği	67
Şekil 4.5. Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli bağlantı dayanımı grafiği	68
Şekil 4.6. Bresser marka lcd dijital optik mikroskop	70
Şekil 4.7. Karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin optik mikroskop öncesi görüntüleri	71
Şekil 4.8. Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	71
Şekil 4.9. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	72
Şekil 4.10. (a) Cam elyaf takviyeli kompozit numune, (b) Karbon elyaf takviyeli kompozit numune.....	72
Şekil 4.11. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin kırılma görüntüleri.....	73
Şekil 4.12. Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin kırılma görüntüleri	73
Şekil 4.13. Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozun SEM görüntüleri, (a) 30000x büyütme, (b) 5000x büyütme.....	74
Şekil 4.14. hBN katkılı yapıştırıcılı termoset kompozitlerin SEM görüntüleri (a) cam elyaf takviyeli termoset, (b) karbon elyaf takviyeli termoset.....	75

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1.1. Elyaf ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri (Çakır, vd., 2018)	8
Tablo 2.1. Elyaf takviye epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri (Okkalıoğlu, vd., 2014) ..	21
Tablo 2.2. Bor mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Tayyip, vd., 2017)	41
Tablo 2.3. Hegzagonal bor nitrürün (hBN) fiziksel ve kimyasal özellikleri (Öz, 2016)	42
Tablo 3.1. LT450E10A kodlu cam elyaf kumaş özellikleri	45
Tablo 3.2. Karbon elyaf kumaş özellikleri	46
Tablo 3.3. Duratek DTE 1200 epoksi reçine ve DTS 1151 sertleştirici özellikleri	47
Tablo 3.4. Araldite 2011 marka yapıştırıcı özellikleri	49
Tablo 3.5. Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozu teknik özellikleri	50
Tablo 3.6. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin fiziksel özellikleri	54
Tablo 3.7. Ultrasonik homojenizasyon cihazında uygulanan parametreler	59
Tablo 3.8. Numunelerin özelliklerinin açıklaması	61
Tablo 4.1. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonuçları	66

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Kompozit malzemeler en kısa ve yalın tanımıyla bilinen iki yada daha fazla, farklı veya aynı malzemenin arzu edilen özelliklerde farklı yöntemler ile bir araya getirilerek oluşturulan yapılar kompozit malzemeler olarak tanımlanabilir. Kompozit malzemeler genellikle en basit tabiriyle takviye ve matriksler denilen iki fazdan oluşmaktadır.

Kompozit malzemelere bir çok sınıflandırma yapılabilir. Bu sınıflandırmalar genellikle takviye elemanına göre, matriks elemanına göre ve malzeme yapısına göre sınıflandırılabilirler. Bu tez çalışmasında matriks malzemesine göre sınıflandırsak termoset matriksli kompozitler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Havacılık uygulamalarında da termoset kompozitler sıklıkla kullanılmaktadır. Termoset kompozitler yüksek sıcaklık dayanımı, iyi korozyon direnci, yüksek rijitlik, yüksek mukavemet dayanımı ve iyi kimyasal uyum gibi özellikleri sebebiyle tercih edilirler. Bazı elyaf ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 1.1’de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Elyaf ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri (Çakır, vd., 2018)

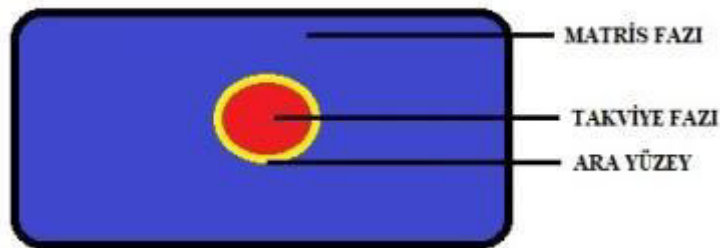
ÖZELLİK	ELYAF			MATRİS
	CAM	BORON	KARBON	EPOKSİ
Elastik Modül (uzunlamasına) GPa	7,7	42,2	35,2	0,35
Elastik Modül (çapraz) GPa	7,7	42,2	1,0	0,35
Kayma Modülü, GPa	2,8	17,6	2,8	0,14
Poisson Oranı	0,2	0,2	0,2	0,4
Mukavemet, MPa	351	313	211	3,5
Şekil Değiştirme Oranı, %	4,5	0,7	0,6	10
Yoğunluk g/cm ³	2,3	2,7	1,66	1,1

Kompozit malzemeler günümüzde havacılık, otomotiv, sağlık, uzay ve savunma sanayisi başta olmak üzere bir çok endüstride ve alanda kullanılmaktadır. Kompozit

malzemelerin günümüzde girmedığı alana rastlamak neredeyse mümkün değildir. Kompozit malzemelerin diğer malzemelere kıyasla; üstün özellikte, farklı özellikte, değişken özellikte ve istenilen özellikte olmaları kompozit malzemeleri ön plana çıkartan durumlar olmuştur. Kompozit malzemeleri bu kadar önemli kılan durumlar göz önüne alındığı zaman kompozit malzemelerin geleneksel ve diğer malzemelerden öne çıkan durumları daha iyi anlaşılacaktır. Geleneksel malzemelerin ihtiyaçları karşılayamadığı ve istenilen özelliklere karşı cevap veremediği durumlarda kompozit malzemeler imdada yetişmiştir. Bu gibi sebeplerden ve durumlardan ötürü kompozit malzemeler hayatımızın her alanına girmek durumunda kalmıştır.

Havacılık uygulamalarında farklı tasarımlardaki malzemeler, geniş yüzeyli malzemelerin üretilmesi, girintili ve karmaşık malzemelerin üretilmesi gibi durumlar kompozit malzemelerin birleştirilmesi konusunun ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Kompozit malzemelerde genel itibariyle uygulanan kuvvet ve yüklerde ortaya çıkan bozulmaların genel sebebi delemantasyon denilen kompozit plakaların katlarının birbirinden ayrılması sorunudur. Bu sebeble kompozit plakalarda ortaya çıkacak bozulmaları en aza indirebilmek için kat bozulmalarına ve kat ayrılmasına önlem alınabilmesi için mukavemetli kompozitler üretilmelidir. Kat ayrılma sorunları için mukavemetli kompozitler üretebilmek için kompozit plakaların ana yapısı olan lifler ve sıvı yüzey arasındaki ara yüzey bağını mukavemetli olacak bir şekilde tasarlamak gerekmektedir. Üretimi yapılacak olan kompozit plakaların bu ara yüzeylerini dayanıklı yapabilmek için kompozit malzemeler üretilirken çeşitli tasarımlar, katkılar ve düzenlemeler yapmak gerekmektedir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin genelyapısı(Kaya,2016)

Üretilcek kompozit malzemelerde ara yüzey bağının kuvvetini artırmak için kompozit malzemeler üretilirken hegzaonal bor nitrür (hBN) olan bor nano parçacıkları üretime dahil edilmiştir. Hegzaonal bor nitrür (hBN) nano parçacıkları kompozit malzemelerin ara yüzey bağını geliştirerek daha mukavemetli kompozit plakalar üretilmesine olanak sağlamıştır.

Kompozit malzemelerin üretimi kadar kompozit malzemelerin birleştirilmesi, kaynaklanabilmesi ve montajlanabilmeside günümüzde çok önemli bir yere sahiptir. Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinin geliştirilmeside bu yönde aynı derece önem ve ehemmiyete sahiptir. Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi için kompozit malzemelerin üretim yöntemlerin geliştirilmesi, kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve kompozit malzemelerin tasarımlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerini geliştirirken kompozit malzemelere katkı, takviye, fonksiyonnelleştirme ve tasarım değişiklikleri gibi parametrelerin de iyileştirilmesi ve düzenlenmesi gibi sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Kompozit malzemelerin birleştirilme yöntemlerini genel olarak üçe ayrabiliriz. Bunlar mekanik bağlantılılar ile birleştirme, kaynak ile birleştirme ve yapıştırma ile birleştirmedir. Bu çalışmada kompozitlerin yapıştırılarak birleştirilmesinin geliştirilmesi üzerine durulmuştur.

Bu çalışmanın amacı; havacılık uygulamalarında kullanılan epoksi matrisli cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozitlerin birleştirme yöntemlerinden olan, yapıştırmalı birleştirmesine katkılanan hegzaonal bor nitrür nano parçacıklarının kompozitlerin birleştirilmesine yaptığı mekanik sonuçların geliştirilmesi ve incelenmesidir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Yapılan bu tez çalışmanın gerekçesi havacılık uygulamalarında kullanılan kompozit malzemelerinin bor katkılı birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesini ve kaynaklardaki eksikliğe katkı sağlamaktır. Günümüzde hem havacılık alanında hemde diğer alanlarda kompozit malzemelerin ve birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi büyük öneme sahiptir.

Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerindeki geliştirilmede ülkemizde de bir çok çalışma yapılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi olan yapıştırmalı

birleştirilmelere yapılan katkılardır. Kompozit malzemelere yapılan bu katkılardan bir tanesinde mükemmel ve farklı özelliklere sahip olan bor mineralidir. Bu çalışmanın amacı da bor katkısının termoset kompozitlerin birleştirme yöntemlerinden birisi olan yapıştırımlı birleştirme yönteminin mekanik özelliklerine yaptığı gelişimleri ve değişimleri incelemektir.

Bu çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılan termoset kompozit malzemelerinin bor katkısının birleştirme yöntemlerinden olan yapıştırımlı birleştirilmesine olan etkileri araştırılmıştır.

Araştırmalar sırasında izlenen yol haritası;

- Karbon elyaf takviyeli ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli termoset kompozit malzemelerin Vakum infüzyon yöntemi ile üretilmesi,
- Üretilen kompozit malzemelerden ASTM D5868-01 standartlarına uygun olarak numunelerin kesilmesi,
- Hazırlanan numuneleri yapıştırmak için hegzagonal bor nitrid (hBN) nano parçacık katkı yapıştırıcı solüsyonun hazırlanması,
- Hazırlanan yapıştırıcı solüsyon ile numunelerin ASTM D5868-01 standartlarına uygun olacak şekilde birleştirilmeleri,
- Birleştirilen numunelere tek bindirmeli çekme testleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop (SEM) testlerinin yapılması,
- Testleri yapılan numunelerden çıkan sonuçlara göre çıkarımların yapılması ve bulguların analiz edilmesidir.

1.3. Literatür Araştırması

Kompozit malzemelerinin birleştirilmesi havacılık alanında 1940 yıllarından itibaren zamanımıza kadar yüksek mukavemetli ve ağırlığı düşük malzemelerde önemli gelişmelere neden olmuştur (Tombilin, 2001). Kompozit malzemelerde meydana gelen bu gelişmeler de birleştirme yöntemlerinin gelişmesini, etkili ve emniyetli ilerlemesini sağlamıştır. Bu nedenle geleneksel mekanik birleştirme tekniklerinden uzaklaşılmasını meydana getirmiştir (Van, 1996). Kompozit malzemelerin ve farklı plastiklerin birleştirme yöntemlerinde yapıştırıcıların kullanımı fazlasıyla artış göstermiştir (Vinson, 1986).

Yapıştırma yöntemlerinin havacılık, uzay, otomotiv vb. sektörlerinde çok fazla kullanılmasından ötürü yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesine, güvenilirliğine ve üretilebilirliğe olan ihtiyaç araştırmacıları bu yönde teşvik etmiştir (Edwards, 1998).

Yapıştırılması planlanan malzemenin yüzeyinde herhangi bir pislik, kirlenici unsur, yağ ve pas kalıntılarının temizlenmesi ve arındırılması önemlidir (Temiz, 2003). Yapıştırılan yüzeyin, seçilen yapıştırıcıya göre en iyileştirilmesi ve duruma göre tasarlanması gerekmektedir (Loctite, 1998). Yapıştırıcı yüzeyinin hazırlanması en önemli aşamalardandır. Yüzey oluşturma'nın amacı malzeme ile yapıştırıcının en iyi bir şekilde temas etmesini sağlamaktır (Aydın, 2003).

Termoset ve termoplastik gibi kompozit malzemelerin mekanik birleştirme yöntemlerinde delme, vidalama, perçinleme vb. işlemler sonucunda ortaya çıkan katmanların ayrılması (delaminasyon) sorununa sebep oldukları ayrıca korozyona ve bozulmalara neden oldukları da görülmüştür (Demircan, vd., 2019).

Mekanik ve yapıştırımlı birleştirme çeşitlerinin de birbirlerine göre üstünlük ve düşüklükleri vardır. Mühim olan yapılan işe ve malzemeye göre birleştirme yönteminin seçilmesi ve en iyi yapışmanın gerçekleşmesini sağlamaktır. Mekanik birleştirmeli bağlantılarda malzemelerde gerilme bozulmaları meydana gelmektedir.

Yapıştırımlı birleştirmelerin diğer birleştirme yöntemlerine nazaran üstün yönleri vardır. Bunlardan birkaçından bahsedecek olursak (Elaldı, 2012):

- Polimerler, seramikler, kompozitler ve metaller kolaylıkla birleştirilebilir,
- Birleştirme bölgelerinde gerilme bozulmaları daha düzgün oluşur,
- Kolay ve verimli bir yöntemdir,
- Yüzey özellikleri daha düzgün ve rijit olabilir,
- Yapıları gerçeği sıvı geçirmezlik sağlarlar ve sıvı geçirmez aracı yerine kullanılırlar,
- Karmaşık bağlantılar ve şekiller rahatlıkla birleştirilebilir,
- Oksitlenmeye karşı dirençlidir,
- Malzemenin ağırlığına ek fazla yük sağlamaz,
- Birleştirilmede fazladan enerji ve işçilik kaybı azdır,
- Uygulanabilirliği kolaydır,
- Sönümleme ve esneme kabiliyetleri mevcuttur,

- Diğer yöntemlere göre daha ucuz bir birleştirme yöntemidir.

Yapıştırırmalı birleştirmelerde ilk araştırma çalışmalarını, 1938 senesinde Volkersen aracılığı ile yapılmıştır. Volkersen'in oluşturduğu araştırmalarda, tek bindirme bağlantısında yapıştırıcı yüzeyindeli gerilme bozulmaları çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda gerilme bozulmalarının en yüksek olduğu bölge bindirme bağlantısındaki her iki ucunda olduğunu belirtmiştir (Volkersen, 1938).

Kompozit malzemelerde yama ile yapılan tadilatlar da ilerlemeli hasar analizi çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda farklı parametreler kullanılarak bozulmaya uğramış kompozit malzemenin tadilatları gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda yama ile birleştirilen numunelerde dört temel yüksek gerilme çeşiti ve üç temel hasar çeşiti görülmüştür. Çift yüzeyli birleştirmelerde çok az olarak soyulmanın ortaya çıktığı ile farklı yama tadilatların ara sıra benzer mukavemet göstereceği ancak ayrılma çeşitlerinin birbirinden farklı gerçekleşeceği anlatılmıştır (Turan, vd., 2010).

Metalik bir plakada meydana gelen bir bozulma, yapıştırıcı ve yama uygulanarak tadilatı yapılmış malzemenin çekme testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda soyulma bozulması yapışma yüzeyini eksilteceği için bu işlemin tadilatta önemli olduğu vurgulanmıştır (Papanikos, et al., 2007).

Anizotropik malzemelerin yapıştırırmalı birleştirmelerinde gerilme bozulmaları test edilmiştir. Yapılan testlerde en yüksek değerler malzemenin en uç bölgelerinde meydana gelmiştir (Wah, 1973).

Kompozit malzemeler çeşitli mekanik bağlantılar kullanılarak birleştirilebilir. Yapılan bu birleştirmelerde uygulanan birleştirme yönteminin özelliğine göre verimlilikler farklılık gösterebilmektedir. Yapıştırırmalı birleştirmelerde diğer mekanik birleştirme yöntemlerine göre çok daha iyi kuvvet transferi gerçekleştirilmektedir (Mazumdar, et al., 1998).

Epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit malzemelerde yorulma dayanımları ve statik kopma yükleri araştırılmıştır. Bu araştırmaya göre yapıştırıcı kalınlığı kadar yapıştırma alanının da sonuçlarda etkili olduğu vurgulanmıştır (Mazumdar, vd., 1998).

Yapıştırırmalı birleştirmelerin analiz yöntemlerinde genel olarak kullanılan analitik yöntemler yerine sayısal modellemeli sonlu elemanlar yöntemlerinde kullanılacağı kanısına varılmıştır (Adams, et al., 1984).

Karbon elyaf takviyeli termoset kompozitlerin yama yapılarak ve yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan tamiratların çekme dayanımı mekanizması çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada sonlu elemanlar metodu (FEM) ile modellerin yapılmıştır. Çekme dayanımında numunelere kuvvet uygulanmıştır. Değişik parametrelerde uygulanan tamiratlara da çekme dayanımları araştırılmıştır (Xiaoquan, et al., 2013).

ABD Ulaştırma Federal Havacılık İdaresi 2000 senesinde kompozit malzemelerde plakaların yapıştırılması sonuç raporunu, temel kaidelerini ve uygulanan yapıştırıcılara etki eden nedenler belirtmeye gayret gösterilmiştir (Yastımoğlu, vd., 2017)

Elyaf takviyeli örgülü kompozit malzemelerin delikli tabakalarında oluşan gerilme analizleri araştırılmıştır. Bu çalışmada sonlu elemanlar ile sayısal analiz yapılarak, delik boyut değişimleri tespit edilmiştir (Tse, et al., 2002).

Katmanlı kompozit malzemelerin havacılık uygulamalarına elverişli olup olmadığı hasar analizleri ile araştırılmıştır (Jones, et al., 1995).

Katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozitlerin yapıştırma çekme gerilmeleri deneysel ve sayısal anlamda irdelenmiştir. Yapılan bu incelemeler sonucunda yapıştırılmış numunelerin % 90 oranında sağlam parçaya yaklaştığı açıklanmıştır (Cheng, et al., 2011).

Karbon elyaf takviyeli katmanlı kompozitlerde değişik geometrik şekillerde meydana gelen çekme gerilmelerinin bulunması araştırması sayısal olarak yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada yapıştırma bağlantı dayanımı çift tesirli bindirmede % 12 arttığı, tek tesirli bindirmede % 27 arttığı ortaya konulmuştur (Campilho, 2008).

Yapısal kompozitlerin geometrik bozukluklarını tamir edilmesi deneysel ve nümerik olarak çalışılmıştır (Madani, et al., 2010).

Yapıştırma ile birleştirilen kompozitlerin temel esasları ve uygulamaları tespit edilmiştir (Davis, et al., 1999).

Elyaf takviyeli katmanlı kompozitlere uygulanan çekme mukavemetleri ve dayanımları numunelerin boyutlarına göre irdelenmiştir (Wisnom, 1999).

Havacılık uygulamalarında kullanılan kalın katmanlı kompozit malzemelerin gömmeli yama ile yapıştırılmalarının mikro analizi araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada sert ve yumuşak yama tekniği kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda sert

yamanın yumuşak yamaya göre daha verimli olduğu savunulmuştur (Whittingham, et al., 2009).

Kızıl ötesi görüntüleme tekniği kullanılarak yapılan kompozit yamaların yapısal teknolojileri çalışması yapılmıştır. yapılmış olan bu çalışma katmanlı kompozit malzemelerin yama tadilatlarında kullanılan teknolojiler hakkında bilgi verilmiştir. Havacılık uygulamalarında kullanılan kanatlarda yapılan kızıl ötesi görüntüleme tekniğine göre bozulma ve hasarlar tespit edilmeye çalışılmıştır (Avdelidis, et al., 2003).

Kompozit malzemeler de meydana gelen hasarların tamiri için pratik çalışmalar yapılmıştır (Ahn, et al., 2011).

Havacılık uygulamalarında kullanılan araçlarda yapıştırıcı birleştirmelerde yapılan tamir şeklinin verimliliğe etkileri sayısal olarak çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmada meydana gelen süreksizlikler ile ilgili olarak hasar kriterleri ve gerilme yoğunluk faktörleri kullanılmıştır. Yapılan yapıştırma ve kompozit hakkında gerilme dağılım analizlerine bakılarak açıklama yapılabileceği anlatılmıştır (Rachid, et al., 2012).

Epoksi matrisli boron ve grafit katkılı kompozit malzemelere yapılan tek tesirli yapışma birleştirmelerinde ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır (Apalak, vd., 2006).

Yapıştırma birleştirmelerinde kürleşme basıncının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada basınç ve esnek özellikli yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit malzemelere tek tesirli bindirme birleştirmelerinin yük kaldırma kapasitelerinin, kürleşme süresince basınç değişimi deneysel anlamda incelenerek nümerik olarak irdelenmiştir. Bu çalışmanın sonucu olarak esnek özellikli yapıştırıcıların kürleşme sırasında ortaya çıkan basınç artışının birleştirmede de artışa neden olduğu ve yapılan uygulamada serbest uçlarda bindirme gerilmelerinin artışına sebep olmuştur (Aydın, vd., 2007).

Havacılık alanlarında uygulanan yapıştırıcı birleştirmelerinde farklı yaklaşımlar ortaya konulmuştur (Baker, 2011).

Tek bindirmeli yapıştırma birleştirmelerinde elastik gerilmelerinin analiz çalışmaları yapılmıştır (Sayman, 2011).

Kompozit malzemelerin yapıştırırmalı birleştirmelerinde karbon elyaf takviyeli kompozitlere dıştan yapılan yama tamirlerinin basma mukavemetleri araştırılmıştır (Soutis, et al., 1999).

Karbon elyaf ve titanyum takviyeli polimerler kullanılarak yapıştırılmış civata birleştirmelerinde teorik araştırmaya katkı sağlamıştır. Yapıştırırmalı birleştirmeler basma mukavemetine karşı önemli bir üştünlük sağlamazken, yapıştırıcılı civata ie birleştirilen bağlantılar daha üştün mukavemet özellikleri sağlanmıştır. Çalışmada oda sıcaklığı altında ve uygun ortam şartlarında yapıştırıcının %98 yükü ilettiği anlaşılmıştır (Smith, 1982)

Kompozit malzemelerde bulunan takviye elemanlarının elyaf yönlenim açılarının yapışmaya ve mukavemete olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmada elyaf yönlenimi birleşme mukavemetini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir (Turan, 2016).

Yapıştırıcı ile birleştirilmış kompozit malzemelerin mekanik davranışları incelenmiştir. İncelenen bu çalışmada yapıştırma bağlantılarını bir çok parametrenin etkilediği ortaya koyulmuştur. Çalışmada farklı şekil ve boyutlarda deneysel çalışmaları yapılmıştır. Bu nedenle farklı şekilde ve uzunlukta, iki değişik yapıştırıcı kullanarak tek tesirli binndirmeli birleştirmelerde mekanik davranışları araştırılmıştır (Solmaz, 2008).

Katmanlı kompozit malzemelerde uygulanan yapıştırırmalı birleştirmelerde meydana gelen hasarlar araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda yapıştırılan numunelerde eksen kaçıklığı tespit edilmiştir. Eksen kaymalarına karşı cam elyaf numunelerin ucuna elyalar atılmıştır (Polat, 2008).

Cam elyaf takviyeli kompozitlerin alüminyum plakalar ile yapıştırılması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konusu araştırılmıştır. Araştırılan çalışmanın sonucunda yapıştırılan malzemenin yüzeyinin durumu ve yapıştırılan numunelerin özellikleri önemli bir yere sahiptir. Ayrıca bindirme mesafesi arttıkça mukavemetin arttığı ve farklı özellikteki yapıştırıcılarında mukavemetinin farklı olduğu ortaya koyulmuştur (Çakır, vd., 2016).

Havacılık uygulamalarında kullanılan kompozitlere bor nitrür nano parçacık katkısı ve yapısal yapıştırıcıların kayma dayanımları incelenmiştir. İncelenen bu çalışmada alüminyum-karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakalar tek taraflı

bindirme birleştirmelerinde farklı oranlarda nanoparçacık katkısı epoksi reçine içerisine katılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda nanoparçacıkların ısı bozulma sıcaklığını düşürdüğü ve ayrıca 0,5 bor nitrür (BNNPs) + 0,5 nano Ag hibrit nanoparçacıklı epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımlarını % 18 ve % 61 oranlarında artırdığı vurgulanmıştır (Ekrem, 2019).

Bor nitrür (BN) parçacıkları ile takviye edilmiş vinil ester matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi araştırılmıştır. Yapılan bu araştırma sonucunda kompozit numunelerin sertlik değerlerinde artış olduğu ve ayrıca aşınma dayanımının arttığı söylenmiştir. Kompozit numunelerde darbe mukavemetlerinin arttığı sonucuna varılmıştır (Boztoprak, vd., 2019).

Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının alümina matrisli kompozit malzemelere etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmalar sonucunda hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının kompozit numunelerin yoğunluğunu azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının yağlayıcı görev üstlendiğı sonucuna varılmıştır. Bor katkısının ilerleyen zamanlarda biyomedikal uygulamalarda artacağı düşüncesine yer verilmiştir (Göncü, vd., 2020).

Hegzagonal bor nitrürün (hBN) ısısal davranışları yapılan incelenmiştir. incelenen çalışmada bor nitrürün karbon yapısına benzemekte ancak benzer karbon allotropundan daha yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olduğu anlatılmıştır. Bor nitrürün polimerlere ve diğer endüstrilerde katkı malzemesi olarak kullanılabileceğinden bahsedilmektedir. Kristal boyutlarının birbirinden farklı olan bor nitrürlerin (BN) fiziksel özelliklerinde birbirinden farklı olacağı konusu açıklanmıştır (Öz, 2016).

Yapıştırırmalı birleştirmelerde yüzey özelliklerinin etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak yapıştırıcıların hata modunun sınıflandırması ve yapışma bağlantılarının bozulmasının nedeni olarak kohezyon, ara yüzey ve ana malzeme gösterilmiştir. Bu yüzden seçilecek yapıştırıcının yapıştırılan yüzeyin ve malzemenin iyi seçilmesi gerektiğı vurgulanmıştır (Gürsel, vd., 2021).

Bor nitrürün (BN) kaynak aparatların yüzeyine yapışmasını etkileyen davranışlar çalışılmıştır. Yapılan çalışmalara göre bor nitrürün (BN) kaynak aparatların yüzeylerinin temiz olması önemlidir. Bor nitrürün bu kaynak aparatların dış yüzeylerini temiz tuttuğundan bahsedilmektedir (Kalkan, 2016).

Yapılan bir çalışmada iki kompozit levhanın yapıştırılmalı tek bindirmeli yapıştırma testleri yapılarak hasar analizleri ANSYS yazılımı ile incelenmiştir. incelemelerin sonucu olarak yapışma alanının değişiminin hasar yüklerinin değişmesine neden olduğu anlaşılmıştır (Turan, vd., 2010).

Havacılık uygulamalarında bakım alanında katmanlı imalat teknolojilerin kullanımı araştırılmıştır. Araştırmalara göre metal malzemeler için katmanlı imalatın avantajlarından ve tasarım bakımından üstünlüklerinden söz edilmiştir. Metal matrisli kompozit malzemelerin havacılık alanındaki motor komponentlerinde de kullanıldığından bahsedilmiştir (Poyraz, 2018).

Cam fiber takviyeli polipropilen (pp) matrisli kompozitlerin ultrasonik kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Araştırmalara göre farklı geometrik şekillerde yapılan ultrasonik kaynakların dayanımının farklı olduğundan bahsedilmiştir (Uzun, vd., 2018).

Havacılık alanında kullanılan birleştirme yöntemleri araştırılmıştır. Araştırmalara göre havacılık uygulamalarında kullanılan birleştirme yöntemleri; kaynak, kaplama, lehim, perçin ve yapıştırma yöntemlerinden bahsedilmektedir (Baştekel, 2020).

Günümüzde; helikopter, uçak, roket ve uzay aracı gibi platformların bir çok yapısal parçası, motor ve gövde parçaları çözülebilir ve çözülemez bağlantılardan oluşmaktadır. Özellikle çözülemez bağlantılarının kullanıldığı alanlarda ve kısımlarda birleştirme yöntemi olarak yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Ancak büyük ölçüde kaynak, lehim, perçin ve mekanik bağlantılar kullanılmaktadır. Gün geçtikçe bağlantı verimliliğin arttığı, hafifliğin önem kazandığı ve mukavemetli birleştirme süreçlerin üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bizim için önemli olan yerli ve milli uçak, helikopter ve roket yapımlarının hızlandığı günlerimizde birleştirme tekniklerinin geliştirilmesi büyük öneme sahiptir (Baştekel, 2020).

Cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf/hacim oranlarındaki artışın mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. İncelenenlere göre kompozit malzemede cam elyaf takviyenin arttığında mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür. Ancak yapılan bu çalışma %60 cam elyaf oranına kadar yapılabildiği vurgulanmıştır (Çakır, vd., 2018).

Kompozit malzemelere paralel çift pim ve yapıştırılmış karma bağlantıların çekme gerilmesi altında etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalara göre mekanik bağlantılı olan yerlerde daha fazla çekme hasarlarının oluştuğu gözlenmiştir. Yapıştırılmalı bağlantıların daha dayanıklı olduğundan bahsedilmektedir (Alyanak, vd., 2015).

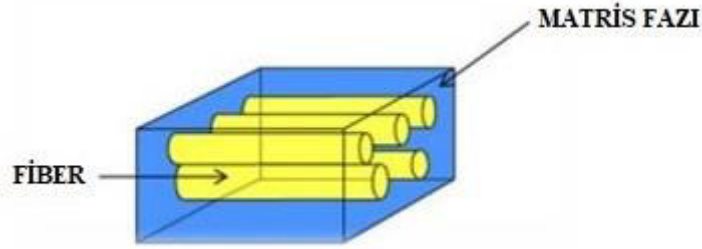
Termoset kompozitlerin yüzey özelliklerinin yapışmaya olan etkileri incelenmiştir. yapılan incelemelere göre termoset kompozitlerin yüzeyine yapılan mekanik aşındırmalar, zımparalamalar ve oyma işlemlerinde yapışmanın mekanik özelliklerini artırdığı söylenmiştir (Didim, 2014).

Kompozitlerin yapıştırılmalı ve kaynaklı bağlantıları nümerik ve deneysel olarak karşılaştırmalı bir şekilde irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kaynak bağlantılarını en çok etkileyen faktörün sıcaklık olduğu anlaşılmıştır. Kaynak mukavemetini etkileyen diğer bir faktörün ise kaynak mesafesi olduğundan bahsedilmektedir (Uçar, 2013).

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler en az iki yada daha çok sayıdaki malzemelerin farklı yöntemler ve teknikler kullanılarak makro boyutta birleştirilmesiyle ortaya çıkan malzemelerdir. Kompozit malzemeler genellikle matris ve takviye fazı denilen iki ayrı fazdan oluşmaktadır. Molekül boyutta ve atomsal boyutta birleştirilen malzemeler mikroskopik anlamda homojen olduklarından kompozit malzemeler olarak adlandırılmazlar. Örnek verecek olursak çelik malzemesinin içindeki demir ve karbon fazlarının birleşimi kompozit olarak değilde alaşım olarak adlandırılırlar. Bunun yanı sıra metal, seramik ve plastik gibi malzemelerin makro boyutta birleştirilmeleri kompozit malzeme olarak adlandırılırlar (Bitlisli, 2019).



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin matris ve elyaf fazı görüntüsü (Engin, vd., 2015)

Kompozit malzemelerde bulunan matris ve takviye fazlarından bahsedecek olursak, matris fazı kompozit malzemeyi bir arada tutucu, bağlayıcı ve birleştirici gibi görevleri mevcuttur. Takviye fazının ise kompozit malzemeye istenen duruma göre; mukavemet kazandırma, korozyon direnci, aşınma direnci, basma mukavemeti, esneklik, iletkenlik gibi bir çok görevi mevcuttur (Yastımoğlu, 2017).

Kompozit malzemeler kompoziti oluşturan takviye elemanı ve matris fazına göre kendisine özgü özellikler kazanabilirler. Bu nedenden ötürü havacılık, otomotiv, savunma sanayi ve sağlık gibi bir çok endüstride kompozit malzemelere ihtiyaç doğmaktadır. Kompozit malzemeler istenilen özelliklerin yanında ekonomiklik, işlenebilirlik ve üretilebilirlik gibi durumlarda da tercih etmeyi kolaylaştırır.

Kompozit malzemelerin bilinen bir kaç özelliğinden bahsedecek olursak;

- Mükemmel çekme dayanımı,
- Yüksek tokluk,

- Yüksek korozyon direnci,
- Yüksek sürtünme dayanımı,
- Yüksek ısı dayanımı,
- Yüksek basma dayanımı,
- Farklı ve güzel görünüş.

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre de avantajlarından bahsedecek olursak;

- Bazı kompozitlerin pahalı olması,
- Bazı üretim zorlukları,
- Geri dönüştürülemiyen kompozit malzemeler,
- Bazı işleme ve istenilen özellikleri sağlayamama zorluğu gibi özelliklerden söz edebiliriz.

Bazı elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri Tablo 2.1’gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Elyaf takviye epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri (Okkaloğlu, vd., 2014)

Malzeme	Özgöl ağırlık (gr/cm ³)	Çekme mukavemet (N/mm ²)
Cam lif – polyester	1,5 – 2,1	200 – 340
Karbon lif – epoksi	1,5 – 1,8	1860
Kevlar lif– epoksi	2,36	2240
Boron lif – epoksi	1,4	1240

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler günümüzde birçok yönden sınıflandırılmışlardır. Yapılan bu sınıflandırmalar genel anlamda; kullanılan uygulama alanına göre, takviye elemanına göre, matris elemanına göre, taşıdığı özelliğe göre veya yapısına göre gibi bir çok sınıflandırmalar yapılmıştır. bunlardan bahsedecek olursak;

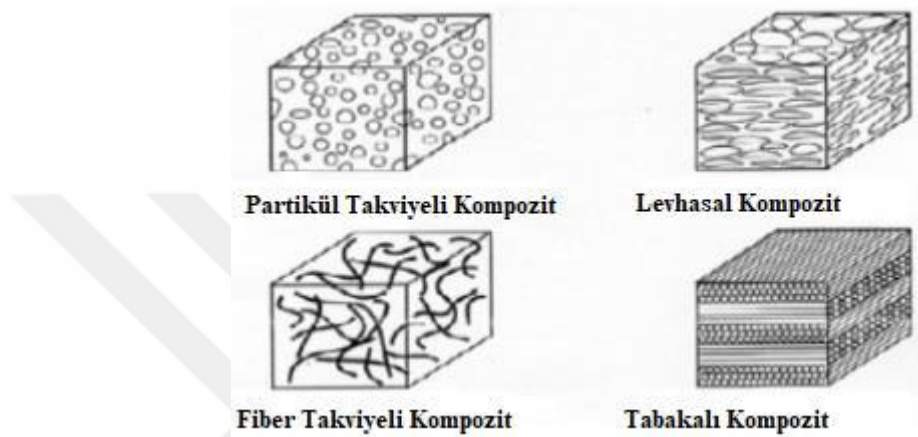
- Takviye elemanına göre,
- Matris elemanına göre,
- Yapısına göre gibi genelleyebiliriz.

2.2.1. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırma yapacak olursak;

- Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
- Yapısal takviyeli kompozit malzemeler,

Gibi genel sınıflandırma yapabiliriz.



Şekil 2.2. Takviyeli kompozitlerin sınıflandırılması (Karakter, 2016)

2.2.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık veya partikül takviyeli kompozitler genellikle tek ve iki boyutlu makro boyuttaki parçacıkların oluşturdukları kompozit malzeme çeşitidir. Parçacık olarak metal, alaşım, seramik ve polimer gibi malzemeler kullanılabilir. Parçacık boyutu üretilen kompozit malzemeye göre değişiklik göstermektedir.

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler takviye elemanının artışı ile birlikte kompozitin içerisindeki hatalar ve kusurlar artmaktadır. Üretilen kompozit malzemelerin dayanımı takviye elemanının yapı içerisinde homojen dağılmasına bağlıdır. Takviye elemanının tane boyutu ve şekilleride kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen diğer bir husustur. Kompoziti oluşturan bileşikler kompozit malzemenin özelliklerini belirlemektedir.

2.2.1.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler kendi aralarında sürekli, süreksiz, rastgele dağılmış ve parçacık şeklinde ayırmak mümkündür. Elyaf takviyeli kompozitler

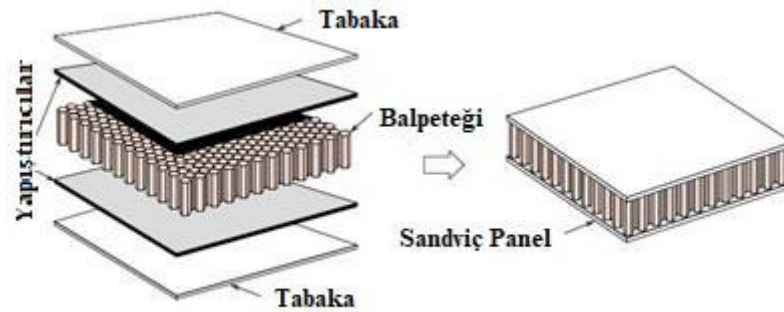
matrisin içerisindeki elyaf çeşitine ve özelliklerine göre farklı mekanik özellikler gösterebilmektedir. Elyaf lar matris malzemesinden aldıkları yükü taşımaktadırlar. Elyaf takviyeli kompozitler kumaş türü, örme şekilleri, elyaf çeşitleri vb. özelliklerinden ötürü çok değişik ve çeşitlilik bakımından özgündürler.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler matris malzemesi ile birlikte yumuşak, sert, dayanıklılık, süneklik ve tokluk gibi özellikler kazanabilirler. Elyaf takviyeli kompozitlerde matris ve elyaf takviyesinin birbiri ile uyumu ve özellikleri önem arz etmektedir.

2.2.1.3. Yapısal Kompozit Malzemeler

Yapısal veya tabakalı kompozitler olarakta adlandırılabilirler. Yapısal kompozitler istenilen özelliklere göre tabakalı, katmanlı veya petek örgü gibi istenilen şekil ve yapılarda bulunabilirler. Tabakalı kompozitler bir çok yöntem ve metod ile üretilebilirler. Yapısal kompozitler; elyaf, metal, seramik vb. yapı malzemeleri ile birlikte de oluşturulabilirler.

Litaratürde geçen sandviç panelli kompozitleride yapısal kompozit malzemeler sınıfına dahil edebiliriz. Sandviç panelli kompozit malzemeler farklı takviye ve matris elemanlarından oluşabilirler. Sandviç kompozit malzemeler tokluk bakımından üstün yönleri mevcuttur. Bu kompozitler; üretim yöntemine, takviye elemanına, yapı şekline ve matris malzemesine göre çeşitli farklılıklarda özellikler gösterebilmektedirler.



Şekil 2.3. Yapısal kompozitlerin genel görünümü (Ulus, vd., 2018)

2.2.2. Matris Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler matris elemanına göre dört ayrı gruba ayırabiliriz. Bunları metal, seramik, polimer ve karbon şeklinde sıralayabiliriz (Chung, 2010).

Kompozit malzemeleri matris elemanına göre sınıflandırmak istersek;

- Metal matrisli kompozit malzemeler,
- Seramik matrisli kompozit malzemeler,
- Plastik matrisli kompozit malzemeler,
- Karbon matrisli kompozit malzemeler,

Gibi genel sınıflandırma yapabiliriz.

2.2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler genel itibariyle matris malzemesi olarak metal yapılara takviye elemanı olarak seramik malzemeler kullanılırlar. Seramik ve metal malzemeye birleştirmede temel mantık üstün aşınma dayanımını elde etmektir. Bunun sebebi seramik malzemelerin yüksek aşınma mukavemetlerinin yanı sıra metal malzemelerin kolay şekillendirilebilmesi örnek verilebilir. Bu kompozitler günümüzde yaygın olarak savunma sanayi, uzay ve otomotiv sanayisinde sıklıkla kullanılırlar (Şahin, 2006).

2.2.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik matrisli kompozit malzemeler sert ve kırılgan malzemelerdir. Uzay ve savunma sanayi alanlarında sıklıkla kullanılırlar. Günümüzde yapılan çalışmalarda alüminyum oksit ve zirkonya katkılı seramik malzemeler biyomalze alanında da kullanılmaktadırlar (Bouslama, et al., 2009).

2.2.2.3. Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler

Plastik veya polimer matrisli malzemeler olarakta bilinmektedirler. Bu kompozitler genelde üç gruba ayrılabilirler;

- Termoset kompozit malzemeler,
- Termoplastik kompozit malzemeler,
- Elastomer kompozit malzemelerdir.

Plastik kompozit malzemeler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Havacılık uygulamalarında; hafiflik, üretilebilirlik, dayanım ve maliyet bakımından üstün yönleri mevcuttur.

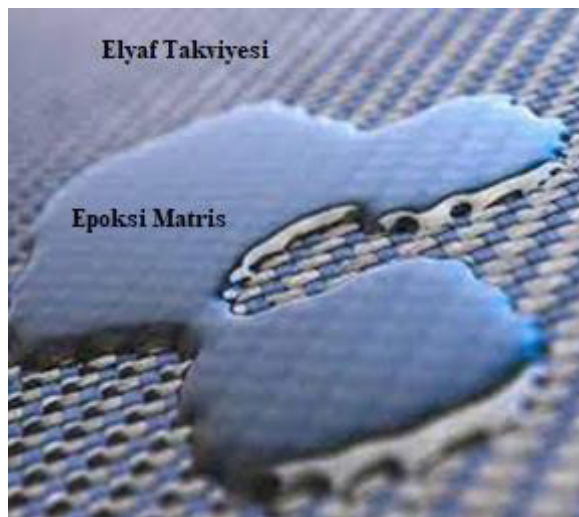
Plastik matrisli kompozit malzemeleri diğer kompozitlerden kıyasla üretilebilirliği bakımından üstünlükleri vardır. Üretiminde genellikle düşük sıcaklıklar

istese de, epoksi ve fenolik reçinelerde 200 °C iken, poli amid(PA), poli eter sülfon (PES), poli eter eter keton (PEEK), poli propilen sülfür (PPS) gibi termoset ve termoplastik malzemeler için 300 °C – 400 °C sıcaklıklara çıkabilmektedir (Chung, 2010).

2.2.2.3.1. Termosetler

Termoset matrisli kompozit malzemelerde matris olarak kullanılan malzemelerdendir. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar. Bu malzemelerin ısıtılmasıyla meydana gelen kimyasal tepkimeler sonucunda sertleşirler ve sağlamlaşırlar.

Termoset malzemelerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklıdır. Bu polimerlerin polimerizasyon süreci genellikle geri dönüşümü zor olan süreç olarak ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıklarda dahi bu malzemeler yumuşamazlar. Termoset matrisli kompozit malzemeleri, sertleşmemeleri için soğutulurlar ve termosetler bu usûlde korunurlar. Soğutucudan çıkartılıp oda sıcaklığında bir süre (1-4 hafta) bekletildiğinde sertleşme sürecine girerler ve eski özelliklerini kaybederler. Bu durumda, bu çeşit kompozit malzemelere şekil verilmesi güç olur ve geri dönüşümü olarak değerlendirilemezler. Genel olarak soğutucu içinde olmak şartıyla son kullanma süreleri 6-18 ay arasında değişmektedir. Termoset matrisli reçineler kimyasal özelliklerini çevre koşullarına rağmen korurlar ve zor hava şartlarında uzun süreli özelliğini kaybetmemektedirler (Bingöl, vd., 2016).



Şekil 2.4. Termoset matrisli kompozit reçineler (Didim, 2014)

2.2.2.3.2. Termoplastikler

Termoplastik polimerlerin çeşitleri çok fazla olmasına rağmen matriks olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler, düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ve ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matriks olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme işlemi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı, güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Termoplastikler oda sıcaklıklarında katı durumda bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma mukavemeti özellikleri gösterirler.

Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matriks olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni, üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termosetlere kıyasla termoplastiklerin hammaddesi daha pahalıdır (Demir, vd., 2019).



Şekil 2.5. Termoplastik malzemelerin görüntüsü (Karagöz, vd., 2016)

2.2.2.3.3. Elastomerler

Elastomerler, termoset polimer malzemeler gibi çapraz bağlı olan zincirli moleküllerden oluşurlar. Elastomerler çok düşük kuvvetlere maruz kaldıklarında yüksek elastik deformasyon yapma kabiliyeti olan polimer esaslı malzemelerdir. Çok

tanıdık olan elastomerler ise kauçuklardır. Kauçuklar ise iki gruba ayrılabilir. Bunlar doğal ve sentetik kauçuk şeklinde adlandırılabilirler.

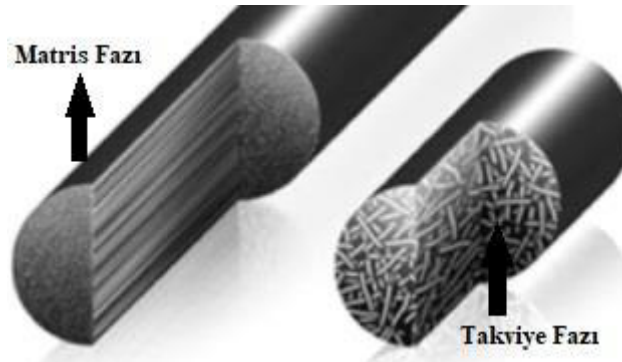


Şekil 2.6. Elastomer malzemeye bir örnek (Mayıs, vd., 2020)

2.2.2.4. Karbon Matrisli Kompozit Malzemeler

Karbon matrisli kompozitler karbon matrisin içerisine karbon elyaf ve kumaş gibi yapıların takviyesiyle üretilmektedirler. Genellikle sıvı fazın katı faza katılması ile uygulanmaktadırlar.

Karbon matrisli kompozitler genelde hava, uzay ve otomotiv sanayisinde yüksek termal, yüksek basınç ve yüksek sürtünme direnci gibi gereksimlerden ötürü kullanılırlar. Karbon matrisli kompozitler günümüzde de gelişimlerini sürdürmektedirler. Buna örnek verecek olursak askeri ve sivil uçaklarda, hipersonik sistemlerde ve uzay projeleri gibi çeşitli analarda kullanım imkanı bulmuştur.



Şekil 2.7. Karbon matrisli kompozit malzemelerin yapısı (Şenel, vd., 2015)

2.2.3. Yapısal Kompozit Malzemeler

Yapısal kompozit malzemeler günümüzde ilerleyen ve gelişen teknolojiler ışığında sürekli gelişmekte ve değişime uğramaktadır. Bu kompozitler günümüzde uzay teknolojileri, havacılık uygulamaları, savunma sanayisi ve sağlık endüstrisi gibi önemli ve değişik alanlarda kullanılmaktadırlar.

Kompozit malzemeleri yapılarına göre sınıflandırmak istersek;

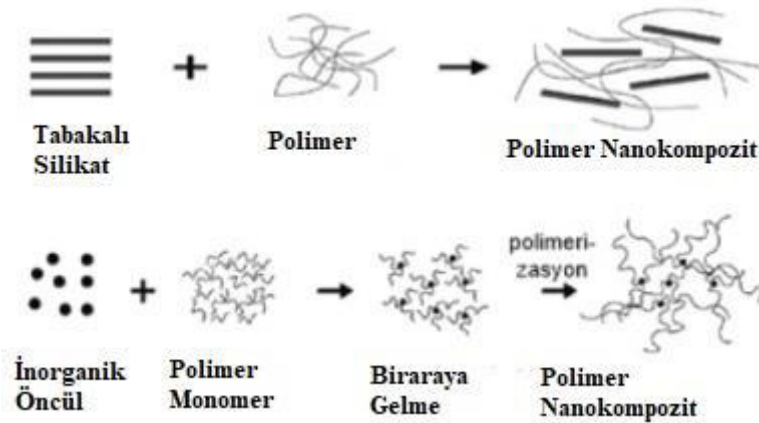
- Nanokompozit malzemeler,
- Katkılı kompozit malzemeler,
- İleri kompozit malzemeler,

Gibi genel bir sınıflandırma yapabiliriz.

2.2.3.1. Nanokompozit Malzemeler

Nanokompozit malzemeler makro ölçekteki özelliklerinden farklı olarak mikro, moleküler ve makromoleküler olarak incelenmektedirler. Nanokompozitler nanometre (nm) adı verilen ölçü birimleri ile ölçeklendirip tanımlanabilirler. Nanokompozit malzemeler katkı malzemesi olarak kullanıldıklarında nano ölçekte yüzey alanları ve özellikleri artacağı için kompozit malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkileyip artıracaklardır. Nanomalzemelerin yüzey alanı/hacim oranı (S/V) makro malzemelere kıyasla oldukça yüksektir.

Nanokompozit malzemelerin nanokompozit grubuna girebilmesi için takviye elemanının en az bir yüzeyinin 100 nm veya daha küçük boyutlarda olması gerekmektedir.



Şekil 2.8. Nanokompozit malzemelerin oluşumu (Erdem, vd., 2015)

2.2.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin günümüzde geliştirilmiş birçok üretim yöntemi mevcuttur. Kompozit malzemelerde yöntemler; üretilecek kompozitin yapısına, maliyetine, işlenebilirliğine ve istenilen özelliğe göre üretim yöntemlerinde farklılık göstermektedir.

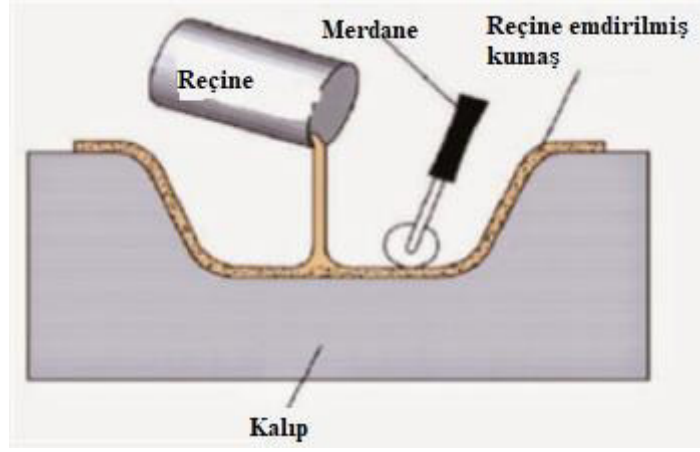
Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri kompozit malzemelerin sınıflandırmasında da olduğu gibi farklılıklar ve özel üretim yöntemleri mevcuttur.

2.2.4.1. Elyaf Yatırma Yöntemi

Elyaf yatırma yöntemiyle kompozit üretimde düşük ve orta hacimli yapılardır. Kompozit plakalar, gemi, kayık, kaporta, eşyalar gibi yapılar bu yöntemle üretilmektedir. Elyaf yatırma yöntemi kolay ve uygulanabilir olması günümüzde de sıklıkla kullanılmaktadır.

Elyaf yatırma yönteminde kalıplar kullanılmaktadır. Elyaf yatırma yöntemi yapılırken ilk önce kalıptan parçanın kolay sökülebilmesi için kalıp yağlayıcılar ve ayırıcıları kullanılır. Daha sonra kalıp yüzeyine fırca gibi materyaller ile yüzeye reçine uygulaması yapılır. Reçine uygulaması yapıldıktan sonra yüzeye elyaf demetleri veya kumaş gibi yapılar yatırılır. Elyaf yatırma işlemi tamamlandıktan sonra yüzeye tekrardan yeteri miktarda reçine uygulaması yapılarak silindirik rölolar yardımı ile hava kabarcıkları ve düzensizlikler giderilir. İşlem bittikten sonra reçinenin özelliğine ve sertleşme süresine göre gerekli kürlenme işlemleri yapılarak bekletilir. Bu işlemlerde genellikle oda sıcaklığında sertleşen reçine ve epoksiler kullanılmaktadır.

Yapılan el yatırma yöntemi aşağıdaki resimde gösterilmiştir. Bu yöntem uygulaması ve yapısı gereği maliyeti ve uygulaması ucuz bir yöntemdir. Çünkü kullanılan malzemeler ve gereksinimlerin maliyetleri düşüktür. Bu yöntem genellikle model ve kalıp yöntemleri için kullanılırlar.



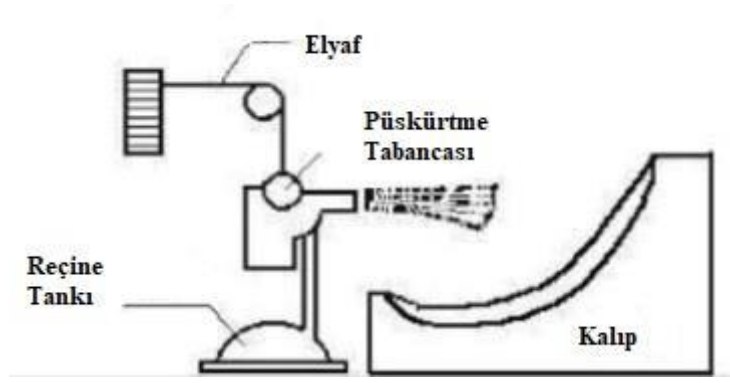
Şekil 2.9. Elyaf yatırma yöntemi (Bingöl, vd., 2016)

2.2.4.2. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemiyle kompozit malzeme üretimi el yatırma yöntemiyle benzerlik göstermektedir. Bu yöntemin el yatırma yöntemine göre avantajları; karmaşık şekilli yapıları yapmak daha kolay, uygulaması daha pratik ve üretimi daha hızlı yapmak mümkündür. Genellikle tanklar, depolar, kayıklar ve daha büyük karmaşık şekilli yapılar üretilmektedir.

Püskürtme yönteminde kırıcı ve püskürtme tabancaası arasında sürekli camelyaf demeti beslenmektedir. Bu araçta aynı anda elyafları kırarak kalıp üzerine reçineyi kataliz etmektedir. Bu durumdan ötürü tabakalı kompozitlerde süreksizleri giderebilmek için rölolar gibi el aletleri kullanılmaktadır. İstenen kalınlık elde edilene kadar reçine ve elyaf uygulaması sürdürülür.

Elyaf püskürtme yönteminde genellikle katılaşması oda sıcaklığında gerçekleşir. Malzemeyi kalıp yüzeyine püskürtmeden önce kalıp ayırıcıları ve yağlayıcıları elyaf yatırma yönteminde de olduğu gibi uygulaması yapılmaktadır. Bu yöntemin kullanılmasının sebepleri; kolay, taşınabilir aygıt, karmaşık parça imalatı ve ekonomiklik özellikleri ön plana çıkmaktadır.



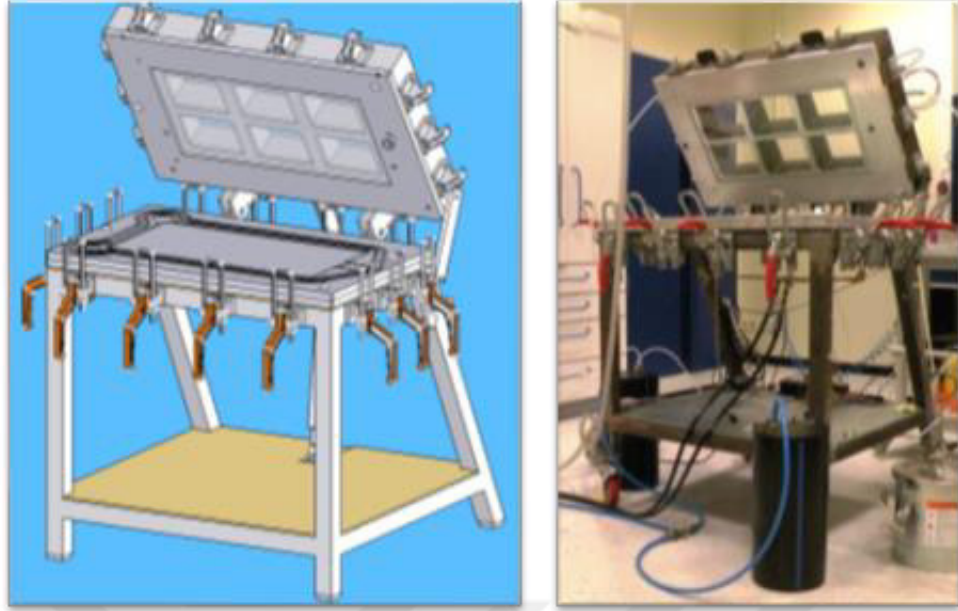
Şekil 2.10. Elyaf püskürtme yöntemi (Olgun, vd., 2018)

2.2.4.3. Reçine Transfer Yöntemi

Büyük hacim ve yüksek basınç altında karmaşık yapılı malzemelerin üretimi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde yüksek mukavemet elde etmek mümkündür. Karmaşık şekilli parçalar iyi yüzey kalitesi ve yüksek dayanım ile üretilebilmektedir. Genellikle termoset reçineler kullanılmaktadır. Bu yöntemde eş çalışan kalıplar kullanılarak hidrolik veya mekanik olarak çalışan sistemlerle kalıplama ve press işlemleri uygulanmaktadır. Reçine transfer yönteminde farklı uygulama ve metodlar kullanılabilmektedir. Sıcak veya soğuk şekillendirme kullanılmaktadır. Basma kalıplama yöntemiyle benzerlik göstermektedir.

Kompozit malzemeler için farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan biri, özellikle havacılık endüstrisindeki yüksek standartlara uygun kompozit parça üretimi sağlayan reçine transfer yöntemi (RTM) olarak bilinmektedir.

RTM yöntemi yüksek fiber hacim oranlı ve yüksek yüzey kalitesine sahip parçaların çok az bir ek işlem gerekecek şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır. Ek olarak, kapalı bir sistem içerisinde üretimin gerçekleştirildiği RTM yöntemi sayesinde insan kaynaklı üretim hataları azaltılmakta ve operatörün kimyasallarla teması en aza indirgenmektedir.

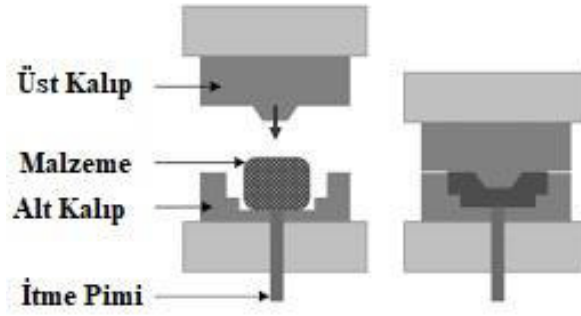


Şekil 2.11. Reçine transfer yöntemi (Demircan, vd., 2019)

2.2.4.4. Soğuk Presleme Yöntemi

Soğuk presleme yöntemiyle kompozit üretiminde genellikle düşük basınç, ucuz kalıplar ve oda sıcaklığında orta hacimli yapılarda kullanılırlar. Bu yöntemde cam elyaf ve karbon elyaflar termoset reçine içerisine kalıplar arasına yerleştirilerek üretim gerçekleştirilir. Elyaf yatırma yöntemiyle benzerlik göstermektedir. Elyaf yatırma yönteminden farklı olarak daha mukavemetli ve düzgün yüzeyli malzemeler üretmek mümkündür.

Soğuk presleme yönteminde kalıp olarak metal, seramik ve plastik kalıplar kullanabilmektedir. Kullanılan reçinelerde oda sıcaklığında sertleşen ve viskozitesi düşük olanlar tercih edilebilir. Yüksek kalıplama sıcaklık ve basınçları gerekmediği için kısmen uygun ve maliyeti düşük bir yöntemdir. Üretilen kompozit malzemenin yüzey kalitesi ve dayanımı yüksek seviyelerdedir. Soğuk presleme yöntemi Şekil 2.12’de görülmektedir.

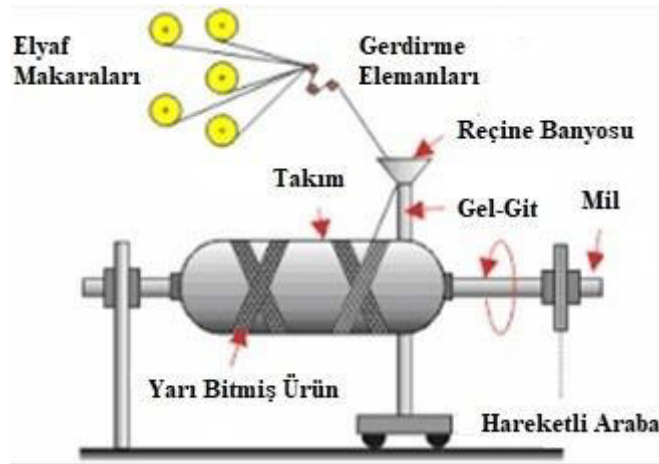


Şekil 2.12. Soğuk presleme yöntemi (Deniz, 2005)

2.2.4.5. Helisel Sarma Yöntemi

Helisel sarma yöntemi ile roketler, tanklar, uzun pervaneler, borular ve silindirik yapılar üretiminde kullanılmaktadır. Burada elyaflar önceden reçine emdirilerek mil veya istenilen kalıp yüzeyine belirli açılarda sarılarak uygulanır. Sarma işlemi sırasında elyaflara belirli kuvvet uygulanmaktadır. İstenilen kalınlığın ve yüzey formunun oluşması için ileri-geri helisel gibi sarma şekilleri uygulanarak üretim tamamlanır.

Helisel sarma yöntemide istenilen ve uygulaması yapılan parçaya ve şekile göre değişiklik göstermektedir. Bilgisayar kontrollü ve manuel kontrollü olmak üzere yapılan uygulamaları vardır. Karmaşık göeometrili malzemelerin üretimi kısmen maliyetli ve kontrolü zordur. Helisel sarma yöntemi Şekil 2.13'te görülmektedir.



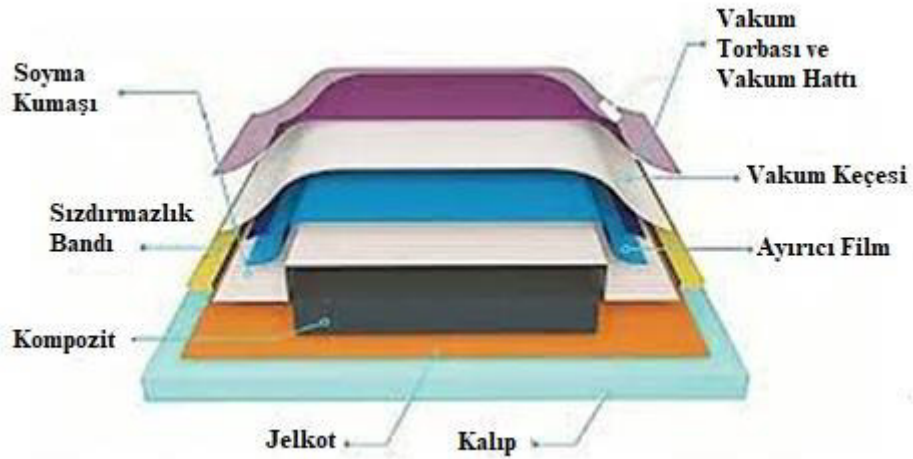
Şekil 2.13. Helisel sarma yöntemi (Deniz, 2005)

2.2.4.6. Tabakalı Birleştirme Yöntemi

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde de farklı yöntemler ve metodlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde sıcak presleme ve vakum torbalama gibi metodlar kullanılmaktadır. Bu yöntemde önceden reçine emdirilmiş elyaf (prepreg) kumaş ve yapılar kullanılabilir. Tabakayı istenilen hale getirebilmek için kalıba belirli sıcaklıklar uygulanmaktadır.

Tabakalı birleştirmede ısıtıcı kalıp, otoklav gibi birleştirme yöntemleri kullanılır. Kalıp içerisine tabaka şeklinde ve istenilen açılarda istiflenen elyaflar sistemdeki tüm havayı çekmek için vakum torba altına alınır. Bu sistemin içerisinde delikli yüzey tabaksı, reçine akış filesi, borular, sızdırmazlık bantları ve naylon örtüler kullanılır. Bu uygulamada reçine ısıtılır veya sisteme sıvı olarak dışarıdan entegre edilir. Bu yöntem literatürde vakum infüzyon yöntemiyle de bilinmektedir.

Tabakalı birleştirme yöntemi ekonomik olup vakum altında uygulama basıçlı torba ve kalıp arasında yapılmaktadır. Elyaf kumaş, hamur kalıplama ve kısa elyaflar gibi değişik uygulamalara da uygundur. Bu yöntemde oldukça karmaşık parçalar ve yapılar üretmek mümkündür. Bu yöntemle kullanılan reçine ve takviye elemanına göre değişiklik göstermektedir. Pratik ve uygulaması kısmen kolay bir yöntemdir. Tabakalı birleştirme yöntemlerinden olan vakum torbalama yöntemi Şekil 2.14'te görülmektedir.



Şekil 2.14. Vakum torbalama yöntemi (Baştekel, 2020)

2.2.4.7. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Termoset, termoplastik ve elastomer malzemeler enjeksiyon kalıp haznesine koyulur. Isıtılmış ve hazırlanmış içerisine yeterli miktarda polimerler enjekte edilir. Uygulanan basınç ve sıcaklık üretilecek malzemeye ve yapıya göre değişiklik göstermektedir.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi kısmen maliyetli bir yöntemdir. Makine ve teçhizat ihtiyacı vardır. Ama uygulama bakımından pratik ve hızlı bir yöntemdir. Seri üretimde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılan malzeme ve üretilen parça çeşiti itibariyle zengin bir üretim tekniğidir. Bu yöntemle bir çok kompozit, polimer ve metal alaşım malzemeler yüksek mukavemet ve iyi yüzey kalitesiyle üretmek mümkündür. Bir çok sektörde ve alanda kullanılan bir yöntemdir. Enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılan enjeksiyon makinesi Şekil 2.15'te görülmektedir.

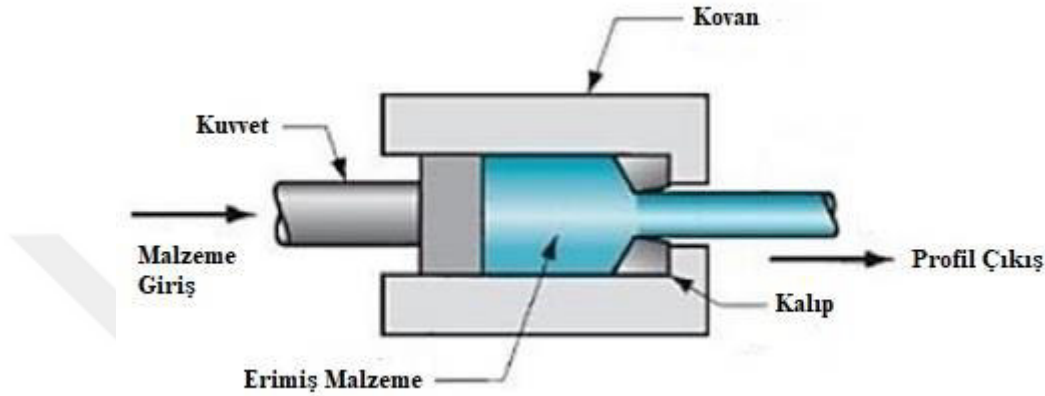


Şekil 2.15. Enjeksiyon makinesi

2.2.4.8. Profil Çekme Yöntemi

Profil çekme yöntemiyle % 75'e varan kompozit malzemeler üretmek mümkündür. Reçineye daldırılan elyaf demetleri önce bir kalıptan geçirilerek içindeki hava ve fazlalık reçine giderilir. Bu işlemden sonra ısıtılmış kalıptan geçmesi ile fırına transfer edilir. Bu işlemden sonra şekil verilen malzeme istenen son kalıptan geçirilerek kompozit malzeme üretilmiş olur. Bu yöntem pultrüzyon yöntemiyle benzerlik göstermektedir.

Kompozit malzemeyi oluşturan elemanlar iki kalıp arasında sıkıştırılarak sertleştirme işlemleri yapılır. Takviye elemanı olarak dokuma elyaf veya kırılmış elyaf kullanılabilir. Bu elyafları tamamen reçine emdirilmesi sağlanarak basınçla ısıtılır ve sertleşmesi sağlanmaktadır. Bu durumdan ötürü seçilen reçinelerin viskozitesi düşük olmalıdır. Bu yöntem ile yüksek kaliteli otoklav gövde plakaları üretmek mümkündür.



Şekil 2.16. Profil çekme yöntemi (Sarıbyık, vd., 2007)

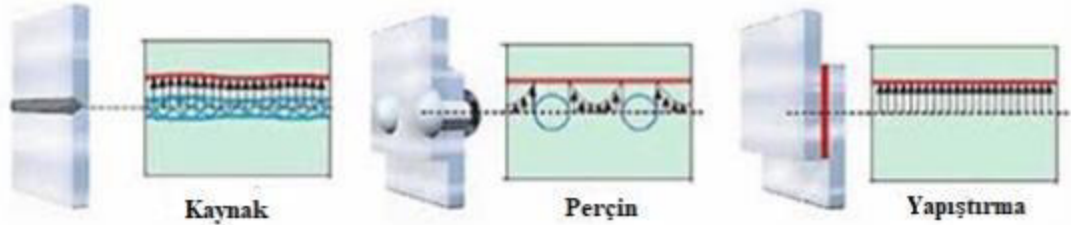
2.3. Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemleri

Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinde günümüzde bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemleri genel olarak ikiye ayırabiliriz. Bunlar;

- Yapıştırma yöntemiyle birleştirme,
- Mekanik bağlantılarla birleştirme,

Şeklinde kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerini genelleyerek gruplandırabiliriz.

Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemleri kullanılan malzemeye, uygulama alanına, istenilen özelliğe ve malzemenin yapısal şekillerine göre değişiklik göstermektedir. Birleştirme yöntemlerinin birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları vardır. Bu avantajlar ve dezavantajlar kullanılacak malzemeye ve uygulanacak sürece göre farklılıklar göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 2.17'deki resimde bazı birleştirme yöntemlerinin gerilmeleri gösterilmiştir.



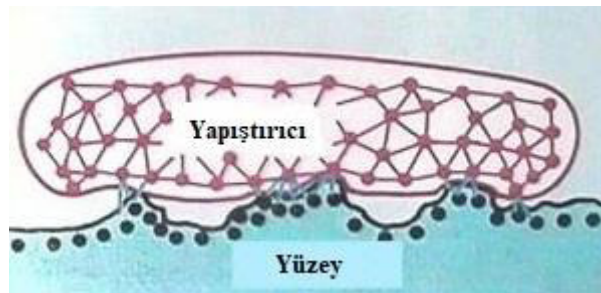
Şekil 2.17. Yapıştırıcı, perçin ve kaynaklı birleştirmelerin gerilmeleri (Loctite, 1998)

2.3.1. Yapıştırırmalı Birleştirme Yöntemi

Yapıştırırmalı birleştirmelerde yapıştırma bağlantısının kriterlerini belirlemek gerekmektedir. Bu durumda seçilecek yapıştırıcıların doğru ve uygun olarak seçilerek uygulanması lazım gelir. Seçilecek yapıştırıcıların kompozit malzemeye uygunluğu kimyasal yapısı ve dayanımları dikkate alınmalıdır.

Yapıştırırmalı birleştirmelerde iki parçayı birbirine yapıştırma görevi yapan ve ayrılamayan yapısal bağlantılardır. Parçalar arasında çok ince bir tabaka oluşturan yapıştırıcılar kimyasal reaksiyonların sonucunda makro moleküler oluşumlar ile sertleşirler.

Yapıştırıcılar gerek kendi iç dayanımı (kohezyon direnci) gerekse parça yüzeylerindeki yapışma dayanımları (adezyon direnci) ile dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlamaktadır. Yapıştırıcı ile yüzey arasındaki yapışma olayı Şekil 2.18’de görülmektedir.



Şekil 2.18. Yapıştırıcı ve yüzey arasındaki bağlantı yapısı (Okkaloğlu, vd., 2014)

Yapıştırırmalar genellikle ikiye ayrılabilir. Bunlar; tek bileşenli yapıştırıcılar ve iki bileşenli yapıştırıcılar olarak bahsedebiliriz.

Tek bileşenli yapıştırıcılar tüm bileşenleri yapıştırıcının içerisinde bulunmaktadır. Kimyasal yapılarına göre yüzeye yayılma sırasında su meydana gelmemesi için kuvvet uygulanmaktadır.

İki bileşenli yapıştırıcılar poliestерler, epoksiler veya poliüretanlar vb. yapılardan oluşurlar. Yapıştırmadan önce sertleştirici görevi yapan ikincil bileşenle karıştırma işlemine tabi tutulurlar. Sertleşme süresi sertleştiricinin yapısına ve yapıştırıcıya bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Yapıştırma işlemi yapılırken birkaç hususa dikkat etmek gerekmektedir. Bunlar;

- Yüzey temizliği,
- Yüzeylerin pürüzlülüğü ve yapısı,
- Yüzeylerin yıkanması veya kimyasal süreçlerin uygulanması,
- Yüzeylerin kurutulması veya arındırılması,
- Yapıştırıcıya gerekli kuvvet ve destek uygulanması,

Gibi işlemlere yapıştırmalı birleştirmelerde dikkat etmek gerekmektedir.

2.3.2. Mekanik Birleştirme Yöntemleri

Mekanik birleştirme yöntemlerinde çoğunlukla geleneksel yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan bahsedecek olursak civata, perçin ve geçmeli bağlantılar gibi yöntemlerden örnek verebiliriz.

Mekanik birleştirme yöntemlerini civata, vida, perçin ve kaynak olarak söyleyebiliriz. Bunlardan bazıları civata ve vida sökülebilen birleştirmelerdir. Ancak sökülemeyen perçin ve kaynak birleştirmelerdir. Kolay sökülme gerektiğinde civata kullanımı en iyi ve genellikle güvenilir bir yöntemdir. Ancak bazı durumlarda civatalar gevşeyebilir. Bunların güvenlikleri sebebiyle emniyete alınmaları gerekmektedir (Okkalıoğlu, vd., 2014).

Civata veya perçin gibi elemanlar kullanmak için delik açılması gerekir, bu da parçaların mukavemetini zayıflatır. Birleşim yük altına alındığında açılan deliklerin etrafında gerilme yoğunlaşmalarına ortaya çıkar. Bu durum erken malzeme deformasyonuna sebep olabilir. Bundan dolayı bu tür bağlantılarda kullanılmak istenen mukavemetin sağlanması için malzeme kalınlığını artırılması gerekir. Ayrıca, civata ve perçin bağlantıları korozyon tehlikesini de artırır. Bu nedenle sıklıkla karmaşık ve pahalı olan yalıtım kullanılır. Yüzey koruma işlemlerine gerek duyulur. Farklı metallerin birbirleriyle birleştirilmesi sırasında ise korozyon görülebilmektedir.

2.3.2.1. Kaynak Yöntemiyle Birleştirme

Kompozit malzemelerin bir diğer birleştirme yöntemlerinden olan kaynak ile birleştirmedir. Kaynak işle birleştirme yöntemlerinden bazıları; direnç kaynağı, ultrasonik kaynak, sürtünme kaynağı, radyo frekans kaynağı, sıcak eleman kaynağı, sıcak gaz kaynağı, lazer kaynağı, mikrodalga kaynağı ve ekstrüzyon kaynağıdır.

Direnç kaynağı iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda, basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak usulüdür. Malzemeden geçen elektrik akımının meydana getirdiği ısıнын dışında, herhangi bir ısı tatbik edilmemektedir.

Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinasındaki elektrodlar veya çeneler vasıtasıyla uygulanır. Şebeke akımının yüksek voltaj/düşük amperi, düşük voltaj/yüksek akım şekline bir trafo yardımıyla dönüştürülür.

Kaynak, kaynak edilecek malzemeleri belli bir basınçla sıkıştırıp, akımın malzemeye akmasını sağlayan elektrodlar yardımıyla yapılır. Akım bir elektrodta diğerine malzeme üzerinden geçerek akar. Bu elektrodlar, yüksek akımın geçişine izin veren, basınç altında yeterli fiziksel mukavemete sahip özel bakır alaşımlarıdır.

Termoplastik kompozitlerin direnç kaynağı ile ısıtılarak birleştirilmesi için karbon kumaş ve metalin kullanıldığı iki yaklaşım vardır.

Karbon kumaş kullanılması yönteminin avantajları, birleştirme sonrasında birleştirme bölgesinde hiçbir yabancı madde kalmaması ve termoplastik reçinenin, karbon fiberlere metalik bir malzemeden daha iyi yapışabilmesidir (Demir, vd., 2019).

Karbon fiberlerden elektriksel yalıtım sağlamak ve ilave matriks malzemesiyle boşlukları doldurulması için genellikle direnç ısıtıcının her iki tarafına ince polimer film tabakaları eklenir.

2.4. Bor Minerali

Bor mineralleri yapılarında farklı oranlarda bor oksit içeren doğal bileşiklerdir. Doğada 230'dan farklı bor minerali bulunmaktadır. Ticari açıdan en önemli bor mineralleri; Tinkal, Kolemanit, Kernit, Üleksit, Pandemit, Borasit, Szaybelit ve Hidroborasit'tir. Dünya Bor Lideri olan Eti Maden tarafından uluslararası kalite standartlarında yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülen başlıca bor mineralleri ise; Tinkal, Kolemanit ve Üleksit'tir.

Bor elementinin, atom numarası 5 ve kimyasal sembolü B'dir. Bor bir yarı metaldir. Bor minerali dünyada düşük miktarda bulunmaktadır. Doğada bulunan bileşikleri suda çözüldüklerinden ötürü belli yerlerde yoğun olarak bulunabilirler (Tayyip, vd., 2017).

Element olarak bor madenini doğada bulmak zordur. Endüstride yüksek saflıkta bor zorlukla elde edilebilir çünkü bor, karbon ve başka elementlerle bileşikler oluşturur. Borun çeşitli allotropları vardır. Amorf olan bor koyu kahverengi bir tozudur. Kristal bor siyah, son derece sert (Mohs sertlik değeri yaklaşık 9,3) ve oda sıcaklığında düşük iletkenidir. Bor elementi, yarı iletkenlerde kullanılır. Yüksek saflıkta element bor süperiletken teknolojisinin en önemli bileşenidir. Dünya'da en çok bor cevheri Türkiye'de bulunur (Ekrem, 2019).

Bor bileşiklerinin ana kullanım alanları, çamaşır tozunda beyazlatıcı olarak (sodyum perborat) ve ısı yalıtımında kullanılan cam elyafının boraks bileşeni olaraktır. Bor bileşiklerinin ayrıca, yüksek kuvvetli düşük ağırlıklı yapısal malzemelerde özelleşmiş rolleri vardır. Camlar ve seramiklerde onların ısı şokuna dayanıklı olması için kullanılır. Bor içeren reaktanlar organik bileşiklerin sentezinde kullanılırlar, ve bor içermeyen bazı ilaçların yapımında ara ürün olurlar (Töre, 2006).

Biyolojide boratlar memeli canlılara düşük düzeyde toksiktir (sofra tuzu kadar) ama eklem bacaklılarda çok daha etkilidirler. Bor içeren doğal bir antibiyotik bilinmektedir. Bitkilerde az miktarda bor hücre duvarının sertleşmesi için gereklidir, bu yüzden toprakta borun varlığı bitki büyümesi için gereklidir. Deneylerde borun hayvanlarda da eser seviyede dahi olsa gerekli bir element olduğu bulunmuştur, ama hayvan fizyolojisindeki rolü bilinmemektedir.

Bor minerali birçok alanda kullanılırlar. Özellikle boraks ve borik asit nükleer sanayide kullanılmaktadır. Jet ve roket yakıtı, sabun, deterjan, tekstil, boya, cam elyafı ve kağıt endüstrilerinde kullanılırlar. Ayrıca savunma sanayisinde, enerjetik malzeme olarak, optik ve seramik gibi çok geniş alanlarda da kullanılırlar.



Şekil 2.19. Bor minerali görüntüsü (Töre, 2006)

Tablo 2.2. Bor mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Tayyip, vd., 2017)

Periyodik Sırası	5
Atom Ağırlığı	10.82 g/mol
İzotopları	10B:% 19.57, 11B:%80.43
Kristal Yapısı	Tetragonal-Hegzagonal
Yoğunluğu	2,33-2,43 g/cm ³
Erime Noktası	2190 °C (-20 °C)
Sertliği	9,3 Mohs
Yapısı	Kristal-Amorf

2.4.1. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN)

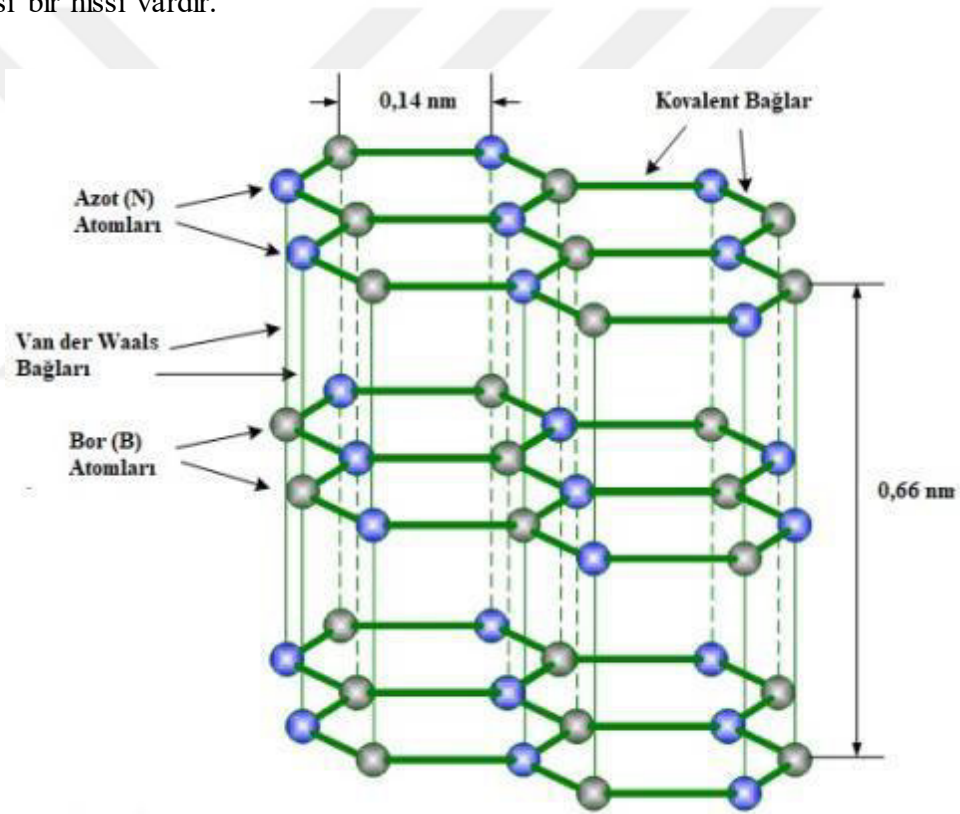
Hegzagonal bor nitrür (hBN) kimyasal kararlılık, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik ve yağlayıcılık özellikleriyle tanınan beyaz renkte toksit olmayan kaygan bir malzeme türüdür. Bor nitrür düşük reaktif, üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle pek çok alanda kullanılmaktadır. Elektriksel yalıtkanlık ve ısı iletkenlik özellikleri sebebiyle tercih edilmektedirler.

Bor nitrür, çok sayıda bor bileşiklerinden sentetik olarak üretilen ticari öneme sahip bir maddedir. İlk olarak 1842 yılında üretilmiştir (Şenel, vd., 2015). Eşit sayıda bor ve nitrojen atomundan oluşan bor nitrürün molekül formülü BN'dir. Bor ve

nitrojen atomları birbirine kovalent bağ ile bağlanmış olup, tabakalar arasında van der Waals kuvvetleri etkin bir moleküller arası etkileşim türüdür (Şekil 2.20).

BN aynı örgü yapıdaki karbon atomlarıyla izoelektroniktir ve bununla birlikte halkasal yapıdaki BN tabakalı yapı da içermektedir. Tabakalı yapı karbonun grafit allotropuna benzemektedir (Şekil 2.20) ve kristal birimini belirtilerek hegzagonal bor nitrür (hBN) grafitik bor nitrür olarak adlandırılmaktadır. Grafit fiziksel olarak siyah renkte olmasına rağmen hbn beyaz renklidir ve bu yüzden beyaz grafit olarak adlandırılmaktadır (Aydın, 2018).

hBN görünüm olarak alüminaya benzeyen, zehirsiz, kaygan bir malzemedir. Seramik malzemeler içinde en düşük yoğunluğa sahip bir bileşiktir dokunulduğunda ipeksi bir hissi vardır.



Şekil 2.20. Hegzagonal bor nitrürün (hBN) kimyasal bağ yapısı (Öz, 2016)

Hegzagonal bor nitrürün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.3’de gösterilmektedir.

Tablo 2.3. Hegzagonal bor nitrürün (hBN) fiziksel ve kimyasal özellikleri (Öz, 2016)

Yoğunluğu	2,27
-----------	------

Termal iletkenlik, 25 °C (W cm⁻¹ K⁻¹)	0,627 W cm ⁻¹ K ⁻¹ (a ve b ekseninde) 0,015 W cm ⁻¹ K ⁻¹ (c ekseninde)
Dielektrik Sabiti	4,2
Erime Sıcaklığı (°C)	2700
Latis Sabiti (Å)	a=b=2,504 c=6,661
Elektrik Direnci (Ω cm)	3,0 x 10 ⁷ (a ve b ekseninde) 3,0 x 10 ⁹ (c ekseninde)
B-N Arasındaki Mesafe (Å)	1,446
Oksitlenme Sıcaklığı (°C)	980

3. MATERYAL VE YÖNTEM

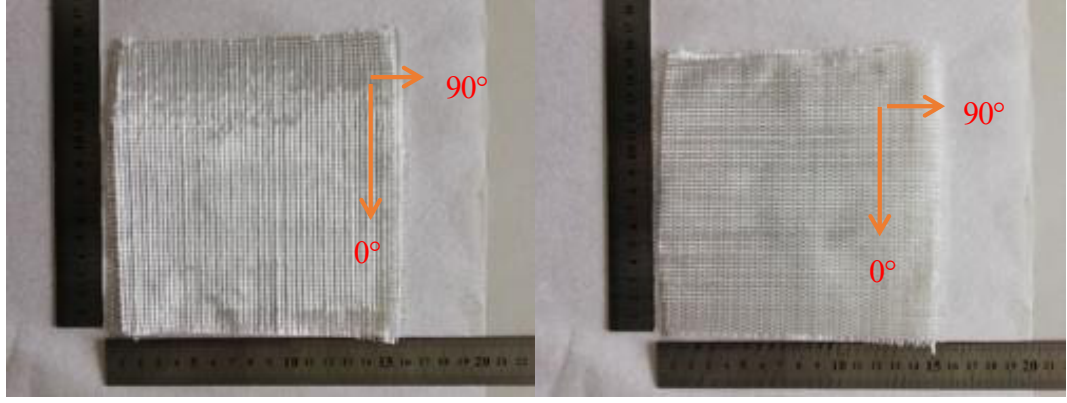
Bu çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılan termoset matrisli cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yapıştırıcı birleştirmesine bor katkısının incelenmesi ve geliştirilmesi çalışmaları yürütülmüştür.

Çalışmada ilk olarak cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset matrisli kompozit malzemelerin vakum infüzyon yöntemiyle üretilmesi ile başlanmıştır. Üretimi gerçekleşen termoset kompozitlerin ASTM D5868-01 standartlarına uygun bir şekilde sulu mekanik kesici ile kesilerek kompozit numuneler hazırlanmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra Araldite 2011 marka yapıştırıcıya hBN katkısı ağırlıkça; % 0, 1, 2, 3 şeklinde yapıştırıcı solüsyon hazırlanmıştır. Yapıştırıcı solüsyon hazırlanırken 50 ml litre plastik beher kaplar kullanılmıştır. Kullanılan beher kaplara 30 ml etanol çözeltisi ve 10 gram Araldite 2011 marka yapıştırıcının reçine kısmı koyularak 1 saat boyunca ultrasonik karıştırıcıda homojenizasyonu yapılmıştır. Ultrasonik karıştırıcıda homojenizasyonu tamamlanan solüsyonlar 24 saat süre ile bekletilerek etanol çözeltisi uzaklaştırılmıştır. Etanol çözeltisi uzaklaştırıldıktan sonra borlu yapıştırıcıya % 50 oranında sertleştirici ilavesi yapılarak mekanik olarak 5 dakika süre ile karıştırılmıştır. Mekanik karıştırma sürecinden sonra yapıştırıcı cam elyal ve karbon elyaf takviyeli termoset matrisli kompozit malzemelere ASTM D5868-01 standartlarına uygun bir şekilde birleştirme işlemleri yapılarak 24 saat süre ile sertleştirilmeye bırakılmıştır. Sertleşme ve donma süresi tamamlanan numunelere Karadeniz İleri Teknolojiler Araştırma Merkezinde (KİTAM) bulunan İnstron marka çekme cihazı ile tek bindirmeli çekme testleri yapılmıştır. tek bindirmeli çekme testleri yapılan numunelerin sonuçların değerlendirilmeleri ve çıkarımları yapılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Cam Elyaf Kumaş

Yapılan çalışmada cam elyaf takviyeli termoset epoksi matriski kompozit plakaların üretiminde LT 450 cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Kullanılan cam elyaf kumaşın ağırlığı 450 g/m^2 'dir. Şekil 3.1' de kullanılan cam elyaf kumaş gösterilmiştir.



Şekil 3.1. LT 450 cam elyaf kumaş

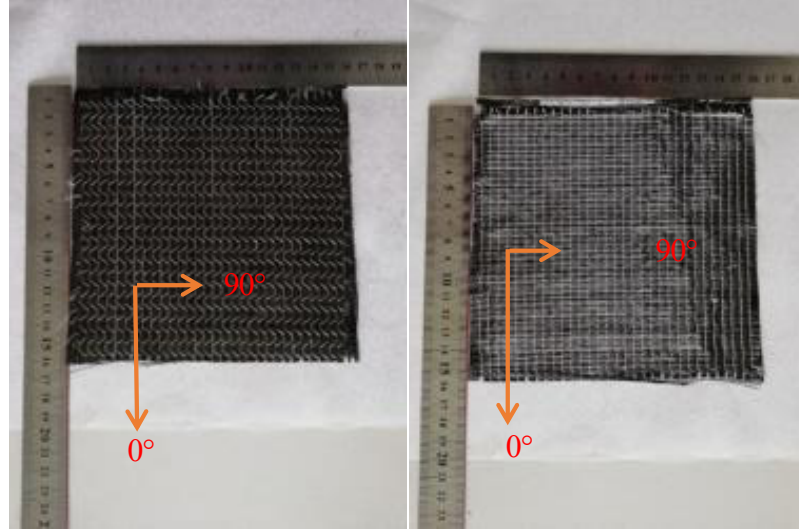
Üretimi yapılan termoset matrisli cam elyaf takviyeli kompozit plakada kullanılan cam elyaf kumaşın teknik özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1. LT450E10A kodlu cam elyaf kumaş özellikleri

Katman sayısı	Katman derecesi (°)	Elyaf tex (m2)	Alan ağırlığı (g/m2)	Dikiş mastarı (dikiş/inç)	Dikiş tipi	Dikiş uzunluğu (mm)
1	0	600	236	10	Triko	3
2	90	300	106	10	Triko	3
3	90	300	106	10	Triko	3
4	Dikiş	76	76	10	Triko	3

3.1.2. Karbon Elyaf Kumaş

Yapılan çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit plakaların üretiminde +/-090 biaxial karbon kumaş kullanılmıştır. Kullanılan karbon kumaş elyaf hacim oranına ve kompozit plaka kalınlıklarına göre LT 450 cam elyaf kumaş ile benzerlik gösterildiği için tercih edilmiştir. Kullanılan karbon kumaş Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. +/-90 Biaxial karbon elyafkumaş

Kompozit plakada kullanılan karbon elyaf takviyeli kumaşın teknik özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Karbon elyafkumaş özellikleri

Ürün kodu	Kumaş tipi	Alan ağırlığı(g/m ²)	Elyaf tipi
HSCF 12 KD +/-900 BX400 1200 KOMP	+/-900 Biaxial	400	12 K

3.1.3. Termoset Epoksi Reçine

Karbon elyaf takviyeli kompozit plaka ve cam elyaf takviyeli kompozit plakaların üretiminde termoset Duratek DTE 1200 marka epoksi kullanılmıştır. Epoksi sertleştiricisi olarak Duratek DTS 1151 marka epoksi sertleştiricisi kullanılmıştır. Kullanılan epoksi reçine Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. DTE 1200 Duratek epoksi reçine ve DTS 1151 sertleştirici

Kompozit plakaların üretiminde kullanılan Duratek marka termoset epoksi ve sertleştiricinin teknik özellikleri Tablo 3.3’de gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Duratek DTE 1200 epoksi reçine ve DTS 1151 sertleştirici özellikleri

Yoğunluk (Kg/Lt)	Viskozite (Mpas) (25 °C’de)	Karışım Ömrü (Dakika) (23°C’de,100 ml)	Ağırlıkça Karışım Oranı (%) Sertleştirici)	Çekme Mukavemeti (N/mm2)	Eğilme Mukavemeti (N/mm2)
1,10 ± 0,05	300 ± 50	180 ± 20	27	76-81	113-118

3.1.4. Kalıp Ayırıcı

Kompozit plakaların vakum infüzyon yöntemiyle üretilirken kalıp ayırıcı olarak Xtend 1080 marka sıvı kalıp ayırıcısı kullanılmıştır. Kullanılan kalıp ayırıcısı Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Xtend 1080 kalıp ayırıcı

3.1.5. Temizleyici Solüsyon

Kompozit plakaların, kompozit numunelerin ve kalıp temizliği için Isolab marka % 99.99 saflıktaki aseton kullanılmıştır. Kullanılan aseton Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Isolab marka % 99,99 saflıkta aseton

3.1.6. Yapıştırıcı Solüsyon

Kompozit yapıştırıcı numuneler için yapıştırıcı solüsyonun hazırlanmasında çözelti için kullanılan Isolab marka % 99.99 saflıkta ethanol kullanılmıştır. Kullanılan ethanol Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Isolab marka %99,99 saflıkta ethanol

Kompozit numunelerin yapıştırılmasında Araldite 2011 marka epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

3.1.7. Yapıştırıcı Epoksi



Şekil 3.7. Araldite 2011 marka epoksi yapıştırıcı

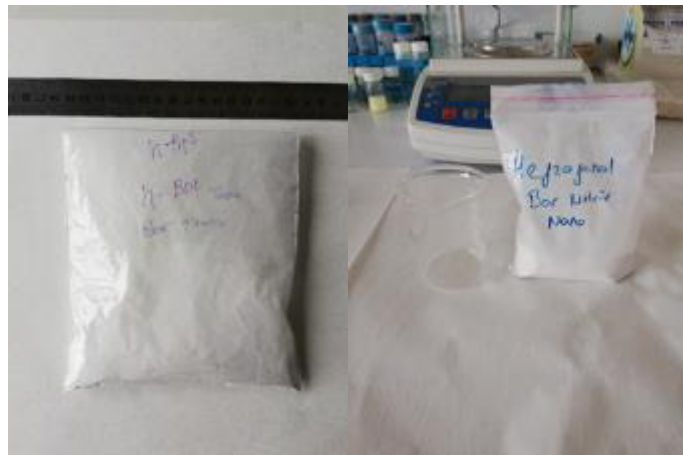
Araldite 2011 marka yapıştırıcının genel özellikleri Tablo 3.4’de görülmektedir.

Tablo 3.4. Araldite 2011 marka yapıştırıcı özellikleri

Kimyasal Tipi	Çalışma Süresi	Kürlenme Süresi (23 °C)	Renk	Kapasite	Ortalama mukavemet (Mpa)	Yoğunluk (g/cm ³)
Epoksi	100 Dk	10 Saat	Sarı	50 ml	16,3	1,05

Kompozit numuneler yapıştırılırken ağırlıkça; % 1,2 ve 3 oranlarında yapıştırıcı solüsyonun içine nano boyuttaki hegzagonal bor nitrür (hBN) katılmıştır. Yapıştırıcı solüsyona katılan nano boyuttaki hegzagonal bor nitrür (hBN) tozları Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Hegzagonal bor nitrür nano parçacık tozu Nanografi firmasından temin edilmiştir.

3.1.8. Hegzagonal Bor Nitrür (hBN)



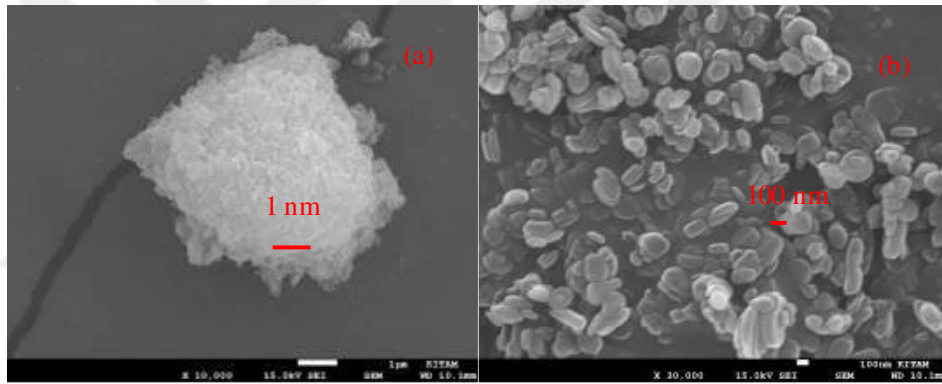
Şekil 3.8. Nano boyutta hegzagonal bor nitrür (hBN)

Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozun teknik özellikleri Tablo 3.5’de gösterilmektedir.

Tablo 3.5. Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozu teknik özellikleri

Saflık (%)	Erime Sıcaklığı (C°)	Ortalama Nano Parçacık Boyutu (nm)	Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	Element Analizi (%)
99,85	2700	250-300	2,52	Fe ₂ O ₃ = 0,03 CaO = 0,002 MgO = 0,04 B ₂ O ₃ = 0,1

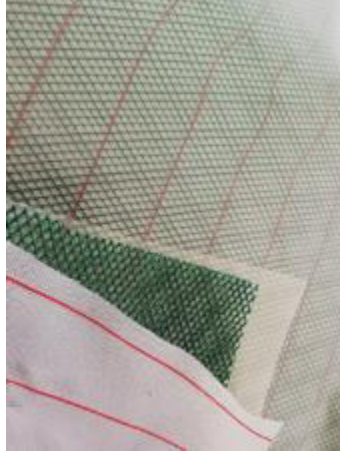
Hegzagonal bor nitrürün (hBN) SEM görüntüleri Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozun SEM görüntüleri, (a) 50000x büyütme, (b) 30000x büyütme

3.1.9. Vakum İnfüzyon Seti

Kompozit plakaların vakum infüzyon yöntemiyle üretiminde kullanılan; vakum naylanı, akış filesi ve sıyırma kumaşı Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Vakum infüzyon seti; vakumnaylonu, reçine akış filesi ve sıyırma kumaşı

3.2. Kullanılan Makine ve Araçlar

3.2.1. Vakum İnfüzyon Sistemi

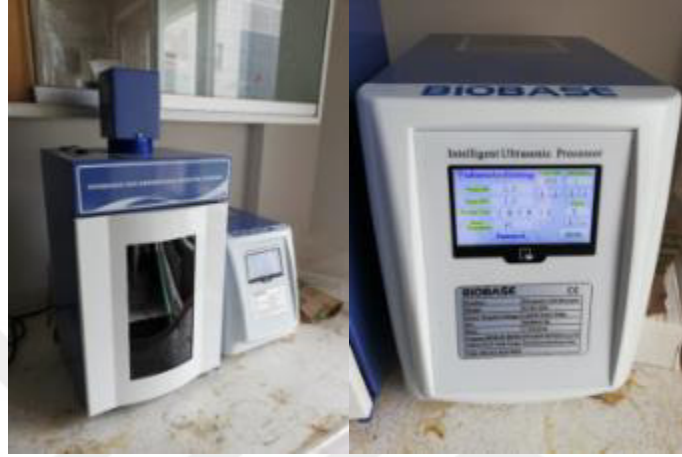
Bu çalışmada cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Vakum infüzyon yönteminde kullanılan sistemler ve araçlar Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Gösterilen şekilde vakum pompası, havalandırma sistemi, ısıtmalı kalıp ve vakum infüzyon seti görülmektedir.



Şekil 3.11. Vakum infüzyon seti; kalıp sistemi, vakumpompası, kalıp ısıtıcı ve havalandırma sistemi

3.2.2. Ultrasonik Homojenizasyon Cihazı

Kompozit numunelerin yapıştırılmasında kullanılan solüsyonun homojen olarak karıştırılması için kullanılan Bobase marka ultrasonik homojenizasyon cihazı kullanılmıştır. Yapıştırıcı solüsyonun karışımı için kullanılan ultrasonik homojenizasyon cihazı şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Biobase marka ultrasonik homojenizasyon cihazı

3.2.3. Kompozit Kesme Makinesi

Çalışmada üretilen kompozit plakaların ve numunelerin kesim işleminde sulu seramik ve kompozit kesme makinesi kullanılmıştır. Kompozitleri kesmek için kullanılan sulu kesim makinesi Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Sulu kompozit kesme makinesi

3.2.4. Hassas Terazi

Yapılan çalışmalarda numunelerin, solüsyonların ve malzemelerin hassas tartılmasında kullanılan hassas terazi Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Hassas terazi

3.2.5. Plastik Beher Kaplar

Yapıştırıcı solüsyonun hazırlanmasında ve ultrasonik homojenizasyon cihazında karıştırılmasında kullanılan 50 ml kapasiteli Isolab marka plastik beher Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Isolab marka plastik 50 ml beher kab

3.2.6. Epoksi Yapıştırıcı Tabancası

Kompozit numunelerin birbirine yapıştırılmasında ve epoksi yapıştırıcının solüsyona sıkılmasında kullanılan Areldite 2000 marka epoksi yapıştırıcı tabancası kullanılmıştır. Kullanılan epoksi tabancası Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Araldite 2000 marka epoksi yapıştırıcı tabancası

3.2.7. Kül Fırını

Kompozit plakalara elyaf/hacim oranını hesaplamak için yakma testi yapılmıştır. yakma testi Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde seramik laboratuvarında bulunan Proterm marka kül fırını kullanılmıştır. Kullanılan kül fırını Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Proterm marka kül fırını

Kompozit plakalardan alınan numunelere yapılan yakma testinde çıkan sonuçlar Tablo 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin fiziksel özellikleri

Numuneler	Kat Sayısı	Elyaf Yoğunluğu	Kalınlık (mm)	Elyaf/Hacim Oranı
Cam Elyaf Kumaş	4	2,6	2	42,72

Karbon Elyaf Kumaş	4	1,8	2	42,08
-----------------------	---	-----	---	-------

3.2.8. Manyetik Karıştırıcı

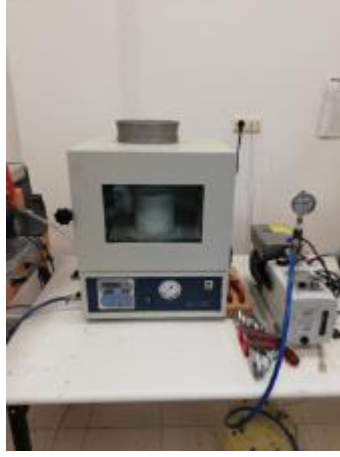
Kompozit plakalar üretilirken epoksi reçinenin mekanik olarak karıştırılması için ön ısıtmalı manyetik mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan manyetik mekanik karıştırıcı Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Manyetik mekanik karıştırıcı

3.2.9. Vakum Fırını

Kompozit plakaların vakum infüzyon yönteminde üretimleri yapılırken önceden hazırlanan epoksi recinesinin mekanik karıştırma işlemi bittikten sonra 3 dakika süre ile vakum fırınına koyulmuştur. Vakum fırınına koyulmasındaki sebep mekanik karıştırmada ortaya çıkan epoksi reçine içerisindeki hava kabarcıklarını yok etmektir. Hava kabarcıklarını elimine etmek için kullanılan vakum fırını Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Vakum fırını

3.3. Kullanılan Yöntemler

3.3.1. Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Kompozit Plaka Üretimi

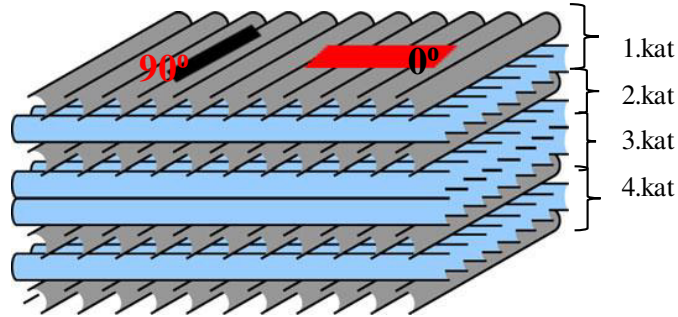
Bu çalışmada ilk önce cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemiyle 4 kat kumaş simetrik bir şekilde uygulanarak üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kompozit plakalar 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenmeye bırakılan kompozit plakalardan ASTM D5868-01 standartlarına uyacak şekilde kompozit numuneler sulu kompozit makinesi yardımı ile kesilmiştir. Kesilen numuneler aseton yardımıyla temizlenerek 24 saat süre ile kurutulmak için bekletilmiştir.

Kompozit plakaların vakum infüzyon yöntemiyle üretim görselleri Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



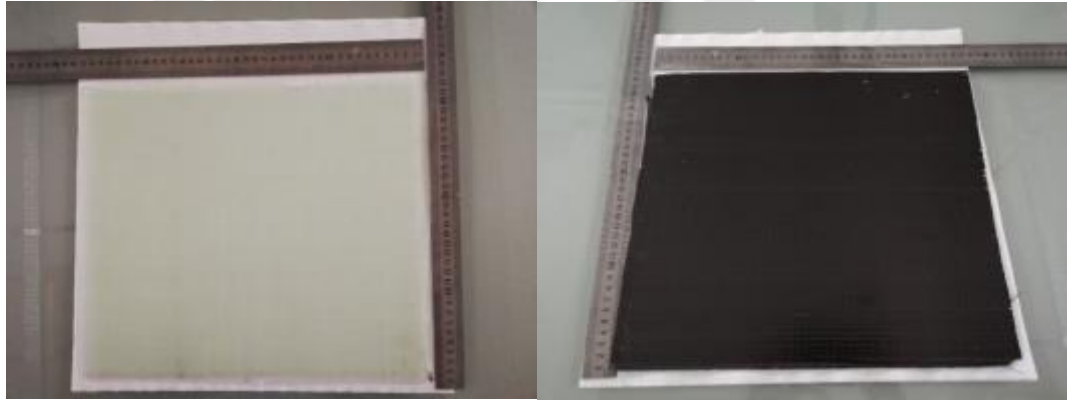
Şekil 3.20. Vakum infüzyon ile kompozit plaka üretimgörselleri

Kompozit plakaların üretiminde kullanılan cam elyaf ve karbon elyaf kumaşlar 4 kat uygulanmıştır. Katlar 2 kat üst üste ve diğer 2 kat simetrik olarak birbiri üstüne koyularak vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Cam ve karbon elyaf kumaşların dizilimi ve elyaf yönlenimleri Şekil 3.21’de görülmektedir.



Şekil 3.21. Cam ve karbon elyaf kumaşların dizilimi (Al-darkazali, vd., 2018)

Kompozit plakaların vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş resimleri Şekil 3.22’de görülmektedir.



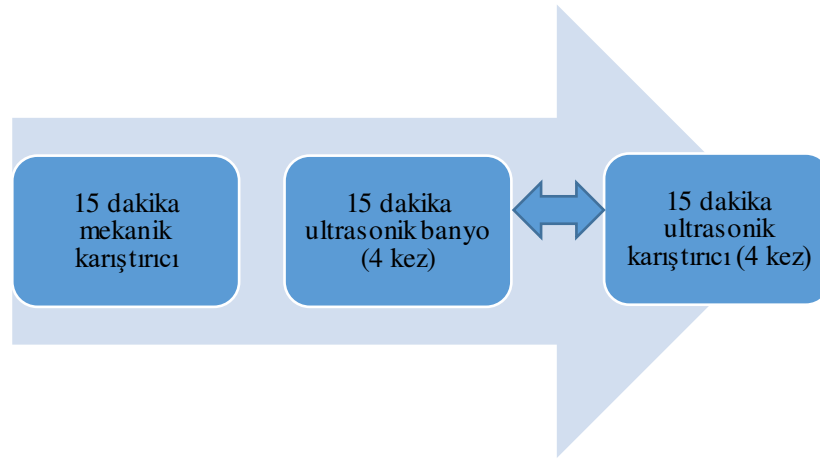
Şekil 3.22. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiş cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit plakalar

3.3.2. Yapıştırıcı Solüsyonun Hazırlanması

Kompozit numuneler hazırlandıktan sonra hegzagonal bor nitrür (hBN) katkılı yapıştırıcı solüsyonun hazırlanmıştır. Yapıştırıcı solüsyonun hazırlanması ilk olarak Araldite 2011 marka epoksi yapıştırıcıdan cam elyaf ve karbon elyaf numuneler için 10 gram yapıştırıcı epoksisine 50 ml ethanol olacak şekilde solüsyonlar hazırlanmıştır.

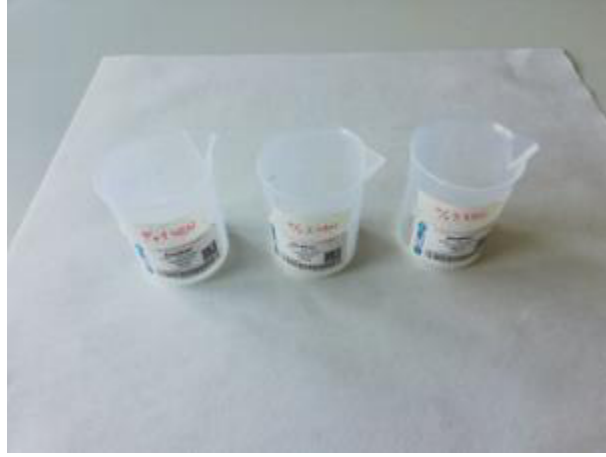
Hazırlanan solüsyonun karıştırma işlem şeması Şekil 3.23’te gösterilmiştir. İlk olarak 15 dakika mekanik karıştırıcı ile sonra 15 dakika ultrasonik banyo sonra ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Ultrasonik banyo ve ultrasonik karıştırıcı ile 4

kez döngü şeklinde 15 şer dakika olmak üzere toplamda 1 saat karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.23. Yapıştırıcı solüsyonun karıştırma şeması

Hazırlanan solüsyonların içerisine hassas terazi yardımı ile ağırlıkça % 0, 1, 2 ve 3 hegzagonal bor nitrür (hBN) katılmıştır. hBN katkısı yapılan numuneler 1 saat süre ile ultrasonik homojenizasyon cihazında karıştırılmıştır. Ultrasonik homojenizasyon cihazında karıştırma işlemi biten yapıştırıcı epoksili hBN katkı etanolü solüsyon 24 saat süre boyunca buharlaşmaya bırakılmıştır. Etanol çözücüsü tamamen hBN katkılı epoksi yapıştırıcı solüsyondan uzaklaştırıldıktan sonra Araldite 2011 marka epoksi sertleştiricisi ağırlıkça % 50 oranında katılarak hBN katkılı yapıştırıcı 3 dakika süre ile mekanik olarak karıştırılmaya tabi tutulmuştur. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra önceden hazırlanmış numuneler ASTM D58689-01 standartlarına uygun bir şekilde birleştirme işlemi uygulanmıştır. Birleştirme işlemi tamamlanan numuneler yaylı aparatlarla tutturularak 24 saat süre ile beklemeye alınmıştır. Birleşme işlemi tamamlanan numunelere daha sonra mekanik testler uygulanmıştır. Hazırlanan solüsyonlar Şekil 3.24'te gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkılı etanolli yapıştırıcı solüsyonun hazırlanması

3.3.3. Yapıştırıcının Ultrasonik Homojenizasyon ile Karıştırılması

Yapıştırıcı solüsyon hazırlandıktan sonra BIOBASE marka UCD-1200 model ultrasonik homojenizasyon cihazı ile 1 saat boyunca karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma işlemi bittikten sonra yapıştırıcı solüsyon 24 saat boyunca etanol çözücüsünün uzaklaşması için beklemeye bırakılmıştır. Ultrasonik homojenizasyon cihazı ve hazırlanan yapıştırıcı solüsyon Şekil 3.25’de gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Yapıştırıcının ultrasonik homojenizasyon cihazı ile karışımı

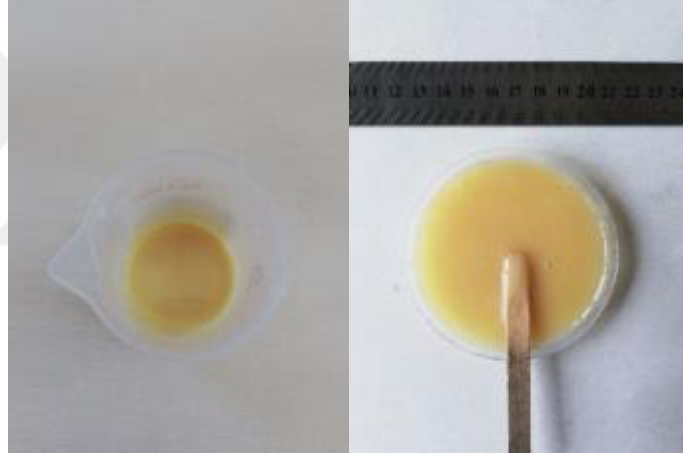
Ultrasonik homojenizasyon cihazında karıştırılan solüsyona uygulanan parametreler Tablo 3.7’de açıklanmıştır.

Tablo 3.7. Ultrasonik homojenizasyon cihazında uygulanan parametreler

DEĞİŞKENLER	DEĞERLER
-------------	----------

Voltaj/Frekans	220V/50Hz
Ultrasonik Güç	1200 Watt
Güç Oranı	%40
Karıştırıcı Uç	8 mm
Titreşim Açık	5 sn
Titreşim Kapalı	2 sn
Proses Süresi	1 saat

Ultrasonik homojenizasyonda karıştırılan ve daha sonra bekletilen numuneler daha sonra ağırlıkça % 50 oranında sertleştiricileri katılarak 3 dakika boyunca odun çubukla mekanik olarak karıştırılarak numuneleri birleştirme işlemine geçilmiştir. Hazırlanan yapıştırıcı epoksinin görüntüsü Şekil 3.26’da görülmektedir.

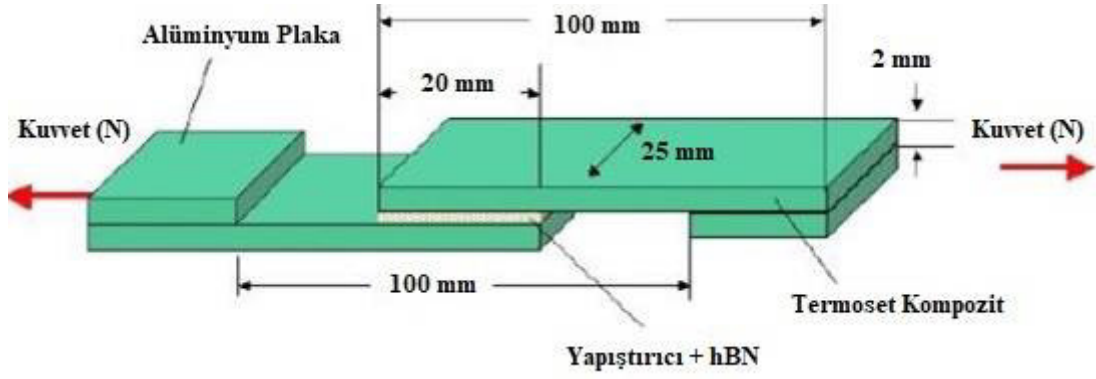


Şekil 3.26. Sertleştiricisi ilave edilmiş hBN katkılı yapıştırıcı epoksi

3.3.4. Tek Bindirmeli Çekme Numunelerin Hazırlanması

Yapıştırılmış numunelere tek bindirmeli çekme testi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezindeki (KİTAM) Mekanik Test Laboratuvarında INSTRON marka çekme cihazında yapılmıştır. Çekme testi standardı olarak ASTM D5868-01 kullanılmıştır. Şekil 3.27’de ASTM D5868-01 tek bindirmeli çekme testi standartlarındaki ölçülendirmeler ve test numunesi görülmektedir.

Tek bindirmeli çekme testinde uygulanan yapışma alanı; 25 mm numune genişliği, 20 mm yapışma uzunluğu ve 0,5-0,7 mm yapıştırıcı kalınlığı olarak belirlenmiştir.



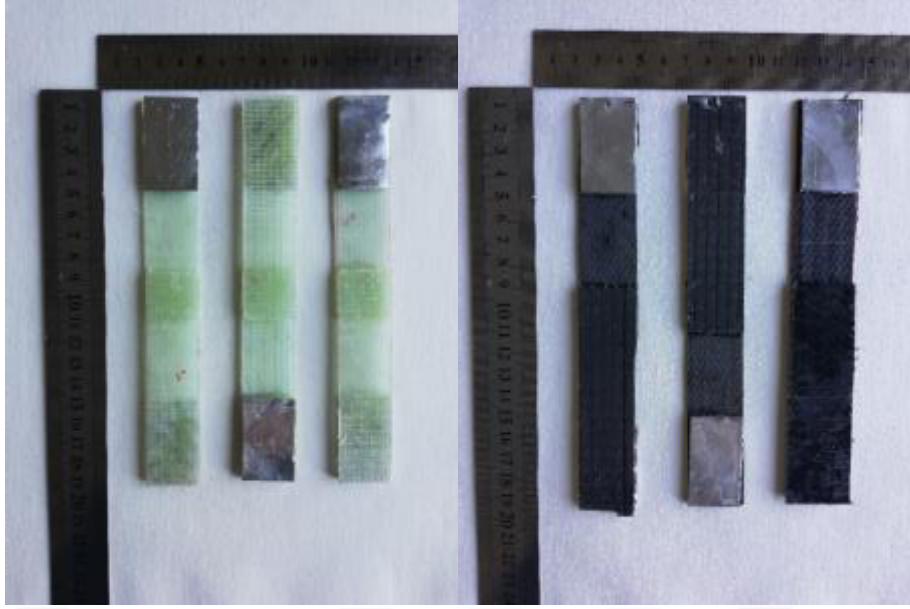
Şekil 3.27. ASTM D5868-01 standartlarındaki numuneler

Kompozit numuneler tek bindirmeli çekme testinde 3'er adet olmak üzere cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitler olarak ayrı ayrı hazırlanmıştır. Ayrıca numuneler kesilirken kompozit plakadan elyaf yönlenimlerine göre 0° ve 90° yönlerinden ayrı ayrı 3'er numuneler alınmıştır. Referans numuneler ile birlikte toplamda 24 adet numune üstünde çalışılmıştır. Referans ve katkıli numunelerin açıklaması Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Tablo 3.8. Numunelerin özelliklerinin açıklaması

Numune Kodları	Numune Kalınlığı (mm)	Katman Sayısı	Numune Elyaf Derecesi	Hbn Katkı Oranı (% ağırlık)	Numune Açıklaması
0° cam% 0,1,2,3 hbn	2	4	0°	% 0,1,2,3	0° cam elyaf kompozit %0,1,2,3 hBN katkıli
90° cam% 0,1,2,3 hbn	2	4	90°	% 0,1,2,3	90° cam elyaf kompozit %0,1,2,3 hBN katkıli
0° karbon% 0,1,2,3 hbn	2	4	0°	% 0,1,2,3	0° karbon elyaf kompozit %0,1,2,3 hBN katkıli
90° karbon% 0,1,2,3 hbn	2	4	90°	% 0,1,2,3	90° karbon elyaf kompozit %0,1,2,3 hBN katkıli

Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme test numuneleri ASTM D5868-01 standartlarına uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 3.28'de görülmektedir.



Şekil 3.28. Cam elyaf ve karbon elyaf tek bindimeli çekme testi öncesi numuneleri

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Malzeme Karakterizasyonu

Yapılan çalışmaları irdellemek ve sonuçlarını değerlendirmek üzere cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset matrisli kompozit numunelere tek bindirmeli çekme testi, optik mikroskop testi ve taramalı elektron mikroskop (SEM) testleri yapılmıştır. yapılan testlerin çıktıları ve bulguları bu bölümde incelenmiştir.

Kompozit numunelere yapılan tek bindirmeli çekme testi ve SEM testleri KİTAM'da, optik mikroskop testi Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki Karakterizasyon Laboratuvarında yapılmıştır.

4.1.1. Tek Bindirmeli Çekme Testi

Kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testleri ASTM D5868-01 standartlarına uygun olarak hazırlanıp, OMÜ KİTAM'da yapılmıştır. yapılan testlerin sonuçları bu bölümde gösterilmiştir. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testleri tek tek irdelenerek yapılmıştır. Kompozit numuneler için her bir katkı oranına ve elyaf yönelimlerinin her biri için 3'er numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere yapılan testlerin ortalamaları alınarak homojen ve doğru sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

Tek bindirmeli çekme testi için sonuçlarda kullanılan formül (1);

$$S = F/A$$

S = Tek bindirmeli çekme gerilmesi (MPa)

F = Numuneye uygulanan maksimum kuvvet (Newton)

A = Yapışma alanı (mm^2)

$$(A = 25 \text{ mm} * 20 \text{ mm} = 500 \text{ mm}^2)$$

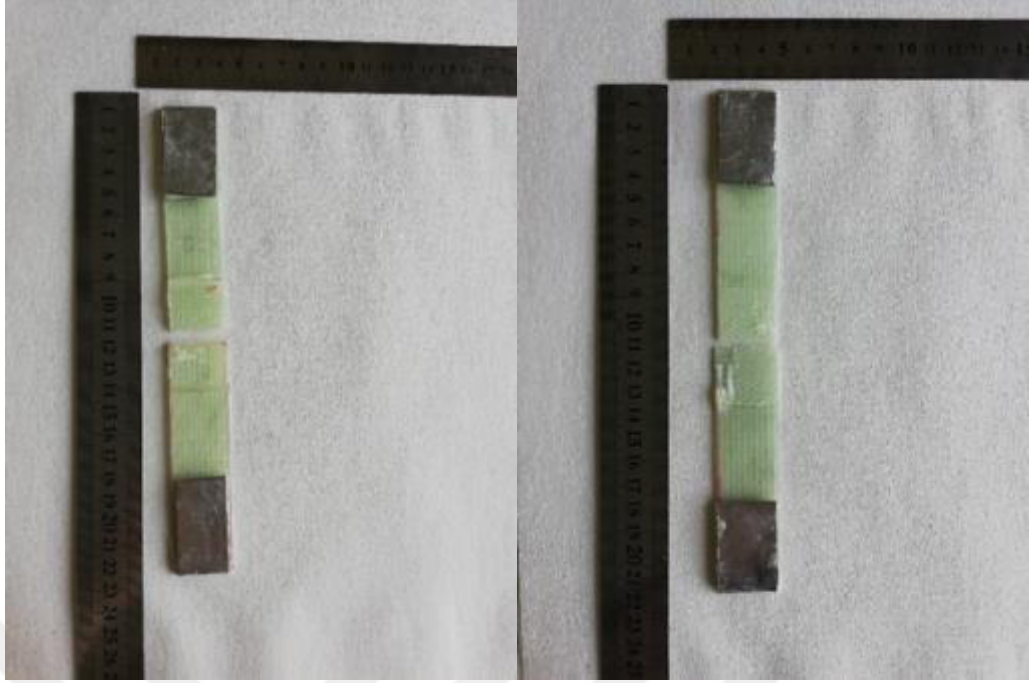
Tek bindirmeli çekme testlerinin yapıldığı Instron marka çekme cihazı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Instron marka çekme cihazı

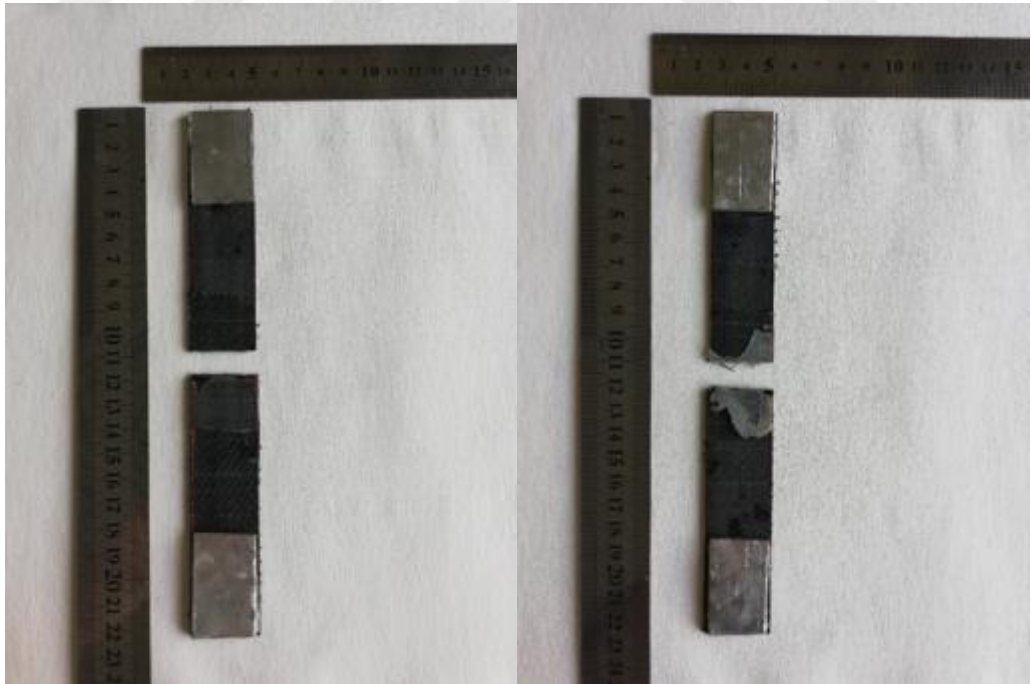
Kompozit numunelere yapılan tek bindirmeli çekme testleri sonucunda numunelerde meydana gelen hasarlar ve görüntüleri Şekil 4.2’de ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Cam elyaf takviyeli termoset matrisli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonrasındaki görüntüleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Cam elyaf takviyeli numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonrası görüntüleri

Karbon elyaf takviyeli termoset matrisli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonrasındaki görüntüleri Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Karbon elyaf takviyeli numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonrası görüntüleri

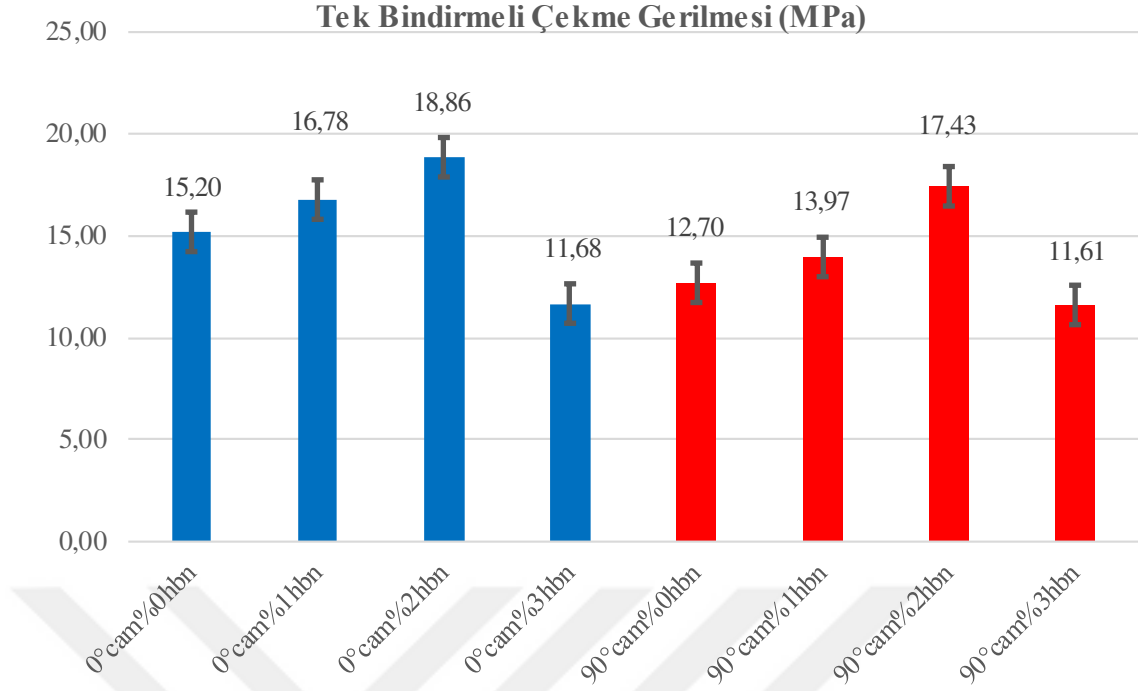
Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli ağırlıkça % 0, 1, 2 ve 3 hBN katkılı kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonuçları ve

standart sapmaları Tablo 4.1’de gösterilmiştir. Tek bindirmeli çekme testi sonuçları Instron marka çekme cihazından alınan verilerin, aynı kodlu 3’er numunenin aritmetik ortalaması alınarak formül 1’e göre hesaplanarak oluşturulmuştur.

Tablo 4.1. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonuçları

Numune Kodları	Tek Bindirmeli Çekme Gerilmesi (Mpa)
0°cam% 0hbn	15,1988 ± 0,4340
0°cam% 1hbn	16,7834 ± 2,0845
0°cam% 2hbn	18,8603 ± 0,7228
0°cam% 3hbn	11,6819 ± 0,9411
90°cam% 0hbn	12,7001 ± 2,1487
90°cam% 1hbn	13,9669 ± 1,4625
90°cam% 2hbn	17,4349 ± 2,6975
90°cam% 3hbn	11,6128 ± 0,9279
0°karbon% 0hbn	5,1607 ± 1,4199
0°karbon% 1hbn	12,1991 ± 0,9716
0°karbon% 2hbn	15,0452 ± 1,2301
0°karbon% 3hbn	12,1991 ± 1,8969
90°karbon% 0hbn	7,0062 ± 0,6881
90°karbon% 1hbn	7,6976 ± 0,3687
90°karbon% 2hbn	12,5046 ± 0,4147
90°karbon% 3hbn	4,5141 ± 0,5327

Cam elyaf takviyeli kompozit numunelere ağırlıkça % 0, 1, 2 ve 3 hBN katkıla yapıştırılmalı birleştirmesindeki numunelerin tek bindirmeli bağlantı dayanımları hesaplanmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli bağlantı dayanımı grafiği Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

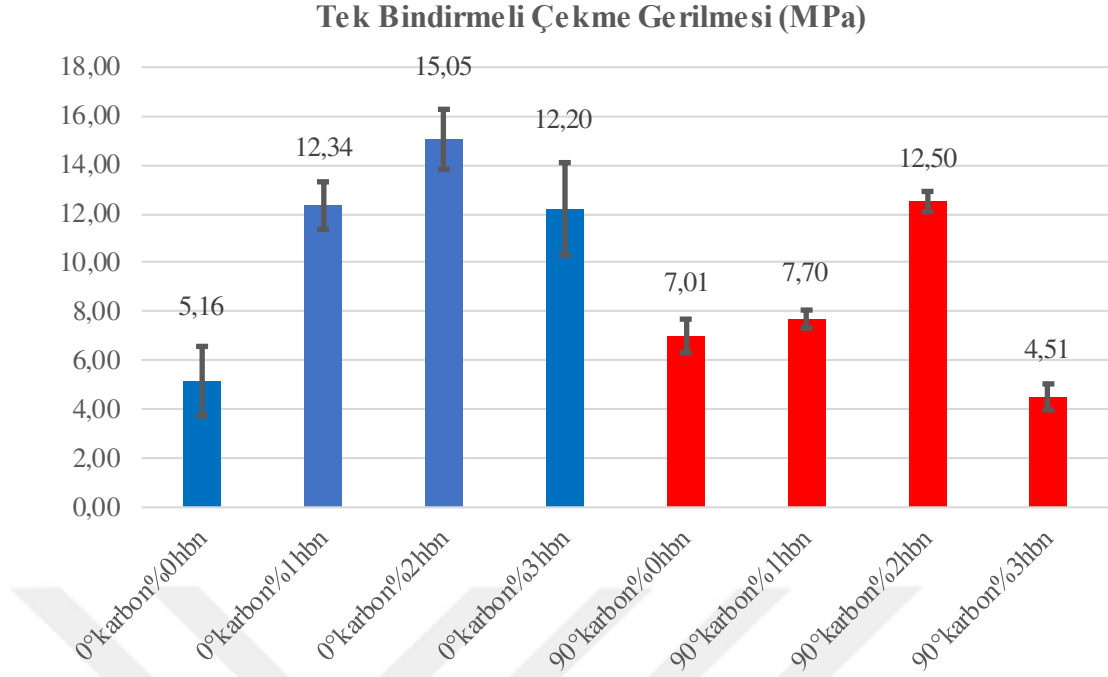


Şekil 4.4. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli bağlantı dayanımı grafiği

Cam elyaf takviyeli kompozit numunelere uygulanan tek bindirmeli çekme testi sonuçlarına göre 0° kumaş yönlenimli numunelerin, 90° yönlenimli numunelere göre gerilme mukavemetlerinin daha yüksek çıktığı görülmektedir. En yüksek tek bindirmeli çekme gerilmesi “0°cam%2hbn” kodlu, 0° kumaş yönlenimli, % 2 hBN katkılı kompozit numunelerde olduğu anlaşılmıştır. Referans numuneye göre hBN katkısının cam elyaf takviyeli numunelerde % 2 hBN oranlı numune haricinde çekme mukavemetlerinde düşüş kaydedilmiştir.

Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısı numunelerde ve kumaş yönlenimlerine göre bakarsak en yüksek mukavemet değerine % 2 hBN katkılı numunelerde hem 0° hem de 90° yönlenimli numunelerde yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun nano hBN partiküllerinin epoksi yapıştırıcının içerisinde homojen olarak dağıldığı ve ek olarak numunelerin yapışma yüzey alanını genişlettiğinden ötürü mukavemetlerin yükseldiği şeklinde yorumlanmıştır. Çıkan sonuçlara göre uygun ve homojen bir şekilde yapıştırıcı epoksi içerisine dağıtılan nano hbn partiküllerin tek bindirmeli bağlantı dayanımının yükseldiği anlaşılmaktadır.

Karbon elyaf takviyeli, termoset epoksi matrisli, nano toz hegzaonal bor nitrür (hBN) katkılı yapıştırılmalı numunelerin tek bindirmeli çekme testi grafiği Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli bağlantı dayanımı grafiği

Karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonuçlarına göre en yüksek mukavemet değerine “0° karbon%2hbn” kodlu 0° kumaş yönündeki % 2 hBN katkılı numunede raslandığı görülmektedir.

Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerde 0° kumaş yönündeki numunelerin 90° kumaş yönlenimli numunelere göre mukavemetlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Karbon elyaf takviyeli numunelerde hBN katkısı genel itibarıyla mukavemeti artırdığı ancak en yüksek mukavemet değerine % 2 hBN katkılı numunelerde rastlandığı anlaşılmıştır. Bu durumun sebebi olarak nano hbn partiküllerini yapıştırıcı epoksi içinde homojen olarak dağıldığı ve yapıştırıcı yüzey alanını genişleterek daha iyi tutunma sağladığı anlaşılmıştır.

Karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testi sonuçlarına baktığımızda nano hBN tozu katkısının karbon elyaf takviyeli numunelerde daha çok mukavemeti artırıcı yönde etki ettiği anlaşılmıştır. Ancak cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin ise tek bindirmeli çekme gerilmelerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak yapıştırıcı epoksinin karbon

elyaf takviyeli numunelerde daha az yapışma ve tutunma gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmadan çıkan tek bindirmeli çekme gerilmelerini literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslamak gerekirse; yüzey işlemi yapılan çelik plakaların yapıştırılmasında epoksi içine karbon nano tüp (CNT) ve kısa aramid elyaf takviyesi yapılarak yapışma özellikleri araştırılmıştır. Yapılan bu araştırmaya göre ortalama tek bindirmeli çekme gerilmeleri 24 MPa değerlerinde bulunmuştur (Wang, vd., 2016). Çalışmadaki CNT yapılarının bu tezde çalışılan hBN nano yapılarının tek bindirmeli çekme gerilmelerine katkıları daha fazladır. Bu farkın CNT yapılarının yaptığı katkıdan dolayı olduğu düşünülmektedir.

Yapılan bir çalışmada farklı özelliklere sahip epoksi yapıştırıcılara farklı özelliklere sahip nanokiller eklenerek mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çıkan sonuçlara göre % 1 nanokil katkı oranındaki numunelerin özellikleri yüksek çıkmıştır (Akpinar, vd., 2018). Yapılan çalışmayı bu tez ile kıyaslırsak en yüksek tek bindirmeli çekme gerilmeleri % 2 hBN katkılı numunelerde gerçekleşmiştir. Fakat % 1 hBN katkılı numunelerinde değerlerinde yükselme görülmektedir. Bu sebeple yapılan çalışma ile bu tez sonuçları birbirini desteklemektedir.

Birbirinden farklı yapıştırma ve yapıştırıcıyı karıştırma yöntemi kullanılarak yapıştırıcıya eklenen birbirinden farklı grafen nanoyapıların oluşturduğu nanokompozitlerin tek bindirmeli çekme gerilmeleri araştırılmıştır. Çıkan sonuçlara göre eklenen grafen nanoyapılarının çekme gerilmelerine olumlu etki yapıldığı ve ortalama değerlerin 15 MPa olduğu belirtilmiştir (Gültekin, vd., 2016). Yapılan çalışma bu tez ile kıyaslanırsa çıkan değerler birbirine yakın ve benzer çıkmaktadır.

Karbon fiber takviyeli termoplastik kompozit-alüminyum birleştirmeli bağlantılarında tek bindirmeli çekme gerilmeleri ortalama 12 MPa değerlerinde bulunmuştur (Ramaswamy, vd., 2020). Yapılan çalışmayı bu tez ile karşılaştırsak; karbon elyaf takviyeli hBN katkılı termoset kompozitlere yapılan tek bindirmeli çekme testlerine göre ortalama 13,75 MPa gibi benzer ve yakın değerler karşımıza çıkmaktadır.

Yapıştırıcıya eklenen farklı katkı oranlarındaki nanoyapı ile oluşturulan nanokompozitlerin tek bindirmeli çekme testleri araştırılmıştır. Araştırmaya göre yapıştırıcının yapısal özelliklerine ve nanoyapı tipine göre özellikler değişmektedir.

En iyi tek bindirmeli çekme gerilmesi % 1 katkı oranındaki numunelerde çıkmıştır (Akpınar, vd., 2017). Yapılan çalışmayı bu tez ile değerlendirdiğimizde çıkan sonuçlar benzerlik ve yakınlık göstermektedir. Tezden çıkan sonuçlara göre de % 2 hBN katkı oranına kadar tek bindirmeli çekme gerilmelerinde artış görülmektedir.

Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan epoksi yapıştırıcıların yapışma özellikleri araştırılmıştır. Araştırma sonucuna göre epoksi yapıştırıcıların tek bindirmeli çekme gerilmeleri 4 MPa değerlerinde elde edilmiştir (Passos, vd., 2021). Yapılan çalışmayı bu tez ile kıyaslırsak hBN nano yapılarının epoksi yapıştırıcılara tek bindirmeli çekme gerilmelerinde ortalama 15 MPa gibi büyük bir katkısının olduğu anlaşılmaktadır.

Bu tezde ortaya çıkan tek bindirmeli çekme gerilme sonuçları literatüre göre; benzerlik, yaklaşık ve yüksek değerler göstermektedir.

4.1.2. Optik Mikroskop Testi

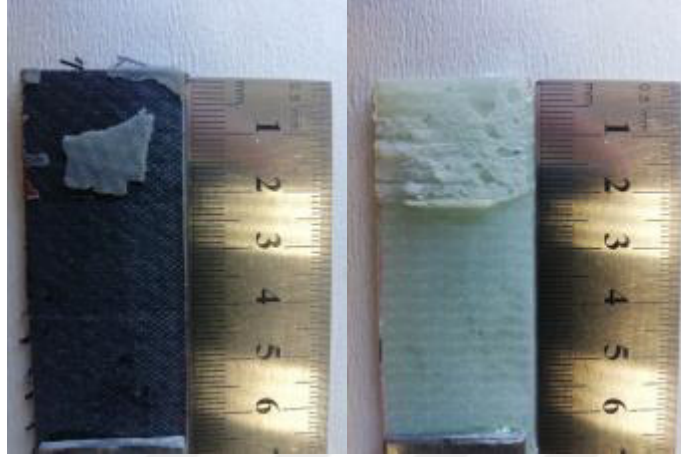
Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelere tek bindirmeli çekme testi sonrasında optik mikroskop ile görüntüleri analiz edilmiştir. Optik mikroskop testi Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Bresser marka lcd dijital optik mikroskopta yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan optik mikroskop Şekil 4.6’da gösterilmektedir.



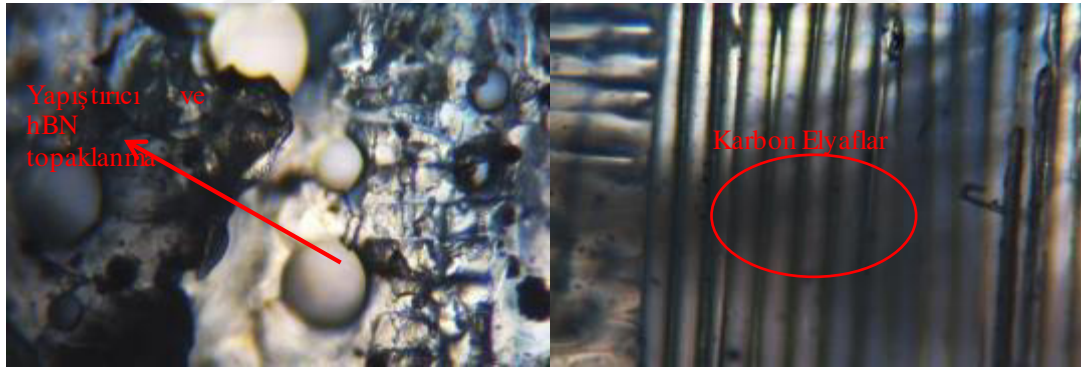
Şekil 4.6. Bresser marka lcd dijital optik mikroskop

Optik mikroskopta incelenen tek bindirmeli çekme testi sonrasında alınan cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin görüntüleri Şekil 4.7’de görülmektedir.



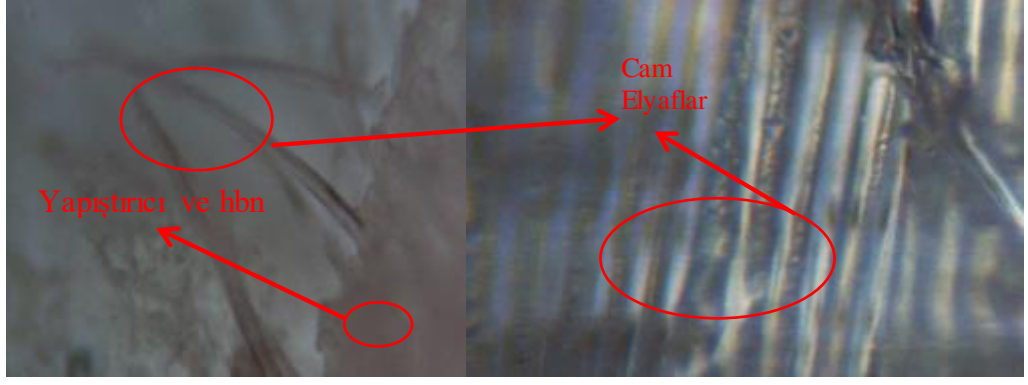
Şekil 4.7. Karbon ve camelyaf takviyeli kompozit numunelerin optik mikroskop öncesi görüntüleri

Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin test sonrasında yapıştırılan bölgelerine optik mikroskop ile baktığımızda yüzeye iyi yapışmama ve topaklanmalar izlenmiştir. Alınan bu görüntüler Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin optik mikroskop görüntüleri

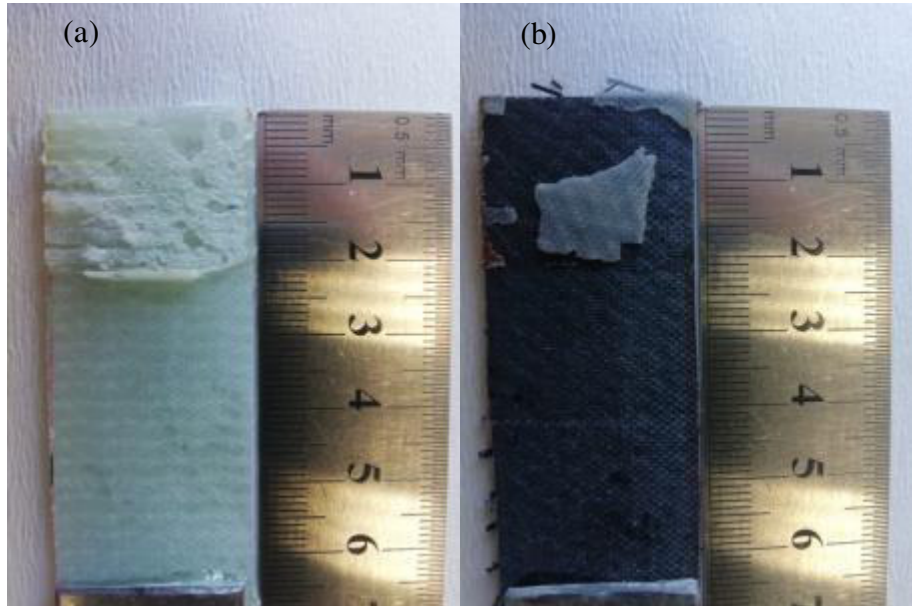
Cam elyaf takviyeli kompozit numunelere optik mikroskop ile baktığımızda yüzeye iyi yapışma ve homojen bir dağılım izlenmiştir. Numunelerden alınan görüntüler Şekil 4.9’da görülmektedir.



Şekil 4.9. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin optik mikroskop görüntüleri

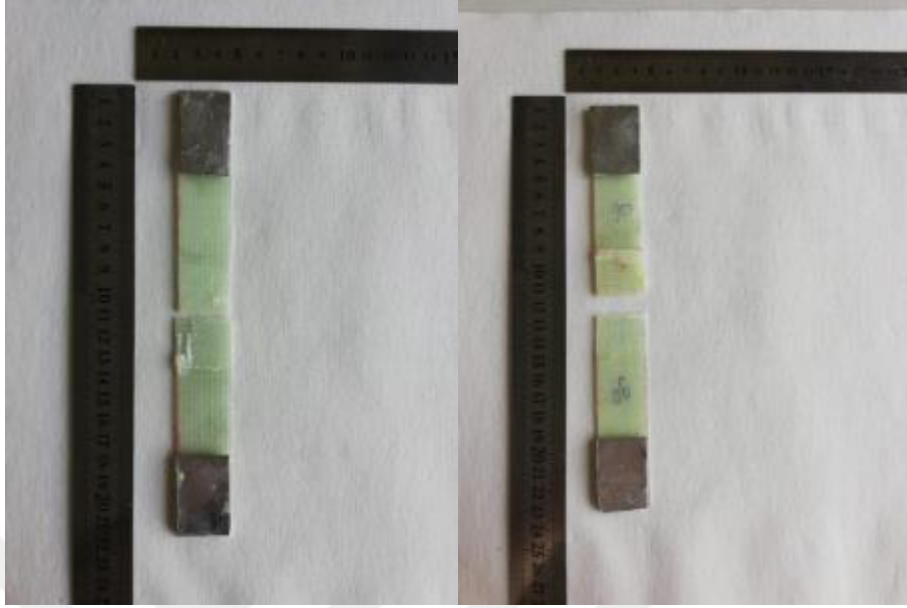
4.1.3. Numunelerin Kırılma Analizleri

Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numuneler tek bindirmeli çekme testi sonrasında birleştirme bölgeleri optik mikroskop ve göz ile muayene yöntemi ile kırılma analizleri yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda hBN katkılı yapıştırıcının cam elyaf takviyeli kompozitlerde karbon elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha iyi yapışma gösterdiği görülmüştür. Birleşme bölgeleri incelendiğinde hBN katkılı yapıştırıcının karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin yüzeylerine cam elyaf takviyeli kompozit numunelere göre daha kötü yapışma özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin kırıldıktan sonraki görüntüleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

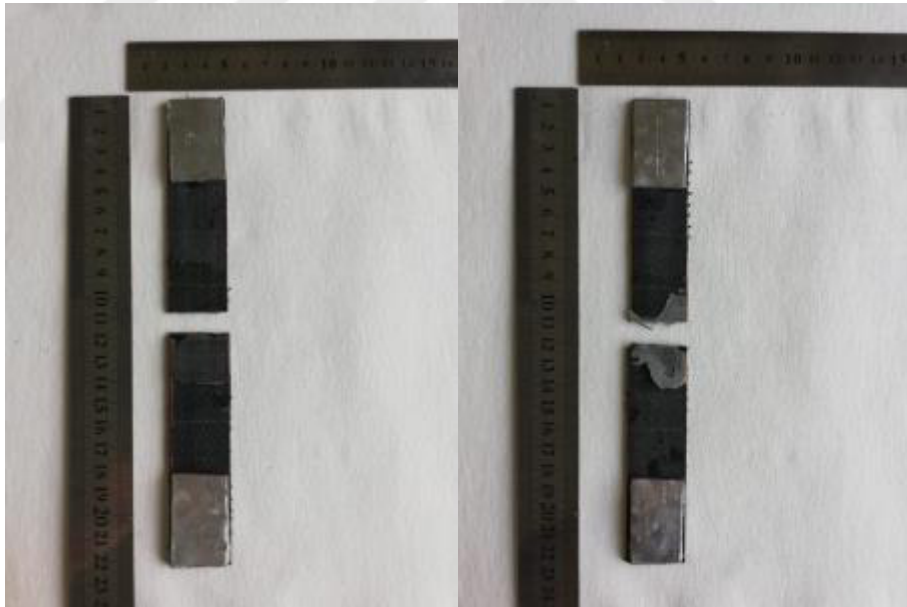


Şekil 4.10. (a) Cam elyaf takviyeli kompozit numune, (b) Karbon elyaf takviyeli kompozit numune

Kompozit numunelerin tek bindirmeli çekme testinden sonraki kırılma görüntüleri Şekil 4.11 ve 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin kırılma görüntüleri



Şekil 4.12. Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin kırılma görüntüleri

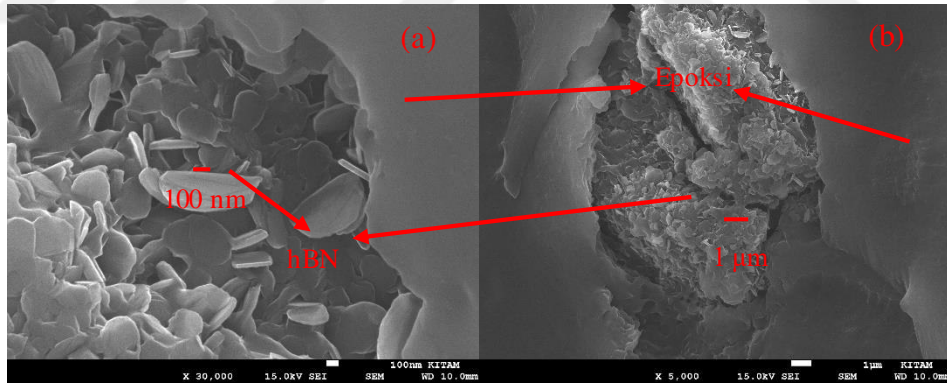
Yukarıdaki kompozit numunelerin kırılma görüntülerinden anlaşılacağı üzere hbn katkılı yapıştırıcının cam elyaf takviyeli kompozitlerde karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre daha iyi yapışma özelliği gösterdiği izlenmiştir.

Cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin hBN katkılı yapıştırıcı ile birleştirilmelerinin tek bindirmeli çekme testleri, optik mikroskop

testleri ve kırılma analizleri sonucunda hBN katkısının yapıştırıcının ağırlıkça % 2’de en uygun olduğu anlaşılmıştır. Karbon elyaf takviyeli numunelerin hBN katkılı yapıştırıcılı birleştirmelerinde cam elyaf takviyeli kompozitlere göre daha kötü sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bunun nedeni olarak epoksi ve cam elyafın kimyasal yapılarını incelediğimizde benzer yapılar karşımıza çıkmaktadır. Cam elyaf ile hBN kimyasal ve fiziksel yapılarına baktığımızda, karbon elyafa göre daha yakın özellikler karşımıza çıkmaktadır. Karbon elyafın kimyasal yapısı ve fiziksel özelliklerine baktığımızda ise; epoksi ve hegzagonal bor nitrür (hBN) ile farklı özellikler gösterdiği görülmektedir. Tek bindirmeli çekme testi sonuçlara bakarsak hBN katkısının homojen dağıldığında yapışma mukavemetinin artış gösterdiği ancak hBN katkısının yapıştırıcı ağırlığının % 2’sinden sonra yapışma mukavemetinde toplanma ve homojen olmayan yapılardan ötürü düşüş gösterdiği görülmüştür.

4.1.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

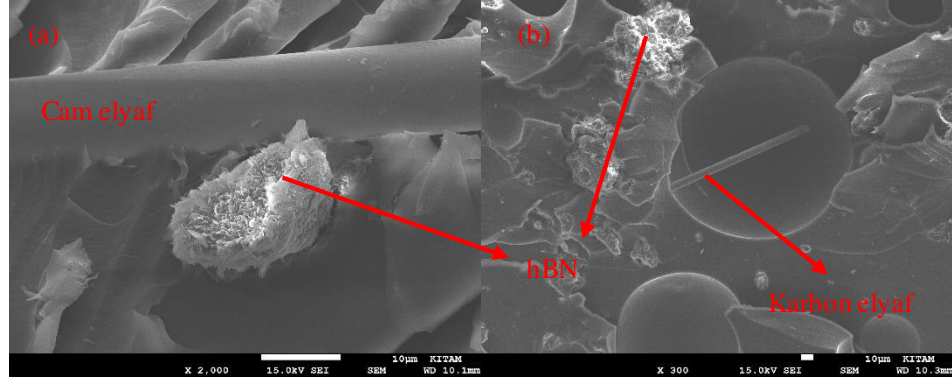
Termoset kompozit malzemelerinin birleştirilmesinde kullanılan epoksi yapıştırıcının içerisine ağırlıkça % 0, 1, 2 ve 3 oranlarında katılan hBN nano tozunun SEM görüntüleri Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Hegzagonal bornitrür (hBN) nano tozun SEM görüntüleri, (a) 30000x büyütme, (b) 5000x büyütme

Hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozun yapıştırıcıda ağırlıkça % 2 den sonra toplanma yaptığı, yapılan tek bindirmeli çekme testi ve optik mikroskop testinden anlaşılmıştır. hBN nano tozun yapıştırıcıda homojen olarak dağıldığında yapıştırıcının özelliklerini iyileştirdiği ve yapıştırıcı yüzey alanını genişlettiği görülmüştür.

Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozitlerin tek bindirmeli çekme testinden sonra alınan SEM görüntüleri Şekil 4.14’te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. hBN katkı yapıştırıcılı termoset kompozitlerin SEM görüntüleri (a) cam elyaf takviyeli termoset, (b) karbon elyaf takviyeli termoset

Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere hBN nano parçacıkları yapıştırıcı epoksiye ve elyaf yüzeylerine birleşme sağlamıştır. Bu birleşmenin termoset kompozitlerin yapıştırırmalı birleştirmesine katkı sağladığı anlaşılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler sonucunda cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset epoksi matrisli kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinde kullanılan epoksi yapıştırıcılarının, hegzagonal bor nitrür (hBN) nano tozunun yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağıtılarak ve hBN ağırlıkça katkı oranının % 2 oranında mukavemetini ve dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir.

Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kumaş yönlenim açılarına göre değerlendirecek olursak 0° yönleniminde alınan numunelerin 90° yönlenimdeki numunelere kıyasla yapışma ve çekme mukavemetinin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Cam elyaf takviyeli kompozit numunelerdeki yapışma mukavemetinin karbon elyaf takviyeli kompozit numunelere göre yapışmalı birleştirmesinin daha iyi mukavemet ve dayanımda olması cam elyaf kumaş ve karbon elyaf kumaşın yüzey yapılarına ve fiziksel özelliklerine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bunun nedeni olarak epoksi yapıştırıcının ve hBN nano tozlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin cam elyafın fiziksel ve kimyasal özelliklerine daha çok benzerlik gösterdiği görülmüştür. Karbon elyaflar ile hBN nano tozlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirlerinden daha farklı özellik ve yapıları sahiptirler.

Cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde hBN nano tozunun yapıştırıcıya mukavemet katkısının iyi olmasının nedeni olarak hBN nano toz partiküllerinin yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağılması ve yapıştırıcının yüzey alanını genişleterek kompozit numunelerin birbirlerine daha iyi tutunmasını sağlamıştır. Sonuçları daha kötü çıkan numunelerde ise hBN nano parçacıklarının yapıştırıcı içerisinde topaklanma yaptığı ve yapıştırıcıda iyi dağılmadığı gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmayı genel olarak değerlendirirsek cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli numunelerde en yüksek tek bindirmeli çekme mukavemetine % 2 hBN katkılı numunelerde rastlanmıştır. hBN katkısının genel itibariyle yapıştırıcı birleştirmelerde olumlu etki yaptığı ve yapıştırıcı yüzey alanını genişlettiği görülmüştür.

Bu çalışmanın sonucunda termoset ve termoplastik matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesinde bor nano tozları

kullanılabilir. Kompozit malzemelerin yapıştırma yöntemlerinde hBN nano toz katkıları kullanılacağı zaman numunelerin temizliğine ve üretim yöntemlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü yapıştırma yöntemlerinde yüzey temizliği, yüzey pürüzlülüğü, yapışkanın kimyasal ve fiziksel yapıları önem teşkil etmektedir.

Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi için bor yapıları ve hBN nano toz katkıları kullanılabilir. Yapıştırma yöntemlerinin geliştirilmesi yapıştırıcının geliştirilmesi ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesine bağlıdır.



KAYNAKÇA

- Adams, R.D. and Wake, W.C., (1984), *Structura Adhesive Joint İn Engineering*, Elsevier Sciece Publisher, London.
- Ahn J.S. And Basu P.K., (2011), *Locally Refined P-Fem Modeling Of Patch Repaired Plates, Composite Structures*, Vol. 93, 1704-1716.
- Akpınar, I. A., Gültekin, K., Akpınar, S., Akbulut, H., and Ozel, A. (2017). Experimental Analysis On The Single-Lap Joints Bonded By A Nanocomposite Adhesives Which Obtained By Adding Nanostructures. *Composites Part B: Engineering*, 110, 420–428. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.046>
- Akpınar, I. A., Gültekin, K., Akpınar, S., Gürses, A., and Ozel, A. (2018). An Experimental Study On Composite Adhesives Reinforced With Different Types Of Organo-Clays. *The Journal Of Adhesion*, 94(2), 124–142. <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1255606>
- Alyanak, İ., ve Şen, F. (2015). Paralel Çift Pim Uygulanmış ve Yapıştırılmış Karma Bağlantılı Kompozit Plakaların Çekme Yüğü Altında Gerilme Analizi *Stress Analysis Of Hybrid Jointed Composite Plates Applied Two Parallel Pins and Adhesive Bonding Under Tensile Loading*. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2, 11–23.
- Apalak Z.G., Apalak M.K. and Genc M.S., (2006), Progressive Damage Modeling Of An Adhesively Bonded Unidirectional Composite Single-Lap Joint İn Tension At The Mesoscale Level, *Journal Of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 19, 671.
- Avdelidis N.P., Moropoulou A., and Marioli Riga Z.P., (2003), The Technology Of Composite Patches and Their Structural Reliability Inspection Using Infrared Imaging, *Aerospace Sciences*, Vol. 39, 317-328.
- Aydın M.D., Temiz Ş., Ve Özel A., (2007), Yapıştırma Bağlantılarının Dayanımı Üzerine Kürleşme Basıncının Etkisi, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul/Türkiye.
- Aydın M.D., (2003), Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin DeneySEL ve Teorik İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi F.B.E, Doktora Tezi, Erzurum.
- Aydın, H. (2018). Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu (Vol. 30).
- Baker A.A., (2011), A Proposed Approach For Certification Of Bonded Composite Repairs To Flight-Critical Airframe Structure, *Applied Composite Materials*, Vol. 18, 337-369.
- Baştekeli, E. O. (2020). Havacılık Alanında Kullanılan Birleştirme Yöntemleri (Vol. 61). <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.767267>
- Bingöl, M., & Çavdar, K. (2016). Effects Of Different Reinforcements For Improving Mechanical Properties Of Composite Materials (Vol. 21). <https://doi.org/10.17482/uujfe.35051>
- Bitlisli, B., ve Yazıcı, M. (2019). Araç Zirhlamada Kullanılan kompozit malzemelerin balistik Performanslarını İncelenmesi (Vol. 24). <https://doi.org/10.17482/uumfd.494262>
- Boztoprak, Y., ve Kartal, İ. (2019). Bor Nitrür Partikülleriyle Takviyelendirilmiş Vinil Ester Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (Vol. 2019). <https://doi.org/10.31202/ecjse.450790>
- Campilho R.D.S.G., De Moura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L And Domingues J.J.M.S., (2010), Buckling Strength Of Adhesively-Bonded Single and Double-Strap Repairs On Carbon –Epoxy Structures, *Composites Science And Technology*, Vol. 70, 371-379.

- Cheng P., Gong X.J., Hearn D. and Aivazzadeh S., (2011), Tensile Behaviour Of Patch-Repaired Cfrp Laminates, Composite Structures, Vol. 93, 582-589.
- Çakır, M. V., ve Kınay, D. (2016). Cam Elyaf Kompozitlerin Alüminyum Plaka İle Yapıştırılması ve Yapışmanın Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(Ös1), 99–108. <https://doi.org/10.21605/Cukurovaummfd.311893>
- Çakır, M., & Berberoğlu, B. (2018). E-Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Elyaf Oranındaki Artış İle Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi (Vol. 5). <https://doi.org/10.31202/ECjse.415482>
- Davis M. And Bond D., (1999), Principles and Practises Of Adhesive Bonded Structural Joints and Repairs, International Journal Of Adhesion & Adhesives, Vol. 19, 91-105.
- Demir, A., Ay, İ., Üniversitesi, B., Fen, B., Enstitüsü, M. M., Bölümü, B., & Tarihi, A. (2019). Termoplastik Malzemelerin Ultrasonik Kaynağı ve Kaynak Parametrelerinin Çekme Dayanımına Etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 11(3), 177–185.
- Demircan, Ö., Çolak, P., Kadioğlu, K., Günaydın, E., Demircan, O., Çolak, P., ... Flexural, G. E. (2019). Flexural Properties Of Glass Fiber / Epoxy / Mwcnt Composites To Cite This Article Flexural Properties Of Glass Fiber / Epoxy / Mwcnt Composites.
- Deniz, M. E. (2005). Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı.
- Didim, S. (2014). Termoset Kompozitlerin Yüzey Özelliklerinin Yapışmaya Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi.
- Edwards, K.L., (1998), A Brief Insight Into The Selection And Use Of Engineering Adhesives For Preliminary Joint Design. Materials and Design, 19, 121-123.
- Ekrem, M. (2019a). Bor Nitrid Nanoplateletlerin ve Nano Ag Takviyeli Yapısal Yapıştırıcıların Kayma Dayanımı. Journal Of Boron, 4(3), 128–134. <https://doi.org/10.30728/Boron.568138>
- Ekrem, M. (2019b). Hekzagonal Bor Nitrid Nanoplate-Nano Ag/Epoksi Kompozitler: Üretimi, Mekanik ve Termal Özellikleri (Vol. 2019). <https://doi.org/10.31202/ECjse.559083>
- Elaldı, F. (2012). Pekiştirilmiş kompozit Panel için Farklı Birleştirme Yöntemlerinin Yapısal Performans Etkinliği (Vol. 27). Retrieved From <https://dergipark.org.tr/tr/pub/Gazimmfd/issue/6691/88617>
- Engin, K. E., Koyuncu, T., and Lüle, F. (2015). Production Of Different Composite Materials And Determination Of Some Technical Properties. Anadolu Journal Of Agricultural Sciences, 30(1), 43. <https://doi.org/10.7161/Anajas.2015.30.1.43-50>
- Erdem, N., Erdoğan, Ü. H., & Akşit, A. (2015). Nanokompozit polipropilen filamentlerin Nano-Composite Polypropylene Filaments. Tekstil Ve Mühendis, 69.
- Göncü, Y., Onar, İ. C., & Ay, N. (2020). The Effect Of Hexagonal Boron Nitride Addition On Pressureless Sintered Alumina Matrix Composites. Journal Of Boron, 5(1), 40–47. <https://doi.org/10.30728/Boron.633242>
- Gültekin, K., Akpınar, S., Gürses, A., Eroğlu, Z., Cam, S., Akbulut, H., ... Özel, 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>

- Gürsel, A., & Yıldız, S. (2021). Yapıştırıcı Birleştirmelerde Bağlantı Mukavemetini Etkileyen Faktörler: Yüzey Morfolojisi ve Yüzey Enerjisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 987–996. <https://doi.org/10.29130/Dubited.884675>
- Hart-Smith, L.J., (1982), Design Methodology For Bonded-Bolted Composite Joints Technical Report Afwal-Tr-81-3154, Douglas Aircraft Company.
- Jones R., Chiu W.K. and Smith R., (1995), Airworthiness Of Composite Repairs: Failure Mechanisms, Engineering Failure Analysis, Vol 2, 117-128.
- Kalkan, H. (2016). Bor Nitrür Kaplamanın , Kaynak Çapaklarının Metal Aparat Yüzeylerine Yapışma Davranışlarına Etkisi.
- Karagöz, İ., & Öksüz, M. (2016). Termoplastiklerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kullanılan Yöntemler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(Ös1), 19–28. <https://doi.org/10.21605/Cukurovaummfd.311197>
- Karakter, V. E. (2016). Marmara Üniversitesi.
- Loctite Global Tasarım Elkitabı, (1998), Erasmusdruck GmbH, Mainz, Germany.
- Madani K., Touzain S., Feaugas X., Cohendouz S. And Ratwani M., (2010), Experimental and Numerical Study Of Repair Techniques For Panels With Geometrical Discontinuities, *Computational Materials Science*, Vol. 48, 83-93.
- Mayis, O., Tezi, L., Dan, U. A., ve Ali, S. (2020). Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Nr / Br (Doğal Kauçuk / Butadien Kauçuk) Elastomer Karışımlarının Enjeksiyon Nr / Br (Doğal Kauçuk / Butadien Kauçuk).
- Mazumdar, S.K. and Mallick, P.K., (1998), Static and Fatigue Behaviour Of Adhesive Joints In Smc-Smc Composites, *Polymer Composites*, Vol, 19, 139-146.
- Okkaloğlu, M., Pekbey, Y., & Aktaş, A. (2014). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Tipik kompozit Köşe Bağlantılarında Çekme Dayanımının Artırılması (Vol. 55).
- Olgun, Ö. H., ve Çavdar, U. (2018). Termoplastik Matrisli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kaynaklanmasında İndüksiyonla Isıtmanın Etkileri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 1–14. <https://doi.org/10.25092/Baunfbed.480558>
- Öz, M. (2016). Hegzagonal Bor Nitrürün Açık Atmosferde Termal Davranışları. *Cumhuriyet Science Journal*, 37(1), 57. <https://doi.org/10.17776/Csj.38616>
- P. Papanikos, K.I. Tserpes, Sp. Pantelakis, (2007), Initiation And Progression Of Composite Patch Depending In Adhesively Repaired Cracked Metallic Sheets, *Composite Structures*, Vol 81, Pp. 303–311.
- Passos, A. C., Arouche, M. M., Aguiar, R. A. A., Costa, H. R. M., De Barros, S., and Sampaio, E. M. (2021). Adhesion Of Epoxy and Polyurethane Adhesives In Pultruded Composite Material. *Journal Of Advanced Joining Processes*, 3(January), 100045. <https://doi.org/10.1016/J.Jajp.2021.100045>
- Polat Z., (2008), Hasarlı Kompozit Plakaların Tamir Yoluyla Mukavemetlerinin Arttırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 62 S.
- Poyraz, Ö. (2018). Havacılık Komponentlerinin Bakım Uygulamalarında Katmanlı İmalat Teknolojilerinin Kullanımı The Use Of Additive Manufacturing Technologies In Maintenance Applications Of Aviation Components (Vol. 59).
- Rachid M., Serier B., Bouiadjra B.B., Belhouari M., (2012), Numerical Analysis Of The Patch Shape Effects On The Performances Of Bonded Composite Repair In Aircraft Structures, *Composites: Part B*, Vol. 43, 391-397.

- Ramaswamy, K., O'higgins, R. M., Kadiyala, A. K., McCarthy, M. A., and McCarthy, C. T. (2020). Evaluation Of Grit-Blasting As A Pre-Treatment For Carbon-Fibre Thermoplastic Composite To Aluminium Bonded Joints Tested At Static and Dynamic Loading Rates. *Composites Part B: Engineering*, 185(October 2019), 107765. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107765>
- Sayman O., (2011), Elasto-Plastic Stress Analysis İn An Adhesively Bonded Single-Lap Joint, *Composites: Part B*, Vol., 10.1016/j.compositesb.2011.08.006.
- Solmaz M.Y., (2008), Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 150 S.
- Soutis C., Duan D.M. and Goutas P., (1999), Compressive Behaviour Of Cfrp Laminates Repaired With Adhesively Bonded External Patches, *Composite Structures*, Vol. 45, 289-301.
- Şenel, M., Gurbuz, M., ve Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis Ve Makina*, 56(December), 36–47.
- Tayyip, R., Üniversitesi, E., Bilimler, T., Yüksek, M., ve Otomasyon, E. (2017). Öğütülmüş Nano Boyutlu Kolemanit Mineralinin Elementel ve Kristal Yapı Özellikleri. Öğütülmüş Nano Boyutlu Kolemanit Mineralinin Elementel ve Kristal Yapı Özellikleri, 10(2), 303–313. <https://doi.org/10.18185/Erzifbed.334656>
- Temiz Ş., (2003), Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkinin İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi F.B.E, Doktora Tezi, Erzurum.
- Tomblin, J.S., Yang, C. and Harter, P. (2001), Investigation Of Thick Bond Line Adhesive Joint. Final Report, DOT/Faa/Ar, U.S. Department Of Transportation, Washington, Dc.,
- Tse P.C., Lau K.J. and Wong W.H., (2002), Stress and Failure Analysis Of Woven Composite Plates With Adhesive Path-Reinforced Circular Hole, *Composites: Part B*, Vol. 33, 57-65.
- Turan K., (2016), Kompozit Malzemelerde Yapışma Bağlantılarının Mukavemeti Üzerine Yama Fiber Takviye Açısı Etkisi (Araştırma Makalesi), Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 7, Sayı:1, 129-138.
- Turan, K., Kaman, M. O., Teorisi, H. H., Asal, M., ve Hasar, G. (2010). Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında İlerlemeli Hasar Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*; Cilt: 16 Sayı: 3; 315-323, 16(3), 315-323–323.
- U.S. Department Of Transportation Federal Aviation Administration, (2000), Repair Of Composite Laminates, DOT/Faa/Ar-00/46, Office Of Aviation Research Washington, D.C. 20591, Final Report.
- Ulus, H., Kaybal, H. B., Demir, O., Senyurt, M. A., Tatar, A. C., ve Avcı, A. (2018). Improvement İn Adhesive Performance Of Single-Lap Joining Composite Laminates By Using Nano-Montmorillonite Modified Epoxy. *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 163–167. <https://doi.org/10.31202/Elcjse.352486>
- Uzun, H., and Tuyan, M. (2018). Ultrasonik Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cam Fiber Takviyeli Pp Kompozitlerin Birleştirme Mukavemetine Enerji Yönlendirici Türünün Etkisi (Vol. 1). <https://doi.org/10.33793/Acperpro.01.01.18>
- Van Rijn, L.P., (1996), Towards The Fastenerless Composite Design. *Composites Part A*, 27a, 915-920.
- Vinson, J.K., (1989) Adhesive Bonding Of Polymer Composites. *Polymer Engineering and Science*, 29 (19), 1325-1331.
- Volkersen, O., (1938), Die Nietkraftverteilung İn Zugbeanspruchten Nietverbindungen Mit Konstanten Laschenquerschnitten, *Luftfahrtforschung*, Vol 15, 41-47.

- Wah, T., (1973), Stress Distribution In A Bonded Anisotropic Lap Joint, Transactions Of Asme, Series H, J. Of Engineering Materials And Techonology, Vol 95, 174-181.
- Wang, B., Bai, Y., Hu, X., and Lu, P. (2016). Enhanced Epoxy Adhesion Between Steel Plates By Surface Treatment And Cnt/Short-Fibre Reinforcement. Composites Science And Technology, 127, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.03.008>
- Whittingham B., Baker A.A., Harman A. And Bitton D., (2009), Micrographic Studies On Adhesively Bonded Scarf Repaires To Thick Composite Aircraft Structure, Composites: Part A, Vol. 40, 1419-1432.
- Wisnom M.R., (1999), Size Effects In The Testing Of Fibre-Composite Materials, Composite Structures and Tecnology, Vol. 59, 1937-1957.
- Xiaoquan C., Baig Y., Renwei H., Yujian G. And Jikui Z., (2013), Study Of Tensile Failure Mechanisms In Scarf Repaired Cfrp Laminates, International Journal Of Adhesion and Adhesives, Vol 41, 177-185.
- Yastımoğlu, F., & Özkan, A. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 56–66. Retrieved From <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/27453/289129>