

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**B₄C KATKILI KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Miray CAYMAZ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2021**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1.GİRİŞ	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	8
2.1. Kompozit Malzemeler	8
2.1.1. Takviye Malzemesinin Türüne ve Kullanım Şekline Göre Kompozit Malzemeler	9
2.1.1.1. Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozit Malzemeler	10
2.1.1.2. Hibrit (Karma) Takviyeli Kompozit Malzemeler	10
2.1.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	10
2.1.1.4. Elyaf (Lif) Takviyeli Kompozit Malzemeler	10
2.1.2. Matris Malzemesinin Türüne ve Kullanım Şekline Göre Kompozit Malzemeler	13
2.1.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)	13
2.1.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)	14
2.1.2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler (PMK)	14
2.2. Kompozit Malzemeler Üretim Yöntemleri	16
2.2.1. Elle Yatırma Yöntemi (Hand-Lay-up)	16
2.2.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTK)	16
2.2.3. Vakum Torbalama	17
2.2.4. Püskürtme (Sprey Up)	18
2.2.5. Filament Sarma	19
2.2.6. Pultrüzyon (CTP)	19
2.2.7. Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)	20
2.3. Bor Nedir?	21
2.3.1. Bor Karbür (B ₄ C) Nedir?	22
2.4. Triboloji	24
2.4.1. Sürtünme	24
2.4.2. Aşınma	26
2.4.2.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	27
2.4.2.2. Aşınma Mekanizmaları	28
3.MATERYAL ve YÖNTEM	33
3.1. Materyal	33
3.2. Yöntem	34
3.2.1. Epoksi Karışımının Hazırlanması	34
3.2.2. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Sistemi ile Kompozit Malzeme Üretimi	36
3.3. Deneyler	40
3.3.1. Çekme Deneyi	40
3.3.2. Eğilme Deneyi	42
3.3.3. Charpy Darbe Deneyi	43
3.3.4. Sertlik Ölçümü	44
3.3.5. Aşınma Testleri	44
3.3.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	46
3.3.7. Kompozit Malzemelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	48
4.1. Kompozit Malzemelerin Gerilme-Birim Şekil Değişirme Eğrileri	48
4.2. Kompozit Malzemelerin Eğilme Dayanımları	49
4.3. Kompozit Malzemelerin Charpy Darbe Dayanımları	50
4.4. Kompozit Malzemelerin Sertlikleri	51
4.5. Kırık Yüzey Kesit Görüntü Analizi	52

4.6. Kompozit Malzemelerin Yoğunlukları	53
4.7. Kompozit Malzemelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	54
4.8. Kompozit Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları	55
4.8.1. Sürtünme Katsayısı (μ)	55
4.8.2. Aşınma Hacim Kaybı (mm^3).....	57
4.8.3. Özgül Aşınma Miktarı	58
4.8.4. Kompozit Malzemelerde Meydan Gelen Aşınma Mekanizmaları	59
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	62
5.1. Sonuçlar	62
5.2. Öneriler.....	63
KAYNAKLAR	65



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

B₄C KATKILI KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Miray CAYMAZ

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Yıl: 2021, Sayfa:70

Bu çalışmada, B₄C mikropartiküller ve karbon elyaf kumaşlarla birleştirilerek polimer matrisli kompozit malzemeler üretilip bu malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Karbon elyaflara ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7 oranlarında B₄C katılarak vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin Arşimed prensibi ile yoğunlukları, optik mikroskopla mikro yapıları, Rockwell sertlik yöntemiyle ile sertlik değerleri araştırılmış, çekme, üç nokta eğilme, charpy darbe dayanımı, yüzey pürüzlülüğü, aşınma, sürtünme gibi mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda örneklerde B₄C katkı oranına bağlı olarak sertlik ve yoğunluğun arttığı gözlenmiştir. Çekme ve eğilme testi sonucunda malzemelerde %3 katkı oranına kadar çekme ve eğilme dayanımında artış gözlenmiş ve bu orandan sonra düşüş yaşanmıştır. Charpy darbe dayanımı test sonucunda örneklerde sadece %1 B₄C katkı oranında dayanım artmıştır ve diğer katkı oranları arttıkça dayanım değerlerinde paralel bir azalma gözlenmiştir. Kırık yüzeylere yapılan kesit yüzey analizi sonucunda örneklerde katkı miktarına bağlı olarak kırık yüzeylerde herhangi bir farklılığa rastlanmamıştır. Örneklerin yüzey pürüzlülüğünde maksimum değer saf malzemede yakalanmış olup daha sonra değerlerde düşüş gözlenmiştir. Sürtünme ve aşınma testlerine göre B₄C katkısı sonucu örneklerin sürtünme, aşınma hacmi ve özgül aşınma oranında azalma olmuştur. Aşınan yüzeylerden alınan optik mikroskop görüntüleri neticesinde malzemelerin aşınma mekanizmasında abrasiv aşınmanın meydana geldiği gözlenmiştir. Sonuç olarak karbon kumaşa eklenen B₄C katkısının mekanik ve tribolojik özellikleri iyileştirdiği bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: B₄C, Kompozit Malzemeler, Mekanik Özellikler, Triboloji

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION of MECHANICAL and TRIBOLOGICAL PROPERTIES of B₄C-DOPED CARBON FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES

Miray CAYMAZ

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Bülent AKTAŞ
Year:2021, Page:70**

In this study, B₄C microparticles and carbon fiber fabrics were combined with polymer matrix composite materials and mechanical and tribological properties of these materials were examined. Production was carried out by vacuum-assisted resin infusion method by adding B₄C in 1, 3, 5 and 7% by weight to carbon fibers. Mechanical and tribological properties such as tensile, three-point bending, charpy impact resistance, surface roughness, wear, friction were examined. As a result of the examinations, it was observed that hardness and density increased depending on the ratio of B₄C additives in the samples. As a result of the tensile and bending test, an increase in tensile and bending strength was observed in materials up to a 3% additive rate, and after this rate, a decrease was observed. Charpy impact resistance as a result of the test, the strength of the samples increased by only 1% of the B₄C contribution rate, and a parallel decrease in the strength values was observed as other contribution rates increased. As a result of cross-sectional surface analysis of broken surfaces, no differences were found on broken surfaces depending on the amount of contribution in the samples. The maximum value in the surface roughness of the samples was captured in pure material, and then a decrease in values was observed. According to the friction and wear tests, the friction, wear volume and specific wear rate of the samples were reduced as a result of the B₄C contribution. As a result of optical microscope images taken from worn surfaces, abrasive wear occurred in the wear mechanism of materials. As a result, B₄C additive added to carbon fabric was found to improve mechanical and tribological properties.

KEYWORDS: B₄C, Composite Materials, Mechanical Properties, Tribology

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışması süresince bana her konuda yardımcı olan, bilgi, beceri, tecrübelerini benimle paylaşan, motive eden saygıdeğer danışman hocam Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Bülent AKTAŞ hocama en içten dileklerle teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışması boyunca her konuda rahatça danışabildiğim tezin başlangıcından bitimine kadar her anlamda benden tecrübe ve bilgilerini esirgemeyen hocalarım Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Abuzer AÇIKGÖZ ve Arş. Gör. Gökhan DEMİRCAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca, özellikle laboratuvar çalışmalarında bana destek olan, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mustafa ÖZEN'e yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, bana her zaman güvenip yanımda olan, benden desteklerini, anlayışlarını esirgemeyen canım annem Hanım CAYMAZ, babam Kadir CAYMAZ ve üç değerli kardeşlerime ve yengeme en içten teşekkür, sevgi ve saygılarımı sunarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin farklı özellikleri (Karasu, 2014).	8
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Bodur, 2016).....	9
Şekil 2.3. Karbon elyafın uçakta kullanılması (Gay ve ark., 2003).....	12
Şekil 2.4. El yatırma yönteminin şematik gösterimi (Poliya, 2017).....	16
Şekil 2.5. Reçine transfer kalıplama yöntemi (Gay vd., 2003).....	17
Şekil 2.6. Vakum torbalama yöntemi (Campbell ve ark., 2004).	17
Şekil 2.7. Püskürtme yöntemi (Chawla, 2011).	18
Şekil 2.8. Filament sarma yöntemiyle kompozit malzeme üretilmesi (Dil, 2016).	19
Şekil 2.9. Pultrüzyon yöntemi üretim prosesi (Barbero ve ark., 2018).	20
Şekil 2.10. VARTM üretim aşamaları (Goren and Atas, 2008).	21
Şekil 2.11. Bor elementi kristal yapısı (URL-1, 2021).....	22
Şekil 2.12. B ₄ C kristal yapısı (Wiley, 2011).	23
Şekil 2.13. Triboloji sisteminin yapısı (Odabaş vd., 1995).	24
Şekil 2.14. Sürtünme kuvveti mekanizması (Mang, 2007).	25
Şekil 2.15. Aşınma mekanizması (Karl-Heinz ve ark., 1987).....	26
Şekil 2.16. Adhezif aşınma mekanizması (Ercenk, 2011).....	29
Şekil 2.17. Abrasiv aşınma mekanizması (Stachowiak ve ark., 2011).....	29
Şekil 2.18. Erozyon aşınma mekanizması (Stachowiak ve ark., 2005).	30
Şekil 2.19. Yorulma aşınma mekanizması (Stachowiak ve Batchelor, 2011).	31
Şekil 2.20. Korozif aşınma mekanizması (Kato ve Adachi, 2001).	31
Şekil 3.1. B ₄ C partiküllerinin tartılması.....	34
Şekil 3.2. Epoksi ile B ₄ C partiküllerinin birleştirilmesi	35
Şekil 3.3. Epoksi karışımının ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması.....	35
Şekil 3.4. Karbon elyaf kumaşlar	36
Şekil 3.5. Kalıp ayırıcı film ve sızdırmazlık bandının zemine yerleştirilmesi	36
Şekil 3.6. Karbon elyaf kumaşlarının film üzerine serilmesi	37
Şekil 3.7. Soyma kumaşların karbon elyaf kumaşları üzerine serilmesi	37
Şekil 3.8. Yeşil infüzyon filesinin soyma kumaş üzerine serilmesi	38
Şekil 3.9. Bağlantı parçalarının sisteme yerleştirilmesi	38
Şekil 3.10. Sistemin vakum poşeti ile kaplanması	38
Şekil 3.11. Epoksi karışımının sisteme infüzyonu	39
Şekil 3.12. Üretilen kompozit plakalar	39
Şekil 3.13. Kompozit Plaka boyutları	40
Şekil 3.14. Çekme Deneyi.....	41
Şekil 3.15. Eğilme Deneyi.....	43
Şekil 3.16. Charpy Darbe Deneyi.....	43
Şekil 3.17. Rockwell sertlik cihazı	44
Şekil 3.18. TRD marka pin-on-disk Aşınma Test Cihazı.....	46
Şekil 3.19. Time TR 200 model profilmetre cihazı	46
Şekil 3.20.a. Malzemenin havada asılı ağırlığının ölçülmesi,Şekil 3.20.b. Malzemenin su içerisindeki ağırlığının ölçülmesi.....	47
Şekil 4.1. Saf ve B ₄ C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	48
Şekil 4.2. Numunelerin 3 noktadan eğilme testi eğrileri	49
Şekil 4.3. Saf ve B ₄ C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin Charpy darbe testi grafiği.	50
Şekil 4.4. Numunelerin katkı oranına göre sertliklerindeki değişim	51

Şekil 4.5. Çekme numunelerinin kırık yüzey kesit görüntü analizi; a) saf, b) %1, c) %3, d) %5, e) %7 B ₄ C katkılı.....	52
Şekil 4.6. Çekme numunelerinin kırık yüzey kesit görüntü analizi d)%5, e)%7 B ₄ C katkılı.....	53
Şekil 4.7. Kompozitlerin yoğunlukları.....	54
Şekil 4.8. Yüzey pürüzlülük değerleri.....	55
Şekil 4.9. Kompozitlerin zamana karşı sürtünme katsayısı.....	56
Şekil 4.10. Kompozit malzemelerde meydana gelen hacimce aşınma kaybı.....	57
Şekil 4.11. Kompozit örneklerin B ₄ C katkı miktarına göre özgül aşınma miktarları.....	58
Şekil 4.12. 20N yük altında test edilen numunelerin 5X büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri a)0 (saf), b)%1, c)%3, d)%5, e)%7 B ₄ C katkılı.....	59
Şekil 4.13. 20N yük altında test edilen numunelerin 5X büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri a)0 (saf), b)%1, c)%3, d)%5, e)%7 B ₄ C katkılı.....	60



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 3. 1. B ₄ C Teknik özellikleri.....	33
Çizelge 3. 2. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri.....	33
Çizelge 3. 3. Karbon elyaf teknik özellikleri.....	34
Çizelge 4. 1. Numunelere ait çekme gerilmesi değeri	48
Çizelge 4. 2. Numunelere ait eğilme dayanımı değerleri.....	50
Çizelge 4. 3. Numunelere ait darbe enerjisi değerleri.....	51
Çizelge 4. 4. Numunelere ait sertlik değerleri.....	52
Çizelge 4. 5. Numunelere ait yoğunluk değerleri.....	53
Çizelge 4. 6. Numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	54
Çizelge 4. 7. Kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri.....	56
Çizelge 4. 8. Kompozit malzemelere ait aşınma hacim kayıpları.....	57
Çizelge 4. 9. Numunelere ait özgül aşınma değerleri	58
Çizelge 4. 10. Aşınma İz Çap Değerleri (mm).....	58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
AMK	Alimünyum matrisli kompozitler
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
B	Bor
B ₂ O ₃	Bor oksit
B ₄ C	Bor Karbür
Ca ₂ O ₄ Si	Kalsiyum silikat
CaSiO ₃	Kalsiyum metasilikat
HCL	Hidroklorik asit
KE	Karbon Elyaf
MMK	Metal matrisli kompozitler
PMK	Polimer matrisli nanokompozitler
PP	Polipropilen
RTK	Reçine tranfüzyon kalıplama
Si ₃ N ₄	Silikon nitrür
SiC	Silisyum karbür
SiO ₂	Silisyum dioksit
SMK	Seramik matrisli kompozitler
VARTM	Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi
XRD	X ışınları difraktometresi

1.GİRİŞ

Gelişen ve değişen dünyamızın sunduğu yenilikler hayat kolaylaştırıcı olmakla beraber bazı zor getirilere de yol açmaktadır. Mühendislik dünyası 50.000'den fazla malzeme bulunan malzeme biliminde yeni ve çeşitli özelliklere sahip malzeme arayışları sonucunda çözüm olarak rotasını kompozit malzemelere yöneltmekte bulmuştur. Tek bileşen yerine her bir bileşenin olumlu özelliklerinden faydalanılarak tasarlanan kompozit malzemeler; seramik, metal, yarı iletken ve polimer malzeme çeşitlerine nazaran daha geniş bir yelpazede yeni özellikler meydana getirmesi sebebiyle diğer malzeme çeşitlerinden üstün hale gelip son yıllarda bu alanda çalışmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur.

Kompozit malzemeler anizotropik ve heterojen yapısı gereği malzemelere istenilen doğrultuda üretilebilirlik, düşük maliyet, dayanıklılık, sertlik, uzun yorulma ömrü, ısı iletkenliği, ısı yalıtımı, düşük yoğunluk, aşınma ve korozyon direnci gibi eşsiz avantajlara sahip olup, malzeme üretimine önemli katkılar ve yenilikler getirmektedir. Heterojen ve anizotropik yapıda olması optimum konfigürasyona sahip bir yapı tasarlama özgürlüğü sağlamaktadır (Daniel ve Ishai 1994).

Kompozit malzemelerin geçmişi çok eski yıllara dayanmakla beraber yaygın kullanım alanına sahip olması 1960'larda polimerik malzemelerin üretilmesiyle gerçekleşmiştir. Geniş alanlara yayılması (otomotiv, sanayi, havacılık, petrol endüstrisi vb.) bu alandaki çalışmaları ve rekabet ortamını arttırmıştır (Mazumdar ve ark., 2018).

Polimer matrisli kompozitler günümüzde çok fazla tercih edilen havacılık sektörü, spor malzemeleri, vb. yüksek maliyete sahip veya otomotiv sektörü, beyaz eşyacılık, boru imalatları gibi daha birçok düşük maliyet gerektiren malzeme üretimleri için ortak üretim sahası olmaktadır. Bu bağlamda bakılacak olursa -özellikle de teknolojinin sürekli gelişmesi göz önüne alındığında- güçlü, yüksek mukavemetli,

eğilme ve darbelere, yüksek ısıl işlemlere dayanıklı matris malzemelerle beraber kullanım alanlarının daha da artacağı tahmin edilmektedir (Huten, 2003).

Wetzel ve ark. (2003) epoksi esaslı polimer kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarında takviye malzemelerinin türü, karışım oranı, farklı tane boyutunda eklenen takviye malzemelerinin matris içerisindeki homojen dağılımı gibi unsurların kompozit malzemeye olan etkilerini incelemiştir. Epoksiye katılan nano Al_2O_3 (13 nm) 'ün sertlik ve darbe dayanımını aynı anda iyileştirdiğini ve yüksek mekanik özellikler sağlamak için %2 oranında eklenen mikro $CaSiO_3$ (4-15 µm) partiküllerinin elastite modülünü ve aşınma direncini arttırdığını tespit etmişlerdir. Deney sonuçları Al_2O_3 ve $CaSiO_3$ partiküllerinin aşınma özelliklerini olumlu yönde etkilediği ancak partiküllerin yüzeye yaklaştıkça aşınmanın şiddetlenmesine sebep olduğunu göstermiştir.

Karbon elyaflar başlarda karbon atomunun yüksek elektrik iletkenliği baz alınarak üretilmiştir. Daha sonra epoksi matrisler ile birleştirilmesi denenmiş, yüksek sertlik ve mukavemet özellikleri keşfedilince çeşitli karbon elyaf üretimleri başlamıştır. Yüksek üretim maliyeti sebebiyle spor ve tıbbi malzemeler, uçak sanayisi alanlarında kullanılmaktadırlar (Arıcasoy, 2006; Er, 2004; Hüner, 2014).

Suresha ve ark. (2006), cam örgü/epoksi kompozitleri ve karbon örgü/epoksi kompozitleri pin on disk yöntemiyle sürtünme ve aşınma özelliklerini kıyaslamışlardır. Deneyleri oda sıcaklığında, 5000 m kayma mesafesinde, 20, 40, 60, 80 N yüklerde ve 2, 3, 4, 5 m/s hızlarda gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda yük ve hızlara bakmadan karbon epoksi kompozitlerde cam epoksi kompozitlere oranla daha düşük aşınma ve sürtünme meydana geldiğini söyleyebilmişlerdir.

Misra ve ark. (2004) 8 µm boyutunda kalsiyum silikatu (Ca_2O_4Si) takviye malzemesi olarak kullanıp etilen-propilen ve polipilen malzemelerin yüzey hasar davranışlarını iyileştirmeyi hedeflemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda polimer malzemelere takviye edilen Ca_2O_4Si 'nin polimer malzemenin yüzey hasarlanma direncini iyileştirdiğini ve ara yüzey mukavemetini olumlu yönde etkilediğini

vurgulamışlardır. Amerio ve arkadaşları (2008) da nanokompozitler üzerine yaptıkları kaplamalarda benzer yorumları kullanmışlardır.

Badie ve ark. (2011) karbon, cam elyaf ve epoksi kullanarak otomobil şaftı üretip yorulma, eğilme deneyi ve gerilme analizleri yapmışlar ve karbon elyaf ile üretilen örneklerin cam elyaftan iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Shi ve ark. (2003) ağırlıkça farklı oranlarda ve nano boyutta Si_3N_4 ve epoksiyi birleştirerek nanokompozit malzemeler üretilip, eğilme, Charpy çentik darbe dayanımı, sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Burada artan nano Si_3N_4 takviyesinin sürtünme ve aşınma davranışlarını iyileştirdiğini, eğilme ve Charpy çentik darbe dayanımını arttırdığını görmüşlerdir.

Baptista ve ark. (2016) epoksi içerisine farklı miktarlarda grafit (%0-30) partikül ekleyerek kompozit malzeme üretilip, bu kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Deneylerinde grafit takviyesi artışına paralel olarak kayma, eğilme ve çekme modüllerinin de arttığını ayrıca epoksi reçinesi arttıkça çekme gerilmesinin azaldığını görmüşlerdir. Grafit partikül takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin aşınma özelliklerini iyileştirdiğini ve buna grafitin aşınmada ekstra yağlama özelliği göstermesinin büyük etkisi olduğunu söylemişlerdir.

Das ve Satapathy (2011) yaptıkları çalışmalarda polipropilen (PP) içerisine farklı oranlarda senosfer takviyesi yaparak kompozit malzeme üretmişler ve bu malzemelerin çekme, eğilme, darbe dayanımları üzerinde durmuşlardır. Deneyler sonucunda senosfer takviyesinin artışıyla beraber elastite modülü de artmış ancak çekme ve darbe dayanımında duruma zıt olarak düşüş gözlenmiştir.

Nasir ve Azizan (2011) epoksi kompozitlere takviye ettikleri kırpıntılı ve örgü tipli cam elyaflarla kompozit malzeme üretilerek üzerinde tribolojik deneyler gerçekleştirmişlerdir. Farklı yüklerle (10-30N) ve farklı aşındırma hızlarında (0,033-1,022 m/s) gerçekleştirilen aşınma deneylerinde Pin-on-disk aşınma prensibi

kullanılmış, örgü tipli cam elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma özelliklerini kırpıntılı cam elyaflara göre daha fazla iyileştirdiğini tespit etmişlerdir.

Larsen ve ark. (2007) çalışmalarında epoksi esaslı cam elyaf örgülü ve karbon/aramit hibrit örgülü kompozitleri elle yatırma yöntemiyle üretilen tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı hacimlere sahip fiberlerle ve farklı boyutlara sahip takviyelerle üretilen kompozit malzemeler pin-on-disk aşınma prensibi ile aşınma deneyine tabii tutulmuştur. Deneyler; farklı kayma hızlarında (1,3,6 m/s) gerçekleştirilmişlerdir. Karbon elyafın yağlayıcı özelliği ve aramid elyafların mikro çatlakları tutucu etkisine bağlı olarak aramid elyaflardan elde edilen sürtünme katsayısı değerleri %35 daha düşük ölçülmüştür. En yüksek aşınma oranı cam elyaf örgülü kompozitlerde görülmüştür.

Suresha ve ark. (2006) karbon örgü-epoksi kompozitleri ve cam örgü-epoksi kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını kıyaslamışlardır. Farklı yüklerde (20-40-60-80 N) ve farklı aşınma hızlarında (2-3-4-5 m/s) gerçekleştirilen deneylerde uygulanan yüklere hızlara bakmadan karbon epoksi kompozitlerin cam epoksi kompozitlerden daha düşük sürtünme ve aşınma kaybına yol açtığı gözlenmiştir.

Subbaya ve ark. (2012) tribolojik özellikler üzerine yaptıkları çalışmalarında silisyum karbür dolgusu ekledikleri karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlere yer vermişlerdir. Taguchi L9 ortogonal deneysel tasarım modülüne göre hazırlanan numuneler pin-on-disk aşınma prensibiyle aşınma deneyine tabii tutulup deneylerde ağırlıkça farklı dolgu oranları (%0, 5, 10), farklı yük miktarları (5, 10, 15N), farklı kayma hızı (25, 50, 75m) ve farklı abrasiv parça büyüklüğü (80, 150, 320) parametreleri uygulanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda kompozitlere eklenen SiC dolgusunun aşınma özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir.

Akın (2006) toz metalürjisi yöntemiyle Al-B₄C katkılı kompozitler üretilip, aşınma ve korozyon dirençlerini inceleyerek en uygun üretim değerlerini bulma yoluna gitmiştir. Deneyler sonunda %9 B₄C takviyesine kadar aşınma direncinin arttığı, bu katkı miktarından sonra düştüğü gözlenmiştir. Yine bu katkı miktarında

korozyon direncinde artma görülmüş numuneye yapılan ara deformasyon buna sebep olarak gösterilmiştir. Sertlik değerinin katkıyla doğru orantılı olarak artmasına karşın, korozyon direncinde de düşüş meydana gelmiştir. İdeal üretim parametrelerinde sertlik baz alınmış, 570°C’de 12 saat sinterleme optimum değer olarak belirlenmiştir.

Kumdalı (1998) alüminyum matrisli kompozitlerde en çok kullanılan takviyenin SiC ve Al₂O₃ olduğunu söylemiştir. Sıcaklıkla artan çekme gerilmesi, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk gibi pozitif özelliklere sahip B₄C’nin çok fazla tercih edilmemesinin sebebini yüksek maliyete bağlamıştır.

Zhang ve ark. (2004) farklı takviye boyutu ve ağırlıkça farklı oranlara sahip B₄C tozlarını soğuk izostatik presleme ve sinterleme sonrasında ekstrüzyon ve sıcak izostatik presleme ile 6092 Al matrisle birleştirip bu iki ayrı üretim yollarının metal matrisli kompozitler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda üretim yollarının kompozitin matris dayanımı ile mikro yapısı üzerindeki etkisinin fazla olduğunu, sıcak izostatik preslemede ara yüzeylerde hasarlar meydana geldiğini, takviye oranının da mikro yapıya etkisi olduğunu ve artışına bağlı olarak malzemenin dayanımının arttığını belirtmişlerdir.

Mohanty ve ark. (2008) yaptıkları çalışmalarda matris malzemesi olarak farklı boyutlara (35-45 µm) sahip alümina tozlar içerisine ağırlıkça farklı oranlarda (%6,10,15,25) B₄C katkısı ekleyerek AMK üretilen mekanik ve mikro yapı özellikleri incelemişlerdir. Katkısız alümina içerisine eklenen %25 B₄C katkısıyla birlikte malzeme dayanımında 183 MPa artış gözlenmiştir. Katkı miktarına paralel olarak elastik modülünde artış yaşanırken, eğilme direncinde ve elektriksel iletkenliğinde azalma görülmüştür. Metal matrisli kompozit malzemelerin özelliklerinin iyileştirilebilmesi için iç yapıdaki gözeneklerin azaltılması ve ara yüzey bağının artırılmasını söylemişlerdir.

Topçu ve ark. (2009) toz metalürjisi ile ürettikleri alüminyum matris içerisine farklı takviye miktarlarında B₄C ekleyerek bu kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki deformasyon özelliklerini incelemişlerdir. 650°C’de sinterlenen numunelere yapılan

deneyler sonucunda takviye oranına bağı olarak sertlik değerlerinin arttığını, darbe dayanımının azaldığını görmüşlerdir.

Wonderly ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada vakum destekli reçine infüzyon (VARTM) ile karbon elyaf/vinil ester kompozit ve cam elyaf vinil ester kompozitler üretip mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Numunelerin çekme, sıkıştırma, delik açık çekme ve delik açık sıkıştırma, enine çekme, çentik ve balistik çarpma testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karbon fiber çekme ve çentik darbe dayanım değerleri cam elyaflara göre daha yüksek bulunmuştur.

Dong and Davies (2013) çalışmalarında cam elyaf ve karbon elyafları farklı kalınlıklarda (h) ve farklı oranlarda takviye ederek, cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli hibrit kompozit malzemeleri el yatırma yöntemiyle üretmişlerdir. Saf cam elyaf, saf karbon elyaf ve cam + karbon elyaf birleşimiyle üretilen numunelere uygulanan 3 nokta eğilme deneyleri farklı ankastre aralığında yapılarak elde edilen veriler ANSYS programı ile çözüme ulaştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda elyaf + karbon elyaf kompozitlerin eğilme dayanımını saf karbon elyafa göre %16.6 ve saf cam elyafa göre %42.58 arttırdığı gözlenmiştir.

Pıhtılı (2009) epoksi ve polyester matrislerle ürettiği cam örgü elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma özelliklerini kıyaslamıştır. Blok on şaft cihazıyla farklı yüklerde (5-10N), farklı aşınma hızlarında (0.39-0.557m/s) gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucunda polyester matrisli kompozitlerin elyaf matrisli kompozitlere göre daha çok aşınmaya uğradığını, ayrıca artan yük ve hıza bağı olarak artan sıcaklığın aşınma miktarının arttırdığını tespit etmişlerdir.

Topçu ve ark. (2009) farklı oranlara sahip (%5-10-15-20) B₄C takviyeli alümiyum matrisli kompozitler üretip mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 3 farklı sıcaklıkla (600-625-640°C) sinterlenen numunelerin sertlik, yoğunluk ölçümleri, XRD ve SEM analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Artan sıcaklık miktarıyla beraber yoğunluk değerlerinde artış gözlemişlerdir. Artan B₄C'ye bağı olarak sertlik değerlerinde artış yaşanırken, sıcaklık artışı da sertliği arttırmıştır. B₄C artışıyla beraber Charpy darbe

dayanımında azalma meydana gelmiştir. Kompozit malzemelerin sürünme davranışları da incelenmiştir. Sürünme testleri için numuneler 1 saat 650°C 'de sinterlenerek 400 ve 450°C 'de sürünme testleri yapmışlardır.6 saat süren test sonucunda B₄C katkısının artmasıyla beraber sürünme gerilmesinde azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

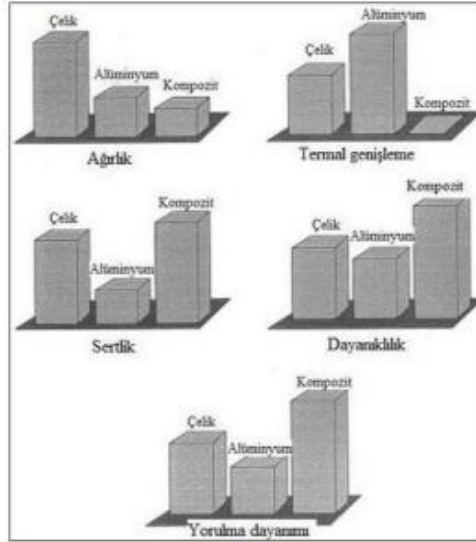
Yukarıda verilen literatür taramasına göre B₄C ve karbon elyafla ilgili çok sayıda mekanik ve tribolojik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak literatür tarama sonuçlarına göre B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeye dair bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi başlıklı çalışma özgün kabul edilebilir.

2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler iki veya ikiden fazla bileşenin birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde bir araya getirilmesiyle oluşan ve kendisini meydana getiren bileşenlerden daha iyi özelliklere sahip olmasını sağlayan malzeme kombinasyonudur. Bu malzemelerin istenilen özellikler doğrultusunda üretilmesi geleneksel malzemelerin önüne geçmesini sağlamıştır. Kompozit malzemelere ait bazı özellikler aşağıda belirtilmiştir:

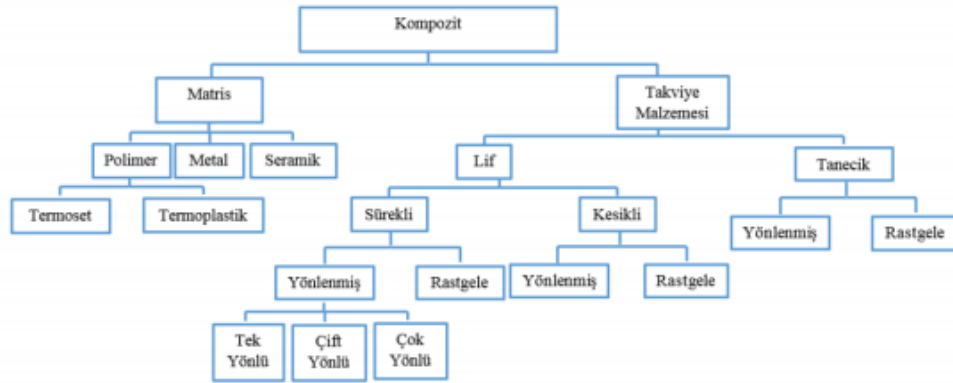
- Düşük ağırlık, sertlik ve boyutsal kararlılık,
- Isı, ses, elektriksel yalıtkanlık
- Yüksek güçte ağırlık oranı,
- Tasarım konusunda çeşitlilik,
- Mekanik ve yorulma dayanımı,
- Hafif ve sertlik Boyutsal kararlılık
- Korozyon, hava şartları, kimyasal maddelere dayanım



Şekil 2.1. Çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerin farklı özellikleri (Karasu, 2014)

Kompozit malzemelerin çelik ve alüminyum malzemelere göre bazı özellikleri Şekil 2.1’de verilmiştir.

Her kompozit malzeme sertlik ve mukavemet sağlamak amacıyla eklenen takviye ve takviyeleri bir arada tutan matris sisteminden meydana gelir. Bu iki ana malzeme kompozitin sahip olması istenilen özellikler doğrultusunda seçilir. Farklı kullanım alanları için seçilen takviye ve matris malzemelerinin çeşitliliği kompozit malzemelerin iki ana başlığa ayrılmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Bodur, 2016)

2.1.1. Takviye Malzemesinin Türüne ve Kullanım Şekline Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemenin ikincil fazı olan takviye fazı; matris içerisinde dağılarak malzemeye istenilen özelliğin verilmesini sağlar. Esas görevi malzemeye sertlik ve dayanım katmak olan takviye fazının kompozit malzemelerin aşınma dayanımı, elektriksel ve termal iletkenlik ve kontrollü termal genleşme özelliklerine olan katkısı da büyüktür (Miracle ve ark., 2001).

Bu özellikler neticesinde kompozit malzemeler takviye türüne göre 4 kısma ayrılmıştır:

- Partikül (Parçacık) Takviyeli Kompozit Malzemeler,
- Hibrit Takviyeli Kompozit Malzemeler,
- Tabakalı Takviyeli Kompozit Malzemeler,
- Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler.

2.1.1.1. Parçacık (Partikül) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler; parçacık veya pul boyutuna sahip takviye malzemesinin alaşım ve seramikler gibi matris içerisinde dağılmasıyla meydana gelmektedir. Partiküller çeşitli ve keyfi birleştirilebilmekte olup matris içerisinde tamamen dağılması, çok küçük ve birbiriyle yaklaşık boyutlara sahip olması malzemenin mukavetini arttırmaktadır. Genellikle beton üretiminde alüminyum ve çakıl, kum ve çimentoda kauçuk SiC parçacıklarında alüminyum tercih edilmektedir (Kaw, 2006).

2.1.1.2. Hibrit (Karma) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Farklı özelliklere sahip en az iki ya da daha fazla takviye elemanının birleştirilmesiyle meydana gelen güçlendirilmiş kompozitlere hibrit takviyeli kompozitler denir. Bu kompozitler üretilirken istenilen mekanik, termal ve tribolojik özellik doğrultusunda takviye elemanları (elyaf/dolgu) seçilir. Üretim ve maliyet açısından avantaj sağlamaları sebebiyle endüstride sıklıkla tercih edilmektedir.

2.1.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Birden fazla elyafların levhalar halinde üst üste yönlendirilmesiyle meydana gelen kompozit malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Sürekli yük, ısı ve nem dayanımı, düşük üretim maliyeti, yüksek dayanım, hafiflik, aşınma, korozyon direnci, sayesinde geleneksel malzemelere göre en çok kullanılan ve en eski kompozit çeşididir.

2.1.1.4. Elyaf (Lif) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler; takviye kısmını elyafların oluşturduğu malzemeler olup istenilen kalınlıkta üretim yapmak için ince liflerin ve matrislerin yerleştirilmesiyle meydana gelirler. Kullanılan elyaflar malzemenin tribolojik, termal

özellikle mekanik özelliklerini geliştirmektedir. Elyaf takviyeli kompozitler; yüksek dayanımlı elyaflar ve elyaflar arasında yük taşıma işlemini gerçekleştirerek malzeme yapısını bir arada tutan ve ortamdaki koruyan bir matristen meydana gelir (Karataş, 2008). Bu matris sistemi malzemenin şekil değişimine olan direncini artırır ve malzemenin çekme, eğilme, darbe gibi mekanik özelliklerini iyileştirir.

Elyafın temel görevi malzemede sertlik ve dayanım oluşturmaktır. Bu özellikler sadece elyaf türüne bağlı olmayıp; elyafların malzeme içerisindeki hacimsel miktarına bağlı olarak da değişir. Malzeme içerisinde hacimce artan elyaf miktarına bağlı olarak mukavemette artış gözlenirken, bu artışta aşırıya gidilmesi durumunda matris malzeme miktarının azalması gerçekleşir ve matris elyafları bağlayamaz hale gelir. Bu durumda malzeme mukavemetinde azalma meydana gelir (Şahin, 2006). Dolayısıyla burada elyaf ve matris miktarının doğru ayarlanması oldukça önem taşır. Benzer şekilde elyafların ve matrislerin istiflenme yönleri de malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Aynı takviye ve matris malzemelerinin elyaf yönelim sırası değiştirilerek farklı özellikler meydana getirmek mümkündür (Mallick, 1989).

Kullanılan elyaflar polikristal veya amorf olabilir, cam, karbon, kevlar (aramid), bor, alüminyum oksit ve silisyum karbür sık tercih edilenler arasındadır. PMK'lerde yaygın olarak tercih edilen 3 elyaf çeşidi vardır:

- Cam Elyaf
- Karbon Elyaf
- Aramid Elyaf

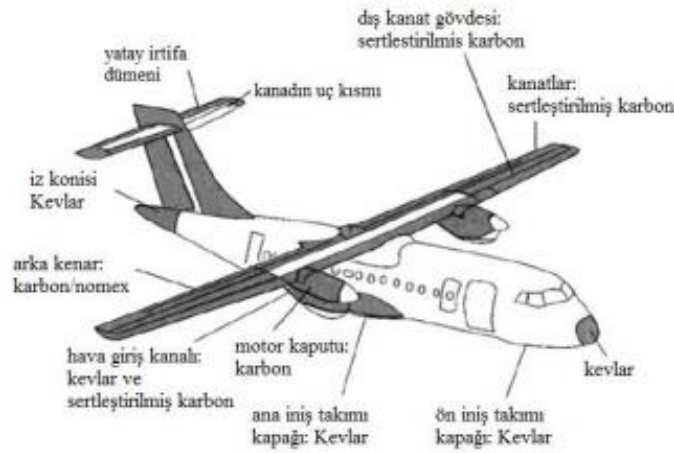
Cam Elyaf

Cam elyaflar birincil ham maddesi silika kumu olan, boron, sodyum, alüminyum, kalsiyum ve demir oksitlerden oluşan, kompozitlerde -özellikle PMK- en yaygın ve en eski kullanılan elyaf çeşididir (Chawla, 1987). Diğer elyaflara göre daha düşük maliyete sahip olan cam elyaflar yüksek çekme gerilmesi, yalıtıcılık, düşük ısı direnci özelliklerine sahiptir. Geçmişte havacılık sektöründe hafiflik sağlamak

amacıyla metallerin yerine kullanılmaya başlanmıştır ancak sonralarda daha yüksek dirence sahip olmasına rağmen daha hafif olduğu gerekçesiyle yerini karbon elyafa bırakmıştır. Cam elyafların özellikleri, elyaf üretim prosesine ve bu prosesde kullanılan kaplamalara, takviyelere, filament çapına, liflerin boyutlandırılmasına, cam tipine göre değişir.

Karbon Elyaf

Karbon elyaflar bileşimlerinde %92 karbon bulunan amorf karbon ve grafitik karbon bileşiklerinden meydana gelmektedir. Karbon atomları arasında güçlü bağlar vardır ancak düzlemler arası zayıf Van Der Wals bağlarının mevcuttur (Mallick,2007). Yorulma dayanımı çok yüksektir ve gerilme mukavemeti, 4.5 kat hafif olduğu çelikten 3 kat daha fazladır. Bu sebepten en fazla havacılık endüstrisinde kullanılmakta olup, spor malzemeleri, otomotiv parçaları, yüksek basınçlı gaz depolama vb. üretimlerde yüksek teknoloji alanlarında da tercih edilmektedir.



Şekil 2.3. Karbon elyafın uçakta kullanılması (Gay ve ark., 2003)

Fiziksel, kimyasal, mekanik, termal ve elektriksel özellikleri yönlendirebilmesi sayesinde çeşitli ticari alanlara uygun hale gelmesine sebep olmuştur ancak yüksek maliyet sebebiyle kullanım alanı daha geniş sektörlere ulaşamamıştır. Cam ve kevlar elyafa göre daha iyi birleşime sahiptir ancak maliyet sebebiyle -özellikle cam elyaf-

daha az kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe kullanılan karbon elyafların uçakta kullanıldığı kısımlar Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Aramid (Kevlar) Elyaf

Aramid elyaf “aromatik polyamid” kelimelerinin kısaltılmasıyla meydana gelmiştir. Kevlar ya da Twaron ticari ismiyle bilinmektedir. Farklı formlara ve anizotropik yapıda olan kevlar lif diğer elyaf türlerine göre sıcaklığa en dayanıklı liftir. Yüksek darbe dayanımı ve çekme gerilmesine, düşük yoğunluk özelliği sayesinde yüksek teknoloji gerektiren uzay endüstrisinde, denizcilik alanlarında, balistik sistemlerde, koruyucu giysilerde, çelikten 5 kat dayanıklı olması sebebiyle de halat üretiminde kullanılmaktadır. Tribolojik özellikleri çok iyi olmakla beraber basma gerilmesinde aynı durum söz konusu değildir (Onuk, 1994).

2.1.2. Matris Malzemesinin Türüne ve Kullanım Şekline Göre Kompozit Malzemeler

Matris kompozit malzemelerin birincil fazı olup malzeme içerisindeki takviyeleri özellikle elyafları birbirine bağlamak, yük dağılımını sağlamak, malzemeyi dış etkenlere karşı korumak, mekanik, kimyasal dayanımlarını ve yüzey kalitesini arttırmak gibi görevlere sahiptir. Yüksek süneklik ve tokluk özelliklerine sahip olması da malzeme içerisindeki çatlakların yayılmasını azaltmaktadır (Barbero, 1999; Beşergil, 2016; Kalpakjian ve ark., 2009). Kompozit malzemeler matris türüne göre 3 ana bölüme ayrılmaktadır:

- Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMC)
- Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)
- Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler (PMK)

2.1.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)

Metal matrisli kompozitler metal bazlı matris sisteminden -genellikle sünek metal- meydana gelen kompozit malzeme tipidir. Malzemedeki kullanılacak olan metal,

malzemenin uygulama alanına bağlı olarak seçilmektedir. En yaygın kullanılan metaller alüminyum ve bakır alaşımlarıdır. Gelişen teknolojiye bağlı olarak geleneksel alaşımlar terk edilip yeni teknolojik çalışmalara yön verilmiştir. Malzeme dayanımını, sertliğini arttırmak ve malzemeye şekil, boyut olarak istenilen özelliği kazandırmak için matrise uygun takviye elemanı seçmek yeterlidir. Takviye ve matris ara yüzey dağılımının yeterliliği, doğru tasarım teknikleri, metal ve takviye malzemesinin doğru kombinasyonu sonucunda meydana gelen MMK'ler güçlendirilmiş mekanik özellikleri, düşük ağırlıkları sebebiyle özellikle son 10 yılda otomotiv, tren, havacılık, savunma, biyo-teknoloji, optik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. MMK'lerde yüksek sıcaklıklarda bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu sorunun önüne geçmek için ek takviye, koruyucu yüzey kaplamaları ya da alaşımlarda değişikliğe gidilerek malzeme özellikleri geliştirilebilir.

PMK'lerle kıyaslandığında yüksek akma dayanımı ve metal malzeme kullanıldığı için de termal ve mekanik işlemlere dayanıklı olmasıyla öne geçmektedir. Özellikle alüminyum ve alaşımları iyi korozyon direncine sahip oldukları için matris malzemesi olarak çokça tercih edilir.

2.1.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)

Seramik matrisli kompozit malzemelerde matris fazı olarak seramik malzemeler tercih edilmiş ve malzeme adını buradan almıştır. Seramik malzemeler yüksek sıcaklık dayanımları, düşük ağırlıklara sahip olmaları, termal şok direnci, yüksek sertlik, korozyon direnci, düşük yoğunluk gibi yüksek özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir. Malzemelerin çatlak ilerlemesine karşı düşük dayanımı ve düşük kırılma tokluğuna sahip olan SMK'ler lif takviyeleriyle desteklenerek bu özellikler iyileştirilmeye çalışılmıştır. Matris olarak genellikle SiC, Si₃N₄, B₄C, Al₂O₃, mullit (Al₂O₃-SiO₂) tercih edilir.

2.1.2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler (PMK)

Polimerler kimyasal bağlarla birbirine çok düzenli bağlanan aynı ya da farklı atom gruplarının oluşturduğu bileşiklerdir. Bu bileşiklerin 1960'lı yıllarda kompozit

malzemelerde matris olarak kullanılmaya başlamasıyla polimer matrisli kompozitler otomotiv, havacılık, balistik, elektrik, denizcilik, spor malzemeleri gibi alanlarda bilim dünyasına dahil olmuştur (Pandya ve ark., 2011). Polimer reçine matris ve takviye malzemelerden genellikle elyaflardan oluşan PMK'lerde sadece matris değil takviye malzemesi de sertlik ve mukavemet arttırması açısından büyük önem taşır. Üretim çeşitliliği, kolaylığı ve düşük maliyet, yüksek özgül sertlik ve mukavemet, korozyon direnci, hafiflik gibi özellikleri sayesinde hem geleneksel uygulamalarda hem gelişmiş teknolojilerde kullanım alanına sahiptir.

PMK'lerde genellikle matris olarak reçine ve takviye olarak elyaflar tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerden daha düşük dayanımlara sahip olmalarına rağmen takviyelerle bu durum tersine çevrilebilmektedir. Malzemedeki meydana gelebilecek birçok olumsuz durum takviyelerle iyileştirilebilir.

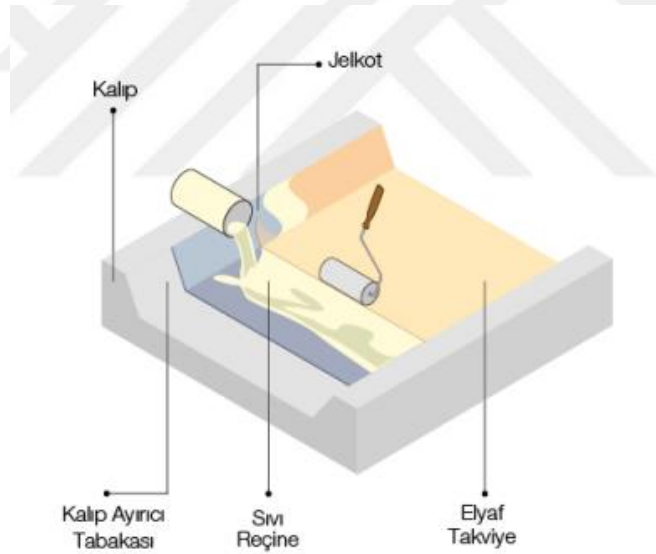
Polimerler termoset ve termoplastik olarak 2 başlığa ayrılır. Termoset polimerler monomer çarpaz bağların birbirine rastgele kovalent bağlarla bağlanmasıyla meydana gelen amorf yapıya sahiptir. Bu çarpaz bağ birleşimi malzemenin fazla yüklenme, değişebilen sıcaklık ve yüksek gerilimlere karşı direncinin artmasına sebep olmuştur. Ancak bu çarpaz yapıların zayıf esnekliğe sahip olması da termosetlerin dezavantajı olarak gösterilebilir. Termoplastiklere göre uzun ömür ve düşük maliyetleri uzay ve inşaat sektörünün tercih sebepleri olmaktadır. Termosetlere örnek olarak, vinilester reçine, polyester reçine, silikon, epoksi reçineler vb. verilebilir.

Termoplastik malzemeler arasında çarpaz kimyasal bağın aksine zayıf Hidrojen ve Van Der Wals bağları bulunmaktadır. Termoplastikler ısıtıldıkları zaman yumuşama ve soğutuldukları zaman sertleşme eğilimi gösterirler. Bazı durumlarda birkaç defa ısıtma işlemleri gerçekleştirilebilir. Genellikle karmaşık ve hacimli parçalar kalıplama ile üretimi gerçekleştirilebilir. Termoplastiklere verilebilecek en güzel örnekler; polistiren, poliolefin, lineer poliesterler vb. olmaktadır.

2.2. Kompozit Malzemeler Üretim Yöntemleri

2.2.1.Elle Yatırma Yöntemi (Hand-Lay-up)

Elle yatırma yöntemi kompozit üretim yöntemleri arasında en çok kullanılan en basit üretim şeklidir. Genellikle büyük ebatlara sahip düşük kalitedeki tank, küçük boy tekneleri, inşaat, hava ve denizlik sektöründe kullanılan malzemelerin üretiminde tercih edilir. Burada takviye malzemesi olarak elyaflar, keçe -özellikle cam- tercih edilmektedir. Bir veya daha fazla parçaya sahip kalıp üzerine reçineden önce kalıp ayırıcı (polivinil alkol, vaks, vb.) uygulanır. Kalıp ayırıcı üzerine yüksek reçine (jelkot) fırça yardımıyla döşenir. Daha sonra istenilen boyut, hacim, yönde, kalınlığa gelene kadar elyaflar elle yerleştirilerek jelkot reçine elyaflara infüze ettirilir. Kullanılacak reçine karışımı da hazırlanıp liflere takviye edilir. Elyaflar üzerine rulo fırça kullanılarak hava ve nem çıkışı sağlanır ve sertleşme sağlandıktan sonra kalıptan çıkarılır (Şahin, 2001). Elle yatırma prosesi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

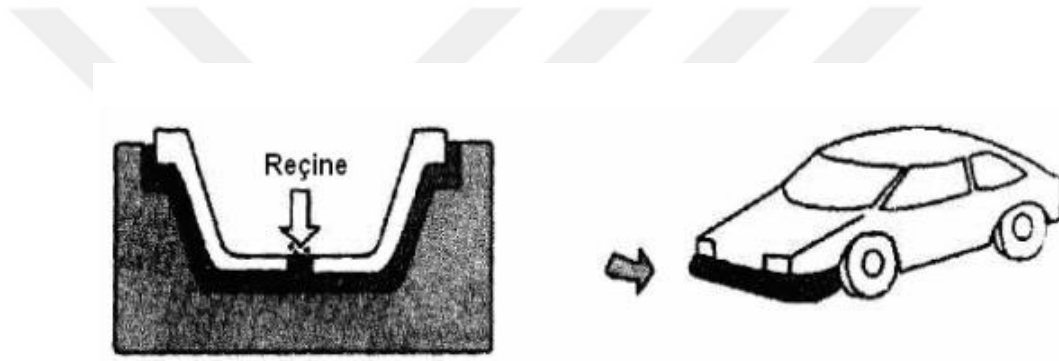


Şekil 2.4. El yatırma yönteminin şematik gösterimi (Poliya, 2017)

2.2.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTK)

Kapalı kompozit üretim yöntemlerinden biri olan reçine transfer kalıplama 1980'li yılların ortalarında otomotiv endüstrisinde yüksek hacme sahip ağ şeklindeki

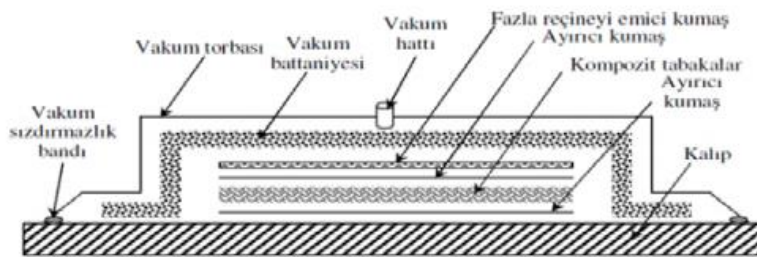
parçaların üretimi için kullanılmaya başlamıştır (Advani ve Hsiao, 2012). İki parçalı kalıptan oluşan sistemde kalıbın taban kısmına bez, dokuma fitil veya kuru iplikçikler yerleştirilir. Belirli basınçlarda hazırlanan reçine enjeksiyonla kalıplar arasına sabit basınçla pompalanır ve kürlenmeye bırakılır. Gerekli soğuma sağlandıktan sonra kalıptan çıkarılır (Bratukhin ve Bogolyubov, 1995; Gay and Hoa, 2003; Mazumdar, 2002). Burada kalıba pompalanan basınç 0.7 MPa'dan az olup bu basınçla lifler arasındaki boşluklar kapanır. Kalıba uygulanan sıkıştırma kuvveti de düşüktür (Lee ve Suh, 2006). Bu yöntem düşük vizkoziteye sahip termoset ve sürekli elyaflarda daha net hacimde parçalar üretmek için tercih edilmektedir. RTK üretim prosesi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Reçine transfer kalıplama yöntemi (Gay vd., 2003)

2.2.3. Vakum Torbalama

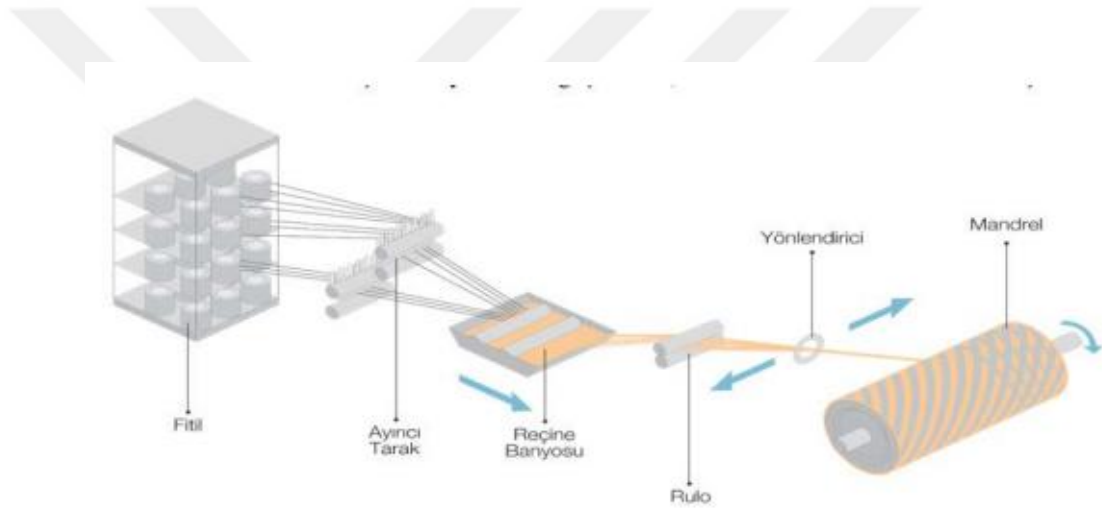
Vakum torbalama yönteminin, elle yatırma tekniğinin vakumla kombinasyonu sonucu meydana geldiği söylenebilir. Yüksek üretim hızına sahip olmayan ancak düşük maliyet ve yüksek malzeme performansına sahip olduğu için hava ve uzay endüstrisinde kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Vakum torbalama yöntemi (Campbell ve ark., 2004)

2.2.5. Filament Sarma

Filament sarma yöntemi, silindirik, küresel, aksel simetrik ve aksel olmayan malzemeler için tercih edilen yüksek hızlı üretim yöntemidir. Islak ve kuru sargı olarak ayrılrsa da genellikle ıslak sarım tercih edilmektedir. Bu yöntemde elyaflara reçineler emdirerek elyafların ıslanması sağlanır. Islanan elyaflar dönel bir mandrelle istenilen katta ve açıda sarımı sağlanarak üretim gerçekleştirilir. Şekil 2.8’de filament sarma işlemi gösterilmiştir. Sistemin elyaf sarım açısı ve hızı değiştirilerek malzemede farklı mekanik özellikler sağlanabilir (Bratukhin ve Bogolyubov, 1995; Gay ve Hoa, 2003; Mazumdar, 2002).

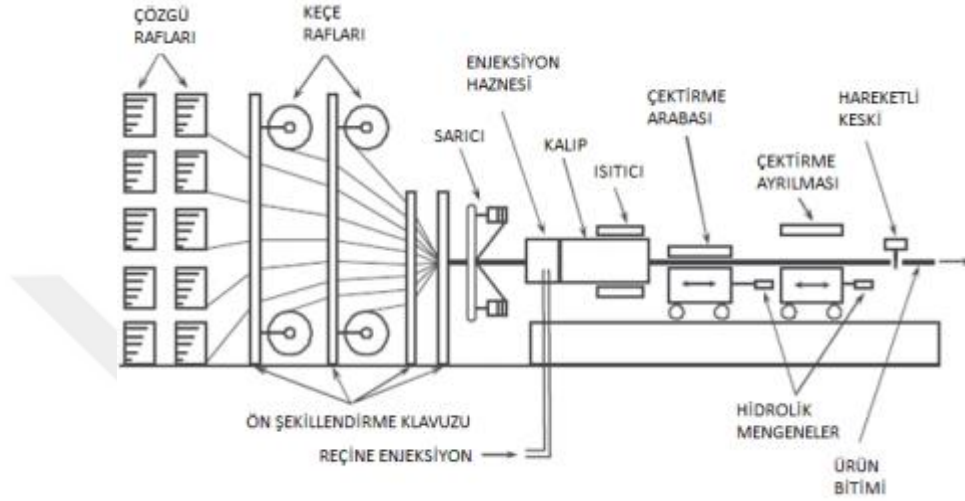


Şekil 2.8. Filament sarma yöntemiyle kompozit malzeme üretilmesi (Dil, 2016)

2.2.6. Pultrüzyon (CTP)

Pultrüzyon üretim yöntemi kirişler, çerçeve yapıları, kanallar, boru sistemleri, otomotiv parçaları gibi içi boş parçaların seri üretiminde kullanılmaktadır. Yüksek dayanım, düşük maliyet, korozyon direnci, otomotil kontrollü seri sistemi özelliklerine sahiptir. Genellikle cam elyaflar kullanıldığı için Cam Elyaf Takviyeli Polyester (CTP) ismiyle de bilinmektedir. Pultrüzyon yönteminde takviye malzemeleri açık bir reçine banyosuna daldırılarak reçine elyaflara tamamen emdirilir. İçerisindeki hava ve nem alınan reçineyle kaplı takviye malzemeleri ektürüzyon sistemi benzer şekilde sıcak bir kalıba konulur. Sıcak kalıpta ısınan malzemeler kürlenmeye başlar ve bu kürlenme

üretim hattı boyunca devam eder ve istenilen boyutlarda kesim uygulanır (Bratukhin ve Bogolyubov, 1995; Gay ve Hoa, 2003; Mazumdar, 2002). Pultrüzyon üretim prosesi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Soğutma ve sertleşme işlemleri için soğutulmuş şekillendirme kalıbı kullanılır.



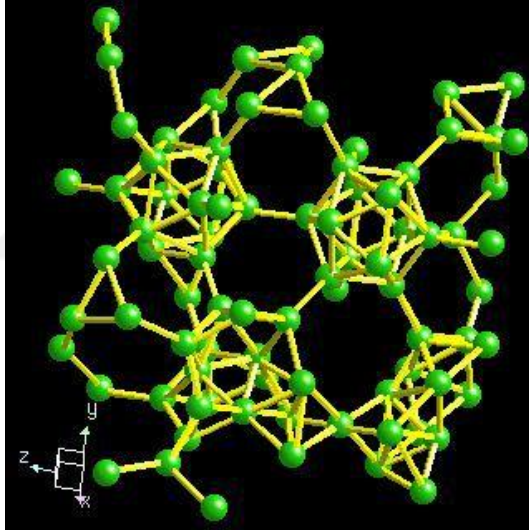
Şekil 2.9. Pultrüzyon yöntemi üretim prosesi (Barbero ve ark., 2018)

2.2.7. Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)

Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi, çok büyük parçaları, düşük maliyet ve yüksek kalitede üretme özelliğine sahip kapalı bir üretim yöntemidir. RTK ve diğer sıvı kalıplama yöntemlerine benzer özelliklere sahip olmakla beraber sistemde tek parça kalıp kullanılması ve reçine uygulamasının vakumla gerçekleşmesi yönüyle diğerlerinden ayrılır. Üretilcek malzemeye göre belirlenen kalıbın temizliği gerçekleştirildikten sonra üzerine malzemenin yapışmaması için kalıp ayırıcı kumaş yerleştirilir. Takviye malzemesi olarak kuru elyaflar tercih edilmektedir. Elyafların sayısı istenilen kalınlığa göre ayarlanır ve sistemden kolay sökülebilmesi için üzeri soyma kumaşla örtülür. Son olarak vakum torbası ile sistem kapatılır ve sistem kenarları sızdırmazlık bandıyla kapatılır. Reçine transferini gerçekleştirmek ve fazla reçine, hava, nem çıkışı için sistem üzerine iki vakum hattı kurulur. Hazırlanan reçine karışımı vakumla sisteme emdirilir. Hava kabarcıkları ve nem de vakumla sistemden uzaklaştırılır ve sistem sertleşme sağlanıncaya kadar beklenir ve epoksiyi bozmayacak

bağ yapma eğilimdedir ve genellikle oksijen, karbon, sodyumla, birleşik oluşturmaktadır (GreenFacts, 2004). Bor elementi kristal yapısı Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

Bor polimer ve moleküler formunda oksijenle birleşme özelliği sayesinde çok sayıda borat bileşikleri meydana getirebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda su ve bazı minerallerle de reaksiyona girerek borik asit oluşturur. Minerallerle olan reaksiyonunda sıcaklık ve yoğunluğa bağlı olarak tepkime yavaş veya patlayıcı olabilir. Silikalarla birleşerek kristalleşir ayrıca cam teknolojisinde borosilikat, borositleri oluşturur. Laboratuarda üretilen ve mineral olmayan borların da sayısı fazladır.



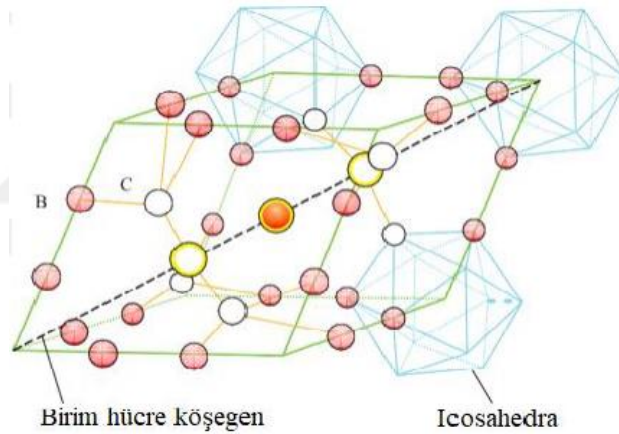
Şekil 2.11. Bor elementi kristal yapısı (McCarty, 1958)

2.3.1. Bor Karbür (B₄C) Nedir?

Bor karbür (B₄C) yüksek fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert malzeme olmakla beraber yüksek sıcaklıklarda kararlılığının bozulmaması sebebiyle B-C sistemindeki en kararlı bileşiktir. 19. yüzyılın başlarında başlarında bulunmasına rağmen üzerine yapılan çalışmalar 1930'lu yıllarda yoğunlaşmıştır (Concentic, 2021). Yüksek elastite modülü, düşük yoğunluk, yüksek termal ve elektriksel özellik, düşük sıcaklıkta sinterlenebilme, aşınma direnci,

yüksek dayanım, yüksek nötron yakalama gibi özellikleriyle balistik, nükleer, havacılık, uzay, tıp endüstrilerinde kullanılmaktadır. Yüksek sertliği sayesinde kesme işlemlerinde gevşek aşındırıcı, elmas takımları giydirci olarak kullanılmakta olup yüksek sıcaklıklarda metallerle tepkimeye girmesinden dolayı tel çekme gibi işlemlerde kalıp olarak kullanılamaz (Yücel ve ark.). B_4C 'nin yoğunluk değeri $2,52 \text{ gr/cm}^3$, ergime sıcaklığı $2450 \text{ }^\circ\text{C}$, Knoop (100 gr) sertlik değeri 2800 kg/mm^2 , çekme dayanımı 13.8 GPa , kayma modülü 180 GPa özelliklerine sahiptir (Sezer, 2001).

B_4C kristal yapısı olarak 12 atomlu ikosahedral düzenlemeye sahip atomların eşkenar dörtgen ana köşegen boyunca üç atomlu kovalent bağlarla meydana getirdiği zincirden oluşan rombohedral yapıya sahiptir (Thévenot, 1990). B_4C kristal kafes yapısı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. B_4C kristal yapısı (Wiley, 2011)

B_4C tozları elektrik ark ocaklarında (genellikle $1750 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde) B_2O_3 ile reaksiyona sokularak karbotermal indirgeme veya gaz fazı reaksiyonlarıyla elde edilir (Alizadeh, 2004). Denklem 2.1'de verilmiştir:

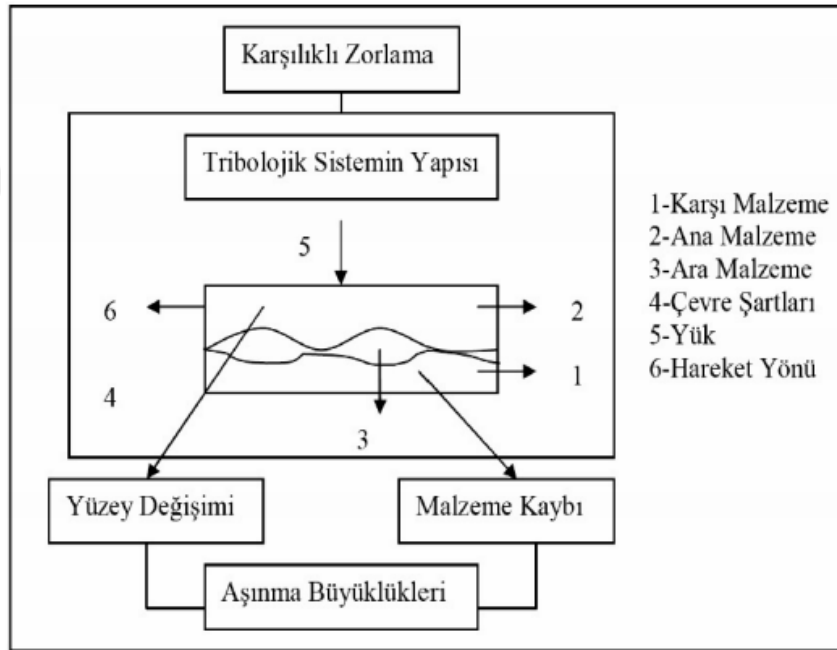


Bu endotermik reaksiyon sonucu açığa çıkan karbon monoksit sistemden ventiltörle uzaklaştırılır. Büyük B_4C parçaları öğütülüp veya ezilerek ince toz haline

getirilir. Daha sonra B₄C tozları metalik kalıntıları gidermek için HCl ile temizlenir (Wiley, 2011).

2.4. Triboloji

Triboloji birbiriyle etkileşime sahip göreceli hareket halindeki yüzeylerin sürtünmesi, aşınması ve yağlanmasıyla ilgilenen bilim dalıdır. Son yıllarda gittikçe büyüyen kompozit malzeme sektörü için tribolojik uygulamalar gittikçe önem kazanmıştır. Buradaki temel amaç, kayan ve yuvarlanan kontak yatakları, dişliler, kamlar, kesici takımlar ve daha birçok malzemenin sürtünme ve aşınmasını azaltarak uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlamaktır. Triboloji sisteminin yapısı Şekil 2.13'de gösterilmiştir.



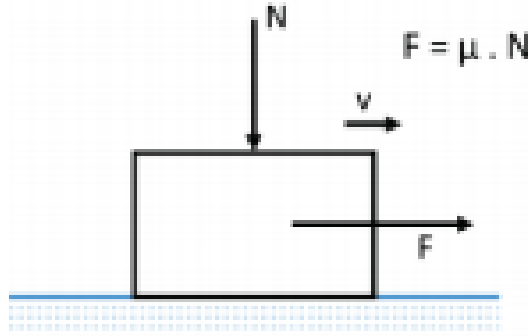
Şekil 2.13. Triboloji sisteminin yapısı (Odabaş vd., 1995)

2.4.1. Sürtünme

Triboloji biliminin ana konularından biri olan sürtünme katı bir nesnenin başka bir veya birkaç nesneye kaymasına karşı gösterilen direçtir. Mühendislik, jeomekanik, termal, dinamik sistem ve tasarımlarda önemli rol oynamaktadır. Sürtünme basit bir

konu olarak görünse de malzemede meydana getirdiği deformasyonların beklenmedik ve ağır sonuçlara yol açtığı bilinmektedir. Sistem performansına olan etkilerini azaltmak için çalışmalar yapılmıştır ancak genel bir sürtünme modeli henüz bulunmamıştır. Kayma gerçekleşirken ara yüzeyin görülememesi sebebiyle genel bir çözüm bulunamamıştır (Tabor ve David, 1981). Çünkü malzemede meydana gelen deformasyonlar, mikro çatlaklar artan sıcaklığa bağlı değişimler ana malzemeden yapısal ve kimyasal anlamda farklılık göstermektedir. Sürtünme bu gibi sebeplerle mekanik, kimyasal ve termal mekanizmaların toplamı olarak düşünülebilir (Al-Bender ve ark., 2004).

Bir yüzey üzerine yerleştirilmiş cismin yüzeye arasındaki etkileşim sonucu oluşan sürtünme kuvveti Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Sürtünme kuvveti mekanizması (Mang, 2007)

Sürtünme kuvvetini hesaplamak için Denklem 2.2 kullanılmaktadır (Özsaraç, 1999).

$$F = \mu \cdot N \quad (2.2)$$

F = Sürtünme Kuvveti

μ = Sürtünme Katsayısı

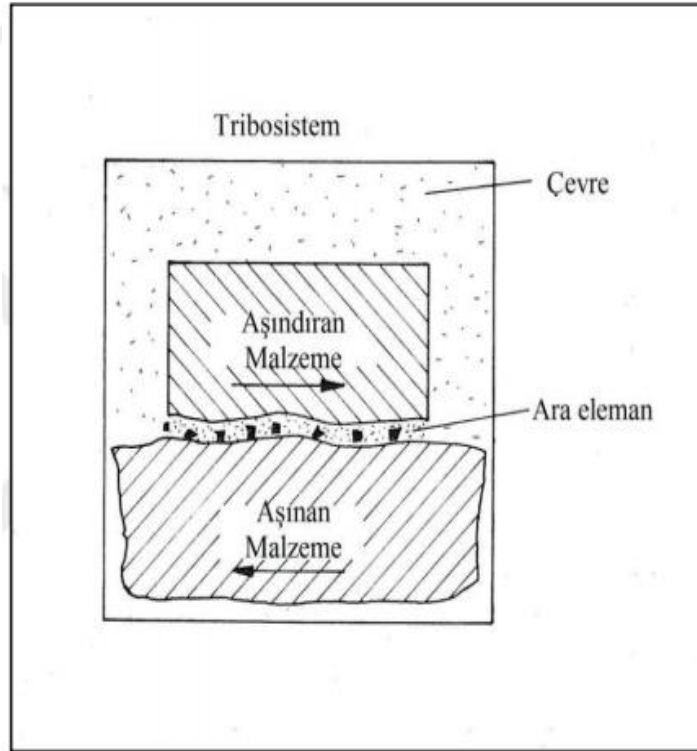
N = Cisim Yüzeyine Etkiyen Kuvvet

Her iki malzeme çifti için iki sürtünme katsayısı mevcuttur. Malzemeyi hareket ettirmek için gerekli kuvvetten statik (μ_s) ve malzeme hareket etmeye başladıktan

sonra hareketin devamını sağlayan kuvvetten doğan dinamik (μ_k) sürtünme katsayısıdır. Her zaman $\mu_k < \mu_s$ 'dir (Özsaraç, 1999).

2.4.2. Aşınma

Tribolojinin bir diğer önemli konusu olan aşınma birbirine göre izafi hareket eden iki cismin mekanik temas sebebiyle meydana getirdikleri hasar, malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Metal ve metal olmayan malzemelerde görülebilen aşınma ve sürtünme tribolojinin parçasıdır ancak aralarında doğrudan ilişki kurmak mümkün değildir. Sürtünme direnci farklı nesnelere benzerlik gösterebilir ancak aşınma miktarı artırılabilir. Sürtünme malzemede enerji kaybına yol açarken aşınma malzeme kaybına sebebiyet verdiği ve ilerleyen bir hasar olduğu için malzemede daha ağır hasar meydana getirmektedir. Talaşlı imalatta malzeme ayrımları için kullanılsa da genel olarak istenilmeyen bir durumdur. Aşınmayı meydana getiren faktörler aşağıda ve Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Aşınma mekanizması (Karl-Heinz ve ark., 1987)

-Sürtünme Ana Malzemesi (Aşınan Malzeme)

- Karşı Malzeme (Aşındıran Malzeme)
- Ara Eleman
- Çevre
- Hareket

Burada ana malzeme özellikleri bilinen malzeme kaybının gerçekleştiği malzeme olurken, karşı malzeme aşındırma yapan malzeme olarak tanımlanır. Ara eleman iki yüzey arasındaki bulunan, katı, sıvı, gaz ya da iki malzemeden kopan parçaların bileşimi olan malzemedir. Aşınmanın gerçekleştiği çevre ve malzemelerin birbirine karşı gösterdiği hareketin yönü, şiddeti olmaktadır.

2.4.2.1. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Mühendislik dünyasının önemli sorunlarından biri olan aşınmayı etkileyen bazı faktörler aşağıdaki gibidir:

Malzeme Seçimi

Aşınmayı en çok etkileyen durumlardan biri şüphesiz malzeme seçimidir. Malzeme kullanılacağı alanın özellikleri doğrultusunda uygun olarak seçilmelidir. Aksi takdirde hem istenilen performans alınamaz hem de maliyete zarar verir.

Sürtünme

Sürtünme ve aşınma arasında doğrudan bir bağlantı kurulamasa bile bazı metal malzemelerde sürtünme katsayısı aşınmayla ters orantılı olabilmektedir.

Yüzeye Uygulanan Yük

Yüzeye uygulanan yükün artışına bağlı olarak aşınmanın arttığı ve azalmasına bağlı olarak aşınmada azalma gözlemlendiği birçok deneylerde keşfedilmiştir.

Sürtünme Mesafesi

Sürtünme mesafesinin zamana bağlı artışıyla aşınma miktarı da doğru orantılı olarak artmaktadır.

Yüzey Sertliği

Yüzey sertliği aşınmayı büyük oranda etkileyen faktörlerdendir. Yüzeyin sertliği arttıkça aşınma miktarında azalabilir veya yüzey hasarı durağan olabilir.

Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü için gereken aralık 10 ila 70 µm olmalıdır. Kaba yüzeylerde aşınma artmaktadır.

Yağlama

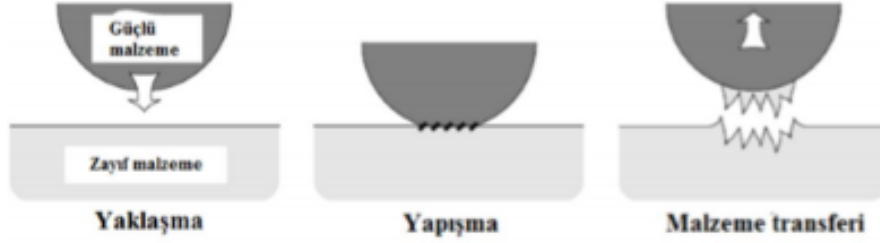
Yağlama aşınma olasılığını azaltan bir faktördür. Metaller arası teması azaltıcı etkiye sahip olduğu için çok sık tercih edilmektedir (Jareel ve ark., 1999).

2.4.2.2. Aşınma Mekanizmaları

Adhezyon Aşınması

Adhezyon diğer adıyla yapışkan aşınma yağlanmış, yağlanmamış veya yetersiz yağlanmaya sahip metalik yüzeylerin birbirilerine karşı izafi hareketleri sonucu oluşan çekimin neden olduğu yapışmaya bağlı aşınma mekanizmasıdır. Cisimlerin hareketlerine bağlı kayma sonucunda malzeme yüzeyinde kopmalar başlar ve küçük parçalar diğer cisme yapışır. Cisimlerin hareketleri devam ettikçe yapışan parçalar tekrar kendi malzemesine yapışabilir veya aşınma parçacıkları oluşturabilir (Bhushan, 2013). Adhezif aşınma mekanizması Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Adhezif aşınma

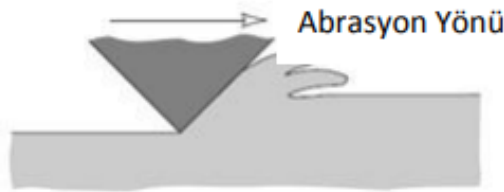
kaymalık yatak ve pistonlarda, kesici takımlarda, tel çekme, metal kalıplarda çok sık görülmekle beraber arıza durumlarında büyük zararlar oluşturmaz.



Şekil 2.16. Adhezif aşınma mekanizması (Ercenk, 2011)

Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma iki malzeme arasında gerçekleşen daha sert özelliklere sahip malzemenin yumuşak malzeme üzerinde meydana getirdiği deformasyonlarla ortaya çıkar. Çevreden gelen kirletici parçacıklar veya yumuşak malzemeden kopan aşınma artıkları da abrasiv aşınmaya sebep olur. Abrasiv aşınma mekanizması Şekil 2.17’de verilmiştir. Sürtünme, malzemeler arasındaki sertlik farkı ve basıncın etkisiyle gerçekleşen abrasiv aşınmada malzeme kayıpları çabuk gelişir. Kırılma veya plastik deformasyon hasarı görülür (Bayer, 2004).

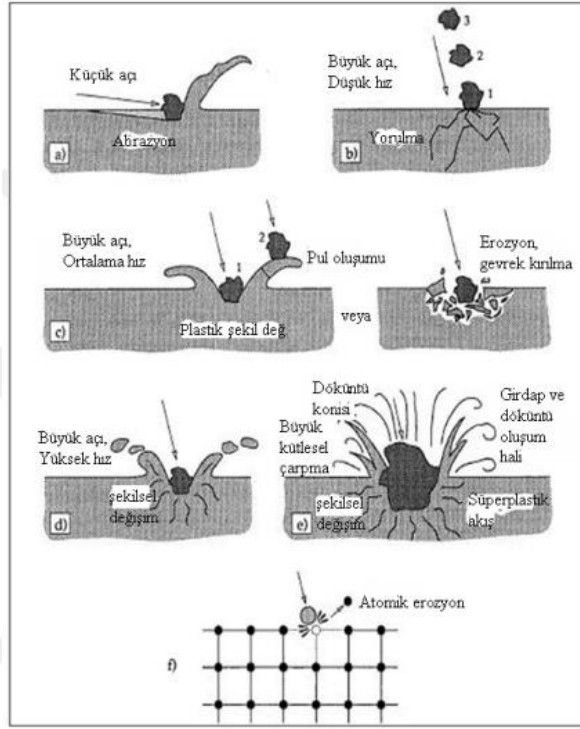


Şekil 2.17. Abrasiv aşınma mekanizması (Stachowiak ve ark., 2011)

Erozyon Aşınması

Eroziv aşınma katı ve sıvı aşındırıcı partiküllerin akışkan veya hava ortamında ana malzemeye çarparak yüzeyden malzeme koparmasıyla meydana gelir. Eroziv aşınma malzemede kırılma, plastik deformasyon, mikro oluk, yarık, çatlak oluşturur. Burada malzemenin çarpma hızı, ana malzemenin yoğunluğu, çarpma açısı, parçacık

boyutu, şekli aşınma mekanizmasını etkilemektedir. Sünek malzemelerde düşük çarpma hızlarında yüksek aşınma görülürken gevrek malzemede çarpma hızı arttıkça aşınma miktarı artmaktadır (Sheldon, 1970). Erozyon aşınması görülen bazı durumlar Şekil 2.18’de gösterilmiştir.

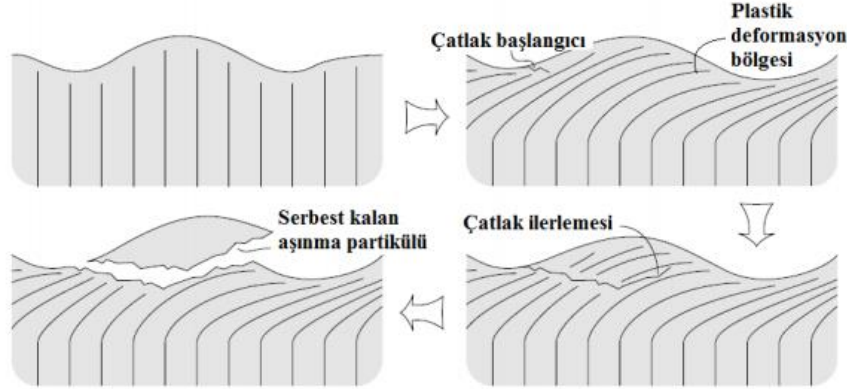


Şekil 2.18. Erozyon aşınma mekanizması (Stachowiak ve ark., 2005)

Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması sürekli yükler altında çalışan malzemelerde yorulmaya bağlı çatlak oluşumu ve çatlağın ilerlemesiyle malzemede kırılmanın gerçekleştiği aşınma mekanizmasıdır. Çatlaklar tekrarlanan yüklerle başlar ve plastik gerginlik sebebiyle büyüyerek yüzeye ulaşır ve burada kırılma meydana getirir. Yorulma mekanizmasına benzemekle beraber yorulma ve yorulma aşınması farklı kavramlardır. Yorulmada malzemede kırılmanın gerçekleşmemesi için gerekli dayanımda malzeme tercih edilirken yorulma aşınmasında böyle bir sınır söz konusu değildir (Rabinowicz, 1976). Yorulma aşınması dişli çarklar, tren ray ve rulmanlarında çok sık görülmektedir. Bu sistemlerin aşınması şiddetli sonuçlara yol açmaktadır ve bunun önüne geçilebilir.

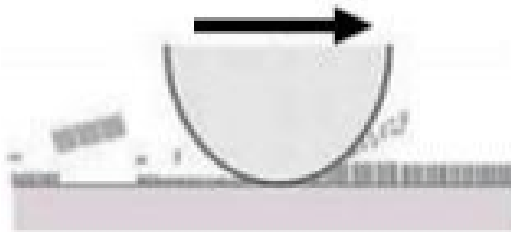
için en uygun yol sistemlerin yağlanmasıdır. Yorulma aşınma mekanizması Şekil 2.19'da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Yorulma aşınma mekanizması (Stachowiak ve Batchelor, 2011)

Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması malzemenin yüzeyinde sıvı veya gaz atmosferlerinde kimyasal veya elektrokimyasal etkilerle gerçekleşen reaksiyonlara bağlı olarak meydana gelir. Reaksiyon sonucu çıkan partiküller ana malzemeye yapışıp burada malzemeye tamamen bağlanırsa korozyon aşınması meydana gelir (Bhushan, 2000).



Korozif Aşınma

Şekil 2.20. Korozif aşınma mekanizması (Kato ve Adachi, 2001)

Maden alanlarında kullanılan iş makinalarında meydana gelen aşınmalar örnek olarak verilebilir. Korozyon aşınması Şekil 2.20'de gösterilmiştir.

Korozyon aşınması değişen sıcaklık ve ortam şartlarına bağlı olarak 8 farklı şekilde gözlemlenir:

- ✓ Nitrürlenme
- ✓ Tuz (kül) çökmesine bağlı korozyon
- ✓ Sülfürleme
- ✓ Karbürlenme ve metal tozlaşması
- ✓ Eritilmiş veya erimiş tuza bağlı korozyon
- ✓ Sıcaklık ve ortama göre gelişen sıcaklık-sıvı metal korozyonu
- ✓ Halojen korozyonu (Kaşkan, 2005).



3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada farklı oranlara sahip partiküller epoksi ile birleştirilip kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretimi için Bor Karbür (B_4C) mikro partikülleri seçilmiştir. Bor Karbür (B_4C) mikropartikülleri elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert malzeme olup en çok üretime ve kullanım alanına sahiptir. B_4C 'nin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir (Nanografi,2020).

Çizelge 3.1. B_4C Teknik özellikleri

Renk	Siyah
Safılık	> % 99.5
Yoğunluk	2,52 g/cm ³
Ergime Noktası	2350 °C
Partikül Boyutu	1-3 µm
Kristalografik Yapı	Hekzagonal

Kompozit malzemeleri üretmek için matris malzemesi olarak Çizelge 3.2'de teknik özellikleri gösterilen MGS L 285 laminasyon reçinesi ile H287 sertleştiricisi kullanılmıştır. Kullanılan MGS L285 laminasyon reçine ve H285 sertleştiricisi ağırlıkça 100:40 oranında karıştırılmıştır (Kadhim ve ark., 2013).

Çizelge 3.2. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri

MGS L 285 Laminasyon Reçinesi		H287 sertleştiricisi	
Yoğunluk	1.18-1.23 g/cm ³	Yoğunluk	0.93-0.96 gr/ cm ³
Vizkosite	600-900 mPas	Vizkosite	80-120 mPas
Epoksi eşdeğeri	155-170 gr/eşdeğer	Amin Değeri	450-500 mgr KOH/gr
Epoksi değeri	0.59-0.65 eşdeğer/100gr	Refraktör indeksi	1.4950-1.4990
Refraktör indeksi	1.525-1.530	-	-

Bu çalışmada takviye malzemesi olarak Twill 3k karbon elyaf kullanılmıştır. Karbon elyafların diğer elyaflara oranla yüksek çekme dayanımı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve yüksek ısı kararlılık gibi güçlü özelliklere sahip olması tercih sebebi

olmuştur. Karbon elyafın teknik özellikleri Çizelge 3.3’de gösterilmiştir (Kompozitnet,2020).

Çizelge 3.3. Karbon elyaf teknik özellikleri

Dokuma Stili	3k Twill
Genişlik	100 cm
Alan Ağırlığı	200 g/m ²
Laminat Kalınlığı	0.327 mm
İplik	Çözümlü elyaf
Çekme Dayanımı	3950 MPa
Yoğunluk	1,76 gr/cm ³

3.2. Yöntem

3.2.1. Epoksi Karışımının Hazırlanması

Çalışmalarda kullanılacak olan boyutlara uygun kompozit plaka üretmek için kullanılacak olan 10 kat karbon elyafın ağırlığı ölçüldükten sonra emdiği epoksi reçinesinin miktarı hesaplanmıştır. Bu oranın 10 kat karbon elyaf için 400 gram epoksi reçine (285 gram epoksi + 115 gram sertleştirici) olduğu deneysel olarak bulunmuştur. Epoksi reçinesine eklenecek olan B₄C partikül miktarları hassas tartı ile Şekil 3.1’de gösterildiği gibi tartıldı.



Şekil 3.1. B₄C partiküllerinin tartılması

285 gram epoksiye B₄C partikülleri kütlece sırası ile %1, 3, 5 ve 7 oranında Şekil 3.2’de gösterildiği gibi elle karıştırıldıktan sonra reçine sertleştiricisi epoksi reçine

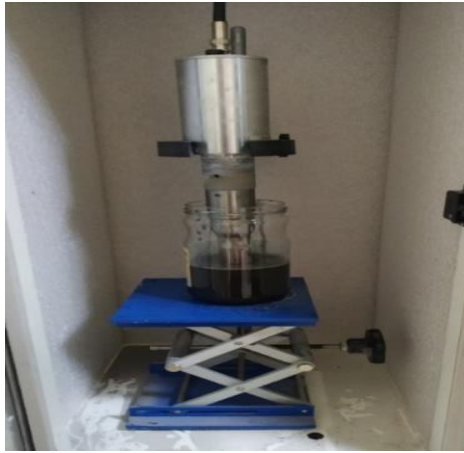
miktarına göre (115 gr) daha sonraki aşamada reçine içerisine ilave edilecektir (Kadhim ve ark., 2013).



Şekil 3.2. Epoksi ile B₄C partiküllerinin birleştirilmesi

Epoksi ve B₄C partiküllerinden oluşan karışım MR Heil-Teach marka manyetik karıştırıcıya alındı. Epoksinin sıcaklık değerinin 60 °C'ye ulaşması için zamana ihtiyaç vardır. Bu sebeple karışım manyetik karıştırıcıda 200 dev/dk hızda 7,5 dk karıştırıldıktan sonra manyetik karıştırıcı 600 dev/dk hıza çıkarılıp tekrar 7,5 dk karıştırıldı.

Manyetik karıştırıcıda 15 dakika kalan karışım Şekil 3.3'te gösterildiği gibi VCX 500 Sonics marka ultrasonik karıştırıcıya alındı. Ultrasonik karıştırıcıda %50 genlik değerinde 2 saniye açık 2 saniye kapalı olacak şekilde 2 saat boyunca karıştırıldı.



Şekil 3.3. Epoksi karışımının ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması

Daha sonra epoksi reçine içerisine sertleştirici 115 gram ilave edilerek 5 dakika boyunca elle karıştırılmıştır. Elde edilen homojen karışım vakum destekli reçine infüzyon yöntemi için hazırlanan düzeneğe alınarak kompozit üretim aşamasına geçildi.

3.2.2. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Sistemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Kompozit plaka üretmek için kullanılacak olan 10 kat karbon elyaf belirlenen ebatlarda (464 x 282.2 mm) Şekil 3.4'te gösterildiği gibi kesildi.



Şekil 3.4. Karbon elyaf kumaşlar

Üretimin yapılacağı alan temizlendikten sonra epoksinin zemine yapışmasını engellemek için en alta kalıp ayırıcı (380 x 750 mm) film Şekil 3.5'te gösterildiği gibi zemine yerleştirildi. Film kenarları olası hava kaçaklarının önüne geçebilmek amacıyla sızdırmazlık bandı ile kapatıldı.



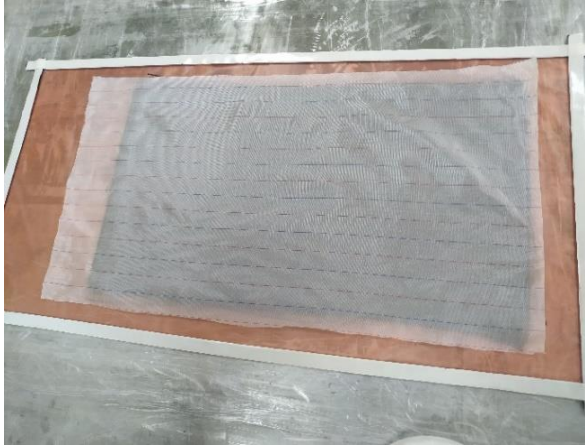
Şekil 3.5. Kalıp ayırıcı film ve sızdırmazlık bandının zemine yerleştirilmesi

Kalıp ayırıcı film üzerine kuru karbon elyaflar 10 kat üst üste ve simetrik şekilde hizalanarak Şekil 3.6'da gösterildiği gibi yerleştirildi.



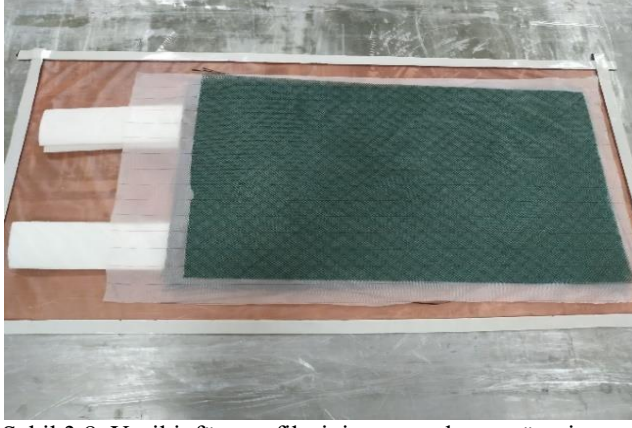
Şekil 3.6. Karbon elyaf kumaşlarının film üzerine serilmesi

Karbon elyafların üzerine plakanın infüzyon filesine yapışmasını önlemek için soyma kumaşı (322 x 600 mm) vakum hattı tarafında daha fazla olacak şekilde Şekil 3.7'de gösterildiği gibi yerleştirildi.



Şekil 3.7. Soyma kumaşların karbon elyaf kumaşları üzerine serilmesi

Epoksinin karbon elyaflara infüzyonunu kolay hale getirmek ve fazla reçinenin reçine emici katlara dağılmasını sağlamak için Şekil 3.8'de gösterildiği gibi yeşil infüzyon filesi (282 x 500 mm) yerleştirildi. Plakanın yüzeyden ayrılmasını kolaylaştırmak için kenarlar peçete ile desteklendi.



Şekil 3.8. Yeşil infüzyon filesinin soyma kumaş üzerine serilmesi

Epoksinin sisteme akışını sağlamak için oluşturulan reçine ve vakum hattının bağlantı parçaları Şekil 3.9'da gösterildiği gibi yerleştirildi. Vakum hattı sağlıklı reçine akışı sağlamak amacıyla reçine hattının karşısına yerleştirildi.



Şekil 3.9. Bağlantı parçalarının sisteme yerleştirilmesi

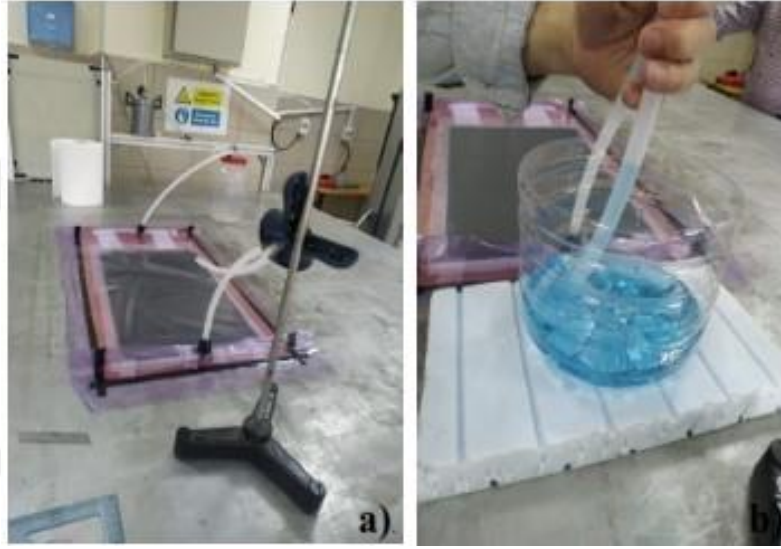
Son olarak sistem doygunluğu kolaylaştıran vakum poşeti (480 x 1200 mm) Şekil 3.10'da gösterildiği gibi kapatıldı.



Şekil 3.10. Sistemin vakum poşeti ile kaplanması

Reçine infüze ettirilmeden önce hava kaçakları için küçük bir vakumla kontrol edildi.

Epoksi karışımı hazırlanan sisteme atmosfer basıncından faydalanılarak Şekil 3.11’de gösterildiği gibi infüze ettirildi. Karışım tüm sisteme yayılana kadar vakumlandı. 80 °C’de 15 saat kürlenmeye bırakılarak mukavemetinin artması sağlandı.



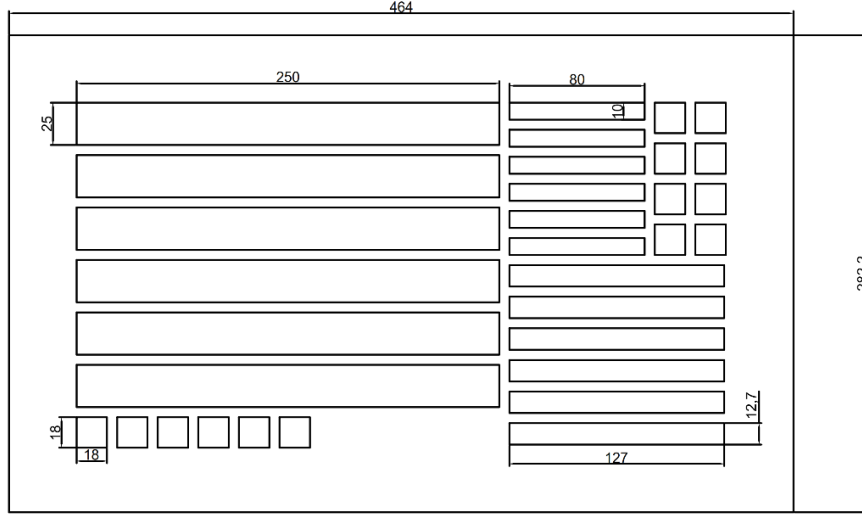
Şekil 3.11. Epoksi karışımının sisteme infüzyonu

Üretilen kompozit plaka Şekil 3.12’de gösterildiği gibi sistemden söküldü ve ASTM standartlarına uygun olarak su soğutmalı tezgâh tipi testere ile kesildi.



Şekil 3.12. Üretilen kompozit plakalar

Tez çalışması kapsamında yapılacak testler için kullanılacak numuneler 6 adet çekme deneyi, 6 adet eğme deneyi, 6 adet charpy darbe deneyi, 6 adet tribolojik deneyler olarak hesaplanmıştır ve gerekli kompozit plaka boyutları ise (464 x 282.2 mm) olarak bulunmuştur. Kompozit plaka ve numune boyutları Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kompozit Plaka boyutları

3.3. Deneyler

3.3.1. Çekme Deneyi

Bu çalışmada yapılan çekme deneyi kompozit malzemelerin elastisite modülü (Young Modülü) (E), poisson oranı (ν), maksimum çekme gerilmesi, tokluk, birim şekil değiştirmesini belirlemek için yapıldı. Çekme deneyinde iki çene arasında paralel olarak yerleştirilen kompozit malzemelere kopana kadar yük uygulandı. Yapılan deney süresince numunelerde meydana gelen uzama değerleri kayıt altına alındı ve malzemelere ait çekme gerilmesi Denklem 3.1 kullanılarak hesaplandı. Çekme deneyi sonrası kompozit malzemelere ait birim şekil değiştirme ve elastisite modülü Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 kullanılarak hesaplandı (ASTM D3039, 1997).

$$\sigma = F/A \quad (3.1)$$

Burada;

σ : Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)

F: Maksimum Çekme Kuvveti (N)

A: Kesit alanı (mm²)

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (3.2)$$

Burada;

ε : Birim Şekil Değişirme

ΔL : Numunenin boyundaki değişim

L: Numunenin ilk boyu

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (3.3)$$

Burada;

E: Elastite Modülü

σ : Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)

ε : Birim Şekil Değişirme



Şekil 3.14. Çekme Deneyi

Bu tezde yapılmış olan çekme testleri için numuneler ASTM D3039 standardına uygun olarak kesilerek hazırlanmıştır. Testlerden emin olmak için her kompozit malzemeden 5'er adet numune teste tabii tutulmuştur. Testler, Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne ait mekanik laboratuvarında SHİMADZU AG-X PLUS ÇEKME CİHAZI ile Şekil 3.14'te gösterildiği gibi yapıp video ekstansometre ile saniyelik ölçümler alınmıştır.

3.3.2. Eğilme Deneyi

Bu çalışmada, üretilen kompozitlerin 3 noktadan eğilme dayanım testleri yapılmıştır. Bu testte bir temas noktası üzerine yatay olarak yerleştirilen numuneye dik ve sürekli olarak yük uygulanır ve meydana gelen şekil değişimleri incelenir.

Malzemeye ait eğilme gerilmesi ve birim şekil değişimini bulmak için Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılmıştır (Türker ve ark., 2019).

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (3.4)$$

Burada;

σ : Eğilme Gerilmesi (MPa)

P: Kırılma Anında Numuneye Uygulanan Kuvvet (N)

L: Alt Destek Uzunluğu (mm)

b: Genişlik (mm)

d: Kalınlık (mm)

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot D \cdot d^2}{L^2} \quad (3.5)$$

Burada;

ε : Birim Şekil Değiştirme

D: Eğilme Miktarı

d: Numunenin Çapı (mm)

L: Alt Destek Uzunluğu (mm)

Bu çalışmada tek temas noktası kullanılarak yapılan 3 nokta eğilme deneyleri için numuneler Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan KT-CR İMPACT TEST CİHAZI kullanılarak Şekil 3.15'te gösterildiği gibi eğilme deneyine tabii tutulmuştur.



Şekil 3.15. Eğilme Deneyi

3.3.3. Charpy Darbe Deneyi

Bu çalışmada darbe testi için test edilecek numuneler İSO 179-1 standartlarına göre kesilmiştir. Testler, Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Mekanik Laboratuvarında bulunan KT-CR İMPACT TEST CİHAZI kullanılarak Şekil 3.16'da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan çekiç ağırlığı 21,9 kilogram, çekiç merkez uzunluğu 0.752 metre ve çekiç enerjisi 300 J.



Şekil 3.16. Charpy Darbe Deneyi

3.3.4. Sertlik Ölçümü

Bu çalışmada üretilen kompozit örneklerin sertlikleri Rockwell sertlik yöntemiyle ölçülmüştür. Deney için HRM 6,33 mm uç kullanılmış olup 100 kg yük 15 sn boyunca uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri için Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarındaki Şekil 3.17’de gösterilen Rockwell sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için 10 adet numune tercih edilip her örnekten en az 10 adet ölçüm yapılmıştır ve bunların aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri bulunmuştur.



Şekil 3.17. Rockwell sertlik cihazı

3.3.5. Aşınma Testleri

Bu çalışmada aşınma deney numuneleri Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarına ait Şekil 3.18’de gösterilen TRD marka aşınma test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Testler oda sıcaklığında (~ 22 °C), 0,3 m/sn kayma hızında, 20 N yük ve 1000 m kayma mesafesinde ASTM G99 standardına göre yapılmıştır (Baradesvaran ve ark., 2013). Kompozit numunelerin aşınma testi “pin-on-disk” yöntemiyle yapılmıştır ve deneylerde kompozit numuneye karşı aşındırıcı eleman olarak 66 HRC sertliğinde yüksek hız çeliğinden yapılmış bir “pin” kullanılmıştır. Aşınma işleminden önce numunede küçük bir iz oluşturup dijital kumpasla iz çapı ölçülüp testlere devam edilmiştir. Sürtünme ve aşınma miktarlarının

doğru bir şekilde belirlemek için aşınma testleri 3 örnek üzerinde tekrar edilmiş ve bulunan değerlerin ortalamaları alınıp aşınma oranları, hacim kayıpları ve özgül aşınma miktarları belirlenmiştir. Örneklere ait aşınma oranları, hacim kayıpları ve özgül aşınma miktarlarını hesaplamak için Denklem 3.6, Denklem 3.7 ve Denklem 3.8 kullanılarak hesaplanmıştır (ASTM G99, 2017).

$$\text{Aşınma Oranı} = \Delta V / S \quad (3.6)$$

Burada;

ΔV : Hacim kaybı (mm^3)

S: Aşınma Mesafesi (mm)

$$\Delta V = \Delta m / \rho \quad (3.7)$$

Burada;

ΔV : Hacim kaybı (mm^3)

Δm : Kütle Kaybı (g)

ρ : Yoğunluk (gr/mm^3)

$$W_S = \Delta m / \rho \cdot S \cdot F_N \quad (3.8)$$

Burada;

W_S : Özgül Aşınma Miktarı ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$)

Δm : Kütle kaybı (gr)

ρ : Yoğunluk (gr/mm^3)

S: Aşınma Mesafesi (cm)

F_N : Yük (N)



Şekil 3.18. TRD marka pin-on-disk aşınma test cihazı

3.3.6. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Bu çalışmada örneklerin yüzey pürüzlülük değeri Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan Şekil 3.19’da gösterilen Time TR 200 model profilmetre cihazıyla ölçülmüştür. Deneyler için her numuneden 3’er örnek alınıp her örnek üzerinden 5 ölçüm gerçekleştirilmiştir ve bu ölçümlerin ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3.19. Time TR 200 model profilmetre cihazı

3.3.7. Kompozit Malzemelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Bu çalışmada örneklere ait yoğunluk ölçümleri için Arşimed deney prensibinden faydalanılmıştır. Örneklerin yoğunluk ölçümleri Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan Şekil 3.20’de gösterilen Radwack cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Örneklerin havadaki ve sudaki ağırlıkları ölçülüp (Şekil 3.20(a)-(b)) Denklem 3.7 kullanılarak yoğunluk değerleri bulunmuştur

(Tosun ve Kurt,2019). Ölçümlerde saf su kullanılmıştır. Her örnek için 3 ölçüm yapıp ortalamaları alınmıştır.

$$\rho_{\text{örnek}} = \frac{m_a}{m_a - m_w} \times \rho_{\text{sivi}} \quad (3.7)$$

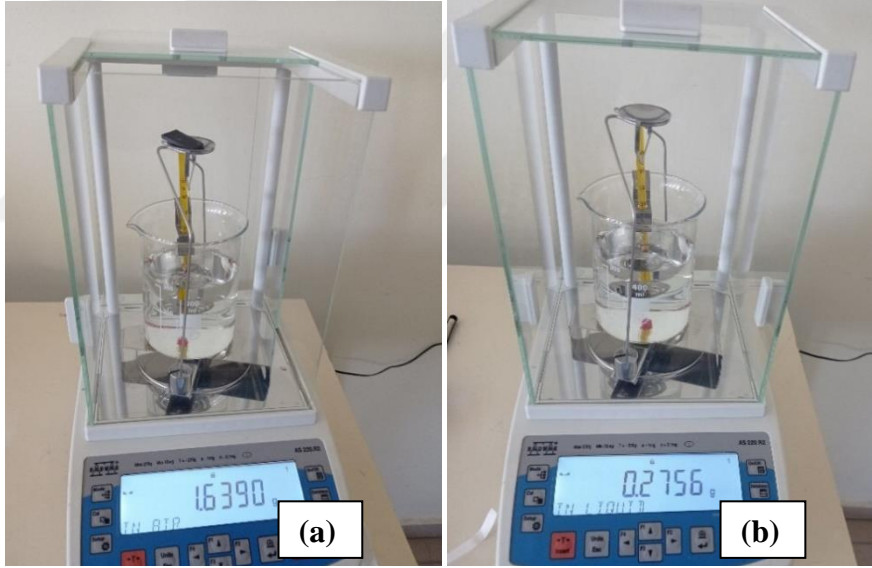
Burada;

$\rho_{\text{örnek}}$:Yoğunluk (gr/cm³)

m_a : Örneğin havadaki ağırlığı (gr)

m_w : Örneğin su içerisindeki ağırlığı (gr)

ρ_{sivi} : Saf suyun yoğunluğu (gr/cm³)

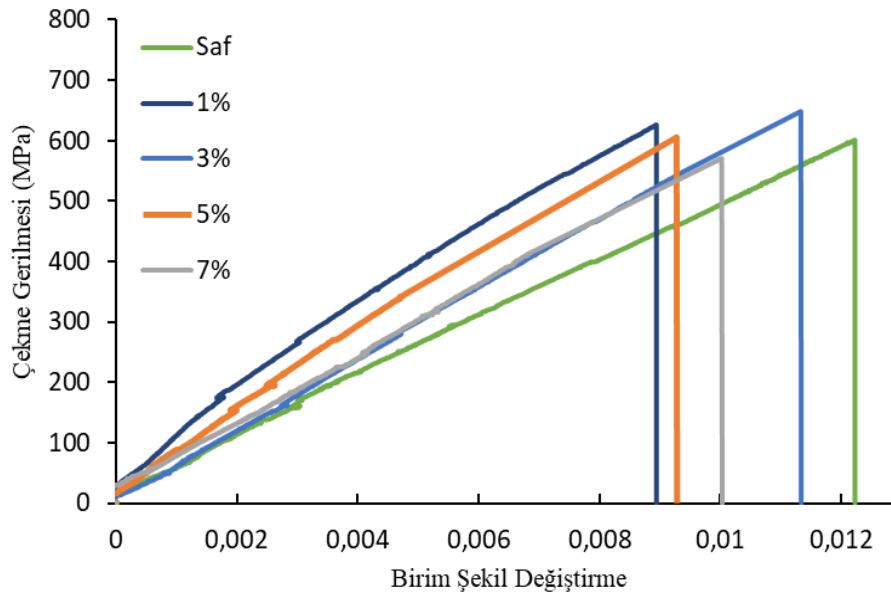


Şekil 3.20. (a) Malzemenin havada asılı ağırlığının ölçülmesi, (b) Malzemenin su içerisinde ağırlığının ölçülmesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Kompozit Malzemelerin Gerilme-Birim Şekil Değişirme Eğrileri

Çekme deneyi için malzemeler ASTM D3039 standardına göre kesildi. Çekme deneyi süresince veriler kayıt altına alındı. Alınan ölçümler neticesinde numunelerin gerilme ve birim şekil değişirme değerleri belirlenmiştir. Çekme testi, her örnekten 5 test yapıp sonuçların ortalamaları alınmıştır. Saf ve B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme birim şekil değişirme eğrileri Şekil 4.1’de gösterilmiştir ve eğrilere ait veriler ise Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Saf ve B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme-birim şekil değişirme eğrileri

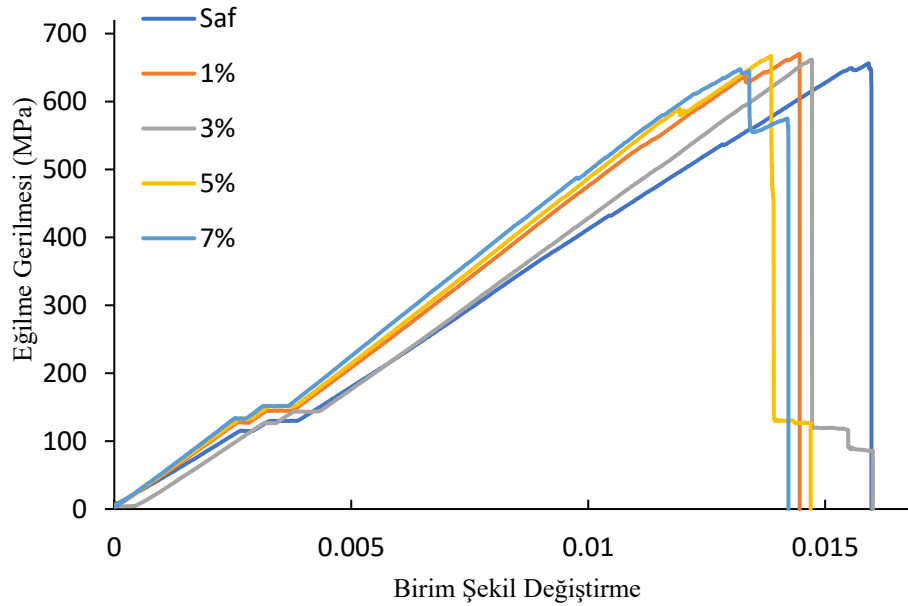
Çizelge 4. 1. Numunelere ait çekme gerilmesi değeri

B ₄ C katkı oranı (%)	Çekme gerilmesi (MPa)
0 (saf)	601 ± 24
1	626 ± 25
3	648 ± 25.9
5	605 ± 24.2
7	570 ± 22.8

Şekil 4.1’de verilen eğriler incelendiğinde %3 B₄C katkı oranına kadar numunelerin çekme gerilmesinin arttığı, bu katkı oranında sonra değerlerin düşmeye başladığı gözlenmiştir. %1 katkı oranına sahip numunelerde çekme gerilmesi 626 MPa olarak ölçülmüştür. %3 katkı oranında çekme gerilmesi 648 MPa ile maksimum çekme değeri olarak ölçülmüştür. %5 katkı oranına sahip numunelere ait çekme gerilmesinin saf kompozitten çok az fazla olduğu gözlenmiştir. %7 katkı oranına ait çekme gerilmesi 570 MPa ile en düşük değer olarak ölçülmüştür. Buradan %3 katkı oranından sonraki katkı miktarlarında topaklanma meydana geldiği söylenebilir. B₄C katkısının karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme gerilmesini iyileştirdiği görülmüştür.

4.2. Kompozit Malzemelerin Eğilme Dayanımları

Eğilme dayanımı testi için malzemeler ASTM D790 standardına uygun olarak kesilmiştir. Eğilme dayanımının belirlenmesinde her örnekten 5 test yapıp sonuçların ortalamaları alınmıştır. Alınan ölçümler neticesinde numunelere ait gerilme ve birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.2’de gösterildiği gibi çizilmiştir. Grafiğe ait veriler Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Numunelerin 3 noktadan eğilme testi eğrileri

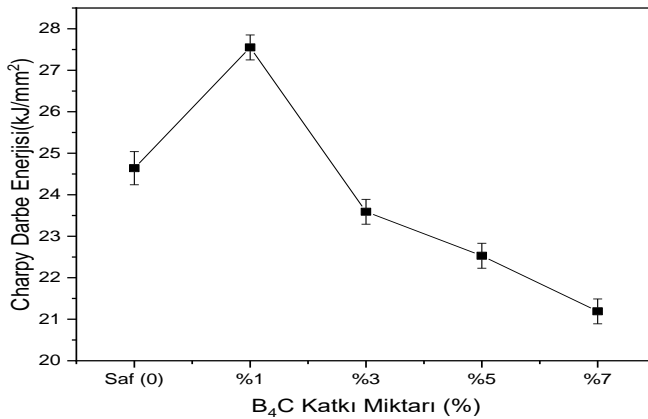
Çizelge 4.2. Numunelere ait eğilme dayanımı değerleri

B ₄ C katkı oranı (%)	Eğilme dayanımı (MPa)
0 (Saf)	654 ± 26.1
1	670 ± 26.8
3	719 ± 28.7
5	666 ± 26.6
7	647 ± 25.8

Şekil 4.2 ve Çizelge 4.2 incelendiğinde eğilme dayanımında %3 B₄C katkı oranına kadar artış daha sonraki katkı oranlarında düşüşler gözlenmektedir. %1 katkı oranında eğilme gerilmesi 670 MPa, %5 katkı oranına sahip gerilme değeri 666 MPa olarak ölçülmüştür. %7 katkı oranında gerilme değeri 647 MPa ile en düşük değer olarak kaydedilmiştir. Bu katkı değeri için kompozit malzemelerin çekme ve eğilme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. %3 katkı oranında eğilme gerilmesi maksimum değer 719 MPa olarak ölçülüp bu katkı oranının eğilme gerilmesini büyük oranda iyileştirdiği gözlenmiştir. Yine burada da bu katkı miktarlarından sonra topaklanma meydana gelmiş olabilir. Sonuçların çekme deneyiyle paralel olduğu gözlenmiştir.

4.3. Kompozit Malzemelerin Charpy Darbe Dayanımları

Charpy darbe deneyi için numuneler İSO 179-1 standardına göre kesilmiştir. Alınan sonuçlar doğrultusunda Charpy darbe deneyi sonuçları Şekil 4.3'te gösterildiği gibi çizdirilmiştir. Grafiğe ait veriler Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Şekil 4.3. Saf ve B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin Charpy darbe testi grafiği

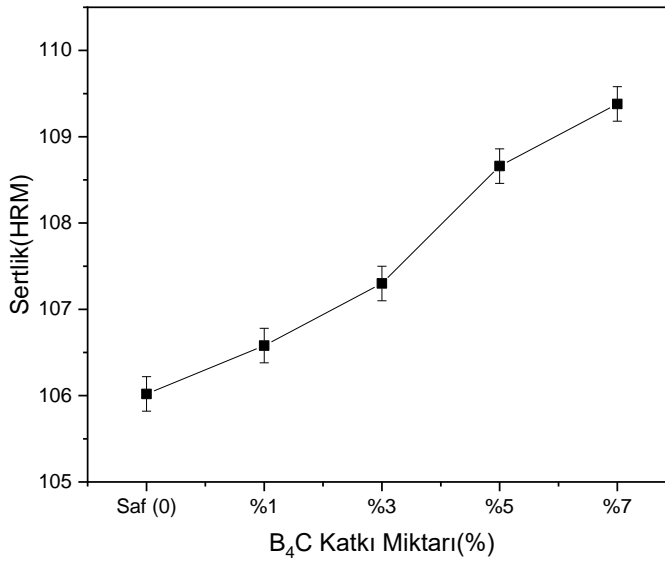
Çizelge 4.3. Numunelere ait darbe enerjisi değerleri

B ₄ C katkı oranı (%)	Darbe enerjisi (kJ/mm ²)
0 (Saf)	24,64 ± 0.9
1	27,55 ± 1.1
3	23,59 ± 0.9
5	22,53 ± 0.9
7	21,19 ± 0.8

Şekil 4.3 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde maksimum darbe enerjisi değeri %1 katkı oranında 27,55 kJ/mm² olarak gözlenmiştir. Bu katkı oranında sonra değerlerde paralel bir düşüş izlenmiştir. Sadece %1 katkı oranının darbe enerjisi değerleri saf kompozit malzemedен fazla olarak gözlenmiştir. %3, %5 ve %7 katkı oranları sırasıyla 23,59, 22,53 ve 21,19 kJ/mm² olarak ölçölüp darbe enerjisini olumsuz yönde etkilemişlerdir. En düşük değer ise %7 katkı oranında gözlenmiştir.

4.4. Kompozit Malzemelerin Sertlikleri

Numunelerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde Rockwell Sertlik yöntemi kullanılmıştır. Her numune 10 defa test edilerek ortalamaları alınmıştır. Numunelerin sertlik değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Grafiğe ait veriler Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Numunelerin katkı oranına göre sertliklerindeki değişim

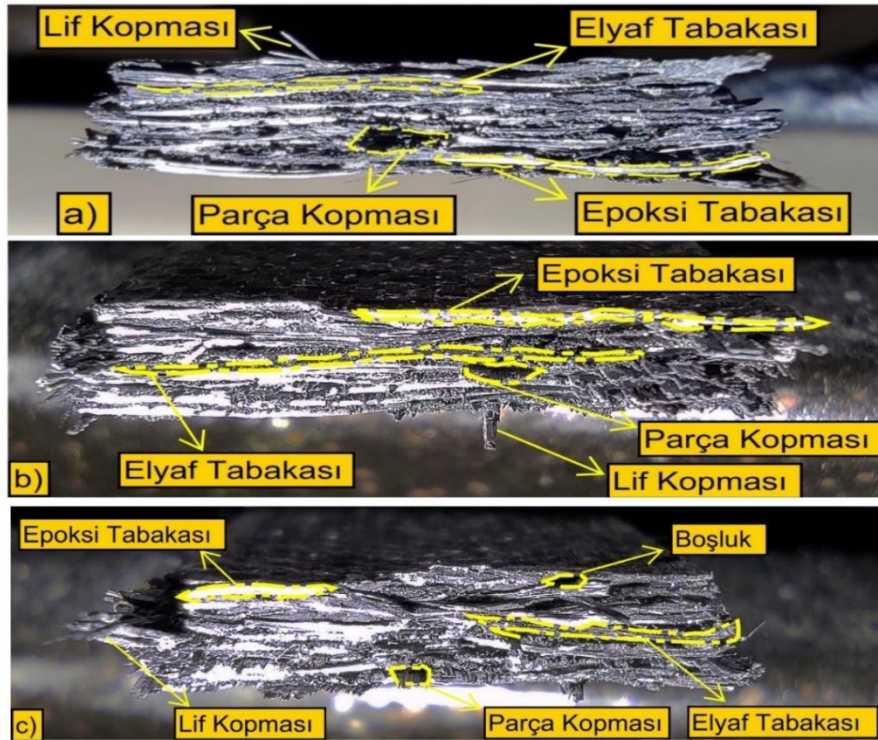
Çizelge 4.4. Numunelere ait sertlik değerleri

B ₄ C katkı oranı (%)	Sertlik değerleri (kg/mm ²)
0 (Saf)	106,02 ± 4.2
1	106,58 ± 4.2
3	107,3 ± 4.3
5	108,66 ± 4.3
7	109,38 ± 4.3

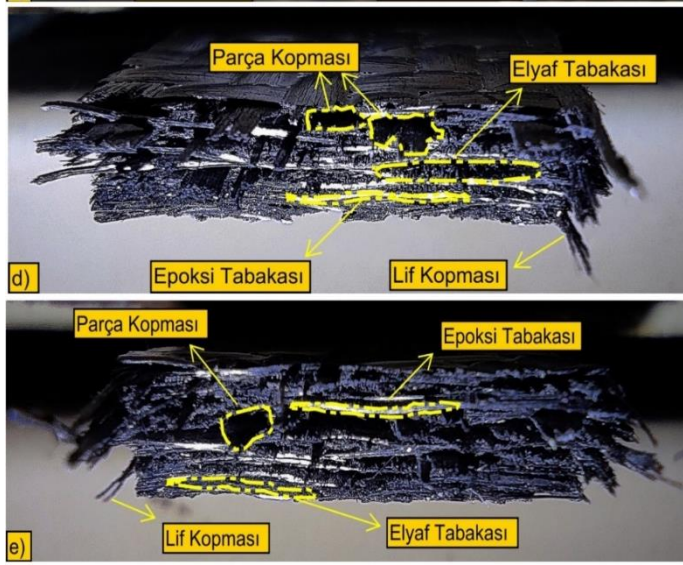
Şekil 4.4 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde sertlik değerlerinin katkı miktarına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Numunelerin sertlik değerleri %1, 3 ve 5 B₄C katkı oranlarında artma meydana gelmiş ve bu değerler sırasıyla 106,8, 107,3 ve 108,66 kg/mm² olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri 109,38 kg/mm² olarak %7 katkı oranında bulunmuştur. B₄C katkısının karbon elyaf katkılı kompozitlerin sertlik değerlerini arttırdığı söylenebilir.

4.5. Kırık Yüzey Kesit Görüntü Analizi

Numunelere uygulanan çekme deneyleri sonucunda malzemelerde oluşan kırık yüzeylerinin kesit analizleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5. Çekme numunelerinin kırık yüzey kesit görüntü analizi; a) saf, b) %1, c) %3, d) %5, e) %7 B₄C katkılı



Şekil 4.6. Çekme numunelerinin kırık yüzey kesit görüntü analizi d) %5, e) %7 B₄C katkı

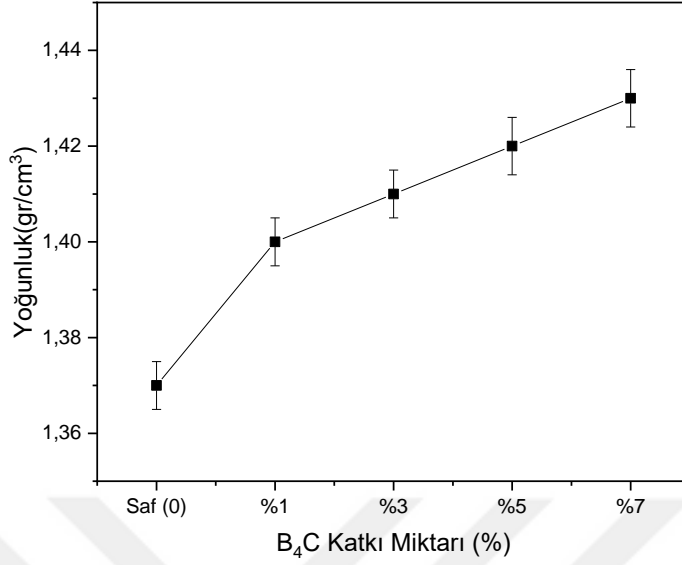
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde malzemelerdeki boşluklar ve parça kopmaları gözlenmektedir. Bu boşlukların ve kopmaların kırılma esnasında oluştuğu düşünülmektedir. Elyaf ve lif katmanları sıralı ve belirli şekilde gözlenmiştir. Numunelerin uç kısımlarında lif kopmaları dağınık şekilde gözlenmiştir. Kırık yüzeylerde katkı oranına veya herhangi bir parametreye bağlı bir farklılık gözlenmemiştir. B₄C katkısının kırık yüzeyler üzerinde herhangi bir etkisi olduğunu söylemek mümkün değildir.

4.6. Kompozit Malzemelerin Yoğunlukları

Kompozit malzemelerin yoğunluk değerleri Arşimed Yoğunluk Prensibi ile ölçülmüştür. Burada, kompozitlerin yoğunluk değerlerinin B₄C katkı miktarıyla ilişkisi araştırılmıştır. Yoğunluklar değerleri 3 örnekten alınan sonuçların ortalaması alınarak bulunmuştur. Numunelerin yoğunluk değerleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Grafiğe ait veriler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Numunelere ait yoğunluk değerleri

B ₄ C katkı oranı (%)	Yoğunluklar (gr/cm ³)
0 (Saf)	1,37 ± 0.05
1	1,40 ± 0.05
3	1,41 ± 0.05
5	1,42 ± 0.06
7	1,43 ± 0.06



Şekil 4.7. Kompozitlerin yoğunlukları

Şekil 4.7 ve Çizelge 4.5'e bakıldığında katkı miktarının artışıyla beraber yoğunluk değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. En yüksek yoğunluk değeri %7 katkı oranında 1,43 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu paralel artış kompozit malzemelerin içerisindeki iç gözenekliliğin azalmasına ve B₄C'nin yoğunluğunun (2,54 gr/cm³) karbon elyaf (2 gr/cm³) ve epoksiden (1 gr/cm³) daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. B₄C katkısının yoğunluk değerlerini arttırdığını söylemek mümkündür.

4.7. Kompozit Malzemelerin Yüzey Pürüzlülük Değerleri

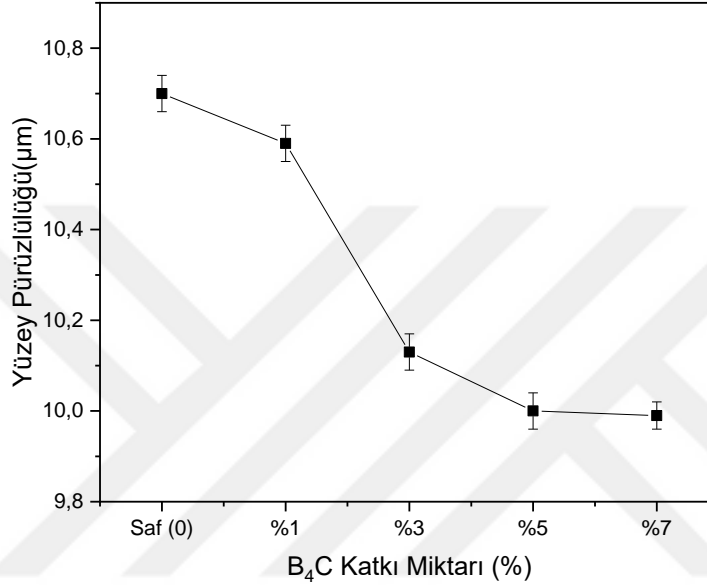
Kompozit malzemelere ait yüzey pürüzlülük değerleri için her numuneden 3 ölçüm yapıp ortalamaları alınmıştır. Burada numunelerin katkı oranlarıyla yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki araştırılmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Grafiğe ait veriler Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri

B ₄ C katkı oranı (%)	Yüzey pürüzlülük değerleri (µm)
0 (Saf)	10,70 ± 0.4
1	10,59 ± 0.4

Çizelge 4.6. Numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri devamı

B ₄ C katkı oranı (%)	Yüzey pürüzlülük değerleri (µm)
3	10,13 ± 0.4
5	10 ± 0.4
7	9,99 ± 0.3



Şekil 4.8. Yüzey pürüzlülük değerleri

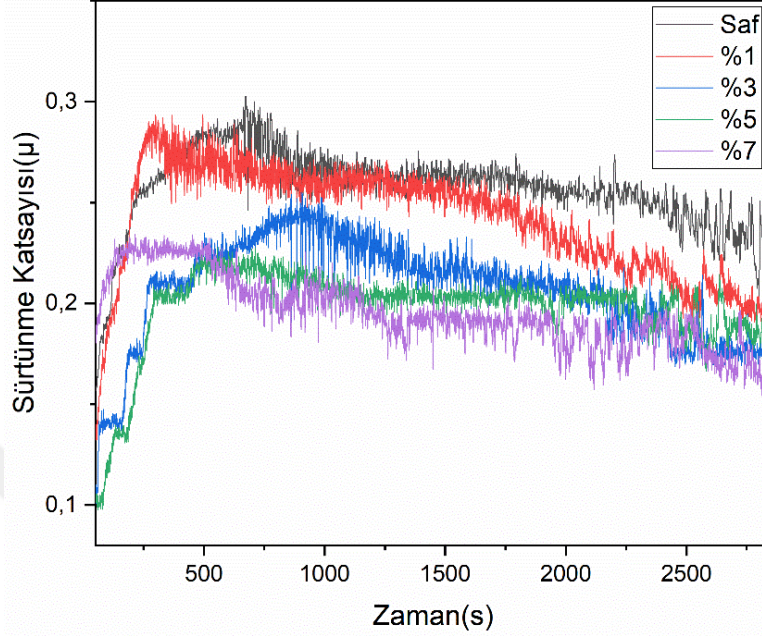
Şekil 4.8 ve Çizelge 4.6 incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerlerinde maksimum değer katkısız numunede 10,70 µm olarak ölçülmüştür. Saf numuneden sonra değerlerde paralel düşüş gözlenmiştir. Buradan B₄C katkısının yüzey pürüzlülük değerlerini iyileştirdiği söylenebilir.

4.8. Kompozit Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Davranışları

4.8.1. Sürtünme Katsayısı (µ)

Saf ve B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma testleri 0,3 m/sn kayma hızında, 20 N yük ve 1000 m kayma mesafesinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan aşınma deneyi süresince numunelere ait sürtünme

katsayısı kaydedilmiştir. Kompozit malzemelere ait sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 4.9'da gösterilmiştir ve grafiğe ait değerler ise Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.9. Kompozitlerin zamana karşı sürtünme katsayısı

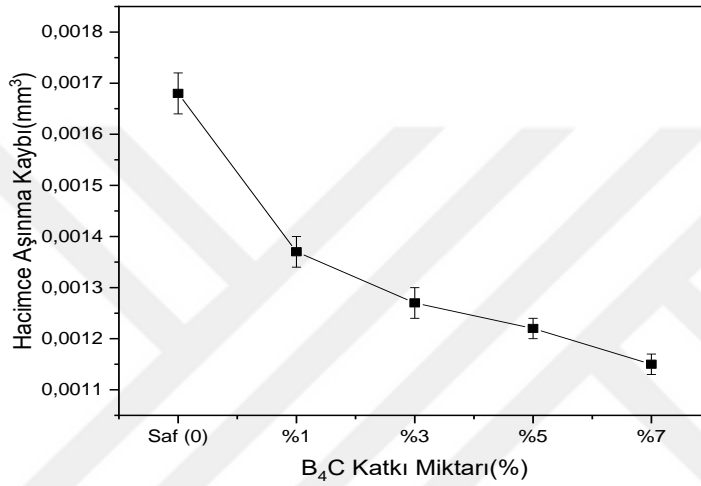
Çizelge 4.7. Kompozitlerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri

B ₄ C katkı oranı (%)	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)
0 (Saf)	$0,239 \pm 9.5 \cdot 10^{-3}$
1	$0,212 \pm 8.4 \cdot 10^{-3}$
3	$0,204 \pm 8.1 \cdot 10^{-3}$
5	$0,192 \pm 7.6 \cdot 10^{-3}$
7	$0,186 \pm 7.4 \cdot 10^{-3}$

Şekil 4.9 ve Çizelge 4.7 incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı katkısız numune gözlenmiştir. B₄C katkı oranının artmasına karşın sürtünme katsayısında düşüş gözlenmiştir. B₄C'nin yüzey pürüzlülük değerini azalttığı bölüm 4.8'de gösterilmiştir. Azalan yüzey pürüzlülüğü sürtünme katsayısının da azalmasına sebep olmuştur. Ayrıca B₄C katı bir yağlayıcı olarak kullanıldığı bilinmektedir (Bhowmick ve ark., 2016). Epoksi matrise katkı olarak ilave edilen B₄C, katı bir yağlayıcı etkisi yaparak sürtünme katsayısında bir azalmaya neden olmuştur. Buradan B₄C katkısının sürtünme katsayısını azalttığını söylemek mümkündür.

4.8.2. Aşınma Hacim Kaybı (mm³)

Kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma mekanizmaları ASTM G99 standardına uygun olarak incelenmiştir (ASTM G99, 2010). Numunelere ait hacim kayıpları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Grafiklere ait değerler Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Kompozit malzemelerde meydana gelen hacimce aşınma kaybı

Çizelge 4.5. Kompozit numunelere ait aşınma hacim kayıpları

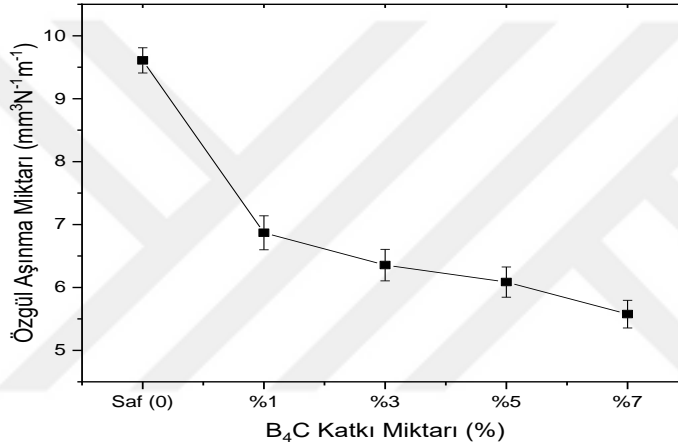
B ₄ C katkı oranı (%)	Hacim kaybı (mm ³)
0 (Saf)	0,00168 ± 6.7*10 ⁻⁵
1	0,00137 ± 5.4*10 ⁻⁵
3	0,00127 ± 5*10 ⁻⁵
5	0,00122 ± 4.8*10 ⁻⁵
7	0,00115 ± 4.6*10 ⁻⁵

Şekil 4.10 ve Çizelge 4.8 incelendiğinde katkı miktarı arttıkça hacim kaybında düşmeler gözlenmiştir. En yüksek hacim kaybı 0,00168 mm³ olarak katkısız numunelerde bulunmuştur. %1 katkı oranında büyük bir düşüş yaşanmış daha sonraki katkı miktarlarında az miktarda azalmalar devam etmiştir. Denklem 3.7 incelendiğinde hacim kaybının kütle kaybı ve yoğunluğa bağlı olduğu bilinmektedir. Bölüm 4.6'da yoğunluk değerlerinin B₄C katkı miktarıyla beraber arttığı gözlenmiştir. Hacim kaybı yoğunlukla ters orantıya sahip olması ve paralel olarak artan yoğunluğa bağlı olarak

hacim kaybının da paralel olarak azalması çalışmanın literatürle uyum sağladığını göstermektedir (ASTM G99, 2010). Buradan B₄C katkısının hacim kaybında azalma meydana getirdiğini söylemek mümkündür.

4.8.3. Özgül Aşınma Miktarı

B₄C katkılı kompozitlere yapılan aşınma testleri sonucunda numunelere ait özgül aşınma miktarı Şekil 4.11’de gösterilmiş ve aşınma değerleri ise Çizelge 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4. 11. Kompozit örneklerin B₄C katkı miktarına göre özgül aşınma miktarları

Çizelge 4.9. Numunelere ait özgül aşınma miktarları

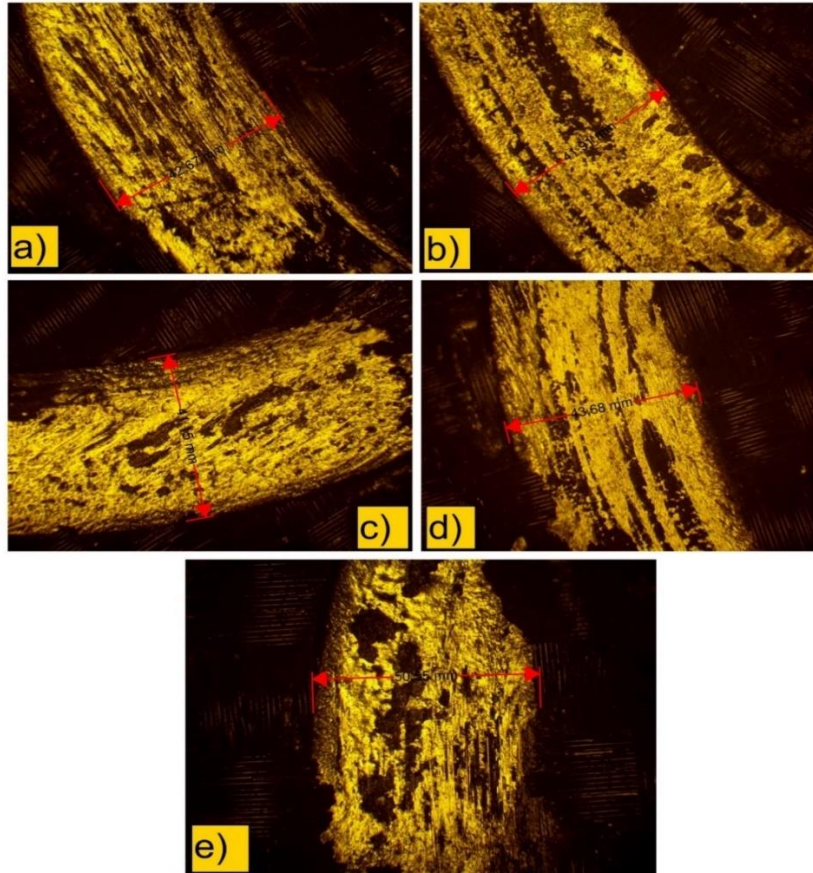
B ₄ C katkı oranı (%)	Özgül aşınma miktarları (mm ³ N ⁻¹ m ⁻¹)
0 (Saf)	9,609 ± 0.3
1	6,868 ± 0.2
3	6,355 ± 0.2
5	6,085 ± 0.2
7	5,576 ± 0.2

Şekil 4.11 ve Çizelge 4.9 incelendiğinde katkı oranına bağlı olarak özgül aşınma miktarında düşüş gözlenmiştir. En yüksek değer 9,609 mm³N⁻¹m⁻¹ olarak katkısız numunelerde bulunmuştur. %1 katkı oranında büyük bir düşüş gözlenip daha sonra az miktarda düşmeye devam etmiştir. Denklem 3.8’e bakıldığında özgül aşınma oranının; kütle kaybı, yoğunluk, aşınma mesafesi ve uygulanan yüke bağlı olduğu bilinmektedir. Deneyler süresince yük ve aşınma mesafesi sabit tutulmuştur. Özgül aşınma miktarı,

kütle kaybı ve yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Malzemelerde meydana gelen aşınmaya bağlı kütle kaybı ve B_4C 'ye bağlı yoğunluk değerlerinin artmasıyla özgül aşınma miktarında azalma gözlenmiştir. Yani diğer bir ifadeyle, epoksi matrise katkı yapılan B_4C 'in ikincil faz etkisiyle çekme mukavemeti ve sertlikte meydana getirdiği artışın bir sonucu olarak epoksi kompozitlerin aşınma direncinde bir artış meydana gelmiştir.

4.8.4. Kompozit Malzemelerde Meydan Gelen Aşınma Mekanizmaları

Aşınma testine tabii tutulan kompozit numunelerin aşınma mekanizmalarını belirlemek için aşınma izlerinden optik mikroskop görüntüleri alınmıştır ve bu görüntüler Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir. Aşınma izlerinin optik mikroskoptaki 5x büyütme görüntülerinde tüm aşınma iz kalınlığı yer almaktadır. Numunelere ait iz kalınlıkları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

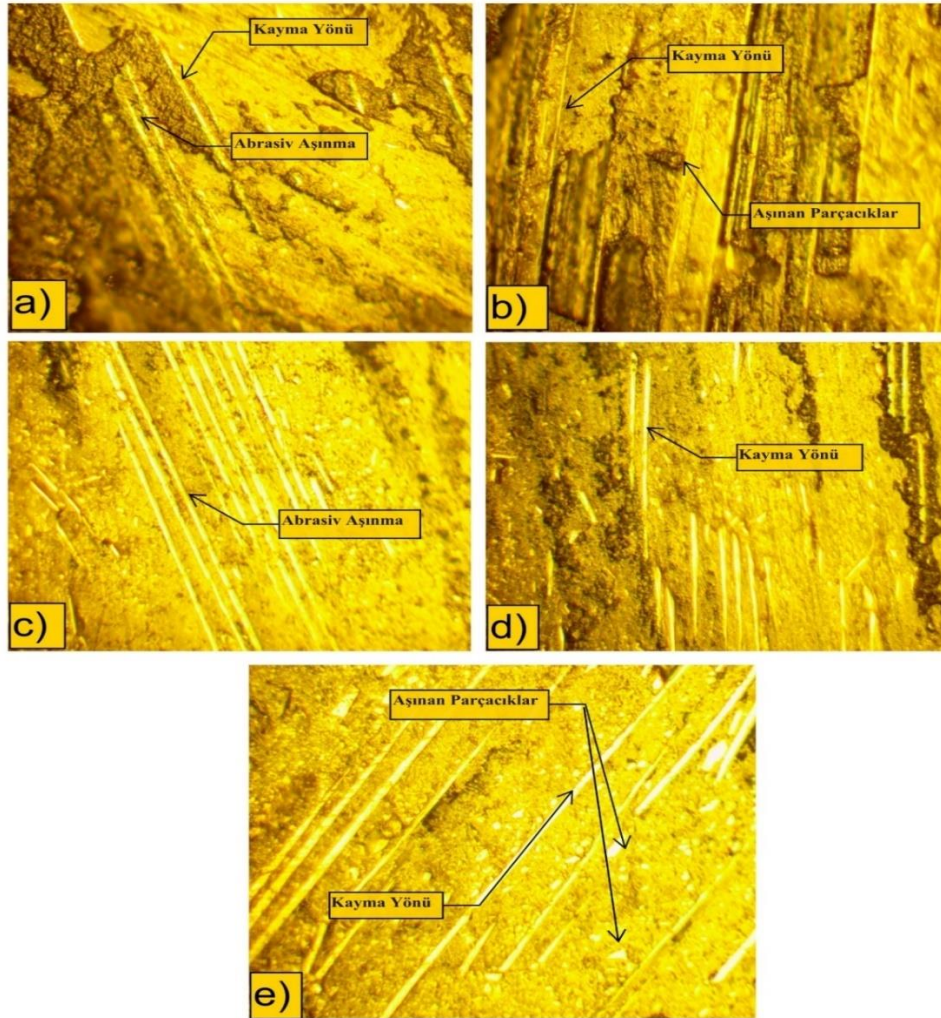


Şekil 4.12. 20 N yük altında test edilen numunelerin 5X büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri a) 0 (saf), b) %1, c) %3, d) %5, e) %7 B_4C katkı

Çizelge 4.10. Aşınma iz çap değerleri (mm)

B ₄ C katkı oranı (%)	İz Çapı (mm)
0 (Saf)	42,67
1	41,92
3	41,15
5	43,68
7	50,55

%3 B₄C katkısına kadar azalan iz kalınlığı, %5 katkısından sonra ise artış yaşanmıştır ancak iz çaplarının boyutları ile B₄C katkıları ile doğrudan bir ilişki kurulamamıştır. Ancak izler incelendiğinde aşınma yüzeylerinde B₄C katkısı ile topaklanmaya bağlı olarak malzemede boşluklar meydana geldiği gözlenmiştir (Uraylı, 2018).



Şekil 4.13. 20 N yük altında test edilen numunelerin 50X büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri a) 0 (saf), b) %1, c) %3, d) %5, e) %7 B₄C katkılı

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 incelendiğinde aşınmaların abrasiv aşınma olduğu görülmektedir. Abrasiv aşınmada çokça karşılaşılan sert parçacıkların yüzeyde oluşturduğu kılcal ve parlak izler görülmektedir. Bunun temelinde sert B₄C mikro partiküllerinin epoksi tabakası üzerinde hareket etmesidir. Ayrıca aşındırma yüzeyinde oluşan derin çiziklerin aşındırma esnasında kopan parçacıkların aşındırıcı pin arasına girmesine atfedilebilir. Bu duruma bağlı olarak kayma yönleri belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4.13’de katkı miktarı arttıkça aşınmanın daha belirgin olduğu görülmektedir. Katkı miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısının düştüğü düşünüldüğünde bu duruma kopan partiküllerin sebep olduğu anlaşılmaktadır.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Karbon elyaf içerisine katılan B₄C'nin %5 katkı miktarına kadar çekme gerilmesinde artış meydana getirdiği bulunmuştur. %1 B₄C katkı oranında çekme gerilmesi %4.16 artışla 626 MPa olarak ölçülmüştür. %5 katkı oranında %0.66 gibi düşük bir artış gözlenmiştir. En yüksek artış miktarı %7.82 ile %3 katkı oranında 648 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük çekme gerilmesi %5.16 azalmayla %7 katkı oranında ölçülmüştür.

B₄C'nin %5 katkı oranına kadar eğilme gerilmesinde artış meydana getirdiği gözlenmiştir. %1 B₄C katkı oranında eğilme gerilmesi %2.45 artışla 670 MPa olarak ölçülmüştür. %5 katkı oranında en düşük artış miktarı gerçekleşmiş olup bu değer %1.83 artışla 666 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek artış miktarı %9.94 ile %3 katkı oranında 719 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük eğilme gerilmesi %1.07 azalmayla %7 katkı oranında ölçülmüştür.

B₄C katkısının %1 katkı oranında Charpy Darbe enerjisini arttığı, diğer katkı oranlarında azalma meydana getirdiği bulunmuştur. %1 katkı oranında %11.81 artışla maksimum değer 27.55 kJ/mm² bulunmuştur. %3, %5 ve %7 katkı oranlarında sırasıyla %4.16, %8.56, %14 azalma görülüp bu değerler yine sırasıyla 23.59, 22.53 ve 21.19 kJ/mm² olarak bulunmuştur.

B₄C'nin katkı miktarının artışına bağlı olarak sertlik değerini arttırdığı bulunmuştur. En düşük sertlik değeri saf karbon elyaf takviyeli kompozit malzemede 106.02 kg/mm² olarak ölçülmüştür. %1, %3 ve %5 katkı miktarlarında sırasıyla %0.53, %1.21, %2.49 artış meydana gerek bu değerler yine sırasıyla 106.58, 107.3, 108.66 kg/mm² olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri ağırlıkça en fazla B₄C katkısına sahip %7 oranında %3.17 artışla 109.38 kg/mm² olarak bulunmuştur.

B₄C'nin artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerini azaldığı gözlenmiştir.

B₄C'nin katkı miktarına bağlı olarak yoğunluk değerini arttırdığı bulunmuştur. En düşük yoğunluk değeri saf numunelerde 1,37 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. %1, %3, %5 katkı miktarlarında sırasıyla % 2.18, %2.91, % 3.64 artışlarla 1.40 1.41, 1.42 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. En yüksek yoğunluk değeri %4,38 artışla 1.43 gr/cm³ olarak %7 katkı oranında ölçülmüştür.

Yapılan çekme ve eğilme deneyleri sonucunda incelenen numunelerde kırılmalar lif kopmaları ve mikro boşluklar gözlenmiştir. Kırılmalara en zayıf elyaf bağlarının ve mikro boşlukların sebep olduğu sonucuna varılmış ancak B₄C katkısıyla kırık yüzeyler arasında herhangi bir ilişki tespit edilememiştir.

B₄C katkısı ile numunelerde abrasiv aşınma meydana gelmiştir. B₄C mikro yapıda topaklanma meydana getirmiştir.

B₄C katkısının sürtünme, aşınma ve spesifik aşınma miktarlarını iyileştirdiği bulunmuştur.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada kompozit malzemeler vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit malzemeler farklı üretim metotlarıyla üretilip, deneyler tekrarlanabilir.

Bu çalışmada mikro B₄C partikülleri kullanılmıştır. Nano B₄C partikülleriyle üretim yapılarak nanoteknolojinin etkileri araştırılabilir.

Elyafar modifiye edilerek üretim gerçekleştirilip, karbon elyafın farklı etkileri araştırılabilir. Farklı örgü yapısına sahip karbon elyafar tercih edilip karşılaştırma yapılabilir.

B₄C katkı miktarı artırılarak sertlik ve yoğunluk değerleri değişimleri araştırılabilir. Farklı sertlik ölçüm yöntemleri bakılarak karşılaştırma yapılabilir. Yüksek katkı miktarlarıyla mekanik ve tribolojik testler tekrarlanıp karşılaştırma yapılabilir.

Aşınma testleri sabit yük ve kayma mesafesinde yapıldı. Buradaki parametreler değiştirilerek farklı yük, kayma mesafesi değiştirilerek karşılaştırma yapılabilir.

B₄C katkı miktarı azaltılarak testler yeniden gerçekleştirilip karşılaştırma yapılabilir.

Farklı katkı maddesi veya farklı takviye malzemesi kullanılarak üretim gerçekleştirilebilir.

B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli kompozitler üzerinde basma testi, IZOD Charpy deneyi veya 4 nokta eğilme deneyi gibi farklı mekanik testler gerçekleştirilip karşılaştırma yapılabilir.

B₄C katkılı karbon elyaf takviyeli kompozitler karbon elyafın hafifliği ve B₄C'nin yüksek dayanımı sebebiyle havacılık sektöründe kullanılması düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- ADVANI, S. G., and HSIAO, K. T., 2012. Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs) Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs). Elsevier, 245-251.
- AKIN, G. 2006, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,36-39.
- AL-BENDER, FARİD, VINCENT LAMPAERT, AND JAN SWEVERS., 2004. A novel generic model at asperity level for dry friction force dynamics. Tribology Letters 16.1-2 (2004): 81- 93.
- ALİ O. SEZER, J.I., 2001. Brand, Materials Science and Engineering, B79(2001), 191.
- ALİZADEH, A., TAHERİ-NASSAJ, E., & EHSANİ, N. 2004. Synthesis of boron carbide powder by a carbothermic reduction method. Journal of the European Ceramic Society, 24 (10), 3227-3234.
- AMERİO, E., FABBRİ, P., MALUCELLİ, G., MESSORİ, M., SANGERMANO, M., TAURİNO, R., 2008. Scratch resistance of nano-silica reinforced acrylic coatings, Progress in Organic Coatings 62, 129-133.
- ARICASOY, O. 2006. Kompozit Sektör Raporu (İstanbul Ticaret Odası, 4) 1 Aralık İstanbul: İTO, 9.
- ASTM D3039, 1997. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- ASTM G99, 2010. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, American Society for Testing and Material.
- ASTM G99-17, 2017. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org , Erişim tarihi: 3 Nisan 2021.
- BADİE M., MAHDİ E., HAMOUDA A., 2011. An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft, Materials and Design, 32: 1485–1500.
- BAPTİSTA, R., MENDÃO, A., RODRİGUES, F., FİGUEİREDO-PİNA, C.G., GUEDES, M., MARATMENDES, R., 2016. Effect of high graphite filler contents on the mechanical and tribological failure behavior of epoxy matrix composites, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 85:113–124.
- BARADESWARAN A, ELAYAPERUMAL A., 2013. Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075–B4C composites. Composites: Part B 54: 146–52.
- BARBERO, E. J. 1999. Introduction to Composite Materials Design. Taylor & Francis, pp., New York, 25-30.
- BARBERO, E. J., 2018, Introduction to Composite Materials Design, Third edition, CRC Press Taylor & Francis Group., New York, 37-102.

- BAYER, R. G., 2004. Mechanical wear fundamentals and testing. New York: Marcel Dekker.
- BEŞERGİL, B. 2016. Kompozitler Temel İlkeler Test Metotları. Gazi Kitabevi, pp. 37,38,51,114,459,493,518, Ankara.
- BHOWMICK, S., SUN, G., ALPAS, A.T., 2016. Low friction behaviour of boron carbide coatings (B₄C) sliding against Ti-6Al-4V, 308: 316-327.
- BHUSHAN, B., 2013. Introduction to Tribology (2nd Edition). John Wiley & Sons.
- BHUSHAN, B., 2000. Modern Tribology Handbook. CRC Yayınevi.
- BODUR, M.S., 2016. Doğal Lif Takviyeli Kompozitlerde Lif / Matris Ara Yüzey İyileştirme Çalışmaları ve Çevresel Koşullara Göre Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- BOREN-Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü 2016, [online], <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>. Erişim tarihi 5 Ağustos 2021.
- BOREN, <http://www.concentric.net/~ctkang/b4c.shtml>. Erişim tarihi 10 Ağustos 2021.
- BRATUKHİN, A. G., & BOGOLYUBOV, V. S., 1995. Composite manufacturing technology. (1st ed.). UK: Springer Science & Business Media.
- CAMPBELL, F. C., 2004. Manufacturing processes for advanced composites, Elsevier, New York.
- CHAWLA, K. K., 1987. Composite Materials. Science and Engineering. SpringerVerlag New York Berlin Heidelberg London Paris Tokyo.
- CHAWLA, K.K., 2011, Composite Materials Science and Engineering, Third Edition Springer , New York, USA, 11-140.
- DANIEL, I.M. AND ISHAİ, O., 1994. Engineering mechanics of composite materials, Oxford University Press.
- DAS, A., SATAPATHY B.K., 2011, Structural, thermal, mechanical and dynamic mechanical properties of cenosphere filled polypropylene composites, Materials and Design, 32:1477-1484.
- DİL, T., 2016. Polimer Matrisli Kompozitlerde Sarım Açısının Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- DOÇ. DR. YUSUF ŞAHİN., 2001. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, İstanbul, Türkiye, .
- DONG, C., DAVIES, I. J., 2014. Flexural and tensile strengths of unidirectional hybrid epoxy composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres. Materials & Design, 54, 955-966.
- ER, U., 2004. Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler. <http://www.hho.edu.tr/huten/2003> Erişim tarihi 27 Haziran 2021.
- ERCENK E., 2011. Bazalt Esaslı Sic Takviyeli Cam Ve Cam-Seramik Kaplamaların Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü, Doktora Tezi, Sakarya.
- GARRETT, D.E. (Ed.), 1998. Borates: Handbook of deposits, processing, properties, and use. Academic Press.
- GAY, D., & HOA, S. V., 2003. Composite materials: design and applications. (1st ed.). Boca Raton: CRC press.
- GAY, D., HOA, S. V. AND TSAİ, S.W., 2003, "Composite materials design and applications, 4th ed.", CRC Press, New York, 15-20,151, 168,187-209.
- GAY, D., HOA, S.V., TSAİ S.W., 2003. Composite Materials Design and Applications. 3-27, Paris.

- GOREN, A. AND ATAS, C., 2008. Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. Archives of materials Science and Engineering, 34 (2), 117-120.
- GREENFACTS, 2004. Scientific facts on boron. Page:1-13.
- HANDE SEZGİN, 2018. Investigation And Enhancement Of The Mechanical Properties Of The Fabric Reinforced Hybrid Composites. Istanbul Technical University.
<http://www.azom.com> International Tungsten Association and Ceramic Research, Erişim tarihi 01 Ağustos 2021.
- <http://www.hho.edu.tr> , 2003-2004 havacılık sanayinde kullanılan plastik matrisli kompozit malzemeler. Erişim tarihi 08 Ağustos 2021.
- <http://www.kompozit.net.com> , Karbon elyaf 3k twill teknik özellikleri, Erişim tarihi 11 Kasım 2020.
- HÜNER, Ü., 2014. Çeşitli Elyafarla Takviye Edilmiş Termoplastik Kompozitlerin Levha Ekstrüzyonunun ve Özelliklerinin İncelenmesi. (Yayımlanmamış doktora tezi). Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- JAREEL, D, J. AND BEJBL, F., 1999. Understanding wear and friction in medical-grade stainless steels, Medical Device & Diagnostic Industry Magazine, 2-3.
- KADHIM, M. J., ABDULLAH, A. K., AL-AJAJ, I. A., and KHALIL, A. S., 2013. Mechanical Properties of Epoxy/Al₂O₃ Nanocomposites. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, 2(11): 10-16.
- KALPAKJIAN, S., SCHMID, S. R. 2009. Manufacturing Engineering and Technology (Sixth Edition in SI Units). Pearson - Prentice Hall, pp. New York, 216-222.
- KARASU, H., 2014. Kompozit disk yayların tasarımı ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- KARL-HEINZ Z. G., JOHN A. WILLIAMS., 1987. Microstructure and Wear of Materials, Tribology Series, 10.
- KAŞKAN, A., 2005. “Grafit katkılı nylon6(poliamid6)nın aşınma davranışlarının incelenmesi”, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 21-22.
- KATO, K. VE ADACHI, K., 2001. Modern Tribology Handbook, Chapter7, Wear Mechanisms, CRC Press LLC.
- KAW, A. K., 2006. Mechanics of Composite Materials (2nd ed.). CRC Press, pp. 8- 12, Boca Raton, FL.
- KUMDALI F., 2008. Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- LARSEN T., 2007. ANDERSEN T., THORNING B., HORSEWELL A., VIGILD M., Comparison of friction and wear for an epoxy resin reinforced by a glass or a carbon/aramid hybrid weave, Wear Volume 262, Issues 7–8, pp. 1013– 1020.
- L. MCCARTY, 1958. *J. Am. Chem. Soc.*, 80, 2592., <https://www.webelements.com> ,Erişim tarihi 26 Ağustos 2021.
- LEE, D. G., AND SUH, N. P., 2006. Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools, and Automobiles OXFORD university press.
- LOPEZ-ANİDO R., NAİK T., 2000. Emerging Materials for Civil Infrastructure. State of the Art, American Society of Civil Engineers.
- M. ALTIN KARATAŞ AND H. GÖKKAYA., 2018. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, Def. Technol., vol. 14, pp. 318–326.

- MALLICK, P.K., 2007. Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design. CRC Press.
- MANG, T.; DRESEL, W., 2007. Lubricants and Lubrication; Wiley-Vch Weinheim, Germany, Vol. 2.
- MAZUMDAR, S., 2002. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering (5th ed.). Boca Raton: CRC Press.
- MIRACLE, D. B., DONALDSON, S. L., 2001. Introduction to Composites. In: A. S. M. Handbook Volume 21: Composites (Miracle, D. B., Donaldson, S. L. Eds.), ASM International, pp. 1, Ohio.
- MISRA, R.D.K., NATHANI, H., DASARI, A., WANJALE, S.D., JOG, J.P., 2004. The determining role of clay particles on mechanically induced surface damage and associated stress whitening in polybutene-clay nanocomposites, *Materials Science and Engineering A* 386, 175-185.
- MOHANTYA, R.M., BALASUBRAMANIANA, K., SESHADRIB, S.K., 2008. Boron carbide reinforced aluminium 1100 matrix composites: Fabrication and properties, *Materials Science and Engineering*, 498: 42–52.
- Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti. Erişim tarihi 01 Ocak 2021.
- NASIR, R.MD., AZIZAN, M.M., 2011 Adhesion and friction of E-glass fiber reinforced epoxy composites for tribo-applications, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 24, pp. 1-14.
- ODABAŞ D., TOPAL E.S., 1995, 100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Denizli, 396-405.
- ONUK, E., 1994. Kompozit İmalat Konferans, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul.
- ÖZSARAÇ, U., 1999. Endüstriyel Yatak Alaşımalarının Aşınma Davranışlarının Karakterizasyonu. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- P. K. MALLICK., 1989. Fibre-reinforced composites: materials, manufacturing and design, vol. 20, no. 2.
- PANDYA KS, Veeraju C, Naik NK., 2011. Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading. *Materials and Design*.32: 4094- 4099.
- PIHTILI, H., 2009. An experimental investigation of wear of glass fibre–epoxy resin and glass fibre–polyester resin composite materials, *European Polymer Journal* (45), 149–154.
- POLİYA (2017). El Yatırma Uygulamaları, <https://www.poliya.com/tr/el-yatirmasi-ve-elyaf-puskurtme> . . 24 Şubat, 2019.
- RABINOWICZ, E., 1976. Wear. *Materials Science and Engineering*, 25, 23–28. doi: 10.1016/0025-5416(76)90047-1.
- SHELDON, G. L., 1970. Similarities and Differences in the Erosion Behavior of Materials. *Journal of Basic Engineering*, 92(3), 619–626. doi: 10.1115/1.3425086.
- SHI, G., ZHANG, M.Q., RONGA, M.Z., WETZEL, B., FRIEDRICH, K., 2003, Friction and wear of low nanometer Si₃N₄ filled epoxy composites, *Wear*, 254:784–796.
- STACHOWIAK, G. W. & BATCHELOR, A. W., 2005. *Engineering Tribology*, 3th edition.
- STACHOWIAK, G. W. VE BATCHELOR, A. W., 2011. *Engineering Tribology*, 3, Butterworth-Heinemann, Oxford.

- SURESHA B. and CHANDRAMOHAN G., SAMAPTHKUMARAN P., SEETHARAMU S. and VYNATHEYA S., 2006. Friction and wear characteristics of carbon-epoxy and glass-epoxy woven roving fiber composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, No. 7.
- SURESHA, B., CHANDRAMOHAN G., 2007. Effect of normal load and sliding velocity on friction and wear behavior of carbon fiber reinforced epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 26, No. 16.
- ŞAHİN, Y., 2006, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 2. Baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara, 27-139.
- TABOR, DAVID., 1981. Friction: the present state of our understanding. *Journal of lubrication technology*, 103-169.
- THÉVENOT, F., 1990. Boron carbide—A comprehensive review, *Journal of the European Ceramic Society*, 6, p. 205.
- TONG, L., MOURITZ, A.P., BANNISTER, M.K., 2002. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, (Elsevier Science), pp. 221-239.
- TOPCU, I., H. O. GULSOY, N. KADIOĞLU., AND A. N. GULLUOĞLU., 2009. *Journal of Alloys and Compounds*, Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites, 482, pp. 516-521.
- TOPCUA, I., GULSOYB, H.O., KADIOĞLUC, N., GULLUOĞLUA, A.N., 2009. Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 482: 516–521.
- TOSUN G., KURT M., 2019. Metal Matrisli Al₂O₃/Al-Mg Kompozitinin Yoğunluğunun Üretim Parametrelerine Bağlı Olarak Değişimi, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi* 31(1), 21-28.
- TÜRKER H.T, MARDANI A., DELİKTAŞ A., 2019. İki Eksenli Eğilme Gerilmesi Altında Bulanık Çimento Esaslı Malzemelerin Çekme Dayanımının Üçgen Plaka Yöntemi ile (ÜPY) İncelenmesi, *Uluslararası 10. Beton Kongresi*, 2-4 Mayıs, Bursa.
- URAYLI, Ç., 2018. Cu-B₄C Kompozit Malzemelerdeki Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Kastamonu.
- WETZEL, B., HAUPERT, F., ZHANG, M., 2003. Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance, *Composites Science and Technology*, 63 (14): 2055–2067.
- WILEY, C. S., 2011. Synergistic methods for the production of high-strength and low-cost boron carbide (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- WONDERLY, C., GRENESTEDT, J., FERNLUND, G., CEPUS, E., 2005. Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites, *Composites: Part B*, 1-10.
- www.balikesir.edu.tr/~hguler/bor_kimyası.htm , Erişim tarihi 12 Ocak 2021.
- ZHANG, H., RAMESHA, K.T., CHIN, E.S.C., 2004. High strain rate response of aluminum 6092/B₄C composites”, *Materials Science and Engineering*, 384: 26–34.

