

**FARKLI FİBER YÖNLERİNDE ÜRETİLEN EPOKSİ POLİMER
MATRİSLİ KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
BORULARDA İŞLENEBİLİRLİĞİN ARAŞTIRILMASI**

MERVE YILMAZ ARICI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR.ÜYESİ MERT KILINÇEL**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI FİBER YÖNLERİNDE ÜRETİLEN EPOKSİ POLİMER
MATRİSLİ KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
BORULARDA İŞLENEBİLİRLİĞİN ARAŞTIRILMASI

Merve Yılmaz Arıcı tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi. Mert KILINÇEL
Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Doç. Dr. Şenol ŞİRİN
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi. Mert KILINÇEL
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Turgay KIVAK
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU
Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 22/09/2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

22 Eylül 2023

Merve Yılmaz Arıcı



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Mert KILINÇEL hocama en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Doç. Dr. Şenol Şirin hocama şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime ve biricik aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresinde bana her anlamda destek veren iş yerim Teknopro Mühendislik ve Endüstri Tesisleri Üretim A.Ş. firmasına ve yöneticilerime teşekkürlerimi sunarım.

22 Eylül 2023

Merve YILMAZ ARICI

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. KOMPOZİT MALZEMELER.....	1
1.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI	2
1.2.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ..	2
1.2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	3
1.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	3
1.2.1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	3
1.2.2. Takviye Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	5
1.2.2.1. Elyaf (Lif) Takviyeli Kompozitler	5
1.2.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	8
1.2.2.3. Tabakalı (katmanlı) Kompozit Malzemeler	9
1.2.2.4. Karma (Hibrit) Kompozit Malzemeler.....	9
1.2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	9
1.2.3.1. Elle Yatırma (Hand Lay-up) Kalıplama Yöntemi	10
1.2.3.2. Püskürtme Yöntemi	10
1.2.3.3. İplik (Filament) Sarma Yöntemi	11
1.2.3.4. Vakum Torbalama Yöntemi	11
1.2.3.5. Vakum İnfüzyon Yöntemi	12
1.2.3.6. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi.....	12
1.2.3.7. Pultrüzyon Yöntemi.....	13
1.2.3.8. Otoklav Yöntemi.....	13
1.2.3.9. Sıcak Presleme Yöntemi.....	14
1.2.3.10. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi.....	14
1.2.3.11. Yuvarlanma ile Sarma (Roll-Wrapping) Yöntemi.....	15
1.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE	
İŞLENEBİLİRLİK.....	16
1.3.1. İşlenebilirliğe Etki Eden Faktörler	17
1.3.1.1. İşleme Türü ve İşleme Parametreleri.....	17
1.3.1.2. Malzeme Türü ve Özellikleri.....	19
1.3.1.3. Elyaf Yönlenmesi.....	19
1.3.1.4. Takım Özellikleri.....	20
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM	28
3.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI.....	28
3.2. DENEY NUMUNELERİ KÜRLEME İŞLEMİ.....	31
3.3. TORNALAMA DENEY DÜZENEGİ	32

4. BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	36
4.2. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	38
4.3. KESİCİ TAKIM AŞINMASI VE MEKANİZMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	40
4.4. TALAŞ OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
6. KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	52



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Takviye çeşitleri ve matris yapısı [13].	2
Şekil 1.2. Matris malzemelerine göre kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları [13].	5
Şekil 1.3. a) Tek yönlü sürekli elyaf b) Çift yönlü sürekli elyaf c) Dağınık süreksiz elyaf [21].	5
Şekil 1.4. Kompozit malzemede elyafların yerleşimi [22].	6
Şekil 1.5. Liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri [23].	6
Şekil 1.6. Cam elyaf üretim prosesi [25].	7
Şekil 1.7. Karbon elyaf [26].	8
Şekil 1.8. Parçacık takviyeli kompozit [29].	8
Şekil 1.9. Tabakalı kompozitlerin yapısal gösterimi ve sandviç panellerin yapısı [29].	9
Şekil 1.10. Elle yatırma yöntemi [32].	10
Şekil 1.11. Elyaf püskürtme yöntemi [33].	11
Şekil 1.12. Elyaf sarma yöntemi [34].	11
Şekil 1.13. Vakum torbalama yöntemi [34].	12
Şekil 1.14. Vakum infüzyon yöntemi [35].	12
Şekil 1.15. Reçine transfer yöntemi [34].	13
Şekil 1.16. Pultrüzyon yöntemi [36].	13
Şekil 1.17. Otoklav yöntemi [37].	14
Şekil 1.18. Sıcak presleme yöntemi [38].	14
Şekil 1.19. Enjeksiyon kalıplama yöntemi [39].	15
Şekil 1.20. Tornalama işlemi [44].	17
Şekil 1.21. Frezeleme işlemi [45].	18
Şekil 1.22. Delik delme işlemi [46].	18
Şekil 1.23. Taşlama işlemi türleri [47].	19
Şekil 2.1. Farklı ilerleme hızlarında güç ve malzeme üzerinden talaş kaldırma oranı [52].	23
Şekil 3.1. Kalıp ayırıcı	28
Şekil 3.2. Kalıp ayırıcı uygulaması yapılan alüminyum borular	29
Şekil 3.3. Deney numunelerine ait sarma işlemi.	30
Şekil 3.4. Farklı açısız fiber yönlerinde hazırlanan karbon fiberler.	31
Şekil 3.5. Kütleme sırasında deney numuneleri.	32
Şekil 3.6. Fırınlanmış deney numuneleri.	32
Şekil 3.7. Tornalama işlemindeki numune.	33
Şekil 3.8. Tornalama işleminde kullanılan kesici takım uçları.	33
Şekil 3.9. Kullanılan kesici takım hakkında detaylı bilgiler.	33
Şekil 3.10. Tornalama sonrası deney numuneleri.	34
Şekil 3.11. a) Kesme sıcaklığının, b) İşlenen yüzeydeki yüzey pürüzlülüğünün deneysel detayları ve ölçüm	35
Şekil 4.1. Kesme hızlarında farklı lif açılarında yüzey pürüzlülük değerleri.	36
Şekil 4.2. Kesme hızlarında farklı elyaf açılarında kesme sıcaklık değerleri.	38
Şekil 4.3. Farklı kesme hızlarında ve farklı elyaf açılarında kesme sıcaklığı ekran görüntüleri.	39
Şekil 4.4. Kesici takım işleme ve farklı elyaf sarım yönü: (a) 0°, (b) 45° ve (c) 90°.	40
Şekil 4.5. 200 m/dak kesme hızı altında farklı elyaf açılarında yanak aşınma	

sonuçları.	40
Şekil 4.6. 200 m/dak kesme hızında farklı lif açılarında talaş oluşumu.	42



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1. Bazı termoplastiklere ait özellikler [19].	4
Çizelge 2.1. Kesme işlemi için dikkate alınan parametre değerleri [52].	22
Çizelge 3.1. Karbon fiber kumaşların fiber özellikleri.	30
Çizelge 3.2. West sistemi Pro-Set Lam 125/224 epoksinin mekanik özellikleri.	31
Çizelge 3.3. Teknik özellikler ve deneysel ayrıntılar.	34



KISALTMALAR

CBN	Kübik Bor Nitrür
CNC	Bilgisayar Destekli Kontrol
CTP	Cam Takviyeli Polyester
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
FRP	Karbon Elyaf Takviyeli Plastik
HSS	Yüksek Hız Çeliği
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
PCD	Polikristal elmas
PLC	Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
RPM	Devir sayısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
TIN	Titanyum Nitrür
UD	Tek Yönlü

SİMGELER

$\sigma_{\check{c}}$	Çekme mukavemeti
E/ρ	Özgöl elastite modülü
ρ	Yoğunluk
$\sigma_{\check{c}}/\rho$	Özgöl çekme mukavemeti
E	Elastite modülü
$^{\circ}\text{C}$	Celsius
g/cm^3	Özgöl ağırlık
S_a	Yüzey alanı
V_c	Kesme hızı
R_a	Yüzey pürüzlülüğü
kW	Güç
f	İlerleme hızı



ÖZET

FARKLI FİBER YÖNLERİNDE ÜRETİLEN EPOKSİ POLİMER MATRİSLİ KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BORULARDA İŞLENEBİLİRLİĞİN ARAŞTIRILMASI

Merve YILMAZ ARICI

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi. Mert KILINÇEL

Eylül 2023, 51 sayfa

Günümüzde özellikle gelişen batarya sistemlerinin daha verimli kullanılabilmesi adına yüksek mukavemetli ve hafif malzemelerin arayışı hızla devam etmektedir. Bu nedenle kompozit malzemeler daha fazla ilgi görmektedir. Kompozit malzemeler iki veya daha fazla malzemeden elde edilir ve bu malzemelerin üstün özelliklerini içerirler. Fiber takviye plastikler (FRP), önemli miktarda yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin denizcilik, havacılık, motor sporları, enerji ve savunma sanayisinde kullanılmaktadır. Ancak yine de uzun üretim süreleri, yüksek üretim maliyetleri ve karmaşık geometrilerdeki zorluklar gibi üstesinden gelinmesi gereken bazı zorlukları bulunmaktadır. Formlu geometrilerde ürün elde etmek için filament sarma, pultrüzyon ve vakum torbalama gibi çeşitli üretim yöntemleri mevcut olmasına rağmen, kalıp üzerine elle yatırma yöntemi, yüksek mukavemetli malzemeleri geliştirmek için en verimli yöntemdir. Tez çalışmasında karbon fiber ve polimer matris çalışılmıştır. CFRP boruların üretim yöntemlerinde yüzey hassasiyeti düşük olduğundan üretim sonunda yüzey kalitesi işlemlerine gerek duyulmaktadır. Bu işlemler göz önünde bulundurularak CFRP borular için torna işleme süreci bu çalışmada deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada karbon fiber/epoksi kompozit boruların imalatında tek yönlü fiber doğrultusunda (UD) elyaf kullanılarak, uygulamaya yönelik kullanımı için 0, 45, 90° arası açılarda sarım gerçekleştirilerek ürünler elde edilmiştir. Üretilen numuneler bilgisayarlı sayısal kontrollü (CNC) torna tezgâhında üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme hızı ve sabit kesme derinliğinde tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Tornalama işlemi sonrası; yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınması parametreleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerine 90° sarım açısı ve 120 m/dak kesme hızında en düşük ise 45° sarım açısı 160 m/dak kesme hızında ulaşılmıştır. Kesme sıcaklığında ise kesme hızı arttıkça kesme sıcaklığında da artış gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Polimer Matrisli Kompozit, Karbon Fiber Boru, Kompozit Boru, Takım Aşınması

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MACHINABILITY IN CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE PIPES WITH EPOXY POLYMER MATRIX PRODUCED IN DIFFERENT FIBER DIRECTIONS

Merve YILMAZ ARICI

Duzce University

Graduate School of Education, Department of Manufacturing Engineering

Master Thesis

Dr. Öğr. Üyesi. Mert KILINÇEL

September 2023, 51 pages

Today, the search for high-strength and lightweight materials continues rapidly, especially to use the developing battery systems more efficiently. For this reason, composite materials are attracting more attention. Composite materials are obtained from two or more materials and contain the superior properties of these materials. Fiber reinforcement plastics (FRP) are used in a significant number of high-tech applications. For example, it is used in the maritime, aviation, motor sports, energy, and defense industries. However, some challenges remain to be overcome, such as long production times, high production costs, and difficulties in complex geometries. Although various production methods such as filament winding, pultrusion, and vacuum bagging are available to obtain products in shaped geometries, the hand lay-on-die method is the most efficient method for developing high-strength materials. In the thesis study, carbon fiber and polymer matrix were studied. Since surface sensitivity is low in the production methods of CFRP pipes, surface quality treatments are required at the end of production. Considering these processes, the turning machining process for CFRP pipes has been experimentally investigated in this study. In this study, products were obtained by using unidirectional fiber direction (UD) fiber in the manufacture of carbon fiber/epoxy composite pipes; and by winding at angles between 0, 45, and 90° for application-oriented use. The produced samples were turned at three different cutting speeds, three different feed rates, and constant cutting depth on a computer numerically controlled (CNC) lathe. After the turning process, surface roughness, cutting temperature, and tool wear parameters were investigated. As a result of the experimental studies, the highest surface roughness value was reached at 90° wrap angle and 120 m/min cutting speed, and the lowest was reached at 45° wrap angle and 160 m/min cutting speed. As for the cutting temperature, it was observed that as the cutting speed increased, the cutting temperature also increased.

Keywords: Polymer Matrix Composite, Carbon Fiber Tube, Composite Tube, Tool Wear

1. GİRİŞ

1.1. KOMPOZİT MALZEMELER

En az iki veya daha fazla aynı veya farklı malzemelerin uygun kombinasyonlar sonucunda birleştirilmesiyle oluşturulan ve kullanım alanına göre daha iyi özellikler gösteren yeni malzeme türüne kompozit malzeme denir [1]. Yüksek mukavemet, hafiflik, yanmazlık özelliği, yüksek yorulma mukavemeti, aşınma direnci, düşük elektrik iletkenliği, tasarım esnekliği, iyi kırılma direnci, ölçüsel kararlılık, yüksek termal direnç ve yüksek korozyon direnci kompozit malzemelerin en önemli özellikleridir. Kompozit malzemelerin yapısı; takviye elemanı ve matris adı verilen iki ana fazdan oluşmaktadır [2]. Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak genellikle cam, karbon veya aramid fiberler kullanılmaktadır. Tez çalışmasında ise karbon elyaf kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Matris fazı olarak ise metal, seramik veya polimer malzemeler kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde genellikle polyester, vinilester veya epoksi reçine tercih edilmektedir. Tez çalışmasında ise polimer matris olarak epoksi reçine tercih edilmiştir.

Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) malzemeler; savunma sanayi, havacılık, denizcilik, enerji ve motor sporları gibi endüstrilerde; yüksek mukavemet ve hafiflik amacıyla tercih edilmektedir. Bununla birlikte ilgili endüstrilerde CFRP borularının yüzey kalitesi sorununu iyileştirmek için çözümler aranmaktadır [3]-[4]. CFRP boruları üretmek için filament sarma [5] – [6], pultrüzyon [7] – [8] ve rulo sarma (prepreg sarma veya elle yatırma yoluyla kuru kumaş sarma) [9] – [10] gibi çeşitli üretim yöntemleri vardır. Üretim yöntemine bağlı olarak, CFRP boruların yüzeyinde rötüş veya ek işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle montaj sırasında delme, kesme veya yüzey zımparalama gibi ek işlemler gerekmektedir [11]. Kompozit malzemenin geometrisi boru gibi dairesel bir yapıda ise son işlemler daha da zorlaşmaktadır.

CFRP borularda istenilen ölçülerde ürün elde etmek ve kararlı boyutsal özelliklerin sağlanması için tornalama gibi ek işlemler gerekmektedir. CFRP malzemelerin frezelenmesi, delinmesi veya kesilmesi ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen CFRP boruların tornalama işlemi ile ilgili fazla bir çalışma yoktur [12].

Bu çalışmada ana amaç, CFRP boruların tornalama sırasındaki işleme parametrelerinin ve fiber oryantasyonunun; kompozit malzemenin yüzey kalitesine ve kesici takım aşınmasına etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla 0° , 45° , 90° fiber açıları seçilmiş ve rulo sarma yöntemi ile CFRP boru numuneleri üretilmiştir. İç çapı 30 mm ve dış çapı 60 mm olan CFRP borularda, farklı lif oryantasyonları (0° , 45° ve 90°), farklı devirler (120, 160, 200 dev/dak) ve ilerleme hızı (f 0,4 mm/dev) parametreleri kullanılmıştır. Tornalama sonrasında iş parçalarının yüzey pürüzlülüğü, kesici takımların aşınma davranışları ve SEM mikroskopuyla talaş oluşumları incelenmiştir. Son olarak termal kamera yardımıyla iş parçası yüzeyinde sürtünmeden kaynaklı sıcaklık miktarları incelenmiştir.

1.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeler; takviye elemanının yapısı ve türüne ve matris türüne göre sınıflandırılmaktadır.

1.2.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris ve takviye olarak iki önemli ana unsurdan oluşmaktadır. Matris fazı ana bileşen olarak rol oynamakta ve takviye bileşenini sararak bir arada ve istenilen formda tutulmasını sağlamaktadır. Aşağıdaki Şekil 1.1'de kompozit malzemelerin takviye çeşitleri ve matris yapısına örnek bir görsel verilmiştir [13].



Şekil 1.1. Takviye çeşitleri ve matris yapısı [13].

Matris, takviye fazının istenilen ölçü ve boyutlarda koruyarak uygulanan kuvveti herhangi bir zarar göstermeden takviye fazına eşit şekilde ileterek zarar görmesini önler. Matristen istenilen eyafları her yerinden en iyi şekilde sarmalamaktır. Matris malzeme fiberleri bir arada tutar. Kompozit malzemedeki oluşan yükü fiberlere eşit şekilde dağıtmaya yardımcı olur. Kompozite şekil vermesinden ötürü malzemenin katı durmasını sağlayarak çevresel etkenlere karşı da malzemeyi korumaktadır [13].

Matris malzemeler kompozit malzemenin kullanım amacına göre metal, polimer ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak üç gruba ayrılmaktadır.

1.2.1.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Temel malzemeleri çeşitli metal ya da metal alaşımlarından oluşan malzemelerdir. Bu alışımda takviye farklı şekillerde olabilmektedir. Metal esaslı malzemeler takviye malzemelerine göre son derece iyi özelliklere sahiptirler. Hafif ve dayanıklı olmaları özellikle otomotiv sektöründe vazgeçilmez olmalarını sağlamaktadır [14].

1.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve hafif olmaları sayesinde oldukça kullanışlı malzemelerdir. Matris tek bir aşamada üretilerek homojen bir matris elde edilir. Süneklik ve tokluk dirençleri düşüktür. İleri teknoloji seramikleri metallerle olduğu gibi metal dışı elementlerle de bileşik oluşturabilirler. Oluşumda yer alan elementlerin arasındaki güçlü iyonik ve kovalent bağlar sayesinde oldukça sert ve dayanıklı bir yapıya sahip olmaktadır. Üç farklı seramik matrisli kompozit malzeme vardır. Bunlar; sürekli fiberli, süreksiz fiberli ve partiküllü kompozitlerdir [15].

1.2.1.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimerler birden fazla monomerin uzun zincir yapılarla birbirlerine kimyasal bağla bağlanarak oluşturdukları bileşiklere verilen addır. Polimerlerin üretimi yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmediğinden karmaşık şekilli parçaların üretimi kolaydır. Düşük sıcaklık sayesinde takviye elemanlarında herhangi bir bozunma meydana gelmemektedir. PMK üretimi için gerekli ekipmanlar basittir. Polimer matrisler; termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak üçe ayrılmaktadır.

Termoset malzemelerde, moleküller çapraz bağ ile güçlü kovalent bağ oluştururlar bu nedenle termosetleri plastik deformasyona uğratmak zordur. Kompozit imalatı esnasında bir katalizör ve ısı kaynağının birlikte ya da ayrı ayrı kullanılması ile sertleştirilirler ve oldukça sert, yüksek sıcaklığa karşı mukavemet gösteren bir malzeme halini alırlar. Akışkan yapıları sayesinde oldukça kolay şekil alabilen termoset malzemelerin en büyük dezavantajları barındırdıkları çapraz bağlar nedeniyle bir kez işleme tabi tutulduktan sonra bağ yapıları değiştiğinden tekrar ısıtılsalar bile ilk hallerine döndürülemezlerdir. Kompozit malzemelerde en çok tercih edilen termoset malzemeler; epoksi ve polyeşter reçinelerdir [16].

Epoksi reçineler, Bifenol A ile Epiklorhidridind komponentlerinin karıştırılmasıyla ortaya çıkan reaksiyon sonucunda oluşur. Yüksek yapıştırma gücü ile geniş uygulama alanlarına sahiptir. Nem, ısı, kimyasallara karşı aşınmaya dirençleri oldukça fazladır.

Üstün yanlarından bir diğeri ise; farklı kür veya sertleştirici ile bir araya geldiğinde çapraz bağ ile üstün bir malzeme elde edilmektedir. Kürlenme konusunda sıcaklık aralıkları geniş bir reçine türüdür [16].

Epoksi reçineler ahşap ürün üretimi, zemin kaplamaları, zemin ve duvar boya ları, elektronik bileşenler, müzik aletleri üretimi, uzay, havacılık ve otomotiv sanayi, sanat ve hobi alanları gibi birçok alanda epoksi malzemeler kullanılmaktadır [17]. Epoksilerin kullanımlarına önemli bir örnek olarak elyaf takviyeli epoksi reçineler verilebilir. Elyaf takviyeli epoksilerde her türlü elyaf cinsi kullanılabilmekte ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmaktadır [18].

Termoplastik malzemeler günümüzde, soğuma esnasında ekstra bir sertleştirme işlemine gerek duymamaları ve tekrar tekrar ısıtılarak şekillendirilebilmeleri dolayısı ile kompozit üretiminde yer almaya başlamışlardır. Ayrıca kırılganlıklarının düşük oluşu ve hafiflik özellikleri nedeni ile otomotiv sektöründe de kullanılmaktadır. Kalıplama esnasında oldukça fazla öneme sahip olan viskozite değerlerinin termoplastik malzemeler için yüksek değerler alması ise en önemli dezavantajları sayılabilir. Başlıca termoplastiklere ait fiziksel özellikler çizelge 1.1’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.1. Bazı termoplastiklere ait özellikler [19].

Malzeme Adı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Çekme Muk. (Mpa)	Elastik Modül (Mpa)	Kullanma Sıcaklığı Sınırı (°C)
Polietilen	0,92-0,93	7-17	105-280	80
PVC	0,95-0,96	20-37	420- 1260	100
PP	1,50- 1,58	40-60	2,800-4,200	110
PS	0,90- 0,91	50-70	1,120-1,500	105
ABS	1,08- 1,10	35-68	2,660-3,150	85
Polimetilmetakrilat	1,05-1,07	42-50	-	75
Teflon	1,11-1,20	50-90	2,450-3,150	125
Naylon 6,6	2,1-2,3	17-28	420-560	120
Selülozikler	1,06-1,15	60-100	2,000-3,500	82

Çekildiklerinde uzama miktarları fazla ve çekme kuvveti kaldırıldığında kalıcı boyut değişimi gözlenmeden hızla ilk boyutlarına dönebilen polimerler malzemeler elastomer adı verilir [20].

Şekil 1.2’de görüleceği üzere kompozitlerde kullanılan matris malzemelerin birbirlerine

göre avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Kullanım alanına uygun şekilde üretim sırasında uygun matris seçimi yapılmaktadır.



Şekil 1.2. Matris malzemelerine göre kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

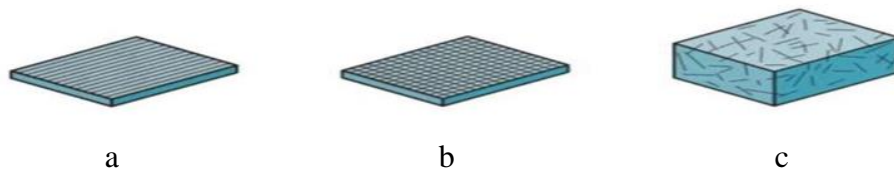
[13].

1.2.2. Takviye Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanı kompozit malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemede büyük rol oynamaktadır. Kullanılacağı alana ve istenilen özelliklere bakılarak takviye elemanının yapısı ve türü seçilmelidir. Takviye elemanları; elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı kompozitler ve karma (hibrit) kompozitler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Takviye elemanı olarak elyaf takviyeli kompozit malzemeler yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

1.2.2.1. Elyaf (Lif) Takviyeli Kompozitler

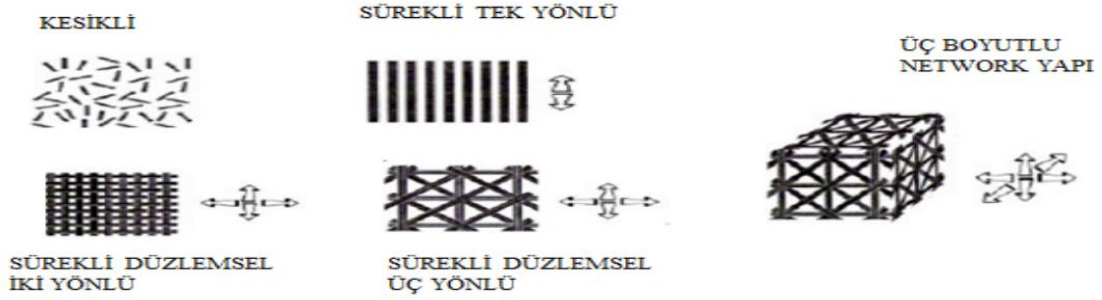
Elyaf yapılı kompozit malzemeler, ince elyafların matris içerisine tek – çift yönlü ya da dağınık olarak yerleştirilmesi ile üretilmektedir. Elyafların matris içerisindeki yerleşim doğrultuları malzeme mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Elyaf parça doğrultusunda yerleştirilmiş ise bu doğrultuda yüksek mukavemet sağlanırken diğer yönde mukavemet değerleri düşük ölçülmektedir [21]. Kompozit içerisinde elyaf yönlümesi ve elyaf yerleşim konfigürasyonu Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. a) Tek yönlü sürekli elyaf b) Çift yönlü sürekli elyaf c) Dağınık süreksiz elyaf

[21].

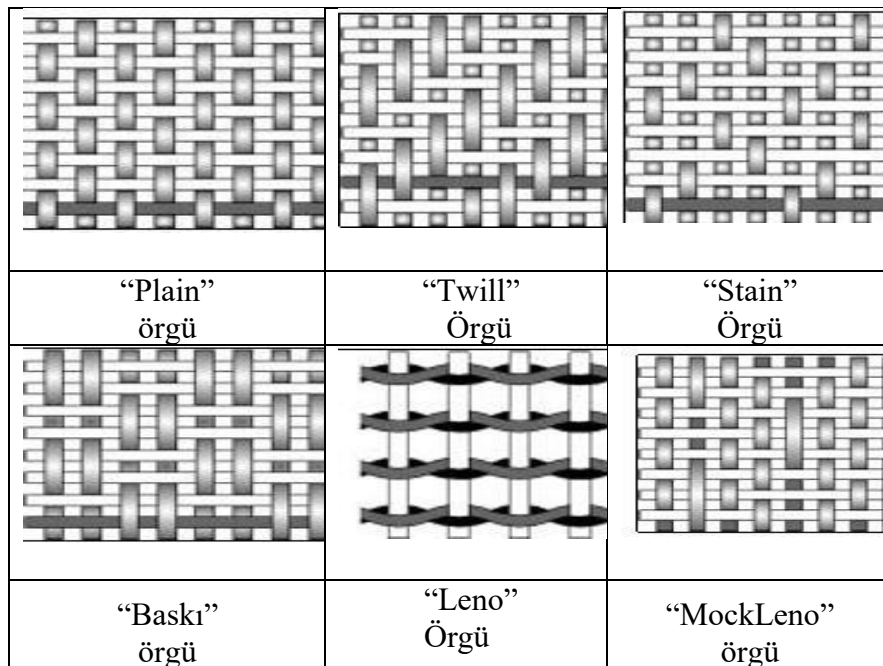
ELYAF YERLEŞİM KONFİĞÜRASYONLARI



Şekil 1.4. Kompozit malzemede elyafların yerleşimi [22].

Çeşitli şekillerdeki fiberler aynı malzemenin katı halinin yapısına göre daha rijit ve daha dayanıklıdır. Fiberler yoğunluklarına oranla yüksek rijitlik ve dayanım özelliklerine sahiptirler. Fiber takviyeli kompozitlerin yapısında kısa veya kesik yapıda fiberler bulunabilir. Kısa fiberlerin boy-çap oranı büyüktür ve matris içerisinde tek yönlü ya da rastgele dizilmiş halde bulunabilirler. En çok kullanılan çeşitleri grafit ve karbon fiberlerdir.

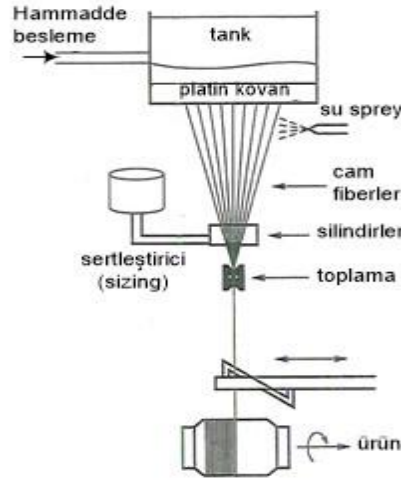
Ancak aynı zamanda parça yönüne dik olarak da yerleştirilirse iki yönde de aynı değerde mukavemet sağlanabilmektedir. Elyafar homojen ve dağınık olarak matris içerisine yerleştirilmiş ise her yönde aynı mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. İmalat sırasında liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri [23].

Elyafın uzunluk/çap oranları 100 ve yukarıda ise uzun elyaf 100'ün altında ise kısa elyaf olarak tanımlanmaktadır. Bunların yanı sıra, elyafın uzunluk/çap değerleri yükseldikçe elyafın aktarılan yük değeri de artış göstermektedir [24].

Cam elyaf: Cam elyaf malzeme eritilmiş camın ince bir boşluk ya da oyuk içerisinde eritilerek akıtıldıktan sonra sertleşmesi yöntemine dayalı bir proses ile üretilmektedir. Şekil 1.6'da cam elyaf üretim prosesi gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Cam elyaf üretim prosesi [25].

Cam elyaf ağırlık ve mukavemet açısından iyi olması ve maliyetin uygun oluşundan dolayı tercih sebebidir. Islak olduğunda dahi yüksek mukavemet göstermesi sebebiyle su boruları kimyasal borular ve tanklarda da tercih edilmektedir. Takviye elemanı olarak en çok tercih edilen türler arasında da cam elyaf yerini almaktadır. Farklı kullanım alanlarına göre A, E, S ve C olarak da çeşitli cam elyaf türleri bulunmaktadır.

Karbon elyaf: Karbon atomunun bağ yapma kapasitesinin fazlalığı ile uzun zincirlerden oluşan karbon atomlarının birbirine bağlanması ile oluşan yüksek mukavemetli, uzun sert zincirlerden oluşan hafif yapılardır. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan karbon elyaf örneklerine Şekil 1.7'de yer almaktadır. Havacılık, uzay endüstrilerinin vazgeçilmez malzemesidir. Düşük yoğunluk, yüksek dayanım, düşük sürtünme katsayısı, korozyon direnci fazla ve hafiflik en önemli temel özellikleridir. Şekil 1.7'de karbon fiber kumaşlara örnek verilmiştir.



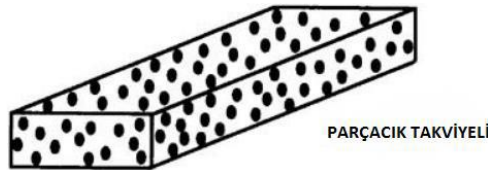
Şekil 1.7. Karbon elyaf [26].

Aramid elyaf: Aromatik polyamidler, ticari olarak Aramid olarak bilinmektedir. Uzun zincirlere sahip polimer malzemelerdir. Kevlar 29 ve Kevlar 49 en çok tercih edilen aramid elyaflardır. Karbon elyaflar gibi elyaf ekseninde mekanik özellikleri iyi olmasına rağmen elyaf eksenine dik yönlerde oldukça düşük mekanik özelliklere sahiptirler. Aramid elyaflar; yüksek çekme dayanımına, yüksek darbe direncine, yüksek aşınma direncine ve düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Aramid elyaf takviyeli kompozitler cam elyaf takviyeli kompozitlere göre yaklaşık %35 daha hafiftirler. Karbon elyaflara göre daha sünek malzeme olmalarından ötürü daha iyi şekil verilebilir malzemelerdir. Asit ve alkali kimyasallara direnci düşük olmasına rağmen doğal kimyasallara karşı dirençlidir [27],[28].

1.2.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Kullanılan takviye malzemesinin özellikleri üretilecek kompozitin özelliklerini büyük oranda belirleyici görev üstlenmektedir. Öyle ki taneseli yapı takviyeleri kompozitlerde; çekme, sertlik, darbe dayanımı gibi özellikler kazandırmaktan ziyade korozyon direnci, elektriksel iletkenlik, sertlik vb. özellikler kazandırmak ve birim maliyeti düşürmek için kullanılmaktadır. Şekil 1.8’de taneseli yapı takviyeli kompozit iç yapısı gösterilmektedir.

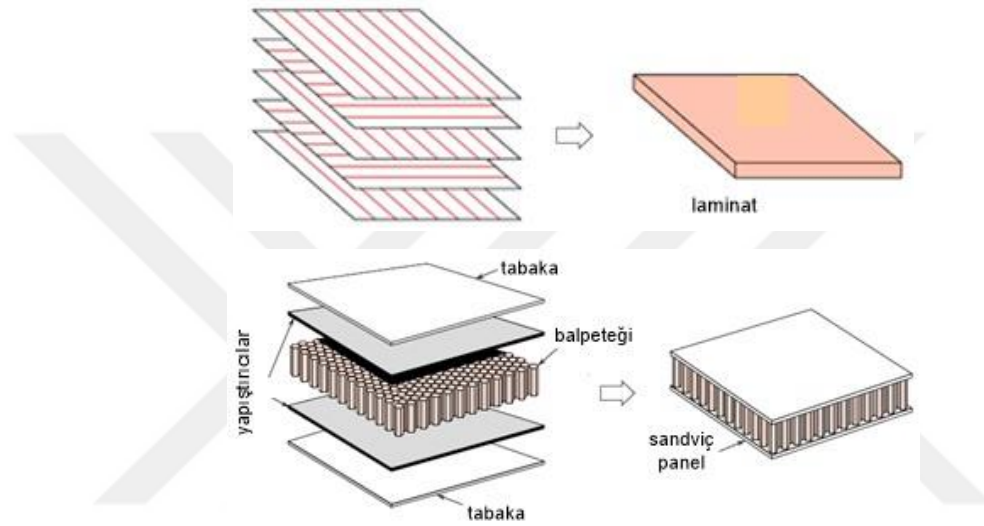
Taneseli yapı takviyeli kompozit imalatında plastik matris- metal takviye ya da plastik matris- seramik takviye eşlemeleri tercih edilmektedir. Metal takviyesi kullanıldığında metal kaynaklı iyi elektrik iletimi sağlanırken, seramik takviye kullanıldığında iyi sertlik ve sıcaklık dayanımı gözlenmektedir. Şekil 1.8’de parçacık takviyeli kompozitlerin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Parçacık takviyeli kompozit [29].

1.2.2.3. Tabakalı (katmanlı) Kompozit Malzemeler

Farklı yönlerde elyaf yerleşimleri ile dokunmuş tabakaların bir araya getirilmesi ile oluşturulan kompozit malzemelerdir. Kompozitlerin tabakalı olarak üretilmesi sayesinde mekanik, fiziksel ve kimyasal olarak farklı özelliklere sahip katmanlar bir araya getirilerek üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilebilmektedir [30]. Bu yapıların su geçirgenliği de oldukça düşüktür. Sık tercih edilen katmanlı kompozitler laminar ve sandviç kompozitlerdir. Şekil 1.9'da tabakalı kompozit malzemelere ait iç yapı gösterimi yer almaktadır.



Şekil 1.9. Tabakalı kompozitlerin yapısal gösterimi ve sandviç panellerin yapısı [29].

1.2.2.4. Karma (Hibrit) Kompozit Malzemeler

Kompozit yapısında birden fazla elyaf çeşidinin bulunduğu kompozitler karma kompozitlerdir. Tek takviye elemanı ile oluşturulan kompozit malzemelere göre üstün özellikleri vardır. Karma diğer adıyla hibrit kompozitler; kompozit malzemeleri, metalleri ve polimerleri aynı alanda toplamaktadır. Hava, kara su taşımacılıklarında hafiflikleri sebebi ile tercih edilmektedir [31].

1.2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin birçok üretim yöntemi bulunmakta olup üretim yöntemi tercihinde çeşitli faktörler etkili olmaktadır. Elde edilecek üründe başlıca istenen özellikler, ürün yapısı, maliyet, ürün hacmi, üretim miktarı ve işlenebilirlik, ürünün kullanılacağı endüstriye uygun seçim yapılabilmektedir. Tez çalışmasında yuvarlanarak sarma yöntemiyle kompozit borular üretilmiştir. Kompozit malzemelerde ürün tasarımı,

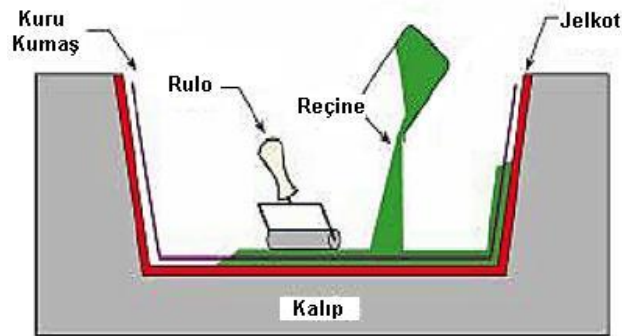
ürün montajı, karmaşık ürün yapısı ve bazı endüstri alanlarında ürün esnekliği ve boyutsal kararlık istendiği durumlarda kompozit malzemelerin üretim sonrasında işlemeye tabii tutulması gerekmektedir.

PMK parçalar çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Üretilen parçanın kalitesine, istenilen özelliklere, miktarına ve maliyetine göre uygun yöntem seçilebilir.

1.2.3.1. Elle Yatırma (Hand Lay-up) Kalıplama Yöntemi

Keçe ya da dokuma türü elyaflarla kesilip hazırlanan kuru kumaşları daha öncesinde hazırlanan kalıp üzerine veya kalıp içerisine elle yatırılarak reçinenin elyafın her yerine nüfuz etmesi sağlandığı ve istenilen kalınlık boyutu elde edilene kadar devam edildiği üretim yöntemidir. Reçinenin içerisindeki hava kabarcıkları rulo vasıtasıyla giderilerek fiber ve reçinenin eşit şekilde dağılmasına özen gösterilmektedir. Bu üretim tekniğinde polyester ve epoksi reçineler en çok tercih edilen reçine türleridir.

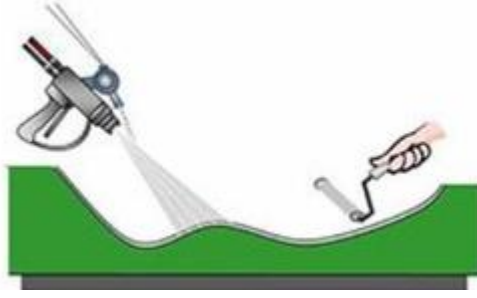
Elle yatırma tekniğinin ürün boyutunda sınırlama yoktur. Kullanım kolaylığı ve maliyet açısından uygun olması nedeniyle tanklar, uçak kanatları, teknelerin gövde yapımında çok tercih edilmektedir. Elle yatırma tekniği reçinenin iyice nüfuziyet sağlaması için yüzeydeki pürüzlerin giderilmesi açısından el becerisi gerektiren bir üretim yöntemidir. Şekil 1.10'da elle yatırma prosesi gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Elle yatırma yöntemi [32].

1.2.3.2. Püskürtme Yöntemi

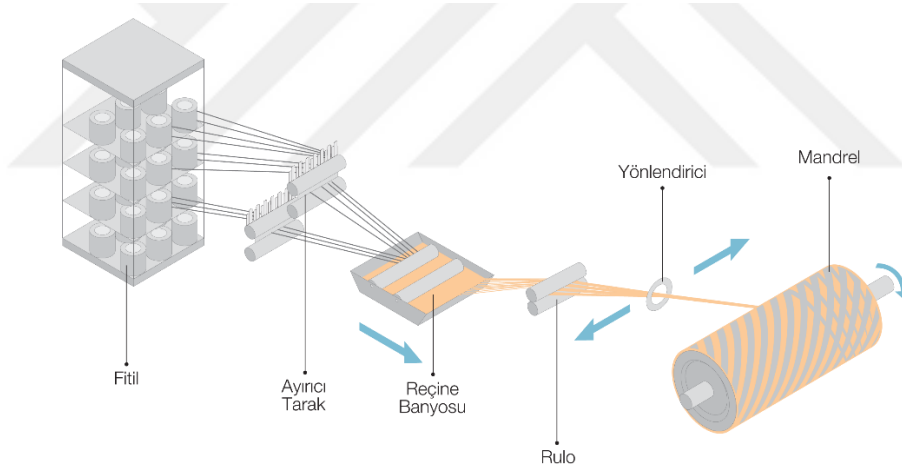
Elle yatırma yönteminin makineler aracılığıyla gerçekleştiği bir yöntem olarak tanımlanabilmektedir. Elle yatırma yöntemine göre karmaşık malzemelerin üretimine olanak sağlar. Kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine reçine katılmış tabanca yardımıyla püskürtülür. Püskürtme sonrasında yüzey rulo yardımıyla düzleştirilerek ürüne şekil verilir. Şekil 1.11'de elyaf püskürtme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Elyaf püskürtme yöntemi [33].

1.2.3.3. İplik (Filament) Sarma Yöntemi

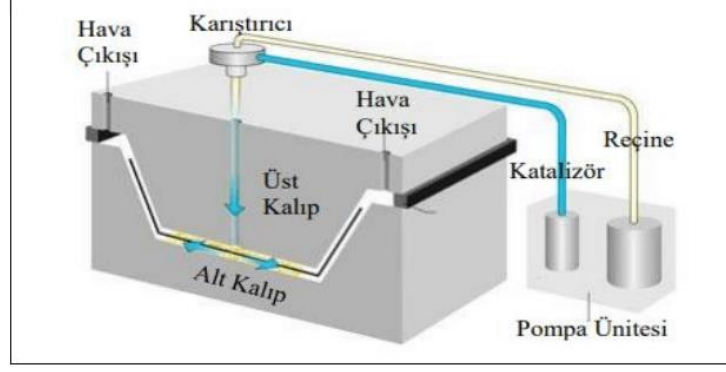
Elyaf liflerinin reçine vasıtasıyla ıslatılma işleminden sonra bir makaradan geçirilerek dönen kalıbın üst kısmına sarılması işlemi iplik sarma yöntemi olarak adlandırılır. Liflerin farklı açılarda sarılması farklı mekanik özelliklere sahip ürünlerin ortaya çıkmasını sağlar. Yeterli miktarda sarılan elyaflar kürleştikten sonra makaradan çıkarılır. Bu yöntem araba şaftlarında, su kaydırakları ve silindirik boru üretimlerinde tercih edilen yöntemler arasındadır. Şekil 1.12’de elyaf sarma yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Elyaf sarma yöntemi [34].

1.2.3.4. Vakum Torbalama Yöntemi

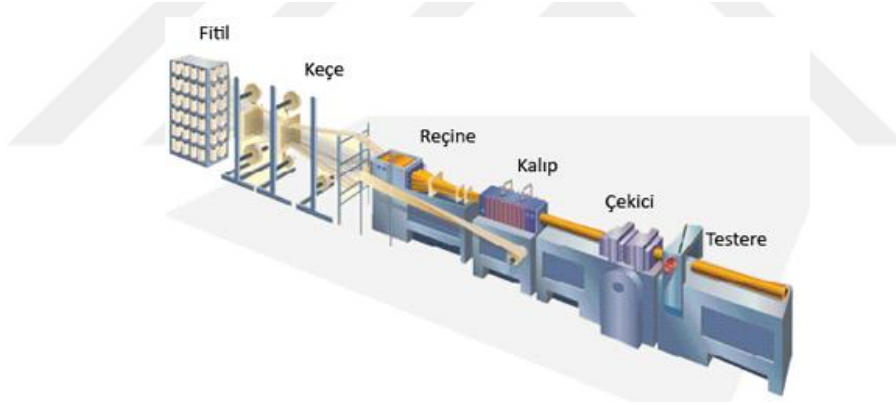
Vakum torbası yardımıyla ıslatılan elyafların/prepreglerin vakum altında sertleşmesi ile yapılan yöntem vakum torbalama yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntemin amacı fazla reçinenin ve hava boşluklarının oluşturulan yapı içerisine nüfuziyetinin sağlanmasıyla elyaf oranı yüksek kompozit bir malzeme üretimi gerçekleştirmektir. Elle yatırma yöntemiyle benzerdir ancak burada içeride oluşan hava basınç yardımı ile yok edilmektedir. Şekil 1.13’te vakum torbalama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Reçine transfer yöntemi [34].

1.2.3.7. Pultrüzyon Yöntemi

Sürekli fiberlerin uygun reçinelerle birleştirilmesi sonucu sıcak kalıptan geçirilerek şekillendirilmesi işlemine Pultrüzyon adı verilir. Bu yöntem hızlı ve ekonomiktir, reçine miktarı makine ile kontrol edilebilmektedir. Isıtmalı kalıbın pahalı olması ve üretilecek parçasının sınırlı olması dezavantajları arasında yer almaktadır. Şekil 1.16’da Pultrüzyon yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Pultrüzyon yöntemi [36].

1.2.3.8. Otoklav Yöntemi

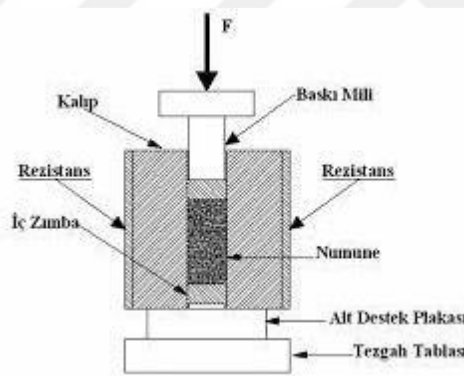
Isı basınç ve vakum etkisiyle yüksek sıcaklıklardaki fırınların içerisinde gerçekleştirilen üretim metodudur. Parçanın sertleşmesi işlemi fırın içerisinde sağlanmaktadır. Fırın içerisindeki sıcaklık ve basınç dışarıdan kontrol edilebilir olduğundan yüksek fiber özellikli malzeme üretimlerine elverişli bir yöntemdir. Otoklav pahalı bir proses olup deneyimli bir operatör yardımıyla kontrol edilmelidir. Şekil 1.17’de otoklav fırınına örnek verilmektedir.



Şekil 1.17. Otoklav yöntemi [37].

1.2.3.9. Sıcak Presleme Yöntemi

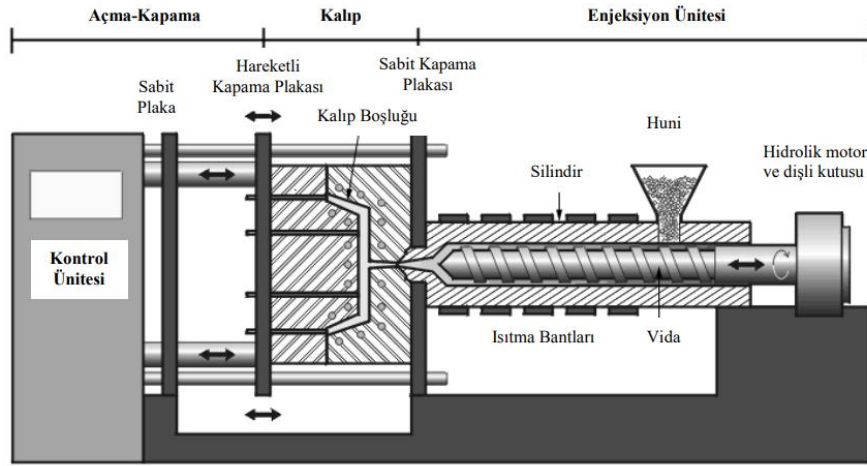
Alt ve üst olarak iki kalıp kullanılır alt kalıba reçine ve takviye malzemesi konularak üst kalıpla kapatılır, üst kalıba sıcaklık ve basınçlı hava verilerek presleme işlemi yapılır bu sayede fazla reçine hava kabarcıklarıyla beraber dışarı atılarak üretim gerçekleştirilir. Şekil 1.18’de sıcak presleme yöntemine örnek verilmektedir.



Şekil 1.18. Sıcak presleme yöntemi [38].

1.2.3.10. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Boyutsal kararlılığın yüksek olduğu karmaşık şekilli ürünlerin kalıplanmasında yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Yüksek hacimli üretimler için de uygundur. Bazı durumlarda, üretim hızı makina başına saatte binlerce adet parçaya çıkabilmektedir. Dişi ve erkek kalıplardan oluşan ve kapalı konumda yer alan prese enjekte edilen akışkan haldeki termoplastik malzeme, soğuyana kadar kalıpta bekletilir soğuduktan sonra kalıbın basıncı kaldırılarak üretim tamamlanır. Şekil 1.19’da enjeksiyon kalıplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1.19. Enjeksiyon kalıplama yöntemi [39].

1.2.3.11. Yuvarlanma ile Sarma (Roll-Wrapping) Yöntemi

Rulo sarma olarak da bilinen bir yöntemdir. Yüksek dayanıma sahip boru imalatlarında kullanılması dışında, bisiklet gövdeleri golf sopaları ve olta takımları imalatında da tercih edilen yöntemdir. Bu yöntem ile üretilen borular çelik borularla kıyaslandığında çok daha hafif ve yüksek mukavemetli yapıya sahiptirler.

Yuvarlama sarma metodunda genellikle önceden reçine ile emdirilen prepreg levhalar kullanılmaktadır. S-E cam lifleri karbon veya kevlar elyaflar kullanılarak imal edilmektedir. Birim uzunlukta ince cidar ve düşük ağırlık istenilmesi sebebiyle karbon elyaf kaynaklı prepreg malzemeler kullanımda tercih edilmektedir. İstenilen çapta bir kalıp (mandrel) üzerine işlem sonrası ayrılmayı kolaylaştırmak için kalıp ayırıcı uygulanır. Ayırıcı üzerine istenilen doğrultu ve yoğunlukta elyaf dağılımı sağlayacak şekilde ve oldukça sıkı bir şekilde prepreg levhaların sarımı gerçekleştirilir. Bu işlem el ile yapılabileceği gibi çeşitli ekipmanlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Kullanılan prepreg levhaların sarım doğrultusuna göre kompozit ürüne kazandırdıkları özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir.

Mandrel boyunca yerleşim: Eğilme dayanımı,

Mandrelle 90° açı yapan sarım: Basınç ve gerilim dayanımı,

Mandrelle 45° açı yapan sarım: Burulma dayanımı

Son aşamada elyaf üzeri büzülme bantları ile sarılır, bu işlemde her turda en fazla 1-2 mm ilerleme sağlanması ve mümkün olan en sıkı şekilde sarım yapılması oldukça önemlidir. Sarım işlemlerinin tamamlanmasının ardından malzeme kürlenme işlemi için fırına

konulur. Burada sıcaklığın artması ile malzemede genleşme, dış bantta ise büzüşme başlaması ile malzeme üzerinde bir basınç meydana gelir. Bu basınçla reçine ve takviye malzemesinin tam birleşmesinin yanında sarım işleminde oluşabilecek mukavemeti düşüren hav boşlukları en az seviyeye indirilmiş olmaktadır.

Fırınlama işlemi sonrası malzeme mandrel üzerinden sıyrılır ve büzüşme bantları sökülerek imalat işlemi tamamlanır. Yuvarlanma ile sarma, oldukça düşük ağırlığa sahip, elyaf sarım konfigürasyonunda özelleştirilebilen ve düşük maliyetli ürün imalatı yapılabilen yenilikçi bir kompozit imalat metodudur.

1.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE İŞLENEBİLİRLİK

Kompozit malzemeler, çeşitli yöntemlerle üretildikten sonra kullanıma hazır hale gelmeleri için yüzeylerindeki pürüzlülüğün giderilmesi, çapakların alınması, delik delme ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi konularında talaşlı imalata ihtiyaç duyulmaktadır [40]. Malzemenin istenilen yüzey, şekil ve boyutlara sahip olması için malzeme üzerinde, boyutlarında veya iç kısımlarında güç ve kesici bir takım yardımıyla iş parçasından malzeme kaldırma işlemine talaşlı imalat adı verilmektedir. Çıkan malzeme tabakasına talaş denir [41]. Talaşlı imalatta işlenebilecek parça skalası oldukça fazla olmakla beraber her türlü şekil ve boyutlardaki parçaları elde etmek mümkündür. İşlenebilirlik talaşlı imalatta etkili bir rol oynamaktadır. Kesici takım ucu ve geometrisi, kesici takımın hızı, takım aşınması ve kesme hızı malzemenin işlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bunun yanında malzemenin sünekliği, sertliği ve aşınmaya karşı direnci de işleme parametrelerine etki ederek parça yüzeyinden kalkan talaşların farklı türlerde oluşmasına yol açmaktadır [42]. Malzeme yüzeyinde hasar meydana gelmemesi ve talaşlı imalat işleminin iyi yapılabilmesi için doğru talaşlı imalat yöntemi seçilip talaşlı imalat parametreleri (kesme hızı, takım ucu, ilerleme hızı, talaş derinliği, takım ömrü) göz önünde bulundurularak talaşlı imalat işlemi yapılmalıdır. Frezeleme, tornalama, taşlama, delik delme başlıca talaşlı imalat yöntemleri arasında yer almaktadır.

Talaşlı imalat parçalarını işlemede kullanılan tezgâhlara takım tezgâhları adı verilir. Takım tezgâhları yapılacak işlem türüne, parçada hangi şekil değişikliğinin istenilmesi durumlarına göre farklı türlere ayrılmaktadır. Tez çalışmasında ise talaşlı imalat yöntemlerinden tornalama işlemi, takım tezgâhlarından torna tezgâhi kullanılmıştır.

1.3.1. İşlenebilirliğe Etki Eden Faktörler

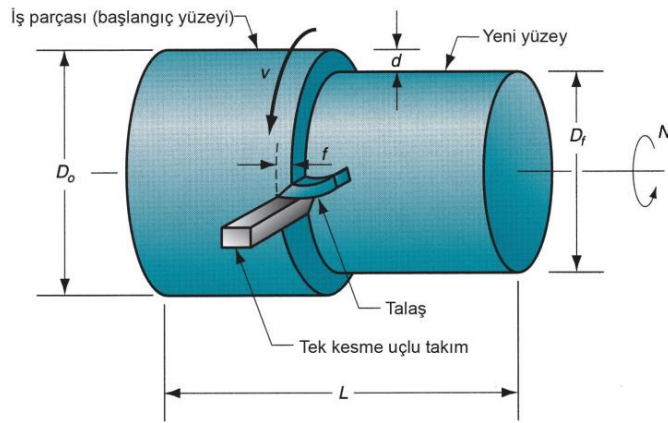
Kompozit malzemenin işlenmesi sürecinde malzemenin var olan özelliklerine göre uygun takım geometrisi ve takım seçimi yapılması gerekmektedir. İşlenebilirliğe etki eden faktörlerin yanlış seçimi sonucunda malzemede çeşitli kalıcı deformasyonlar meydana gelebilmektedir. İşlenebilirlikte; işlem türü, malzeme türü ve özellikleri, elyaf yönlendmesi, işlem parametreleri ve takım özellikleri önemli parametrelerdir [43].

1.3.1.1. İşleme Türü ve İşleme Parametreleri

Talaşlı imalat yöntemlerinden frezeleme, delik delme, tornalama, taşlama işlemleri malzeme özelliklerine seçildiklerinde kullanım farklılıklarına sebep olur. Bu talaş kaldırma işlemlerinin hepsi her malzeme için uygun olmayabilir ya da malzemede istenilen boyutta bir değişime neden olmayabilir. Aşağıda bu işlem türlerinin nasıl yapıldığına ait detaylı açıklamalar verilmiştir.

Kompozit malzemelerin işlenmesinde kesme hızı, kesme kuvvetleri, ilerleme derinliği ve kesme derinliği etkin rol almaktadır.

Tornalama: Dairesel yönde hareket eden iş parçasının üzerinden doğrusal yöndeki kesici takımın hareketleriyle talaş kaldırma işlemine tornalama denir. Tornalama işleminde kesici takım sabit olup iş parçası hareket halindedir. Şekil 1.20’de tornalama işlemine ait iş parçası ve kesici takım yer almaktadır.

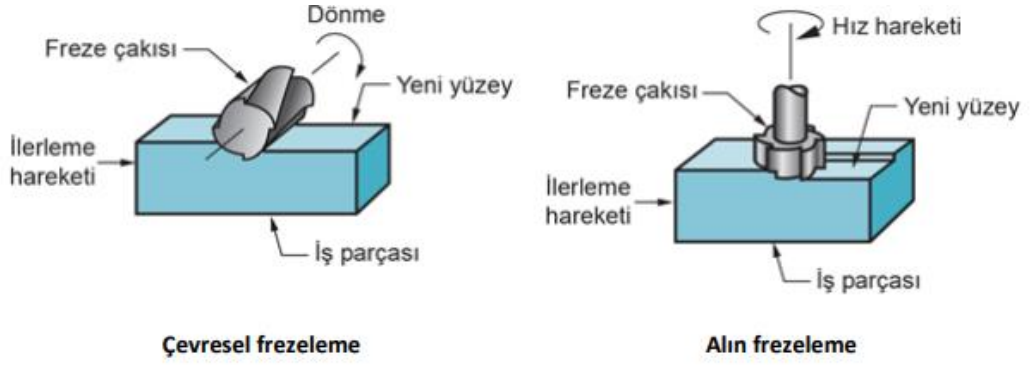


Şekil 1.20. Tornalama işlemi [44].

Tornalama yöntemi karbon fiber borularda işlenebilirlik açısından en çok tercih edilen talaşlı imalat yöntemlerindedir. Tez çalışmasında tornalama işlemi sırasındaki kesme hızı, ilerleme miktarı, kesici takım türü ve devir hızı parametrelerinin; kompozit borulardaki yüzey kalitesine, kullanılan kesici takım aşınmasına ve çıkan talaş türü ve

miktarına etkisi incelenmiştir.

Frezeleme: Kendi eksenini ve birden fazla eksen etrafında dairesel dönme hareketi yapan kesici takımın tezgâha bağlanan iş parçası üzerinden takım eksenini doğrultusunda talaş kaldırma işlemine frezeleme adı verilir. Alın, çevresel, aynı ve zıt yönlü frezeleme biçimleri bulunmaktadır. Şekil 1.21’de freze çakısı pozisyonuna göre frezeleme türleri belirtilmektedir.



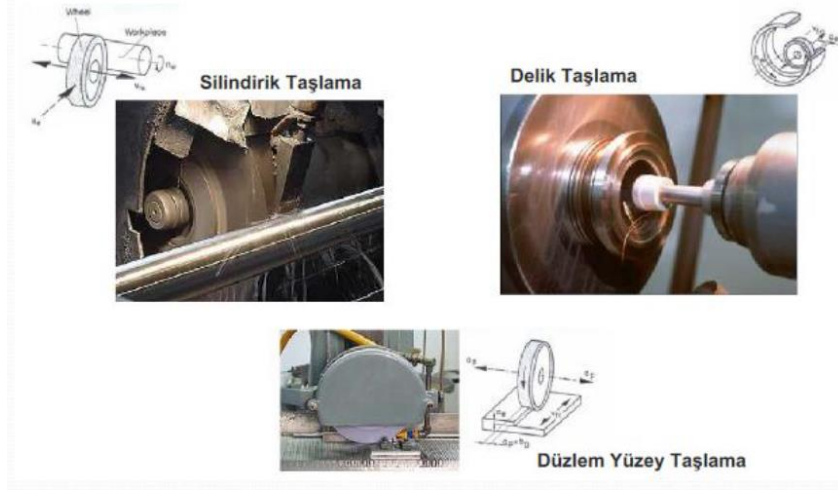
Şekil 1.21. Frezeleme işlemi [45].

Delik delme: Matkap adı verilen takım tezgâhları üzerinde metal veya metal dışı malzemelerin üzerinde silindirik biçimli delik açma işlemine delik delme adı verilir. Delik delme işlemini diğer işlemlerden ayıran en önemli fark delik oluşturma ile sınırlıdır. Bu proseste talaş kırma ve talaşın boşaltılması önem arz etmektedir. Şekil 1.22’de delik delme işlemi gösterilmektedir.



Şekil 1.22. Delik delme işlemi [46].

Taşılama: Malzemenin imal aşamasındaki son aşama olarak da tanımlanabilen taşılama malzemenin imal edildikten sonra yüzeyindeki kusurların giderilmesi amacıyla taşılama adı verilen takım tezgahlarında hatalı ve kusurlu kısımlarının giderilmesi işlemine taşılama denir. Şekil 1.23’te taşılama türleri gösterilmektedir.



Şekil 1.23. Taşlama işlemi türleri [47].

1.3.1.2. Malzeme Türü ve Özellikleri

Takviye malzemesi elyaf olan kompozitlerin işlenmesi birçok parametreye bağlı olarak farklılık göstermektedir. Matrisin kesmeye etkisi fazla olmasa da talaş oluşumu üzerinde etkisi yüksektir. Elyaf yönlenmesine bağlı dayanım yüksek olduğunda kesme kuvveti de buna bağlı olarak artış göstermektedir. Elyaf yönlenmesine bağlı olarak malzemede kırılma, burkulma zorlaşabilir aksine daha da kolay bir hal alarak talaş oluşumunu da arttırabilmektedir.

Karbon ve grafit in ısı iletkenliği fazla olduğundan işleme sırasında oluşan ısı giderilmektedir ancak cam ve aramidin ısı iletkenlikleri az olduğundan işleme sırasında oluşan ısı da işlenen bölgeden kolayca uzaklaşmadığından takımın aşınmasına sebep olabilmektedir.

1.3.1.3. Elyaf Yönlenmesi

Kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında takım elyaf yönlenmesine 0° derecelik açıda işlemeye geçtiği durumlarda laminatı etkileyen gerilmeler takviye elemanına paralel yönde etki etmektedir. Bu durumda çoğunlukla tabaka ayrılması sonucu kompozit laminatta kırılma meydana gelmektedir.

Kesme yönü ile elyaf yönü arasındaki açının artması ile elyaflar baskı sonucu yönlenmeye zıt bir biçimde bükülmeye maruz kalmakta ve etki eden basınç sonucunda kırılmaktadır. Elyaf yönlenmesine 90° derecelik açıyla yapılan işlemede ise elyaflar bükülmeye maruz kalarak ayrı ayrı kırılmaktadır [48].

1.3.1.4. Takım Özellikleri

Dayanım oranları yüksek takviye malzemeleri kullanılan kompozitlerin takım malzemesi seçimi önemlidir ancak daha düşük dayanımlı takviye malzemesi seçiminde takımın geometrisi etkin rol almaktadır.

Kesici takımların malzemelerine uygulanan kaplama işlemleri takımın performansını arttırmada büyük ölçüde fayda sağlamaktadır. En sık kullanılan ve dayanım özellikleri iyi olan kaplama türü elmas kaplamalı takımlardır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

R. Vinayagamoorthy ve arkadaşları, elyaf takviyeli plastik malzemelerdeki kesme kuvvetinin daha az olmasına rağmen, işleme süresini ve maliyeti azaltmak için diğer kesme parametreleri olan kesme hızı ve ilerleme hızının işleme kolaylığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Üretim yöntemleri ve işleme parametrelerinin etkileri üzerine kapsamları araştırmalara yaparak işleme için optimum şartlar hakkındaki sonuçları ortaya çıkarmışlardır. Filament sarma yöntemi ile cam elyaf takviyeli plastik boruların delme işlemi sırasındaki yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Düşük yüzey pürüzlülüğünde delme işlemi için yüksek mil hızı, talaş derinliği ve düşük mil hızının kullanılacağı sonucuna ulaşmışlardır [49].

Kumar Abhishek ve arkadaşları, karbonun tornalama işlemi sırasında en uygun işleme parametresi seçimi için doğrusal olmayan regresyon modellemesi, bulanık çıkarım sistemi (FIS) ile JAYA optimizasyon algoritmasını entegre ederek çok yanıtlı bir optimizasyon yolunun uygulama potansiyelini vurgulamaktadır. Elyaf takviyeli (epoksi) kompozitlerin proses kontrol parametreleri olarak iş mili hızı, ilerleme hızını ve talaş derinliğini dikkate alınarak deneyler yapmışlardır, talaş kaldırma oranı, pürüzlülük ortalaması ve kesme kuvvetini işleme için performans özellikleri olarak ele almışlardır. Mevcut durum deneysel araştırması ile JAYA algoritmasının daha az hesaplama çabası ve zaman ile güvenilir sonuçlar sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışmada malzeme kaldırma oranını, pürüzlülük ortalamasını ve sonuçtaki kesme kuvvetini önemli çıktı tepkileri olarak değerlendirmiştir ve takım ömrü, takım aşınmasının kapsamı gibi başka süreç yanıtlarının olduğunu da belirtmişlerdir. Bunlar arasında takım tezgâhı titreşiminin ve farklı pürüzlülük parametrelerinin, işlenmiş ürünün boyutsal doğruluğu da yer almaktadır [50].

K. Vijay Kumar ve arkadaşları, işleme parametrelerinin elle yatırma işlemi ile üretilen hibrit kompozit boruların malzeme özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Karbon ve aramid fiberden oluşan kompozit malzemelerde tornalama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Tornalama da minimum kesme hızı ve minimum yüzey pürüzlülük değerlerini optimum seviyeye taşımışlardır. Deneysel sonuçlara bağlı olarak analiz sonuçları matematiksel olarak modellemişlerdir. Çalışmada reçine olarak bisfenol karbon ve aramid fiberlerden oluşan çift yönlü karma kompozit malzeme kullanmışlardır. Deneyde kullandıkları parametreler iş mili hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğidir. Bu

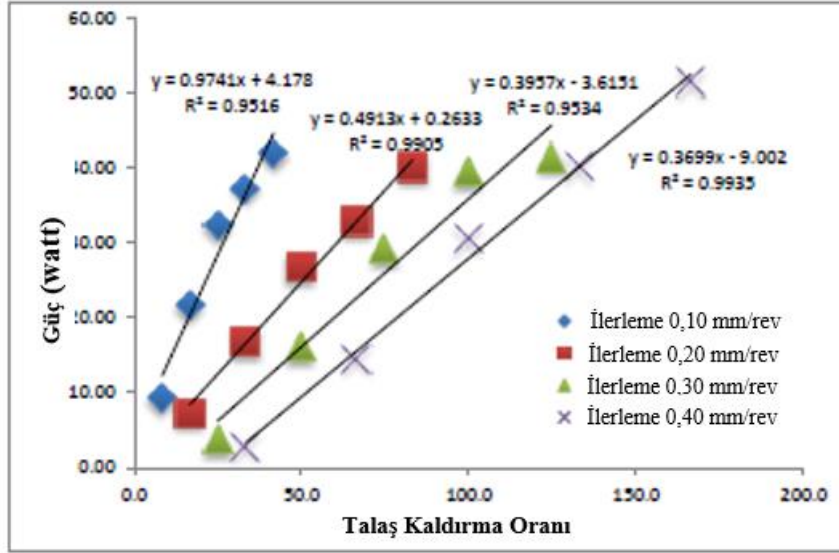
çalışma sonucunda kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin arttığı, yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerleme hızındaki artışla birlikte kesme kuvvetinin azaldığına, yüzey pürüzlülüğünün ise başlangıçta artarak ilerlemeye başladığında azaldığı sonucuna varmışlardır [51].

A. I. Azmi ve arkadaşları, güç ve özgül enerji sabitlerini belirlemek ve işleme koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanan etkilerini değerlendirmek için iki farklı fiber takviyeli kompozit malzeme üzerinde tormalama işlemi gerçekleştirmişlerdir.

Bu makale, farklı parametre ayarlarında tormalama işlemi sırasında CFRP kompozitlerin ve CFRP kompozit boruların gücünü, talaş kaldırma oranını ve spesifik kesme enerjisini tartışmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak, tormalama parametrelerinin CFRP kompozitlerin MRR ve özgül kesme enerjileri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Deneysel veriler pozitif bir lineer ilişki gösterdiğinden ve kullanılan CFRP kompozitlerinin türünden bağımsız olarak R2 1.0'a çok yakın olduğundan, kesme gücündeki artış MRR'den kaynaklanmaktadır. Deneysel sonuçlar ayrıca, her iki CFRP kompozitinin özgül kesme enerjisinin ilerleme hızından güçlü bir şekilde etkilendiğini ortaya koydu. Spesifik enerji sabiti, özellikle CFRP kompozit ve CFRP kompozit boru için ilerleme hızına göre azaltılabilir. Çalışmadaki spesifik kesme enerjisinin ilerleme hızı ile ilişkileri, teorik spesifik kesme kuvveti modeliyle uyum içerisinde olduğunu ortaya koymuşlardır [52]. Şekil 2.1 ve Çizelge 2.1'de yaptıkları araştırmaların sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kesme işlemi için dikkate alınan parametre değerleri [52].

Talaş Derinliği, ap (mm)	İlerleme, f (mm/rev)	V_c (m/dk)	Durum
0,2	0,15-0,30-0,45- 0,60	20, 40, 60, 80, 100	Kuru
0,1	0,10-0,20-0,40- 0,50	50, 100, 150, 200, 250	Kuru



Şekil 2.1. Farklı ilerleme hızlarında güç ve malzeme üzerinden talaş kaldırma oranı [52].

Ekici ve Işık, takviye olarak cam elyaf takviyeli malzemenin delinmesi sırasında meydana gelen yüzey hasarı üzerinde araştırma yapmışlardır. 60°, 90° ve 120° uç açılına sahip 2,3 ve 4 ağızlı HSS matkap kullanarak delme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deney sonucunda, kesme hızının artışıyla yüzey hasarında azalma meydana geldiğini, artan ilerleme hızıyla da yüzey hasarında artma meydana geldiğini ortaya koymuşlardır [53].

Phadnis ve arkadaşları; karbon elyaf takviyeli polimer epoksi kompozit malzemelerin delme işlemi sırasında kesme değerlerinin itme kuvveti ve tork üzerindeki yansıma ve değişimlerini incelemişlerdir. İlerleme miktarı düşük ve kesme hızları yüksek karbon elyaf ve epoksi matrisli plakaların delme işlemlerinde ideal olduğunu belirtmişlerdir [54].

Naresh ve arkadaşları, Taguchi metodunu kullanarak cam elyaf takviyeli kompozitlerdeki kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğündeki en uygun parametre değerlerini ortaya koymayı amaçlamışlardır. Araştırmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve delaminasyon gibi değerlerdeki etkenin elyaf açısı olduğu sonucuna varmışlardır. Elyaf açısının kesici takımın kesme açısı ve ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülük ve delaminasyonda artış meydana geldiği sonucuna vararak elyaf açısının en çok yüzey pürüzlülüğüne etki ettiği sonucuna ulaşmışlardır [55].

Jinguang Du ve arkadaşları bu çalışmada, temel olarak, karbon fiber takviyeli polimer matris kompozitler dahil olmak üzere, karbon fiber takviyeli seramik matris

kompozitlerin geleneksel işleme ve geleneksel olmayan işleme yöntemi açısından makineyle işleme durumuna ilişkin araştırmayı gözden geçirmektedir. Geleneksel işleme yöntemlerinin basit kullanım, gelişmiş teknoloji, daha az ekipman yatırımı vb. avantajları vardır. Ancak takım aşınması özellikle karbür takımlar kullanıldığında şiddetlidir. Sert bir kesme noktası olarak, doğrudan aletin kesici kenarına sürtünerek kesici kenarın aşınmasına neden olur. Matrisin kesilmesi, liflerin kırılması ve kesme kenarı, talaşlar ve işlenmiş yüzey arasındaki sürtünmeye kesme ısısı oluşumu eşlik eder. Kesme ısısı esas olarak takımın kesici kenarının yakınında yoğunlaşarak takımdaki yüzey malzemesinin aşınmasına ve takımın kesme performansının düşmesine neden olmaktadır. PCD ve CBN türü kesici takımlar, seramik matrisli kompozitlerin işlenmesi için uygun mükemmel özelliklere sahiptir. Katmanlar arası bağ dayanımı düşük olan ve kesme kuvveti dikey lif dizimi sırasında katmanlar arasındaki bağ dayanımını aşan karbon fiber takviyeli kompozitlerin konvansiyonel işlenmesinde yırtılma, çapak vb. birçok işleme hatası gerçekleşmektedir. İşleme sırasında delaminasyon kusurları ortaya çıkmaktadır. Bu kompozitlerin delinmesi sırasında; eksenel kuvvet etkisi nedeniyle, en dıştaki malzeme deforme olur ve geri çekilerek delaminasyon, yırtılma ve şişkinlik kusurlarına neden olmaktadır [56].

Hintze ve arkadaşları, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin frezelemesi sırasında oluşan delaminasyon miktarının yüzey hasarı ve elyaf açılarındaki etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmaları sonucunda uç radyus değeri büyük kesici takım ile yüzey hasarının arttığını gözlemlemişlerdir. Düşük elyaf açılı karbon elyaf takviyeli malzeme kullanıldığında ise yüzey hasar oranının azal meydana geldiğini ortaya koymuşlardır [57].

Senthil Kumar ve arkadaşları, takviye malzemesi karbon fiber olan plastik ve titanyum alaşımlı tabakalı malzemeleri farklı delme parametrelerinde delme işlemi uygulayarak takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delik sayısı arttıkça aşınma miktarının artarak, 130° uç açılı matkaplarda 118° uç açılı matkaplara göre talaşın daha iyi yüzeyden kaldırıldığını ve takım aşınmanın daha az olduğunu sonucuna varmışlardır [58].

Durão ve arkadaşları, çalışmalarında karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin delinmeleri işleminde matkap ucunun birbirinden farklı geometrileri ve ilerleme hızlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında delme işlemi sonrasındaki itme kuvvetini, delikli duvar yüzeyinin pürüzlülüğünü ve delme işlemi sonrası delaminasyon değerlerini

karşılaştırmışlardır. Düşük ilerleme hızının itme kuvvetini ve delaminasyon faktörünü azalttığını belirtmişlerdir. İlerleme hızının fazla olduğunda ise en uygun matkapların 120° uç açılı helisel matkap ile kademeli matkap olduğunu, delik yüzey pürüzlülüğünün ölçümlerinin dağınık olmalarından dolayı geçerli bir sonuca varamadıklarını belirtmişlerdir. [59]

N. Duboust ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, yüzey pürüzlülüğü, ticari bir temassız optik yöntem kullanılarak karakterize edilmiş ve geleneksel bir prob ucu profilometre ile karşılaştırılmıştır. Tek yönlü ve çok yönlü karbon fiber plakaların kenarları kırılmış ve oluklu frezelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki değişim, farklı takım tipleri, fiber oryantasyonları ve kesme parametreleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskopu görüntüleri kullanılarak yüzey hasarı ve kesme mekanizmaları değerlendirilmiş ve yüzey alanı (Sa), çarpıklık ve basıklık gibi pürüzlülük parametrelerinin uygunluğu da analiz edilmiştir. Optik sistemin kullanılması, farklı fiber oryantasyonlarına sahip çok yönlü bir kompozit plaka üzerindeki bireysel katların doğru pürüzlülük hesaplamasına izin vermiştir. Ayrıca çalışmada, alansal pürüzlülük parametrelerinin kullanımı da dahil olmak üzere optik sistemin işlenmiş lifli kompozit yüzeyler için pürüzlülük ölçümünün doğruluğunu artırabildiğini ve ölçüm konumuna prob ucuna göre daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. Çalışmada çıkarılan sonuçlar, işlenmiş kompozit yüzeylerin yüzey pürüzlülüğünü ve hasarını ölçmek için yeni bir optik yöntem kullanılmıştır. Sonuçlar, fiber oryantasyonunun talaş kaldırma mekanizmasında ve yüzey hasarında önemli bir rol oynadığını doğrulamıştır. 135° fiber oryantasyonu, yüzey hasarı ve pürüzlülük ölçümü için kritik fiber oryantasyonu olarak bulunmuştur. Basıklık ve eğiklik, pürüzlülük parametrelerinin yararlı olduğu ve çatlakların veya çukurların ve çıkıntılı liflerin varlığını göstermek de dahil olmak üzere yüzey kalitesi ve hasarının daha eksiksiz bir temsilini verdiği bulunmuştur. İstatistiksel yöntemler; ilerleme hızının ve takım tipinin yüzey kalitesi üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu ve ilerlemedeki değişikliklerden en çok fiber oryantasyonunun etkilendiğini göstermiştir. Temassız optik yöntemin, işlenmiş kompozitlerin yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için yararlı bir araştırma aracı olduğu gösterilmiştir. Daha da önemlisi, makinede işlenmiş çok yönlü bir kompozit plakanın tek kat katmanlarındaki pürüzlülük veya hasarın karakterizasyonunun bir prob ucu ile mümkün olmayan şekilde karakterizasyonuna izin vermektedir. Teknik, bir prob ucu kullanarak yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesiyle ilişkili olduğu bulunan güvenilirlik sorunlarını ortadan kaldırmakta ve böylece profilin ve

işlenmiş lifli kompozit plakaların görülen karmaşık hasar mekanizmalarının daha kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesini sağlamaktadır [60].

Ki Soo Kim ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, yüksek dayanımlı karbon fiber epoksi kompozit malzemelerin tornalamada işlenebilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Talaş oluşum mekanizmaları ve Taylor takım aşınma sabitleri belirlenmiştir. Kesme hızları ve ilerlemelere göre de yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Yapılan çalışmada karbon fiber-epoksi kompozit malzemelerin tornalanmasında çıkardıkları sonuçlar; kesici takımın kenar aşınması, fiber sarma açısındaki artışla artmaktadır. Ayrıca fiber sarma açısı daha büyük olduğunda, takım aşınmasının kesme hızına bağımlılığı daha fazladır. Yüzey pürüzlülüğü, kesme hızından daha çok ilerlemeye ve fiber sarma açısına bağlıdır. Tungsten karbür kesici takım türünün kenar aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından kesme hızı ve ilerleme sırasıyla 20-40 m/dak ve 0,2 mm/dev olarak tavsiye edilmektedir [61].

Ramesh ve arkadaşları, CVD (TiN, TiCN, Al₂O₃) kaplamalı sert karbürlü kesici takım uçlarıyla Grade 5 titanyum alaşımlarının farklı kesme parametrelerinde tornalanması işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini araştırmışlardır. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre olduğunu, ilerleme hızının ve kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün oldukça fazla arttığını, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [62].

R. Teti, metal seramik ve polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi üzerine çeşitli konularda genel araştırmalarda bulunmuştur. Kompozit malzemelerin işlenmesinin kesici takımın geometrisi ve aşınma direnci konusunda farklı özellikler gerektirdiğini vurgulamıştır. Kesici takım aşınma mekanizmaları, öncelikle farklı fiber matris sistemlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilgili olduğunu belirtmiştir. Cam ve karbon lifleri, yapıları gereği aşındırıcı özellikleri fazla oldukları için güçlü bir aşındırıcı davranış gösterirler. Aramid elyaflar ise düşük ısı iletkenlikleri ve sünek özelliklerinden dolayı kesici takımda bozulmaya yol açabilmektedirler. Yapıştırıcı aşınma, takım yüzeylerinde karbonize veya erimiş matris birikintileri biriktiğinde meydana gelir. Metal matrisli kompozitlerin işlenebilirliği, takviye ve matris sertliğinden kritik olarak etkilenecek daha yüksek sertlik, takım ömrünü önemli ölçüde kısaltır. CBN ve PCD takımları, aşınma direnci açısından karbür takımlardan bir ve iki kat daha iyidir. Karbür takımlar, kaba işleme operasyonlarında ekonomik olarak kullanılabilirken, daha uzun takım ömürleri nedeniyle ince işleme operasyonlarında PCD takımlar kullanılmalıdır.

Karbür takımların TIN kaplaması takım ömrünü iyileştirmez, ancak karmaşık geometrili takımlarda uygun elmas kaplama en iyi takım teknolojisidir [63].

Dipti Kanta Das ve arkadaşları; seramik takviyeli alüminyum matris kompozitlerin tornalanması sırasında kesici takım aşınması incelemiştir. Takım aşınma mekanizmasının bu kompozitlerin tornalanması sırasında takım ömrünün esas olarak kenar aşınmasından etkilendiğini göstermiştir. Takviyenin partikül boyutunun veya ağırlık derişiminin artmasıyla artan kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği ile kesici takımın kenar aşınması artmıştır. Kesme hızı ve ilerleme hızı, kenar aşınmasını etkileyen en önemli parametrelerdir. Kesme derinliğinin yan yüzey aşınması üzerindeki etkisi sınırlıdır. PCD kesici takımlar, seramik takviyeli alüminyum matris kompozitlerin tornalanması sırasında daha yüksek kesme parametreleri aralığında bile takım aşınması ve takım ömrü açısından HSS, WC, seramik, CVD elmas kaplı WC ve CBN kesici takımlardan daha iyi performans göstermiştir. Seramik takviyeli alüminyum matris kompozitlerin tornalanması sırasında, takviyenin parçacık boyutunun veya ağırlık oranının artmasıyla takım aşınmasının arttığı sonucuna varmışlardır [64].

Çelik ve arkadaşları; titanyum ve alaşımların talaşlı imalat ile işlenebilirliğinde kesici takım malzemeleri, aşınma mekanizmaları, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri gibi konular üzerinde araştırma yapmışlardır. Sonuç olarak tornalama ve frezeleme işlemlerinde talaş derinliğinin düşük seçilmesi gerektiği, yüksek aşınma direncine ve kimyasal kararlılığa sahip kesici takımların tercih edilmesi, yağlama özellikli basınçlı soğutma sıvılarının tercih edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır [65].

Xu ve arkadaşları; çalışmalarında karbon elyaf takviyeli polimer epoksi kompozitlerin delme işleminde çok kristalli elmas "PCD" matkaplar yardımıyla kesme performansı üzerine araştırmalar yapmışlardır. PCD kama matkabının PCD helisel matkabına göre daha fazla itme kuvveti ortaya koymuştur. PCD kama matkabı kesimi için daha büyük itme kuvvetleri üretilmiş olmasına rağmen, daha düşük yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde daha küçük çapak ve delaminasyon hasarının daha az olduğu sonucuna varmışlardır [66].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Uygun kompozit malzeme üretim yöntemi seçilip kompozit malzeme üretimi tamamlandığında sıra kompozit malzemenin yüzeyinde optimum koşullara ulaşabilmek adına uygun talaşlı imalat yöntemi seçilerek yüzey işlenmesine geçilir. İşleme sırasında kesme hızı, talaş derinliği, kesici takım ucu gibi birçok parametre malzemenin yüzeyinde meydana gelecek bir hasara yol açabilir. Bu çalışmada kompozit malzemenin işlenmesi sırasında oluşacak hasarı en aza indirecek parametreler bulunarak kompozit malzemenin hangi koşullarda en iyi yüzey kalitesine sahip olabileceği sonucuna varılacaktır.

3.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

İlk olarak iç çapı 24 mm, dış çapı 30 mm olan alüminyum borular kalıp olarak kullanılmak amacıyla temin edilmiştir. Temin edilen alüminyum borular temizlenerek Şekil 3.1’de belirtilen kalıp ayırıcı sıvısı işlemi uygulanmıştır. Kalıp ayırıcı uygulamamızın amacı borunun etrafına sarılan reçineyle ıslatılmış karbon elyafın borudan kolayca sıyrılarak çıkmasına yardımcı olmaktır. Kalıp ayırıcı uygulanırken her bir kattan sonra 20 dakika beklenmiştir ve bu işlem 10 defa tekrarlanarak uygulanmıştır. Şekil 3.1’de kullanılan kalıp ayırıcı ve Şekil 3.2’de kalıp ayırıcı uygulaması yapılmış alüminyum borular gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Kalıp ayırıcı



Şekil 3.2. Kalıp ayırıcı uygulaması yapılan alüminyum borular

Sonrasında iç çapı 30 mm ve dış çapı 50 mm olacak şekilde deney numunelerinin üretimleri planlanmıştır. CFRP boruları üretmek için el yatırması ve rulo sarma yöntemleri kullanılmıştır. Şekil 3.3'te deney numunelerinin alüminyum borulara sarma işlemi gösterilmektedir. CFRP boruların üretiminde kullanılan karbon fiber dokuma kumaşlar Kordsa tarafından temin edilmiştir. Epoksi sistem ise Etap Marine tarafından sağlanmıştır. Karbon elyafların birleştirilmesinde matris malzeme olarak West sistemi Pro-Set Lam 125/224 kullanılmaktadır. CFRP boruların üretim süreci, alüminyum boruya uygulanan bir kalıp ayırıcı ile başlamıştır. Üretilecek CFRP boruların tornaya bağlantısı sırasında test numunelerinin yeterli mukavemeti göstermesi için bir laminasyon planı geliştirilmiştir. Çünkü borular torna tezgahına yerleştirildiğinde yüksek mekanik basınca maruz kalmaktadır. Bu basınç altında tek yöne sarılarak üretilen CFRP borular yeterli mukavemeti sağlayamamaktadır. Bu nedenle kalıba ilk iki kat olarak Twill dokuma 600 g/m² karbon elyafı kumaşlar uygulanmıştır. Daha sonra 300 g/m² tek yönlü (UD) karbon fiber kumaşlar uygulanmıştır. Böylece kompozit boruların iç kısmı; torna tezgahının basıncını ve farklı açısız oryantasyona sahip UD karbon fiber kumaşlar ile yapılan boruların yüzeyini kaldırabilecek kadar sert hale gelecektir. Seçilen karbon elyaf kumaşların elyaf özellikleri Çizelge 3.1'de elyaf sarma işlemi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.

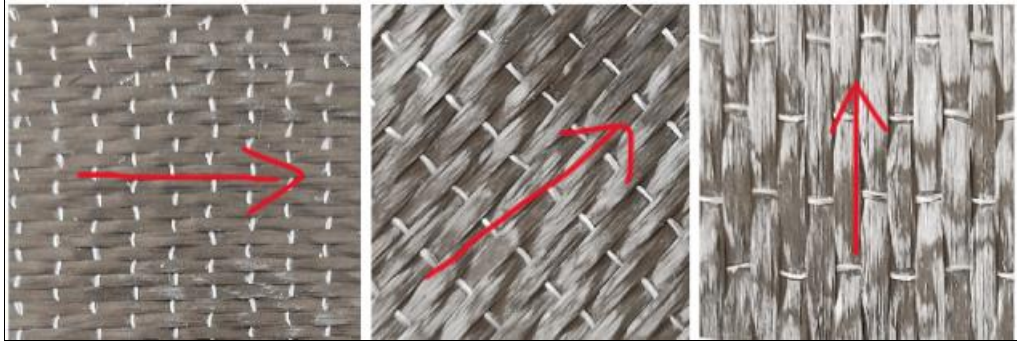


Şekil 3.3. Deney numunelerine ait sarma işlemi.

Çizelge 3.1. Karbon fiber kumaşların fiber özellikleri.

	Kumaş ağırlığı	Sarım sayısı	Kumaş kalınlığı
Birimi	g/m ²	K	mm
UD	300	12	0,48
Twill	600	12	0,97

Kalıp olarak kullanılacak alüminyum borulardan kürlenmiş ürünlerin uzaklaştırılması için yüzeyde kalıp ayırıcı kullanılmalıdır. Bu nedenle kalıba herhangi bir işlem uygulanmadan önce kalıp ayırıcı malzeme sprey yöntemi ile uygulanmıştır. Bu işlem, üretici firma tarafından tavsiye edilen kullanıma bağlı olarak yüzeylere beş kez uygulanmıştır. Bu aşamadan sonra, üretim öncesi yüzeyin tamamen kuruması için beklenmiştir. Daha sonra karbon fiber kumaşlar, istenen çapları geliştirmek için belirtilen boyutlarda kesilmiştir. Kesilen UD karbon kumaşlar belirlenen açılarda (0°, 45° ve 90°) epoksi reçine uygulanarak kalıba sarılmıştır. Farklı açısal oryantasyon yönlerinde kesilen karbon elyaflar Şekil 3.4'te kullanılan epoksiye ait mekanik özelliklerde Çizelge 3.2'de gösterilmektedir. Kesilen parçalar, birleşim noktalarında yaşanabilecek hasarların engellenmesi için kesilen karbonların koyulacağı camın yüzeyi epoksi reçineyle ıslatılmıştır ve kesilen karbonların bitiş ve başlangıç noktaları üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu sayede hiçbir noktada katman sayısı az veya çok olmasının önüne geçilmiştir.



Şekil 3.4. Farklı açısız fiber yönlerinde hazırlanan karbon fiberler.

Çizelge 3.2. West sistemi Pro-Set Lam 125/224 epoksinin mekanik özellikleri.

	Çekme mukavemeti	Çekme modülü	Çekme uzaması	Eğilme mukavemeti	Eğilme modülü	Sertlik
Birimler	MPa	GPa	%	MPa	GPa	SertlikD
Lam 125/224	77	3,41	5,6	136	3,28	86

3.2. DENEY NUMUNELERİ KÜRLEME İŞLEMİ

Daha iyi yüzey kalitesi ve boyutsal kararlılığı sağlamak için, karbon fiber malzemenin dış yüzeyine büzülme bandı sarılmıştır. Sarım işlemi tamamlanan ürünler, kürlenme işlemi için fırına yerleştirilmiştir. Kürlenme sürecinde en önemli husus, kontrollü ve ayarlı bir ısıtma çevriminin sağlanmasıdır. Bu nedenle, ısıtma hızı dikkatlice ayarlanmalıdır. Malzemenin her bir bölgesinin mümkün olduğunca eşit sıcaklıkta olması için ayarlamalar yapılmıştır. Kürlenme işlemi tamamlanan ürünler fırından çıkarılmıştır. Kürlenmiş ürünler bantları çıkarılarak alüminyum borulardan ayrılmıştır. Çıkarılan ürünler elyaf açalarına göre gruplandırılmış ve deneysel boyutlara göre kesilmiştir. Epoksi malzemenin kürlenme işlemi hem kürlenme verimini hem de kürlenme sonrası mekanik dayanımının artırılması amacıyla, ısı altında gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Bu nedenle, numunelerin tamamı, epoksi üreticisinin teknik veri sayfası (TDS) önerilerine uygun olarak, 80 derecede 2 saatte bir fırında bekletilmiştir. Kürlenme işlemi sırasında sıcaklık stabilitesini sağlamak için programlanabilir mantık denetleyicisi (PLC) kontrollü 4 kW'lık bir kürlenme fırını kullanılmıştır. PLC ünitesi, fırın içindeki ortam sıcaklığını ve malzeme yüzeyinin sıcaklığını termokupullar aracılığıyla ölçerek, sıcaklık kararlılığını sağlamaktadır. Şekil 3.5'de kürlenme işlemine tabi tutulmuş deney numuneleri gösterilmektedir. Şekil 3.6'da

fırından çıkartılan deney numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Kürleme sırasında deney numuneleri.



Şekil 3.6. Fırınlanmış deney numuneleri.

3.3. TORNALAMA DENEY DÜZENEĞİ

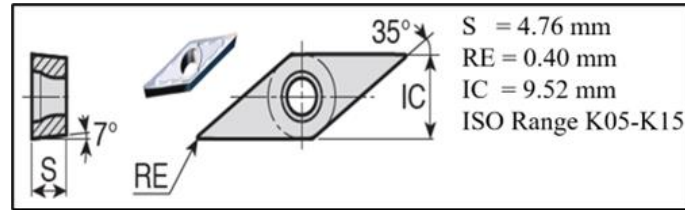
Fırınlanmış deney numuneleri CNC torna tezgahına uyumlu bir şekilde boyutlara ayrılarak torna tezgahında işlenmeye alınmıştır. Şekil 3.7’de tornalama işlemine tabi tutulan deney numunesi gösterilmektedir. Şekil 3.8’de ise tornalamada kullanılan kesici takım uçları gösterilmektedir. ACCUWAY JT 150 CNC torna tezgahında deneysel bir çalışma yapılmıştır. CNC torna merkezi maksimum 7,5 kW güce sahiptir ve iş mili hızı maksimum 4,000 rpm’dir. Tornalama deneylerinde kesici takım olarak Teague Tec VCGT 160404 FL kaplamasız geçme kesici takımlar kullanılmıştır. Kullanılan kesici takım hakkında detaylı bilgi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.7. Tornalama işlemindeki numune.



Şekil 3.8. Tornalama işleminde kullanılan kesici takım uçları.



Şekil 3.9. Kullanılan kesici takım hakkında detaylı bilgiler.

CNC torna tezgahına belirtilen kesici takım ve iç çapı 30 mm olan, 0°, 45°, 90° UD sarım yönlerine sahip karbon fiber borular sırası ile CNC torna tezgahına bağlanmıştır. CNC tornada 120, 160, 200 m/dk kesme hızları ile f 0,4 mm/dev ilerleme hızı ile borular işleme alınmıştır. Şekil 3.10'da tornalama sonrasında deney numuneleri gösterilmektedir. VJCR 2525 M16 takım tutucu, kesici takımların rijit bir şekilde bağlanması için kullanılır. Deneylerde, CFRP iş parçası bir hidrolik parça ile torna merkez makinesine sabitlenmiştir. Punta yardımı ile iş parçası tezgah üzerinde ortalanır. Tornalama işlemi kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde kullanılan parametreler

Çizelge 3.3’de verilmiştir. Her test parametresi için yeni bir kesme kenarı kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Tornalama sonrası deney numuneleri.

Çizelge 3.3. Teknik özellikler ve deneysel ayrıntılar.

Parametreler	Teknik özellikler
Torna merkezi	ACCUWAY JT 150
Kulp	VJCR 2525 M16
Kesme uçları	VCGT 160404 FL
Kesme hızı	120, 160, ve 200 m/dk
İlerleme hızı	0,4 mm/dev
Kesme derinliği	0,5 mm
Durum	Kuru

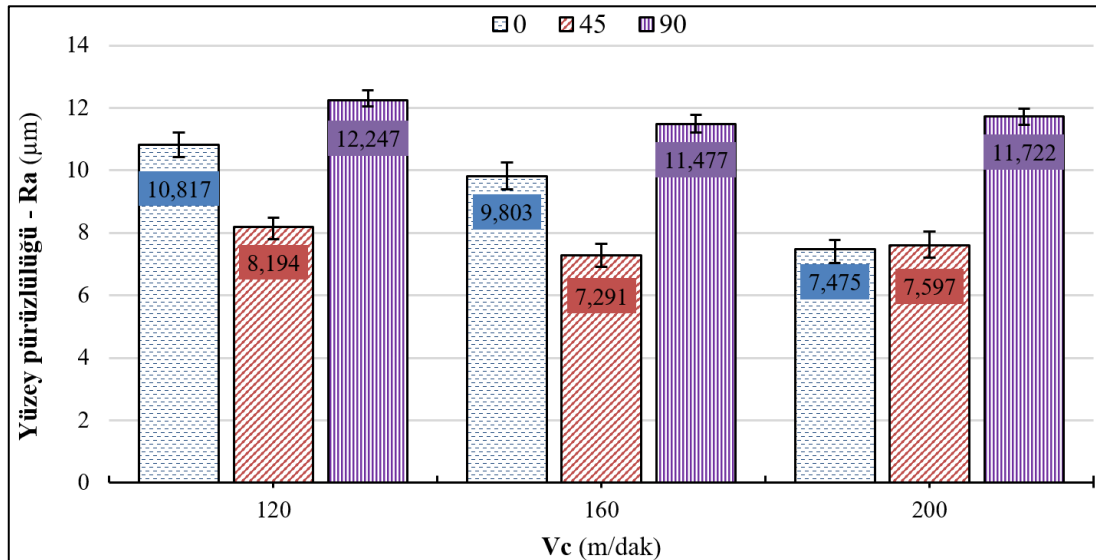
Tornalama deneyleri sırasında kesme bölgesindeki maksimum kesme sıcaklığını belirlemek için Optris PI 450 termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera çapaklardan zarar görmemesi için kesme bölgesine 30 derece açı yapacak şekilde ve 200 mm mesafe olacak şekilde konumlandırılmıştır. Termal kamera konumu tüm deneyler boyunca sabitlenmiş olup, termal kamera üreticisi ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak emisivite değeri $\varepsilon = 0,84$ tercih edilmiştir. Tornalanmış yüzeylerin pürüzlülük değerlendirmesi için ortalama pürüzlülük değeri (R_a) kullanılmıştır. R_a değerlerini ölçmek için portatif Mahr Marsurf PS 10 iğne temaslı yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Her ölçümden önce cihaz, üretici tarafından sağlanan gösterge ile kalibre edilmiştir. Bu sayede ölçümlerin doğruluğunu sağlanmaktadır. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ISO 4287 kullanılmıştır. LT değeri 4,8 mm ve Lc değeri 0,8 mm olarak alınmıştır. Kesici takımların aşınma boyutunu belirlemek ve talaşları makro olarak incelemek için Dino-Lite AM7915MZTL dijital mikroskop kullanılmıştır. FEI Quanta

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

CFRP malzemelerde üretim sonrası yüzeydeki çapak alma veya yüzey kalitesi artırma gibi son işlemler için geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Talaşlı imalat yöntemleri kompozit malzemelerin kürlenme işleminden önce veya sonrasında tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada CFRP malzemenin kürlenme işleminin gerçekleşmesinden sonra talaşlı imalat yöntemi olan tornalama işlemi ile ilgili deneyler yapılmıştır. Farklı fiber açılarıyla üretilen CFRP numuneleri ile yapılan işlemlerden elde edilen parametrelerle bazı ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıdaki tablolar, deney görselleri ve çıkan sonuçlar ışığında açıklanmıştır.

4.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yüzey kalitesi, bir malzemenin işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesinde en önemli parametrelerden biridir. Özellikle kompozit malzemelerde uygulama alanlarından dolayı yüzey kalitesi önemli bir konudur. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde pürüzlülük, dalgallılık ve şekil kusurları dikkate alınmaktadır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri doğrudan ve karşılaştırmalı yöntemlerle belirlenebilir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ortalama değer (Ra), on nokta yüksekliği (Rz) ve maksimum profil yüksekliği (Rt) sıklıkla tercih edilmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra, imalat sanayinde kullanılan ve bu çalışmada da tercih edilen bir değerdir. Şekil 4.1’de CFRP malzemenin tornalama sonrası kesme hızı ve elyaf sarım açısına göre yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Kesme hızlarında farklı lif açılarında yüzey pürüzlülük değerleri.

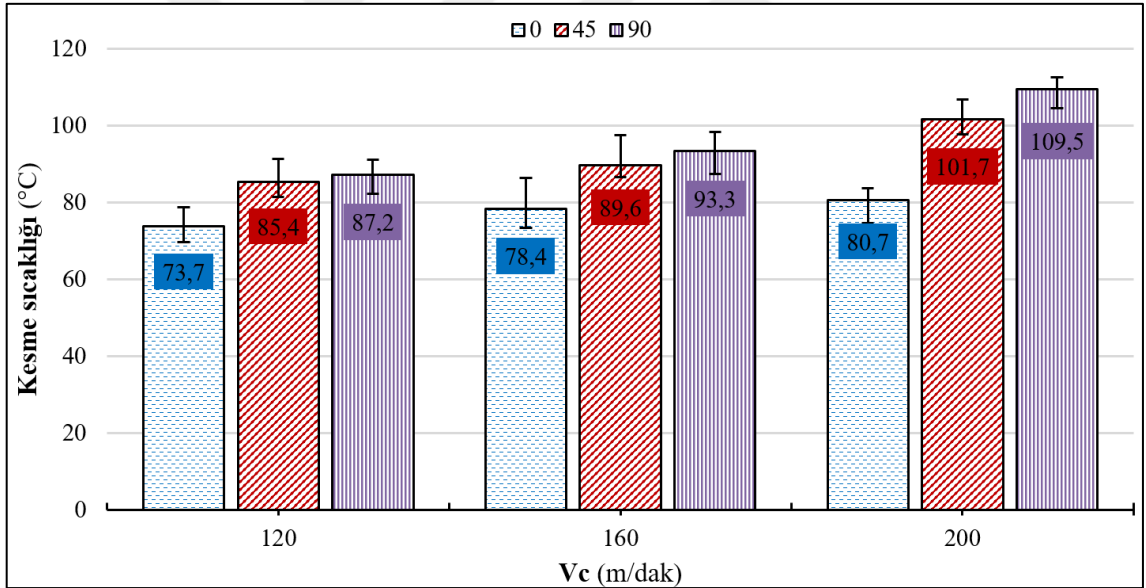
Şekil 4.1 incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü Ra değeri (12,247 μm) 120 m/dak kesme hızında ve 90° fiber açılarında elde edilmiştir. En düşük Ra değeri (7,291 μm) 160 m/dak kesme hızında ve 45° fiber açılarında elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde tüm kesme hızlarında en yüksek Ra eğiliminin 90° fiber açılarında olduğu görülmektedir. Bu durumun farklı lif açılarından kaynaklandığı düşünülmektedir. 90° fiber açıları işleme yönüne zıt olduğundan talaşları CFRP iş parçası yüzeylerinden ayırmak zor olabilir. Şekil 4.5'te verilen talaş oluşumu da bu durumu desteklemektedir. 90° fiber açılı numunelerde oluşan talaşların diğer fiber açılara göre fiberli ve uzun olduğu anlaşılmaktadır. Kesici takım tarafından uzaklaştırılan talaşların uzun ve büyük hacimli olmasının yüzey pürüzlülüğüne olumsuz etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca CFRP malzemelerin yapısındaki liflerin plastik deformasyonunun düşük olması da bir diğer neden olarak düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda CFRP malzeme yapısındaki fiber plastiğin deformasyona karşı dayanıklı olmadığı ve konvansiyonel işleme sonrasında yüzey kalitesinin bozulabileceği belirtilmektedir [66].

Diğer fiber açıları ile karşılaştırıldığında 45° fiber açılarında nispeten daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir. Ra sonuçlarına göre 45° fiber açıda elde edilen bu performansın nedeninin sarım yönünden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum, 45° açıda kesici takımın CFRP malzeme yüzeyinden talaş kaldırabildiği, tüm yüzey yerine yüzey kusurlarının lokal talaş kaldırma ile önlendiği yorumuyla açıklanabilir. En düşük Ra değeri (7,291 μm) 160 m/dak kesme hızında ve 45° fiber açılarında elde edilmiştir. Diğer bir deyişle, 160 m/dak kesme hızında 0° ve 90° fiber açılarına göre 45° fiber açısı Ra değerini %25,6 ve %36,5 azaltmıştır.

Şekil 4.1 genel olarak değerlendirildiğinde, kesme hızının Ra değerlerini bir miktar azalttığı, kesme hızının daha da artmasıyla Ra değerlerinin yükselmeye başladığı görülmektedir. Kesme hızının artırılması, kesme bölgesindeki sıcaklığın da artmasına yardımcı olur. Artan kesme hızı, plastik deformasyona yardımcı olan sıcaklığı artırdığından daha kolay talaş kaldırma sağlanır. Kesme hızının artmasıyla daha kolay talaş kalkacaktır. Talaş miktarının artması kesici takımın aşınmasının artmasına ve yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır.

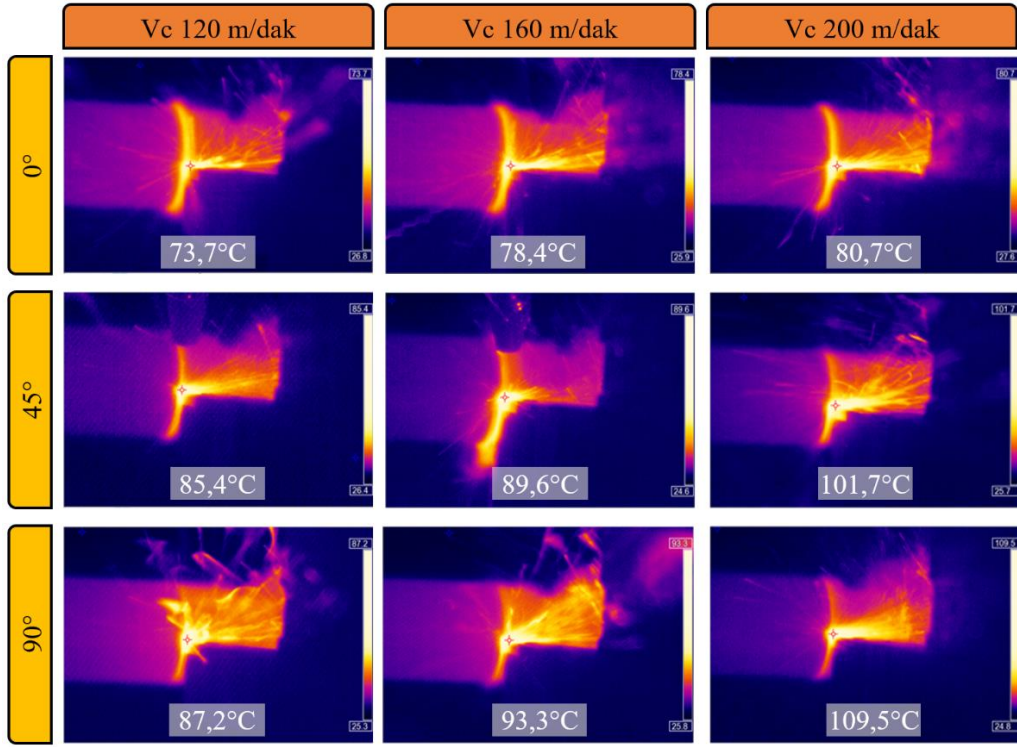
4.2. KESME SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Talaş kaldırma operasyonlarında en büyük sorunların başında sıcaklık oluşumları gelmektedir. Yüksek sıcaklık, iş parçasına, takım tezgahına veya kesici takıma zarar verebildiği gibi operatörlerin güvenliği açısından da tehlike oluşturabilmektedir. Talaş kaldırma operasyonlarında, kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı ısı oluşumu kaçınılmazdır. Bu çalışmada farklı fiber açılı numuneler kullanılarak farklı kesme hızlarında elde edilen maksimum kesme sıcaklığı değerleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde en düşük kesme sıcaklığının ($73,7^{\circ}\text{C}$) 0° fiber açısında elde edildiği anlaşılmaktadır ve 120 m/dak kesme hızı ile en yüksek kesme sıcaklığı ($109,5^{\circ}\text{C}$) 90° fiber açısı ve 200 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. Şekil 4.2’de kesme hızı ve elyaf sarım açısına göre ölçülen kesme sıcaklıkları ve Şekil 4.3’te kesme bölgesinde online kayıt altına alınan kesme sıcaklığı değerleri ekran görüntüsü verilmiştir.



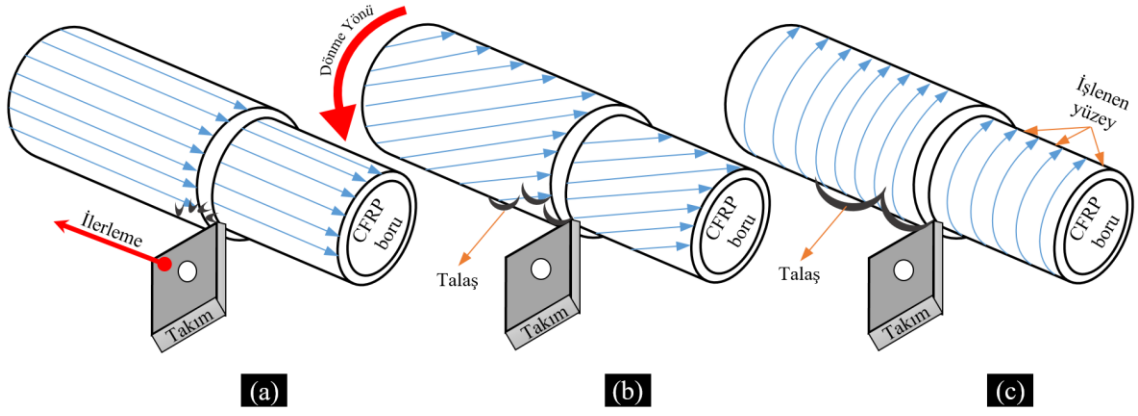
Şekil 4.2. Kesme hızlarında farklı elyaf açılarında kesme sıcaklık değerleri.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 birlikte incelendiğinde tüm fiber açılarda, kesme hızı arttıkça kesme sıcaklığı değerinin arttığı görülmektedir. Kesme hızı arttıkça iş parçası ile kesici takım arasında sürtünme artacak ve bu durum kesme sıcaklığının artmasına sebep olacaktır [67]. Düşük kesme hızında ise sürtünme az olacağından dolayı, kesme sıcaklığı değerinin düşük olması beklenen bir durumdur.



Şekil 4.3. Farklı kesme hızlarında ve farklı elyaf açılarında kesme sıcaklığı ekran görüntüleri.

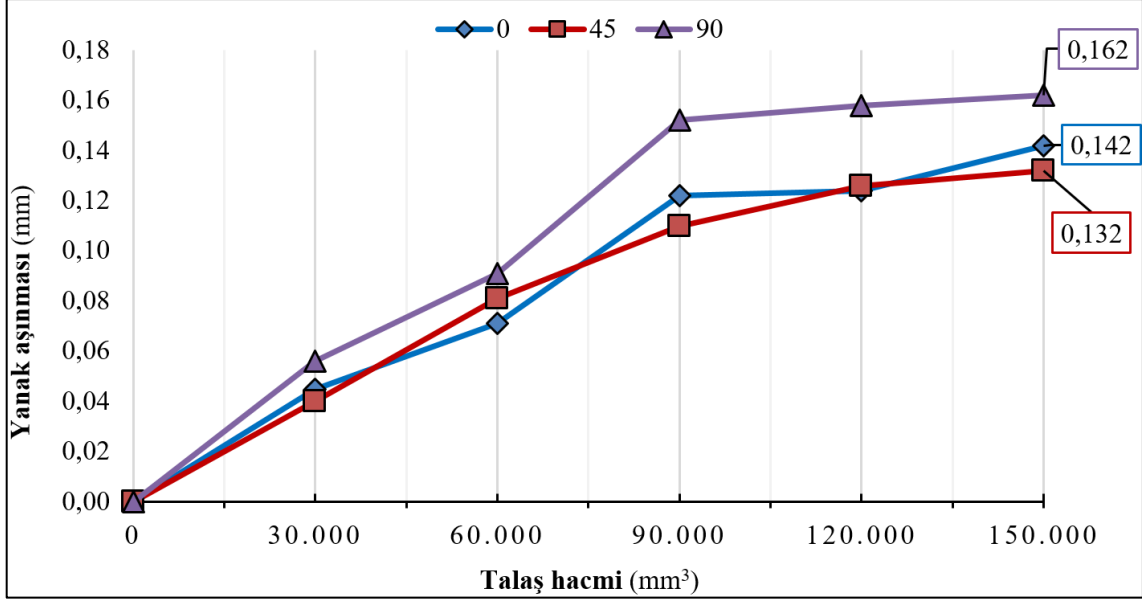
Tüm kesme hızlarında 0° fiber açısında en düşük kesme sıcaklığı 90° fiber açısında ise en yüksek kesme sıcaklığı ölçülmüştür. Bu durum iş parçasının elyaf yönlenmesi ve kesici takımın çalışma yönüyle ilgili olduğu düşünülmektedir. CFRP iş parçası elyaf açısı ve kesici takım işleme yönü detayları Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde, 90° fiber açısına sahip bir iş parçasının kesici takım yönüne paralel yönde tornalama işlemine tabi tutulduğu görülmektedir. İş parçası elyaf sarım yönü kesici takım işleme doğrultusuna paralel olduğundan, kesici takım daha fazla sürtünmeye maruz kalacaktır. Daha fazla sürtünmeye maruz kalan kesici takımda kesme sıcaklığı değerlerinin daha yüksek oranda gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. 0° fiber elyaf açısına sahip iş parçasında ise kesici takım yönüne dik olduğundan 45° ve 90° sarım açılarına göre kesme sıcaklığı nispeten daha düşük mertebelerde meydana gelmiştir. 0° elyaf açısında kesici takım-iş parçası sürtünme oranı düşük trend gösterdiğinden sıcaklık değerlerinin de düşük oranlarda elde edildiği varsayılmaktadır.



Şekil 4.4. Kesici takım işleme ve farklı elyaf sarım yönü: (a) 0°, (b) 45° ve (c) 90°.

4.3. KESİCİ TAKIM AŞINMA MİKTARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde farklı elyaf açılarında üretilen, malzemelerin kesici takım yanak aşınma değerleri incelenmiştir. Şekil 4.5, 150.000 mm³ talaş hacmi sonrasında kesici takım yanak yüzeylerde meydana gelen aşınma miktarlarını vermektedir. Aşınma deneyleri en ağır koşul olan, 200 m/dak sabit kesme hızı altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5. 200 m/dak kesme hızı altında farklı elyaf açılarında yanak aşınma sonuçları.

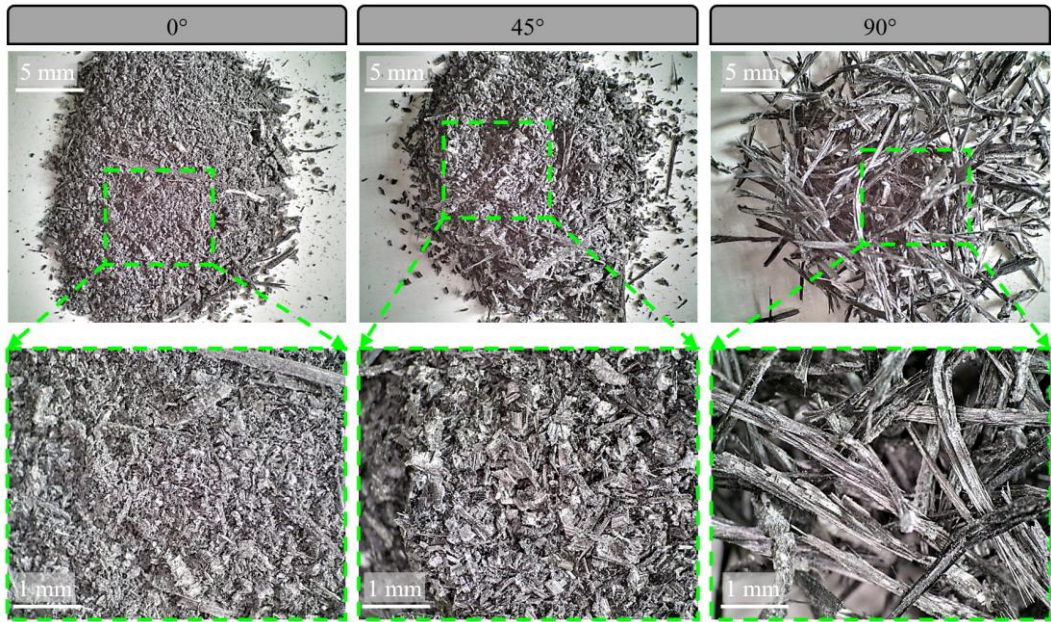
Şekil 4.5. incelendiğinde 150.000 mm³ talaş hacmi sonrasında en yüksek aşınma değerine (0,162 mm) 90° elyaf açısında elde edildiği görülmektedir. Bunun asıl nedeni olarak kesici takımın 90° açıda diğer açılara göre iş parçası ile daha fazla temas etmesi olarak

yorumlanabilir. Bu yorumu kesme sıcaklığı değerleri doğrular nitelikte olup tüm kesme hızlarında (120, 160 ve 200 m/dak), 90° açıda en yüksek kesme sıcaklığı değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.2). Kesme sıcaklığı değerlerinin yükselmesi, ilerleyen işleme sürelerinde kesici takımında hatalara ve ömründe azalmalara neden olabilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda kesme sıcaklığının yükselmesiyle kesici takım ömrünün azaldığı ve daha yüksek aşınma değerlerine sebep olduğu ifade edilmiştir [68]. 90° açığı sırasıyla 0° (0,142 mm) ve 45° (0,132 mm) elyaf açısına sahip CFRP iş parçalarıyla yapılan deneylerde elde edilmiştir. Bir başka ifadeyle 90 açığına göre 0 ve 45 açıları yanak aşınma değerlerini sırasıyla %12,4 ve %18,5 oranında azaltarak nispeten daha iyi performans göstermişlerdir. 45° elyaf açısındaki CFRP malzemesindeki deneylerde en düşük kesici takım yanak aşınma değeri elde edilmiştir. Yani 90° ve 0° açılara göre 45° açısındaki kesici takım yanak aşınma değeri sırasıyla %18,5 ve %7,04 oranında azalma göstermiştir. Elde edilen kesici takım yanak aşınma sonuçlarını, yüzey pürüzlülük (Ra) sonuçları (Şekil 4.1) destekler niteliktedir. Ra sonuçlarında en düşük sonuçlar 45° açısındaki CFRP numunelerde elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak sarım yönünün kesici takım işleme doğrultusuna açısal olarak temas etmesi olarak ifade edilebilir. Bir başka tanımla, kesici takımın CFRP iş parçası elyaf delaminasyonuna oransal olarak eşit temas etmesi sayesinde uygun bir işleme karakteristiği ile kesici takım aşınması ve yüzey kalitesini iyileştirdiği vurgusu yapılabilir.

4.4. TALAŞ OLUŞUMUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı fiber açılarda üretilen CFRP iş parçalarından tornalama işlemi esnasında talaş numuneleri alınarak, mikroskop altında makro görüntüleri alınmıştır. 200 m/dak kesme hızındaki 0°, 45° ve 90° fiber açılarda meydana gelen talaş görüntüleri Şekil 4.6'da sunulmuştur. 0° fiber açısına sahip CFRP iş parçalarında küçük boyutlu ve toz halde talaşlar elde edildiği anlaşılmaktadır. 0° fiber açısında meydana gelen talaş oluşumların küçük boyutlu olması kesici takım işleme doğrultusuna dik olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Farklı elyaf sarım yönüne sahip iş parçaları Şekil 4.4 verilmiş olup, 0° açısındaki kesme yönüne dik olan elyaf sarım doğrultusu açıkça görülmektedir. 0° fiber açı ile üretilen iş parçaları, tornalama operasyonu esnasında reçine ve karbon elyaf malzeme tabakaları kolaylıkla ayırarak, diğer açılara göre nispeten daha ufak boyutlu talaş oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. 45° fiber açıda elde edilen talaşların 0° fiber açığına göre daha uzun olduğu görülmüştür. Fiber açının işleme doğrultusuna paralel

olmaya başladıkça talaş boyutlarının ve uzunluğunun artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Öyle ki 90° fiber açıda elde edilen talaş boyutlarının ise diğer açılara göre boyutsal olarak daha büyük ve uzun olarak elde edilmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında kesici takım işleme yönüne dik doğrultuda elde edilen talaşlar küçük boyutlu olurken, işleme yönüne paralel doğrultuda elde edilen talaşlar büyük boyutlu olduğu ifade edilmiştir [69]. Literatürde ifade edilen durum, yapılan bu tez çalışmasında da benzer özellik sergilemektedir. Fiber sarım açısı kesici takım işleme doğrultusuna paralel oldukça talaş boyutlarının büyüdüğü ve uzunluğunun ise artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. 200 m/dak kesme hızında farklı lif açılarında talaş oluşumu.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmanın sonucunda karbon fiber malzemeden farklı sarım açılarıyla üretilen boru malzemelerin, CNC torna tezgahında işlenebilirlik karakteristiği incelenmiştir. Bu amaçla tez çalışması iki ana proses altında toplanmıştır. Birinci proseste; 0°, 45° ve 90° fiber sarım açılarıyla malzemeler üretilmiştir. İkinci proseste ise üretilen malzemeler, CNC torna merkezinde 120, 160, ve 200 m/dak kesme hızlarında tormalanmıştır. İşleme karakteristiğinin belirlenmesi adına performans kriteri olarak yüzey pürüzlülüğü, kesme bölgesindeki sıcaklık değerleri, kesici takım aşınma miktarı ve talaş oluşumları tercih edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen çıktılar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Yapılan çalışmada 0°,45° ve 90° fiber sarım açıları kullanılarak çapları 30-50 mm boyları yaklaşık 25 cm CFRP borular elyaf sarma yöntemi ile üretilmiştir.
2. Yüzey pürüzlülük değerleri ölçüldüğünde en yüksek yüzey pürüzlülüğü 120 m/dak kesme hızında ve 90° elyaf sarım açısında 12,247 µm olarak ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü 160 m/dak kesme hızında 45° elyaf sarım açısında 7,291 µm olarak ölçülmüştür. 90° sarım açısı tüm kesme hızlarında en yüksek yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşmıştır.
3. Kesme sıcaklığı sonuçlarına göre, en yüksek kesme sıcaklığı 200 m/dak kesme hızında 90° elyaf sarım açısında (109,5 °C) ölçülmüştür. En düşük kesme sıcaklığı ise 120 m/dak kesme hızında ve 0° elyaf sarım açısında 73,7 °C olarak ölçülmüştür. Kesme sıcaklıklarına bakıldığında kesme hızı ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir.
4. 150,000 mm³ talaş hacmi sonrasında en yüksek kesici takım yanak aşınması, 90° sarım açısında 0,162 mm olarak elde edilmiştir. Sırasıyla 0° ve 45° sarım açılarında, kesici takım yanak aşınma değerleri 0,142 mm ve 0,132 mm olarak elde edilmiştir.
5. En yüksek kesme hızı olan 200 m/dak da talaş oluşumu 0°'de küçük parçalar halinde, 45°'de nispeten düzenli ve 90°'de ise uzun ve büyük parçalar halinde oluşmuştur.

Yapılan bu tez çalışması genel olarak değerlendirildiğinde: farklı sarım açılarında üretilen CFRP borular, ikincil bir şekillendirme operasyonu olarak tormalama işlemine tabi

tutulmuştur. Elde edilen tüm verilere göre, 45° sarım açısına sahip iş parçalarının nispeten daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda CFRP malzemelerin kullanımının artış göstermeye başladığından özellikle ikincil bir şekillendirme gerektiren işlemlerde bu tez çalışması rehberlik etmesi temennimizdir.

Bundan sonraki çalışmalarda öneri olarak: farklı sarım açılarında numuneler üretilebilir, ikincil şekillendirme farklı bir operasyon (frezeleme, delik delme, taşlama vb.) ile tekrar edilebilir, şekillendirme operasyonlarında soğutma ve/veya yağlama yöntemleri denenebilir.



6. KAYNAKLAR

- [1] Ü. G. Başçı, “Al₂O₃ Partikül Takviyeli Al-Cu Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi,” Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1999.
- [2] İ. Uygur, & H. Saruhan, “Mechanical Behaviour of Aluminum Based Metal Matrix Composites,” Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 8, sayı 1, ss. 167-174, 2004.
- [3] Y. Chen, X. Guo, K. Zhang, D. Guo, C. Zhou, & L. Gai, “Study on the surface quality of CFRP machined by micro-textured milling tools,” Journal of Manufacturing Processes, c. 37, ss. 114–123, 2019.
- [4] V. Schorník, M. Daňa, & I. Zekai, “The influence of the cutting conditions on the machined surface quality when the CFRP is machined,” Procedia Engineering, c. 100, ss. 1270–1276, 2015.
- [5] R. Rafiee, M. A. Torabi, & S. Maleki, “Investigating structural failure of a filament-wound composite tube subjected to internal pressure: Experimental and theoretical evaluation,” Polymer Testing, c. 67, ss. 322–330, 2018.
- [6] A. Maziz, M. Tarfaoui, L. Gemi, S. Rechak, & M. Nachtane, “A progressive damage model for pressurized filament-wound hybrid composite pipe under low-velocity impact,” Composite Structures, c. 276, 2021.
- [7] A. U. Al-saadi, T. Aravinthan, & W. Lokuge, “Structural applications of fibre reinforced polymer (FRP) composite tubes: A review of columns members,” Composite Structures, c. 204, ss. 513–524, 2018.
- [8] A. M. Ali, L. Dieng, & R. Masmoudi, “Experimental, analytical and numerical assessment of the bond-slip behaviour in concrete-filled-FRP tubes,” Engineering Structures, c. 225, 2020.
- [9] Z. Y. Li, X. T. Wang, L. Ma, & L. Z. Wu, “Study on the mechanical properties of CFRP composite auxetic structures consist of corrugated sheets and tubes,” Composite Structures, c. 292, 2022.

- [10] I. F. Soykok, H. Tas, O. Ozdemir, & H. Kandas, "Effect of drop weight impact on the torsional-loading behavior of filament wound and prepreg-wrapped composite tubes," *Polymers and Polymer Composites*, c. 29, sayı 6, ss. 617–628, 2021.
- [11] S. Morkavuk, U. Köklü, & K. Aslantaş, "An Experimental Comprehensive Analysis of Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastic Tubes and Comparison With Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 42, sayı 7-8, 2022.
- [12] A. T. Ertürk, E. Yarar, F. Vatansever, A. E. Sahin, M. Kiliñçel, & Y. O. Alpay, "A comparative study of mechanical and machining performance of polymer hybrid and carbon fiber epoxy composite materials," *Polymers and Polymer Composites*, c. 29, sayı 9, ss. 655–666, 2021.
- [13] H. İ. İşlek. 2020 4 Mart. Matris nedir? [Online]. Erişim: <http://kompozithayalleri.com/matris-nedir/>
- [14] A. İ. Kaya. (2016 22 Ağustos). Kompozit Nedir? Kompozit Malzemeler ve Özellikleri [Online]. Erişim: <https://www.turkchem.net/kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri.html>
- [15] A. C. Serinöz. (2023). Seramik Matrisli Kompozitler [Online]. Erişim: <https://prezi.com/px99ku7kniwy/seramik-matrisli-kompozitler/?frame=e65cd8af483fa5217bb57c98566e19fbdd41d8e0>
- [16] A. Arı, & A. Bayram, "Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2022.
- [17] Anonim. (2023). Epoksi Nedir? Epoksi Malzemenin Özellikleri Nelerdir? [Online]. Erişim: <https://www.baumerk.com/tr/blog/epoksi-nedir-epoksi-malzemenin-ozellikleri>
- [18] F. Güney. (2017 Ocak 10). Epoksi Reçine Nedir? [Online]. Erişim: <https://malzemebilimi.net/epoksi-recine-nedir.html>
- [19] Ş. Özgür, *Polimerler, Ders Notları*, Kayseri, 2019.
- [20] M. Saçak, *Polimer Teknolojisi*. Ankara: Gazi Kitapevi , 2005, ss. 431.

- [21] G. Güzel, “Epoksi reçinesi- yüksek fırın cürufu / yer fıstığı kabuğu tozu kompozitlerinin hazırlanması ve özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2016.
- [22] M. Saçak, Polimer Kimyası. Ankara: Gazi Kitabevi, 2002, ss. 568.
- [23] M. Kara, “Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı,” Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2012.
- [24] M. Saçak, Lif ve Elyaf Kimyası, Ankara: Gazi Kitabevi, 2002, ss. 271.
- [25]. N. L. Philips, Design with Advance Composite Materials, Springer-Verlag, The Design Council, Great Britain Younossi O., Kennedy M., Graser J. C I., 2001, Military Airframe Costs The Effects of Advanced Materials and Manufacturing Processes, Project Air Force, RAND, Pittsburg, USA. 1989.
- [26] A. Enşici, “Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler ve Ürün Tasarımında Kullanımları,” Plastik Teknolojisi, 2004.
- [27] M. Zor, Kompozit Malzeme Mekaniği, Ders Notları, İzmir, 2018.
- [28] A. A. Eker, Plastik Matrisli Kompozitler, Ders Notları, İstanbul, 2008.
- [29] B. Beşergil. (2016). Kompozitler [Online]. Erişim: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_97.html
- [30] Anonim. (2021 Ocak 1). Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi [Online]. Erişim: <https://docplayer.biz.tr/17284916-Kompozit-malzemelerin-mekanik-ozelliklerinin-belirlenmesi-ve-ansys-10-programi-ile-isil-gerilme-analizi.html>
- [31] G. İnançer, “Farklı Takviye Malzemeli Plastik Kompozitlerin Darbe Davranışına Çevrenin Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2015.
- [32] A. Işık, “Kompozit Malzemedен İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanın Eğilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.

- [33] Ö. Bayraktar, “Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi,” Yüksek Lisans Tezi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2016.
- [34] N. Korkmaz, “Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma,” Yüksek Lisans Tezi, Tekstil Mühendisliği, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2014.
- [35] A. M. Bahar, “Pultrüzyon Yöntemiyle CTP Üretimi ve Üretim Parametrelerinin Malzeme Nihai Özelliklerine Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [36] E. Özbaş. (2021, 6 Ağustos). [Online]. Erişim: <https://www.muhendisbeyinler.net/otoklav-nedir/>
- [37] Z. Gülten, “SMC Yöntemi ile Kompozit Üretimi,” Doktora Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2003.
- [38] V. Temiz, Plastik Malzemelerle Konstrüksiyon, Ders Notları, İstanbul, 2004.
- [39] S. Abrate, & D. A. Walton, “Machining of composite materials (a two review),” Composites Manufacturing, c. 3, sayı 2, ss.75-94,1992.
- [40] F. Tür. (2020). [Online]. Erişim: <https://malzemebilimi.net/talasli-imalat.html>
- [41] Davim, J.P., Reis, P., “Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics Manufactured by Autoclave-Experimental and Statistical Study”, Materials and Design, Volume 24, Number 5, ss.315-324, 2004.
- [42] M. P. Groover, Modern İmalatın Prensipleri, Nobel Yayıncılık. Bölüm 24, ss.3-9, 2021.
- [43] M. P. Groover, Modern İmalatın Prensipleri, Nobel Yayıncılık Bölüm 20, ss.11,,2021
- [44] E. Erdem Talaşlı İmalat, Ders Notları, Hitit Üniversitesi, Çorum, 2018.

- [45] H. Aslan. (Anonim). [Online]. Erişim: <https://www.hamitarслан.com/delik-delme.html>,
- [46] A. Öztürk, Taşlama İşlemleri Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2016.
- [47] E.E. Akkuzu, "Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliğinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, ss. 5-15, 2012.
- [48] R. Vinayagamoorthy, "A review on the machining of fiber-reinforced polymeric laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, c. 37, sayı 1, ss. 49-59, 2018.
- [49] K. Abhishek, V. R. Kumar, S. Datta ve S. S. Mahapatra, "Application of JAYA algorithm for the optimization of machining performance characteristics during the turning of CFRP (epoxy) composites: comparison with TLBO, GA, and ICA," *Engineering with Computers*, c.33, ss.457-475, 2017.
- [50] K. V. Kumar, A. N. Sait ve K. Panneerselvam, "Machinability study of hybrid-polymer composite pipe using response surface methodology and genetic algorithm," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, c. 16, sayı 4, ss. 418-439, 2014.
- [51] A. I. Azmi, A. Z. Syahmi, M. Naquib, T. C. Lih, A F. Mansor ve A. N. M. Khalil, "Effects of machining conditions on the specific cutting energy of carbon fiber - reinforced polymer composites," *Journal of Physics: Conference Series*, c. 908, 2017.
- [52] E. Ekici, "Cam Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Delinmesi Esnasında Oluşan Yüzey Hasarının Deneysel Olarak İncelenmesi", *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS)*, ss.1-6, 2009.
- [53] V. A Phadnis, F. Makhdum, A. Roy ve V. Silberschmidt, "Drilling in Carbon/Epoxy Composites", *Experimental Investigations and Finite Element Implementation, Composites*: c. 47, ss 41-51, 2013.
- [54] N. Naresh., K. Rajasekhar, P.V.B. Reddy, "Parametric analysis of GFRP composites in CNC milling machine using Taguchi method", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering C*. 6, sayı 1, ss.102-111, 2013.
- [55] J. Du, H. Zhang, Y. Geng, W. Ming, W. He, J. Ma, Y. Cao, X. Li ve Kun Liu, "A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites," *Ceramics International*, c. 45, sayı 15, ss. 18155-18166, 2019.

- [56] W. Hintze, D. Hartmann, C. Schütte, "Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fiber reinforced plastics", *Composites Science and Technology*, c. 71, sayı 15, ss. 1719-1726, 2011.
- [57] M. S. Kumar, A. Parabukarathi, V. Krishnaraj, Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti-6Al-4V) stacks, *Procedia Engineering*, c.64, ss. 582-592, 2013.
- [58] L.M. Durão, D. Gonçalves, J. Tavares, V. Albuquerque, A. Vieira ve A. Marques, "Drilling Tool Geometry Evaluation for Reinforced Composite Laminates", *Composite Structures*, c. 92, ss. 1545 1550, 2010.
- [59] N. Duboust, H. Ghadbeigi, C. Pinna, S. Ayvar-Soberanis, A Collis, R. Scaife ve K. Kerrigan, "An optical method for measuring surface roughness of machined carbon fiber reinforced plastic composites," *Journal of Composite Materials*, c. 51, sayı 3, ss. 289-351, 2016
- [60] K. S. Kim, D. G. Lee, Y. K. Kwak, & S. Namgung, "Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 32, sayı 3, ss. 553-570, 1992.
- [61] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, & K. Palanikumar, "Surface roughness analysis in the machining of titanium alloy," *Materials and Manufacturing Processes*, c.23, ss.174-181, 2008
- [62] R. Teti, "Machining of Composite Materials," *CIRP Annals*, c. 51, sayı 2, ss. 611-634, 2002.
- [63] D. K. Das, P. C. Mishra, S. Singh, & R. K. Thakur, "Tool wear in turning ceramic reinforced aluminum matrix composites—A review," *Journal of Composite Materials*, c. 49, sayı 24, ss. 1-13, 2014.
- [64] Y. H. Çelik, & E. Kılıçkap, "Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar," *Gazi University Journal of Science*, c.6, sayı 1, ss. 163-175, 2018.
- [65] J. Xu, Q. An, & M. Chen, "A Comparative Evaluation of Polycrystalline Diamond Drills in Drilling High Strength T800s/250f CFRP," *Composite Structures*, c. 117, ss. 71-82, 2014.
- [66] J. Ahmad, "Machining of Polimer Composite," 2009.

- [67] Ş. Şirin, & T. Kıvak, “Effects of Hybrid Nanofluids on Machining Performance in MQL-milling of Inconel X-750 Superalloy,” *Journal of Manufacturing Processes*, c.70, ss.163-176, 2021.
- [68] T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, & Ş. Şirin, “Study on Turning Performance of PVD TiN Coated Al₂O₃+TiCN Ceramic Tool Under Cutting Fluid Reinforced by Nano-Sized Solid Particles,” *Journal of Manufacturing Processes*, c.56, sayı A, ss. 522-539, 2020.
- [69] R. Vo, M. Henerichs, F. Kuster, & K. Wegener, “Chip Root Analysis after Machining Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) at Different Fiber Orientations,” c.14, ss.217-222, 2014.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve Yılmaz Arıcı

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İmalat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2023
Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2018
Lise	Sayısal	Rauf Denктаş Anadolu Lisesi	2014

İŞ DENEYİMİ

TeknoPro Mühendislik ve Endüstri Tesisleri Üretimi A.Ş. 03-2023/ Halen

Baytek Basınçlı Ekipmanlar Müşavirlik LTD. ŞTİ. 01-2021/02-2023