



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOKTORA  
TEZİ**

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ  
KOMPOZİT MALZEMELERİN  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Ferhat CERİTBİNMEZ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2020





**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN  
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Ferhat CERİTBİNMEZ**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2020**

Ferhat CERİTBİNMEZ tarafından hazırlanan "NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Müh. Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



**Başkan:** Prof. Dr. Naki TÜTÜNCÜ

Makine Müh. Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi


Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



**Üye:** Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

Makine Müh. Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



**Üye:** Prof. Dr. Yusuf CÜNEDİOĞLU

Makine Müh. Anabilim Dalı, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



**Üye:** Doç.Dr. Ali GÜNEN

Makine Müh. Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/~~onaylamıyorum.~~



Tez Savunma Tarihi: 07/02/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Tolga DEPCI

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
  - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

  
imza

Ferhat CERİTBİNMEZ

07/02/2020

# NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Ferhat CERİTBİNMEZ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2020

## ÖZET

Bu çalışmada, farklı malzemelerin en iyi özelliklerini tek bir malzemede toplayıp, fiziksel ve mekanik ihtiyaçları karşılayarak birçok kullanım alanına sahip stratejik malzeme üreterek; nanopartikül takviyesi ile daha dayanıklı, daha hafif, alışıldandan farklı ve üstün malzeme özellikleri/üretim süreçleri elde edilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak; 8 katmanlı düz örgülü cam elyafı ile epoksi reçinenin ağırlıkça % 0,1 oranında çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) katkılı ve katkısız kompozit tabakalar üretilmiştir. İmalatı tamamlanan her bir kompozit tabakadan örnekler alınarak; çekme testi, yoğunluk ve yakma testi, sertlik analizi yapılarak mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Nanopartikül katkısının elastik modül, çekme dayanımı, poison oranı, yoğunluk, fiber hacim oranı, matriks hacim oranı, boşluk hacim oranı, yüzey sertliği üzerine etkisi tespit edilmiştir. Saf ve katkılı kompozit tabakalardan aynı sayıda ve ölçülerde test numuneleri hazırlanarak, aynı şartlar altında ayrı ayrı işlenebilirlik çalışmaları yapılmıştır. Farklı kesme profilli zımba ve kalıp kullanarak delme, parmak freze kullanarak orbital delme ve frezeleme, farklı nokta açısına sahip matkaplar kullanarak konvansiyonel delme, lazer kesim ve su jeti kesim gibi imalat yöntemleri kullanılarak işlenebilirlikleri analiz edilmiştir. Zımba ile delme çalışmalarında; yük ölçümü için Amatek (Load Cell), basınç ölçümleri için Fujifilm (Prescale) , boyut ve yüzey kontrolleri için 3 boyutlu lazer tarama (Romer Absolute Arm) kullanılmıştır. Freze çakısı ve matkap kullanarak yapılan delme işlemi Makino S33 model CNC tezgahında farklı tezgâh devri ve ilerleme parametreleri seçilerek yapılmıştır. Yüzey frezeleme işlemleri ARION GEVS 500A NC freze tezgâhı kullanılarak tamamlanmıştır. Kesici takım aşınmaları Zoller Genius 3s tezgâhı kullanılarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Mitutoyo SurfTest SJ-310, ölçüsel kontroller için Mitutoyo 150 mm dijital kumpaslar kullanılmıştır. Frezelenen yüzeyler Olympus BX-53 PHAKO stereo mikroskobu ile muayene edilmiştir. Lazer ve su jeti kesimde elde edilen mikroskobik bulgular Nikon SMZ 745T mikroskobu ile analiz edilmiştir. Garnet aşındırıcılı su jeti ve CO<sub>2</sub> lazer yöntemleri kullanılarak yapılan kesimlerden elde edilen termal ve mekanik hasarlar, ölçüsel problemler ve hassasiyetler rapor edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Polimer takviyeli kompozit malzemeler, ÇCKNT, işlenebilirlik, lazer kesim, su jeti kesim, frezeleme, delme

Sayfa Adedi : 115

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

# INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF NANOPARTICLE REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

(Ph. D. Thesis)

Ferhat CERİTBİNMEZ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

FEBRUARY 2020

## ABSTRACT

In this study, by gathering the best properties of different materials in a single material, meeting the physical and mechanical needs, producing strategic materials having many uses; with nanoparticle reinforcement, more durable, lighter, different than usual and superior material properties / production processes were obtained. Composite plates of 8-layer flat braided glass fiber and epoxy resin with 0.1 % by weight of multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) doped and undoped were produced by vacuum infusion method. Samples were taken from each composite layer completed; mechanical properties were determined by tensile test, density and burning test, hardness analysis. The effect of nanoparticle additive on elastic modulus, tensile strength, poisson ratio, density, fiber volume ratio, matrix volume ratio, void volume ratio, surface hardness were determined. Test samples were prepared from pure and doped composite sheets at the same number and dimensions, and individual machinability studies were carried out under the same conditions. Machinability of the produced composites were analyzed by using manufacturing methods such as punching using different cutting profile punch and die, orbital drilling and milling using end mill, conventional drilling using different point angles, laser cutting and water jet cutting. In punching by punches; Amatek (Load Cell) was used for load measurement, Fujifilm (Prescale) was used for pressure measurements, 3D laser scanning (Romer Absolute Arm) was used for dimension and surface controls. Drilling process using milling knife and drill was performed by selecting different machine speed and progress parameters on Makino S33 model CNC machine. Surface milling was completed using the ARION GEVS 500A NC milling machine. Cutting tool wear was determined using Zoller Genius 3s machine tool. Mitutoyo Surfrest SJ-310 was used for surface roughness measurements and Mitutoyo 150 mm digital calipers were used for dimensional controls. The milled surfaces were examined with Olympus BX-53 PHAKO stereo microscope. Microscopic findings obtained from laser and water jet cutting were analyzed with Nikon SMZ 745T microscope. Thermal and mechanical damages, dimensional problems and sensitivities obtained from cuts made using Garnet abrasive water jet and CO<sub>2</sub> laser methods were reported.

Key Words : Polymer reinforced composite materials, MWCNTs, machinability, laser cutting, water jet cutting, milling, drilling

Page Number : 115

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini hiç esirgmeden bana aktaran, yol gösteren, moral ve motivasyon desteği sağlayan, yoğun akademik ve idari görevlerine rağmen daima bana zaman ayıran değerli hocam Prof. Dr. Ahmet YAPICI' ya en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca değerli bilgilerini bana ve tüm öğrencilerine en iyi şekilde aktaran, akademik eğitim ve sanayi işbirliği içerisinde en değerli kazançların elde edilmesine öncülük eden, mühendislik eğitimimin temelini oluşturan ilk yapı taşlarının atılmasında emeği geçen Prof. Dr. Adnan MİDİLLİ, Prof. Dr. Yusuf CÜNEDİOĞLU ve Prof. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU' na saygı ve sevgilerimi sunar teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kıymetli zamanlarını ve fikirleri ile desteklerini esirgemeyen Tik ve Juri üyeleri; Prof. Dr. Lokman GEMİ ve Doç.Dr. Ali GÜNEN'e ayrı ayrı teşekkür ederim.

Haier Europe / Candy Group / Hoover şirketlerinin ve çalışma arkadaşlarımla, doktora eğitimim boyunca sağlamış oldukları tüm katkılardan dolayı her birine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yanımda olan, haklarını hiçbir şekilde ödeyemeyeceğim annem Mevlüde CERİTBİNMEZ, babam Fuat CERİTBİNMEZ, kardeşlerim Duygu TATLISU ve Cansu UYSAL'a teşekkür eder, göstermiş olduğum tüm başarılarında paylarının olduğunu bildirmek isterim.

Bu çalışmanın endüstriyel uygulamalara ve akademik çalışmalara fayda sağlamasını temenni ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	.iv
ABSTRACT.....	.v
TEŞEKKÜR.....	.vi
İÇİNDEKİLER .....	.vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	.x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	.xi
RESİMLERİN LİSTESİ .....	.xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	.xv
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Kompozit Malzemeler.....	4
2.1.1. Takviye elemanları.....	4
2.1.2. Matriks malzemeleri .....	5
2.2. Nanomalzemeler .....	5
2.2.1. Çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) .....	6
2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Metodları .....	7
2.3.1. Vakum infüzyon yöntemi .....	8
2.4. Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği .....	9
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	10
4. MATERYAL ve YÖNTEM .....	34
4.1. Materyal .....	34
4.1.1. Epoksi reçine .....	34
4.1.2. Cam elyaf fiber.....	35
4.1.3. Çok cidarlı karbon nano tüp.....	36
4.2. Yöntem.....	37
4.2.1. Kompozit malzemelerin üretimi .....	37



	<b>Sayfa</b>
4.2.2. Çekme testi (tensile test) .....	39
4.2.3. Yakma testi (burn off test) ve yoğunluk testi (density test) .....	40
4.2.4. Sertlik testi (barcoll test) .....	41
4.2.5. Yüzey pürüzlülüğü testi (Surftest) .....	42
4.2.6. Zımba ve kalıp yöntemiyle delme.....	43
4.2.7. Parmak freze kullanarak orbital delme .....	45
4.2.8. Matkap kullanarak konvansiyonel delme .....	47
4.2.9. Freze çakısı kullanarak yüzey frezeleme.....	49
4.2.10. Aşındırıcılı su jeti yöntemiyle kesim .....	50
4.2.11. CO <sub>2</sub> lazer yöntemiyle kesim.....	52
<b>5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>54</b>
5.1. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....	55
5.2. Zımba ve Kalıp Kullanarak Delme Bulguları.....	56
5.2.1. Ametek chatillon (Load Cell) ve Fujifilm (Prescale) ile kuvvet ölçümü ve basınç dağılımı değerlendirmesi .....	56
5.2.2. Romer Absolute Arm Line lazer tarayıcı ile boyut kontrolü .....	59
5.2.3. Zımba ve kalıp kullanarak delme test parametreleri ve önemli bulgular .....	61
5.2.4. Zoller Genius 3s ile zımbaların aşınma kontrolü .....	64
5.2.5. Kesilen pulların analizi .....	65
5.3. Parmak Freze Kullanarak Orbital Delme Bulguları .....	66
5.3.1. Tezgah işleme parametreleri ve delik kalitesi .....	66
5.3.2. Zoller Genius 3s ile takım aşınması kontrolü .....	69
5.4. Matkap Kullanarak Konvansiyonel Delme Bulguları .....	70
5.4.1. Test parametreleri ve sonuçları .....	70
5.5. Freze Çakısı Kullanarak Yüzey Frezeleme Bulguları.....	74
5.5.1. Yüzey frezeleme test parametreleri ve slot kaliteleri .....	74

	<b>Sayfa</b>
5.5.2. Olympus Floresan Mikroskobu ile yüzey kontrolü .....	77
5.5.3. Zoller Genius 3s ile takım aşınması görsel muayenesi.....	78
5.6. Aşındırıcılı Su Jeti Kesim Bulguları .....	80
5.6.1. Kerf konik açılı ölçülerinin hesaplanması .....	80
5.6.2. Stereo mikroskop İle makro analiz .....	82
5.7. CO <sub>2</sub> Lazer Kesim Bulguları .....	88
5.7.1. Giriş ve çıkış kerf ölçülerinin hesaplanması .....	88
5.7.2. Lazer kesim etkileri ve mikroskobik bulgular .....	88
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	95
6.1. Sonuç.....	95
6.2. Öneriler .....	99
KAYNAKLAR .....	100
ÖZGEÇMİŞ .....	111

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Katkı maddelerinin ve matriks malzemenin mekanik özellikleri .....	37
Çizelge 5.1. Saf ve katkılı kompozitlerin mekanik özellikleri.....	56
Çizelge 5.2. Hacim oranları bulguları .....	56
Çizelge 5.3. Barcol sertliği ölçüm sonuçları .....	56
Çizelge 5.4. Zımba ile kesme parametreleri ve delik kalitesi .....	62
Çizelge 5.5. Tezgah işleme parametreleri ve delik kalitesi.....	66
Çizelge 5.6. Test parametreleri ve sonuçları.....	71
Çizelge 5.7. İşlem parametreleri ve frezeleme sonuçları.....	74
Çizelge 5.8. Aşındırıcılı su jeti kesim parametreleri ve delik kalitesi .....	81
Çizelge 5.9. Lazer kesim parametreleri ve delik kaliteleri .....	89

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Bir monoatomik grafen tabakası (Shafraniuk, 2015).....	6
Şekil 2.2. Grafen tabakalarından oluşan karbon nano tüpler (a) Grafit kafes yapısı, (b) Tek duvarlı karbon nano tüp, (c) Çok duvarlı karbon nano tüp (Kreupl, Graham, Liebau, Duesberg, Seidel, Unger, 2004). .....	7
Şekil 2.3. Vakum infüzyon yönteminin şematik olarak gösterimi (Durgun, 2014) .....	8
Şekil 4.1. Zımbaların kesme profilleri.....	43
Şekil 4.2. Zimba kalıbı ve kullanılan parçalar .....	44
Şekil 4.3. (a) Orbital delme işleminde takım hareketi, (b ve c) sırasıyla CD ve OD'deki son tabakanın delaminasyonu (M'Saoubi, 2015).....	46
Şekil 4.4. Test numunesinin su jeti ile kesilmesi ve bazı teknik bilgiler .....	52
Şekil 4.5. Test numunesinin Lazer ile kesilmesi ve bazı teknik bilgiler.....	54
Şekil 5.1. Kesme boşluğuna bağlı kuvvet değişimi (fuji film kesim) .....	59
Şekil 5.2. Kesme boşluğuna bağlı delik çapı değişimi (saf kompozit kesim).....	63
Şekil 5.3. Kesme boşluğuna bağlı delik çapı değişimi (katkılı kompozit kesim) .....	63
Şekil 5.4. 250 mm/dak sabit ilerleme ve artan fener mili devrine bağlı delik çapı ölçüsü .....	67
Şekil 5.5. 500 dev/dak Sabit fener mili devri ile artan ilerleme değerine bağlı çapaklanma .....	68
Şekil 5.6. Matkap nokta açısı ve ilerleme oranına bağlı delik çapı (saf kompozit delme) .....	71
Şekil 5.7. Matkap nokta açısı ve ilerleme oranına bağlı delik çapı (katkılı kompozit delme) .....	72
Şekil 5.8. Artan fener mili devrine bağlı slot genişliği.....	75
Şekil 5.9. Artan ilerleme oranına bağlı slot genişliği .....	75
Şekil 5.10. Sabit ilerleme oranı ile artan fener mili devrine bağlı yüzey pürüzlülüğü .....	76
Şekil 5.11. Sabit fener mili devri ile artan ilerleme oranına bağlı yüzey pürüzlülüğü .....	76
Şekil 5.12. Kerf konik açısının ölçüm açıklaması.....	81
Şekil 5.13. Saf ve katkıli kompozitlerin artan kesme hızına bağlı delik giriş çapı ölçüleri.....	85
Şekil 5.14. Saf ve katkıli kompozitlerin artan kesme hızına bağlı delik çıkış çapı ölçüleri .....	85
Şekil 5.15. Kesme hızına bağlı kalınlık değişimi .....	86
Şekil 5.16. Farklı kesme hızlarının kesme yüzeyinin sertlik değişimi üzerine etkisi .....	86
Şekil 5.17. Artan kesme hızına bağlı kerf konik açısı .....	87
Şekil 5.18. Giriş ve çıkış kerf ölçüsünün hesaplanması .....	88
Şekil 5.19. Kesme hızına bağlı delik giriş ölçüsü .....	90
Şekil 5.20. Kesme hızına bağlı delik çıkış ölçüsü .....	90
Şekil 5.21. Artan lazer gücüne bağlı delik giriş ölçüsü .....	91
Şekil 5.22. Artan lazer gücüne bağlı delik çıkış ölçüsü.....	92

**Şekil****Sayfa**

Şekil 5.23. Lazer gücüne bağlı sertlik değişimi ..... 93



## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Vakum infüzyon uygulaması (a) malzemelerin dizilmesi (b) vakum kontrolü .....	9
Resim 4.1. Epoksi matrisi (a) Reçine (b) Sertleştirici .....	34
Resim 4.2. E-cam fiber.....	35
Resim 4.3. KNT I-13 tip karbon nanotüp.....	36
Resim 4.4. Kompozit malzeme üretimi.....	38
Resim 4.5. Çekme testi (a) Test öncesi (b) Test sonrası (c) Test cihazı (d) Mikroskop ve yazılım.....	39
Resim 4.6. Yakma testi (a) Test öncesi (b) Test sonrası.....	40
Resim 4.7. Sertlik ölçümü .....	41
Resim 4.8. Surf test SJ-310 ile yüzey pürüzlülük ölçümü.....	42
Resim 4.9. Parmak freze çakısı ve kompozit tutma aparatı.....	45
Resim 4.10. Makino S33 CNC tezgahında orbital delme işlemi.....	46
Resim 4.11. Makino S33 CNC tezgahında konvansiyonel delme işlemi .....	47
Resim 4.12. Açılı Matkap Bileme Makinası (EDG-213N).....	48
Resim 4.13. Arion-GEVS500A freze tezgahında yüzey frezeleme işlemi .....	49
Resim 4.14. Su jeti kesim işlemi (a) Su jeti makinası (b) Kompozit tabakalar (c) Test numuneleri .....	50
Resim 4.15. Garnet aşındırıcının SEM görüntüsü (Doreswamy, 2015) .....	51
Resim 4.16. CO2 Lazer makinası ve kesme koşulları .....	53
Resim 5.1. Fiber çekilme ve kopmaları (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit.....	55
Resim 5.2. Kuvvet ve basınç ölçümü .....	57
Resim 5.3. Kesme zımbalarına göre basınç dağılımları ve renk değişimleri.....	58
Resim 5.4. Romer Absolute Arm ile lazer tarama .....	60
Resim 5.5. Lazer tarama ile test numunelerinin 3D model ve delik çapı tespiti .....	60
Resim 5.6. Deliklerin mesh yapısı (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit .....	61
Resim 5.7. Zoller Genius 3s ile takım aşınması kontrolü.....	64
Resim 5.8. Zımbalarda aşınma kontrolü.....	64
Resim 5.9. Farklı zımba profilleri ile kesilen pulların analizi.....	65
Resim 5.10. Sabit 250 mm/dak ilerleme oranı ile çapaksız deliklerin elde edilmesi .....	67
Resim 5.11. Sabit 500 dev/dak fener mili devri ile elde edilen çapaklı delikler.....	68
Resim 5.12. Freze çakısı kanat aşınması (a) Saf kompozit kesim (b) Katkılı kompozit kesim .....	69
Resim 5.13. Freze çakısı alın aşınması saf kompozit kesim .....	70
Resim 5.14. Freze çakısı alın aşınması katkılı kompozit kesim.....	70

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.15. Saf ve katkıli kompozit plakaların delme sonrası çapaklanması .....	72
Resim 5.16. Katkısız kompozit plakaların Polyworks ile analizi.....	73
Resim 5.17. ÇCKNT katkıli kompozit plakaların Polyworks ile analizi.....	73
Resim 5.18. Yüzevi frezelenmiş saf kompozit tabaka.....	77
Resim 5.19. Yüzevi frezelenmiş katkıli kompozit plaka .....	78
Resim 5.20. Çakı kesme kenarının yanal yüz aşınması (saf kompozit kesim) .....	78
Resim 5.21. Çakı kesme kenarının yanal yüz aşınması (katkılı kompozit kesim) .....	79
Resim 5.22. Kesici takımın ön düzlem ve kenar aşınması (saf kompozit kesim) .....	79
Resim 5.23. Kesici takımın ön düzlem ve kenar aşınması (katkılı kompozit kesim).....	80
Resim 5.24. Saf kompozit kesim (a) 400 mm/dak (b) 950 mm/dak (c) 1500 mm/dak .....	82
Resim 5.25. Katkılı kompozit kesim (a) 400 mm/dak (b) 950 mm/dak (c) 1500 mm/dak.....	82
Resim 5.26. Saf kompozitin delik kenarına su jetinin etkileri .....	83
Resim 5.27. Katkılı kompozitin delik kenarına su jetinin etkileri.....	83
Resim 5.28. Saf kompozit deliğinin delaminasyonu (delik iç duvarı) .....	84
Resim 5.29. Katkılı kompozit deliğinin delaminasyonu (delik iç duvarı).....	84
Resim 5.30. Test numuneleri (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit .....	89
Resim 5.31. Kesilemeyen deliklerin arka yüzü (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit.....	92
Resim 5.32. Lazer ışınının saf kompozit delik kenarına etkileri (a) Giriş yüzeyi (b) Çıkış yüzeyi .....	93
Resim 5.33. Lazer ışınının katkıli kompozit delik kenarına etkileri (a) Giriş yüzeyi (b) Çıkış yüzeyi .....	94
Resim 5.34. Fiberlerin kömürleşmesi (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit.....	94

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>TPa</b>	Terapascal
<b>GPa</b>	Gigapascal
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>kPa</b>	Kilopascal
<b>µm</b>	Mikrometre
<b>mm</b>	Milimetre
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum oksit
<b>°C</b>	Santigrat
<b>g</b>	Gram
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>W</b>	Watt

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>AWJ</b>	Aşındırıcı Su jeti
<b>CSLM</b>	Konfokal Lazer Taramalı Mikroskopu
<b>CNC</b>	Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol
<b>CMM</b>	Koordinat Ölçme Makinası
<b>ÇCKNT</b>	Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
<b>NC</b>	Nümerik Kontrol
<b>HIPS</b>	Yüksek Etkili Polistiren
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskopu
<b>RSM</b>	Yanıt Yüzey Metodolojisi
<b>IR</b>	Kızılötesi
<b>UV</b>	Ultraviyole



## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, mevcut konvansiyonel malzemeler ile elde edilemeyen dayanım ve özelliklerin iki ya da daha fazla sayıdaki farklı malzemelerin en iyi özelliklerinin kullanılmasıyla ve makro düzeyde bir araya getirilmesiyle elde edilen çok fazlı malzemelerdir. Kompozit malzemeler takviye ve matriks fazlarından meydana gelir. Matriksler; kompozit yapıyı çevresel ve dış etkilerden koruyarak, elyaflara yük ve gerilim transferi sağlar ayrıca malzemenin (elyaf-matriks) bütünlüğünü korur. Takviye elemanları ise kompozit yapının dayanımını arttırarak yük taşıma görevini üstlenir (Şahin, 2015: 31, 32).

Kompozit malzemeler dünyanın varoluşundan bu yana doğada birçok farklı kompozisyonlarda bulunmaktadır. Örneğin bitkilerin özellikle odun dokusu hücrelerinin duvarlarında (hücre çeperi içerisinde) bulunan lignin, selülozla birlikte bitkinin odunsu yapısını ve dayanıklılığını sağlar. Salyangozlar ve istiridyeler gibi omurgasızların kabukları birer kompozit örneğidir. Ayrıca bilim adamları; bir örümcek ağının sentetik elyaflar'dan daha güçlü olduğunu bildirmiştir (Mazumdar, 2001). Arkeologlar Mısırdaki M.Ö 2800 yıllarında lamine edilmiş tahta tabakalar bulmuştur. Ayrıca Orta doğuda insanların dayanımı yüksek ok yayları elde etmek için farklı lif yönlerine sahip malzemeleri üst üste koydukları kayıtlara geçmiştir. Çinliler ve Japonlar da darbe sönümleme mukavemeti yüksek ok yayı gövdesi yapmak için metal ve işlem görmüş derileri bir araya getirmiştir (Şahin, 2015: 49). Kompozitler yüzyıllar boyunca insanlar tarafından kullanılarak, bilim ve teknolojinin gelişmesi ile farklı amaçlar için yeniden tasarlanmıştır. Doğal kompozitler (ahşap ve kumaşlar) 17 Aralık 1903 tarihinde Kuzey Carolina'da Wright Brothers's Flyer 1'in ilk uçuşundan itibaren uçaklarda kullanılmıştır (Irving ve Soutis, 2014). Son yıllarda ise cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin havacılık, denizcilik, otomotiv ve inşaat alanlarında kullanımları giderek artmaktadır (Bazli ve diğerleri, 2020).

Yüksek mukavemet ve sertlik-ağırlık oranı, düşük yoğunluk, uzun yorulma ömrü, yüksek korozyon ve aşınma dirençleri kompozitleri birçok endüstride kullanılan en genel amaçlı malzemelerden biri yapmaktadır (Ertürk, Vatansever, Yazar, Karabay, 2019). Kompozit malzemeler farklı katkı maddeleri ile katkılandırılarak mevcut özellikleri daha da iyileştirilebilmekte ve güçlendirilebilmektedirler. Karbon nanotüpler; yüksek yüzey alanı,

60 GPa'ya kadar çekme dayanımı, yaklaşık 1 Tpa elastik modülü gibi olağanüstü fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı kompozit malzemelere dolgu maddesi olarak dikkat çekmektedir (Hawreen, Bogas, Kurda, 2019). Son yıllarda, çok cidarlı karbon nanotüplerin (ÇCKNT) olağanüstü mekanik, termal ve diğer fonksiyonel özelliklerinden dolayı polimer matriks kompozitte dolgu maddesi olarak öne çıkmaktadır (Yang, Lee, Hsieh, Chen, Cheng, 2018). Fakat polimer bazlı kompozitlerin solvent ve kimyasallardan etkilenmesi, anizotropik oluşları, şekillendirilmeleri veya işlenebilirliklerinin maliyetli ve yavaş oluşu dezavantajlarıdır (Groover, 2007).

Gelişen teknoloji ihtiyaçları ve ülkelerin rekabet zorunluluğu; güçlü malzemeleri düşük maliyet ile üretme konusunda araştırma ve geliştirme faaliyetlerini tetiklemektedir. Kullanım yerine ve ihtiyaçlarına göre doğru matriks ve takviye elemanı seçimi, üretim tekniği seçimi daha sonrasında malzemelerin montaj edilmesi çok önem arz eder (Geier, Davim, Szalay, 2019). Endüstride malzemelerin kullanım yerlerine montajlanabilmesi için pim, perçin, perno, civata-somun, kama gibi bağlantı elemanları kullanılır bu sebepten dolayı malzemelerde delik, kama yeri, slot ihtiyacı doğar (Matthews, Davies, Hitchings, Soutis, 2000). Kompozit malzemelerin montajında ise en çok delik ihtiyacı olur ve bu delikler farklı matkap tipleri kullanılarak oluşturulur (Mudhukrishnan, Hariharan, Palanikumar, 2020). Farklı talaşlı veya talaşsız imalat yöntemleri kullanılarak bu ihtiyaçlar karşılanabilir fakat maliyet, ölçüsel hassasiyet, imalat esnasında ortaya çıkan sorunlar ve imalat sonrası ek işçilik gibi birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu çalışmada; farklı malzemelerin en iyi özelliklerini bir malzemede toplayıp, fiziksel ve mekanik ihtiyaçları karşılayarak birçok kullanım alanına sahip stratejik malzeme üreterek; nanopartikül takviyesi ile daha dayanıklı, daha hafif, alışıldan farklı ve üstün malzeme özellikleri/üretim süreçleri elde edilmiştir. Cam elyaf takviyeli polimer ve ÇCKNT katkılı kompozit tabakalar vakum infüzyon yöntemi ile hassas bir şekilde üretilerek kürlenmiştir. Üretimleri tamamlanan her bir kompozit tabakadan mekanik özelliklerin belirlenmesi ve işlenebilirlik çalışmalarının yapılabilmesi için ayrı ayrı test numuneleri alınmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme, yakma, yoğunluk ve sertlik testleri yapılmıştır. Mekanik testlerin tamamlanmasının ardından her bir parametre için ortalama değerler tespit edilmiştir. Saf ve katkılı kompozitlerin ayrı ayrı yoğunluk, elastik modül, maksimum çekme ve gerilme kuvvetleri, kopma uzamaları, poison oranları, yüzey sertlikleri, fiber ve matriks hacim oranları belirlenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin işlenmesinde ve

delinmesinde alışlagelmiş metotların dışına çıkılarak; zımba ile delme, parmak freze kullanarak orbital delme, matkap kullanarak konvansiyonel delme, freze çakısı ile yüzey frezeleme gibi imalat tekniklerinin yanı sıra su jeti ve lazer gibi ileri imalat teknikleri kullanılarak delme ve kesme işlemleri yapılmıştır. Her bir işleme metodu için farklı çalışma parametreleri kullanılarak, çalışma parametrelerinin saf ve katkılı kompozit malzemelerin işlenebilirliklerine etkileri tespit edilmiştir. Saf ve katkılı kompozit tabakaların işlenmesinde; ölçüsel hassasiyet, çapaklanma, yarıлма, parçalanma, delaminasyon, yüzey sertleşmesi, yüzey deformasyonu, yüzey pürüzlülüğü, kalınlık değişimi, epoksi çekilmesi, fiber kömürleşmesi, kerf ölçümü gibi mekanik, termal ve ölçüsel analizler yapılmıştır. Kompozit tabakaların işlenmesinde kullanılan her yöntemin ayrı ayrı avantajları ve dezavantajları belirtilmiştir. Yapılan bu çalışma ile ÇCKNT katkılı ve katkısız cam elyaf takviyeli polimer malzemelerin imalatı sonrası kullanım yerine göre hangi yöntem ile işlenmesinin faydalı olacağı, işlenmesi esnasında seçilen yöntemin etkilerinin ve hasarlarının neler olabileceği gösterilmiştir.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; kullanım yerine göre bir ihtiyacı karşılamak için en az iki veya daha fazla sayıdaki, farklı veya aynı tür malzemelerin üstün özelliklerini yeni ve tek bir malzemede elde etmek için, malzemelerin makro düzeyde bir araya getirilmesi neticesinde elde edilen malzemeler olarak tanımlanabilir. Kompozit malzemeler takviye ve matriks malzeme olmak üzere iki veya daha fazla belirgin fazdan meydana gelir. Matriks fazını oluşturan temel malzemeler metal, seramik ve polimer olabilir. Takviye fazında yine bu üç temel malzemenin yanı sıra bor ve karbon gibi elementlerden seçilebilir. Kompozit malzeme imalatında veya kullanımında seçilecek olan fazların uyumu çok önemlidir, seramik ve polimer matriks kombinasyonlarının pek verimli olmadığı hakkında bilgiler mevcuttur (Groover, 2016). Kompozit malzeme tasarımı ve imalatı öncesi; kullanım yeri ve koşulları, üretim metodu, işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliği analiz edilmeli; kullanılacak olan takviye elemanlarının ve matriks malzemelerin uyum içinde olması gerekmektedir. Matriks ve takviye elemanlarının uygunluğu, meydana gelen hasar modlarını (mekanizmaları) önemli ölçüde etkilemektedir.

#### 2.1.1. Takviye elemanları

Takviye elemanları kompozit yapıya gelen yükleri taşıyarak, matriksin rijitlik ve dayanımını artırma görevini üstlenir. Takviye elemanlarından beklenen özellikler; yüksek elastik modül, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk, üretim kolaylığı ve ısı dirençtir. Takviye malzemelerinin mukavemet, termal stabilite ve dirençlik sağlama görevlerinin yanı sıra kullanılan fiber malzemelerin özelliklerine göre elektrik iletkenliği ve yalıtım sağlama fonksiyonlarını yerine getirme işini de yapar. Doğada takviye elemanı olarak doğal elyaflar, sentetik organik elyaflar, sentetik inorganik elyaflar bulunmaktadır. Kompozit yapıların imalatında cam, boron, karbon, alüminyum oksit, silisyum karbür, organik moleküller, metalik camlar ile doğada bulunan doğal; flax, hemp, jute, kenaf, ramie, sisal, hindistan cevizi elyafı gibi malzemeler takviye elemanları olarak kullanılmaktadır (Şahin, 2015: 65, 98).

### 2.1.2. Matriks malzemeleri

Matriks, kompozit yapıdaki elyaf-matriks bütünlüğünü koruyarak, elyaflara yük ve gerilim transferi sağlar. Ayrıca kompozit yüzeyini dış ve çevresel etkilerden muhafaza ederek; çatlak oluşumu, kılcal çatlak ilerlemesi gibi etkilerin önlenmesi görevini üstlenir. Fiberlerin birbirinden izole edilmesi görevi de matrikslerdedir, bu sebeple fiberler birbirlerinden bağımsız davranır böylece çatlak ilerlemesi olmaz veya yavaşlar. Kompozit malzemelerin süneklik, darbe direnci gibi performans karakteristikleri, seçilen matriks malzemelerin özelliklerine bağlı olarak değişir. Kompozit yapının kırılma tokluğu daha sünek bir matriks malzemenin kullanılması ile artırılabilir. Örneğin matriks malzeme için termoplastik esaslı yapılar seçilerek tokluğu yüksek kompozit malzemeler üretilebilir. Kompozit malzeme imalatında; metal matriksler (Aluminyum, magnezyum, çinko, titanyum alaşımları), plastik matriksler (termoplastikler, termosetler, elastomerler) ve seramikler matriks malzeme olarak kullanılmaktadır (Şahin, 2015: 103, 127).

### 2.2. Nanomalzemeler

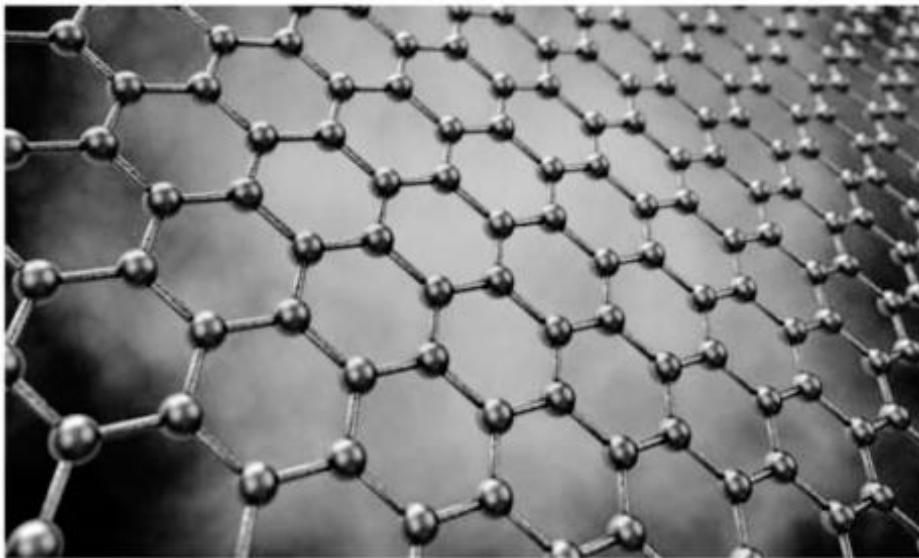
Herhangi bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelen nano günümüzde sıkça duyulmaktadır. Nanometre ise metrenin bir milyarda birine eşit olan uzunluk birimidir. Nanoteknolojinin kullanımıyla veya doğada var olan nano boyutlu malzemelerin kullanımı ile nanopartikül katkılı kompozit malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır. Nanoboyutlara geçildiğinde malzemeler makro boyutlardan farklı şekilde fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler göstermektedir (Şahin, 2015: 330, 359).

Epoksi esaslı matriksli kompozit malzemeler mükemmel mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı hava taşıtlarında, uzay ve otomobil endüstrisinde yapısal bileşenler olarak yaygın şekilde kullanılır. Kompozit malzeme imalatında malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için bir çok dolgu maddesi bulunmaktadır bunların en değerli olanı nano malzemelerdir (Yang, Lee, Hsieh, Chen, Cheng, 2018). ÇCKNT'ler olağanüstü mekanik, termal ve fonksiyonel özelliklerinden dolayı polimer matriksli kompozit malzemelerde tercih edilen nano dolgu maddesi olarak yerini almıştır.

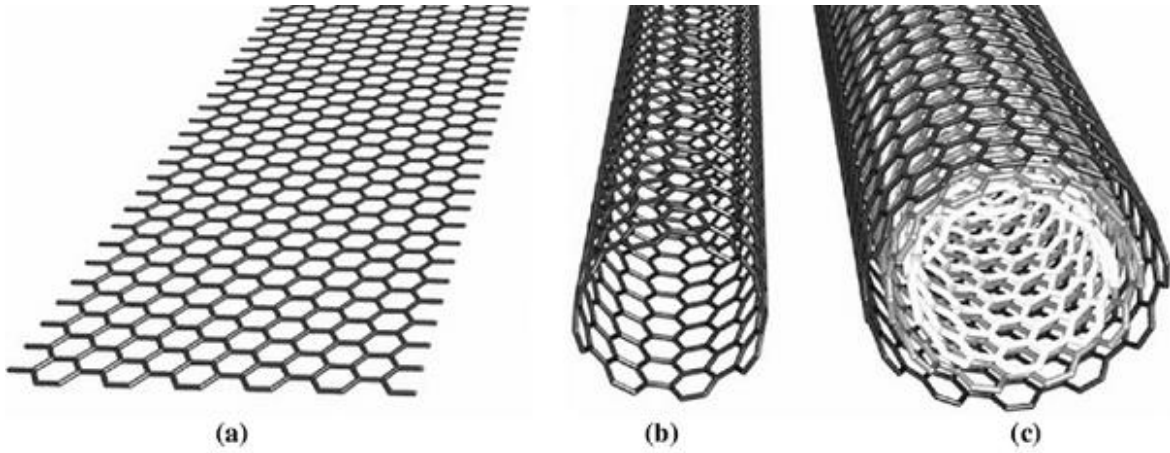
### 2.2.1. Çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT)

Karbon, antik çağlardan beri bilinen, evrende doğal halde veya elementlerde bileşik halinde bulunan altıncı elementtir. Günümüzde milyonlarca karbon bileşiği bulunmaktadır. Karbon ihtiyacının büyük çoğunluğu kömür yataklarından sağlanmaktadır. Periyodik tablonun en önemli elementlerinden biri olan karbon gündelik hayatta karşımıza grafit (kurşun kalem) ve elmas şeklinde çıkarken, fullerden ve nanotüp gibi yeni sentezlenen formları ile de araştırmaların odak noktası olmuştur (Özkan, 2019). Karbon ailesi içerisinde Kent'ler yüksek yüzey/hacim oranı, 1 TPAO'ya yaklaşan bir elastik modül, 100 GB'lık bir gerilme kuvvetine ulaşabilirler (Hawreen, Bogas, Kurda, 2019). Bu mukavemet, herhangi bir endüstriyel elyafinkinden daha yüksektir.

Graben ise altıgen yapılarda bulunan karbon atomlarının pal peteği gibi gruplaşmış halidir (Şekil 2.1). Grabenin elektrik ve ısı iletkenliği çok iyidir. Grabenin içerisinde bulunan elektronlar saniyede yaklaşık 750-800 km hızla hareket edebilir. Karbon nanotüpler farklı uzunlukta, iç ve dış çap ölçülerinde bulunabilirler. Karbon nanotüpler (KANT), graben tabakaların silindir şeklinde rulodanmış halidir (Şekil 2.2) (Melen, Frer, Park, 2002). Grafen düzlemi denilen örülü yapının bir silindir şekline sarılması ile oluşan KNT'ler çeşitli yöntemlerle tek (Single walled carbon nanotube-SWCNT) veya çok duvarlı (Multi walled carbon nanotube-MWCNT) yapılar halinde elde edilebilmektedir (Chaudhury ve Samantaray 2017).



Şekil 2.1. Bir monoatomik grafen tabakası (Shafraniuk, 2015)



Şekil 2.2. Grafen tabakalarından oluşan karbon nano tüpler (a) Grafit kafes yapısı, (b) Tek duvarlı karbon nano tüp, (c) Çok duvarlı karbon nano tüp (Kreupl, Graham, Liebau, Duesberg, Seidel, Unger, 2004).

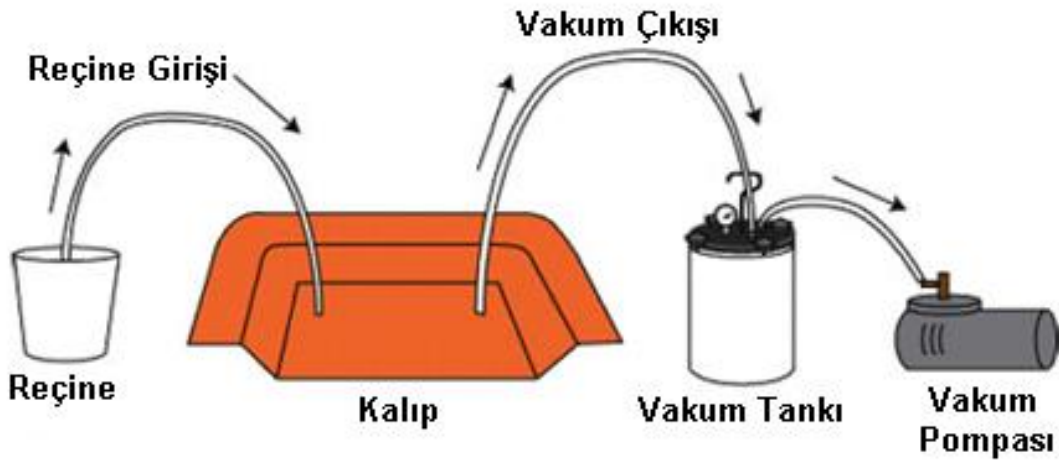
Son derece yüksek esneme kabiliyeti, yüksek elastiklik ve kırılma gerilimi ile KNT'ler dikkat çekici mekanik özelliklere sahiptir. Bir KNT'nin kendi ağırlığının 300 milyon katı ağırlığa dayanabileceği, çelikten 100 kat daha güçlü ve 6 kat daha hafif olduğu bilinmekte ve tüm bu özellikler KNT'leri şimdiye kadar bulunmuş en güçlü malzeme yapmaktadır.

### 2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları

İstenilen kalitede kompozit malzeme üretmenin en önemli aşamalarından biri olan kompozit malzeme üretim metodu; kullanılan matriks ve fiber malzemelere göre seçilir. Endüstride çok sayıda üretim yöntemi kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde ; el yatırma yöntemi, püskürtme yöntemi, sürekli kalıplama, elyaf sarma yöntemi, santrifüj kalıplama, torba ile kalıplama (vakum torbası yöntemi, otoklav yöntemi, basınç torbası yöntemi), kapalı döküm yöntemi, enjeksiyon kalıplama, tabakalı birleştirme, soğuk presleme yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal matriksli kompozit malzemelerin üretiminde ise; sıcak presleme yöntemi, toz metalürjisi yöntemi, sıvı metal emdirme yöntemi, elektroliz yöntemi, buhar çökeltme yöntemi, haddeleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoplastik reçineli kompozitlerin ise enjeksiyon kalıplama ve termo şekillendirme ile üretimleri yapılabilmektedir. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin üretiminde en yaygın ve başarılı yöntem ise vakum infüzyon yöntemidir.

### 2.3.1. Vakum infüzyon yöntemi

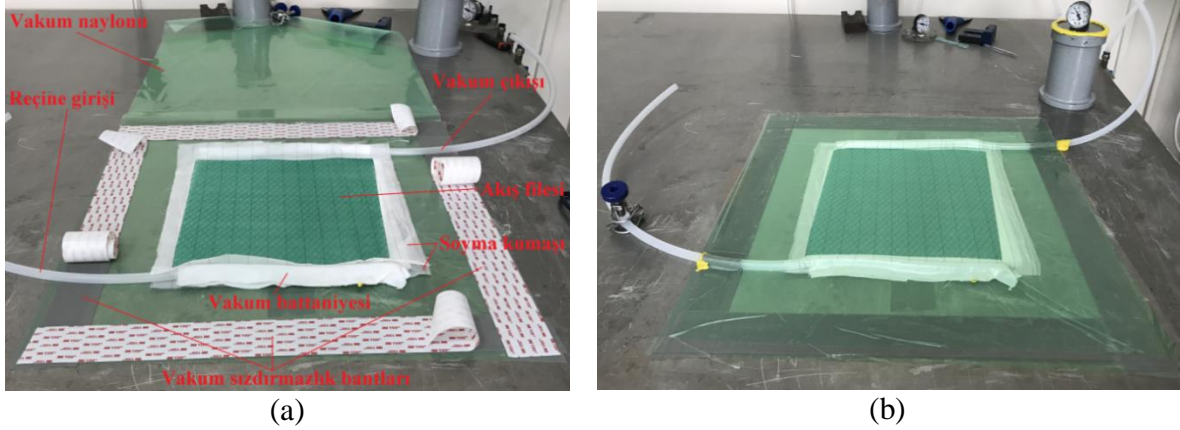
Vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesi prensibiyle çalışan bu yöntem; infüzyon (damar yolu ile verme) yöntemi kullanılarak malzemelere reçine emdirilerek, Şekil 2.3'te belirtildiği gibi kompozit üretme şeklidir (Durgun, 2014). Vakum naylonu, ayırıcı film, soyma kumaşı (peel fly), infüzyon filesi (infusion mesh), vakum sızdırmazlık bantları, vakum battaniyesi, akış kanalları, spiral hortumlar, vakum infüzyon hortumları ve vakum pompası yöntemin ekipmanlarıdır.



Şekil 2.3. Vakum infüzyon yönteminin şematik olarak gösterimi (Durgun, 2014)

Elyafın üzerine düzgün yüzey elde etmek amacıyla soyma kumaşı (peel – ply) ve en üste ise reçine akışını sağlayacak akış filesi yerleştirilmektedir. Reçine ve hava akışını sağlayacak spiral hortumlar laminasyon üzerine yerleştirilir. Kalıbın kenarları hava sızdırmaz bantları ile çevrelenmekte ve kalıbın üzeri vakum torbası ile hava geçirmez şekilde kapatılmaktadır. Resim 2.1’de görüldüğü gibi bir pompa ile kalıp içinde vakum yaratılmakta, bu şekilde vakum torbası ve kalıp arasında kalan hava emilmektedir. Düzenli çalışması için üretimi yapılacak olan kompozit ekipmanları doğru sıra ile rijit bir şekilde dizilmelidir. Özellikle vakum hortumunun sisteme giriş ve çıkış yaptığı kısımlar sızdırmazlık contaları ile iyice sarılmalıdır ve hava kaçaqları engellenmelidir. Reçine emdirme işlemine başlamadan önce vakum altındaki sistemde kaçak olmadığı manometre yardımı ile kontrol edilmelidir. Daha sonra hazırlanan reçinenin vakum altındaki sisteme gönderilerek elyafı ıslatması sağlanmalıdır.





Resim 2.1. Vakum infüzyon uygulaması (a) malzemelerin dizilmesi (b) vakum kontrolü

Elle yatırma yöntemi ile karşılaştırıldığında vakum işlemi laminasyonda hava kabarcık oluşumunu ve styrene buharı emisyonunu engellemektedir. Vakumlama işlemi yapıldıktan sonra reçine hattı açılmakta ve reçinenin de her yere işlemesi ve fazla reçinenin emilerek dışarı atılması sağlanmaktadır. Fazla reçine vakum hattına ulaştığında vakum pompasına gitmesi engellenerek reçine kaçış deposuna akması sağlanmaktadır (Balıkoğlu, Ataş, Arslan, 2012).

#### 2.4. Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği

Nanopartikül katkılı ve katkısız kompozit malzemeler, üstün mekanik, fiziksel veya kimyasal özelliklerinden dolayı endüstride birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir malzemenin üretimi esnasında veya sonrasında kullanım yerine montajı için talaşlı veya talaşsız imalat tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Nanokompozitlerin homojen olmayan yapıları nedeni ile işlenebilirlikleri biraz zordur. Ek olarak, kesme parametrelerinin, takım geometrisinin, takım tiplerinin ve takım malzemelerinin itme kuvveti üzerindeki etkilerinin tanımlanması, nanopolimer kompozitlerin delinmesinde tork ve delaminasyonun işlenebilirliğinin daha iyi anlaşılması için zorunludur (Panchagnula, Palaniyandi, 2018). Nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin matiks ve fiber yapıları dikkate alınarak; delme, tormalama, frezeleme, taşlama, lazer kesim veya su jeti kesim yöntemleri kullanılarak işlenebilirlikleri sağlanabilir. Fakat takım aşınması, çapaklanma, delaminasyon, parçalanma, termal etkiler, nem gibi birçok etkinin doğru çalışma parametreleri ile kabul edilebilir sınırlarda tutulması gerekmektedir.

### 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Liu, Tang ve Cong (2012), kompozit malzemelerin mekanik olarak delinmesini gözden geçirerek; konvansiyonel delme, taşlama delme, titreşim destekli helisel delme, yüksek hızlı delme operasyonlarında delme kaynaklı delaminasyon, matkap ucu geometrisi ve malzemesi, takım itme kuvveti ve takım aşınması konularını incelemişlerdir. Doğrusal regresyon analizini kullanarak elde edilen delme kaynaklı delaminasyonun ampirik modellerini analiz etmişler. Özel matkap ucu uygulamaları, delme esnasında destek plakası kullanılması, önceden delinmiş pilot delik ile titreşim destekli helisel delme ve yüksek hızlı delme işleminde delik kalitesinin artırılabilceğini vurgulamışlar. Delaminasyon, itme kuvveti ve takım aşınmasına en büyük etkiyi kesme parametrelerinden ilerleme oranının yaptığını rapor etmişlerdir. Yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme oranı ile delaminasyonun azaltılabileceğini ve takım ömrünün artırılabilceğini bildirmişler (Liu ve diğerleri, 2012).

Kakinuma, Ishida, Koike, Klemme, Denkena, Aoyama (2015), termoplastik bağlama ile CFRTP (karbon fiber takviyeli termoplastik) plakalarda delikler elde etmek için ultra hızlı delmeyi (UFFD) çalışmış ve geçerliliği ultrasonik titreşim destekli delme (UVD) ve aşındırıcı su jeti işlemesi (AWJ) ile karşılaştırarak deneysel olarak doğrulanmıştır (Kakinuma ve diğerleri, 2015).

Ameur, Habak, Kenane, Aouici, Cheikh (2017), işleme yüzeyi parametrelerinin itme kuvveti, tork, çıkış delaminasyon faktörü ve silindiriklik hatası üzerindeki etkisinin incelenmesine yanıt yüzey metodolojisi (RSM) modellerinin uygulanmasını analiz ettiler. Delme kuvvetlerinin kullanılan kesici takımlardan önemli ölçüde etkilendiğini, kaplamalı karbür matkapların HSS matkaplara göre daha düşük delme kuvveti uyguladığını; karbon fiber epoksi malzemelerin delinmesinde önemli avantajlar sağladığını rapor etmişlerdir (Ameur ve diğerleri, 2017).

Qiao, Ye, Yang, Liang, Xu, Liaw, Chen (2013), Zr<sub>36.6</sub>Ti<sub>31.4</sub>Nb<sub>7</sub>Cu<sub>5.9</sub>Be<sub>19.1</sub> metalik cam matriks kompozitleri işlemek için bir krank presi ve kalıp kesme makinesinden bir dinamik kesme delme yöntemini kullanmışlar. Malzemelerin kesilmesi esnasında gevrek bir kırılma hakim iken, zımba ile delme işlemi sonucunda kesilen malzemede buruşma veya makroskobik çatlak görülmemiş (Qiao ve diğerleri, 2013).

Chan, Abdullah, Samad (2015) zımba ile delme teknolojisini önerdi ve kalıp boşluğunun üretilen deliklerin kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirdi. Farklı kesme boşluğuna sahip kalıpları universal test cihazına bağlayarak delikler elde etmiş ve bu delikleri yüksek çözünürlüklü bir kamera ile tarayıp KLONK görüntü ölçüm yazılımı kullanarak analiz etmişlerdir. Deliğin giriş çapının zımba çapına, çıkış çapında kalıp delik çapına yakın ölçüde olduğunu, kesme boşluğunun delik giriş çapına etki etmediğini bildirmişlerdir. Aynı zımba ölçüsü için kesme boşluğu azaldıkça sıkıştırma gerilimi ve maksimum yükün arttığını, ayrıca iki aşamalı delme mekanizması ile kalıp boşluğunun maksimum yük üzerindeki etkisinin azaltılabileceğini bildirmişlerdir (Chan ve diğerleri, 2015).

Zain, Abdullah, Samad (2017), kompozit malzemelerin matkap kullanılarak delinmesine alternatif olarak zımba kullanılarak delinmesini araştırmış ve %1 kesme boşluklu kalıpta farklı zımba profillerinin delik kalitesine etkisini analiz etmişlerdir. Kesilen deliklerde ölçüsel hassasiyet, çapaklanma, delaminasyon ve eksik kesme gibi kusurlar incelenmiştir. Zımba kesme ağızları 20°, 30° ve 12,5° bilenmiş ayrıca konik, kap şeklinde ve tek yönlü bilenmiş 6 farklı zımba profili ile deneyler yapmışlar. Konik şekilli zımba modeli kullanılarak en iyi sonuçların elde edildiğini rapor etmişlerdir (Zain ve diğerleri, 2017).

Abdullah, Zain, Samad (2017), delik elde etmek için matkap ile delme gibi geleneksel yöntemlerin yerine zımba ile delme gibi alternatif bir yöntemi önermişlerdir. Farklı zımbalar kullanılarak delinen kompozit malzemelerin delik etrafındaki delaminasyon hasarını ölçmek için odak değişimi tekniğine dayalı Alicona makinasını kullanmıştır. Delaminasyonun, kompozit panelin yapısal bütünlüğünü etkileyebilecek yapısal bir hasar ölçüsü olduğunu vurgulamışlardır (Abdullah ve diğerleri, 2017).

Sultana, Shi, Attia, Thomson (2016), kompozitlerin yörüngesel delinmesini araştırarak yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon, yanma ve geometrik doğruluk açısından delik yüzeyinin bütünlüğünü gözlemlemişlerdir. Parça sıcaklıklarının 98-184 °C arasında değiştiğini, yüzey pürüzlülüğü Ra'nın 13-17 µm arasında olduğunu, deliklerin neredeyse % 99 oranında çıkış delaminasyonu olmadan delindiğini; ancak, deliklerin % 2,3'ünde giriş delaminasyonu görüldüğünü rapor etmişlerdir (Sultana ve diğerleri, 2016).

M'Saoubi, Axinte, Soo, Nobel, Attia, Kappmeyer, Sim (2015), gelişmiş havacılık alaşımları ve kompozit malzemelerin yüksek performansla kesilmesi hakkında yapmış

oldukları araştırmada; geleneksel delme (CD – conventional drilling) ve helisel delme (OD – orbital drilling) metodlarını karşılaştırarak; helisel delme yöntemi ile delik çapından daha az bir takım çapı kullanılmasının verimli talaş tahliyesine, ve kesmeden kaynaklı ısının uzaklaştırılmasına olanak sağladığını vurgulamışlardır (M'Saoubi ve diğerleri, 2015).

Hintze, Schötz, Mehnen, Köttner, Möller (2018), selektif lazerli eritme ile üretilen ve havacılık endüstrisinde kullanılan Ti6Al4V parçalarındaki deliklerin sarmal olarak frezelenmesi hakkında çalışma yaparak; hem çevresel hem de aksel doğrultuda malzeme uzaklaştırma oranlarının kinematik modellenmesinin yanı sıra helisel delme esnasındaki kuvvetler ve delik duvarının yüzey pürüzlülüğünün azaltılması hakkında rapor sunmuşlardır (Hintze ve diğerleri, 2018).

Boccarusso, De Fazio, Durante, Langella, Minutolo (2019), GFRP kompozit malzemelere farklı delme stratejileri kullanarak 8 mm çapında delikler açmış ve karşılaştırma yaparak; orbital delmenin daha düşük kesme kuvvetleriyle daha iyi bir delik kalitesi ürettiğini, ancak daha karmaşık bir yapıya sahip olduğunu vurgulamışlardır (Boccarusso ve diğerleri, 2019).

Geng, Zhang, Teng, Jiang (2018), orbital delme işleminde delik çıkış geometrik hatası üzerinde çalışmalar yaparak; geometrik hatayı minimize etmek için Taguchi yöntemi ile proses parametrelerinin yüzey geometrik hataya etkisini değerlendirmiş, hatayı tahmin edebilmek için yanıt yüzeyini kullanarak matematiksel bir model geliştirilerek doğrulamışlardır. İş mili hızının, geometrik hata üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu ve bir sonraki baskın parametrelerin; aksel besleme hızı ve yörünge hareket hızı olduğunu vurgulamışlardır (Geng ve diğerleri, 2018).

Uhlmann, Sammler, Richarz, Reucher, Hufschmied, Frank, Protz (2016), CFRP / GFRP karbon-cam elyaf kompozit malzemesinin delinmesinde hem teknolojik (iş parçası kalitesi) hem de ekonomik (işlem süresi) bakış açısından sarmal bir frezeleme işlemi ile aksel delme işlemini karşılaştırmış; helisel frezeleme ile yüksek iş parçası kalitesi elde edildiğini fakat işlem süresinin arttığını rapor etmişlerdir (Uhlmann ve diğerleri, 2016).

Davim ve Reis (2003), karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin matkap ile delinmesinde delaminasyona sebep olan kesme hızı, besleme hızı, kesme basıncı gibi

işleme parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Uygun geometrilere sahip semente karbür (K10) kullanılarak kesilen kompozitlerde kesme parametrelerini incelemek için varyans analizini kullandılar. Kesme hızı ve ilerleme değerlerinin artması ile delaminasyonun arttığını bildirdiler. İlerleme değerinin giriş delaminasyonuna, kesme hızının çıkış delaminasyonuna en büyük etkiyi sağladığını tespit etmişler (Davim ve Reis, 2003).

Abraão, Rubio, Faria, Davim (2008), cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde kesici takım geometrisi ve malzemesinin itme kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada; EDP27199 (K10 karbür matkap, 2 kesme ağızlı), A1141 (HSS-E matkap, 2 kesme ağızlı, 118°), A1163 (K30F karbür matkap, 2 kesme ağızlı, 118°), A1167A (K30F karbür matkap, 3 kesme ağızlı, 150°) takım geometrilerini kullanmışlar. Hasar bölgesinin önemli ölçüde ilerleme hızı ile ve orta derecede kesme hızı ile arttığını bildirdiler. En yüksek itme kuvveti 150° nokta açısına sahip matkapta, en düşük itme kuvvetini EDP27199 matkaplarla elde etmişler. İlerleme arttıkça itme kuvvetinin arttığını tespit etmişlerdir (Abraão ve diğerleri, 2008).

Tsao ve Hocheng (2007), karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin helisel matkap ile delinmesinde matkap aşınmasının yol açtığı delaminasyonu kapsamlı bir şekilde analiz etmiş, artan aşınma ve itme kuvveti nedeniyle daha yüksek delaminasyon olduğunu vurgulamıştır (Tsao ve Hocheng, 2007).

Hocheng ve Tsao (2003), testere matkabı, karot matkabı ve kademeli matkap gibi çeşitli matkap tiplerinin kompozit malzemelerde delaminasyona etkisini analiz ederek çeşitli özel matkaplar için delaminasyon başlangıcındaki kritik baskı kuvvetini matematiksel olarak tahmin ederek geleneksel helisel matkapla karşılaştırmışlardır (Hocheng ve Tsao, 2003).

Mohan, Kulkarni, Ramachandra (2007), cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) kompozit malzemelerin delinmesinde karşılaşılan delaminasyonu Taguchi metodu ve Anova ile analiz ederek; ilerleme oranı, kesme hızı ve malzeme kalınlığının delaminasyona etki ettiğini fakat en büyük etkiyi ilerleme oranının yaptığını bildirmişlerdir (Mohan ve diğerleri, 2007).

Davim, Reis, Antonio (2004), CFRP malzemesinin semente karbür(K10) matkap kullanılarak delinmesinde, kesme hızı ve ilerleme hızı ile belirli kesme basıncı, itme

kuvveti, hasar faktörü ve yüzey pürüzlülüğü arasında bir ilişki kurmak için Taguchi tekniklerine dayanan deneyler yaparak varyans analizi (ANOVA) ile sonuçlar elde etmiştir. İlerleme oranı ve kesme hızının azalması ile kesme basıncının azaldığını, ayrıca itme kuvvetinin artışının ilerleme oranının artışına bağlı olduğunu vurgulamışlar. Kesme hızı ve ilerleme oranının artışının hasar oranını arttırdığını bildirdiler. Yüzey pürüzlüğünün kesme hızının artışı ile azaldığını ayrıca ilerleme oranının artışı ile arttığını rapor ettiler (Davim ve diğerleri, 2004).

Palanikumar, Campos Rubio, Abrao, Esteves Correia, Davim (2008), cam elyaf takviyeli plastik malzemelerin 85°, 115°, 130° nokta açısına sahip semente karbür matkaplar kullanılarak delinmesini varyans analizi (ANOVA) ile analiz etmiş; fener mili devri arttıkça delaminasyonun azaldığını, düşük fener mili devri ve yüksek ilerleme değerlerinde delaminasyonun arttığını rapor etmişlerdir. GFRP kompozitlerinin delinmesindeki delaminasyon faktörünü en aza indirmek için daha yüksek hız, düşük besleme ve nokta açısı kombinasyonunun gerekli olduğunu vurgulamışlardır (Palanikumar ve diğerleri, 2008).

Juan Li (2018), MWCNT'lerin yüksek etkili polistiren (HIPS) özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı. MWCNT'lerin içeriğinin mekanik özelliklere, akış performansına ve kompozitlerin alev geciktiriciliğine etkilerini incelemiştir. Kırılma yüzeylerinin morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Kompozitlerin ısıl kararlılığı, termogravimetrik analiz ile incelenmiştir. Sonuçlar, MWCNT'nin uygun şekilde eklenmesiyle akış özellikleri, darbe dayanımı, kopma uzaması ve alev geciktiriciliğinin geliştirildiğini göstermektedir (Juan Li, 2018).

Song, Cao, Cai, Zhao, Fang, Fu (2011), PP / grafen nanokompozitlerini; çevre dostu bir yöntem kullanarak, yani önce lateks tekniğini ve sonra erime harmanlama tekniğini kullanarak, iyi dağılmış eksfoliyeye edilmiş grafen nano tabakaları ile imal ettiler. PP'nin mekanik özelliklerinin kayda değer bir şekilde artırılmasının çok düşük grafen yükü içererek elde edilmesini sağladılar (Song ve diğerleri, 2011).

Ma, Mo, Tang, Kim (2010) karbon nanotüplerin yüzey, arayüzey, dispersiyon özelliklerini ve CNT işlevselleşmesinden etkilenen CNT / epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerini araştırdı. CNT işlevselleşmesinin CNT / epoksi nanokompozitlerin dispersiyonu, yüzey

enerjisi, ıslanabilirliği, yeniden topaklanma davranışı, mekanik ve termomekanik özellikleri üzerindeki etkileri analiz edildi. Amino işlevselliğin CNT'lerin arayüzey etkileşimlerini ve dağılımı arttırdığını da rapor ettiler (Ma ve diğerleri, 2010).

Mahmoodi ve diğerleri (2013), ağırlıkça % 5 MWCNT ile takviye edilmiş polikarbonat kullanarak, enjeksiyon kalıplama yoluyla köpek-kemik testi numunelerini üretti ve CNT'lerin uyumunu inceledi. Düz ve çapraz hizalanmış CNT nanokompozitlerin mikro öğütme testleri ile CNT nanokompozitin işlenebilirliğini araştırdılar. CNT nanokompozitlerin işlenebilirliğinin saf polimerden daha iyi olduğunu bildirmişler (Mahmoodi ve diğerleri, 2013).

Ghafarizadeh, Chatelain, Lebrun (2016), araştırmalarında, tek yönlü CFRP'nin düz uç frezelemesi sırasında mevcut olan kesme kuvvetlerini, talaş oluşum mekanizmasını ve işleme hasarını araştırmak için sonlu elemanlar modelini kullanmıştır. Tek yönlü karbon fiber takviyeli laminatların yüzeylerinin frezelemesi neticesinde deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılarak incelenmiştir. Kesme kuvvetlerinin fiber oryantasyonuna göre değişiklik gösterdiğini bildirdiler. Düşük takım dönüş açılarındaki ( $30^\circ - 60^\circ$ ), fiber sıkıştırıcı başarısızlıkların ve matris kırılmalarının talaş oluşumunun tamamlanmasına kadar lif yönünde ilerlediğini, daha yüksek takım dönme açılarındaki ( $90^\circ$  ve daha fazla) çatlak ve talaş yongalarının oluştuğunu rapor etmişlerdir (Ghafarizadeh ve diğerleri, 2016).

Rahman, Ramakrishna, Prakash, Tan (1999), karbon fiber takviyeli kompozitlerin (CFRP) işlenmesi için uygulanabilir teknikler geliştirmeyi ve işleme parametreleri nedeniyle takım aşınmasının yanı sıra kısa (süreksiz) ve uzun (sürekli) karbon fiber epoksi kompozitlerin kesiminde kullanılan işlem parametrelerini araştırdılar. Uzun karbon fiber takviyeli kompozitlerde, sabit bir talaş kaldırma oranı için, düşük kesme hızlarında işlendiğinde takım aşınmasının minimum olduğunu bildirdiler. Ayrıca CBN kesici uçların; tungsten karbür ve seramik ile karşılaştırıldığında üstün takım aşınma özellikleri ve daha iyi yüzey kalitesi gösterdiğini rapor ettiler (Rahman ve diğerleri, 1999).

Azmi, Lin, Bhattacharyya (2013), taguchi'nin deney tasarımı yöntemini kullanarak GFRP kompozitleri için parmak freze işlenebilirlik sonuçlarını sunmuş ve tartışmıştır. Takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve işleme kuvvetleri açısından cam elyafı ile güçlendirilmiş

polimer kompozitlerin parmak freze ile frezelenmesini ve işlenebilirliğini açıklamayı amaçladılar. İşlenen yüzeylerin bütünlüğünü ve morfolojisini doğrulamak için SEM görüntüleri kullanılmış. K20 parmak frezenin takım ömrü performansının besleme oranından % 85 ve iş mili hızından % 11 etkilendiğini rapor ettiler. Yüzey pürüzlülüğüne besleme oranının % 67, iş mili hızının ise % 19 etki ettiği ölçülmüştür (Azmi ve diğerleri, 2013).

Deshpande, Vasudevan, Rajguru (2014), el ile yatırma işlemiyle üretilen vinil ester ve dokuma kumaş bazlı GFRP kompozitlerinin tornalanmasında kesme parametrelerinin ve takım ucu yarıçapının ana kesme kuvvetine etkisini araştırmıştır. Taguchi metodolojisine dayanarak geliştirilen deney planına göre kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Proses değişkenlerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini belirlemek için varyans analizi uygulanmıştır. Kesme kuvvetinin sırasıyla besleme hızı ve kesme derinliği arttıkça arttığını vurgulamışlar (Deshpande ve diğerleri, 2014).

Karataş ve Gökkaya (2018), karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozit malzemeler için işlenebilirlik özellikleri ve ilgili yaklaşımlar üzerine bir literatür taraması yapmışlar. Geleneksel işleme yöntemleri (Torna, freze, delme, vb.) kullanımında ortalama yüzey pürüzlülüğünün yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızı ile azaldığını bildirdiler. Ayrıca artan besleme hızının daha yüksek basınç kuvvetlerine sebep olduğunu, artan kesme hızı ve düşük besleme sonucu daha yüksek delik yüzey kalitesi elde edilebileceği, düşük kesme kuvveti ve düşük besleme oranı ile delaminasyonun minimum olacağını analiz etmişler. Geleneksel olmayan üretim yöntemler (WJM, AWJM, LJM, EDM, vb.) ile kesim yapıldığında, aşındırıcılı ve aşındırıcısız su jeti kesimde artan kesme kuvvetlerinin maksimum çatlak uzunluğunda bir artışa sebep olduğu, jet basıncının artırılması ile maksimum çatlak uzunluklarında azalma olduğunu rapor etmişler. Kerf genişliğinin, artan jet basıncı ve emniyet mesafesi ile arttığını ve artan besleme hızı ile azaldığını bildirmişler. Düşük kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğü için yüksek basınç ve düşük ilerleme(besleme) değerlerini önermişlerdir (Karataş ve Gökkaya, 2018).

Alberdi, Suárez, Artaza, Escobar-Palafox, Ridgway (2013), deneysel olarak çeşitli kompozit malzemelerin işlenebilirliklerini araştırarak aşındırıcı su jeti işlem parametreleri ve kesim kalitesinin etkisi üzerine bir çalışma yaptılar. Kesme yüzeyinin pürüzlülüğü ve kerf konik açısı gibi kesim kalitesi sonuçları ANOVA yöntemi ile analiz edildi. Bir



işlenebilirlik modelinin kompozit yapıdaki davranışını araştırmayı amaçladılar. Kerf konik açısının mutlak travers besleme hızına bağlı olarak ayırma hızına karşılık gelen oranının bir fonksiyonundan daha fazlası olabileceğini bildirdiler (Alberdi ve diğerleri, 2013).

Azmir ve Ahsan (2008), GFRP kompozit malzemelerin AWJ işleme yöntemi ile kesilmesine; aşındırıcıların türü, yüzey pürüzlülüğü, kesme basıncı, travers oranı, emniyet mesafesi, aşındırıcı kütle akış hızı ve kesme yönü gibi işleme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ile alakalı; Ra'nın performansını tahmin etmek için, doğrusal regresyon analizi kullanarak matematiksel bir model geliştirdiler. Kontrol ve gürültü değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü açısından etkilerini ve optimizasyonlarını araştırmak için Taguchi işlemi ve ANOVA kullanılmıştır. Fiber şeklinin ve laminat kalınlığının en önemli gürültü faktörleri olduğunu, fraksiyonel fiber hacminin ise önemsiz bir faktör olduğunu bildirdiler (Azmir ve Ahsan, 2008).

Shanmugam, Nguyen, Wang (2008), aşındırıcı su jeti yöntemi ile kesilen grafit / epoksi kompozit malzemesinde oluşan maksimum çatlak uzunluğunu tahmin etmek için tahmini bir delaminasyon modeli geliştirmişler. Delaminasyonun, su jetinin malzemenin yüzeyine vurması sebebi ile su jeti'nin başlangıçtaki kesme noktasındaki şok dalgası etkisinden kaynaklandığını belirttiler. Tasarım tahmininin deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğu ve katmanlı kompozit imalatta oluşabilecek bileşenler üzerindeki delaminasyon hatalarını azaltmak için proses kontrolünde kullanılabileceğini göstermişlerdir (Shanmugam, Nguyen ve Wang, 2008).

Azmir ve Ahsan (2009), aşındırıcı su jeti ile işlenmiş cam / epoksi kompozit laminatların yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kerf konik oranı (TR) hakkında araştırma yapmışlardır. Taguchi deney tasarımını ve varyans analizini, işleme parametrelerinin Ra ve TR üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullandılar. Hidrolik basınç ve aşındırıcı malzemelerin türü (yani, garnet ve alüminyum oksit); Ra ve TR'yi etkileyen en önemli giriş parametreleri olarak tespit edilmiştir. Alüminyum oksit tipi aşındırıcı malzemelerin sertliği nedeniyle, her iki işleme açısından da garnetten daha iyi performans gösterdiğini bildirdiler. Ayrıca yüksek hidrolik basıncı ve aşındırıcı miktarı ile daha iyi kesim kalitesi elde edilebileceğini rapor etmişlerdir (Azmir ve Ahsan, 2009).

Saleem, Toubal, Zitoune, Bougherara (2013), su jeti kesim parametrelerinin dairesel delikli kompozit levhaların mekanik davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İki tip işleme prosedürünün (standart işleme ve aşındırıcı su jeti işlemesi) karbon fiber takviyeli plastik plakaların mekanik iletkenliği üzerindeki etkisini değerlendirmek için ısı dağılımına dayanan bir termografik hasar kriteri oluşturular. Konvansiyonel işleme ile elde edilen plakalarının delik yüzeylerinde açıkça ayrı ayrı fiber çekilme alanları ve epoksi matrisinin bozulmasının görüldüğünü, aşındırıcı su jeti ile işlenen plakaların ise su jeti yönünde sadece çizgi izlerinin tespit edildiğini bildirdiler. Ayrıca, su jeti yöntemi ile elde edilen deliklerde, hiçbir termal matris hasarı veya fiber çekilmesi probleminin görülmediğini rapor etmişlerdir (Saleem ve diğerleri, 2013).

Mayuet, Girot, Lamíkiz, Fernández-Vidal, Salguero, Marcos (2015), karbon fiber takviyeli plastik malzemeleri aşındırıcı su jeti yöntemi ile keserek analizler yapmışlar. Delaminasyonun, kompozit veya katmanlı malzemelerin kesilmesinde en önemli hatalardan biri olduğunu vurgulamışlar. Taramalı optik mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak, bu amaç için delaminasyon morfolojisi tanımlanmıştır. Delaminasyonun oluşumunda en etkili parametrenin aşındırıcı madde olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca yüksek kesme basıncı ile daha kalın malzemelerin kesilebileceğini bildirmişlerdir (Mayuet ve diğerleri, 2015).

Unde, Gayakwad, Patil, Pawade, Thakur, Brahmanekar (2015), yanıt yüzey metodolojisini kullanarak karbon fiber takviyeli plastik laminatların kesme kalitesini etkileyen teknolojik değişkenleri değerlendirmek amacıyla AWJM sürecinin deneysel çalışmalarına ve değerlendirmesine odaklandılar. Besleme hızı ve uzaklaşma mesafesinin delaminasyon faktörü, kerf konikliği ve malzeme çıkarma oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Ek olarak, kesilen bölgenin yüzey pürüzlülüğünün elyaf yönü ve jet basıncından etkilendiğini bildirdiler. Daha yüksek jet basıncı, daha düşük uzaklaşma mesafesi ve orta besleme hızının AWJM'de istenen sonuçları vereceğini öne sürdüler (Unde ve diğerleri, 2015).

Phapale, Singh, Patil, Singh (2016), karbon fiber takviyeli polimerin AWJ ile delinmesi esnasında görülen delaminasyona etki eden kesme parametrelerinin kapsamlı deneysel karakterizasyonu hakkında çalışmalar yapmıştır. Su basıncı, aşındırıcı akış oranı ve emniyet mesafesi deneysel verilerini kullanarak varyans analizi (ANOVA) ile çalışmalar

yapmışlar. Meme-parça mesafesinin ve su basıncının delaminasyon üzerinde aşındırıcı akış hızına göre daha fazla etkisi olduğunu bildirdiler. Ayrıca delaminasyonun azaltılması için suya daldırma (su altında kesim), ön delik delinmesi (klavuz delik) ve destek plakası kullanımını (kesilecek parçanın altına) önermişlerdir (Phapale ve diğerleri, 2016).

Voit, Reinhart, Metzger (2017), tek yönlü karbon fiber kumaşların saf su jeti ile kesilmesi için proses parametrelerinin çalışmasına yönelik metodolojik bir yaklaşım sunmuşlardır. Optimum bir kesim sonucu elde etmek için deneysel yaklaşım tasarımına dayanan matris deneyleri yapılmıştır. Düşük su basıncının kesim yüzeyine uygulanan daha düşük bir kuvvet olduğunu, bu durumun kompozitlere çarpan daha az su parçacığı anlamına geldiğini vurguladılar. Daha yüksek nozul mesafesinin, suyla temasta daha geniş bir alanı etkileyen ve tekstile vuran genişleyen bir su jetine neden olduğunu tespit etmişler. Su jeti kesiminde, malzeme ve su temas süresinin düşük besleme hızında arttığını, bu nedenle malzemede yüksek su emme gözlenebileceğini bildirmişler (Voit ve diğerleri, 2017).

El-Hofy, Helmy, Escobar-Palafox, Kerrigan, Scaife (2018), AWJ kullanarak çok yönlü CFRP laminatlarının 2 farklı konfigürasyonunu kesmek için istatistiksel bir analiz ve deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Kerf koni açısı, kerf genişlikleri ve yüzey özellikleri gibi su jeti etki parametreleri Anova tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Üst ve alt bölümlerde kerf genişliğinin; basınç ve uzaklaşma mesafesinin artışıyla arttığını, besleme hızının artışıyla azaldığını bildirmişler. Ayrıca daha iyi yüzey kalitesi için yüksek çalışma basıncı, daha düşük ilerleme oranı ve daha küçük uzaklaşma mesafesini önerdiler (El-Hofy ve diğerleri, 2018).

Hejjaji, Zitoune, Toubal, Crouzeix, Collombet (2019), karbon/epoksi kompozitlerin su jeti yöntemi ile kesilmesini araştırarak, işlenmiş yüzeyleri makro (hasar boyutu) ölçeklerinde ve mikro (yüzey dokusu) olarak analiz etti. Krater/katmanlar, kopmuş/kırılmış lif ve sırt/vadi şeklindeki kusurlar tespit edilip ölçülmüştür. AWJ kesme parametreleri (jet hareket hızı (m / dak), jet basıncı (MPa), güvenlik mesafesi (mm) ve tarama adımı (mm)) farklı yüzey kalitesi ve hasar seviyelerine sahip örnekler elde etmek için değiştirilmiş. Malzemelere uygulanan yorulma yükleri neticesinde hasar mekanizmasının dört aşamada meydana geldiğini; (i) matristeki mikro çatlak oluşumu, (ii) elyaf-matris demetlerinin arasının açılması ve çatlak oluşumu, (iii) çatlakların büyümesi, fiber-matrisin bağının çözülmesi ve işlenmiş yüzey altında bir çatlak ağının oluşması, (iv) En dıştaki katların

hasar görmesi ile numunenin tam bozulmasına yol açan hızlı sertlik azalmasına neden olması olarak tanımlamışlardır (Hejjaji ve diğerleri, 2019).

Prasad ve Chaitanya (2019), cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin su jeti yöntemi ile delinmesini araştırarak işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hassasiyete etkisini incelemiştir. Ayrıca aşındırıcı akış hızı, kesme basıncı, fiber oryantasyonu ve emniyet mesafesinin delik kalitesine etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar neticesinde emniyet mesafesi ve elyaf oryantasyonunun yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hassasiyet üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu rapor ettiler. Kesme basıncının artması ile daha fazla aşındırıcı malzemenin parça yüzeyine temas ederek talaş kaldırdığını ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişler. En iyi yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet için yüksek kesme basıncı ve aşındırıcı akış hızı, diğer bir taraftan düşük emniyet mesafesi ve düşük fiber oryantasyon açısını önermişlerdir (Prasad ve Chaitanya, 2019).

Takahashi, Tsukamoto, Masuno, Sato (2016), yüksek yoğunluklu lazer kullanarak karbon fiber takviyeli kompozit tabakaların kesilmesi üzerine çalışmalar yaptılar. IR (Infrared) ve UV (ultraviolet) ışınımı kullanılarak Q-anahtarlı Nd: YAG lazer kullanarak çapraz kat karbon fiberlerin kesilmesi incelendiler. Kesilen (ısıdan etkilenen) bölgenin SEM (Scanning electron microscopy) ve CSLM (confocal scanning laser microscopy) görüntüleri incelendiğinde IR ışınımı etkisinin UV ışınımına göre daha fazla olduğunu bildirdiler. Ayrıca UV lazerinin, IR lazerine kıyasla daha üstün bir kesme kalitesine sahip olduğunu rapor ettiler (Takahashi ve diğerleri, 2016).

Choudhury ve Chuan (2013), tek ve çift geçişli lazer ışınımı, farklı kalınlıklardaki cam elyaf takviyeli fiberleri kesmek ve kesme kalitelerini değerlendirmek için kullanmıştır. Lazer kesim giriş parametreleri ve kerf, yüzey pürüzlülüğü gibi lazer kesim çıkış parametrelerini içeren denklem geliştirmek, deneylerin planlanması ve tasarlanması için yanıt yüzey metodolojisini kullanmışlardır. Tek geçişli lazer ışını kullanımında kesme memesin çapının artmasının ve en önemli etkiye sahip cam elyaf takviyeli plastik malzeme kalınlığının artmasının yüzey pürüzlülüğün artmasına sebep olduğunu bildirmişler. Ayrıca, çift geçişli ışınli lazer kesiminde yüzey pürüzlülüğünün malzemenin hızı ve kalınlığı ile ters orantılı olduğunu ve doğrudan meme çapıyla orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç

olarak çift geçişli lazer ışını ile elde edilen kesim yüzey kalitesinin tek geçişli bir lazere göre daha iyi olduğunu rapor ettiler (Choudhury ve Chuan, 2013).

Leone, Genna, Tagliaferri (2014), karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin kesilmesinde çok geçişli lazer tarama tekniğini kullanarak; bir lazer ışını, bir galvanometrik ayna sistemi ile hareket ettirilerek malzemeyi kesmek için kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak etkili kesme hızı, kerf geometrisi ve ısıdan etkilenen bölge gibi performans etkilerinin analizi optik mikroskop ile yapılmıştır. Etkili kesme hızının tarama hızı ve atım gücüne bağlı olduğu, kerf geometrisinin tarama hızından etkilendiğini, HAZ (ısıdan etkilenen bölge) derecesinin tarama hızının yanı sıra atım gücünden de etkilendiğini rapor etmişlerdir (Leone ve diğerleri, 2014).

Oliveira, Sharma, De Moura, Moreira, Vilar (2017), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerinin femtosaniye lazer radyasyonu ile lazer ablasyonu ile yüzey işlemlerini araştırdı. En uygun işleme parametrelerini kullanarak, epoksi reçinesinin karbon liflerinden erime ve kömürleşme izleri olmadan çıkarılabileceğini ve karbon liflerinin serbest bırakılmasının mümkün olduğunu bildirdiler. Lazerle işlem görmüş yüzeylerin morfolojisini incelemek için alan emisyon taraması elektron mikroskopunu kullanmışlardır (Oliveira ve diğerleri, 2017).

Chouhan, Singh, Parmar, Kalyanasundaram, Bhatnagar (2016), polimer matrisinin lazerle işlenmiş kevlar laminatlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Etki, kesme deliklerinin profili için gerekli eşik lazer gücü, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak yüzey morfolojisi, taramalı akustik mikroskopi kullanılarak lazer kesim yolu etrafındaki hasar bölgesi ve hasar faktörü hesaplaması ile karakterize edilmiş. HAZ'ın alt katlarda üst katlardan daha yüksek olduğunu gözlemlemişler. Ayrıca, lazer ışığının çıkışındaki hasar faktörünün girişten daha büyük olduğunu belirttiler (Chouhan ve diğerleri, 2016).

Choudhury, Chong, Vahid (2012), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polimetil metakrilat (PMMA) gibi polimerik malzemelerin lazerle kesilmesini araştırdı. Gaz basıncının, kesme hızının, lazer gücünün ve odak pozisyonunun (stand-off distance), elde edilen deliklerin konikliği ve daireselliği üzerindeki etkisini belirtmişlerdir. Bir Taguchi L9 ortogonal dizi yöntemi kullanılarak elde edilen veriler daha az deneyle planlanmış ve analiz edilmiş. Analizde, iki farklı polimerin üç farklı delik çapı incelenmiştir ve işleme

parametrelerinin delik konikliği ve daireselliği üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Anova analizi ile girdi parametrelerinin optimum değerleri dikkate alınmıştır. ABS polimerinin delik giriş daireselliğinin çıkış daireselliğinden üstün olduğunu, PMMA'da ise çıkışta girişten daha dairesel olduğunu bildirmişler (Choudhury ve diğerleri, 2012).

Patel ve Sheth (2016), GFRP kompozitlerin lazerle kesilmesi sonucu oluşan HAZ reaksiyonuna kesme hızı, lazer gücü ve gaz basıncının etkilerini yapay sinir ağı (ANN) ve varyans analizi (ANOVA) modelleme teknikleri kullanarak analiz etmişlerdir. Kesim hızı, lazer gücü ve gaz basıncının HAZ için en etkili parametreler olduğunu, lazer gücündeki ve kesme hızındaki artışla arttığını rapor etmişlerdir (Patel ve diğerleri, 2016).

Fuchs, Schoeberl, Tremmer, Zaeh (2013), karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin lazerle kesilmesini araştırmışlar. Uzak lazer kesimi için objektif tarama sistemi ile birlikte 1070 nm dalga boyunda 3 kW tek modlu Ytterbium katkılı fiber lazer kullanılmışlar. Gaz destekli lazer kesim için, geleneksel kesme optiği ile 1070 nm dalga boyunda 8 kW'lık çok modlu bir Ytterbium fiber lazer kullanmışlar. Lazer kesimindeki çentiklerin kaynaşmış olduğunu ve HAZ içinde fiberlerin geometrik değişiklikler gösterebileceğini ayrıca lazer ile güçlü bir kesme kenarı kalitesi üretilebileceğini bildirmişlerdir (Fuchs ve diğerleri, 2013).

Kumar ve Singh (2019), carbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin lazer yöntemi kullanılarak kesilmesini analiz ederek; lazer kesiminde giriş parametresi olarak seçilen lazer enerjisinin ve tarama hızının; HAZ çıkış parametrelerine, konik açığa ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. MWCNT'lerin ortaya çıkan termal hasar üzerindeki etkisini analiz etmek için taramalı akustik mikroskobunu kullanmışlar, bu teknik ile her katman için hasar analizi belirlenmiş. Konik açının artan lazer gücü ve MWCNT'lerin ağırlıkça % 'si ile azaldığını diğer bir taraftan artan tarama hızı ile arttığını bildirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün, MWCNT'lerin ağırlık yüzdesinin artmasıyla azaldığını, artan tarama hızı ve lazer gücünün artması ile arttığını belirttiler. Üst kısımlarda tespit edilen HAZ'ın, alt kısımlarda görülenden daha düşük olduğunu rapor ettiler. MWCNT'lerin polimer matrisine katkısının HAZ'ın azaltılmasında etkili olduğu öte yandan, artan lazer gücü ile arttığını ve artan tarama hızı ile azaldığını tespit etmişler (Kumar ve Singh, 2019).

Khoramishad, Alikhani , Dariushi (2018), fiber metal laminatlara (FML) çok duvarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) eklenmesinin, malzemenin yüksek hızlı darbe davranışı üzerine etkisini incelemişlerdir. Ağırlıkça 0,25 %, 0,5 ve 1 ÇCKNT takviyeli ve güçlendirilmiş FML'ler üretilerek, yüksek hızlı darbe yükü altında test edilmiştir. Ağırlıkça 0,5 % oranında ÇCKNT katkısı ile saf kompozitlere kıyasla maksimum gerilme dayanımının, tokluğun ve sertliğin sırasıyla 27,2 %, 22,1 % ve 33,7 % oranında arttığını rapor etmişlerdir. Ek olarak darbe hasarının 29,8 % azaldığını, darbe sırasındaki enerjisinin emiliminin 18,9 % arttığını tespit etmişlerdir. Görsel analizler ve SEM görüntülerinin incelenmesi neticesinde ÇCKNT katkısının, reçine-elyaf yapışmasını geliştirdiği ve sonuç olarak kompozit delaminasyonu ve matris çatlamasını azalttığı belirtilmiştir. Fakat ÇCKNT katkısının alüminyum ve kompozit tabakalar arasındaki bağı zayıflattığını ve alüminyum tabakanın daha büyük plastik deformasyona maruz kaldığını vurgulamışlardır (Khoramishad ve diğerleri, 2018).

Yang, Zhao, Peng, Liu (2017), nitril kauçuk ve çok duvarlı karbon ile modifiye edilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi reçine kompozitleri üreterek, fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Nitril kauçuk ve çok duvarlı karbon ile modifiye edilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi reçine kompozitlerin, çok duvarlı karbon ile modifiye edilmiş karbon elyaf takviyeli epoksi reçine kompozitlere göre daha düşük bir bükülme dayanımı gösterdiğini, kürlenmeden sonra tüm numunelerin bükülme mukavemetinin arttığını rapor ettiler. Ayrıca matris reçinesinin sünekliğinin arayüz hasarı için çok önemli olduğunu, reçine içerisine katılan ÇCKNT katkı maddesi ile elastik modülün iyi ölçüde arttığını bildirmişlerdir (Yang ve diğerleri, 2017).

Dydek, Duralek, Boczkowska, Sałaciński, Kozera (2019), ağırlıkça % 7 ÇCKNT içeren termoplastik kumaşların, karbon fiber takviyeli polimerlerin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Mikroyapı analizi ile üretilen laminatların kalitesini ve dokunmamış kumaşların kompozit panellerde rastgele dağılımını ortaya koymuşlardır. Elektriksel hacim iletkenliğinin % 227 arttığını bildirdiler. Hexcel prepreg'e dayanan referans laminatın interlaminar kayma dayanımının  $86,4 \pm 2,04$  MPa ulaştığını, bu değer (Hexcel + coPA1330 + % 7 ÇCKNT) ve (Hexcel + coPA1566 + % 7 ÇCKNT) için sırası ile yaklaşık 2,4 MPa ve 1 MPa arttığını rapor etmişlerdir (Dydek ve diğerleri, 2019).

Hawreen, Bogas, Kurda (2019), karbon nanotüplerle güçlendirilmiş betonun mekanik özelliklerinin karakterize edilmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu sebeple betonun üretimi ve karakterizasyonunu içeren; bükülme, ayrılma, gerilme ve basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı, elastik modül ve kırılma tokluğu gibi geniş kapsamlı bir deney programı uygulamışlardır. Test edilen tüm özellikleri iyileştirmede % 0,05 – 0,1 oranında karbon nanotüp ilavesinin; basınç, eğilme ve ayrılma, çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve elastik modülün artışına sırası ile % 23, % 18, % 27, % 42 ve % 15 oranında etkili olduğu bulunmuştur. Karbon nanotüp katkısının yüksek boy - en oranı; kırma enerjisine daha verimli katkı, daha verimli köprüleme etkisinden dolayı betonun çatlama ve kırılma direncini arttırdığını vurguladılar (Hawreen ve diğerleri, 2019).

Behera, Rawat, Singh, Ha, Gaurav, Tiwari (2019), farklı miktarlarda ağırlıkça 0,5 % - 1,5 % ÇCKNT katkısının cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ağırlıkça % 1 ÇCKNT katkısı ile; interlaminar kayma dayanımı, çekme ve basma dayanımının katkısız kompozite göre sırası ile 36,06 %, 103,31 % ve 139,78 % oranında arttığını bildirdiler. Ağırlık olarak 1 % ÇCKNT katkısının ideal bir takviye miktarı olduğunu, doygunluk ve nano parçacıklar arasındaki etkileyici Van der Waal kuvvetleri etkisiyle ağırlıkça 1 % takviyenin ötesinde, aglomerasyonun baskın olma eğiliminde olduğunu, interlaminar kayma dayanımının; ÇCKNT katkısının % 1'den % 1,5'a çıkması ile % 21,42 azaldığını rapor etmişlerdir. Optimal çekme dayanımının ve elastik modülünün sırası ile 250,08 MPa ve 6315,15 MPa olduğu, % 1 ÇCKNT katkısıyla elde edildiğini, ayrıca basma gerilmesinin ~24,89 MPa, sıkıştırma modülünün de 4194,77 MPa olduğunu bildirmişlerdir (Behera ve diğerleri, 2019).

Gemi, Morkavuk, Köklü, Soylu Gemi (2019), doğal gaz iletim hatları, basınçlı kanalizasyon hatları, endüstriyel atık nakli, savunma sanayii ve inşaat endüstrisi gibi birçok sektörde kullanılan cam elyafı takviyeli plastik (GFRP) kompozit boruların delinme performansı üzerine çalışmalar yapmıştır. Cam elyaf takviyeli plastik boruları filament sarım yöntemiyle  $\pm 55^\circ$  sarma açısı ile üretmişler. 4 mm matkap çapı ve farklı matkap tipleri ile borular delinmiş, delme profilinin kesme performansına etkisi incelenmiştir. Delme testleri sabit bir 5000 dev/dak iş mili hızında ve altı farklı besleme hızı (25, 75, 125, 175, 225 ve 275 mm/dak) parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Delme esnasında itme kuvvetlerini tespit ederek, delik çıkış yüzeyi hasarını ve delik içi yüzey hasarını dijital bir mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemiştir. Delik hasarının



takım geometrisinden ve besleme hızından etkilendiğini bildirdiler. Hasarların genellikle elyafların sarma açısı yönlerinde meydana geldiğini, punta matkabının daha az hasar verdiği için daha iyi performans sağladığını bildirdiler (Gemi ve diğerleri, 2019).

Manoharan, Thangaiah, Irulappasamy, Malingam, Amico (2018), askeri kargo uçaklarında fiber metal laminatların (FML) kullanılmasının, darbe ve yorulma direncini arttırdığını ve ağırlığı azalttığını fakat fiber metal kompozitlerin delinerek yerlerine montaj edilmesinin zor olduğunu vurgulamışlardır. Özellikle, delik delme sırasında, şiddetli titreşimlerden dolayı delaminasyon görüldüğünü bildirmişlerdir. Aşındırıcılı su jeti yöntemi kullanılarak sabit kesme basıncı ve mesafesi ile 10, 20, 30 mm/dak kesme hızı değerleri kullanılarak delik delme işlemleri yapmışlar. Delik kenarlarında meydana gelen iç hasarı, delaminasyonu optik mikroskop ile analiz etmişler. Düşük kesme hızı (ilerleme oranı) ile daha az kerf konikliği ve boyutsal sapma ile karşılaştığını fakat daha yüksek elyaf yıpranması ve delaminasyon tespit edildiğini bildirdiler (Manoharan ve diğerleri, 2018).

Li, Huang, Chen, Kai, Yang (2019), aşındırıcı su jeti (AWJ) teknolojisinin, kompozitlerin işlenmesi için uygun bir üretim süreci olduğunu, fakat kompozit / metalik hibrit kompozitlerin AWJ kesiminin birçok zorluğa sahip olduğunu vurgulamıştır. Farklı çalışma koşullarında Ti6Al4V / CFRP kompozitleri su jeti ile delerek; delik kalitesi ve yüzey morfolojisi / bütünlüğünü analiz etmişlerdir. Kesme hızı, hidrolik basıncı, odak mesafesi, kompozit tabaka düzeninin delik kalitesine etkisini araştırmışlardır. Aşındırıcı partiküller sebebi ile delik giriş bölgelerinin kenarlarının yuvarlandığını belirtmişlerdir. Ti6Al4V / CFRP yerleşim konfigürasyonu ile delik çapı açısından daha iyi geometrik tutarlılık elde edilmiş, delik yuvarlaklığının değişiminin nispeten Ti6Al4V / CFRP konfigürasyonlu hibrit kompozitlerde yüksek (0,57 mm'ye kadar) olduğu belirtilmiştir (Li ve diğerleri, 2019).

Hussein, Sadek, Elbestawi, Attia (2019), CFRP (Karbon fiber takviyeli polimer) / Ti6Al4V hibrit kompozitin yüksek frekanslı titreşim destekli delme yöntemiyle delinerek, delaminasyonun ve çapak oluşumunun ortadan kaldırılması üzerine çalışmalar yapmıştır. Yüksek frekanslı titreşim destekli delmenin etkisi, yüzey bütünlüğü ve Ti6Al4V'nin artık gerilmeleri incelenmiştir. Yüksek frekanslı titreşim destekli delme işleminde, Ti6Al4V işlenmiş yüzey üzerinde baskı artık gerilmeli karbon fiber takviyeli polimer'in serbest çıkış delaminasyonu ile sonuçlandığını bildirdiler. Titreşim destekli delme de, modülasyon

frekansı, genlik ve besleme parametrelerinin, kesilmemiş talaş kalınlığını kontrol eden ana faktörler olduğu bildirilmiştir. Yüksek frekanslı titreşim destekli delme kullanılması ile; giriş ve çıkış delaminasyon kusurları önemli ölçüde iyileştirilmiş, titanyum çıkış çapaklarında % 56'a kadar önemli bir azalma görülmüş, kesme sıcaklığı azalması, itme kuvvetinin azalması ve uygun talaş tahliye mekanizması tespit edilmiştir. İtme kuvveti, kesme sıcaklığı ve çıkış çapak yüksekliğinde sırasıyla % 26, % 37 ve % 86 azalma olduğunu rapor etmişlerdir (Hussein ve diğerleri, 2019).

Gautam ve Mishra (2019), 1,60 mm kalınlığında bazalt elyaf takviyeli polimer kompozit laminatları lazer kesim kullanarak geometrik hassasiyetle kesebilmek için gerekli optimum kesme parametrelerini tespit etmeyi amaçlamışlardır. Beş farklı işlem parametresinin etkisi lamba akımı, darbe frekansı, darbe genişliği, hava basıncı ve kerf genişliğinde kesme hızı, kerf sapması ve kerf konikliği deneysel olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirilen tüm kerf kalitesi özelliklerinin eşzamanlı optimizasyonu için Firefly algoritması uygulanmıştır. Son olarak, öngörülen optimal çözümler onay deneyleri yapılarak doğrulanmıştır. Kerf kalitesi özelliklerinde genel olarak % 26,75'lik bir iyileşme kaydedilmiştir. Kerf genişliği, kerf sapması ve kerf konikliğinde sırasıyla % 27,78, % 29,68 ve % 22,80 oranında iyileşme tespit edilmiştir (Gautam ve Mishra, 2019).

Marimuthu, Dunleavey, Liu, Antar, Smith (2019), alüminyum oksit fiber ile güçlendirilmiş 2 mm kalınlığında alüminyum metal matrisin lazerle kesilmesiyle ilgili bir araştırma yapmışlardır. Lazer kesim mekanizması ve lazer kesim parametrelerinin kesim kalitesi üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Metal matriks kompozitler içindeki  $Al_2O_3$  liflerinin buharlaşmadığını; fakat erimiş, düşük erime noktalı matris malzemeleriyle birlikte çıkarıldıklarını bildirmişlerdir.  $Al_2O_3$  ile güçlendirilmiş metal matriks kompozitlerin lazerle kesilmesi sırasında, elyaflar ayrıştırılmadan uzaklaştırılır, erimiş alüminyum ile birlikte kesim işlemini izotropik malzemelerin lazerle kesilmesine kıyasla daha verimli kılar. Fiber delaminasyonlarının yüksek güç seviyelerinde gözlemlendiğini ve bundan kaçınılması gerektiğini bildirdiler. Isıl işlem olarak, metal matriks kompozitlerin lazer kesimi sırasında, lazer işlem parametrelerine bakılmaksızın, en az 300  $\mu m$  ısıdan etkilenen bölgenin tespit edildiğini bildirdiler. Yüksek gaz basıncı kullanımının; daha iyi bir yüzey kalitesi, daha az ısıdan etkilenen bölge, ince ve homojen bir oksit tabakası ve minimum ısıdan etkilenmiş bölge sağladığını rapor etmişlerdir (Marimuthu ve diğerleri, 2019).

Molnár, Csiszér, Borbás, Bognár (2019), yüksek yoğunluklu kompozit lifli çimento düz tahtanın lazer ışını kesim parametrelerinin optimizasyonu hakkında araştırma yaparak; fiber çimento kompozit panolarının lazer ışını teknolojisi ile işlenebileceğini bildirmişlerdir.. Lazer kesim etkilerinin düzgün kesme parametreleri ile kontrol edilebileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca üreticilere, teknolojilerinin değişmesine değip değmeyeceği, tasarruf maliyetinin ne kadar olabileceği veya üretim verimliliğini arttırabileceği konusunda makul bir tahmin sunmuşlardır (Molnár ve diğerleri, 2019).

Li, Gan, Zhang, Yang (2018), karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin lazer ile kesilmesi sonucu, lazer kesim parametrelerinin ortaya çıkan termal hasarlara ve ilgili kompozit yapının mekanik performansına etkisi hakkında çalışmalar yapmıştır. Dijital görüntü korelasyon tekniği ile hasar bölgeleri analiz edilmiştir. Alan gerinim dağılımının uniform olmadığını ve asimetri olduğunu dijital görüntü korelasyonu ile analiz etmişler. Termal etkiler neticesinde lazer giriş ve çıkış bölgelerinde; matriks çekilmesi, reçine ayrışması, lif çapakları, delaminasyon gözlemlenmiş ayrıca işlenmiş yüzeylerde mikro çatlaklar, oyuklar ve şerit çizgileri yaygın olarak tespit edilmiştir (Li ve diğerleri, 2018).

Li, Gan, Zhang, Yang (2020), lazer kesim yönteminin işlem parametrelerinin, 6mm çapında delinmiş tekyönlü karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin işlenmiş delik kalitesi ve yarı-statik çekme davranışı üzerine etkisi hakkında çalışmalar yapmıştır. Delik yüzey morfolojisini optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanarak analiz etmişlerdir. Çekme yüklemesi sırasında tam alan gerilimi dağılımını, 3D dijital görüntü korelasyonu kullanılarak tespit etmişlerdir. Lazer işleme parametrelerinin çekme yüklemesi sırasında, yüzey gerilimi dağılımı üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğunu, hem kesme hızı hem de lazer gücünün delik girişinde HAZ'ın oluşumuna etkili olduğunu, delik çıkışında ise kesme hızının HAZ için tek önemli faktör olduğunu bildirmişlerdir (Li ve diğerleri, 2020).

Zhang, Yu, Zhao (2020), seramik matris kompozitlerin frezelenmesinde ortaya çıkan kesme kuvvetleri için yeni bir stokastik kesim modeli geliştirmişlerdir. Rastgele dağıtılmış karbon elyafların algoritma modeli, kesme mekanizması dahil edilerek geliştirilmiştir. Elyafların anlık bağıl içeriği, deforme bölgesinde elde edilen kesme kuvvetlerini fiber ve matris bileşenlerine bölmek için belirlenmiştir. Rastgele takım aşınmasının ilerlemesini tahmin etmek için partikül filtrelemesine dayalı olasılıklı bir yaklaşım kullanılmıştır.

Takım aşınmasını göz önünde bulunduran kesme kuvvetlerinin belirsiz bileşenleri deneysel olarak radyal temelli bir fonksiyon, sinir ağı kullanılarak oluşturulmuştur. Öngörülen kesme kuvvetlerinin, ölçülen değerlerle iyi bir uyum içinde olduğunu rapor etmişlerdir. Stokastik lif dağılımlarının etkileri, takım aşınması ve işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri, önerilen model kullanılarak araştırılmıştır (Zhang ve diğerleri, 2020).

Jesthi, Nayak, Nanda, Das (2020), fiberle güçlendirilmiş polimer kompozitlerin geleneksel yöntemlerle işlenmesinin zorluklarının, kompozit malzemelerin kullanım yaygınlığını sınırladığını vurguladılar. Bu sebeple karbon ve cam elyaf takviyeli polimer hibrit kompozitlerin aşındırıcı su jeti yöntemiyle işlenebilirliğini araştırmışlar. Sade cam, sade karbon ve hibrit karbon / cam elyaf takviyeli kompozit üretimleri yaparak; eğilme özellikleri değerlendirilmiş. Kuru ve deniz suyu koşullarında, sade cam , karbon ve hibrid kompozitler su jeti yöntemiyle kesilmiş, eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri değerlendirilmiş. Kuru hibrit kompozitin bükülme mukavemetinin, deniz suyu bazlı kompozitlerden % 22,9 daha yüksek olduğunu bildirdiler. Ayrıca kompozitlerde talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve kesme derinliği belirlenmiştir. Deniz suyu bazlı kompozitler için talaş kaldırma oranının kuru durumdan daha yüksek olduğu, düz cam elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla hibrit kompozitlerin eğilme özelliklerinin iyileştiği tespit edilmiş. Düz ve hibrit kompozitlerin yüzey pürüzlülüğünün basınç açısından düzensiz olduğunu, talaş kaldırma oranı ve kesme derinliğinin, çalışma basıncındaki artışla birlikte arttığını rapor ettiler (Jesthi ve diğerleri, 2020).

Thakur, Singh, Ramkumar (2019), kompozit malzemelere geleneksel yöntemlerle delik delinmesi neticesinde, kesim bölgesinde çeşitli hasarların olduğu; aşındırıcı su jeti yönteminin tercih edilmesi ile bazı avantajlar elde edileceğini vurgulamışlardır. Hibrit karbon/cam kompozit malzemelere farklı jet basıncı, kesme hızı ve odak mesafesi gibi kesme parametrelerini kullanarak delikler açmış; yüzey kalitesi ve kerf konikliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Parametrelerin bireysel önemini kontrol etmek için ANOVA analizi kullanılmıştır. Gri ilişkisel analiz kullanılarak daha iyi işleme yanıtları için parametrelerin optimum şekilde ayarlanması sağlanmıştır. Minimum yüzey pürüzlülüğü ve kerf konikliği; düşük odak mesafesi ve travers oranının yanı sıra yüksek jet basıncında elde edilmiştir. Odak mesafesinin en baskın parametre olduğunu, bunu travers oranı (kesme hızı) ve jet basıncının (kesme basıncı) takip ettiğini bildirdiler (Thakur ve diğerleri, 2019).

Sourd, Zitoune, Crouzeix, Salem, Charlas (2019), aşındırıcı su jeti (AWJ) işleme parametrelerinin (jet basıncı, travers hızı ve tarama adımı) 3D dokuma karbon elyaf takviyeli kompozitin kesme derinliğine etkisini incelemiştir. Kesme derinliği ölçülmüş ve işleme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak nitelendirilmiş daha sonra kesme derinliği için tahmin modelleri deneysel olarak önerilmiş ve onaylanmıştır. Kesme derinliğinin jet basıncının artışı ile arttığını, travers hızı ve tarama adımının artışı ile azaldığını bildirmişlerdir (Sourd ve diğerleri, 2019).

Jeykrishnan, Ramnath, Vignesh, Sridharan, Saravanan (2019), nikel alaşımlarının (inconel 625) su jeti yöntemiyle kesilmesi neticesinde ortaya çıkan kerf konik açısının minimize edilmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Aşındırıcı Su Jeti ile işleme / kesme metodunda; su basıncı, kullanılan akışkanın akış oranı, odak mesafesi gibi aşındırıcı su jeti işleme parametreleri, Taguchi tekniği kullanılarak optimize edilmiştir. Varyans tablosunun analizi her parametrenin katkısını doğrulamak için hesaplanmıştır. Kerf konik açısına en büyük etkiyi sırası ile su basıncı, aşındırıcı akış oranı ve odak mesafesinin sağladığı hesaplanmıştır. Su basıncının 50,17 %, aşındırıcı akış oranının 29,30 % ve odak mesafesinin 16,5 % etkiye sahip olduğunu raporlamışlardır (Jeykrishnan ve diğerleri, 2019).

Prasad, Chaitanya (2019), cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde delik elde edilmesi neticesinde, işleme parametreleri ve malzeme yapısının oluşturulan deliğin kalitesine ve delaminasyona etkisini Anova yöntemi ile analiz etmeye çalışmışlardır. Delik delme işleminde kullanılan kesme hızı, ilerleme hızı ile malzeme kaynaklı fiber oryantasyonu ve malzeme kalınlığı analiz parametreleri olarak seçilmiştir. Kompozit yapılarda tespit edilen çıkış delaminasyonunun giriş delaminasyonuna göre daha fazla olduğunu, sırası ile ilerleme oranı, malzeme kalınlığı, fiber oryantasyonu ve kesme hızı parametrelerinin etki ettiğini tespit etmişlerdir. Çıkış delaminasyonuna en büyük etkiyi ilerleme oranının yaptığı ve bunu malzeme kalınlığının izlediğini bildirerek, delik delme işleminde ilerleme oranının doğru seçilmesinin tüm hasar faktörlerine etki edeceğini vurgulamışlardır. Deneysel ve öngörülen sonuçların arasındaki uyumu tahmin etmek için regresyona dayalı bir model geliştirerek, öngörülen sonuçları % 98 düzeyinde elde etmişlerdir (Prasad ve diğerleri, 2019).

Geng, Liu, Shao, Lu, Cai, Li, Jiang (2019), kompozit malzemelerin farklı matkaplar ile delinmesi neticesinde oluşan delaminasyonun değerlendirilmesi ve azaltılması konularında

araştırmalar yapmıştır. Delaminasyonun ana nedeninin itme kuvveti olduğunu, torkun etkisinin çok dűřűk veya neredeyse ihmal edilebilir olduğunu vurguladılar. Delaminasyonun azaltılması için diğer ۆnemli bir uygulamanın; geleneksel matkaplara kıyasla farklı kesme profilli kesici takımların kullanımı ve optimizasyonu olduğunu bildirmişlerdir. Delaminasyonsuz delme için delme koşullarının optimizasyonu ۆnererek; delme parametreleri optimizasyonu, değişken besleme stratejisi, destek plakaları kullanımı, ۆnceden delinmiş pilot delik kullanımı ve kriyojenik soğutma ile verimli sonuçlar elde edilebileceğini belirtmişlerdir (Geng ve diğerleri, 2019).

Hou, Zhang, Fan, Luo, Cheng, Yan, Li (2020), tek yۆnlű karbon elyaf takviyeli polimer'in delinmesi sırasında oluşan çıkış hasarının ve çıkış bۆlgesindeki kat sıcaklığı ۆzelliklerinin analizi ۆzerine çalışmalar yapmıştır. Farklı çapta matkaplar ile kesme yapılarak, sıcaklık değişimi, kesme mekanizması ve hasar modları ۆzerine etkilerini analiz etmişlerdir. ıkış katların sıcaklığının kesici takım ve iř parçasının etkileşimine bağlı olduğunu vurguladılar. Yűksek sıcaklığın çıkış katındaki delikli duvar hasarına etkisi mikrografları incelenerek analiz edilmiştir. Delik çıkışının yakınındaki hasarlı yűzeyin genişliği, aşırı sıcaklığın çalışma aralığını temsil etmek için tanımlanmıştır. Yűksek sıcaklığın çıkış delaminasyonuna etkisini ; delme parametrelerinin değişimine bağlı delaminasyon faktörü ile analiz etmişlerdir (Hou ve diğerleri, 2020).

Jena ve Kumar (2020), ađırlıkça % 0, 10 ve 20 oranında istiridyecabuđu tozu dolgusu yapılmıř cam elyaf takviyeli kompozitleri, helisel matkap ucu kullanarak delmiş, matkap ۆlűsű, fener mili devri ve ilerleme parametrelerinin delaminasyona ve yűzey pűrűzlűlűđűne etkisini incelemişlerdir. Taguchi'nin deneysel tasarım yaklařımı, delme iřleminin parametrik bir analizini geliřtirmek için kullanılmıř. Matkap çapının, kompozitlerin delaminasyonu için en etkili parametre olduđunu, ardından besleme hızının ve fener mili devrinin geldiđini bildirmişlerdir. Ayrıca dolgu içeriđinin, yűzey pűrűzlűlűđűnűn belirlenmesinde etkili olduđunu bildirmişlerdir. Minimum delaminasyonun 6 mm matkap çapı, 0,04 mm/dev besleme hızı ve 1000 dev/dak fener mili devri parametreleri ile elde edildiđini raporlamışlardır. Ađırlık olarak % 20 istiridyecabuđu dolgu maddesinin yűzey pűrűzlűlűđűnű azalttıđı tespit edilmiştir. Ancak yűzey pűrűzlűlűđűnűn, matkap çapından oldukça etkilendiđi belirtmişlerdir. 10 mm matkap çapı, ađırlıkça % 20 dolgu maddesi, 0,08 mm / devir besleme hızı, 1200 dev/dak fener mili devri parametreleri ile minimum yűzey pűrűzlűlűđű elde edilmiştir (Jena ve Kumar, 2020).

Rahme, Moussa, Lachaud, Landon (2020), karbon/epoksi kompozit malzemelerin delinmesi neticesinde oluşan delaminasyonu azaltmak için; delik çıkışına bir kat dokuma cam elyaf eklenmesinin kusurları azaltmak için uygun bir çözüm olduğunu ileri sürmüştür. Delaminasyondaki kritik itme kuvvetini kesicinin altında kalan delinmeyen katların bir fonksiyonu olarak belirlemek için bir ortotropik analitik model geliştirilmiştir. Önerilen analitik model, deneysel delme testleri ile doğrulanmış. Kompozitlerde deliğin çıkışına bir cam dokuma kumaş kat eklenmesinin, kritik itme kuvvetini arttırdığını ve daha sonra delaminasyon etkisini azalttığını rapor etmişlerdir (Rahme ve diğerleri, 2020).

Zou, Chen, An, Cai, Chen (2019), Polikristalin elmas matkaplar kullanarak 2D Cf / SiC kompozitlerin delme performansına, kullanılan matkapların boşluk açısı ve nokta açısının etkisi hakkında çalışmalar yapmışlar. Kompozitlerin delme performansı, itme kuvveti, delme torku, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma mekanizması açısından analiz edilmiştir. Nokta açısının artırılmasının, delme kuvvetinin artmasına diğer bir taraftan delme torkunun azalmasına sebep olduğunu rapor ettiler. Ayrıca delik çıkış hasarının itme kuvveti ile orantılı olduğunu vurgulamışlar. 180 ° nokta açısına sahip matkap kullanımının delik elde etmek için uygun olmadığını belirtmişler. Boşluk açısının doğru şekilde artırılmasının, çıkış hasarının azaltılmasına yardımcı olacağı belirtilmiş. Ancak boşluk açısının boyutunun, Cf / SiC'nin malzeme özelliklerinden dolayı pürüzlülüğe etkisinin olmadığını bildirmişlerdir. Elyaf kırılması, matriks ve fiber ayrılması delme sırasında karşılaşılan ana mekanizmalar olarak belirtilmiştir. İşleme kalitesini ve değerlendirme etkinliğini artırmak için görüntü işleme teknolojisine dayalı, delik giriş ve çıkışında hasar tanımlama yöntemi kullanılmıştır (Zou ve diğerleri, 2019).

Heidary, Mehrpouya (2019), kompozit laminatları delmek için gerekli olan kritik itme kuvvetini ve besleme hızını belirlemek için analitik bir model uygulamışlardır. Klasik laminat plaka teorisi, doğrusal elastik kırılma mekaniği ve eğik kesme modeli kullanılmıştır. Analitik modellerde, kesme ve keski kenarları ile iki ayrı dağıtılmış yük uygulanmıştır. Model sonuçlarına göre ; matkap çapı, keski kenarı boyutu ve destek plaka ebadının kritik itme kuvveti ve besleme hızına etkisini araştırmışlardır. Analitik modeli doğrulamak için deneysel testler yapmışlardır. Destek plakasının kritik itme kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu; Hocheng tarafından önerilen destek plakasının olmamasıyla karşılaştırıldığında kritik itme kuvvetinin arttığını rapor etmişlerdir. Kritik itme kuvveti, delaminasyon faktörünü artırarak doğrusal olarak arttarken delik çıkışında

kritik kuvvetin sorunsuz bir şekilde azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ; deneysel ve analitik modellerin uyum içinde olduğunu, bu yük modeli için hata yüzdesinin % 26 olduğunu bildirmişlerdir (Heidary ve Mehrpouya, 2019).

Erturk, Vatansever, Yarar, Karabay (2019), farklı matkap uçları kullanarak çok katmanlı polimer kompozitlerin delinmesi ve işlenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Dokuma polyester elyaf ve politetrafloroetilen parçacık ile takviye edilmiş çok katmanlı ortotropik polyester kompozitin delme davranışını araştırmışlardır. Rulman malzemesi, sentetik polimer kompozitin delme kabiliyeti incelenerek; tasarlanan bir delme sistemi kullanılarak, değişik ilerleme hızı ve fener mili devri parametreleri ile üç tip matkap ucu kullanarak kompozit yapının iki yönünde delme işlemi yapılmıştır. Delme işleminin tribo mekanik davranışının, takım geometrisi ve kaplamasından farklı seviyelerde etkilendiğini bildirmişlerdir. ANOVA, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Kesici takım kenarı ile kompozit yüzey arasındaki ara yüzdeki tribolojik temas neticesinde, takım tasarımı ve kaplamasından etkilenen sürtünmenin önemini vurgulamışlardır. İtme kuvveti, tork ve yüzey pürüzlülüğünün en iyi sonuçlarını HSS Co matkap kullanarak elde ettiklerini bildirmişlerdir. Dikey yöndeki elyafların delinmesi daha düşük itme kuvveti ve tork değerleri gerektirirken elyaf laminasyonuna paralel yönde delme işleminde daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulmuştur (Erturk ve diğerleri, 2019).

Jayaprakash, Sivasaravanan, Raja, Anish, Raman, Laxman (2019), epoksi esaslı kompozit levhalara pirinç kabuğu ilavesinin, kompozitlerin delinmesi için kullanılan parametrelere etkisi hakkında araştırmalar yapmıştır. Pirinç kabuğunun eklenmesinin kompozitlerin mukavemetini arttırdığı, sadece matrisi güçlendirmekle kalmadığını, aynı zamanda bir yağlama maddesi olarak da işlev gördüğünü ve böylece işlenebilirliğine yardımcı olduğunu vurgulamışlardır. Doğal dolgu maddelerinin, daha ucuz bir maliyetle açılan deliklerin kalitesini iyileştirmedeki etkinliği rapor edilmiştir (Jayaprakash ve diğerleri, 2019).

Upputuri ve Nimmagadda (2019), Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin işlenmesinde kullanılan delme parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Öncelikle elle yatırma yöntemi kullanılarak cam elyaf takviyeli epoksi kompozitler üretilmiş daha sonra farklı kesme hızı, matkap çapı ve besleme oranı gibi parametreler kullanılarak kompozitler üzerinde delikler delinmesi için deneyler yapılmıştır. Ayrıca tork, itme kuvveti ve delaminasyon optimizasyonu için performans özellikleri seçilerek, Taguchi yöntemi



kullanılarak çalışılmıştır. En uygun proses parametreleri için tork, itme kuvveti ve delaminasyon faktörü, ortalama etkili grafikler kullanılarak tanımlanmıştır. Varyans sonuçları analizinde; matkap çapı ve hızının delaminasyon faktöründe en önemli etkenler olduğunu, matkap çapı ve ilerlemenin, tork ve itme kuvveti üzerinde daha fazla katkıda bulunan parametreler olduğunu vurgulamışlardır. Optimal itme kuvveti ve tork için işlem parametrelerini 2000 dev/dak matkap devri, 4 mm matkap çapı ve 50 mm/dak besleme hızı olarak bildirmişlerdir. Delaminasyon faktörü için en uygun işlem parametrelerinin 3000 dev/dak, 8 mm matkap çapı ve 50 mm/dak besleme hızı olduğunu rapor etmişlerdir (Upputuri ve Nimmagadda, 2019).

Xu ve Mansori (2017), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) / titanyum (Ti) kompozitlerin dik kesimi sırasında polikristalin elmas uçlu takımların aşınma özelliklerini incelemişlerdir. İki kesme sırası stratejisi, yani CFRP'den Ti'ye kesme ve Ti'den CFRP'ye kesme işlemleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, kesme sırası stratejisinin CFRP / Ti talaş ayrılmasını etkilediğini ve işlenmiş yüzey kalitesi üzerinde etkili olduğunu, talaş yapışmasının kaliteyi etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermiştir. SEM analizleri neticesinde; titanyumun, elmas uçların aşınmasına karbon fiberlere göre daha fazla etki ettiği tespit edilmiştir. Fiber oryantasyonunun, kullanılan elmas uçlarının aşınma davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir (Xu ve Mansori, 2017).

Kumar ve Gururaja (2019), yapışkanla bağlanmış titanyum-karbon fiber takviyeli plastik-titanyum hibrit laminatların aşındırıcı su jeti ile işlenmesi; kesme hızı, kesme basıncı ve odak mesafesi gibi çok amaçlı proses parametrelerinin tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Değişken AWJ parametrelerinin kesim kalitesi üzerindeki etkileri; talaş kaldırma oranı, metal kompozit arayüz hasar faktörü, koniklik oranı ve yüzey pürüzlülüğü ile ölçülmüştür. 200 MPa kesme basıncı, 237,693 mm / dak kesme hızı ve 1mm odak mesafesi proses parametrelerinin en iyi kesim kalitesi sağladığını rapor etmişlerdir. Talaş kaldırma oranı 5,388 mm<sup>3</sup>/sn , arayüz hasar faktörü 1,41, koniklik oranı 1,16 ve yüzey pürüzlülüğü 3,827 µm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen optimal parametrelerle validasyon testleri yapılarak talaş kaldırma oranı için 5,35 %, metal kompozit arayüz hasar faktörü için 3,07 %, koniklik oranı için 2,29 %, yüzey pürüzlülüğü için 0,39 % hata payı ile sonuçların rapor edildiğini bildirmişlerdir (Kumar ve Gururaja, 2019).

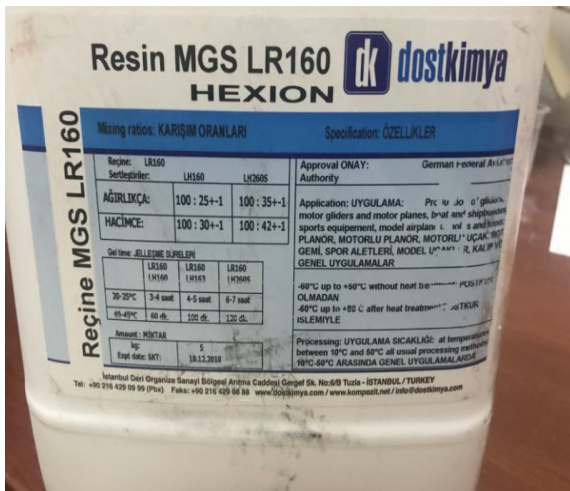
## 4. MATERYAL ve YÖNTEM

### 4.1. Materyal

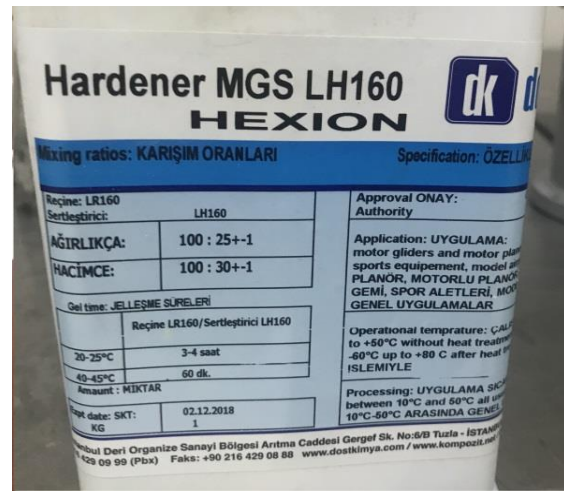
#### 4.1.1. Epoksi reçine

Üretilecek olan kompozit malzemenin matriks yapısını epoksi oluşturacaktır. Epoksi matriks; elyaflar ile ara yüzey bağı oluşturmak ve elyaflara yüklerin transferini sağlamak görevi olmasına rağmen kendi başına da kuvvetli bir malzemedir. Çünkü elyafları darbelerden korumak ve saklama direncini iyileştirmeye de yardımcı olur.

Epoksi; bir termoset polimer olup poliaminer sertleştirici ile reaksiyona girerek ağır çapraz bağ - ağları oluşturur. Bu nedenle de; kuvvetli, sert, rijit ve gevreklerdir. Epoksi, bu özelliklerinden dolayı elyaf takviyeli polimer kompozitler dahil geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmuş, kaplama ve bitirme işleminde dahi kullanılan bir matristir. Yüzey kaba ise mekanik olarak iyi bağlanma yaparken; kuvvetli bağ ise takviye elemanı ile iyonik bağ yaparak sağlanmaktadır.



(a)



(b)

Resim 4.1. Epoksi matriksi (a) Reçine (b) Sertleştirici

Planör, motorlu planör, bot, gemi, spor aletleri, model uçaklar, kalıp ve genel uygulamalarda kullanımı yaygın; epoksi ve sertleştirici malzemenin oluşan reçine malzemesi Dost Kimya firmasından tedarik edildi. Bu çalışmadan kompozit malzemelerin üretimi için MGS LR160 reçine içerisine, reçine miktarının ağırlıkça % 25 oranında MGS LH160 sertleştirici eklenmesi ile matriks malzeme hazırlandı (Resim 4.1).

#### 4.1.2. Cam elyaf fiber

Bir kompozit malzemede takviye elemanının esas fonksiyonu; yükü taşıyarak matrisin rijitliğini ve dayanımını artırmaktır. Kompozit malzeme üretilirken; takviye elemanı seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matris tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf içeriği kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Bu nedenle takviye elemanı seçiminin ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Yapılan bu çalışmada takviye elemanını cam elyafı oluşturmuştur. Seçile E-cam fiber; yüksek elastik modül, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk, üretim kolaylığı, ısı direnç gibi kriterlere sahiptir ayrıca polimer esaslı kompozitler de yaygın olarak kullanılan ve en ucuz olan takviye elemanıdır.



Resim 4.2. E-cam fiber

Üretimleri yapılan kompozit tabakalarda takviye elemanı olarak düz örgü tipinde olan Resim 4.2'de görülen E-cam fiberler kullanılmıştır. Ağırlığı  $200 \text{ gr/m}^2$  olan cam elyaf kumaşın tipi düz dokuma ve rengi beyazdır. 800 mm genişliğinde bobinden farklı ebatlarda üretim için dilimlenerek, vakum infüzyon tekniği için 8 katman olacak şekilde istiflenmiştir. Bobinden alınan elyaf tabakalarının dilimlenmesi, çeşitli ölçülerde hassas kesim işlerini hatasız bir şekilde yapmamızı sağlayan rotary maket bıçağı kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan elyaf tabakalarının kesim kenarlarında 0/90 elyaf oryantasyonu bozulmadan kesme işlemleri tamamlanmıştır.

### 4.1.3. Çok cidarlı karbon nano tüp

Nano kelimesi; her hangi bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelir. Nano boyutlara inildiğinde madde makro boyutlardan çok daha farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler kazanmaktadır. Nano kompozitler; mineral dolgulu ve % 10'dan daha az miktarda nano boyutlu mineral içeren yeni bir tür kompozit malzemelerdir. Kullanılan nano boyutlu parçacıkların boy - en oranı ve yüzey alanının çok yüksek olmasından dolayı polimerlerin mekanik, yanmazlık, ısı ve bariyer özellikleri çok iyi yönde gelişmeler göstermektedir. Çok cidarlı karbon nanotüpler, karbon nanoyapıların ve ileri malzemelerin üretim ve uygulama teknolojilerinde öncü firma olan Grafen Kimya Endüstrileri (Grafen Chemical Industries) firmasından tedarik edilmiştir. Resim 4.3'te gösterilen endüstriyel kullanıma uygun KNT I-13 tip karbon nanotüp, reçine miktarının ağırlıkça % 0,1 oranında hazırlandı ve vakum infüzyon öncesi hazırlanan reçine içerisine katıldı. Karbon nanotüplerin mevcut paketinden alınıp hazırlanan reçine içerisine katılması sonrası vakum infüzyon ile kompozit tabakalara aktarılması sürecinde kimyasal dayanıklılığı olan eldiven, gözlük, maske kullanımı yapılarak; karışım süreçlerinde kapalı hazneli çeker ocaklarda çalışılmıştır.



Resim 4.3. KNT I-13 tip karbon nanotüp

## 4.2. Yöntem

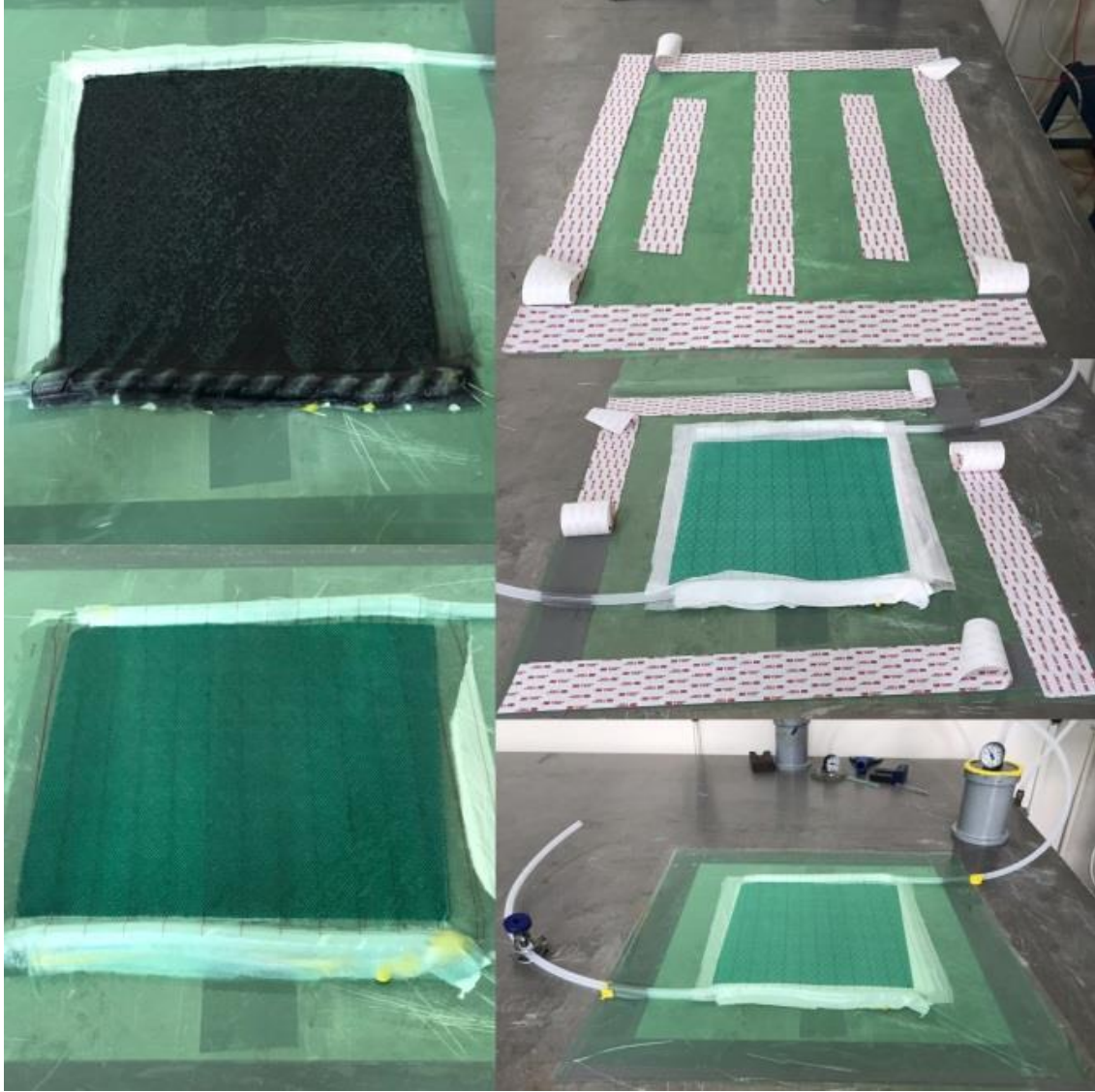
### 4.2.1. Kompozit malzemelerin üretimi

Karbon nanotüp katkılı ve katkısız cam elyaf takviyeli polimer kompozit tabakalar vakum infüzyon yöntemi kullanılarak 300 x 300 mm ebatlarında üretilmiştir. Hexion MGS LR160 reçine ve MGS LH160 sertleştirici karışımı ağırlıkça 4:1 oranında hazırlanarak fiber malzeme olarak her üretim için 0/90° fiber oryantasyonuna sahip 8 tabaka düz örgülü cam kumaş kullanılmıştır. Kullanılan katkı maddelerinin ve matriks malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.1’de görülmektedir. ÇCKNT katkılı kompozit malzemelerin üretiminde hazırlanan reçine miktarının ağırlıkça % 0,1 oranında nanopartikül ilavesi yapılmış ve vakum infüzyon sonrası kompozit tabakalar 23°C de 24 saat kürlenmiştir (Resim 4.4).

Çizelge 4.1. Katkı maddelerinin ve matriks malzemenin mekanik özellikleri

Cam Elyaf Kumaş Düz Örgü [0/90]s		Saf Reçine Mekanik Özellikleri Kürleme: 24 s , 23 °C + 15 s , 60 °C		Karbon Nanotüp (Siyah)/COOH Fonksiyonlu CNTs, saflık>% 90	
Fiber çapı (µm)	7	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,18-1,20	Sıkıştırılmış yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	0,14
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2,6	Eğilme gerilmesi (MPa)	110-140	Gerçek yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2,1
Çekme gerilmesi (MPa)	3,5	Çekme gerilmesi (MPa)	70-80	Dış Çap (nm)	10-30
Çekme modülü (GPa)	72	Elastisite Modülü (GPa)	3,2-3,5	İç Çap (nm)	5-10
Kopma uzama (%)	4,8	Kopma uzama (%)	5,0-6,5	Uzunluk (µm)	10-30

Kompozit tabakaların üretimi İskenderun Teknik Üniversitesi’nin mekanik laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi için özel hazırlanmış düz bir masa üzerine vakum nayolonun sabitlenmesinde ve vakum haznesi oluşturulmasında; yüksek mukavemetli, yastıklama, sönümlenme ve darbe dayanımı olan çift taraflı, basınca ve ısıya duyarlı, kapalı hücreli, PE film astarı içeren bir akrilik köpük bant olan 3M VHB kullanılmıştır. Vakum nayolonunun hemen üzerine soyma kumaşı konularak, sırası ile 8 tabaka cam elyafı, soyma kumaşı, akış filesi üst üste simetrik bir şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra vakum battaniyesine sarılmış spiral hortumlar, vakum giriş ve çıkış bölgelerine yerleştirilerek, vakum hortumları ile bağlantıları tamamlanmıştır. Dört taraftan çift taraflı bant ile sızdırmazlığı sağlanan vakum torbası kapatılarak, sistem vakuma hazır hale getirilmiştir. Hava kaçaklarının olmadığı, vakum tankında bulunan manometre üzerinde okunan basınç değerinin sabit kalması neticesinde tespit edilmiş olup, reçine giriş hortumunun hazırlanan reçine karışımına tamamen daldırılması ile üretim yapılmıştır.

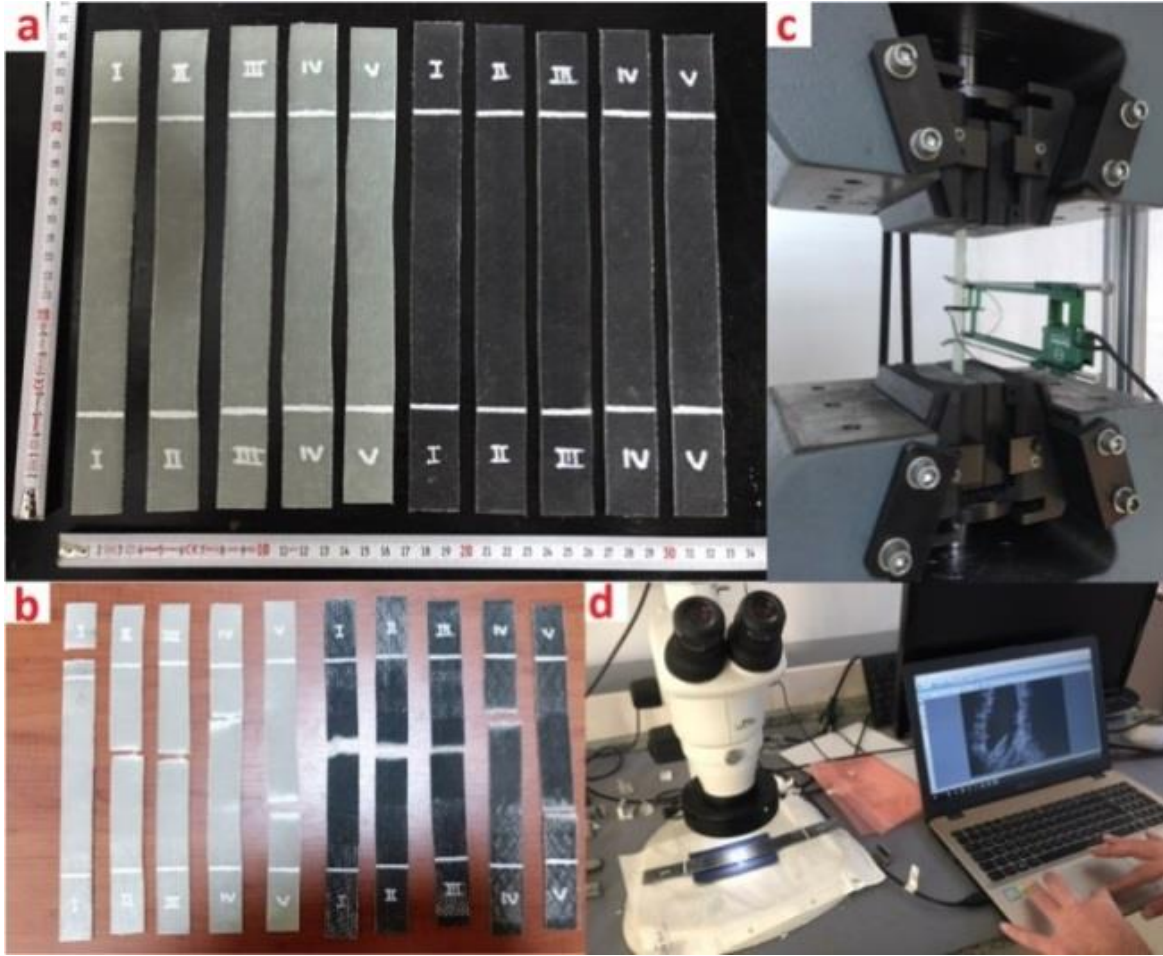


Resim 4.4. Kompozit malzeme üretimi

Kullanılan reçine ve sertleştiricinin, tedarikçi firma tarafından önerilen kürleme sıcaklıkları ve süreleri dikkate alınarak kürlenmeleri tamamlanmıştır. Üretimi tamamlanan kompozit tabakalar, vakum naylonlarının dikkatli bir şekilde kesilmesi ile vakum torbasından çıkarılmıştır. Kompozit tabakaların alt ve üst yüzeylerinde bulunan soyma kumaşları dikkatli bir şekilde soyularak elde edilmek istenen tabakaların üretimi tamamlanmıştır. Üretimlerin tamamlanmasının sonunda vakum infüzyon sisteminde kullanılan katılaştırılmış reçine besleme tankı, vakum hortumları, vakum naylonları dikkatli bir şekilde toplanarak kimyasal atık kutularına atılmıştır. Her bir kompozit tabakanın üretimi için aynı işlemler, aynı şartlar altında tekrar edilmiştir. Elde edilen kompozit tabakaların alt ve üst yüzeylerinin birbirlerine paralel olduğu herhangi bir çarpılmanın veya burulmanın görülmediği tespit edilmiştir.

#### 4.2.2. Çekme testi (tensile test)

Üretimi tamamlanan kompozit tabakalardan 250 x 25 mm ebatlarında beşer adet çekme testi numunesi dekopaj testere kullanılarak hazırlandı (Montesano, Fawaz, Bougherara, 2015). Üniversal çekme testi cihazı, epsilon ekstansometre (Model:3542-050M-100-ST), Nikon SMZ 745T stereo mikroskop kullanılarak ASTM D3039 / D3039M. standardına göre çekme testleri tamamlanmıştır (Resim 4.5).

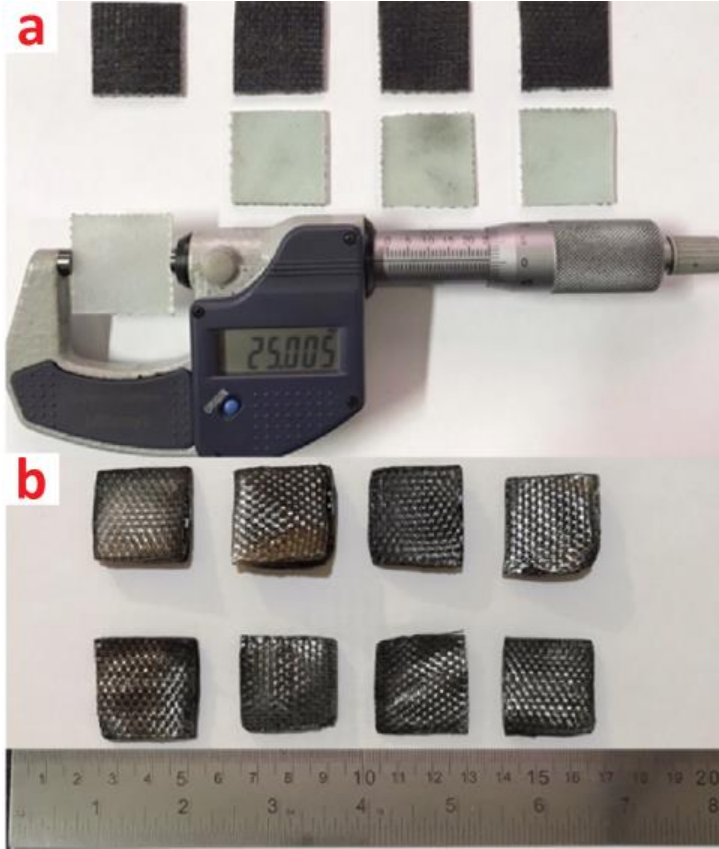


Resim 4.5. Çekme testi (a) Test öncesi (b) Test sonrası (c) Test cihazı (d) Mikroskop ve yazılım

Hazırlanan çekme numunelerinin dekopaj testere ile kesilmesi esnasında metal şablonlar kullanılarak, numunelerin hasar görmesinin önüne geçilmiştir böylece çentik etkisi ve delaminasyon engellenmiştir. Çekme numunelerinin, çekme test cihazının çenelerine bağlanması esnasında her iki çeneye 50 x 25mm ölçülerinde çene basıncını engellemeye ve çentik etkisini ortadan kaldırmaya yönelik kompozit destek plakaları yerleştirilmiştir ve testler tamamlanmıştır.

#### 4.2.3. Yakma testi (burn off test) ve yoğunluk testi (density test)

Kompozit yapıların yoğunluk ve hacim oranlarının tespiti için her tabakadan dört adet 25 x 25 mm ölçülerinde numuneler dekopaj testere yardımı ile hazırlanarak ısıtma fırınında yakılmıştır (Resim 4.6). Epoksinin numunelerden uzaklaştırılması sonrası ve test öncesi tüm numuneler HZK-110FA Serisi 0.0001 gr hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Elyaf, matriks hacim oranlarının belirlenmesinde ASTM D3171 standardı kullanılmıştır. Numunelerin yoğunluğu, Arşimet prensibi ile ASTM D 792 test standardına göre belirlenmiştir (San Juan, Fernández, Pincheira, Meléndrez, Flores, 2016). Yoğunluğu hesaplamak için gerçek ağırlık ve nesnenin sudaki ağırlığı kullanılmıştır.



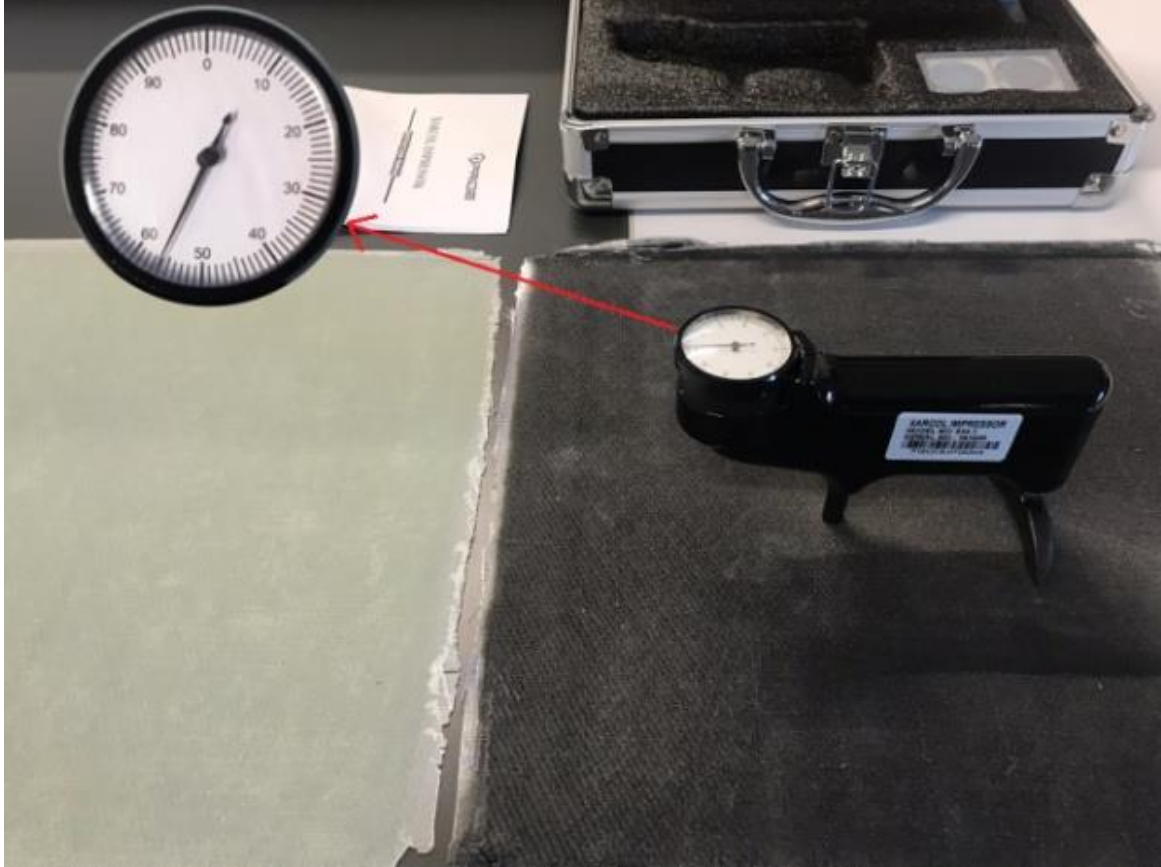
Resim 4.6. Yakma testi (a) Test öncesi (b) Test sonrası

Her bir kompozit test numunesinin, yakma testi öncesi ölçümlerinde Mitutoyo'nun 0-25 mm ölçüm aralıklı ve 0.001 mm ölçüm hassasiyetine sahip mikrometreleri kullanılmıştır. Epoksinin kompozit deney numunelerinden uzaklaştırılması sonucu 8 tabaka cam elyafı çarpılarak belirginleşmiştir fakat cam elyaflarında yanma meydana gelmemiştir.



#### 4.2.4. Sertlik testi (barcol test)

Barcol sertlik ölçer, ölçüm yapılacak yüzeye yerleştirilerek baskı yapılması neticesinde; cihaz içerisinde bulunan sivri ucun malzemeye baskı yapması neticesinde 0-100 Ba aralıklı analog göstergeden sertlik değerinin okunması prensibine dayanan, malzeme sertlik ölçümünde kullanılan kullanılan basit ve portatif sertlik ölçüm cihazıdır. Barcol sertlik test cihazı; 100 skalaya sahiptir, hassasiyetleri Webster sertlik test cihazlarından daha yüksektir. Sert plastikler, kompozitler, fibreglaslar, yumuşak metaller, alüminyum ve alaşımları, bakır ve pirinç gibi malzemelerin sertliklerinin tespitinde kolaylıkla kullanılabilir. kullanılmaktadır.



Resim 4.7. Sertlik ölçümü

Saf ve katkılı kompozit tabakaların kürlenmesinin tamamlanmasının ardından, tabakalar sert düz bir yüzeye konularak, aynı şartlar altında sertlikleri tespit edilmiştir. Her bir kompozit tabakanın farklı bölgelerinden ayrı ayrı toplam 22 adet ölçüm alınarak ortalama değerler belirlendi ve yüzey sertlikleri tespit edildi (Resim 4.7). Barcol impressor 934-1 cihazı kullanılarak ASTM D2583 standardına göre ölçümler yapılmıştır (Wiggers, 2018).

#### 4.2.5. Yüzey pürüzlülüğü testi (Surftest)

Gelişen teknoloji ve kompozitlerin artan kullanım alanına paralel olarak, özellikle havacılık ve otomotiv sanayisinde kalite beklentileri giderek artmaktadır. Kompozit malzemelerin kalite parametreleri çok fazladır, bunların en önemlilerinden birisi de yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülük kriteri kompozit bileşenlerinin işlevselliğini ve görselliğini ciddi oranda etkilemektedir. Talaşlı imalat yöntemi ile işlenmiş iki farklı kompozit malzemenin bir araya getirilmesi, montajlanması süreçlerinde yüzey pürüzlülüğünün; mukavemet, estetik görünüm, kırılma dayanımı ve korozyon dayanımı üzerinde ciddi etkileri vardır.

Kompozit ve nanopartikül takviyeli kompozit deney numunelerinin yüzey frezeleme işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlükleri Mitutoyo Surftest SJ-310 yüzey pürüzlük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Resim 4.8). Yapılan ölçümlerde Ra, Rq, Rz pürüzlük parametreleri dikkate alınarak her yüzeyin farklı pürüzlükte olduğu tespit edilmiştir.



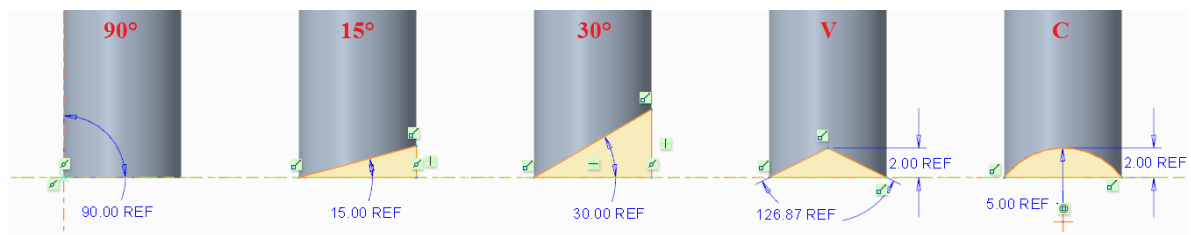
Resim 4.8. Surftest SJ-310 ile yüzey pürüzlülük ölçümü

Malzemenin merkezinden yukarı doğru oluşan profil dalgalanmalarının mutlak aritmetik ortalaması Ra yüzey pürüzlüğüdür. Çok kullanılan yüzey pürüzlük ölçme parametresidir. Rq yüzey pürüzlüğü, ölçüm uzunluğu boyunca profil yüzeyindeki dalgalanmaların geometrik ortalamasıdır. Rz yüzey pürüzlüğü, ölçüm uzunluğu dikkate alınarak profil yüzeyindeki en düşük ve en yüksek noktalar arasındaki dikey mesafelerin ortalamasıdır.

#### 4.2.6. Zımba ve kalıp yöntemiyle delme

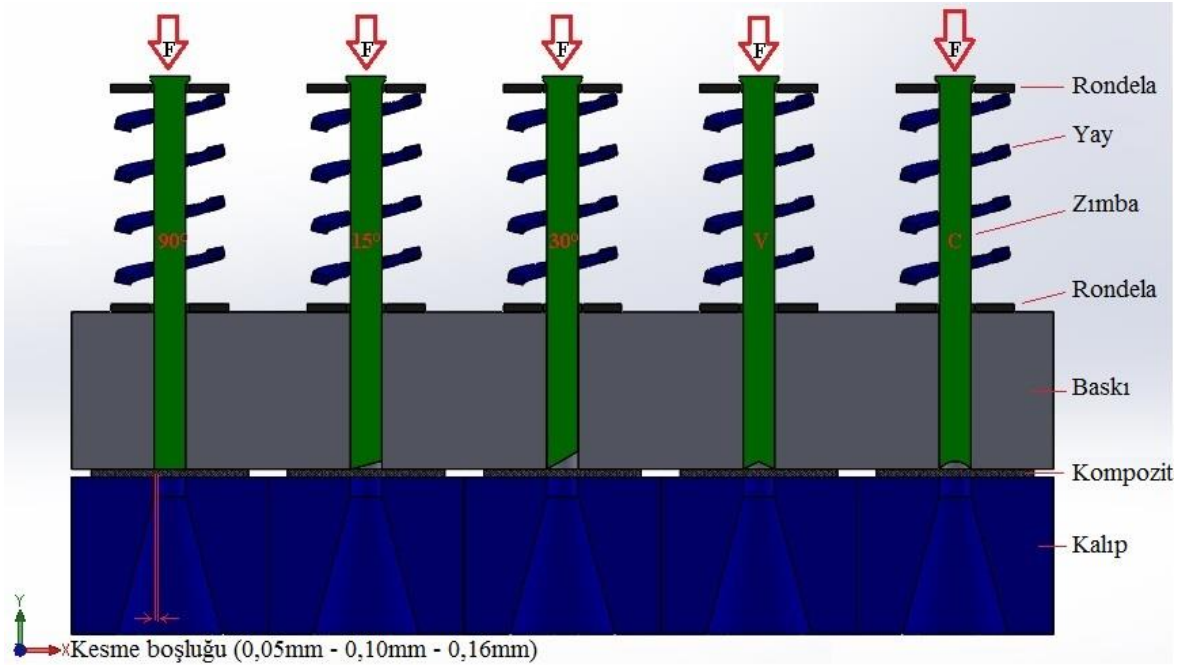
Levha veya şerit haldeki metal, kompozit, plastik vb. malzemeleri talaş kaldırmadan, malzemelerden daha sert kesme-delme zımbaları ve dişi kalıplar kullanarak; malzemeleri ayırma işlemi, kalıpcılıkta zımba ve kalıp yöntemiyle kesme ve delme olarak tanımlanmaktadır. Kesme - delme olayı zımbanın malzemenin üzerine baskı yapması ile başlar ve parçanın tamamen tabakadan ayrılması ile sona erer. Bu süreçte elastik bölge deformasyonu, plastik deformasyon, pekleşmenin azalması, kesme kenarları arası çatlak başlaması ve ilerlemesi, en son ise parça çıkışı safhaları gerçekleşir. Kalıp kullanarak kesme - delme işleminde; kullanılan malzemenin cinsine, kalınlığına göre, dişi ve erkek arasına çalışma boşluğu verilmektedir. Söz konusu kesme boşluğu kesilen parçanın yüzey kalitesine, kalıbın ve zımbanın ömrüne, kesme - delme için gerekli olan kuvvete ciddi şekilde etki etmektedir.

Üretimi tamamlanan kompozit malzemeler zımba ve kalıp yöntemi kullanılarak delindi. Delme işlemi için 90 °, 15 °, 30 °, V, C tipi kesme formu bulunan Ø8 mm'lik zımbalar, charmilles robofil 290P tel erozyon (WEDM) tezgahında hazırlandı. Endüstride yaygın olarak kullanılan; mukavemet gerektiren yerlerde tercih edilen 90 ° tipi, daha az kuvvet ile kesme sağlayan 15 ° ve 30 ° tipi, makaslamanın yapıldığı V tipi ve delgeçlerde tercih edilen için C tipi zımba modelleri seçilmiştir (Şekil 4.1). Tel erozyon tezgahında kesme formları işlenen zımbalar Güvenal Kalıp Elemanları A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir.



Şekil 4.1. Zımbaların kesme profilleri

Kompozit levhalara delik açmak için bir zımba kalıbı tasarlanarak, tel erozyon tezgahı kullanılarak üretildi. OD: 30 - ID: 8 mm rondela, Ø20x10 mm mavi yaylar ve 1.2379 malzemeden yapılmış zımba ve kalıp çeliği (62 - 64 HRC  $\pm$  2) delme işlemi sırasında kullanılmıştır. Kalıp dişi çeliğine; 0,05 mm, 0,10 mm ve 0,16 mm kesme boşluğuna sahip üç farklı delik delinmiştir (Şekil 4.2). Zımba – baskı - kalıp siteminin aynı ekseninde simetrik çalışabilmesi için kalıbın sağ ve sol kenarlarına merkezleme pimleri konulmuştur. Zımbalama ömrü, delik kenarı kalitesi ve vuruş başına maliyet, optimum kalıp boşluğuna bağlıdır. Kalıp boşluk değerlerinin seçilmesinde kompozit malzemenin kalınlığı ve endüstriyel uygulamalar dikkate alınmıştır.



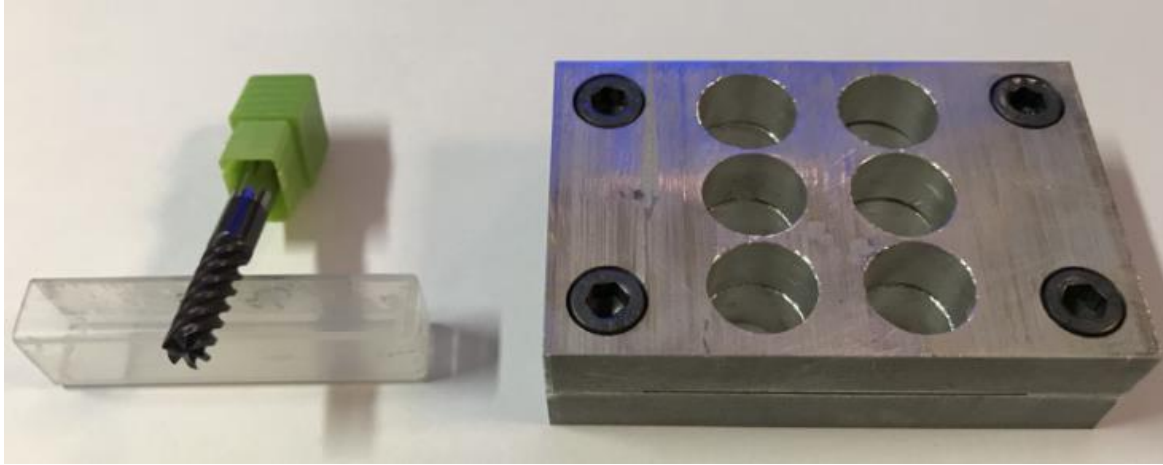
Şekil 4.2. Zımba kalıbı ve kullanılan parçalar

Tüm laminatlar atölye tipi manuel hidrolik pres yardımı ile delinmiştir. Hazırlanan kesme kalıbı hidrolik presin çalışma masasına yerleştirilmiş ve daha sonra zımba kafasına pres pistonu ile kuvvet uygulanmıştır. Tüm parçalar merkezleme pimleri yardımı ile dikey olarak hizalanmıştır ve presin hızı (kesme hızı) 5 mm/sn olarak seçilmiştir. Kompozit tabakaların delinmesi neticesinde her baskıda elde edilen pul (hurda) dişi kalıp içerisinde çıkarılmış, elyaf ve epoksi tozları temizlenerek bir sonraki baskı işlemi yapılmıştır. Her bir kesme boşluğu ve zımba profili için saf ve katkılı kompozit tabakalara üç ayrı delme işlemi yapılmıştır. Ölçüsel değerlerin tespit edilmesinde delinen plakaların ortalama değerleri rapor edilmiştir.

#### 4.2.7. Parmak freze kullanarak orbital delme

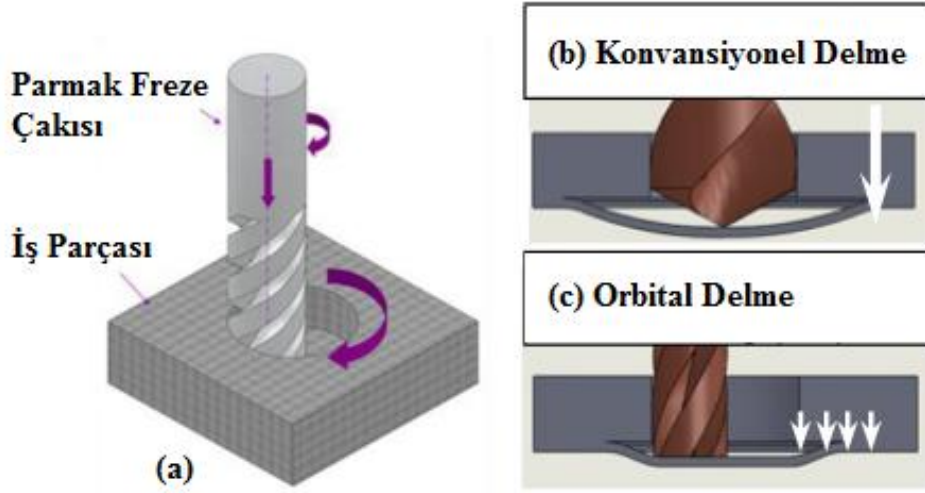
Parmak frezeler sahip oldukları helezonik kesici kenarlar ve çok ağızlı yapısı ile makine, kalıp imalat sanayisinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Yüzey frezeleme, form işleminin yanı sıra dairesel ve yanal hareketlerle delik delme işleminde de sağlıklı bir şekilde kullanılmaktadır. Saplı veya şaftlı frezeler olarak ta bilinen bu kesici takımlar CNC veya NC makinalarının fener miline bağlanır daha sonra kontrol sisteminin komuta sistemi ile iş parçasından talaş kaldırır. İşlenecek olan parçanın tezgah mengenesine hassas bir şekilde bağlanması ölçüm ve iş güvenliği hassasiyeti açısından önem arz eder.

Kompozit deney numuneleri, özel tasarlanmış 5083 alüminyum aparata bağlanarak 68-70HRc sertliğe sahip Ø6 mm çapında, 6 kesme bıçaklı parmak freze ile 8 mm çapında delinmiştir. Delik delme işlemlerinde sadece hava ile soğutma kullanılmıştır. Freze çakısının içerisinde helisel hareket yapabileceği ve kompozit tabakalarının sehim yapmasını engellemek için 14 mm çapında delikleri bulunan destek plakaları oluşturulmuştur (Resim 4.9).



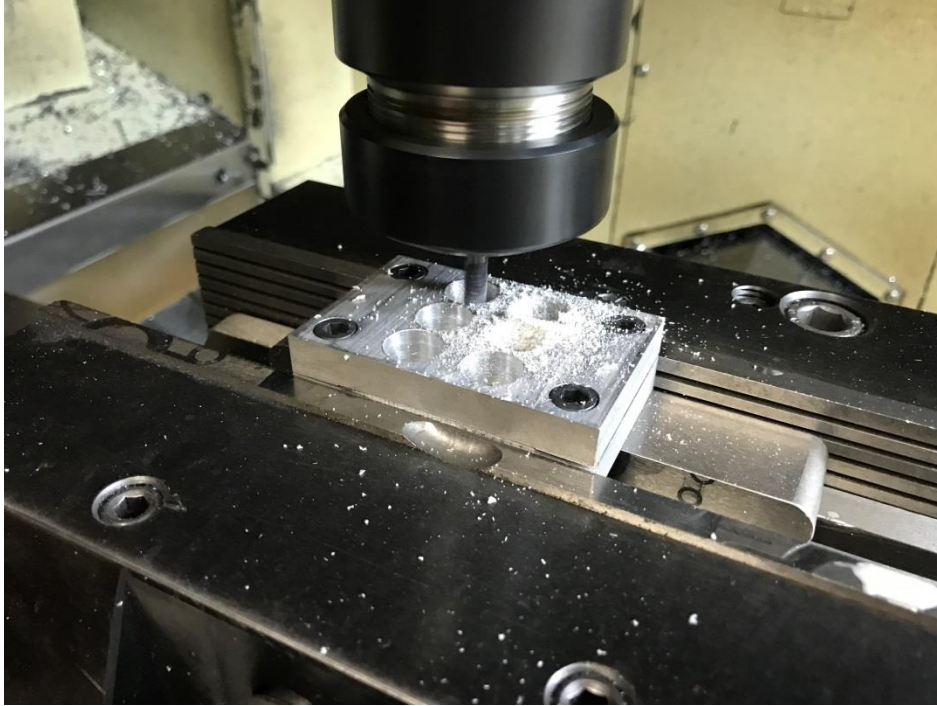
Resim 4.9. Parmak freze çakısı ve kompozit tutma aparatı

Matkap ile delme esnasında kompozit yapılarda çapaklanma, delaminasyon, parçalanma gibi deformasyonlar görülmektedir. Kaliteli ve hassas delik ihtiyacı orbital delmeyi (OD), geleneksel delme işlemine umut verici bir alternatif haline getirmiştir, çoğu durumda delaminasyon içermeyen delikler elde edilebilmektedir (Sultana, 2016). Geleneksel delme (konvansiyonel delme) işleminde aksenel yönde hareket eden matkap ile delik elde edilirken, orbital delme (yörüngesel) işleminde hem çevresel hemde aksenel doğrultuda hareketle talaş kaldıran parmak freze çakıları kullanılarak delikler elde edilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. (a) Orbital delme işleminde takım hareketi, (b ve c) sırasıyla CD ve OD'deki son tabakanın delaminasyonu (M'Saoubi, 2015)

Makino S33 model CNC tezgahına özel mengene ile sabitlenen kompozit deney numuneleri, freze çakısı ile helisel hareket yaparak havuz boşaltma modülü kullanılarak 8 mm çapında taranmıştır. Tezgah ilerlemesi 200 mm/dak sabit tutularak 3500, 4000, 4500 dev/dak fener mili devri ile delik delme işlemi yapılmıştır. Daha sonra fener mili devri 500 dev/dak sabit tutularak; 500, 1000, 1500 mm/dak tezgah ilerlemesi değerleri ile delik delme işlemleri yapılmıştır (Resim 4.10).

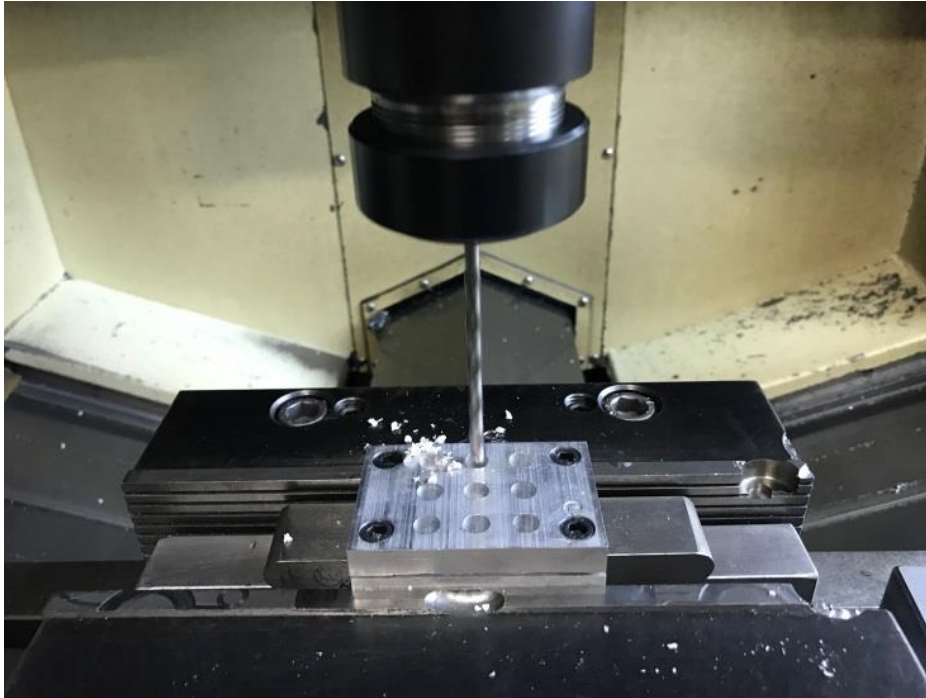


Resim 4.10. Makino S33 CNC tezgahında orbital delme işlemi

#### 4.2.8. Matkap kullanarak konvansiyonel delme

Matkap kullanarak delik delme işlemi imalat sektörünün vazgeçilmez talaşlı imalat yöntemlerinden biri olup, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile delik delme işlemi için delinecek olan malzemeden daha sert ve keskin bir kesici takım kullanılır. Metal matkap uçları; alüminyum, bakır, pirinç, çinko gibi demir içermeyen malzemelerin kesimi için uygundur. Paslanmaz çelikler için; kobalt alaşımlı matkap uçları veya titanyum kaplamalı matkap uçları tercih edilmektedir. Ahşap matkap uçları; uzun bir merkezleme çıkıntısı ve etrafını saran kesme kenarları olan matkaplardır, matkap ucunda bulunan çıkıntı kesme işlemi öncesi merkezleme yaparak ahşapta düzgün bir delik elde edilmesine yardımcı olur. Beton matkap uçları; ağır işlerde kullanılan ve daha çok duvar, beton delmek için tercih edilen matkap uçlarıdır.

Malzemelere matkap kullanarak delik açılması ile mil, pim, perçin, perno, cıvata-somun gibi bağlantı elemanlarının takılması sağlanabilir. Ayrıca farklı amaç için delik elde etme (ısı transferi-havalandırma-soğutma) ihtiyaçları karşılanabilir. Kesici takımların CNC, NC, radyal matkap, sütunlu matkap, masaüstü matkap tezgahlarına bağlanması ile iş parçalarına delikler açılabilir. Delik daireselliğinin ve ölçüsünün çok hassas olmadığı operasyonlarda taşınabilir darbeli, darbesiz matkaplar, şinyal matkaplar kullanılabilir.



Resim 4.11. Makino S33 CNC tezgahında konvansiyonel delme işlemi

Makino S33 model CNC tezgahına özel mengene ile sabitlenen kompozit deney numunelerine  $\text{\O}5$  mm  $\text{\c}apında$   $90^\circ$ ,  $118^\circ$ ,  $140^\circ$  kesme ağız açısına sahip HSS matkaplar kullanılarak, gagalama yapılmadan, soğutucu kullanılmadan direk kompozit tabakaya dalarak delme işlemi yapılmıştır (Resim 4.11). 1000 dev/dak fener mili devri sabit tutularak 200, 600, 1000 mm/dak ilerleme değerleri ile delikler delinmiştir.

Delik kalitesini arttırmak ve delaminasyonu azaltmak için her bir deney numunesi, 5083 alüminyum malzemeden tasarlanmış özel aparatlar yardımı ile mengeneye bağlandı. Destek plakası görevi gören aparat ile matkap ucunun kompozit plakaya sehim yaptırmasının önüne geçilmiştir ( Liu, 2012).



Resim 4.12. Açılı Matkap Bileme Makinası (EDG-213N)

Delme işlemi öncesi 200 - 250 HB (Brinell Hardness) sertliğine sahip HSS (High Speed Steel) matkapların kesme uçları, EDG-213N kesici bileme tezgahında  $90^\circ$ ,  $118^\circ$ ,  $140^\circ$  olacak şekilde bilenmiştir (Resim 4.12). Yaklaşık  $600^\circ\text{C}$  sıcaklıklara kadar susuz çalışabilen ve dayanımlarını kaybetmeyen matkaplar ile su kullanılmadan delik delme işlemi yapılmıştır.



#### 4.2.9. Freze akısı kullanarak yüzey frezeleme

40 mm x 40 mm ebatlarda hazırlanan kompozit plakalar Arion-GEVS500A freze tezgahında sabit 1500 mm/dak ilerleme; 600 mm/dak, 1800 mm/dak, 3000 dev/dak makine devri ile sabit 3600 dev/dak makine devri; 1800 mm/dak, 2000 mm/dak, 2500 mm/dak ilerleme değerleri kullanılarak frezeleme çalışması yapıldı ve kompozit tabakalardan talaş kaldırıldı. Ø6 mm çapında 6 kesme ağzı bulunan parmak freze akısı kullanılarak her pasoda 0,25 mm talaş derinliğine girilerek 4 pasoda toplamda 1 mm talaş kaldırıldı. Kompozit deney numunelerinin tezgah mengenesine bağlanması 5083 Alüminyum malzemeden üretilmiş, tüm yüzeyleri birbirine dik bağlama aparatı kullanıldı (Resim 4.13).



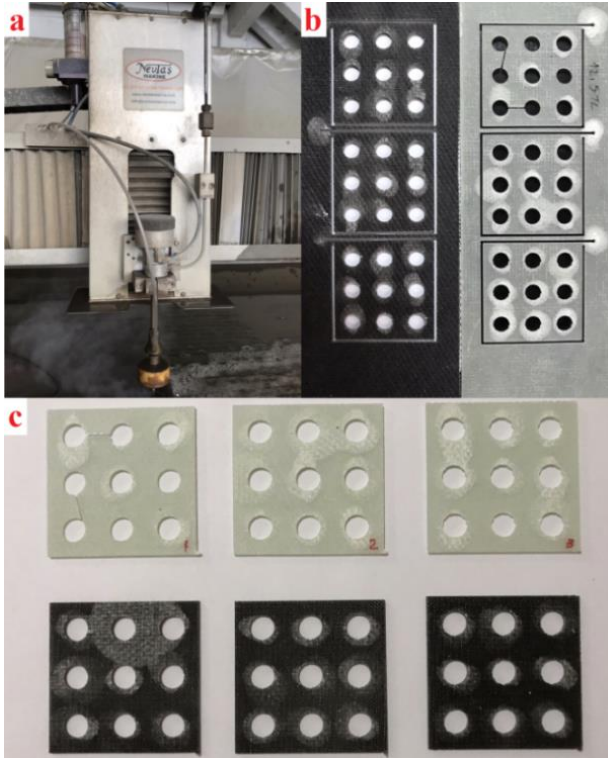
Resim 4.13. Arion-GEVS500A freze tezgahında yüzey frezeleme işlemi

Test numunelerinin alüminyum aparat arasına yerleştirilmesi neticesinde; kesici takım tarafından uygulanan itme kuvvetinin parçaya sehim yaptırmasının önüne geçilmiş ayrıca her pasoda yüzeyden talaş kaldırmaya çalışan parmak frezenin kompozit plakayı sarsması engellenmiştir. Kama yeri (slot) elde etmek için yapılan çalışmada alüminyum plakada, freze çakısının rahat hareket edebileği kanallar boşaltılarak başarılı sonuçlar elde edildi.

#### 4.2.10. Aşındırıcılı su jeti yöntemiyle kesim

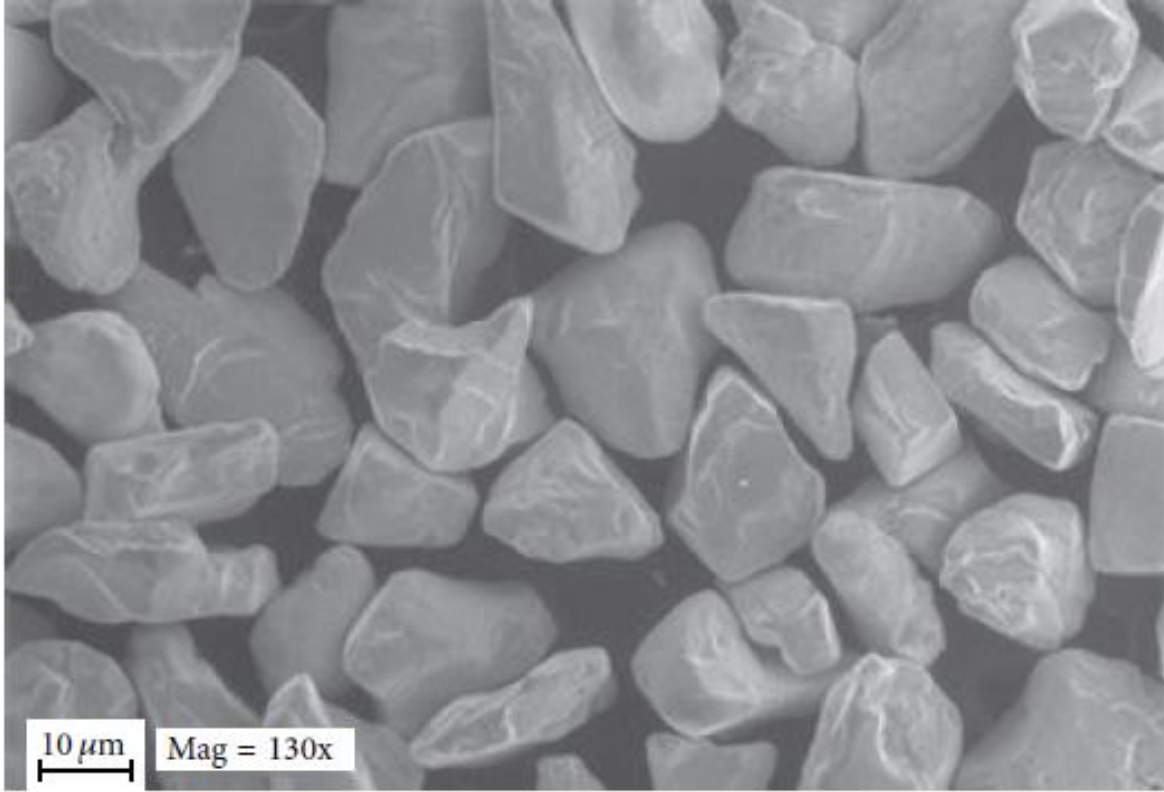
Su jeti yöntemiyle kesim işlemi, geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden olup bu yöntem kullanılarak nerdeyse doğadaki her türlü malzeme kesilebilmektedir. 1960'lı yılların sonunda bulunan bu yöntem geliştirilerek 1982 yıllarında endüstrilerde kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte su jetine aşındırıcı eklenmesi, su jeti nozulunun elektronik motorlar ve yazılımlar kullanılarak kontrol altına alınması, yöntemin verimliliğini arttırmıştır. Aşındırıcılı su jeti sisteminde; filtreler kullanılan suyu süzerek temizler bu sayede sistemin ömrünü arttırır, sistemin ihtiyaç duyduğu yüksek basınçta su kompresör tarafından sağlanır, borular ve bağlantı elemanlarında kompresörden aldıkları suyu orifise sevk eder, aşındırıcı ve su jeti karışım odasında karıştırılarak ivmelenen aşındırıcı su akımı şeklinde kesilecek olan parçaya temas ettirilir.

300 x 300 mm ebatlarında üretilen kompozit plakalar su jeti makinesine bağlanarak 50 x 50 mm ebatlarda kesilmiş ve farklı kesme parametreleri kullanılarak her kare levhaya 9 adet delik açılmıştır. Kompozitlerin kesilmesinde Nevtaş NSJ 1630/50 HP su jeti makinesi kullanılmıştır (Resim 4.14).



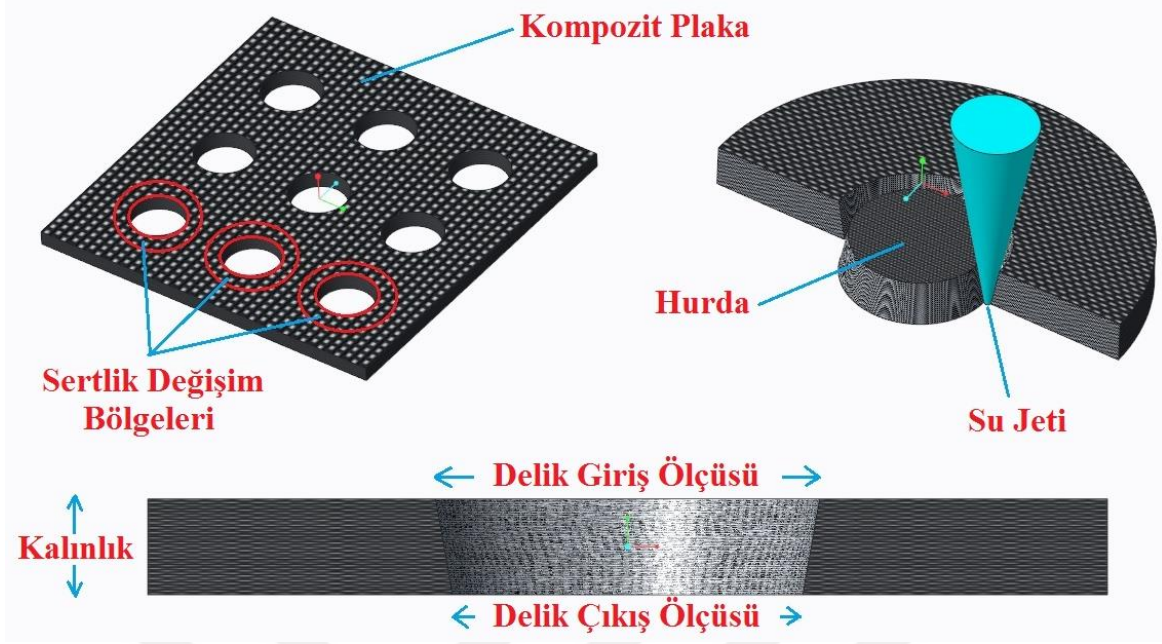
Resim 4.14. Su jeti kesim işlemi (a) Su jeti makinesi (b) Kompozit tabakalar (c) Test numuneleri

Su jeti için aşındırıcı maddesi olarak, iyi bir aşındırıcı olan garnet kumu tercih edilmiştir (Resim 4.15). Çok yüksek basınçlı suyla karıştırılan garnet, su jetlerinde çelik ve diğer malzemeleri kesmek için kullanılır. Sert kayadan çıkarılan garnet form bakımından daha köşeli olduğundan kesim esnasında diğer aşındırıcılara göre daha verimlidir. Ayrıca garnet kumu, slika kumu gibi çevre ve insan sağlığına zararlı değildir, diğer kumlama uygulamalarında da korozif etki yaratmamasından dolayı alüminyum oksit malzemesinin yerini alarak alternatif olmuştur. Endüstride denizcilik sektöründe gemi raspalama işlemlerinde ve çelik konstrüksiyon kumlama işlemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.



Resim 4.15. Garnet aşındırıcının SEM görüntüsü (Doreswamy, 2015)

Bu çalışmada su jeti makinasına ait kesme kafasından 4 lt / dak akış hızında su verilmiştir. Pompada üretilen 3750 bar yüksek basınçlı su, çelik borularla kesme kafasına ulaştı. Oradan 0.014" dahili elmas delikten geçirildi ve hızı ses hızının yaklaşık 3 katına çıkarıldı. Daha sonra, karıştırma haznesinde aşındırıcı kum vakum ile karıştırıldı ve 1 mm iç çaplı nozülünden geçirilerek malzemeye gönderildi. Kesme işlemleri sonrası kesilen kompozit malzemedeki sertlik ve kalınlık değişimleri, delik giriş-çıkış ölçüleri, delaminasyon ve çapaklanma gibi delik kalitesine etki eden parametreler incelendi (Şekil 4.4).

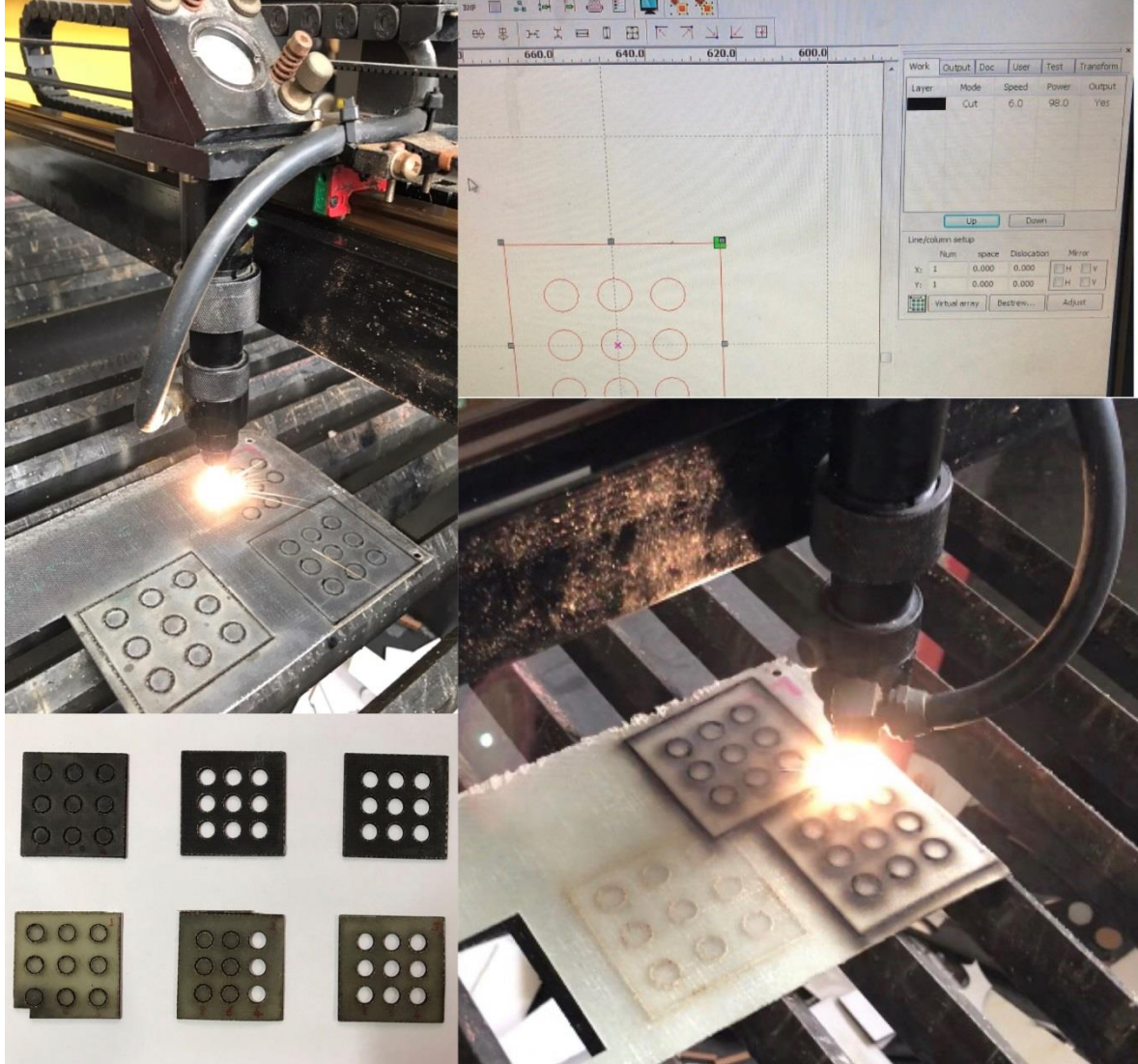


Şekil 4.4. Test numunesinin su jeti ile kesilmesi ve bazı teknik bilgiler

#### 4.2.11. CO<sub>2</sub> lazer yöntemiyle kesim

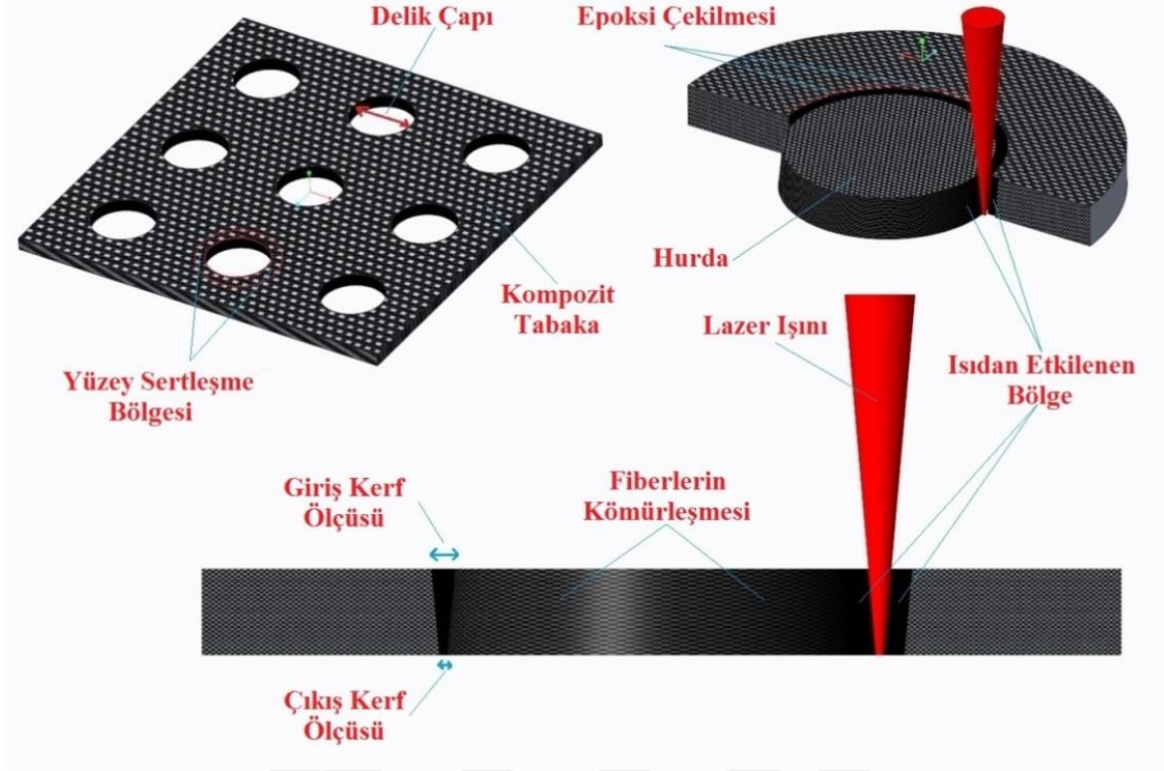
Lazer teknolojisindeki gelişmelerin artması ile mevcut talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri yerini lazer kesim yöntemine bırakmaya başlamıştır. Endüstride büyük bir paya sahip metal ve metal olmayan malzemelerin kesimi artık lazer kesim makineleri ile yapılmaktadır. Lazer kesimin diğer imalat yöntemlerinden en büyük farkı malzemeye temas etmeden, mekanik kesme kuvvetleri oluşmadan işlem yapılmasıdır. Ayrıca kesici takım aşınma maliyetlerinin olmaması da bu yöntemin bir avantajıdır. Geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi lazer kesim yönteminde de kesim kalitesine etki eden işlem parametreleri bulunmaktadır. Doğru seçilen çalışma parametreleri kullanılarak başarılı sonuçlar alınabilmektedir. Lazer makineleri kullanılarak; pleksiglass / akrilik, cam ve türevleri, kumaş, deri, ahşap, plastik, kağıt ve karton, sunta ve türevleri, kauçuk, seramik, lastik, boyalı ve boyasız metal parçalar, polivinilklorür (PVC) malzemeler, mermer ve sayamadığımız birçok materyale işlem yapılabilir. Bu yöntemin endüstride yaygın olarak kullanıldığı bazı alanlar; reklam logo tabelaları, zanaat hediyelik eşya imalatı, kristal süsler, kağıt-karton süsler, bambu ve ahşap sektörü, kompozit malzemeler, baskı plakası yapımı, giysi, deri, dekorasyon, ambalaj endüstrileridir. Çalışmamızda kullandığımız D'1390 lazer kesim makinasının; RECI Z4 lazer tüpü standart 100 watt olup, makina maksimum 130 watt gücündedir. 20 mm pleksi, 10 mm MDF, 8 mm kontrplak, 3 mm kalınlığındaki deri malzemeler rahatlıkla kesilebilmektedir.

Kompozit levhaların kesim modelleri Coreldraw çizim programında çizildi ve ardından RDCAM programında lazer iş parametreleri tanımlanarak D'1390 CO<sub>2</sub> lazer kesim makinesinde işlendi (Resim 4.16). 130 W lazer gücüne sahip makine ile CO<sub>2</sub> işlem gazı kullanılmış ve % 65, 80, 98 (düşük, orta, yüksek) güç oranları seçilmiştir. Malzeme yüzeyine göre sabit 14 mm odak pozisyonunda 4, 6, 8 mm/sn olacak şekilde üç farklı kesme hızı kullanılmıştır.



Resim 4.16. CO<sub>2</sub> Lazer makinası ve kesme koşulları

Lazer kesim makinesinin güvenli çalışma parametreleri göz önüne alınarak üretimler tamamlanmıştır. Şekil 4.5'te belirtildiği gibi lazer kesim neticesinde elde edilen termal etkiler ve ölçüsel değerler analiz edilmiştir.



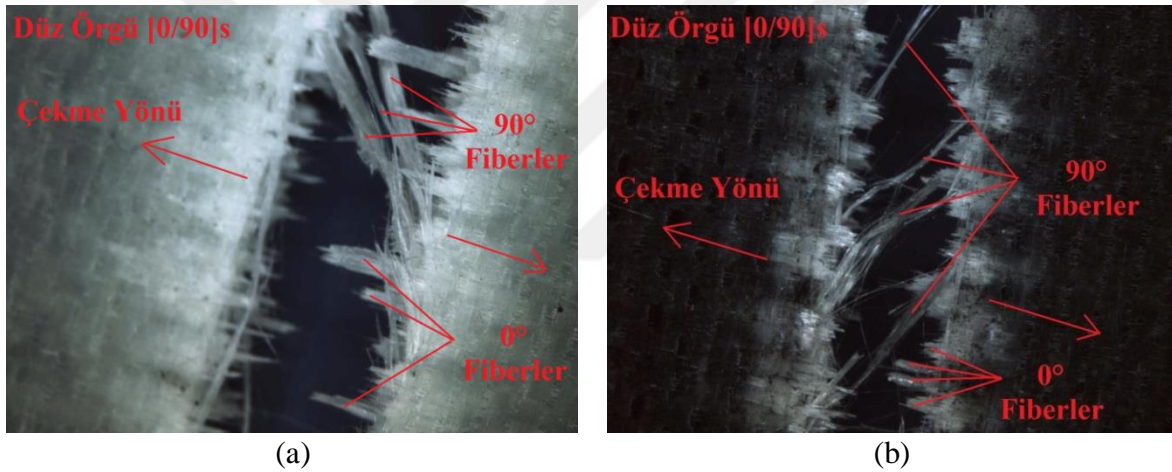
Şekil 4.5. Test numunesinin Lazer ile kesilmesi ve bazı teknik bilgiler

CO<sub>2</sub> lazer kesim yönteminin; testere ile kesme, plazma ve oksijen ile kesme yöntemlerine göre avantajları mevcuttur. Bu yöntemin kesme işlemi esnasında parçaya temas etmemesi; ince ve farklı formlara sahip, iletken veya yalıtkan yapıya sahip, kesimi problemlili olabilen kompozitler gibi özel malzemelerin kesilmesine olanak vermektedir. Lazer teknolojisi; termal bir yöntemdir bu sebeple kesilecek olan parçaların doğru seçilmiş işleme parametreleri kullanarak işlem görmesi gerekmektedir bu şekilde kabul edilebilir termal etkiler elde edilebilir. CO<sub>2</sub> lazer kesim yönteminin temelinde, merceklerin kullanılması ile lazer ışınının malzeme yüzeyine odaklanması sonucu, kesme işleminin yapılacağı bölgede malzemeyi eritme ve buharlaştırma işlemi vardır. Bu sebepten dolayı cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin lazer yöntemi kullanılarak kesilmesi neticesinde, kesim bölgelerinin yakın kısımlarında yüze sertleşmesi, lazer ışınının temas ettiği bölgelerde termal hasarlar ve epoksi çekilmesi, kesme yüzeylerinde fiber kömürleşmesi, lazer ışınının malzemeye giriş ve çıkış kısımlarında kerf ölçüsü, tespit edilen bazı problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Kesilecek parçanın cinsine ve kalınlığına göre seçilecek olan lazer gücü, kesme hızı, odak mesafesi gibi işlem parametrelerinin doğru ayarlanması ; en yüksek kesim kalitesinde işleme yapılmasına olanak sağlamaktadır.

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Saf ve katkılı kompozit tabakaların üretimleri sonrası her tabakanın farklı bölgelerinden 5 adet çekme testi numunesi alınarak gerilme ve kopma değerleri tespit edildi. Çekme testi sonrası kompozit malzemelerin kopma bölgeleri Resim 5.1’de gösterilmiştir. Görüntüler Nikon SMZ 745T stereo mikroskop kullanılarak 7,5 kat büyütme yapılarak makro analiz ile elde edildi. Saf kompozit çekme numunlerinde görülen düzensiz fiber çekilmelerinin ve kopmalarının katkılı kompozitlere göre daha fazla olduğu tespit edildi. Katkılı kompozit çekme numunlerinin fiber kopmalarının daha düzenli olduğu tespit edilmiştir. ÇCKNT’lerin fiber ve epoksi yapısını bir arada tutma eğilimi içinde olduğu görüldü.



Resim 5.1. Fiber çekilme ve kopmaları (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit

Çekme istikametine dik ( $90^\circ$ ) olan fiberlerin bir kısmının sıyrılarak çekildiği, çekme istikametine paralel ( $0^\circ$ ) fiberlerin koptuğu gözlemlendi. Saf ve katkılı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. ÇCKNT katkılı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin katkısız kompozitlere göre daha iyi olduğu görüldü. Karbon nanotüplerin yüksek elastik modul ve çekme dayanımlarının kompozit yapının mekanik özelliklerine katkı sağladığı tespit edildi. Lifler, kompozit yapıların gerilme direncini etkileyen en önemli katkı maddesidir. ÇCKNT’lerin eklenmesiyle, elyafların artan hacim oranı, çekme dayanımındaki artışa olumlu katkıda bulunmuştur.

Çizelge 5.1. Saf ve katkılı kompozitlerin mekanik özellikleri

Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Kuvvet (kN)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Uzama (%)	Poison oranı (mm/mm)
Saf Kompozit	1,62	22,97	13,74	338,811	2,16	0,14
Katkılı Kompozit	1,59	24,99	14,53	364,303	1,29	0,15

Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde matriks ve takviye fazlarının ağırlıklı ortalamalarını da içeren karışımlar kuralı kullanılmıştır (Groover, 2016: 184, 185). ÇCKNT katkısı ile fiber hacim oranı, boşluk hacim oranı ve kompozit levhaların yüzey sertliği artmış, diğer bir taraftan matriks hacim oranı ve yoğunluk azalmıştır. Çizelge 5.2 ve 5.3'te katkı maddesi ile değişen bazı mekanik özellikler belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Hacim oranları bulguları

Spesifikasyon	Saf Kompozit	Katkılı Kompozit
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,62	1,59
Fiber hacim oranı %	40,47	41,88
Matriks hacim oranı %	49,96	45,12
Boşluk hacim oranı %	9,3	12,97

Çizelge 5.3. Barcol sertliği ölçüm sonuçları

Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Test Sayısı	Barcol Sertliği
Saf Kompozit	22	48
Katkılı Kompozit	22	56

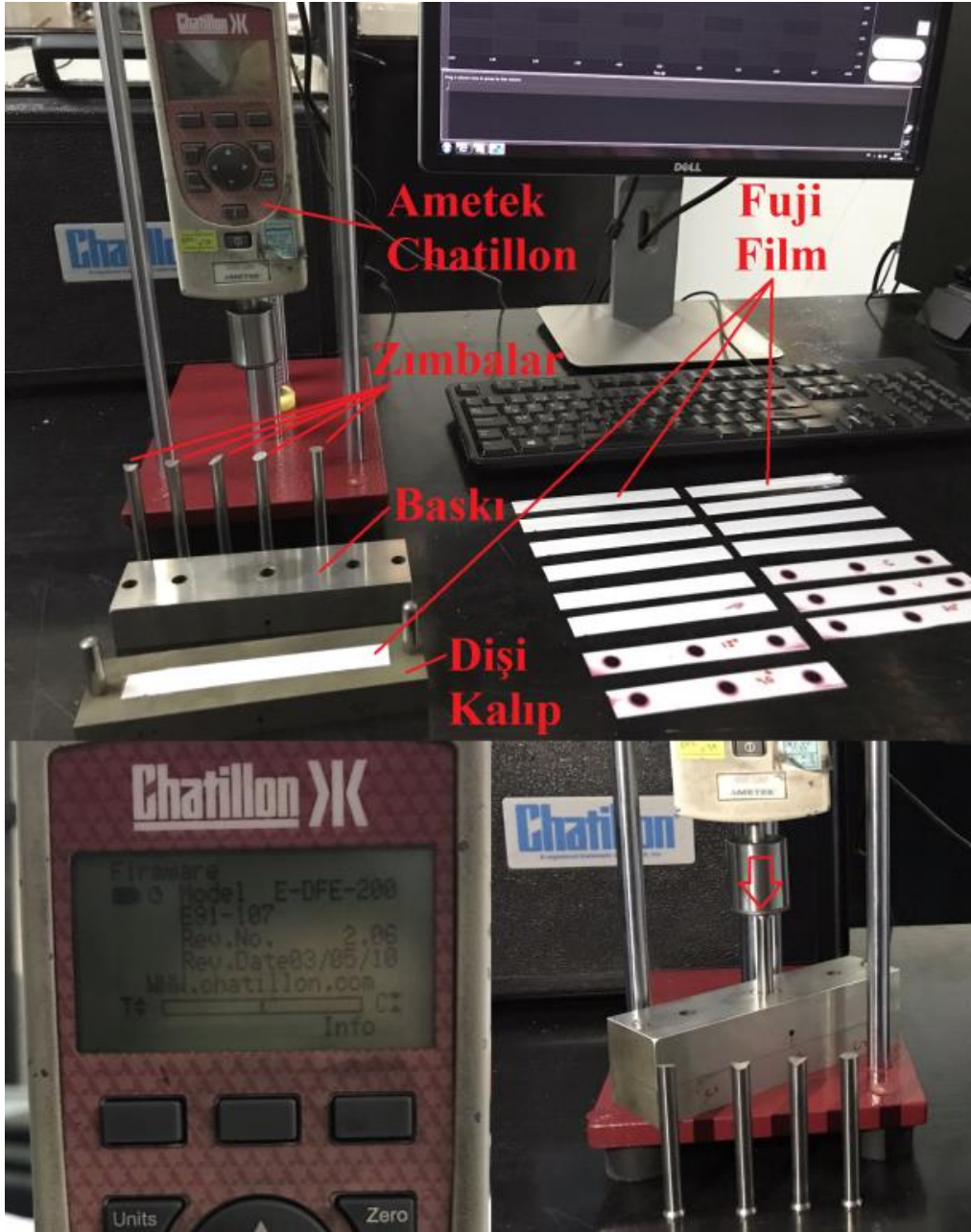
## 5.2. Zımba ve Kalıp Kullanarak Delme Bulguları

### 5.2.1. Ametek chatillon (Load Cell) ve Fujifilm (Prescale) ile kuvvet ölçümü ve basınç dağılımı değerlendirmesi

Fujifilm Prescale, uygulandığı proseslerde yüzeydeki basınç dağılımını, paralelliğini görebildiğimiz endüstriyel bir filmidir. Filmin üzerine basınç uyguladığımız da içindeki mikro kapsüller patlayarak film üzerinde kırmızı bir renk oluşturur. Film üzerinde oluşan ve değişkenlik gösteren kırmızı rengin yoğunluğuna göre basınç dağılımını görebiliriz. Fujifilm numuneleri Right Team Danışmanlık Hizmetleri firmasından tedarik edilerek;

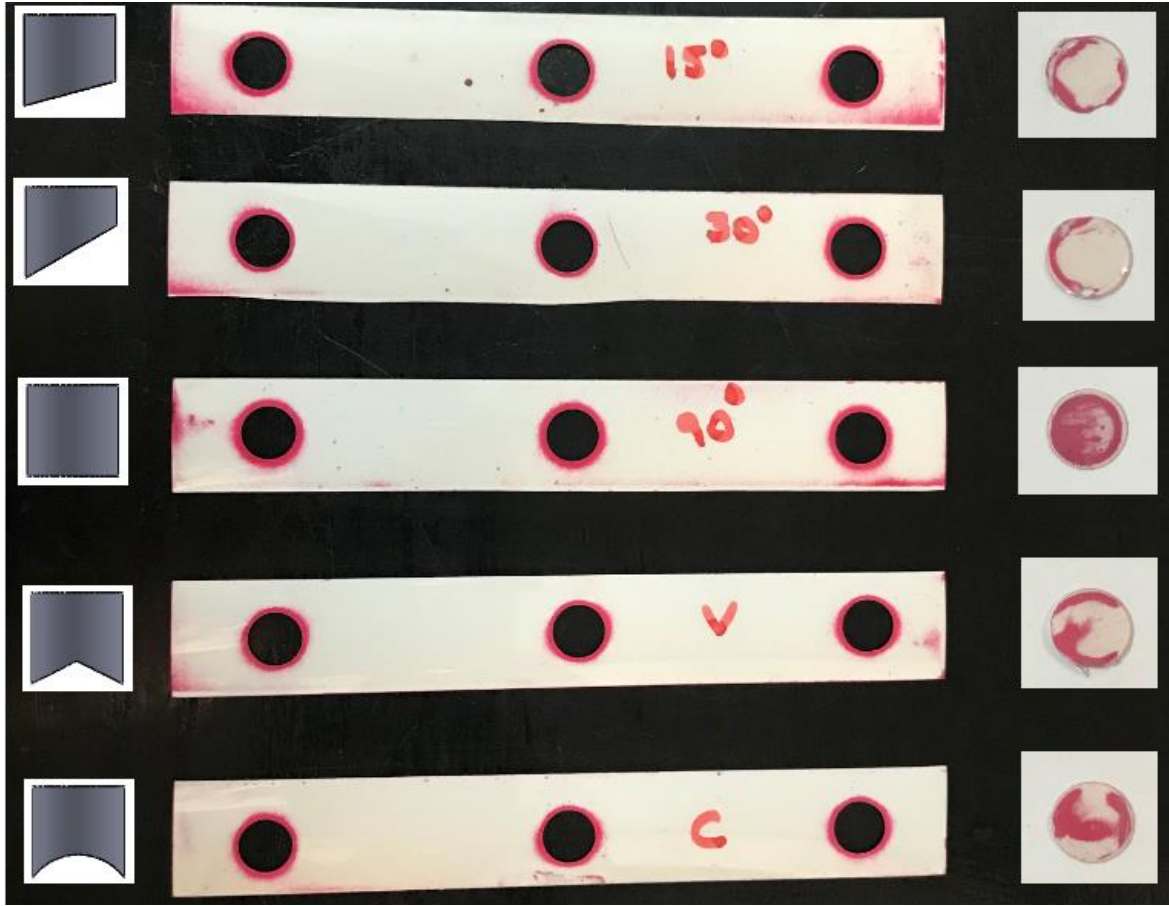


20°C - 30°C ortam sıcaklığı ve 35%RH / 80%RH nem ortamında 110 mikron kalınlığında mono sheet type basınç ölçer kullanılarak, 5 farklı kesme zımbası ve 3 farklı kesme boşluğu ile hazırlanmış kalıp içerisine konularak; kesme zımbalarının kesme esnasında ve sonrasında parçaya uygulamış olduğu basınç değişimleri gözlemlenmiştir. Yük ölçümleri için Ametek chatillon (yük ölçer) kullanılmıştır. Özel bir düzenek yardımı ile fuji filmi kesen zımbaların ihtiyacı olan kuvvet, yük ölçere bağlanan bir baskı aparatı ile ölçülmüştür (Resim 5.2).



Resim 5.2. Kuvvet ve basınç ölçümü

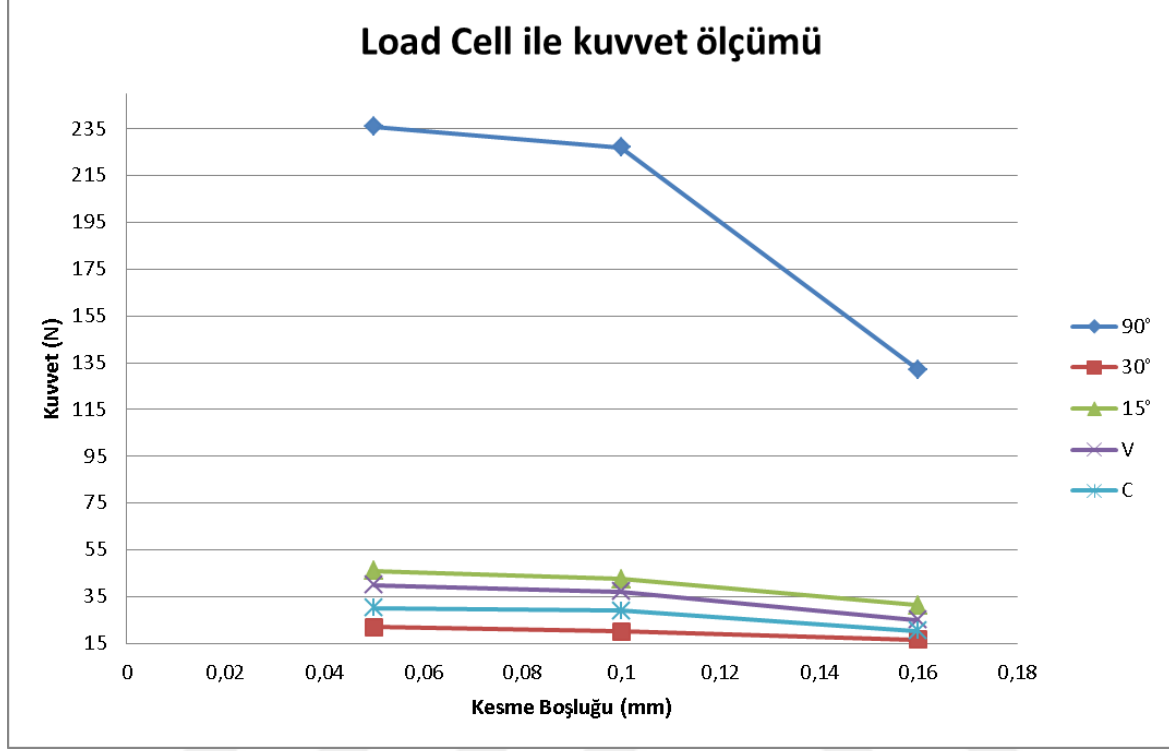
Resim 5.3'de 15°, 30°, 90°, V, C şeklinde hazırlanan kesme zımba ağızları ile kesme kalıbına verilen 0,05 mm, 0,1 mm ve 0,16 mm kesme boşluğu ölçüleri neticesinde kesme sonrası elde edilen renklenmeler ve kesilen pulların renklenmesi gösterilmiştir. Resim 5.3'de görüldüğü gibi Zımba baskı yüzeyi arttıkça basınç artmış ve basınç ölçer içerisindeki kapsüller patlayarak koyu renk belirmiştir. Açılı zımbalar ile V, C tipi zımbaların kesme noktalarının mono sheet'e girdiği kısımlarda basınç nedeni ile renklenme artmıştır. Kesilen parçalar incelendiğinde en yüksek basınç 90° zımbada tespit edilmiştir. Kesme boşluğunun artması kesme basıncını azaltmış ve renklenme azalmıştır. Kesme zımbasının açısı arttıkça kesme basıncının düştüğü tespit edilmiştir.



Resim 5.3. Kesme zımbalarına göre basınç dağılımları ve renk değişimleri

Kesme boşluğunun çok küçük olması, kesme işlemi için daha çok kuvvet ihtiyacı doğurur diğer bir taraftan kesme boşluğunun çok büyük olması da kesme kenarlarında çapaklanmaya sebep olur (Groover, 2007: 446). Kesme boşluğunun az olması neticesinde zımba malzemeyi keserken sıkışır ve basınç artar. Kayma gerilimi ve basınç gerilmesi, boşluk değerlerinin bir sonucu olarak basınç değişimlerinde etkili olmuştur. Şekil 5.1'de

kesme boşluğunun artışı ile düşen kesme kuvveti gösterilmiştir. Yapılan tüm delme işlemlerinde en küçük kesme boşluğu değerlerinde basınç en yüksek ölçülmüştür.



Şekil 5.1. Kesme boşluğuna bağlı kuvvet değişimi (fuji film kesim)

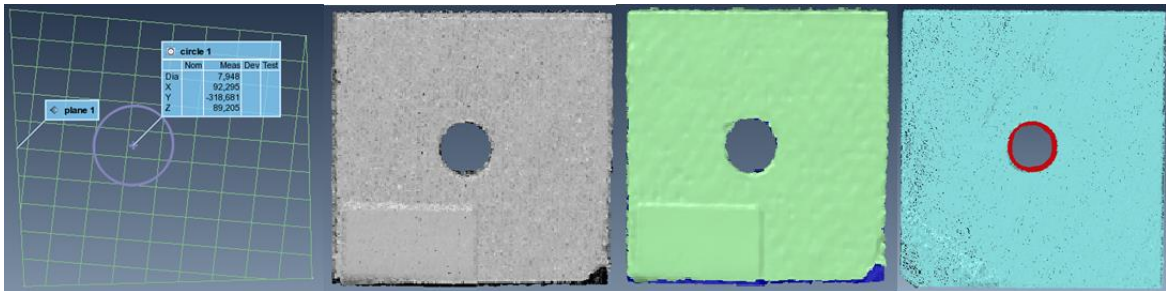
### 5.2.2. Romer Absolute Arm Line lazer tarayıcı ile boyut kontrolü

3 boyutlu lazer tarama teknolojisi temelde bir lazer ve bu lazer ışınının algıladığı alanı algılayan kamera teknolojisi çalışma prensibi ile 3 boyutlu nokta bulutu elde eden sistemlerdir. Lazer tarama sistemleri lazer ışınının parça üzerine yansması ve bu ışının geri yansması sonucu kameranın lazer ışınının üzerinde düşürdüğü noktaların koordinatlarının belirlenmesi ile datayı elde eder. Lazer teknolojisi line lazer veya cross lazer olarak kullanılır. Line lazer scanner tek çizgi lazeri ifade eder, cross lazer scanner çoklu çizgi lazeri ifade etmektedir. Line lazer scanner teknolojisi ağırlıklı olarak manuel koordinat arm sistemleri ile birlikte kullanılırken cross lazer scanner sistemleri CMM (koordinat measuring machine) sistemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Romer, otomotiv, havacılık ve uzay, güç üretimi / rüzgar enerjisi, şekillendirme, döküm, makina imalatı, spor ekipmanı, boru ve tüp tesisatı, tarım ve ağır ekipman, demiryolu, gemi ve tekne inşası endüstrilerinde; sac metal parça, kalıplar ve şablon, işlenmiş parça, kompozit parça kontrolü, tersine mühendislik vb. ölçümlerinde kullanılmaktadır.

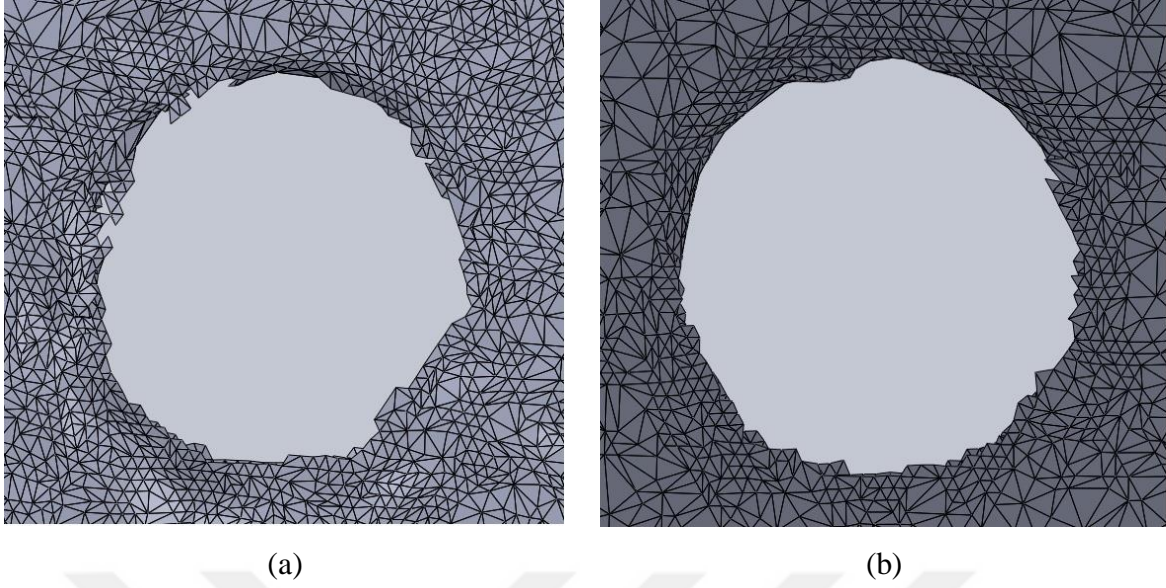


Resim 5.4. Romer Absolute Arm ile lazer tarama

Zımba ile delme işlemi uygulanan deney numuneleri ayrı ayrı mengeneye bağlanarak sabitlendi daha sonra RA-7320 SI HEXACON ROMER ABSOLUTE ARM ile delik çapı için 3 mm, yüzey tarama için 6 mm prob kullanılarak ölçümler yapıldı (Resim 5.4). Alınan datalar PolyWorks Inspector premium ile analiz edildi. Delik çapı ve 3B ölçüleri tespit edilen numunelerin mesh yapısı incelendi daha sonra STL dosyası olarak çıktı alınarak Solidworks CAD (computer aided drawing) programında incelendi (Resim 5.5).



Resim 5.5. Lazer tarama ile test numunelerinin 3D model ve delik çapı tespiti



Resim 5.6. Deliklerin mesh yapısı (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit

Lazer tarama sonrası deney numunelerinin mesh yapısı incelendiğinde nano kompozit yapıların daha rijit ve düzenli kesme yüzeyine sahip olduğu görüldü (Resim 5.6).

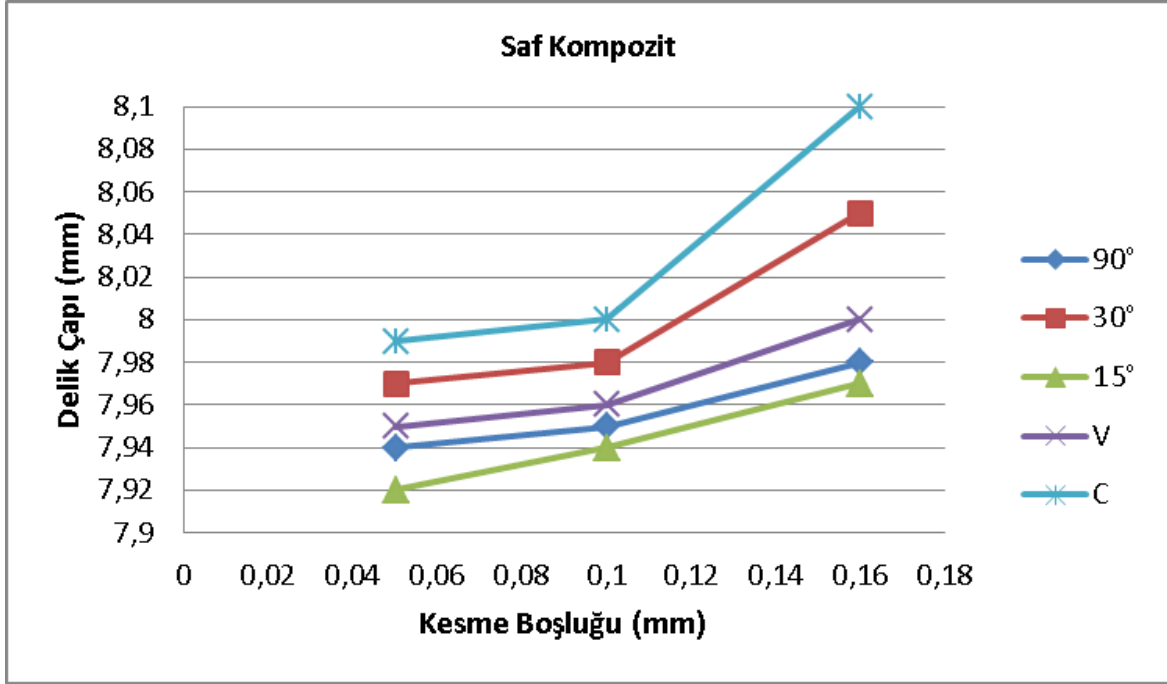
### 5.2.3. Zımba ve kalıp kullanarak delme test parametreleri ve önemli bulgular

Beş farklı kesme zımba profili ve üç farklı kesme boşluğu parametreleri ile delinen saf ve katkılı kompozit malzemelerin delik kaliteleri analiz edilmiştir. Çizelge 5.4'te zımba ile kesme neticesinde delaminasyon ve parçalanmanın olmadığı, yapılan delme işlemlerinin çoğunluğunun çapaksız olduğu fakat kesme boşluğunun artması ile çapaklanmanın arttığı belirtilmiştir. Ayrıca zımba ile kesme işleminin delik çevresinde yüzey sertleşmesine sebep olmadığı görülmüştür.

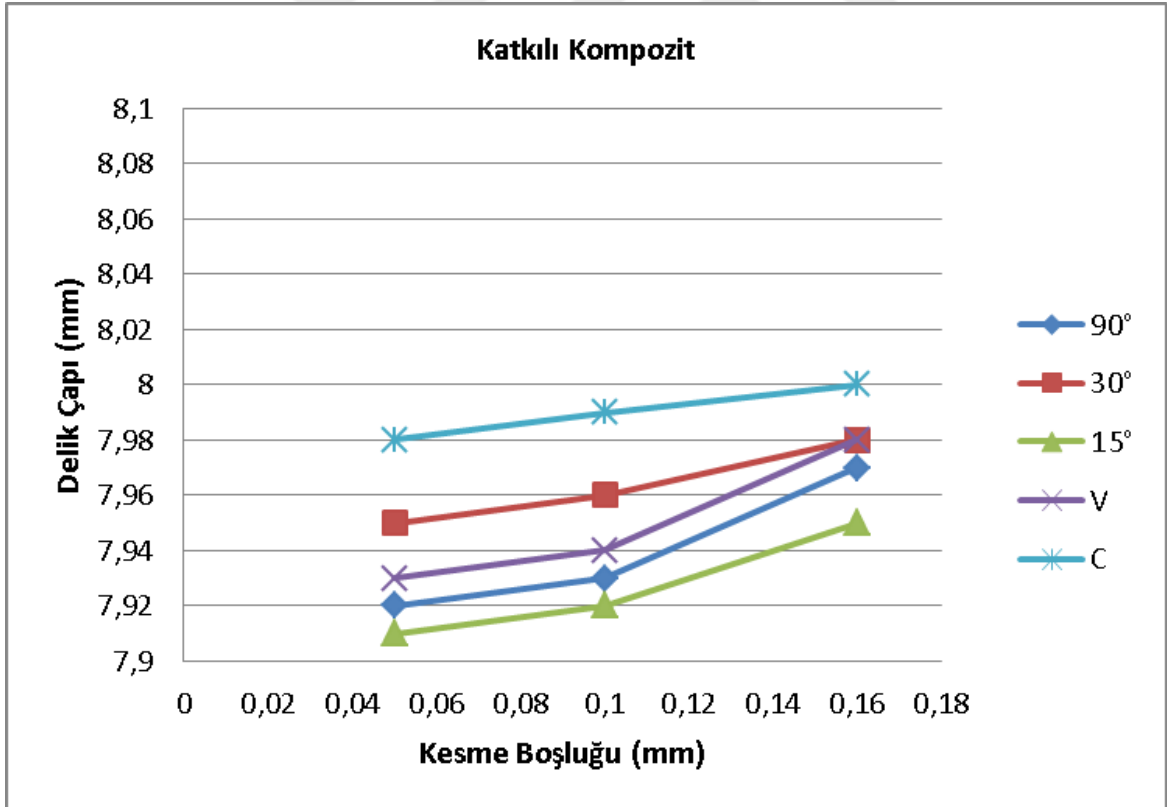
Çizelge 5.4. Zımba ile kesme parametreleri ve delik kalitesi

Deney No	Zımba Çapı (mm)	Zımba Kesme Formu	Kesme Boşluğu (mm)	Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Delik Kalitesi				
					Delik Çapı (mm)	Delaminasyon	Parçalanma	Çapaklanma	Yüzey Sertliği (Ba)
1	8	90°	0,05	saf kompozit	7,94	yok	yok	yok	42-48
				katkılı kompozit	7,92	yok	yok	yok	50-56
2	8	90°	0,1	saf kompozit	7,95	yok	yok	yok	42-48
				katkılı kompozit	7,93	yok	yok	yok	50-56
3	8	90°	0,16	saf kompozit	7,98	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,97	yok	yok	yok	50-56
4	8	30°	0,05	saf kompozit	7,97	yok	yok	yok	42-48
				katkılı kompozit	7,95	yok	yok	yok	50-56
5	8	30°	0,1	saf kompozit	7,98	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,96	yok	yok	yok	50-56
6	8	30°	0,16	saf kompozit	8,05	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,98	yok	yok	yok	50-56
7	8	15°	0,05	saf kompozit	7,92	yok	yok	yok	42-48
				katkılı kompozit	7,95	yok	yok	yok	50-56
8	8	15°	0,1	saf kompozit	7,94	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,92	yok	yok	yok	50-56
9	8	15°	0,16	saf kompozit	7,97	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,95	yok	yok	yok	50-56
10	8	V	0,05	saf kompozit	7,95	yok	yok	yok	42-48
				katkılı kompozit	7,93	yok	yok	yok	50-56
11	8	V	0,1	saf kompozit	7,96	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,94	yok	yok	var	50-56
12	8	V	0,16	saf kompozit	8	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,98	yok	yok	var	50-56
13	8	C	0,05	saf kompozit	7,99	yok	yok	yok	42-48
				katkılı kompozit	7,98	yok	yok	yok	50-56
14	8	C	0,1	saf kompozit	8	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	7,99	yok	yok	var	50-56
15	8	C	0,16	saf kompozit	8,1	yok	yok	var	42-48
				katkılı kompozit	8	yok	yok	yok	50-56

Nanopartikül katkısının malzemeye dayanıklılık katarak ölçüsel olarak deformasyonunun önüne geçtiği görüldü. En büyük delik ölçüsü C tipi, en düşük delik ölçüsü 15° kesme formu zımba kullanılarak elde edildi. Katkılı ve katkısız kompozit malzemelerin kesilmesinde, kesme boşluğunun artması ile delik çapının arttığı görülmüştür. Saf kompozit malzemelerin delik çapının, katkılı kompozit malzemelerin delik çapına göre daha büyük olduğu ölçüldü. Şekil 5.2’de saf kompozit malzemelerin farklı kesme profiline ve kesme boşluğuna sahip zımbalar ile kesilmesi neticesinde farklı delik ölçüsüne sahip oldukları gösterilmiştir. Bu farkın katkılı kompozitlere göre daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 5.3). ÇCKNT katkısı ile kompozit malzemelerin fiber ve matris bütünlüğü artarak işlenebilirliği iyi ölçüde etkilenmiştir. Katkılı kompozit malzemelerin 8 mm çapında zımba ölçüsü ile elde edilen delik çaplarının, zımba ölçüsüne yakın değerlerde olduğu ölçülmüştür. Saf kompozitlerin delik ölçülerinin epoksi yapının deformasyonu sebebi ile katkılı kompozite göre zımba çapından biraz daha farklı olduğu ölçülmüştür.



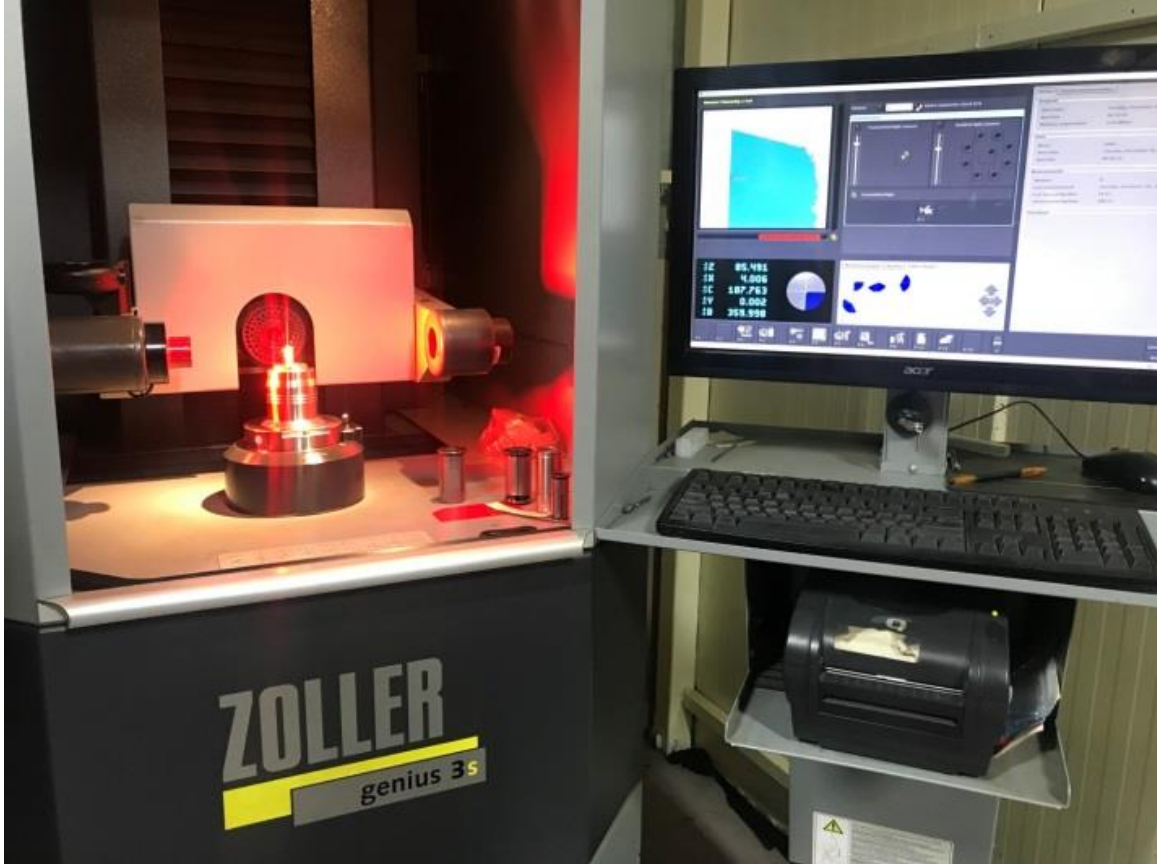
Şekil 5.2. Kesme boşluğuna bağlı delik çapı değişimi (saf kompozit kesim)



Şekil 5.3. Kesme boşluğuna bağlı delik çapı değişimi (katkılı kompozit kesim)

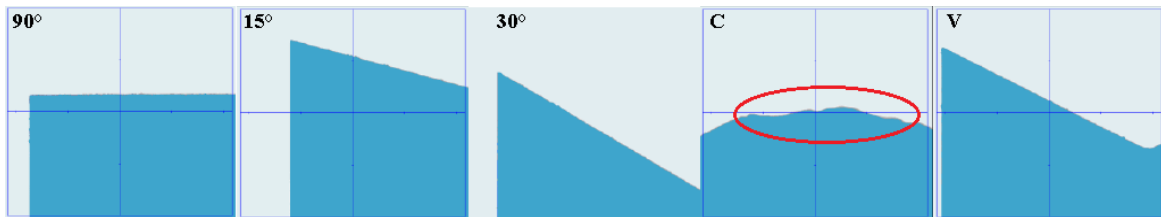
#### 5.2.4. Zoller Genius 3s ile zımbaların aşınma kontrolü

Zoller Genius 3s metal kesme aletleri için üniversal ölçüm cihazıdır. Kesme işlemi sonrası, delik elde etmek için kullanılan tüm zımbaların kesme ağızları Zoller Genius cihazı ile incelendi ve aşınmalar tespit edildi (Resim 5.7).



Resim 5.7. Zoller Genius 3s ile takım aşınması kontrolü

Her biri 62-64 HRC sertliğe sahip zımbalar kullanılarak, her boşluk değeri için üç ayrı kesim yapıldı ve yapılan inceleme neticesinde C tipi kesme formu bulunan zımbanın sahip olduğu zayıf kesme kenarlarında aşınmalar tespit edilmiştir. Diğer zımbalarda herhangi bir aşınma görülmemiştir (Resim 5.8).



Resim 5.8. Zımbalarda aşınma kontrolü



### 5.2.5. Kesilen pulların analizi

15°, 30°, 90°, V, C tipi kesme ağızlı zımbalar ile kesilen kompozit tabakalardan çıkan pullar incelendiğinde; zımba ve delik çapından daha büyük parçaların elde edildiği görüldü. 90° düz kesme ağızlı zımbanın kullanıldığı deneyde kesilen pulun düz, alt ve üst yüzeyinin paralel olduğu tespit edildi. Açılı kesilen zımbalardan çıkan pulların kesme noktalarının düz, kopma noktalarının ise deforme olduğu görüldü. V tipi zımbanın kullanıldığı kesme işleminden çıkan pulların zımba ağız yapısını aldığı, kopma noktalarının çapaklı ve sivri olduğu tespit edildi. C tipi zımbadan elde edilen pullar incelendiğinde çarpık ve zımba ağız formunu aldığı görüldü. Nano kompozit tabakalardan çıkan pulların kompozit tabakalardan çıkan pullara göre daha az deforme olduğu, ölçüsel olarak daha kararlı olduğu tespit edildi (Resim 5.9).



Resim 5.9. Farklı zımba profilleri ile kesilen pulların analizi

### 5.3. Parmak Freze Kullanarak Orbital Delme Bulguları

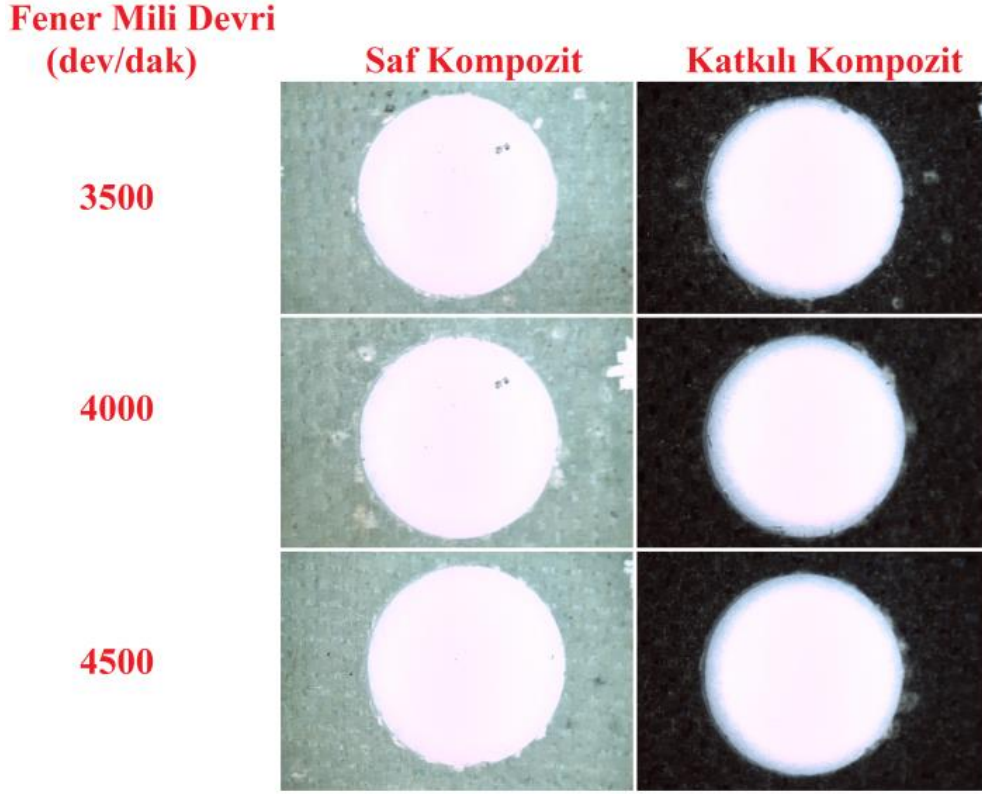
#### 5.3.1. Tezgah işleme parametreleri ve delik kalitesi

Katkılı ve katkısız kompozit tabakaların orbital delinmesinde kullanılan parametreler ve elde edilen delik kaliteleri Çizelge 5.5 'te gösterilmiştir. Freze çakısı kullanılarak yapılan delme işleminde istenilen delik çapına  $\pm 0,02$  mm hassasiyet ile ulaşılmıştır. Delme öncesi ve sonrası, delik etrafında yapılan sertlik ölçümlerine göre ortalama sertliğin değişmediği tespit edilmiştir.

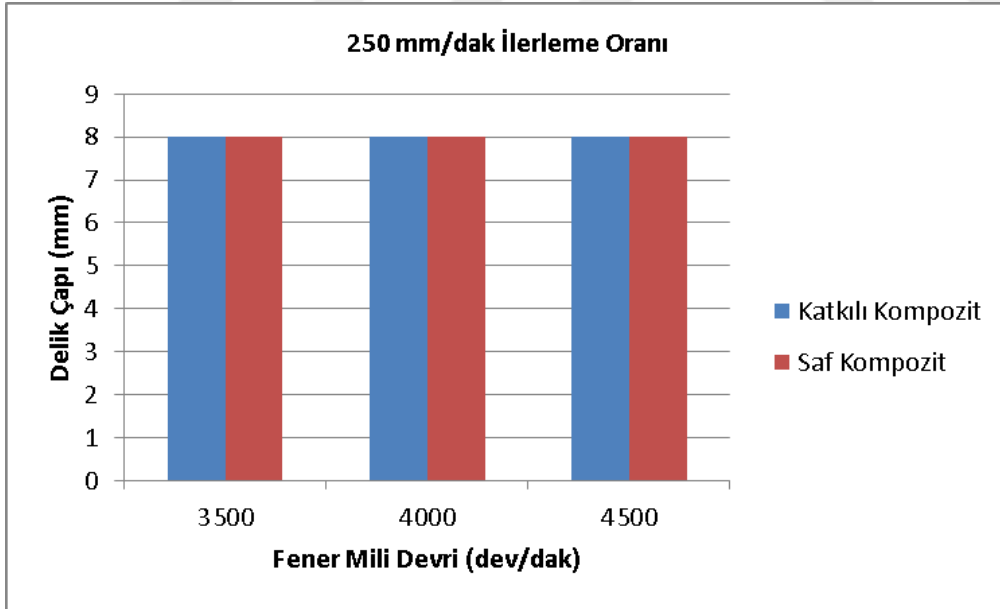
Çizelge 5.5. Tezgah işleme parametreleri ve delik kalitesi

Deneysel No	Takım Çapı (mm)	Takım Ağız Sayısı	Fener Mili Devri (dev/dak)	İlerleme Oranı (mm/dak)	Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Delik Kalitesi				Sertlik Değeri (Ba)
						Delik Çapı (mm)	Delaminasyon	Parçalanma	Çapaklanma	
1	6	6	3500	250	saf kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	yok	42-48
					katkılı kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	yok	50-56
2	6	6	4000	250	saf kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	yok	42-48
					katkılı kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	yok	50-56
3	6	6	4500	250	saf kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	yok	42-48
					katkılı kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	yok	50-56
4	6	6	500	1500	saf kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	var	50-56
5	6	6	500	1000	saf kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	var	50-56
6	6	6	500	500	saf kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	8 $\pm$ 0,02	yok	yok	var	50-56

Delaminasyon her iki kesme parametresi ile artar, bu da kompozit delaminasyonun daha yüksek kesme hızı ve daha yüksek ilerleme değerleri ile daha büyük olduğu anlamına gelir (Davim ve Reis, 2003, 2004). Fakat bu çalışmada delinen kompozit tabakaların alt kısmı delik çapından 3 mm daha geniş bir deliğe sahip alüminyum aparat ile desteklenerek delaminasyon engellenmiştir. Nikon stereo mikroskop ile elde edilen delik görüntüleri detaylı şekilde incelendiğinde çapaksız, düzgün kenar kalitesine sahip oldukları görülmektedir (Resim 5.10).

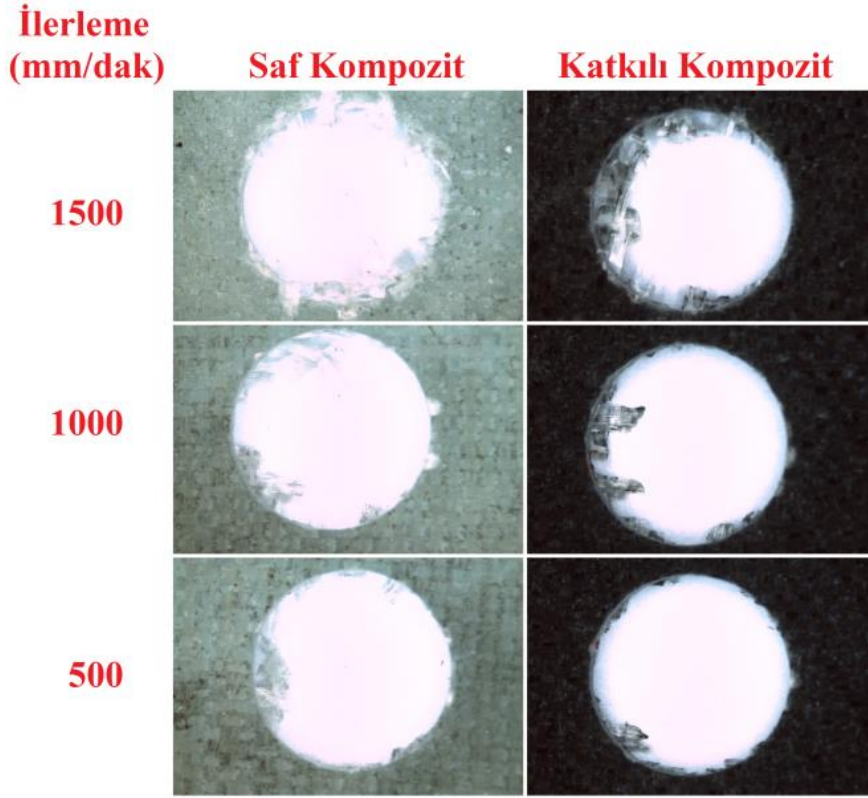


Resim 5.10. Sabit 250 mm/dak ilerleme oranı ile çapaksız deliklerin elde edilmesi

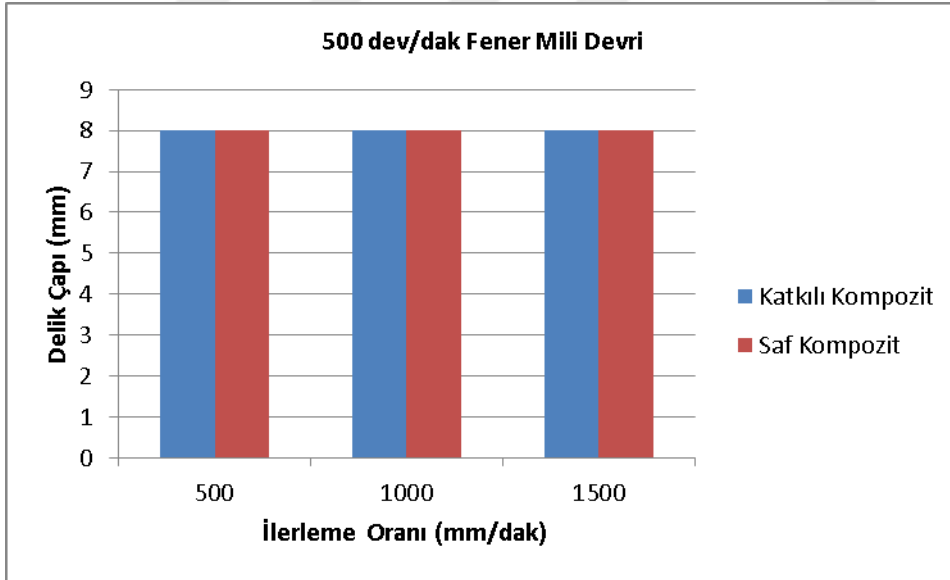


Şekil 5.4. 250 mm/dak sabit ilerleme ve artan fener mili devrine bağlı delik çapı ölçüsü

Yüksek fener mili devirleri ve düşük ilerleme değerlerine rağmen elde edilmek istenilen 8 mm ölçüsüne hassas bir şekilde ulaşıldı (Şekil 5.4). Kullanılan 6 ağızlı parmak freze çakısı ile her devirde yeterince talaş kaldırılması neticesinde talaş yığılması ve sıkışması görülmedi.



Resim 5.11. Sabit 500 dev/dak fener mili devri ile elde edilen çapaklı delikler



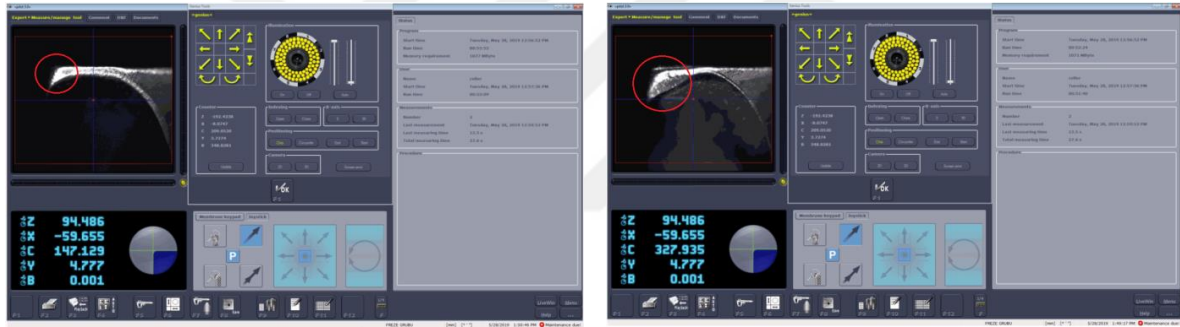
Şekil 5.5. 500 dev/dak Sabit fener mili devri ile artan ilerleme değerine bağlı çapaklanma

500 dev/dak sabit fener mili devri ile tezgâh ilerleme değeri artırıldıkça çapaklanmanın arttığı görüldü (Resim 5.11). 500 mm/dak ilerleme değerinde diğer yüksek ilerleme değerlerine göre çapaklanmanın düşük olduğu görülmektedir. Düşük hızdaki sabit fener mili değerinde ilerleme arttıkça freze çakısının yeterince talaşı malzeme yüzeyinden

taahye edemediği için delik çevresinde çapaklanma gözlemlendi. Kompozit plakalar işleme esnasında özel tasarlanmış alüminyum menjelere bağlandığı, alt ve st kısımlardan sabitlendiği için herhangi bir delaminasyon ve parçalanma görülmemiştir. Yapılan orbital delme işleminde kullanılan özel parmak freze ile hem yanal hemde yüzeyden talaş kaldırıldığı için istenilen 8 mm delik çapı ölüsüne  $\pm 0,02$  mm hassasiyet ile ulaşılmıştır (şekil 5.5).

### 5.3.2. Zoller Genius 3s ile takım aşınması kontrolü

Nanopartikül katkılı ve katkısız kompozit tabakaların işlenmesinde kullanılan freze akılarının aşınmaları Zoller Genius 3s tezgahında analiz edilmiştir. Cam elyaf fiber ve epoksi karışımı kompozit yapının; freze çakısının uç ve yan duvarlarında aşınmalara sebep olduğu, ÇCKNT katkısı ile aşınmanın daha da arttığı tespit edilmiştir (Resim 5.12).

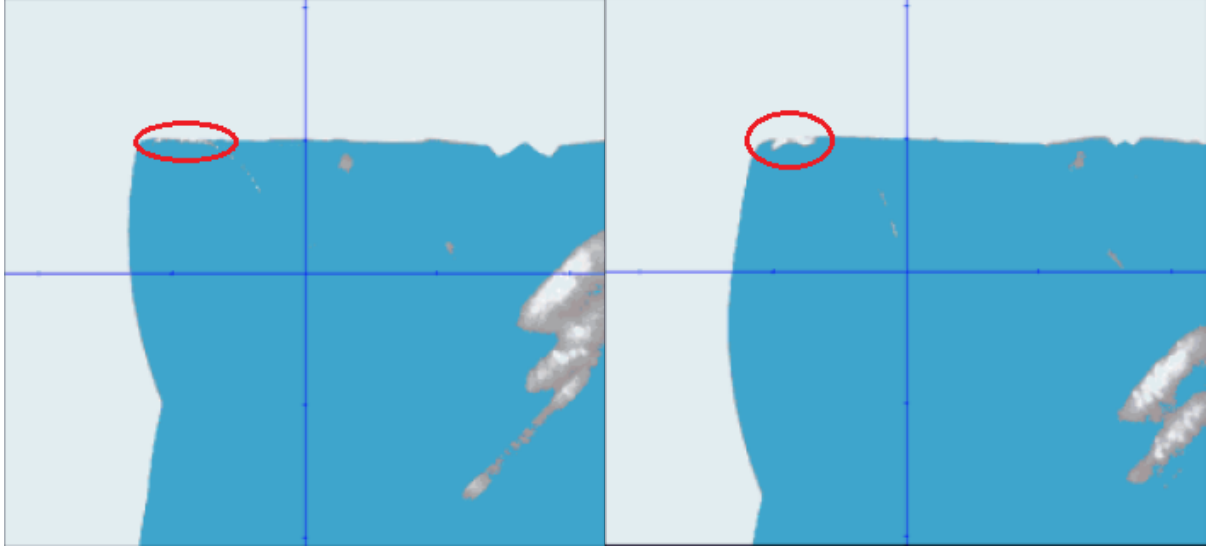


(a)

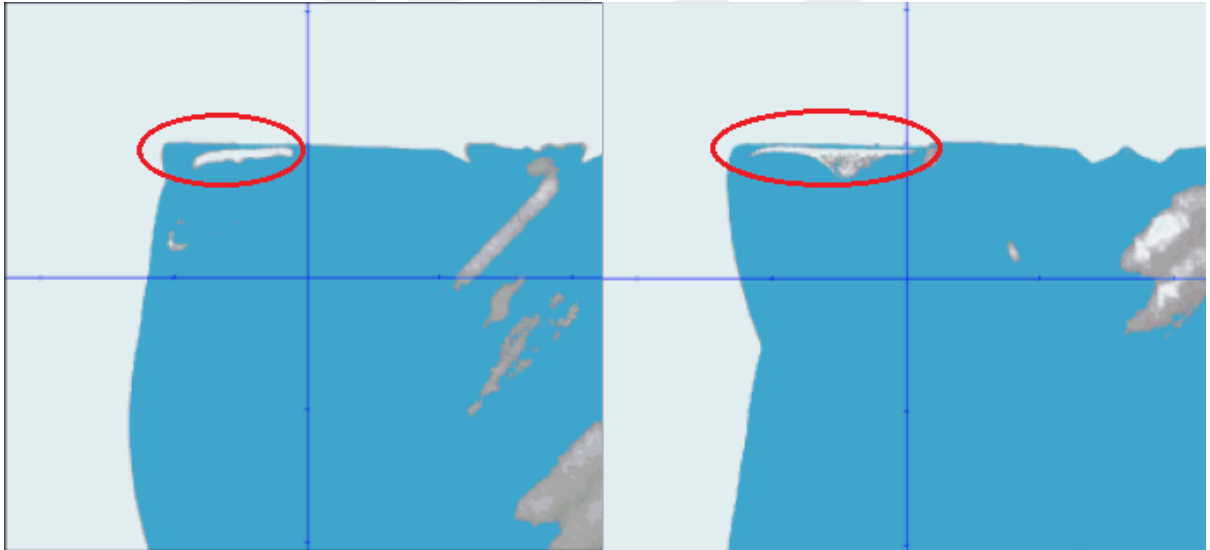
(b)

Resim 5.12. Freze akısı kanat aşınması (a) Saf kompozit kesim (b) Katkılı kompozit kesim

Resim 5.13 ve Resim 5.14 freze akılarının kompozit yapıya temas ettiği bölgelerin aşındığını, aşınmanın kesme bıçaklarının uç kısımlarından freze gövdesine doğru ilerlediğini göstermektedir. Katkılı kompozit tabakalarda bulunan katkı maddesinin freze çakısının alın bölgelerinde de aşınmaları arttırdığı görüntülenmiştir.



Resim 5.13. Freze akısı alın aşınması saf kompozit kesim



Resim 5.14. Freze akısı alın aşınması katkılı kompozit kesim

## 5.4. Matkap Kullanarak Konvansiyonel Delme Bulguları

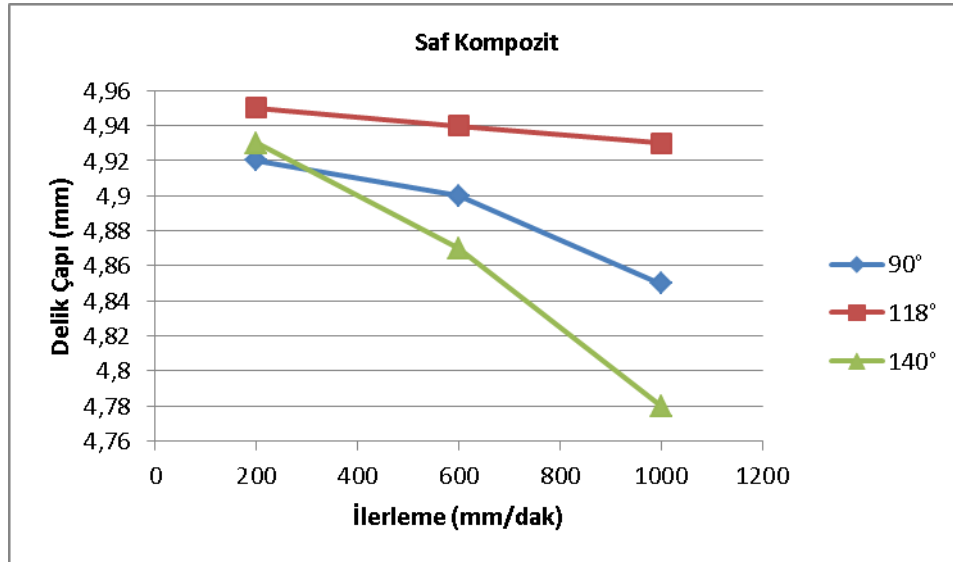
### 5.4.1. Test parametreleri ve sonuçları

Delme operasyonlarında kullanılan işleme parametreleri ve delik kalitesi değerleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir. Farklı işleme parametreleri ile yapılan kesme işlemlerinde delaminasyon ve çapaklanma tespit edildi; delik çevresinde sertlik değişimine veya parçalanmaya rastlanmamıştır.

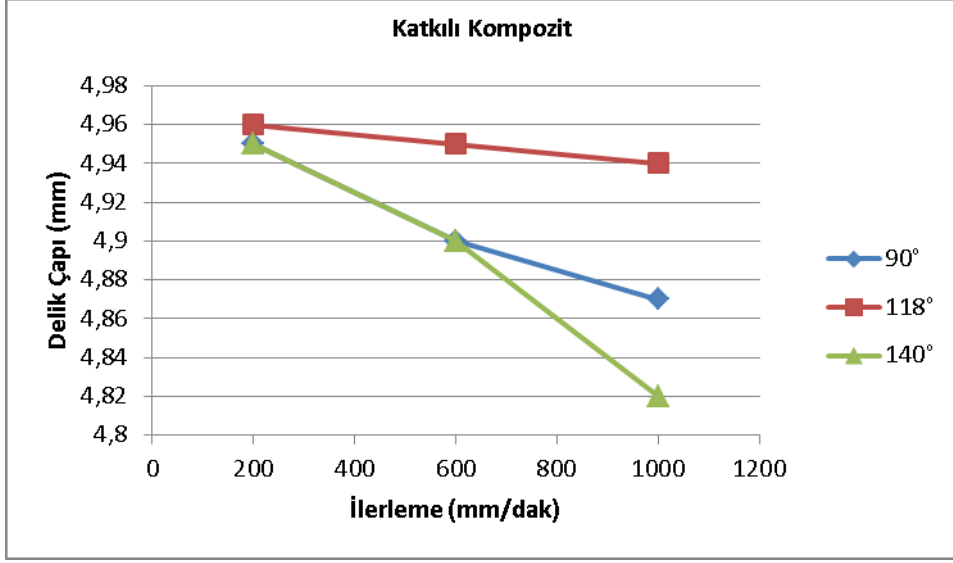
Çizelge 5.6. Test parametreleri ve sonuçları

Deney No	Takım Çapı (mm)	Nokta Açısı (derece)	Fener Mili Devri (dev/dak)	İlerleme Oranı (mm/dak)	Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Delik Kalitesi			Sertlik Değeri (Ba)	
						Delik Çapı (mm)	Delaminasyon	Parçalanma		Çapaklanma
1	5	90	1000	200	saf kompozit	4,92	yok	yok	yok	42-48
					katkılı kompozit	4,95	yok	yok	yok	50-56
2	5	90	1000	600	saf kompozit	4,9	var	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	4,9	yok	yok	var	50-56
3	5	90	1000	1000	saf kompozit	4,85	var	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	4,87	var	yok	var	50-56
4	5	118	1000	200	saf kompozit	4,95	yok	yok	yok	42-48
					katkılı kompozit	4,96	yok	yok	yok	50-56
5	5	118	1000	600	saf kompozit	4,94	yok	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	4,95	yok	yok	var	50-56
6	5	118	1000	1000	saf kompozit	4,93	yok	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	4,94	yok	yok	var	50-56
7	5	140	1000	200	saf kompozit	4,93	yok	yok	yok	42-48
					katkılı kompozit	4,95	var	yok	yok	50-56
8	5	140	1000	600	saf kompozit	4,87	var	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	4,9	var	yok	var	50-56
9	5	140	1000	1000	saf kompozit	4,78	var	yok	var	42-48
					katkılı kompozit	4,82	yok	yok	var	50-56

Ø5 mm matkap kullanılarak elde edilen deliklerin matkap çapından küçük olduğu; matkap çapına en yakın delik ölçüsünün 118° matkap ile sağlandığı tespit edilmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de fener mili devri değeri sabit tutularak ilerleme değeri arttıkça delik çapı ölçüsünün azaldığı görülmektedir.

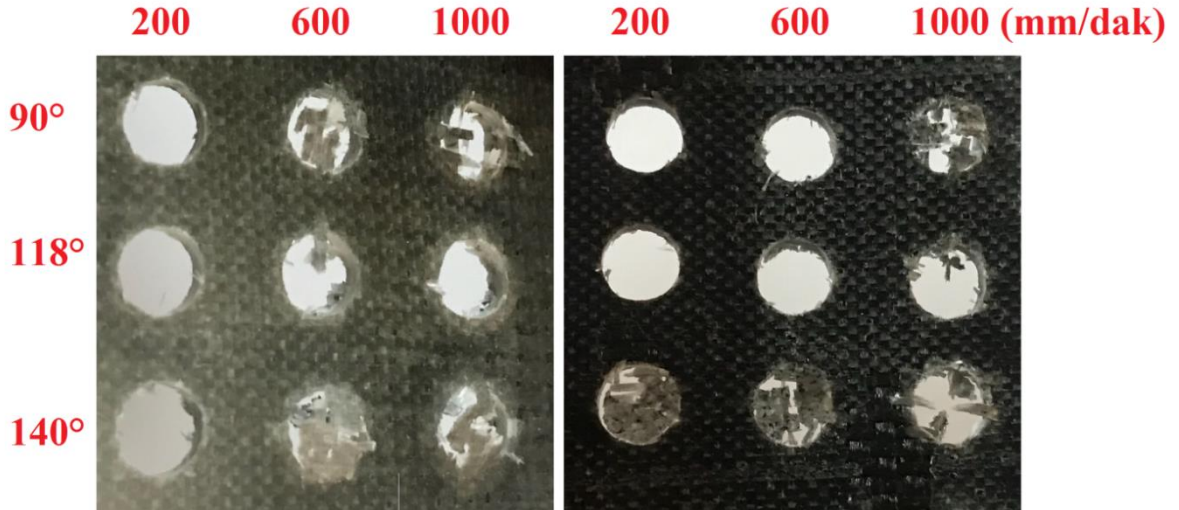


Şekil 5.6. Matkap nokta açısı ve ilerleme oranına bağlı delik çapı (saf kompozit delme)



Şekil 5.7. Matkap nokta açısı ve ilerleme oranına bağlı delik çapı (katkılı kompozit delme)

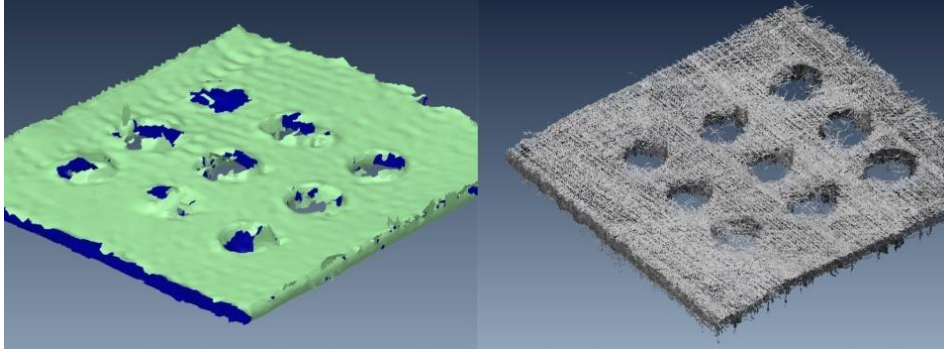
Delaminasyon her iki kesme parametresi ile artar, bu da kompozit delaminasyonun daha yüksek kesme hızı (fener mili devri) ve daha yüksek ilerleme değerleri ile daha büyük olduğu anlamına gelir (Davim ve Reis, 2003, 2004). Katkılı ve katkısız kompozit plakalardaki en belirgin delaminasyon 140° matkap nokta açısı, en yoğun çapaklanma ise 90° matkap nokta açısı ile 1000 dev/dak tezgâh devri ve 1000 mm/dak ilerleme değerlerinde görülmüştür. Matkap ucu açısı arttıkça çapaklanma artmıştır, sabit tezgâh devri değeri ile matkap ucu açısı ve ilerleme değeri arttıkça delaminasyon artmıştır.



Resim 5.15. Saf ve katkılı kompozit plakaların delme sonrası çapaklanması

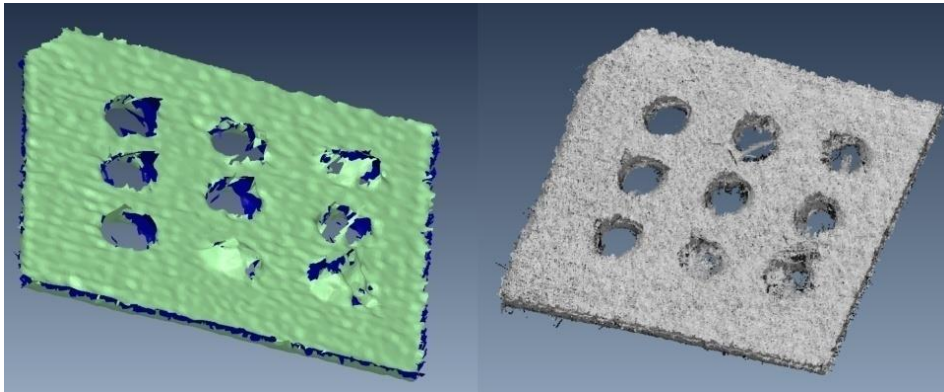


Sabit 1000 dev/dak tezgâh devri ile 200 mm/dak ilerleme değerlerinde 90° ve 118° matkap uçları kullanılarak yapılan delme işleminde giriş ve çıkış kısımlarında çapaklanma görülmemiş, 140° matkap ucu ile yapılan delik delme işleminde katkılı kompozit tabaka delik çıkışında blok şeklinde delaminasyon görülmüştür (Resim 5.15). Sabit 1000 dev/dak tezgâh devri ile 600 mm/dak ve 1000 mm/dak ilerleme değerlerinde 90° ve 118° matkap uçları kullanılarak yapılan delme işleminde giriş ve çıkış kısımlarında çapaklanma görülmüş, 140° matkap ucu ile yapılan delik delme işleminde giriş ve çıkış kısımlarında yoğun çapaklanma görülmüştür (Resim 5.15). En uygun çapaksız delme operasyonu 118° matkap kullanımı, 1000 dev/dak tezgâh devri ve 200 mm/dak ilerleme parametreleri ile elde edilmiştir (Resim 5.16).



Resim 5.16. Katkısız kompozit plakaların Polyworks ile analizi

Yüksek ilerleme değeri ve 140° matkap ucu ile delme işleminde katkılı kompozit malzemenin delik çıkışında blok şeklinde delaminasyon görülürken, saf kompozit plakanın delik çıkışında parçalanma şeklinde delaminasyon olmuştur. ÇCKNT katkısının kompozit yüzeyindeki epoksi karışımında bağlayıcı olduğu görülmüştür (Resim 5.17).



Resim 5.17. ÇCKNT katkılı kompozit plakaların Polyworks ile analizi

## 5.5. Freze Çakısı Kullanarak Yüzey Frezeleme Bulguları

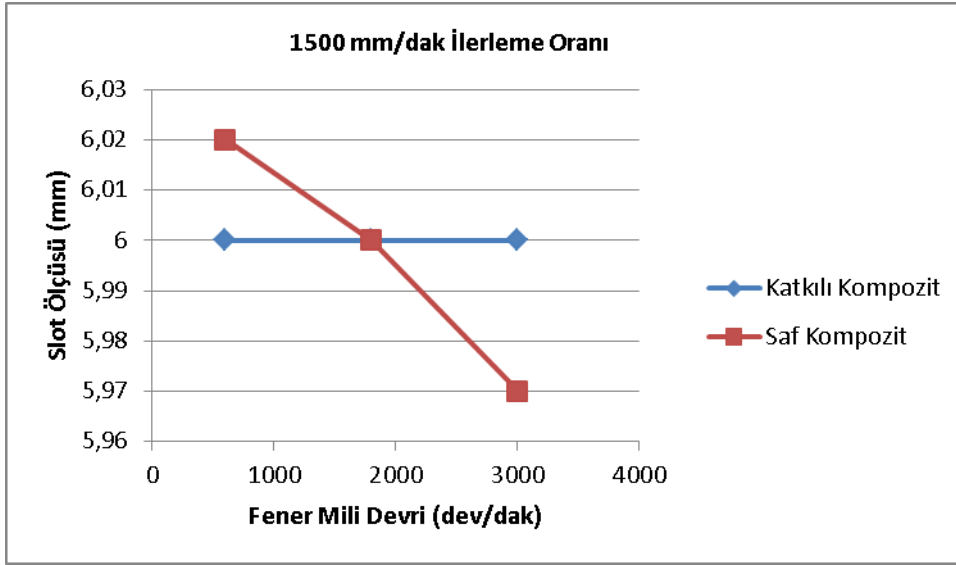
### 5.5.1. Yüzey frezeleme test parametreleri ve slot kaliteleri

Makine işleme parametreleri ve yüzey frezeleme kalitesi bilgileri işlem sırasına göre listelenmiştir. Çizelge 5.7 işlenebilirlik ve talaş kaldırma sonuçlarının deneysel verilerini göstermektedir. Ortalama tepki, her bir parametre için farklı seviyelerde performans karakteristiğinin ortalama değerini ifade etmektedir.

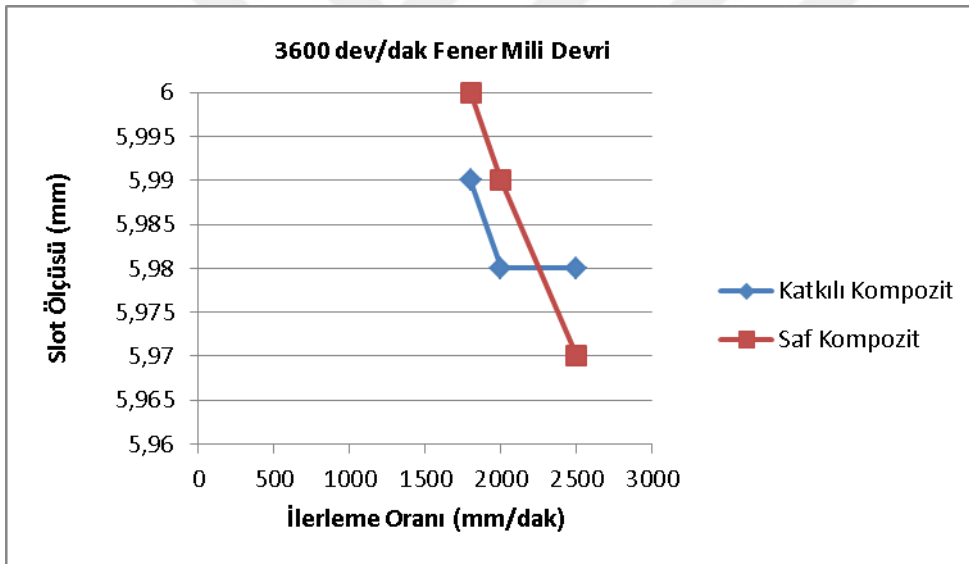
Çizelge 5.7. İşlem parametreleri ve frezeleme sonuçları

Deney No	Takım Ölçüsü (mm)	Takım Ağız Sayısı (Z)	Fener Mili Devri (dev/dak)	İlerleme Oranı (mm/dak)	Kesme Pasosu (mm)	Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Kama Kanalı (Slot Kalitesi)				Yüzey Pürüzlülüğü			
							Slot Ölçüsü (mm)	Delaminasyon	Parçalanma	Çapaklanma	Sertlik Değeri (Ba)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
1	6	6	600	1500	0,25	saf kompozit	6,02	yok	yok	yüksek	42-48	25,055	33,43	137,816
						katkılı kompozit	6,00	yok	yok	yüksek	50-56	2,959	4,03	22,542
2	6	6	1800	1500	0,25	saf kompozit	6,00	yok	yok	orta	42-48	4,011	5,658	26,597
						katkılı kompozit	6,00	yok	yok	orta	50-56	1,408	1,803	9,753
3	6	6	3000	1500	0,25	saf kompozit	5,97	yok	yok	düşük	42-48	1,961	2,507	13,417
						katkılı kompozit	6,00	yok	yok	düşük	50-56	1,25	1,585	8,359
4	6	6	3600	1800	0,25	saf kompozit	6,00	yok	yok	düşük	42-48	1,638	2,035	10,215
						katkılı kompozit	5,99	yok	yok	düşük	50-56	1,045	1,322	7,03
5	6	6	3600	2000	0,25	saf kompozit	5,99	yok	yok	orta	42-48	2,341	2,928	14,619
						katkılı kompozit	5,98	yok	yok	orta	50-56	1,312	1,731	10,056
6	6	6	3600	2500	0,25	saf kompozit	5,97	yok	yok	yüksek	42-48	8,393	10,485	41,592
						katkılı kompozit	5,98	yok	yok	yüksek	50-56	1,873	2,276	10,153

Deneysel sonuçlardan, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı açıkça görülmektedir. Benzer sonuçlar Gupta ve Kumar (2015) tarafından da rapor edilerek, ilerleme hızının artışının yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olduğu bildirilmiştir. Kompozit malzemelerin yüzey frezelenmesi öncesi ve sonrası slot çevresinde sertlik ölçümleri yapılarak kıyaslandı ve ortalama yüzey sertliklerinin değişmediği görüldü. Düşük fener mili devri değerleri ve yüksek ilerleme değerlerinde yapılan frezeleme işlemlerinde yüksek çapaklanma görüldü. Kesici takımın yeterince talaş ortamdan uzaklaştırmadan ilerlemesi çapaklanmaya neden olmuştur. Özel tasarlanmış alüminyum aparatlara bağlanarak işlenen deney numunelerinde Çizelge 5.7'de belirtildiği gibi delaminasyon ve parçalanma görülmemiştir.

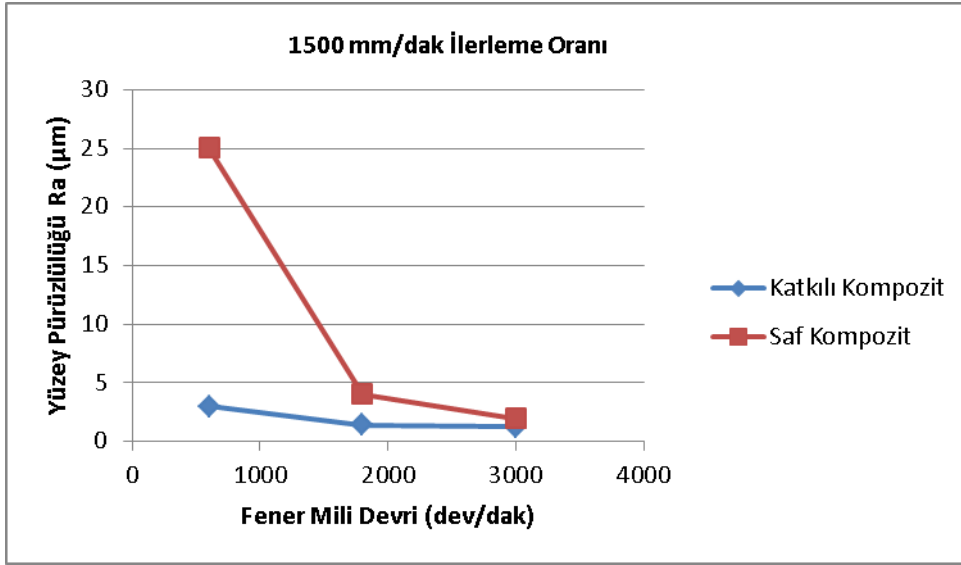


Şekil 5.8. Artan fener mili devrine bağlı slot genişliği

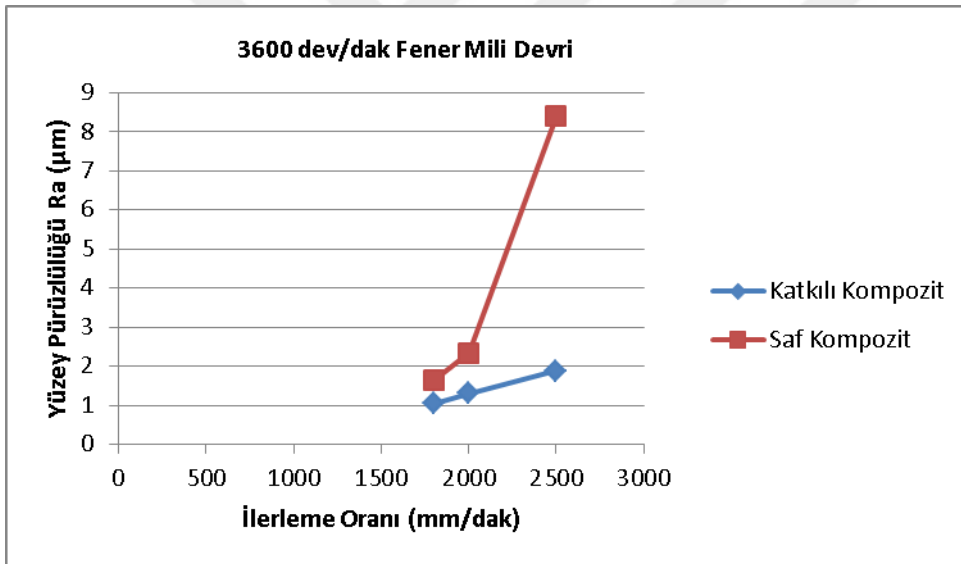


Şekil 5.9. Artan ilerleme oranına bağlı slot genişliği

6 mm çapında 6 kesme ağızı bulunan parmak freze ile elde edilen slot ölçüleri fener mili devri ve ilerleme oranından etkilenmiştir. Artan ilerleme oranı slot ölçüsünün freze çakısının çap ölçüsünden daha küçük ölçüde olmasına sebep olmuştur. Freze çakısının yeterince talaş kaldırmadan ilerlemesi, malzeme yığılması ve esnemesi sebebi ile ölçüsel farklılıklar görülmüştür. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da görüldüğü gibi ÇCKNT katkıli kompozit yapıların esnemeyen rijit yapısı sebebi ile daha iyi talaş kaldırma işlemi gerçekleşmiş, istenilen slot ölçüsüne ulaşılmıştır.



Şekil 5.10. Sabit ilerleme oranı ile artan fener mili devrine bağlı yüzey pürüzlülüğü

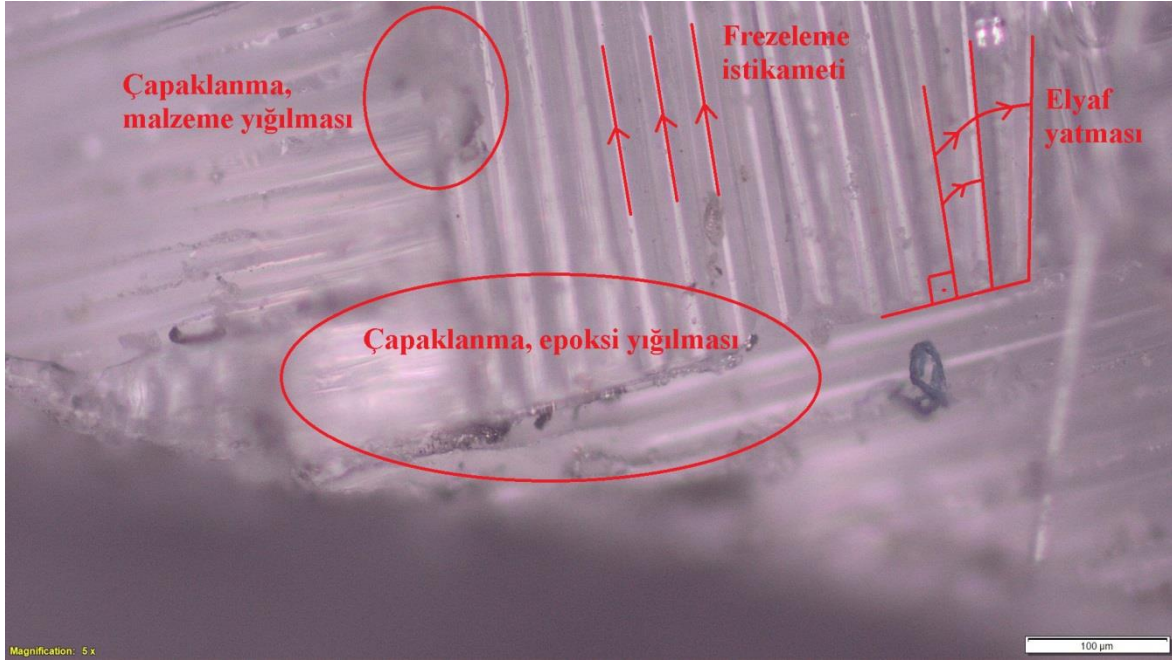


Şekil 5.11. Sabit fener mili devri ile artan ilerleme oranına bağlı yüzey pürüzlülüğü

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerlerinin, fener mili devri ve tezgah ilerleme parametrelerinden ciddi şekilde etkilendiği görülmektedir (Hussain, Al-Ghamdi, Bijanrostami, Alehashemi, 2016). Literatürde benzer çalışmalar ve sonuçlar rapor edilmiştir; Azmi, Lin ve Bhattacharyya (2013) ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde en etkili parametre olduğunu, daha sonra bunu fener mili devrinin takip ettiğini, etki parametrelerinin sırasıyla 67 % ve 19 % katkıda bulunduğunu bildirmişlerdir ayrıca kesme derinliğinin etkisinin ihmal edilebilir olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada ÇCKNT katkısının yüzey pürüzlülüğünün azalmasına katkı sağladığı görülmüştür.

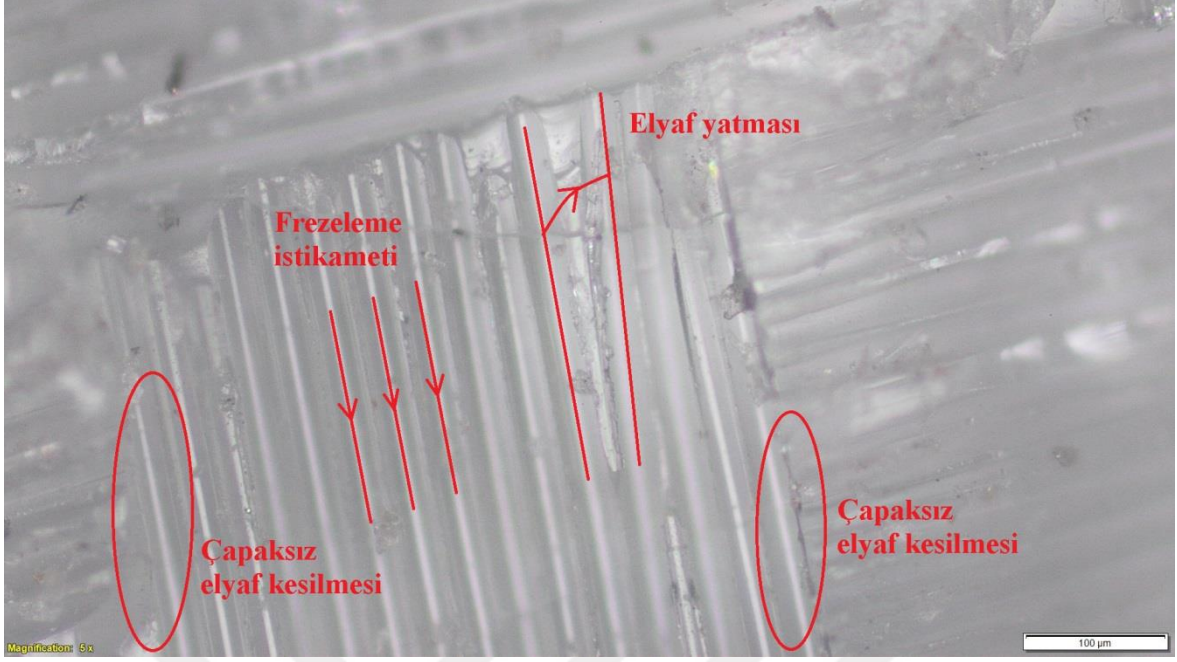
### 5.5.2. Olympus Floresan Mikroskobu ile yüzey kontrolü

Saf ve katkılı kompozit plakalar, yüzey frezelemesi sonrası Olympus mikroskobu ile analiz edilmiştir. Olympus BX-53 PHAKO, olympus XC-10 dijital kamera sistemi ile donatılmış floresan mikroskopisi için uygun bir stereo mikroskoptur. Analiz edilen parçalarda çapaklanma, malzeme yığılması, fiber hasarları tespit edilmiştir. Yüzey frezeleme işlemleri sırasında soğutma suyu veya hava kullanılmadı. Saf kompozit malzemelerin, yüksek fener mili devri ve ilerleme oranı ile frezelenmesinin etkisi olarak Resim 5.18 'de görüldüğü gibi yüzeylerde çapaklanma, malzeme yığılması hatta elyafların yönelmesi gibi durumların ortaya çıkmıştır. Fiber malzeme olarak seçilen cam elyafların vakum infüzyon esnasında da farklı yönlere yönelebileceği ve düz örgü şeklinden çıkabileceği düşünülmektedir.



Resim 5.18. Yüzeyi frezelenmiş saf kompozit tabaka

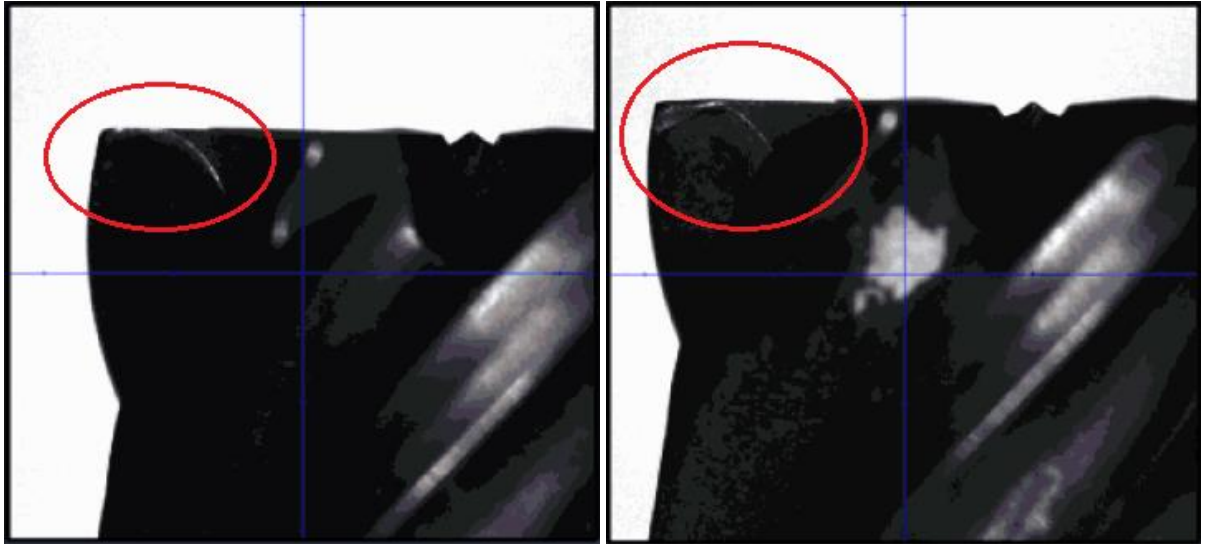
Resim 5.19'da çapaksız şekilde frezelenmiş takviyeli kompozit yüzeyi gösterilmiştir. ÇCKNT katkısı, kompozit yapıya stabilite kattı ve talaş kaldırma işlemi sırasında malzeme yığılmasını önledi. Yip, Lin ve Wu (2011) karbon nanotüplerin cam elyaf takviyeli polimer kompozit modifikasyonu için yüksek potansiyele sahip katkı maddesi olduğunu vurgulamışlardır.



Resim 5.19. Yüzeyi frezelenmiş katkılı kompozit plaka

### 5.5.3. Zoller Genius 3s ile takım aşınması görsel muayenesi

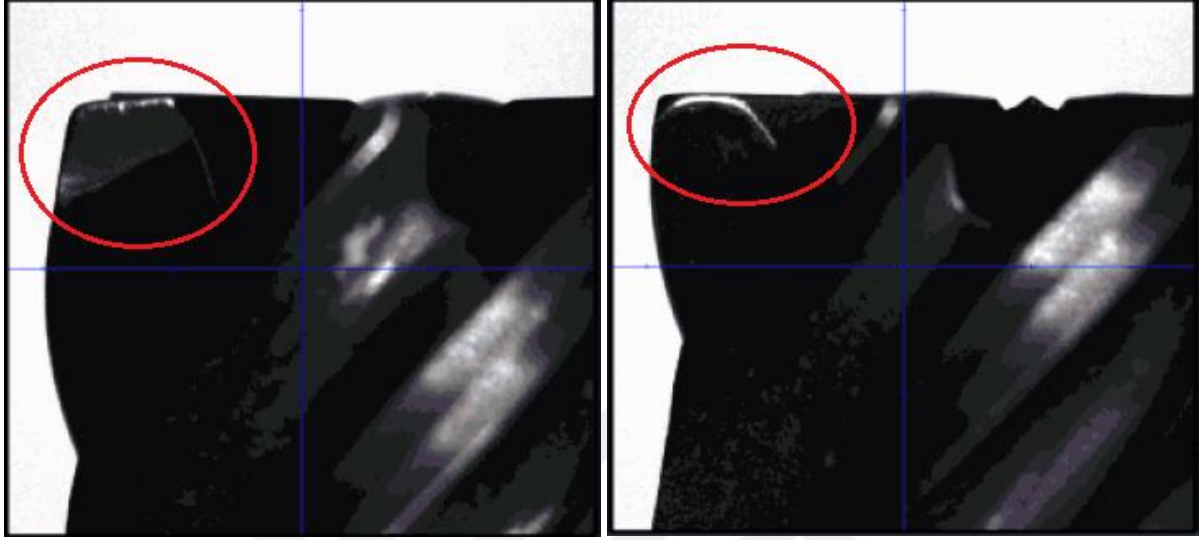
Saf kompozit malzemenin işlenmesinde kullanılan frezenin yan kesici kenarlarındaki aşınma Resim 5.20’de gösterilmiştir.



Resim 5.20. Çakı kesme kenarının yan yüz aşınması (saf kompozit kesim)

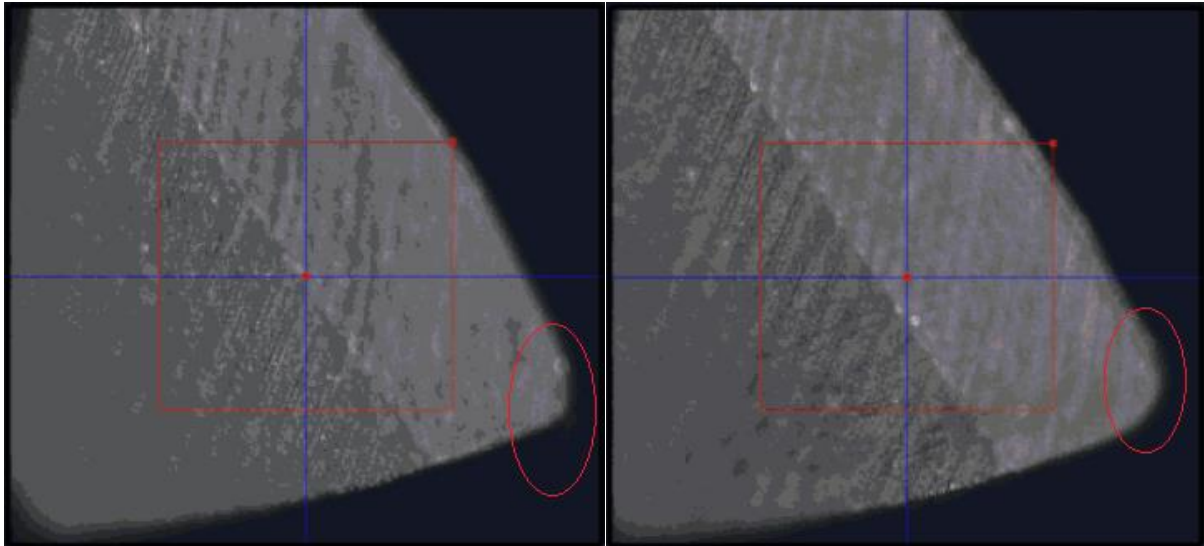
Katkılı kompozit kesim için kullanılan freze çakısının kesme kenarının yan yüz aşınması, Resim 5.21’de gösterilmiştir. Aşınmaların yüzeyden kenarlara doğru büyüdüğü

yorumlanabilir. Freze bıçağının uç kısımlarından gövdeye doğru blok şeklinde aşınmalarda tespit edilmiştir. ÇCKNT katkısının kesici takım aşınmasını arttırdığı görülmüştür. Parmak freze çakılarında aşınma harici çatlama veya kırılma görülmemiştir.



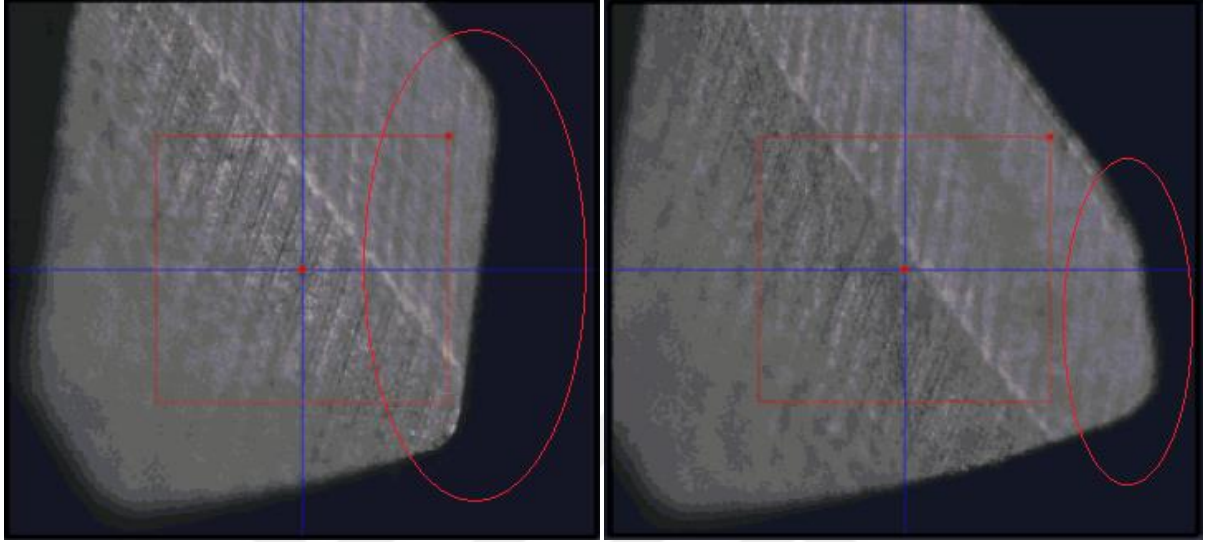
Resim 5.21. Çakı kesme kenarının yanal yüz aşınması (katkılı kompozit kesim)

Kesici takımın ön düzlemi ve kenar aşınması, Resim 5.21 ve Resim 5.22 'da gösterilmiştir. Epoksi, cam elyafı ve ÇCKNT'lerin malzemelerin frezelenmesinde kullanılan kesici takımları aşındırdığı çok açıktır.



Resim 5.22. Kesici takımın ön düzlem ve kenar aşınması (saf kompozit kesim)

Saf kompozit kesimde kullanılan; epoksi ve fiber kesimi yapan freze çakılarının uç kısımlarında küçük aşınmalar gözlemlenirken, ÇCKNT katkıli kompozitleri kesen çakıların uç kısımlarında daha büyük ve geniş aşınmalar tespit edilmiştir.



Resim 5.23. Kesici takımın ön düzlem ve kenar aşınması (katkılı kompozit kesim)

ÇCKNT katkıli kompozit malzemenin kesilmesinde kullanılan freze bıçağının köşelerinde ve ön yüzlerinde belirgin aşınma olduğu tespit edildi. Resim 5.23, aşınmanın ÇCKNT katkı maddesi ile arttığını göstermektedir.

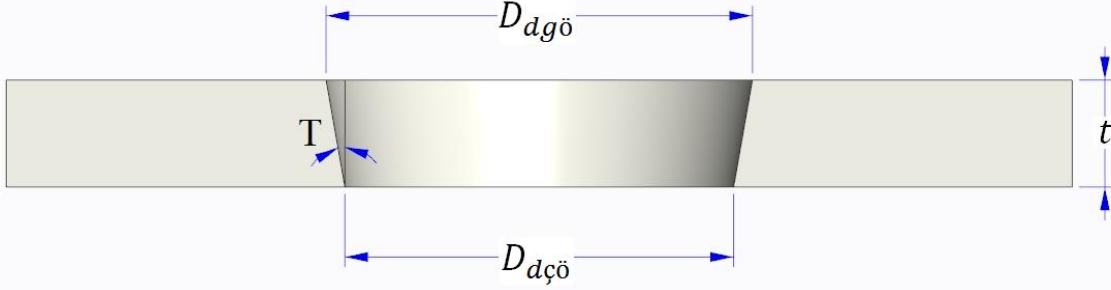
## 5.6. Aşındırıcılı Su Jeti Kesim Bulguları

### 5.6.1. Kerf konik açı ölçülerinin hesaplanması

Kompozit levhaların su jeti ile kesilmesinden sonra, delik giriş ve çıkış ölçüleri dikkate alınarak kerf konik açısı hesaplandı (Şekil 5.12).



$$\text{Kerf Konik Açısı (T)} = \arctan\left(\frac{D_{dg\ddot{o}} - D_{d\check{c}\ddot{o}}}{2t}\right)$$



Şekil 5.12. Kerf konik açısının ölçüm açıklaması

Su jeti ile delinen kompozitin delik giriş ölçüsü ( $D_{hen}$ ), delik çıkış ölçüsü ( $D_{hex}$ ) ve kalınlığı ( $t$ ); 0,01 mm ölçüm hassasiyetine sahip Mitutoyo dijital kumpas kullanılarak tespit edildi. Yapılan ölçümlerde su jetinin malzemeye giriş ve çıkış bölgelerinde ölçüsel farklar olduğu bu sebeple kerf konik açısının oluştuğu tespit edildi. Ayrıca suyun temas ettiği kesme kenarlarında delaminasyon sebebi ile kalınlık farkları olduğu ve bu kalınlık farklarının kerf konik açısına etki ettiği görüldü. Su jeti işleme parametreleri ve delik kalite bilgileri işlem sırasına göre Çizelge 5.8’de listelenmiştir.

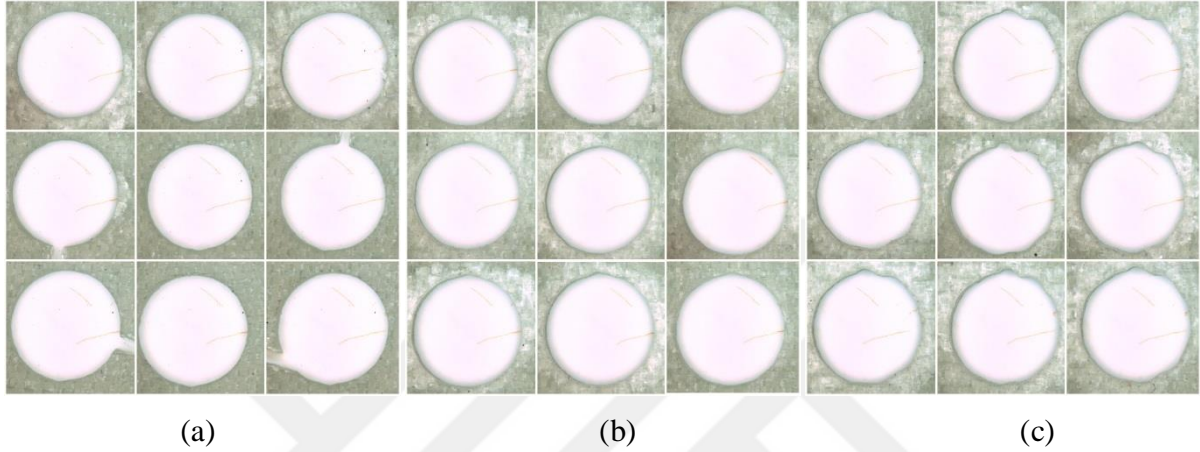
Çizelge 5.8. Aşındırıcılı su jeti kesim parametreleri ve delik kalitesi

Deney No	Nozul Çapı (mm)	Kesme Hızı (mm/dak)	Aşındırıcı Boyutu (mesh)	Kesme Basıncı (bar)	Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Delik Kalitesi									
						Delik Çapı (mm)		Kerf Konik Açısı (derece)	Delaminasyon	Parçalanma	Çapaklanma	Delik Çevresi Kalınlık (mm)		Delik Çevresi Sertlik (Ba)	
						Giriş	Çıkış					Önce	Sonra	Önce	Sonra
1	1	400	80	3750	saf kompozit	8,05	8,01	0,66	var	yok	yok	1,60	1,73	42-48	25-42
					katkılı kompozit	8,09	7,99	1,43	var	yok	yok	1,50	2,00	50-56	29-42
2	1	950	80	3750	saf kompozit	8,12	8,04	1,27	var	yok	yok	1,60	1,80	42-48	24-42
					katkılı kompozit	8,10	8,01	1,46	var	yok	yok	1,50	1,76	50-56	31-42
3	1	1500	80	3750	saf kompozit	8,15	8,05	1,52	var	yok	yok	1,60	1,89	50-56	21-39
					katkılı kompozit	8,11	8,02	1,52	var	yok	yok	1,50	1,70	42-48	29-39

Yapılan çalışmalar neticesinde kompozit yapılarda parçalanma ve çapaklanma görülmemiştir fakat delaminasyon meydana gelmiştir. Ayrıca elde edilen deliklerin etrafında delaminasyondan kaynaklı kalınlık artması ve yüzeylerde sertlik azalması görülmüştür. İstenilen delik çapına en yakın değerler en düşük kesme hızında elde edilmiştir. Ayrıca tüm delme işlemlerinde, delik giriş çapının delik çıkış çapından daha büyük olduğu bulunmuştur.

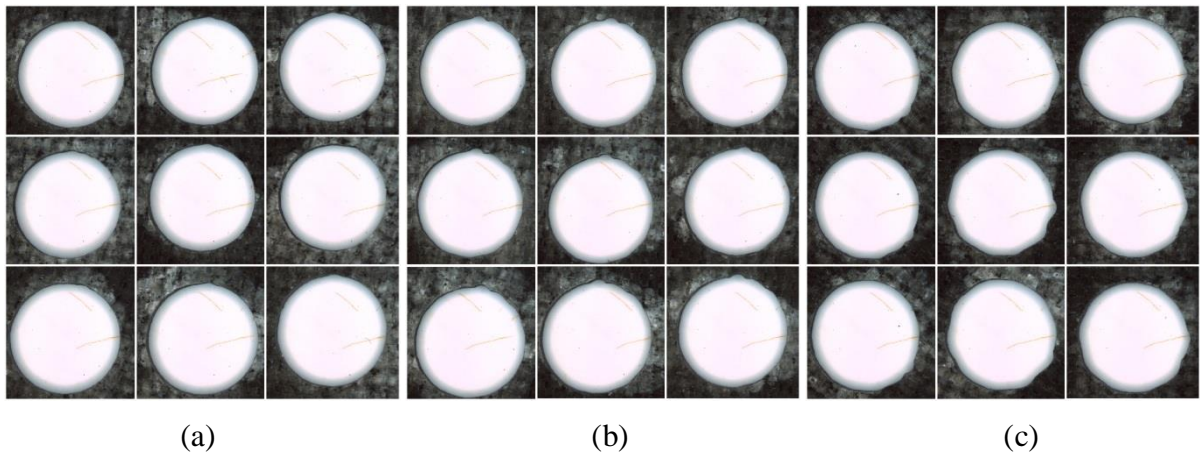
### 5.6.2. Stereo mikroskop İle makro analiz

Kesme hızı arttıkça, aşındırıcı hareketli su delik çapının büyümesine, dalgalı kesme yüzeyinin oluşmasına ve deliklerin daireselliğinin azalmasına neden olmuştur. Resim 5.24. ve Resim 5.25'te kesme hızının artmasıyla deliklerin daireselliğinin azaldığı açıkça gösterilmiştir.



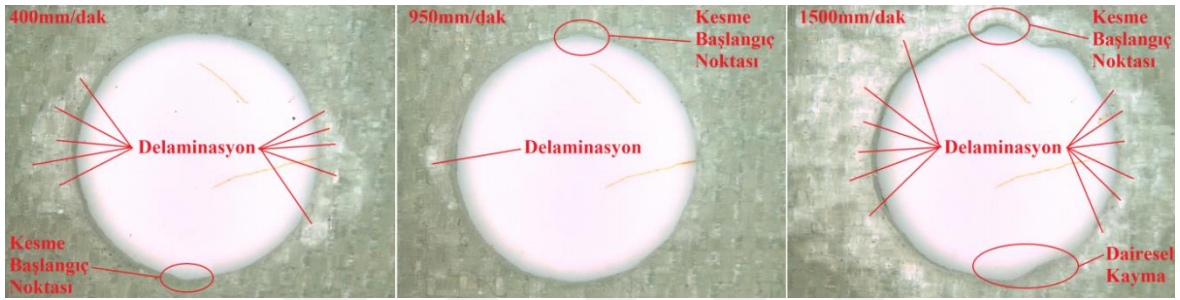
Resim 5.24. Saf kompozit kesim (a) 400 mm/dak (b) 950 mm/dak (c) 1500 mm/dak

Artan kesme hızı, delik çaplarının artışına sebep olmuştur. Su jeti ile kesilen deliklerin çapı, suyun hızlı ve düzensiz dairesel hareketi ile artmıştır. Resim 5.24 ve Resim 5.25'te 400 mm/dak düşük kesme hızı ile elde edilen deliklerin yüksek hızda delinen deliklere göre daha dairesel ve hatasız olduğu gösterilmiştir. Diğer taraftan, 950 mm/dak kesme hızında su jeti giriş noktalarının daha belirginleştiği; 1500 mm/dak kesme hızında ise deliklerin düzensiz kesme kenarına sahip olduğu ve su jeti giriş noktalarının dalgalı olduğu tespit edilmiştir.



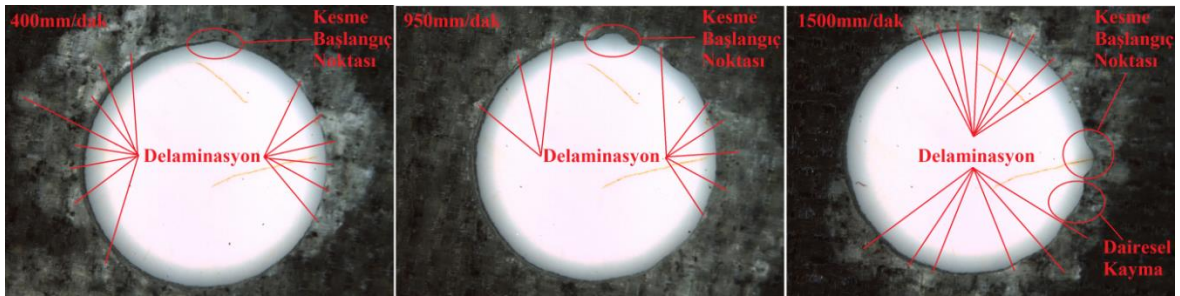
Resim 5.25. Katkılı kompozit kesim (a) 400 mm/dak (b) 950 mm/dak (c) 1500 mm/dak

Aşındırıcılı su jeti ile kompozitler üzerinde delik elde edilmesi neticesinde; delaminasyon, kesme başlangıç noktası izi, su jetinden kaynaklı ovallık (dairesel kayma) problemleri Nikon SMZ 745T mikroskop kullanılarak, 5 kat büyütme yapılarak tespit edildi. Resim 5.26 ve Resim 5.27’ de kesme hızının çok yüksek ve çok yavaş olduğu deneylerde delaminasyonun çok fazla olduğu görülmüştür (Voit, Reinhart ve Metzger, 2017). Kompozit malzeme ilk su basıncı ile kesilmeye başladığında ve yüzeye isabet eden basınçlı su nedeniyle giriş bölgesinde delaminasyon artmıştır (Shanmugam, Nguyen ve Wang, 2008).

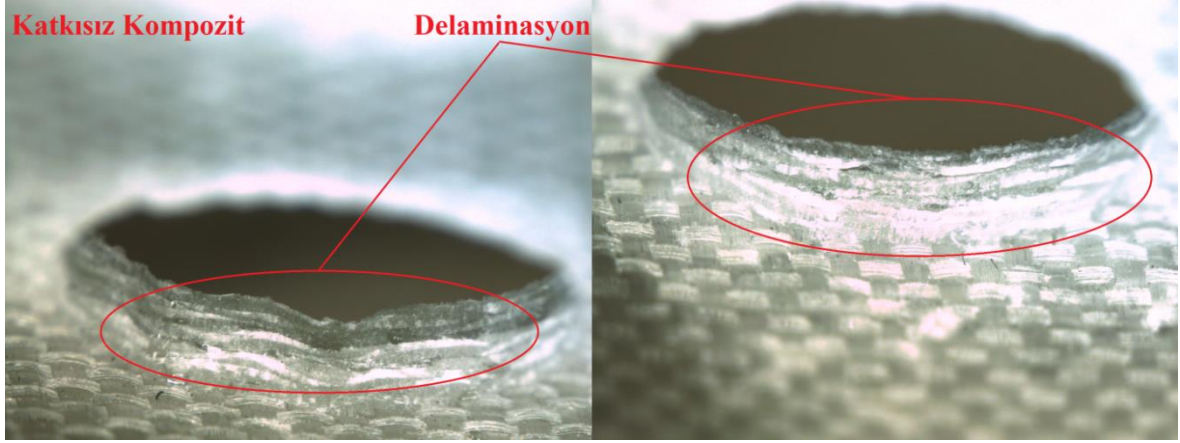


Resim 5.26. Saf kompozitin delik kenarına su jetinin etkileri

Kesme işleminde düşük kesme hızıyla malzemenin ve suyun temas süresi artacağından; delaminasyon artar ve malzeme su ile daha fazla temas eder (Shanmugam ve diğerleri, 2008).

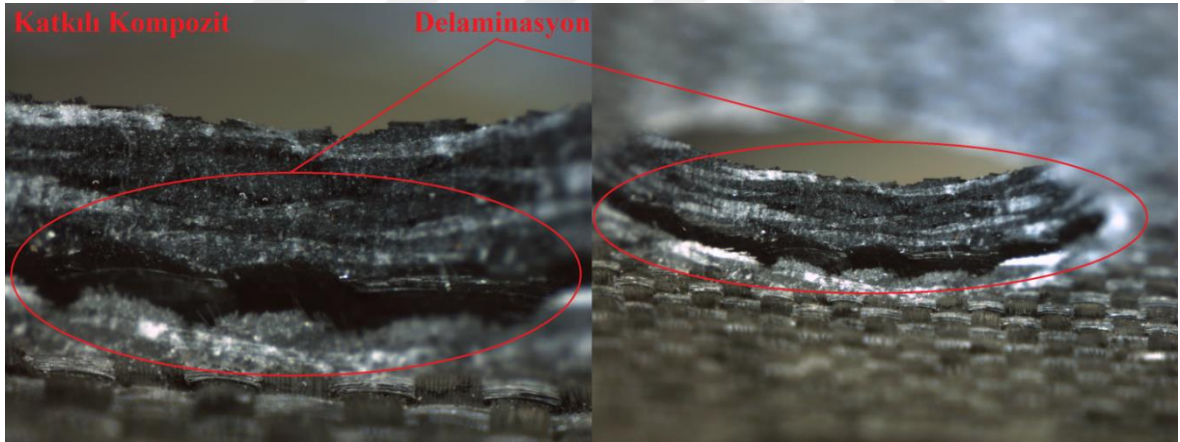


Resim 5.27. Katkılı kompozitin delik kenarına su jetinin etkileri



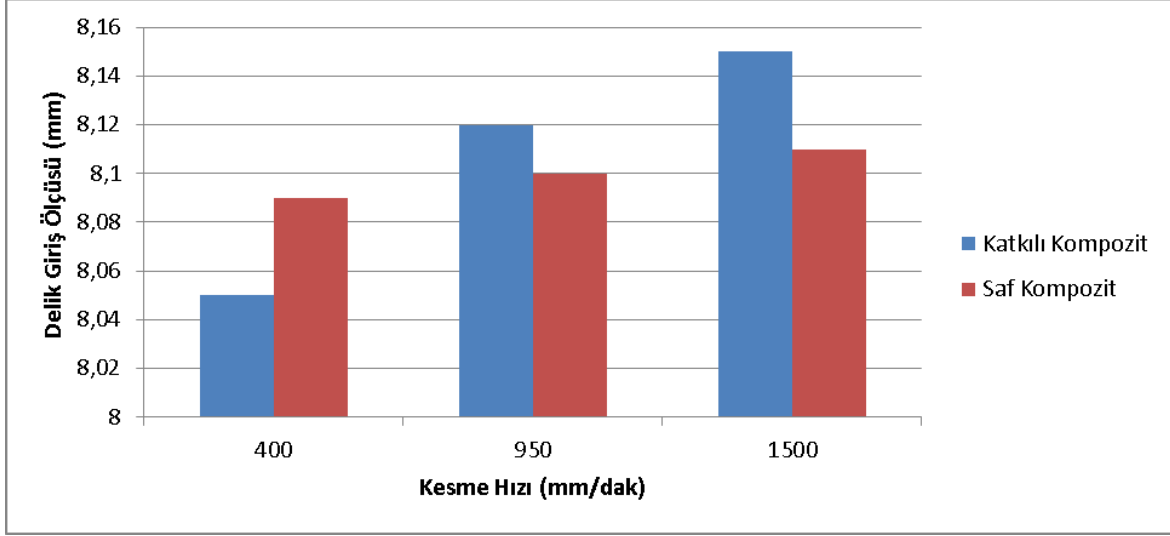
Resim 5.28. Saf kompozit deliğinin delaminasyonu (delik iç duvarı)

Su jeti yöntemi kullanılarak kesilen deliklerin yakınında, epoksi ve cam elyaf katmanlarının açılması, su basıncının etkisiyle meydana gelmiştir ayrıca su, epoksi ve elyaf katmanlarının ayırım kısımlarına nüfuz etmiştir. Kompozit tabaka yüzeylerinin cam elyafı ve epoksi bütünlüğünün bozulması ile yüzey sertliğinde azalma görülmüştür.



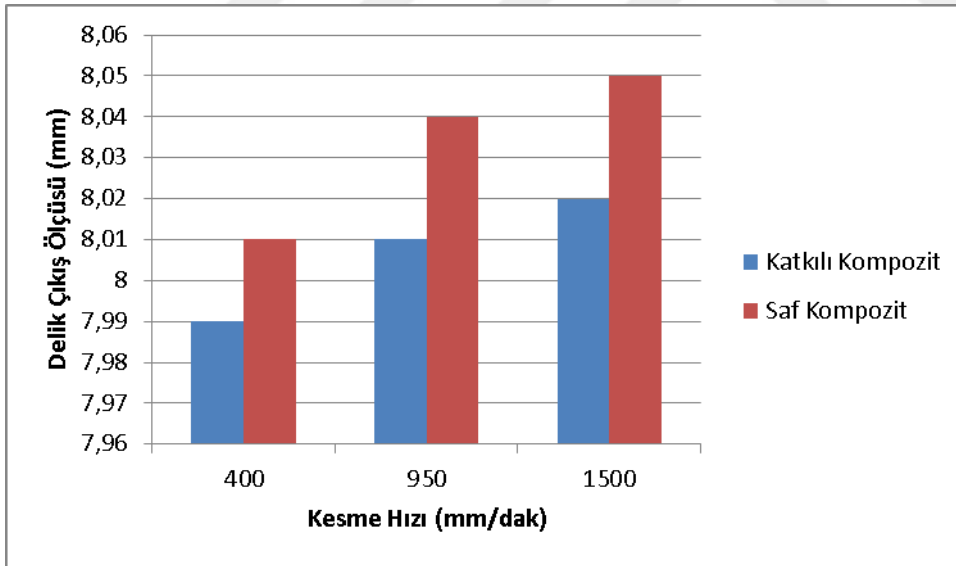
Resim 5.29. Katkılı kompozit deliğinin delaminasyonu (delik iç duvarı)

Nanoparçacık takviyeli malzemeler yüksek kuvvete sahip olduklarından, malzeme kesilmeye direnç göstermiş ve sonuç olarak katmanlar arası ayrımı arttırmıştır (Resim 5.29). ÇCKNT katkıli kompozit katmanlarının boşluk hacim oranının, saf kompozitlerin boşluk hacim oranından daha yüksek olduğu ve bunun da delaminasyon artışını etkilediği görülmüştür.



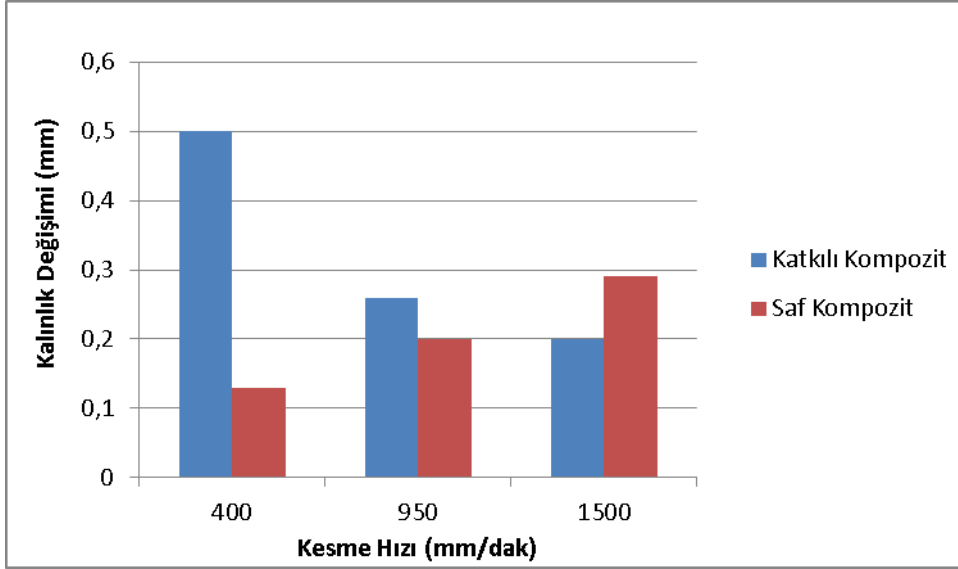
Şekil 5.13. Saf ve katkılı kompozitlerin artan kesme hızına bağlı delik giriş çapı ölçüleri

Artan kesme hızıyla agresif hareket eden su sebebiyle, delik girişi çapları arttı. Düşük kesme hızında daha düzgün ve daha yavaş olan su jeti ile delikler istenen ölçüde elde edildi (Şekil 5.13).



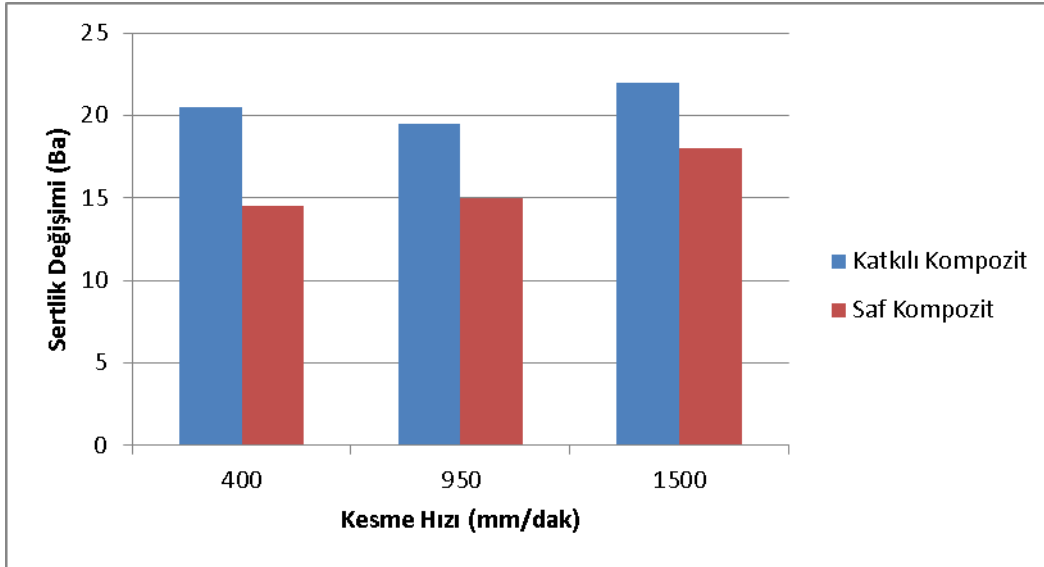
Şekil 5.14. Saf ve katkılı kompozitlerin artan kesme hızına bağlı delik çıkış çapı ölçüleri

Kesme hızının artmasıyla birlikte, delik çıkış boyutu da artmıştır. Hızlı ve agresif su jeti, deliğin daha fazla kesme yüzeyine temas etti ve bu sebeple delik çıkış çapı arttı (Şekil 5.14).



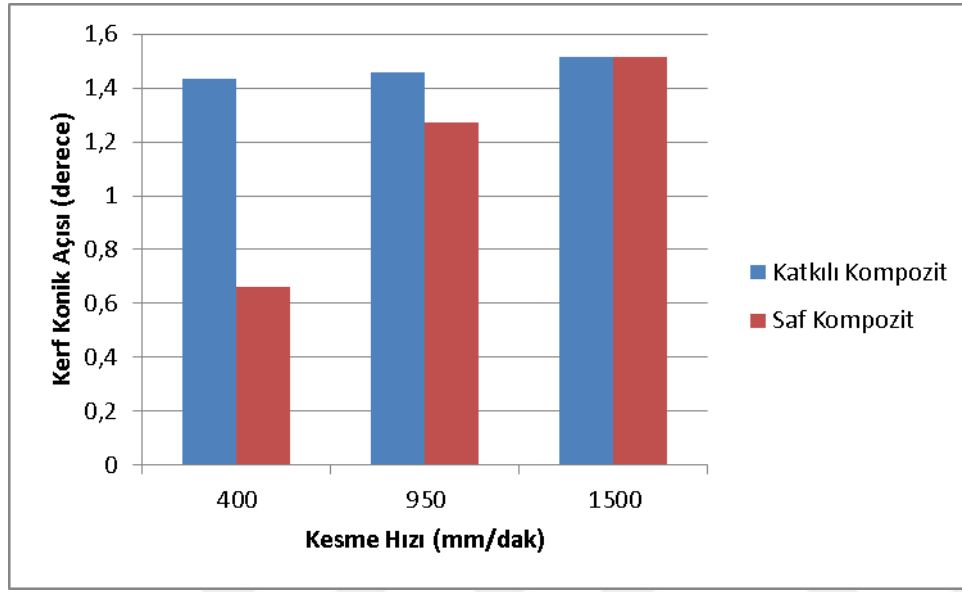
Şekil 5.15. Kesme hızına bağlı kalınlık değişimi

Delaminasyon, 400 mm/dak ve 1500 mm/dak kesme hızlarında çok fazla idi. Çok düşük bir kesme hızında, malzeme ve su temas süresinin artışı delaminasyonun artmasına sebep olmuştur. Su jetinin çok yüksek kesme hızlarında agresif hareketi de delaminasyonu arttırmıştır. Kompozit tabakasında bulunan katmanların ayrılmasından dolayı malzeme kalınlığı kesimden sonra artmıştır. Katkılı kompozit yapının su jetine dayanımı nedeniyle delaminasyonun ve sonuç olarak kalınlık değişikliğinin daha yüksek olduğu görüldü (Şekil 5.15).



Şekil 5.16. Farklı kesme hızlarının kesme yüzeyinin sertlik değişimi üzerine etkisi

Yüzey sertliğindeki değişiklik delaminasyon nedeniyle artmıştır. Epoksi tabakasının, su giriş bölgelerinde cam elyaf tabakalarından ayrılması nedeniyle malzemenin yüzeyinin sertliği azalmıştır. Kesme hızı çok yüksek ve çok düşük olduğunda delaminasyon görülmüştür, bu nedenle yüzey sertliği kesim öncesi yüzey sertliğine göre azalmıştır (Şekil 5.16).



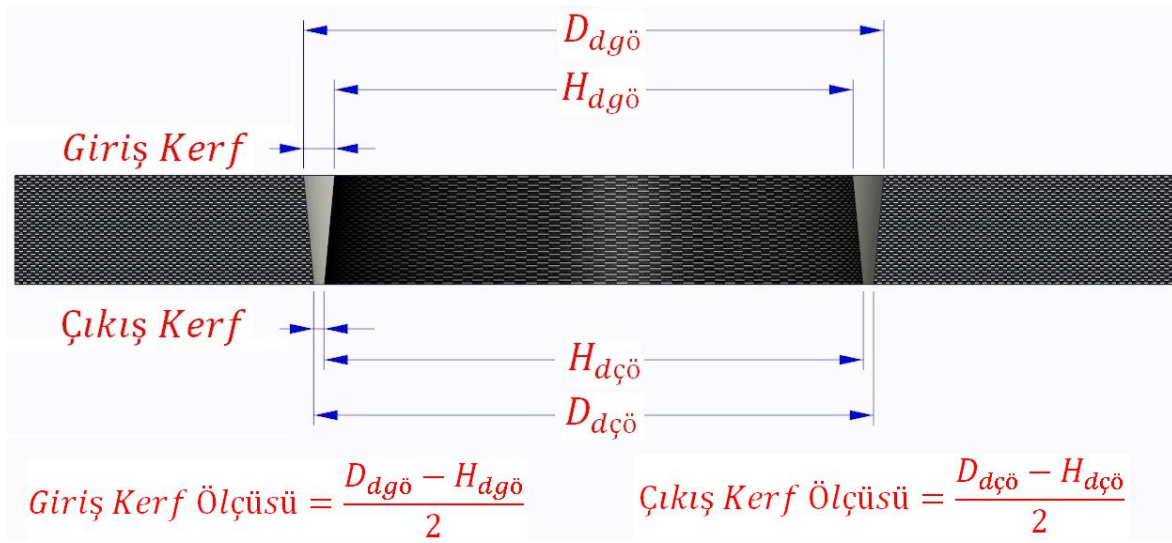
Şekil 5.17. Artan kesme hızına bağlı kerf konik açısı

Kerf açısının hesaplanmasında, delme işleminden sonra kompozit levhaların kalınlığı, delik giriş ve çıkış ölçüleri dikkate alınmıştır. Kesme hızı arttıkça, agresif ve hızlı dairesel hareketli su jeti, kerf açısının artmasına neden oldu. Saf kompozitin kerf açısının artan kesme hızı ile arttığı, bu artışın ÇCKNT katkı kompozitlerin kerf açısının artışından daha yüksek olduğu hesaplandı (Şekil 5.17). Nanopartikül katkı maddesinin kompozit yapıyı güçlendirdiği ve kompozit yapının aşınmasını azalttığı analiz edildi. Shanmugam ve Masood (2009), kerf konik açısının tamamen ortadan kaldırılamayacağını ancak yüksek su basıncı ve düşük kesme hızı parametreleri kullanılarak kerf konik açısının en aza indirilebileceğini bildirmişlerdi. Genel olarak, daha düşük kesme hızı ve daha yüksek hidrolik basıncı ile işlem yapıldığında; aşındırıcı parçacıkların yüksek momentum transferine yol açan jet kinetik enerjisinin artması ve daha sonra alt ve üst kerf genişliğinin azalması sebebi ile nispeten düşük bir konik açısı elde edilmiştir (Li, Huang, Chen, Gong, Yang, 2019).

## 5.7. CO<sub>2</sub> Lazer Kesim Bulguları

### 5.7.1. Giriş ve çıkış kerf ölçülerinin hesaplanması

Kompozit malzemelerin CO<sub>2</sub> Lazer ile kesilmesinden sonra giriş ve çıkış kerf ölçüsü, delik ve hurda boyutları dikkate alınarak hesaplanmıştır (Şekil 5.18). Delik giriş ölçüsü ( $D_{dgö}$ ), delik çıkış ölçüsü ( $D_{dçö}$ ), hurda giriş ölçüsü ( $H_{dgö}$ ), hurda çıkış ölçüsü ( $H_{dçö}$ ) 0,01 mm hassasiyete sahip Mitutoyo 150 mm dijital kumpas ile ölçülerek giriş ve çıkış kerf ölçüsünün hesaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 5.18. Giriş ve çıkış kerf ölçüsünün hesaplanması

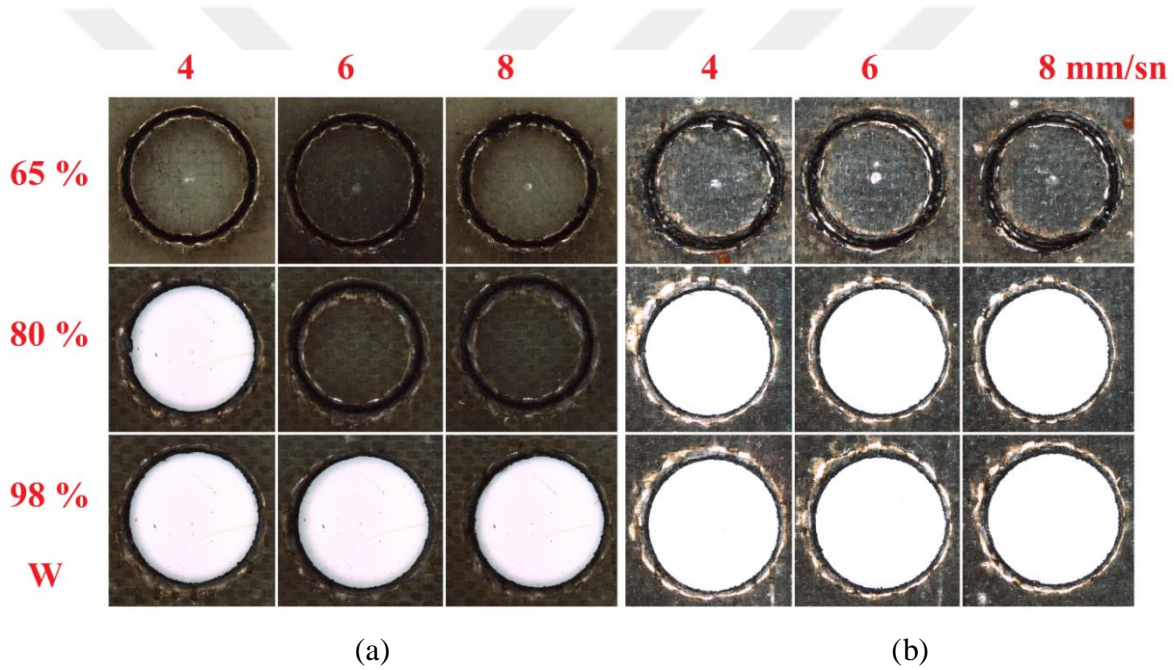
### 5.7.2. Lazer kesim etkileri ve mikroskobik bulgular

Lazer işleme parametreleri ve delik kalitesi bilgileri işlem sırasına göre Çizelge 5.9'da listelenmiştir. Yapılan tüm kesimler incelendiğinde; kompozit test numunelerinde çapaklanma, delaminasyon ve parçalanmaya rastlanılmamıştır. Lazer kesim işlemlerinin çoğunluğunda delik elde edilirken, düşük lazer gücü ile yapılan kesme işlemlerinde hurda parçadan çıkmamış ve tam olarak malzeme kesilmemiş bu sebeple delik elde edilememiştir. Saf ve katkılı kompozit malzemelerin lazer kesim öncesi ve sonrası yapılan sertlik ölçümleri dikkate alındığında, delik çevrelerinde yüzey sertliklerinin değiştiği görülmüştür.



Çizelge 5.9. Lazer kesim parametreleri ve delik kaliteleri

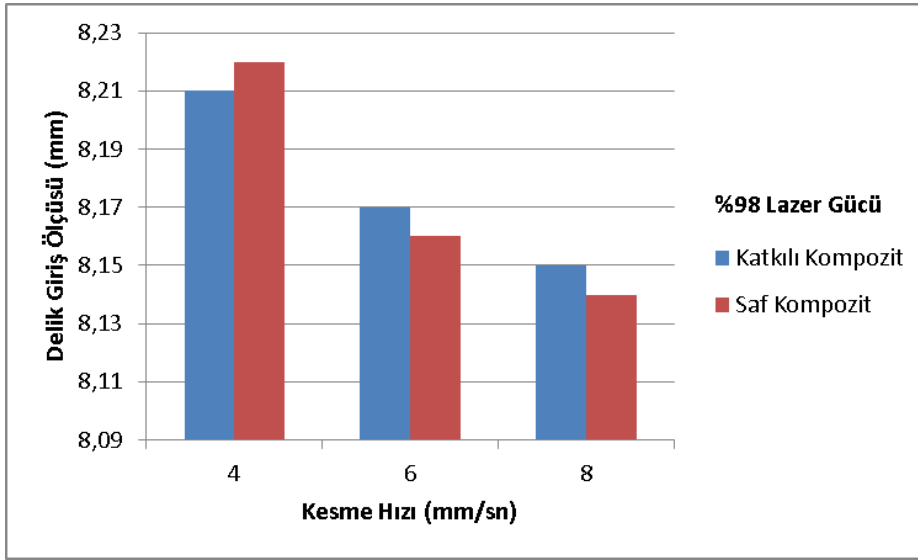
Deney No	Proses Gazı	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (130W)	Odak Pozisyonu (mm)	Malzeme (%0,1 ÇCKNT)	Delik Kalitesi							
						Delik Çapı (mm)		Giriş Kerf Ölçüsü (mm)	Çıkış Kerf Ölçüsü (mm)	Delaminasyon	Parçalanma	Çapaklanma	Delik Çevresi Sertlik (Ba)
						Giriş	Çıkış						
1	CO <sub>2</sub>	4	65%	14	saf kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	49-54
					katkılı kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	58-62
2	CO <sub>2</sub>	6	65%	14	saf kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	49-54
					katkılı kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	58-62
3	CO <sub>2</sub>	8	65%	14	saf kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	49-54
					katkılı kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	58-62
4	CO <sub>2</sub>	4	80%	14	saf kompozit	8,20	7,98	0,19	0,09	yok	yok	yok	53-57
					katkılı kompozit	8,20	7,96	0,11	0,07	yok	yok	yok	59-64
5	CO <sub>2</sub>	6	80%	14	saf kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	53-57
					katkılı kompozit	8,18	7,98	0,19	0,08	yok	yok	yok	59-64
6	CO <sub>2</sub>	8	80%	14	saf kompozit	delinmedi	delinmedi	belirsiz	belirsiz	yok	yok	yok	53-57
					katkılı kompozit	8,18	7,99	0,18	0,08	yok	yok	yok	59-64
7	CO <sub>2</sub>	4	98%	14	saf kompozit	8,22	7,99	0,20	0,05	yok	yok	yok	54-59
					katkılı kompozit	8,21	8,00	0,18	0,07	yok	yok	yok	59-65
8	CO <sub>2</sub>	6	98%	14	saf kompozit	8,16	8,01	0,17	0,06	yok	yok	yok	54-59
					katkılı kompozit	8,17	8,03	0,17	0,09	yok	yok	yok	59-65
9	CO <sub>2</sub>	8	98%	14	saf kompozit	8,14	8,07	0,16	0,08	yok	yok	yok	54-59
					katkılı kompozit	8,15	8,05	0,15	0,08	yok	yok	yok	59-65



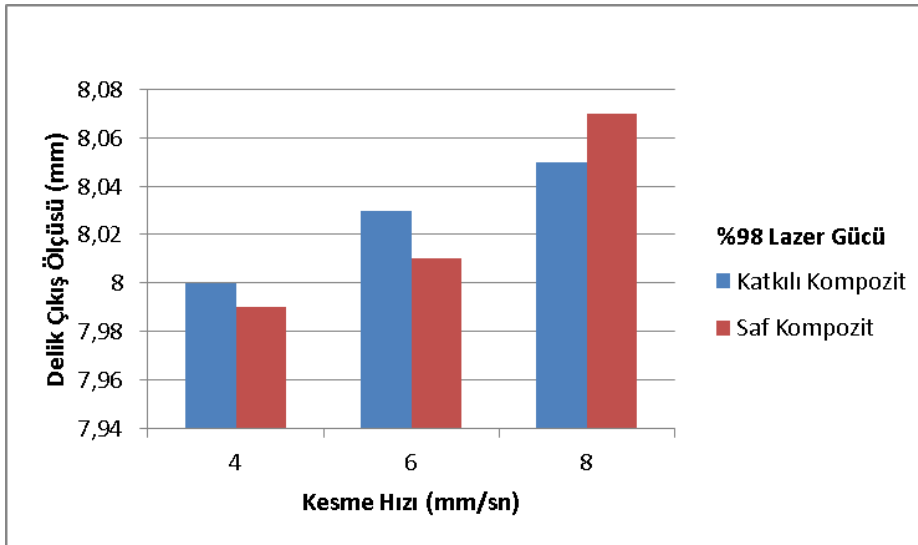
Resim 5.30. Test numuneleri (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit

Kompozit plakalarda delikler elde etmek için 4, 6, 8 mm / sn kesme hızı ve 130 W lazer gücünün 65 %, 80 %, 98 % oranlarındaki parametre değerleri uygulanmıştır. Saf ve katkıli kompozit malzemelerin, % 65 lazer gücü ve buna bağlı olarak 4, 6, 8 mm / sn kesme hızı değerleri kullanılarak delinemediği görülmüştür (Resim 5.30). Ayrıca lazer girişi ve kesme yüzeyinde izler ve termal etkiler gözlenmiştir. Lazer ışını ile kesilen parçanın, lazer ışını ile temas süresinin kesme hızının azalmasıyla arttığı için ısıdan etkilenen bölge arttı, benzer sonuçlar Fuchs, Schoeberl, Tremmer, Zaeh (2013) ve Kumar, Singh (2019) tarafından da bildirilmiştir. Ayrıca P. Patel, Sheth ve T. Patel (2016), cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin lazer ile kesilmesinde ısıdan etkilenen bölgeye en çok etki eden

parametrenin kesme hızı olduğunu ve bunu lazer gücü ve gaz basıncının izlediğini rapor etmişlerdir. % 80 lazer gücü ile 6 ve 8 mm/sn kesme hızında saf kompozit tabakalarda delik elde edilememiştir fakat delik çevresinde termal etkiler görülmüştür (Resim 5.30). Yüksek kesme hızı veya çok düşük lazer gücünün, yetersiz termal zaman ve enerji nedeniyle kesmeyi olumsuz etkileyebileceği görülmüştür. Şekil 5.19'de saf ve katkılı kompozit malzemelerin, artan kesme hızı ile delik çaplarının düştüğü ve istenilen delik çapına yaklaşıldığı görülmüştür. Düşük kesme hızlarında delik giriş bölgesinde lazer ışını ile parça temas süresi arttığından; fiber ve epoksilerin ortamdaki uzaklaştığı ve daha fazla malzeme yandığı tespit edilmiştir.

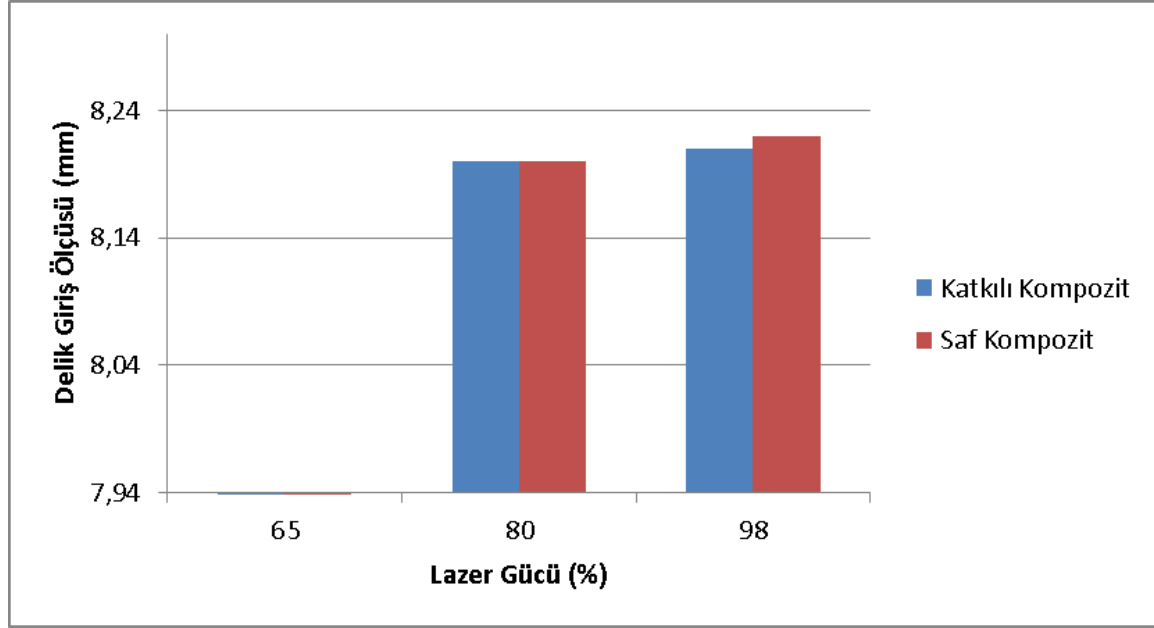


Şekil 5.19. Kesme hızına bağlı delik giriş ölçüsü



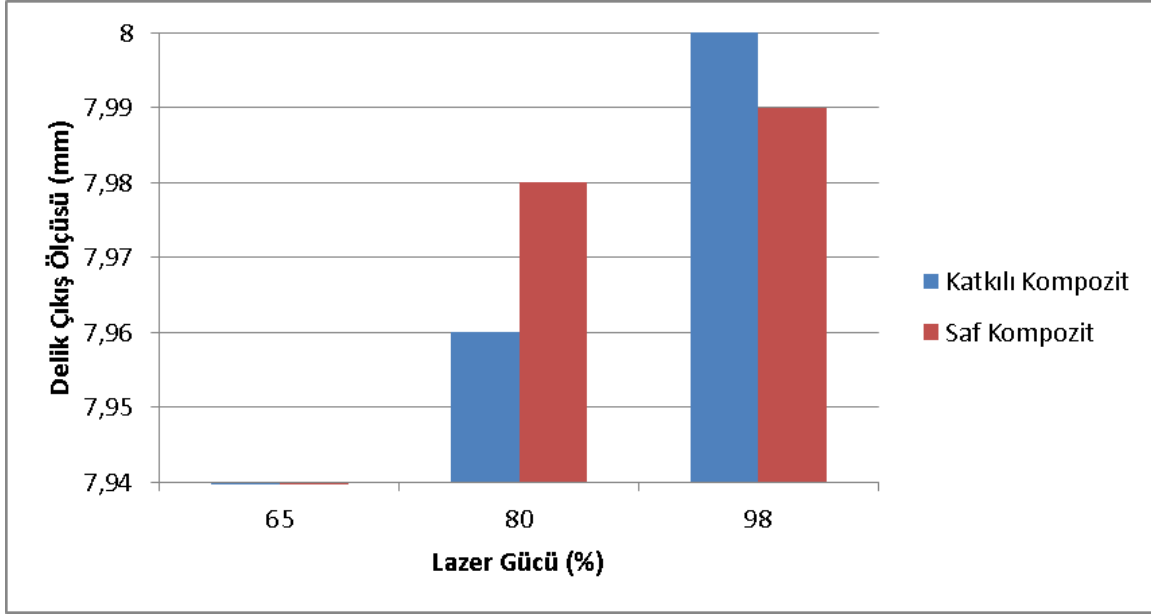
Şekil 5.20. Kesme hızına bağlı delik çıkış ölçüsü

Saf ve katkılı kompozit malzemenin giriş deliği ebadı azalan kesme hızı ile arttı. Öte yandan, çıkış deliği boyutu artan kesme hızı ile birlikte artmıştır (Şekil 5.20). Hızlı hareket eden lazer ışını, delik girişinde çok fazla termal etki oluşturmadan delik çıkışında daha büyük bir boyuta neden oldu (Chouhan, Singh, Parmar, Kalyanasundaram, Bhatnagar, 2016). Ancak, her kesme parametresi için giriş deliği boyutunun, çıkış deliği boyutundan daha büyük olduğu görülmüştür.



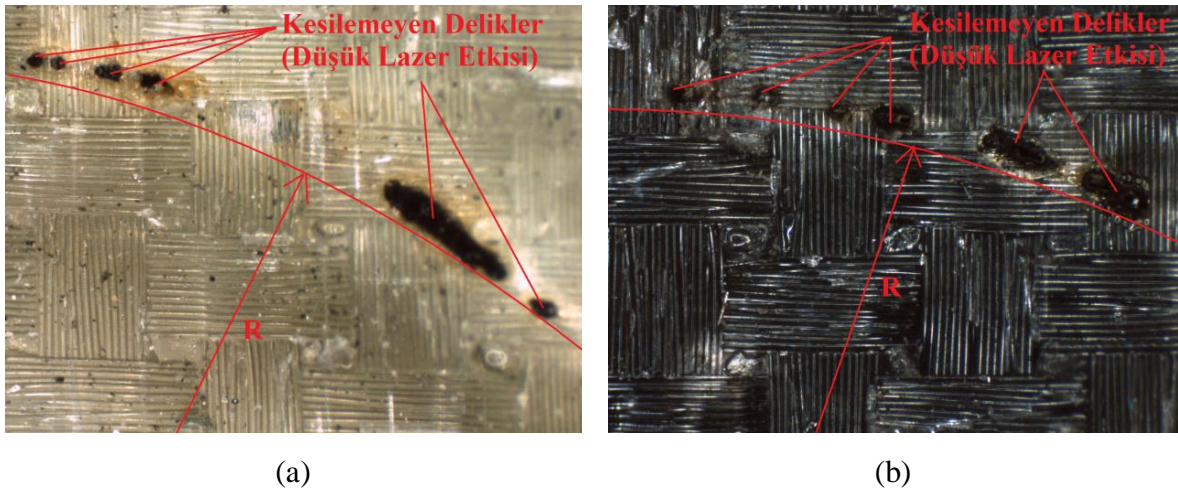
Şekil 5.21. Artan lazer gücüne bağlı delik giriş ölçüsü

Sabit 4 mm/sn kesme hızı parametresi ile kesme işleminde hem delik girişinin hem de delik çıkış boyutlarının artan lazer gücü ile arttığı belirlenmiştir. Lazer gücündeki artış, kompozit levhalarda delme işlemi sırasında elyaf ve epoksi yanmasını artırarak delik çaplarının artmasına neden olmuştur (Şekil 5.21). % 65 lazer gücü ile yapılan kesme işlemlerinde delik elde edilememiştir. Saf kompozitlerin kerf ölçülerinin katkılı kompozitten daha büyük olduğu tespit edildi. ÇCKNT'lerin katkısı kerf büyüklüğünde bir küçülmeye neden olmuştur. Ek olarak, lazer gücü ve kesme hızının kerf genişliğinde etkili olduğu bulundu (Leone, Genna, Tagliaferri, 2014). Saf ve katkılı kompozitlerin giriş kerf ölçülerinin, çıkış kerf ölçülerinden daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Choudhury ve Chuan, 2013). Şekil 5.22'de ise saf ve katkılı kompozit deney numunlerinin artan lazer gücü ile delinmesinde, delik çıkış ölçüsünün arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.22. Artan lazer gücüne bağlı delik çıkış ölçüsü

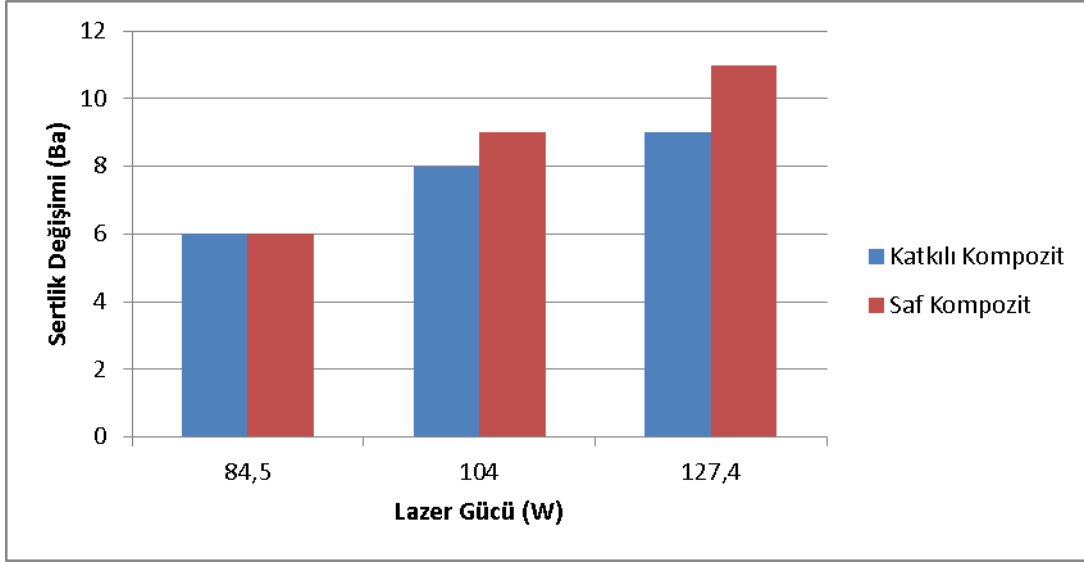
Yetersiz lazer gücü ile delme işlemi sırasında saf ve katkılı kompozit katmanlarda delik elde edilememiştir. % 65 lazer gücü kullanımında, delik giriş kısımlarında dairesel kesme işaretleri oluşmuş, ancak delik çıkış kısımlarında lazer ışın izleri görülmüştür. Her ne kadar epoksi ve elyaflar delik giriş kısımlarında kesilmiş gibi görünsede, delik giriş ve çıkış kısımlarında elyaf ve epoksi kesilmemiştir, dolayısıyla hurda parçası delikten çıkmamıştır (Resim 5.31).



Resim 5.31. Kesilemeyen deliklerin arka yüzü (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit

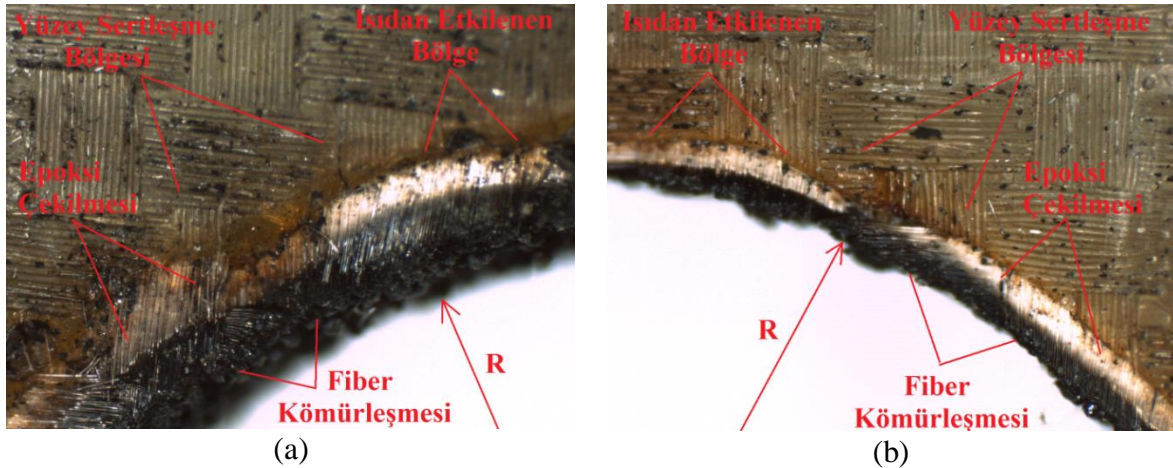
Lazer kesiminden önce ve sonra yapılan sertlik ölçümlerine göre, kompozit tabakaların yüzey sertliğinin ısı etkisi nedeniyle değiştiği görülmüştür. Saf kompozitlerin yüzey

sertliğindeki değişimin, lazerle kesildikten sonra katkıli kompozitlerin sertlik değişimine göre daha yüksek olduğu görüldü. ÇCKNT katkısının lazerle kesme ve termal etkiler nedeniyle sertlik değişimini önlediği görülmüştür.



Şekil 5.23. Lazer gücüne bağlı sertlik değişimi

Lazer kesim parametrelerinden biri olan lazer gücünün sertlik değişimi üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu ve kompozit yapıların yüzey sertliğinin lazer gücünün artması ile arttığı gözlemlendi (Şekil 5.23).



Resim 5.32. Lazer ışınının saf kompozit delik kenarına etkileri (a) Giriş yüzeyi (b) Çıkış yüzeyi

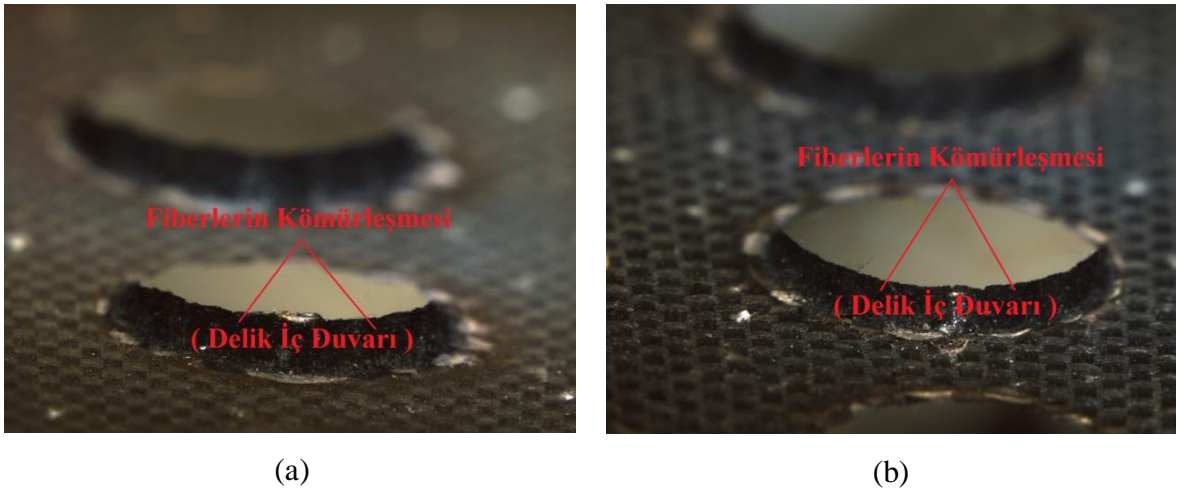
Lazer kesim sonrası her bir deney numunesi Nikon SMZ 745T mikroskop ile analiz edilerek kesme kenarlarına 22,5 kez yakınlaştırma yapılarak; ısıdan etkilenen bölge (HAZ),

fiberlerin kömürleşmesi (COF), epoksi çekilmesi (ERZ) görülmüştür. Resim 5.32 ve Resim 5.33, delik giriş kısımlarındaki termal hasarların delik çıkışındaki hasar bulgularından göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. Lazer ışını etkisiyle epoksi ortamdan uzaklaştırılmış ve daha sonra lifler (epoksi çekilmesi) ortaya çıkmıştır (Oliveira, Sharma, De Moura, Moreira, Vilar, 2017).



Resim 5.33. Lazer ışınının katkılı kompozit delik kenarına etkileri (a) Giriş yüzeyi (b) Çıkış yüzeyi

Farklı lazer parametreleri kullanılarak yapılan kesme işlemlerinde, elde edilen tüm deliklerde fiberlerin kömürleştiği görülmüştür (Resim 5.34). Giriş bölgesindeki daha büyük kerf genişliği nedeniyle elyafların karbonlaşması daha belirgindi. Lazer ışınının etkisi altında epoksi yanarak ortamdan uzaklaşmıştır ve sonra Oliveira ve diğerleri, (2017) tarafından bildirildiği gibi karbonize olan lifler görülmüştür.



Resim 5.34. Fiberlerin kömürleşmesi (a) Saf kompozit (b) Katkılı kompozit

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuç

Bu çalışmada, vakum infüzyon metodu ile cam elyaf takviyeli katkısız (saf) polimer ve reçine miktarının ağırlıkça % 0,1 oranında ÇCKNT katkılı polimer kompozit malzemeler üretilmiştir. Elde edilen saf ve katkılı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilerek nanopartikül katkısının etkisi tespit edilmiştir. Saf ve katkılı kompozit tabakalar ayrı ayrı lazer kesim, su jeti kesim, zımba ve kalıp kullanarak delik elde etme, matkap kullanarak konvansiyonel delme, parmak freze kullanarak orbital delme, freze çakısı ile yüzey frezeleme gibi imalat yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Her bir talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri için farklı işleme parametreleri kullanılarak, kesilen kompozit tabakalarda meydana gelen değişimler rapor edilmiştir. Kompozit malzemelere ÇCKNT katkısının, kompozit yapıların işlenebilirliğinin üzerine etkisi incelenmiştir ayrıca her bir imalat yönteminin avantajları ve dezavantajları vurgulanmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıda belirtilen önemli sonuçlardan bahsetmek mümkündür;

- % 0,1 ÇCKNT katkı maddesi ile üretilen kompozit malzemelerin saf örneklerden daha güçlü olduğu tespit edildi. Nanopartiküller ile düşük yoğunluklu, yüksek elastik modüle ve çekme dayanımına sahip nanokompozitler elde edildi.
- Nanopartikül desteği ile yüzey sertliği % 16,66, lif hacmi oranı % 1,16, boşluk hacmi oranı % 3,67 oranında artmıştır. Öte yandan, matris hacim oranı % 4,84, yoğunluk % 1,85, bileşik katman kalınlığı % 6,25 azalmıştır. ÇCKNT'lerin yüksek yüzey / hacim oranı ve son derece ince tel formunun yüksek sertliği kompozit yapının mekanik özelliklerini etkilemiştir.

Farklı kesme formlu zımbalar ve farklı kesme boşluğuna sahip kalıplar kullanılarak delik elde edilmesi sonucunda;

- Load Cell ve fujifilm prescale kullanılarak yapılan ölçümlerde, delme zımbası yüzeyinin artması ile kesme kuvvetinin arttığı tespit edildi. Maksimum kesme kuvveti, 90° tip zımbada ölçüldü ve minimum kesme kuvveti C tipi zımbada ölçüldü. Fujifilm prescale

renk sonuçları incelendiğinde, en büyük renk değişimi 90° form zımbasında, en az renk değişimi ise C tipi zımbada gözlemlendi.

- Kesme boşluğu ölçüsünün artması neticesinde kompozitleri kesmek için gerekli olan kesme kuvveti azaldı ve kompozit malzemelerde elde edilen delik ölçüleri arttı.
- Ø8 mm zımba kullanılarak elde edilen deliklerin zımba çapından daha küçük olduğu bulundu. ÇCKNT katkılı kompozit yapıların delik çaplarının katkısız kompozitlere göre daha küçük olduğu tespit edildi. Nanopartikül katkısı, kompozit yapıya stabilite kattı ve kesme yüzeylerinin daha homojen olmasını sağladı.
- Kompozit tabakaların delinmesi sonrası, deliklerden çıkan pulların zımba ve delik çapından daha büyük olduğu tespit edildi. 90° düz kesim zımbasının kullanıldığı deneyde, pul yüzeyinin düz, alt ve üst yüzeyinin paralel olduğu tespit edildi. Pulların açılı zımbalar ile kesimlerinde; kesme noktalarının düz, kopma noktalarının deforme olduğu görüldü.
- Zımba ve kalıp kullanılarak yapılan delme işlemlerinden sonra kompozit yapılarda delaminasyon, ayrılma, bozulma ve yüzey sertleşmesi görülmedi.
- ÇCKNT katkılı kompozit malzemelerin kesim yüzeyinin daha temiz olduğu ve malzeme mukavemetinin daha yüksek olduğu tespit edildi.
- Kompozit malzemelerin delinmesinde kullanılan C tipi zımba, zayıf kesme kenarları nedeniyle aşındı ve başka hiçbir kesici zımbada aşınma görülmedi.
- Zımba ve kalıp yöntemi ile yapılan delme işleminde; çevreye ve insan sağlığına zarar veren kesme tozları (lif, epoksi, nano parçacık yongaları) görülmedi.

Farklı matkap nokta açısına sahip HSS matkaplar ve değişken fener mili devri, ilerleme oranı parametreleri ile delik elde edilmesi sonucunda;

- Optimum çapaksız delme işlemi 118° matkap kullanımı; 1000 dev/dak fener mili devri ve 200 mm/dak ilerleme parametreleri ile elde edildi. 90° ve 118° matkap uçları kullanılarak yapılan delme işleminde deliklerin giriş ve çıkış kısımlarında çapaklanma görülmedi.
- Sabit 1000 dev/dak fener mili devri ve 200 mm/dak ilerleme parametrelerinde; 140° matkap ucu ile yapılan delme işleminde, ÇCKNT katkılı kompozit yapıların delik çıkışında blok şeklinde delaminasyon oldu.
- 90° ve 118° matkap uçları kullanılarak yapılan delme işleminde deliklerin giriş ve çıkış kısımlarında, sabit 1000 dev/dak fener mili devri ile 600 mm/dak ve 1000 mm/dak



ilerleme hızlarında çapak gözlemlenmiştir. 140° matkap ucu ile yapılan delme işleminde ise giriş ve çıkışta yoğun çapaklanma görüldü.

- 140° matkap ucun kullanılarak yapılan delme işleminde, nanopartikül katkıli kompozit malzemenin delik çıkışında blok şeklinde delaminasyon görüldü. Saf kompozit levhanın delik çıkışında parçalanma şeklinde delaminasyon oldu. ÇCKNT katkı maddesinin, kompozit yüzeylerinde, epoksi karışımında bağlayıcı olduğu bulundu.
- Sabit fener mili devri değerlerinde, ilerleme hızı ve matkap nokta açısı arttıkça; delaminasyon arttı. Matkap ucu açısı arttıkça çapaklanma arttı.
- Katkıli ve saf kompozit plakalarda en önemli delaminasyon; 140° matkap nokta açısı ile 1000 dev/dak'lık fener mili devri ve 1000 mm/dak'lık ilerleme hızı parametrelerinde gözlemlendi.

Parmak freze çakısı kullanarak orbital delme yöntemiyle delik elde edilmesi sonucunda;

- Parmak freze çakısı ile delik delme yönteminde istenilen delik çapına  $\pm 0,02$  mm hassasiyet ile ulaşıldığı görülmüştür.
- Yüksek fener mili değerleri ile sabit 250 mm/dak ilerleme değerlerinde delik içinde, giriş ve çıkışında çapaklanma görülmemiştir.
- 500 dev/dak düşük fener mili devri kullanılarak; 500, 1000, 1500 mm/dak ilerleme parametreleri ile yapılan delme işleminde freze giriş kısımlarında çapaklanmalar görülmüştür.
- Epoksi fiber karışımı kompozit yapının kesici takımın aşınmasına sebep olduğu, ÇCKNT katkısı ile kesici takımın aşınmasının daha da arttığı tespit edilmiştir.

Parmak freze çakısı kullanılarak kompozit yapılarda slotların açılması ve yüzey frezelenmesi sonucunda;

- % 0,1 ÇCKNT katkı maddesi, kompozit yapıların yüzey pürüzlülüğünü azaltmıştır. Test numunelerinin karbon nanotüp katkısı ile yüzeyinin saf kompozit numunelerin yüzeyinden daha pürüzsüz ve düzenli olduğu bulundu. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde nanopartikül katkı maddesi ile Ra, Rq, Rz değerlerinin azaldığı ölçüldü.
- 1500 mm /dak ilerleme hızında fener mili devri arttıkça yüzey pürüzlülüğü azaldı. Ayrıca 3600 dev/dak fener mili devri değerinde ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır.

- ÇCKNT takviyeli kompozit katmanlarının frezeleme yüzeylerinin saf kompozit katmanlardan daha çapaksız olduğu ve pürüzsüz kesme kenarlarına sahip olduğu görülmüştür.
- Kompozit malzemelerin yüzey frezelemede kullanılan freze çakıların yan ve ön kesme yüzeylerinde aşınmalar tespit edilmiştir. ÇCKNT takviyeli kompozit levhaların frezelenmesinde kullanılan freze bıçağının, saf kompozit levhaları frezeleyen çakılara göre daha fazla aşındığı tespit edildi.
- ÇCKNT katkılı ve katkısız kompozit tabakaların yüzeylerinin frezelenmesi sonrası kompozit yapının kesme kenarlarında yüzey sertliği değişmedi.

Farklı kesme gücü ve kesme hızı parametreleri kullanılarak CO<sub>2</sub> Lazer kesim yöntemi ile kompozit malzemeler delinerek;

- Lazerin ilk teması parça giriş yüzeyi alanına geldiğinden, lazerin delik girişinde ısıdan etkilenen bölge, yüzey sertleşmesi, fiberlerin kömürleşmesi, epoksi çekilmesi delik çıkışındaki hasarlara göre daha belirgin bulunmuştur. Lazerle kesilen kısmın temas süresi, kesme hızı düştükçe arttığı için HAZ artmıştır.
- Saf ve katkılı kompozit malzemenin giriş deliği ebadı azalan kesme hızı ile arttı. Düşük kesme hızına bağlı olarak lazerin artan temas süresi epoksi ve elyafın tamamen yanmasına neden oldu. Öte yandan, çıkış deliği boyutu artan kesme hızı ile birlikte artmıştır. Artan kesme hızı ve lazerin hızlı dairesel hareketi çıkış açıklığının boyutunu etkiledi.
- Saf kompozitin kerf boyutunun katkılı kompozitten daha büyük olduğu tespit edildi. ÇCKNT'lerin katkısı kerf büyüklüğünde bir küçülmeye neden olmuştur. Lazerin ilk teması giriş bölgesinde olduğundan, saf ve katkılı kompozitin giriş kerf ölçüleri, hem saf hem de katkılı kompozitin çıkış kerf çaplarından daha yüksektir.
- Lazer kesiminden sonra kompozit yapılarda delaminasyon, ayrılma, bozulma ve çapak oluşumu gözlenmedi ancak yüzey sertleşmesi tespit edildi. ÇCKNT'lerin katkısının lazerle kesme ve ısı nedeniyle oluşan sertlik değişimini azalttığı bulunmuştur.
- Lazer kesim ile çevreye ve insan sağlığına zarar veren kesme tozları (fiber, epoksi, nano parçacık yongaları) görülmedi fakat işleme sırasında epoksi yanma gazları görüldü.

Garnet aşındırıcı katkılı su jeti yöntemi kullanılarak yapılan kesme işlemleri sonucunda;

- Kesme hızı düştükçe, kompozit malzemenin suyla temas süresi arttı ve sonuç olarak delaminasyon arttı. Epoksi ve cam elyaf katmanlarının ayrılması ile delik çevresinde kalınlık arttı. Ek olarak, yüzeydeki epoksi yapısı, deliklerin etrafındaki katmanların ayrılmasından dolayı hasar gördü ve yüzey sertliği azaldı.
- Kesme hızı arttıkça, delik daireselliği bozuldu ve kesme yüzeyi girintili oldu. Kesme hızının artması nedeniyle, su jetinin hızlı hareketi kerf konik açısında bir artışa ve delik çapının artmasına neden oldu.
- Su jeti kesim yöntemi kullanılarak yapılan kesme işleminde malzeme kesimini ve çevreyi olumsuz etkileyen termal etkiler ve gazlar görülmemiştir.

## 6.2. Öneriler

Yapılan çalışmaya ek olarak;

- Farklı oranlarda nanopartikül ilavesi yapılarak üretim ve işlenebilirlik çalışmaları tekrarlanabilir.
- Her bir imalat yöntemi için farklı çalışma parametreleri seçilebilir ve etkileri analiz edilebilir.
- Kompozit malzeme üretiminde kullanılan cam elyafı örgü tipi, tabaka sayısı, matriks malzeme cinsi değiştirilerek farklı kombinasyonlarda üretim yapılabilir.
- Her bir işleme metodunun endüstride en çok kullanıldığı alanlar gözetilerek detaylı çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Abdullah, A. B., Zain, M. S. M., & Samad, Z. (2017). Delamination assessment of punched holes on laminated composite panels based on the profile measurement technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4), 993-1000.
- Abrao, A. M., Rubio, J. C., Faria, P. E., & Davim, J. P. (2008). The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials & Design*, 29(2), 508-513.
- Alberdi, A., Suárez, A., Artaza, T., Escobar-Palafox, G. A., & Ridgway, K. (2013). Composite cutting with abrasive water jet. *Procedia Engineering*, 63, 421-429.
- Ameur, M. F., Habak, M., Kenane, M., Aouici, H., & Cheikh, M. (2017). Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: cases of exit delamination and cylindricity error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9-12), 2557-2571.
- Azmi, A. I., Lin, R. J. T., & Bhattacharyya, D. (2013). Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(1-4), 247-261.
- Azmir, M. A., & Ahsan, A. K. (2008). Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining. *Journal of materials processing technology*, 198(1-3), 122-128.
- Azmir, M. A., & Ahsan, A. K. (2009). A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(20), 6168-6173.
- Bazli, M., Jafari, A., Ashrafi, H., Zhao, X. L., Bai, Y., & Raman, R. S. (2020). Effects of UV radiation, moisture and elevated temperature on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Construction and Building Materials*, 231, 117137.
- Behera, R. P., Rawat, P., Singh, K. K., Ha, S. K., Gaurav, A., & Tiwari, S. K. Fracture analysis and mechanical properties of three phased glass/epoxy laminates reinforced

- with multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* (2019)
- Boccarusso, L., De Fazio, D., Durante, M., Langella, A., & Minutolo, F. M. C. (2019). CFRPs drilling: comparison among holes produced by different drilling strategies. *Procedia CIRP*, 79, 325-330.
- Chan, H. Y., Abdullah, A. B., & Samad, Z. (2015). Precision punching of hole on composite panels.
- Chaudhury, P., & Samantaray, S. (2017). Role of Carbon Nano Tubes in Surface Modification on Electrical Discharge Machining-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 4079-4088.
- Choudhury, I. A., Chong, W. C., & Vahid, G. (2012). Hole qualities in laser trepanning of polymeric materials. *Optics and lasers in engineering*, 50(9), 1297-1305.
- Choudhury, I. A., & Chuan, P. C. (2013). Experimental evaluation of laser cut quality of glass fibre reinforced plastic composite. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(10), 1125-1132.
- Chouhan, H., Singh, D., Parmar, V., Kalyanasundaram, D., & Bhatnagar, N. (2016). Laser machining of Kevlar fiber reinforced laminates—Effect of polyetherimide versus polypropylene matrix. *Composites Science and Technology*, 134, 267-274.
- Davim, J. P., & Reis, P. (2003). Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study. *Materials & design*, 24(5), 315-324.
- Davim, J. P., Reis, P., & Antonio, C. C. (2004). Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289-297.
- Deshpande, N., Vasudevan, H., & Rajguru, R. (2014). Investigation of the machinability characteristics of GFRP/vinyl ester composite using design of experiments. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 2, 15(3-4), 186-200.

- Doreswamy, D., Shivamurthy, B., Anjaiah, D., & Sharma, N. Y. (2015). An investigation of abrasive water jet machining on graphite/glass/epoxy composite. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2015.
- Durgun, İ. (2014). Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, Bursa, Mayıs.
- Dydek, K., Latko-Durałek, P., Boczkowska, A., Sałaciński, M., & Kozera, R. (2019). Carbon Fiber Reinforced Polymers modified with thermoplastic nonwovens containing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 173, 110-117.
- Erturk, A. T., Vatansever, F., Yarar, E., & Karabay, S. (2019). Machining behavior of multiple layer polymer composite bearing with using different drill bits. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107318.
- El-Hofy, M., Helmy, M. O., Escobar-Palafox, G., Kerrigan, K., Scaife, R., & El-Hofy, H. (2018). Abrasive water jet machining of multidirectional CFRP laminates. *Procedia Cirp*, 68, 535-540.
- Franz Kreupl, Andrew P. Graham, Maik Liebau, Georg S. Duesberg, Robert Seidel, Eugen Unger.(2004). Carbon Nanotubes for Interconnect Applications. San Francisco, CA, December 13-15, Iedm Technical Digest. IEEE. DOI: 10.1109/IEDM.2004.1419261
- Fuchs, A. N., Schoeberl, M., Tremmer, J., & Zaeh, M. F. (2013). Laser cutting of carbon fiber fabrics. *Physics Procedia*, 41, 372-380.
- Gautam, G. D., & Mishra, D. R. (2019). Firefly algorithm based optimization of kerf quality characteristics in pulsed Nd: YAG laser cutting of basalt fiber reinforced composite. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107340.
- Geier, N., Davim, J. P., & Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105552.
- Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., ... & Zhang, D. (2019). Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*.

- Geng, D., Zhang, D., Teng, Y., & Jiang, X. (2018). An experimental investigation on hole exit geometric error in orbital drilling process. *Procedia CIRP*, 71, 128-133.
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U., & Gemi, D. S. (2019). An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation. *Composites Part B: Engineering*, 172, 186-194.
- Ghafari-zadeh, S., Chatelain, J. F., & Lebrun, G. (2016). Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4), 399-409.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- Groover, M. P., Prensipieri, M. İ., Yurdakul, M., & Tansel, Y. (2016). 1150.
- Gupta, M., & Kumar, S. (2015). Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD-GFRP using PCA and Taguchi method. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(1), 70-81.
- Hawreen, A., Bogas, J. A., & Kurda, R. (2019). Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(10), 8361-8376.
- Heidary, H., & Mehrpouya, M. A. (2019). Effect of backup plate in drilling of composite laminates, analytical and experimental approaches. *Thin-Walled Structures*, 136, 323-332.
- Hejjaji, A., Zitoune, R., Toubal, L., Crouzeix, L., & Collombet, F. (2019). Influence of controlled depth abrasive water jet milling on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 397-410.
- Hintze, W., Schötz, R., Mehnen, J., Köttner, L., & Möller, C. (2018). Helical milling of bore holes in Ti6Al4V parts produced by selective laser melting with simultaneous support structure removal. *Procedia Manufacturing*, 18, 89-96.
- Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of materials processing technology*, 140(1-3), 335-339.

- Hou, G., Zhang, K., Fan, X., Luo, B., Cheng, H., Yan, X., & Li, Y. (2020). Analysis of exit-ply temperature characteristics and their effects on occurrence of exit-ply damages during UD CFRP drilling. *Composite Structures*, 231, 111456.
- Hussain, G., Al-Ghamdi, K. A., Bijanrostami, K., & Alehashemi, A. J. (2016). Determination of optimum process parameters for cutting hole in a randomly-oriented glass fiber reinforced epoxy composite by milling process: maximization of surface quality and cut-hole strength. *Polymers and Polymer Composites*, 24(2), 81-89.
- Hussein, R., Sadek, A., Elbestawi, M. A., & Attia, M. H. (2019). Elimination of delamination and burr formation using high-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1-4), 859-873.
- Irving, P., & Soutis, C. (Eds.). (2014). *Polymer composites in the aerospace industry* (No. 50). Elsevier.
- Jayaprakash, V., Sivasaravanan, S., Raja, V. B., Anish, M., Raman, N., & Laxman, N. (2019). Optimization of drilling parameters of epoxy/rice husk composite material. *Materials Today: Proceedings*.
- Jena, H., & Kumar, M. (2019). Study of influence of process parameters in drilling of glass fibre reinforced polymer composite with clam shell filler. *Materials Today: Proceedings*.
- Jesthi, D. K., Nayak, R. K., Nanda, B. K., & Das, D. (2019). Assessment of Abrasive Jet Machining of Carbon and Glass Fiber Reinforced Polymer Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3116-3121.
- Jeykrishnan, J., Ramnath, B. V., Vignesh, S. S., Sridharan, P., & Saravanan, B. (2019). Optimization of Process Parameters in Abrasive Water Jet Machining/Cutting (AWJM) of Nickel Alloy using Traditional Analysis to Minimize Kerf Taper Angle. *Materials Today: Proceedings*, 16, 392-397.
- Mahmoodi, M. (2013). *Electrical, thermal, and machining behaviour of injection moulded polymeric cnt nanocomposites* (Doctoral dissertation, University of Calgary).



- Manoharan, T., Thangaiah, W. J. J., Irulappasamy, S., & Dhar, S. (2018). Study of delamination factors on the abrasive water-jet drilling of fibre metal laminates for military cargo aircraft. *Science & technology research institute for defence (stride)*, 181, 248.
- Ma, P. C., Mo, S. Y., Tang, B. Z., & Kim, J. K. (2010). Dispersion, interfacial interaction and re-agglomeration of functionalized carbon nanotubes in epoxy composites. *Carbon*, 48(6), 1824-1834.
- Marimuthu, S., Dunleavey, J., Liu, Y., Antar, M., & Smith, B. (2019). Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite. *Optics & Laser Technology*, 117, 251-259.
- Matthews, F. L., Davies, G. A. O., Hitchings, D., & Soutis, C. (2000). *Finite element modelling of composite materials and structures*. Elsevier.
- Mayuet, P. F., Girot, F., Lamíkiz, A., Fernández-Vidal, S. R., Salguero, J., & Marcos, M. (2015). SOM/SEM based characterization of internal delaminations of CFRP samples machined by AWJM. *Procedia engineering*, 132, 693-700.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CrC press.
- McEuen, P. L., Fuhrer, M. S., & Park, H. (2002). Single-walled carbon nanotube electronics. *IEEE transactions on nanotechnology*, 1(1), 78-85.
- Mohan, N. S., Kulkarni, S. M., & Ramachandra, A. (2007). Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 265-271.
- Molnár, L., Csiszér, T., Borbás, L., & Bognár, L. L. (2019). Optimisation of laser beam cutting parameters of high density composite fibre cement flat board. *Materials Today: Proceedings*, 12, 388-394.
- Montesano, J., Fawaz, Z., & Bougherara, H. (2015). Non-destructive assessment of the fatigue strength and damage progression of satin woven fiber reinforced polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 71, 122-130.

- M'Saoubi, R., Axinte, D., Soo, S. L., Nobel, C., Attia, H., Kappmeyer, G., ... & Sim, W. M. (2015). High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Annals*, 64(2), 557-580.
- Mudhukrishnan, M., Hariharan, P., & Palanikumar, K. (2020). Measurement and analysis of thrust force and delamination in drilling glass fiber reinforced polypropylene composites using different drills. *Measurement*, 149, 106973.
- Oliveira, V., Sharma, S. P., De Moura, M. F. S. F., Moreira, R. D. F., & Vilar, R. (2017). Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation. *Optics and Lasers in Engineering*, 94, 37-43.
- Özkan, V. (2019). Petrol türevi polimerlere nanopartikül katkılandırarak nanokompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
- Panchagnula, K. K., & Palaniyandi, K. (2018). Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review. *Journal of materials research and technology*, 7(2), 180-189.
- Palanikumar, K., Campos Rubio, J., Abrao, A. M., Esteves Correia, A., & Davim, J. P. (2008). Influence of drill point angle in high speed drilling of glass fiber reinforced plastics. *Journal of composite Materials*, 42(24), 2585-2597.
- Patel, P., Sheth, S., & Patel, T. (2016). Experimental analysis and ANN modelling of HAZ in laser cutting of glass fibre reinforced plastic composites. *Procedia Technology*, 23, 406-413.
- Phapale, K., Singh, R., Patil, S., & Singh, R. K. P. (2016). Delamination characterization and comparative assessment of delamination control techniques in abrasive water jet drilling of CFRP. *Procedia Manufacturing*, 5, 521-535.
- Prasad, K. S., & Chaitanya, G. (2019). Analysis of delamination in drilling of GFRP composites using Taguchi Technique. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3252-3261.
- Prasad, K. S., & Chaitanya, G. (2019). Experimental study on surface roughness and dimensional accuracy of hole machining process on GFRP composites using abrasive water jet technique. *Materials Today: Proceedings*.

- Qiao, J. W., Ye, H. Y., Yang, H. J., Liang, W., Xu, B. S., Liaw, P. K., & Chen, M. W. (2013). Dynamic shear punching of metallic glass matrix composites. *Intermetallics*, 36, 31-35.
- Kakinuma, Y., Ishida, T., Koike, R., Klemme, H., Denkena, B., & Aoyama, T. (2015). Ultrafast feed drilling of carbon fiber-reinforced thermoplastics. *Procedia CIRP*, 35, 91-95.
- Karataş, M. A., & Gökkaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326.
- Khoramishad, H., Alikhani, H., & Dariushi, S. (2018). An experimental study on the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on high-velocity impact behavior of fiber metal laminates. *Composite Structures*, 201, 561-569.
- Kumar, D., & Gururaja, S. (2019). Abrasive waterjet machining of Ti/CFRP/Ti laminate and multi-objective optimization of the process parameters using response surface methodology. *Journal of Composite Materials*, 0021998319884611.
- Kumar, D., & Singh, K. K. (2019). Effect of nanofiller on fibre laser drilling quality of carbon fibre reinforced polymer composite laminates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(4), 857-870.
- Leone, C., Genna, S., & Tagliaferri, V. (2014). Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 53, 43-50.
- Li, J. (2018). Effect of multiwalled carbon nanotubes (MWNT) on the properties of high impact polystyrene (HIPS). *Journal of Nanomaterials*, 2018.
- Liu, D., Tang, Y., & Cong, W. L. (2012). A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite structures*, 94(4), 1265-1279.
- Li, M., Huang, M., Chen, Y., Gong, P., & Yang, X. (2019). Effects of processing parameters on kerf characteristics and surface integrity following abrasive waterjet slotting of Ti6Al4V/CFRP stacks. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 82-95.

- Li, M., Huang, M., Chen, Y., Kai, W., & Yang, X. (2019). Experimental study on hole characteristics and surface integrity following abrasive waterjet drilling of Ti6Al4V/CFRP hybrid stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-12), 4779-4789.
- Li, M., Gan, G., Zhang, Y., & Yang, X. (2019). Thermal damage of CFRP laminate in fiber laser cutting process and its impact on the mechanical behavior and strain distribution. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(4), 1511-1522.
- Li, M., Gan, G., Zhang, Y., & Yang, X. (2020). Thermal defect characterization and strain distribution of CFRP laminate with open hole following fiber laser cutting process. *Optics & Laser Technology*, 122, 105891.
- Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J. R. S., & Tan, D. C. G. (1999). Machinability study of carbon fiber reinforced composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 89, 292-297.
- Rahme, P., Moussa, P., Lachaud, F., & Landon, Y. (2019). Effect of adding a woven glass ply at the exit of the hole of CFRP laminates on delamination during drilling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105731.
- Saleem, M., Toubal, L., Zitoune, R., & Bougherara, H. (2013). Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 55, 169-177.
- San Juan, V., Fernández, E., Pincheira, G., Meléndrez, M., & Flores, P. (2016). Evaluation of the fill yarns effect on the out-of-plane compressive fatigue behavior for an unidirectional glass fiber reinforced epoxy composite. *Composite Structures*, 138, 237-242.
- Shafraniuk, S. (2015). *Graphene: Fundamentals, Devices, and Applications*. Jenny Stanford Publishing.
- Shanmugam, D. K., Nguyen, T., & Wang, J. (2008). A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(6), 923-929.

- Shanmugam, D. K., & Masood, S. H. (2009). An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites. *Journal of materials processing technology*, 209(8), 3887-3893.
- Song, P., Cao, Z., Cai, Y., Zhao, L., Fang, Z., & Fu, S. (2011). Fabrication of exfoliated graphene-based polypropylene nanocomposites with enhanced mechanical and thermal properties. *Polymer*, 52(18), 4001-4010.
- Sourd, X., Zitoune, R., Crouzeix, L., Salem, M., & Charlas, M. (2019). New model for the prediction of the machining depth during milling of 3D woven composite using abrasive waterjet process. *Composite Structures*, 111760.
- Sultana, I., Shi, Z., Attia, M. H., & Thomson, V. (2016). Surface integrity of holes machined by orbital drilling of composites with single layer diamond tools. *Procedia CIRP*, 45, 23-26.
- Şahin, Y. (2015). *Kompozit malzemelere giriş*. ISBN:978-975-02-3463-7, (3.Bs), Gazi Yayınevi, Ankara.
- Takahashi, K., Tsukamoto, M., Masuno, S., & Sato, Y. (2016). Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 84, 114-122.
- Thakur, R. K., Singh, K. K., & Ramkumar, J. (2019). Experimental investigation of abrasive waterjet hole cutting on hybrid carbon/glass composite. *Materials Today: Proceedings*.
- Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2007). Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials. *International journal of mechanical sciences*, 49(8), 983-988.
- Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S., Reucher, G., Hufschmied, R., Frank, A., ... & Protz, F. (2016). Machining of carbon and glass fibre reinforced composites. *Procedia CIRP*, 46, 63-66.
- Unde, P. D., Gayakwad, M. D., Patil, N. G., Pawade, R. S., Thakur, D. G., & Brahmanekar, P. K. (2015). Experimental investigations into abrasive waterjet machining of carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Composites*, 2015.

- Upputuri, H. B., & Nimmagadda, V. S. (2019). Optimization of drilling process parameters used in machining of glass fiber reinforced epoxy composite. *Materials Today: Proceedings*.
- Voit, M., Reinhart, G., & Metzger, T. (2017). Experimental study on water jet cutting of unidirectional carbon fiber fabrics. *Procedia CIRP*, 66, 221-226.
- Wiggers, H., Ferro, O., Sales, R. D. C. M., & Donadon, M. V. (2018). Comparison between the mechanical properties of carbon/epoxy laminates manufactured by autoclave and pressurized prepreg. *Polymer Composites*, 39(S4), E2562-E2572.
- Xu, J., & El Mansori, M. (2017). Wear characteristics of polycrystalline diamond tools in orthogonal cutting of CFRP/Ti stacks. *Wear*, 376, 91-106.
- Yang, C. K., Lee, Y. R., Hsieh, T. H., Chen, T. H., & Cheng, T. C. (2018). Mechanical property of multiwall carbon nanotube reinforced polymer composites. *Polymers and Polymer Composites*, 26(1), 99-104.
- Yang, Y., Zhao, X., Peng, G., & Liu, W. (2018). Effects of nitrile rubber and multi-walled carbon nanotubes on damage recovery and physical mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites. *High Performance Polymers*, 30(7), 856-863.
- Yip, M. C., Lin, Y. C., & Wu, C. L. (2011). Effect of multi-walled carbon nanotubes addition on mechanical properties of polymer composites laminate. *Polymers and Polymer Composites*, 19(2-3), 131-140.
- Zain, M. S. M., Abdullah, A. B., & Samad, Z. (2017). Effect of puncher profile on the precision of punched holes on composite panels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9-12), 3331-3336.
- Zhang, X., Yu, T., & Zhao, J. (2020). An analytical approach on stochastic model for cutting force prediction in milling ceramic matrix composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 168, 105314.
- Zou, F., Chen, J., An, Q., Cai, X., & Chen, M. (2019). Influences of clearance angle and point angle on drilling performance of 2D Cf/SiC composites using polycrystalline diamond tools. *Ceramics International*.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : CERİTBİNMEZ, Ferhat  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.09.1988, Hatay  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : -  
 e-mail : ferhatceritbinmez@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	İskenderun Teknik Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2020
Yüksek lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2014
Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2011
Lise	İskenderun Lisesi	2005

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	Haier Europe	Makine Mühendisi
2017-2018	Candy Hoover Group	Makine Mühendisi
2012-2016	Fil Filtre A.Ş	Makine Mühendisi
2011-2012	Türk Silahlı Kuvvetleri	Asteğmen

### Yabancı Dil

İngilizce, Arapça

### Yayımlar

Uluslararası hakemli dergilere gönderilen makaleler

Ceritbinmez F, Yapici A. (2020). An Investigation on cutting of the MWCNTs doped composite plates by AWJ. Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE). DOI: 10.1007/s13369-020-04363-3

Ceritbinmez F, Yapici A. (2020). An Investigation on cutting of the MWCNTs doped composite plates by CO<sub>2</sub> Laser beam. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. (Hakemlerde).

Ceritbinmez F, Yapici A., Kanca E. (2020). The Effect of Nano Particle Additive on Surface Milling in Glass Fiber Reinforced Composite Structures. Mechanika. (Hakemlerde).

Ceritbinmez F, Yapici A. (2020). An Investigation of Punching the MWCNTs doped Composite plates by Using Different Cutting Profiles. The Journal Tehnički vjesnik – Technical Gazette. (Hakemlerde).

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler

Ceritbinmez F, Yapici A. (2019). The Effect of MWCNTs on the Orbital Drilling of Composite Materials by End Mill Cutter. International Congress of Academic Research (ICAR) 16-18 September 2019 Bolu - TURKEY.

Ceritbinmez F, Kanca E., Kırar E. (2015). Analyse of Effect to The Dust Holding Capacity of Gasket Profiles Which are used for Air Filters. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering And Science (ISITES) 3-5 June 2015 Valencia - SPAIN.

Ceritbinmez F, Kanca E., Demir M., Koç M. (2014). Detecting The Blurring Amount With Image Processing Method in Plastic Enjection Forming. 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering And Science (ISITES) 18-20 June 2014 Karabük - TURKEY.

Ceritbinmez F, Kanca E., Demir M. (2014). Plastik Parça Üretiminde Çapaklanma



Miktarinin Genetik Algoritma Yöntemiyle Tahmin Edilmesi. 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering And Science (ISITES) 18-20 June 2014 Karabük - TURKEY.

**Hobiler**

Yüzmek, Koşmak, Seyahat etmek, Tasarım yapmak.



## DİZİN

### A

Aluminyum · 5  
Amatek (Load Cell) · iv, v

### B

Barcol impressor · 42  
bor · 4

### C

CMM · xvi, 63  
CNC · iv, v, xiii, xvi, 46, 48, 49, 50  
CO<sub>2</sub> Lazer · 56, 93, 104  
CSLM · xvi, 21

### Ç

çapak · 102, 105  
ÇCKNT · iv, v, xvi, 2, 3, 5, 6, 37,  
58, 59, 73, 77, 78, 80, 81, 82,  
84, 85, 89, 92, 97, 98, 100,  
101, 102, 103, 104, 105  
çekme dayanımı · iv, 2  
çekme testi · iv, 40, 58  
çinko · 5, 49

### D

delaminasyon · 10, 11, 12, 13, 14,  
17, 18, 19, 47, 54, 65, 70, 73,  
74, 76, 77, 79, 86, 88, 89, 92,  
93, 102, 103, 105  
delik çıkış ölçüsü · xi, xii, 86, 93,  
96, 97  
Delik giriş ölçüsü · 93

delik ihtiyacı · 2, 47  
dijital kumpas · 86, 93  
doğal elyaflar · 4

### E

elastik modul · iv, 58  
elastomerler · 5  
enjeksiyon kalıplama · 7, 15  
epoksi çekilmesi · 99, 104

### F

fener mili devri · 14, 48, 50, 72,  
73, 75, 76, 78, 79, 80, 81, 102,  
103, 104  
ferezeleme · iv  
fiber hacim · iv, 59  
fiberlerin kömürleşmesi · 99, 104  
flax · 4  
floresan mikroskopisi · 81  
Fujifilm (Prescale) · iv, v, 60  
fulleren · 6

### G

Garnet · iv, v, xiii, 54, 105  
grafit · 6, 17

### H

HAZ · 22, 23, 99, 104, 112  
hemp · 4  
HIPS · xvi, 14, 113  
hidrolik basıncı · 18, 26, 92  
hindistan cevizi elyafı · 4

### i

ilerleme · iv, 10, 13, 14, 17, 20,  
50, 51, 70, 71, 72, 73, 75, 76,  
77, 78, 79, 80, 81, 102, 103,  
104  
istiridyeler · 1

### J

jute · 4

### K

kalınlık farkları · 86  
Kama yeri · 52  
karbon · iv, vii, xi, xiii, 2, 4, 6, 7,  
10, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 21,  
22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31,  
36, 37, 82, 103  
Katkılı kompozit · xiii, xiv, 58, 65,  
66, 73, 83, 88, 89, 91, 94, 98,  
100  
kenaf · 4  
kesme boşluğu · 11, 45, 46, 60,  
61, 62, 65  
Kesme boşluğu · 101  
kesme formu · 45, 68  
kesme kuvveti · 16, 17, 62, 101  
konvansiyonel delme · iv, 3, 47,  
49, 50, 100

### L

lazer kesim · iv, v, 9, 21, 22, 23,  
56, 93, 100  
lazer tarama · iv, 21, 63, 64

lignin · 1

---

## M

magnezyum · 5

matkap nokta açısı · 76, 103

matriks hacim · iv, 41

---

## N

NC · iv, v, xvi, 46, 49

Nikon SMZ 745T · iv, v, 58, 88, 99

Nikon stereo mikroskop · 70

---

## O

ok yayları · 1

Olympus BX-53 PHAKO stereo  
mikroskobu · iv

Olympus mikroskobu · 81

orbital delme · iv, 3, 12, 46, 47,  
49, 73, 100, 103

organik elyaflar · 4

---

## P

PolyWorks · 64

punta · 25

---

## R

RDCAM · 56

ROMER ABSOLUTE ARM · 64

---

## S

*Saf kompozit* · xiii, xiv, 58, 65, 66,  
73, 81, 83, 85, 87, 89, 94, 98,  
100, 102

Salyangozlar · 1

SEM · xiii, xvi, 14, 16, 21, 23, 25,  
54, 111

seramik · 4, 16, 28, 55

sertlik · iv, 1, 20, 54, 70, 74, 78,

86, 91, 93, 98, 99, 105

slika kumu · 53

soyma kumaşı · 8, 38

spiral hortumlar · 8, 38

stratejik malzeme · iv, 2

su jeti kesim · iv, v, 9, 18, 86, 100

Surftest SJ-310 · iv, v, 43, 44

---

## T

takım itme kuvveti · 10

takım ömrü · 16

taşlama · 9, 10

terazi · 41

termal etkiler · 10, 56, 94, 98,  
105

termo şekillendirme · 7

termoplastikler · 5

termosetler · 5

tornalama · 9

---

## V

vakum battaniyesi · 8

Vakum infüzyon · iv, 8, 9

Vakum naylonu · 8

vakum sızdırmazlık bantları · 8

---

## Y

yakma testi · iv

yoğunluk · iv, viii, 1, 2, 4, 35, 38,  
41, 59, 101

yüzey sertleşmesi · 102, 104, 105

---

## Z

Zimba ile delme · iv, 64

Zimba ve kalıp yöntemi · 102

Zoller Genius 3s · iv, v, 68, 73, 83



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

