

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN
DELİNMESİNDE TOZ OLUŞUMUNUN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan KAYABAŞI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

TEMMUZ 2023

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN
DELİNMESİNDE TOZ OLUŞUMUNUN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökhan KAYABAŞI
(200891107)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

TEMMUZ 2023

TEZ ONAYI

Gökhan KAYABAŞI tarafından hazırlanan “Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Delinmesinde Toz Oluşumunun Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda (**YÜKSEK LİSANS TEZİ**) olarak kabul edilmiştir.

Danışman:

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Jüri Üyeleri

İmza:

Prof. Dr., Uğur KÖKLÜ

Doç. Dr., Murat MAYDA

Dr. Öğr. Üy., Oğuz KOÇAR

Tez Savunma Tarihi: 05/07/2023

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI
Enstitü Müdürü



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

(İmza)
Gökhan KAYABAŞI







Ayşegül ablama,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda yardım ve desteklerini esirgemeyen, teknik bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye ve Sayın Arş. Gör. Dr. Sezer MORKAVUK'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında maddi ve manevi destekleri ile hep yanımda olan aileme, eğitim sürecimin her bir aşamasını büyük bir titizlikle takip eden Sayın Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğünün 24-YL-21 No.lu Projesi ile desteklenmiştir.

Temmuz 2023

Gökhan KAYABAŞI
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1 Kompozit Malzemeler	5
2.1.1 Kompozit malzemelerin tarihi gelişimi	6
2.1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	7
2.1.2.1 Takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler	7
2.1.2.2 Matris malzemenin cinsine göre kompozit malzemeler	10
2.1.3 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri	12
2.1.3.1 Elle yatırma yöntemi	12
2.1.3.2 Püskürtme yöntemi	13
2.1.3.3 Elyaf sarma yöntemi	13
2.1.3.4 Reçine transfer kalıplama yöntemi	14
2.1.3.5 Profil çekme yöntemi	14
2.1.3.6 Hazır kalıplama yöntemi	14
2.1.3.7 Vakum kalıplama yöntemi	15
2.1.3.8 Otoklav yöntemi	16
2.2 Delik Delme	16
2.3 Kriyojenik İşleme	19
2.4 Kompozit Malzemelerin İşlenmesi Sonucu Oluşan Tozun Etkileri ile İlgili Yapılan Çalışmalar	21
2.5 Kriyojenik Koşullarda İşleme ile İlgili Yapılan Çalışmalar	30
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1 Deneylerde Kullanılan Kesici Takım	35
3.2 Deney Parametreleri	36
3.3 Deney Düzeneği	36
4. BULGULAR	41
4.1 İtme Kuvvetleri	41
4.2 Toz Ölçümleri	44
4.3 Delaminasyon Ölçümleri	48
4.4 Yüzey Pürüzlülüğü	53
4.5 Deliklerin (SEM) Taramalı Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi	56
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	65
KAYNAKLAR	67



KISALTMALAR

CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
KFTK	: Karbon Fiber Takviyeli Kompozit
LN₂	: Sıvı Azot
MQL	: Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama)
NIOSH	: National Institute for Occupational Safety and Health (Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü)
Ni-Ti	: Nikel-Titanyum
OSHA	: Occupational Safety and Health Admin (İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi)
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür



SEMBOLLER

D, d	: Kesici Takım Çapı (mm)
f	: Devir Başına İlerleme (mm/dev)
F_{sz}	: Kesme Kuvveti (N)
F_{vz}	: İlerleme Kuvveti (N)
F_{rz}	: Radyal Kuvvet (N)
L	: Kesme Derinliği (mm)
M_s	: Kesme Momenti (Nm)
N	: Fener Mili Hızı (dev/dk)
t	: İşleme Süresi (dk)
V_c	: Kesme Hızı (m/dk)
V_f	: İlerleme Hızı (mm/dk)
z	: Matkap Ağız Sayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Matris, takviye elemanı ve kompozit yapı şekilleri.	6
Çizelge 4.1 : Delik delme sonucu elde edilen itme kuvvetleri.	42
Çizelge 4.2 : Delik delme sonucu elde edilen tork dataları.	42
Çizelge 4.3 : Temtop PMD 351 toz ölçüm çizelgesi.	44
Çizelge 4.4 : Trotec PC200 toz ölçüm çizelgesi.	46
Çizelge 4.5 : Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları	53



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Takviye ve matris malzemeden oluşan kompozit malzeme (Zor, 2016). ..	5
Şekil 2.2 : Tabakalı kompozit malzemeler (Yozgat, 2018).	9
Şekil 2.3 : Elle yatırma yöntemi (Gülmez, 2018).	12
Şekil 2.4 : Elyaf sarma yöntemi (Termek, 2021).	13
Şekil 2.5 : Profil çekme yöntemi (Anonim, 2017).	14
Şekil 2.6 : Hazır kalıplama yöntemi (Gülmez, 2018).	15
Şekil 2.7 : Vakum kalıplama yöntemi (Karabağ, 2011).	15
Şekil 2.8 : Delme işlemi (Başar ve diğerleri, 2020).	16
Şekil 2.9 : Matkapla delik delmede kesme kuvvetleri (Kaplan, 2010).	18
Şekil 2.10 : Kriyojenik soğutma yöntemleri (Uçak ve Çiçek, 2017).	20
Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan kesici takım.	35
Şekil 3.2 : Deneylerin gerçekleştirildiği dik işlem merkezi.	37
Şekil 3.3 : Temtop PMD 351 ve Trotec PC200 partikül sayıcı.	37
Şekil 3.4 : Keyence VHX-900F dijital mikroskop ile delaminasyon ölçümü.	38
Şekil 3.5 : Zygo ZeGage marka optik profilometre ile yüzey pürüzlülük ölçümü. ...	39
Şekil 3.6 : Taramalı elektron mikroskobu.	39
Şekil 4.1 : Kuru ve kriyojenik şartlarda yapılan testlerde itme kuvveti ve tork oluşumu	43
Şekil 4.2 : Temtop PMD 351 ile ölçülen toz yoğunluğunun ilerleme ve fener mili hızına göre değişimi.	45
Şekil 4.3 : Trotec PC200 ile ölçülen toz partikül sayısının ilerleme ve fener mili hızına göre değişimi.	48
Şekil 4.4 : Delaminasyonun ilerleme hızı ve fener mili hızına göre değişimi.	50
Şekil 4.5 : Kuru kesme koşullarında delik çıkışında oluşan hasarlar.	51
Şekil 4.6 : Kriyojenik kesme koşullarında delik çıkışında oluşan hasarlar.	52
Şekil 4.7 : Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ve fener mili hızına göre değişimi.	54
Şekil 4.8 : Kuru kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğü.	55
Şekil 4.9 : Kriyojenik kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğü.	56
Şekil 4.10 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızı ve 250 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.	58
Şekil 4.11 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızı ve 750 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.	60
Şekil 4.12 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızı ve 250 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.	61
Şekil 4.13 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızı ve 750 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.	62



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DELİNMESİNDE TOZ OLUŞUMUNUN ARAŞTIRILMASI

Gökhan KAYABAŞI

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Temmuz, 2023, 73 sayfa

Günümüzde karbon fiber takviyeli kompozit (KFTK) malzemelerin çeşitli amaçlarla kullanılmaları nedenleriyle delik delme, frezeleme ve tornalama gibi ikincil işlemlere gereksinim duyulmaktadır. Küçük bir uçakta bile 100000'den daha fazla delik olduğu düşünüldüğünde büyük bir uçağın imalat ve imalat sonrası montaj süreçlerinde milyonlarca delik delme işleminin gerektiği bilinmektedir. Bu malzemelerin delinmesi sonucu karşılaşılan en önemli problemlerden bir tanesi toz oluşumudur. Bu çalışmada, karbon fiber bir plakanın kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında üçer tekrarlı şekilde delinmesiyle oluşan itme kuvveti, toz oluşumu, delik çıkış hasarı (delaminasyon), delik içi yüzey pürüzlülüğü ve delik iç yüzeyinde oluşan hasarlar araştırılmıştır. Deney sonuçlarında; itme kuvveti, ilerleme hızının artışıyla artarken fener mili hızının artışıyla azalmaktadır. Yapılan deneylerde 1000 dev/dk fener mili hızında kriyojenik ortam koşullarında oluşan toz miktarının kuru ortam koşullarındaki toz miktarına göre daha az olduğu, fener mili hızının 9000 dev/dk olduğu durumda ise kriyojenik ortam koşullarında oluşan toz miktarının kuru ortam koşullarında oluşan toz miktarından çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Delaminasyon, ilerleme hızının artışıyla artarken fener mili hızının artışıyla azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, ilerleme hızının artışıyla artarken fener mili hızının artışıyla azalmaktadır. Kriyojenik kesme koşullarında itme kuvveti ve delaminasyon kuru kesme koşullarına göre artarken yüzey pürüzlülüğü ise azalmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda genel olarak düşük kesme hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında toz oluşumunun düşük seviyelerde olduğu, ancak yüzey kalitesinin yüksek olması için de kompozit malzemenin yüksek kesme hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında işlenmesi gerektiği gözlemlenmiştir.

AnahtarKelimeler: KFTK, delik delme, toz oluşumu, kriyojenik, delaminasyon.



ABSTRACT

MsThesis

INVESTIGATION OF DUST FORMATION IN DRILLING OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES

Gökhan KAYABAŞI

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

Supervisor: Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

July, 2023, 73 pages

Nowadays, secondary processes such as drilling, milling and turning are needed due to the use of carbon fiber reinforced composite (CFRC) materials for various purposes. Considering that there are more than 100000 holes in even a small aircraft, it is known that millions of hole drilling operations are required in the manufacturing and post-production assembly processes of a large aircraft. One of the most important problems encountered as a result of the drilling of these materials is the formation of dust. In this study, a carbon fiber plate was drilled three times at two different spindle speeds (cutting speed) of 1000 and 9000 rpm in dry and cryogenic cutting conditions and at three different feed rates of 250, 500 and 750 mm/min. The thrust force, dust formation, hole exit damage (delamination), hole surface roughness and damage to the inside of the hole were investigated. In the experimental results; The thrust force increases with the increase of the feed rate and decreases with the increase of the spindle speed. In the experiments carried out, the amount of dust generated in cryogenic environment conditions at 1000 rpm spindle speed is less than the amount of dust in dry environment conditions, and in the case of a spindle speed of 9000 rpm, the amount of dust formed in cryogenic environment conditions is much higher than the amount of dust formed in dry environment conditions. While delamination increases with the increase of feed rate, it decreases with the increase of spindle speed. While the surface roughness increases with the increase of the feed rate, it decrease with the increase of the spindle speed. In cryogenic cutting conditions, thrust force and delamination increase compared to dry cutting conditions, while surface roughness decreases. As a result of the experimental studies, it has been observed that dust formation is generally at low levels at low cutting speeds and high feed rates, but the composite material must be processed at high cutting speeds and low feed rates in order to have a high surface quality.

Keywords: CFRC, hole drilling, dust formation, cryogenic, delamination.



1. GİRİŞ

İki ya da daha fazla malzemenin birbiri içerisinde çözünmeden birleştirilmesiyle oluşan yeni ve daha üstün özelliklere sahip malzemelere kompozit malzemeler denir (Şahin, 2006). Kompozit malzemeler kullanım alanlarına göre oldukça farklı türlere sahip olmakla birlikte en fazla tercih edilen türlerinden bir tanesi karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerdir.

Karbon fiber takviyeli kompozit (KFTK) malzemelerin, yüksek mukavemet ve korozyon dayanımı, hafiflik, sertlik, düşük ısı genleşme katsayısı ve yüksek yorulma dayanımı gibi üstün özellikleri bulunmaktadır (Demir ve diğerleri, 2019; Andleeb ve diğerleri, 2021; Deniz ve diğerleri, 2021; Nik Baihaqi ve diğerleri, 2021). Bu üstün özellikleriyle diğer malzemelerden ayrılan KFTK malzemeler, özellikle uzay ve havacılık sektörlerinde son zamanlarda tercih edilmekle birlikte denizcilik, otomotiv, elektrik, elektronik, robotik, inşaat, gıda, tıp, spor ve müzik sektörleri gibi pek çok alanlarda kullanılmaktadır.

Günümüzde KFTK malzemelerin çeşitli amaçlarla kullanılmaları nedenleriyle delik delme, frezeleme ve tornalama gibi ikincil işlemlere gereksinim duyulmaktadır. Küçük bir uçakta bile 100000'den daha fazla delik olduğu düşünüldüğünde büyük bir uçağın imalat ve imalat sonrası montaj süreçlerinde milyonlarca delik delme işleminin gerektiği bilinmektedir. Bu malzemelerin delinmesi sonucu karşılaşılan temel problemler; elyafların kopması, fiber/reçinelerde ayrılma, gerilme yoğunlaşmaları, mikro çatlaklar, delik giriş ve çıkış bölgelerinde delaminasyonların oluşumu ve delik delme işleminin uygulandığı bölgelerdeki yüzey kalitesinin düşmesi olarak sayılabilir. Sanayide üretim ve montaj işlemleri sırasında özellikle delik delme işlemi sırasında oluşan hasarlar nedeniyle pek çok parça kullanılamamaktadır. Örneğin uçak üretiminde oluşan bu problem nedeniyle parçaların % 60'ı hurdaya ayrılmaktadır (Kılıçkap, 2010).

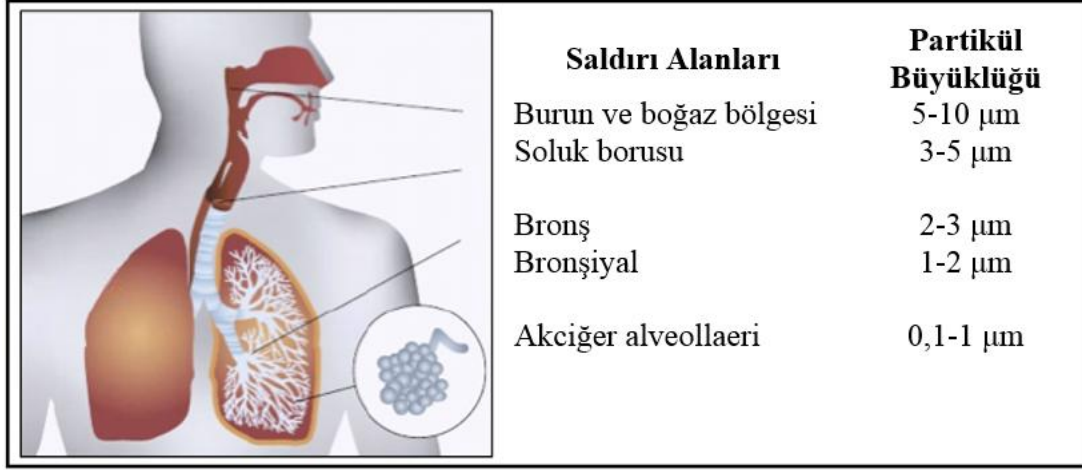
Kompozit malzemelerin kullanımı yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve korozyon direnci gibi üstün malzeme özelliklerine bağlı olarak sürekli artmaktadır. Dolayısıyla

kompozit malzemelerin kullanımının artışıyla birlikte bu malzemelerin işlenmesi de gün geçtikçe artmaktadır. Kompozit malzemelerin işlenmesi sonucunda, metaller ve metal alaşımlı malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan katı bir talaş yerine kompozit malzemelerin yapısından kaynaklı toz parçacıkları oluşmaktadır. Bu nedenle gelişen teknoloji ile birlikte özellikle havacılık, savunma sanayi ve otomotiv sektörlerinde hızla artan kompozit kullanımına bağlı olarak kompozit malzemelere olan ihtiyacın giderek artması ve bu malzemeler üzerinde gerçekleştirilen delme, kesme, tornalama, frezeleme gibi işlemler sonrası oluşan tozun insan sağlığı açısından etkileri de önemli hale gelmektedir.

Kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan tozla ilgili yapılan bazı çalışmalarda tozun kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, kesici takımın geometrisi, kesici takımın malzemesi, kesici takımda meydana gelen aşınma miktarı, işlenen kompozit malzemenin yapısı, soğutma sıvısı kullanımı, havalandırma işleminin yapılması gibi faktörlerin toz oluşumuna ve insan sağlığına etkilerinin olabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte yapılan deneysel çalışmalarda kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan en düşük toz miktarının düşük kesme hızı, yüksek ilerleme hızı ve düşük kesme derinliklerinde olduğu ancak; bu şartlarda da istenilen yüzey kalitesine ulaşılamayabileceği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan tozun insanlar üzerinde çok nadir olarak baş ağrısı, baş dönmesi, kusma ve ciltte meydana gelen tahrişler gibi şikayetler olsa da en çok şikayetler solunum ve akciğer problemleri üzerine olmuştur. Solunum yoluyla alınan tozun partikül büyüklüğü akciğer hastalıklarının meydana gelmesi açısından önemlidir. Tozun akciğerlerde hastalığa neden olması için alveollere ulaşması gerekir. Yapılan çalışmalarda kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu ortaya çıkan toz parçacıklarının boyutunun akciğer ve solunum açısından kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere Amerika İş Güvenliği ve Sağlığı İdaresi OSHA (Occupational Safety and Health Admin) tarafından 5-10 μm aralığındaki partiküllerin burun ve boğazda tahrişe neden olabileceği, 3-5 μm aralığındaki partiküllerin soluk borusuna girebileceği, 1 ile 2 μm partikül boyutunun arter damarlar yoluyla akciğerlere girme ihtimalinin olduğu, 1 μm ’den küçük partikül boyutu alveollere ve siliyer alışverişi yoluyla kan dolaşımına girebileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte akciğerlerde hastalık meydana gelmesi bakımından büyüklüğü 0,5 ile 5 μm arasında olan tozların

en büyük tehlikeyi oluşturduğu, 0,5 μm 'den daha küçük tozların ise alveol içinde havada asılı olarak durduğu ve solunumla veya lenfatikler ile alveolden dışarı atıldığı belirtilmiştir (Iyer, 2015).



Şekil 1.1: İnsan akciğerlerine saldırı alanları (Iyer, 2015).

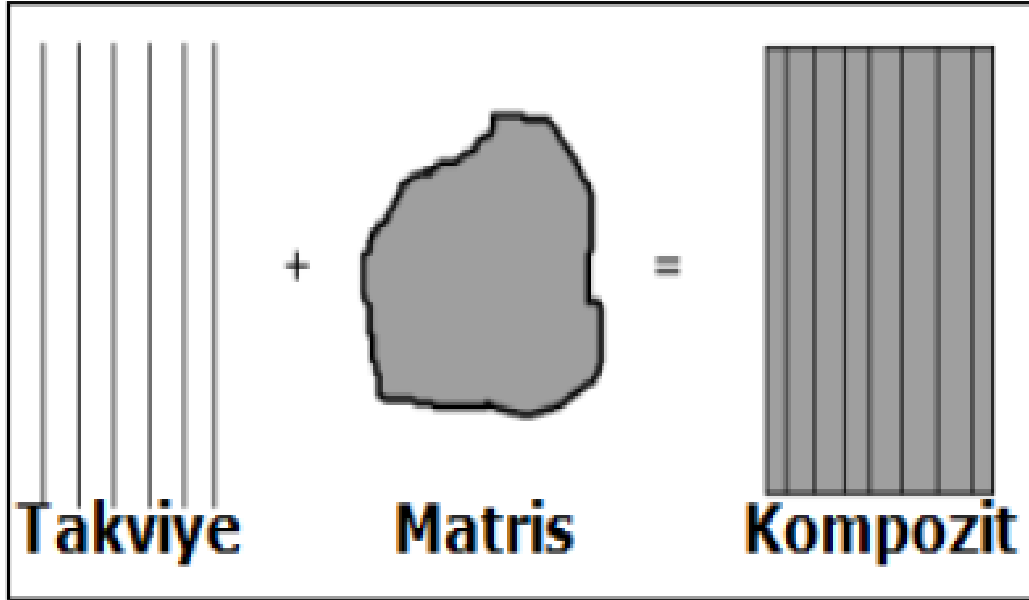
Bu tez çalışmasında karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin farklı kesme koşullarında delinmesi sonucunda delik delme anında oluşan itme kuvveti ve toz oluşum miktarı, deneylerden sonra ise delik çıkışlarında meydana gelen delaminasyon hasarı ve delik içi yüzey kalitesi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler hem kuru kesme şartlarında hem de kriyojenik kesme şartlarında sıvı azot içerisinde uygulanmıştır. Bu kapsamda kompozit malzeme hem kuru ortam koşullarında işlenmiş hem de kriyojenik sıvıya daldırma yöntemi kullanılarak işlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ele alınarak literatüre yeni bir çalışma sunulmuştur.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Kompozit Malzemeler

İki ya daha fazla malzemenin biribiri içerisinde çözünmeden birleştirilmesiyle oluşturulan yeni özelliklere sahip malzemelere kompozit malzeme denir (Şahin, 2006). Kompozit malzemeler genel olarak Şekil 2.1’de de görüldüğü üzere matris adı verilen bir ana malzeme ve takviye elemanı adı verilen daha mukavemetli bir malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır.



Şekil 2.1 : Takviye ve matris malzemedan oluşan kompozit malzeme (Zor, 2016).

Kompozit malzeme üretimlerindeki asıl amaç mukavemet, hafiflik, dayanıklılık, iletkenlik, korozyon direnci, geometri ve düşük maliyet gibi pek çok özellikler açısından matris malzemeler ve takviye elemanlarına göre daha üstün bir malzeme elde etmektir. Çizelge 2.1’de kompozit malzemelerde kullanılan matris ve takviye elemanları ile kompozit yapıların şekilleri görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Matris, takviye elemanı ve kompozit yapı şekilleri.

Matris Malzemeleri	Takviye Elemanları	Kompozit Malzemenin Şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Whiskers	Film-Folye
Seramikler	Pudra	Bal Peteği
	Yonga	Sarılmış Filament
	Granül	Kaplamalar

Kompozit malzemeleri oluşturan matris malzemeler plastik deformasyon oluşumu sırasında meydana gelebilecek çatlak ilerlemesini engellemekle birlikte malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Kompozit malzemeleri oluşturan takviye elemanları ise kompozit malzemenin mukavemet, tokluk ve yüke dayanım özellikleri gibi özelliklerini belirlemektedir. Kompozit malzemeleri oluşturan matris malzemelerden genel olarak yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve darbe dayanımı, yüksek korozyon direnci, yüksek elastik uzama, düşük ısı iletkenlik, uzun ömür ve düşük maliyet özelliklerinin olması istenilmektedir (Ünal, 2013).

2.1.1 Kompozit malzemelerin tarihi gelişimi

Günümüzde üstün özellikleri nedeniyle neredeyse bütün sektörlerde kullanılan kompozit malzemelerin tarihi, eski Mısır ve Mezopotamya Uygarlıklarına kadar dayanmaktadır. Milattan önce 2000’li yıllara dayanan kerpiç evler en eski kompozit malzemelerdendir. Kerpiç evler, toprak ve samanın bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Ana malzeme olan toprağa su ve saman ilavesi sonucunda kuruyan toprak saf haline göre daha mukavemetli, ısı geçirgenliği daha az bir yapıya dönüşerek kerpiç haline dönüşmektedir. Yine eski çağlarda Çinliler tarafından kil ve saman birleştirilerek kompozit bir tuğla üretilmiştir. Bununla birlikte Çinlilerin mimari yapılarda kullandıkları balmumu, oldukça üstün özelliklere sahip bir elyaf takviyeli kompozit malzemedir. Geçmiş uygarlıklar arasında yapılan savaşlarda kullanılan tahta, deri ve bambu gibi malzemelerin birleşimiyle oluşan ok yayları da oldukça eski bir tarihe sahip kompozit malzemelerden bir tanesidir. Sanayinin gelişmesi ile birlikte su ve çimento karışımından oluşan beton, inşaat sektörünün vazgeçilmez bir kompozit malzemesi olmakla birlikte yollarda kullanılan asfalt ise ilk olarak 1938’de Paris’te kullanılan bir kompozit malzemedir (Yamamoto ve diğerleri, 2019).

I. ve II. Dünya Savaşları ile önemi daha çok anlaşılan kompozit malzemeler özellikle bu savaşlardan sonra savunma sanayi, uçak, uzay ve havacılık sektöründe yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. 1940'lı yıllardan itibaren önemi daha çok anlaşılan cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler bu tarihlerden itibaren birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. 1942 yılında ilk olarak cam elyaf takviyeli bir kompozit malzemenin tekne üretimi yapılırken, 1946 yılında ilk elyaf takviyeli kompozit malzemenin patenti ABD'de alınmıştır. 1950'li yıllarda ise kompozit malzemelerin kullanım alanı daha da genişleyerek uçak pervanelerinin üretiminde kullanılmıştır (Yamamoto ve diğerleri, 2019).

Hızla gelişen teknoloji ve insanların ihtiyaçlarına bağlı olarak çeşitli üstün özellikleriyle her geçen gün daha da ön plana çıkan kompozit malzemeler günümüzde de oldukça sık tercih edilmektedirler. Günümüzde daha mukavemetli, daha hafif, daha az korozyon oluşumu ve daha ucuz olmaları nedeniyle özellikle uçak, uzay ve havacılık sektöründe kompozit malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Böylelikle farklı birleşimlerle farklı avantajlar sağlayan kompozit malzemeler gün geçtikçe çok daha fazla önem kazanmaktadır.

2.1.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler çok farklı şekilde sınıflandırılmakla birlikte genel olarak takviye elemanlarının cinsine ve matris malzemelerin cinsine göre iki sınıfa ayrılmaktadırlar.

2.1.2.1 Takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler

Takviye elemanları olarak adlandırılan malzemeler, matris malzemelerle birleşerek kompozit malzemelerin oluşturulmasında kullanılan malzemelerdir. Kompozit malzemeleri oluşturan takviye elemanları kompozit malzemenin mukavemet, tokluk ve yüke dayanım gibi özelliklerini belirlemektedir. Kompozit malzemeler takviye elemanlarının cinsine göre elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve karma kompozit malzemeler olmak üzere dört ana sınıfa ayrılmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler: Fiber takviyeli kompozit malzemeler olarak da adlandırılan bu kompozitler, daha hafif ve daha yüksek dayanıma sahip yeni bir kompozit malzemenin elde edilebilmesi için matris malzemelerin fiberlerle takviye edildiği malzemelerdir. Elyaf takviyeli yeni bir kompozit malzemenin elde

edilmesindeki en önemli amaç yüksek mukavemetli ve yüksek kopma dayanımına sahip malzemeler elde etmektir.

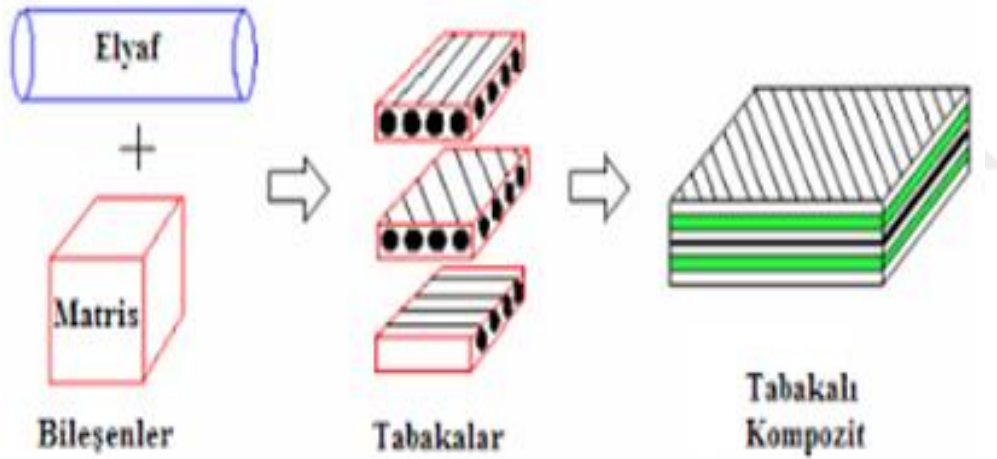
Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviye elemanı olan elyaflar kompozit malzeme içerisindeki yükün %90'lara varan oranlarda taşımaktadırlar. Ayrıca elyaflar, yeni oluşan kompozit malzemeye bünyelerinde bulundurdıkları hafiflik, elektrik iletkenliği, rijitlik ve termal kararlılık gibi özellikleri katarak daha üstün bir malzeme oluşumuna büyük katkı sağlamaktadırlar. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerdeki matris malzemelerin ise elyafları bir arada tutma, meydana gelebilecek çatlakların ilerleyişini yavaşlatma, elyaflar arası aşınmaları engelleme, kompozit malzemeye mukavemet, tokluk ve darbe dayanımı özellikleri katma ve iyi bir yüzey kalitesi gibi özellikler kazandırma görevleri bulunmaktadır (Mazumdar, 2001).

Fiberlerin matris içerisindeki yerleşimleri kompozit malzemenin mukavemet özelliğini etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesidir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler fiber geometrisine göre tek yönlü sürekli fiberli, çapraz sıralanmış sürekli fiberli, rastgele sıralanmış sürekli fiberli, kesikli fiberli ve ortagonal fiberli olmak üzere beş farklı sınıfa ayrılmaktadır. Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler diğer yerleşimli kompozit malzemelere göre yönlendirilebilme kabiliyetleri sayesinde daha üstün özelliklere sahiptirler. Yeni kompozit malzemenin mukavemetinde fiberlerin yerleşimi kadar fiberlerin uzunluk ve çapları ile homojen dağılımı ve kullanılan fiberlerin de önemi oldukça büyüktür. Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak cam, organik elyaf, seramik elyaf, grafit, bor ve kevlar gibi malzemeler kullanılmaktadır (Şimşir, 2020).

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler: Kompozit malzemeyi oluşturan matris içerisindeki takviye elemanlarının parçacıklar halinde bulunduğu kompozit malzemelere parçacık takviyeli kompozit malzemeler denir. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mukavemeti parçacıkların sertliğine, çaplarına ve geometrisine bağlıdır. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler arasından en fazla tercih edileni metal parçalarının takviye elemanı olarak plastiklerin ise matris olarak kullanıldığı kompozitlerdir. Bunun yanında beton, asfalt ve sermet olarak isimlendirilen seramik kompozitler parçacık takviyeli kompozit malzemelere verilecek örnekler arasındadır. Çimento, su, kum ve çakılın birleşmesiyle beton oluşmaktadır. Beton içerisindeki kum ve çakıl parçacıklı takviye elemanı çimento ve

su da bağlayıcı özelliğe sahip matris malzemelerdir. Asfalt ise sert yapıdaki malzemelerin parçacıklı bağlayıcı özellikteki malzemelerin birleşmesiyle oluşan parçacık takviyeli kompozit bir malzemedir. Sermet olarak isimlendirilen kompozit malzemeler ise yüksek sıcaklık ve basınç altında kobalt metali ile tungsten karbür parçacıklarının sinterlenmesi sonucu oluşan parçacık takviyeli kompozit malzemelerdir. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde istenilen özelliğe bağlı olarak farklı farklı parçacık takviye elamanı ve matris malzemeler seçilebilmektedir (Zhao ve diğerleri, 2018; Yamamoto ve diğerleri, 2019; Şimşir, 2020).

Tabakalı kompozit malzemeler: İstenilen mukavemet özelliklerini elde etmek için aynı veya farklı açılarda bir araya getirilen fiber takviyeli kompozit levhaların katmanlar halinde oluşturdukları yapılara Şekil 2.2’de de görüldüğü üzere tabakalı kompozit malzemeler denir. Tabakalı kompozit malzemeler düşük maliyet, yüksek mukavemet, hafiflik, aşınmaya karşı yüksek direnç, yüksek ısı genleşme özellikleri ve estetik görünimleri nedenleriyle oldukça sık tercih edilmektedirler.



Şekil 2.2 : Tabakalı kompozit malzemeler (Yozgat, 2018).

Tabakalı kompozit malzemeler her bir tabakada yer alan fiberlerin açıl durumlarına göre tek yönlü, çapraz, açılı ve simetrik olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılmaktadırlar. Tek yönlü tabakalı kompozit malzemelerde fiber yönü aynı olacak şekilde katmanlar birleştirilerek yeni kompozit malzeme oluşturulur. Çapraz tabakalı olanlarda ise fiber açıları 0° ve 90° olmakta, açılı tabakalarda fiberler farklı tabakalarda farklı açılara sahip olurken simetrik tabakalarda ise fiber yönleri birbirlerinin simetrisi olacak şekilde birleştirilerek oluşturulmaktadırlar (Baba, 2013; Goh ve diğerleri, 2018).

Karma kompozit malzemeler: Farklı çeşit ve sayıda takviye malzemesinin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan kompozit malzemelere karma kompozit malzeme denir. Karma kompozit malzemelerde iki ya da daha fazla elyaf türü bulunabilmektedir. Ayrıca karma kompozit malzemelerde metal, polimer ve seramik malzemeler kombinasyonlu hallerde birlikte yer alabilmektedirler.

2.1.2.2 Matris malzemenin cinsine göre kompozit malzemeler

Matris malzeme olarak adlandırılan malzemeler, takviye elemanlarıyla birleşerek kompozit malzemelerin oluşturulmasında kullanılan malzemelerdir. Kompozit malzemeleri oluşturan matris malzemeler plastik deformasyon oluşumu sırasında meydana gelebilecek çatlak ilerlemesini engellemekle birlikte malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris malzemelerden genel olarak yüksek mukavemet, yüksek tokluk ve darbe dayanımı, yüksek korozyon direnci, yüksek elastik uzama, düşük ısı iletkenlik, uzun ömür ve düşük maliyet özelliklerinin olması istenilmektedir. Kompozit malzemeler matris malzemenin cinsine göre ise metal matris, polimer matris ve seramik matris kompozitler olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmaktadırlar.

Metal matrisli kompozit malzemeler: Metal matrisli kompozit malzemelerde ana yapı olarak nitelendirilen matris malzemeler genellikle alüminyum, bakır, nikel, çinko, titanyum ve magnezyum gibi hafif metal veya metal alaşımlarından takviye elemanlarının ise çoğunlukla olarak seramik malzemeler kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemeler, yapılarındaki seramik malzemelerin yüksek elastisite özellikleri ve yapılarındaki metallerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin bir araya gelmesiyle yüksek basma gerilmesi, yüksek kırılma tokluğu ve yüksek aşınma direnci gösteren üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Ancak metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi zor ve oldukça maliyetlidir. Metal matrisli kompozit malzemeler çoğunlukla otomotiv, uzay, uçak, havacılık ve savunma sanayi alanlarında kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin magnezyum hafifliği sağlamak amacıyla tercih edilebilirken oksijenli bir ortamda kullanılması durumunda korozyona direnç gösterememektedir. Yine berilyum da hafifliği ve çekme mukavemetinin yüksek olması nedenleriyle tercih edilebilirken gevrek bir malzeme olması dolayısıyla çabuk kırılması nedeniyle

kullanım alanları oldukça azdır. Bununla birlikte nikel ve kobalt alaşımları mukavemet özelliklerini çok yüksek sıcaklıklara kadar koruyabilmelerine rağmen yüksek sıcaklıklarda oksijenle tepkimeye girerek korozyon oluşumuna neden olmaktadır (Şahin, 2006; Güneş, 2010).

Polimerik matrisli kompozit malzemeler: Yapılarında polimer esaslı malzemelerin matris malzeme olarak kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Polimer matrisli kompozit malzemelerden polyester ve epoksi matrisli ve sürekli fiberlerle takviye edilmiş olanları bu sınıftaki en önemli kompozit malzemelerdendir. Polimer matrisli kompozit malzemeler; hafif olmaları nedeniyle havacılık, otomotiv, taşımacılık ve spor malzemelerinde, yüksek korozyon direnci nedeniyle denizcilik malzemelerinde, yanmama özellikleri nedeniyle otomotiv iç dekorasyon malzemelerinde kullanılmaktadır. Polimerik matrisli kompozit malzemeler, termoset polimerler ve termoplastik polimerler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Termoset polimerler, ısıl sertleşir plastikler olarak da adlandırılmaktadırlar. Termoset polimer malzemeler ısıtıldıkları zaman yumuşamazlar, dolayısıyla bu malzemeler şekillendirilememektedirler. Termoset polimer malzemeler genellikle presle kalıplama, reçine transferiyle kalıplama, enjeksiyon kalıplama ve döküm gibi yöntemlerle üretilen kompozit malzemelerdendir. Termoset polimer malzemelere polyester, epoksi, fenolik, yüksek sıcaklık reçineleri, silikon poliüretan gibi malzemeler örnek olarak verilebilir.

Termoplastik polimerler, isminden de anlaşılacağı üzere ısıl yumuşar reçineler olarak da adlandırılmaktadırlar. Termoplastik polimer malzemeler ısıtıldıkları zaman yumuşamakta, soğutuldukları zaman tekrar sertleşmektedirler. Dolayısıyla termoplastik polimer malzemeler şekil verilebilen malzemelerdendir. Termoplastik polimer malzemeler genellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon yöntemleriyle üretilmektedirler. Termoplastik polimer malzemelere polietilen, poliamidler, polipropilen, polivinilklorür, polistiren gibi malzemeler örnek olarak verilebilir (Arı, 2022).

Seramik matrisli kompozit malzemeler: Yüksek sıcaklık matris kompozitleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Seramik matrisli kompozitler metal veya metal olmayan malzemelerin birleşmesiyle oluşmaktadırlar. Yüksek sıcaklıklarda bile çok yüksek mukavemet, yüksek termal kararlılık, korozyon direnci göstermelerine rağmen çok

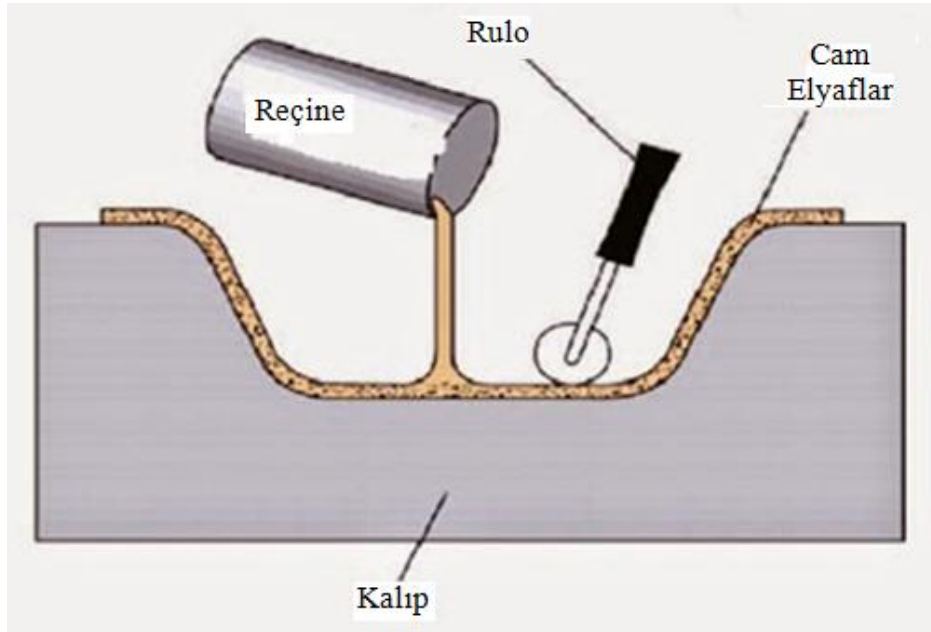
sert ve gevrek olmaları sebebiyle kırılgan bir yapıdadırlar. Bu nedenlerle kullanım alanları kısıtlıdır. Bu kompozitler genellikle silikatlar, alüminatlar, su ve metal oksitleri ile alkali ve toprak alkali metallerin bileşimlerinden oluşmaktadırlar. Yüksek ısıl dayanımlarına sahip olmaları nedeniyle elektronik ve optik cihazlar ile yüksek sıcaklıklara maruz kalan sanayi tipi fırınlarda kullanılmaktadırlar. Son yıllarda roket başlığı ve uzay araçlarında alümina ve zirkonya esaslı kompozit malzemeler de kullanılmaktadır. Bununla birlikte insan sağlığı için biomalzeme olarak da son zamanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Şahin, 2006; Kara, 2020).

2.1.3 Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Kompozit malzemeler elle yatırma, püskürtme, elle sarma, reçine transfer kalıplama, profil çekme, hazır kalıplama, torba kalıplama ve otoklav yöntemi olmak üzere sekiz farklı şekilde üretilmektedirler.

2.1.3.1 Elle yatırma yöntemi

Elle yatırma yöntemi en basit ve en eski elyaf takviyeli polimerik kompozit malzeme üretim yöntemidir. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere bu yöntemde kırılarak veya dokuma şeklindeki takviye elemanları kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine reçine sürülmektedir. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar reçine ve elyaf malzeme ilavesi yapılır. İşlemler bittikten sonra malzeme soğumaya bırakılarak nihai ürün olan kompozit malzeme elde edilir.



Şekil 2.3 : Elle yatırma yöntemi (Gülmez, 2018).

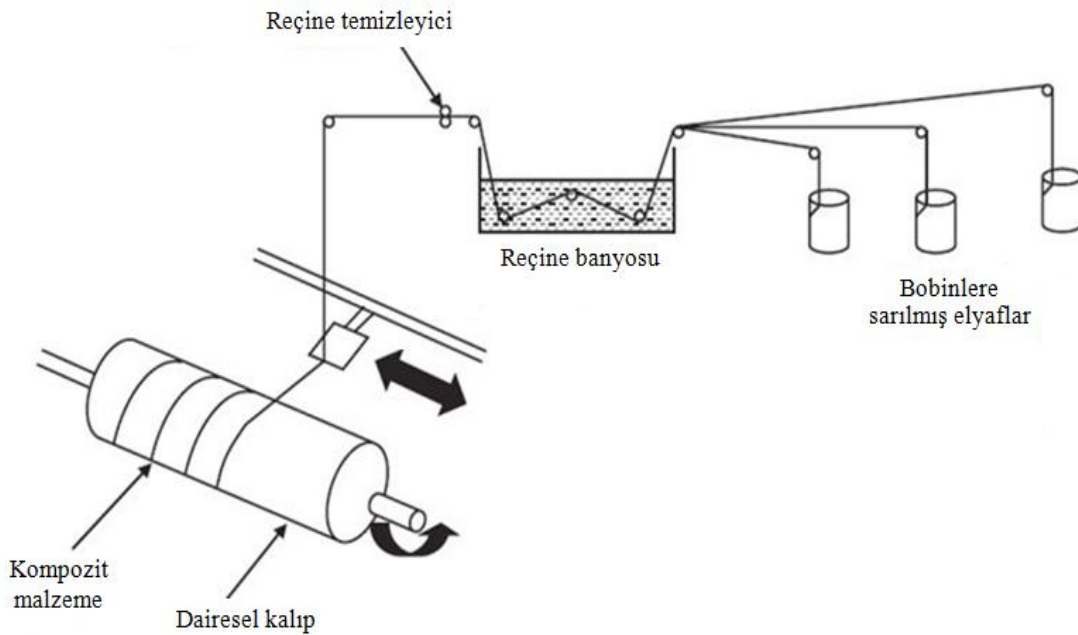
Elle yatırma yöntemi ile kompozit üretiminde kalifiyeli işçinin yanında reçinenin elyaf ile çok iyi bir şekilde karışması da çok önem arz etmektedir. Elle yatırma yönteminde en çok polyester, epoksi, fenolik reçineler ve vinil esterler kullanılmaktadır (Sarıkaya, 2019; Yamamoto ve diğerleri, 2019).

2.1.3.2 Püskürtme yöntemi

Püskürtme yönteminin elle yatırma yönteminden farkı, bir püskürtme aletinin kullanılmasıdır. Bu yöntemde elyaflar, içerisine sertleştirici madde katılmış reçine ile birlikte bir püskürtme aleti yardımıyla gerçekleştirilir. Püskürtme yönteminde üretim kolay ve seridir. Bu nedenle genellikle duvar gibi geniş ve düz yüzeylerin kaplanmasında ve elyaf takviyeli geniş parçaların üretiminde kullanılmaktadırlar (Şahin, 2008; Sarıkaya, 2019).

2.1.3.3 Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, Şekil 2.4'te görüldüğü üzere bobine sarılı olan elyaf malzemenin makaralar yardımıyla bir reçine banyosundan geçirilerek dönen bir kalıp üzerine sarılması şeklinde seri olarak üretimin yapıldığı bir yöntemdir. Sarma işlemi tamamlandıktan sonra dönen kalıp çıkarılarak kompozit malzeme soğumaya bırakılmaktadır. Bu yöntem çoğunlukla araba şaftları ve dairesel yapıdaki kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır (Kaya ve diğerleri, 2015).



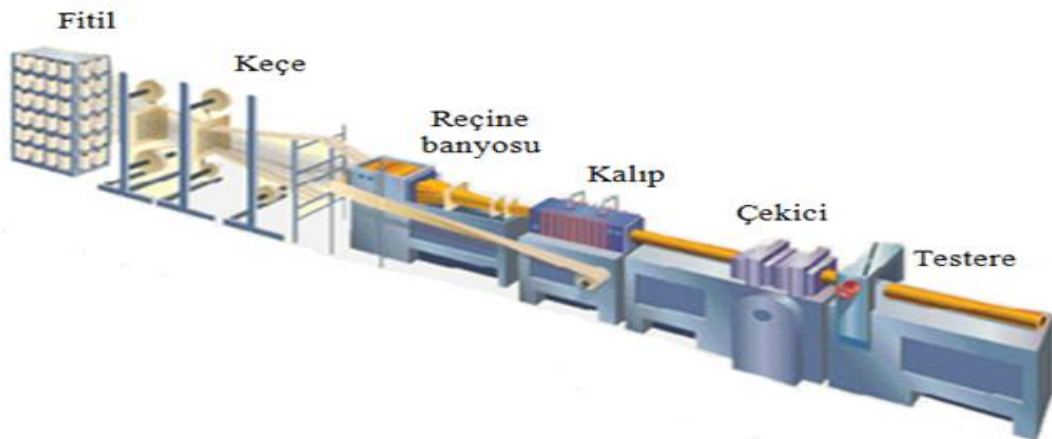
Şekil 2.4 : Elyaf sarma yöntemi (Termek, 2021).

2.1.3.4 Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine transfer kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi elle yatırma yöntemi ile kompozit üretiminden daha seri ve daha uzun vadeli olması nedenleriyle daha fazla tercih edilmektedirler. Bu yöntemde iki kalıp kullanılmaktadır. İlk olarak alt kalıba takviye elemanı yerleştirilir daha sonra yüksek sıcaklık ve basınç altında reçine enjekte edilir ve malzeme soğumaya bırakılır. Reçine transfer kalıplama yöntemiyle karmaşık yapıdaki kompozit malzemeler seri ve hızlı bir şekilde üretilmektedirler. İki kalıp arasında kalan malzemeye yüksek sıcaklık ve basınç altında enjekte işlemi gerçekleştirildiğinden yüzey kalitesi yüksek kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu nedenle oldukça sık tercih edilmektedirler (Özdemir, 2020).

2.1.3.5 Profil çekme yöntemi

Profil çekme yöntemi ile Şekil 2.5'teki gibi sürekli olarak sabit bir şekle sahip kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu yöntemde 120-150 °C'ye sahip bir kalıp içerisine reçine banyosundan geçirilmiş takviye elemanları çekilir ve malzeme soğumaya bırakılır. Profil çekme yöntemi ile çok yüksek mukavemetli kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu özelliği kazandırmak için enine yükler göz önünde bulundurularak özel dokuma işlemi gerçekleştirilmelidir. Profil çekme yöntemiyle kompozit malzeme üretiminin maliyeti oldukça düşüktür ve seri üretim için oldukça uygundur (Işık, 2008).

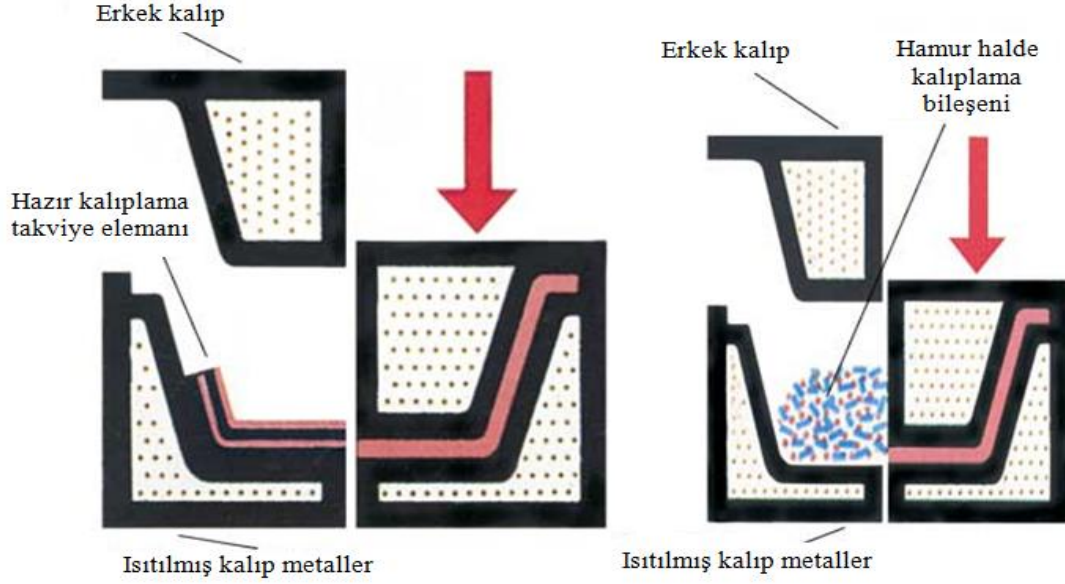


Şekil 2.5 : Profil çekme yöntemi (Anonim, 2017).

2.1.3.6 Hazır kalıplama yöntemi

Hazır kalıplama yöntemi ile iki metal kalıp arasına elyaf, reçine, diğer dolgu ve katkı maddelerinin ilave edilerek sıcak pres yardımıyla kompozit malzeme üretimi

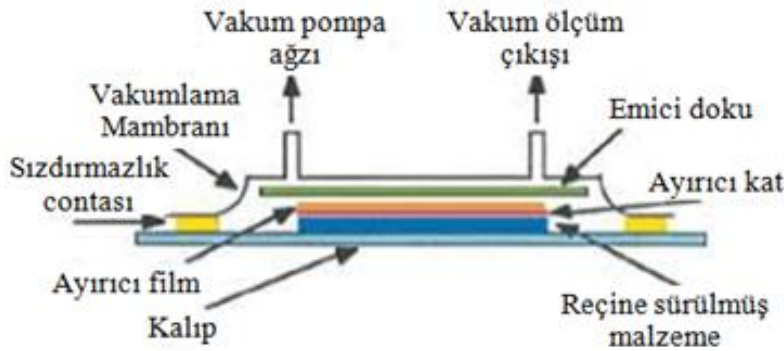
sağlanmaktadır. Şekil 2.6’da görülen hazır kalıplama yöntemi ile kompozit üretimlerinde fire oranları oldukça düşüktür. Karmaşık kompozit malzemelerin farklı farklı kalınlıklarda üretilmesine imkan vermektedirler. Ancak; kalıpların metal olması ve soğutma sırasında soğutuculara ihtiyaç duymaları nedenleriyle maliyetleri oldukça yüksektir (Termek, 2021).



Şekil 2.6 : Hazır kalıplama yöntemi (Gülmez, 2018).

2.1.3.7 Vakum kalıplama yöntemi

Vakum kalıplama yöntemi ile yüksek kalitede kompozit malzeme elde etmek amacıyla kür içerisindeki hava çıkartılmakta ve sertleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.7’de görülen bu yöntem reçine sertleşmeden önce bir vakum torbası yardımıyla uygulanmaktadır. Bu yöntemle uygulanan vakum sayesinde fazla reçine ve hava dışarıya atılırken kalıp içerisindeki kürün sertleştirilmesi de sağlanmış olmaktadır (Shrivastava ve diğerleri, 2008).



Şekil 2.7 : Vakum kalıplama yöntemi (Karabağ, 2011).

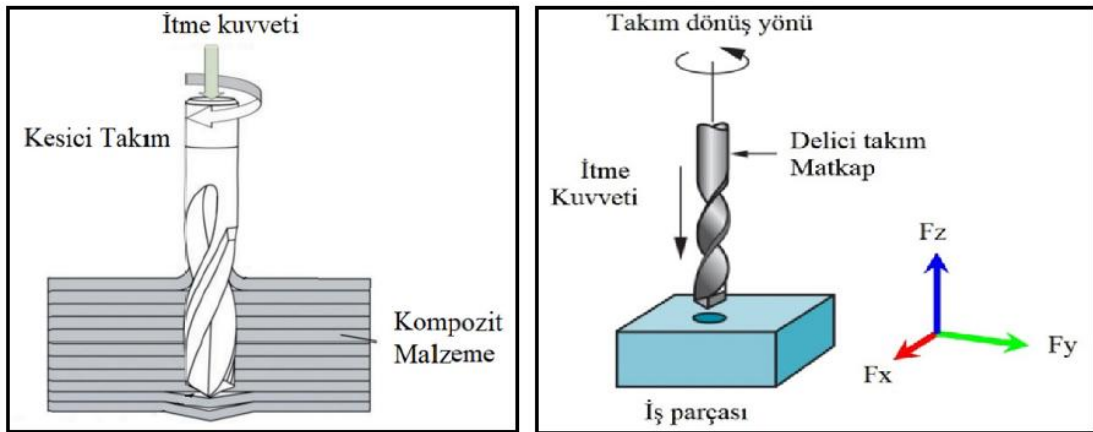
2.1.3.8 Otoklav yöntemi

Otoklav yöntemi vakum kalıplama yöntemine benzemekle birlikte bu yöntemde fırın yerine bir otoklav kullanılmaktadır. Otoklav; sıcaklık, basınç ve vakumun tam olarak kontrol edildiği bir kaptır. Otoklav yöntemi ile tam kontrolün sağlanmasıyla birlikte özel amaçlara yönelik olarak yüksek kalitede kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu yöntem diğer kompozit malzeme üretme yöntemlerine göre daha fazla maliyet ve zaman almaktadır (Kumdere, 2020).

2.2 Delik Delme

Delik delme işlemi, bir iş parçası üzerinde kesici takımlar kullanılarak silindirik bir şekilde delik açma işlemi olarak tanımlanabilir (Kaplan, 2010). Özellikle havacılık, uzay ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan delik delme işlemi, talaşlı imalat yöntemlerinin yaklaşık % 33'ünü oluşturmakla birlikte üretim sürecinde harcanan sürenin ise % 25'ini oluşturmaktadır (Kaplan, 2010; Yağmur ve diğerleri, 2013; Bayraktar ve diğerleri, 2017; Yılmaz ve diğerleri, 2020).

Şekil 2.9'da görüldüğü üzere kesici takımın kesme ve ilerleme kuvvetleri yardımıyla iş parçasına delik delme işlemi, talaş kaldırma işlemlerinde genellikle son işlemdir. Delik delme işlemlerini frezeleme ve tornalama gibi diğer talaş kaldırma işlemlerinden ayıran en önemli özellik delme işleminin iş parçasının içinde yani kapalı bir alanda gerçekleşmesidir. İş parçasının içerisinde gerçekleşen delme işleminde talaşın takım ve iş parçasından tahliyesi ile kesme işlemi sırasında sürtünmeye bağlı olarak oluşan yüksek sıcaklıklar delme işlemini diğer talaşlı imalat yöntemlerine göre oldukça zor ve karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenlerle delik delme işlemlerinde kesme parametreleri oldukça önemlidir.



Şekil 2.8 : Delme işlemi (Başar ve diğerleri, 2020).

Delme işlemlerinde delik derinliğinin uzunluğuna bağlı olarak talaş kaldırma işlemi ve işlemin kontrol edilebilirliği oldukça zordur. Delik delme işlemleri sırasında oluşan talaş; kesme hızı, ilerleme, takım geometrisi, takım malzemesi ve iş parçası malzemesi gibi farklı kesme parametrelerine bağlıdır. Bu kesme parametreleri ise kesme kuvvetleri, kesme sıcaklığı, takım aşınması, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, çap doğruluğu, delik kalitesi ve talaş tipi gibi parametreleri doğrudan doğruya etkilemektedir (Kaplan, 2010; Yağmur ve diğerleri, 2013; Bayraktar ve diğerleri, 2017; Yılmaz ve diğerleri, 2020). Bu nedenlerle matkapla delik delme işlemlerinde özellikle delik kalitesinin en ideal seviyelerde olması ve kesme bölgesindeki sıcaklığın da düşük olması gerekmektedir. Tüm bu gereksinimler araştırmacıları bu problemleri azaltmak amacıyla bazı çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Araştırmacıların delik delme işlemlerinde oluşan sıcaklığı düşürmek ve delik kalitesini yükseltmek amacıyla son yıllarda yaptıkları çalışmalarda, özellikle kriyojenik işleme koşullarında gerçekleştirdiği çalışmaların olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir (Bayraktar ve diğerleri, 2017).

Delme işleminde kesme hızı ve ilerleme hızı olmak üzere iki farklı hız parametresi vardır. Kesme hızı, matkap üzerindeki bir noktanın dakikada aldığı yol olarak tanımlanabilir. Fener mili hızı (N) ve kesici takım çapına (D) bağlı bir parametre olan kesme hızı (V_c), denklem 2.1’de yer aldığı şekilde hesaplanabilir.

$$V_c = \pi \cdot D \cdot N \quad (2.1)$$

İlerleme, iş parçası üzerinde dakikadaki ilerleme miktarı olarak tanımlanabilir. Fener mili hızı ve devir başına ilerleme miktarına (f) bağlı bir parametre olan ilerleme hızı (V_f), denklem 2.2’de yer almaktadır.

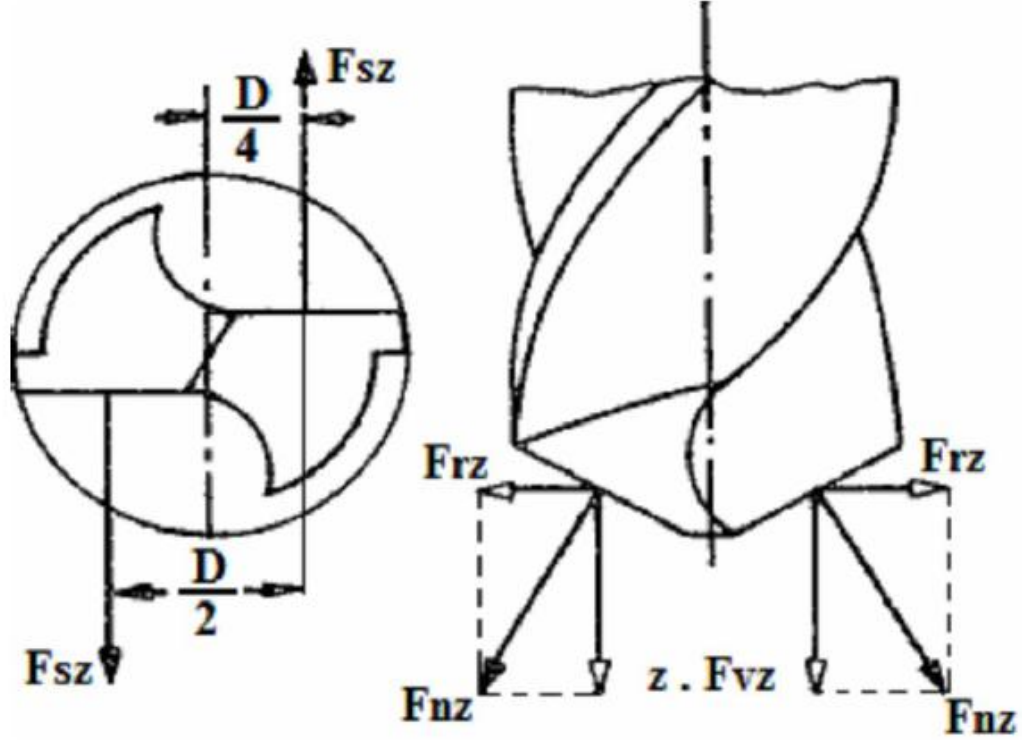
$$V_f = N \cdot f \quad (2.2)$$

Delme işlemlerinde, delik derinliği (L) ve ilerleme hızına bağlı olan işleme süresi (t), denklem 2.3’te gösterilmektedir.

$$t = \frac{L}{V_f} \quad (2.3)$$

Delik delme işlemi sırasında kesici matkap ağzına karşılık gelen talaş kaldırma kuvvetlerinin bileşenleri Şekil 2.9’da görüldüğü üzere kesme kuvveti (F_{sz}), ilerleme kuvveti (F_{vz}) ve radyal kuvvetinden (F_{rz}) oluşmaktadır. Matkap ağızlarının konumları

itibariyle her ağızda birbirine eşit ve birbirlerini dengeleyen radyal kuvvetler oluşmaktadır. Dolayısıyla delik delme işlemlerinde sadece kesme ve ilerleme kuvvetleri etki etmektedir.



Şekil 2.9 : Matkapla delik delmede kesme kuvvetleri (Kaplan, 2010).

İki ağızlı bir matkap için oluşan kesme kuvveti denklem 2.4'te gösterilmektedir.

$$F_s = z \cdot F_{sz} = 2 \cdot F_{sz} = d \cdot s_z \cdot k_s = \frac{d \cdot s}{2} k_s \quad (2.4)$$

Burada k_s , özgül kesme kuvvetini ifade etmektedir. İki ağızlı matkapta oluşan kesme kuvvetinin etkisiyle oluşan toplam kesme momenti ise denklem 2.5'te yer almaktadır.

$$M_s = z \cdot F_{sz} \cdot \frac{d}{4} = 2 \cdot F_{sz} \cdot \frac{d}{4} = F_s \cdot \frac{d}{4} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te denklem 2.4'te yer alan değerler yerine yazıldığında kesme momenti denklem 2.6'daki gibi ifade edilebilmektedir (Kaplan, 2010; Yağmur ve diğerleri, 2013).

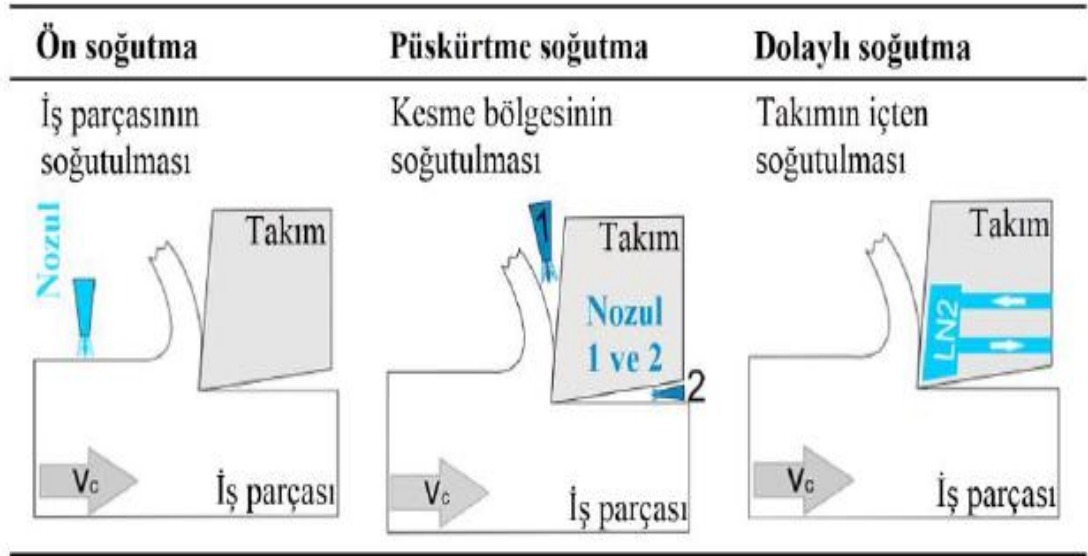
$$M_s = \frac{d^2 \cdot s \cdot k_s}{8 \cdot 10^3} \quad (2.6)$$

2.3 Kriyojenik İşleme

Yunanca bir kelime olan “Kryos” soğuk anlamına gelmektedir. Dolayısıyla düşük sıcaklığa sahip ortamlarda çalışmak ise kriyojenik olarak tanımlanabilmektedir. İlk kriyojenik çalışmalara 1882 yılında Hollanda Leiden Üniversitesi’nde Heike Kamerling Onnes tarafından kurulan laboratuarda başlanılmıştır. Reitz, 1919 yılında iş parçalarını işlemede soğutma sıvısı olarak sıvılaştırılmış gazların kullanılabileceğini belirterek soğutucu olarak CO₂ (karbondioksit) kullanmıştır. 1966 yılında ise CryoTech firması tarafından kriyojenik ortamda gerçekleştirilen işleme sonucunda metal takım ömründe artış olduğu gözlemlenmiştir. Kriyojenik uygulamaların ilerlemesiyle birlikte 1968 yılında Uehara ve Kumagai, kriyojenik işleme işlemini başlatmışlardır. Günümüzde önemi giderek artan kriyojenik işleme yöntemleri geleneksel yöntemlere alternatif bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir (Zindani ve Kumar, 2020).

İş parçası ve kesici takımdan oluşan kesme bölgesinin sıvı azot (-195,8 °C), karbondioksit (-78,5 °C), sıvı helyum (-269 °C) ve hidrojen (-252,9 °C) gibi maddelerle soğutularak talaş kaldırılması işlemine kriyojenik işleme denilmektedir. Kriyojenik işleme yönteminde kullanılan soğutucular yardımıyla kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar ve bu sıcaklıklara bağlı oluşan takım aşınmaları engellenmekte dolayısıyla takım ömrü artmaktadır. Ayrıca kriyojenik işlemeyle kesme ve talaş kaldırma hızlarında ve işlenen parçanın yüzey kalitesinde artışlar görülmektedir. Bununla birlikte kesici takımların kriyojenik işleme sırasında çok düşük sıcaklıklara maruz kalmaları nedeniyle takımlarda kırılmalar oluşabilmektedir. Böylelikle kesici takım kırılmalarına bağlı olarak yüzey kalitelerinde azalmalar ve kesici takım maliyetlerinde artışlar meydana gelebilmektedir (Uçak ve Çiçek, 2017). Günümüzde kriyojenik soğutma genel olarak işlenebilirliği arttırıcı ve çevreci bir imalat yöntemi olarak açıklanabilmektedir. Fakat kriyojenik soğutma yöntemi kullanılarak en ideal sonuçlara ulaşabilmek için farklı kriyojenik işleme yöntemleri kullanılmaktadır. Kriyojenik soğutma yöntemlerinde farklı kriyojenik maddeler, farklı mühendislik malzemelerinin farklı üretim aşamalarında kullanılmaktadırlar. Şekil 2.10’da görüldüğü üzere kriyojenik soğutma yöntemleri ön soğutmayla iş parçasının soğutulması, püskürtme soğutmayla kesme bölgesinin soğutulması ve dolaylı soğutmayla kesici takımın soğutulması olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılabilir. İş parçasının soğutulması yönteminde, talaş kaldırma işlemi

gerçekleşmeden hemen önce iş parçasının üzerine kriyojen maddenin püskürtülmesi veya kriyojen maddenin bulunduğu bir banyoya iş parçasının daldırılıp çıkartılması şeklinde gerçekleşmektedir. Araştırmacılar iş parçasının işlenmeden hemen önce kriyojen madde püskürtülmesi ile yaptıkları çalışmalarda kriyojenin iş parçasına nüfuz etmesiyle talaşın gevrekleştiğini ve bu durumun sünek malzemelerin işlenmesinin kolaylaştırdığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar iş parçasına kriyojenik banyo uyguladıkları çalışmalarında ise malzemelerin işlenebilirlik özelliklerinde artışların olduğunu tespit etmişlerdir. Püskürtmeyle soğutma yönteminde, kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltmak ve yüksek sıcaklığa bağlı olarak sürtünmeden kaynaklı kesici takım aşınması ve iş parçası aşınmasını engellemek amacıyla bir ya da daha fazla nozul yardımıyla kesme bölgesine kriyojen püskürtülerek soğutulmaktadır. Dolaylı soğutma yönteminde ise kesici takım içerisinden geçirilen kriyojen madde dolaylı olarak kesme bölgesini ve iş parçasını soğuturken kesici takımı doğrudan soğutmaktadır (Uçak ve Çiçek, 2017).



Şekil 2.10 : Kriyojenik soğutma yöntemleri (Uçak ve Çiçek, 2017).

Ön soğutma, püskürtme soğutma ve dolaylı soğutma olmak üzere üç farklı soğutma yöntemi şeklinde sınıflandırılabilen kriyojenik soğutma yöntemleri, geleneksel yöntemlere göre farklı mühendislik malzemelerine farklı ihtiyaçlar için farklı kriyojenik soğutucular kullanılarak farklı üretim aşamalarında kullanılabilmelerinden dolayı önemli avantajlar sağlamaktadır (Uçak ve Çiçek, 2017; Zindani ve Kumar, 2020).

2.4 Kompozit Malzemelerin İşlenmesi Sonucu Oluşan Tozun Etkileri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

(Wagnam ve diğerleri, 1982), grafit/epoksi kompozitlerin işlenmesi ve yakılmasından kaynaklanan potansiyel karbon fiber salınımları hakkında bilgiler elde etmek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bir laboratuvar fırınında yüksek sıcaklığa maruz grafit fiberlerin yanmaya karşı 1000 °C'ye kadar direnç gösterdiklerini bulmuşlardır. Kompozitlerdeki reçineler ve bağlayıcıların bu denli yüksek sıcaklıklarda hızla yanacağı, ancak; geleneksel çöp yakma metoduyla bertaraf edilmelerinde yeterli toz olmadıkça hem bozulmamış hem de kısmen bozulmuş ve inceltilmiş grafit liflerden büyük miktarda salınmalar olacağını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, grafit/epoksi kompozitlerin kesilmesi ve delinmesi sonucu ortaya çıkan tozların yaklaşık 50 ile 100 µm büyüklüğünde çok sayıda elyaf içermesine karşılık hiç reçine matrisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, ayrıca fiber üretim sürecinde oluşturulmuş liflerin testere ile işlenmesi sonucunda bazı liflerde uzunlamasına yarılmalara olduğunu, yaklaşık 6 ile 8 µm'den daha küçük çaplara sahip solunabilir fiber kırıntılarının oluşabileceğini gözlemlemişlerdir. Bunun yanında kompozitlerin işlenmesi sonucunda ortaya çıkan tozların kompozit malzemenin barındırdığı lif miktarına ve yoğunluğuna bağlı olarak cilt, göz ve üst solunum yollarında tahrişlere yol açabileceğini de belirtmişlerdir.

(Boatman ve diğerleri, 1988), uçak endüstrisinde kullanılan altı farklı kompozit malzemenin işlenmesi sonucunda solunabilir tozların operatörler için bir sağlık riski oluşturup oluşturmadığını incelemişlerdir. Araştırmacılar ilk olarak çeşitli kompozitler ve yapısal bileşenleri temsil eden toz örneklerini boyutlandırarak parçalara ayırmışlardır. Daha sonra yığın ve parçalanmış haldeki numuneleri ışık ve elektron mikroskobu ile inceleyerek kimyasal olarak termogravimetresi, gaz kromatografisi ve kütle spektrometresi ile analiz etmişlerdir. Dökme numunelerdeki toz çaplarının 0,8 ile 2,0 µm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Mikroskopla yapılan incelemeler neticesinde toz çaplarının 7 ile 11 µm arasında olduğunu gören araştırmacılar bu toz parçacıklarının en boy oranlarının 4:1 ile 8:1 arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Parçalanmış partiküllerin ise ortalama çaplarının 2.7 µm bulmuşlardır. Kimyasal olarak termogravimetreye göre 250 °C'nin altındaki sıcaklıklarda toz partiküllerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirten araştırmacılar, bu sıcaklıkta gaz kromatografisi ve kütle spektrometresi ile salınan

buhar üzerinde yaptıkları ölçümde her numunede farklı miktarlarda ve farklı bileşiklerde partikül olduğunu görmüşlerdir. Sıcaklığın 860 °C'ye çıkarılmasıyla partiküllerin arttığını tespit eden araştırmacılar, mevcut işleme şartlarında liflerin uzunlamasına ayrıldığına dair herhangi bir kanıt olmaksızın takım yüzeyindeki tozların solunabilir boyutta olduğunu ve bu tozların düşük buharlaşabilir kimyasal içeriğe sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

(Seibert, 1990), kompozit elyafların tehlikeleri üzerine bir araştırma yapmıştır. Seibert özellikle havacılık sektörü ve uçaklar üzerine yoğunlaşarak büyük bölümü kompozit malzemelerden oluşan uçakların üretimleri ve işlenmeleri sırasında oluşan kompozit tozları incelemiştir. Araştırmacı ayrıca; çeşitli sebeplerle uçaklarda kompozit malzemenin yanması sonucu ortaya çıkan gazların insan sağlığı üzerine etkilerini incelemiştir. Araştırmacı yaptığı çalışmalar sonucu elde ettiği raporunda kompozitlerin işlenmesi sonucunda oluşan tozların genellikle çeşitli kuruluşlar tarafından belirlenen maruziyet sınır değerinin altında kalmasına rağmen göz ardı edilmemesi gerektiğini, kompozit malzeme yangınları sonucunda çıkan gazların ise kompozitin içeriğinde yer alan elyafa bağlı olarak kanserojen etkilerinin bulunduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak kompozit malzemelerin gerek işlenmesi gerekse yanması sonucu yapılacak müdahalelerde iş sağlığı ve güvenliği açısından gerekli kişisel donanımların kullanılması ve ortamın havalandırılması gerektiğini belirtmiştir.

(Zhang ve diğerleri, 2001), çalışmalarında karbon fiber ve karbon fiber kompozit tozlarının farelerin brokoalveolleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar ilk olarak ağırlıkları 200-300 gram arasında değişen 21 erkek ve 21 dişiden oluşan Wistar cinsi fareleri, her grupta 3 dişi ve 3 erkek fare olmak üzere 7 gruba ayırmıştır. Daha sonra uçaklarda kullanılan karbon fiber bir malzemeyi delerek oluşan tozları dövme işlemi ile büyük çoğunluğunu 5 µm'den daha küçük hale getiren araştırmacılar, tüm farelerin 1 ay süreyle karbon fiber kompozit tozlarına maruz bırakmışlardır. Bu sürenin tamamlanması sonucunda farelerin ağırlıklarında artışların olduğunu tespit eden araştırmacılar, farelerin sol akciğerini çıkararak brokoalveollerde toz birikiminin olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları araştırma neticesinde elde edilen verilerin insanların toz maruziyet sınır değerleri için limit kabul edilebileceğini ve kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında havalandırma işleminin büyük önem arz ettiğini belirtmişlerdir.

(Ramulu ve diğerleri, 2003), kompozit malzemelerin işlemesine ilişkin yapmış oldukları derleme çalışmalarında, kompozitlerin geleneksel olarak kullanılan malzemelerin çeşitli sebeplerle yerlerini alarak yüksek performans gösterdiklerini, bu nedenle kullanımlarının sürekli olarak artmaya devam ettiklerini belirtmişlerdir. Kompozit malzemelerin artışına bağlı olarak bu malzemelerin işlenmelerinden dolayı toz ve talaş döküntülerinin ve toz oluşumunun tehlikelerinde de artışların olabileceğini tespit etmişlerdir. Ancak araştırmacılar, elyaf yönüne göre kesme işleminin uygulanması gibi işlemler ile kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan tozun oluşturduğu etkilerin azaltılabileceği ve kontrol altına alınabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca yaptıkları çalışmalar sonucunda malzeme geometrisi, kesme hızı, kesici takım malzemesi ve takım geometrisi gibi parametrelerin parçacık boyutu dağılımını ve havadaki konsantrasyonu etkileyebileceğini tespit etmişlerdir. Tozun tehlikelerinin toz partiküllerinin içeriğine ve havadaki yoğunluk miktarına göre belirleneceğini belirtilen araştırmacılar, yayınlanan bazı çalışmaların aksine kompozitlerin işlenmesi sonucunda oluşan toz yoğunluğunun İş Güvenliği ve Sağlığı İdaresi OSHA (Occupational Safety and Health Admin) ve Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) tarafından belirlenen yasal maruz kalma sınırlarını aşabileceğini belirtmişlerdir.

(Durgam ve diğerleri, 2010), Kansas'taki Cessna tesisinde çalışanların (Karbonmonoksit) CO'ya, solunabilir tozlara ve oluşan tüm tozlara maruz kalma durumlarını tespit etmek üzere bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarını tesiste gerçekleştiren araştırmacılara, kompozit ve metal parçaların taşlandığı bölümlerde çalışan önceden astım hastalığı olan dört kişiden üçü, işyerinde astımlarının kötüleştiğini bildirmiştir. Bir çalışan bu tesiste çalışmaya başladığından itibaren kendisine astım hastalığı teşhisi konduğunu, farklı üç çalışan deri döküntülerinin olduğunu, diğer iki çalışan ise baş ağrısı şikayetleri olduğunu bildirmişlerdir. Araştırmacılar, şikayetler üzerine havadan örneklem yöntemiyle aldıkları numuneler neticesinde çalışanların toplam toza, solunabilir toza ve metallere maruz kalma ölçümleri ile havadaki CO ve taşlama sonucu oluşan toz yoğunluğu ölçümleriyle ortaya çıkan sonuçların OSHA tarafından belirlenen sınır değerlerinin altında olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, sonuçların belirlenen sınır değerin altında çıkmasına rağmen çalışanlar tarafından belirtilen şikayetlerin, oluşan toz

partiküllerinden dolayı olabileceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışanların kullandığı tezgahların bulunduğu yerlerde havalandırma sisteminin aşağı çekişli olması, rutin iş sağlığı ve güvenliği kontrollerinin yapılması, toz oluşumu olan yerlerde uygun kişisel korucu donanımların kullanılması şeklinde önerilerde bulunmuşlardır.

(Azmi, 2012), çalışmasında cam takviyeli polimer kompozitlerinin frezeleme ile sistematik bir şekilde işlenebilirliğini ortaya koymaya çalışmıştır. Araştırmacı, işleme parametrelerinin temel işlenebilirlik endekslerini ve çıktıları belirlemek üzere bazı deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu deneylerde takım ömrü açısından takım performansı ve seçilen parametreler arasındaki deneysel ilişkileri bulmak üzere araştırmacı, Taylor'un geleneksel takım ömrü denklemini kullanarak analizler gerçekleştirmiştir. Araştırmacı deneylerini, 100 dev/dk, 300 dev/dk ve 500 dev/dk iş mili hızlarında, 3,77 m/dk, 11,30 m/dk ve 18,84 m/dk ilerleme hızlarında, 3 mm eksenel ve 0,5 mm radyal kesme derinliklerine sahip kesme koşullarında gerçekleştirmiştir. Analizinin sonucunda kesme hızının takım ömrünü etkileyen en önemli parametre olduğunu bulan araştırmacı, yüzey kalitesinin yüksek devir ve kesme hızlarında kaliteli olmasına karşılık yüksek ilerleme hızlarında yüzey kalitesinin düşük olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı bunun yanında taramalı elektron mikroskobu yardımıyla freze ile işlemenin neden olduğu hasarın fiber kırılması, çekilme veya çıkıntılar, delaminasyon hasarı ve epoksi matrisin kırılmasından kaynaklandığını gözlemlemiştir. Bu olumsuzlukların tümünün yüksek işleme kuvveti ve takım keskinliğinin azalmasına bağlı olduğunu belirlemiştir. Cam takviyeli polimer kompozitlerinin işlenebilirliğini talaş oluşumu açısından değerlendiren araştırmacı yüksek hızlı bir video kamera kullanmıştır. Talaş oluşumu üzerindeki araştırması sonucunda artan kesme hızına bağlı olarak elyaf boyunca delamine bir yüzey ve çok küçük parçacıkların oluşumunda artışların olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmacı sonuç olarak, farklı kesme parametreleri ve koşullarda yaptığı çalışmalar neticesinde düşük kesme hızları ve kesme derinliği ile yüksek ilerleme hızlarında toz oluşumunun çok daha az olduğunu gözlemlemiştir.

(Haddad ve diğerleri, 2012), tungsten karbür malzemeden üretilmiş bir parmak freze ile karbon fiber takviyeli polimerik kompozit malzemenin işlenmesi sonucunda oluşan toz boyutunu ve yüzey kalitesini incelemişlerdir. Araştırmacılar deneylerini 18870 dev/dk, 37130 dev/dk ve 74270 dev/dk iş mili hızlarında, 125 mm/dk, 250

mm/dk ve 500 mm/dk ilerleme hızlarında ve 2 mm kesme derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışma sonucunda solunum ile pulmoner alveollere ulaşan toz yüzdesini ölçmüşlerdir ve % 87 ile % 95'lere kadar ulaştığını tespit etmişlerdir. Bunun için karbon fiber takviyeli polimerik malzemelerin yüksek hızlarda kuru işlenmesi sırasında kesici takımı kullanan operatörlerin iş sağlığı ve güvenliği önlemlerini alması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında araştırmacılar, kesme parametrelerinin toz oluşumunu ve yüzey kalitesini etkilediğini gözlemlemişler ve toz oluşumunu düşürmek için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızlarından kaçınılması gerektiğini belirtmişlerdir.

(Lanyurt ve diğerleri, 2012), diş kliniklerinde diş hekimlerinin hastaların ağız ve diş sağlığı işlemlerinde kullandıkları kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında meydana gelen tozun karakteristikleri ve toz maruziyetleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarını klinik ortamda gerçekleştiren araştırmacılar, kompozit malzemenin frezelenmesi neticesinde oluşan tozu gravimetre kullanarak ölçmüşlerdir. Bu ölçümlerinin yanında elektron mikroskobu analizini de kullanan araştırmacılar, çalışmalarının sonucunda farklı kompozit malzemelerin işlenmesi sonucunda oluşan tozun 5 µm'den daha küçük solunabilir nitelikte olduğunu gözlemlemişlerdir. Elektron mikroskobu analizlerinde ise toz boyutunun 10 µm'den büyük toz parçacıklarına rastlamakla birlikte genellikle mikron ve nano boyutlu toz parçacıklarının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte toz parçacıklarının, tekli nano dolgu partiküllerinin yanı sıra genellikle reçinede bulunan çoklu dolgu partiküllerinden oluştuğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalar sonucunda kompozitlerin işlenmesi sonucunda oluşan tozun insan sağlığına etkilerini azaltmak amacıyla su soğutmasının kullanımını, iyi aspirasyon yapılmasını, sık sık havalandırma işleminin yapılmasını ve yüksek partikül filtreleme özelliğine sahip maskelerin kullanılmasını tavsiye etmişlerdir.

(Haddad ve diğerleri, 2014), 20 katmandan oluşan 5,2 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli polimerik bir kompozit malzemenin frezelenmesi işleminde takım geometrisinin ve kesme koşullarının, yüzey kusurları ile kesme sırasında oluşan toz üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar deneylerini 6 mm çapında tungsten karbür, elmas kaplamalı tungsten karbür ve 4 ağızlı elmas kaplamalı olmak üzere üç farklı frezeleme takımı kullanarak 500 mm/dk, 1000 mm/dk ve 1500 mm/dk ilerleme hızlarında, 150 m/dk ve 250 m/dk kesme hızları ve 2 mm kesme

derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanında yine üç farklı frezeleme takımı kullanarak 125 mm/dk, 250 mm/dk ve 500 mm/dk ilerleme hızlarında, 350 m/dk, 700 m/dk ve 1400 m/dk kesme hızları ve 2 mm kesme derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, yüzey kusurlarının genellikle kesme koşulları ile takım geometrisine bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bunun yanında frezeleme işleminde ilerleme hızının artışı ve kesme hızının düşmesine bağlı olarak yüzey kusurlarının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca frezeleme sırasında oluşan tozun ise takım geometrisi ve kesme koşullarına bağlı olarak değiştiğini tespit eden araştırmacılar, yüksek kesme hızlarında sıcaklığın artışına bağlı olarak işlenmiş yüzeylere tozların yapıştığını görmüşlerdir.

(Miller, 2014), kompozit malzemelerin işlenmesinden oluşan toz partiküllerini analiz etmek için en uygun yöntemleri belirlemek üzere deneyler gerçekleştirmiştir. Araştırmacı öncelikle herhangi bir havalandırma kullanmadan 0° ile 135° fiber yönünde kompozit malzemeyi işlenirken kütle medyan aerodinamik çapının 0.12 µm ile 0.35 µm arasında olduğunu kademeli impaktörler yardımıyla tespit etmiştir. Toz oluşumunu hem kademeli çarpıştırıcılar kullanılarak hem de gerçek zamanlı cihazların paralel kullanımıyla analiz etmiştir. Araştırmacı, tipik yüzey kalitesini artırma koşullarından kaynaklanan toz yoğunluğunun, rahatsız edici toz için izin verilen 5 mg/m³ sınırlarını aştığını belirlemiştir. Araştırmacı bununla birlikte farklı cihazlarla bildirilen ve gravimetrik olarak ölçülen toz yoğunluklarının karşılaştırılmasını sağlayan destekleyici analiz araçları da geliştirmiştir.

(Costantino ve diğerleri, 2015), büyük bir bölümü kompozit malzemelerden üretilen uçakların kaza yapmaları sonucunda oluşan yangın ve toz oluşumunu insan sağlığı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalar neticesinde uçak kazalarının bulunduğu yerlerde müdahale ekibinin özellikle kompozit malzemelerin içeriğinde bulunan reçineden kaynaklı gaz ve buhar salınımlarının toksit etki oluşturarak kanser gibi hastalıklara dahi sebebiyet verebileceğini tespit etmişlerdir. Bunun yanında yine uçak kazaları sonucunda kompozit malzemelerin içeriğinde bulunan ve yanmaya bağlı olarak çevreye dağılan reçine tozlarının ciltte ve solunum yollarında tahrişlere hatta uzun süreli maruziyete kalınması durumlarında akciğer alveollerine ulaşmasına bağlı olarak akciğer kanserine sebebiyet verebileceğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar uçak kazalarında kompozit malzemelerin yanmasına ve buna bağlı olarak çevreye toz salınımı üzerine yaptıkları

çalışmada reçineden kaynaklı zararlı etkenlerden korunmak için kazaya müdahale ekibinin kişisel korucuyu donanımları kesinlikle kullanması gerektiğini belirtmişlerdir.

(Iyer, 2015), yaptığı çalışmada karbon fiber kompozit malzemelerin üretim sürecinin karmaşıklığının yanında bu malzemelerin işlenmesi, delinmesi ve zımparalanması sonucunda meydana gelen ince bir toz oluşumunun önemli olduğunu belirtmiştir. İşlenmeleri sonucunda toz oluşumuna sebebiyet veren kompozit malzemelerin karbon, grafit, cam ve/veya para-aramid elyaflarla güçlendirilmiş epoksi matrislerden oluştuğunu belirten araştırmacı, epoksi malzemelerin de genellikle epoksi polyester, fenolik, florokarbon, polietersülfon ve silikon olduğunu belirtmiştir. Bu kompozit malzemelerin bilgisayarlarda, kontrol panellerinde, servo motorlarda ve havada birikebileceğini belirten araştırmacı bu tür tozların makine cihazlarda kısa devrelere dolayısıyla yangın ve patlamalara yol açabileceği gibi insan sağlığını da önemli ölçüde tehdit edebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle Amerika Birleşik Devletleri Mesleki Güvenlik ve Sağlık İdaresi OSHA tarafından kompozit üretimi ve işlenmesinin yapıldığı yerlerde havada biriken toz miktarları ve havayla birlikte taşınan potansiyel toksik liflere maruz kalınmasına ilişkin olarak birtakım araştırmalar yapmıştır. Araştırmacı çalışmasında, kompozitlerin işlenmesi sonucu oluşan tozun potansiyel olarak insan akciğerine zarar verebileceği ve hava ile taşınan bu toz parçacıklarının akciğerde sebep olduğu hasarların tespiti ile yayılan toz boyutunu ve yoğunluğunu araştırmıştır. Kompozit malzemenin sağlık üzerine etkilerinin değerlendirilmesi için sağlam bilimsel temellere ve standartlara dayandırılarak genel olarak reçine sistemindeki malzemeleri ayrı ayrı değerlendirilerek gerçekleştirmiştir. Araştırmasının asıl amacı, ağırlıklı olarak frezeleme işlemi ile kompozitlerin işlenmesi sırasında oluşan toz miktarını belirlemek ve bu tür tozlu ortamlarda çalışanların yüzde kaçının bu durumdan zarar gördüğü tespit etmektir. Araştırmacı, toz ölçüm işlemini OSHA tarafından tanımlanan partikül madde aerosol standartlarını esas alarak yapmıştır. Buna ek olarak kompozit tabakaların sırasının, toz yoğunluğu ve boyutu üzerine etkileri de araştırılmıştır. Bu çalışmada farklı kesme parametreleri ile tek yönlü fiber kompozitlerin işlenmesi sırasında gerçekleştirmiş olduğu çok sayıdaki deneyler sonucunda tek yönlü kompozitlerin işlenmesi sonucunda çıkan tozların çaplarının 0.19 μm olduğunu, fiber kompozitlerin işlenmesi sonucu oluşan tozların çaplarının

ise 0.28 μm olduğunu tespit etmiştir. Araştırmacı yapmış olduğu deneyler sonucunda en düşük toz oluşumunun düşük kesme hızı ve kesme derinliği ile yüksek ilerleme hızlarında olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu koşulların en iyi yüzey kalitesini elde etmede uygun olamayabileceğini belirtmiştir.

(Denkena ve diğerleri, 2017), çalışmalarında havacılık ve otomotiv uygulamalarında sıkça kullanılan ve kullanımı artarak devam eden fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Bu malzemelerin işlenmesi neticesinde oluşan toz parçacıkları küçük boyutları nedeniyle makine bileşenleri ve operatörün sağlığı açısından son derece zararlı olduğunu belirten araştırmacılar, oluşabilecek kalıcı hasarları önlemek için bir emme-vakum sisteminin olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle fiber takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan tozların azaltılması amacıyla enerji açısından verimli ve akıllı bir toz emme sistemini geliştirmek istemişlerdir. Araştırmacılar, geliştirdikleri toz emme sistemini test etmek için simülasyon ortamında hacimsel akış hızları ile partikül miktarını analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, yaptıkları simülasyon sonucunda geliştirdikleri sistemin % 70'lere varan enerji tasarrufu ve yüksek bir toz emilimini sağladığını ortaya koymuşlardır.

(Aamir ve diğerleri, 2019), özellikle uzay ve havacılık sektöründe sıkça kullanılan fiber takviyeli polimerlerin delinmesi sırasında ve sonrasında oluşabilecek hususlar hakkında bir derleme çalışması yapmışlardır. Araştırmacılar, delme sırasında meydana gelebilecek mukavemetin düşmesi, düşük delik kalitesi, hızlı takım aşınması, sık sık takım değiştirme ihtiyacı, yüksek takım ve işleme maliyetlerinin olabileceğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak delme parametrelerinin ve optimizasyon tekniklerinin işleme sürecindeki oluşabilecek toz parçacıklarının insan sağlığı üzerine etkilerini inceleyen araştırmacılar, kalite denetimi yoluyla delme sürecine ilişkin avantaj ve dezavantajları ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar, kompozit malzemelerin işlenmesi sonucunda oluşan toz boyutu ve miktarının, kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme hızı, işlenen parça geometrisi, takım geometrisi, kesici takım ucu, kesme kuvvetleri, işlenecek parçanın yüzey kalitesi gibi etkenlere de bağlı olabileceğini belirtmişlerdir.

(Nguyen-Dinh ve diğerleri, 2020) çalışmalarını, karbon fiber takviyeli kompozitlerin işlenmeleri sonucunda oluşan tozun, kesici takımı kullanan operatörün sağlığında oluşturabileceği olumsuz etkileri incelemek amacıyla yapmışlardır. Araştırmacılar

yapmış oldukları çalışmada karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin kesilmesi sırasındaki dağılan zararlı parçacıkların şekli ve miktarı üzerindeki etkilerini farklı kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme hızı, takım geometrisi ve takım aşınması koşullarında incelemişlerdir. Araştırmacılar deneylerini 500 mm/dk, 1000 mm/dk ve 1500 mm/dk ilerleme hızlarında, 150 m/dk ve 250 m/dk kesme hızları ve 2 mm kesme derinliğinde gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde oluşan toz miktarını azaltmak için klasik iki düz ağızlı, iki helisel ağızlı kesici takım ucunun yanında ASAHI Company ile birlikte geliştirdikleri dört kanallı düz ağızlı kesici takım kullanarak oluşan tozları karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, 1 litre havadaki zararlı toz parçacıklarının sayısının ölçümünü lazer spektroskopik toz monitörü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalarının sonucunda geliştirdikleri dört kanallı düz ağızlı kesici takım ucu ile yapılan deneylerde oluşan tozun düz ağızlı kesici takım ucu ile yapılan deneylere göre daha az toz oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanında farklı kesme parametreleri ve koşullarda yaptıkları çalışmalar neticesinde düşük kesme hızları ve kesme derinliği ile yüksek ilerleme hızlarında çok daha az zararlı toz oluşumunun olduğunu belirtmişlerdir.

(Boughdiri ve diğerleri, 2021), çalışmalarında Glare hibrit havacılık malzemesinin delinmesi sırasında kesme parametrelerinin ve takım kaplamasının kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve zararlı toz parçacıklarının oluşumu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar deneylerini elmas benzeri karbon kaplamalı, kristal kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere farklı farklı matkap uçları ile gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları deneyler sonucunda iş mili hızının aksine ilerlemenin, itme kuvveti ve tork üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca; elmas benzeri karbonla kaplı matkap uçları ile yapılan delme işlemlerindeki yüzey kalitesinin kristal kaplamalı ve kaplamasız matkap uçları ile yapılan delme işlemlerindeki yüzey kalitesine göre daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Araştırmacılar bununla birlikte delme işlemi sonucunda oluşan tozun kesme parametrelerine bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Toz ölçümlerine ilişkin yapmış oldukları araştırma sonucunda düşük iş mili hızıyla yapılan delme işlemleri sonucu çıkan tozun, yüksek iş mili hızıyla yapılan delme işlemlerine göre % 50 oranında daha az olduğunu gözlemlemişlerdir.

2.5 Kriyojenik Koşullarda İşleme ile İlgili Yapılan Çalışmalar

(Xia, 2014), yaptığı tez çalışmasında üstün özelliklerinden dolayı son yıllarda özellikle havacılık ve otomobil sektöründe kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin hem kuru hem de kriyojenik soğutma koşullarında delme performansı üzerine etkilerini araştırmıştır. Xia, yaptığı çalışma sonucunda kriyojenik delme koşullarında delme işlemlerinde çoğunlukla daha iyi yüzey pürüzlülüğü, daha iyi çap kalitesi, daha iyi delik kalitesi, daha az çapak oluşumu, daha az takım aşınmasına karşılık tüm kesme parametreleri altında daha yüksek itme kuvveti ve daha yüksek tork oluştuğunu gözlemlemiştir.

(Köklü ve Morkavuk, 2018), karbon fiber takviyeli bir polimer malzemenin sıvı nitrojene daldırılarak işlenmesi üzerine yaptıkları araştırmada itme kuvveti, delaminasyon, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışma sonucunda kriyojenik ortamda yapılan delme işleminde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünde azalmaların olduğunu ancak itme kuvvetinde ise artışların olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmacılar genel olarak kriyojenik işlemenin karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin işlenebilirliğinin arttığını ortaya koymuşlardır.

(Shokrani ve diğerleri, 2019), son on yılda havacılık ve otomotiv sektöründe kullanımları sürekli artış gösteren karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin montaj ve üretim aşamalarında sürekli olarak gereklilik gösteren kompozitlerin delinmesi işlemi üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırmacılar deneylerinde kuru, sıvı nitrojenli ve kriyojenik işleme ortamlarında düz ve kademeli olmak üzere iki farklı matkap geometrisiyle karbon fiber takviyeli kompozit malzemeyi delme çalışmaları sonucunda düz matkap kullanılarak kriyojenik soğutma koşullarında işlenen malzemenin kuru işleme koşullarına göre daha iyi performans gösterdiğini, yüzey pürüzlülüğünün % 25 daha iyi olduğunu, çıkışta meydana gelen delaminasyonun daha düşük olduğunu ve işleme koşulları ile kesici takım geometrisinin işlenen malzeme parametrelerine etkilerinin olduğunu gözlemlemiştir.

(Basmacı ve Yörük, 2020), karbon fiber takviyeli bir malzemenin 20 ve 50 m/dk olmak üzere iki farklı kesme hızlarında, 0.075, 0.15, 0.225 ve 0.3 mm/dev olmak üzere dört farklı ilerleme hızlarında, 4 ve 6 mm olmak üzere iki farklı çaplı matkap ile delme deneylerini kuru ve kriyojenik koşullarda gerçekleştirmişlerdir. Basmacı ve

Yörük araştırmalarının sonucunda kriyojenik işlemede kuru işlemeye göre deliğin daha kolay delindiğini, yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, işlenilebilirliğin arttığını, delaminasyon faktörünün ve itme kuvvetinin arttığını tespit etmişlerdir.

(Khanna ve diğerleri, 2020), kuru ve kriyojenik koşullarda karbon fiber takviyeli kompozit bir malzemenin delinmesi üzerine yaptıkları araştırma sonucunda kriyojenik delme işleminde ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin kuru delme işlemine göre % 14-38 oranında azalmaların olduğunu, giriş ters delaminasyon faktörünün ise % 5-68 oranında artışların olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar elde ettiği sonuçlara göre kriyojenik delme işleminin uygun bir yöntem olduğunu ve kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

(Nagaraj ve diğerleri, 2020), yaptıkları çalışmada havacılık, savunma ve otomotiv sanayilerinde yaygın olarak tercih edilen karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kuru, kriyojenik ve MQL (Minimum Quantity Lubrication) koşullarında delinmesinde itme kuvveti, tork, delaminasyon ve delik çapı hatalarını inceleyerek karşılaştırmışlardır. Ayrıca önemli bir işleme parametresi olan ilerlemenin kompozitlerin delinmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, deneylerini 90 m/dk kesme ve 0,2 ile 8 mm/dev arasındaki farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonucunda kompozit malzemelerin kriyojenik ve MQL koşullarında delinmesi sonucu kuru işlemeye göre itme kuvvetlerinin artışına bağlı olarak delaminasyonların arttığı, soğutma nedeniyle de kuru işlemeye göre sıcaklığın düşmesiyle birlikte takım ömrünün arttığı ve delik çaplarındaki hatalarda azalmaların olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Mura ve Dini, 2021), özellikle hafif olmaları ve diğer üstün özellikleri için son yıllarda havacılık ve otomotiv sektöründe artan talepleri nedeniyle karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin delinmesi üzerine çalışan araştırmacılar delme işlemi sırasında olumsuzluklara neden olan sıcaklığı düşürmek amacıyla malzemenin homojen şekilde soğutulması için delme işlemine başlamadan önce ön soğutmaya dayanan bir deney gerçekleştirmişlerdir. Ön soğutması tamamlanan kompozit malzemelerin delinmesi sırasında oluşacak sıcaklık ve buna bağlı olumsuz etkilerden kaçınmak isteyen araştırmacılar kriyojenik koşullarda malzemelerine delme işlemini uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda kompozit malzemeler için kriyojenik delme işleminin kullanılabilir ve uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

(Köklü ve diğerleri, 2021), S2 cam elyaf kompozit bir malzemenin delinmesinde iş mili hızı, ilerleme hızı, kriyojenik ortamda delik biçimi ve boyutlarına ilişkin

etkilerini incelemek üzere yaptıkları araştırma sonucunda delik çapının kuru işlemeye göre oldukça arttığını, delik daireselliği ve silindirikliğinin kuru kesme koşullarına göre azaldığını, delik kalitesinde ise iyileşmeler olduğunu gözlemlemişlerdir.

(Agrawal ve diğerleri, 2022), karbon fiber takviyeli kompozitlerin delinmesi üzerine yaptıkları çalışmada itme kuvveti, tork, spesifik kesme enerjisi, delaminasyon faktörü ve delik kalitesi gibi parametreleri kuru ve kriyojenik soğutma koşullarında incelemişlerdir. Araştırmacılar kriyojenik soğutma sıvısı olarak çok jetli sıvı nitrojen kullanmışlardır. Kuru ve kriyojenik koşullarda gerçekleştirdikleri deneylerinde kesici takım olan matkabı, dört farklı devir hızı ve dört farklı ilerleme hızında kullanmaları sonucunda kriyojenik koşullarda delme işlemlerinde kuru koşullarda delme işlemlerine göre itme kuvvetinin % 35'e kadar arttığı, torkun % 24,46'ya kadar azaldığı, spesifik kesme enerjisinin % 35'e kadar azaldığı, delaminasyonun % 21,55'e kadar azaldığı, yüzey pürüzlülüğünün % 20'ye kadar azaldığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışma sonucunda çok jetli kriyojenik soğutma koşullarında kompozit malzemelerin işlenebilirliğini ve sürdürülebilirliğini ortaya koymuşlardır.

(Batista ve diğerleri, 2022), karbon fiber takviyeli termoplastik ve termoset polimerlerin kuru ve kriyojenik koşullarda delinmesinin delaminasyon, kesilmemiş lifler, delik çapı ve yuvarlaklık üzerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarının sonucunda delik kalitesinin hem kompozit malzemenin matris türüne hem de delme koşullarına bağlı olduğunu ve delik derinliği ilerledikçe delik kalitesinin değiştiğini tespit etmişlerdir. Bunun yanında termoset kompozitlerin kriyojenik soğutma koşullarında delme işlemleri sonucunda delik çıkışında delaminasyonun azaldığını delik girişlerinde ise kesilmemiş liflerin azaldığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar termoplastik kompozitlerin kriyojenik soğutma koşullarında delme işlemleri sonucunda ise delik çapı ve yuvarlaklık hatalarının azaldığını saptamışlardır.

(Thamos ve diğerleri, 2022), kuru ve kriyojenik koşullarda karbon fiber takviyeli kompozit bir malzemenin delinmesi üzerine yaptıkları araştırma sonucunda kriyojenik delme işleminde kuru delme işlemine göre ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin % 14-38 oranında azalmaların olduğunu, giriş ters deformasyon katsayısında ise % 5-68 oranında artışların olduğunu gözlemlemişlerdir.

Araştırmacılar elde ettiği sonuçlara göre kriyojenik delme işleminin petrol ve gaz sektörlerinde kullanılabilecek uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

(Yan ve diğerleri, 2022), kriyojenik koşullarda frezeleme konusunda yaptıkları çalışmalarında üstün mekanik ve optik özellikleri sayesinde kullanımları gün geçtikçe daha da artan polimetil metakrilat kompozit malzemeleri kullanmışlardır. Araştırmacılar, kriyojenik ortamda farklı sıcaklık koşullarında farklı frezeleme parametrelerinin yüzey kalitesine etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada, polimetil metakrilat malzemenin işlenebilirliğinin sıcaklığa büyük ölçüde bağımlı olması nedeniyle frezeleme işlemini kriyojenik koşullarda -55  C ve 25  C sıcaklıklarda gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonucunda araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen parametrenin talaş kaldırma derinliği olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca; düşük sıcaklık koşullarında malzemenin daha kırılgan olarak frezelendiği ve yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir.

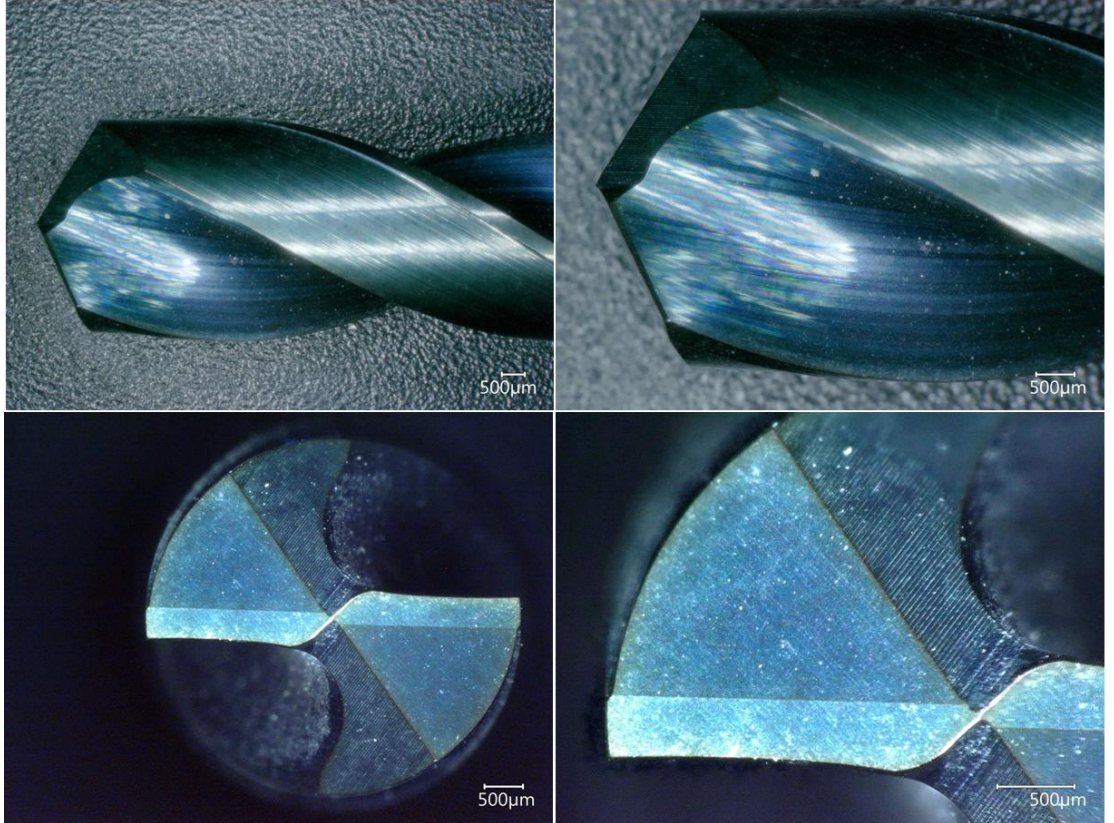


3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin kuru ve kriyojenik koşullarda delinmesiyle oluşan itme kuvveti, toz oluşumu, delik çıkış hasarı (delaminasyon), delik içi yüzey pürüzlülüğü ve delik iç yüzeyinde oluşan hasarlar araştırılmıştır.

3.1 Deneylerde Kullanılan Kesici Takım

Delik delme deneylerinde 5 mm çapında Nachi firmasının AquaREVO serili 30° helis açılı, 135° uç açılı helisel matkaplar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takımların fotoğrafları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Deneylerde kullanılan kesici takım.

3.2 Deney Parametreleri

Deneyler kuru ve kriyojenik (-196 °C) kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk fener mili hızlarında 250, 500 ve 750 mm/dk ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler üçer tekrarlı olacak şekilde Çizelge 3.1’de yer alan parametrelerde yapılmıştır.

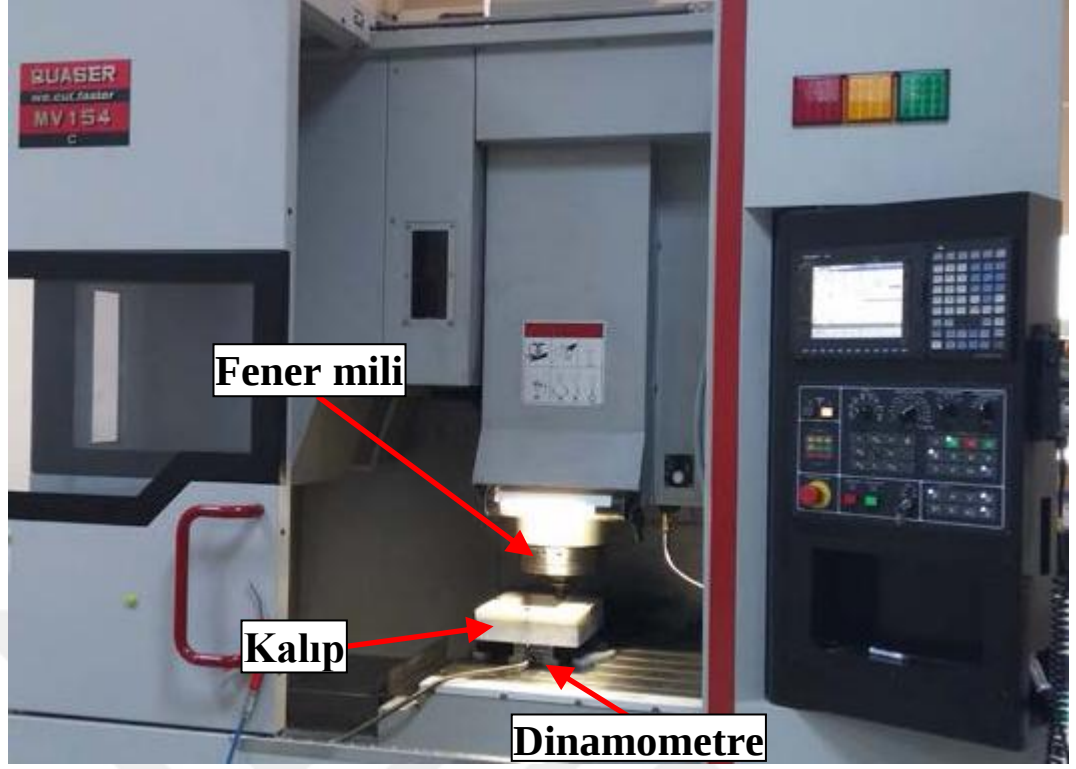
Çizelge 3.1: Deney parametreleri.

Kesme Koşulları	Fener mili hızı (dev/dk)	İlerleme hızı (mm/dk)
Kuru	1000	250
	1000	500
	1000	750
	9000	250
	9000	500
	9000	750
Kriyojenik	1000	250
	1000	500
	1000	750
	9000	250
	9000	500
	9000	750

3.3 Deney Düzenegi

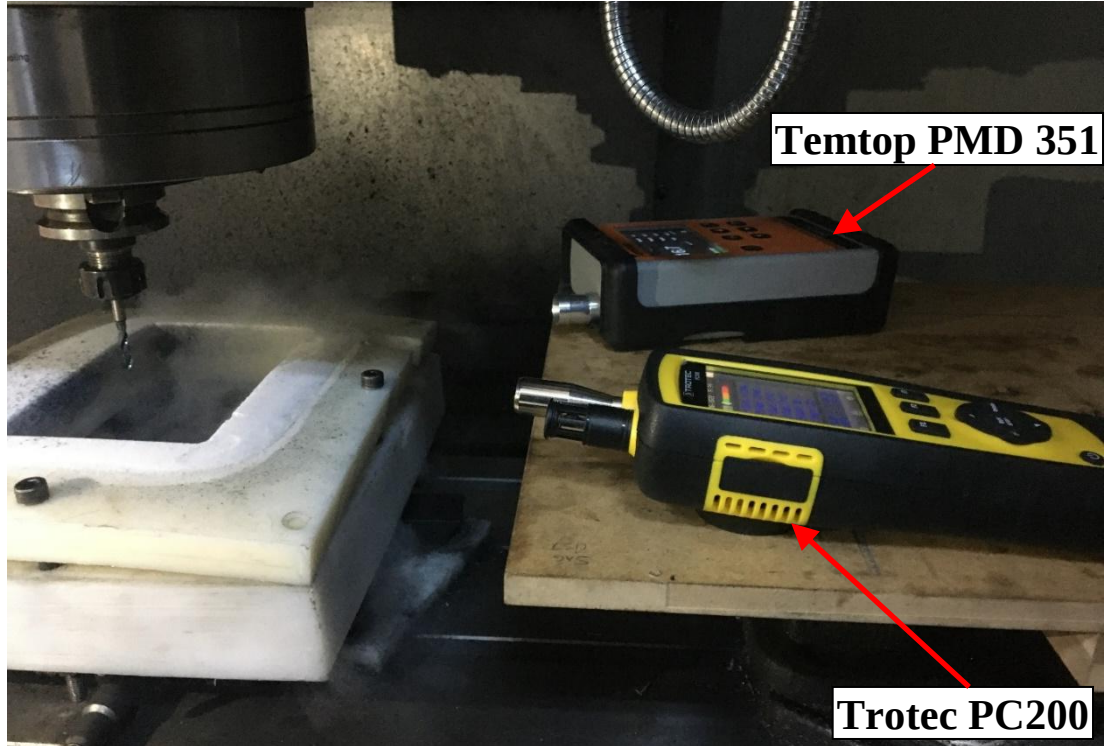
Deneyler, Şekil 3.2’de görüldüğü üzere 10000 dev/dk fener mili hızına ve maksimum 17.5 kW güç kapasitesine sahip Quaser MV154C marka dik işlem merkezinde yapılmıştır. İtme kuvvetlerinin ölçümleri, Kistler 9257B marka ölçüm dinamometresi, Kistler 5070A marka amplifikatör, Kistler 5697A veri toplama sistemi ve DynoWare yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

480x480x4 mm boyutlarındaki temin edilen karbon fiber plaka, bağlama kalıbına bağlanabilmesi için kalıp ölçülerinde kesilerek somun ve cıvata yardımıyla sabitlenmiştir. Bağlama kalıbına yerleştirilen karbon fiber plaka delik delinmek üzere tezgah tablasına rijit olarak bağlanan dinamometrenin üzerine yerleştirilerek deneysel çalışmalara hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.2 : Deneylerin gerçekleştirildiği dik işlem merkezi.

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere karbon fiber plakanın delinmesi sonucu oluşan toz miktarını ölçmek amacıyla matkap ucundan 30 cm uzaklığa konulan Temtop PMD 351 aerosol toz monitörü ve Trotec PC200 partikül sayıcısı yerleştirilmiştir.



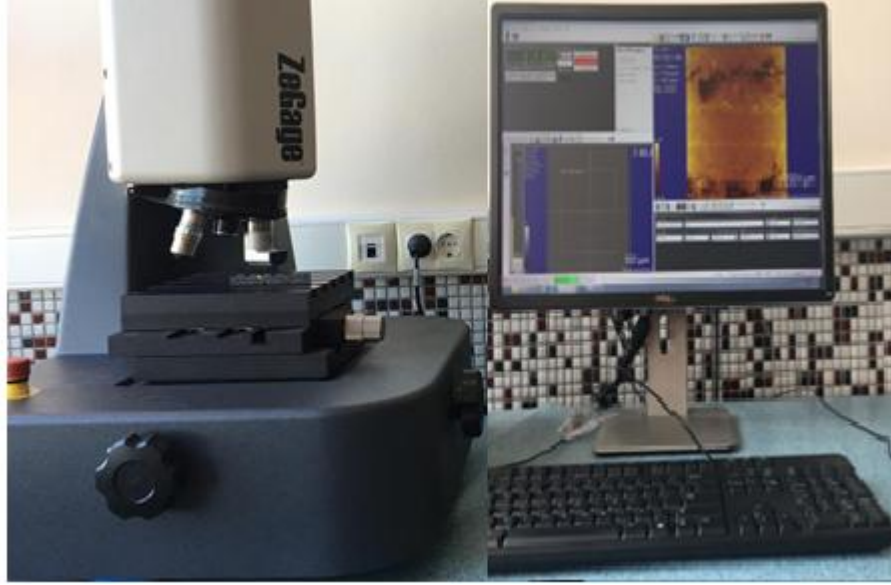
Şekil 3.3 : Temtop PMD 351 ve Trotec PC200 partikül sayıcı.

Delik çıkışlarında oluşan hasarların yani delaminasyonların ölçümleri Şekil 3.4'te görülen Keyence VHX-900F dijital mikroskopla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 : Keyence VHX-900F dijital mikroskop ile delaminasyon ölçümü.

Karbon fiber takviyeli kompozit plakanın farklı fener mili hızları, farklı ilerleme hızlarında, kuru ve kriyojenik kesme koşullarında gerçekleştirilen deneylerden sonra delikler aksenal olarak kesilmiş ve Şekil 3.5'te görüldüğü gibi Zygo ZeGage optik profilometre yardımıyla delik içi yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.



Şekil 3.5 : Zygo ZeGage marka optik profilometre ile yüzey pürüzlülük ölçümü.

Delik iç yüzeylerinde oluşan hasarlar ise Şekil 3.6’da görüldüğü üzere taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 : Taramalı elektron mikroskobu.



4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında, karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında delinmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler üçer tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada; itme kuvveti, toz oluşumu, delik çıkış hasarı (delaminasyon), delik içi yüzey pürüzlülüğü ve delik iç yüzeyinde oluşan hasarlar araştırılmıştır.

4.1 İtme Kuvvetleri

Delik delme deneylerinde kesici takım X ve Y koordinatları yönünde sabit kalırken Z koordinatı yönünde ilerlemektedir. Dolayısıyla kesici takım X ve Y koordinatlarında çok fazla kesme kuvveti oluşturmazken, kesici takımın ilerlediği Z koordinatı yönünde maksimum kuvvet oluşmaktadır. Bu nedenle yapılan deneysel çalışmalarda sadece Z koordinatı yönündeki kesme kuvveti (F_z -itme kuvveti) dikkate alınmıştır. Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında üçer tekrarlı şekilde yapılan delik delme deneyleri sonucu elde edilen itme kuvvetlerine ilişkin değerler Çizelge 4.1’de yer almaktadır.

Çizelge 4.1 : Delik delme sonucu elde edilen itme kuvvetleri.

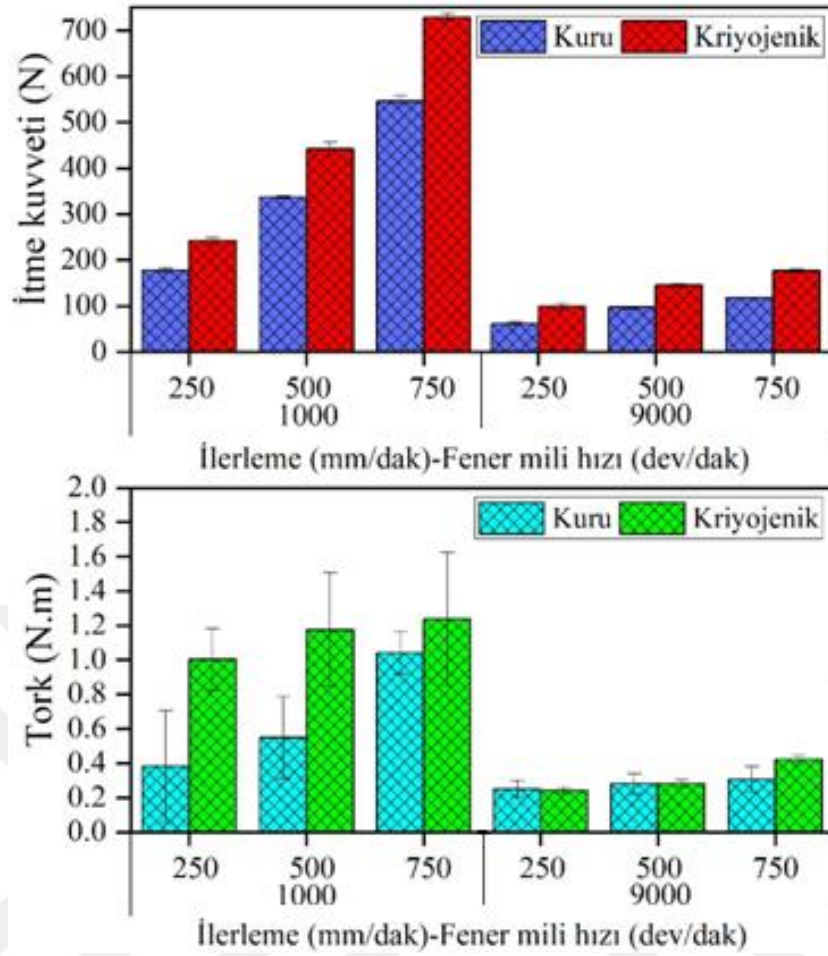
Deney sayısı	Kesme koşulları	Fener mili hızı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)	F _z (N) 1. tekrar	F _z (N) 2. tekrar	F _z (N) 3. tekrar	Ortalama kuvvet (N)
1	Kuru	1000	250	179.4	181.8	172.9	178.0
2			500	338.5	338.8	332.9	336.7
3			750	547.0	559.8	532.2	546.3
4		9000	250	57.35	59.85	65.9	61.0
5			500	93.84	97.31	99.4	96.9
6			750	117.3	117.5	119.3	118.0
7	Kriyojenik	1000	250	233.4	243.9	248.6	242.0
8			500	425.9	438.1	461.5	441.8
9			750	727.2	720.9	739.2	729.1
10		9000	250	89.61	97.97	107.8	98.5
11			500	141.9	147.7	146.2	145.3
12			750	172.6	180.1	176.7	176.5

Delik delme deneylerinde oluşan tork değerleri ise Çizelge 4.2’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : Delik delme sonucu elde edilen tork dataları.

Deney sayısı	Kesme koşulları	Fener mili hızı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)	T (Nm) 1. tekrar	T (Nm) 2. tekrar	T (Nm) 3. tekrar	Ortalama tork (Nm)
1	Kuru	1000	250	0.2943	0.0395	0.8141	0.3826
2			500	0.8654	0.2946	0.4840	0.5480
3			750	0.9156	0.9985	1.2080	1.0407
4		9000	250	0.2000	0.2376	0.3168	0.2515
5			500	0.3551	0.2783	0.2086	0.2807
6			750	0.3971	0.3094	0.2120	0.3062
7	Kriyojenik	1000	250	0.7502	1.1168	1.1440	1.0037
8			500	1.3810	0.7086	1.4370	1.1755
9			750	1.7790	1.0340	0.8985	1.2372
10		9000	250	0.2652	0.2413	0.2193	0.2419
11			500	0.2698	0.3119	0.2610	0.2809
12			750	0.4499	0.4202	0.3967	0.4223

Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilen sayısal değerlerin grafiksel gösterimi ise Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1 : Kuru ve kriyojenik şartlarda yapılan testlerde itme kuvveti ve tork oluşumu

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere itme kuvveti, ilerleme hızının artışıyla artarken fener mili hızının (kesme hızının) artışıyla azalmaktadır. İlerleme hızının artışıyla itme kuvvetinin artmasının nedenleri; talaş kesit alanının büyümesi, talaş kaldırmak için ihtiyaç duyulan enerjinin artması ve kesilmemiş olan talaş yükünün artmasıdır (Ercan, 2020; Köklü ve Kayhanlar, 2022). Fener mili hızının artışıyla itme kuvvetinin azalmasının nedenleri ise talaş kaldırma esnasında fener mili hızının artışıyla kesici takım ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı sıcaklık artar ve malzeme yumuşar. Böylece kesici takım ile iş parçası ara yüzeyindeki temas alanı ile özgül kesme enerjisi azalmasına bağlı olarak itme kuvveti azalır.

Kriyojenik ve kuru koşullarda yapılan delik delme işlemleri karşılaştırıldığında Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere kriyojenik koşullardaki itme kuvvet değerlerinin kuru koşullardaki itme kuvvet değerlerine göre daha yüksek olduğu dolayısıyla kuvvete

bağlı tork değerlerinin de yine kriyojenik koşullardakinin kuru koşullardakinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Kriyojenik koşullarda yapılan deneylerde daha fazla kuvvet ve tork oluşmasının nedeni -196 °C'deki sıvı azotun (LN₂) soğutucu etkisiyle malzemenin gevrekleşerek mukavemetinde artış meydana gelmesidir (Çoban, 2019).

Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi en yüksek itme kuvveti, kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında gerçekleşirken en düşük itme kuvveti ise; kuru kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında gerçekleşmiştir.

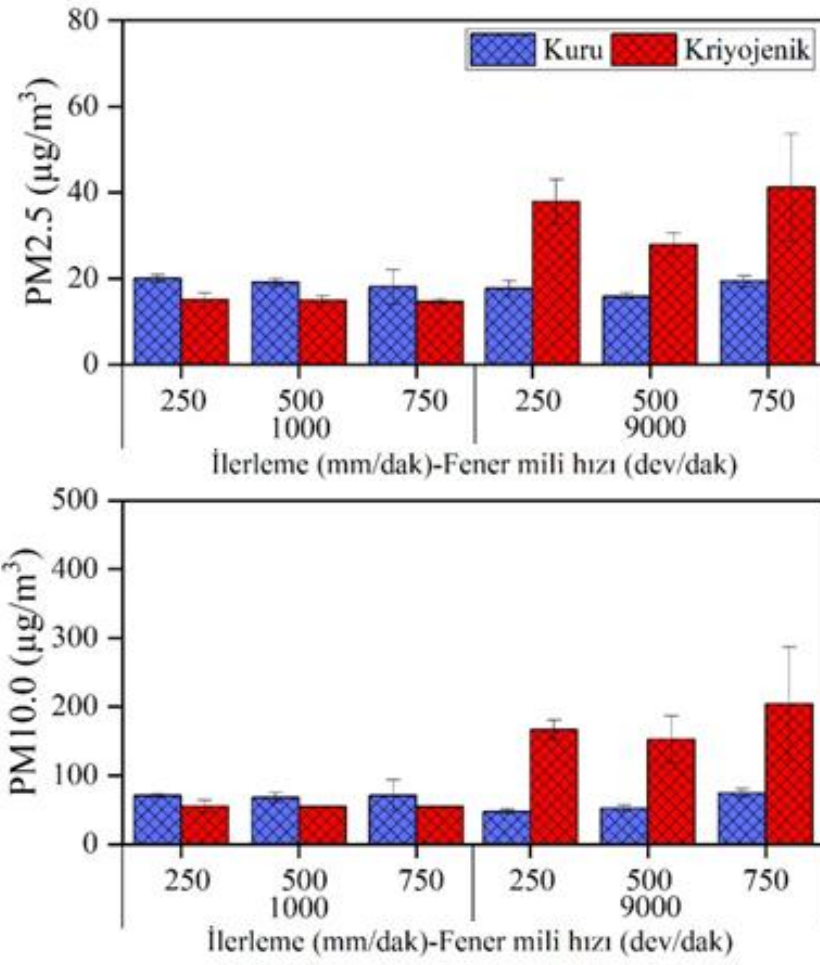
4.2 Toz Ölçümleri

Toz ölçümleri, kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında üçer tekrarlı şekilde matkap ucundan 30 cm uzaklığa konulan Temtop PMD 351 ve Trotec PC200 partikül sayıcıları ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen delik delme deneyleri sonucu Temtop PMD 351 ve Trotec PC200 partikül sayıcıları ile elde edilen toz ölçüm verilerine ilişkin değerlere sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

Çizelge 4.3 : Temtop PMD 351 toz ölçüm çizelgesi.

Kesme Koşulları	Fener mili hızı (dev/dk)	İlerleme (mm/dk)	PM1.0		PM2.5		PM4.0		PM10.0	
			Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma
Kuru	1000	250	11.63	0.579	20.03	0.793	38.87	2.281	70.93	2.713
	1000	500	11.27	0.450	19.13	0.873	39.53	3.844	68.00	6.913
	1000	750	11.07	2.037	18.07	3.994	37.60	12.404	70.97	22.375
	9000	250	11.10	1.791	17.67	1.841	30.23	3.878	47.80	3.203
	9000	500	9.97	0.419	15.83	0.704	30.27	3.289	52.40	4.752
	9000	750	11.60	0.616	19.40	1.283	37.27	2.327	74.50	5.776
Kriyojenik	1000	250	9.40	1.020	15.00	1.551	32.87	4.371	55.30	9.150
	1000	500	8.63	0.634	14.90	1.061	31.70	1.451	54.87	0.579
	1000	750	7.97	0.330	14.63	0.694	30.67	2.317	54.83	0.694
	9000	250	20.60	2.328	37.83	5.203	85.97	1.960	166.80	14.005
	9000	500	15.80	1.657	27.93	2.639	70.77	8.916	152.83	34.156
	9000	750	22.23	7.082	41.23	12.503	99.87	37.270	204.03	82.711

Toz ölçümlerine ilişkin Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilen sayısal verilerin grafiksel sonuçları sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te yer almaktadır.



Şekil 4.2 : Temtop PMD 351 ile ölçülen toz yoğunluğunun ilerleme ve fener mili hızına göre değişimi.

Çizelge 4.4 : Trotec PC200 toz ölçüm çizelgesi.

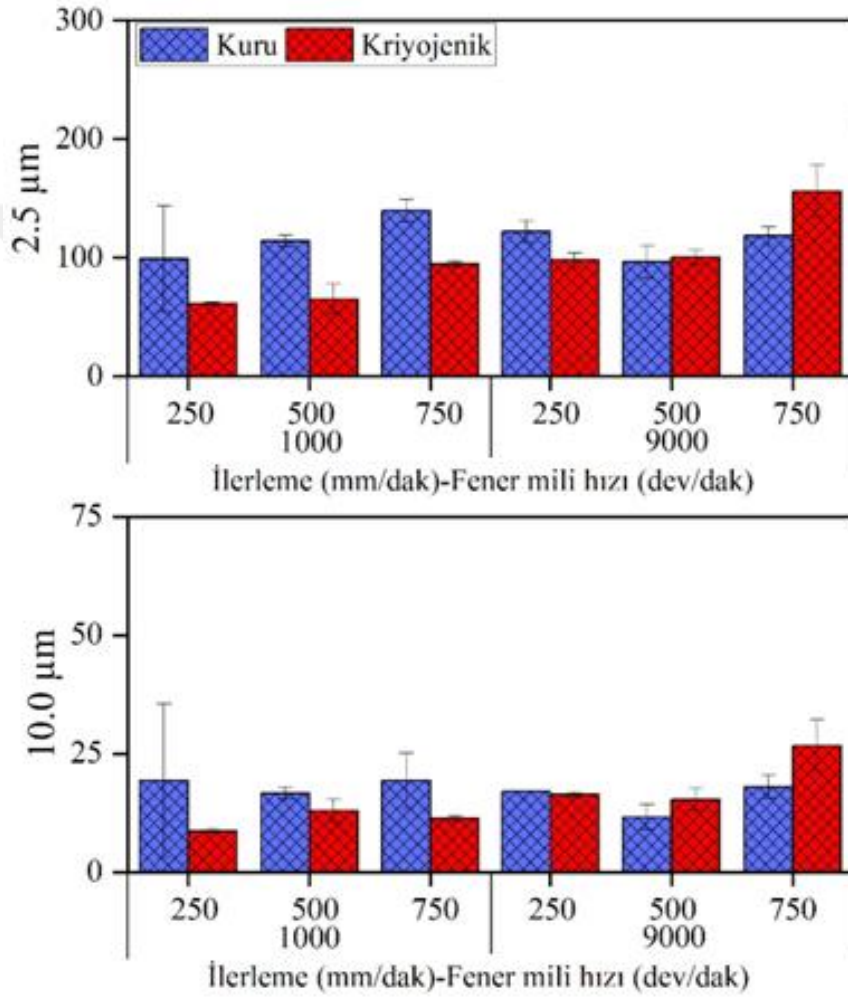
Kesme koşulları	Fener mili hızı (dev/dk)	İlerleme (mm/dk)	0.3 µm		0.5 µm		1 µm		2.5 µm		5 µm		10 µm	
			Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma
Kuru	1000	250	20318.33	1596.981	4012.33	307.413	603.00	94.756	99.00	44.639	26.67	16.131	19.33	16.214
	1000	500	20199.67	692.758	4319.00	336.527	621.67	49.695	114.00	5.099	27.33	0.943	16.67	1.247
	1000	750	20953.33	1223.466	4632.33	519.642	688.00	101.295	139.67	9.286	36.33	4.714	19.33	5.793
	9000	250	22809.33	3331.116	5533.67	1581.153	903.00	387.599	122.00	9.000	56.33	35.864	17.00	0.000
	9000	500	20477.67	1867.398	4473.33	670.117	623.00	47.378	96.33	13.275	23.00	4.967	11.67	2.625
	9000	750	22851.67	242.500	4650.67	462.326	699.33	67.658	118.33	7.717	29.00	1.633	18.00	2.449
Kriyojenik	1000	250	7999.00	522.629	2064.33	104.059	334.33	27.777	61.33	1.247	18.33	2.055	8.67	0.471
	1000	500	9297.00	407.060	2244.67	181.590	356.33	7.409	65.00	12.728	21.00	2.944	13.00	2.449
	1000	750	10502.67	370.923	2662.67	181.627	448.00	38.609	94.67	2.055	29.33	2.625	11.33	0.471
	9000	250	9999.33	550.453	2601.33	312.761	464.67	11.842	100.33	5.907	31.00	3.742	16.33	0.471
	9000	500	9783.67	111.721	2725.67	141.035	496.67	46.205	99.67	10.873	27.67	4.714	15.33	2.357
	9000	750	11857.00	1289.211	3432.67	470.241	695.00	108.271	156.00	21.970	43.00	4.967	26.67	5.437

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere kuru ve kriyojenik ortam koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ilerleme hızı arttıkça toz yoğunluğunda pek değişimin olmadığı ancak; 9000 dev/dk fener mili hızında ilerleme hızı arttıkça genel olarak toz yoğunluğunda artışın olduğu görülmüştür. Ayrıca; 1000 dev/dk fener mili hızında kriyojenik koşullarında yapılan testlerde oluşan toz yoğunluğunun, kuru kesme koşullarında yapılan testlerde oluşan toz yoğunluğuna göre daha az olduğu, fener mili hızının 9000 dev/dk olduğu durumda ise kriyojenik ortam koşullarında oluşan toz yoğunluğunun kuru ortam koşullarında oluşan toz yoğunluğundan çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te yer alan toz ölçüm sonuçları ile kompozit malzemelerin işlenmesi sonucunda özellikle 0.5-5 μm arasında toz oluşumlarının da mevcut olduğu görülmektedir. Dolayısıyla gerçekleştirdiğimiz deneyler sonucu oluşan toz miktarlarının, OSHA standartları ile kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan tozun insan sağlığı üzerine etkileri üzerine yapılan çalışma sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda kompozit malzemelerin delinmesinde oluşan toz miktarının insan sağlığına zararlı etkilerinin olabileceği aralıklarda da olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenlerle; kompozitlerin işlenmesi sonucunda oluşan tozun insan sağlığına olabilecek etkilerini azaltmak amacıyla kriyojen gibi soğutma sıvılarının kullanılması, sık sık havalandırma işleminin yapılması, yüksek partikül filtreleme özelliğine sahip maskelerin ve gözlüklerin kullanılması ile periyodik olarak iş sağlığı ve güvenliği kontrollerinin yapılması tavsiye edilmektedir (Zhang ve diğerleri, 2001; Durgam ve diğerleri, 2010; Lanyurt ve diğerleri, 2012).

Şekil 4.3’te görüldüğü üzere Trotec PC200 cihazı ile kompozit malzemenin işlenmesi sonucu oluşan toz partikül sayısı ölçülmüştür. Kuru ve kriyojenik ortam koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk fener mili hızlarında kriyojen ortamda yapılan deneylerde toz partikül sayısında önemli ölçüde azalmalar olduğu görülmektedir. Kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan toza ilişkin birçok araştırmacının yaptıkları çalışmalar sonucunda; düşük kesme hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında toz oluşumunun düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir (Azmi, 2012; Haddad ve diğerleri, 2012; Iyer, 2015; Nguyen-Dinh ve diğerleri, 2020; Boughdiri ve diğerleri, 2021).

Mevcut literatürden farklı olarak kriyojenik ortamda da gerçekleştirilen deneysel çalışmalarımız sonucunda kriyojenik şartlarda 1000 dev/dk fener mili hızında toz oluşumunun önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla yapılan deneysel çalışmalardan ve literatür çalışmalarından da görüleceği üzere karbon fiber takviyeli kompozit bir malzemenin delinmesi sonucunda toz oluşumunun en düşük seviyelerde olması için malzemenin kriyojenik koşullarda, düşük kesme hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında işlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.3 : Trotec PC200 ile ölçülen toz partikül sayısının ilerleme ve fener mili hızına göre değişimi.

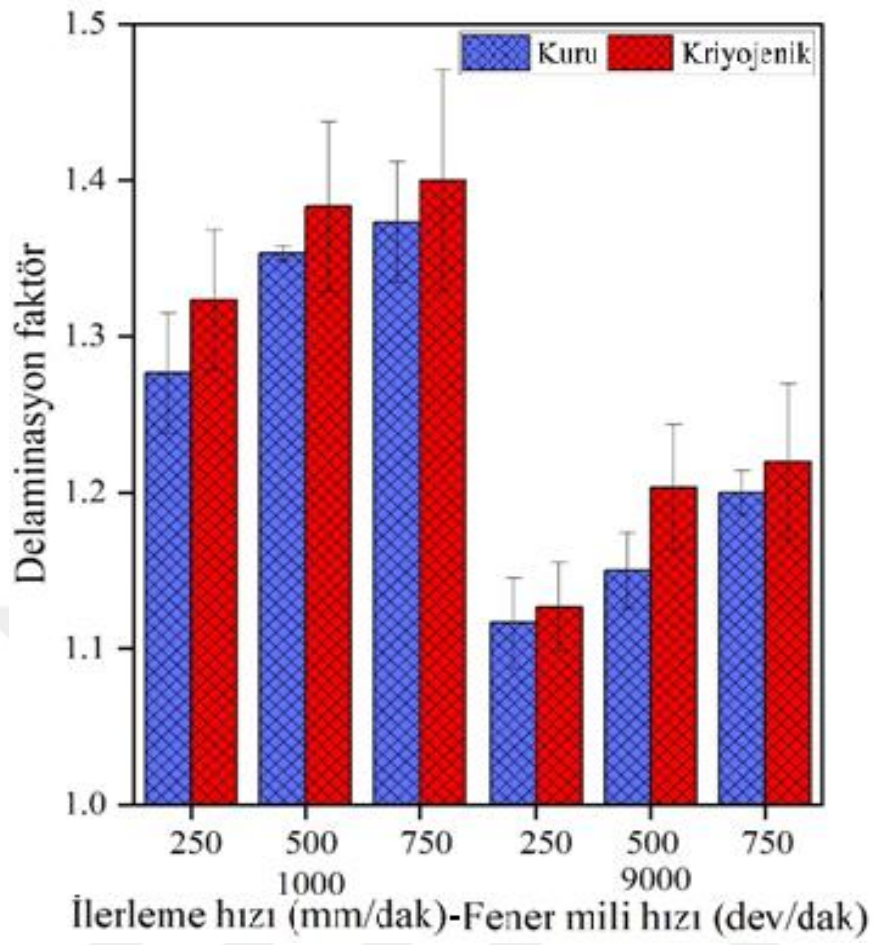
4.3 Delaminasyon Ölçümleri

Delaminasyon, kompozit malzemelerin delinmesi sırasında delik giriş ve çıkışlarında oluşan büyük hasarlardan bir tanesidir. Delaminasyon faktörü, kompozit malzemelerin delinmesi işlemlerinde oluşan yüzey hasarlarının analizinde kullanılan

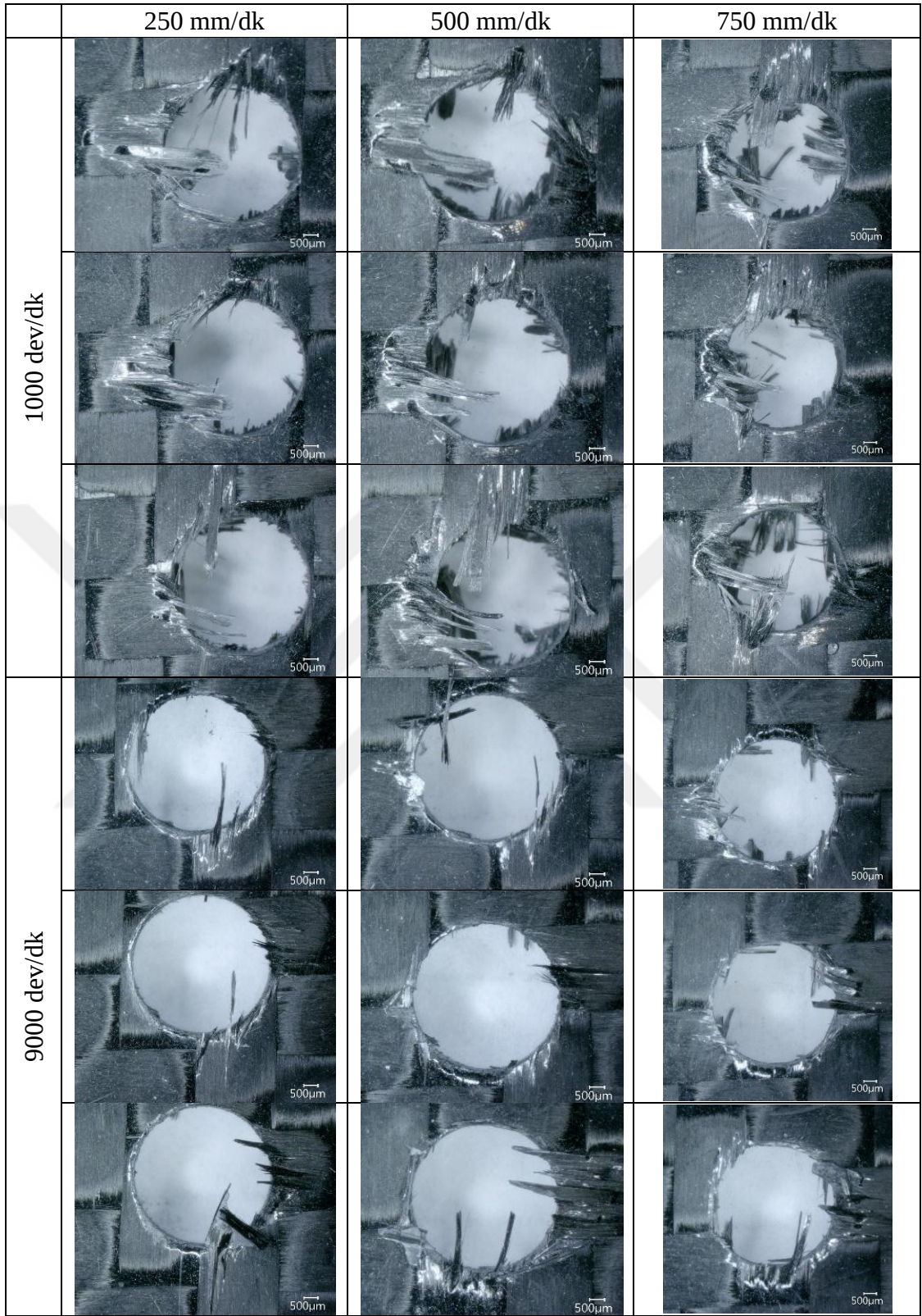
en önemli parametrelerden bir tanesidir (Bilge ve diğerleri, 2017). Delaminasyon faktörü, delik çevresinde oluşan maksimum hasar çapının, delik çapına bölünmesiyle elde edilmektedir (Kuş ve Ekici, 2017).

Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında üçer tekrarlı şekilde gerçekleştirilen deneyler sonucunda oluşan delik çıkış delaminasyon faktörünün ilerleme hızı ve fener mili hızlarına göre değişim grafiği Şekil 4.4'te yer almaktadır. Delik çıkış delaminasyonlarına ilişkin kuru ve kriyojenik koşullarda ve farklı kesme parametreleri için ayrı ayrı alınan görüntülere sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da yer verilmiştir.

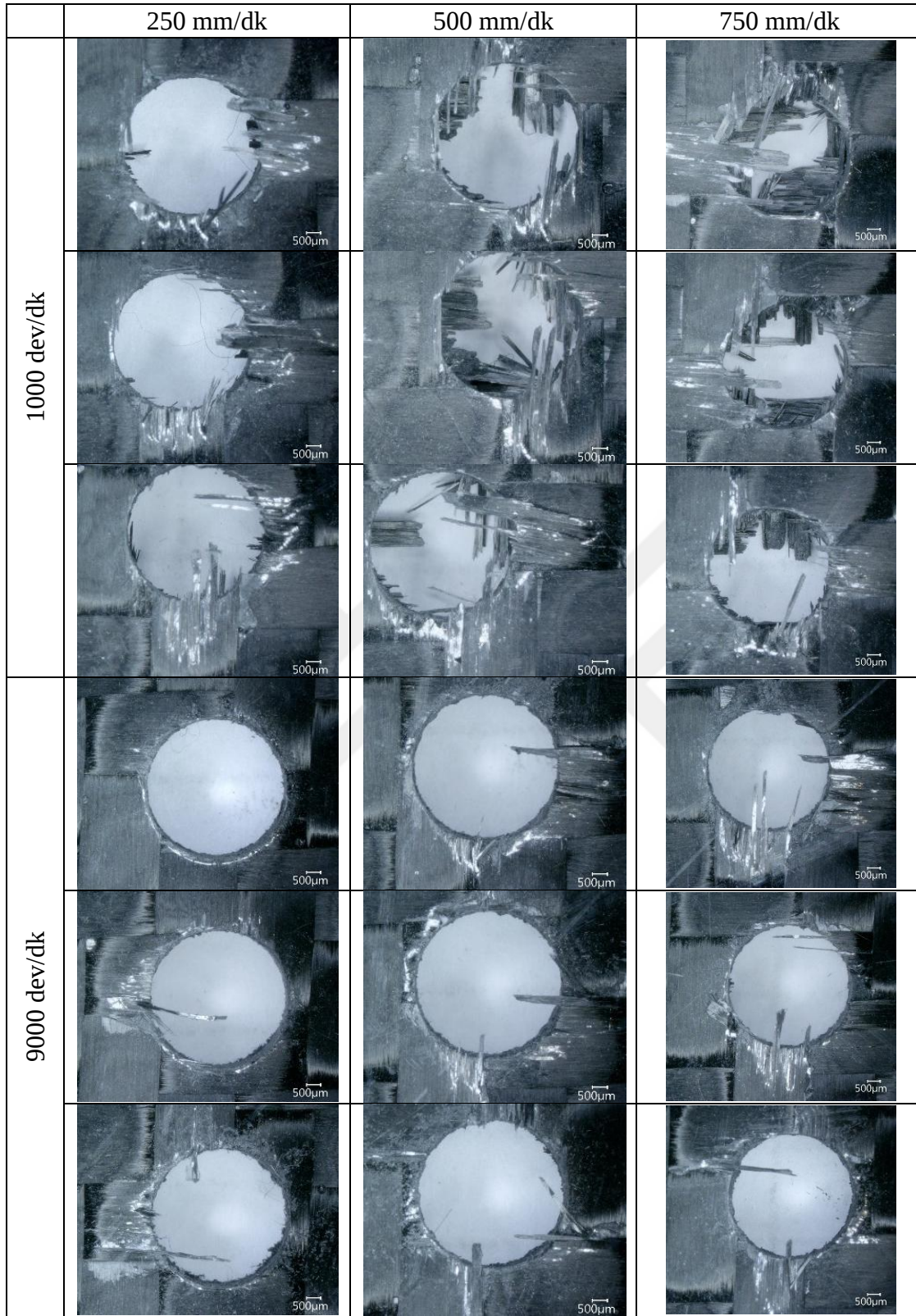
Delme işlemi sırasında matkap ucu delik çıkışına yaklaştıkça delinecek kompozit malzemenin kalınlığı azalır. Dolayısıyla kompozit malzemenin delaminasyona karşı gösterdiği direnç azalır. Bu nedenle delik çıkışlarında meydana gelen delaminasyon, delik girişlerinde meydana gelen delaminasyonlara göre daha fazladır (Özen, 2015). Şekil 4.4'te görüldüğü üzere ilerleme hızı arttıkça delaminasyon faktörü artmıştır. Bunun nedeni ilerleme hızının artmasına bağlı olarak itme kuvveti artar. Böylece artan itme kuvvetinin etkisiyle kompozit malzemenin delik çıkışındaki katmanlar birbirinden ayrılır, dolayısıyla delaminasyonda artış meydana gelir (Özkaya ve diğerleri, 2019). Fener mili hızı arttıkça delaminasyon faktörü azalmıştır. Bunun nedeni fener mili hızının artmasına bağlı olarak kesme bölgesinde sürtünmeden dolayı sıcaklık artar ve malzeme yumuşar, dolayısıyla delaminasyon azalır (Genç, 2019). Delaminasyon oluşumu ile kuvvet arasında doğrudan bir bağlantı bulunmaktadır. Bu nedenle kriyojenik işleme koşulları kuru kesme koşullarına göre daha fazla delaminasyon oluşumuna neden olmuştur (Basmacı ve Yörük, 2020). Yapılan deneysel çalışmalardan delaminasyon oluşumunun kuru kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında en düşük seviyede olduğu, kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla düşük delaminasyon oluşumu için kompozit malzemenin kuru kesme koşullarında yüksek fener mili (kesme) hızında ve düşük ilerleme hızında işlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.4 : Delaminasyonun ilerleme hızı ve fener mili hızına göre değişimi.



Şekil 4.5 : Kuru kesme koşullarında delik çıkışında oluşan hasarlar.



Şekil 4.6 : Kriyojenik kesme koşullarında delik çıkışında oluşan hasarlar.

4.4 Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında üçer tekrarlı şekilde Zygo ZeGage marka optik profilometre, ZeMaps ve MetroPro yazılımları yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

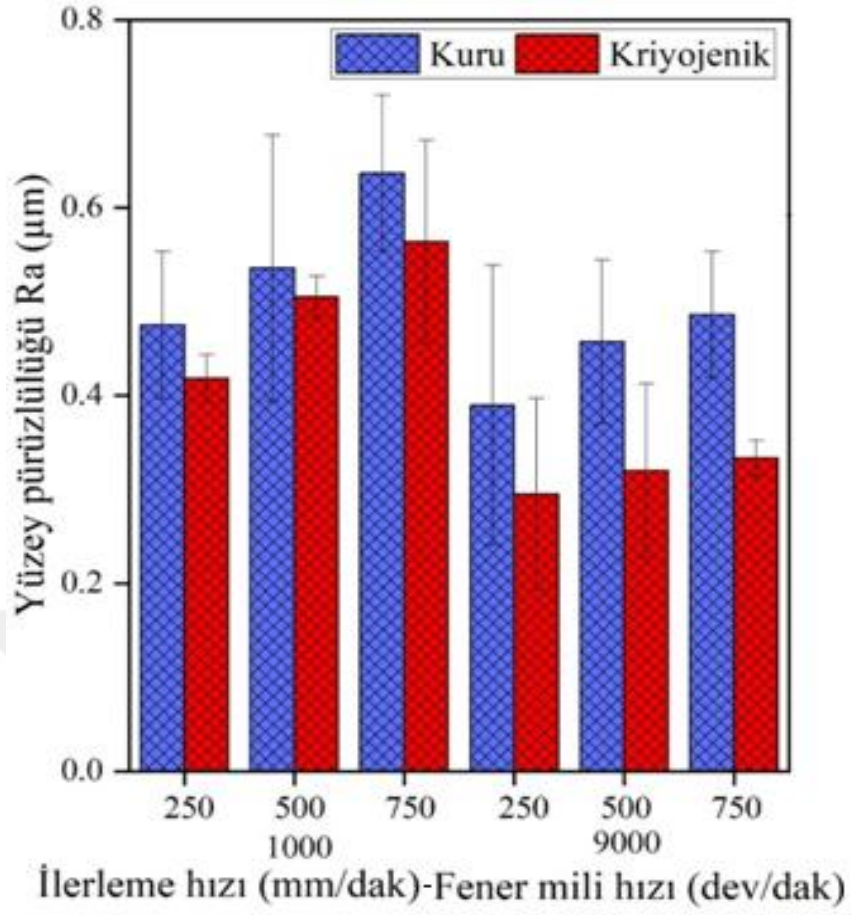
Çizelge 4.5 : Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

Deney sayısı	Kesme koşulları	Fener mili hızı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)			Ortalama
				1. tekrar	2. tekrar	3. tekrar	
1	Kuru	1000	250	0.514	0.526	0.385	0.475
2		1000	500	0.698	0.473	0.436	0.536
3		1000	750	0.721	0.634	0.555	0.637
4		9000	250	0.560	0.282	0.327	0.390
5		9000	500	0.364	0.537	0.471	0.457
6		9000	750	0.473	0.426	0.559	0.486
7	Kriyojenik	1000	250	0.440	0.390	0.424	0.418
8		1000	500	0.525	0.481	0.508	0.505
9		1000	750	0.593	0.444	0.654	0.564
10		9000	250	0.293	0.398	0.194	0.295
11		9000	500	0.268	0.265	0.427	0.320
12		9000	750	0.316	0.330	0.354	0.333

Deneysel çalışmalar sonucunda Çizelge 4.5'te yer aldığı üzere yüzey pürüzlülük parametrelerinin belirlenmesinde en yaygın kullanılanlardan bir tanesi olan aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) kullanılmıştır (Morkavuk, 2016).

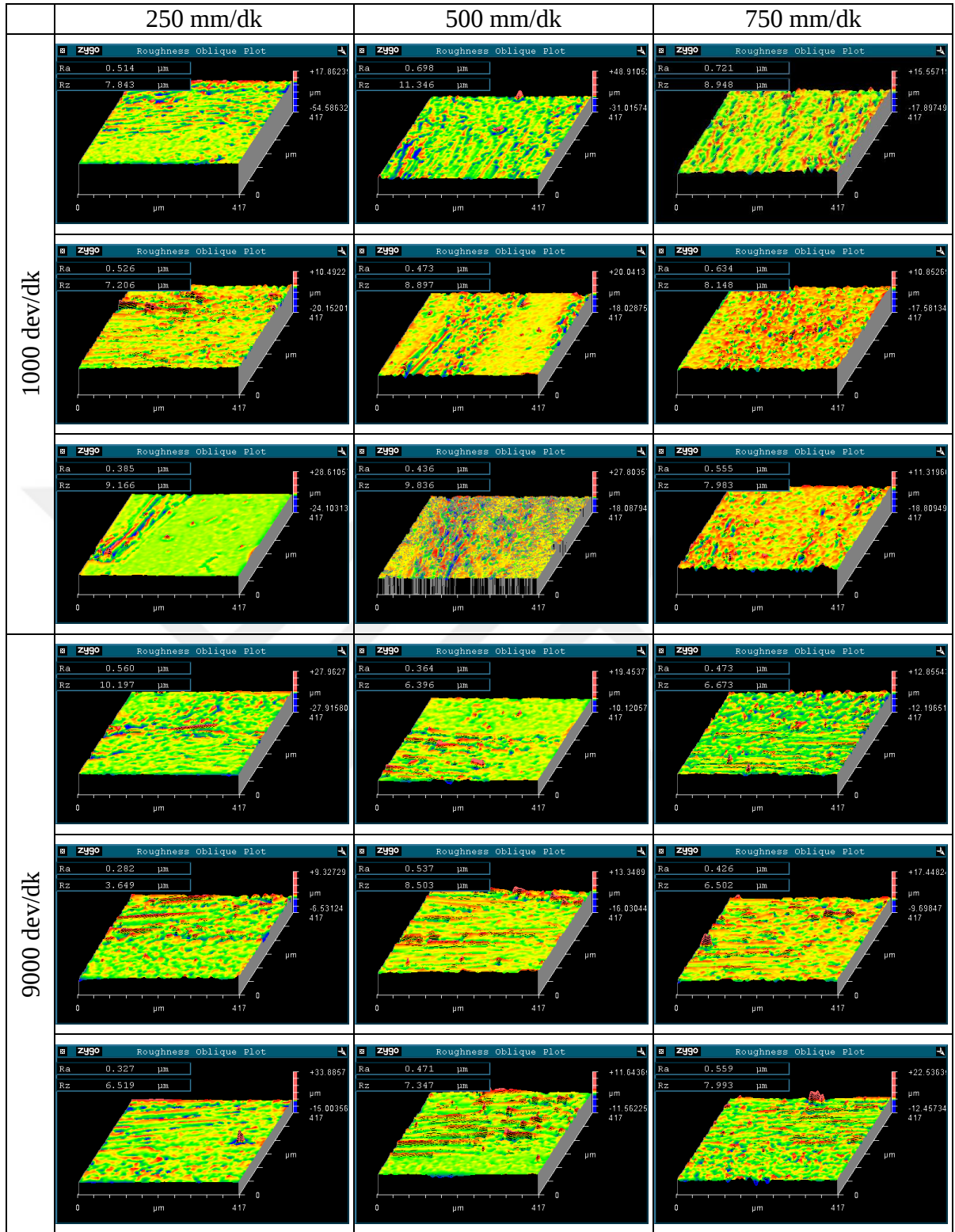
Çizelge 4.5'te yer alan yüzey pürüzlülük ölçümlerine ilişkin çizelgenin grafiksel görünümü Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi fener mili hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmakta, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Bu durumun nedeni itme kuvvetidir. İtme kuvveti arttıkça yüzey kalitesi düşmektedir (Morkavuk, 2016).

Yapılan deneysel çalışmalardan yüzey pürüzlülüğünün kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında en düşük seviyede olduğu, kuru kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla düşük yüzey pürüzlülüğü için kompozit malzemenin kriyojenik kesme koşullarında yüksek fener mili hızında ve düşük ilerleme hızında işlenmesi gerekmektedir.

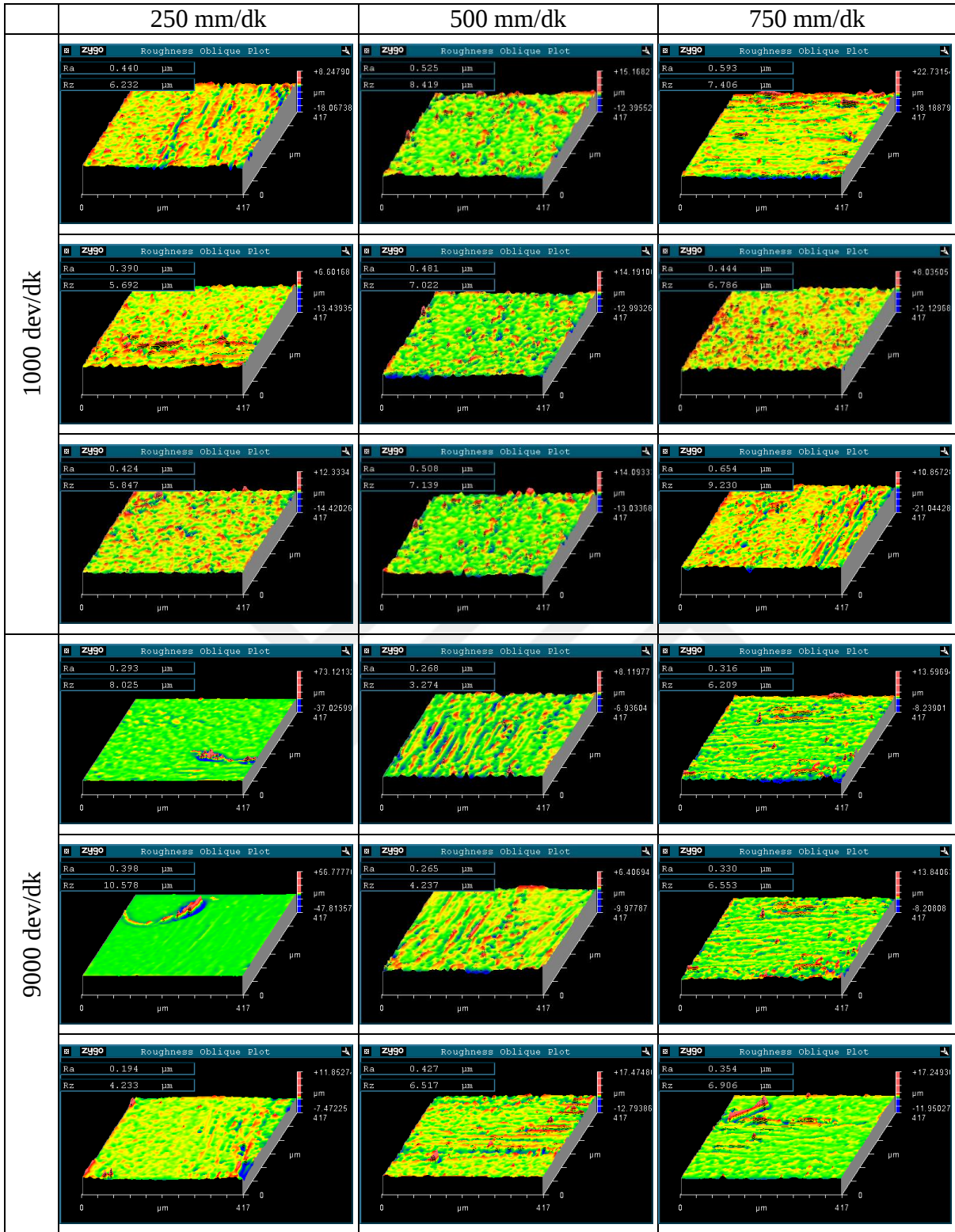


Şekil 4.7 : Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ve fener mili hızına göre değişimi.

Şekil 4.7’de yer alan yüzey pürüzlülüklerinin kuru ve kriyojenik kesme koşullarına göre alınmış görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da yer almaktadır.



Şekil 4.8 : Kuru kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğü.



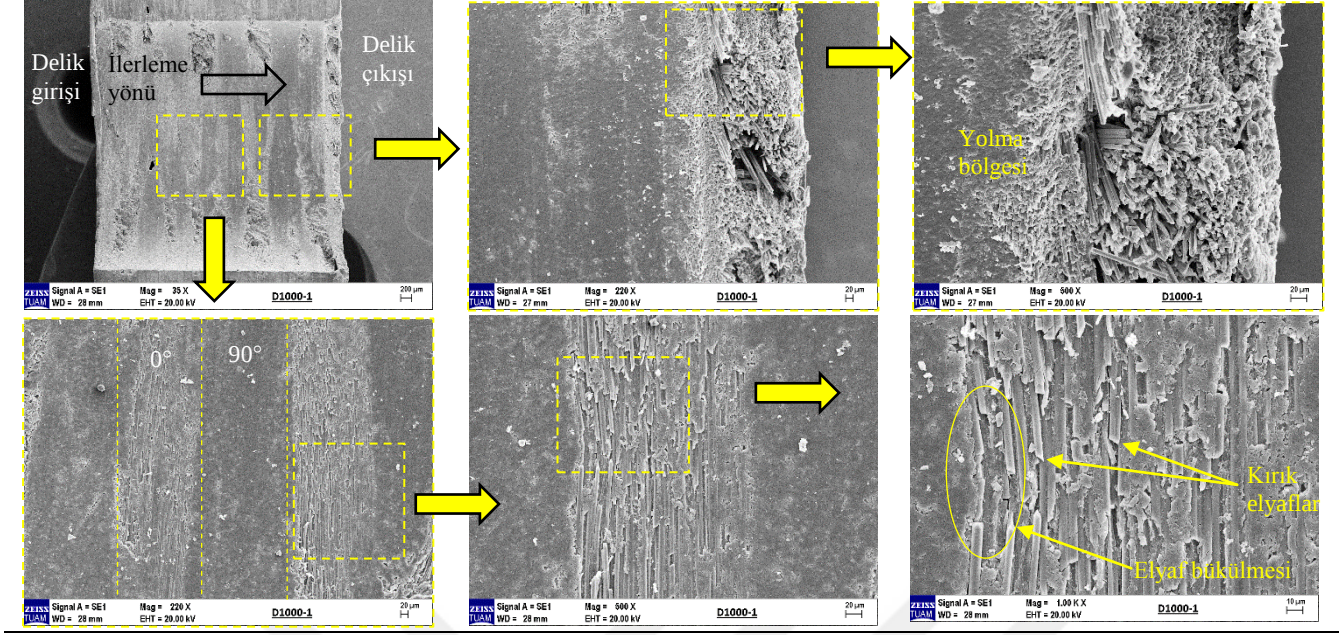
Şekil 4.9 : Kriyojenik kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğü.

4.5 Deliklerin (SEM) Taramalı Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi

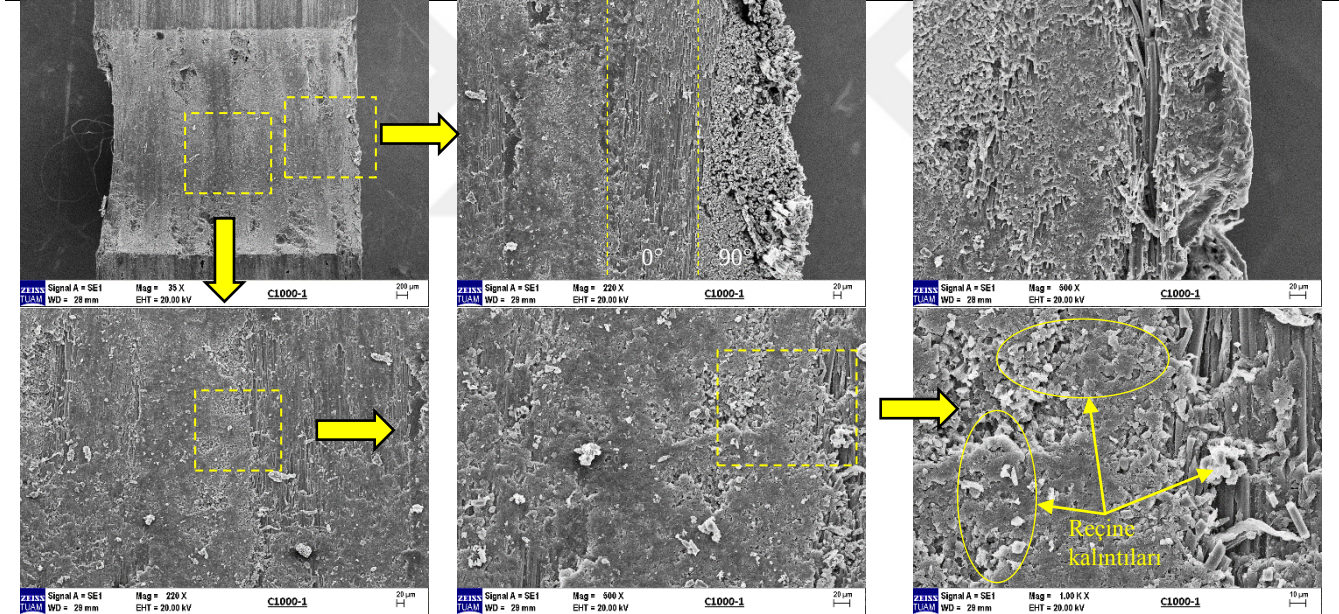
Taramalı elektron mikroskobu incelemesi, kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250 ve 750

mm/dk olmak üzere iki farklı ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında delme işlemi gerçekleştirilmiş numunelerin delik içi yüzeyleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiş ve hasar analizleri yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskopundan elde edilen ve Şekil 4.10'da yer alan görüntüler incelendiğinde kuru koşulda yapılan deneylerde delik içinin orta kısımlarından ziyade delik çıkışlarında yolma bölgelerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde matrisin, elyafı yeteri kadar koruyamadığı bu nedenle de elyaflarda hasarların oluştuğu tespit edilmiştir. Kriyojenik koşullarda yapılan deneylerde ise yolma bölgelerinde matrisin kuru kesme koşullarına göre daha az hasar gördüğü dolayısıyla elyafları bir yere kadar koruyabildiği gözlemlenmiştir. Matrisin hasar gördüğü bölgelerde ise yüzeyde reçine kalıntıları olduğu görülmüştür. Kompozit malzemenin kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında delme işlemiyle gerçekleştirilen deneyler sonucunda özellikle kuru kesme koşullarında elyafların açığa çıktığı kısımlarda elyaf kırılmaları ve elyaf bükülmeleri gibi hasarlar gözlemlenirken kriyojenik kesme koşullarında ise kesme işleminin elyafların açığa çıkmadan gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Kuru kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 1000 dev/dk, f : 250 mm/dk)



Kriyojenik kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 1000 dev/dk, f : 250 mm/dk)



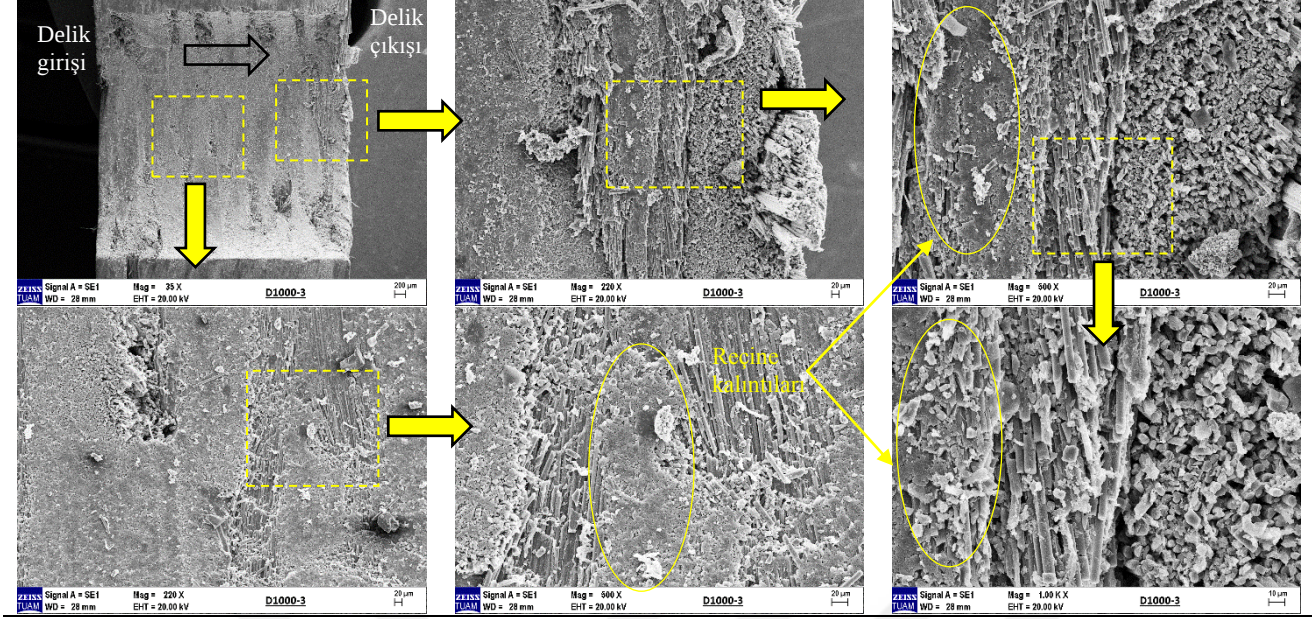
Şekil 4.10 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızı ve 250 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.

Şekil 4.11’de görüldüğü üzere kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında delme işlemi gerçekleştirilmiş numunelerin delik içi SEM görüntüleri verilmiştir. Kuru kesme koşullarında yüzeyde elyaf ve reçine kalıntıları olduğu gözlemlenmiştir. Kriyojenik kesme koşullarında ise elyaf-matris ayrılması, elyaf çekilmesi ve delaminasyon gibi toz oluşumuna fazla sebep olmayacak hasarların oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de yer

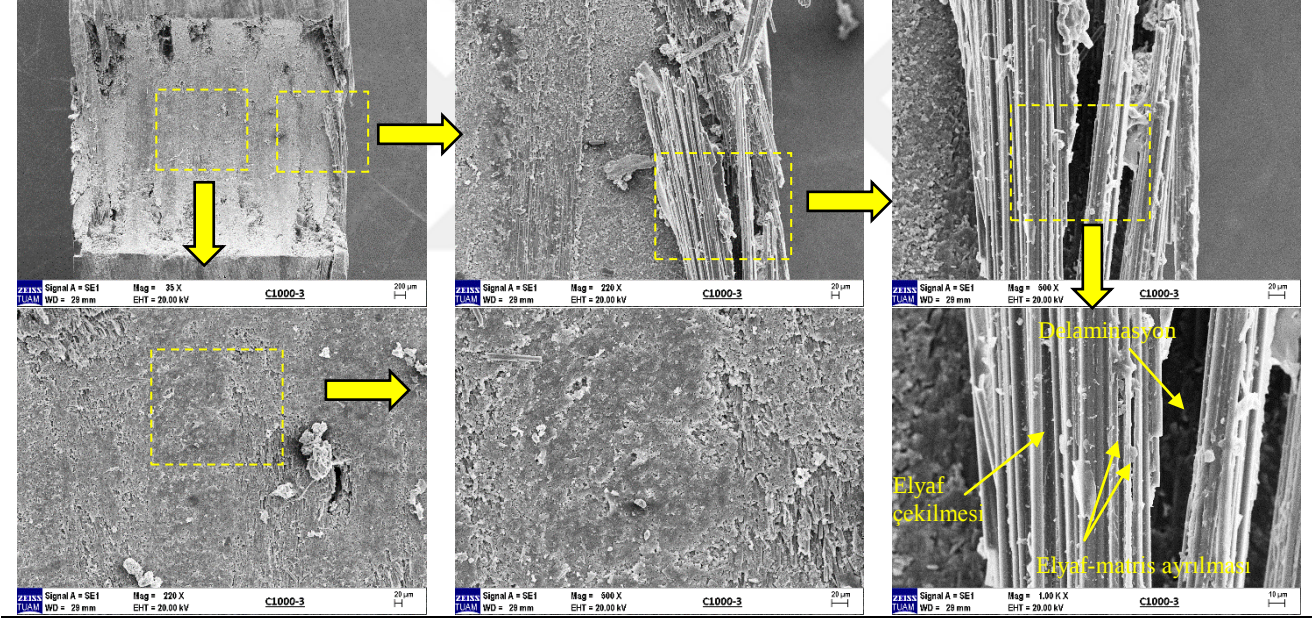
alan delik içi SEM görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde ilerleme hızının artmasıyla delik içi yüzeylerinde daha fazla hasarın olduğu dolayısıyla yüzey kalitesinin düştüğü saptanmıştır. Bunun yanında 1000 dev/dk fener mili hızında kuru kesme koşullarında matrisin hasar görmesiyle elyaflar açığa çıkararak hasar görmüş ve elyaflar kırılarak reçine parçalarının toz oluşturduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla SEM görüntülerinden elde edilen verilerden de kriyojen ilavesinin toz oluşumunu kuru kesme koşullarına göre azalttığı da gözlemlenmiştir.

Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında delme işlemi gerçekleştirilmiş numunelerin delik içi SEM görüntüleri şekil 4.12’de, 750 mm/dk ilerleme hızında delme işlemi gerçekleştirilmiş numunelerin delik içi SEM görüntüleri ise şekil 4.13’te gösterilmiştir.

Kuru kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 1000 dev/dk, f : 750 mm/dk)



Kriyojenik kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 1000 dev/dk, f : 750 mm/dk)

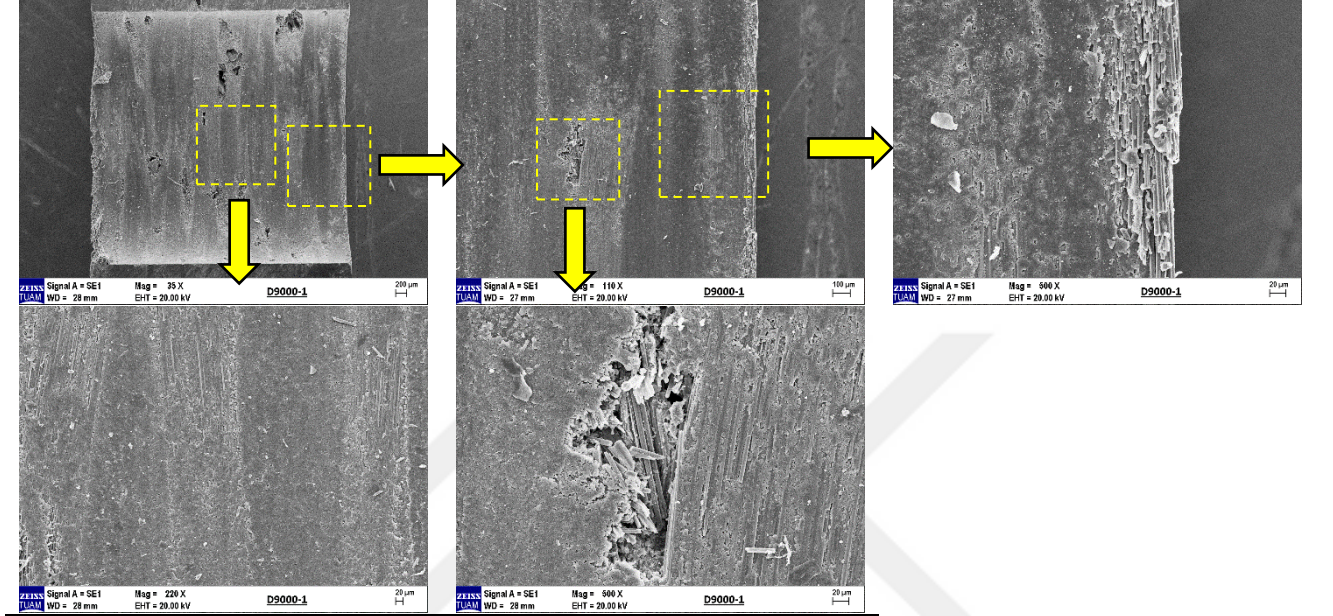


Şekil 4.11 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızı ve 750 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.

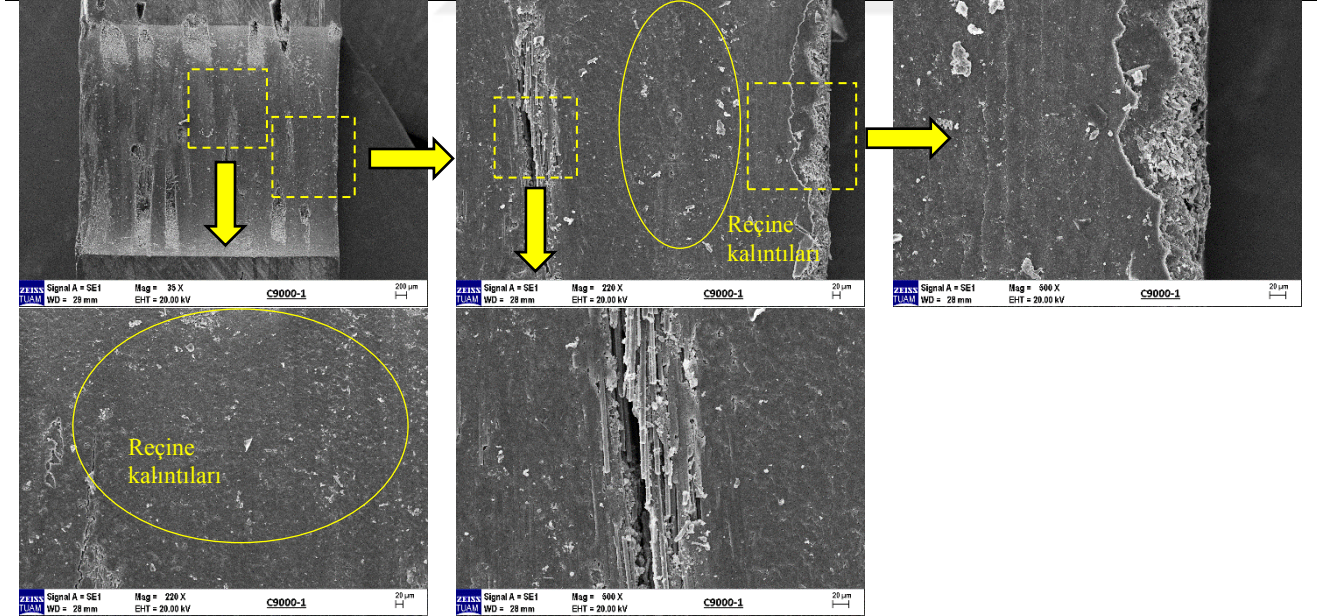
Yapılan deneysel çalışmalarda fener mili hızının artmasıyla daha az hasar oluşumu gözlenmişse de fener milinin daha yüksek hızda dönmesi dolayısıyla talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan tozların oluşturduğu hava sirkülasyonu ve havada asılı kalması sebepleriyle daha fazla toz oluşturduğu ölçüm cihazlarından da görülmektedir. Bununla birlikte kriyojenik koşullarda 9000 dev/dk fener mili hızında yapılan delik delme deneylerinde yüzeyde oluşan reçine kalıntılarının daha yüksek toz miktarlarının ölçülmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, kuru kesme

koşullarında özellikle 9000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında kuru koşulda yapılan deneylerde, kesici takımın yüzeyini kazıyarak talaş kaldırdığı tespit edilmiş olup bu durumun ise büyük boyutlu toz oluşumunu arttırdığı toz ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Kuru kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 9000 dev/dk, f : 250 mm/dk)

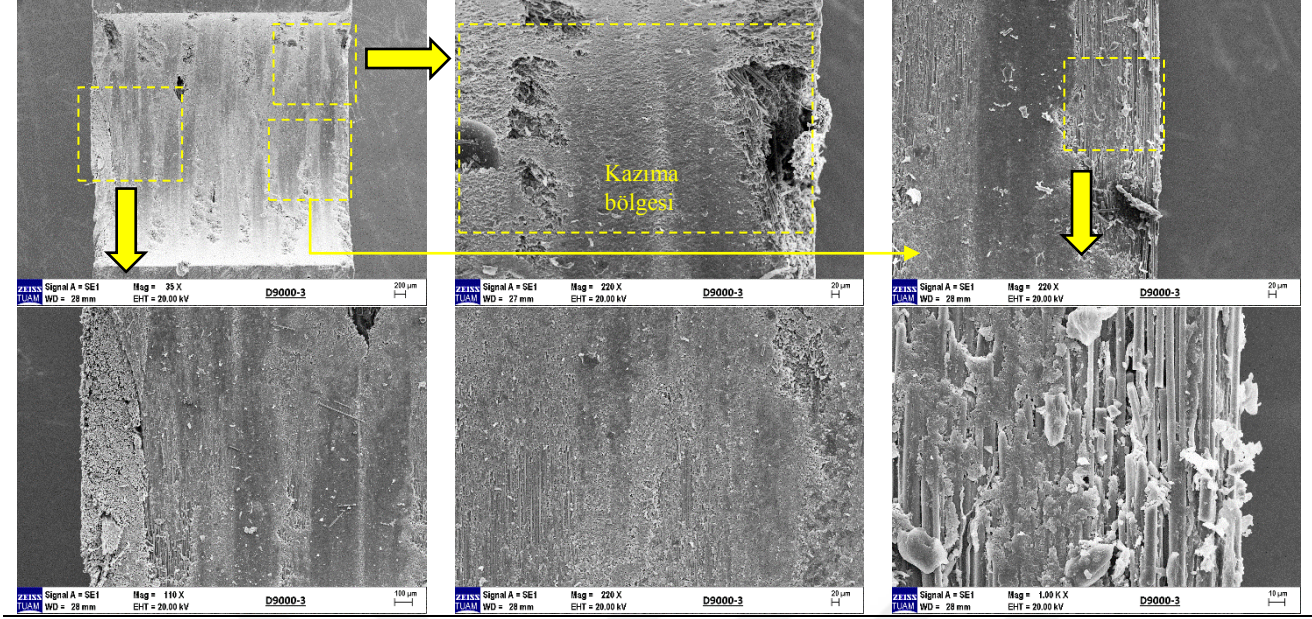


Kriyojenik kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 9000 dev/dk, f : 250 mm/dk)

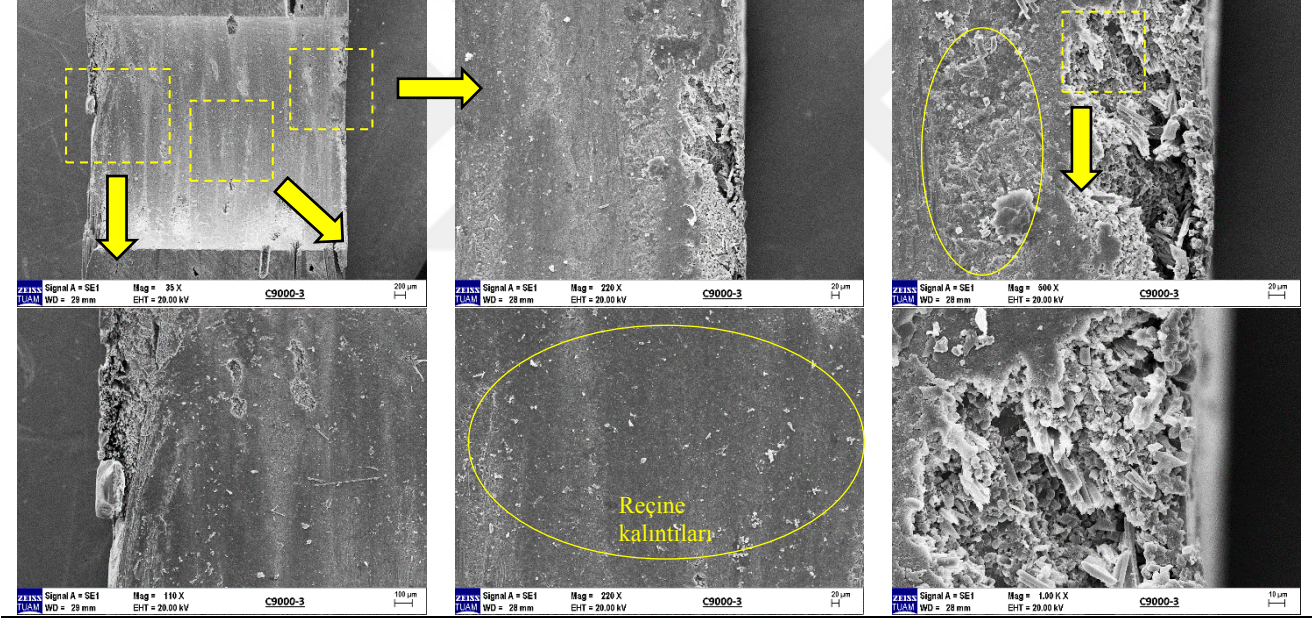


Şekil 4.12 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızı ve 250 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.

Kuru kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 9000 dev/dk, f : 750 mm/dk)



Kriyojenik kesme koşullarında delik içi SEM görüntüleri (N : 9000 dev/dk, f : 750 mm/dk)



Şekil 4.13 : Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızı ve 750 mm/dk ilerleme hızında delik içi SEM görüntüleri.

Kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250 ve 750 mm/dk olmak üzere iki farklı ilerleme hızlarında taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan ölçümler sonucunda yüzey kalitesinin kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında en yüksek seviyede olduğu, kuru kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yüksek yüzey kalitesi için kompozit malzemenin

kriyojenik kesme koşullarında yüksek fener mili hızında ve düşük ilerleme hızında işlenmesi gerekirken, düşük toz oluşumu için ise kompozit malzemenin kriyojenik kesme koşullarında düşük fener mili (kesme) hızında ve yüksek ilerleme hızında işlenmesi gerekmektedir.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki karbon fiber plakanın kuru ve kriyojenik kesme koşullarında 1000 ve 9000 dev/dk olmak üzere iki farklı fener mili hızlarında ve 250, 500 ve 750 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme hızlarında üçer tekrarlı şekilde helisel matkap ile delinmesiyle gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara ilişkin öneriler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- En yüksek itme kuvveti, kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında gerçekleşirken en düşük itme kuvveti ise; kuru kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında gerçekleşmiştir. İtme kuvveti, ilerleme hızının artışıyla artarken fener mili hızının (kesme hızının) artışıyla azalmaktadır.
- Kuru ve kriyojenik ortam koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ilerleme hızı arttıkça toz miktarında pek değişimin olmadığı ancak; 9000 dev/dk fener mili hızında ilerleme hızı arttıkça genel olarak toz miktarında bir artışın olduğu görülmüştür. Ayrıca; 1000 dev/dk fener mili hızında kriyojenik ortam koşullarında oluşan toz miktarının kuru ortam koşullarındaki toz miktarına göre daha az olduğu, fener mili hızının 9000 dev/dk olduğu durumda ise kriyojenik ortam koşullarında oluşan toz miktarının kuru ortam koşullarında oluşan toz miktarından çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut literatürden farklı olarak kriyojenik ortamda da gerçekleştirilen deneysel çalışmalarımız sonucunda kriyojen ilavesinin 1000 dev/dk fener mili hızında toz oluşumunu önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla yapılan deneysel çalışmalardan ve literatür çalışmalarından da görüleceği üzere karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin delinmesi sonucunda toz oluşumunun en düşük seviyelerde olması için malzemenin kriyojenik koşullarda, düşük fener mili hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında işlenmesi gerekmektedir.

- Gerçekleştirilen deneyler sonucunda; OSHA standartları ile kompozit malzemelerin işlenmesi sonucu oluşan tozun insan sağlığı üzerine etkileri üzerine yapılan çalışma sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda kompozit malzemelerin delinmesinde oluşan toz miktarının insan sağlığına zararlı olabileceği aralıklarda da olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenlerle; kompozitlerin işlenmesi sonucunda oluşan tozun insan sağlığına olabilecek etkilerini azaltmak amacıyla kriyojen gibi soğutma sıvılarının kullanılması, sık sık havalandırma işleminin yapılması, yüksek partikül filtreleme özelliğine sahip maskelerin ve gözlüklerin kullanılması ile periyodik olarak iş sağlığı ve güvenliği kontrollerinin yapılması tavsiye edilmektedir.
- Delaminasyon oluşumunun kuru kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında en düşük seviyede olduğu, kriyojenik kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında en yüksek seviyede olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla delaminasyon faktörünün azalması için kompozit malzemenin kuru kesme koşullarında yüksek fener mili hızında ve düşük ilerleme hızında işlenmesi gerekmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğünün kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında en düşük seviyede olduğu, kuru kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla fener mili hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmakta, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Yani malzemenin yüzey kalitesinin artması için kriyojenik koşullarda, yüksek fener mili hızlarında ve düşük ilerleme hızlarında işlenmesi gerekmektedir.
- Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemeler sonucunda yüzey kalitesinin kriyojenik kesme koşullarında 9000 dev/dk fener mili hızında ve 250 mm/dk ilerleme hızında en yüksek seviyede olduğu, kuru kesme koşullarında 1000 dev/dk fener mili hızında ve 750 mm/dk ilerleme hızında en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Dolayısıyla yüksek yüzey kalitesi için kompozit malzemenin kriyojenik kesme koşullarında yüksek fener mili hızında ve düşük ilerleme hızında işlenmesi gerekirken, düşük toz oluşumu için ise kompozit malzemenin kriyojenik kesme koşullarında düşük fener mili (kesme) hızında ve yüksek ilerleme hızında işlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., Nosrati, A. (2019). Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 2289-2308. doi: 10.1007/s00170-019-04348-z
- Agrawal, C., Khanna, N., Pimenov, D. Y., Wojciechowski, S., Giasin, K., Sarıkaya, M., Yıldırım, Ç. V., Jamil M. (2022). Experimental investigation on the effect of dry and multi-jet cryogenic cooling on the machinability and hole accuracy of CFRP composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1772-1783. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.03.096
- Andleeb, Z., Malik, S., Khawaja, H. A., Nordli, A. S., Antonsen, S., Hussain, G., Moatamedi, M. (2021). Thermoelastic investigation of carbon-fiber-reinforced composites using a drop-weight impact test. *Applied Sciences*, 11, 207. doi: 10.3390/app11010207
- Anonim (2017). <http://www.fiberpull.com/uretimteknolojileri.html> [Ziyaret Tarihi: 05.05.2022]
- Arı, A. (2022). Polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Azmi, A. I. (2012). Machinability study of fibre-reinforced polymer matrix composites. *Master's Thesis*, The University of Auckland, New Zealand.
- Baba, A. B. (2013). Delaminasyonlu tabakalı kompozit plakaların burkulma analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Basmacı, G. ve Yörük, A. S. (2020). Karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin kuru ve kriyojenik şartlarda delinebilirliğinin deneysel araştırılması. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 11(2), 164-175. doi: 10.29048/makufebd.745998
- Başar, G., Fedai, Y., Kırılı Akın, H. (2020). Kompozit malzemelerin delme işleminde itme kuvvetinin taguchi metodu ile optimizasyonu ve regresyon analizi ile tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 369-981.
- Batista, M. F., Basso, I., Toti, F. A., Rodrigues, R. A., Tarpani, J. R. (2022). Cryogenic drilling of carbon fibre reinforced thermoplastic and thermoset polymers. *Composite Structures*, 251, 112625. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112625
- Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 120-130. doi: 10.16984/saufenbilder.296833
- Bilge, T., Motorcu, A. R., Ivanov, A. (2017). Kompakt laminat kompozit malzemenin tungsten karbür takımlarla delinmesinde delaminasyon faktörünün

- değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 427-436. doi: 10.5055/pajes.2016.97992
- Boatman, E. S., Covert, D., Kalman, D., Lucht, D., Omenn, G. S. (1988). Physical, morphological, and chemical studies of dusts derived from the machining of composite-epoxy materials. *Environmental Research*, 45, 242-255.
- Boughdiri, I., Giasin, K., Mabrouki, T., Zitoune, R. (2021). Effect of cutting parameters on thrust force, torque, hole quality and dust generation during drilling of GLARE 2B laminates. *Composite Structures*, 261, 113562. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113562
- Costantino, J., Jarbeau, J. J., Hintz, T. J., Hinojosa, M. (2015). Composite material hazard assessment at crash sites. *Air Force Research Laboratory 711th Human Performance Wing School of Aerospace Medicine Occupational and Environmental Health Dept Consultative Services Division*, USA.
- Çoban, H. (2019). Kriyojenik ve kuru kesme şartlarının magnezyum alaşımının delinmesine etkisinin deneysel incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman.
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., Kılıçkap, E. (2019). Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrasiv aşınmaya etkisi. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 811-817. doi: 10.2339/politeknik.429642
- Deniz, M. E., Altın, M. B. (2021). Bal peteği ve beton çekirdek malzemesine sahip cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit tüplerinin bası davranışı. *DEUFMD*, 23(67), 195-206. doi: 10.21205/deufmd.2021236717
- Denkena, B., Dittrich, M. A., Rahner, B. H. (2017). Smart and energy-efficient dust suction concept for milling of fibre-reinforced plastics. *Production Engineering*, 11, 723-729. doi: 10.1007/s11740-017-0776-x
- Durgam, S., Perio, M. A. (2010). Evaluation of potential exposures during composite grinding at an aircraft manufacturing plant. *Health Hazard Evaluation Report-HETA 2007-0344-3104*, Cessna Aircraft Company, Wichita, Kansas.
- Ercan, I. (2020). Ph13-8Mo paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Genç, A. (2019). Karbon elyaf ve karbon nanotüp katkılı poliamid 6 polimer kompozit malzemesinin işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Goh, G. D., Dikshit, V., Nagalingam, P., Goh, G. L., Agarwala, S., Sing, S. L., Weic, J., Yeong, W. Y. (2018). Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Materials & Design*, 137, 79-89. doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.021
- Gülmez, S. (2018). Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Güneş, D. (2010). Al matrisli SiCp takviyeli kompozit ile Ç1030 çeliğinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.

- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., Castanie, B., Bougherara, H. (2012). Surface quality and dust analysis in high speed trimming of CFRP. *Applied Mechanics and Materials*, 232, 57-62. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.232.57
- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F., Castanie, B. (2014). Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites: Part A*, 66, 142-154. doi: 10.1016/j.compositesa.2014.07.005
- Işık, A. (2008). Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Iyer, A. K. (2015). Characterization of composite dust generated during milling of uni-directional and random fiber composites. *Master's Thesis*, University of Washington, USA.
- Kaplan, Y. (2010). Delik delmede farklı parametrelerin kesme kuvveti, moment, titreşim, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkileri. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Kara, A. (2020). Karşıt ekstrüzyon işleminin Al esaslı seramik takviyeli kompozitlerde mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Karabağ, S. (2011). Rüzgar türbini kanadı imalatı. *İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi*, 1-17, İzmir.
- Kaya, D., Subaşı, S., Subaşı, A. (2015). Elyaf sarma tekniği ile üretilen kompozit borularda reçine ve cam elyaf türünün iç basınç dayanımına etkisi. *Akademik Platform*, 2384-2393.
- Khanna, N., Pusavec, F., Agrawal, C., Krolczyk, G. M. (2020). Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility. *Measurement*, 154, 107504. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107504
- Kılıçkap, E. (2010). Cetp kompozitlerin delinmesinde oluşan deformasyona delme parametrelerinin etkisinin incelenmesi, 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, 76-84, Diyarbakır.
- Köklü, U. ve Kayhanlar, H. (2022). An experimental investigation on machinability of az31b magnesium alloy under dry and dipped cryogenic approaches. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(2), 1285-1296. doi: 10.1007/s11665-021-06264-4
- Köklü, U. ve Morkavuk, S. (2018). Cryogenic drilling of carbon fiber-reinforced composite (Cfrp). *Surface Review and Letters*, 26(9). doi: 10.1142/S0218625X195000604
- Köklü, U., Morkavuk, S., Featherston, C., Haddad, M., Sanders, D., Aamir, M., Pimenov, D. Y., Giasin, K. (2021). The effect of cryogenic machining of S2 glass fibre composite on the hole form and dimensional tolerances. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 125-140. doi: 10.1007/s00170-021-07150-y
- Köklü, U., Morkavuk, S. ve Urtekin, L. (2022). Effects of the drill flute number on drilling of a casted AZ91 magnesium alloy. *Metarials Testing*, 61(3), 260-266.

doi: 10.3139/120.111315

- Kumdere, M. (2020). Tabakalı prepreg kompozitlerde karbon nanotüp takviyesi ile mekanik özelliklerinin optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya.
- Kuş, A. ve Ekici, E. (2017). Sandviç kompozitlerin delinmesinde delaminasyon faktörünün incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 22(3), 153-162. doi: 10.17482/uumfd.372451
- Landuyt, K. L. V., Yoshihara, K., Geebelen, B., Peumans, M., Godderis, L., Hoet, P., Meerbeek, B. V. (2012). Should we be concerned about composite (nano-)dust? *Dental Materials*, 28, 1162-1170. doi: 10.1016/j.dental.2012.08.011
- Mazumdar, S. K. (2001). Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. *PhD Thesis*, University of Washington, USA.
- Miller, J. L. (2014). Investigation of machinability and dust emissions in edge trimmimng of laminated carbon fiber composites. *PhD Thesis*, University of Washington, USA.
- Morkavuk, S. (2016). Karbon fiber takviyeli plastiklerin kuru ve kriyojenik işleme koşullarında frezelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Mura, H. M. ve Dini, G. (2021). Drilling carbon fiber reinforced plastics with pre-cooling treatment by cryogenic fluid. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 23-31. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.05.030
- Nagaraj, A., Uysal, A., Jawahir, I. S. (2020). An investigation of process performance when drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite under dry, cryogenic and MQL environments. *Procedia Manufacturing*, 43, 551-558. doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.165
- Nguyen-Dinh, N., Hejjaji, A., Zitoune, R., Bouvet, C., Salem, M. (2020). New tool for reduction of harmful particulate dispersion and to improve machining quality when trimming carbon/epoxy composites. *Composites Part A*, 131, 10580-105806. doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105806
- Nik Baihaqi, N. M. Z., Khalina, A., Nurazzi, N. M., Aisyah, H. A., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A. (2021). Effect of fiber content and their hybridization on bending and torsional strenght of hybrid epoxy composites reinforced with carbon and sugar palm fibers. *Polimery*, 66, 36-43. doi: 10.14314/polimery.2021.1.5
- Ramulu, M., Kramlich, J. (2003). Machining of fiber reinforced composites: review of environmental and health effects. *International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing*, 11(4).
- Özdemir, B. (2020). Polimer matrisli kompozit malzeme imalatı için vakum destekli mekanizmaların geliştirilmesi ve performanslarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özen, F. (2015). Polimer matriksli kompozit malzemelerde farklı fiber takviye fazlarının işlenebilirliğe etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Özkaya, F., Özen, F., İlhan, E., Aslanlar, S. (2019). Cam küre takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin delaminasyon faktörünün deneysel olarak incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 843-849.

doi: 10.35414/akufemubid.543476

- Sarıkaya, E. (2019). Doğal fiber takviyeli kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti. *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Seibert, J. F. (1990). Composite fiber hazards. *For Health Environment*. 1-23.
- Shokrani, A., Leafe, H., Newman, S. T. (2019). Cryogenic drilling of carbon fibre reinforced plastic with tool consideration. *Procedia CIRP*, 85, 55-60. doi: 10.1016/j.procir.2019.10.008
- Shrivastava, R., Singh, K. K. (2020). Interlaminar fracture toughness characterization of laminates composites: A review. *Polymer Reviews*, 60, 542-593. doi: 10.1080/15583724.2019.1677708
- Şahin, Y. (2006). Kompozit malzemelere giriş. *Seçkin Yayıncılık*, 27-56, Ankara.
- Şahin, M. (2008). Burkulmaya maruz tabakalı kompozit plakların deneysel ve nümerik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Şimşir, E. (2020). Taşıtlarda kullanılan polimer matrisli kompozit yan darbe kırımlarının tasarımı ve analizleri. *Doktora Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Termek, H. (2021). Nano katkılı biyokompozitlerin otomotiv malzemelerinde kullanılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Thamos, J. J., Selvakumar, P., Paramasivan, S., Ramkumar, P., Yuvararasimman, P. (2022). Investigation on hole parameters of carbon fibre reinforced plastic composite boring by dry and cryogenic environment. *Materialstoday: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.898
- Uçak, N. ve Çiçek, A. (2017). Talaşlı imalat süreçlerinde kriyojenik soğutma uygulamaları üzerine bir araştırma. *2017 Published in 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017, Azerbaijan*.
- Ünal, A. R. (2013). Geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerin otomotiv endüstrisinde uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Wagman, J., Berger, H. R., Miller, J. L., Conner, W. D. (1982). Dusts and residues from machining and incinerating graphite/epoxy composites: A preliminary study. *Environmental Technology*, 3, 469-478. doi: 10.1080/09593338209384151
- Xia, T. (2014). Investigation of drilling performance in cryogenic drilling on CFRP composite laminates. *Master's Thesis*, University of Kentucky, Lexington.
- Yağmur, S., Acır, A., Şeker, U., Günay, M. (2013). Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin kesme bölgesindeki sıcaklığa etkisinin deneysel incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(1), 1-6.
- Yamamoto, G., Onodera, M., Koizumia, K., Watanabe, J., Okuda, H., Tanaka, F., Okabe, T. (2019). Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 499-509. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.04.011

- Yan, Y., Sun, Y., Li, B., Zhou, P. (2022). An experimental study of PMMA precision cryogenic micro-milling. *Biomaterials and Polymers Horizon*, 1(1), 15-21. doi: 10.37819/bph.001.01.0123
- Yozgat, U. (2019). Bazalt elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışlarının düşük iç basınç altında incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Zhang, Z., Wang, X., Lin, L., Xing, S., Wu, Y., Li, Y., Wu, L., Gang, B. (2001). The effects of carbon fibre and carbon fibre composite dusts on bronchoalveolar lavage component of rats. *Journal of Occupational Health*, 43, 75-79.
- Zindani, D. ve Kumar, K. (2020). A brief review on cryogenics in machining process. *SN Applied Sciences*, 2, 1107. doi: 10.1007/s42452-020-2899-5
- Zhao, X., Wang, X., Wu, Z., Keller, T., Vassilopoulos, A. P. (2018). Effect of stress ratios on tension–tension fatigue behavior and micro-damage evolution of basalt fiber-reinforced epoxy polymer composites. *Journal of Materials Science*, 53, 9545-9556. doi: 10.1007/s10853-018-2260-1
- Zor, M. (2016). http://kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf [Ziyaret Tarihi: 01.06.2022]