



**KARBON FİBER TAKVİYELİ HAVACILIK
KOMPOZİTLERİNİN DELME
PROSESLERİNDE NANOGRAFEN KATKILI
MMY SOĞUTMA METDODUNUN DELİK
KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mustafa Burak SAĞENER

Eskişehir 2023

**KARBON FİBER TAKVİYELİ HAVACILIK KOMPOZİTLERİNİN DELME
PROSESLERİNDE NANOGRAFEN KATKILI MMY SOĞUTMA
METDODUNUN DELİK KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa Burak SAĞENER

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2023

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mustafa Burak SAĞENER'in KARBON FİBER TAKVİYELİ HAVACILIK KOMPOZİTLERİNİN DELME PROSESLERİNDE NANOĞRAFEN KATKILI MMY SOĞUTMA METDODUNUN DELİK KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı çalışması 31/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Makine Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Üye

: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Üye

: Doç Dr. İrfan KAYA

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Mustafa Burak SAğENER, KARBON FİBER TAKVİYELİ HAVACILIK KOMPOZİTLERİNİN DELME PROSESLERİNDE NANO GRAFEN KATKILI MMY SOğUTMA METDODUNUN DELİK KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

ÖZET

KARBON FİBER TAKVİYELİ HAVACILIK KOMPOZİTLERİNİN DELME PROSESLERİNDE NANOGRAFEN KATKILI MMY SOĞUTMA METDODUNUN DELİK KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mustafa Burak SAĞENER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2023

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (KFTP), olağanüstü fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan gelişmiş malzemelerdir. Önemli işleme süreçlerinden biri özellikle bileşenlerin yüksek kalitesinin ve yüzey bütünlüğünün gerekli olduğu havacılık sektöründe delmedir. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) soğutma, kesme sıvılarının kullanımını optimize eden yenilikçi bir işleme tekniğidir. Bu tez çalışmasında havacılık KFTP kompozit plakaların delinmesi prosesinde nanografen katkılı MMY soğutma metodunun delik kalitesi üzerinde etkileri incelenmiştir. Deneyler 3 farklı ilerleme ve 2 farklı grafen nanoplatelet katkısı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deney sonunda yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve çap ölçümü yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda %0,5 grafen nanoplatelet (GNP) katkılı kesme sıvısı ile 0,05 mm/dev ilerleme kullanılarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon bakımından en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Karbon fiber kompozit, Minimum miktarda yağlama, Grafen, Delaminasyon

ABSTRACT

EXAMINATION OF THE EFFECTS OF NANOGRAFENE-ENHANCED MMY COOLING METHOD ON HOLE QUALITY IN DRILLING PROCESSES OF CARBON FIBER REINFORCED AVIATION COMPOSITES

Mustafa Burak SAĞENER

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2023

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Carbon Fiber Reinforced Polymers (KFTP) are advanced materials widely used in various applications such as aerospace and automotive industries due to their outstanding physical and mechanical properties. One of the important machining processes is drilling, especially in the aerospace industry where high quality and surface integrity of components is required. Minimum Quantity Lubrication (MMY) cooling is an innovative machining technique that optimizes the use of cutting fluids. In this thesis study, the effects of nanographene-added MMY cooling method on hole quality in the drilling process of aviation KFTP composite plates were examined. Experiments were carried out using 3 different advances and 2 different graphene nanoplatelet additives, and surface roughness, delamination and diameter were measured at the end of the experiment. As a result of the experiments, the best results in terms of surface roughness and delamination were obtained in the experiments using 0.05 mm/rev feed with 0.5% graphene nanoplatelet (GNP) added cutting fluid.

Keywords: Carbon Fiber Composite, Minimum Quantity Lubrication, Graphene, Delamination

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecim boyunca ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın deneysel aşamasında alt yapı imkanlarından faydalanmama imkân veren Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme Bölümünden Sn. Prof. Dr. Nuran Ay' a ve Isparta Süleyman Demirel Üniversitesinde YETEM Merkezi Müdürü Doç Dr. Kadir KIRAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmada kullanılan malzeme desteklerinden dolayı TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay A.Ş, Blaser Swisslube ve Secotools firmalarına teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her aşamasından benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim

Mustafa Burak SAĞENER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Mustafa Burak SAĞENER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	3
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.3 Fiber Takviyeli Kompozitler	6
2.3.1 Farklı elyafların özellikleri	7
2.4 Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler	9
2.4.1 Karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri.....	9
2.4.1.1. El ile yatırma (serme) yöntemi	10
2.4.1.2 Reçine transfer kalıplama yöntemi	10
2.4.1.3 Profil çekme yöntemi	11
2.4.1.4 Elyaf sarma yöntemi.....	12
2.4.1.5 Otoklav yöntemi	14
2.4.1.6 Vakum kalıplama yöntemi.....	15
2.4.2 Karbon fiber takviyeli kompozitlerin işlenebilirliği.....	16

2.4.3. Karbon Fiber Takviyeli Polimer (KFTP) Kompozitlerin Delinebilirliği	17
2.5 Minimum Miktarda Yağlama (MMY).....	19
2.5.1 MMY sistem türleri.....	21
2.5.1.1. <i>Dâhili Minimum Miktarda Yağlama Sistemi</i>	21
2.5.1.2 <i>Harici minimum miktarda yağlama sistemi</i>	23
2.5.2 Nanoakışkanlar ve özellikleri	24
2.5.2.1 <i>Nanoakışkanların hazırlanması</i>	26
3. LİTERATÜR TARAMASI	28
3.1. Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Delinebilirliği Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	28
3.2 Farklı Soğutma Koşullarında KFTP'lerin Delinebilirliği Üzerine Yapılan Çalışmalar	35
4. MATERYAL VE METOT.....	41
4.1. İş Parçası ve Özellikleri	41
4.2 Kesici Takım ve Takım Tutucu	41
4.3 Kullanılan CNC Tezgâh ve Özellikleri.....	42
4.4 Deneylerde Kullanılan Minimum Miktarda Yağlama Sistemi.....	42
4.5 Deneylerde Kullanılan Nanoakışkanların Hazırlanması	44
4.6 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı	45
4.7 Delaminasyon Ölçümleri	46
4.8 Çap Ölçümleri	46
4.9 Deney parametreleri	47
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
5.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	50
5.1.1 Taguchi L9 deneyleri için S/N oranları	51
5.1.2 Varyans Analizi (ANOVA)	53
5.2 Delaminasyon Ölçümleri	53
5.3 Çap Ölçümleri	60
5.5 Tartışma ve Öneriler.....	60
KAYNAKÇA.....	62

ÖZGEÇMİŞ



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. İş parçasının özellikleri	41
Tablo 4.2. Kesici takımın özellikleri	42
Tablo 4.3. Blaser CSF 35 kesme sıvısı özellikleri	44
Tablo 4.4. Nanografen özellikleri	45
Tablo 4.5. Deney girdi parametreleri	47
Tablo 4.6. Farklı çalışmalarda kullanılan deney girdi parametreleri	48
Tablo 4.7. Deney tasarımı	48
Tablo 5.1. Deney sonuçlar ve S/N oranları	52
Tablo 5.2. Yüzey pürüzlülüğü S/N yanıt tablosu	52
Tablo 5.3. Yüzey pürüzlülüğü deneyleri ANOVA sonuçları	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Boeing 787 uçağının üretiminde kullanılan malzemeler ve oranları [3].....	3
Şekil 2.2. Çeşitli malzemelerin ve kompozitlerin özellikleri [1]	4
Şekil 2.3. Matris türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.4. Takviye türüne göre kompozit malzemeler.....	6
Şekil 2.5. Kompozit üretim tekniklerinin sınıflandırılması [6]	9
Şekil 2.6. El ile yatırma yöntemi [3]	10
Şekil 2.7. Reçine transfer kalıplama yöntemi [3]	11
Şekil 2.8. Profil çekme yöntemi şematik gösterimi [3]	12
Şekil 2.9. Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi [3]	13
Şekil 2.10. Çevresel sarma yöntemi [3].....	14
Şekil 2.11. Helisel sarma yöntemi [3]	14
Şekil 2.12. Polar sarma yöntemi [3]	14
Şekil 2.13. Son zamanlarda kullanılan otoklav makineleri [7].....	15
Şekil 2.14. Otoklav yönteminin şematik gösterimi [3].....	15
Şekil 2.15. Vakum kalıplama yöntemi [3].....	16
Şekil 2.16. Kompozit plakada delik hataları [9]	18
Şekil 2.17. Dahili MMY sisteminin şematik gösterimi [12]	22
Şekil 2.18. Tek kanallı ve çift kanallı dahili MMY sistemi [12].....	23
Şekil 2.19. Harici MMY sistemi [12]	23
Şekil 2.20. İki adımlı hazırlama metodu [12]	27
Şekil 4.1. Seco Tools sitesinden alınmış ilerleme ve hız değerleri [54].....	48
Şekil 5.1. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü grafiği	50
Şekil 5.2. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N değerleri.....	53
Şekil 5.3. Kompozit malzemelerin delinmesi esnasında oluşan giriş ve çıkış delaminasyonları	54
Şekil 5.4. Delaminasyon faktörünün belirlenmesi.....	55
Şekil 5.5. Delaminasyon faktörü değişimi.....	59
Şekil 5.6. Çap ölçümleri	60

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 4.1. Deneylerde kullanılan kesici takım	42
Görsel 4.2. Kullanılan MMY sistemi	43
Görsel 4.3. Manometre.....	43
Görsel 4.4. Nozul	43
Görsel 4.5. Rezervuar.....	44
Görsel 4.6. Nanoakışkanların hazırlanması için kullanılan manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo	45
Görsel 4.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	46
Görsel 4.8. Deneylerde kullanılan optik mikroskop	46
Görsel 4.9. Deneylerde kullanılan mikrometre	47
Görsel 5.1. %0,5 NGP+MMY ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında a) giriş ve b) çıkış delaminasyonları	55
Görsel 5.2. %0,5 NGP+MMY ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında a) giriş ve b) çıkış delaminasyonları	56
Görsel 5.3. %0,5 NGP+MMY ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	56
Görsel 5.4. % 1 NGP+MMY ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	57
Görsel 5.5. % 1 NGP+MMY ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	57
Görsel 5.6. % 1 NGP+MMY ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	57
Görsel 5.7. % 0 NGP+MMY ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	58
Görsel 5.8. % 0 NGP+MMY ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	58
Görsel 5.9. % 0 NGP+MMY ve 0,8 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AFTP	: Aramid Fiber Takviyeli Polimer
CFTP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
KFTP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
KFTP	: Kenevir Fiber Takviyeli Polimer
MMY	: Minimum Miktarda Yağlama
SMK	: Seramik Matris Kompozit
GNP	: Grafen Nanoplatelet



1. GİRİŞ

Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (KFTP'ler), takviye olarak karbon elyafı içeren ve tipik olarak epoksi gibi bir polimer reçine içeren bir kompozit malzeme kategorisine aittir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, hasar toleransı ve yorulma ve korozyona karşı mükemmel direnci dahil olmak üzere KFTP'lerin istisnai nitelikleri, onu havacılık, inşaat, ulaşım ve tıp gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Örnek olarak Boeing 787 Dreamliner ticari uçağının ağırlığının yaklaşık yarısı kompozitlerden oluşmaktadır. KFTP'lerin en önemli faydalarından biri, matris ve takviyenin uygun bir kombinasyonunu seçerek istenen belirli özellikleri elde etme kabiliyetinde yatmaktadır ve bu da onu çok çeşitli uygulamalar için uygun çok yönlü bir malzeme haline getirmektedir [54].

Kompozit malzemeler genellikle net şekle yakın olarak üretilse de ikincil işleme süreçleri, özellikle delme, genellikle KFTP'lerden yapılmış ürünler veya bileşenler üzerinde gerçekleştirilir. Bununla birlikte, KFTP'lerin işlenmesi, homojen olmayan yapıları nedeniyle metallere veya alaşımlara kıyasla birtakım zorluklar sunar. Talaşlı imalat sürecinde matris ve takviye arasındaki etkileşimler, malzemelerin iki fazının sergilediği farklı mekanik ve termal özellikler nedeniyle metallerde gözlemlenenlerden farklıdır [54].

Geleneksel olarak, kompozitlerin delinmesi herhangi bir soğutma sıvısı olmadan kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar delme işlemi sırasında soğutma sıvısı kullanarak olumlu sonuçlar bildirmişlerdir [54]. Ancak geleneksel soğutma yöntemleri kompozitlerin yapısı nedeniyle kullanıma uygun değildir. Bu noktada araştırmacılar farklı soğutma metotlarına yönelmiştir [53]. Bu metotlardan biri Minimum Miktarda Yağlama (MMY) olarak adlandırılır. Bu yöntem kesme bölgesine yüksek basınçlı hava ile çok küçük miktarlarda kesme sıvısı gönderilerek gerçekleştirilir. Gönderilen sıvının miktarı 50-150 ml/saat olarak değişiklik gösterir. Araştırmacılar son zamanlarda bu yöntem üzerinde sıklıkla durmuşlardır [53]. Özellikle bu yöntemde kullanılan kesme sıvılarına nanoakışkanlar eklenerek kesme sıvısının soğutma özelliklerinin geliştirilmesi son zamanlarda araştırmacıların en çok ilgilendiği konulardan biri haline gelmiştir [50-52].

Bu tezin amacı nanografen katkılı minimum miktarda yağlama yönteminin KFTP plakaların delme işlemi üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Hipotez, MMY soğutma yoluyla kesme sıcaklığının düşürülmesiyle açılan deliklerin kalitesinin

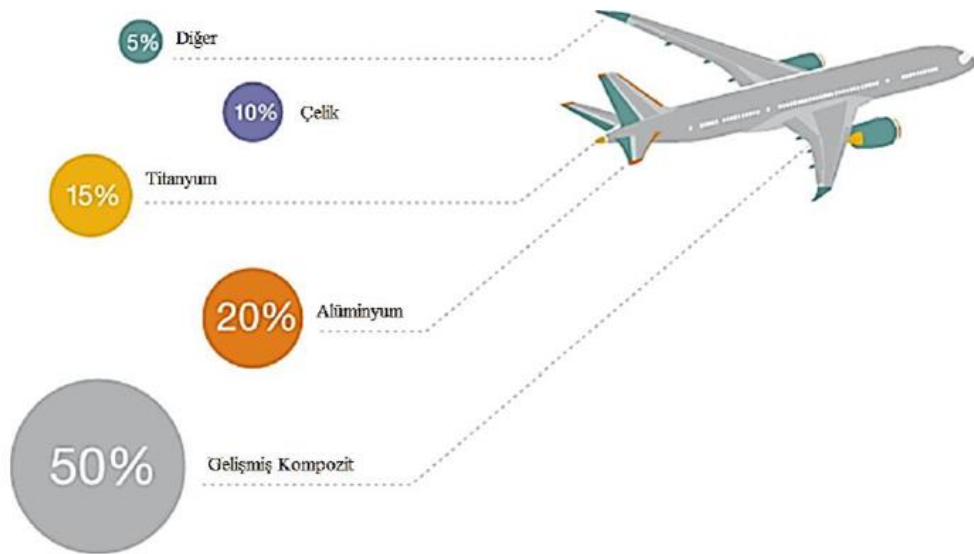
iyileştirilebileceğidir. Bu çalışmada delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü ve yuvarlaklık hatası gibi delme performansının çeşitli yönleri, farklı kesme parametreleri ve farklı nanografen katkı oranları kullanılarak incelenmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

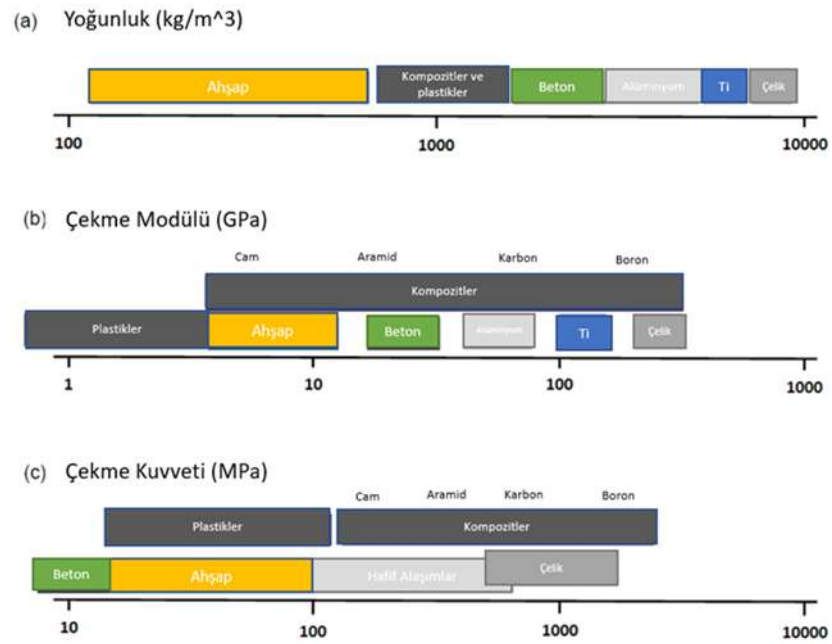
2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler zamanın başlangıcından beri var olmuştur. Bitkiler ve hayvanlar gibi birçok nesne lifli kompozit sistemlerdir. Günümüzde kullanılan kompozitlerin sunduğu tasarım esnekliği dolayısıyla, tek, basit ve kullanışlı bir tanım yapmak zordur. Bununla birlikte yaygın tanım olarak, kompozit malzemeler, biri sert, uzun takviyeden (lifler) ve diğeri takviyeyi yerinde tutan bir bağlayıcı veya matristen oluşan iki veya daha fazla bileşenin bir karışımı olarak nitelendirilebilir. Lifler, matrise göre güçlü, sert ve genellikle ortotropiktir (iki farklı yönde farklı özelliklere sahiptir). Matris takviyeyi bir arada tutmanın yanında aynı zamanda kompozitin şeklini belirler. Sonuç olarak ortaya çıkan kompozit malzeme, tek başına her iki bileşen malzemesinden de üstün olan yapısal özelliklere sahiptir. Kompozit malzemeler özellikler havacılık, otomotiv, spor ekipmanları ve sağlık gibi sektörlerde sıklıkla tercih edilir. Bunun en büyük nedenlerinden biri kompozitlerin sağladığı ağırlık azalması ve dayanım/ağırlık oranıdır. Örneğin 1980’lerde üretilen Boeing 767’nin %5’i kompozitlerden oluşurken 2007 yılından beri üretilen Boeing 787 Dreamliner ağırlıkça %50 kompozitlerden oluşmaktadır (Şekil 2.1). Benzer bir şekilde karbon fiber takviyeli kompozitler yeni Airbus A380’nin yapısal ağırlığının yaklaşık % 25’ini oluşturmaktadır. bu da yakıt tüketiminde %12’ye varan azalmaya neden olmuştur. Geleneksel malzemelerin ve kompozit malzemelerin özellikleri arasındaki karşılaştırma Şekil 2.2’ de verilmiştir [1, 2].



Şekil 2.1. Boeing 787 uçağının üretiminde kullanılan malzemeler ve oranları [3]

Düşük ağırlığa sahip olmasının yanında kompozit malzemeler yüksek özgül mukavemet, düşük ısıl genleşme katsayısına, yüksek titreşim sönümleme özelliğine, tasarım esnekliğine ve net şekle yakın üretilebilmeleri gibi özelliklere sahiptirler. Kompozitlerin geleneksel malzemelere göre avantajları açık olsa da sınırlamaları göz ardı edilmemelidir. Nispeten yeni malzemeler olduklarından, mevcut ve yeni tasarımlara hızla dahil edilmelerini sınırlayan belirgin bir bilgi ve deneyim eksikliği vardır. Malzemelerin yüksek maliyeti ve imalatlarındaki karmaşıklıklar mevcuttur [1].



Şekil 2.2. Çeşitli malzemelerin ve kompozitlerin özellikleri [1]

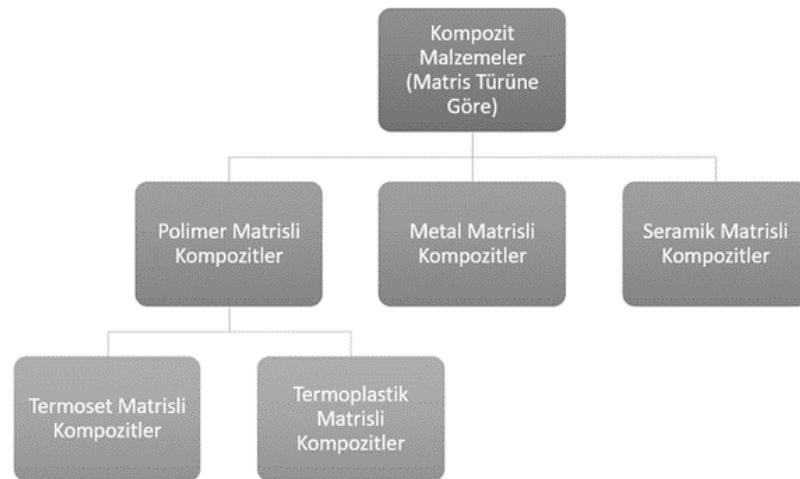
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler genellikle iki farklı seviyede sınıflandırılır. İlk sınıflandırma seviyesi genellikle matris bileşenine göre yapılır (bkz. Şekil 2.3). Başlıca kompozit sınıfları, polimer matrisli kompozitler (PMK'ler), metal matrisli kompozitler (MMK'ler) ve seramik matrisli kompozitlerden (SMK'ler) oluşur. Organik matrisli kompozitler kendi aralarında polimer matrisli kompozitler ve karbon matrisli kompozitler (yaygın olarak karbon-karbon kompozitleri olarak anılır) olmak üzere ikiye ayrılır. Karbon matrisli kompozitler genellikle polimer matrisli kompozitlerin karbonize edilmesi ve yoğunlaştırılması ile meydana gelir. Bu sistemlerin her birinde matris tipik olarak bileşen boyunca sürekli bir faz olarak bulunur [1].

Metal Matrisli Kompozitler: metal matrisli kompozitler (kısaca MMK) yüksek mukavemet, özgül modül, termal kararlılık, iyi süneklik ve tokluk değerlerine sahiptirler ve tipik olarak orta çalışma sıcaklığı uygulamaları için kullanılırlar. Al-6061-T6 (%51 B, sürekli lifler) ve Al 2124-T6 (%20 SiC, parçacık takviyesi) bu durumlara uygun örnekler olarak gösterilebilir. MMK'ların faydaları arasında organik sıvılar tarafında bozulmaya karşı direnç ve yanmazlık yer alır fakat polimer matrisli kompozitlere nazaran daha ağırlardır. Örnek verecek olursak %30 SiC ile güçlendirilmiş bir Al MMK'tin yoğunluğu karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin yoğunluğuna kıyasla %81 daha fazladır. Ayrıca korozyona eğilimlidirler [1].

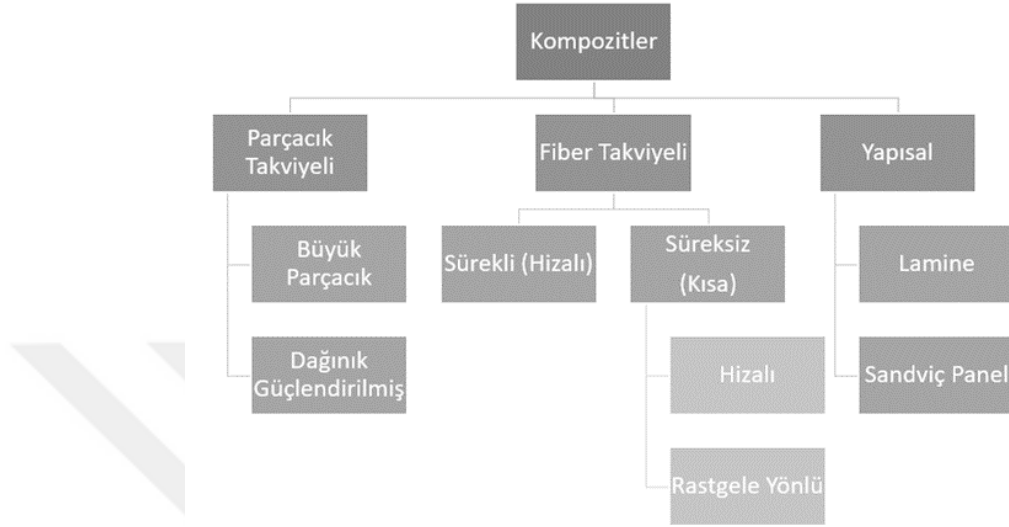
Seramik Matrisli Kompozitler: Seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda metallerden daha iyi mekanik özellikler gösterirler. Bu yüzden 2000 °C 'ye kadar kullanılabilirler fakat seramikler oluşurken güçlü iyonik ve kovalent bağlar kurduğu için doğal bir gevrekliğe sahiptir. Bu da kullanım alanını kısıtlanırdır. SMK'ların SiC veya C ile takviye edilmesi gevrekliklerini ve kırılma tokluğunu önemli ölçüde iyileştirebilir. SMK'lara örnek olarak Si₃N₄ ve Al₂O₃ verilebilir [1].

Polimer Matrisli Kompozitler: Polimer matrisli kompozitler en yaygın kullanılan kompozit türüdür. Matris olarak hem termoset polimerler hem de termoplastik polimerler kullanılabilir. Epoksi ve polyester en çok kullanılan matris çeşitleridir. Polimer matrisli kompozitler havacılık, uçak, otomotiv, denizcilik ve spor gibi birçok alanda sıklıkla kullanılır [1].



Şekil 2.3. Matris türüne göre kompozitlerin sınıflandırılması

İkinci sınıflandırma seviyesi, takviye biçimine göre yapılı ve partikül takviyeli, fiber takviyeli veya yapısal olarak takviyeli kompozit malzemeler olarak adlandırılır (bkz. Şekil 2.4)



Şekil 2.4. Takviye türüne göre kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler, parçacık boyutu ve matris içindeki parçacıkların dağılımı ile tanımlanır. Elyaf takviyeli kompozitler, elyafın sürekliliğine ve elyafın matris içinde nasıl yönlendirildiğine göre gruplandırılır. Elyaf takviyeli kompozitler ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak ele alınacaktır. Yapısal olarak güçlendirilmiş bir kompozit, ya farklı özelliklere sahip çoklu tabakalara sahip bir lamine ya da bir sandviç yapıdır. Bir sandviç yapı, bir bal peteği, köpük veya başka bir çekirdeği sıkıştıran, lamine olabilen iki ön tabakaya sahiptir. Parçacık takviyeli ve elyaf takviyeli kompozitler, bir lamine veya sandviç kompozitte tabakaları oluşturabilir [1, 2].

2.3 Fiber Takviyeli Kompozitler

Elyaf ya da fiber takviyeli kompozit malzemeler, aralarında belirgin arayüzler (sınırlar) bulunan bir matrise gömülü veya bir matrise bağlanmış yüksek mukavemetli ve modüllü elyaflardan oluşur. Genel olarak, elyaflar ana yük taşıyıcı elemanlardır, elyafları çevreleyen matris ise onları istenen konum ve yönelimde tutar, aralarında bir yük aktarım ortamı görevi görür ve elyafları çevresel zararlardan korur. Elyaf matris içinde tek yönlü (UD) veya dokuma kumaşlar şeklinde bulunabilir. Tek yönlü terimi tek bir yönde düzenlenmiş malzemeyi ifade ederken dokuma yapılar dikey olarak kesişen elyafları ifade eder [1].

Karbon, cam ve aramid (kevlar) ticari kullanımında en sık karşılaşılan elyaf türleridir. Bunun dışında bor, silisyum karbür ve alüminyum oksit gibi diğer lifler sınırlı miktarlarda kullanılmaktadır. Elyaf takviyesinin türünü belirtmek için FTP kelimesinin önüne K, C ve A harfleri konulur. Örneğin, KFTP, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer 'in kısaltmasıdır, CFTP ve AFTP sırasıyla Cam ve Aramid Elyaf Takviyeli Polimer 'in kısaltmalarıdır. Tüm bu lifler, sürekli uzunluklarda veya süreksiz (kısa) uzunluklarda bir matrise dahil edilebilir. Matris malzemesi bir polimer, bir metal veya bir seramik olabilir. Her matris kategorisinde çeşitli kimyasal bileşimler ve mikroyapısal düzenlemeler mümkündür [1].

2.3.1 Farklı elyafların özellikleri

Elyaf lar genellikle sıvı malzemenin çekilmesi veya bir öncünün (lif malzemesinin başlangıç/ham hali) bir delikten çekilmesiyle üretilir. Genellikle 3.000 ila 30.000 arasında sürekli elyaf filamanlarından oluşan kırıklar(tows) şeklinde tedarik edilirler. Endüstride en sık kullanılan üç elyaf çeşidi aşağıda incelenmiştir.

a. Cam Elyaf

Cam elyafları yüksek gerilme mukavemeti, düşük yoğunluğu, yüksek yangın direnci, iyi yalıtım özellikleri ve düşük maliyetlerinden dolayı en çok kullanılan elyaflardandır. Dezavantajları, nispeten düşük çekme modülü, kullanım sırasında aşınmaya karşı hassasiyet, nispeten düşük yorulma direnci ve yüksek sertliktir. Cam elyaf kompozitler, yüksek aşınma ve korozyon direnci nedeniyle kimya endüstrisinde ve denizcilik uygulamalarında boru tesisatı için kullanılmaktadır. Ne yazık ki, cam elyaflar oldukça aşındırıcıdır ve CFTP kompozitlerin işlenebilirliğini olumsuz etkiler.

E-Glass ve S-Glass endüstride en yaygın olarak kullanılan cam fiberleridir. S-Glass orijinal olarak uçak bileşenleri ve füze kovanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir ve tüm elyaflar arasında en yüksek gerilme mukavemetine sahiptir. Ancak bileşim farkı ve daha yüksek üretim maliyeti yüzünden endüstride E-Glass daha çok tercih edilir. S-Glass'ın S-2-Glass adı verilen daha düşük maliyetli bir versiyonu da mevcuttur. S-2-Glass daha az katı askeri olmayan spesifikasyonlarla üretilse de gerilme mukavemeti ve modülü S-Glass'a benzerlik gösterir [1, 4].

b. Aramid

1970'lerin başında ilk defa piyasa sürüldüklerinden beri Aramid elyaflar piyasada bulunan herhangi bir takviye elyafına kıyasla en yüksek mukavemet-ağırlık oranına

sahiptir. Üretilen en eski aramid lifleri E.I. Du Pont de Nemours & Company, Inc şirketi tarafından lastiklerin ve plastiklerin güçlendirilmesi amacıyla Kevlar ticari adı altında çıkarılmıştır. Hafiflik, yüksek mukavemet ve yüksek tokluk özellikleri balistik, lastik, halat, kablo, asbest ikamesi ve koruyucu giysi gibi kullanım uygulamalarına yol açmıştır [1, 4].

Sertlikleri 125 GPa kadar yüksek olabilir ve gerilimde çok güçlü olmalarına rağmen çok zayıf sıkıştırma ve kesme özelliklerine sahiptirler. Aramid lifler, üstün darbe, sürünme ve yorulma kopma direncinin yanı sıra -200 ile 200 °C arasında mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Ancak işlenmeleri zordur. Aramid fiber kompozitlerin kesilmesi, yüksek derecede kenar keskinliğine ve küçük kesme kenarı yarıçapına sahip takımlar gerektirir.

c. Karbon Fiber

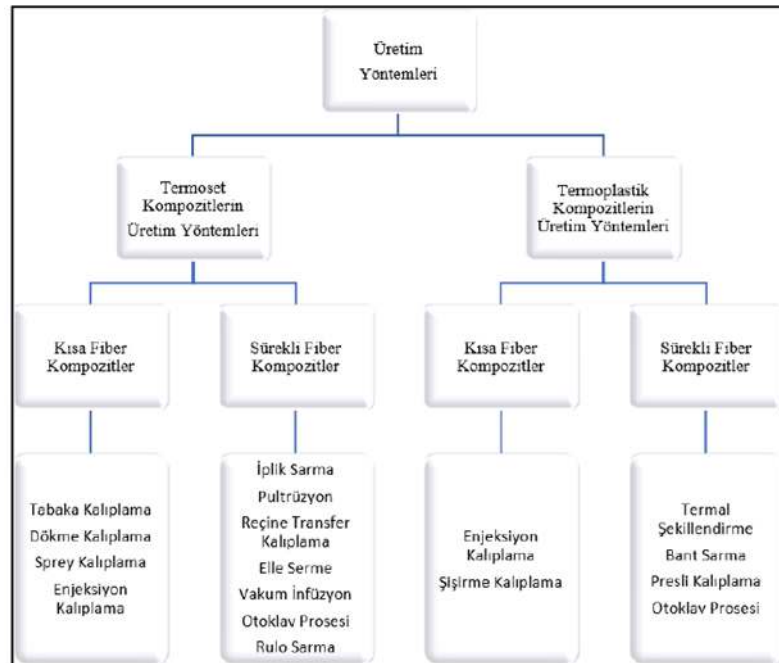
İlk olarak 1960'larda tanıtılan Karbon Fiberler (KF'ler), grafit ve kristal olmayan bölgelerden yapılan yeni bir yüksek mukavemetli malzeme türüdür. Tüm takviye edici lifler arasında, karbon lifleri en yüksek özgül modülü ve mukavemete sahiptir. Karbon fiber, mükemmel sertliği ve hafif yapısı ve uygun maliyeti nedeniyle oldukça arzu edilen bir malzemedir. Cam elyaftan sonra en çok kullanılan ikinci elyafıdır. Karbon fiber, gelişmiş kompozitler oluşturmak için etkileyici sertlik-ağırlık ve güç-ağırlık oranlarından yararlanarak, havacılık ve belirli spor ürünlerinde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Karbon fiberlerin avantajları arasında olağanüstü yüksek çekme mukavemeti-ağırlık oranlarının yanı sıra gerilme modülü-ağırlık oranları, uzay antenleri gibi uygulamalarda boyutsal stabilite sağlayan çok düşük lineer termal genleşme katsayıları, yüksek yorulma mukavemetleri ve bakırdan bile daha yüksek olan termal iletkenlikleri sayılabilir. Ancak düşük kırılma gerilmesine ve düşük darbe direncine sahiptirler. Ayrıca karbon fiberler hem üretim hem de işletim ortamlarında önemli zorluklar ortaya çıkarabilen elektriksel iletkenlikleri açısından belirgin bir özelliğe sahiptir. Karbon lifleri aşındığında, ince toz parçacıkları oluşur ve bu tozlar takım tezgâhı kontrollerini bozabilir. Bu da elektrikli ekipmanın kısa devre yapmasına neden olabilir. Ayrıca bu toz aşındırıcıdır ve makine kılavuzlarında ve hareketli yüzeylerde aşınmaya neden olma potansiyeline sahiptir. Ek olarak, karbon takviyenin elektriksel iletkenliği nedeniyle metal eklerde galvanik korozyon oluşma riski vardır. Karbon fiberlerin bir diğer dikkate değer özelliği, uzunlamasına yön boyunca negatif termal genleşme katsayılarıdır. Bu benzersiz özellik,

geniş bir sıcaklık aralığında minimum boyutsal değişikliklerle yapıların tasarlanmasını sağlar. Bir sonraki bölümde karbon fiberlerden daha detaylı bir şekilde bahsedilecektir [1, 4].

2.4 Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

2.4.1 Karbon fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretimi için vakum yöntemi, otoklav kalıplama, filaman sarma, sıkıştırma kalıplama, basınçlı kap kalıplama, termal kalıplama ve profil oluşturma dahil olmak üzere birçok yöntem mevcuttur. Ancak bu yöntemlerden fabrikasyon üretim için genellikle otoklav ve fırın prosesleri tercih edilmektedir. Kompozit yapılarda kullanılan üretim teknikleri, kompozitlerde çok sayıda ve çeşitli malzemelerin bulunması nedeniyle metal işlemede kullanılanlardan önemli ölçüde farklıdır. Kompozit parça imalatında elyaflar, reçineler, kumaşlar, prepregler ve kalıplama bileşenleri dahil olmak üzere çeşitli türde ham maddeler kullanılır. Her üretim tekniği, farklı malzeme sistemlerini, işleme koşullarını ve kompozit parçaları imal etmek için araçlar gerektirir. Her tekniğin işleme yetenekleri, parça boyutu, parça şekli, maliyeti ve kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Kompozit parçaların başarılı üretimi, üretim tekniğinin uygun seçimine ve proses parametrelerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Şekil 2.5'te en yaygın olarak kullanılan tekniklerin bir listesi sunulmaktadır [6].

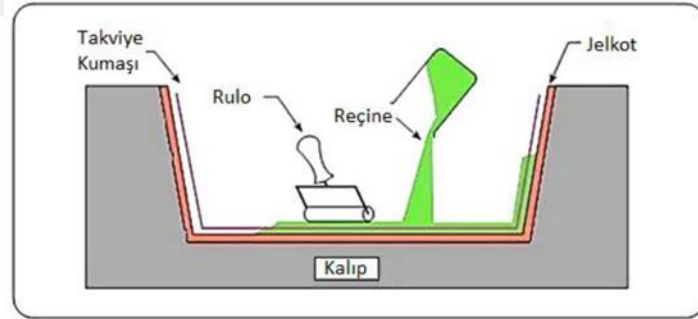


Şekil 2.5. Kompozit üretim tekniklerinin sınıflandırılması [6]

2.4.1.1. El ile yatırma (serme) yöntemi

El ile, kompozit ürünlerin tek taraflı kalıplar kullanılarak açık temas kalıplama yoluyla oluşturulduğu, yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Hem uygun maliyetli hem de yaygın olması nedeniyle Amerika Birleşik Devletleri'nin uçak endüstrisinde kompozit parçaların imalatında kullanılan en çok yöntem haline getirmiştir [7].

El ile yatırma işlemi sırasında, karbon fiber sürekli lifli keçeler ve/veya dokuma fitil gibi diğer kumaşlar dikkatli bir şekilde kalıbın içine manuel olarak yerleştirilir (bkz. Şekil 2.6). Uygun yapışmayı sağlamak için her katman, viskozitesi 1000 ila 1500 cps arasında değişen katalize reçine ile kaplanır. Daha sonra laminatı tamamen doyurmak ve sıkıştırmak için fırçalar ve rulolar kullanılır ve reçinenin liflere etkili bir şekilde nüfuz etmesi sağlanır. Bu imalat tekniği üretim ve izolasyon giderlerinin azalması gibi avantajlar sunmaktadır. Ek olarak, önemli boyut sınırlamaları olmadan büyük parçaların üretilmesini sağlar. Bununla birlikte, bu yöntemde nihai ürünün kalitesinin, uygulama sürecinde yer alan kişilerin becerilerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceği unutulmamalıdır. Tipik olarak, bu yöntemde kullanılan takviye malzemesinin oranı %25 ila %35 arasında değişmekle birlikte potansiyel olarak %45'e kadar ulaşabilir [3].

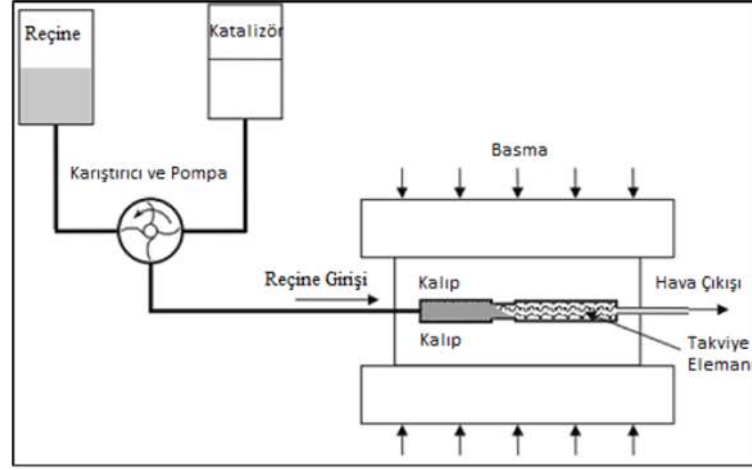


Şekil 2.6. El ile yatırma yöntemi [3]

2.4.1.2 Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine Transfer Kalıplama (RTK) işlemi, sabit bir lifli preformu emprenye etmek için sıvı reçine kullanımını içeren etkili bir imalat tekniğidir. RTM'de ön kalıp, kalıp boşluğu içinde konumlandırılır, kalıp kapatılır ve ardından basınç altında boşluğa reçine enjekte edilir. Sıvı reçine kalıp boşluğunu tamamen doldurduktan sonra sertleşmeye uğrar. Bu sertleştirme aşaması sırasında reçine, polimerik bir ağ oluşumunun bir sonucu olarak sertleşerek kompozitin matrisini oluşturur ve parçanın kalıptan çıkarılmasını sağlar. Epoksi, vinil ester, metil metakrilat, polyester veya fenolik reçine gibi termoset

polimerler genellikle cam elyafı, karbon elyafı, aramid ve sentetik elyaf takviyeleri ile kombine edilerek kullanılır. Polimer matris ve takviye malzemelerinin seçimi hem malzeme maliyetini hem de kalıplanmış parçanın mekanik ve yüzey kalitesi performansını belirler. Ek olarak, yangın geciktirme, esneklik modülü ve yüzey kalitesi gibi özellikleri geliştirmek için karışıma mineral dolgu maddeleri eklenebilir. Şekil 2.7’de RTK yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [7].



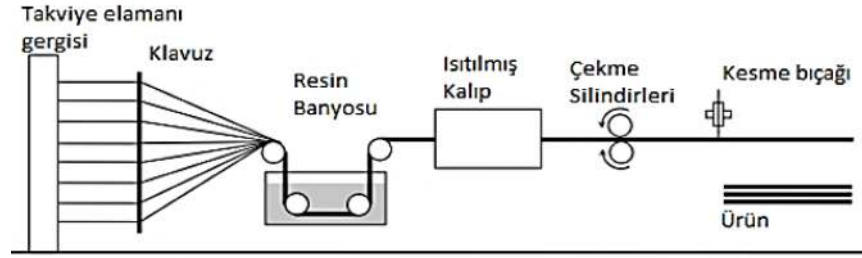
Şekil 2.7. Reçine transfer kalıplama yöntemi [3]

RTM sürecinde karşılaşılan ana zorluk, takviyenin reçine/katalizör karışımı ile yeterince doygun olmadığı alanları ifade eden kuru noktaların ortaya çıkmasıdır. Bu sorun nihai ürünün yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Bu sorunu çözmek için, vakumlama işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlem, reçinenin kalıba daha hızlı infüzyonunu kolaylaştırır ve en önemli faydalarından biri, keçe tipi takviyeler içinde hapsolmuş havanın çıkarılmasıdır. Keçe içindeki reçine dağılımı eşit olmadığında, hava hapsolür ve kalıptan kaçamaz. Sonuç olarak, bu, bitmiş ürünün mekanik özelliklerinde önemli bir azalmaya yol açar [7].

2.4.1.3 Profil çekme yöntemi

Profil çekme, sürekli uzunluklarda FRP (Fiber Takviyeli Polimer) yapısal şekiller üretmek için özel olarak tasarlanmış bir üretim sürecidir. İşlem, reçine, dolgu maddeleri ve özel katkı maddeleri içeren bir sıvı reçine karışımı da dahil olmak üzere, güçlendirici liflerle birlikte bir ham madde kombinasyonunun kullanılmasını içerir. Malzemelerin itildiği ekstrüzyonun aksine, pultrüzyon, bu ham maddeleri ısıtılmış bir çelik oluşturma kalıbından çekmek için sürekli bir çekme cihazına dayanır. Profil çekmede kullanılan takviye malzemeleri tipik olarak cam elyafı keçe ruloları veya cam elyafı fitil demetleri

gibi sürekli formlardadır. Bu takviyeler bir reçine emdiriciden geçerken, kalıptan çekilmeden önce reçine karışımıyla (ıslak olarak bilinir) doyurulurlar. Kalıptan gelen ısı, reçinenin jelleşmesini veya sertleşmesini başlatarak, kalıbın şekline karşılık gelen rijit, kurlenmiş bir profilin oluşmasına neden olur. Bu süreç, tutarlı boyutlara ve mekanik özelliklere sahip FRP yapısal şekillerin sürekli üretimini sağlar [7].



Şekil 2.8. Profil çekme yöntemi şematik gösterimi [3]

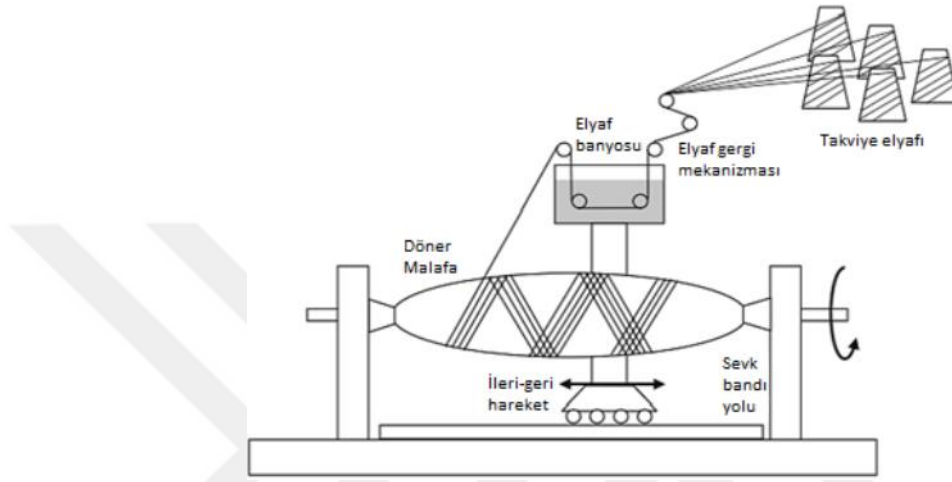
Profil çekmede, genellikle doymamış polyester veya vinil ester reçinesi ile birleştirilmiş cam elyafları gibi malzemeleri kullanır. Ek olarak, epoksi reçineleri ile aramid ve karbon elyafları da bu süreçte sıklıkla kullanılmaktadır [3]

2.4.1.4 Elyaf sarma yöntemi

Elyaf(filament) sarma yöntemi, sürekli bir takviye malzemesi filamanının birden fazla katmanda dönen bir mandrel üzerine hassas bir şekilde sarılmasını içeren bir üretim tekniğidir. Reçine uygulamasına bağlı olarak proses, ıslak filaman sarımı veya kuru filaman sarımı olarak kategorize edilebilir. Islak filaman sarmada, sarmadan önce filamana sıvı bir ısıyla sertleşen reçine uygulanır. Bu reçine emdirme, sarım işleminden önce gerçekleşir. Kuru filaman sarımında ise reçine sarım işlemi sırasında sarılan filamanla birlikte mandrel üzerine püskürtülür. Filament sarımı, borular ve tanklar gibi dairesel veya oval kesitli içi boş bileşenlerin üretilmesi için özellikle uygundur. Sürekli elyaf demetleri olan elyaf kırıkları, reçine ile emprenye edilmeleri için bir reçine banyosundan geçirilir. Bu reçine emdirilmiş lif kırıkları daha sonra, lif besleme mekanizması ve merdanenin dönme hızı tarafından kontrol edilen çeşitli yönlerde bir mandrel üzerine sarılır. Bu kontrollü sarma işlemi, yüksek yapısal bütünlüğe sahip güçlü ve hafif yapıların oluşturulmasını sağlar [7].

Elyaf sarma işleminde, elde edilen ürünlerin mekanik özellikleri, liflerin sürekli olarak farklı açılarda kalıba sarılmasına bağlı olarak değişebilir. Sarım açılarını

ayarlayarak, belirli mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir. Proses, elyafların bir kalıba birden fazla katman halinde sürekli olarak sarılmasını içerir. Yeterli sayıda lif sarıldıktan sonra ürünün sertleşmesine izin verilir. Akabinde döner kalıp ayrıştırılır ve istenilen ürün elde edilir. Silindirik borular, araba milleri, uçak su depoları, yat direkleri ve dairesel basınç tanklarının üretiminde yaygın olarak filaman sarma yöntemi kullanılır [7].



Şekil 2.9. Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi [3]

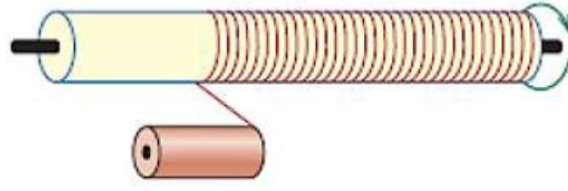
Filament sarma yöntemi ile kompozit üretimi, üç farklı sarım şekli kullanılarak elde edilebilmektedir.

Çevresel Sarma: Bu uygulamada lifler, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi mandrel etrafına 90° açıyla sarılır. Bu, mandrelin eksenine dik olarak yönlendirilmiş lif katmanları ile sonuçlanır.

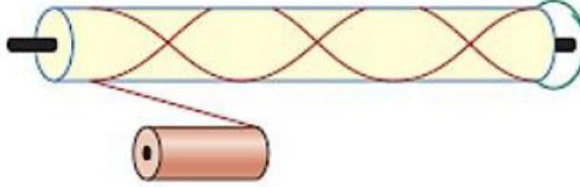
Helisel Sarma: Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, helisel sarma yöntemi, mandrelin sabit bir hızda döndürülmesini ve aynı anda fiber kılavuzun mandrelle paralel sarmal bir modelde hareket etmesini içerir. Bu, lif katmanlarında sarmal bir açı oluşturarak nihai ürüne güç ve burulma direnci sağlar.

Polar Sarma Yöntemi: Şekil 2.12'de gösterilen polar sarma yöntemi, basınçlı kapların üretiminde yaygın olarak kullanılan uçtan uca sarma tekniğidir. Lifler, bir uçtan diğer uca spiral bir desenle sarılarak damarın eğriliğini takip eden katmanlar oluşturur.

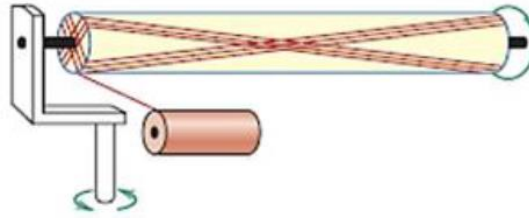
Bu farklı sarım şekilleri, özel uygulamalara ve gereksinimlere göre uyarlanmış, değişen mekanik özelliklere ve yapısal özelliklere sahip kompozit ürünlerin üretimine izin verir [3].



Şekil 2.10. Çevresel sarma yöntemi [3]



Şekil 2.11. Helisel sarma yöntemi [3]

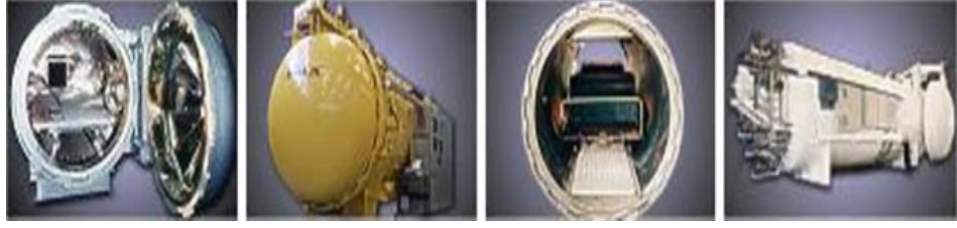


Şekil 2.12. Polar sarma yöntemi [3]

2.4.1.5 Otoklav yöntemi

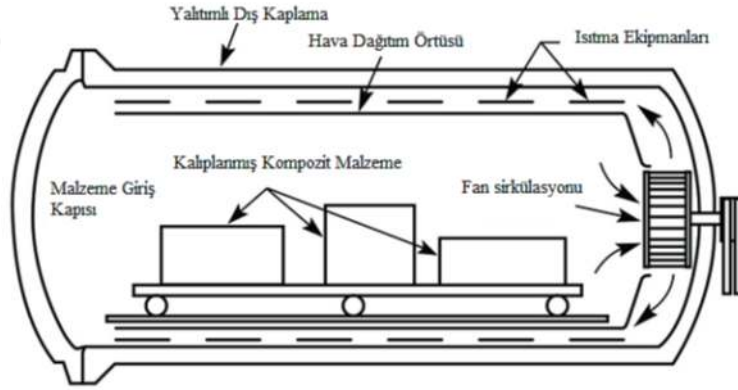
Otoklav, kompozitler üretilirken kullanılabilecek başka bir yöntemdir (bkz. Şekil 2.13). Otoklav, açık kalıplama yöntemlerinden biri kullanılarak kalıplanmış bir parçanın vakum, ısı ve inert gaz basıncı uygulanarak sertleştirilmesini içerir.

İşlem, kalıplanmış parçanın bir vakum pompası kullanılarak havasının çıkarıldığı plastik bir torbaya yerleştirilmesiyle başlar. Bu adım, kalıplanmış parçadaki hava kalıntılarını ve uçucu maddeleri ortadan kaldırdığı için çok önemlidir. Daha sonra, parça bir otoklav içinde ısı ve inert gaz basıncı kombinasyonuna tabi tutulur. Bu, malzemelerin sertleşmesine ve yoğunlaşmasına yol açarak daha güçlü ve daha kompakt bir nihai ürünle sonuçlanır. Otoklav kürlleme işlemi, sertleştirme koşulları üzerinde hassas kontrol sağlar, bu da geliştirilmiş mekanik özellikler ve kompozit malzemenin kalitesinin artmasıyla sonuçlanır [7].



Şekil 2.13. Son zamanlarda kullanılan otoklav makineleri [7]

Otoklav yöntemi, tutarlı ve homojen malzemeler üretme kabiliyetiyle bilinir. Bununla birlikte, öncelikle yüksek kaliteli havacılık ürünlerinin imalatında kullanılan nispeten pahalı bir yöntemdir. Otoklavlar yalnızca lamine kompozitlerin işlenmesi için değil, aynı zamanda petek paneller gibi bağlı metalik tertibatlar için de kullanılır. Vakum veya havalandırma uygulayarak, otoklav içindeki ısı ve basınç, kompozit parçalardaki elyaf-reçine oranını optimize etmek için hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu, üstün mukavemete sahip kompozit parçaların üretimine izin verir. Yapıştırılmış düzenekler söz konusu olduğunda, otoklavlar, güçlü bağlar elde etmek için yüksek mukavemetli film yapıştırıcıların kullanılmasını sağlar. Otoklavlar, onlarca yıldır endüstride temel bir malzeme olmuştur [7].



Şekil 2.14. Otoklav yönteminin şematik gösterimi [3]

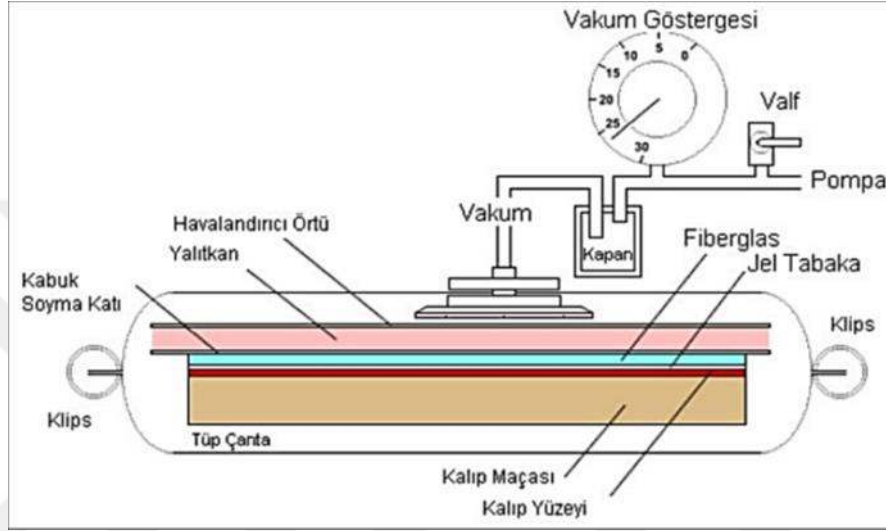
2.4.1.6 Vakum kalıplama yöntemi

Vakum torbalama olarak bilinen bir laminata basınç uygulama işlemi, esasen ıslak yatırma işleminin bir uzantısıdır. Amacı, laminatın konsolidasyonunu arttırmaktır.

Vakumlu torbalama sırasında, ıslak serilmiş laminatın üzerine ve alet veya kalıbın üzerine bir plastik film sıkıca kapatılır. Torbanın altında sıkışan hava daha sonra bir vakum pompası kullanılarak çıkarılır. Havayı çekerek laminata bir atmosfere (veya

atmosferik basınca) kadar basınç uygulanabilir ve laminat etkin bir şekilde birleştirilebilir.

Bu basınç, hava boşluklarının ortadan kaldırılmasına yardımcı olur ve laminatın katmanları arasındaki bağı güçlendirerek daha sağlam ve uyumlu bir nihai ürün sağlar. Vakum torbalama, laminatların yapısal bütünlüğünü ve kalitesini iyileştirmek için kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılır [7].



Şekil 2.15. Vakum kalıplama yöntemi [3]

2.4.2 Karbon fiber takviyeli kompozitlerin işlenebilirliği

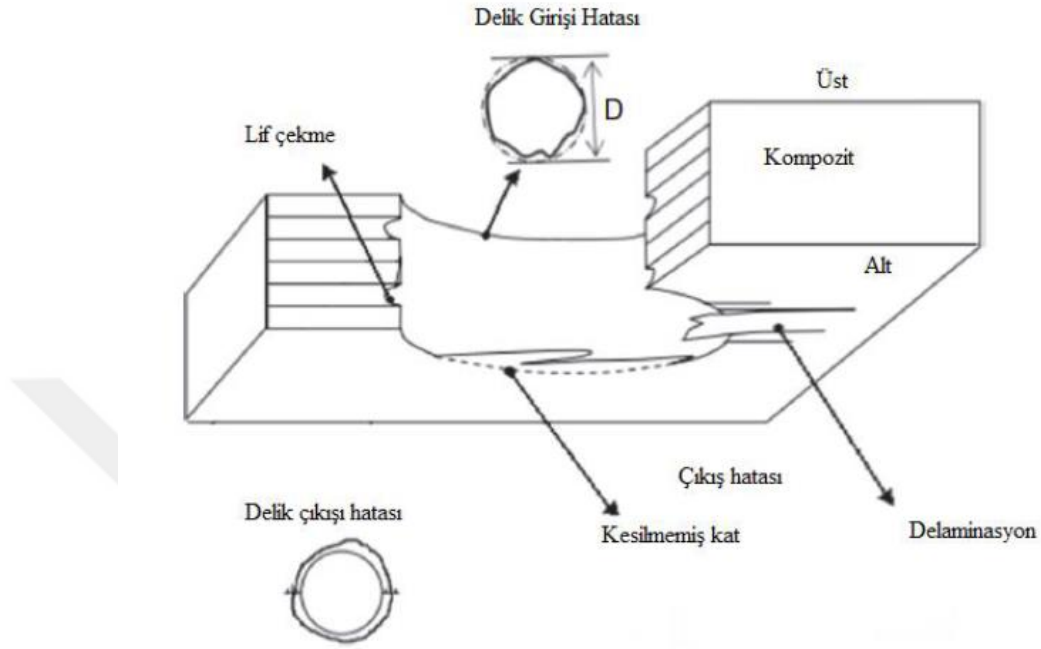
Karbon Fiber Takviyeli Polimer (KFTP) kompozitler tipik olarak istenen nihai boyutlara çok yakın boyutlarda üretilir. Bununla birlikte, istenen boyutsal toleransı, yüzey kalitesini ve kompozitin diğer fonksiyonel gerekliliklerini elde etmek için genellikle tornalama, frezeleme veya delme gibi ek makineyle işleme işlemleri gereklidir. KFTP kompozitlerinin işlenmesi, geleneksel metaller ve alaşımlara kıyasla daha zorlayıcı olabilir. Bunun başlıca nedeni, farklı mekanik ve termal özelliklere sahip malzemelerden oluşan KFTP'nin iki fazlı yapısından kaynaklanmaktadır. Matris içinde liflerin varlığı, işleme sırasında karmaşık etkileşimlere yol açarak KFTP'nin işlenmesini metallerinkinden önemli ölçüde farklı kılar. Matris ve fiber arasındaki mekanik ve termal özelliklerdeki farklılıklar, işleme operasyonları sırasında delaminasyon, fiberin çekilmesi, takım aşınması ve yüzey hasarı gibi sorunlara neden olabilir. KFTP kompozitlerini işlerken bu zorlukların üstesinden gelmek ve istenen sonuçları elde etmek için genellikle özel işleme teknikleri ve araçları ile süreç optimizasyonu gerekir [8].

KFTP kompozitlerinin işlenebilirliği, yapısal özellikleri, imalat yöntemi, reçine/matris yapısı ve işleme süreci ve araçlarının seçimi dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir. FTP kompozitlerinin homojen olmaması ve anizotropisi, işleme sırasında fiber çekilmesi ve fiber-matris arayüzünün ayrılması gibi sorunlara yol açarak zorluklara neden olabilir. Kompozitin farklı yönleri boyunca mekanik özelliklerdeki değişiklik, eşit olmayan kesme kuvvetlerine ve takım aşınmasına neden olabilir. FTP kompozitleri, kesici takımlarda önemli ölçüde aşınmaya neden olabilecek yüksek ısı direnci ve aşındırıcı özellikler sergiler. KFTP kompozitlerinde kullanılan epoksi reçinelerin doğal zayıflığı, düşük kesme kuvvetleri altında bile tabakalara ayrılmaya ve matris çatlamasına neden olabilir. Ayrıca, işleme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar, özellikle yüksek kesme hızlarında, kompozitlerin düşük termal iletkenliği nedeniyle reçine bozulmasına yol açabilir. FTP kompozitlerinin işlenmesi ayrıca lif parçalanması, yüzey pürüzlülüğü ve yanma gibi çeşitli kusurlara neden olabilir. Bu kusurlar, işlenmiş parçaların boyutsal doğruluğunu, yüzey kalitesini ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. FTP malzemeleriyle çalışan endüstrilerin devam eden hedefi, bu süreçten kaynaklanan hasarları önlemek ve kontrol etmek için stratejiler geliştirmektir. Bu, işleme parametrelerini optimize etmeyi, özel kesici takımlar ve takım kaplamaları geliştirmeyi ve işleme sırasında malzeme davranışının anlaşılmasını iyileştirmeyi içerir. KFTP kompozitlerinin işlenebilirliğini artırmak ve yüksek kaliteli bileşenlerin üretimini sağlamak için işleme teknikleri ve takımlardaki gelişmeler takip edilmektedir [8].

2.4.3. Karbon Fiber Takviyeli Polimer (KFTP) Kompozitlerin Delinebilirliği

Kompozit levhaları delerken oluşabilecek ana kusurlar delaminasyon ve delik girişinde ve çıkışında lif büzülmesidir. Bu kusurlar hem termoset hem de termoplastik matris kompozitlerde yaygındır. Delaminasyon, kompozit malzeme içindeki katmanların ayrılmasını ifade eder ve kompozitin kullanım ömrünün herhangi bir aşamasında çeşitli etkilerle meydana gelebilir. Delaminasyon, kompozitin performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Delaminasyonun konumuna bağlı olarak, çekme mukavemetinde azalmaya yol açabilir ve malzemenin genel performansını tehlikeye atabilir. Delaminasyon aynı zamanda kompozitin dayanıklılığını, taşıma gücünü ve yapısal bütünlüğünü de etkiler, bu da performans sorunlarına ve toplam gücün azalmasına neden olabilir. Bu zararlı etkileri azaltmak için uygun kesici takım malzemesinin, takım geometrisinin ve kesme koşullarının seçilmesi çok önemlidir. Kompozitleri işlerken uygun takım seçimi ve işleme parametreleri, delme işlemleri sırasında katmanlara ayrılma ve diğer kusurların

oluşmasını en aza indirmeye yardımcı olabilir. Şekil 2.16, bir kompozit levhanın delme işlemi sırasında meydana gelebilecek bazı tipik kusurları göstermekte ve kompozitlerin işlenmesinde karşılaşılan zorlukların görsel örneklerini sağlamaktadır [9].



Şekil 2.16. Kompozit plakada delik hataları [9]

Delaminasyon, esas olarak kompozitin delinme yönünde daha düşük mukavemeti nedeniyle, delinmiş kompozit malzemelerde önemli bir başarısızlık şeklidir. Kompozit katmanların istiflenme sırası, delaminasyonun meydana gelmesinde çok önemli bir rol oynar. Delaminasyon genellikle döngüsel yükler ve düzlem dışı çekme gerilmeleri nedeniyle katmanlar arasında gerçekleşir. Çatlak büyüme hızı nispeten düşük olduğundan, bu tip delaminasyon tipik olarak yavaş ilerler. Döngüsel yükler, çekme veya sıkıştırma olabilir ve delaminasyon, yapının basınç taşıma kapasitesinde bir azalmaya yol açabilir.

Delik delme işlemleri sırasında delaminasyonun meydana gelmesine çeşitli faktörler katkıda bulunur. Yüksek itme kuvveti ve ilerleme hızları delaminasyonun ana sebepleri arasındadır. Hızlı takım aşınması ve aşırı güç de delaminasyona katkıda bulunabilir. Delme, kompozitlerde delik açmak için standart bir süreçtir ve havacılık, otomotiv ve sıvı endüstrileri gibi endüstrilerde kompozit bileşenleri diğer yapılarla birleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bir uçak kanadı binlerce delik gerektirebilir. Sonuç olarak, işleme maliyetleri kompozit üretiminde önemli bir faktördür.

Havacılık ve otomotiv kompozit yapılarının montajında, kompozit katmanları metal veya diğer kompozit parçalara sabitlemek için cıvatalama ve perçinleme tercih edilen yöntemlerdir. Delinmiş deliklerin kalitesi, genel yapının güvenilirliği ve yorulma mukavemeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, nihai ürünün yapısal bütünlüğünü ve performansını sağlamak için montaj aşamasından önce kompozitlerde hasarsız deliklerin delinmesi esastır [9].

2.5 Minimum Miktarda Yağlama (MMY)

Minimum Miktarda Yağlama (MMY), geleneksel su bazlı soğutma sıvısı yerine saf yağdan oluşan ince bir aerosol sisi kullanan gelişmiş bir işleme yöntemidir. MMY'de yağ buharı doğrudan kesme bölgesine uygulanır ve toplanmak, filtrelenmek ve yeniden kullanılmak yerine işleme sürecinde tüketilir. MMY sistemleri, su bazlı soğutucu sistemlerinde kullanılan dakikada litre (L/dak) yerine mililitre/saat (mL/sa) cinsinden yağ akış oranlarını ölçer. Gereken spesifik yağ akış hızı, çalışma malzemesi ve alet boyutu gibi faktörlere bağlı olarak tipik olarak 5 ila 200 mL/sa arasında değişir. MMY'nin gelişimi, başta Almanya ve Japonya olmak üzere 1990'larda ortaya çıkmıştır. Bu dönemde, su bazlı soğutma sıvılarıyla ilgili maliyetler ve potansiyel sağlık riskleri, soğutma sıvısı kullanımının azaltılmasına yönelik ilgiyi artırdı. Kuru işlemeyle ilgili ilk araştırmalar, belirli malzemeleri herhangi bir yağlayıcı olmadan etkili bir şekilde işlemenin zorluklarını da vurgulamıştı. Sonuç olarak, MMY özellikle uçak gövdeleri için büyük yapısal bileşenlerin işlenmesinde ve otomotiv aktarma organlarının işlenmesinde kapsamlı uygulamalar buldu. Ayrıca MMY, alüminyum alaşımları, karbon ve düşük alaşımlı çelikler, gri ve küresel dökme demirler dahil olmak üzere çeşitli iş malzemelerinin işlenmesi için yaygın olarak kullanılır. Etkinliği, kesme sıvısı kullanımını ve ilgili maliyetleri önemli ölçüde azaltırken, işleme sırasında yeterli yağlama ve soğutma sağlamada yatmaktadır [10].

MMY, geleneksel su bazlı soğutma sıvısı sistemlerine göre belirli avantajlar sunar. Temiz bir yağ sistemi olarak MMY kesici kenarda daha iyi yağlama sağlayarak takımın ve iş parçasının sürtünme ısınmasını azaltır. Ayrıca alet üzerinde malzeme birikmesini önlemeye yardımcı olarak alet ömrünü ve performansını artırır. Bununla birlikte, taşmalı soğutma sıvısıyla karşılaştırıldığında, MMY'nin soğutma ve termal kararlılık açısından sınırlamaları vardır. İşleme sırasında oluşan ısıyı etkili bir şekilde yönetmek için yeterli soğutma sağlamayabilir. Ek olarak, MMY, talaşların kesme bölgesinden

uzaklaştırılmasında ve taşınmasında daha az etkili olabilir. MMY işlemede kabul edilebilir boyutsal stabilite ve etkili talaş işleme sağlamak için çeşitli stratejilerin uygulanması gerekir. Bu, iyi tanımlanmış bir boyut ve ölçüm stratejisine sahip olmayı, kesici takımlarda değişiklikler yapmayı ve işleme prosesi parametrelerini buna göre ayarlamayı içerir. İlgili mühendislik ve süreç izleme maliyetlerine karşı MMY işleminin genel faydalarını değerlendirmek çok önemlidir. MMY belirli uygulamalarda avantajlar sunabilse de sürecin uygulanması ve izlenmesi ile ilgili maliyetlerin, iyileştirilmiş performans, takım ömrü ve maliyet tasarrufu açısından beklenen faydalarla gerekçelendirilmesi gerekir. MMY uygulamasının fizibilitesini ve uygunluğunu belirlemek için özel işleme gereksinimlerinin ve maliyet faktörlerinin dikkatli bir değerlendirmesi gereklidir.

MMY'yi başarılı bir şekilde uygulamak, tüm işleme sistemini dikkate alan kapsamlı bir mühendislik yaklaşımı gerektirir. Bu, takım tezgâhları, fiktürler, proses parametreleri ve sırası ve kesici takımlar gibi çeşitli yönleri içerir. Bu mühendislik seviyesi, entegre işleme sistemleri kullanılarak yüksek işlenmiş içeriğe sahip karmaşık bileşenler üretilirken özellikle çok önemlidir [10-12].

MMY işlemede, aşağıdaki mühendislik hususlarını ele almak önemlidir:

- MMY Sistem Türleri: Mevcut farklı MMY sistem türlerini anlamak ve belirli uygulama için uygun sistemi seçmek.
- Yağlayıcılar: İşleme sırasında etkin yağlama ve termal kararlılık sağlayan uygun yağlayıcıların seçilmesi.
- Takım Tezgâhı ve Kesici Takım Gereksinimleri: Takım tezgahlarının MMY işlemlerini gerçekleştirme ve MMY işleme için optimize edilmiş kesici takımları seçme kapasitesinin sağlanması.
- Termal Yönetim ve Boyutsal Kontrol: Termal kontrol mekanizmaları da dahil olmak üzere işleme sırasında üretilen ısıyı yönetmek için stratejiler uygulamak ve işleme sürecinde boyutsal kararlılığı dikkate almak.

- Hava ve Talaş İşleme: Uygun talaş tahliyesi işleme kalitesini korumak ve takım hasarını önlemek için çok önemli olduğundan, MMY işlemede hava ve talaş giderme işlemleri için etkili yöntemler geliştirmek.

- Mevcut Araştırma Alanları: Süreci iyileştirebilecek yeni teknikler ve teknolojilerden yararlanmak için MMY işlemede devam eden araştırma ve gelişmelerden haberdar olmak.

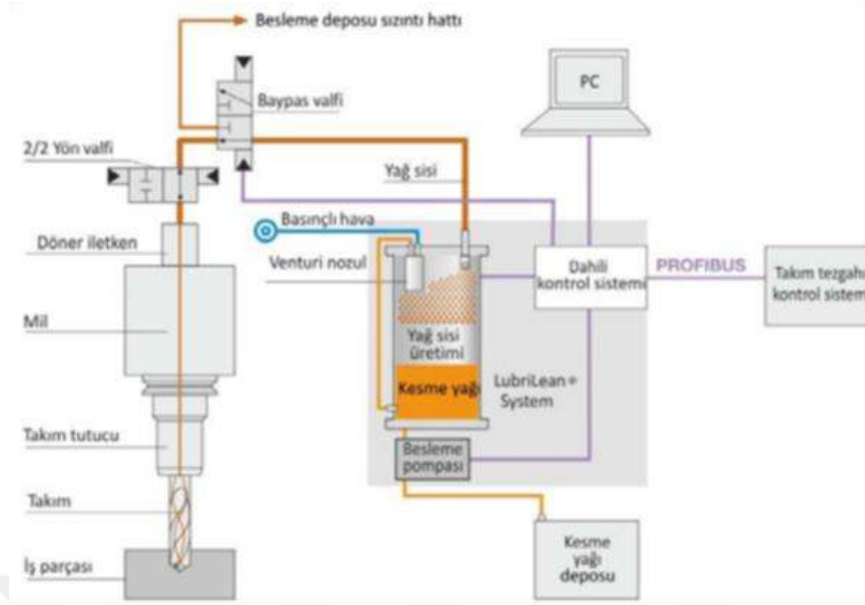
Bu mühendislik yönlerine genel bir bakış, MMY işlemenin uygulanmasıyla ilgili hususlar ve zorluklar hakkında değerli bilgiler sağlar. Üreticiler, bu yönleri kapsamlı bir şekilde ele alarak MMY süreçlerini optimize edebilir ve gelişmiş performans, üretkenlik ve maliyet verimliliği elde edebilir [10-12].

2.5.1 MMY sistem türleri

Minimum Miktarda Yağlama (MMY) sistemlerinde, kesme sıvıları iki farklı yöntemle kesme bölgesine aktarılabilir: takım içindeki kanallardan içten aktarım veya sabit nozullar kullanılarak dıştan aktarım.

2.5.1.1. Dâhili Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Dahili MMY sisteminde soğutma, havayla yağlama ve havadaki küçük yağ damlacıklarının (aerosol) varlığıyla sağlanır. Bu sistemde, aerosol yağlama sistemi içinde üretilir ve daha sonra dönen shaft boyunca hortumlar boyunca hareket eder. Takım içerisinde bulunan MMY soğutma kanallarından geçerek iş parçasına ulaşır. Şekil 2.17, dahili MMY sistemini gösteren şematik bir görünüm sağlar. Aerosolün yağlama sisteminden dönen mil ve aletin içindeki MMY soğutma kanallarına giden yolunu gösterir. Bu sistem, havada asılı duran küçük yağ damlacıkları şeklindeki yağın, işleme sırasında etkin soğutma ve yağlama için doğrudan kesme bölgesine iletilmesini sağlar. Dahili MMY sistemi, havayla yağlamayı ve yağ aerosolünün kontrollü uygulamasını kullanarak hassas ve hedefe yönelik bir yağlama yaklaşımı sağlar. Soğutma ve yağlama verimliliğini optimize ederek sürtünmeyi, ısı oluşumunu ve takım aşınmasını azaltırken boyutsal doğruluğu korur ve işleme performansını iyileştirir [12].



Şekil 2.17. Dahili MMY sisteminin şematik gösterimi [12]

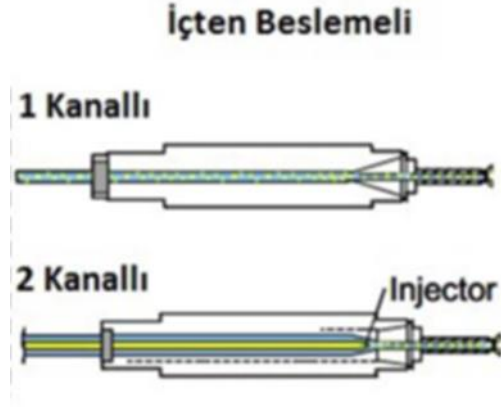
Dahili MMY sistemi ayrıca Şekil 2.18'de gösterildiği gibi tek kanallı ve çift kanallı olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir:

- Tek Kanallı Sistem: Tek kanallı sistemde yağ-hava karışımı hazırlanır ve dışarıdan püskürtülür. Yağlayıcı ve hava, takım veya takım tutucunun dışında karıştırılır ve ardından kesme bölgesine yönlendirilir. Yağ ve hava karışımı aerosol olarak sağlanır ve işleme sırasında yağlama ve soğutma sağlar.

- Çift Kanallı Sistem: Çift kanallı sistemde yağ ve hava ayrı ayrı verilir ve takım veya takım tutucu içinde karıştırılır. Hem yağ hem de hava kanalları, yağ-hava aerosolünü oluşturmak için karıştırmaları belirli bir noktada buluşacak şekilde tasarlanmıştır. Bu konfigürasyon, yağlama işlemi üzerinde daha hassas kontrol sağlar ve yağ-hava karışımının daha iyi optimize edilmesini sağlar.

Dahili MMY sistemlerinde aerosol oluşturmak için özel bir araç kullanılır. Bu araç, yağ-hava karışımını oluşturmak ve tipik olarak 0,3 ila 1 μm arasında değişen boyutlarda aerosol damlacıkları üretmek için tasarlanmıştır. Damlacıkların küçük boyutu, yörüngelerinde önemli değişiklikler olmadan keskin dönüşlerden veya yüksek hızlı dönen şaftlardan geçmelerine izin vererek düşük ataletlerine katkıda bulunur. Sonuç olarak, aerosol, işleme sürecinde istenen yağlama noktasına etkili bir şekilde ulaşabilir. Uygun aerosol oluşturma aracıyla tek kanallı veya çift kanallı sistemi kullanarak dahili MMY yaklaşımı, işleme operasyonları sırasında hassas yağlama ve soğutma sağlar. Optimum

performans için yağlayıcının kesme bölgesindeki kritik noktalara ulaşmasını sağlarken sürtünmeyi, ısı oluşumunu ve takım aşınmasını azaltmaya yardımcı olur [10, 12].



Şekil 2.18. Tek kanallı ve çift kanallı dahili MMY sistemi [12]

2.5.1.2 Harici minimum miktarda yağlama sistemi

Harici MMY yönteminde soğutma, kesme sıvısının sabit nozullar kullanılarak dışarıdan püskürtülmesiyle gerçekleştirilir. Bu sistem tipik olarak bir veya daha fazla karışım regülatörü, soğutma hortumu ve bir püskürtme memesi içerir. Sisteme, soğutma sıvısı deposundaki basıncı artıran basınçlı hava verilir. Sisteme basınçlı hava verilerek sistem içindeki basınç yükselir ve kesme sıvısının hava ile karışmadan taşınması sağlanır. Bu ayırma, artan basınç farkı nedeniyle elde edilir. Kesme sıvısı, nozül vasıtasıyla çevreleyen hava ile eşmerkezli olarak karıştırılarak atomize halde kesme alanına iletilir. Şekil 2.19, harici MMY sistemini göstermektedir. Püskürtme memesi basınçlı hava ile birlikte kesme sıvısının atomizasyonunu sağlayarak kesme bölgesine yönlendirilen bir buğu oluşturur. Harici MMY yöntemini kullanarak, kesme sıvısı tam olarak kesme alanına iletilir ve işleme sürecinde yağlama ve soğutma sağlar. Püskürtme sprej, takımın, iş parçasının ve talaşın soğutulmasına yardımcı olarak sürtünmeyi ve ısı oluşumunu azaltırken genel işleme performansını iyileştirir [10, 12].



Şekil 2.19. Harici MMY sistemi [12]

Harici yağlama sistemi de tek kanallı ve çift kanallı konfigürasyonlar olarak kategorize edilebilir.

- Tek Kanallı Harici Yağlama Sistemi: Tek kanallı sistemde yağ-hava karışımı harici olarak hazırlanır ve ardından kesme bölgesine püskürtülür. Yağlayıcı ve hava, aletin veya alet tutucunun dışında karıştırılır ve tek bir kanaldan memeye iletilir, burada karışım atomize edilir ve iş parçası üzerine püskürtülür.

- Çift Kanallı Harici Yağlama Sistemi: Çift kanallı sistemde, yağ ve hava ayrı olarak dağıtılır ve nozül veya belirlenmiş bir yerde karıştırılır. İki kanal, yağı ve havayı karışımları belirli bir noktaya getirerek yağ-hava karışımını oluşturur. Bu konfigürasyon, iş parçası üzerine püskürtülmeden önce yağlayıcı-hava karışımının daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini ve optimize edilmesini sağlar.

Harici püskürtme gerektiren uygulamalarda, harici yağlama sisteminde oluşan aerosol, bir veya daha fazla nozul kullanılarak kesme bölgesine iletilir. Nozulların sayısı, yönü ve yerleşimi, yağlama yönteminin etkinliğini ve kalitesini belirlemede önemli bir rol oynar. Optimum yağlayıcı kapsamı ve soğutma elde etmek için uygun meme seçimi ve konumlandırma önemlidir. Dıştan yağlama yöntemi genellikle kesme işlemlerinde, parmak ve yüzey frezelemede ve tornalamada kullanılır. Bununla birlikte, delme, raybalama ve diş açma operasyonları için harici püskürtme genellikle yalnızca uzunluk-çap oranı (l/d) 3'ten küçük olduğunda faydalıdır. Harici yağlama sisteminde tek kanallı veya çift kanallı konfigürasyon kullanılarak yağ püskürtme, işleme performansını, takım ömrünü ve iş parçası kalitesini iyileştirmek için kontrol edilebilir ve optimize edilebilir. Bu konfigürasyonlar arasındaki özel seçim işleme uygulamasına, takım tasarımına ve istenen yağlama sonuçlarına bağlıdır [10].

2.5.2 Nanoakışkanlar ve özellikleri

Nanoakışkan, nanoparçacıklar olarak bilinen küçük parçacıklar içeren bir sıvıyı ifade eder ve bu nanoparçacıkların bir baz sıvı içinde süspansiyonla oluşturulur. Bu tasarlanmış koloidal süspansiyonlar, oksit seramikler (Al_2O_3 , CuO), nitrür seramikler (AlN , SiN), karbür seramikler (SiC , TiC), metaller (Cu , Ag , Au), yarı iletkenler (TiO_2 , SiC), karbon nanotüpler ve alaşımlı nanoparçacıklar (örn. Ek olarak, diğer yeni malzemeler ve yapılar, nanopartiküller için arzu edilen özelliklere sahip olabilir. Nanoakışkanlarda kullanılan baz sıvılar arasında su (H_2O), etilen glikol (EG), motor yağı

(EO), pompa yağı ve gliserol bulunur. Nanoakışkanlar, mühendislik ekipmanlarının performansını ve kompaktlığını iyileştirmek için çok önemli bir faktör olan sıvıların termal iletkenliğini önemli ölçüde artırma yetenekleri nedeniyle son zamanlarda ilgi kazanmıştır. 19. yüzyılın sonlarında milimetreden mikrometre boyutlarına geçiş yapan parçacıklar kavramı, şimdi nanoakışkanların geliştirilmesine olanak tanıyan nanoparçacıklar dünyasına evrildi. Bu nanoteknoloji tabanlı ısı transfer akışkanları, partikül hacmi tipik olarak %1 veya daha az olan, geleneksel ısı transfer akışkanlarında stabil şekilde asılı duran nanopartiküllerden oluşur. "Nanoakışkan" terimi ilk olarak Choi tarafından 1990'ların başında bu yeni sıvı sınıfının ortaya çıkışını öngörerek ortaya atıldı. Nanoakışkanların dikkate değer termal özellikleri, nanoparçacıkların ve baz sıvıların sinerjistik etkilerinden kaynaklanır ve dünya çapındaki araştırmacıları bu ilgi çekici sıvıların potansiyel uygulamalarını keşfetmeye motive etmiştir [13].

Nanoakışkanlar, karışık yağda çözülmeden kalan, 100 nm'ye kadar boyuta sahip partiküller içeren heterojen karışımlardan oluşur. Nanoteknoloji, iyileştirme için umut verici bir yol olarak ortaya çıktı ve bu alandaki son gelişmeler, bu teknolojiyi imalat sektöründe kullanmak isteyen araştırmacılar arasında artan ilgiyi ateşledi. Bilim adamları, deneyler ve kapsamlı araştırmalar yoluyla, performanslarını artırmak için nanopartikülleri kesme sıvılarına dahil etmeye odaklanıyorlar. Nanoparçacıkları kesme sıvısına karıştırmanın birincil amacı, üretim süreci sırasında sıvının soğutma ve yağlama özelliklerini geliştirmektir. Nanoteknolojinin yağlamada kullanılması, özellikle kesme sıvısının tribolojik ve termo-fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesinde umut verici sonuçlar göstermiştir. Nanoteknolojik yağlama üzerindeki bu yoğunlaşma, devam eden araştırma çabalarında merkezi bir tema haline geldi. Devam eden araştırma ve geliştirme, kesme sıvılarının soğutma ve yağlama verimliliğini artırırken aynı zamanda maliyetleri düşürmeyi amaçlıyor. Amaç, üretim süreçlerine değer katan ileri teknoloji çözümler yaratmaktır. Kesme sıvılarının soğutma-yaglama özelliklerini etkili bir şekilde optimize ederek, işleme operasyonları daha yüksek performans seviyelerine ulaşabilir ve böylece imalat sektöründe genel üretkenlik ve maliyet etkinliğinden faydalanabilir. Ayrıca, nanoteknolojinin kesme sıvısı teknolojisine entegrasyonu potansiyel çevresel faydalar sağlar. Kesme sıvılarının performansını artırarak, aşırı sıvı kullanımı ihtiyacı en aza indirilebilir, bu da atık oluşumunun azalmasına ve işleme süreçlerinde daha çevre dostu bir yaklaşıma katkıda bulunur. Sonuç olarak, nanoakışkanlar, kesme sıvısı özelliklerinde devrim yaratmak ve üretim süreçlerini ilerletmek için dönüştürücü bir fırsat sunuyor. Bu

alanda nanoteknolojinin aktif takibi, onu mevcut araştırmanın önemli bir yönü haline getirerek olumlu sonuçlar vermektedir. Sürekli araştırma ve geliştirme ile, soğutma ve yağlama verimliliğini artırmaya, maliyetleri düşürmeye ve nihai olarak imalat endüstrisindeki üretime değer katmaya odaklanılmaktadır [14].

2.5.2.1 Nanoakışkanların hazırlanması

Ana sıvıda nanopartiküllerin düzgün dağılımını ve kararlı süspansiyonunu elde etmek, en kaliteli nanoakışkanların üretilmesinde çok önemlidir. Bu iki faktör, nanoakışkanların özelliklerini ve çeşitli uygulamalarını incelemek için temel ön koşullardır. Son derece kararlı nanoakışkanlar yaratmanın anahtarı, tek boyutlu nanopartikülleri topaklanmadan önce etkili bir şekilde dağıtmakta yatmaktadır. Bunu başarmak için araştırmacılar, nanoakışkan üretimi için çok sayıda tek adımlı ve iki adımlı fiziksel ve kimyasal süreçler geliştirdiler. Nanoakışkanlar oluşturmak için sürekli olarak farklı yöntemleri keşfediyor ve geliştiriyorlar. Süreçler şu şekilde özetlenebilir:

Tek adımlı metot:

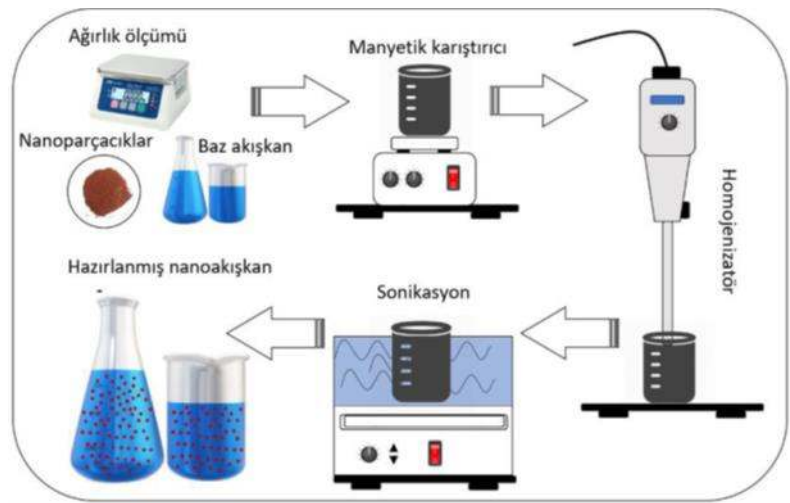
Tek adımlı yöntem, nanoparçacıkların hazırlanmasının nanoakışkanların sentezi ile birleştirilmesini içerir; burada nanoparçacıklar doğrudan fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknikleri veya sıvı kimyasal yöntemler kullanılarak hazırlanır. Bu yaklaşımda, nanoparçacıkların depolanması, taşınması ve ayrık dağılımı süreçleri ortadan kaldırılarak nanoparçacıkların birikmesi azaltılır ve sıvı stabilitesi artırılır. Nanopartiküllerin sentezi ve baz sıvıya dağılımı, tek bir adımda eş zamanlı olarak gerçekleşir. Örneğin, Argonne tek adımlı bir nanoakışkan üretim sistemi geliştirdi, burada metalik kaynak malzemenen nano ölçekli buhar doğrudan düşük buhar basınçlı sıvılara dağıtılır, bu da herhangi bir dağıtıcı olmaksızın Cu nanopartiküllerinin kararlı süspansiyonları ile sonuçlandı [15]. Diğer bir tek adımlı fiziksel süreç, boncuklu değirmenlerle ıslak öğütme teknolojisini içerir. Bununla birlikte, tek adımlı fiziksel yöntemler, büyük ölçekli nanoakışkan sentezi için uygun olmayabilir ve ilgili maliyet yüksek olabilir. Sonuç olarak, tek aşamalı kimyasal yöntem hızla ivme kazanıyor. Zhu ve Liu ve ark. kararlı metalik nanoakışkanlar üretmek için tek adımlı kimyasal indirgeme yöntemlerini kullanmışlardır [16, 17]. Ek olarak, Phuoc ve ark., sıvı içinde tek adımlı optik lazer ablasyonu kullanarak Ag-su nanoakışkanlarını başarıyla üretti [18]. Tek adımlı sürecin birincil avantajı, nanopartiküllerin nispeten saf olması ve daha tekdüze boyutlara sahip olmasıdır. Avantajlarına rağmen, tek adımlı yöntemin bazı dezavantajları da vardır. En önemli

endişelerden biri, eksik reaksiyonlar veya stabilizasyon nedeniyle nanoakışkanlarda artık reaktanların varlığıdır. Ayrıca, bu yöntem yalnızca düşük buhar basınçlı temel sıvılarla uyumludur ve belirli durumlarda uygulanabilirliğini sınırlar. Sonuç olarak, tek adımlı yöntem, tek tip nanoparçacık boyutlarına sahip nanoakışkanları sentezlemek için uygun ve verimli bir yaklaşım sunar. Araştırmacılar, sınırlamalarının üstesinden gelmek ve gelişmiş maliyet etkinliği ve kararlılığı ile büyük ölçekli nanoakışkan üretimi potansiyelini kullanmak için bu yöntemi keşfetmeye ve iyileştirmeye devam ediyor [13].

İki adımlı metot

Bu yöntemde nanopartiküller kuru toz formunda üretilir veya elde edilir ve daha sonra manyetik karıştırıcılar, ultrasonik banyolar, homojenleştiriciler, yüksek parçalayıcı karıştırıcılar ve boncuk karıştırıcılar gibi çeşitli teknikler kullanılarak baz sıvıya dağıtılır. Bu iki aşamalı süreç, maliyet etkinliği ve çeşitli şirketlerden nanoparçacıkların bulunabilirliği nedeniyle nanoakışkan sentezi için yaygın olarak benimsenmiştir. Araştırmacılar bu yöntemi Al_2O_3 , TiO_2 , Cu ve karbon nanotüpler gibi farklı nanopartiküllerle nanoakışkanlar oluşturmak için kullandılar [19].

Tek adımlı yaklaşıma kıyasla iki adımlı metodolojinin ana dezavantajlarından biri, işlem sırasında daha yüksek partikül birikimidir. Bu sınırlamaya rağmen, iki aşamalı yöntem hem büyük hem de küçük miktarlarda nanoakışkanlar üretmek için en sık kullanılan yaklaşım olmaya devam ediyor ve bu da onu çeşitli nanoakışkan türleri oluşturmak için pratik kılıyor. Şekil 2.20'deki adımlı yöntemin şematik gösterimi görülmektedir [19].



Şekil 2.20. İki adımlı hazırlama metodu [12]

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerin Delinebilirliği Üzerine Yapılan Çalışmalar

Dharan ve Won, hasarı en aza indirirken ve üretkenliği en üst düzeye çıkarırken kompozitlerin verimli bir şekilde işlenmesini sağlamak amacıyla akıllı bir akıllı kontrolör geliştirdi. Araştırmacılar, dikey bir işleme merkezi kullanarak KFTP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) üzerinde delme deneyleri gerçekleştirdiler ve deneyler, 1000 rpm'lik sabit bir iş mili hızında 100, 200, 300, 400, 500, 700 ve 1000 mm/dak'lık değişen ilerleme hızlarını içeriyordu. Delme işlemi sırasında 6.35, 7.94 ve 9.53 mm çaplarında karbür burğu matkaplar kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, ilerleme hızı ile itme kuvveti arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ve ilerleme hızında bir artışın daha yüksek itme kuvvetine yol açtığını ortaya koydu [21].

Zhang ve ark. özellikle parçalanma ve tüylenmeye odaklanarak, karbon elyaf takviyeli levhalarda delme sırasında delaminasyon mekanizması üzerine bir araştırma yürütmüştür. Çalışma, bu delaminasyon mekanizmalarını farklı işleme koşullarına göre karakterize etmeyi amaçladı. Bunu başarmak için, delme testleri için 3000, 6000, 9000, 12000, 18000 ve 24000 rpm iş mili hızları ve 24, 44, 66, 91.2 ve 120.8 mm/dk ilerleme hızları gibi kesme parametreleri seçilmiştir. Delme testleri iki tip iş parçası üzerinde gerçekleştirilmiştir: 4 mm kalınlığında çok yönlü KFTP ve 2 mm kalınlığında tek yönlü KFTP. Deneylerde belirtilen kesme parametrelerine göre 4.8, 5.5 ve 6 mm çapında karbür matkaplar kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları birkaç önemli bulguyu ortaya çıkardı. Aynı kesme koşulları altında, tek yönlü KFTP plakada parçalanma seviyesinin çok yönlü KFTP plakaya göre daha yüksek olduğu gözlemlendi. Ayrıca, delme işlemi sırasında pullanma kusurunun tüylenmeye göre daha ciddi hasara neden olduğu tespit edilmiştir. İlerleme hızı ve matkap çapı, pullanma mekanizmasını etkileyen ana faktörler olarak belirlenmiştir [22].

Davim ve Reis tarafından yürütülen bir çalışmada, kesme hızı ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin, delme işlemleri sırasında karbon elyaf takviyeli polimerlerde (KFTP) güç tüketimi (Pc), özgül kesme basıncı (Ks) ve delaminasyon üzerindeki etkisinin araştırılmasına odaklanılmıştır. Deneyleri gerçekleştirmek için araştırmacılar, 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızları ve 0,05, 0,1 ve 0,2 mm/dev ilerleme hızları ile bir deney planı oluşturarak Taguchi deney tasarımını kullandılar. Çalışmada iki farklı karbür matkap

kullanıldı: 3 mm çapında helis kanallı "Straight shank" K10 karbür matkap ve 5 mm çapında "Brad & Spur" K10 karbür matkap. Deney sonuçları birkaç önemli bulguyu ortaya çıkarmıştır. İlerleme hızının, kullanılan matkap türünden bağımsız olarak, g  tüketimi, özgül kesme basıncı ve girişteki delaminasyon üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu gözlemlendi. Ayrıca her iki matkapta da girişteki delaminasyonun çıkışa göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, daha yüksek kesme hızlarında ve ilerleme hızlarında delaminasyonun arttığı gözlemlenmiştir. [23].

Tsao ve Hocheng, üç farklı matkap geometrisi kullanarak karbon elyaf takviyeli plastik (KFTP) laminatta delaminasyon faktörünü tahmin etmeyi ve değerlendirmeyi amaçlayan bir çalışma yürütmüştür. Araştırmacılar, deneysel tasarımlarının temeli olarak Taguchi'nin yöntemini ve varyans analizini (ANOVA) kullandılar. KFTP laminatındaki delaminasyonu değerlendirmek için, delaminasyonun kapsamı ve yeri hakkında ayrıntılı bilgi sağlayan bir ultrasonik C-Taraması kullanıldı. Deneyler, 0.01, 0.02 ve 0.03 mm/dev ilerleme hızları, 800, 1000 ve 1200 rpm iş mili hızları ve 6, 8 ve 10 mm matkap çapları dahil olmak üzere çeşitli kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Verileri analiz eden araştırmacılar, KFTP laminattaki delaminasyon ile seçilen kesme parametreleri, yani ilerleme hızı, iş mili hızı ve matkap çapı arasında bir ilişki kurdular. Sonuçlar, delme işlemleri sırasında genel delaminasyon faktörüne en önemli katkının ilerleme hızı ve matkap çapı olduğunu gösterdi [24].

Davim ve ark. delaminasyon faktörünü (Fda)  lmek için dijital analiz kullanan yeni bir teknik ortaya koydu. Çalışma, farklı kesme koşullarının fiber takviyeli polimer laminatlar üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçladı. Deneysel tasarım için, 3 mm kalınlığında karbon elyaf takviyeli polimer (CFTP) plakalar, 5 mm çapında bir helisel karbür matkap kullanılarak delinmiştir. Delaminasyon davranışını incelemek için 50, 60 ve 70 m/dak kesme hızı ve 0.25, 0.30 ve 0.35 mm/dev ilerleme hızı kesme parametreleri seçildi. Delme işleminin ardından, delaminasyon faktörünü değerlendirmek için hasarlı alanın dijital analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, dijital analiz tekniğinin, karbon fiber takviyeli plastiklerde delmeden kaynaklanan hasarın tahmin edilmesinde ve miktarının belirlenmesinde etkili olduğunu göstermiştir [25].

Tsao, bir karot matkabı kullanarak dokuma karbon fiber takviyeli plastiğin (KFTP) delinmesi üzerine deneysel bir araştırma yaptı. Çalışmanın ana odak noktası, delme parametrelerinin, özellikle çap oranı, ilerleme hızı ve iş mili hızının, delme işlemi

sırasında delaminasyonun meydana gelmesi üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Deneyleri yürütmek için, delme parametrelerini sistematik olarak değiştirmek için ortogonal L18 dizili Taguchi yöntemi kullanıldı. Çap oranı, ilerleme hızı ve mil hızının farklı kombinasyonları test edildi ve elde edilen delaminasyon seviyeleri değerlendirildi. Deneysel sonuçlar, dokuma KFTP'de delaminasyonun çap oranı ve iş mili hızının azalmasıyla arttığını, ilerleme hızının artmasıyla ise arttığını ortaya koymuştur. En az delaminasyon sergileyen en iyi delme parametre kombinasyonu 0,74 mm/mm çap oranı, 8 mm/dk ilerleme hızı ve 1200 rpm iş mili hızı olarak bulunmuştur [26].

Faraz, KFTP kompozit laminatların delinmesi sırasında kaplanmamış sement karbür aletlerin keskinliğinin veya kütlüğünün bir göstergesi olarak hizmet eden, kesici kenar yuvarlaması olarak bilinen bir aşınma özelliğini araştırmak için bir çalışma yürütmüştür. Temel amaç, bu yeni aşınma özelliğini ve bunun geleneksel yan aşınma modelleri ile ilişkisini değerlendirmektir. Araştırmacılar, kesici kenar yuvarlanmasını belirlemek için dört farklı matkap türü kullanarak delme deneyleri gerçekleştirdiler: geleneksel tip ve üç farklı özel tasarım. Delme testleri 50 m/dak sabit kesme hızında ve 0,1 mm/dev sabit ilerleme hızında 4 mm çapında matkaplar kullanılarak gerçekleştirilmişti Deneyler boyunca delme kuvveti ve tork gibi mekanik yükler ölçülmüş ve delik giriş ve çıkış noktalarında delaminasyon gözlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, yeni aşınma türü olan kesici kenar yuvarlatmanın seçilen tüm takımlar için neredeyse benzer şekilde geliştiğini ve matkaplarla ilişkili geleneksel yan aşınma modellerinden pratik olarak bağımsız görüldüğünü ortaya koydu. Bu bulgu, kesici kenar yuvarlanmasının, özellikle KFTP kompozit laminatları delerken, takım keskinliği veya kütlüğünün güvenilir bir ölçüsü olarak kullanılabileceğini göstermektedir [27].

Iliescu ve ark. karbon kompozit malzemelerin delinmesi sırasında itme kuvvetinin tahminine ve değerlendirilmesine odaklanan bir çalışma yürütmüştür. Araştırma, itme kuvveti, delme parametreleri ve takım aşınması arasındaki ilişkiyi kuran bir model geliştirmeyi amaçladı. Deneyler için iki tip burğu matkap kullanıldı: Diager'in 6 mm çapında kaplamasız ve elmas kaplı burğu matkapları. Testler 0.05, 0.1 ve 0.15 mm/dev farklı ilerleme hızlarında, 3000, 6000, 9000 ve 12000 rpm iş mili hızlarında ve 56.55, 113.10, 169.65 ve 226.13 m/dak kesme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel araştırmalar sayesinde, araştırmacılar itme kuvvetini etkileyen en önemli faktörlerin ilerleme hızı, kesme hızı ve takım aşınması olduğunu bulmuşlardır. Geliştirilen model,

bu delme parametrelerine ve takım aşınmasına dayalı olarak itme kuvvetinin tahmin edilmesini sağlayarak, karbon kompozit malzemelerin delme işlemine ilişkin bilgiler sağladı [28].

Miskoviç ve Koboeviç tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin delinmesi sırasında kesici takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı ve delaminasyon arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada, ağırlıkça %55 oranında karbon fiber içeren 4 mm kalınlığında dokuma karbon fiber takviyeli epoksi matris kompozit (KFTP) kullanıldı. 6 mm çapında Kobaltlı Yüksek Hızlı Çelik (HSS-Co), Azaltılmış Kobaltlı Yüksek Hızlı Çelik (HSS-R) ve tungsten karbür matkap ile iki faktör için üç seviyeli ortogonal bir dizi kullanılarak deneysel bir tasarım tasarlandı. Kesme hızları 16, 24 ve 32 m/dak olarak ayarlandı ve ilerleme hızları 0.05, 0.10 ve 0.20 mm/dev olarak ayarlandı. Deney sonuçları birkaç önemli bulguyu ortaya çıkardı. İtme kuvveti ve delaminasyonun kesme hızına, ilerleme hızına, takım geometrisine ve takım aşınmasına bağlı olduğu bulundu. Yüksek kesme hızlarında ve yüksek ilerleme hızlarında delaminasyonun arttığı gözlenmiştir. Ek olarak, matkabın keski kenar uzunluğu azaltılarak itme kuvveti önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca, HSS-R matkap, test edilen matkaplar arasında en yüksek delaminasyonu sergiledi [8].

Grilo ve ark. delik delme sırasında karbon fiber takviyeli polimerin (KFTP) delaminasyonu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma, üç farklı 5 mm çaplı matkap geometrisinin ve kesme parametrelerinin, özellikle ilerleme hızı ve iş mili hızının, delaminasyon üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçladı. Delaminasyon derecesini ölçmek için iki delaminasyon faktörü kullanıldı. Deneyler 3 mm kalınlığındaki KFTP numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, delik alanını ölçmek ve delaminasyonun neden olduğu hasar bölgesinin maksimum çapını belirlemek için delinmiş yüzeylerin işlenmiş görüntü analizini içeren tahribatsız bir yöntem kullandılar. Çalışmanın sonuçları, SPUR olarak bilinen matkap geometrisinin, delaminasyonu en aza indirme açısından en uygun sonuçları gösterdiğini göstermiştir. Spesifik olarak, 2025 mm/dak'lık bir ilerleme hızı ve 6750 dev/dak'lık bir işmili hızının birleşimi, delaminasyona neden olmadan daha yüksek üretim hızlarına yol açtı. [29].

Shahrajabian ve ark, KFTP'de delme sırasında çeşitli işleme parametrelerinin ve takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve itme kuvveti üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bunu başarmak için, farklı takım uç açılarına sahip

(60°, 100° ve 140°) matkaplar kullanılarak farklı iş mili hızlarında (1250, 2625 ve 4000 rpm) ve ilerleme değerlerinde (50, 425 ve 800 mm/dk) KFTP numuneleri üzerinde deneyler yapıldı. Deneyler için tam faktöriyel bir tasarım kullanıldı ve ardından verileri analiz etmek için varyans analizi (ANOVA) uygulandı. Bu kombinasyonları tam bir faktöriyel tasarım kullanarak test ederek, araştırmacılar her bir parametrenin delme işlemi üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirebildiler. Yapılan deneyler sonucunda İlk olarak, yüzey pürüzlülüğünün yüksek ilerleme oranları ile arttığı, ancak kesme hızı arttıkça azaldığı gözlenmiştir. İkinci olarak, itme kuvvetleri daha yüksek ilerleme oranları ile artarken, artan kesme hızı ile azalmaktadır. Üçüncü olarak, delaminasyon faktörü daha yüksek ilerleme hızlarıyla artarken, artan mil hızı ve takım ucu açısı ile azalmaktadır [30].

Wang ve ark. farklı derinliklerde delik delme sırasında delaminasyon sürecini araştırmak için deneyler yapmıştır. Deliğin radyal yönü boyunca farklı kesit alanlarında meydana gelen delaminasyonu gözlemlediler. Araştırmacılar delme derinliğini değiştirirken delaminasyon sürecini analiz ettiler ve gizli bir delaminasyon bölgesi tespit ettiler.

Deney düzeneği, 3,1 mm kalınlığında KFTP numunelerinin 5000 dev/dk sabit iş mili hızında ve 0,02 mm/dev ilerleme hızında delinmesini içeriyordu. Delme işlemi sırasında 2,1 mm ile 5,3 mm delik derinliği arasında delaminasyon meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma, kritik delaminasyon konumunu ve itme kuvvetini belirlemek için teorik analizler içermektedir. Araştırmacılar, kritik delaminasyonun teorik konumunun deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde eşleştiğini buldular [31].

Merino-Perez ve ark., Karbon Fiber Takviyeli Polimer (KFTP) kompozitlerin delme işlemi sırasında malzeme özelliklerinin ve kesme hızının ısı dağılımı üzerindeki etkisini inceledi. Kuru delme koşullarında 10 mm kalınlığında dokuma KFTP'yi delmek için Sandvik Coromant's tarafından üretilen 6,35 mm çapında kaplamasız tungsten-karbür (CoroDrill 856) kesme takımı kullandılar. Çalışma iki aşamadan oluştu. İlk aşamada, araştırmacılar üç farklı KFTP sisteminin delinmesindeki ısı dağılımını karşılaştırdılar. Isı dağılımını analiz etmek için termokupllar ve bir kızılötesi kamera kullanarak delinmiş deliğin etrafındaki sıcaklıkları ölçtüler. Araştırma, polimer matrisin çapraz bağlanma yoğunluğunun, kristallik derecesinin ve karbon liflerinin yapısının delme sırasında genel sıcaklığı ve ısı dağılımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya çıkardı. İkinci aşamada araştırma, kesme hızının delme sırasında oluşan sıcaklıklar üzerindeki etkisine odaklandı.

Bulgular, 150 ila 200 m/dak arasında değişen kesme hızlarının, 50 ila 100 m/dak arasında değişen kesme hızlarına kıyasla daha yüksek ısı konsantrasyonu ile sonuçlandığını göstermiştir [32].

Çelik ve ark., SiAlON çubuktan yapılmış dört farklı geometriye sahip kesici takım setleri kullanarak havacılık sınıfı KFTP kompozitlerinin delme işlemini araştırdı. Araştırmacılar, 6,4 mm çapında SiAlON kesici takımlar kullanarak 10 mm kalınlığında tek yönlü KFTP üzerinde bir delme testi gerçekleştirdiler. Çalışma, iş mili hızı ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin ve SiAlON delme takımlarının geometrik özelliklerinin delme işlemi sırasında kesme kuvvetleri ve soyulma delaminasyonu üzerindeki etkilerini inceledi. Deney düzeneği için, araştırmacılar kesme parametreleri olarak 8000 ve 4000 rpm iş mili hızlarını ve 0,05, 0,10, 0,15 ve 0,20 mm/dev ilerleme oranlarını seçtiler. Araştırmanın sonuçları, yeni SiAlON delme takımlarının uç açısı ve keski kenar uzunluğunun, delme sırasında maksimum itme kuvvetini ve delaminasyonu etkileyen birincil parametreler olduğunu göstermiştir. Ayrıca SiAlON delme takımlarının kesici uçlarında itme kuvvetinin abrasif aşınmaya yol açtığı gözlemlenmiştir [33].

Poulachon ve ark., KFTP'nin delme işlemi sırasında deliklerin yüzey kalitesini araştırmaya odaklandı. Araştırmacılar, ana kesici kenarlar ve ikincil (kenar boşluğu) kenarlar dahil olmak üzere takım kenarlarında hasarlar gözlemlediler. Ayrıca silindirik bir cihaz kullanarak matkap aşınmasına ve liflerin yönüne dayalı olarak kesilmemiş liflerin miktarını değerlendirdiler. Delinmiş deliklerin kalitesini sağlamak için araştırmacılar, deliğin çap toleransına dayalı olarak delik sayısını sınırlayan bir aşınma kriteri tanımladılar. Bu kriter, delme işlemini kontrol etmelerine ve kesme takımında aşırı aşınmayı önlemelerine olanak tanır. Delme testleri, 35 mm kalınlığında bir KFTP numunesi üzerinde 12 mm çapında kaplanmamış karbür matkap kullanılarak kuru kesme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme hızı 100 m/dak ve ilerleme hızı 0,05 mm/dev olarak ayarlanmıştır, bu da endüstriyel kesme koşullarını yakından taklit eder. Deneysel sonuçlar, delme aletinin hem ana hem de ikincil kenarlarında ciddi aşınma gösterdi. Gerekli delik çapı toleransını korumak ve deliklerin kalitesinden ödün vermemek için araştırmacılar, matkabın değiştirilmesi veya yenilenmesi gerekmeden önce 22 adede kadar deliğin delinebileceğini belirlediler [34].

İsmail vd. çeşitli delme parametrelerinin (ilerleme hızı, kesme hızı ve itme kuvveti), matkap çaplarının ve talaş oluşumunun kenevir elyaf takviyeli polimer (KETP) ve karbon

fiber takviyeli polimerde (KFTP) delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirdi. Araştırmacılar, kuru işleme koşullarında 5 mm ve 10 mm çapında yüksek hızlı çelik (HSS) matkaplar kullanarak 5 mm kalınlığındaki KETP ve KFTP numuneleri üzerinde delme deneyleri gerçekleştirdiler. Deneysel tasarımlarında, 0,05, 0,10, 0,15 ve 0,20 mm/dev ilerleme hızları ve 10, 20, 30 ve 40 m/dak kesme hızları dahil olmak üzere farklı kesme parametrelerini dikkate aldılar. Sonuçlar, ilerleme hızı ve itme kuvveti artışının hem KETP hem de KFTP numunelerinde daha yüksek delaminasyona ve yüzey pürüzlülüğüne yol açtığını, kesme hızının ise aynı etkiyi göstermediğini göstermiştir. Ayrıca, matkap çapı ve farklı talaş oluşum tiplerindeki artış, talaş kaldırma oranı arttıkça her iki malzemede de yüksek delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğüne katkıda bulunmuştur. Optimum delme sonuçlarına ulaşmak için, yazarlar hem KETP hem de KFTP numuneleri için minimum yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon faktörü ile sonuçlanan 0,05-0,10 mm/dev ilerleme hızları ve 30 m/dak kesme hızı kullanılmasını önermişlerdir [35].

Feito ve ark., karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin (KFTP) delme işlemi sırasında kademeli matkap ucu geometrisinin işleme hasarı üzerindeki etkisini analiz etmek için bir çalışma yürütmüştür. Delme sırasında kompozit hasarı önlemek için özel olarak tasarlanmış kademeli bir matkabı geleneksel bir matkapla karşılaştırdılar. Deneyler, 6 mm çapında geleneksel bir matkap ve 4 mm ila 6 mm arasında değişen adımli bir matkap kullanılarak 2,2 mm kalınlığında dokuma KFTP üzerinde gerçekleştirildi. Araştırmacılar, kademeli matkap kullanımının, delme verimliliği açısından potansiyel bir faydaya işaret eden itme ve torkta azalma ile sonuçlandığını gözlemlediler. Bununla birlikte, delaminasyondaki azalma yalnızca düşük ilerleme hızlarında önemliydi. Kademeli matkabın etkilerini daha fazla araştırmak için Feito ve ark. adım geometrisine dayalı sayısal bir model geliştirdi. Bu model, farklı ilerleme hızı ve kesme hızı değerleri kombinasyonları için itme kuvvetini ve delaminasyonu tahmin etmelerini sağladı. Sayısal modelden elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle iyi bir uyum gösterdi [36].

Kuo ve ark., yeni geometrik tasarımlara sahip elmas kaplı çift uç açılı ve çok yüzlü matkaplar üzerinde bir çalışma yürütmüştür. Araştırmalarının temel amacı, bu iki farklı matkap tasarımı kesme kuvvetlerine maruz kaldığında takım aşınması ve kırılma arasındaki ilişkiyi araştırmaktı. Bunu başarmak için, çeşitli kesme koşulları altında takım aşınması ve kırılma modlarının belirlenmesine odaklanarak 3,5 mm kalınlığında dokuma

KFTP laminatlar üzerinde delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler kuru işleme koşullarında iki farklı kesme hızında (50 m/dk ve 75 m/dk) ve üç ilerleme hızında (0,05 mm/dev, 0,1 mm/dev ve 0,15 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. ISO standardına (ISO 3685) göre kenar aşınmasını değerlendirmek için elmas kaplı matkaplar kullanılarak toplamda 140 delik açıldı. Çalışmanın sonuçları, iki matkap türü için ilginç bulgular ortaya çıkardı. Çift noktalı matkaplar, delme sırasında tekrarlanan gerilim döngülerinden kaynaklanan yorulma kırılmaları sergiledi. Öte yandan, çok yüzölçümlü matkaplarda, delme işlemi sırasında aşırı titreşim nedeniyle ufalanma ve mikro çatlaklar görülmüştür [8].

3.2 Farklı Soğutma Koşullarında KFTP'lerin Delinebilirliği Üzerine Yapılan Çalışmalar

Xia ve ark., farklı delme yöntemlerinin, özellikle kuru delme ve kriyojenik delmenin, karbon fiber takviyeli polimer (KFTP) kompozitler üzerindeki etkilerini keşfetmeye çalıştı. Her delme yönteminin genel delme performansını nasıl etkilediğini anlamak için itme kuvveti, tork, delaminasyon faktörü ve yüzey özellikleri gibi çeşitli delme parametrelerini incelediler. Delme sırasında kesme aletini soğutmak için sıvı nitrojen kullanmayı içeren kriyojenik soğutma uygulaması, yüzey kalitesi açısından umut verici sonuçlar verdi. Araştırmacılar, kriyojenik soğutmanın kuru delmeye kıyasla yüzey pürüzlülüğünde bir azalmaya yol açtığını gözlemlediler. Yüzey kalitesindeki bu gelişme, kesici takım ile KFTP malzemesi arasındaki gelişmiş ısı dağılımına ve azaltılmış sürtünmeye bağlanabilir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğündeki iyileşmeye rağmen, çalışma ayrıca kriyojenik delme ile ilgili bazı dezavantajları da ortaya çıkardı. Kriyojenik soğutma kullanıldığında, araştırmacılar delme işlemi sırasında daha yüksek itme kuvveti ve tork üretildiğini gözlemlediler. Kesme kuvvetlerindeki bu artış, talaş oluşumunda ve takım-malzeme etkileşimlerinde değişikliklere yol açan kriyojenik soğutma sıvısının termal özelliklerine bağlanabilir. Ek olarak, deliğin giriş ve çıkışındaki delaminasyon veya hasarın derecesini ölçen delaminasyon faktörünün kriyojenik soğutma koşullarında arttığı bulundu. Daha yüksek itme kuvveti ve tork, delaminasyondaki artışa katkıda bulunmuş olabilir, bu da kriyojenik delik delmenin açılan deliklerin kalitesi üzerinde potansiyel bir olumsuz etkiye sahip olabileceğini gösterir [37].

Nagaraj ve ark., üç farklı soğutma ortamı kullanarak KFTP'lerin delinmesi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüştür: kuru, minimum miktarda yağlama (MMY) ve kriyojenik soğutma. MMY'nin bir soğutma yöntemi olarak kullanılması bazı ilginç

bulgulara yol açmıştır. MMY, delik çapının doğruluğunu artırırken delme sırasında hem itme kuvvetinde hem de delaminasyon faktöründe artışa neden oldu [38].

Wang ve ark., KFTP'lerin MMY ile delinmesi sırasında soğutma sıvısı çıkış konumunun etkisini daha fazla araştırdı. MMY soğutma sıvısı çıkışının konumunun delme işlemi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gözlemlediler. Spesifik olarak, MMY soğutma sıvısı uygulandığında daha fazla delaminasyon ve çapak gözlemlendi. Ayrıca, soğutma sıvısı çıkışı ikincil kesme kenarlarının önünde bulunan takım, çıkışı ikincil kesme kenarlarının ucunda olan matkap ucuna göre daha fazla hasar vermiştir. Wang ve arkadaşlarının araştırmasından elde edilen sonuçlar, MMY soğutma sıvısının iş parçasına doğrudan püskürtülmesinin delme sırasında daha yüksek itme kuvvetlerine yol açtığını ve ardından daha fazla delaminasyona neden olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, bir soğutma yöntemi olarak MMY kullanıldığında, delaminasyonu azaltmak ve genel delme performansını iyileştirmek için soğutma sıvısı çıkış konumunun optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır [39].

İqbal ve ark. minimum miktarda yağlama (MMY), gaz keleşbeği ile soğutma ve evaporatif kriyojenik soğutma yöntemleri arasında karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirdi. Amaç, işleme operasyonları sırasında her bir soğutma tekniğinin proses uygulanabilirliğini ve performansını değerlendirmektir. Araştırmalarının sonuçları, MMY'nin üçü arasında en uygun soğutma yöntemi olarak ortaya çıktığını gösterdi. Kompozit malzemelerde delme de dahil olmak üzere çeşitli işleme uygulamaları için daha verimli ve güvenilir bir seçenek olabileceğini öne sürerek üstün proses uygulanabilirliği sergiledi. Öte yandan, soğutma sıvısının akışını düzenleyerek işleme bölgesinin soğutulmasını içeren gaz keleşbeği soğutması da umut verici bir performans gösterdi. Kısmi keleşbeği soğutmasıyla ilişkili ılıman sıcaklık, buharlaşmalı kriyojenik soğutmaya kıyasla gelişmiş performansına katkıda bulunmuştur. Bir kriyojenik sıvının uygulandığı buharlaşmalı soğutma durumunda, soğutma ortamının hızlı buharlaşmasıyla ilişkili potansiyel zorluklar nedeniyle sonuçlar o kadar olumlu olmayabilir [40].

Kim ve ark., nano-katı yağlamanın KFTP kompozitlerinin mikro delinmesi üzerindeki etkisini araştırdı. Araştırmacılar, deneylerinde iki tür nano-partikül yağlayıcı kullanımını incelediler ve sonuçları kuru kesme ve hava soğutma teknikleriyle karşılaştırdılar. Bulgular, nano parçacıklı yağlayıcıların uygulanmasının, kuru kesme ve havayla soğutma yöntemlerine kıyasla daha iyi delik kalitesine yol açtığını ortaya koydu.

Spesifik olarak, nanoparçacık yağlayıcılarla açılan delikler, daha düşük delaminasyon faktörleri ve azaltılmış kesilmemiş lif alanları sergiledi, bu da KFTP kompozitlerine verilen hasarda önemli bir azalmaya işaret ediyor. Sonuçlar, mikro delme işlemine nanokatı yağlamanın dahil edilmesinin gelişmiş işleme performansına katkıda bulunduğunu ve geleneksel kesme ve soğutma yöntemleriyle ilişkili olumsuz etkileri en aza indirdiğini gösterdi.[41].

Morkavuk ve ark., kriyojenik soğutmayı kullanırken KFTP'ler üzerinde kanal frezeleme deneyleri gerçekleştirdi ve ardından bunun malzeme hasarı üzerindeki etkisini analiz etti. Araştırmacılar, kriyojenik işlemenin işlenmiş yüzeylerde daha az hasara, daha küçük katmanlara ayrılmış alanlara ve iyileştirilmiş yüzey pürüzlülüğüne yol açtığını buldular, bu da KFTP işleme için uygun bir soğutma yöntemi olma potansiyelini ortaya koyuyor. Bununla birlikte, düşük hasar ve iyileştirilmiş yüzey kalitesi açısından faydalarına rağmen, kuru öğütme deneylerinden elde edilen sonuçlara kıyasla kriyojenik öğütme sırasında kesme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, kriyojenik soğutmanın hasarı azaltma ve yüzey kalitesini iyileştirme açısından avantajlar sunarken, artan kesme kuvvetini hesaba katmak için işleme parametrelerinde ayarlamalar gerektirebileceğini göstermektedir [42].

Kerrigan ve Scaife, KFTP delme sırasında takım performansı üzerindeki üç farklı kesme sıvısının etkisinin bir analizini gerçekleştirdi. Bulguları, kuru delmenin test edilen tüm sıvılara kıyasla daha düşük itme kuvveti ve torkla sonuçlandığını gösterdi. Ayrıca kuru delmenin kesici takımda daha az kaplama hatasına yol açtığını gözlemlemişlerdir [43].

Xia ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, itme kuvveti, tork, matkap ucu kenar aşınması, delaminasyon faktörü ve yüzey özelliklerine odaklanarak KFTP'lerin kuru ve kriyojenik delik delmei arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Araştırmacılar, kriyojenik soğutmanın yalnızca kesme kenarı yuvarlama ve takım aşınmasını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de iyileştirdiği sonucuna vardı. Bununla birlikte, kriyojenik soğutma uygulamasının itme kuvvetini, torku ve delaminasyon faktörünü artırdığını belirtmişlerdir [37].

Khairusshima ve Sharifah kuru ve soğutulmuş hava (-10 °C, 0,55 MPa hava basıncı ve 4,10 m/s akış hızında) ortamlarında KFTP işleme sırasında takım aşınmasını araştırdı.

Soğutulmuş hava kullanmanın takım ömrünü %30 artırdığını buldular. ANOVA sonuçları ilerleme hızının takım ömrü üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu vurguladı

Meshreki ve ark. kuru, düşük basınçlı ve yüksek akışlı MMY (Minimum Miktar Yağlama), yüksek basınçlı ve düşük akışlı MMY ve taşma soğutma dahil olmak üzere çeşitli soğutma koşullarında KFTP'nin delme performansını karşılaştırmak için bir çalışma yürütmüştür. Bulgular, MMY'nin delme işlemi sırasında en düşük delme sıcaklığı ve sıcaklık değişimi ile sonuçlandığını ortaya koydu. Ek olarak, MMY, özellikle yüksek basınçlı ve düşük akışlı MMY ile taşmalı soğutmanıninkine benzer delme kalitesi sağladı. Sonuç olarak, kesme sıvısı tüketimi önemli ölçüde azaltılarak MMY'yi KFTP delme için verimli ve çevre dostu bir soğutma yöntemi haline getirdi [44].

Iskandar ve diğerleri tarafından yürütülen araştırma, yüksek hava ve düşük yağ akış hızlarının kombinasyonunun, optimum bir püskürtme etkisine yol açan gelişmiş damlacık parçalanma mekanizmasıyla sonuçlandığını göstermiştir. Bu kombinasyon ayrıca daha tutarlı jetler üretti, girdap akımlarının oluşumunu en aza indirdi ve kesme alanına etkili bir şekilde girdi. Deneysel bulgular, MMY'nin (Minimum Miktar Yağlama) gaz-sıvı kombinasyonunun takım aşınmasını önemli ölçüde azaltabildiğini, takımın ömrünü uzatabildiğini ve kesme işlemi sırasında işleme hatalarını en aza indirebildiğini ortaya koydu. Genel olarak, bu özel MMY konfigürasyonunun kullanımının işleme performansını artırmada ve takımla ilgili sorunları azaltmada faydalı olduğu kanıtlanmıştır [45].

Xu ve arkadaşları CFRP/Ti6Al4V yığınlarının işlenebilirliğini ve delik kalitesini değerlendirmek için hem TiAlN kaplı hem de elmas kaplı matkaplar kullanılarak delme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, MMY'nin CFRP/Ti6Al4V yığınlarının delme işlemi sırasında delme torkunda bir azalmaya yol açtığını ve spesifik kesme enerjisi tüketimini en aza indirdiğini ortaya koydu. Ayrıca, MMY kullanımı genel işleme kalitesini geliştirerek, kuru kesme koşuluyla karşılaştırıldığında CFRP deliklerinin daha iyi yüzey morfolojilerine ve daha az titanyum çapak oluşumuna neden oldu. Ek olarak, MMY delme yaklaşımı, kesilmiş yığın delikleri için hassas geometrik doğruluk elde etme açısından üstün performans sergileyen elmas kaplı matkaplarla, kesilmiş kompozit delikler için daha yüksek geometrik doğruluk sağlamıştır. [46].

Xu ve ark., soğutma ve yağlama yöntemi olarak MMY (Minimum Miktarda Yağlama) kullanıldığında KFTP ile işlenmiş yüzeylerin yağ emme kapasitesinin güçlü olduğu bulundu. Ancak yağ emilimine rağmen kesici takım ile talaş arasında koruyucu yağ filmi oluşumu etkili bir şekilde sağlanamamıştır. Sonuç olarak bu, kesme kuvvetinde bir artışa yol açtı ve işleme sürecinde delaminasyon hasarına katkıda bulundu. Bu gözlem, kesme kuvvetlerini en aza indirmek ve delaminasyonu önlemek için KFTP işlemede uygun yağlama ve soğutmanın sağlanmasının önemini vurgulamaktadır. [47].

Önceki bazı çalışmaların aksine, Pervaiz ve ark., harici bir konfigürasyonda MMY'nin (Minimum Miktarda Yağlama) performansına ilişkin farklı bulgular sundu. Bu konfigürasyondaki MMY kurulumunun işleme sürecinde düşük performans sağladığını gözlemlediler. Bu sonucun olası bir nedeni, MMY için kullanılan yağlayıcının bir kısmının işleme boşluğuna akması ve kesici takım ile iş parçası arasında yetersiz bir yağlama filmi oluşumuna yol açmasıdır. Yetersiz yağlama filmi, yağlama ve soğutma verimini olumsuz yönde etkilemiş olabilir ve bu da işleme sırasında artan sürtünme ve ısı oluşumuyla sonuçlanmış olabilir. Sonuç olarak bu, takım ömrünün azalmasına, daha yüksek kesme kuvvetlerine ve işlenmiş parçalarda potansiyel olarak ödün verilmiş yüzey kalitesine yol açmış olabilir. MMY sisteminin ve konfigürasyonunun uygun şekilde optimize edilmesi, etkili yağlama ve soğutmanın sağlanması ve dolayısıyla KFTP işleme proseslerinin genel performansının ve sonuçlarının iyileştirilmesi için çok önemlidir [48].

Gao ve ark., KFTP'nin (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) işlenmesinde farklı yağlama koşullarının (kuru, MMY- Minimum Miktar Yağlama ve CNT NMMY- Karbon Nanotüp bazlı Nano yağlama) etkilerini incelemek için mekanik modeller geliştirdi. Yağlayıcı olarak CNT NMMY kullanmanın, diğer yağlama yöntemlerine (kuru ve MMY) kıyasla kesme kuvvetlerinde, reçine kaplamada ve elyaf çekme kusurlarında önemli azalmalara yol açtığını bulmuşlardır. CNT NMMY'nin uygulanması, kesme sırasındaki mekanik gerilimleri azaltarak ve kesici takım-iş parçası arayüzünde yağlama ve soğutma özelliklerini iyileştirerek KFTP malzemelerde iyileştirilmiş işleme performansı göstermiştir. Kesme kuvvetlerindeki azalma, işlenmiş yüzeylerde hasar olasılığını en aza indirmeye ve KFTP bileşenlerinin genel işleme kalitesini artırmaya yardımcı oldu.[49, 50].

Qu ve ark., karbon nanoparçacıklarını oksidatif modifikasyon yoluyla deiyonize suya dağıtarak ve az miktarda sürfaktan ekleyerek karbon nanoakışkanlar geliştirdiler.

Karbon bazlı Nano-Minimum Miktar Yağlama (NMMY) kullanımının yüzey kalitesini iyileştirmede, işleme kuvvetini azaltmada ve işleme prosesleri sırasında yüzey altı hasarını en aza indirmede faydalı olduğu kanıtlanmıştır [51].

Benzer şekilde, James ve Nejadian bitkisel yağ bazlı NMMY'nin kesme özelliklerini CNT (Karbon Nanotüp), Al₂O₃ (Alüminyum Oksit), Ni (Nikel) ve Al (Alüminyum) dahil olmak üzere farklı nanoparçacıklarla karşılaştırdılar. Yaptıkları deneyler sayesinde, kuru işlemeye kıyasla %2,5 Al₂O₃ + MMY kullanıldığında KFTP/Ti (Karbon Fiber Takviyeli Polimer/Titanyum) kompozitlerinin yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde azaldığını gözlemlediler. Ayrıca, KFTP/Al (Karbon Fiber Takviyeli Polimer/Alüminyum) kompozitler için en iyi sonuçlar %1 CNT + MMY ile elde edilmiş olup, bu da işleme sürecinde iyileştirilmiş yüzey kalitesine işaret etmektedir [52].

Bu bulgular, NMMY'nin çeşitli nanoparçacık türleri ile kullanılmasının, farklı kompozit malzemelerin makineyle işleme performansını artırma potansiyeline sahip olduğunu, bunun sonucunda iyileştirilmiş yüzey kalitesi ve azaltılmış işleme kuvvetleri elde edildiğini göstermektedir.

4. MATERYAL VE METOT

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin minimum miktarda yağlama, nanoakışkan destekli minimum miktarda yağlama ve kuru kesme şartlarında farklı kesme parametreleri ile delinmesi esnasında değişen nanografen oranları sonucu meydana gelen delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü ve delik çapının değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada yapılanlar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

4.1. İş Parçası ve Özellikleri

Deneylerde tek yönlü katmanlardan meydana gelen karbon fiber destekli plakalar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçası TUSAŞ firması tarafından sağlanmıştır. Kullanılan malzemenin boyutları 150x150x6,4 mm ölçülerindedir. Kullanılan plakanın mekanik ve yapısal özellikleri aşağıdaki tabloda belirtilmiştir.

Karbon fiber plaka 32 adet tabakadan oluşmaktadır ve teorik tabaka kalınlığı 0,184 mm'dir. Plakayı oluşturan tabakalardaki fiber oryantasyonları, [45/135/0/0/0/0/90/90/135/0/0/0/0/45/90/90/90/90/45/0/0/0/0/135/90/90/0/0/0/0/135/45] şeklinde sıralanmıştır.

Tablo 4.1. İş parçasının özellikleri

Özellikler	Değeri
Malzeme	UD Tape HexPly AS4/8552/RC34/AW914
Yoğunluk[g/cm ³]	1.59
Resin Bileşimi [%]	34 ± 2
Kürlenmiş Tabaka Kalınlığı[mm]	0.184
Çekme Dayanımı [MPa]	1850
Çekme Modülü [GPa]	135
Tabakalar Arası Kesme Dayanımı ILSS [MPa]	102

4.2 Kesici Takım ve Takım Tutucu

Kesici takım olarak Seco firmasına ait SD205A-6.0-31-6R1-C1 model, 6 mm çapında 60 ve 130 derece uç açılına sahip elmas kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır.

Takım BT40 tipi konik tutucu ile tezgâha bağlanmıştır. Takım özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.



Görsel 4.1. Deneylerde kullanılan kesici takım

Tablo 4.2. Kesici takımın özellikleri

Özellik	Değer
Efektif Kesme Kenarı Sayısı	2
Birincil Uç Açısı	60°
İkincil Uç Açısı	130°
Matkap Çapı	6.0 mm
Toplam Uzunluk	82.0 mm
Kullanılabilir Uzunluk	31.0 mm
Kaplama Türü	Karbür elmas kaplama

4.3 Kullanılan CNC Tezgâh ve Özellikleri

Deneysel çalışmalar Eskişehir Teknik Üniversitesi Merkez Atölyesinde LER VQ-110 4 eksen CNC freze tezgâh kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tezgâh tablası boyutları X ekseninde 100 mm, Y ekseninde 350 ve Z ekseninde 600 mm'dir. İş milinin en büyük dönme hızı 6000 dev/dk'dır.

4.4 Deneylerde Kullanılan Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Yapılan deneylerde Eskişehir Teknik Üniversitesi lisans öğrencileri tarafından TUBİTAK 2209-A projesi kapsamında yapılan basitleştirilmiş bir minimum miktarda yağlama sistemi kullanılmıştır. Delme işlemi sırasında baz yağ ve nanografen katkılı kesme sıvısı basınçlı hava yardımıyla delme bölgesine püskürtülmüştür. Deneyler esnasında 3 bar basınçla delme bölgesine gönderilen yağın debisi 150 ml/saat'dir. Deneylerde kullanılan sistemin ve sistem parçalarının görselleri aşağıda verilmiştir.



Görsel 4.2. *Kullanılan MMY sistemi*



Görsel 4.3. *Manometre*



Görsel 4.4. *Nozul*



Görsel 4.5. Rezervuar

4.5 Deneylerde Kullanılan Nanoakışkanların Hazırlanması

Deneylerde kullanılan nanoakışkanlar Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü Bor Uç laboratuvarında hazırlanmıştır. Kesme sıvısı hazırlanırken baz sıvı olarak Blaser markasının CSF 35 model kesme sıvısı kullanılmıştır. Kesme sıvısının teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.3. Blaser CSF 35 kesme sıvısı özellikleri

Özellik	Değer
40 °C’de viskozite	35 mm ²
20 °C’de yoğunluk	0,90 g/cm ³
Parlama Noktası	333 °C
Ester oranı	>90%
Mineral yağ içeriği	%0
Çinko içeriği	%0
Klor içeriği	%0
Sülfür İçeriği	%0
Renk	Sarı

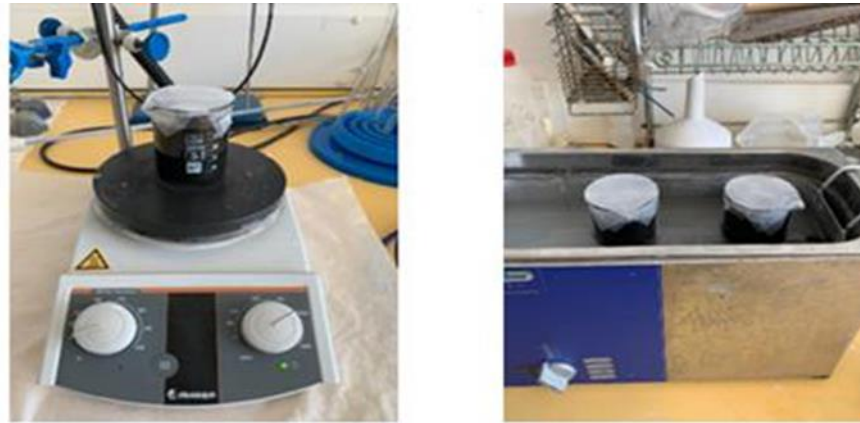
Kesme sıvısının içine daha iyi soğutma sağlaması için ağırlıkça %0,5 ve %1 oranlarında nanografen partiküller eklenmiştir. Deneylerde kullanılan nanografen ODTÜ teknokentte bulunan Nanografi firmasından sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan nanopartiküllerin teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.4. *Nanografen özellikleri*

Nanografen	Değer
Saflık (%)	99.9+
Kalınlık (nm)	5
Çap (µm)	7
Yüzey alanı (m ² /g)	135
İletkenlik (s/m)	110-1600

Nanoakışkanların hazırlanması için daha önce de bahsedilen tek aşamalı ve iki aşamalı olarak adlandırılan iki hazırlama yöntemi mevcuttur. Bu çalışmada iki aşamalı hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem manyetik veya mekanik karıştırıcılar ve ardından ultrasonik banyo kullanılarak gerçekleştirilir.

Bu çalışmada ester bazlı kesme sıvısı ağırlıkça %0, %0,5 ve %1 konsantrasyon oranında NGP partikülleri katılarak iki aşamalı yöntem ile karıştırılmıştır. İlk olarak NGP partikülleri manyetik bir karıştırıcı yardımıyla 750 dev/dak'da 90 dakika boyunca karıştırılmıştır ardından ultrasonik banyoda 60 dakika boyunca tutulmuştur. Söz konusu manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyonun görselleri aşağıda verilmiştir.



Görsel 4.6. *Nanoakışkanların hazırlanması için kullanılan manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo*

4.6 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Yüzey pürüzlülük ölçümleri Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM-Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yapılırken HOMMEL markasının T500 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler Lt = 1.5 mm örnekle uzunluğunda yapılmış olup malzemenin üç

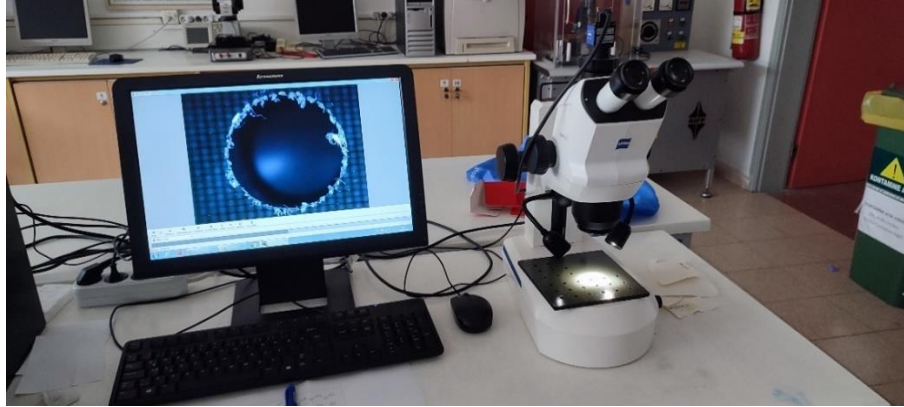
farklı noktasından her ölçümden sonra plaka 90° döndürülerek ölçü alınıp ortalama değerleri kaydedilmiştir. Kullanılan cihazın görseli aşağıda verilmiştir.



Görsel 4.7. *Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri*

4.7 Delaminasyon Ölçümleri

Delaminasyon ölçümleri Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında Zeiss marka optik mikroskop ile yapılmıştır.



Görsel 4.8. *Deneylerde kullanılan optik mikroskop*

4.8 Çap Ölçümleri

Delik çapı ölçümler Eskişehir organize sanayi bölgesinde bulunan KARCAN Kesici Takım Sanayi A.Ş. şirketinin ARGE merkezinde İnsize markasının dijital mikrometresi kullanılarak yapılmıştır. Mikrometre milimetrenin binde biri hassaslık

değerine sahiptir. Her deliğin giriş ve çıkış taraflarından 2 ölçüm alınıp bu ölçümlerin de ortalaması alınmıştır.



Görsel 4.9. Deneylerde kullanılan mikrometre

4.9 Deney parametreleri

Bu çalışmada ilerleme hızı ve kesme sıvısına eklenen nanopartikül oranı dikkate alınarak deney parametreleri belirlenmiş ve güvenilirlik açısından her deney 3 defa tekrarlanmıştır. Aşağıdaki tablolarda deney parametreleri ve deney tasarımı gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Deney girdi parametreleri

Parametre	Değeri
Kesme Hızı Vc (m/dak)	65
İş Mili Devri (mm/dak)	3448
Diş Başına Düşen İlerleme (mm/diş)	0.025, 0.0325, 0.04
İlerleme Hızı (mm/min)	172, 224, 276
NGP katkı oranı (% ağırlık)	0, 0.5, 1

Çalışmada kullanılan kesme hızı takım üreticisinin önerdiği değer olup ilerleme hızları ve nanogرافen katkı oranları yapılan literatür taraması sonucunda en sık kullanılan değerler ve takım üreticisinin önerdiği ilerleme değerleri dikkate alınarak seçilmiştir. Parametrelerin seçiminde referans olarak kullanılan makalelerin bir kısmının bulunduğu bir tablo ve takım üreticisinin katalog değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.6. Farklı çalışmalarda kullanılan deney girdi parametreleri

Takım	İşleme Parametreleri	Referans
Karbür matkap	n: 3000-24000 dev/dak f: 22-120 mm/dak	[22]
Karbür matkap	Vc: 30-50 m/dak f: 0.05-0.2 mm/dev	[23]
Karbür matkap	Vc: 56-226 m/dak f: 0,05-0,1 mm/dev	[28]
Karbür ve HSS matkap	Vc: 16-32 m/dak f: 0,05-0,2 mm/dev	[8]
Karbür matkap	Vc: 100 m/dak f: 0,05 mm/dev	[34]

SMG		f						V _c
		Ø 3,00 Ø 0.118	Ø 5,00 Ø 0.197	Ø 7,00 Ø 0.276	Ø 9,00 Ø 0.354	Ø 11,00 Ø 0.433	Ø 13,00 Ø 0.512	
TS2	C1	0,060	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	65
	C1	0,0024	0,0024	0,0026	0,0028	0,0030	0,0032	215
TS3	C1	0,060	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	50
	C1	0,0024	0,0024	0,0026	0,0028	0,0030	0,0032	165
TP2	C1	0,060	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	65
	C1	0,0024	0,0024	0,0026	0,0028	0,0030	0,0032	215
TP3	C1	0,060	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	50
	C1	0,0024	0,0024	0,0026	0,0028	0,0030	0,0032	165

Şekil 4.1. Seco Tools sitesinden alınmış ilerleme ve hız değerleri [http-1]**Tablo 4.7.** Deney tasarımı

Deney Sayısı	İlerleme(mm/dev)	GNP Katkı oranı (% ağırlık)
1	0.05	0.5
2	0.065	0.5
3	0.08	0.5
4	0.05	1
5	0.065	1
6	0.08	1
7	0.05	0
8	0.065	0
9	0.08	0

Yapılan deneylerde parça mengeneye sıkıldıktan sonra sıfırı alınarak daha önceden NX Unigraphics CAM modülü kullanılarak yazılan programı çalıştıracak şekilde hazır

hale getirilmiştir. Daha sonrasında hazırlanan kesme sıvısı rezervuara eklenmiş ve kesme sıvısının çıkacağı nozul kesici takıma 25 mm mesafeden yaklaşık 60°'lik bir açıda tutulmuştur. İlk deneyler 0.5 nanografen katkılı kesme sıvısıyla yapılmış bütün ilerleme şartlarında deneyler 3 kez tekrarlandıktan sonra takım değiştirilmiş ve rezervuar izopropil alkol ile temizlenerek yeni kesme sıvısına hazır hale getirilmiştir. Bu işlem her kesme sıvısı değiştiğinde tekrarlanmıştır.

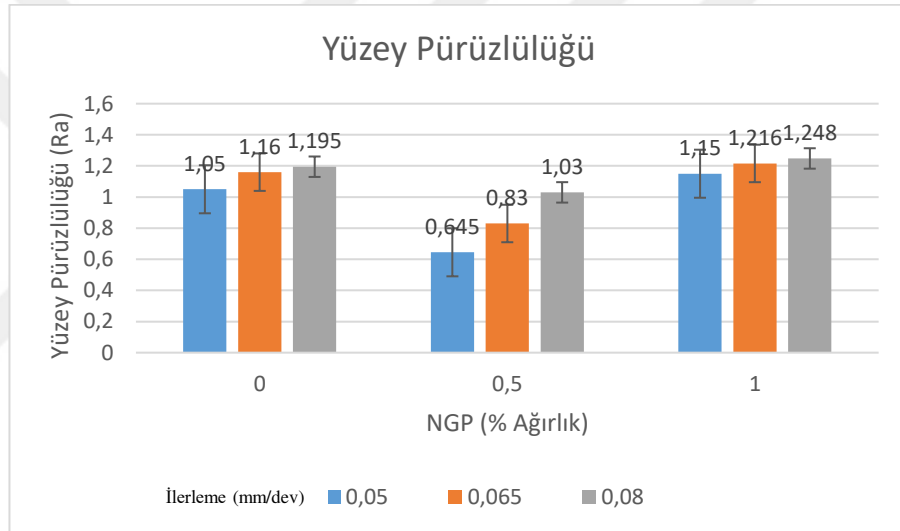


5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerinin delinme prosesinde nanografen katkılı mmy soğutma metodunun delik kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Belirlenen parametreler sonucunda nanografen katkısının yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon üzerine etkileri araştırılmıştır. Deney tasarımında Taguchi L9 dikey dizini kullanılmış olup yapılan bu deneylerin sonuçları, sonuçların analizi ve yorumu aşağıda verilmiştir.

5.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları ilerleme hızının ve NGP katkısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 5.1. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü grafiği

Şekil 5.1 delik delme sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri baz sıvıya eklenen NGP partiküllerinin belirli oranlarda ve farklı ilerleme değerlerinde gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğü sonuçları 0.05 mm/dev ilerleme ve ağırlıkça %0,5 NGP katkılı kesme sıvısı kullanılan deneyde görülmektedir. Bu deney sonucu %1 NGP katkılı kesme sıvısına ve sadece baz sıvı kullanılarak yapılan deneylere kıyasla sırasıyla %43.91 ve % 38.57 daha iyi sonuçlar vermiştir.

Aynı şekilde 0.065 mm/dev ilerlemede %0,5 NGP katkılı kesme sıvısıyla yapılan deneylerden elde edilen pürüzlülük değerleri aynı ilerlemedeki %1 katkılı ve katkısız kesme sıvısı deneyleri ile karşılaştırıldığında sırasıyla %31,74 ve % 28,44 daha iyi sonuçlar vermiştir.

Son olarak 0.08 mm/dev ilerleme hızında % 0.5 NGP katkılı kesme sıvısı ile yapılan deneyler % 1 katkılı ve katkısız delme deneyleri ile karşılaştırıldığında sırasıyla % 17.46 ve %13.8 daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarından da anlaşılabileceği gibi % 0.5 NGP katkılı kesme sıvısı ile yapılan deneyler bütün ilerleme şartlarında daha iyi sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bunun dışında ilerleme miktarının artması daha önce de birçok araştırmacı tarafından belirtildiği gibi yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz etkide bulunmuştur. Örnek olarak Qu ve ark. karbon fiber seramik matris kompozitleri farklı karbon nanopartikül oranlarında taşlama performansını incelemiştir. Karbon nanopartiküllerin (C) konsantrasyonu 1'den 5 g/L'ye yükseldikçe, yüzey pürüzlülüğü (Sa ve Sz) azalarak öğütme yüzeyi kalitesinin iyileştiğini gözlemlemiştir. Fakat, C 5'ten 7 g/L'ye yükseldiğinde, boru hatlarını tıkayan, damlacık kütesini, hava direncini artıran ve damlacıkların öğütme bölgelerine nüfuz etme kabiliyetini azaltan nanopartikül aglomerasyonu nedeniyle yüzey pürüzlülüğü bozulduğunu belirtmiştir [51]. Buna karşın James ve Nejadian yaptıkları çalışmada karbon fiber/alüminyum istiflerin frezelemesinde 5 farklı nanoakışkan kullanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en iyi sonuç %2.5 katkı oranına sahip Al₂O₃ katkılı kesme sıvısı kullanıldığında ortaya çıkmıştır [52]. Yapılan çalışmalardan da anlaşılabileceği gibi nanografen katkılarının ağırlıkça yüzde konsantrasyon oranının artması yüzey pürüzlülüğüne negatif olarak etki etmiştir. Bunun nedeni artan konsantrasyon oranı ile birlikte nanografen partiküllerinin bir araya toplanması ve partikül ağırlığını arttırarak yağlama kabiliyetini azaltmasıdır.

5.1.1 Taguchi L9 deneyleri için S/N oranları

Nano akışkan konsantrasyon oranı, kesme hızı ve ilerleme hızının kontrol faktörü olarak kullanıldığı Taguchi'nin L9 dikey dizinine göre delik delme deneyleri yapılmıştır. Tablo 5.1'de deneysel çalışma sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçları analizi ile elde edilen S/N oranları verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük olması istendiğinden S/N oranlarının hesaplanmasında en küçük en iyi yaklaşımı kullanılmıştır.

Tablo 5.1. Deney sonuçları ve S/N oranları

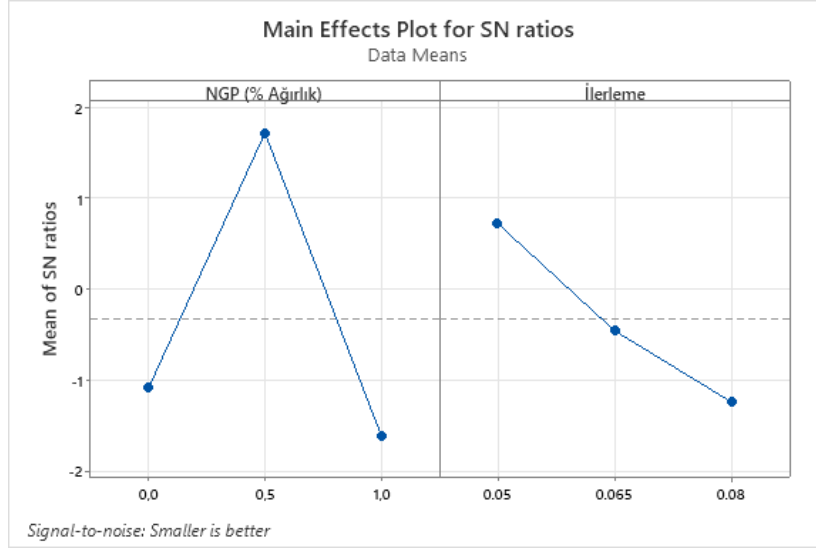
Deney No	A	B	Yüzey	Yüzey
	İlerleme Hızı (f) mm/dev	Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı (%)	Pürüzlülüğü (Ra)(μ m)	Pürüzlülüğü S/N Oranı (dB)
1	0.05	0	1.050	-0.42379
2	0.065	0	1.160	-1.28916
3	0.08	0	1.195	-1.54736
4	0.05	0.5	0.645	3.80881
5	0.065	0.5	0.830	1.61844
6	0.08	0.5	1.030	-0.25674
7	0.05	1	1.150	-1.21396
8	0.065	1	1.216	-1.69867
9	0.08	1	1.248	-1.92429

S/N yanıt tablosu Taguchi metodundaki parametrelerin yüzey pürüzlülüğü için en iyi seviyeleri hangi faktörlerin belirlediğini ve faktörlerin yanıtlarını göstermektedir. Tablo 5.2’te S/N yanıt tablosu verilmiştir. Tabloda kontrol faktörlerindeki en yüksek değerler en optimum seviyeyi göstermektedir

Tablo 5.2. Yüzey pürüzlülüğü S/N yanıt tablosu

Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)		
Kontrol Faktörleri		
Seviyeler	A	B
Seviye 1	0.7237	-1.0868
Seviye 2	-0.4565	1.7235
Seviye 3	-1.2428	-1.61123
Delta	3.3358	1.9665

En iyi yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını gösteren faktörler sırasıyla faktör A (Seviye 1, S/N=0.7237), faktör B (Seviye 2, S/N=1.7235) ve olarak sonuçlanmıştır. Diğer bir ifadeyle; optimum yüzey pürüzlülüğü 0.05 mm/dev ilerleme hızında (A1) ve %0,5 konsantrasyon oranında (B2) elde edilmiştir. Şekil 5.2’de yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N oranlarını gösteren grafikler verilmiştir. Grafikte optimum seviyeler S/N oranının en yüksek olduğu noktalardır. Yüzey pürüzlülüğü için en önemli değişkenin katkı oranı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.2. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama S/N değerleri

5.1.2 Varyans Analizi (ANOVA)

Bu tez çalışmasında kullanılan parametrelerin (ilerleme hızı ve nanoakışkan konsantrasyonu) yüzey pürüzlülüğüne etkisinin seviyelerini anlamak için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizin sonuçları tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Yüzey pürüzlülüğü deneyleri ANOVA sonuçları

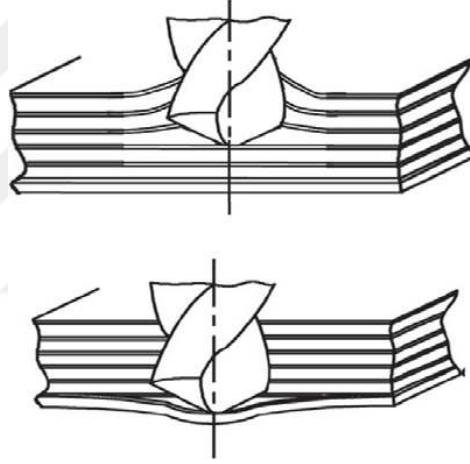
Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı
A	2		0.033111	5.43	0.07238	20.56%
B	2	0.06622	0.115753	19	0.00907	71.87%
Hata	4		0.006093	-	-	7.57%
		0.23151				
		0.02437				
Toplam	8	-	-	-	-	100%

5.2 Delaminasyon Ölçümleri

KFTP delinmesi esnasında delaminasyon, kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğünü ve performansını etkileyen kritik bir konudur. KFTP, mükemmel güç-ağırlık oranı özellikleri sağlayan bir polimer matris içine gömülü karbon fiber katmanlarından oluşur. Bununla birlikte, delme işlemi sırasında dönen matkap ucu ile kompozit malzeme arasındaki etkileşim, lif katmanlarının ve polimer matrisin ayrıldığı veya hasar gördüğü

katmanlara ayrılmaya yol açabilir. Delaminasyon, kesme koşullarındaki ani değişiklikten dolayı matkap giriş ve çıkış alanlarında özellikle yaygındır. Matkap, kompozit malzemeye girerken, farklı seviyelerde dirençle karşılaşır ve bu da delaminasyonu başlatabilen ve ilerletebilen stres konsantrasyonlarına yol açar. Benzer şekilde, matkap malzemedan çıktığında, farklı çıkış koşulları daha fazla hasara neden olabilir.

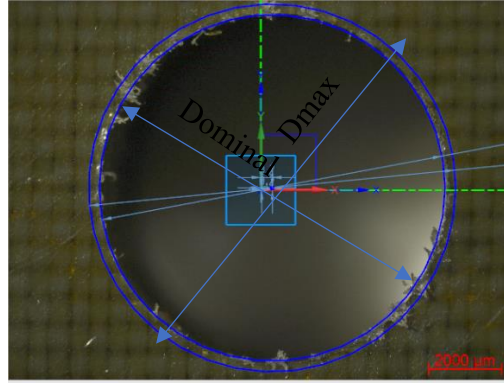
Delaminasyon, KFTP yapılarının mekanik özelliklerini ve yük taşıma kapasitesini olumsuz etkiler. Malzemeyi zayıflatır ve yorulma ömrünü azaltır, bu da erken arızaya yol açabilir. Havacılık, otomotiv ve spor malzemeleri endüstrileri gibi KFTP bileşenlerinin yapısal bütünlüğünün çok önemli olduğu uygulamalarda, delaminasyonu en aza indirmek son derece önemlidir. Aşağıdaki şekilde giriş ve çıkış bölgesinde gerçekleşen delaminasyon mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kompozit malzemelerin delinmesi esnasında oluşan giriş ve çıkış delaminasyonları

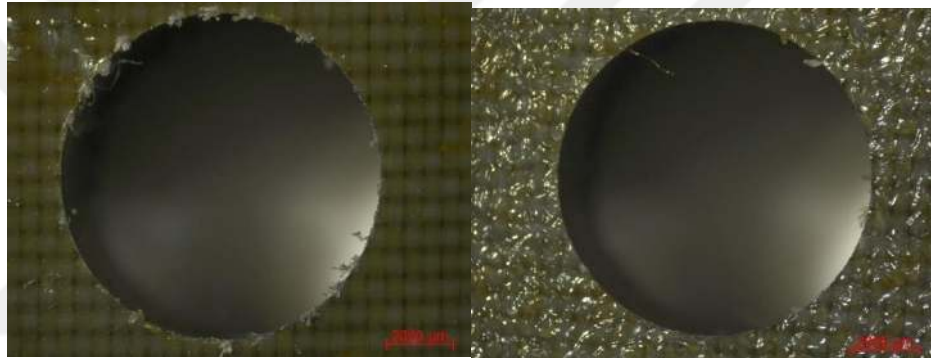
Bu çalışmada delaminasyon ölçümleri optik mikroskop ile yapılmış olup delaminasyon faktörleri mikroskopta görüntülenen resimlerin bir resim analiz programı olan OmniMet™ programına aktarılması yardımıyla yapılmıştır. Delaminasyon faktörü denklem 5.1 de belirtildiği gibi deformasyon bölgesindeki en büyük çapın matkap çapına oranı şeklinde hesaplanmıştır.

$$Fd = \frac{D_{maksimum}}{D_{nominal}} \quad (5.1)$$



Şekil 5.4. Delaminasyon faktörünün belirlenmesi

Aşağıdaki görselde % 0,5 NGP katkı oranı kullanılarak yapılan deneylerdeki giriş ve çıkış delaminasyonları verilmiştir.



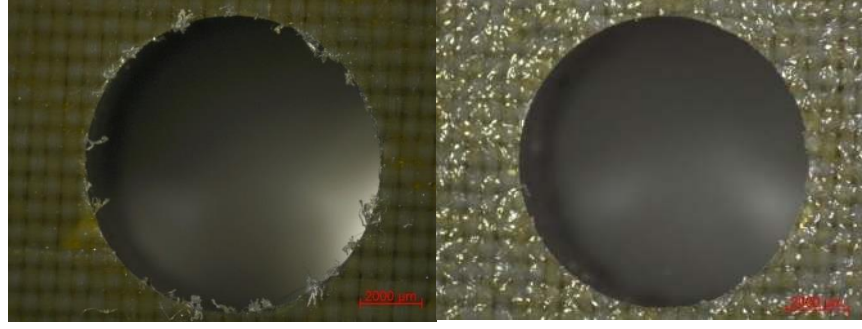
a) Giriş Deleminasyonu

b) Çıkış Deleminasyonu

Görsel 5.1. %0,5 NGP+MMY ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında a) giriş ve b) çıkış delaminasyonları

Yukarıdaki görselde de görüldüğü üzere giriş delaminasyonu çıkış delaminasyonunda daha fazladır bunun sebebi parçanın tezgaha bağlanırken mengeneye sıkıştırılabilmesi için 100 mm kalınlığında tahta bir plaka ile desteklenmesidir bu plaka delik delme işlemi esnasında bir destek işlemi görmüş ve çıkış delaminasyonunu azaltmıştır.

Aşağıdaki görselde %0,5 NGP katkılı kesme sıvısında 0,065 mm/dev ilerleme hızında yapılan deneyler sonucu oluşan giriş ve çıkış delaminasyonları gösterilmiştir. Resimden anlaşılabacağı üzere giriş delaminasyonu çıkış delaminasyonundan daha fazladır.



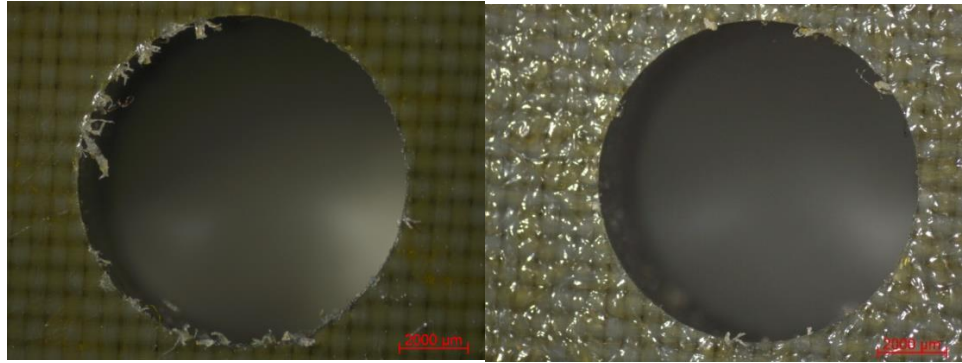
a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

Görsel 5.2. %0,5 NGP+MMY ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında a) giriş ve b) çıkış delaminasyonları

Aşağıdaki görselde %0,5 NGP katkılı kesmen sıvısında 0,08 mm/dev ilerleme hızında yapılan deneyler sonucu oluşan giriş ve çıkış delaminasyonları gösterilmiştir.

Görselden de anlaşılabileceği üzere ilerleme hızının artması kesilmemiş fiber sayısında artışa neden olmuş ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı ile 0,08 mm/dev kesme hızı ile karşılaştırıldığında daha yüksek delaminasyon hasarı gözlemlenmektedir. Çıkış delaminasyonunda ise destek plakasının kullanılmasından dolayı gözle görülür bir değişim gözlemlenmemiştir.

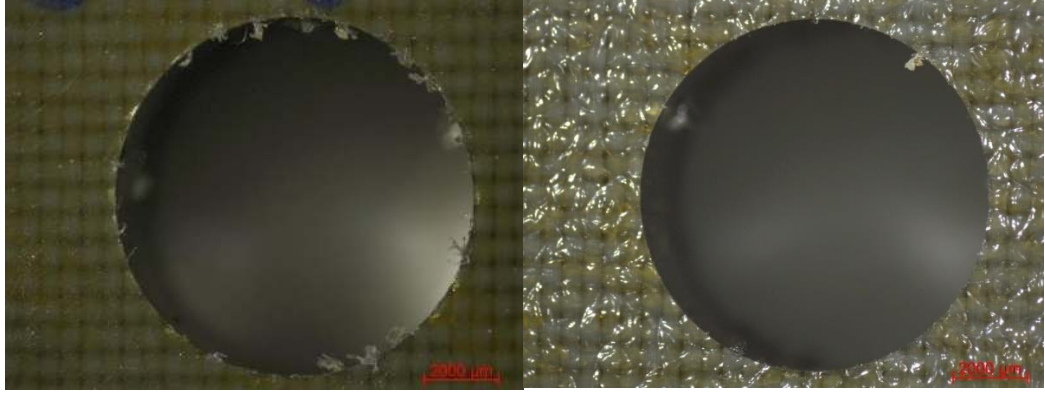


a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

Görsel 5.3. %0,5 NGP+MMY ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları

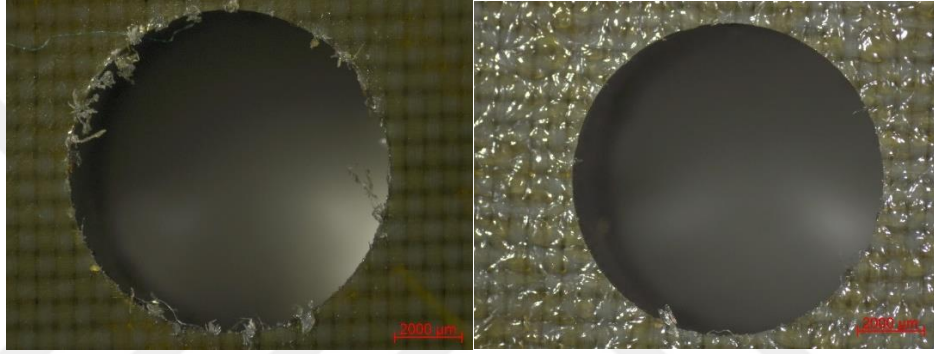
Aşağıdaki görselde %1 NGP katkılı kesmen sıvısında 0,05 mm/dev ilerleme hızında yapılan deneyler sonucu oluşan giriş ve çıkış delaminasyonları gösterilmiştir.



a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

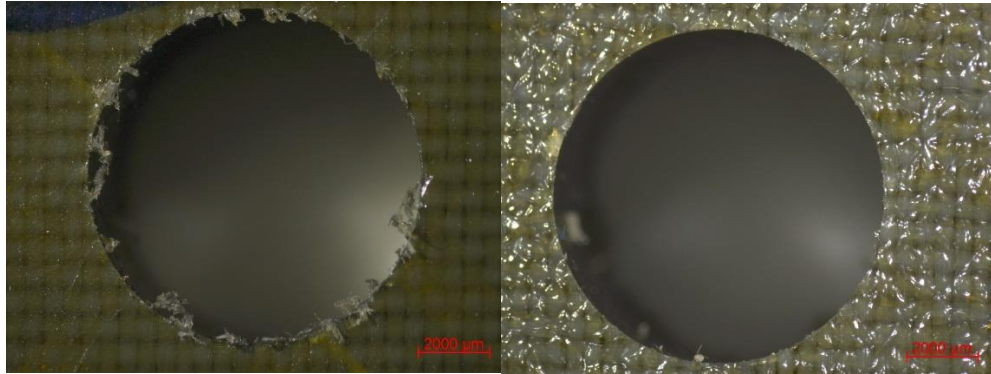
Görsel 5.4. % 1 NGP+MMY ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları



a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

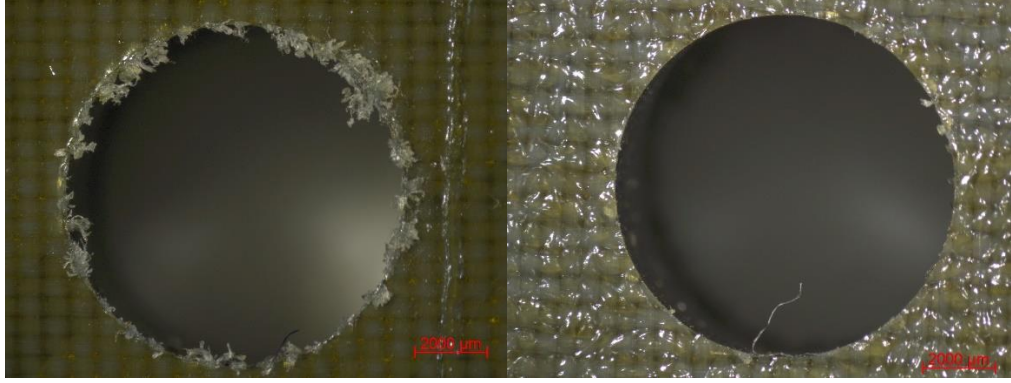
Görsel 5.5. % 1 NGP+MMY ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları



a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

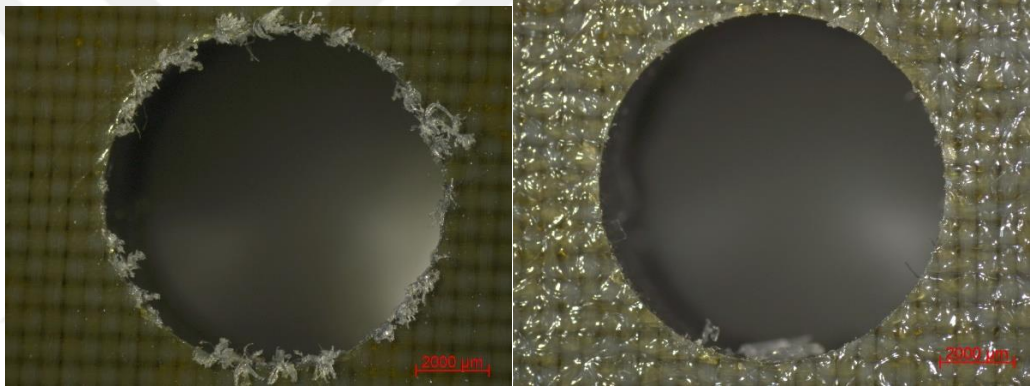
Görsel 5.6. % 1 NGP+MMY ve 0,08 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları



a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

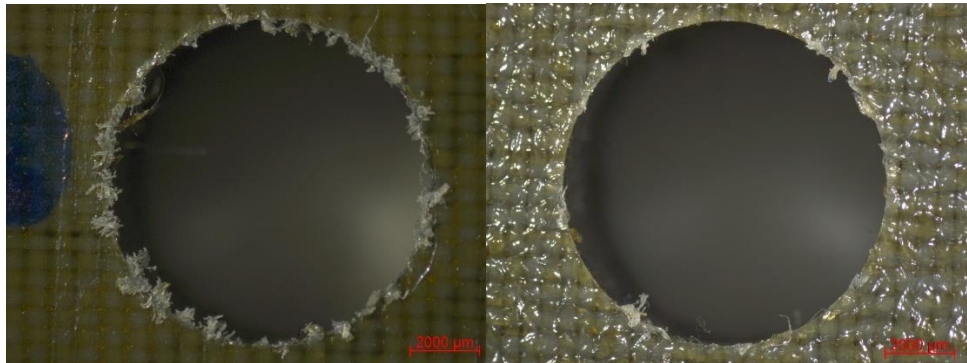
Görsel 5.7. % 0 NGP+MMY ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları



a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

Görsel 5.8. % 0 NGP+MMY ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları



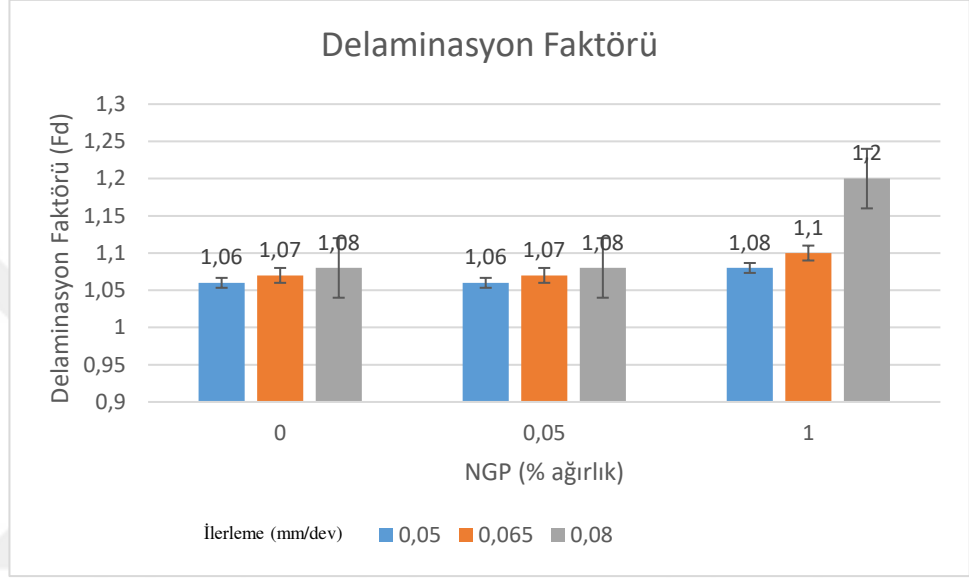
a) Giriş Delaminasyonu

b) Çıkış Delaminasyonu

Görsel 5.9. % 0 NGP+MMY ve 0,8 mm/dev ilerleme hızında giriş ve çıkış delaminasyonları

Yukarıdaki görsellerden de anlaşılacağı üzere giriş delaminasyonları ilerleme arttıkça artış göstermektedir. En düşük giriş delaminasyonları 0,05 mm/dev ilerleme hızında gözlemlenirken en yüksek delaminasyonlar 0,08 mm/dev ilerleme hızlarında görülmektedir.

Aşağıdaki şekil ilerleme hızı ve nanografen katkısının delaminasyon faktörü üzerine etkisini göstermektedir.

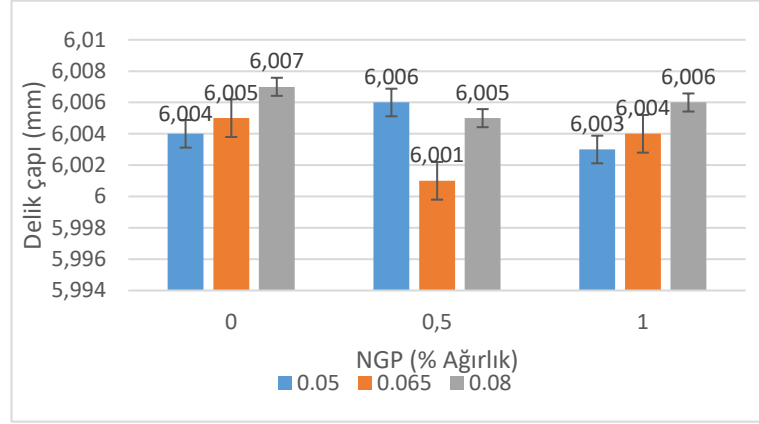


Şekil 5.5. Delaminasyon faktörü değişimi

Grafikten de açıkça görüldüğü gibi delaminasyon faktörü ilerleme arttıkça artmış ve %0,5 NGP katkılı kesme sıvısında ve en düşük ilerlemede en iyi değeri göstermiştir ki bu da literatürde yapılan diğer çalışmalarla uyum içindedir. Ancak grafen katkısının konsantrasyon oranı ve ilerlemenin delaminasyon faktörü üzerine etkisini daha iyi anlayabilmek için farklı konsantrasyon oranlarında farklı kesme hızları ve ilerleme değerlerinde daha derinlemesine araştırmalar yapılması gerekmektedir.

5.3 ap lmleri

Deneyler sonucunda elde edilen çap ölçümleri aşağıdaki Şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.6. ap lmleri

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında deneyler sonucunda yapılan çap ölçümlerinin sonucunda nominal delik çapı olan 6 mm’den en küçük sapma % 0,5 NGP katkılı ve 0,065 mm/dev ilerleme hızında en büyük sapmanın ise baz sıvı ile yapılan deneyler sonucu elde edildiği görülmektedir.

5.5 Tartışma ve neriler

Bu tez çalışmasında karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemenin ağırlıkça farklı nanografen katkı oranlarında minimum miktarda yağlama koşullarındaki delik performansı incelenmiştir. Deneysel alıŐmalar 3 farklı ilerleme değeri (0.05 mm/dev, 0.065 mm/dev, 0.08 mm/dev) ve 3 farklı % ağırlıkta (0, 0.5, 1) nanografen katkısı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup yüzey pürüzlülük ve delaminasyon sonuçları karŐılaŐtırılmıŐtır. Çalışmanın sonuçları Şu Şekilde zetlenebilir

- Yapılan deneyler sonucunda % 0,5 GNP katkılı kesme sıvısı ve 0,05 mm/dev ilerleme durumunda yapılan deneylerin en iyi yüzey pürüzlülük sonuçlarını verdiği grlmŐtır. Bunu sadece baz sıvı kullanılarak yapılan deneyler takip etmiştir. Bunun sebebi daha derin bir araştırma gereksinimi duysa da önceki yapılan farklı türdeki çalışmalara bakılarak artan nanoakışkan oranının damlacık kütlesini arttırdığı ve soğutma kabiliyetini düŐürdüęü daha önceki çalışmalarda gözlemlenmiştir.
- Yapılan deneyler sonucunda giriş delaminasyonunun çıkış delaminasyonuna göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzey

pürüzlülüğü ile kıyaslandığında delaminasyon artışında ilerleme hızının artması ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu da tez çalışmasının literatüre de yapılan çalışmalara paralel bir çizgi izlediğini gösterir

- Yapılan çap ölçümlerinde ise %0.5 nanografen katkılı kesme sıvı ile yapılan ve 0.065 ilerleme hızı kullanılan deneyin nominal çaptan en az sapma yaptığı görülmüştür. Bu elde edilen diğer sonuçlar ile ters düştüğü görülse de yapılan ölçümlerin bir operatör tarafından ortam sıcaklığının her zaman sabit olmadığı bir ortamda yapıldığı düşünüldüğünde sıcaklığı sabit bir ortamda bir CMM makinası ile yapılan ölçümlerin daha farklı sonuçlar çıkarabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak delme işlemi esnasında kesme sıvılarına nanoakışkan eklenmesi delik kalitesini arttıran bir eğilim göstermektedir. Ayrıca MMY yöntemi kullanılarak yapılan işleme sayesinde kullanılan kesme sıvısı miktarı oldukça azdır bu da geleneksel taşma soğutma da kullanılan sıvılara kıyasla operatör sağlığı, çevreye olan zararı ve işleme maliyetlerini azaltarak sürdürülebilir işlemede kesme sıvılarına getirilen yenilikçi çözümlerden biridir. Teknoloji ve araştırma ilerledikçe, MMY delme, daha yeşil ve verimli bir üretim sektörünün giderek daha önemli bir rol oynaması muhtemeldir.

Bu çalışma nanografen katkılı MMY sistemlerinin delik delme performansını inceleyen ilk çalışma olduğu için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir gelecekteki araştırma çalışmaları şu konuları inceleyebilir;

- Farklı nanoakışkan türleri ve konsantrasyon oranlarının kullanılması.
- Günümüzde yeni bir araştırma konusu olan hibrit nanoakışkanların yani birden fazla nanoakışkanın bir arada karıştırılmasıyla elde edilen kesme sıvılarının kullanılması.
- Farklı geometrilerde takımların kullanılması
- Farklı kesme hızları ve ilerleme değerlerinin kullanılması
- Dinamometre kullanılarak kesme kuvveti ve tork değerleri elde edilerek nanografen katkısının kesme kuvvetine olan etkisinin incelenmesi
- Yapılan deneyler sonucunda elde edilen en iyi sonuçlar ile takım aşınması ve ömür testlerinin yapılması

KAYNAKÇA

- [1] Shyha, I.S.E.M., (2010) Drilling of carbon fibre reinforced plastic composites. Master Thesis, University of Birmingham, Department of Mechanical Engineering
- [2] Peters, S.T., (1998) Introduction, Composite Basics and Road Map, in Handbook of Composites, S.T. Peters, Editor., Springer US: Boston, MA. p. 1-20.
- [3] Aydın, E., (2019) Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit (KFTP) İle Alüminyum Alaşımının (Al 7075) İstiflenmiş Halde Delinebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, in Fen Bilimleri Enstitüsü., Gazi Üniversitesi: Ankara.
- [4] Committee, A.S.M.I.H., (2001) ASM handbook. Volume 21, Composites., ASM International Materials Park, OH: Materials Park, OH.
- [5] Demirel, A., (2007) Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemenin Karakterizasyonu, in Fen Bilimleri Enstitüsü., Gazi Üniversitesi: Ankara
- [6] Esmer, Ö., (2022) Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozit Malzemelerin Otoklav Prosesi Parametrelerinin Porozite ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi in Fen Bilimleri Enstitüsü., Gazi Üniversitesi: Ankara.
- [7] Park, S.-J., (2018) Manufacture of Carbon Fiber Composites, in Carbon Fibers, S.-J. Park, Editor., Springer Singapore: Singapore. p. 185-240.
- [8] Karakoca, Y.E., (2021) Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozit (KFTP) İle Alüminyum 7075 Alaşımının İstiflenmiş Halde Delinebilirliğinin İncelenmesi, in Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü., Milli Savunma Üniversitesi: Ankara
- [9] Çelikyürek, V., (2021) Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Delinmesinde Destek Plakası Kullanılmasının Delaminasyona Etkisinin İncelenmesi, in Fen Bilimleri Enstitüsü., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi: Burdur.
- [10] Stephenson, D.A. (2016) and J.S. Agapiou, Metal cutting theory and practice, Third edition.. 1-931.
- [11] Özen, K., (2022) Grafen nanopartikül MMY soğutma ve yağlama tekniği kullanarak Tİ-6AL-4V alaşımının sürdürülebilir işlenebilirliğinin incelenmesi, in Lisansüstü Eğitim Enstitüsü., Eskişehir Teknik Üniversitesi: Eskişehir.
- [12] Yıldırım, Ç.V., (2017) Waspalloy Süper Alaşımının Farklı Soğutma Teknikleri Kullanarak Frezeleme Yöntemi ile İşlenebilirliğinin İncelenmesi, in Fen Bilimleri Enstitüsü., Düzce Üniversitesi: Düzce. p. 1-257.
- [13] Uddin, M., (2016) Fundamentals of Nanofluids: Evolution, Applications and New Theory. International Journal of Biomathematics and Systems Biology,. 2: p. 1-32.
- [14] Demir, İ., AISI 329 (2022) Paslanmaz Çeliğinin Frezelenmesinde CuO ve Grafit Katkılı Nanoakışkan Yağlayıcıların İşleme Performansı Üzerine Etkileri, in Lisansüstü Eğitim Enstitüsü., Düzce Üniversitesi: Düzce.

- [15] Choi, S., W. Yu, and L. Thompson, (2001) Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied physics letters*,. 78(6): p. 718-720.
- [16] Liu, M.-S., et al., (2006) Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,. 49(17-18): p. 3028-3033.
- [17] Zhu, H., et al., (2006) Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids. *Applied Physics Letters*,. 89(2).
- [18] Phuoc, T., (2007) Synthesis of Ag-deionized water nanofluids using multi-beam laser ablation in liquids. *Optics and Lasers in Engineering*,. 45: p. 1099-1106.
- [19] Smaism, G.F, (2022) Nanofluids: properties and applications. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*,. 104(1): p. 1-35.
- [20] Saraç, E.N.S., (2022) AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Bitkisel Bazlı ve SiO₂ Katkılı Nanoakışkan Kullanılan Minimum Miktarla Yağlama Tekniğinin İşleme Performansına Etkisi, in *Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi: Zonguldak*
- [21] Dharan, C.K.H. and M.S. Won, (2000) Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,. 40(3): p. 415-426.
- [22] Zhang, H., (2001) Assessment of the Exit Defects in Carbon Fibre-Reinforced Plastic Plates Caused by Drilling. *Key Engineering Materials-* ., 196: p. 43-52.
- [23] Davim, J.P. and P. Reis, (2003) Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave experimental and statistical study. *Materials & Design*, 24(5): p. 315-324.
- [24] Tsao, C.C. and Hocheng H., (2004) Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10): p. 1085-1090.
- [25] Davim, J.P., (2007) A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Composites Science and Technology*, 67(9): p. 1939-1945.
- [26] Tsao, C.C., (2008) Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills. *Journal of Materials Processing Technology*. 206(1): p. 405-411.
- [27] Faraz, A., D. (2009), Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(15): p. 1185-1196.
- [28] Iliescu, D., (2010)., Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,. 50(2): p. 204-213.
- [29] Grilo, T.J., (2013) et al., Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *Composites Part B: Engineering*,. 45(1): p. 1344-1350.

- [30] Shahrajabian, H., (2012) Experimental Investigation of Machining Parameters on Machinability of Carbon Fiber/Epoxy Composites. *International journal of engineering and innovate technology*. 2: p. 30.
- [31] Wang, H., (2014) Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(1): p. 257-266.
- [32] Merino-Pérez, J.L., (2015) et al., On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-Co tools Part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation. *Composite Structures*,. 123: p. 161-168.
- [33] Çelik, A. (2015) Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites. *Journal of Materials Processing Technology*,. 223: p. 39-47.
- [34] Poulachon, G. (2016) Hole Surface Topography and Tool Wear in CFRP Drilling. *Procedia CIRP*, 45: p. 35-38.
- [35] Ismail, S.O., et al., (2016.) Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(4): p. 2043-2052.
- [36] Feito, N., et al., (2014) Experimental Analysis of the Influence of Drill Point Angle and Wear on the Drilling of Woven CFRPs. *Materials*,. 7(6): p. 4258-4271.
- [37] Xia, T., et al., (2016) Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82: p. 605-616.
- [38] Nagaraj, A., (2020) An Investigation of Process Performance when Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite under Dry, Cryogenic and MMY Environments. *Procedia Manufacturing*, 43: p. 551-558.
- [39] Wang, F., et al., (2018) Effects of cooling position on tool wear reduction of secondary cutting edge corner of one-shot drill bit in drilling CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,. 94(9): p. 4277-4287.
- [40] Iqbal, A., et al., (2021) CFRP drilling under throttle and evaporative cryogenic cooling and micro-lubrication. *Composite Structures*,. 267: p. 113916.
- [41] Kim, J.W., J. Nam, and S.W. Lee, (2019) Experimental study on micro-drilling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic (UD-CFRP) composite using nano-solid lubrication. *Journal of Manufacturing Processes*,. 43: p. 46-53.
- [42] Morkavuk, S., et al., (2018) Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*,. 147: p. 1-11.
- [43] Kerrigan, K. and R.J. Scaife, (2018) Wet vs dry KFTP drilling: Influence of cutting fluid on tool performance. *Procedia CIRP*,. 77: p. 315-319.

- [44] Meshreki, M., et al. (2016) Investigation of drilling of CFRP-aluminum stacks under different cooling modes. in ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.. American Society of Mechanical Engineers.
- [45] Iskandar, Y., et al., (2014) Flow visualization and characterization for optimized MMY machining of composites. CIRP Annals,. 63(1): p. 77-80.
- [46] Xu, J., et al., (2020) Experimental investigation on drilling machinability and hole quality of KFTP/Ti6Al4V stacks under different cooling conditions. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109(5): p. 1527-1539.
- [47] Xu, J., et al., (2020) Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of KFTP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. Composite Structures,. 234: p. 111727.
- [48] Pervaiz, S., et al., (2020) Ecofriendly inclined drilling of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,. 111(7): p. 2127-2153.
- [49] Gao, T., et al., (2020) Surface morphology assessment of CFRP transverse grinding using CNT nanofluid minimum quantity lubrication. Journal of Cleaner Production,. 277: p. 123328.
- [50] Gao, T., et al., (2021) Mechanics analysis and predictive force models for the single-diamond grain grinding of carbon fiber reinforced polymers using CNT nano-lubricant. Journal of Materials Processing Technology,. 290: p. 116976.
- [51] Qu, S., et al., (2020) An investigation of carbon nanofluid minimum quantity lubrication for grinding unidirectional carbon fibre-reinforced ceramic matrix composites. Journal of Cleaner Production,. 249: p. 119353.
- [52] James, S. and S.M. Nejadian, (2020) Experimental study on high-speed saw cutting of hybrid composite stacks using nanoparticle-enhanced minimum quantity lubrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,. 110(11): p. 3077-3090.
- [53] Nagaraj, Arjun, (2019). "Analysis Of Surface Integrity In Machining Of CFRP Under Different Cooling Conditions"

http-1: <https://www.secotools.com> (erişim tarihi 27.07.2023)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-5245-6953

Ad Soyad : Mustafa Burak SAĞENER

Yabancı Dil : İngilizce (C1)

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2019, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim dalı
- Ekim 2020- Haziran 2022, CAD-CAM Mühendisi, Tayyar Tasarım İmalat
- Haziran 2022- Aralık 2022, Proje Mühendisi FEZA Havacılık
- Aralık 2022-Halen, Araştırma Görevlisi, Eskişehir Teknik Üniversitesi