



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİKLERİN KURU VE KRİYOJENİK İŞLEME KOŞULLARINDA FREZELENMESİ

Sezer MORKAVUK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİKLERİN KURU VE KRİYOJENİK İŞLEME KOŞULLARINDA FREZELENMESİ

Sezer MORKAVUK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI
İkinci Danışman: Doç. Dr. Uğur KÖKLÜ

2016, 125 Sayfa

Jüri
Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI
Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Yrd. Doç. Dr. Murat DİLMEÇ

Bu çalışmada özellikle havacılık endüstrisinde yaygın kullanıma sahip olan karbon fiber takviyeli plastiklerin (CFRP) kuru ve kriyojenik koşullarda frezelenme performansı araştırılmıştır. Deneylerde üç farklı fener mili hızı (3000, 5500 ve 8000 dev/dk), üç farklı ilerleme hızı (500, 750 ve 1000 mm/dk) ve üç farklı talaş derinliği (2, 3 ve 4 mm) kesme parametreleri olarak kullanılmıştır. Taguchi L_{54} deney düzeneği kullanılarak toplamda 54 deney yapılmıştır. Frezeleme performansı kesme kuvvetleri, delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre fener mili hızının azalması ve ilerleme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvvetleri, delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık artmıştır. Talaş derinliği arttıkça kesme kuvvetleri artmıştır ancak talaş derinliği parametresinin delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık üzerinde kayda değer bir etkisi görülmemiştir. Aynı kesme parametreleri ile yapılan deneylerde kriyojenik koşullarda daha yüksek kesme kuvvetleri oluşmasına rağmen, daha düşük delaminasyon faktörleri ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri (daha kaliteli yüzeyler) elde edilmiştir. Bu sonuçlar kriyojenik koşulda frezelemenin uygulanabilir bir proses olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: CFRP, Delaminasyon, Frezeleme, Kriyojenik

ABSTRACT

MS THESIS

MILLING OF CARBON FIBRE REINFORCED PLASTICS IN DRY AND CRYOGENIC MACHINING CONDITIONS

Sezer MORKAVUK

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
Second Advisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

2016, 125 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Asst. Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

In this study, milling performance of Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) that is widely used especially in aerospace industry was investigated. Three different spindle speed (3000, 5500, and 8000 rpm), three different feed rate (500, 750, and 1000 mm/min) and three different cutting depth (2, 3, and 4 mm) were used as cutting parameters in the experiments. 54 test were implemented by using Taguchi L_{54} experimental design. Milling performance of CFRP was evaluated according to cutting forces, delamination factor, surface roughness and waviness. According to the results of the experiments, as spindle speed decreases and feed rate increases cutting forces, delamination factor and waviness values increase. When cutting depth increases, cutting forces increase as well but cutting depth hardly effect on delamination factor, surface roughness and waviness. Although larger thrust forces occurred under the cryogenic condition, smaller delamination factor and surface roughness (better surface quality) were obtained. These results demonstrated that milling of CFRP under the cryogenic condition could be applicable.

Keywords: CFRP, Cryogenic, Delamination, Milling,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamı yürütürken beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocalarım Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAĞCI ve Doç. Dr. Uğur KÖKLÜ 'ye, beni manevi olarak destekleyen eşime ve bu tezin yapılması için 16201049 nolu proje kapsamında finans sağlayan Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Sezer MORKAVUK
KONYA-2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **6**

2.1. Kompozitlerin Frezelenmesi Konusunda Yapılan Çalışmalar 6
2.2. Kompozitlerin Delinmesi Konusunda Yapılan Çalışmalar 11
2.3. Kriyojenik Koşullarda İşleme Konusunda Yapılan Çalışmalar 14

3.KOMPOZİT MALZEMELER **18**

3.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi 20
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 21
3.2.1. Takviye elemanının şekline göre sınıflandırma 22
3.2.2. Matris malzemesine göre sınıflandırma 31
3.3. Plastik Matrisli Kompozitlerin Üretim Metodları 35
3.3.1 Elle tabakalama (yatırma) yöntemi 35
3.3.2 Püskürtme yöntemi 36
3.3.3 Elyaf sarma yöntemi 37
3.3.4 Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi 38
3.3.5 Vakum kalıplama (paketleme) yöntemi 39
3.3.6 Vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi (VARTM) 39
3.3.7 Pultrüzyon (Profil çekme) yöntemi 40
3.3.8 Otoklav yöntemi 41

4.FREZELEME OPERASYONU ve POLİMER KOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ **42**

4.1. Frezeleme Operasyonu 42
4.2.Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin İşlenebilirliği 47

5.KRİYOJENİK KOŞULLARDA İŞLEME METODU **51**

5.1. Kriyojenik Koşullarda İşleme Teknikleri 51
5.1.1. İş parçasının kriyojenik ortamda ön soğutularak işlenmesi 52
5.1.2. Kesici takıma dolaylı kriyojenik soğutma yaparak işleme 52
5.1.3. Kesme bölgesine kriyojenik püskürterek işleme 53
5.1.4. Kesici takımın işleme öncesinde soğutulması 54

6. MATERYAL VE YÖNTEM 55

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme 55
6.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım 55
6.3. Deney Parametreleri ve İşleme Stratejisi 56
6.4. Deney Düzeneği 60
6.5. Ölçme Metotları 65
6.5.1. Kesme kuvvetlerinin ölçümü 65
6.5.2. Delaminasyon ölçümü 66
6.5.3. Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık ölçümü 67

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 70

7.1.Frezeleme Kuvvetlerinin Analizi 70
7.1.1. Frezeleme kuvvetleri için Taguchi analizi 71
7.1.2. Frezeleme kuvvetleri için Varyans analizi 75
7.1.3. Frezeleme kuvvetleri için oluşturulan grafikler 77
7.2.Delaminasyon Analizi 81
7.2.1. Delaminasyon faktörü için Taguchi analizi 81
7.2.2. Delaminasyon faktörü için Varyans analizi 82
7.2.3. Delaminasyon faktörü için oluşturulan grafikler 83
7.3. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi 86
7.3.1. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi analizi 86
7.3.2. Yüzey pürüzlülüğü için Varyans analizi 87
7.3.3. Yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan grafikler 88
7.4. Dalgalılık Analizi 90
7.4.1. Dalgalılık için Taguchi analizi 91
7.4.2. Dalgalılık için Varyans analizi 92
7.4.3. Dalgalılık için oluşturulan grafikler 93

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 96

8.1 Sonuçlar 96
8.2 Öneriler 97

KAYNAKLAR 99

EKLER 106

ÖZGEÇMİŞ 114

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

F_x : Frezeleme kuvvetinin x yönündeki bileşeni (N)

F_y : Frezeleme kuvvetinin y yönündeki bileşeni (N)

F_z : Frezeleme kuvvetinin z yönündeki bileşeni (N)

F_{sz} : Diş başına karşılık gelen ortalama kesme kuvveti (N)

F_s : Kesme kuvveti (N)

F_v : İlerleme kuvveti (N)

F_r : Radyal kuvvet (N)

F_a : Eksenel kuvvet (N)

F_t : Teğetsel kuvvet (N)

F_n : Normal kuvvet (N)

F_d : Delaminasyon faktörü

D_o : Nominal çap (mm)

D_{max} : Maksimum hasarlı çap (mm)

W : Nominal genişlik (mm)

W_{max} : Maksimum hasarlı genişlik (mm)

ρ : Yoğunluk (g/cm^3)

E : Elastiklik modülü (GPa)

E_f/ρ : Spesifik modül (MNm/kg)

R_m : Çekme dayanımı (MPa)

R_m/ρ : Spesifik dayanım (kNm/kg)

σ_{fu} : Çekme dayanımı (MPa)

$\sigma_{çekme}$: Çekme mukavemeti (N/mm^2)

ε_{uzama} : Birim uzama

σfu/ρ : Spesifik dayanım (kNm/kg)

v : Kesme hızı (m/dk)

N : Fener mili hızı (dev/dk)

D : Kesici takım çapı (mm)

v_f : Dakikadaki ilerleme miktarı (mm/dk)

f : Devir başına ilerleme miktarı (mm/dev)

a_f : Diş başına ilerleme miktarı (mm/diş)

Z_e : Aynı anda parça ile temas eden diş sayısı

φ_s : Kavrama açısı (°)

h_m : Ortalama talaş kalınlığı (mm)

a : Kesme derinliği (mm)

A_s : Ortalama talaş kesiti (mm^2)

b : Talaş genişliğini (mm)

λ : Helis açısı (°)

k_s : Özgül kesme kuvveti (N/mm^2)

S/N : Sinyal gürültü oranı

p : Anlamlılık

R_a : Yüzey pürüzlülüğü (µm)

W_a : Dalgalılık (µm)

Kısaltmalar

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)

AN : Akrilonitril

CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics (Karbon Fiber Takviyeli Plastik)

EPS : Expanded Polystyrene (Genleştirilmiş Polistiren)

GA : Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)

HSS : High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)

LN_2 : Sıvı Nitrojen

PAN : Poliakrilonitril

PCD : Polikristal Elmas

PSO : Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)

PVD : Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)

RC : Remote Control (Uzaktan Kontrol)

RPM : Revolutions Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)

RSM : Response Surface Methodology (Cevap Yüzey Metodu)

RTM : Resin Transfer Molding (Reçine Transfer Kalıplama)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SK : Sementit Karbür

SiO_2 : Silikon Dioksit

TiAIN : Titanyum Alüminyum Nitrit

TiN : Titanyum Nitrit

VARTM : Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu)

WC : Tungsten Karbür

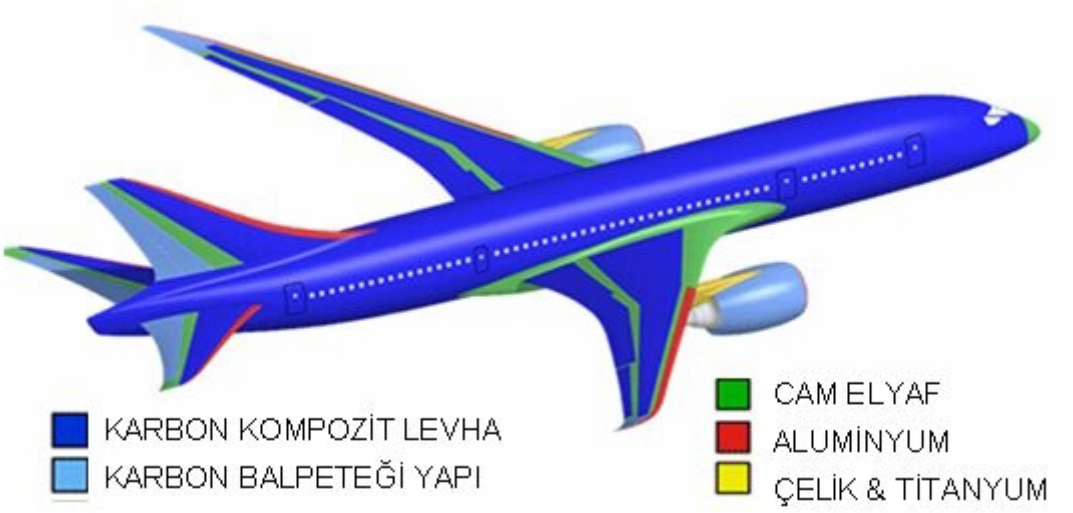
YSA : Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler birbiri içerisinde çözünmeyen farklı malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu oluşumdaki amaç farklı malzemelerin sahip olduğu iyi özellikleri tek bir malzemede elde etmektir. Farklı türleri olmasına rağmen kompozit malzemeler denilince akla ilk olarak fiber takviyeli plastikler gelmektedir. Fiber takviyeli plastikler arasında ise en çok cam fiber takviyeli plastikler ve karbon fiber takviyeli plastikler kullanılmaktadır.

Karbon fiber takviyeli plastikler (CFRP) yüksek dayanım ve sertlik, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek korozyon dayanımı, hafiflik, mükemmel yorulma dayanımı gibi önemli özelliklere sahiptir. Bu arzu edilen özellikleri sayesinde modern havacılık ve uzay sektöründe CFRP kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Tsao ve Hocheng, 2004; Davim ve Reis, 2005; Karpat ve Polat, 2013).

Airbus firmasının ürettiği Airbus A350 modelinin %52 si karbon fiber takviyeli plastik malzemeden yapılmıştır. Yine bir başka ticari uçak üretimi yapan firma olan Boeing'e ait 787 Dreamliner model uçakta bu malzemenin kullanım oranı %50 civarındadır. Uçak gövdesinin parçaları hatta rüzgâr kanatlarında CFRP kullanılmıştır. Yapılan ölçümlere göre uçağın ağırlığında alüminyum alaşımlı uçaklara göre %20 düşüş olmuş ve aerodinamik verime fayda sağlamıştır. Tüm bu faydaların yanı sıra alüminyum alaşımdan imal edilmiş uçağın fiyatı ile kompozit malzemeden imal edilmiş uçağın fiyatı arasında çok önemli bir fark görülmemiştir. Şekil 1.1.'de Boeing firmasının ürettiği 787 model yolcu uçağında kullanılan malzemeler görülmektedir (Özel ve Töre, 2007; De Lacalle ve ark., 2009).



Şekil 1.1. Boeing 787 yolcu uçağında kullanılan malzemeler (Özel ve Töre, 2007)

Karbon fiber takviyeli plastiklerin kullanıldığı diğer önemli sektör de otomotiv sektörüdür. Son yıllarda otomotiv sektörü hafif araçlara olan isteğin güçlü bir şekilde arttığına tanık olmuştur. Bu artışın sebebi düşük ağırlıktaki araçların yakıt tüketiminin az olması haliyle verimlerinin yüksek oluşudur (Yukimoto ve ark., 2015). Şekil 1.2.'de karbon fiber takviyeli plastik kullanılarak üretilen bir otomobil görülmektedir.



Şekil 1.2. CFRP kullanılarak üretilmiş bir otomobil (Anonymous, 2016a)

Araçların gövdelerinde karbon fiber kullanılmasıyla araçların ağırlıkları düşmekte ve böylece araçların performansında önemli artışlar görülmektedir. Bu durum üreticileri sadece gövde değil diğer parçaları da CFRP'den yapmaya yöneltmiştir. Şekil 1.3.'te CFRP kullanılarak üretilmiş bir otomobil jantı görülmektedir.



Şekil 1.3. CFRP'den imal edilmiş bir otomobil jantı (Anonymous, 2016a)

Günümüzde her ne kadar sadece performans araçları için kullanılsa da bu yüzyılda otomotiv endüstrisinde CFRP kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir (Yukimoto ve ark., 2015).

Karbon fiber takviyeli plastikler, son yıllarda motorlu araçların yanı sıra bisiklet yapımında da kullanılmaktadır. Bisikletin hafiflemesi ile sürücünün kendisi haricinde taşıması gereken yük azalmakta ve böylece daha konforlu ve rahat bir sürüş sağlanmaktadır. Ayrıca taşıması da kolaylaşmaktadır. Şekil 1.4.'te CFRP'den imal edilmiş bir bisiklet kadrosu ve bisiklet vites aktarıcısı görülmektedir.



a) b)

Şekil 1.4. CFRP'den üretilmiş, a) Bisiklet kadrosu, b) Bisiklet vites aktarıcısı (Anonim, 2011; Anonymous, 2016a)

Ticari kullanımının yanısıra hobi amaçlı olarak da quadrocopter, drone gibi uzaktan kontrol edilebilen (RC) hava araçlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu cihazlar günümüzde hobi amacının dışında insanların gidemediği yerlerin görüntülerini almak gibi amaçlar için de kullanılmaktadır. Bu tür cihazlar genellikle elektrikli motor ile çalışmaktadırlar. Bu sebeple enerjilerini pillerden alırlar. Pillerin hızlıca tükenmemesi ve cihazın daha fazla havada kalması için cihazın pilden daha az akım çekmesi gerekir. Bu gereklilik için cihaz mümkün mertebe hafif ve gereği kadar mukavemetli olmalıdır. Bu da bizlere kompozit malzemenin önemini bir kez daha göstermektedir. Aşağıda Şekil 1.5.'te CFRP'den üretilmiş bir RC helikopter kuyruğu görülmektedir.



Şekil 1.5. CFRP' den üretilmiş bir RC helikopter kuyruğu (Anonymous, 2016a)

Karbon fiber takviyeli plastikler her ne kadar nihai şekil ve ölçülere yakın olacak şekilde üretilseler de istenilen yüzey pürüzlüğü ve toleransı elde etmek, parçayı tam olarak nihai haline ulaştırmak ve montaj yapmak için tıpkı diğer malzemelerde olduğu gibi delme, frezeleme ve tornalama gibi konvansiyonel talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır (Davim ve Reis, 2005; Karpat ve Polat, 2013). Şekil 1.2.-1.5.'te gösterilen CFRP'den imal edilmiş parçaların resimlerinden açıkça anlaşılacağı üzere frezeleme ve delme işlemleri, parçaları nihai haline ulaştırmak için neredeyse kaçınılmazdır.

CFRP malzemeler düşük ısıl iletkenlik, karbon fiberin doğal aşındırıcı ve aşırı sertlik özelliklerinden ötürü bu malzemeyi frezelemek veya delmek oldukça zordur. Ayrıca talaşlı imalat esnasında CFRP'nin homojen olmayan ve anizotropik olan yapısı nedeniyle hızlı takım aşınması, matris kırılması, termal hasarlar, fiber yırtılması ve delaminasyon gibi problemler ortaya çıkmaktadır (Karpat ve Polat, 2013; Slamani ve ark., 2015).

Bu problemlerden anlaşılacağı üzere konvansiyonel malzemelerin işlenmesinde yararlanılan bilgi ve metotlar (parametreler ve koşullar) bu yeni malzemeler için geçerli olmamaktadır. Bu sebeple işlenebilirliği iyileştirmek adına çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Khairusshima ve ark., 2013). Bu çalışmalarda kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin optimizasyonunun yapılmasının yanı sıra kesme koşullarının iyileştirilmesi çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Kesme koşullarının işlenebilirliğe katkısını artırmak adına Dış Enerji Destekli İşleme (External Energy Assisted Machining) konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bunlar ısıl destekli işleme, kriyojenik işleme, titreşim destekli işleme gibi tekniklerdir (Jeon ve ark., 2013). Bu

çalışmada son yıllarda ön plana çıkan dış enerji destekli işleme metotlarından biri olan kriyojenik koşullarda işleme metodu kullanılarak, önemli bir mühendislik malzemesi olan CFRP'nin frezelenmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca kriyojenik işleme koşullarına da yenilikçi bir yaklaşım getirilmiştir. Bu kapsamda literatürde henüz kompozitler için çalışması mevcut olmayan kriyojenik sıvıya daldırarak işleme metodu uygulanmıştır. Deneyler farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılmış ayrıca aynı parametreler ile kuru ortamda testler yapılıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Fiber takviyeli plastiklerin işlenmesi konusunda ilk teorik çalışma 1971 yılında Everstine ve Rogers tarafından yapılmıştır. Daha sonra araştırmacılar bu alanda deneysel çalışmalar yapmaya devam etmişlerdir (Davim ve Reis, 2005).

Literatürde kompozit malzemelerin frezelenmesi, delinmesi, tornalanması ve taşlanması konusunda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda çoğunlukla malzeme olarak cam fiber takviyeli plastikler kullanılmış olup işleme kuru ortamda yapılmıştır. Kriyojenik koşullarda işleme tekniği henüz yeni bir metot olduğu için literatürde yeteri kadar çalışma mevcut değildir. Ayrıca bu tez çalışmasında kullanılan kriyojeniğe daldırarak işleme tekniğinin kompozitlerin işlenmesine uygulanması literatürde mevcut değildir. Bu yönüyle bu çalışma literatüre bir yenilik katmıştır.

2.1. Kompozitlerin Frezelenmesi Konusunda Yapılan Çalışmalar

Davim ve Reis (2005) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesinde kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon arasındaki ilişkiyi araştırmak için deneyler yapmışlardır. Deneylerinde üç farklı kesme hızı (28, 38 ve 47 m/dk), üç farklı ilerleme hızı (200, 410 ve 860 mm/dk) ile iki farklı takım (iki ağızlı ve altı ağızlı parmak freze) kullanmışlardır ve deneyler kuru işleme koşullarında yapılmıştır. Deneylerin sonucunda her iki takımla da 1 ile 3 μm arasında yüzey pürüzlüğü elde etmenin mümkün olduğunu, delaminasyon faktörünün ilerleme hızı ile yavaşça arttığını, iki ağızlı takımın altı ağızlı takıma göre daha az delaminasyon yarattığı yani delaminasyon faktörünün iki ağızlıda daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Sorrentino ve Turchetta (2011) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelemesinde kesme koşullarının kesme kuvveti üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deneyler yapmışlardır. Deneylerde üç farklı eksenel kesme derinliği (1, 1.5 ve 2 mm), dört farklı radyal kesme derinliği (10, 20, 30 ve 40 mm), üç farklı ilerleme hızı (100, 250 ve 468 mm/dk) ve sabit kesme hızı (100 m/dk) kesme parametreleri olarak belirlenmiş ve deneyler kuru işleme şartlarında yapılmıştır. Her bir deney üç kere tekrar edilerek toplamda 108 deney yapılmıştır. Takım ilerlemesi, eksenel kesme derinliği ve radyal kesme derinli arttıkça kesme kuvvetinin z bileşeninin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca regresyon analizi yardımı ile kesme kuvvetlerinin kesme parametreleri ile ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Hintze ve ark. (2011) delaminasyonun takım aşınmasının bir fonksiyonu olduğunu düşünerek CFRP malzemenin frezelenmesi konusunda deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Deneylerde kesme hızı (800 m/dk) ve ilerleme hızı (0.06 mm/diş) kesme parametreleri kullanılmıştır. Yeni ve aşınmış takımlar kullanarak ve fiber oryantasyonunu değiştirerek delaminasyon ile sistematik bir ilişki kurmaya çalışmışlardır. Bu deneyler kuru işleme koşulunda yapılmış ve sonuç olarak delaminasyonun takım aşınmasına doğrudan bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca delaminasyonun hangi kritik fiber kesme açılarında oluştuğu ve hangi durumlarda yayılma gösterdiği de deneylerle saptanmıştır.

Bayraktar (2011) karbon elyaf takviyeli plastiklerin frezelenme performasını deneysel olarak araştırmıştır. Bu çalışma kapsamında üç farklı ilerleme hızı (0.03, 0.06 ve 0.09 mm/diş), üç farklı fener mili hızı (3800, 4800 ve 5800 dev/dk) ve altı faklı kesici takım (farklı kaplama durumu, helis açısı ve ağız sayılarında) giriş parametreleri olarak belirlenmiştir. Sonuç parametreleri olarak ise kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlüğü ve yüzey hasarı ölçülmüştür. Deneyler kuru işleme koşulunda yapılmıştır. Deneylerin sonucunda kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hasarı açısından kaplamasız kesici takımların daha iyi işleme yaptığı ayrıca kesici takımın ağız sayısı ve helis açısı arttıkça yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hasarında artış olduğu saptanmıştır.

Pecat ve ark. (2012) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesinde proses parametrelerinin ve koşullarının yüzey kalitesine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneylerde üç farklı parametre kullanılmış olup bunlar: kesme hızı (20, 100 ve 200 m/dk), fiber oryantasyon açısı (0, 90, 45 ve -45°) ve iş parçası sıcaklığı (-40, 20, 80 ve 120 °C)'dır. Deneylerde ilerleme hızı 0.1 mm/diş (diş başı ilerleme) ve kesme derinliği 0.6 mm olacak şekilde sabit tutulmuş ve toplam 18 deney yapılmıştır. İş parçası sıcaklığını azaltmak için karbondioksit, artırmak için sıcak hava kullanılmıştır. Deneyler kuru koşullarda yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre 0° ve 45° fiber oryantasyonunda düzgün yüzeyler elde edilirken -45° ve 90° fiber oryantasyonunda aynı durum söz konusu değildir. Ayrıca bu dört farklı fiber oryantasyonuna sahip malzemeler ile yapılan deneylerde farklı kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Buna ek olarak kesme hızı ve iş parçası sıcaklığı arttıkça parçada meydana gelen hasarın da arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıkta ise (120°C) ciddi termal hasarlar oluşmuştur.

El-Hofy ve ark. (2011) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesinde (kanal açma) yüzey yapısını etkileyen faktörleri tespit etmek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Farklı kesici takımlar (Tungsten Karbür (WC), Polikristal elmas (PCD)

), dört farklı kesme hızı (200, 350, 500 ve 650 m/dk) ve ilerleme hızı (0.03, 0.06, 0.10 ve 0.15 mm/diş) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Ayrıca iki farklı kesme koşulunda deneyler yapılmıştır. Bunlar: kuru koşul ve 8 ^{o}C sıcaklık 0.4 bar basınçta soğuk hava ile soğutma yapılan koşuldur. Soğuk hava kullanarak termal hasarları (yanma ve reçinenin yumuşaması) minimize etmeye çalışmışlardır. Deney sonuçlarına göre ANOVA tekniği ile analiz yapıldığında takım malzemesinin istatistiksel olarak yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür. Düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme hızı kombinasyonunun yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. ANOVA tekniğine göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye ilerleme hızı sahiptir. Ayrıca düşük ilerleme hızları ile ve kuru koşullarda yapılan bazı deneylerde reçinenin yandığı gözlemlenmiştir.

Schorník ve ark. (2015) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesinde kesme koşullarının yüzey kalitesine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneylerde iki farklı parametre kullanmışlardır. Bunlar: fener mili hızı (20000 dev/dk sabit), ilerleme hızı (150, 200, 250, 300, 350 ve 400 mm/dk)'dır. Ayrıca deneylerde düz frezeleme ve ters frezeleme teknikleri ayrı ayrı uygulanmıştır. Farklı kesme parametreleri ve teknikleri kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Düz frezeleme ile işlenen parçalarda yüzey pürüzlülüğü değeri, düşük ilerleme hızlarında genel olarak ters frezelemeden fazladır. Ancak delaminasyon açısından değerlendirildiğinde düz frezelemede daha iyi yüzeyler elde edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri düşük ilerleme hızında (150 m/dk) oldukça yüksek iken diğer hızlarda bu değerler birbirine yakındır.

Yashiro ve ark. (2013) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesi esnasında takımda ve parçada oluşan sıcaklığı ölçmek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Deneylerde üç farklı metot ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bunlar: takım-iş parçası termokupul metodu ile kesme noktası sıcaklığı ölçümü (karbon fiber ve takım arasında oluşan sıcaklık), kızılötesi kamera ile parmak freze sıcaklığının ölçümü ve k tipi gömülü termokupul ile işlenen yüzeyin sıcaklığının ölçümüdür. Kesme noktası sıcaklığı ölçümü için sekiz farklı fener mili hızı parametresi (600, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000 ve 12000 dev/dk) ve sekiz farklı ilerleme hızı parametresi (75, 125, 250, 500, 750, 1000, 1250 ve 1500 mm/dk) kullanılmıştır. İşlenen yüzeyin sıcaklığını ölçmek için ise altı farklı fener mili hızı parametresi (1000, 4000, 6000, 8000, 10000 ve 12000 dev/dk) ve altı farklı ilerleme hızı parametresi (63, 250, 375, 500, 625 ve 750 mm/dk) kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre 2000 dev/dk fener mili hızı ve sonrası için

kesme noktası sıcaklık değerleri epoksi reçinenin yaklaşık camsı geçiş sıcaklığı olan 180 ^{o}C'yi geçmiştir. Deneyler sonrasında işlenen yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) ölçülmüş ve yüksek kesme hızları ile yapılan deneyler ile düşük hızdakiler arasında hasar açısından belirgin bir fark bulunamamıştır.

Sheikh-Ahmad ve ark. (2012) karbon fiber takviyeli plastiklerin kenar frezeleme prosesi esnasında oluşan hasar üzerine yoğunlaşmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada üç farklı fener mili hızı (5000, 1000 ve 15000 dev/dk) ve üç farklı ilerleme hızı (2.54, 5.08 ve 10.16 m/dk) kesme parametreleri olarak belirlenmiş ayrıca farklı efektif talaş kalınlığında işleme yapılarak deneyler tamamlanmıştır. İşlenebilirlik ortalama delaminasyon derinliği ve yüzey pürüzlülüğüne göre yapılmıştır. Sonuçlara göre ortalama delaminasyon derinliği ilerleme hızındaki artış ile artmış, kesme hızındaki artış ile azalmıştır ayrıca eksenel kesme derinliği (kesme mesafesi) arttıkça delaminasyon derinliği de artmıştır. Efektif talaş derinliği ile delaminasyon derinliği arasında güçlü bir ilişki olduğu saptanmıştır. En iyi işleme kalitesi yüksek kesme hızı, düşük ilerleme hızı kombinasyonunda elde edilmiştir.

Shahrajabian ve Farahnakian (2015) karbon fiber takviyeli plastiklerin küresel parmak freze ile işlenebilirliğinin optimizasyonu konusunda bir çalışma yürütmüşlerdir. Deneysel çalışmanın yanında optimum parametrelerin bulunması için yanıt yüzey metodu (RSM) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) tekniği ile bir model de oluşturmuşlar ve deneyler ile modeli doğrulamışlardır. Deneylerde üç farklı kesme parametresi kullanmışlardır. Bunlar: fener mili hızı (1250, 2625 ve 4000 dev/dk), ilerleme hızı (200, 500 ve 800mm/dk) ve kesme derinliği (2, 4 ve 6 mm)'dir. Sonuç parametreleri olarak işleme kuvveti (F_x, F_y ve F_z'nin bileşkesi) ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Deneysel sonuçlara göre ilerleme hızı arttıkça işleme kuvveti bariz bir şekilde artmış, yüzey pürüzlülüğü değeri ise kesme derinliği 6 mm değeri hariç düzgün bir şekilde artan eğilime sahip olmuştur. Fener mili hızı arttıkça işleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değeri azalmıştır. Ayrıca ANOVA tekniği ile yapılan analizde ilerleme hızı, hem işleme kuvvetine hem de yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametre olarak saptanmıştır.

De Lacalle ve ark. (2009) farklı takımların karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Beş farklı deney yapılmış ve her bir deneyde farklı bir takım kullanılmıştır. Malzeme, geometri, kenar şekli, kaplama durumu açısından farklılık gösteren takımlar deneylerde kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre kaplama kalınlığı arttıkça takım ömrünün de arttığını

gözlemlemişlerdir. Çok ağızlı takımların z ekseninde kuvvet üretmedikleri bu yüzden de iş parçasında eğilmeye yol açmadığını saptamışlardır. Genel sonuç olarak kenar frezelemede çok ağızlı takımların seçilmesini önermişlerdir.

Kerrigan ve ark. (2012) karbon fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesi prosesini telemetrik termokupul sensör ile görüntülemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada kablosuz ölçüm sistemi kullanılmıştır. K tipi bir termokupul kesici takımın içerisine gömülmüş ve takım tutucu içerisindeki kablosuz data aktarım modülüne bağlanmıştır. Deneylerde iki farklı kesme hızı (60 ve 201 m/s), ilerme hızı (375 ve 1275 mm/dk), kesme derinliği (1 ve 3.4 mm) ve iş parçası kalınlığı (1 ve 5 mm) kesme parametreleri olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre deney esnasında oluşan en yüksek sıcaklık 90 °C ‘den daha düşük olmuştur. Bu sıcaklık değeri ise camsı geçiş sıcaklığının altındadır. İş parçası kalınlığı ve kesme derinliği parametreleri sıcaklık üzerinde en etkili parametre olmuşlardır.

Azmi ve ark. (2013) cam fiber takviyeli plastiklerin parmak freze ile frezelenmesi konusunda deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde üç farklı parametre kullanmışlardır. Bunlar: fener mili hızı (3000, 4000 ve 5000 dev/dk), ilerleme hızı (500, 750 ve 1000 mm/dk), kesme derinliği (1, 1.5 ve 2 mm)’dir. Çıkış parametreleri olarak yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve işleme kuvvetlerini belirlemişlerdir. Ayrıca optimum parametreleri bulmak için Taguchi ve ANOVA metotlarından faydalanmışlardır. Deneyler kuru koşulda yapılmıştır. Sonuçlara göre yüzey pürüzlülük değerine en fazla etki eden parametre ilerleme hızı olmuştur. Fener mili hızı ise ikinci sıradadır. Kesme derinliğinin etkisi ise ihmal edilebilir düzeydedir. Takım ömrü dikkate alındığında yine en fazla etkiyi ilerleme hızı yapmıştır. Fener mili hızının takım ömrüne etkisi ise ilerleme hızına göre oldukça düşüktür. Yüzey pürüzlüğüne etkisi ile benzer olarak kesme derinliğinin takım ömrüne kayda değer bir etkisi olmamıştır. Kesme kuvvetine etki sıralamasında ise durum farklıdır. Yine en fazla etkiyi ilerleme hızı sağlamış ancak ikinci sırayı bu sefer ilerleme hızına yakın bir etki derecesine sahip olarak kesme derinliği almıştır. Fener mili hızı ise kesme kuvveti üzerinde kayda değer bir etkiye sahip değildir.

Razfar ve Zadeh (2009) cam fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesinde optimum kesme parametrelerini bulmak için yapay sinir ağları (YSA) ve genetik algoritma (GA) kullanarak deneysel sonuçlardan tahminsel bir model oluşturmuşlardır. Deneylerde dört farklı parametre kullanmışlardır. Bunlar: fener mili hızı (500, 1000 ve 1600 dev/dk), ilerleme hızı (200, 350 ve 500 mm/dk), kesme derinliği (1, 2 ve 3 mm) ve

kesici takım ağız sayısı (2 ve 4) ‘dır. Yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon ise çıktı parametresi olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre ilerleme hızı arttıkça hem yüzey pürüzlülüğü hem de delaminasyon artmıştır. Fener mili hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Ayrıca iki ağızlı takım hem delaminasyon hem de yüzey pürüzlülüğü açısından dört ağızlı takıma göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Kılıçkap ve Çelik (2012) cam fiber takviyeli plastiklerin frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde üç farklı giriş parametresi kullanmışlardır. Bunlar: kesme hızı (31.4, 62.6 ve 94.2 m/dk), ilerleme hızı (0.05, 0.10 ve 0.15 mm/dev) ve farklı kesici takımlar (HSS, TiN kaplı HSS, Sementit Karbür (SK))’dır. Deney sonuçlarına göre kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalırken ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ayrıca sementit karbür takım, HSS takımlara göre daha başarılı olmuştur. Yapılan bu çalışma neticesinde, iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için yüksek kesme hızı, düşük ilerleme hızı ve sert takımlar kullanılması önerilmiştir.

Sreenivasulu (2013) cam fiber takviyeli plastiklerin parmak freze ile frezelenmesinde, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyonun optimize edilmesi konusunda bir çalışma yapmıştır. Bu kapsamda deneysel bir çalışma yürütmüş optimizasyon için Taguchi ve ANOVA tekniklerinden yararlanmıştır ayrıca yapay sinir ağları (YSA) tekniğini kullanarak tahminsel bir model de oluşturmuştur. Deneylerde üç farklı kesme parametresi kullanmıştır. Bunlar: fener mili hızı (1000, 1250 ve 1500 dev/dk), ilerleme hızı (200, 300 ve 400 mm/dk) ve kesme derinliği (0.5, 1 ve 1.5 mm)’dir. Varyans analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü değerini en çok etkileyen parametre kesme derinliği olurken, delaminasyon değeri için en etkili parametre kesme hızı olmuştur. YSA ile kurulan tahminsel model ile deneysel sonuçlar kıyasladığında arada iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

2.2. Kompozitlerin Delinmesi Konusunda Yapılan Çalışmalar

Arul ve ark. (2006) cam fiber takviyeli plastiklerin delinmesinde proses parametrelerinin optimizasyonu ve modellenmesi konusunda bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde kesme parametreleri olarak üç farklı çapta iki ağızlı HSS takım (4, 6 ve 8 mm), beş farklı fener mili hızı (500 - 2500 dev/dk aralığında) ve üç farklı ilerleme hızı (0.02, 0.02 ve 0.06 mm/dev) kullanmışlardır. İtme kuvveti, tork ve takım aşınması kriterlerine göre işlenebilirlik değerlendirilmiş ayrıca analitik bir model oluşturulup

deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Analitik modelden kritik itme kuvveti 70 N olarak bulunmuş ve bu değerin deneysel sonuçlarla uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Ayrıca takım aşınması yönünden en iyi kesme parametreleri; kesme hızı 18.85 m/dk ve ilerleme hızı 0.02 mm/dev olarak belirlenmiştir.

Palanikumar (2010) cam fiber takviyeli plastiklerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini deneysel olarak test edip parametrelerin etkisini ANOVA tekniği ile analiz etmiştir. Ayrıca uygulaması kolay olan ve zahmet gerektirmeyen, az miktarda deney ile rahatça kurulabilen cevap yüzey yöntemi (RSM) kullanarak delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini tespit etmek için matematiksel bir modelleme yapmıştır. Deneylerinde üç farklı giriş parametresi kullanmıştır. Bunlar: fener mili hızı (500, 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dk), ilerleme hızı (100, 150, 200, 250 ve 300 mm/dev) ve matkap çapı (2, 4, 6, 8 ve 10 mm) 'dır. Deney sonuçları ile modelden elde edilen tahminsel sonuçlar çalışılan parametre aralığında birbirleri ile uyumlu olmuştur. Sonuçlara göre ilerleme hızı, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. İlerleme hızı arttıkça bu iki değer de artmıştır. Matkap çapı ise delaminasyon üzerinde oldukça etkili iken yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde ilerleme hızı kadar etkili değildir. Çap artıkça delaminasyonun arttığı ancak yüzey pürüzlülüğünün çap artışından çok etkilenmediği gözlemlenmiştir.

Kilickap (2010) cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesi sırasında oluşan delaminasyona kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap uç açısı gibi kesme parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Ayrıca delaminasyonun minimize edilmesi için Taguchi ve ANOVA metotlarından faydalanmıştır. Deneylerde dört farklı kesme hızı (5, 10, 15 ve 20 m/dk), dört farklı ilerleme hızı (0.1, 0.2, 0.3 ve 0.4 mm/dev) kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı uç açısına sahip (118^o ve 135^o) matkapla deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre kesme hızı ve ilerleme hızı arttıkça delaminasyonun arttığı görülmüştür ancak ilerleme hızının etkisi daha baskındır. 118^o uç açısına sahip matkapla yapılan deneylerde delik girişlerinde 135^o uç açısına sahip matkaba göre daha az hasar oluşmuştur.

Khashaba ve ark. (2010) işleme parametrelerinin cam fiber takviyeli plastiklerin delinme performansına etkisini araştırmışlardır. Deneylerde kesme parametreleri olarak beş farklı kesme hızı (6.405, 12.710, 20.253, 32.03 ve 50.635 m/dk), beş farklı ilerleme hızı (0.056, 0.112, 0.22, 0.315 ve 0.45 mm/dev) ve iki farklı çapta takım (8 ve 13 mm) kullanmışlardır. Çıktı parametresi olarak itme kuvveti, delaminasyon, yüzey

pürüzlülüğü ve deliklerin yük taşıma kapasiteleri ölçülmüştür. Sonuçlara göre bu parametreler ile delaminasyonsuz delik elde edilememiştir ayrıca ilerleme hızının ve takım çapının artması delaminasyonu artırmıştır. Delaminasyonun artması ile de yük taşıma kapasitesi azalmıştır. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlüğü değeri de artmıştır ancak kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne bariz bir etkisi yoktur.

Isbilir ve Ghassemieh (2012) karbon fiber takviyeli plastiklerin çok tabakalı Titanyum Alüminyum Nitrit (TiAIN)/Titanyum Nitrit (TiN) fiziksel buhar biriktirme (PVD) kaplamalı WC takımlar ile delinmesinde oluşan delaminasyon ve takım aşınmasını araştırmışlardır. Deneylerde dört farklı fener mili hızı (3000, 4500, 6000 ve 9000 dev/dk) ve dört farklı ilerleme hızı (355, 457, 585 ve 684 mm/dk) kullanmışlardır. Deney esnasında itme kuvveti ve tork ölçümü yapılmış deney sonrasında oluşan delaminasyonlar dijital görüntü işleme tekniği ile analiz edilmiştir. İşlenen her bir deliğin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ayrıca takım aşınması da ölçülerek işlenebilirlik değerlendirilmiştir. İtme kuvveti ile tork değerleri kesme hızı ve ilerleme hızının artmasıyla artmıştır ancak ilerleme hızının etkisi daha baskındır. Delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü ise ilerleme hızının artışıyla artarken fener mili hızının artışıyla azalmıştır.

Krishnaraj ve ark. (2012) karbon fiber takviyeli plastik tabakaların yüksek hızda delinmesinde proses parametrelerini optimize etmek için bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde malzeme olarak 2 mm kalınlığında ince karbon fiber takviyeli plastik plaka; kesme parametreleri olarak üç farklı fener mili hızı (12000, 16000 ve 20000 dev/dk) ve dört farklı ilerleme hızı (0.01, 0.05, 0.1 ve 0.3 mm/dev) kullanılmıştır. Deneyler esnasında itme kuvvetleri ölçülmüş ayrıca deneyler sonrasında deliğin boyutsal doğruluğu, giriş ve çıkışlardaki delaminasyon ölçülerek işlenebilirlik değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre ilerleme hızı; itme kuvveti, çıkış delaminasyonu ve delik çapının doğruluğu üzerinde en fazla etkiyi gösteren parametre olmuştur. Düşük ilerleme hızları itme kuvveti ve delaminasyonu azaltırken yüksek ilerleme hızları ile yapılan deneylerde delik çapı nominal çapa daha yakın olmuştur. Kesme ve ilerleme hızının giriş delaminasyonu üzerinde görülebilir bir etkisi olmamıştır.

Köklü ve ark. (2015) fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin talaşlı işlenebilme performansını araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneylerde kullanılan fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme farklı tabakalanma sırasına sahip, bünyesinde hem karbon hem de cam fiber bulunduran bir

kompozittir. Malzemenin bir tarafındaki tabakalanma sırası camdan karbona doğru artarken diğer taraftaki sıralama da tam tersi olarak karbondan cama artmaktadır. Bu sebeple malzemenin bir yönü cam elyaf, diğer yönü karbon elyaf takviyeli plastik malzeme gibi davranmaktadır. Deneylerde iki farklı fener mili hızı (5000 ve 7500 dev/dk) ve beş farklı ilerleme hızı (0.01, 0.02, 0.04, 0.08 ve 0.12 mm/dev) parametreleri kullanılmıştır. Bu parametrelerin itme kuvveti, tork ve delaminasyona etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre ilerleme hızının itme kuvveti ve delaminasyon (hasar faktörü) üzerinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Devir sayısının (fener mili hızı) etkisi ise daha sınırlıdır. Ayrıca cam elyaf yönündeki hasar karbon elyaf yönündeki hasara nazaran daha çok olmuştur.

2.3. Kriyojenik Koşullarda İşleme Konusunda Yapılan Çalışmalar

Ishida ve ark. (2014) karbon elyaf takviyeli plastiklerin frezelenmesi esnasında oluşan ısıyı ve deleminasyonu bertaraf edip işleme kalitesini artırmak için kriyojenik takım soğutma tekniğini kullanmışlardır. Bu tekniğe göre takım sıvı nitrojen (LN_2) dolu bir kap içerisinde bir dakika boyunca soğutulmuş ardından soğutulmuş takım ile parça işlenmiştir ve bu uygulama her işleme öncesi yapılmıştır. Deneyler helisel frezeleyerek delik açma şeklinde yapılmıştır. Ayrıca deneylerde konvansiyonel işlemenin yanı sıra ultrasonik titreşim destekli işleme tekniği de kullanılmıştır. Fener mili hızı sabit 8000 dev/dk ve ilerleme hızı sabit 270 mm/dk alınmıştır. Deney sonucunda takımın sıvı azotla soğutulması ve kuru işleme arasındaki fark karşılaştırılmış takımın aşınmaları arasında dikkate değer bir fark görülmemiştir. Bu durum karşısında takım aşınmasının karbon fiberin sertliğinden dolayı olduğunu ve bunun da işleme sıcaklığına hemen hemen hiç bağlı olmadığı sonucuna varmışlardır. Kesme kuvvetleri ölçüldüğünde, kuru koşulda işlemede oluşan kesme kuvvetlerinin takımın kriyojenik koşulda soğutularak yapılan deneyden elde edilen kesme kuvvetlerine göre düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebini ise kuru işleme anında oluşan ısının epoksi reçineyi ısıtması ve dolayısıyla malzemenin yumuşamasından ötürü olmasına bağlamışlardır. Deney sonrası delaminasyonlar ölçüldüğünde ise kriyojenik soğutma tekniği ile yapılan deneylerde yüzey kalitesinde artış gözlemlenmiştir.

Khairusshima ve ark. (2013) karbon elyaf takviyeli plastiklerin frezelenmesi esnasında oluşan takım aşınması ve yüzey kalitesini incelemek amacıyla deneyler yapmışlardır. Deneylerde işleme esnasında oluşan ısıyı engellemek için 0.55 MPa

basınçta -10 °C sıcaklıkta soğuk hava kullanmışlardır. Soğuk hava doğrudan takıma püskürtülmüştür. Beş farklı kesme hızı (160, 165, 179, 194 ve 200 m/dk), beş farklı ilerleme hızı (0.025, 0.028, 0.035, 0.045 ve 0.05 mm/dev) ve beş farklı kesme derinliği (0.5, 0.55, 0.71, 0.91 ve 1.0 mm) deneylerin giriş parametreleri olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre yüksek kesme hızlarında soğuk hava kullanılarak yapılan işlemede kuru koşulda işlemeye kıyasla takım aşınmasında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Ancak düşük kesme hızlarında aynı durumun söz konusu olmadığını fark etmişlerdir. Bu durum karşısında düşük kesme hızlarında oluşan ısının yüksek kesme hızlarında oluşan ısı kadar yüksek olmadığını ve bu yüzden soğutmanın düşük kesme hızlarında efektif olmadığı çıkarımını yapmışlardır. Ayrıca soğuk hava kullanılarak yapılan işlemede kuru işlemeye göre daha iyi yüzey kalitesi ve daha az delaminasyon elde etmişlerdir.

Xia ve ark. (2016) karbon fiber takviyeli plastiklerin delinmesinde kriyojenik soğutmanın prosese etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda kuru ve sıvı nitrojen soğutmalı olarak deneyler yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Deneylerde sabit kesme hızı 60 m/dk ve iki farklı ilerleme hızı (0.025 ve 0.05 mm/dev) kesme parametresi olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre kriyojenik soğutma kullanılarak yapılan deneylerde takımın aşınması (kesme kenarı radyusu) değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca deliklerin yüzey kalitesi de kriyojenik soğutma ile artırılmıştır. Ancak kriyojenik soğutma kullanılarak yapılan deneylerde daha yüksek kesme kuvvetleri elde edilmiş ve delaminasyon faktörü de artmıştır.

Bhudwannachai (2014) karbon fiber takviyeli plastiklerin konvansiyonel delinmesinde, karbondioksit soğutmasının ve kriyojenik takım soğutmanın delme performansına etkisini araştırmıştır. Deneylerde sıvı nitrojen ile kesici takım soğutma, karbondioksit ile soğutma ve kuru işleme tekniklerini kullanmıştır. Performans değerlendirmesi ise kesme kuvvetleri, takım aşınması ve delaminasyona göre yapılmıştır. Deneyler sonucunda kriyojenik işlemenin yüzey kalitesini artırdığı, daha az çıkış delaminasyonu ve iç hasar oluşturduğu sonucuna varmıştır. Ancak kriyojenik koşullarda işlemenin kesme kuvvetleri ve takım aşınması yönünden avantajlı olmadığını belirtmiştir.

Wang ve ark. (2016) kriyojenik işleme koşullarının aramid fiber takviyeli kompozitlerin frezeleme kalitesine etkisini araştırmak için deneyler yapmışlardır. Bu deneylerde soğutma için sıvı nitrojen kullanılmış ve sıvı nitrojen bir nozul aracılığıyla kesme bölgesine püskürtülmüştür. Soğutmalı ve kuru olacak şekilde farklı deneyler

yapılarak sonuçlar kıyaslanmıştır. Deneylerde beş farklı nozul sıcaklığı (293 (kuru koşul), 253, 203, 153 ve 103 K), beş farklı fener mili hızı (500, 1000, 3000, 5000 ve 7000 dev/dk), beş farklı kesme derinliği (0.5, 1, 1.5, 2 ve 3 mm) ve sabit ilerleme hızı (100 mm/dk) kesme parametreleri olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre aynı kesme hızlarında kriyojenik soğutma kullanılarak yapılan deneylerde daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiş, kesme kuvvetleri de kuru işlemeye göre daha düşük olmuştur. Bu sonuçlardan fiber kesme kusurlarını önlemek için kesme kuvvetlerinin azaltılması, talaş kaldırma metodunun değiştirilmesi ve kesme bölgesinin sıcaklığının düşürülmesinin kriyojenik işlemede pozitif rol oynadığı yorumunu yapmışlardır.

Zhang ve ark. (2015) alüminyum lityum alaşımlarının frezelenmesi sırasında oluşan kalıntı (artık) gerilmelere sıvı nitrojen soğutmasının etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda frezeleme operasyonu için termo mekanik bir model oluşturmuşlar ve ayrıca deneyler yapmışlardır. Deneylerde dört farklı radyal kesme derinliği (1, 2, 3 ve 4 mm), sabit eksenel kesme derinliği (3 mm), sabit fener mili hızı (3000 dev/dk) ve sabit ilerleme hızı (0.1 mm/diş) parametreleri kullanılmıştır. Model ve deney sonuçlarına göre kesme sıcaklıklarında çok düşüş olmasına rağmen kesme kuvvetlerinde fazla bir düşüş görülmemiştir. Ölçüm sonuçlarına göre sıvı nitrojen soğutması ile yapılan deneylerde kuru olana göre artık gerilmenin daha az oluştuğu gözlemlenmiştir.

Yong ve ark. (2007) frezeleme operasyonunda kriyojenik olarak soğutulan WC takımların performansını araştırmak üzere çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalar kapsamında orta karbonlu çelik, kuru ve kriyojenik soğutulmuş WC takım ile yüksek hızda frezelenerek deneyler yapılmıştır. Deneylerde altı farklı kesme hızı (294.5, 343.6, 392.7, 409.9, 540.0 ve 589.0 m/dk), sabit ilerleme hızı (0.15 mm/diş) ve sabit kesme derinliği (0.1 mm) kesme parametreleri olarak belirlenmiştir. Her kesme için yeni bir takım kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre kriyojenik olarak soğutulan takımın aşınma direnci kuru olana göre daha iyi çıkmıştır. Aynı kesme koşulları altında kriyojenik soğutulmuş takım daha iyi performans göstermiştir.

He ve ark. (2014) TiAIN kaplı takımların derin kriyojenik soğutma yapıldıktan sonra kuru tornalamada işlenebilirlik ve aşınma mekanizmasına etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda TiAIN takım -196 °C sıcaklıkta 30 saat bekletilmiştir. Kaplanmamış, kriyojenik soğutulmamış ve soğutulmuş olmak üzere üç faklı koşulda deneyler yapılmıştır. Sonuçlara göre kriyojenik soğutulmuş kaplamalı takım ile özellikle yüksek hızlarda yapılan deneylerden elde edilen kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklığı diğer iki deney koşullarında elde edilen sonuçlara göre önemli ölçüde düşüktür. Kaplamalı

kriyojenik soğutulmuş takımın aşınma miktarı aynı kesme koşullarında diğerlerine göre daha azdır ve bu takımla daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.

Akincioğlu ve ark. (2015) kesici takımların kriyojenik soğutulmasının işleme performansına etkisi konusunda literatür araştırması yapmışlardır. Bu çalışmada literatürde yer alan deneysel çalışmalar birbirleriyle kıyaslanıp sonuçlar düzenli bir şekilde sunulmuştur. Sonuçlara göre kriyojenik soğutma pek çok takıma uygulanabilmektedir ve takım ömrünü iyileştirerek maliyetleri azaltabilmektedir. Kesici takımlara kriyojenik soğutma uygulaması 1 ile 40 saat arasında uygulanabilmektedir ancak geçmiş çalışmalarda genellikle 24 saat uygulanmıştır. Takımların kriyojenik soğutulması ile takım aşınmasında azalma meydana geleceği için kesme kuvvetleri ve işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü değerinde iyileşme olacağı sonucuna varılmıştır.

Ohashi ve ark. (2013) karbon fiber takviyeli plastiklerin taşlama performansını araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu deneylerde taşlama esnasında oluşan kuvvetler, sıcaklıklar ölçülmüş ve taşlama sonrası yüzey kalitesi değerlendirilmiştir. Deneyler kuru, çözünebilir soğutma sıvısı ve sıvı nitrojen kullanılarak üç farklı koşulda yapılmıştır. CFRP'nin kuru taşlanması sırasında oluşan kuvvetlerin çözünebilir soğutma sıvısı kullanılarak yapılan deneylere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Sıvı nitrojen kullanılarak yapılan deneylerde ise delaminasyonun kuru koşulda yapılan deneylere göre azaldığı görülmüştür. Ancak sıvı nitrojen parçayı dondurup sertliğini artırdığı için bu deneylerde taşlama kuvvetinin arttığı görülmüştür.

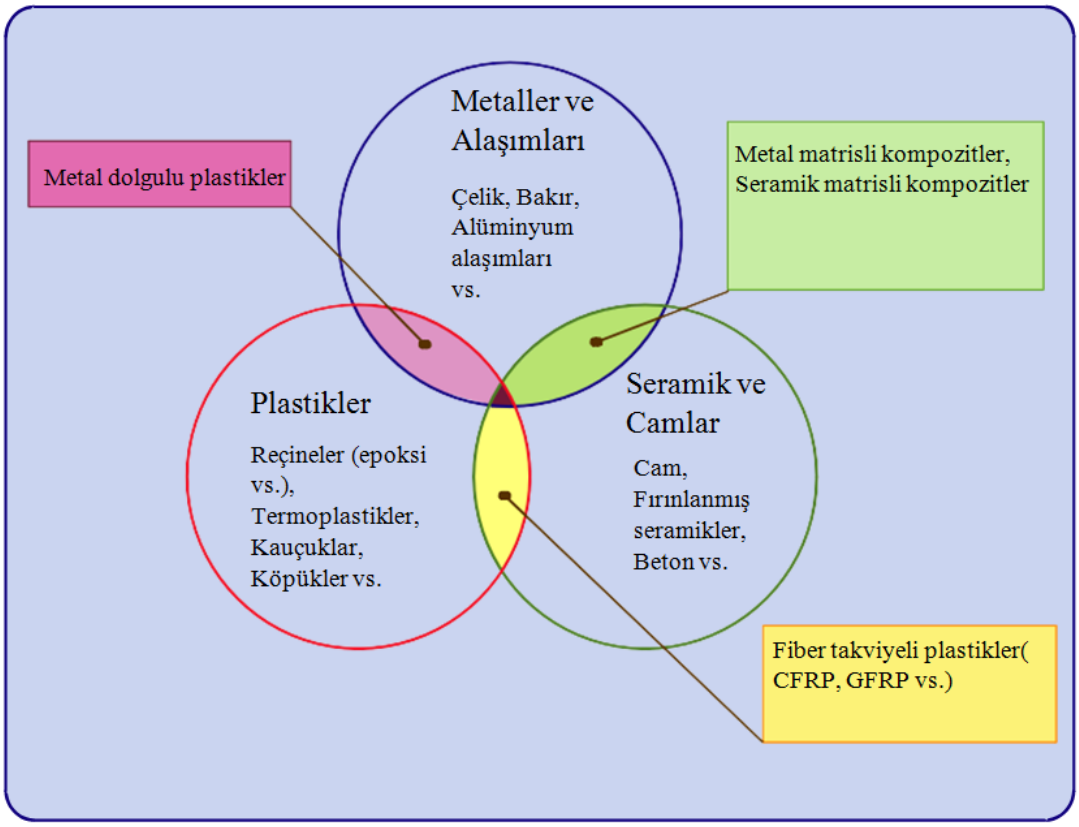
3.KOMPOZİT MALZEMELER

Belirli bir amaca yönelik olarak en az iki farklı malzemenin birbiri içerisinde çözünmeyip makro boyutta bir araya gelmesiyle oluşan yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Buradaki belirli amaç bileşenlerin herhangi birinde tek başına mevcut olmayan özelliği yeni malzemeye katmaktır. Diğer bir değişle bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir (Ersoy, 2001). Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Mekanik dayanım (Çekme, Basma, Eğilme, Yorulma, Sürünme, Darbe)
- Tokluk
- Aşınma direnci
- Korozyon direnci
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Isıl iletkenlik
- Isı direnci
- Elektrik iletkenliği
- Elektrik direnci
- Akustik iletkenlik veya sönümleme
- Rijitlik
- Hafiflik
- Boyutsal stabilite
- Görünüm
- Maliyet (Ersoy, 2001; Bayraktar, 2011; Akdoğan Eker, 2014).

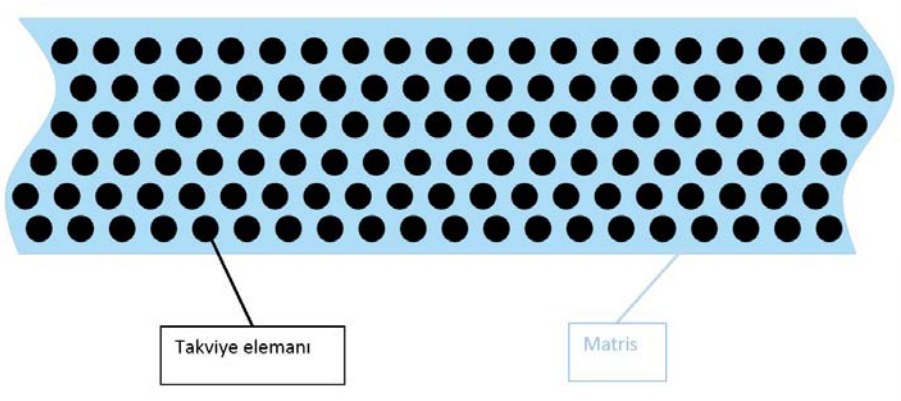
Tüm bu özelliklerin tek fazlı bir malzemede aynı anda bulunması neredeyse imkânsızdır. Tek faz halde bulunan mühendislik malzemeleri incelendiğinde her sınıfın kendisine ait güçlü ve zayıf özellikleri bulunmaktadır. Plastikler düşük yoğunluğa sahiptirler, kimyasal tepkimelere direnci çok iyidir fakat termal direnci oldukça kötüdür. Çevresel etkilere karşı makul derecede dayanıklıdır (Güneş ışığı vs.). Zayıf mekanik özelliklere sahip olmalarına karşın üretimi ve montajı kolaydır. Seramiklerin bazıları çok yoğun olmalarına rağmen bazılarının yoğunluğu düşük olabilmektedir. Mükemmel termal dayanıklılığın yanında aşınma ve korozyona da dayanıklıdır. Yüksek rijitliğe ve güçlü yapısına rağmen kırılgandırlar ve şekil vermesi oldukça zordur. Metaller ise çoğunlukla yüksek yoğunluğa sahiptirler. Sadece magnezyum, berilyum ve alüminyum diğer metallere oranla düşük yoğunluğa sahiptir. Çoğunun termal dayanımı iyidir.

Alaşımlama ile korozyon dayanımı kazandırılabilir. Çok iyi mekanik özelliklere sahiptirler ve şekillendirmek nispeten kolaydır. Sünekliği ve kırılmaya olan direnci sebebiyle metaller çok kullanılan bir mühendislik malzemesidir (Harris, 1999). Bu malzemelerin bir araya getirilmesiyle daha üstün özelliklere sahip olan kompozit malzemeler oluşmuştur. Kompozit malzemeler ve konvansiyonel mühendislik malzemeleri arasındaki ilişki Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit malzemeler ve konvansiyonel mühendislik malzemeleri arasındaki ilişki (Harris, 1999)

Kompozit malzemeler ana faz (matris) ve ikincil faz (takviye elemanı) olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bu durum Şekil 3.2.'de görsel olarak ifade edilmiştir. Matris, kompozit içerisinde genellikle sürekli bir form halinde bulunur ve mekanik özellikleri zayıftır. Takviye elemanı ise sürekli form halinde bulunmaz ve mekanik özellikleri anafaza göre çok iyidir. Burada genel olarak takviyenin görevi kompozit malzemeye mukavemet ve yük taşıma özelliği kazandırmak iken matris ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleme, kompozit malzemenin kopmasını geciktirme, takviye elemanlarını bir arada tutma ve takviye elemanlarını çevresel etkilerden koruma görevlerini üstlenir (Harris, 1999; Baker ve ark., 2004; Zor, 2016).



Şekil 3.2. Kompozit malzemenin yapısı

3.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Günümüzde pek çok alanda yaygın olarak kullandığımız kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı içinde bulunduğumuz yüzyılda başlamış gibi görünse de aslında durum böyle değildir. Kompozitlerin üretimi ve kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. İlk çağlardan beri insanlar kırılgan malzemelere bitkisel ya da hayvansal kökenli takviye elemanları koyarak bu özelliği iyileştirmeye çalışmışlardır. Buna en güzel örnek kerpiçtir. Çamura bitkisel kökenli saman takviyesi yapılarak çamurun kırılganlık özelliği iyileştirilmeye çalışılmış ve mukavemeti artırılmıştır. Bunların yanı sıra günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan cam elyafının da üretimi eskilere dayanmaktadır. M.Ö. 1600'lü yıllarda Antik Mısırda çeşitli kalınlık ve renklerde cam elyaflarla bezenmiş amforaların varlığı bize cam elyafların bu tarihte varlığını göstermektedir (Ersoy, 2001).

Fiber takviyeli plastiklerin doğması ise 1859 yılında Butlerov isimli Rus kimyagerin formaldehit polimerleri keşfetmesi ile başlayan geniş bir süreçtir. Bu süreçte çeşitli polimerler bulunmuş günlük hayatta kullanılmaya başlanmıştır. 1909 yılında Belçikalı kimyager Baekeland tarafından bakalit reçinenin buluşu ise önemli bir kilometre taşı olmuştur. İkinci dünya savaşı zamanından bu alanda büyük gelişmeler yaşanmış ve savaş sonrası 1950'li yıllarda fiber takviyeli sentetik reçineli kompozitler endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin en tanınmışı ise cam elyaf takviyeli polyester reçineli kompozitlerdir. Bu malzeme ülkemizde 1960'lı yılların başından itibaren kullanılmaya başlanmış ve "fiberglass" adıyla anılmıştır. Sıvı depoları, çatı levhaları, deniz tekneleri yapımında kullanılmıştır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış olan Anadol marka otomobilin kaportası da bu malzemeden üretilmiştir (Ersoy, 2001). Karbon fiberlerin geçmişi ise cam elyafınki kadar eski değildir. Karbon

elyafı ilk olarak Thomas Edison tarafından 1879 yılında elektrik ampulünde flaman olarak kullanılmıştır. Kompozit malzemelerde karbon elyafının kullanımı ise 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Ancak teknoloji yetersizliği sebebiyle karbon fiber üretiminin maliyeti çok yüksek olduğundan bu dönemde cam elyaf takviyeli plastikler ön plana çıkmıştır. Karbon elyaflarının üretim metotlarının gelişmesiyle 1968 yılından itibaren ticari olarak üretilmeye başlanmıştır (Anonim, 2016a).

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genel olarak ikiye ayrılır. Bunlar doğal kompozitler ve yapay kompozitlerdir. Doğal kompozitler insan yapımı olmayıp doğada kendiliğinden var olan kompozit yapılardır. Örneğin insan vücudu bir kompozit yapıdır. Burada kemikler takviye elemanı kaslar ise matris görevini üstlenir. Yapay kompozitler ise insanlar tarafından belirli bir amaca yönelik olarak birden fazla malzemenin bir araya getirilmesi ile oluşur. Örneğin çimento ve çelik karışımında çelik takviye elemanı görevini üstlenirken çimento matris görevini üstlenir. Bunların dışında konvansiyonel malzemelerden daha iyi mekanik, kimyasal ve termal özelliklere sahip olan endüstriyel kompozit malzemeler vardır. Bu malzemeler matris malzemelerine göre ve takviye elemanının şekline göre ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.3.'te bu sınıflandırma gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kompozitlerin sınıflandırılması (Bayraktar, 2011)

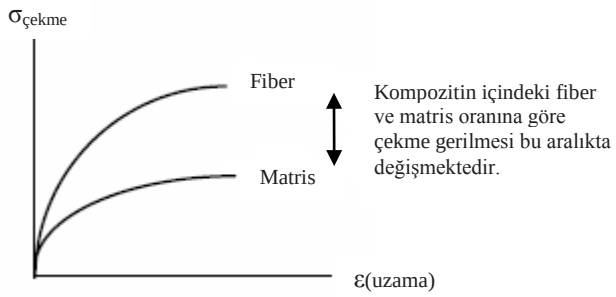
3.2.1. Takviye elemanının şekline göre sınıflandırma

Kompozit yapılarda takviye elemanları Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi dört farklı şekilde bulunabilmektedir. Takviye elemanı ve matris malzemesinin kompozitin mekanik özelliklerini etkilediği gibi takviye elemanın şekli de malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli rolü bulunmaktadır.

Takviye elemanları kompozit malzemeye rijitlik, sertlik, dayanım gibi mekanik özellik kazandırır. Ayrıca takviye elemanları kompozit malzemede istenen özelliğe bağlı olarak elektrik, termal, akustik dayanım gibi fiziksel özellikler de sağlarlar (Bingöl, 2008).

3.2.1.1.Fiber (Elyaf) takviyeli kompozitler

Makro boyutta homojen olan ve kesiti boyunun en az yüzde biri olan esnek malzemelerdir. Elyaflar genellikle takviye amaçlı kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde yükü taşıyan bileşendir. Bu sebeple kompozit malzemede elyaf miktarı arttıkça malzemenin yük taşıma kapasitesi de artacaktır. Ancak elyaf miktarı artarken diğer bileşenin (matris) miktarı azalacaktır. Bu azalma ile matris görevini yerine getiremeyip fiberleri bir arada tutamaz bu sebeple yük taşıma kapasitesi azalmaya başlar. Buradan anlaşılan kompozit içerisindeki matris-takviye oranı optimum seviyede tutulması gerektiğidir (Demirel, 2007). Şekil 3.4.'te kompozitlerin içerisindeki bileşenlerin çekme-uzama diyagramına etkisi görülmektedir.

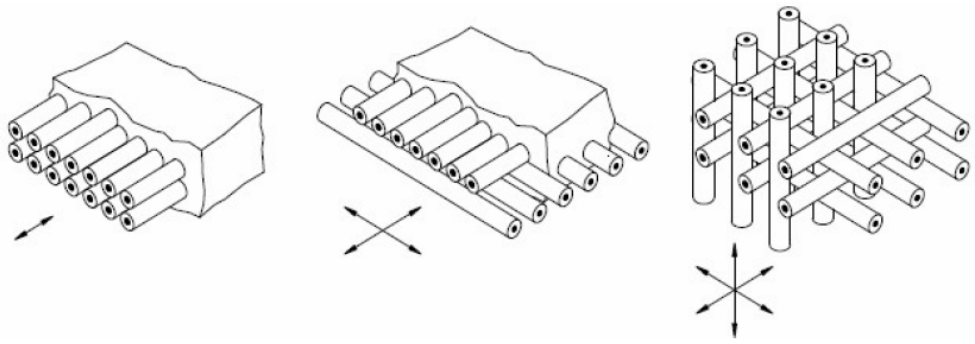


Şekil 3.4. Kompozit bileşenlerinin çekme-uzama diyagramına etkisi (Demirel, 2007)

Kompozit malzemelerde kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen takviye şekli fiber (elyaf) takviyedir. Çünkü bir malzemenin karakteristiğini (mekanik ve fiziksel özellik) en iyi yansıtan yapı fiberdir. Fiberlerin mükemmel özelliklere sahip bir mühendislik malzemesi olmasının sebebi ise küçük tane boyunda üretilmeleri ve boyuna göre çapının çok düşük olması nedeniyle matris tarafından fiberlere aktarılan

yük miktarının artmasıdır. Ayrıca fiberlerin elastisite modülü de çok yüksektir. Ancak üstün karakteristik özelliklere sahip olmasına karşın fiberlerin üretiminin oldukça güç ve maliyetli olduğu da unutulmamalıdır. Son birkaç yılda çapları 3 – 30 μm olan hassas fiberler üretilmiş bunlar ile malzeme mukavemeti yaklaşık 50 kat artırılabilmiştir (Demirel, 2007; Bayraktar, 2011). Hassas fiberler kullanılarak üretilen kompozitlerin mukavemeti ise kaba fiberli kompozitlere göre daha yüksek olmaktadır. Çünkü matrisin fiberlere temas ettiği alan düşük çaptaki hassas fiberlerde daha fazla olmakta ve kuvveti fiberlere daha kolay dağıtmaktadır (Demirel, 2007).

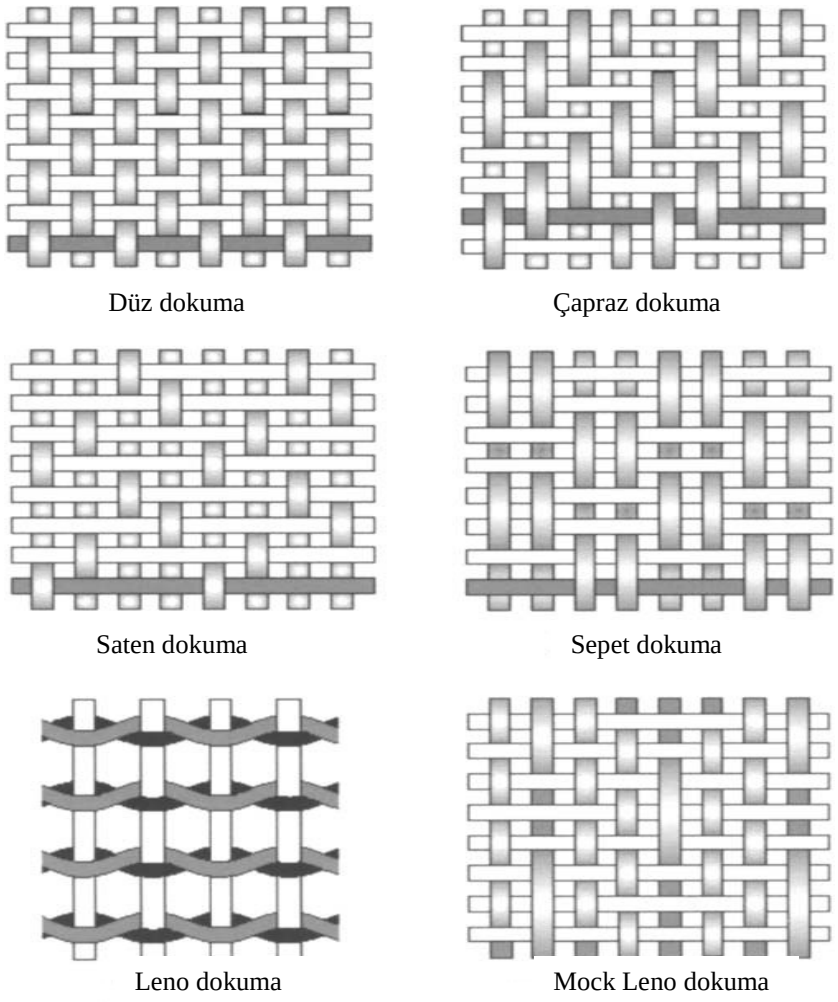
Elyaf takviyelerin kompozit içinde yerleşimi malzemenin mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Elyafların dizildiği doğrultuda mukavemet yüksek iken elyaflara dik doğrultuda aynı mekanik özellik sağlanamamaktadır. Ancak her iki yöne de elyaf takviyesi yapıldığında bu sorun ortadan kalkar ve her iki doğrultuda da birbirine yakın mekanik özellikler sağlanmaktadır. Elyafların kısa parçalar halinde matris içinde homojen dizilmesiyle izotropik bir malzeme yapısı oluşturmak da mümkündür (Zor, 2016). Şekil 3.5.'te bu dizilimler gösterilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 3.5. Elyafların farklı dizilişleri (Bayraktar, 2011)
a)Tek doğrultuda dizilmiş elyaf, b)İki doğrultuda dizilmiş elyaf, c)Üç doğrultuda dizilmiş elyaf

Fiberler mikron boyutunda üretildikleri için o haliyle kullanılamazlar. Pek çok fiber bir araya getirilerek iplik oluşturulur. Bu iplikler kumaş şeklinde dokunur. Böylece yukarıda bahsedilen izotropik yapıda malzeme elde edilebilir (Bingöl, 2008; Zor, 2016). Şekil 3.6.'da yaygın olarak kullanılan dokuma türleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Yaygın olarak kullanılan dokuma türleri (Campbell, 2003)

Dokuma türleri arasında en çok kullanılanı düz dokumadır. Düz dokumada diğer dokuma türlerine göre birim alanda daha fazla dokunma yüzeyi (Daha fazla iç içe geçmiş fiber) bulunur. Bu yüzden en sıkı dokuma türü düz dokumadır. Sıkı olması ise malzemeyi düzlemsel kaymaya karşı daha dayanıklı yapar. Fakat bu özelliğin dezavantajı da vardır. Kompleks şekilleri bu dokuma türü ile oluşturmak zordur. Bir başka dezavantaj ise dokuma yüzeyinin fazla olması nedeniyle dalgalılığın çok olmasıdır. Dalgalılığın çok olması ise mukavemeti ve sertliği düşürmektedir. Sepet dokumada fiber dağılımı simetrik değildir ve düz dokumaya göre daha az dalgalılık içerir. Bu ise bu dokuma türünü bir yere kadar düz dokumadan daha dayanıklı yapar. Saten dokuma minimum dokuma yüzeyine sahip dokuma türüdür. Bu sebeple düz dokumanın aksine düzlemsel kaymaya daha dayanıksızdır. Ancak dalgalılığın az olması sebebiyle düz dokumaya göre daha dayanıklı olduğu söylenebilir. Ayrıca daha düzgün bir yüzeyi vardır. Çapraz dokuma kompozit üretiminde nadir kullanılmaktadır. Reçineyi

mükemmel emme yeteneği ile bilinir. Leno ve Mock Leno dokuma türleri kompozit imalatında hemen hemen hiç kullanılmayan dokuma türleridir. Dokuma türlerinin özelliklerinden de anlaşılacağı üzere dokuma türü seçimi kompozitin imalat sürecini etkilediği gibi malzemenin mekanik özelliklerini de etkilemektedir (Campbell, 2003).

Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan elyaflar karbon, cam, aramid (kevlar) ve bor elyaflarıdır. Bu elyaf türleri sürekli elyaf şeklinde üretilebilmektedir.

Cam elyafı ilk olarak Fenikeli ve Mısırlı sanatçılar tarafından malzemelere mukavemet kazandırmak amacıyla kullanılmıştır (Bayraktar, 2011). Endüstriyel anlamda cam filamanlarının ilk üretimi Büyük Britanya'da 19. yüzyılda başlamıştır. İlk ticari üretim ise 1931 yılında yeni bir üretim metodunun bulunmasıyla başlamıştır. İlk olarak tekstil endüstrisinde kullanılsa da termoset reçinelerin geliştirilmesiyle fiber takviyeli plastikler üretilmeye başlanmış ve II. Dünya Savaşı sırasında bu malzeme baskın bir rol üstlenmiştir. Bugün fiber takviyeli plastiklerin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Cam fiberlerin üretimi, erimiş camın yaklaşık 1250 ^{o}C sıcaklıkta 1-2 milimetrelik deliklerden geçirilip filaman üretilmesiyle başlar. Ardından 5-15 μm deliklerden geçirilerek son halini alır. Pek çok cam çeşidi bulunmasına rağmen bunların hepsi silika olarak bilinen silikon dioksit (SiO_2) bazlıdır (Bunsell, 2011).

Dört faklı tipte cam elyaf bulunmaktadır.

1. A Camı (Alkali Cam): Adından da anlaşılacağı üzere içerisinde yüksek miktarda alkali içerir. Bu sebeple yalıtkanlık özelliği kötüdür. En sık kullanılan cam türüdür. Pencere ve şişe imalatında kullanılır. Genellikle kompozitlerde kullanılmaz.

2. C Camı (Korozyon Camı): Kimyasal direnci yüksektir bu sebeple depolama tankları imalatında kullanılır.

3. E Camı (Elektrik Camı): Elektriksel yalıtkanlık sağlamasının yanı sıra mukavemet ve su direnci oldukça iyidir. Nemli ortamda kullanıma uygundur. Maliyeti de düşüktür. Bu sebeplerle en çok kullanılan cam elyaf türüdür.

4. S Camı (Mukavemet Camı): Yüksek mukavemete sahiptir. Çekme mukavemeti E Camına göre %33 daha iyidir. Elyaf içerisindeki iplikçiklerin çapı E camındakinin yaklaşık yarısı kadar olduğu için elyaf sayısı fazla olup haliyle daha sert daha kaliteli bir yüzeye sahiptir.

S camının üstün özellikleri olmasına rağmen fiber takviyeli plastik kompozitlerde en yaygın kullanılan cam türü E camıdır. Her ne kadar diğer fiberler ile kıyaslandığında zayıf mekanik özelliklere sahip olsa da cazip fiyatı sebebiyle tercih edilmektedir (Ünal, 2016; Zor, 2016).

Karbon elyafı 1965'ten sonra gelişme gösteren, üstün mekanik özelliklerinden ötürü cezbedici bir takviye elemanı olmuştur. Bu özellikler:

- Yüksek elastiklik modülü
- Düşük yoğunluk
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Yüksek sertlik
- Yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı
- Bütün reçinelerle kompozit oluşturabilme 'dir (Zor, 2016).

Karbon elyaflar cam elyaflardan sonra en çok kullanılan takviye elemanlarıdır. Mekanik özellik bakımından karbon elyaflar mükemmel gözükse de cam elyafların maliyetinin düşüklüğü karbon elyaf kullanımının geride kalmasına sebep olmuştur. Fakat mekanik özelliklerin önemli olduğu ve cam elyafların yetersiz geldiği ileri kompozitlerin kullanıldığı uzay, askeri sanayi gibi sektörlerde karbon fiberler ön plana çıkmaktadır. Çizelge 3.1.'de kullanımı yaygın olan E camı ile karbon elyafının mekanik özelliklerinin kıyaslanması gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Cam ve karbon elyafların mekanik özelliklerinin kıyaslanması (Bingöl, 2008)

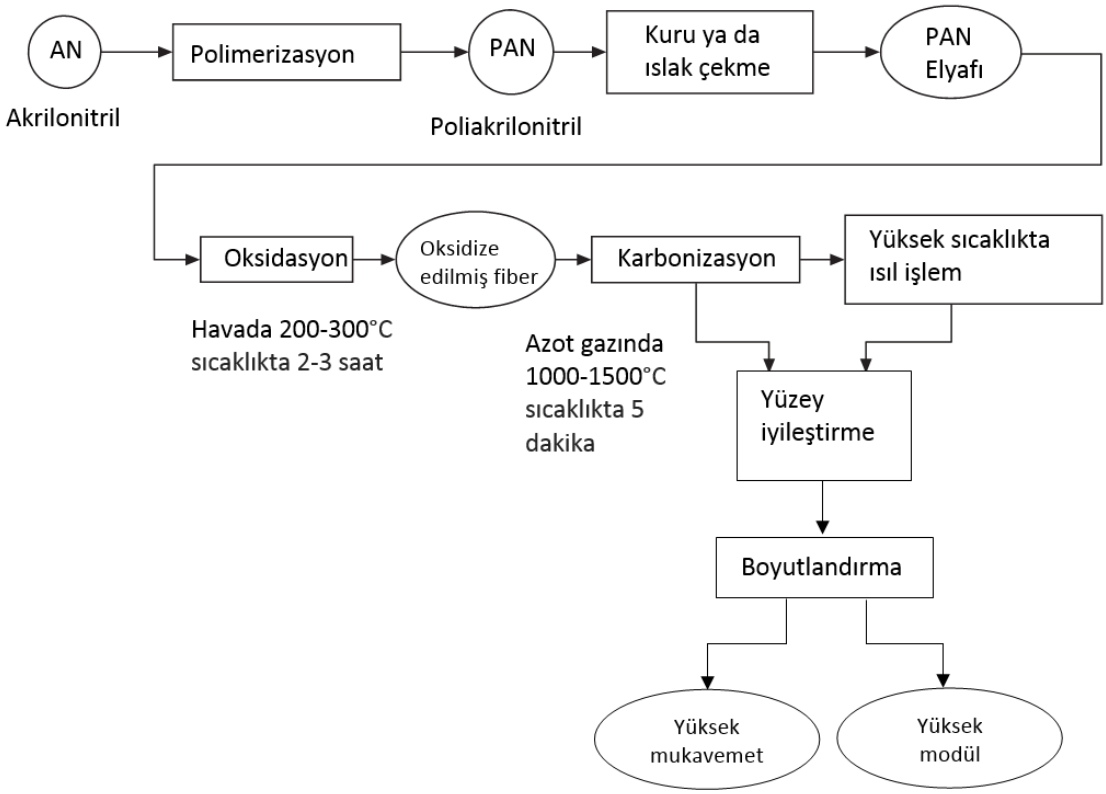
Özellikler	E-Cam Elyafı	Karbon Elyafı
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	2,6	1,75
Çap, (µm)	10-20	5-7
Elastik modüllü, E(GPa)	73	230
Spesifik modül, (E/ ρ) (MNm/kg)	28	130
Çekme Day. σfu, (MPa)	3400	3000-4000
Spesifik Day. (σfu/ ρ), (kN m/kg)	1,30	1,71-2,29
E cam elyafına göre maliyet	1	10-15

Karbon elyaflar üç farklı hammaddeden üretilebilirler. Bunlar selüloz bazlı karbon fiberler, poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon fiberler ve zift bazlı karbon fiberlerdir.

Selülozik karbon fiberler ilk olarak Thomas Edison tarafından bulunmuştur. Birçok fiber karbon fibere dönüştürülebilir. Bunun için gereken basit işlem ise ısıtmaktır. Bu fiberler ısıtıldığı zaman erimeden ziyade kömürleşir. 1901 yılında Edison bambu fiberlerini (bu fiber tıpkı diğer bitkilerde olduğu gibi selülozdan oluşmaktadır) karbon fiberlere dönüştürerek elektrik ampulünde kullanmıştır ve karbon fiber için ilk

patenti alan kişi olmuştur. Ancak bu fiber çok kırılgan bir yapıya sahiptir. 1973 yılında Bacon, viskoz fiberleri selülozdan üretmiştir. Bu üretim prosesi ile selülozdan üretilen karbon fiber oranı %24 olmuştur. Mekanik özellikleri iyi olmamasına karşın termal özellikleri sayesinde günümüzde hala kullanılmaktadır.

Poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon fiberler ticari amaçla ilk olarak 1960'lı yılların ortalarında Büyük Britanya'da geliştirilmiştir. 1970'li yıllarda ise üretimi başlamıştır. PAN hammaddeden karbon üretimi yaklaşık %67 civarındadır. Bu ise selülozik hammaddeden üretilen karbon miktarına göre oldukça iddialı bir rakamdır. Poliakrilonitril hammaddeden farklı özelliklere sahip karbon fiberler üretilebilmektedir. Bu üretim prosesi Şekil 3.7.'de gösterilmiştir (Bunsell, 2011).



Şekil 3.7. Poliakronitrilden karbon fiber üretim prosesi (Bunsell, 2011)

PAN bazlı karbon fiberler ilk üretimde 7 µm çapta üretilir ki bu çaptaki fiberler oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Ancak 5 µm çapa kadar üretimi de mevcuttur. Çaptaki bu düşüş fiberlerin dayanıklılığını artırmaktadır. PAN bazlı karbon fiberler diğer karbon fiberlere göre en çok kullanılan türdür.

Zift bazlı karbon fiberler ilk olarak 1970 yılında ABD'de üretilmiştir. Petrolden ya da kömürden elde edilen zifttten karbon üretimi yaklaşık %90 oranındadır ki bu değer zifti oldukça çekici kılmaktadır. Ancak her ne kadar zifttten karbon fiber üretim oranı

yüksek olsa da saflaştırma prosesi gereklidir ki bu da maliyeti artırmaktadır. Ziftten üretilen bazı karbon fiberler düşük Young Modülüne sahiptirler. Bu fiberler düşük fiyatı ve kimyasal inertliği sebebiyle çimento ve beton takviyesi olarak kullanılmaktadır (Bunsell, 2011).

Aramid fiberler 1970'li yılarda ortaya çıkmış ve yüksek mukavemet, darbe dayanımı, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Sertliği ve mukavemeti cam ile karbon arasında yer alan aramid fiberler organik fiberler olarak bilinir ve organik oldukları için kullanım sıcaklıkları yaklaşık 177°C ile sınırlıdır. Aramid bir kısaltma adı olup tam ismi bir nylon olan "aromatik polyamid " dir. Polimerlerin reçine (matris) olarak kullanımının dışında elyaf (fiber) olarak kullanıldığını da görmekteyiz. Çünkü aromatik polyamid bir polimer malzemedir (Campbell, 2003; Ünal, 2016; Zor, 2016).

Aramidlerin yüksek darbe dayanımlı olması onların balistik alanda kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Kurşungeçirmez yeleklerin aramid elyafından yapılması bunun en bariz örneğidir. Ayrıca motosiklet için dizlik, eldiven, kask gibi koruyucu elbiselerin üretiminde aramid kullanılmaktadır. Yüksek aşınma dayanımından ötürü araçların kavramalarında ve fren sistemlerinde de kullanılmaktadır.

Aramidler piyasada daha çok ticari isimlerle anılmaktadır. Pek çok ismi bulunmasına rağmen bunlardan en yaygın olarak bilinen iki firmanın ürünleridir. Bunlar ABD merkezli DuPont firmasına ait Kevlar ve Hollanda merkezli Akzo Nobel firmasına ait Twaron adlı ürünlerdir. Farklı ihtiyaçları karşılamak için DuPont firması istenen özellikte aramid malzeme üretmiş bunları kevlar 29, kevlar 49 şeklinde isimlendirmiştir. Çizelge 3.2.'de Kevlar ve Twaron ürünlerinin kıyaslaması yapılmıştır (Anonim, 2016c).

Çizelge 3.2. Kevlar ve Twaron ürünlerinin mekanik özelliklerinin kıyaslanması (Bingöl, 2008)

Özellikler	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	1,44	1,45	1,47	1,44
Çap, (µm)	12	12	12	12
Elastiklik Modülü, E (GPa)	60	120	160	60
Spesifik Modül, (E/ρ) (MNm/kg)	42	82	110	42
Çekme Dayanımı, Rm (MPa)	3000	3000	2400	2600
Spesifik Dayanım, (Rm/ρ) (kNm/kg)	2080	2070	1630	1800
Maksimum Uzama %	3,6	1,9	1,5	3

Bor elyafı çekirdek adı verilen tungsten ya da bir diğer adıyla volfram maddesinin veya zift bazlı karbon fiberin bor ile kaplanmasıyla oluşur. Bor elyafı 125-

140 µm çapta filamanlardan 10 µm çapa kadar üretilmektedir ve bir elmas kadar sert olduklarından dolayı bor elyaf takviyeli kompozitleri delmek ya da işlemek oldukça zordur. Bu sebeple karbon fiberler fiyatının yanı sıra işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik açısından çoğu uygulamada bor fiberlerin yerini almıştır. Ancak ABD'ye ait F-14, F-15 ve B-1 gibi önemli hava araçlarında önemli miktarda bor elyaf takviyeli plastikler kullanılmıştır. Bor elyafı ayrıca alüminyum metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak da kullanılmaktadır. Bor fiberler metallere takviye olarak kullanılabilen ilk fiber olduğu için bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Alüminyum ve titanyum matrislerle kimyasal uyumluluğu geliştirmek adına nitrür ya da silikon karbür kaplama teknikleri geliştirilmiştir (Baker ve ark., 2004).

Yüksek yoğunluklu polietilen elyafı en yüksek çalışma sıcaklığı yaklaşık 100 °C ile sınırlı olan ve yaklaşık 150 °C sıcaklıkta erimeye başlayan bir elyaftır. Neme karşı dayanıklı, darbe direnci yüksek ve dikkat çeken elektriksel özelliklere sahip bir malzemedir. Ancak matrisler ile bağ yapma özelliği iyi değildir. Bu fiberlerin balistik veya yüksek darbe direnci isteyen uygulamalarda kullanılması için geliştirmeler yapılmaktadır (Campbell, 2003; Baker ve ark., 2004).

Seramik elyaflar iki gruba ayrılır. Bunlardan biri oksit fiberler diğeri ise oksit olmayan seramik fiberlerdir. Oksit fiberler takviye amaçlı ilk olarak 1970'li yıllarda ABD'de üretilmiştir. Bu fiberler alüminyum oksit ve silisyum oksit bazlıdır. Seramik fiberler çeşitli uzunluklarda ticari olarak mevcuttur. Sürekli alüminyum oksit fiberleri yüksek elastiklik modülü, yüksek erime noktası ve iyi korozyon dayanımına sahiptir. Oksit olmayan birçok seramik fiber mevcuttur. Başlıcaları silisyum nitrür, silisyum karbür, bor nitrür, alüminyum nitrürdür. Bu gruptaki fiberlerin mekanik özellikleri oksit seramik fiberlere göre daha iyidir. Silisyum karbür fiberler düşük fiyatıyla seramik matrisli ve metal matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır ve ticari olarak sürekli ya da kristal (whisker) halde mevcuttur (Akovali ve Uyanik, 2001; Bunsell, 2011).

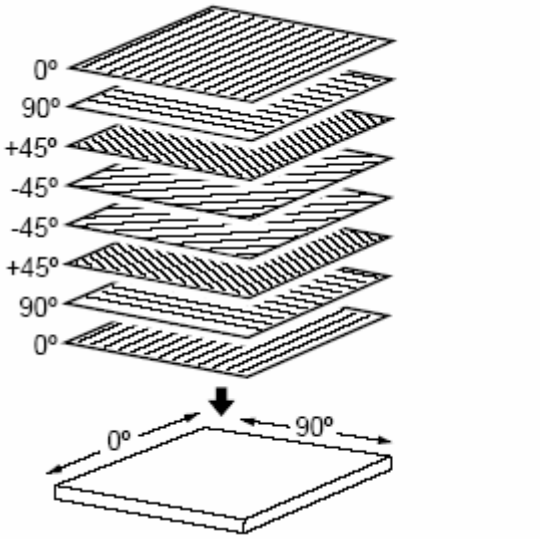
3.2.1.2. Parçacık takviyeli kompozitler

Bir matris içerisinde takviye elemanının sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde olduğu gibi değil de parçacık halde dağılması ile meydana gelir. Bu kompozitler elyaf takviyeli kompozitlere göre daha izotropik bir yapı sergilerler. Isıl ve elektriksel iletkenliğin istendiği yerlerde polimer matris içerisine dağılmış metal parçacıkları

kullanılabilir. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık ve sertlik istenilen yerde metal matris içerisine dağılmış seramik parçacıkları kullanılabilir. Parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri zayıftır bu yüzden mekanik özelliklerin çok önemli olmadığı alanlarda kullanılır. En sık kullanıldığı yer yüksek sıcaklığa ve aşınmaya maruz kalan parçalardır. Bunun haricinde süs eşyası yapımında da kullanılmaktadır (Demirel, 2007; Bayraktar, 2011).

3.2.1.3. Tabakalı kompozitler

Bir matris içerisine dağılmış tek yönde uzanan ya da örülmüş halde bulunan elyaflı yapıya tabaka denilmektedir. Tabakalı kompozitler en yaygın kullanılan kompozit malzeme türüdür. Bir tabaka sadece fiberlerin uzandığı yönde yüksek mekanik özellikler sergiler. Bu sebeple anizotropik yapıdadırlar. Ancak farklı fiber oryantasyon açılarına sahip tabakalar bir araya getirilerek farklı yönlerde de mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanır. Şekil 3.8.'de farklı fiber oryantasyonuna sahip tabakaların bir araya getirilmesiyle oluşan tabakalı kompozit yapı görülmektedir. Mekanik özellikleri iyi olmamasına karşın termal yalıtım amaçlı kullanılan sandviç yapılar da bir tabakalı kompozit örneğidir (Demirel, 2007).



Şekil 3.8. Farklı fiber oryantasyonuna sahip tabakalı kompozit (Demirel, 2007)

3.2.1.4. Hibrit kompozitler

Bir kompozit malzemede birden fazla takviye elemanının yer aldığı kompozit malzemelerdir. Bünyesinde hem karbon fiber hem cam fiber bulunan bir fonksiyonel

derecelendirilmiş kompozit hibrit kompozitlere örnek olabilir. Cam elyafının mekanik özellikler açısından tek başına yeterli gelmediği uygulamalarda aynı kompozit malzemeye karbon fiber takviyesi yapılabilir. Böylece mekanik özellikler iyileştirilirken kompozitin maliyeti de sadece karbon fiberden oluşan kompozite göre azaltılmış olur.

3.2.2. Matris malzemesine göre sınıflandırma

Kompozit yapıların yaklaşık %30 - %40 kadarını matris oluşturmaktadır. Matrisin kompozit yapılarda birkaç görevi vardır. Bunlar:

- Kompozitteki bileşenleri bir arada tutar ve kompozitin termo-mekanik stabilitesini sağlar.
- Takviye elemanlarını çevresel hasarlara karşı korur.
- Kompozite uygulanan kuvveti takviye elemanına dağıtmaya yardımcı olur.
- Kompozitin dayanıklılığını artırır.
- Fiberlerin istenen oryantasyon açıları ve dağılımında kalmasını sağlar (Akovali ve Uyanik, 2001).

Kompozitlerde genel olarak üç farklı matris malzemesi kullanılmaktadır.

3.2.2.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisler polimer matrislere oranla yüksek dayanıma sahiptir ancak metal matrisli elyaf takviyeli kompozitleri üretmek oldukça zor ve maliyetlidir. Kompozit üretiminde metal matris malzemesi olarak Bakır, Alüminyum, Titanyum, Nikel ve Gümüş kullanılmaktadır. Matris malzemesi ergimiş halde, moleküler halde, levha veya ince tabaka halde olabilmektedir. Dökme, karıştırma, presleme, kaplama ve haddeleme yöntemleri ile fiberler ile birleştirilmektedir (Ersoy, 2001).

Metal matrisli kompozitlerin pek çok avantajı bulunmaktadır. Bunlar:

- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Yüksek sertlik ve mukavemet,
- Yüksek tokluk,
- Yüksek elektriksel ve termal iletkenlik,

- Metal matrisli kompozitler konvansiyonel metal işleme ekipmanları ile üretilebilir olmalarıdır. (Akovali ve Uyanik, 2001).

Avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Çoğu metaller yoğunlukları çok yüksek olduğu için matris olarak kullanılamaz. Metal matrisli kompozitlerin üretimi oldukça maliyetlidir. Ayrıca genellikle fiberler ile iyi bağ yapamazlar. Metaller ile en iyi bağı yapan fiber silisyum karbür ile kaplanmış bor elyafıdır. Ancak bu elyafın maliyeti oldukça yüksektir (Akovali ve Uyanik, 2001; Akdoğan Eker, 2014).

3.2.2.2. Seramik matrisli kompozitler

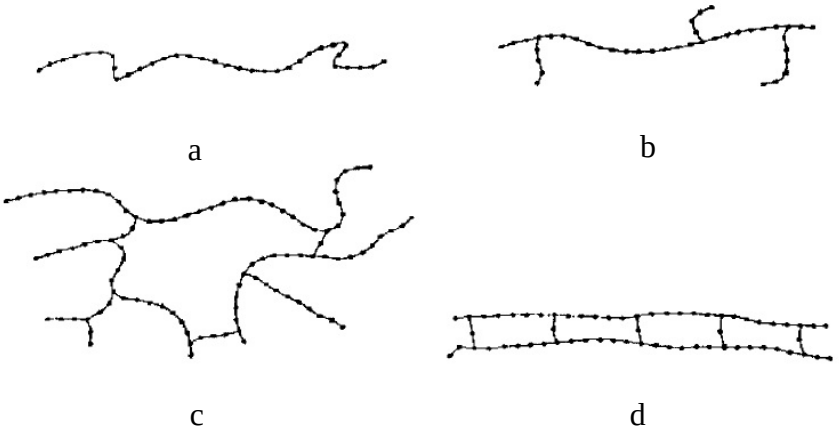
Seramikler metal ve metal olmayan maddelerden meydana gelen inorganik bileşiklerdir. Bu bileşikler doğada kayaların parçalanması ile meydana gelen kaolen, kil gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilir (Akdoğan Eker, 2014). Seramik matrislerin avantajları:

- Çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar.(>2000°C)
- Düşük yoğunluğa sahiptirler.
- Genellikle çok yüksek elastiklik modülüne sahiptirler (Akovali ve Uyanik, 2001).

Seramik matrislerin en önemli dez avantajı ise kırılganlıklarıdır. Bunun yanında düşük çekme dayanımına sahiptirler. Matris malzemesi olarak kullanılan seramikler Alüminyumoksit, Silisyumkarbür, Silikonnitrit, Boronkarbit, Kübikboronnitrür, Titanyumkarbür, Titanyumborür, Titanyumnitrür ’dür (Akovali ve Uyanik, 2001; Zor, 2016).

3.2.2.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimerler çoğunlukla karbon, hidrojen ve metal olmayan diğer organik elementlerin bileşiminden oluşmaktadır. Polimerler monomer adı verilen küçük moleküllerin birbirlerine tekrar eklenmesiyle çok uzun zincir molekülleri oluşturan yapılardır. Bu zincir yapıları Şekil 3.9.’da görüldüğü gibi farklı formlarda olabilmektedir (Akovali ve Uyanik, 2001; Baker ve ark., 2004).



Şekil 3.9. Polimer zincir formları
a)Lineer form, b)Dallanmış form, c)Çapraz form, d)Merdiven form (Baker ve ark., 2004)

Polimerler; termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere genel olarak üç farklı kategoriye ayrılırlar. Kompozit yapımında plastik matris malzemesi olarak termoplastikler ve termosetler kullanılmaktadır (Anonim, 2016b).

Termosetlerin ve termoplastiklerin karakteristik özellikleri, avantaj ve dez avantajları Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Termosetler ve termoplastiklerin kıyaslanması (Baker ve ark., 2004)

	Termosetler	Termoplastikler
Karakteristik Özellikler	Kürlendiği zaman kimyasal değişim geçirir.	Reaksiyon ve kürlenme olmaz.
	Düşük gerilme uzamasına sahiptir.	Yüksek gerilme uzamasına sahiptir.
	Düşük kırılma enerjisine sahiptir.	Yüksek kırılma enerjisine sahiptir.
	Üretim prosesi tersinmezdir.	Üretim prosesi tersinirdir.
	Düşük viskoziteye sahiptir.	Çok yüksek viskoziteye sahiptir.
	Nem absorbe eder.	Çok az nem absorbe eder.
	Solventlere karşı dayanıklıdır.	Organik solventlere karşı dayanıklılığı sınırlıdır.
Avantajlar	Nispeten düşük proses sıcaklığına sahiptir.	Proses zamanı kısadır.
	Fiberler ile bağ oluşturma özelliği iyidir.	Atık kısmı tekrar kullanılabilir.
	Kompleks şekiller verilebilir.	Soğutmaya gerek kalmaksızın yüksek raf ömrüne sahiptir.
	Sıvı formda reçine olarak üretilebilir.	Yüksek delaminasyon direncine sahiptir.
	Sürünmeye karşı dirençlidir.	
Dezavantajlar	Proses zamanı uzundur.	Solventlere karşı direnci zayıftır.
	Yaklaşık 1-2 saatte kürlenir.	Proses için yüksek sıcaklık (Yaklaşık 300-400°C) ve basınç gereklidir.
	Depolama zamanı kısadır ve soğutma gerektirir.	Sürünmeye karşı direnç zayıf olabilmektedir.

Termoplastikler dallanmış zincir formuna sahiptir. Üretim maliyeti, üretim güçlüğü ve özellikleri sebebiyle kompozit üretiminde pek tercih edilmezler. Termosetler ise çapraz zincir formundadır. Kompozit imalatında en çok tercih edilen matrisler termoset reçinelerdir. Plastik (polimer) üretiminde ham madde toz, granül ya da reçine haldedir. Kompozit üretiminde plastiklerin reçine olarak adlandırılması bu sebeptendir. Polyester reçine, epoksi reçine, bismaleimid reçine, siyanat ester reçine ve fenoloik reçine termoset reçinelere örnektir (Bingöl, 2008; Ünal, 2016).

Epoksi reçineler yüksek performanslı kompozitlerde kullanılan en yaygın matris malzemesidir. Mükemmel dayanıklılık, yapışma özelliği ve kürlenme sırasında az çekme payı gibi mükemmel özelliklere sahiptir (Campbell, 2003). Epoksi reçineler oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda kürlenebilir. Oda sıcaklığında kürlenmiş bir epoksi reçineli sistem 50°C'un üstündeki sıcaklıklarda çalışamazken, 120 - 180°C sıcaklıkta kürlenen sistem daha sonra 150- 220°C sıcaklıkta tekrar kürlenebilir ve 100-250°C sıcaklıkta çalışabilir (Baker ve ark., 2004). Epoksi reçinelerin avantajları:

- Optimum özellikleri elde edebilmek için formüle edilebilirlik,
- Kırılma tokluğunun kontrol edilebilirliği,
- Düşük uçuculuğu sayesinde kolay ve güvenli kullanım,
- Az daralma (çekme payı),
- Fiberler ile yüksek bağ yapma,
- Kimyasal dayanıklılık,
- Termal kararlılıktır.

Bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar:

- Polyester reçinelere göre daha fazla maliyet
- Neme karşı hassasiyet
- Yüksek viskozite ve yavaş kürlenme
- Bazı organik malzemelere karşı düşük dayanıklılık (Özellikle organik asitler ve fenoller)
- İleri epoksi formulasyonlarında bile sınırlı çalışma sıcaklığıdır (Baker ve ark., 2004).

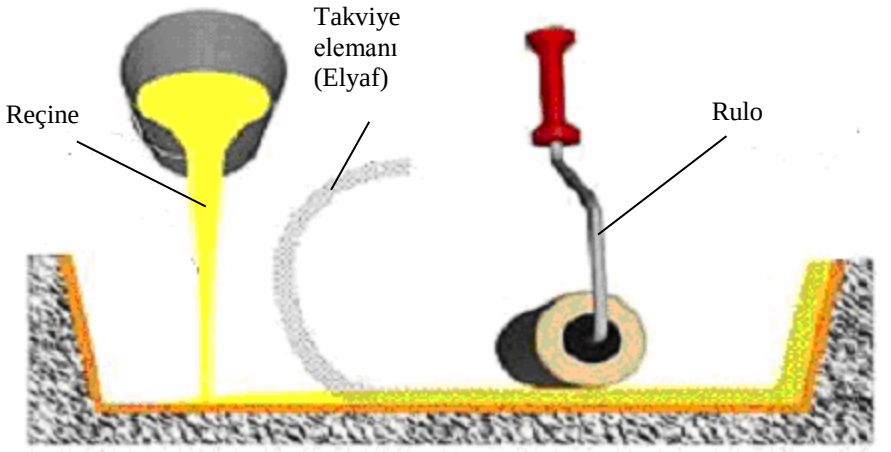
Epoksi reçineler ileri kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılmasından ayrı yüzey kaplamalarında, endüstriyel döşemelerde ve yapıştırıcılarda kullanılmaktadır. Ayrıca elektriksel yalıtım özelliği sayesinde elektronik devre kartları ve elemanlarının yapımında kullanılmaktadır (Demirel, 2007).

3.3. Plastik Matrisli Kompozitlerin Üretim Metodları

Plastik (polimer) matrisli kompozitlerin üretiminde pek çok yöntem mevcuttur. Kullanılan reçine ve fiberin yanında üretim metodu da kompozitlerin nihai özelliklerini etkilemektedir (Ataş, 2016).

3.3.1 Elle tabakalama (yatırma) yöntemi

En basit üretim yöntemidir. Dokuma veya kırpılmış biçimdeki takviye elemanı daha önce hazırlanmış olan kalıp üzerine serilerek üzerine bir rulo ya da fırça yardımıyla reçine sürülür. İstenen kalınlık elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir. Reçine emdirme işleminden sonra oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında ya da farklı sıcaklıklar ve basınçlarda kürlenmeye bırakılır. Böylece tabakalı kompozit elde edilmiş olur. Bu yöntemde en çok kullanılan reçineler polyester ve epoksidir. Uygulama alanları ise rüzgâr türbin kanatları, tekne üretimi ve mimari kaplamalardır (Arıcasoy, 2006; Aktaş, 2016; Ataş, 2016). Bu yöntemin uygulanışı Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Elle tabakalama (yatırma) yöntemi (Bayraktar, 2011)

Yöntemin avantajları:

- Öğrenilmesi ve uygulamasının kolay olması,
- Oda sıcaklığında kürlenen reçineler kullanıldığında düşük maliyetli olması,
- Çoğu reçine ve takviye elemanları ile uyumlu olmasıdır.

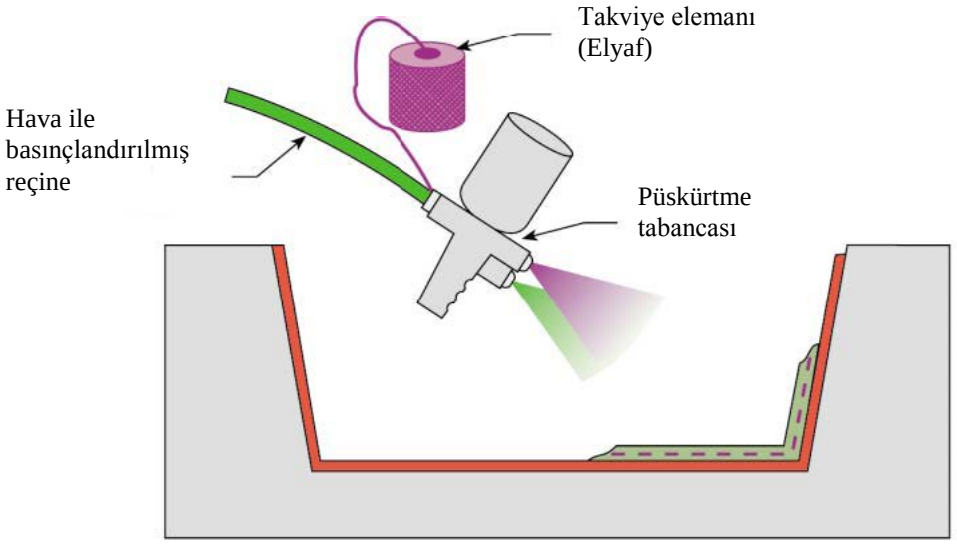
Yöntemin dezavantajları:

- Ustalık isteyen bir yöntem olması,

- Yüksek fiber hacimsel yoğunluklarına ulaşmanın zor olması,
- Reçine kullanımı azaltılmak istendiğinde malzemede hava boşlukları ve ıslanmayan bölge oluşmasıdır (Ataş, 2016).

3.3.2 Püskürtme yöntemi

Bu yöntemde kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırpılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Yük taşımanın çok olmadığı karavan gövdesi, küvet gibi yerlerde kullanılır (Bayraktar, 2011; Ataş, 2016). Bu yöntemin uygulanışı Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Püskürtme yöntemi (Cripps, 2016)

Yöntemin avantajları:

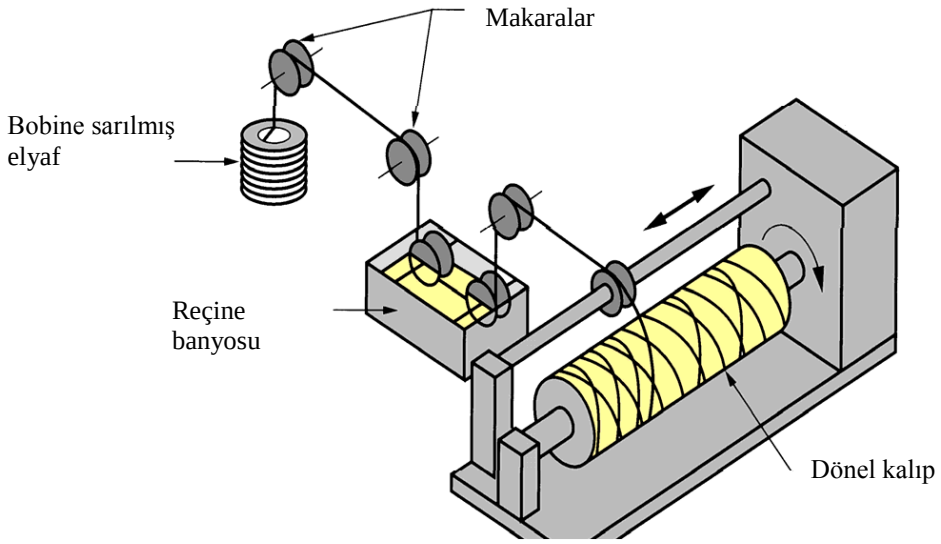
- Kısa sürede düşük maliyetli üretim sağlaması,
- Uygulamasının basit olması,
- Karmaşık parçaların imalatı için uygun olmasıdır.

Yöntemin dezavantajları:

- Elde edilen kompozit yapıda reçine oranının yüksek olması,
- Kırpılmış takviye elemanları sebebiyle mekanik özelliklerin sınırlı olması,
- Sağlık açısından zararlı olmasıdır (Ataş, 2016).

3.3.3 Elyaf sarma yöntemi

Elyaf sarma yöntemi boru, tank gibi silindirik geometriye sahip parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Bobinlere sarılı olan elyafın bir reçine banyosundan geçirilerek dönme hareketi yapan merdaneye (Dönel kalıp) farklı oryantasyonlarda sarılması işlemidir. Yöntemin uygulanışı Şekil 3.12.'de gösterilmiştir (Cripps, 2016).



Şekil 3.12. Elyaf sarma yöntemi (Singh, 2016)

Yöntemin avantajları:

- Hızlı ve ekonomik bir yöntem olması,
- Reçine oranının kontrol edilebilmesi,
- Fiberleri kumaşa dönüştüren ikincil bir prosese ihtiyaç duyulmadığından maliyeti düşürmesi ,
- Tabakaların mekanik özelliklerinin çok iyi olmasıdır (Farklı oryantasyonlarda sarılan fiberler sayesinde).

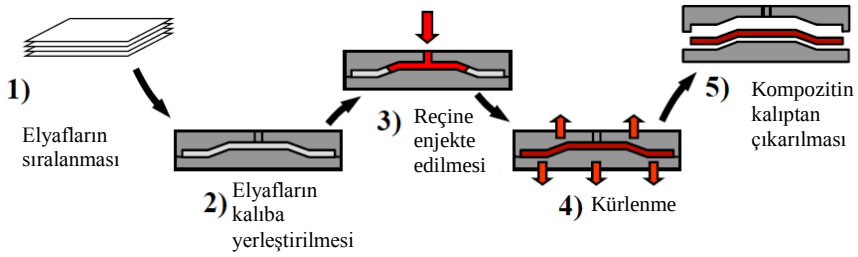
Yöntemin dezavantajları:

- Bu metodunun uygulama alanının kısıtlı olması, (Yalnızca dış bükey parçalar)
- Fiberlerin kalıba düzgün bir şekilde sarılamaması,
- Büyük parçalar için dönel kalıp maliyetinin fazla olması,

- Düşük viskoziteli reçinelerin kullanılmasıyla daha düşük mekanik özellikler elde edilmesi ve çeşitli sağlık sorunlarına yol açmasıdır (Cripps, 2016).

3.3.4 Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi

Bu yöntemde iki adet kalıp kullanılır. Yeteri kadar takviye elemanı alt kalıbın üzerine konulur ardından üst kalıp basınçlı bir şekilde kapatılarak kalıbın içine reçine enjekte edilerek kürleşmesi sağlanır. Kalıp açıldığında kompozit malzeme kullanıma hazırdır. RTM metodu ile düşük maliyetli ve verimli parçaların üretimi mümkündür. Concord uçakların ve F1 araçlarının parçaları bu yöntemle üretilebilmektedir (Bayraktar, 2011).Yöntemin uygulanışı Şekil 3.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. RTM yöntemi (Ataş, 2016)

Yöntemin avantajları:

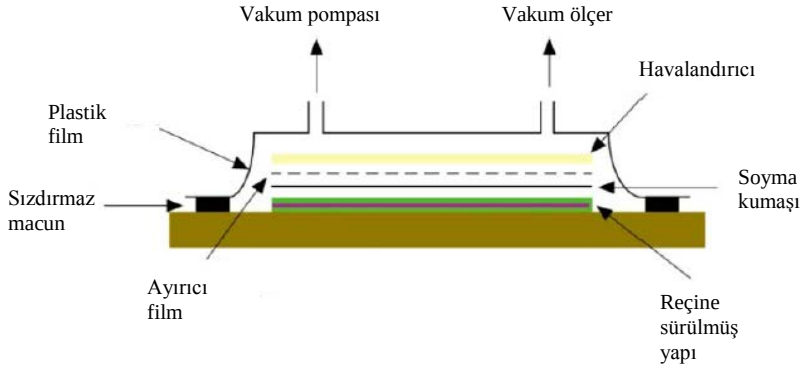
- Üretim hızının yüksek olması,
- Fiber - reçine oranı ve boşluk miktarı başarılı bir şekilde kontrol edilebilmesi,
- Karmaşık şekilli parçaların üretilebilmesi,
- Kapalı ortamda yapıldığı için sağlık sorunu oluşturmaması,
- Düşük iş gücü gerektirmesidir.

Yöntemin dezavantajları:

- Basınca dayanabilecek mukavemette çift kalıp yapmanın maliyetli olması,
- Büyük kalıpların maliyetinin yüksek oluşu sebebiyle üretimin küçük parçalarla sınırlı oluşudur (Ataş, 2016).

3.3.5 Vakum kalıplama (paketleme) yöntemi

Bu üretim yöntemi elle yatırma metodunun uygulanmasından sonra devreye alınan metottur. Bu yöntemle klasik elle yatırma metodunda oluşan olumsuz durumlar bertaraf edilerek daha sağlam ve daha hafif kompozitlerin üretimi mümkün olmuştur. Bu uygulama ile kumaş ve reçine arasındaki hava, henüz kürlenmemiş kompozitin içinden alınarak hava kabarcıklarından arınmış bir kompozit yapı üretilebilmiştir. Yöntemin uygulanışı Şekil 3.14.'te gösterilmiştir (Turgut ve ark., 2007).



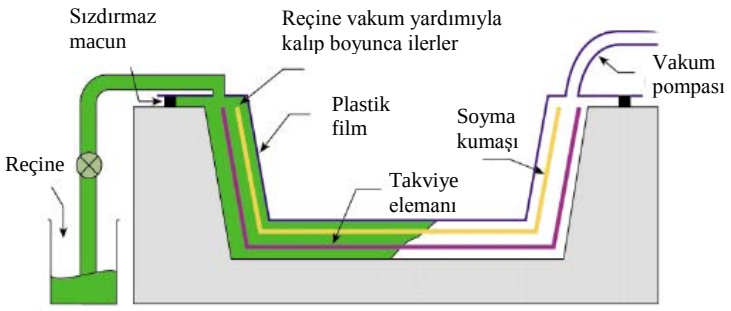
Şekil 3.14. Vakum paketleme yöntemi (Singh, 2016)

Yöntemin avantajları:

- Üretilen kompozit yapı içerisindeki hava kabarcığı ve boşluk oluşumunu minimuma indirmesi,
- Vakum sayesinde reçinenin matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması,
- Vakum işlemi sırasında katmanların birbirine baskı uygulamasıyla katmanlar arası mukavemetin fazla olmasıdır (Turgut ve ark., 2007).

3.3.6 Vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi (VARTM)

Bu yöntemde vakum kalıplama yöntemindeki gibi dokunmuş elyaf kumaşları bir kalıba yatırılır. Ayırıcı film, plastik film ve sızdırmaz macunlar yardımıyla sistem dış ortamdan izole edilir. Vakum yardımıyla reçine bir kaptan kalıp içine çekilerek elyaflara nüfuz etmesi sağlanır. Bu yöntem tekne ve yat gövdelerinin yanısıra rüzgar türbin kanatlarında da kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanışı Şekil 3.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi (Potyrała, 2011)

Yöntemin avantajları:

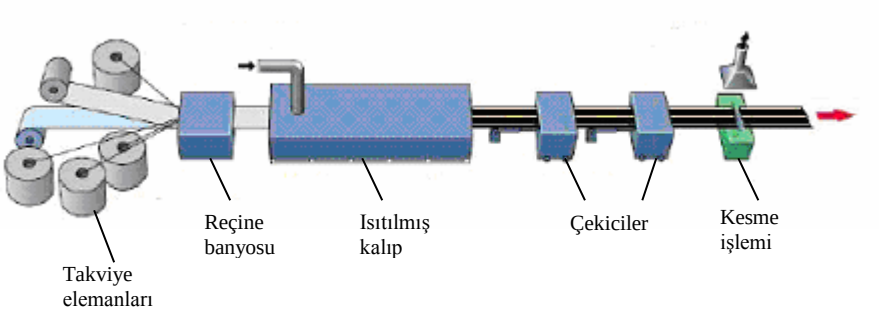
- Kalıbın tek taraflı olması ve yüksek mukavemet gerektirmemesi sebebiyle daha az maliyetli olması,
- Büyük parçaların üretiminde kullanılabilmesi,
- Çekirdek yapıların bir seferde üretilebilmesidir.

Yöntemin dezavantajları:

- Reçinenin ulaşamadığı bölgelerin oluşması,
- İşlem basamaklarının nispeten karmaşık olmasıdır (Ataş, 2016).

3.3.7 Pultrüzyon (Profil çekme) yöntemi

Pultrüzyon yöntemi sürekli sabit bir profile sahip kompozit parçaların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Takviye malzemesi reçine dolu bir kaptan (reçine banyosu) geçirilerek yaklaşık 120-150 °C sıcaklıktaki kalıba doğru çekilir. Burada reçine emdirilmiş yapı kürleşerek kompozit malzeme halini alır. Takviye elemanının doğrultusunda çok yüksek mekanik özellikler elde edilirken enine yükler için özel dokumalar gerekmektedir. Bu üretim yöntemi ile elyaf oranı yüksek (%70 ve üzeri) kompozitler üretilebilmektedir (Bayraktar, 2011). Yöntemin uygulanışı Şekil 3.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Pultrüzyon (Profil çekme) yöntemi (Potyrała, 2011)

3.3.8 Otoklav yöntemi

Vakum torbalama yönteminde olduğu gibi elyaflar istenilen oryantasyonda ve kalınlıkta istiflendikten sonra sızdırmaz bir kalıp-vakum torbası sistemine alınır. Daha sonra kürlenme işlemi bir fırın yerine otoklavda yapılır. Otoklavda yapılmasının sebebi ise sıcaklık ve basınç değerlerinin kesin olarak kontrol edilebilmesidir. Bu sayede optimum özelliklere sahip malzeme üretilebilmektedir. Bu yöntem genellikle hassas kürlenme gerektiren parçaların ve uçak parçalarının imalatında kullanılmaktadır.

Yöntemin avantajları:

- Ağırlığına oranla yüksek dayanımda ve fiber yoğunluğunda parçaların imal edilebilmesi,
- Kontrollü kürleşmeden dolayı üretilen parçaların düşük hava boşluklu olması,
- Kürleşme esnasında basıncın ve sıcaklığın çok iyi kontrol edilebilmesidir.

Yöntemin dezavantajları:

- Sistemin yatırım maliyetinin oldukça yüksek olması,
- Termoplastik matris kullanıldığında termosetlere göre çok yüksek sıcaklık ve basınçlara ihtiyaç duyulmasıdır (Ataş, 2016).

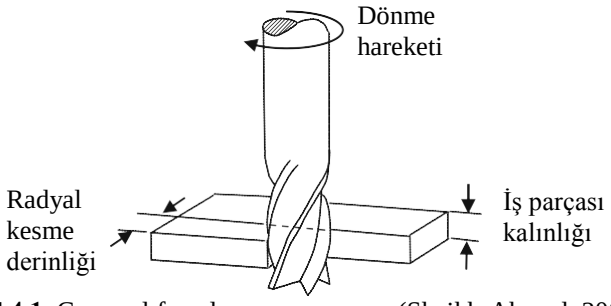
4.FREZELEME OPERASYONU ve POLİMER KOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Frezeleme operasyonu metallerin işlenmesinin yanı sıra polimer kompozitlerin işlenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu başlık altında frezeleme ile talaş kaldırma yöntemi ve polimer kompozitlerin işlenebilme performansı hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Frezeleme Operasyonu

Çevresinde birden fazla diş adı verilen kesme ağızı bulunan dairesel bir kesici takım ile talaş kaldırılarak iş parçasına şekil verme işlemine frezeleme denilmektedir. Genel olarak freze denen kesici takım kendi ekseni etrafında dönerek dairesel hareket yaparken iş parçası ise tezgah tablasına bağlı olarak x, y ve z eksenlerinde doğrusal hareket yapmaktadır. Tornalamada olduğu gibi büyük iş parçalarının dönme hareketi yapmadığı için frezeleme operasyonu tornalamaya göre nispeten daha güvenlidir. Frezelemede düz yüzeyler, kanallar, yuvalar ve şekilli yüzeyler işlenebilirken vida açma ve dişli çark yapma işlemleri de gerçekleştirilebilir. İki çeşit frezeleme işlemi mevcuttur. Bunlar çevresel frezeleme ve alın frezelemedir (Akkurt, 1998; Gavas ve ark., 2015).

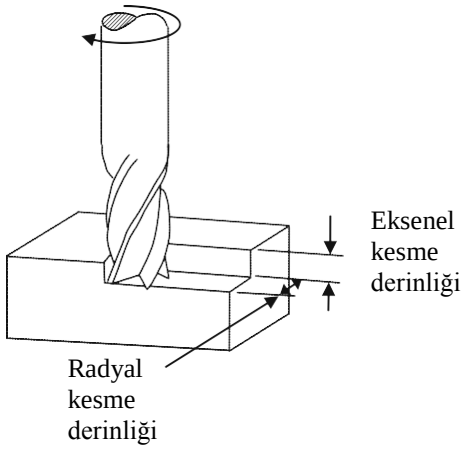
Çevresel frezelemede (Trimming) yüzey, freze etrafındaki çevresel dişler tarafından talaş kaldırılarak oluşturulmaktadır. Oluşan yüzey, dönen kesici takımın dönme eksenine paraleldir. Düz ve şekilli yüzeylerin üretiminde bu yöntem kullanılabilir (Gavas ve ark., 2015). Şekil 4.1. ’de çevresel frezeleme operasyonu görülmektedir.



Şekil 4.1. Çevresel frezeleme operasyonu (Sheikh-Ahmad, 2009)

Alın frezelemede (End milling) işlenen yüzey, freze çakısı ekseni ile 90° açı yapar. Talaş kaldırma işleminin çoğu dişlerin çevresel kısmı ile yapılır ve alındaki dişler

ile tamamlanır. Genellikle geniş ve düz yüzeyler bu teknikle frezelenir. İşlenen yüzeyin genişliği takım çapından küçükse frezeleme simetrik ya da asimetrik olarak yapılır (Bayraktar, 2011; Gavas ve ark., 2015). Şekil 4.2.'de alın frezeleme operasyonu görülmektedir.

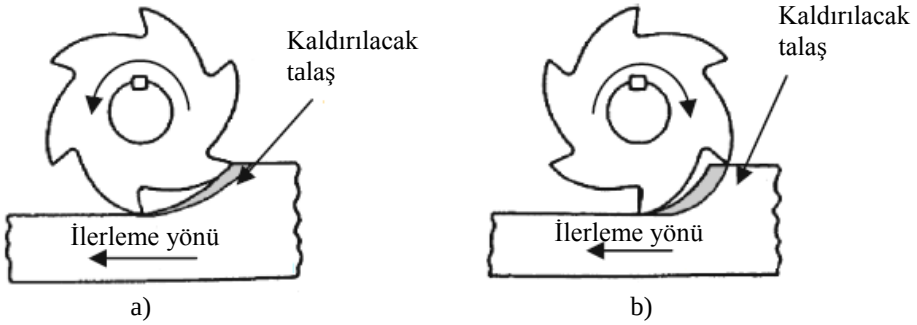


Şekil 4.2. Alın frezeleme operasyonu (Sheikh-Ahmad, 2009)

Frezeleme işleminde takımın ve iş parçasının hareketine bağlı olarak iki farklı frezeleme tekniği mevcuttur. Bunlar zıt yönlü (konvansiyonel) frezeleme ve eş yönlü frezeleme tekniklerdir.

Zıt yönlü frezelemede takım parçanın ilerleme yönüne karşı dönmekte ve kesme işlemi aşağıdan yukarı doğru yapılmaktadır. Talaş kalınlığı sıfırdan maksimuma doğru artmaktadır. Kesme kuvvetleri parçayı tabladan yukarı kaldıracak şekilde oluşmaktadır ve sıfırdan maksimuma doğru artar bu durum bir avantajdır ancak parçanın tabladan yukarıya doğru kaldırılmaya çalışılması bir dezavantajdır. Bu yöntemde kesici takımın dişleri işlenmiş yüzey ile temas eder. Şekil 4.3.(a) 'da zıt yönlü frezeleme tekniği görülmektedir.

Eş yönlü frezelemede kesici takım parçanın ilerleme yönüne doğru döner ve kesme yukarıdan aşağıya doğru yapılır. Talaş kalınlığı maksimumdan sıfıra doğru azalır. Kesme kuvvetleri parçayı tablanın altına alacak şekilde oluşmaktadır. Kesici takımın dişleri işlenmemiş yüzeyle temas eder bu ise özellikle sert parçaları işlerken dişlerin daha çabuk aşınasına sebep olur. Şekil 4.3.(b) 'de zıt yönlü frezeleme tekniği görülmektedir (Akkurt, 1998).



Şekil 4.3.(a) Zıt yönlü frezeleme (b) Eş yönlü frezeleme (Sheikh-Ahmad, 2009)

Frezeleme operasyonunda iki farklı hız parametresi vardır. Bunlardan ilki kesme hızıdır. Kesme hızı(v), fener mili hızının (N) ve kesici takım çapının (D) bir fonksiyonu olarak aşağıda gösterilen denklem 4.1 aracılığı ile hesaplanabilir.

$$v = \pi DN \tag{4.1}$$

Diğer hız parametresi ise ilerleme hızıdır. İlerleme hızı üç farklı formda olabilir. Bunlar: dakikadaki ilerleme miktarı (v_f, mm/dk), devir başına ilerleme miktarı (f, mm/dev) ve diş başına ilerleme miktarı (a_f, mm/diş) 'dır. Dakikadaki ilerleme hızı ile devir başına ilerleme hızı arasındaki ilişki denklem 4.2'de gösterilmiştir.

$$f = \frac{v_f}{N} \tag{4.2}$$

Diş başına ilerleme cinsinden ilerleme hızı ise denklem 4.3 yardımıyla hesaplanabilir. Denklemdeki T sembolü takımın sahip olduğu diş sayısını ifade etmektedir (Sheikh-Ahmad, 2009).

$$a_f = \frac{v_f}{TN} \tag{4.3}$$

Frezeleme operasyonunda kesme kuvvetleri değişkendir. Bu sebeple hesaplamaları kolaylaştırmak için ortalama talaş kesitine karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri hesaplanır. Bu kuvvetler ortalama kesme kuvveti (F_{sz}), ortalama radyal kuvvet (F_{rz}) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_{vz})'dir. Frezelemede birden fazla diş aynı anda talaş kaldırır. Çevresel frezelemede kesme kuvvetleri aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanabilir (Akkurt, 1998).

$$Z_e = z\frac{\varphi_s}{360} \tag{4.4}$$

Denklem 4.4'te Z_e aynı anda parça ile temas eden diş sayısını, φ_s ise kavrama açısını ifade etmektedir. Frezelemede talaş kesiti değişken olduğundan pratikte $\varphi_s / 2$

'ye karşılık gelen ortalama talaş kalınlığı (h_m)'na göre hesaplama yapılır. Ortalama talaş kalınlığı düz silindirik frezelemede denklem 4.5'e göre hesaplanır.

$$h_m = \frac{360}{\pi \varphi_s} \frac{a}{D} a_f \tag{4.5}$$

Kesme açısı ise denklem 4.6 ile hesaplanır.

$$\cos \varphi_s = 1 - \frac{2a}{D} \tag{4.6}$$

Denklem 4.5 ve 4.6'da geçen (a) kesme derinliği iken (D) ise freze çapıdır. a/D oranı 0.2'ye eşit ve bu değerden küçük olduğu durumlarda ortalama talaş kalınlığı denklem 4.7'ye göre hesaplanır.

$$h_m = a_f \sqrt{\frac{a}{D}} \tag{4.7}$$

(h_m) kalınlığına karşılık gelen ortalama talaş kesiti (A_s) denklem 4.8 yardımı ile hesaplanır.

$$A_s = b.h_m \tag{4.8}$$

Denklem 4.8'de yer alan b talaş genişliğini ifade eder ve düz silindirik frezelemede b=B_1 iken helisel frezelemede talaş genişliği denklem 4.9 yardımıyla bulunur.

$$b = \frac{B_1}{\cos \lambda} \tag{4.9}$$

Denklem 4.9'da yer alan B_1 işlenen yüzeyin genişliği iken λ ise helis açısıdır. Bu denklemler yardımıyla diş başına karşılık gelen ortalama kesme kuvveti denklem 4.10 yardımıyla hesaplanır.

$$F_{sz} = b.h_m.k_s \tag{4.10}$$

Denklem 4.10'da yer alan k_s özgül kesme kuvveti değeridir. Diş başına düşen ortalama kesme kuvveti yardımıyla kesme kuvveti denklem 4.11 yardımıyla hesaplanır.

$$F_s = z_e F_{sz} \tag{4.11}$$

Çevresel frezelemede diğer kuvvetler (İlerleme kuvveti F_v, Radyal kuvvet F_r) denklem 4.11 yardımıyla hesaplanır. Zıt yönlü frezelemede diğer kuvvetler pratik olarak denklem 4.12 ve 4.13 yardımıyla hesaplanır.

$$F_v = (1 - 1.2) F_s \tag{4.12}$$

$$F_r = (0.2 - 0.3) F_s \tag{4.13}$$

Eş yönlü frezelemede ise denklem 4.14 ve 4.15 yardımıyla hesaplanır.

$$F_v = (0.8 - 0.9)F_s \tag{4.14}$$

$$F_r = (0.75 - 0.8)F_s \tag{4.15}$$

Helisel frezelemede helis açısına bağlı olarak eksenel yönde bir kuvvet doğar. Bu kuvvetin değeri ise denklem 4.16 yardımıyla hesaplanır. Düz frezelemede $F_a = 0$ 'dır.

$$F_a = F_s \tan\lambda \tag{4.16}$$

Alın frezelemede oluşan kuvvetler ise yine denklem 4.10 yardımıyla hesaplanır. Alın frezelemede ortalama talaş kesiti pratikte yaklaşık olarak denklem 4.17 ile hesaplanır.

$$A_s = b.h_m \approx 0.88 a_f a \tag{4.17}$$

Alın frezelemede oluşan kesme kuvvetleri pratik olarak aşağıdaki denklemler ile belirlenir.

Simetrik frezelemede oluşan kuvvetler denklem (4.18), (4.19) ve (4.20) yardımıyla hesaplanır.

$$F_v = (0.3 - 0.4)F_s \tag{4.18}$$

$$F_a = (0.5 - 0.55)F_s \tag{4.19}$$

$$F_r = (0.85 - 0.95)F_s \tag{4.20}$$

Zıt yönlü asimetrik frezelemede oluşan kuvvetler denklem (4.21), (4.22) ve (4.23) yardımıyla hesaplanır.

$$F_v = (0.6 - 0.9)F_s \tag{4.21}$$

$$F_a = (0.5 - 0.55)F_s \tag{4.22}$$

$$F_r = (0.45 - 0.7)F_s \tag{4.23}$$

Eş yönlü asimetrik frezelemede oluşan kuvvetler denklem (4.24), (4.25) ve (4.26) yardımıyla hesaplanır.

$$F_v = (0.15 - 0.3)F_s \tag{4.24}$$

$$F_a = (0.5 - 0.55)F_s \tag{4.25}$$

$$F_r = (0.9 - 1)F_s \tag{4.26}$$

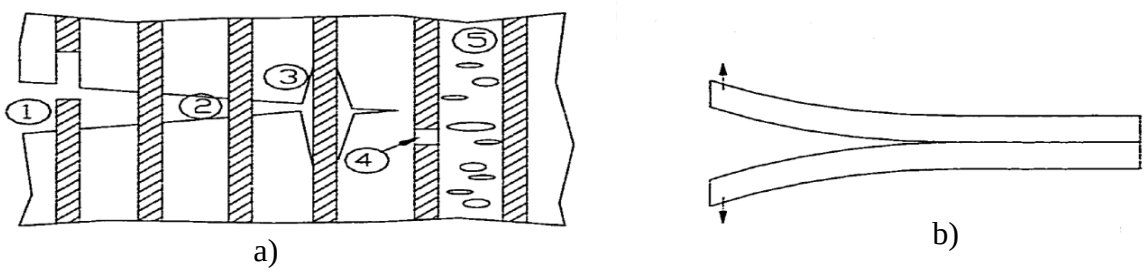
4.2.Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin İşlenebilirliği

İşlenebilirlik kavramı bir malzemenin işlenmesinin kolaylığını ya da zorluğunu ifade eder. Bu kavram sertlik, çekme dayanımı gibi bir malzeme özelliği olmayıp malzemenin kesme koşulları, işleme teknikleri gibi kesme parametrelerine verdiği tepkinin değerlendirilmesidir. İşlenebilirliğin değerlendirilmesi genel olarak üç farklı kritere göre yapılır. Bu üç kriter:

- Kesme kuvvetleri ya da güç tüketimi,
- Takım aşınması ya da takım ömrü,
- Yüzey kalitesidir.

Bu kriterlere göre işlenebilirliğin iyi olması için kesme kuvvetlerinin düşük, takım aşınmasının az ve yüzey kalitesinin iyi olması gerekmektedir. Bu üç kriterin dışında işlenebilirlik talaş oluşumu ve kesme sıcaklıklarına göre de değerlendirilebilmektedir. Oluşan talaş ile yüzey kalitesi arasında her zaman bir ilişki vardır. Şerit şeklinde sürekli talaş oluşumu stabil kesme koşulları ve iyi yüzey kalitesi anlamına gelirken kesikli talaş oluşumu kırılgan yapı ve kötü yüzey kalitesi anlamına gelmektedir. Toz şeklindeki talaş ise operatör ve makine için büyük risk oluşturmanın yanı sıra kontrol etmesi de zordur. Kesme sıcaklıkları ise takım aşınmasını ve yüzey kalitesini etkileyen bir faktördür. Kesme kuvvetleri ve güç tüketimi de kesme sıcaklıklarını etkilemektedir. Çünkü işleme sırasında harcanan enerjinin çoğu ısıya dönüşmektedir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Yukarıda bahsedilen kriterler metal işleme için kullanılmaktadır. Fiber takviyeli plastikler (FRP) ise anizotropik ve heterojen yapısıyla metallerden farklılık göstermektedirler. Bu sebeple FRP'ler işlenirken elyaf çekmesi, lif köprülemesi, fiber-matris ayrılması, fiber hasarı ve matris çatlaması gibi düzlemsel hasarların yanı sıra delaminasyon adı verilen tabakaların ayrılarak parçalanması sorunları ortaya çıkmaktadır. Bahsedilen bu hasarlar Şekil 4.4.'te gösterilmiştir (Azmi, 2012).

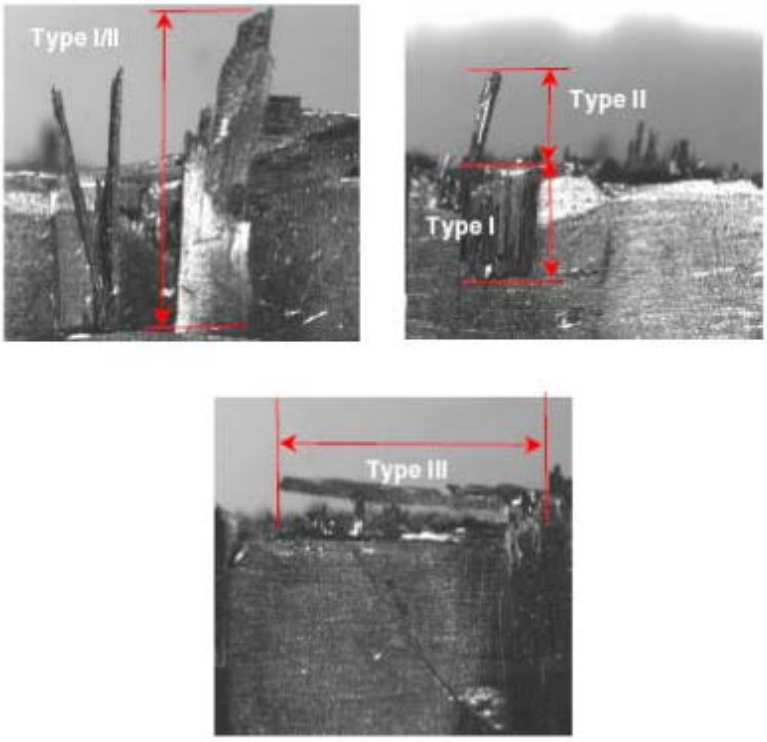


1. Elyaf çekmesi
2. Lif köprülemesi
3. Fiber- matris ayrılması
4. Fiber hasarı
5. Matris çatlaması

Şekil 4.4. Fiber takviyeli plastikler işlendiğinde ortaya çıkan hasarlar a) Düzlemsel boyuttaki hasarlar b) Delaminasyon (Azmi, 2012)

Bu hatalar arasında en önemlisi delaminasyondur. Delaminasyon malzemenin mukavemetini azalttığı gibi yorulma direncini de düşürür. Havacılık endüstrisinde fiber takviyeli plastiklerin yaklaşık %60'lık kısmı delaminasyon hatası nedeniyle reddedilmektedir. Bu oran ise bu hatanın önemini vurgulamaktadır (Arul ve ark., 2006; Khashaba ve ark., 2007; Budan ve ark., 2011; Karpat ve ark., 2012).

Şekil 4.5.'te karbon fiber takviyeli plastiklerin işlenmesinde oluşan farklı deleminasyon tipleri görülmektedir.



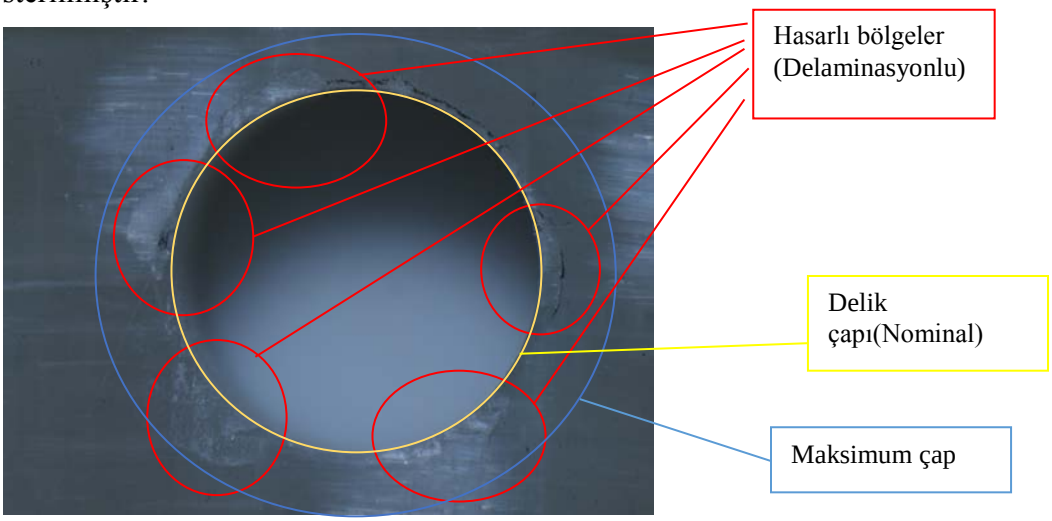
Şekil 4.5. Farklı delaminasyon tipleri (Azmi, 2012)

Delaminasyon delme operasyonunda oluştuğu gibi frezeleme operasyonunda da oluşmaktadır. Delme operasyonunda hem girişte hem çıkışta delaminasyon oluşmaktadır. Ancak çıkış delaminasyonu girişe göre daha büyük olduğundan genellikle çıkış delaminasyonu ölçülmektedir. Delme operasyonunda delaminasyon faktörü denklem 4.27'ye göre hesaplanır.

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_0} \tag{4.27}$$

Bu denklemde F_d deleminasyon faktörünü, $D_{\max}$ hasarlı en büyük çapı ve D_0 ise nominal delik çapını ifade etmektedir (Köklü ve ark., 2015).

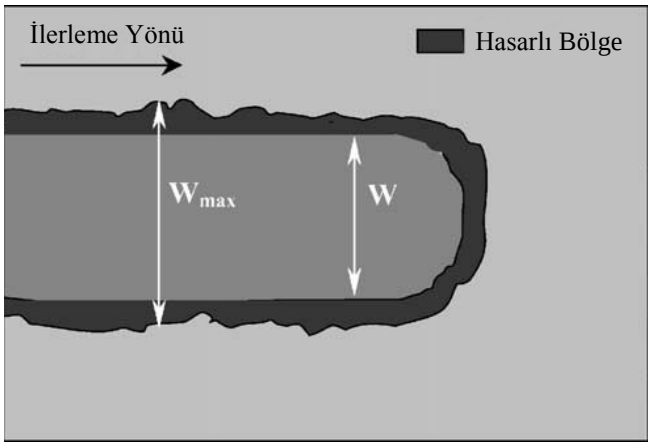
Şekil 4.6.'da cam elyaf takviyeli polimer bir kompozitin delinmesiyle oluşan delaminasyon görülmektedir. Hatalı bölgeler kırmızı yuvarlak içerisine alınmıştır. Nominal çap sarı renk ile ve maksimum hasarı kapsayan maksimum çap açık mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Cam elyaf takviyeli polimer kompozitin delinmesi sırasında oluşmuş delaminasyon

Frezeleme operasyonunda oluşan delaminasyon delmede oluşana benzer teknikle Şekil 4.7.'de görüldüğü üzere maksimum hasara uğramış genişliğin nominal genişliğe bölünmesiyle bulunmaktadır. Frezelemede delaminasyon faktörü denklem 4.28 yardımıyla hesaplanabilir (Davim ve Reis, 2005).

$$F_d = \frac{W_{\max}}{W} \tag{4.28}$$



Şekil 4.7. Frezelemede delaminasyon ölçümü (Davim ve Reis, 2005)

5.KRİYOJENİK KOŞULLARDA İŞLEME METODU

Kriyojenik terimi, kaynama noktası -150 °C ‘dan daha düşük olan sıvılar için kullanılmaktadır. Bu tanıma göre sıvılaştırılmış Nitrojen, Argon, Oksijen, Hidrojen ve Helyum gazları kriyojenik akışkanlar olarak tanımlanabilirler (Ghosh, 2006).

Kriyojenik bilimi 1850’li yıllarda temel termodinamik yasalarının bulunmasıyla başlamıştır. 1900’lü yıllarda ise sıvılaştırma teknolojisinin geliştirilmesiyle kriyojenik sıvıların üretimine başlanmıştır. Bu kapsamda endüstriyel anlamda ilk olarak kaynak endüstrisi için oksijen üretilmiştir. Kriyojenik işleme tekniği ise 1950’ li yıllarda ortaya çıkmıştır. Kriyojenik kullanılarak yapılan ilk işleme 1953 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kriyojenik olarak karbondioksit kullanılmıştır. 1960’lı yıllarda ise sıvılaştırılmış nitrojen kullanılmaya başlanmıştır. 1965 yılında Grumman Aircraft Manufacturing şirketinden araştırmacılar, Titanyumun işlenmesi sırasında soğutucu olarak sıvılaştırılmış nitrojen ve karbondioksit kullanıldığında malzemeden talaş kaldırma oranının arttığını gözlemlemişlerdir. İlerleyen yıllarda kriyojenik işleme diğer malzemelere de uygulanmaya başlanmıştır (Ghosh, 2006; Stefánsson, 2014).

Konvansiyonel soğutma sıvıları zehirli kimyasal maddeler içerdiği için hem çevreye hem de operatöre zarar vermektedir. Diğer taraftan bu sıvıların ısı transfer kapasitesi bazı durumlarda işleme için yeterli gelmemektedir. Tüm bu olumsuzlukları gidermek için kullanılabilecek soğutuculardan biri kriyojenik soğutuculardır. Kriyojenikler arasında ise en yaygın kullanılanı sıvı nitrojen (LN_2)’dir. Çünkü sıvı nitrojen hem bol hem güvenli bir kriyojeniktir. Havanın yaklaşık 5’te 4’ü azot gazından oluşmaktadır. Ayrıca temizdir ve toksik değildir (Jeon ve ark., 2013).

5.1. Kriyojenik Koşullarda İşleme Teknikleri

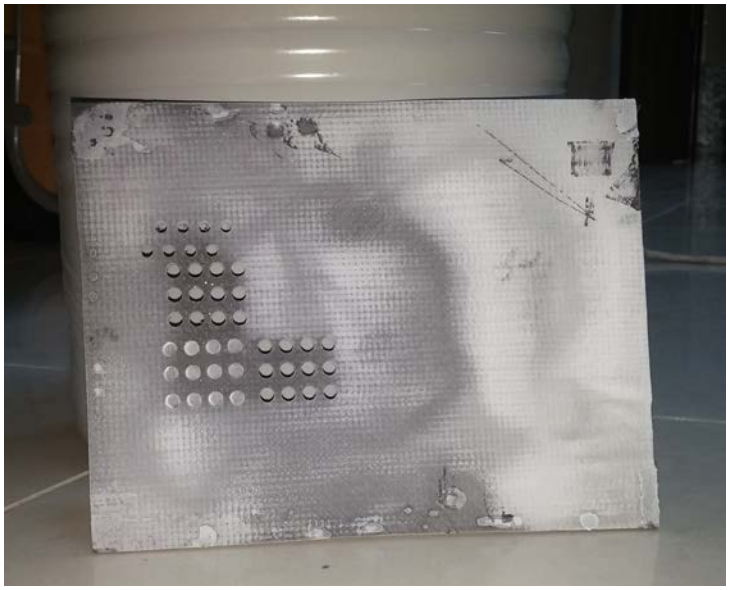
Kriyojenik işleme dört faklı şekilde yapılabilmektedir (Bhudwannachai, 2014). Bunlar:

1. İş parçasının kriyojenik ortamda ön soğutularak işlenmesi,
2. Kesici takıma dolaylı kriyojenik soğutma yaparak işleme,
3. Kesme bölgesine kriyojenik püskürterek işleme,
4. Kesici takımın işleme öncesinde kriyojenik soğutulmasıdır.

5.1.1. İş parçasının kriyojenik ortamda ön soğutularak işlenmesi

Bu yöntemde iş parçası işlenmeden önce içi kriyojenik sıvı ile dolu bir kaba daldırılarak ön soğutulur ve daha sonra işleme yapılır. Burada amaç malzemenin yapısını süneklikten kırılganlığa dönüştürmektir. Böylece iş parçasından talaş kaldırmak kolaylaşacak ve daha kaliteli yüzeyler elde edilebilecektir (Jeon ve ark., 2013; Bhudwannachai, 2014).

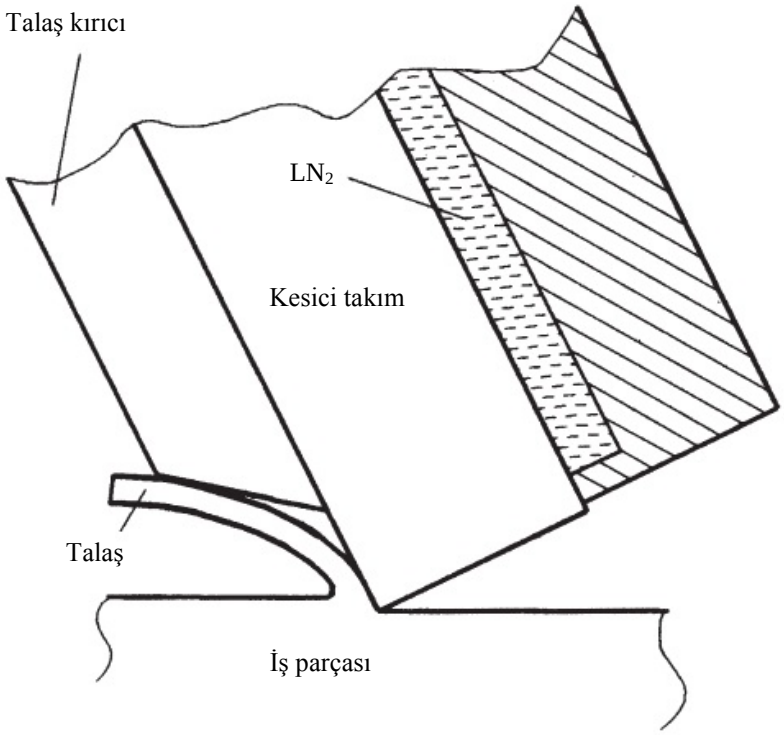
Bu yöntem işleme öncesinde uygulanabildiği gibi işleme esnasında üzerine LN_2 dökülerek de uygulanabilmektedir (Bhudwannachai, 2014). Şekil 5.1.'de kriyojenik ön soğutma yapılmış bir CFRP plaka görülmektedir.



Şekil 5.1. Kriyojenik ön soğutma yapılmış bir CFRP plaka

5.1.2. Kesici takıma dolaylı kriyojenik soğutma yaparak işleme

Bu yöntemdeki amaç takım ile iş parçasının birbirine temas ettiği bölgeyi (kesme bölgesi) doğrudan kriyojeniğe temas ettirmeden soğutma yapmaktır. Bu yaklaşımda LN_2 kesici takımın arkasından uygulanır (Bhudwannachai, 2014). Uygulama Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.

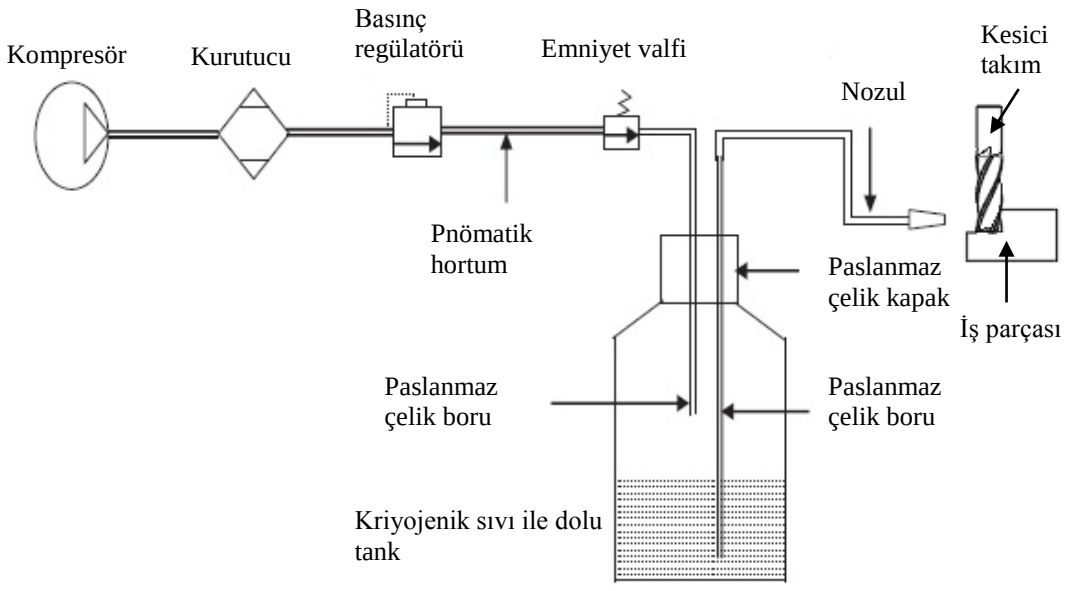


Şekil 5.2. Kesici takıma dolaylı kriyojenik soğutma yaparak işleme (Bhudwannachai, 2014)

İş parçasının mekanik özelliklerinin değişmesinin istenmediği durumlarda bu yöntem kullanılmaktadır (Jeon ve ark., 2013).

5.1.3. Kesme bölgesine kriyojenik püskürterek işleme

Yaygın olarak kullanılan bu metotta, kriyojenik doğrudan kesme bölgesine nozul aracılığı ile uygulanır. Takım-talaş arayüzünün sıcaklığını düşürdüğü için talaş kırılganlığını artırır, takım aşınmasını azaltır ve ayrıca yüzey kalitesini de iyileştirir (Jeon ve ark., 2013). Yöntemin uygulaması Şekil 5.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kesme bölgesine kriyojenik püskürterek işleme (Stefánsson, 2014)

5.1.4. Kesici takımın işleme öncesinde soğutulması

Bu yöntemde kesici takım işleme operasyonuna geçilmeden önce kriyojeniğin içerisinde belirli bir süre soğutulur ve daha sonra talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilir. Takımın soğuması ile takım ömrünün ve aşınma dayanımının artması amaçlanır. Da Silva ve ark. (2006) AISI 8640 çeliğinin delinmesinde HSS takıma kriyojenik soğutma yaparak takım ömrünün soğutma uygulanmamış takıma göre %147-347 arasında arttığını belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Firouzdor ve ark. (2008) Ck40 karbon çeliğinin delinmesinde HSS takıma kriyojenik soğutma yaparak takım ömründe %77-127 arasında artış sağlandığını bildirmişlerdir (Bhudwannachai, 2014).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli plastiklerin kuru ve kriyojenik işleme koşullarında frezelenmesi araştırılmıştır.

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Deneylerde düz dokuma karbon fiber kumaştan imal edilmiş, 0/90° fiber oryantasyon açısına, 5 mm kalınlığa ve 50 x 50 cm ölçülerine sahip CFRP plaka kullanılmıştır. Plaka 26 adet 200 g/m^2 alansal yoğunluğa sahip düz dokuma kumaş, 900 g reçine ve 225 g sertleştirici kullanılarak VARTM tekniği ile üretilmiştir. Reçine vakum ile emdirildikten sonra ıslak yapı 1 saat 70 °C'de ve ardından 2 saat 110 °C'de kürlenmiştir. 50 x 50 cm boyutunda üretilen CFRP plaka, Şekil 6.1.'de gösterildiği gibi daha önceden tasarlanmış ve üretilmiş olan kalıba bağlayabilmek için uygun ölçülerde (200 x 150 mm) el testeresi ile kesilmiştir.



Şekil 6.1. CFRP plakanın kalıba uygun boyutta kesilmesi

6.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takım

Deneylerde Iscar firmasına ait EPNC-C10 08-25C08F63 kodlu kaplamasız, kompozit malzeme işlemek için özel olarak üretilmiş kesici takımlar kullanılmıştır. 8

mm çapa, 63 mm uzunluğa ve 10 ağıza sahip olan kesici takım Şekil 6.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Deneylerde kullanılan kesici takım (Anonymous, 2016d)

Karbon fiber yüksek aşındırıcı bir yapıya ve düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olduğu için karbon fiber takviyeli plastiklerin işlenmesi sırasında takım hızla aşınmaktadır (Karpat ve ark., 2012). Karbon fiberin yanısıra cam fiberin de aşındırıcı ve sert olduğu, dolayısıyla yüksek takım aşınmasına sebep olduğu literatürde daha önce belirtilmiştir (Gaitonde ve ark., 2014). Takım aşınmasının deney sonuçlarına etkisini yok etmek için daha önce yapılan çalışmalarda her bir kesme işlemi için yeni bir kesici takım kullanıldığı belirtilmektedir (Gaitonde ve ark., 2014; Haddad ve ark., 2015; Xia ve ark., 2016). Bu çalışmada da takım aşınmasının sonuçları etkilememesi için her bir kesme işleminde yeni bir takım kullanılmıştır.

6.3. Deney Parametreleri ve İşleme Stratejisi

Deney parametreleri belirlenmeden önce literatürde mevcut olan önceki çalışmalar incelenmiş ve ayrıca kesici takım kataloğundaki öneriler de dikkate alınarak kesme parametreleri belirlenmiştir. Kesme parametreleri Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Kesme parametreleri

Sembol	Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
A	Fener Mili Hızı (dev/dk)	3000	5500	8000
B	İlerleme Hızı (mm/dk)	500	750	1000
C	Talaş Derinliği (mm)	2	3	4
D	İşleme Koşulu	1(Kuru)	2 (Kriyojenik)	-

Çizelge 6.1.'deki parametreler kullanılarak kuru işleme şartında 27 ve aynı parametreler ile kriyojenik işleme şartında 27 olmak üzere toplamda 54 deney yapılmıştır.

Deney tasarımı ve optimizasyon için literatürde kabul gören ve kullanımı yaygın olan Taguchi metodu kullanılmıştır.

Taguchi metodu değişkenler arasındaki etkileşimlerin analizine ve modellenmesine imkan sağlamaktadır. Endüstride ürün geliştirme süresini kısaltmak için kullanılmaktadır ve böylece ürün geliştirme sürecinin kısalmasıyla maliyet ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Konvansiyonel deney tasarım metotlarında kontrol edilemeyen faktörlerden kaynaklanan değişkenlerin kontrolüne de ayrıca imkan sağlamaktadır. Bu yöntemde, kontrol edilemeyen faktörlere karşı kontrol faktörlerine ait seviyelerin performansının ölçülmesinde, amaç fonksiyonuna ait değerler sinyal/gürültü (S/N) oranlarına dönüştürülmektedir. S/N oranı arzu edilen sinyal değerlerinin istenmeyen gürültü değerlerine oranı olarak tanımlanabilir ve deneysel verilerin kalitesinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Üç farklı amaç fonksiyonu yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar: “En büyük en iyi”, “En küçük en iyi” ve “ Hedef değer en iyi” dir (Günay ve Yücel, 2013; Bayraktar ve Turgut, 2016).

Her üç amaç fonksiyonu için de S/N oranının maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. En büyük en iyi amaç fonksiyonu için S/N oranı denklem 6.1, en küçük en iyi amaç fonksiyonu için S/N oranı denklem 6.2 ve hedef değer en iyi amaç fonksiyonu için S/N oranı denklem 6.3 aracılığı ile hesaplanabilir (Bayraktar, 2011).

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{6.1}$$

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right) \tag{6.2}$$

$$S/N = 10\log\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(\frac{y_i}{r}\right)^2}{S^2}\right) \tag{6.3}$$

Bu çalışmada deney parametrelerinin frezeleme kuvveti, delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığa olan etkisi araştırılmıştır. Tüm çıkış parametrelerinin minimize edilmesi frezeleme performansını arttıracağından en küçük en iyi amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

Bu çalışma için hazırlanan Taguchi L_{54} deney tasarımı Çizelge 6.2.’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Taguchi L_{54} Deney Tasarımı

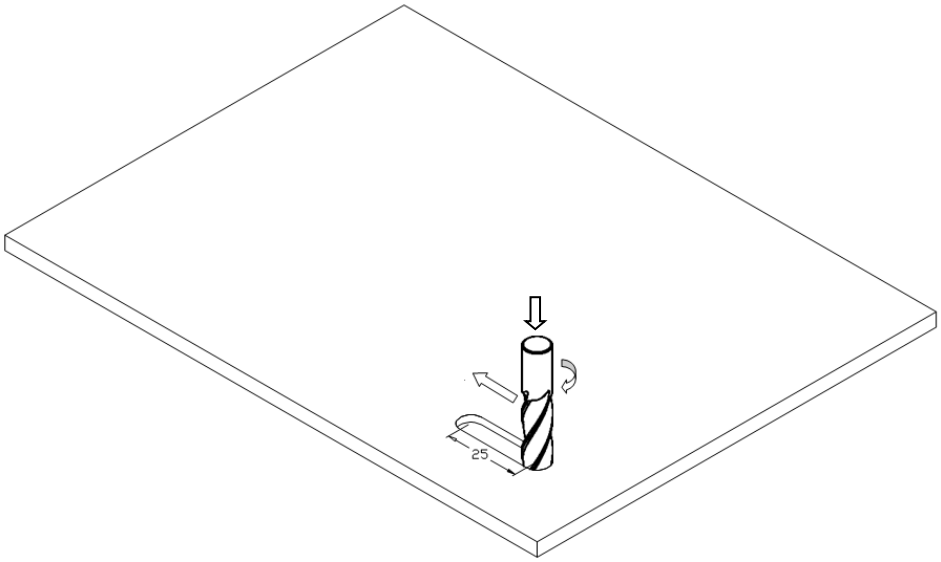
Deney Numarası	Fener Mili Hızı (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Talaş Derinliği (mm)	İşleme Koşulu (1-Kuru 2-Kriyojenik)
1	3000	500	2	1
2	5500	500	2	1
3	8000	500	2	1
4	3000	750	2	1
5	5500	750	2	1
6	8000	750	2	1
7	3000	1000	2	1
8	5500	1000	2	1
9	8000	1000	2	1
10	3000	500	3	1
11	5500	500	3	1
12	8000	500	3	1
13	3000	750	3	1
14	5500	750	3	1
15	8000	750	3	1
16	3000	1000	3	1
17	5500	1000	3	1
18	8000	1000	3	1
19	3000	500	4	1
20	5500	500	4	1
21	8000	500	4	1
22	3000	750	4	1
23	5500	750	4	1
24	8000	750	4	1
25	3000	1000	4	1
26	5500	1000	4	1
27	8000	1000	4	1
28	3000	500	2	2
29	5500	500	2	2
30	8000	500	2	2
31	3000	750	2	2
32	5500	750	2	2
33	8000	750	2	2
34	3000	1000	2	2
35	5500	1000	2	2
36	8000	1000	2	2
37	3000	500	3	2
38	5500	500	3	2
39	8000	500	3	2

40	3000	750	3	2
41	5500	750	3	2
42	8000	750	3	2
43	3000	1000	3	2
44	5500	1000	3	2
45	8000	1000	3	2
46	3000	500	4	2
47	5500	500	4	2
48	8000	500	4	2
49	3000	750	4	2
50	5500	750	4	2
51	8000	750	4	2
52	3000	1000	4	2
53	5500	1000	4	2
54	8000	1000	4	2

Deney parametrelerinin sonuçlara etkisinin yüzdesel olarak belirlenmesi için ANOVA metodundan yararlanılmıştır. ANOVA deneysel verileri yorumlama ve karar verme sürecinde kullanılan istatistiksel bir metottur. Varyans analizi olarak da bilinen ANOVA metodu toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran ve ortalama kareler, karelerin toplamı, serbestlik derecesi gibi niceliklerin hesaplanması için kullanılan matematiksel bir tekniktir (Öztop, 2007; Bayraktar, 2011).

ANOVA temel olarak, deney parametrelerinin veya onların etkileşimlerinin deneye etkisinin belirlenmesi için sonuç değişkenlerinin karelerini değişik gruplar içinde toplamını ele alarak toplam varyansları belirler. Bu işlemden sonra değişkenlerin sisteme katkı yüzdesini hesaplayarak en uygun parametrenin bulunmasını mümkün kılmaktadır (Bayraktar, 2011).

Deneylerde kullanılan işleme stratejisi Şekil 6.3.'te gösterilmiştir. 25 mm sabit uzunluğa (merkezden merkeze) sahip 54 adet kanal CFRP plaka üzerine deney tasarımındaki parametreler kullanılarak işlenmiştir.



Şekil 6.3. İşleme stratejisi

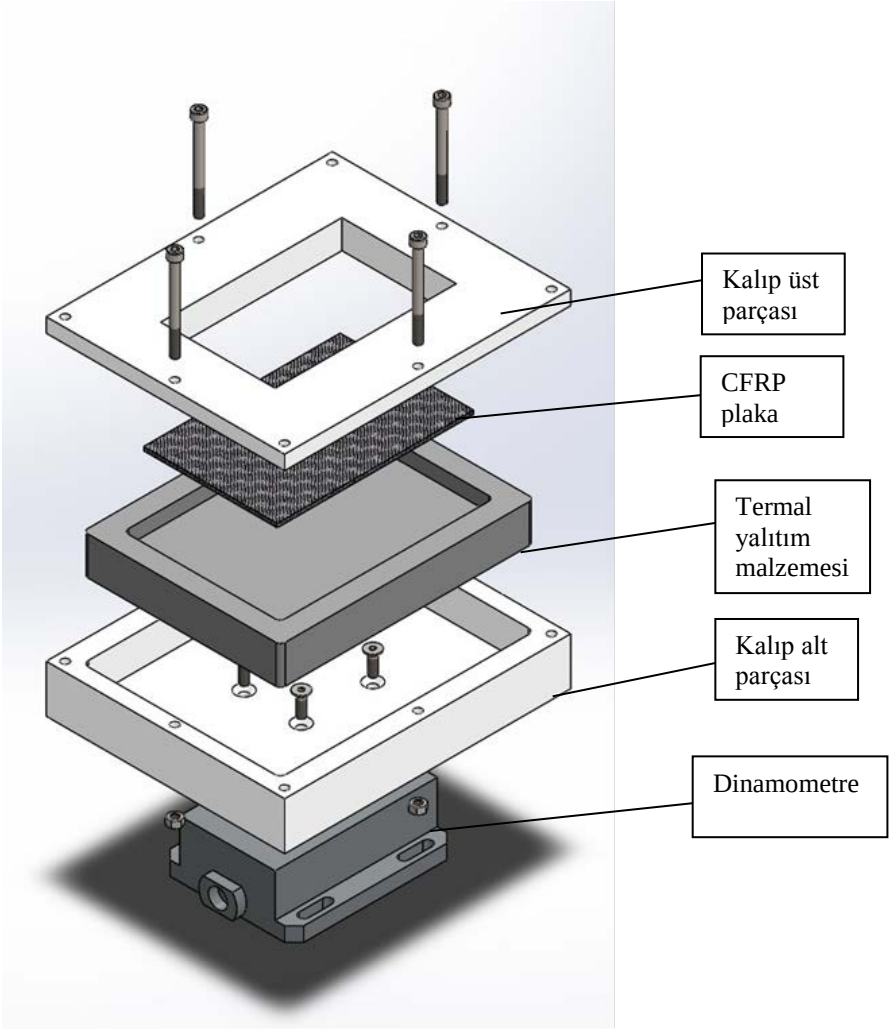
6.4. Deney Düzeneği

Deneyler Şekil 6.4.'te gösterilen maksimum 17.5 kW güce ve 10 000 dev/dk fener mili hızına sahip Quaser MV154C dik işlem merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik koşulda işleme yapabilmek için özel bir kalıp tasarlanmış ve üretilmiştir. Tezgah tablasına, kesme kuvvetlerinin ölçümü için bir dinamometre yerleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Deneylerin yapıldığı dik işlem merkezi

CFRP malzemeyi kriyojenik koşulda (Kriyojenik içerisinde) işlemek için tasarlanan kalıp Şekil 6.5.'te gösterilmiştir.



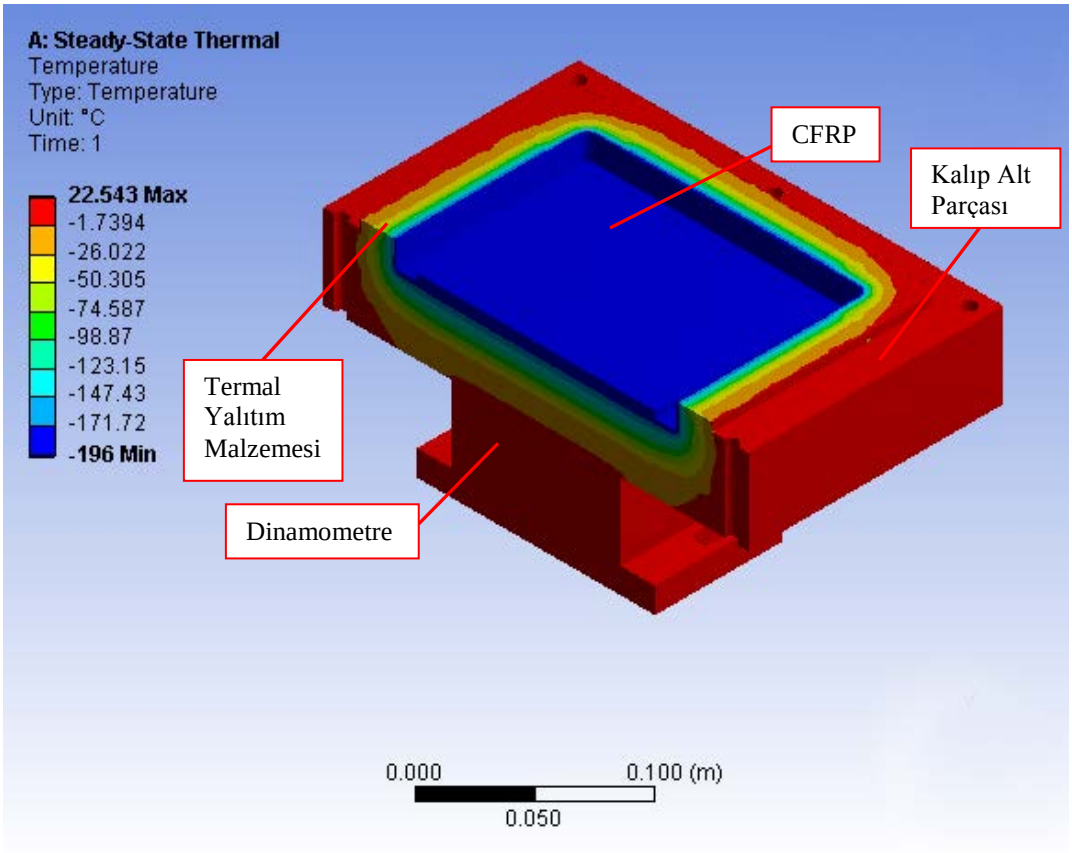
Şekil 6.5. Tasarlanan ve üretilen kalıp

Kalıbın alt parçası, tezgah tablasına sabitlenen dinamometreye 4 adet M8 havşa başlı alyan cıvata yardımıyla bağlanmıştır. Kalıbın alt parçasının içerisine termal yalıtım malzemesi koyulmuş ve işlenecek olan CFRP plaka termal yalıtım malzemesinin üzerine düzgünce yerleştirilmiştir. Son olarak kalıbın üst parçası 4 adet M8 alyan başlı cıvata ve 4 adet M8 somun ile birbirine bağlanmıştır. Cıvatalarda oluşan ön gerilme kuvvetinin yardımı ile CFRP plaka kalıbın içerisine sıkıca sabitlenmiştir.

Çalışma sıcaklığı 0…70 °C olan dinamometrenin kriyojenik soğutucu olarak kullanılan sıvı nitrojenden (-196 °C) etkilenmemesi ve sıvı nitrojenin hızla buharlaşmasının önüne geçilmesi için kalıp içerisine termal yalıtım malzemesi olarak 0.039W/(m.K) ısı iletim katsayısına sahip olan genleştirilmiş polistren köpük (EPS) koyulmuştur. Deneylere başlamadan önce dinamometrenin aşırı soğuktan etkilenip etkilenmediğini test etmek amaçlı sonlu elemanlar yöntemi ile termal analiz yapılmıştır.

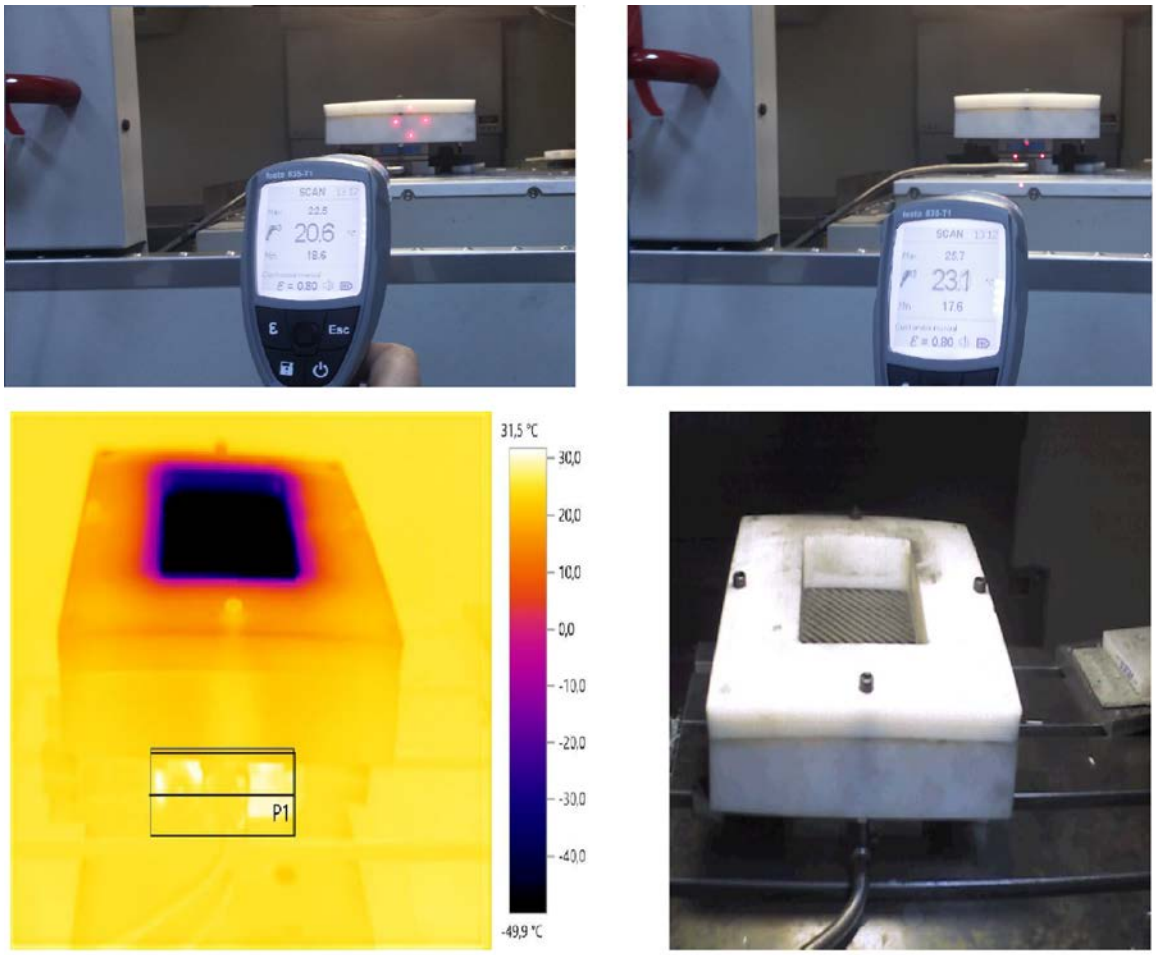
Yapılan analizde ortamın sıcaklığı sabit 26 °C kabul edilmiştir. Kalıp alt parçası polyamid malzemeden üretilmiş olup ısı iletim katsayısı yaklaşık 0.25 W/(mK)'dir. Sıvı nitrojen deney anında sürekli takviye edildiği için termal yalıtım malzemesinin iç yüzeyi ile CFRP'nin tüm yüzeyleri -196 °C sıcaklıkta sabit kabul edilmiştir. Analizde iletim ve taşınım ile olan ısı transferi dikkate alınmıştır.

Yapılan termal analizin sonuçları Şekil 6.6.'da gösterilmiştir. Yapılan termal analiz sonucunda dinamometrenin sıcaklığının yaklaşık 22.5 °C olduğu görülmektedir. Bu ise dinamometrenin, sıvı nitrojenin çok düşük sıcaklığından hemen hemen hiç etkilenmediğini göstermektedir.



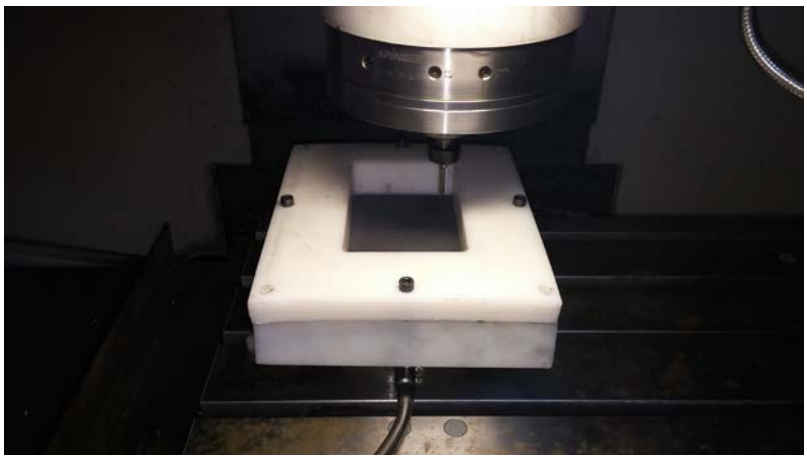
Şekil 6.6. Termal analiz sonuçları

Termal analizin doğruluğunu test etmek için termal kamera ve infrared termometre ile kalıbın kriyojenik koşulda işleme anında sıcaklığının ölçümü yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Şekil 6.7.'de verilmiştir. Sıcaklığın yaklaşık 26 °C olduğu bir ortamda yapılan ölçüm sonuçlarına göre kalıbın dış yüzeyinin sıcaklığı yaklaşık 20.5 °C iken dinamometrenin dış yüzeyinin sıcaklığı yaklaşık 23 °C' dur.



Şekil 6.7. Kalıp ve dinamometrenin sıcaklığının ölçümü

Kuru koşulda yapılan işlemede herhangi bir soğutucu kullanılmamıştır. Kriyojenik koşul ile farklılık oluşturmaması ve sonuçları etkilememesi için yine aynı kalıp kullanılarak işleme yapılmıştır. Kuru koşulda işleme anı Şekil 6.8.'de gösterilmiştir.



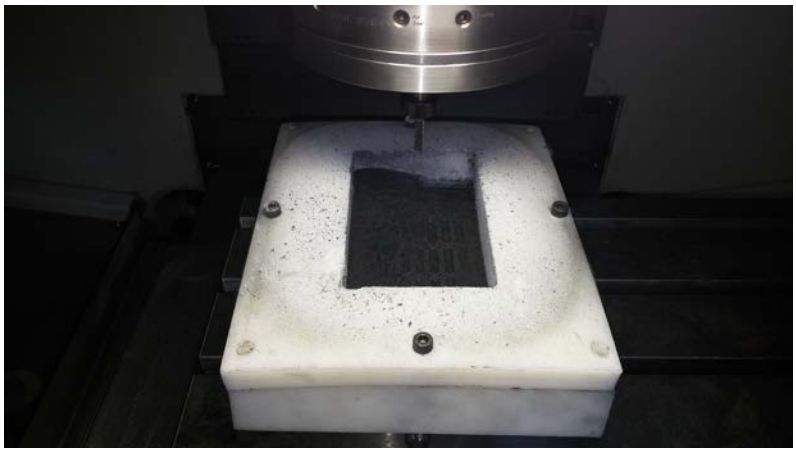
Şekil 6.8. Kuru koşulda işleme

Kriyojenik koşulda işlemede ise parça kalıba bağlandıktan sonra deneylere başlanmadan önce kalıbın üzerindeki boşluktan CFRP malzemenin üzerine parçanın kalınlığını (5 mm) geçecek şekilde sıvı nitrojen dökülmüş ve CFRP plakanın soğutulması sağlanmıştır. Bu sayede deney anında sıvı nitrojenin hızla buharlaşması önlenmiştir. Kriyojeniğin muhafaza edildiği basınçsız sıvı nitrojen tankı Şekil 6.9.'da gösterilmiştir. Deney esnasında kriyojeniği kalıba dökerken soğuk yanığı gibi olumsuzluklar ile karşılaşmamak için soğuğa dayanıklı eldiven kullanılmıştır.



Şekil 6.9. Sıvı nitrojen tankı

Parça soğutulduktan sonra deneylere başlanmış ve deney anında buharlaşan sıvı nitrojen yerine sürekli takviye yapılmıştır. Deney süresince parça sıvı nitrojen içerisine gömülü bir şekilde işlenmiştir. Kriyojenik koşulda işleme anı Şekil 6.10.'da gösterilmiştir.



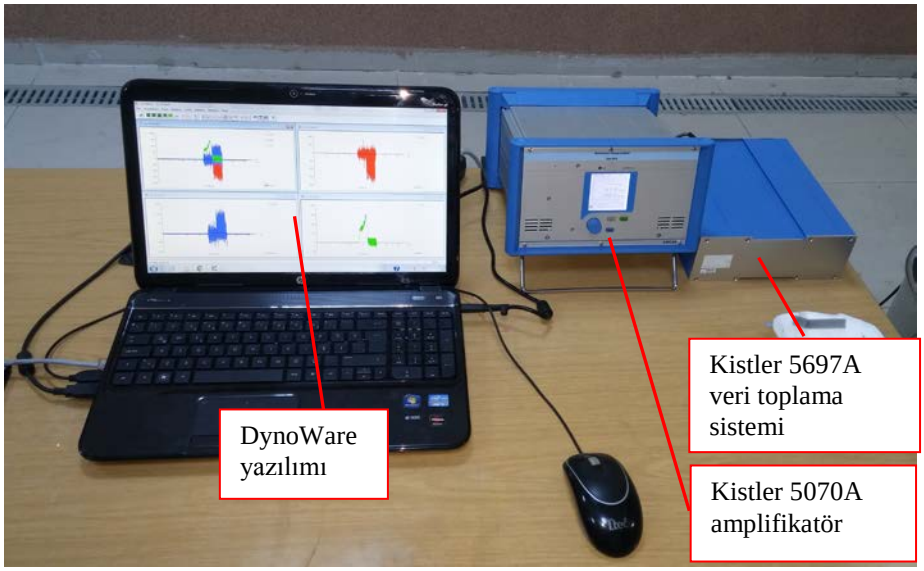
Şekil 6.10. Kriyojenik koşulda işleme

6.5. Ölçme Metotları

İşlenebilirliği değerlendirebilmek için dört sonuç parametresi belirlenmiş ve bunların ölçümleri deney anında ve sonrasında yapılmıştır.

6.5.1. Kesme kuvvetlerinin ölçümü

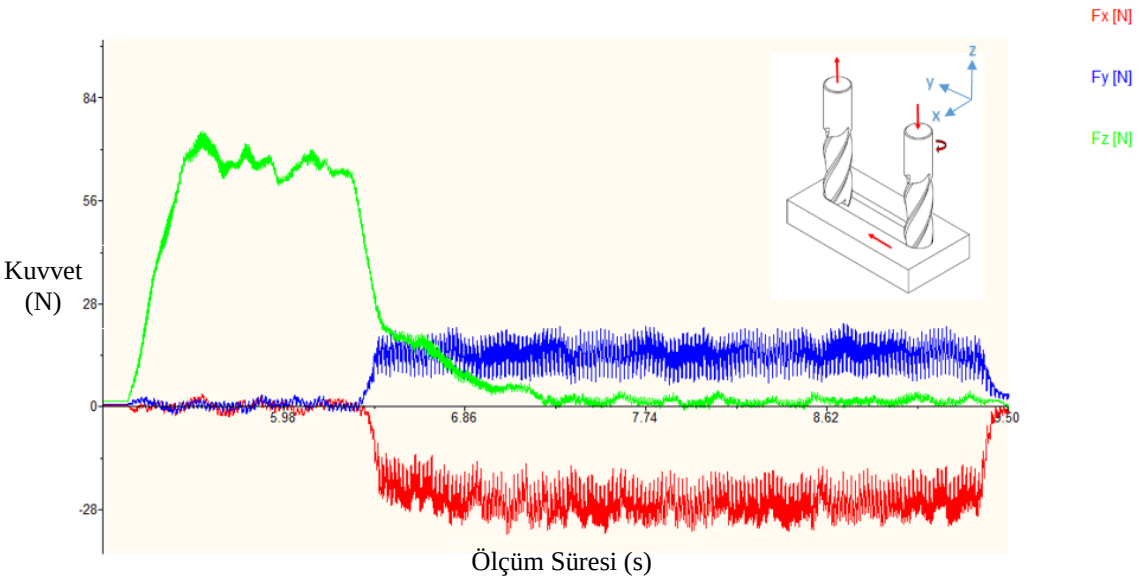
Kesme kuvvetleri (F_x, F_y, F_z) -5…5 kN aralığında ölçüm yapabilen Kistler Type 9257B dinamometre ile deney anında her bir kanal için ölçülmüştür. Deney verilerinin dijital ortama aktarılması için kullanılan ekipmanlar (Kistler 5070A amplifikatör, Kistler 5697A veri toplama sistemi (DAQ kartı) ve DynoWare yazılımı) Şekil 6.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Kesme kuvvetleri ölçümünde kullanılan ekipmanlar

Kesme kuvvetinin yatay bileşenleri teğetsel kuvvet (F_t) ve normal kuvvet (F_n)'den oluşmaktadır. Dinamometre tarafından ölçülen kuvvetler ise bu kuvvetlerin kartezyen koordinat sistemindeki bileşenleri olan F_x ve F_y kuvvetleridir. Bu kuvvetlere ek olarak eksenel yönde oluşan F_z kuvveti de üç bileşenli dinamometre ile ölçülebilmektedir. Frezelemede ilerleme yönü doğrultusunda oluşan kuvvet ilerleme kuvveti olarak adlandırılırken bu kuvvete yatay düzlemde dik olan ve temel kesme etkilerinden dolayı oluşan kuvvet ise asıl kesme kuvveti olarak adlandırılmaktadır

(Wang ve ark., 2016). Kanal açma işlemi sırasında dinamometre tarafından ölçülen kuvvetler Şekil 6.12.'de gösterilmiştir.

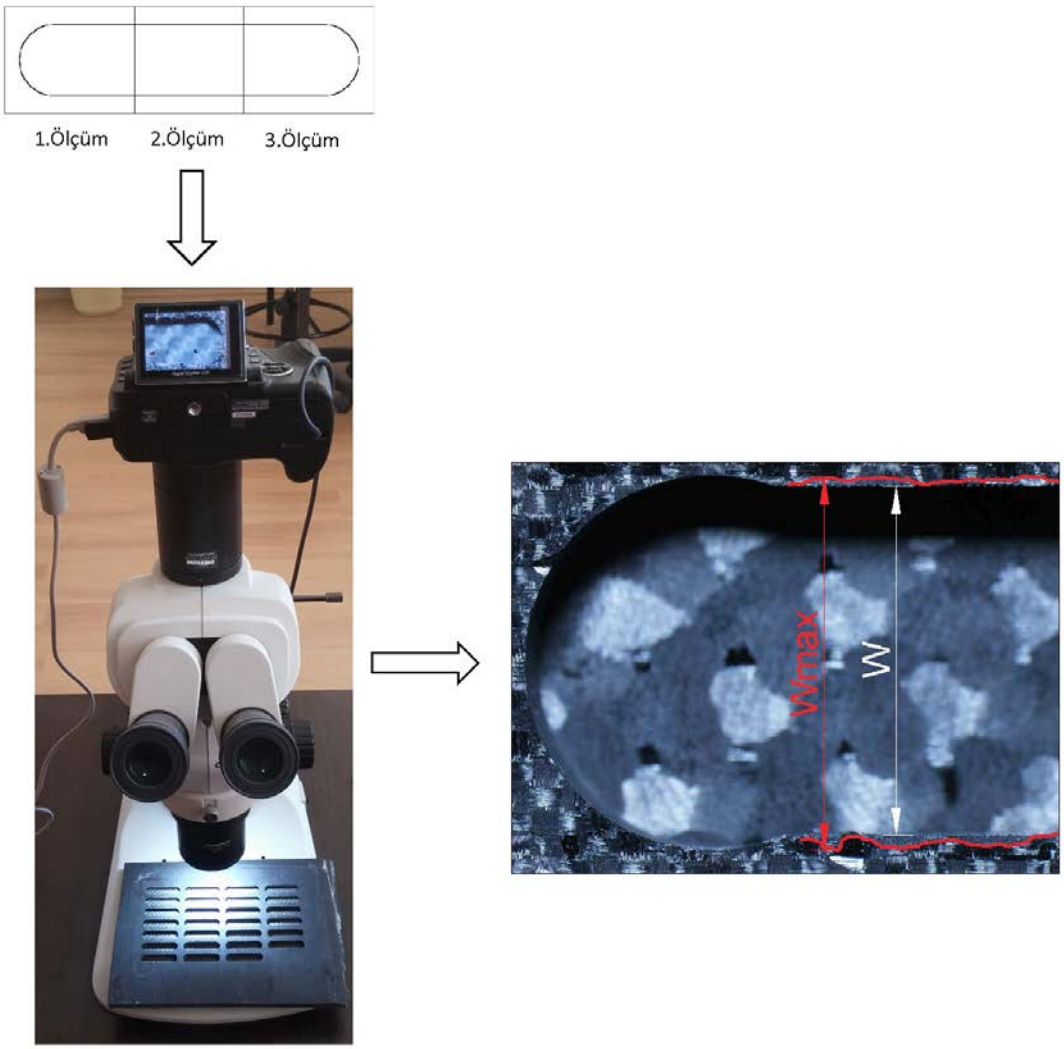


Şekil 6.12. Kanal açma işleminde oluşan kuvvetler

Kanal açma işleminde oluşan kuvvetler incelendiğinde kesici takımın malzemeye ilk temas ettiği andan kanalın derinliğine ulaşıncaya kadar yapılan talaş kaldırma işleminde F_z kuvvetinin çok yüksek çıktığı görülmektedir. Takım y yönünde hareket etmeye başlayınca z yönündeki kuvvet azalırken diğer kuvvetler artarak tüm kanal açma işlemi boyunca stabil bir hal almıştır. Kuvvetlerin ölçümü yapılırken bu durum göz önünde bulundurularak ölçümler stabil duruma göre alınmıştır.

6.5.2. Delaminasyon ölçümü

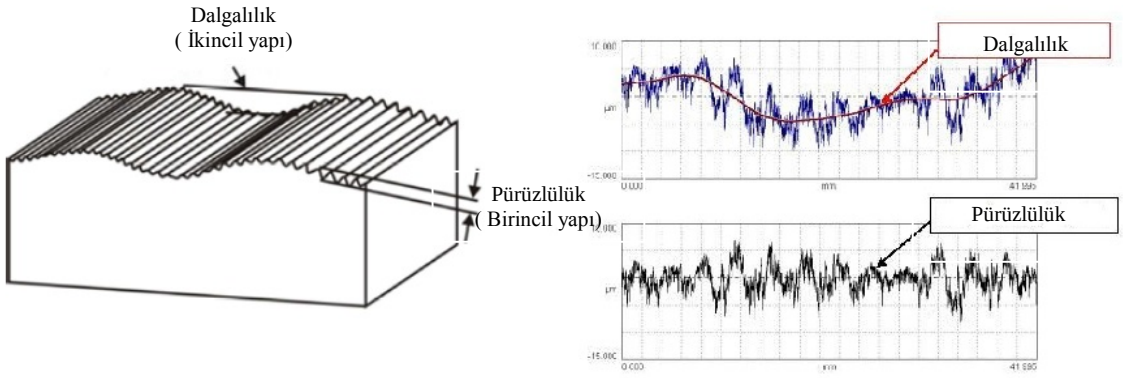
Deneyler yapıldıktan sonra her bir kanal için üç farklı ölçüm yapılıp bu ölçümlerin ortalaması alınarak o kanal için nihai delaminasyon faktörü belirlenmiştir. Delaminasyon ölçümü için Olmypus SZX7 Stereo Trinoküler mikroskop ile işlenen kanalın üç farklı yerinden dijital görüntü alınmış ve delaminasyon faktörü denklem 4.28 yardımıyla hesaplanmıştır. Delaminasyon ölçümü Şekil 6.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Delaminasyon ölçümü

6.5.3. Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık ölçümü

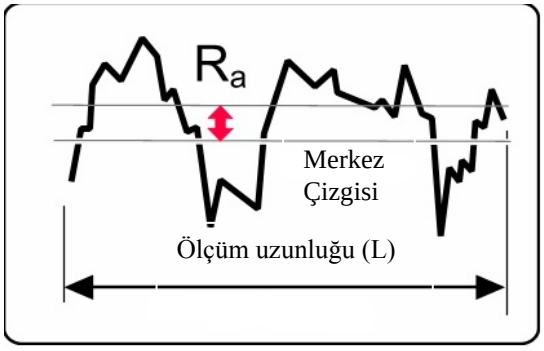
Yüzey yapısı iki farklı formdan oluşur. Bunlar yüzey pürüzlülüğü (birincil yapı) ve dalgalılık (ikincil yapı)'tır. Yüzey pürüzlülüğü yüzeyin kalitesini ifade ederken, dalgalılık ise parçanın geometrisini ifade etmektedir. Yüzey yapısını oluşturan dalgalılık ve yüzey pürüzlülüğü Şekil 6.14.'te gösterilmiştir (Bayraktar, 2011; Ahmed, 2013).



Şekil 6.14. Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık (Ahmed, 2013; Anonymous, 2016c)

Yüzey yapısı; işleme tekniğine, tezgah mekanizmasındaki kusurlara, kesme parametrelerine, titreşimlere, iş parçasına ve ısıl işleme bağlıdır (Bayraktar, 2011; Ahmed, 2013).

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan parametreler R_a ve R_z'dir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ölçüm parametresi olarak R_a kullanılmıştır. R_a, bir profil boyunca ölçülen pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanmaktadır. R_a ölçümü Şekil 6.15.'te gösterilmiştir (Anonymous, 2016b).

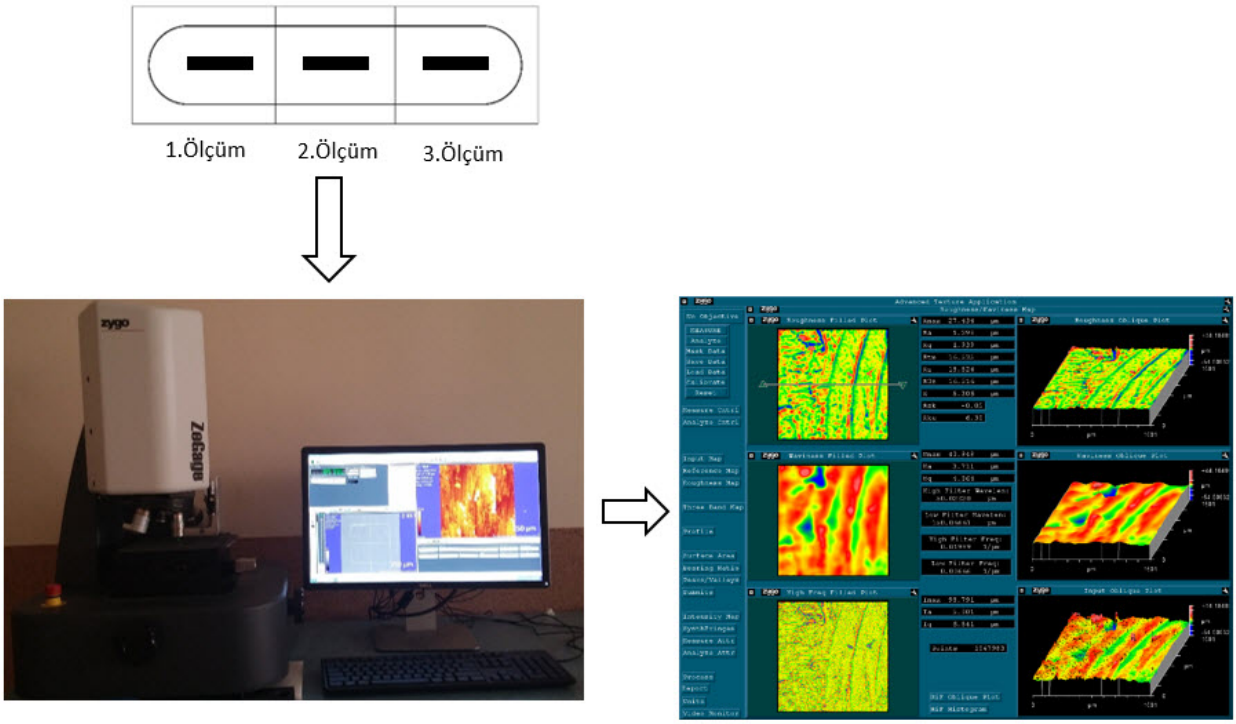


Şekil 6.15. Ra ölçümü (Anonymous, 2016b)

Dalgalılık yüzey doğruluğunu ve montaj hassasiyetini etkileyen; rulmanlı yatak, hidrolik valf gibi çoğu endüstrilerde kullanılan önemli bir kalite kriteridir ve dalgalılığın belirli limitlerde tutulması gerekmektedir (Zhou ve ark., 2010; Jiang ve ark., 2013). Yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi dalgalılık ölçümünde de çeşitli parametreler mevcuttur. Bu çalışmada dalgalılık ölçüm parametresi olarak W_a kullanılmıştır. W_a bir profil boyunca ölçülen dalgalılık değerlerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanmaktadır ve R_a ile aynı şekilde ölçülmektedir ancak dalgalılık değerleri

pürüzlülük değerlerine göre nispeten daha büyüktür (Sheikh-Ahmad, 2009; Anonymous, 2016b).

Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık ölçümünde deneyler sonrası işlenen kanallardan tıpkı delaminasyon ölçümünde olduğu gibi üç farklı yerden ölçüm alınmış ve bu üç ölçümün ortalaması alınarak nihai değer belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık ölçümü Zygo ZeGage optik profilometre, ZeMaps ve MetroPro yazılımları yardımıyla yapılmış ve Şekil 6.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Dalgalılık ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada CFRP'nin frezelenme performansına kesme parametrelerinin ve kriyojenik işleme koşulunun etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler sonucunda çıktı parametreleri olarak kesme kuvvetleri (F_x, F_y ve F_z), delaminasyon faktörü (F_d), yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve dalgalılık (W_a) incelenmiştir. Kesme parametrelerinin tasarımı ve elde edilen sonuçların yorumlanarak optimal verilere ulaşmak için, literatürde kullanımı hayli yaygın olan ve pratik sonuçlar veren Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen kesme kuvvetleri, F_d, R_a ve W_a gibi performans çıktılarının Taguchi metoduyla analizlerinde "daha düşük daha iyi" (lower is better) fonksiyonları kullanılmıştır.

Deney sonuçlarının Sinyal/Gürültü (S/N) oranlarının tespitinde Çizelge 6.1.'de bulunan faktörler ve seviyeler kullanılmıştır. Bu çalışmada, frezeleme deneyleri için fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve işleme koşulu (kuru ve kriyojenik) ilk 3 faktör 3 seviye son faktör ise 2 seviyeye sahip dört kontrol parametresi oluşturulmuştur. Deney parametreleri Çizelge 6.1.'de gösterilmiştir. Deneyler sonucunda yapılan ölçümler neticesinde elde edilen veriler Minitab 17 paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Deneylerden elde edilen tüm ölçüm sonuçları EK-1'de, bu sonuçlardan hesaplanan tüm S/N oranları ise EK-2'de verilmiştir. Deneylerin doğruluğunu ve tekrarlanabilirlik durumunu saptamak için en düşük seviyedeki kesme parametreleri (3000 dev/dk, 500 mm/dk ve 2 mm talaş derinliği), orta seviyedeki kesme parametreleri (5500 dev/dk, 750 mm/dk ve 3 mm talaş derinliği) ve en yüksek seviyedeki kesme parametreleri (8000 dev/dk, 1000 mm/dk ve 4 mm talaş derinliği) kullanılarak üçer tekrar yapılmıştır. Tekrar deneylerinin sonuçları EK-3'te verilmiştir. Tekrar deneyi sonuçlarının ortalaması ile asıl deney sonuçları arasındaki bağıl hatalar hesaplanmış ve EK-3'te verilmiştir. En yüksek hata oranları dalgalılık ve z yönündeki frezeleme kuvveti ölçümlerinde oluşurken en düşük hata oranı ise delaminasyon ölçümünde oluşmuştur.

7.1.Frezeleme Kuvvetlerinin Analizi

İşleme esnasında oluşan frezeleme kuvvetlerinin (F_x F_y, F_z) değerlendirilmesi ayrı ayrı yapılmış dolayısıyla her bir kuvvet bileşeni için analizler yapılmıştır.

7.1.1. Frezeleme kuvvetleri için Taguchi analizi

Yapılan analizden elde edilen frezeleme kuvvetlerine ait S/N değerleri Çizelge 7.1., 7.2. ve 7.3.'te verilmiştir. Çizelgelerde gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise frezeleme operasyonunda farklı kesme parametrelerinde minimum kuvveti elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir.

Çizelge 7.1. X yönündeki frezeleme kuvveti (F_x) için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

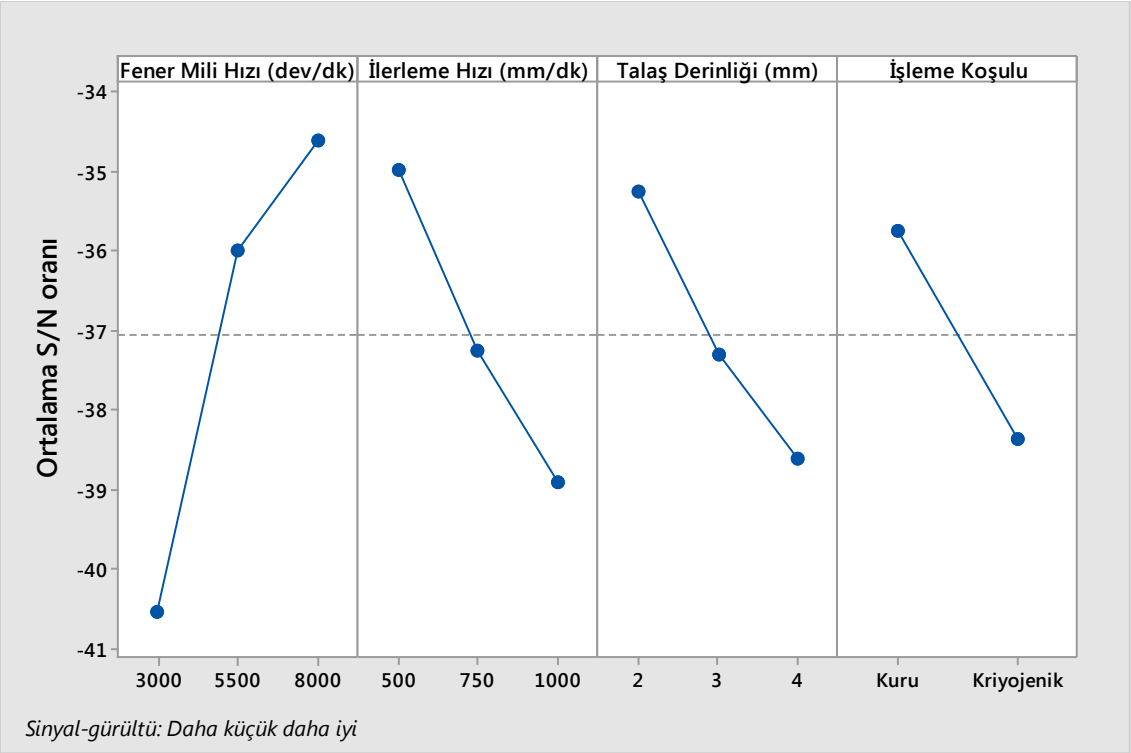
Frezeleme Parametreleri	Ortalama S/N Oranı (dB)			Sıralama	Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
Fener Mili Hızı (dev/dk)	-40,55	-36,01	-34,63[a]	1	5,92
İlerleme Hızı (mm/dk)	-34,99 [a]	-37,27	-38,92	2	3,93
Talaş Derinliği (mm)	-35,25 [a]	-37,32	-38,61	3	3,36
İşleme Koşulu	-35,76 [a]	-38,37		4	2,61

[a] Optimum seviyeler

X yönündeki frezeleme kuvveti (F_x) üzerinde en etkili parametrenin fener mili hızı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Bunları sırasıyla talaş derinliği ve işleme koşulu takip etmektedir (Çizelge 7.1.).

Minimum F_x kuvveti 8000 dev/dk (Seviye 3) fener mili hızında, 500 mm/dk (Seviye 1) ilerleme hızında, 2 mm (Seviye 1) talaş derinliğinde ve kuru kesme şartlarında (Seviye 1) elde edilmiştir ($A_3B_1C_1D_1$).

Şekil 7.1.'de farklı kesme parametreleri ve işleme şartlarıyla CFRP malzemenin frezelenmesiyle oluşan x yönündeki frezeleme kuvveti için S/N grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) kuvvet değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı artmasıyla, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin azalmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum kuvvetin azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.1. Frezeleme parametrelerinin x yönündeki frezeleme kuvvetine (F_x) etkisini gösteren S/N grafiği

Taguchi optimizasyon yöntemi ile F_x için yapılan tahmini model, 8000 dev/dk fener mili hızında (Seviye 3), 500 mm/dk ilerleme hızında (Seviye 1), 2 mm talaş derinliğinde (Seviye 1) ve kuru kesme şartlarında (Seviye 1) ($A_3B_1C_1D_1$) F_x için optimal değerlere ulaşılabileceğini ortaya koymuştur. F_x için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları Çizelge 7.2.'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. X yönündeki frezeleme kuvveti (F_x) için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

	Optimum seviyeler	F_x (N)	S/N oranı
Tahmin	$A_3B_1C_1D_1$	29.65	-29.4426
Deneysel sonuç	$A_3B_1C_1D_1$	30.54	-29.6973
Doğrulama deneyi	$A_3B_1C_1D_1$	31.17	-29.8747

Y yönündeki frezeleme kuvveti (F_y) üzerinde en etkili parametrenin talaş derinliği olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise işleme koşuludur. Bunları sırasıyla ilerleme hızı ve fener mili hızı takip etmektedir (Çizelge 7.3.).

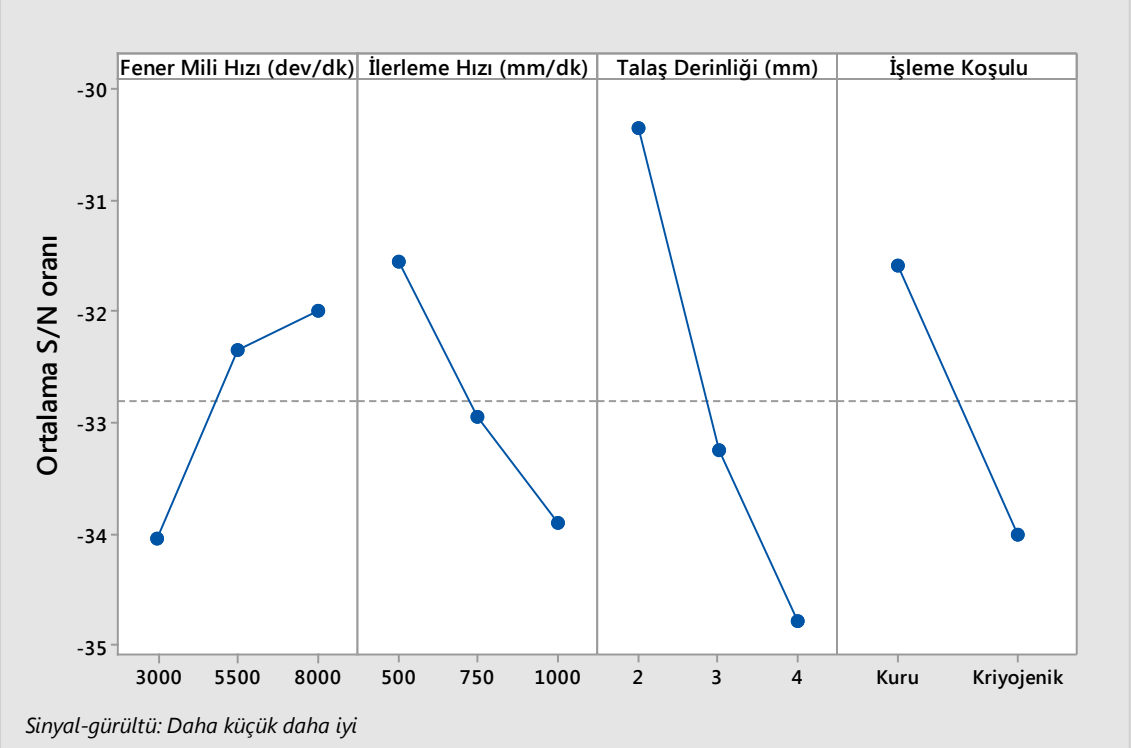
Minimum F_y kuvveti 8000 dev/dk (Seviye 3) fener mili hızında, 500 mm/dk (Seviye 1) ilerleme hızında, 2 mm (Seviye 1) talaş derinliğinde ve kuru kesme şartlarında (Seviye 1) elde edilmiştir ($A_3B_1C_1D_1$).

Çizelge 7.3. Y yönündeki frezeleme kuvveti (F_y) için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Frezeleme Parametreleri	Ortalama S/N Oranı (dB)			Sıralama	Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
Fener Mili Hızı (dev/dk)	-34,04	-32,36	-32,00 [a]	4	2,04
İlerleme Hızı (mm/dk)	-31,56 [a]	-32,94	-33,90	3	2,35
Talaş Derinliği (mm)	-30,36 [a]	-33,26	-34,79	1	4,43
İşleme Koşulu	-31,59 [a]	-34,01		2	2,41

[a] Optimum seviyeler

Şekil 7.2.'de farklı kesme parametreleri ve işleme şartlarında CFRP malzemenin frezelenmesiyle oluşan y yönündeki frezeleme kuvveti için S/N grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) kuvvet değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı artmasıyla, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin azalmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum kuvvetin azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.2. Frezeleme parametrelerinin y yönündeki frezeleme kuvvetine (F_y) etkisini gösteren S/N grafiği

Taguchi optimizasyon yöntemi ile F_y için yapılan tahmini model, 8000 dev/dk fener mili hızında (Seviye 3), 500 mm/dk ilerleme hızında (Seviye 1), 2 mm talaş derinliğinde (Seviye 1) ve kuru kesme şartlarında (Seviye 1) ($A_3B_1C_1D_1$) F_y için optimal

değerlere ulaşılabileceğini ortaya koymuştur. F_y için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları Çizelge 7.4.'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Y yönündeki frezeleme kuvveti (F_y) için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

	Optimum seviyeler	F_y (N)	S/N oranı
Tahmin	$A_3B_1C_1D_1$	22.66	-27.1068
Deneysel sonuç	$A_3B_1C_1D_1$	20.86	-26.3862
Doğrulama deneyi	$A_3B_1C_1D_1$	21.09	-26.4815

Z yönündeki frezeleme kuvveti (F_z) üzerinde en etkili parametrenin talaş derinliği olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Bunları sırasıyla fener mili hızı ve işleme koşulu takip etmektedir (Çizelge 7.5.).

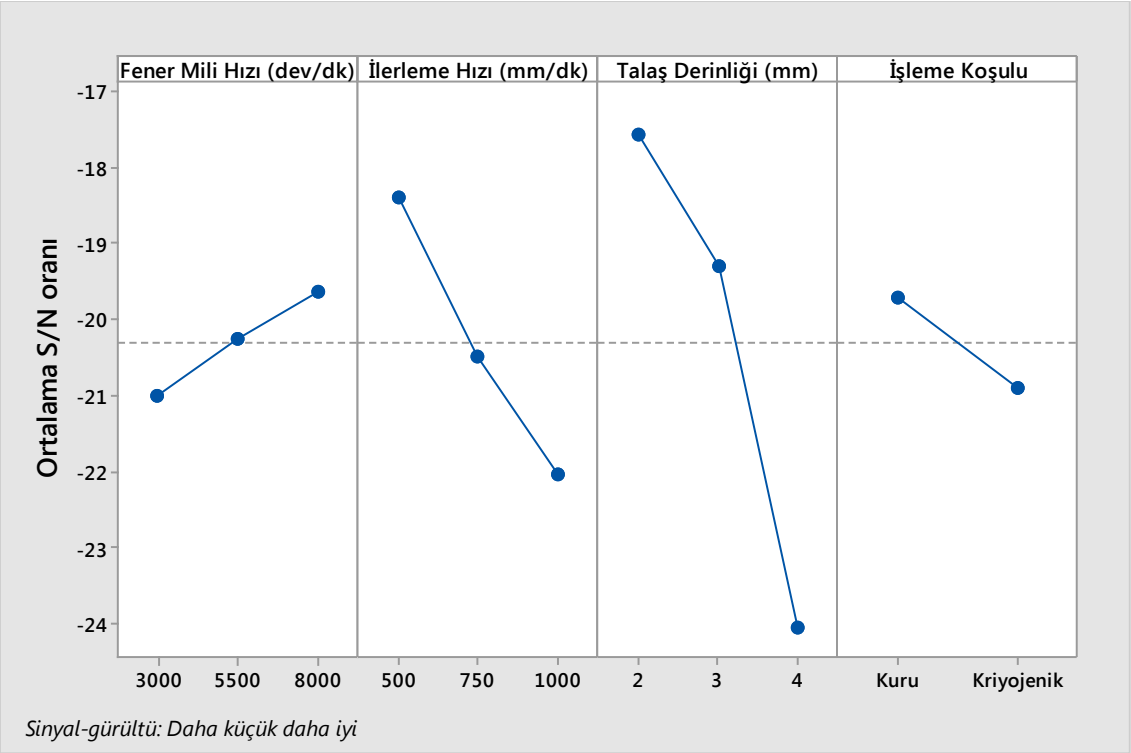
Minimum F_z kuvveti 8000 dev/dk (Seviye 3) fener mili hızında, 500 mm/dk (Seviye 1) ilerleme hızında, 2 mm (Seviye 1) talaş derinliğinde ve kuru kesme şartlarında (Seviye 1) elde edilmiştir ($A_3B_1C_1D_1$).

Çizelge 7.5. Z yönündeki frezeleme kuvveti (F_z) için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Frezeleme Parametreleri	Ortalama S/N Oranı (dB)			Sıralama	Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
Fener Mili Hızı (dev/dk)	-21,02	-20,26	-19,65 [a]	3	1,37
İlerleme Hızı (mm/dk)	-18,38 [a]	-20,50	-22,04	2	3,66
Talaş Derinliği (mm)	-17,56 [a]	-19,30	-24,06	1	6,50
İşleme Koşulu	-19,71 [a]	-20,90		4	1,19

[a] Optimum seviyeler

Şekil 7.3.'te farklı kesme parametreleri ve işleme şartlarıyla CFRP malzemenin frezelenmesiyle oluşan z yönündeki frezeleme kuvveti için S/N grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) kuvvet değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı artmasıyla, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin azalmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum kuvvetin azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.3. Frezeleme parametrelerinin z yönündeki frezeleme kuvvetine (F_z) etkisini gösteren S/N grafiği

Taguchi optimizasyon yöntemi ile F_z için yapılan tahmini model, 8000 dev/dk fener mili hızında (Seviye 3), 500 mm/dk ilerleme hızında (Seviye 1), 2 mm talaş derinliğinde (Seviye 1) ve kuru kesme şartlarında (Seviye 1) ($A_3B_1C_1D_1$) F_z için optimal değerlere ulaşılabileceğini ortaya koymuştur. F_z için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları Çizelge 7.6.'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Z yönündeki frezeleme kuvveti (F_z) için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

	Optimum seviyeler	F_z (N)	S/N oranı
Tahmin	$A_3B_1C_1D_1$	5.23	-14.3761
Deneysel sonuç	$A_3B_1C_1D_1$	6.1	-15.7137
Doğrulama deneyi	$A_3B_1C_1D_1$	6.32	-16.0143

7.1.2. Frezeleme kuvvetleri için Varyans analizi

CFRP malzemenin frezelenmesinde dört farklı faktör ve farklı seviye kullanılarak yapılan deneylerin her birinden farklı kuvvet değerleri ölçülmüştür. Bu farklılıkların tamamen tesadüf mü yoksa, farklı deney parametrelerinden mi kaynaklandığını ve her bir parametrenin bu sonuca etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Minitab paket programı yardımıyla oluşturulan varyans analizi tablosundaki P değeri 0.05'den (% 95 önem seviyesinde) küçükse, en az bir grup ortalaması farklıdır ve gruplar arasında farklılık vardır. Tablo değeri, deneysel veriden

hesaplanan F değerinden daha küçükse grup ortalamaları farklı olduğu sonucu çıkarılır. Yüzde dağılım ise araştırılan yanıt üzerinde proses parametrelerinin önemini vermektedir.

Frezeleme kuvvetleri için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 7.7., 7.8. ve 7.9.'da verilmiştir. Fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, ve işleme koşulu faktörleri x yönündeki frezeleme kuvveti (F_x) üzerinde önemli etkiye sahiptir ($P<0.05$). Çizelge 7.7' de görüldüğü gibi fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve işleme koşulunun x yönündeki frezeleme kuvvetine etkileri sırasıyla % 49.45, % 18.42, % 10.94 ve % 8.97' dir.

Çizelge 7.7. X yönünde oluşan frezeleme kuvveti (F_x) için varyans analizi sonucu

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F Değeri	P Değeri	% Dağılım
Fener mili hızı	2	33775	16887.3	93.22	0.000	49.45
İlerleme hızı	2	12583	6291.4	34.73	0.000	18.42
Talaş derinliği	2	7476	3738.2	20.63	0.000	10.94
İşleme koşulu	1	6130	6130.4	33.84	0.000	8.97
Hata	46	8333	181.2		-	12.2
Toplam	53	68298	-		-	

Y yönünde oluşan frezeleme kuvveti (F_y) için varyans analizi sonucu incelendiğinde fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, ve işleme koşulu faktörlerinin F_y üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir ($P<0.05$). Çizelge 7.8' te görüldüğü gibi fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve işleme koşulunun y yönündeki frezeleme kuvvetine etkileri sırasıyla % 12.87, % 12.93, % 38.83 ve % 18.08' dir.

Çizelge 7.8. Y yönünde oluşan frezeleme kuvveti (F_y) için varyans analizi sonucu

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F Değeri	P Değeri	% Dağılım
Fener mili hızı	2	1398	698.75	17.14	0.000	12.87
İlerleme hızı	2	1405	702.69	17.24	0.000	12.93
Talaş derinliği	2	4218	2108.97	51.74	0.000	38.83
İşleme koşulu	1	1964	1963.85	48.18	0.000	18.08
Hata	46	1875	4.76		0.000	17.26
Toplam	53	10860				

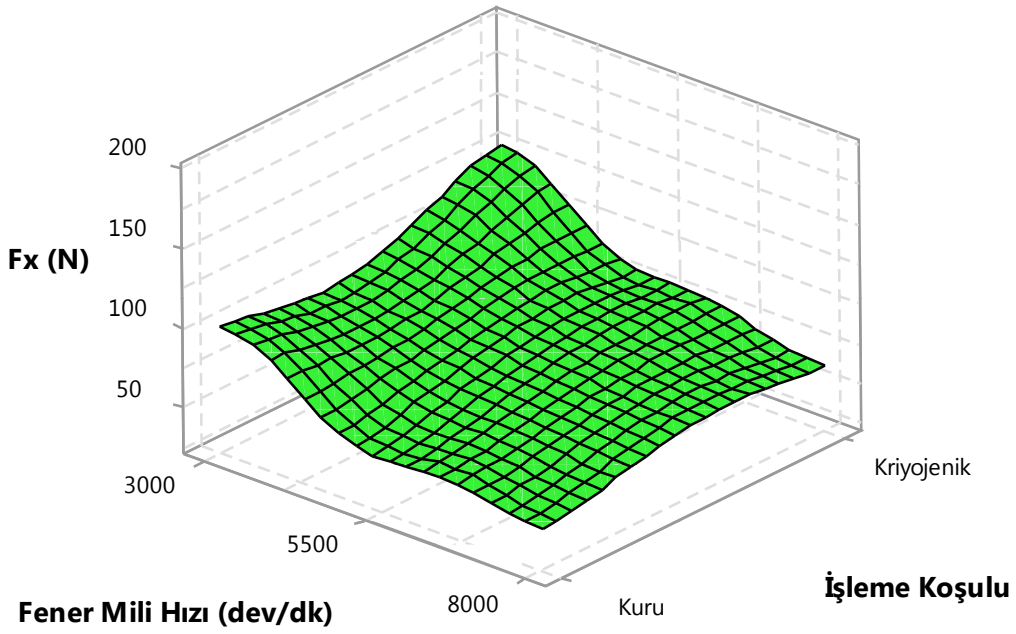
Z yönünde oluşan frezeleme kuvveti (F_z) için varyans analizi sonucu incelendiğinde ilerleme hızı, talaş derinliği, ve işleme koşulu faktörlerinin F_z üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ancak fener mili hızının kayda değer bir etkisi olmadığı görülmektedir ($P<0.05$). Çizelge 7.9' da görüldüğü gibi ilerleme hızı, talaş derinliği ve işleme koşulunun z yönündeki frezeleme kuvvetine etkileri sırasıyla % 11.03, % 21.35 ve % 3.38' dir.

Çizelge 7.9. Z yönünde oluşan frezeleme kuvveti (F_z) için varyans analizi sonucu

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F Değeri	P Değeri	% Dağılım
Fener mili hızı	2	52.16	26.082	2.93	0.064	3.86
İlerleme hızı	2	149.02	74.508	8.36	0.001	11.03
Talaş derinliği	2	693.39	346.696	38.91	0.000	21.35
İşleme koşulu	1	45.77	45.772	5.14	0.028	3.38
Hata	46	409.86	8.910		-	30.35
Toplam	53	1350.20			-	

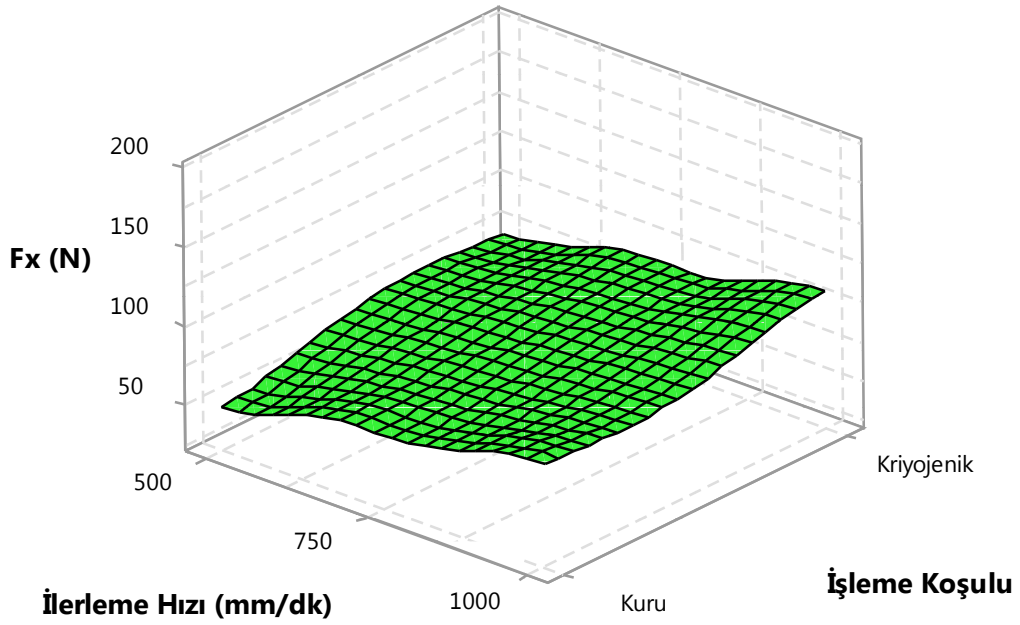
7.1.3. Frezeleme kuvvetleri için oluşturulan grafikler

Frezeleme kuvvetleri için üç boyutlu yüzey grafikleri oluşturularak kesme parametrelerinin oluşan kuvvetlere etkilerinin daha net bir şekilde görülmesi sağlanmıştır. Fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve işleme koşulunun x yönündeki frezeleme kuvvetine (F_x) etkisini gösteren grafikler Şekil 7.4., 7.5. ve 7.6.'da verilmiştir. Ayrıca giriş parametrelerinin y yönündeki frezeleme kuvvetine (F_y) olan etkisini gösteren grafikler EK-4'de, z yönündeki frezeleme kuvvetine (F_z) olan etkisini gösteren grafikler ise EK-5'te verilmiştir.



Şekil 7.4. İşleme koşulu ve fener mili hızına bağlı olarak x yönündeki frezeleme kuvvetinin (F_x) değişim grafiği

Şekil 7.4.'te görüldüğü üzere fener mili hızı arttıkça F_x azalma eğilimindedir. Kuru koşulda, 3000 dev/dk fener mili hızında yapılan tüm deneylerden ölçülen F_x kuvvetlerinin ortalama değeri 100.07 N iken bu değer 5500 dev/dk için 54.65 N ve 8000 dev/dk için 48.10 N olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise 3000 dev/dk için ortama kuvvet 125.98 N, 5500 dev/dk için 78.42 N ve 8000 dev/dk için 62.35 N olarak ölçülmüştür. Daha önceki çalışmalarda fener mili hızının artmasıyla frezeleme kuvvetlerindeki düşüşün sebebi kesme hızındaki artışa bağlı olarak talaş-takım temas uzunluğunun azalması yani birim zamanda kesici takımın kaldırdığı talaş miktarının düşmesi olarak açıklanmıştır. Ayrıca kesme hızına bağlı olarak talaş kaldırma bölgesinin sıcaklığının artması sonucunda talaş-takım yüzeyindeki akma bölgesinde yapışan malzemenin kayma dayanımının düşmesinden de kaynaklandığı vurgulanmıştır (Taşlıyan ve ark., 2007; Ulaş ve ark., 2016).

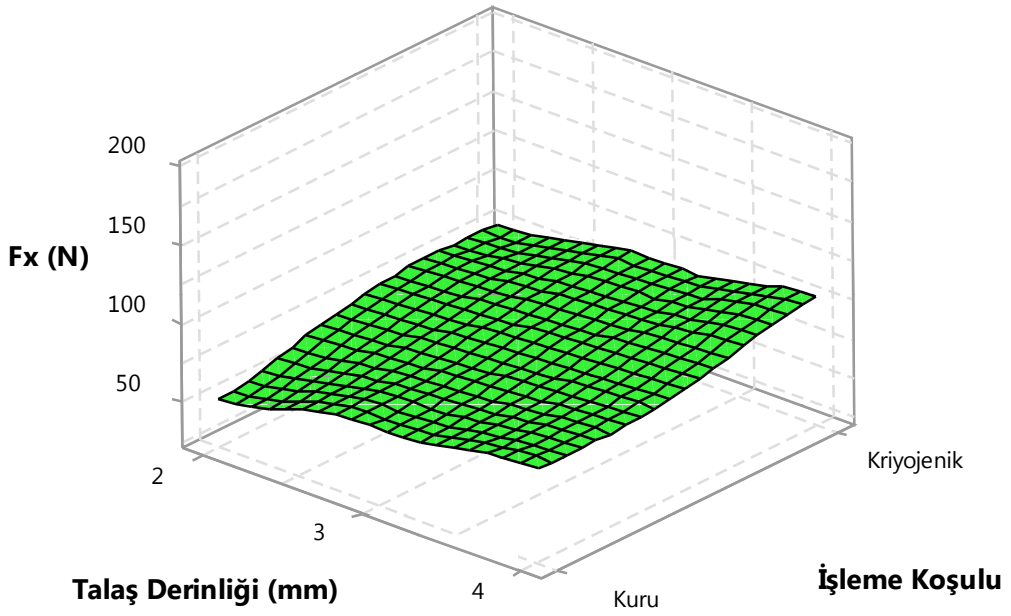


Şekil 7.5. İşleme koşulu ve ilerleme hızına bağlı olarak x yönündeki frezeleme kuvvetinin (F_x) değişim grafiği

Şekil 7.5. incelendiğinde F_x kuvvetinin, ilerleme hızı arttıkça hemen hemen lineer bir şekilde arttığı görülmektedir. Kuru koşulda, 500 mm/dk ilerleme hızında yapılan tüm deneylerden ölçülen F_x'in ortama değeri 48.89 N, bu değer 750 mm/dk ilerleme hızı için 67.89 N ve 1000 mm/dk ilerleme hızı için 86.04 N olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise 500 mm/dk ilerleme hızı için 70.27 N, 750 mm/dk için 88.57 N ve 1000 mm/dk için 107.91 N olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar literatürdeki önceki çalışmalar ile benzerlik göstermektedir (Sorrentino ve Turchetta, 2011; Shahrajabian ve Farahnakian, 2015). Önceki çalışmalarda ilerleme hızına bağlı olarak frezeleme kuvvetlerindeki artışın bu sebebi ise ilerleme hızının artmasıyla kesici takımın birim zamanda kaldıracağı talaş miktarının da artmasından dolayı olduğu belirtilmiştir (Ravi ve Kumar, 2012).

Şekil 7.6. incelendiğinde talaş derinliğinin artmasıyla F_x kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Birim zamanda kaldırılacak talaş miktarı arttıkça kuvvetin de artması beklenen bir sonuçtur. Kuru koşulda 2 mm talaş kaldırılarak yapılan tüm deneylerden ölçülen F_x kuvvetlerinin ortalaması 51.89 N, 3 mm talaş derinliği kaldırıldığında ortalama 69.67 N ve 4 mm talaş kaldırıldığında 81.25 N olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise bu değerler 2 mm talaş derinliği için 74.76 N, 3 mm talaş derinliği için 89.08 N ve 4 mm talaş derinliği için 102.91 N olarak ölçülmüştür. Talaş derinliğinin

artmasıyla kuvvetlerin de artması literatürdeki önceki çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir (Sorrentino ve Turchetta, 2011).



Şekil 7.6. İşleme koşulu ve talaş derinliğine bağlı olarak x yönündeki frezeleme kuvvetinin (F_x) değişim grafiği

Şekil 7.4., 7.5. ve 7.6. incelendiğinde kriyojenik şartlarda ölçülen kuvvet değerleri aynı kesme parametrelerinde kuru ortamda ölçülen değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Xia ve ark. (2016) CFRP malzemenin kesme bölgesine kriyojenik (LN_2) püskürtülerek delinmesi çalışmasını yürütürken benzer bir sonuçla karşılaşmışlardır. Araştırmacılar bunun sebebini malzemenin düşük sıcaklıklarda deformasyona karşı daha fazla direnç göstermesine bağlamışlardır. Daha önceki çalışmalarda karbon fiber takviyeli plastiklerin sıcaklıkları azaldıkça Young modülü ve çekme mukavemetinin arttığı belirtilmiştir. Mekanik özelliklerde oluşan bu değişim frezeleme kuvvetlerini artırmaktadır. Ayrıca kuru koşullarda elde edilen işleme kuvvetlerinin kriyojenik koşullara göre daha düşük olmasının bir diğer sebebi ise kuru işleme koşulunda işleme bölgesinde oluşan sıcaklığın matrisi (epoksi reçine) yumuşatması dolayısıyla malzemenin yumuşamasından kaynaklandığı vurgulanmıştır (Ishida ve ark., 2014; Xia ve ark., 2016).

7.2.Delaminasyon Analizi

İşlenen her bir kanal için üç farklı yerden (giriş, orta, çıkış) ölçüm alınmış delaminasyon faktörü denklem 4.28'e göre hesaplanmıştır. Daha sonra bu üç delaminasyon faktörünün ortalaması alınmıştır.

7.2.1. Delaminasyon faktörü için Taguchi analizi

Yapılan analizden elde edilen delaminasyon faktörüne ait S/N değerleri Çizelge 7.9.'da verilmiştir.

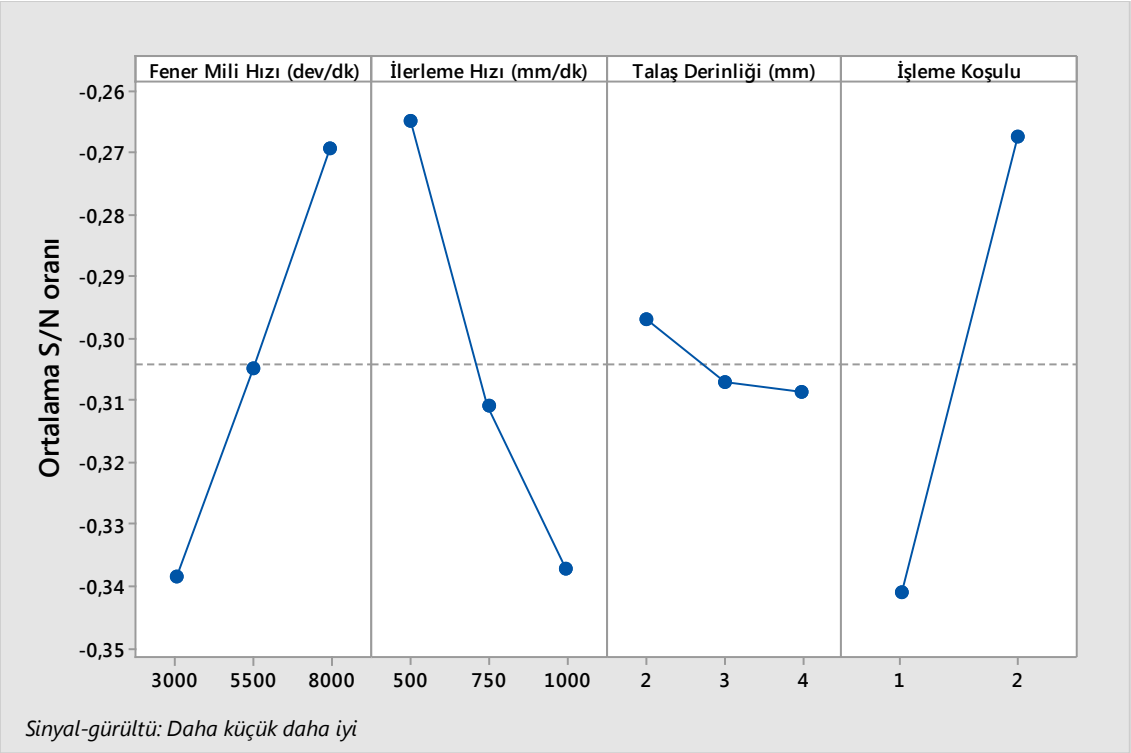
Çizelge 7.9. Delaminasyon faktörü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Frezeleme Parametreleri	Ortalama S/N Oranı (dB)			Sıralama	Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
Fener Mili Hızı (dev/dk)	-0.3385	-0.3049	-0.2693[a]	3	0.0692
İlerleme Hızı (mm/dk)	-0.2648[a]	-0.3108	-0.3372	2	0.0724
Talaş Derinliği (mm)	-0.2970[a]	-0.3070	-0.3088	4	0.0118
İşleme Koşulu	-0.3409	-0.2676 [a]		1	0.0733

[a] Optimum seviyeler

Delaminasyon faktörü üzerinde en etkili parametrenin işleme koşulu olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Bunları sırasıyla fener mili hızı ve talaş derinliği takip etmektedir. En düşük delaminasyon faktörü 8000 dev/dk (Seviye 3) fener mili hızında, 500 mm/dk (Seviye 1) ilerleme hızında, 2 mm (Seviye 1) talaş derinliğinde ve kriyojenik kesme şartlarında (Seviye 2) elde edilmiştir ($A_3B_1C_1D_2$).

Şekil 7.7.'de farklı kesme parametreleri ve işleme şartlarında frezelenen CFRP malzemede oluşan delaminasyon faktörü için S/N grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) delaminasyon faktörü değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı artmasıyla, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin azalmasıyla ve kuru işlemeden kriyojenik işlemeye geçildiğinde S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum delaminasyon faktörünün azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.7. Frezeleme parametrelerinin delaminasyon faktörüne olan etkisini gösteren S/N grafiği

Taguchi optimizasyon yöntemi ile delaminasyon faktörü için yapılan tahmini model, 8000 dev/dk fener mili hızında (Seviye 3), 500 mm/dk ilerleme hızında (Seviye 1), 2 mm talaş derinliğinde (Seviye 1) ve kriyojenik kesme şartlarında (Seviye 2) değerlerinde ($A_3B_1C_1D_2$) delaminasyon faktörü için optimal değerlere ulaşılabileceğini ortaya koymuştur. Delaminasyon faktörü için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları Çizelge 7.10.'da verilmiştir.

Çizelge 7.10. Delaminasyon faktörü için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

	Optimum seviyeler	Delaminasyon Faktörü	S/N oranı
Tahmin	$A_3B_1C_1D_2$	1.021642	-0.185982
Deneysel sonuç	$A_3B_1C_1D_2$	1.023837	-0.204616
Doğrulama deneyi	$A_3B_1C_1D_2$	1.023215	-0.199337

7.2.2. Delaminasyon faktörü için Varyans analizi

Delaminasyon faktörü için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 7.11.'de verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre fener mili hızı, ileleme hızı ve işleme koşulu faktörleri delaminasyon faktörü üzerinde önemli bir etkiye sahipken ($P<0.05$) talaş derinliği parametresi delaminasyon faktörü üzerinde kayda değer bir etkiye sahip

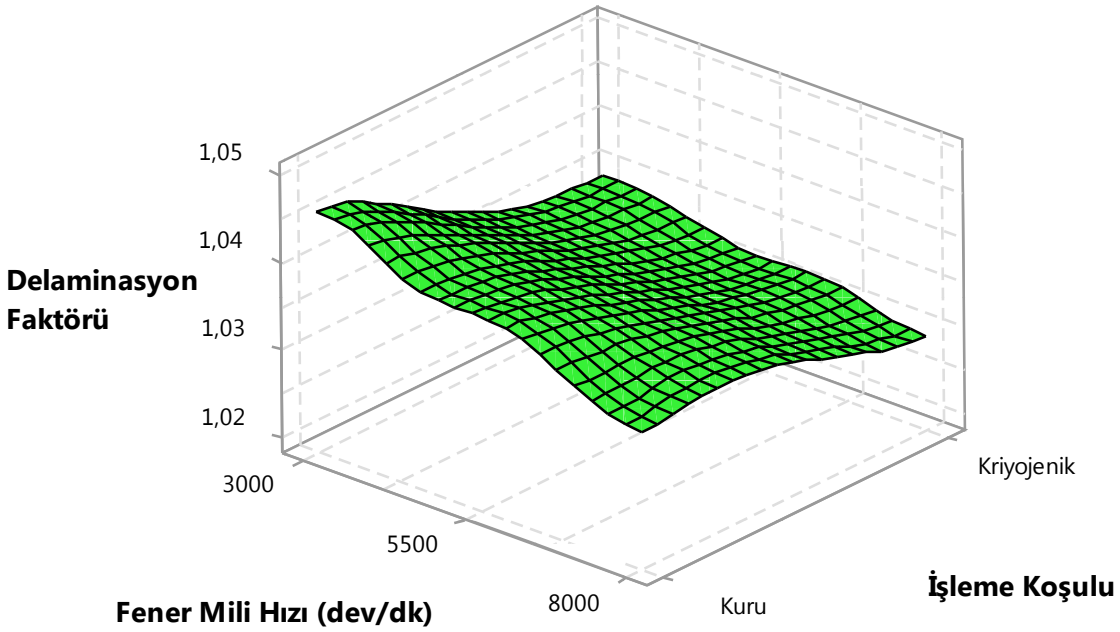
değildir (P>0.05). Çizelgeden de görüldüğü gibi fener mili hızı, ilerleme hızı ve işleme koşulunun delaminasyon faktörüne etkileri sırasıyla % 20.8, % 23.17 ve % 35.08' dir.

Çizelge 7.11. Delaminasyon faktörü için varyans analizi sonucu

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F Değeri	P Değeri	% Dağılım
Fener mili hızı	2	0.000613	0.000307	23.66	0.000	20.80
İlerleme hızı	2	0.000683	0.000342	26.37	0.000	23.17
Talaş derinliği	2	0.000020	0.000010	0.77	0.468	0.67
İşleme koşulu	1	0.001034	0.001034	79.80	0.000	35.08
Hata	46	0.000596	0.000013	-	-	20.22
Toplam	53	0.002947	-	-	-	100

7.2.3. Delaminasyon faktörü için oluşturulan grafikler

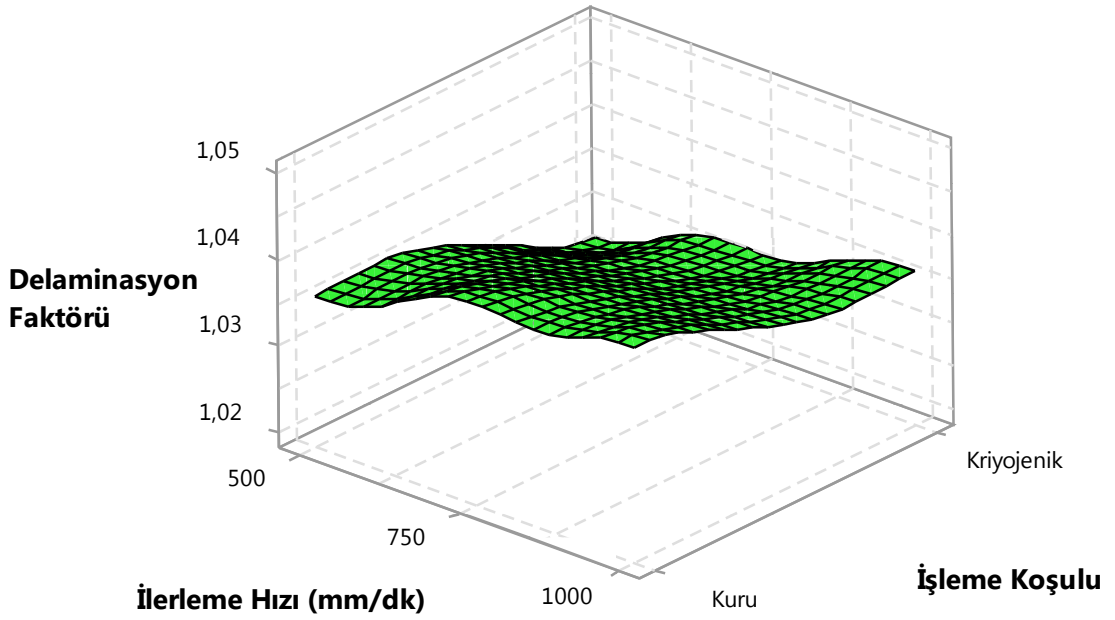
Kesme parametreleri ve kesme koşullarının delaminasyon faktörü üzerine etkileri Şekil 7.8., 7.9. ve 7.10.'daki grafikler yardımıyla daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 7.8. İşleme koşulu ve fener mili hızına bağlı olarak delaminasyon faktörünün değişim grafiği

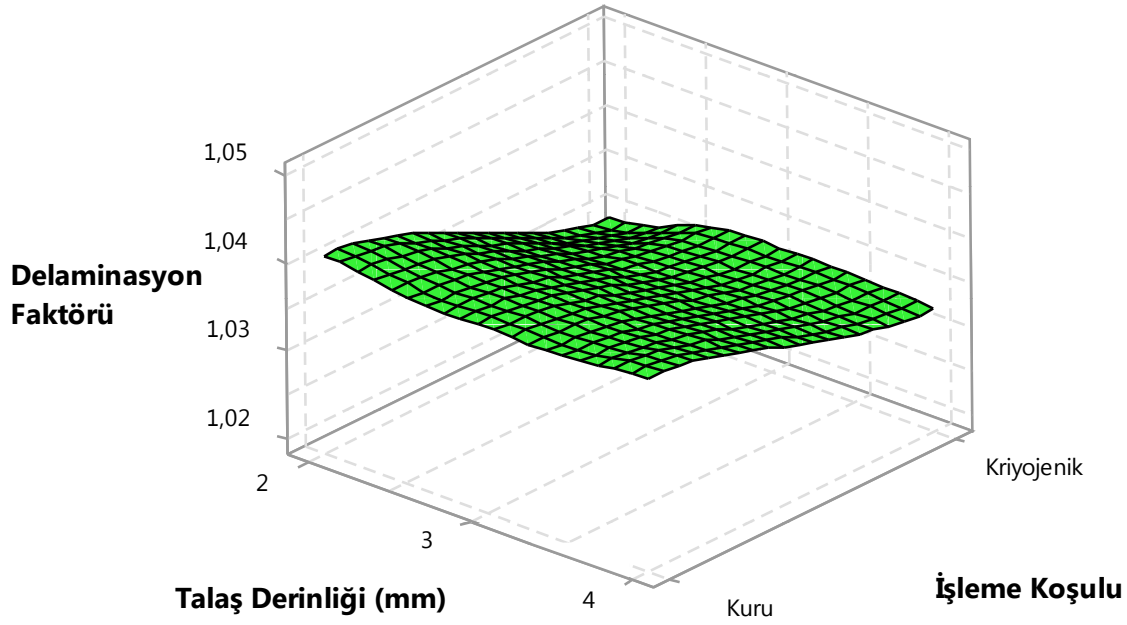
Şekil 7.8.'de görüldüğü üzere fener mili hızının artmasıyla delaminasyon faktöründe azalma olmuştur. Kuru koşulda, 3000 dev/dk fener mili hızında yapılan tüm deneylerden ölçülen ortalama delaminasyon faktörü 1.04568, 5500 dev/dk için 1.04041 ve 8000 dev/dk için ise 1.03406 olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda bu değerler 3000 dev/dk fener mili hızı için 1.03385, 5500 dev/dk için 1.03108 ve 8000 dev/dk için

1.02896 olarak ölçülmüştür. CFRP plaka frezelenirken, frezeleme kuvvetinin eksenel bileşeni (plakaların istiflenme yönüne dik) en üst ve en alt lamineleri plakadan ayırma eğilimindedir. En alt ve en üst tabakanın tek taraflı desteklenmesi bu olumsuzluğa sebep olmaktadır. En alt tabaka bir üst tabaka tarafından desteklenirken, en üst tabaka ise bir alt tabaka tarafından desteklenmektedir. Ayrıca frezelemede üst tabakada delaminasyon daha yaygın görülmektedir. Dolayısıyla işleme kuvvetleri arttıkça delaminasyon oluşumu artmaktadır (Hintze ve ark., 2011; Sheikh-Ahmad ve ark., 2012; Karpat ve Polat, 2013).



Şekil 7.9. İşleme koşulu ve ilerleme hızına bağlı olarak delaminasyon faktörünün değişim grafiği

Şekil 7.9. incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça delaminasyon faktörünün de arttığı görülmektedir. Kuru koşulda, 500 mm/dk ilerleme hızında yapılan tüm deneylerden ölçülen delaminasyon faktörünün ortalama değeri 1.03553, 750 mm/dk için ortalama bu değer 1.04141 ve 1000 mm/dk için ise 1.04321 olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise delaminasyon faktörü 500 mm/dk için ortalama 1.02642, 750 mm/dk ilerleme hızı için ortalama 1.03150 ve 1000 mm/dk için ise ortalama 1.03597 olarak ölçülmüştür. CFRP malzemenin kuru ortamda frezelenmesinde ilerleme hızının artmasıyla delaminasyonun da arttığı daha önceki çalışmalarda rapor edilmiştir (Davim ve Reis, 2005; Sheikh-Ahmad ve ark., 2012).



Şekil 7.10. İşleme koşulu ve talaş derinliğine bağlı olarak delaminasyon faktörünün değişim grafiği

Şekil 7.10. incelendiğinde talaş derinliğinin artmasıyla delaminasyon faktöründe bir artış görülmemektedir. Kuru koşulda, 2 mm talaş kaldırılarak yapılan deneylerden ölçülen ortalama delaminasyon faktörü değeri 1.04067, 3 mm talaş derinliği için bu değer 1.03930 ve 4 mm talaş derinliği için ise 1.04018 olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise ortalama delaminasyon faktörü değerleri 2 mm talaş derinliği için 1.0289, 3 mm talaş derinliği için 1.03267 ve 4 mm talaş derinliği için 1.03225 olarak ölçülmüştür. Delaminasyon faktörü için yapılan varyans analizine göre (Çizelge 8.5.) talaş derinliği değeri delaminasyon faktörü için anlamsızdır. Bu durum grafiğe de yansımıştır.

Delaminasyon için oluşturulan tüm grafiklerde (Şekil 7.8., 7.9. ve 7.10.) kriyojenik koşulda yapılan işleme delaminasyon açısından kuru koşulda yapılan işlemeye göre daha iyi sonuçlar vermiştir. CFRP malzemeler frezelenirken kesme bölgesinde yaklaşık 400 °C sıcaklık oluşmaktadır. Epoksi reçinenin (matris) yaklaşık camsı geçiş sıcaklığı ise 200 °C dolaylarındadır. Dolayısıyla işleme anında matris yumuşayarak fiberleri bir arada tutmak ve malzemeye gelen kuvveti fiberlere düzgünce dağıtmak olan görevini yapamaz hale gelmektedir (Jia ve ark., 2016). Matristeki bu bozulma ile lamineler arası mukavemet azalmakta ve bu durum ise delaminasyon oluşumuna sebep olmaktadır.

7.3. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

Her bir kanal için üç farklı yerden (giriş, orta, çıkış) yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve bu üç ölçümün ortalaması alınarak o kanalın yüzey pürüzlüğü için nihai değer belirlenmiştir.

7.3.1. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi analizi

Yüzey pürüzlülüğü için yapılan Taguchi analiz sonuçları Çizelge 7.12.'de gösterilmiştir.

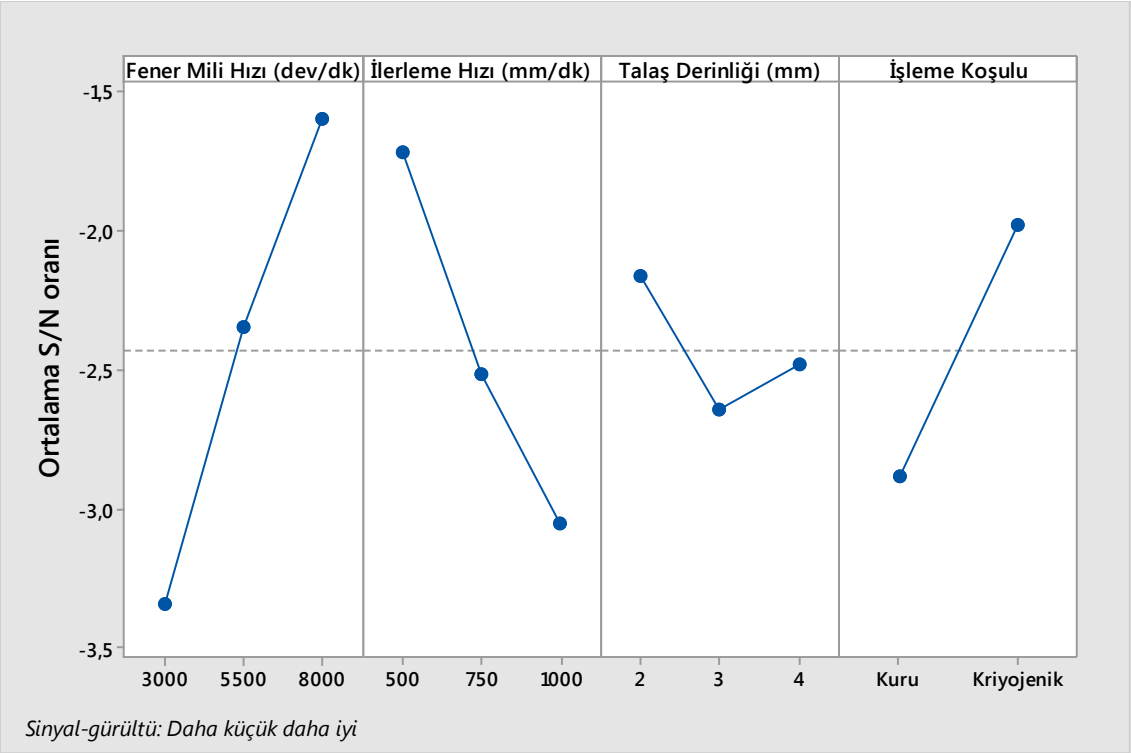
Çizelge 7.12. Yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Frezeleme Parametreleri	Ortalama S/N Oranı (dB)			Sıralama	Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
Fener Mili Hızı (dev/dk)	-3.343	-2.351	-1.596 [a]	1	1.747
İlerleme Hızı (mm/dk)	-1.720 [a]	-2.517	-3.052	2	1.332
Talaş Derinliği (mm)	-2.161 [a]	-2.646	-2.483	4	0.485
İşleme Koşulu	-2.882	-1.978 [a]		3	0.904

[a] Optimum seviyeler

Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin fener mili hızı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Bunları sırasıyla işleme koşulu ve talaş derinliği takip etmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 8000 dev/dk (Seviye 3) fener mili hızında, 500 mm/dk (Seviye 1) ilerleme hızında, 2 mm (Seviye 1) talaş derinliğinde ve kriyojenik kesme şartlarında (Seviye 2) elde edilmiştir ($A_3B_1C_1D_2$).

Şekil 7.11.'de yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan S/N grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) yüzey pürüzlülüğü değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızının artmasıyla, ilerleme hızının azalmasıyla ve kuru işlemeden kriyojenik işlemeye geçildiğinde S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.11. Frezeleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini gösteren S/N grafiği

Taguchi optimizasyon yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü için yapılan tahmini model, 8000 dev/dk fener mili hızında (Seviye 3), 500 mm/dk ilerleme hızında (Seviye 1), 2 mm talaş derinliğinde (Seviye 1) ve kriyojenik kesme şartlarında (Seviye 2) değerlerinde ($A_3B_1C_1D_2$) yüzey pürüzlüğü için optimal değerlere ulaşılabileceğini ortaya koymuştur. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları Çizelge 7.13.'te verilmiştir.

Çizelge 7.13. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

	Optimum seviyeler	Yüzey Pürüzlülüğü	S/N oranı
Tahmin	$A_3B_1C_1D_2$	1.019	-0.1655
Deneysel sonuç	$A_3B_1C_1D_2$	0.968	0.2824
Doğrulama deneyi	$A_3B_1C_1D_2$	0.997	0.0260

7.3.2. Yüzey pürüzlülüğü için Varyans analizi

Yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 7.14.'te verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre fener mili hızı, ilerleme hızı ve işleme koşulu faktörleri yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahipken ($P<0.05$) talaş derinliği parametresi yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkiye sahip değildir

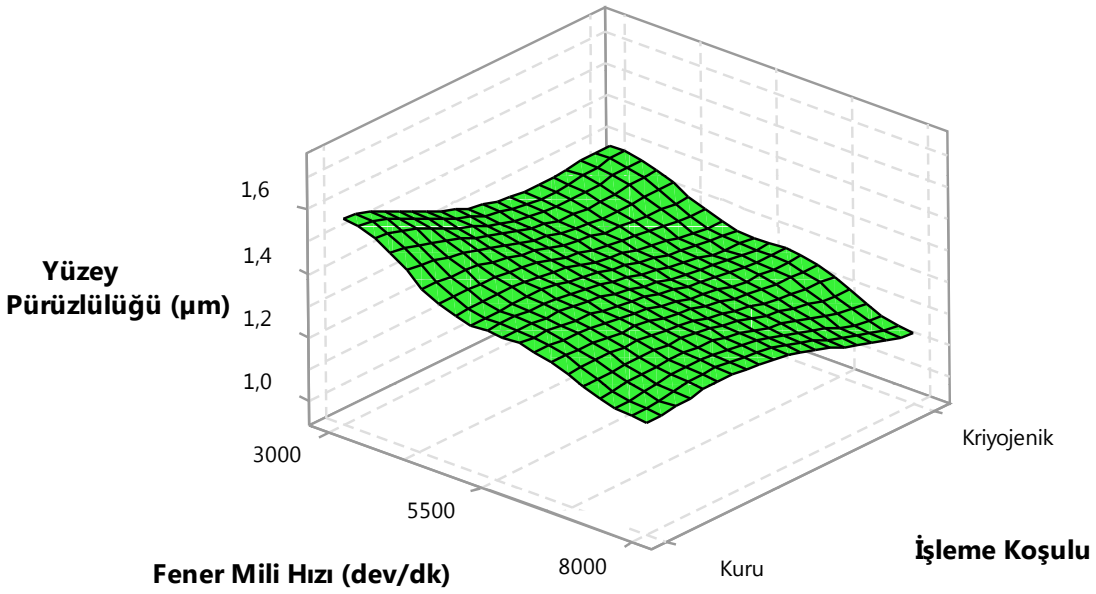
(P>0.05). Çizelgeden de görüldüğü gibi fener mili hızı, ilerleme hızı ve işleme koşulunun yüzey pürüzlülüğüne etkileri sırasıyla % 32.72, % 18.86 ve % 13.84' dür.

Çizelge 7.14. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi sonucu

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F Değeri	P Değeri	% Dağılım
Fener mili hızı	2	0.63677	0.31839	23.67	0.000	32.72
İlerleme hızı	2	0.36706	0.18353	13.65	0.000	18.86
Talaş derinliği	2	0.05397	0.02699	2.01	0.146	2.7
İşleme koşulu	1	0.26948	0.26948	20.04	0.000	13.84
Hata	46	0.61863	0.01345	-	-	31.8
Toplam	53	1.94592	-	-	-	100

7.3.3. Yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan grafikler

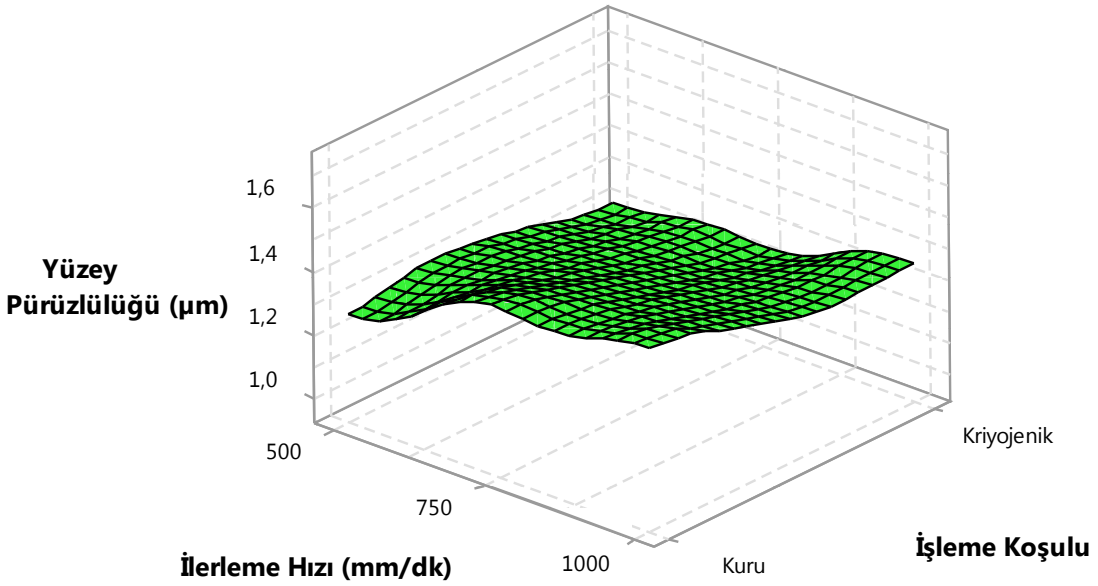
Fener mili hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve işleme koşulu parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren üç boyutlu grafikler Şekil 7.12., 7.13. ve 7.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 7.12. İşleme koşulu ve fener mili hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişim grafiği

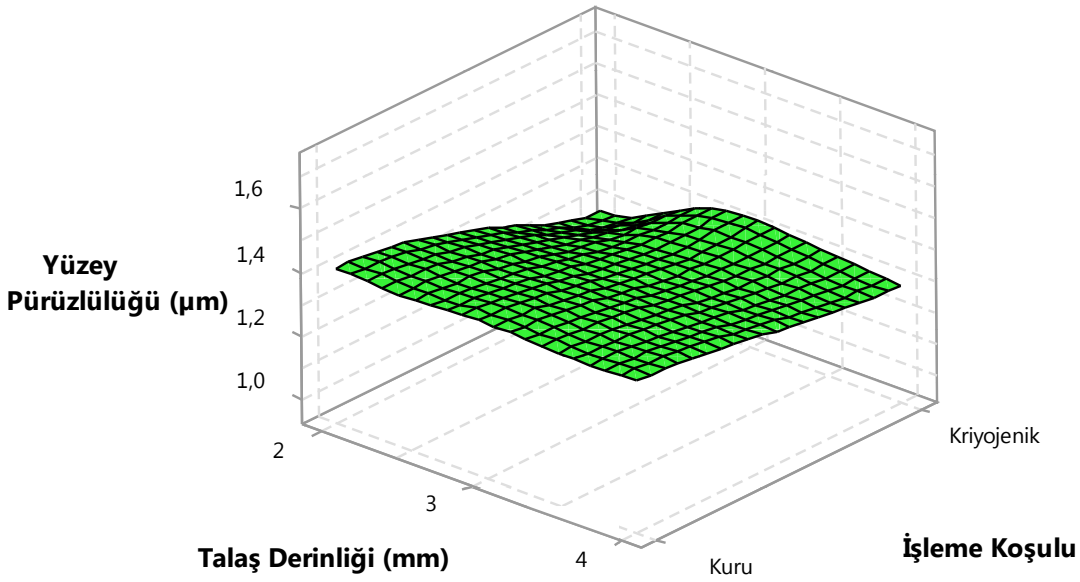
Şekil 7.12. incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü değerinin fener mili hızı arttıkça düştüğü yani yüzeyin kalitesinin arttığı görülmektedir. Kuru koşulda 3000 dev/dk fener mili hızında yapılan tüm deneylerden sonra işlenen kanallardan ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 1.5657 µm, 5500 dev/dk için bu değer ortalama 1.3795 µm ve 8000

dev/dk için ise ortalama 1.2760 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise bu değerler sırasıyla 3000 dev/dk için ortalama 1.3877 µm, 5500 dev/dk için 1.2613 µm ve 8000 dev/dk için 1.1483 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.13 İşleme koşulu ve ilerleme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişim grafiği

Şekil 7.13.'te görüldüğü üzere ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmıştır. Kuru koşulda, 500 mm/dk ilerleme hızı ile yapılan deneylerden sonra işlenen kanallardan ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri ortalama 1.2620 µm, 750 mm/dk ilerleme hızı için ortalama 1.4564 µm ve 1000 mm/dk ilerleme hızı için ortalama 1.5028 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise bu değerler sırasıyla 500 mm/dk ilerleme hızı için 1.1991 µm, 750 mm/dk ilerleme hızı için 1.2377 µm ve 1000 mm/dk için 1.3606 µm olarak ölçülmüştür. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda kesme kuvvetinin azaltılmasıyla daha pürüzsüz yüzeyler elde edilebileceği belirtilmiştir (Shahrajabian ve Farahnakian, 2015). İlerleme hızı arttıkça işleme kuvvetinin de arttığından ve talaş kaldırmanın güçleştiğinden bu çalışmada daha önce bahsedilmiştir. Bu durum ise kesme bölgesinin sıcaklığını artırmasıyla beraber kötü yüzey kalitesine (daha yüksek yüzey pürüzlülüğü) sebebiyet vermektedir (Ravi ve Kumar, 2012). Önceki çalışmalarda CFRP malzemenin kuru ortamda frezelenmesinde ilerleme hızının artması ve kesme hızının azalması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı ve yüzey kalitesinin kötüleştiği belirtilmektedir (Davim ve Reis, 2005; Sheikh-Ahmad ve ark., 2012). Bu çalışmanın sonuçları da önceki çalışmalar ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 7.14. İşleme koşulu ve talaş derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişim grafiği

Talaş derinliği parametresinin varyans analizine göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin olmadığı Çizelge 7.14.'te gösterilmiştir. Şekil 7.14.'deki grafikte de bu durum daha net görülmektedir. Kuru koşulda, 2 mm talaş kaldırılarak yapılan tüm deneyler sonrası işlenen slotlardan ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 1.4097 µm, 3 mm talaş kaldırıldığında bu değer 1.4101 µm ve 4 mm talaş kaldırıldığında ise 1.4014 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise bu değerler sırasıyla 2 mm talaş derinliği için 1.1774 µm, 3mm talaş derinliği için 1.3276 µm ve 4 mm talaş derinliği için 1.2923 µm olarak ölçülmüştür.

Şekil 7.12., 7.13. ve 7.14. incelendiğinde kriyojenik koşullarda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin çoğunlukla kuru ortamda elde edilenlere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Literatürde malzemenin sıcaklığı düştükçe malzemenin gevrekleşerek talaş kaldırmanın kolaylaştığı ve böylece daha pürüzsüz ve kaliteli yüzeylerin elde edilebildiği vurgulanmaktadır (Ravi ve Kumar, 2012).

7.4. Dalgalılık Analizi

İşlenen kanalların dalgalılık ölçümleri tıpkı delaminasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü ölçümünde olduğu gibi üç farklı yerden alınarak ortalamaları hesaplanmış ve bu değerler ile analizler yapılmıştır.

7.4.1. Dalgalılık için Taguchi analizi

Dalgalılık için Taguchi analizinden elde edilen S/N değerleri Çizelge 7.15.'te verilmiştir.

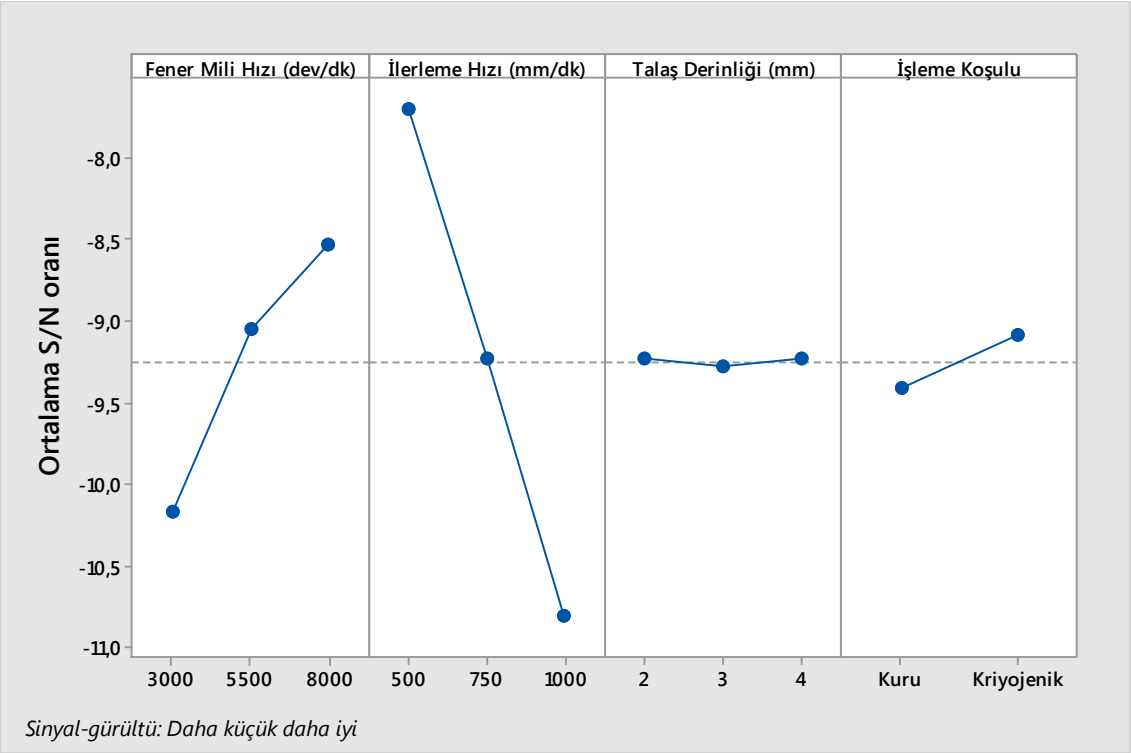
Çizelge 7.15. Dalgalılık İçin Her Bir Seviyedeki Faktörlerin Etkisi

Frezeleme Parametreleri	Ortalama S/N Oranı (dB)			Sıralama	Max-Min
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3		
Fener Mili Hızı (dev/dk)	-10.176	-9.046	-8.527 [a]	2	1.649
İlerleme Hızı (mm/dk)	-7.701 [a]	-9.234	-10.814	1	3.113
Talaş Derinliği (mm)	-9.236 [a]	-9.277	-9.236 [a]	4	0.042
İşleme Koşulu	-9.415	-9.084 [a]		3	0.332

[a] Optimum seviyeler

Dalgalılık üzerinde en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise fener mili hızıdır. Bunları sırasıyla işleme koşulu ve talaş derinliği takip etmektedir. En düşük dalgalılık değeri 8000 dev/dk (Seviye 3) fener mili hızında, 500 mm/dk (Seviye 1) ilerleme hızında, 2 mm (Seviye 1) talaş derinliğinde ve kriyojenik kesme şartlarında (Seviye 2) elde edilmiştir ($A_3B_1C_1D_2$). 4 mm talaş derinliği için bulunan S/N oranı 2 mm talaş derinliği için bulunan S/N oranı ile aynıdır. Sonuçlara göre talaş derinliği dalgalılık üzerinde etkisi en zayıf olan parametredir. Optimum talaş derinliği parametresi 2 mm (Seviye 1) olarak kabul edilmiştir.

Şekil 7.15.'de dalgalılık için oluşturulan S/N grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) dalgalılık değerlerini vermektedir. Grafik incelendiğinde fener mili hızının artmasıyla, ilerleme hızının azalmasıyla ve kuru işlemeden kriyojenik işlemeye geçildiğinde S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum dalgalılığın azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 7.15. Frezeleme parametrelerinin dalgalılığa olan etkisini gösteren S/N grafiği

Taguchi optimizasyon yöntemi ile dalgalılık için yapılan tahmini model, 8000 dev/dk fener mili hızında (Seviye 3), 500 mm/dk ilerleme hızında (Seviye 1), 2 mm talaş derinliğinde (Seviye 1) ve kriyojenik kesme şartları (Seviye 2) değerlerinde ($A_3B_1C_1D_2$) dalgalılık için optimal değerlere ulaşılabileceğini ortaya koymuştur. Dalgalılık için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları Çizelge 7.16.'da verilmiştir.

Çizelge 7.16. Dalgalılık için yapılan tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

	Optimum seviyeler	Dalgalılık	S/N oranı
Tahmin	$A_3B_1C_1D_2$	2.187	-6.7988
Deneysel sonuç	$A_3B_1C_1D_2$	2.118	-6.5185
Doğrulama deneyi	$A_3B_1C_1D_2$	2.159	-6.6850

7.4.2. Dalgalılık için Varyans analizi

Dalgalılık için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 7.17.'de verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre fener mili hızı ve ileleme hızı faktörleri dalgalılık üzerinde önemli bir etkiye sahipken ($P<0.05$) talaş derinliği ve işleme koşulu parametreleri dalgalılık üzerinde kayda değer bir etkiye sahip değildir ($P>0.05$).

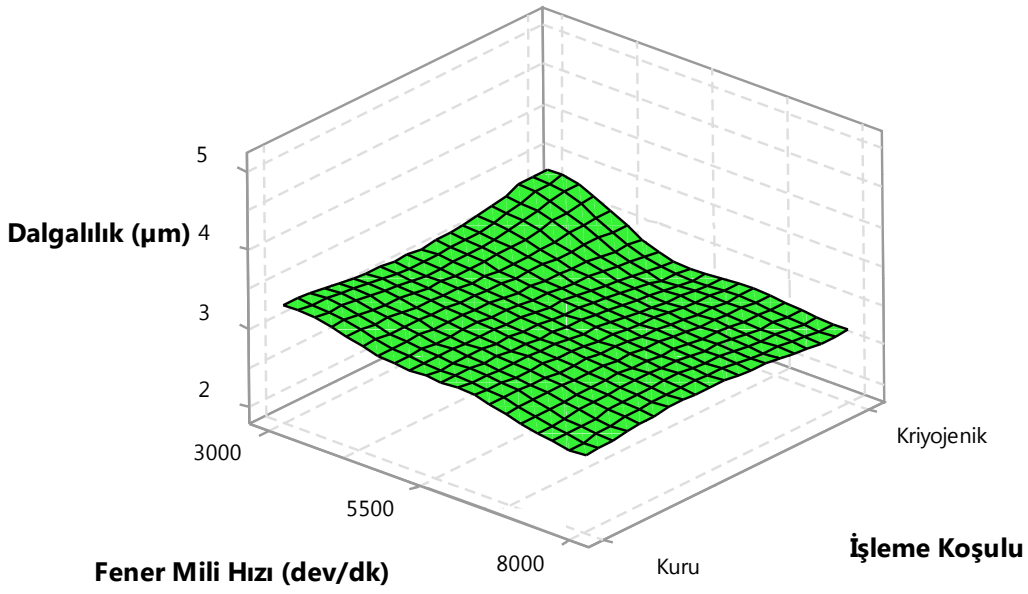
Çizelgeden de görüldüğü gibi fener mili hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin dalgalılığa etkileri sırasıyla % 11.56 ve % 35.94'dür.

Çizelge 7.17. Dalgalılık için varyans analizi sonucu

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F Değeri	P Değeri	% Dağılım
Fener mili hızı	2	3.3633	1.68165	5.11	0.010	11.56
İlerleme hızı	2	10.4541	5.22706	15.89	0.000	35.94
Talaş derinliği	2	0.0013	0.00063	0.00	0.998	0.044
İşleme koşulu	1	0.1355	0.13550	0.41	0.524	0.465
Hata	46	15.1291	0.32889	-	-	52.01
Toplam	53	29.0833	-	-	-	100

7.4.3. Dalgalılık için oluşturulan grafikler

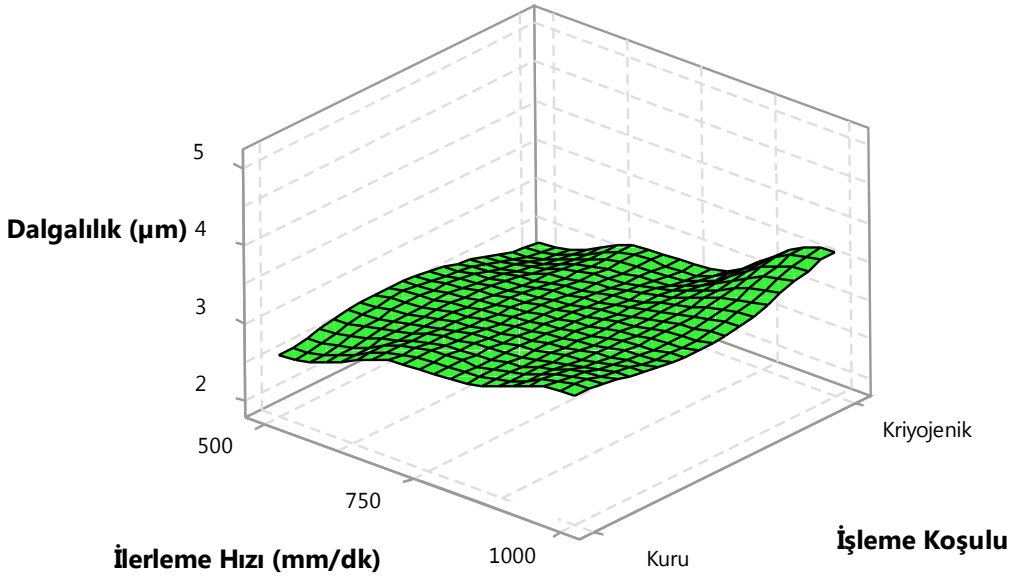
Fener mili hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği parametrelerinin dalgalılığa etkisini gösteren üç boyutlu grafikler Şekil 7.16., 7.17. ve 7.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 7.16. İşleme koşulu ve fener mili hızına bağlı olarak dalgalılığın değişim grafiği

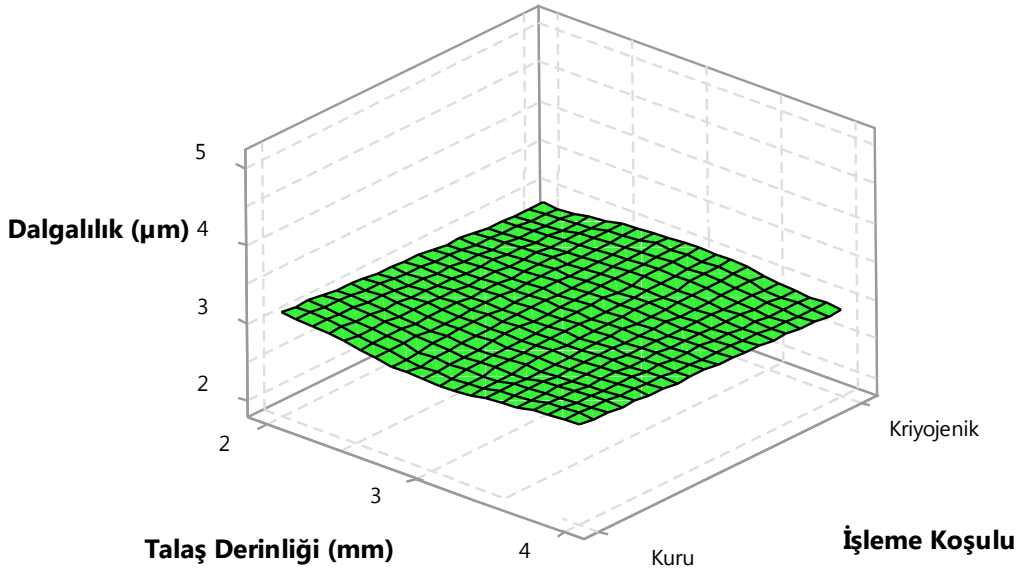
Şekil 7.16. incelendiğinde fener mili hızının dalgalılık üzerinde etkisi her ne kadar yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi kadar olmasa da, fener mili hızının artışıyla

dalgalılığın azaldığı söylenebilir. Kuru koşulda, 3000 dev/dk fener mili hızında yapılan deneylerden sonra işlenen kanallardan ölçülen ortalama dalgalılık değeri 3.2929 µm, 5500 dev/dk fener mili hızında yapılan deneyler için bu değer 3.0384 µm ve 8000 dev/dk fener mili hızında yapılan deneyler için ise bu değer 2.7700 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşullarda ise 3000 dev/dk fener mili hızı için dalgalılık 3.3567 µm, 5500 dev /dk fener mili hızı için dalgalılık 2.7448 µm ve 8000 dev/dk fener mili hızı için ise dalgalılık 2.6992 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.17. İşleme koşulu ve ilerleme hızına bağlı olarak dalgalılığın değişim grafiği

Şekil 7.17. incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça dalgalılığın da arttığı görülmektedir. Kuru koşulda, 500 mm/dk ilerleme hızı parametresi ile yapılan deneylerden sonra işlenen kanallardan ölçülen ortalama dalgalılık 2.5791 µm, 750 mm/dk ilerleme hızında 3.0645 µm ve 1000 mm/dk ilerleme hızında ise bu değer ortalama 3.4577 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise ortalama dalgalılık değerleri 500 mm/dk ilerleme hızı için 2.3639 µm, 750 mm/dk ilerleme hızı için 2.8030 µm ve 1000 mm/dk ilerleme hızı için ise 3.6339 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.18. İşleme koşulu ve talaş derinliğine bağlı olarak dalgalılığın değişim grafiği

Şekil 7.18. incelendiğinde talaş derinliği parametresinin dalgalılık üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir. Kuru koşulda, 2 mm talaş kaldırılarak yapılan deneyler sonrası işlenen kanallardan ölçülen ortalama dalgalılık değeri 3.1113 µm, 3 mm talaş kaldırıldığında bu değer 2.9238 µm ve 4 mm talaş kaldırıldığında ise bu değer ortalama 3.0662 µm olarak ölçülmüştür. Kriyojenik koşulda ise ortalama dalgalılık değerleri sırasıyla 2 mm talaş derinliği için 2.8666 µm, 3 mm talaş derinliği için 3.0307 µm ve 4 mm talaş derinliği için 2.9035 µm olarak ölçülmüştür. Dalgalılık için yapılan varyans analizi sonuçlarının da gösterdiği gibi talaş derinliği ve işleme koşulu parametrelerinin dalgalılık üzerinde bir etkisi yoktur. Bu durum Şekil 7.16., 7.17. ve 7.18.'deki grafiklerde de görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin üç farklı fener mili hızı (3000, 5500 ve 8000 dev/dk), üç farklı ilerleme hızı (500, 750 ve 1000 mm/dk), üç farklı talaş derinliği (2, 3 ve 4 mm) ve iki farklı işleme koşulu (kuru ve kriyojenik) parametreleri kullanılarak frezelenme performansı araştırılmıştır. Elde edilen bulgular ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

8.1 Sonuçlar

- Kuru ve kriyojenik koşullarda, fener mili hızı azaldıkça, ilerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça frezeleme kuvvetlerinde artış görülmektedir.
- Kriyojenik koşulda yapılan işlemede kuru koşulda yapılan işlemeye göre (aynı kesme parametreleri ile) daha yüksek frezeleme kuvvetleri oluşmuştur.
- Frezeleme kuvvetleri için yapılan Taguchi ve ANOVA analizlerine göre x yönündeki frezeleme kuvveti üzerinde en etkili parametre fener mili hızı iken etkisi en zayıf parametre ise işleme koşulu (Kuru/Kriyojenik) olmuştur. Y yönündeki frezeleme kuvveti üzerinde en etkili parametre talaş derinliği iken etkisi en zayıf parametre fener mili hızı olmuştur. Z yönündeki frezeleme kuvveti üzerinde en etkili parametre talaş derinliği iken etkisi en zayıf parametre ise işleme koşulu olmuştur.
- Frezeleme kuvvetleri için optimum parametreler 8000 dev/dk fener mili hızı, 500 mm/dk ilerleme hızı, 2 mm talaş derinliği ve kuru işleme koşulu olarak bulunmuştur.
- Kuru ve kriyojenik koşullarda, fener mili hızı azaldıkça, ilerleme hızı arttıkça delaminasyon faktörü artmakta iken talaş derinliği parametresinin delaminasyon faktörü üzerinde etkisi yok denecek kadar azdır.
- Kriyojenik koşulda yapılan işlemede kuru koşulda yapılan işlemeye göre (aynı kesme parametreleri ile) işlenen malzeme üzerinde daha az delaminasyon oluşmuştur.
- Delaminasyon faktörü için yapılan Taguchi ve Anova analizlerine göre en etkili parametre işleme koşulu iken bu parametreyi ilerleme hızı, fener mili hızı ve talaş derinliği takip etmektedir.
- Kuru ve kriyojenik koşullarda, fener mili hızı azaldıkça, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmakta iken talaş derinliği parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi çok azdır.

- Kriyojenik koşulda yapılan işlemede kuru koşulda yapılan işlemeye göre daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiş, kriyojenik koşullarda aynı kesme parametreleri ile daha düşük yüzey pürüzlülüğü (daha kaliteli yüzeyler) değerleri elde edilebilmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü için yapılan Taguchi ve Anova analizlerine göre en etkili parametre fener mili hızıdır. Bu parametreyi sırasıyla, ilerleme hızı, işleme koşulu ve talaş derinliği takip etmektedir.
- Kuru ve kriyojenik koşullarda, fener mili hızı azaldıkça, ilerleme hızı arttıkça dalgalılık artmıştır. Talaş derinliği parametresinin ise dalgalılık üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Dalgalılık için yapılan Taguchi ve ANOVA analizlerine göre en etkili parametre ilerleme hızıdır. Bu parametreyi sırasıyla fener mili hızı ve işleme koşulu takip etmektedir.
- Delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılık için optimum parametreler 8000 dev/dk fener mili hızı, 500 mm/dk ilerleme hızı, 2 mm talaş derinliği ve kriyojenik işleme koşulu olarak bulunmuştur.
- Diğer sonuç parametrelerinde (kesme kuvveti parametresi hariç) kriyojenik koşulda kuru işlemeye göre daha iyi sonuçlar elde edilirken dalgalılık parametresi için aynı durum söz konusu değildir. Kuru ve kriyojenik koşullarda aynı parametreler ile yapılan deneylerde malzemede oluşan dalgalılık değerleri hemen hemen aynıdır.

Elde edilen bu sonuçlar CFRP malzemelerin kriyojenik ortamda frezelenmesinin uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda kriyojenik koşulda işleme, her ne kadar işleme kuvvetini artırarak işleme esnasında tezgâhın daha fazla güç harcamasına ve bunun yanında kriyojenik sıvı kullanılmasından ötürü işleme maliyetinin artmasına sebep olsa da yüzey kalitesini artırdığı ve malzemede oluşan delaminasyonu azalttığı için uygulanabilir bir prosestir.

8.2 Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıdaki gibidir:

- Diğer kriyojenik işleme teknikleri (Kesme bölgesine kriyojenik püskürterek işleme, kesici takımın işleme öncesinde soğutulması vs.) ve farklı kesme parametreleri kullanılarak yeni deneyler yapılabilir.

• Kriyojenik koşulda işleme tekniği ile diğer işleme stratejileri (Çevresel frezeleme, cep boşaltma vs.) kullanılarak CFRP malzemenin frezelenmesi konusunda yeni deneyler yapılabilir.

• Kriyojenik koşulda işlemenin haricinde diğer soğutma teknikleri (minimum miktarda yağlama, konvansiyonel soğutma sıvıları gibi) kullanılarak CFRP malzemenin frezelenme performansı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Ahmed, N., 2013, Ultrasonically assisted Turning: effects on surface roughness, *World Applied Sciences Journal*, 27 (2), 201-206.

Akdoğan Eker, A., 2014, Kompozit Malzemeler [online], Yıldız Teknik Üniversitesi, http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/akdogan_895a461f0c21a16f319f061a4e1f071e.pdf [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Akincioğlu, S., Gökkaya, H. ve Uygur, İ., 2015, A review of cryogenic treatment on cutting tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (9-12), 1609-1627.

Akkurt, M., 1998, Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 202-220.

Akovali, G. ve Uyanik, N., 2001, Introduction, In: Handbook Of Composite Fabrication, Eds: Akovali, G., *Rapra Technology Limited*, Exeter, UK, 6-22.

Aktaş, M., 2016, Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri [online], Dokuz Eylül Üniversitesi, http://debis.deu.edu.tr/userweb/mehmet.aktas/Kompozit%20Malzemeler/Ders%203/3.pdf [Ziyaret Tarihi: 01.11.2016].

Anonim, 2011, http://i0.wp.com/www.cyclingtr.com/wp-content/uploads/2011/11/karbon_2D00_kadro_2D00_ana.jpg?w=960 [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Anonim, 2016a, Karbon Fiberler [online], İstanbul Üniversitesi, http://muhendislik.istanbul.edu.tr/metalurji/wp-content/uploads/2013/09/k10.pptx [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Anonim, 2016b, Polimer [online], https://tr.wikipedia.org/wiki/Polimer [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Anonim, 2016c, Kevlar [online], https://tr.wikipedia.org/wiki/Kevlar [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Anonymous, 2016a, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Zonda_R_Front_1.jpg [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Anonymous, 2016b, Surface Texture Parameters [online], http://zygo.com [Ziyaret Tarihi: 01.11.2016].

Anonymous, 2016c, 3 Steps to Understanding Surface Texture [online], http://digitalmetrology.com/3-steps-understanding-surface-texture/ [Ziyaret Tarihi: 01.11.2016].

Anonymous, 2016d, https://www.iscar.com [Ziyaret Tarihi: 01.11.2016].

Arıcasoy, O., 2006, Kompozit Sektör Raporu, *İstanbul Ticaret Odası*, *İstanbul*, 11.

Arul, S., Samuel Raj, D., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S. ve Krishnamurthy, R., 2006, Modeling and optimization of process parameters for defect toleranced drilling of GFRP composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 21 (4), 357-365.

Ataş, C., 2016, Kompozit Üretim Yöntemleri [online], Dokuz Eylül Üniversitesi, http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/kompozit/4_%20Uretim%20Yontemleri.pdf [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Azmi, A., Lin, R. ve Bhattacharyya, D., 2013, Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64 (1-4), 247-261.

Azmi, A. I., 2012, Machinability Study of Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composites, Doctor of Philosophy in Engineering, *The University of Auckland Centre for Advanced Composite Materials*, Auckland, 19-21.

Baker, A., Dutton, S. ve Kelly, D., 2004, Composite Materials for Aircraft Structures, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, London, 6-88.

Bayraktar, Ş., 2011, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Frezeleme İşleminde İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2-65.

Bayraktar, Ş. ve Turgut, Y., 2016, AL-5083 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Kuvveti, Yüzey Pürüzlülüğü ve Çapak Yüksekliğinin Optimizasyonu, *7. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2016)*, İstanbul-Türkiye, 24-33.

Bhudwannachai, P., 2014, Performance Evaluation and Analysis of the Use of CO2 Cooling for Conventional Drilling of Carbon Fibre Reinforced Plastics, Doctor of Philosophy, *University of Warwick*, Warwick, 71-80.

Bingöl, Y. C., 2008, Karbon-Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozit Bisiklet Kadrosu Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 24-25.

Budan, D. A., Basavarajappa, S., Kumar, M. P. ve Joshi, A. G., 2011, Influence of fibre volume reinforcement in drilling GFRP laminates, *Journal of Engineering Science and Technology*, 6 (6), 733-744.

Bunsell, A. R., 2011, Fibres for composite reinforcement: properties and microstructures, In: Composite Reinforcements For Optimum Performance, Eds: Boisse, P., *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, UK, 17-30.

Campbell, F. C., 2003, Manufacturing Processes For Advanced Composites, *Elsevier*, Oxford, UK, 44-75.

Cripps, D., 2016, Manufacturing [online], http://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/ [Ziyaret Tarihi: 01.11.2016].

Da Silva, F. J., Franco, S. D., Machado, Á. R., Ezugwu, E. O. ve Souza, A. M., 2006, Performance of cryogenically treated HSS tools, *Wear*, 261 (5), 674-685.

Davim, J. P. ve Reis, P., 2005, Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments, *Journal of Materials Processing Technology*, 160 (2), 160-167.

De Lacalle, L. L., Lamikiz, A., Campa, F., Valdivielso, A. F. ve Etxeberria, I., 2009, Desing and test of a multitooth tool for CFRP milling, *Journal of composite materials*, 43 (26), 3275-3290.

Demirel, A., 2007, Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-27.

El-Hofy, M., Soo, S., Aspinwall, D., Sim, W., Pearson, D. ve Harden, P., 2011, Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP, *Procedia Engineering*, 19, 94-99.

Ersoy, H. Y., 2001, Kompozit Malzeme, *Literatür Yayınları*, İstanbul, 3-169.

Firouzdor, V., Nejati, E. ve Khomamizadeh, F., 2008, Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance and tool life of M2 HSS drill, *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1), 467-472.

Gaitonde, V., Karnik, S., Rubio, J. C. C., de Oliveira Leite, W. ve Davim, J., 2014, Experimental studies on hole quality and machinability characteristics in drilling of unreinforced and reinforced polyamides, *Journal of composite materials*, 48 (1), 21-36.

Gavas, M., Aydın, M., Yaşar, M. ve Altunpak, Y., 2015, Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri, *Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A.Ş.*, Ankara, 288-300.

Ghosh, R., 2006, Technology Assessment On Current Advanced Research Projects in Cryogenic Machining, *The Association for Manufacturing Technology, Virginia-USA*, 1-3.

Günay, M. ve Yücel, E., 2013, Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron, *Measurement*, 46 (2), 913-919.

Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F. ve Castanié, B., 2015, Influence of machining process and machining induced surface roughness on mechanical properties of continuous fiber composites, *Experimental Mechanics*, 55 (3), 519-528.

Harris, B., 1999, Engineering composite materials, *The Institute of Materials*, London, 5-9.

He, H.-B., Han, W.-Q., Li, H.-Y., Li, D.-Y., Yang, J., Gu, T. ve Deng, T., 2014, Effect of deep cryogenic treatment on machinability and wear mechanism of TiAlN coated tools during dry turning, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15 (4), 655-660.

Hintze, W., Hartmann, D. ve Schütte, C., 2011, Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs)–An experimental study, *Composites Science and Technology*, 71 (15), 1719-1726.

Isbilir, O. ve Ghassemieh, E., 2012, Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (10), 717-727.

Ishida, T., Noma, K., Kakinuma, Y., Aoyama, T., Hamada, S., Ogawa, H. ve Higaino, T., 2014, Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen, *Procedia CIRP*, 24, 13-18.

Jeon, Y., Park, H. W. ve Lee, C. M., 2013, Current research trends in external energy assisted machining, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14 (2), 337-342.

Jia, Z., Fu, R., Wang, F., Qian, B. ve He, C., 2016, Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites, *Polymer Composites*.

Jiang, L., Yahya, E., Ding, G., Hu, M. ve Qin, S., 2013, The research of surface waviness control method for 5-axis flank milling, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (1-4), 835-847.

Karpat, Y., Değer, B. ve Bahtiyar, O., 2012, Drilling thick fabric woven CFRP laminates with double point angle drills, *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (10), 2117-2127.

Karpat, Y. ve Polat, N., 2013, Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools, *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 62 (1), 95-98.

Kerrigan, K., Thil, J., Hewison, R. ve O'Donnell, G., 2012, An integrated telemetric thermocouple sensor for process monitoring of CFRP milling operations, *Procedia CIRP*, 1, 449-454.

Khairusshima, M. N., Hassan, C. C., Jaharah, A., Amin, A. ve Idriss, A. M., 2013, Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic, *Wear*, 302 (1), 1113-1123.

Khashaba, U., Seif, M. ve Elhamid, M., 2007, Drilling analysis of chopped composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 (1), 61-70.

Khashaba, U., El-Sonbaty, I., Selmy, A. ve Megahed, A., 2010, Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I–Effect of machining parameters, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41 (3), 391-400.

Kilickap, E., 2010, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite, *Expert Systems with Applications*, 37 (8), 6116-6122.

Kılıçkap, E. ve Çelik, Y. H., 2012, Cam Elyaf Takviyelİ Plastik Kompozitlerin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi, *3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 99-103.

Köklü, U., Kaynak, Y., Demir, O., Avcı, A. ve Etyemez, A., 2015, Fonksİyonel derecelendİrİlmİş kompozİt malzemelerİn talaşli İşlenebİlme performansi, *6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015)*, İstanbul-Türkiye, 198-206.

Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Kumar, M. S., Zitoune, R. ve Davim, J., 2012, Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Composites Part B: Engineering*, 43 (4), 1791-1799.

Ohashi, K., Maeno, H., Fujihara, R., Kubota, S., Yoshikawa, M. ve Tsukamoto, S., 2013, Influence of grinding atmosphere on grinding characteristics of CFRP, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, 79 (808), 5068-5078.

Özel, D. ve Töre, C., 2007, Kompozit Uçak Yüzeyinde Elektrik İletkenliği, *Mühendis ve Makina*, Cilt: 48 (Sayı: 566).

Öztop, M., 2007, Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi ile Alüminyum Ekstrüzyon Prosesinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 40.

Palanikumar, K., 2010, Modeling and analysis of delamination factor and surface roughness in drilling GFRP composites, *Materials and Manufacturing Processes*, 25 (10), 1059-1067.

Pecat, O., Rentsch, R. ve Brinksmeier, E., 2012, Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP, *Procedia CIRP*, 1, 466-470.

Potyrała, P. B., 2011, Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures., Projecte O Tesina D'especialitat, *Universitat Politècnica de Catalunya Enginyeria de la Construcció*, 23-26.

Ravi, S. ve Kumar, M. P., 2012, Experimental investigation of cryogenic cooling in milling of AISI D3 tool steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (10), 1017-1021.

Razfar, M. ve Zadeh, M. Z., 2009, Optimum damage and surface roughness prediction in end milling glass fibre-reinforced plastics, using neural network and genetic algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223 (6), 653-664.

Schorník, V., Daňa, M. ve Zetková, I., 2015, The influence of the cutting conditions on the machined surface quality when the CFRP is machined, *Procedia Engineering*, 100, 1270-1276.

Shahrajabian, H. ve Farahnakian, M., 2015, Multi-constrained optimization in ball-end machining of carbon fiber-reinforced epoxy composites by PSO, *Cogent Engineering*, 2 (1), 993157.

Sheikh-Ahmad, J., Urban, N. ve Cheraghi, H., 2012, Machining Damage in Edge Trimming of CFRP, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (7), 802-808.

Sheikh-Ahmad, J. Y., 2009, Machining of polymer composites, *Springer*, New York, 42-145.

Singh, R., 2016, Composites Manufacturing [online], Indian Institute of Technology Bombay, www.me.iitb.ac.in/~ramesh/courses/ME338/comp.pdf [Ziyaret Tarihi: 01.11.2016].

Slamani, M., Dagger, J. F. ve Hamedanianpour, H., 2015, Comparison of two models for predicting tool wear and cutting force components during high speed trimming of CFRP, *International Journal of Material Forming*, 8 (2), 305-316.

Sorrentino, L. ve Turchetta, S., 2011, Milling of carbon fiber reinforced plastics: analysis of cutting forces and surface roughness, *18th International Conference of Composite Materials*, Jeju Island-Korea.

Sreenivasulu, R., 2013, Optimization of surface roughness and delamination damage of GFRP composite material in end milling using Taguchi design method and artificial neural network, *Procedia Engineering*, 64, 785-794.

Stefánsson, T., 2014, Application of Cryogenic Coolants in Machining Processes State-of-the-art Literature Study and Experimental Work on Metal Matrix Composite, Master's Thesis, *Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Department of Production Engineering*, Stockholm, 1-5.

Taşlıyan, A., Acarer, M., Şeker, U., Gökkaya, H. ve DEMİR, B., 2007, Inconel 718 Süper Alaşımının İşlenmesinde Kesme Parameterelerinin Kesme Kuvveti Üzerindekİ Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (1).

Tsao, C. C. ve Hocheng, H., 2004, Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44 (10), 1085-1090.

Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N. ve Ceylan, M., 2007, Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması, *Mühendis ve Makina*, 48 (566).

Ulaş, H. B., Mihmat, F. ve Demir, H., 2016, DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin testere freze çakılarıyla işlenebilirliğinin araştırılması/An investigation into the machinability of DIN 1.2344 hot work tool steel with circular saw blades, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26 (2).

Ünal, O., 2016, Kompozit Malzemeler [online], http://www.haddemetal.com/tr/download/kompozit%20malzemeler.pdf [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

Wang, F., Wang, Y., Hou, B., Zhang, J. ve Li, Y., 2016, Effect of cryogenic conditions on the milling performance of aramid fiber, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (1-4), 429-439.

Xia, T., Kaynak, Y., Arvin, C. ve Jawahir, I., 2016, Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82 (1-4), 605-616.

Yashiro, T., Ogawa, T. ve Sasahara, H., 2013, Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 70, 63-69.

Yong, A., Seah, K. ve Rahman, M., 2007, Performance of cryogenically treated tungsten carbide tools in milling operations, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32 (7-8), 638-643.

Yukimoto, Y., Matsuzaki, R. ve Todoroki, A., 2015, Effects of mixed-mode ratio and step-shaped micro pattern surface on crack-propagation resistance of carbon-fiber-reinforced plastic/adhesive interface, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 69, 139-149.

Zhang, X., Mu, H., Huang, X., Fu, Z., Zhu, D. ve Ding, H., 2015, Cryogenic milling of aluminium-lithium alloys: thermo-mechanical modelling towards fine-tuning of part surface residual stress, *Procedia CIRP*, 31, 160-165.

Zhou, J. M., Hognas, S. ve Stahl, J.-E., 2010, Improving waviness of bore in precision hard turning by pressurized coolant, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49 (5-8), 469-474.

Zor, M., 2016, Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler [online], Dokuz Eylül Üniversitesi, http://kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf [Ziyaret Tarihi: 21.04.2016].

EKLER

EK-1 Deney sonuçları

Fener Mili Hızı (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Talaş Derinliği (mm)	İşleme Koşulu	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	Delaminasyon Faktörü	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Dalgalılık (µm)
3000	500	2	1	42.48	24.01	4.57	1.040692	1.354	2.255
5500	500	2	1	32.19	24.08	4.12	1.035862	1.257	2.276
8000	500	2	1	30.54	20.86	6.105	1.020089	1.369	4.213
3000	750	2	1	74.67	32.51	10.36	1.047544	1.524	3.507
5500	750	2	1	39.93	25.95	8.11	1.046261	1.404	3.460
8000	750	2	1	41.94	29.59	7.34	1.041915	1.237	2.364
3000	1000	2	1	111.7	54.82	17.88	1.049478	1.617	3.914
5500	1000	2	1	46.89	22.07	5.97	1.042306	1.521	3.105
8000	1000	2	1	46.74	28.33	11.25	1.041935	1.406	2.912
3000	500	3	1	70.24	33.98	5.89	1.043880	1.497	2.465
5500	500	3	1	39.62	32.67	9.1	1.038320	1.089	2.370
8000	500	3	1	38.38	33.86	8.072	1.028701	1.024	1.971
3000	750	3	1	102	44.83	6.14	1.043294	1.549	3.027
5500	750	3	1	61.34	44.33	9.95	1.040419	1.623	4.161
8000	750	3	1	51.75	42.66	7.03	1.033544	1.497	2.930
3000	1000	3	1	135.1	57.57	9.487	1.047578	1.590	3.357
5500	1000	3	1	73.71	46.33	14.04	1.039224	1.465	3.259
8000	1000	3	1	54.96	37.66	8.1	1.038797	1.358	2.775
3000	500	4	1	87.34	38.73	10.9	1.045487	1.612	3.220
5500	500	4	1	51.97	48.36	13.25	1.037547	1.089	2.364
8000	500	4	1	47.31	38.6	13.74	1.029277	1.068	2.080
3000	750	4	1	124.2	58.17	19.38	1.046003	1.620	3.118
5500	750	4	1	63.62	45.44	12.38	1.042229	1.378	2.593
8000	750	4	1	51.61	38.32	11.73	1.031502	1.277	2.423
3000	1000	4	1	152.9	66.43	15.32	1.047207	1.729	4.775
5500	1000	4	1	82.65	50.26	15.87	1.041562	1.591	3.761
8000	1000	4	1	69.71	55.42	17.63	1.040803	1.249	3.265
3000	500	2	2	68.03	34.3	6.5	1.026689	1.269	2.112
5500	500	2	2	54.21	30.31	5.12	1.024749	1.157	2.126
8000	500	2	2	52.24	33.31	4.8	1.023837	0.968	2.118
3000	750	2	2	109.6	50.94	11.68	1.029247	1.292	3.250
5500	750	2	2	53.9	33.16	5.92	1.026962	1.216	2.615
8000	750	2	2	68.07	40.02	8.22	1.025857	0.982	2.218
3000	1000	2	2	137.7	59.36	15.75	1.036201	1.350	4.676
5500	1000	2	2	79.93	41.97	7.01	1.033898	1.189	3.387
8000	1000	2	2	49.17	34.82	7.41	1.033366	1.175	3.299
3000	500	3	2	89.91	48.03	5.13	1.029698	1.249	2.300
5500	500	3	2	69.46	51.37	11.24	1.027910	1.197	2.115
8000	500	3	2	55.37	43.19	8.41	1.023115	1.028	2.265
3000	750	3	2	115.7	55.63	11.72	1.037673	1.388	3.068

5500	750	3	2	81.1	48.16	11.52	1.034287	1.335	3.023
8000	750	3	2	57.3	47.3	7.89	1.033949	1.334	3.069
3000	1000	3	2	171	84.74	11.83	1.038526	1.515	3.711
5500	1000	3	2	93.71	47.4	13.35	1.039834	1.478	3.695
8000	1000	3	2	68.2	49.19	14.36	1.029100	1.427	4.032
3000	500	4	2	110.1	61.33	23.75	1.032344	1.410	2.906
5500	500	4	2	68.39	64.35	18.71	1.024738	1.333	2.631
8000	500	4	2	64.76	52.62	10.23	1.024766	1.182	2.704
3000	750	4	2	147.3	65.95	20.05	1.036604	1.324	3.153
5500	750	4	2	90.98	64.59	17.02	1.028384	1.167	2.508
8000	750	4	2	73.21	56.94	18.21	1.030564	1.102	2.324
3000	1000	4	2	184.5	81.57	21.53	1.037673	1.694	5.035
5500	1000	4	2	114.1	62.8	22.03	1.039029	1.281	2.605
8000	1000	4	2	72.91	58.14	14.04	1.036149	1.138	2.266

EK-2 S/N oranları

Deney Numarası	F_x	F_y	F_z	Delaminasyon Faktörü	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Dalgalılık (µm)
1	-32.56369016	-27.6078432	-13.198324	-0.346447474	-2.632373287	-7.061004793
2	-30.15441953	-27.63312965	-12.29794432	-0.306034938	-1.986705554	-7.141536797
3	-29.69738065	-26.38628608	-15.71371337	-0.172760292	-2.724896035	-12.49079828
4	-37.46292303	-30.24033939	-20.30719511	-0.403442005	-3.657799331	-10.89747686
5	-32.0259862	-28.28274724	-18.18041708	-0.392801488	-2.944248339	-10.7802667
6	-32.45256852	-29.4228993	-17.3139212	-0.356642687	-1.847393993	-7.472949444
7	-40.96106346	-34.77878062	-25.04735029	-0.419465574	-4.174200398	-11.85241643
8	-33.42160465	-26.87604666	-15.51948662	-0.35990157	-3.642584281	-9.839833284
9	-33.39377416	-29.04493149	-21.02305045	-0.356808632	-2.959706414	-9.282335889
10	-36.93169006	-30.62446749	-15.4023059	-0.373010337	-3.504436007	-7.836338472
11	-31.95828942	-30.28298269	-19.18082785	-0.32662416	-0.740557595	-7.49496692
12	-31.68209941	-30.59373908	-18.13962306	-0.245783863	-0.205999133	-5.893732486
13	-40.17200344	-33.03137478	-15.76336742	-0.36813257	-3.801028355	-9.620248419
14	-35.75487543	-32.93395463	-19.95646161	-0.344166031	-4.206370397	-12.38395432
15	-34.27820708	-32.60041702	-16.9391065	-0.286578134	-3.504436007	-9.338340507
16	-42.61310698	-35.20392459	-19.54257801	-0.403724171	-4.027942486	-10.51902682
17	-37.35052822	-33.317246	-22.94734216	-0.334185819	-3.31378752	-10.26079876
18	-34.80093448	-31.51760631	-18.16970038	-0.330614724	-2.654796765	-8.863694583
19	-38.82426375	-31.76094994	-20.74852996	-0.386369839	-4.147300749	-10.15711743
20	-34.31505434	-33.68972584	-22.44431757	-0.320153928	-0.740557595	-7.472949444
21	-33.49905896	-31.73174609	-22.75973465	-0.250644295	-0.571425054	-6.361266699
22	-41.88243192	-35.29398128	-25.74707545	-0.390658289	-4.187619047	-9.876593593
23	-36.0718733	-33.14876645	-21.85441289	-0.359264195	-2.784984351	-8.274375301
24	-34.25467718	-31.66851001	-21.38596024	-0.269405573	-2.123817945	-7.685275714
25	-43.68814971	-36.44728505	-23.70517531	-0.400650991	-4.757574254	-13.57855795
26	-38.34485716	-34.02444969	-24.01153854	-0.353703659	-4.033403593	-11.50491186
27	-36.86590165	-34.87333043	-24.92504625	-0.347374751	-1.931248767	-10.27633346
28	-36.65400942	-30.7058824	-16.25826713	-0.228775926	-2.069232442	-6.491821715
29	-34.68158815	-29.63171873	-14.18539922	-0.212349333	-1.262912742	-6.549222186
30	-34.36006337	-30.45149265	-13.62482475	-0.204612878	0.282492854	-6.518519115
31	-40.79621108	-34.14117881	-21.34885686	-0.250396289	-2.227490926	-10.23766722
32	-34.6317753	-30.41229044	-15.44643413	-0.231089618	-1.698671499	-8.349433864
33	-36.65911501	-32.04554169	-18.29743635	-0.221733966	0.157770244	-6.91727257
34	-42.77867881	-35.46987785	-23.94561116	-0.308878771	-2.603457778	-13.39749005
35	-38.05419626	-32.45877938	-16.91436036	-0.289556863	-1.503637092	-10.59630393
36	-33.83400417	-30.83657534	-17.39636416	-0.285081283	-1.397060422	-10.36764631
37	-39.07615995	-33.63025173	-14.2023473	-0.254194182	-1.931248767	-7.23455672
38	-36.83469558	-34.21419131	-21.01532622	-0.239104133	-1.558254059	-6.506207434
39	-34.86549047	-32.70766408	-18.49591992	-0.198492291	-0.239862293	-7.101364127
40	-41.26666718	-34.9061812	-21.37855223	-0.321206411	-2.844659836	-9.737107106
41	-38.18041708	-33.65372956	-21.22904958	-0.292821765	-2.506371562	-9.608762944
42	-35.16309244	-33.49722281	-17.94154006	-0.28998553	-2.503116592	-9.739937769

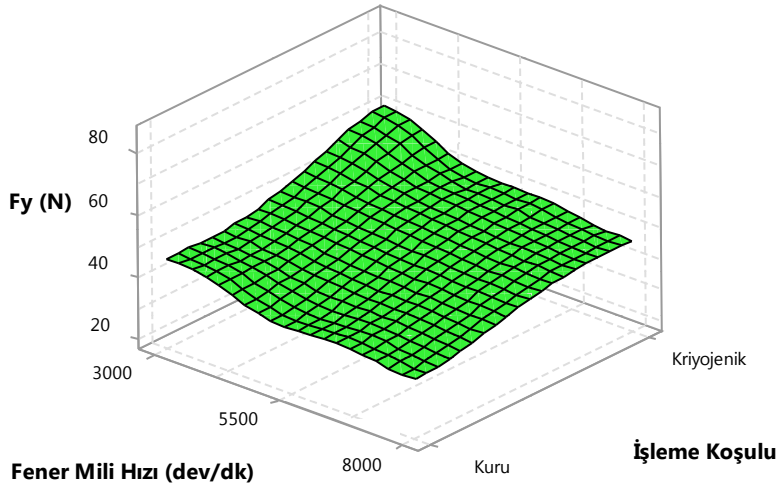
43	-44.65992221	-38.56176919	-21.45969489	-0.328351386	-3.605385553	-11.38981909
44	-39.43571876	-33.51556683	-22.50962531	-0.339278186	-3.393488681	-11.35111342
45	-36.67568749	-33.83753645	-23.1430888	-0.249154467	-3.088479462	-12.10933328
46	-40.83574638	-35.75345929	-27.51327228	-0.276492074	-2.984382253	-9.266908459
47	-36.69985207	-36.17097102	-25.44147575	-0.212257398	-2.496602988	-8.400766123
48	-36.2261368	-34.42301687	-20.19751267	-0.212493293	-1.452349531	-8.638527478
49	-43.36405494	-36.384296	-26.04228754	-0.312260077	-2.437759702	-9.974479415
50	-39.17891865	-36.20330569	-24.61919111	-0.243109992	-1.343897741	-7.986550643
51	-37.29140814	-35.10834926	-25.20619892	-0.261500882	-0.84363189	-7.324722474
52	-45.31992741	-38.23060925	-26.6608806	-0.321212591	-4.576558804	-14.0399895
53	-41.14571289	-35.95919287	-26.86028994	-0.332552384	-2.153242486	-8.31726592
54	-37.25574196	-35.28950055	-22.94734216	-0.308448062	-1.120300671	-7.105198111

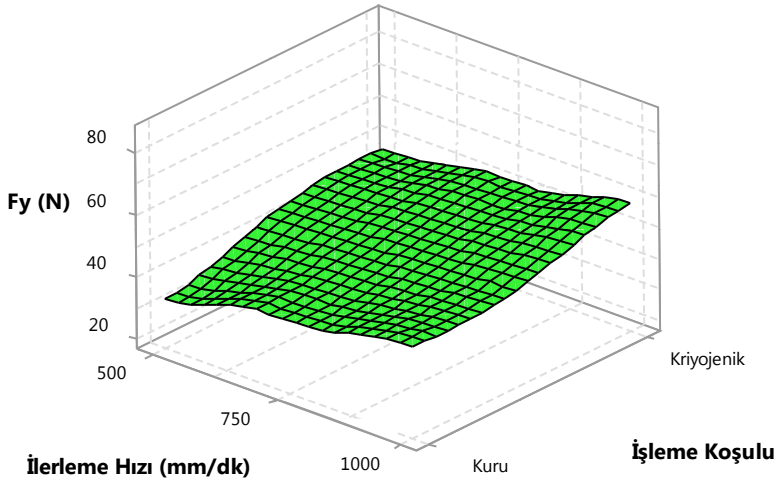
EK-3 Tekrar deneyi sonuçları

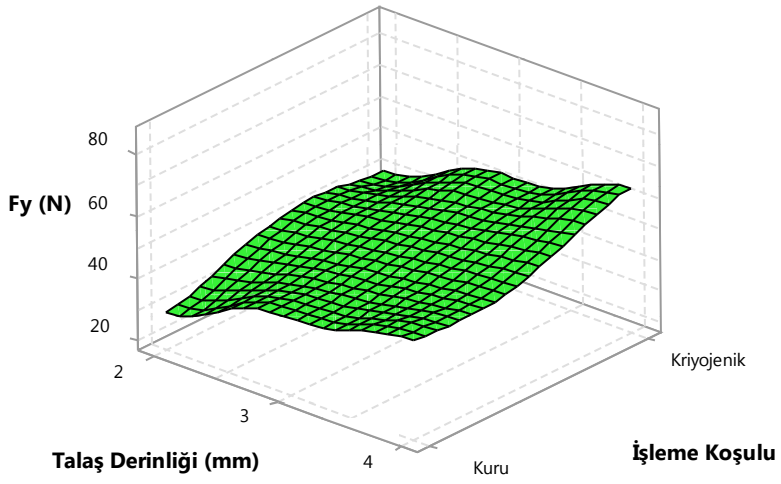
		3000 dev/dk, 500 mm/dk, 2 mm					
		Fx	Fy	Fz	Fd	Ra	Wa
Kuru	1.Tekrar	42.59	24.21	4.62	1.045351	1.362	2.355
	2.Tekrar	42.86	24.67	4.73	1.039756	1.297	2.281
	3.Tekrar	43.71	25.16	5.01	1.041210	1.325	2.343
Ortalama		43.05	24.68	4.78	1.040483	1.328	2.326
Standart sapma		0.5844	0.4750	0.2010	0.00102	0.0326	0.0397
Asıl deney sonuçları		42.48	24.01	4.57	1.040692	1.354	2.255
Bağıl hata		%1.34	%2.79	%4.74	%0.02	%1.92	%3.16
Kriyojenik	1.Tekrar	70.12	35.6	6.73	1.027213	1.301	2.311
	2.Tekrar	68.43	33.51	7.04	1.024862	1.293	2.119
	3.Tekrar	68.09	35.67	6.55	1.02532	1.288	2.157
Ortalama		68.88	34.92	6.77	1.025798	1.294	2.195
Standart sapma		1.0872	1.2273	0.2478	0.0012	0.0065	0.1016
Asıl deney sonuçları		68.03	34.3	6.5	1.026689	1.269	2.111
Bağıl hata		%1.25	%1.82	%4.20	%0.08	%1.97	%4.01
		5500 dev/dk, 750 mm/dk, 3 mm					
		Fx	Fy	Fz	Fd	Ra	Wa
Kuru	1.Tekrar	63.05	45.57	10.83	1.040721	1.609	4.014
	2.Tekrar	62.72	44.89	10.45	1.040513	1.596	3.956
	3.Tekrar	61.83	44.41	10.06	1.040498	1.583	3.903
Ortalama		62.53	44.95	10.44	1.040577	1.596	3.957
Standart sapma		0.6310	0.5828	0.3850	0.0001	0.013	0.0555
Asıl deney sonuçları		61.34	44.33	9.95	1.040419	1.623	4.161
Bağıl hata		%1.94	%1.41	%4.99	%0.01	%1.66	%4.88
Kriyojenik	1.Tekrar	79.12	48.03	11.03	1.032538	1.329	3.161
	2.Tekrar	79.3	49.13	12.17	1.033125	1.289	3.057
	3.Tekrar	81.51	49.89	12.89	1.034541	1.341	3.21
Ortalama		79.97	49.01	12.03	1.033401	1.319	3.142
Standart sapma		1.3309	0.9351	0.9378	0.0010	0.02722	0.0781
Asıl deney sonuçları		81.1	48.16	11.52	1.034287	1.335	3.023
Bağıl hata		%1.38	%1.77	%4.42	%0.08	%1.11	%3.95
		8000 dev/dk, 1000 mm/dk, 4 mm					
		Fx	Fy	Fz	Fd	Ra	Wa
Kuru	1.Tekrar	69.84	54.77	17.18	1.040131	1.24	3.253
	2.Tekrar	70.78	56.5	18.85	1.040915	1.274	3.39
	3.Tekrar	72.36	56.92	19.04	1.041021	1.305	3.471
Ortalama		70.99	56.06	18.35	1.040689	1.273	3.371
Standart sapma		1.2734	1.1395	1.0234	0.000486	0.0325	0.1101
Asıl deney sonuçları		69.71	55.42	17.63	1.040803	1.249	3.265
Bağıl hata		%1.84	%1.16	%4.12	%0.01	%1.92	%3.27
Kriyojenik	1.Tekrar	73.12	59.32	13.89	1.034113	1.153	2.314
	2.Tekrar	73.03	58.19	14.13	1.036151	1.147	2.273
	3.Tekrar	74.98	60.01	15.71	1.036417	1.164	2.379

Ortalama	73.71	59.17	14.57	1.035560	1.154	2.322
Standart sapma	1.1007	0.9188	0.9888	0.00126	0.0086	0.0534
Asıl deney sonuçları	72.91	58.14	14.04	1.036149	1.138	2.266
Bağıl hata	%1.09	%1.77	%3.82	%0.05	%1.49	%2.47

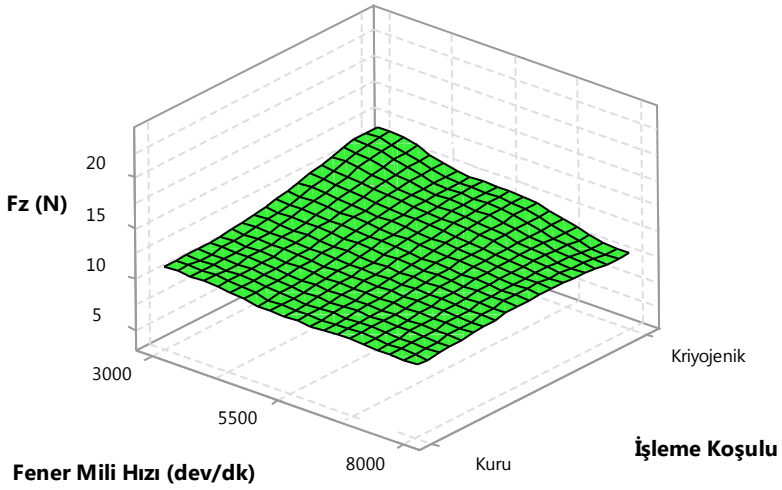
EK-4 Deney parametrelerinin y yönündeki frezeleme kuvvetine (F_y) olan etkisini gösteren grafikler

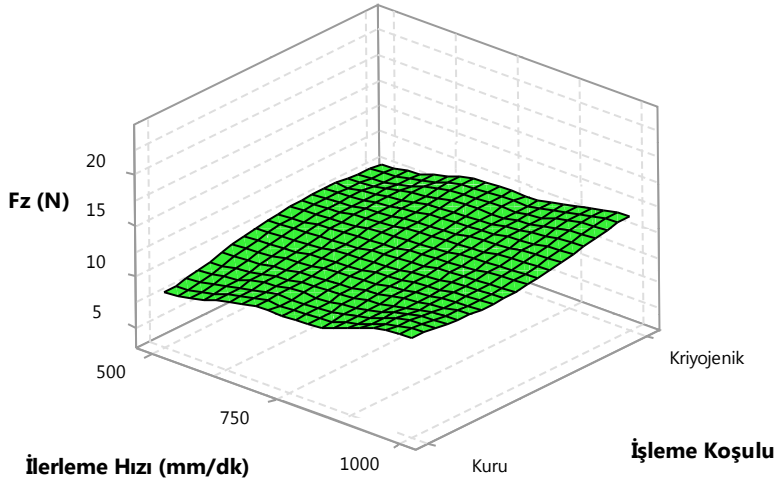


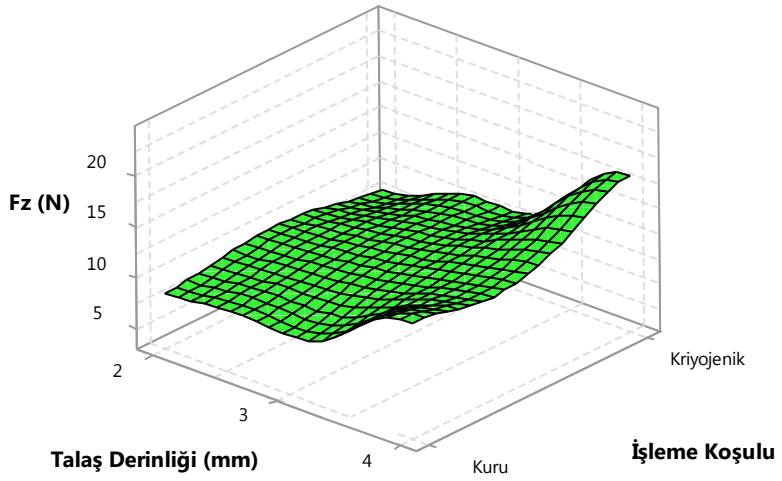




EK-5 Deney parametrelerinin z yönündeki frezeleme kuvvetine (F_z) olan etkisini gösteren grafikler







ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Sezer Morkavuk
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Hadim/ 13.09.1990
Telefon	**:**	5379897594
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	sezermorkavuk@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	**Mehmet Akif Ersoy Lisesi Selçuklu/KONYA**	**2007**
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi KONYA**	**2013**
Yüksek Lisans	:	**-**	
Doktora	:	**-**	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2015	**Türkiye Demiryolu Makinaları Sanayi A.Ş.**	**Makine Mühendisi**
2015 -	**Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi**	**Araştırma Görevlisi**

UZMANLIK ALANI
Talaşlı imalat

YABANCI DİLLER
İngilizce

YAYINLAR
Experimental study on cylindirical grinding with helical grooves wheels , 21 st International Scientific Conference Mechanika 2016, 12-13 May 2016, Kaunas, LITHUANIA

Drilling Of Carbon Fiber Reinforced Plastics Under The Dry and Cryogenic Machining Conditions, The 17th International Conference on Machine Design and Production, July 12- July 15 2016, Bursa, Türkiye.

Milling Of Carbon Fiber Reinforced Plastics In Dry and Cryogenic Machining Conditions, The 17th International Conference on Machine Design and Production July 12 – July 15 2016, Bursa, Türkiye. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır.)

Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin yüksek ilerleme hızı ile kuru ve kriyojenik koşullarda frezelenmesi, 7. Uluslararası talaşlı imalat sempozyumu UTIS 2016, 3-5 Kasım 2016, İstanbul, Türkiye. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır.)