T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİNİN DELİK DELME TALAŞLI İMALAT PROSESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Ender AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Doç.Dr. Yaman ERARSLAN

Ekim, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN CFRP KOMPOZİT MALZEMELERİNİN DELİK DELME TALAŞLI İMALAT PROSESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Ender AYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması 27.10.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Yaman Erarslan
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yaman ERARSLAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç.Dr. Ergün KELEŞOĞLU, Üye
Türk Alman Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Yaman Erarslan sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Havacılık Endüstrisinde Kullanılan CFRP Kompozit Malzemelerinin Delik Delme Talaşlı İmalat Prosesini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ender AYDIN

İmza

Benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen

Sevgili Aileme,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimi tamamlayarak, eğitim hayatımın önemli basamaklarından birini geride bırakıyorum. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında bana tecrübesiyle yol gösteren danışman hocam Sn. Doç. Dr. Yaman Erarslan'a; gerekli malzeme, ekipman ve çalışma ortamını sağlayan ve parçası olmaktan gurur duyduğum Türk Havacılık ve Uzay Sanayii şirketine, sevgili ekip arkadaşlarım Aslı Fidan'a, Gencer Burak Eroğlu'na, Serhat Göncü'ye ve yöneticim Onur Çakır'a ayrıca deneysel çalışmalar esnasında bana sağladığı destek konusunda da Hüseyin Dağlı'ya; son olarak da bugünlere gelmemi sağlayan ve her anımda sevgisini ve desteğini hissettiğim aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu tezi yazarken kullandığım ve beni yarı yolda bırakmayan on yıllık emektar bilgisayarım Lenovo G510'a da teşekkürlerimi sunmak isterim.

Ender AYDIN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti ... 1
1.2 Tezin Amacı ... 3
1.3 Hipotez ... 3
2 KOMPOZİT MALZEMELER 5
2.1 Giriş ... 5
2.2 Kompozit Malzemelerin Tanımı ... 8
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ... 10
2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ... 14
2.5 Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Kompozit Malzemeler ... 23
3 KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ VE DELME İŞLEMİ 30
3.1 Giriş ... 30
3.2 Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalat Özellikleri ... 31
3.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalatında Karşılaşılan Hatalar ... 34
3.4 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Delik Deliminde Kesme Koşulları ... 36
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR 40
4.1 Giriş ... 40
4.2 Materyal ... 40
4.3 Metod ... 45
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 57
5.1 Deney Analizi ... 57
5.2 Sonuçların İstatiki İncelenmesi ... 80
5.3 Sonuç ... 81

KAYNAKÇA **84**
A DENEY PARAMETRELERİ **88**
B ÖLÇÜM SONUÇLARI **90**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **92**

SİMGE LİSTESİ

Pu	Birim (Özgül) Güç
Mrr	Birim Zamanda Kaldırılan Talaş Miktarı
^{o}C	Celsius Cinsinden Sıcaklık
d	Delik Derinliği
^{o}	Derece
Fn	Devir Başına İlerleme
Fz	Diş Başına İlerleme
n	Dönme Devri
HP	Horse Power
F	İlerleme
f	İlerleme
Fr	İlerleme Hızı
t	İş Parçası Kalınlığı
v	Kesme Hızı
Vc	Kesme Hızı
Pc	Kesme İçin Gerekli Güç
Fc	Kesme Kuvveti
KW	Kilowatt
Rmr	Malzeme Kaldırma Hızı
θ	Matkap Uç Açısı
D	Matkap Uç Çapı
Mm	Milimetre
N	Newton
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
HRC	Rockwell Sertlik Birimi
U	Spesifik (Özgül) Enerji
α	Takım Açısı
Z	Takımdaki Ağız Sayısı
E	Takımın Mekanik Verimi
Pg	Tezgahın İhtiyacı Olan Güç
W	Watt

KISALTMA LİSTESİ

BMC	Bulk Moulding Compound
CFRP	Carbon Fiber-Reinforced Plastic
CNC	Computerized Numerical Control
CBN	Cubic Boron Nitride
DCDP	Deoxycytidine Diphosphate
GFRP	Glass Fiber-Reinforced Plastic
HSS	High Speed Steel
NC	Numerical Control
PAN	Poliakrilonitril
PEI	Polieterimid
PEEK	Polyether Ether Ketone
PUR	Polyurethane
PVA	Polyvinyl Acetate
RRIM	Reinforced Reaction Injection Molding
RTM	Resin Transfer Molding
SEM	Scanning Electron Microscope
SMC	Sheet Moulding Compound
SRIM	Structural Reaction Injection Molding
UV	Ultraviolet

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemelerin karşılaştırması [11] **7**
Şekil 2.2 Orta sınıf araçlarda kompozit malzemeden yapılmış otomobil parçaları [12] **7**
Şekil 2.3 Sürat teknesinde kompozit malzeme kullanımı örneği [13] **7**
Şekil 2.4 Türbin motorlarının kompozitlerden üretilmiş parçaları **8**
Şekil 2.5 Kompozit yapı oluşumu [15] **9**
Şekil 2.6 Dolgu türlerine göre kompozit malzemeler [19] **12**
Şekil 2.7 Kompozit malzeme içerisine elyafların yerleşim şekilleri [14] **14**
Şekil 2.8 El yatırma kalıplama yöntemi [25] **15**
Şekil 2.9 Püskürtme yöntemi [25] **15**
Şekil 2.10 Elyaf sarma yöntemi [24] **16**
Şekil 2.11 Reçine transfer kalıplama yönteminin temsili gösterimi [27] **17**
Şekil 2.12 Reçine transfer kalıplama yöntemi [27] **17**
Şekil 2.13 Vakum yönteminde havanın giriş ve çıkış yönleri [23] **19**
Şekil 2.14 Vakum infüzyon yöntemi [26] **19**
Şekil 2.15 Kalıba reçinenin giriş ve çıkış yaptığı bölümler [22] **19**
Şekil 2.16 Kalıbın içindeki bölümlerin gösterimi [22] **20**
Şekil 2.17 Kalıbın içindeki bölümlerin gösterimi [24] **20**
Şekil 2.18 Sıcak presleme yönteminin temsili gösterimi [27] **21**
Şekil 2.19 Pultrüzyon yönteminin temsili gösterimi [28] **22**
Şekil 2.20 Ekstrüzyon laminasyon yöntemi [29] **22**
Şekil 2.21 Polimer eriyiğinde boyun oluşumu [29] **22**
Şekil 2.22 Airbus A350 XWB modeli bir yolcu uçağında kullanılan malzemelerin sınıflarına göre dağılımı [32] **23**
Şekil 2.23 Boeing 787 model yolcu uçağının gövde kısmında kullanılan malzemelerin sınıflarına göre dağılımı [33] **24**
Şekil 2.24 Sandviç yapılı kompozitlerin yapı bileşenleri [32] **25**
Şekil 2.25 Fiber takviyeli kompozitlerin bileşenleri [27] **26**
Şekil 2.26 E-camı fiber malzemesi [39] **27**
Şekil 2.27 Karbon fiber malzemenin yapısı [34] **27**
Şekil 2.28 Karbon fiber malzeme [35] **28**
Şekil 3.1 Talaş kaldırma esnasında kesici takımın ve iş parçasının etkileşimi [44] **30**
Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin talaşlı imalat parametreleri [48] **32**
Şekil 3.3 Malzemenin delinirken uğradığı delaminasyon [49] **33**

Şekil 3.4 CFRP malzemenin işlenmesini etkileyen faktörlerin gösterimi **34**
Şekil 3.5 Delik delinmesi esnasında delaminasyon oluşumu **35**
Şekil 3.6 Açık delik ve kör delik oluşturulması [44] **37**
Şekil 4.1 Deney aşamasında kullanılan CFRP iş parçası **40**
Şekil 4.2 CFRP malzeme üretim akış şeması **41**
Şekil 4.3 CMS antares 5 eksen işleme merkezi **42**
Şekil 4.4 Tezgah tablasına fikstürleme yapılarak sabitlenmiş iş parçası **44**
Şekil 4.5 Deney akış diyagramı **45**
Şekil 4.6 Tezgaha bağlanan iş parçası üzerinde koordinasyon ayarı yapılması **46**
Şekil 4.7 Deney esnasında iş parçasına kesme sıvısı kullanılarak delik açılması **47**
Şekil 4.8 Deney esnasında iş parçasına delik açılması **48**
Şekil 4.9 Deney esnasında iş parçasına delik açılması **49**
Şekil 4.10 Delik içi yüzey pürüzlülük ölçümü **50**
Şekil 4.11 Delik boyutsal ölçümü **51**
Şekil 4.12 İş Parçası üzerinde açılan deliklerin delaminasyonunun incelenmesi **52**
Şekil 4.13 Numune hazırlama çalışmaları **53**
Şekil 4.14 Numune kesme işlemi **54**
Şekil 4.15 Optik mikroskop üzerinde delaminasyon incelemesine ilişkin görseller **55**
Şekil 4.16 Numune üzerine altın film kaplama işlemi **56**
Şekil 4.17 Numunelerin SEM ile incelenmesi **56**
Şekil 5.1 Tezgah dönme devrinin incelenmesi **58**
Şekil 5.2 Tezgah ilerleme hızının incelenmesi **59**
Şekil 5.3 Kesme sıvısı kullanımının incelenmesi **61**
Şekil 5.4 Takım uç açısının değişimin incelenmesi **62**
Şekil 5.5 İş parçasının solidworks programı üzerinde katı modellemesi **64**
Şekil 5.6 İş parçası üzerinden delaminasyon incelemek üzere parça çıkarılması **65**
Şekil 5.7 9. No'lu deney sonrası delaminasyon gözlemlenen deliğin çevresinin optik mikroskop altında x50 görüntülenmesi **65**
Şekil 5.8 Delik çevresindeki delaminayon etkilerinin incelendiği yüzey **66**
Şekil 5.9 18. no'lu deney sonrası delaminasyon gözlemlenen deliğin çevresinin optik mikroskop altında x50 görüntülenmesi **66**
Şekil 5.10 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x75 büyütmede incelenmesi **68**
Şekil 5.11 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x75 büyütmede incelenmesi **68**
Şekil 5.12 Delik içi delaminayon etkilerinin incelendiği yüzey **69**
Şekil 5.13 Delik içi delaminasyonun x75 büyütmede incelenmesi **69**

Şekil 5.14 Delik içi delaminasyonun x75 büyütmede incelenmesi **70**

Şekil 5.15 Deney no 9'a ait delaminasyon etkilerinin x438 büyütmede SEM ile incelenmesi **72**

Şekil 5.16 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x619 büyütmede SEM ile incelenmesi **72**

Şekil 5.17 Deney no 9'a ait delaminasyon etkilerinin x477büyütmede SEM ile incelenmesi **73**

Şekil 5.18 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x348büyütmede SEM ile incelenmesi **74**

Şekil 5.19 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x181büyütmede SEM ile incelenmesi **74**

Şekil 5.20 Deney no:40'a ait delaminasyon etkilerinin x74büyütmede SEM ile incelenmesi **75**

Şekil 5.21 Deney no:40'a ait delaminasyon etkilerinin x74büyütmede SEM ile incelenmesi **76**

Şekil 5.22 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x58 büyütmede SEM ile incelenmesi **77**

Şekil 5.23 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x74 büyütmede SEM ile incelenmesi **77**

Şekil 5.24 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x74 büyütmede SEM ile incelenmesi **78**

Şekil 5.25 Deney no: 18'e ait delaminasyon etkilerinin x193 büyütmede SEM ile incelenmesi **78**

Şekil 5.26 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x2630 büyütmede SEM ile incelenmesi **79**

Şekil 5.27 Dönme devrinin değişiklik gösterdiği her üçlü gruba ait yüzey pürüzlülüğü sapma grafiği **80**

Şekil 5.28 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm dağılım grafiği **80**

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 CMS antares boyut ve eksen özellikleri **41**
Tablo 4.2 CMS antares spindle ve tabla özellikleri **42**
Tablo 4.3 Deney aşamasında kullanılan kesici takım özellikleri **43**
Tablo 4.4 Ölçüm çeşitleri ve kullanılan ölçüm aletleri **44**
Tablo 4.5 Deney parametreleri **47**
Tablo 5.1 İncelenen ölçüm değerleri **67**
Tablo 5.2 İncelenen ölçüm değerleri **70**
Tablo 5.3 İncelenen ölçüm değerleri **71**
Tablo 5.4 Ölçümlere ait istatiki değerler **81**

ÖZET

Havacılık Endüstrisinde Kullanılan CFRP Kompozit Malzemelerinin Delik Delme Talaşlı İmalat Prosesini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi

Ender AYDIN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yaman ERARSLAN

Bu çalışmada; gün geçtikçe havacılık endüstrisinde sahip olduğu yüksek mekanik özellikleri, hafifliği ve çevresel faktörlere gösterdiği dayanımı nedeniyle kullanımı ve önemi artan CFRP kompozit malzemenin geleneksel talaşlı imalat üretim metodlarından biri olan delik delme işlemi parametreleri ve bu parametrelerin değişiminin iş parçası üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışma esnasında levha şeklinde üretilmiş CFRP kompozit malzeme üzerinde 118^{o} ve 135^{o} ağız açılarına sahip Tungtsen karbür (WC) malzemeden üretilmiş takımlar ile farklı tezgah devirleri, ilerleme hızları ve kesme sıvısının kullanım durumunun değişiklik gösterdiği delikler açılmıştır.

Aynı tezgah üzerinde, aynı fikstürleme metoduyla farklı parametreler uygulanarak açılmış olan deliklerin delik içi yüzey pürüzlülükleri, boyutsal ölçüm değerleri ve nihai iş parçasının uğradığı delaminasyon gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile delik delme işleminde kullanılan takımın sahip olduğu ağız açılarının etkisi, tezgah devrinin ve tezgah ilerleme hızının etkileri CFRP kompozit eassalı malzeme için

optimum delik delme parametreleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, CFRP malzemenin delik kalitesinin, tezgah dönme devrinin artması, takımdaki ağız uç açısının 118^{o} seçilmesi, tezgah ilerlemesinin azalması ve kesme sıvısının kullanılmamasıyla artış gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit Malzemeler, CFRP, CNC Tezgah, Delik Delme, Yüzey Pürüzlülüğü, Delaminasyon

ABSTRACT

Investigation of Parameters Affecting Drilling Machining Process of CFRP Composite Material Used in Aviation Industry

Ender AYDIN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yaman ERARSLAN

In this conducted study, the parameters of the hole drilling process, one of the traditional machining production methods, were investigated, and the effects of these parameters on the workpiece were examined for CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) composite material. The importance and use of CFRP composite material have been increasing in the aviation industry due to its high mechanical properties, lightness, and resistance to environmental factors.

During the study, holes were drilled in CFRP composite material produced in plate form using tools made of Tungsten Carbide (WC) with lip angles of 118^{o} and 135^{o}, with variations in machine spindle speed, feed rates, and the use of cutting fluid.

Holes opened with different parameters applied on the same machine with the same fixturing method were observed for hole interior surface roughness, dimensional measurement values, and delamination occurring in the final workpiece. This study aimed to determine the optimum hole drilling parameters for CFRP composite material, considering the effects of tool geometry, machine spindle speed, and machine feed rate. As a result, it was determined that the

quality of the holes in CFRP material increases with an increase in machine spindle speed, the selection of a tool with a lip angle of 118^{o}, a decrease in machine feed rate, and the absence of cutting fluid.

Keywords: Composite Materials, CFRP, CNC Machine, Drilling, Surface Roughness, Delamination

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Teknolojinin gösterdiği gelişim ile birlikte malzeme alanında da birçok ilerleme yaşanmıştır. Bu gelişmelerden en çok etkilenen malzeme gruplarından biri de kompozit malzemelerdir. Geleneksel malzemelerden farklı olarak kompozitler, tek bir malzemede ender görülen çoklu özelliklere sahip olabilirler. Günümüzde yapılan çalışmalar ile de kompozit malzeme çeşitleri ve bu malzemelerin kullanım alanları gün geçtikçe genişlemektedir. Kompozit malzemeler grubu içerisindeki fiber takviyeli kompozit malzemeler ise sahip oldukları dayanım, sertlik, hafilik, düşük termal genleşme ve yüksek sönümleme gibi mekanik özellikleriyle öne çıkmaktadırlar [1]. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, sahip oldukları bu özellikler ile kendine havacılık endüstrisinde geniş bir alan bulmaktadır. Kompozit malzemeler, genel olarak yüksek maliyetlerine rağmen, hafif ancak yüksek yükleri taşıyacak kadar güçlü olması gereken yüksek performanslı ürünlerde (kuyruk, kanat ve gövde gibi hava araçları, rüzgar türbinleri, tekne, bisiklet çerçeveleri ve yarış araba gövdeleri gibi) popülerlik kazanmıştır. Diğer kullanımlar arasında depolama tankları ve balıkçılık çubukları gibi farklı alanlar da bulunmaktadır. Doğal kompozitler (ahşap ve kumaş gibi), Kuzey Karolina'da 17 Aralık 1903'te Wright Kardeşler'in Flyer 1 uçuşunda, askeri ve sivil hava araçlarında yanı sıra insansız hava araçlarında (UAV'ler), uzay fırlatıcıları, uydular ve güneş yelkenleri gibi daha farklı ve çeşitli uygulamalarda kullanılan insan yapımı kompozit malzemelerin şimdiye kadar kullanıldığı çok çeşitli uygulamalarda bulunmuştur [2].

Kompozit malzemeler, üretilicek nihai malzeme formuna özel tasarlanmış kalıplar üzerinde arzu edilen nihai forma yakın bir formda üretilmiş olur. Kompozit malzemelerin kalıplardan çıkarılmasıyla birlikte ürünlere nihai formlarını vermek ve gerekli bağlantı ekipmanlarını kullanabilmek amacıyla frezeleme, delik delme gibi talaşlı imalat prosesleri uygulanabilmektedir.

Takviyeli kompozit malzemeler, homojen bir yapıya sahip olmadıklarından dolayı çelik malzemeler gibi şekillendirilemezler. Bu nedenle, yüzey durumu ve takım aşınması gibi mekanizmalar açısından homojen çeliklerden farklılık gösterirler

[3]. Malzemenin davranışı, takviye türü, matris/takviye hacim oranı gibi faktörlerin yanı sıra kompozit malzemelerin homojen olmayan ve anizotropik yapısı da talaşlı şekillendirme sürecinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, bu malzemelerin talaşlı şekillendirilebilirliği, kesici takımın aşınma direnci ve geometrisi üzerinde özel talepleri beraberinde getirir. Bu nedenle, kesici takım seçimi, bu mekanizmaları dikkate alarak iyi bir şekilde yapılmalıdır [4]. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek performanslı özelliklere sahip olsalar da, talaşlı imalat işlemleri sırasında bazı zorluklarla karşılaşabilirler. Bu zorluklar arasında delaminasyon (katman ayrılması), fiber fazının ayrılması, matris malzemesinin çatlaması ve takımın hızlı aşınması gibi sorunlar bulunabilir [5]. Bu problemler üretim parçasının mekanik özelliklerini doğrudan etkiler ve parçanın işlevselliğini düşürür. Özellikle parçaların havacılık endüstrisinde, hava aracı üzerinde olduğu düşünüldüğünde ortaya çok tehlikeli ve hayati durumlar çıkabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, CFRP gibi havacılık endüstrisinde kendine geniş bir kullanım alanı bulan bu malzeme çeşidinin talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan delik delme parametrelerinin incelenmesi önemlidir [6].

Bu çalışmada, tamamiyle aynı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip CFRP kompozit iş parçası üzerinde 5 eksenli CNC tezgahta farklı uç açısına sahip takımlar ile, farklı tezgah dönme devirleri ve farklı ilerleme hızları altında, kesme sıvısı kullanılarak ya da kullanılmayarak delikler açılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların ardından malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, boyutsal ölçüm değerleri ve delaminasyona uğrayıp uğramadıkları kullanılan parametreler karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda CFRP kompozit malzemenin delik delimi esnasında tezgah devrinin artışıyla delik içi yüzey pürüzlülüğünün, delaminasyonun ve geometrik sapmaların azaldığı ve bu doğrultuda delik kalitesinin arttığı [7]; tezgah ilerleme hızının artışıyla delik içi yüzey pürüzlülüğün, delaminasyon faktörünün ve geometrik sapmaların arttığı ve bu doğrultuda delik kalitesinin azaldığı belirlenmiştir [8]. Takım uç açı değerinin artışıyla ise delik kalitesinin azaldığı ortaya çıkmıştır [9]. Çalışma esnasında tüm parametreler sabit tutulup kesme sıvısının değişken tutulduğu denemeler gerçekleştirilmiş ve kesme sıvısı kullanıldığında delik içerisinde sıvama gözlenmiş, bu da geometrik sapmalara neden olmuştur. Kesme sıvısı kullanımının delik kalitesini düşürdüğü belirlenmiştir. Ayrıca delaminasyon olduğu belirlenen

deliklerle alakalı optik mikroskop altında incelemeler gerçekleştirilmiş ve iş parçası üzerindeki deformasyon görüntülenmiştir. Literatürde CFRP kompozit malzemelerin talaşlı imalatı ve delik delimiyle alakalı kaynaklar incelendiğinde, bu tez çalışması sonucunda ortaya çıkan sonuçların, literatür ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Literatür özetinde de bahsedildiği gibi CFRP kompozit malzemeler kalıplardan çıkarıldıktan sonra ürünlerin istenen geometriye getirilmesi ya da bağlantı ekipmanlarının görevlerini yerine getirebilmesi amacıyla iş parçası üzerinde frezeleme ve delik delme gibi talaşlı imalat işlemleri uygulanır. Bu işlemler uygulanırken işlenen parça üzerinde delaminasyon, fiber fazının ayrılması ve matriks malzemesinin çatlaması gibi bazı problemlerle karşılaşılabilir. Karşılaşılan bu problemler üretilen parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Bu problemlerin oluşumunun önüne geçebilmek amacıyla CFRP kompozit malzemelerinin delik delme işlemi esnasında belirlenecek parametrelerin seçimi önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında da tezgah ilerlemesi, dönme devri, kesici takım uç açısı ve kesme sıvısı kullanımının ne gibi etkileri olduğunun ortaya koyulması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

CFRP kompozit malzemelerin delik delinmesi esnasında prosesi etkileyen birden fazla parametre vardır. Bu tez çalışmasında aşağıdaki parametrelerin prosese etkileri incelenecektir.

- Takımdaki ağız uç açısı (Z)
- CNC tezgah dönme devri (dev/dk)
- CNC tezgah ilerleme hızı (mm/dk)
- Kesme sıvısı kullanımı

Yukarıda bahsedilen parametre değerlerinin her birinin değişimiyle birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinin değişeceği, boyutsal ölçümlerin farklılık göstereceği ve iş parçası üzerinde delaminasyonun farklılaşacağı yani oluşturulan deliklerin kalitelerinin her birinin farklı parametreler için değişiklik göstereceği öngörülmektedir. Delik kalitesinin, tezgah dönme devrinin artması, takımdaki

ağız uç açısının azalması, ilerleme hızının düşmesi ve kesme sıvısının kullanılmamasıyla artacağı düşünülmektedir.

2
KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Giriş

Teknolojik gelişmelerin, malzeme alanındaki ilerlemelere bağlı olduğu bir gerçektir. Malzeme sektöründe yaşanan gelişimler ile birlikte birçok yeni teknoloji uygulanabilir hale gelmiştir ve bu alanda yaşanan gelişimler ile birlikte de uygulanabilir hale gelmeye devam etmektedir. Ayrıca teknolojik anlamda yaşanan gelişmeler de yeni malzemelerin bulunmasında ve ortaya çıkarılmasında oldukça önem arz etmektedir. Bu her iki kavramdaki olumlu gelişmeler birbirini destekler niteliktedir. Gelişen teknolojiyle birlikte malzeme sınıfları arasındaki en büyük gelişimin kompozit malzemeler sınıfında olduğu söylenebilir [2].

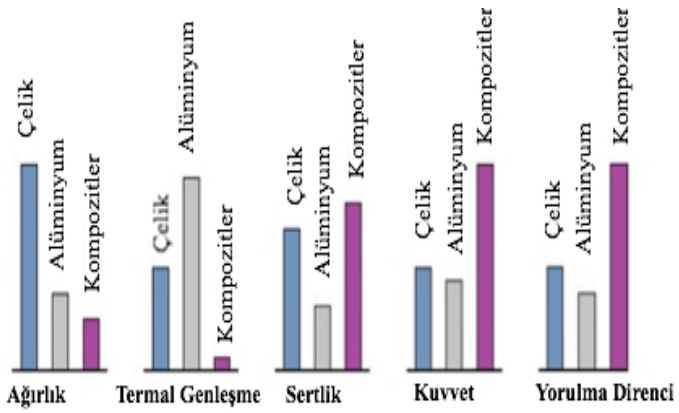
Doğa, kompozit malzemelerin kullanıldığı örneklerle doludur ve bu örneklerin tarihi oldukça eskilere dayanır. İlk defa M.Ö. 1500'lü yıllarda kullanılmaya başlanan kompozit malzemeler, eski Mısırlılar ve Mezopotamyalılar tarafından, çamur ve saman karışımından oluşan kerpiç benzeri malzeme kullanarak daha sağlam ve dayanıklı yapılar inşa etmek için kullanılmıştır. Saman, takviye malzemesi olarak çanak, çömlek ve tekne gibi birçok üründe de kullanılmıştır. Moğollar, M.S. 1200'lü yıllarda kompozit yayı icat etmişlerdir. Sağlam ve hassas yaylar üretmek için, ahşap, kemik ve hayvansal yapıştırıcı malzemeler kullanılarak presleme ve huş ağacı kabuğu ile sarılma yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, yapılan malzemelerin dayanıklılığını artırarak sağlam ve hassas yaylar elde etmeyi sağlamıştır. Bu yaylar, barutun icadına kadar en güçlü silah olarak kullanılmış ve Moğolların büyük askeri üstünlük sağlamasına neden olmuştur. Modern kompozit malzeme üretimi, bilim adamlarının plastik malzemeleri geliştirmesi ile başlamıştır. Vinil, polistiren, fenolik ve polyester gibi plastikler ise 1900'lü yılların başlarında geliştirilmiştir [10].

20. Yüzyılın ortasından sonra Dünya'da yaşanan teknoloji rekabeti ile birlikte daha sert, daha güçlü, ancak daha hafif olan malzemeler için artan bir talep ortaya çıkmıştır. Özellikle bu tür malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesi inşaat, otomotiv, uzay ve havacılık alanlarında bir çok sorunun çözümü ve farklı birçok tasarımın da hayata geçirilebileceği anlamına gelmektedir. Geleneksel metal malzemelerin gelişiminin yavaşlaması ile birlikte çalışmalar kompozit ve seramik

malzemelerde yoğunlaştırılmış ve bu çalışmaların sonucunda da günümüzde birçok alanda kullanılan ileri seramiklerin ve kompozit malzemelerin bulunmasıyla çalışmalar olumlu sonuçlar vermiştir ve vermeye devam etmektedir.

Kompozit malzeme alanında yaşanan bu olumlu gelişmeler ile birlikte kompozitlerin sağladığı yüksek mekanik özellikler ve bu özelliklerin yanında sahip olduğu düşük özgün ağırlık değerleri kompozit malzemeleri havacılık ve uzay sanayisinde şu an günümüzde en çok kullanılan malzeme gruplardan biri haline getirmiştir. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelerin tek bileşenler tarafından ulaşamadığı performans değerlerine, farklı malzeme gruplarının kombinlenerek ulaşmasıyla ve bu kombinasyonların gelişime çok fazla açık olması sebebiyle tüm sektörlerde özellikle de havacılık ve uzay sektöründe çok değerlidir. Ayrıca kompozit malzemeler esnek bir tasarım avantajını da sunarlar; Yani, prensip olarak, kompozit malzeme istenen optimum bir tasarımın özelliklerine göre özelleştirebilir. Bu, ilk bakışta göründüğünden çok daha güçlü bir ifadedir. Bu, bir havacılık yapısının, bir otomobilin, bir teknenin ya da bir elektrik motorunun en etkili tasarımı göz önünde bulundurulduğunda, ihtiyacı karşılayan bir kompozit malzeme yapılabileceği anlamına gelir. Schier ve Juergens 1983 yılında yaptıkları çalışmada kompozitlerin savaş uçağı üzerindeki tasarım etkisi üzerine çalışmıştır. Bu yazarlara göre, "kompozitler, tasarım mühendisliği için olağanüstü bir akışkanlık yaratmış, bu da tasarım analistini her uygulama için farklı bir malzeme yaratmaya zorlayarak ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlamıştır [6]."

Deutsch 1978 yılında alüminyum ve çelik gibi geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemeler arasında Şekil 2.1'de gösterildiği üzere bir karşılaştırma yapmıştır [11]. Bu karşılaştırma, kompozit malzemeler kullanılarak geleneksel malzemeler üzerinde elde edilebilecek iyileştirme imkanlarını göstermektedir. Kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş olan parçalarla alakalı örnek görseller Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de verilmiştir.



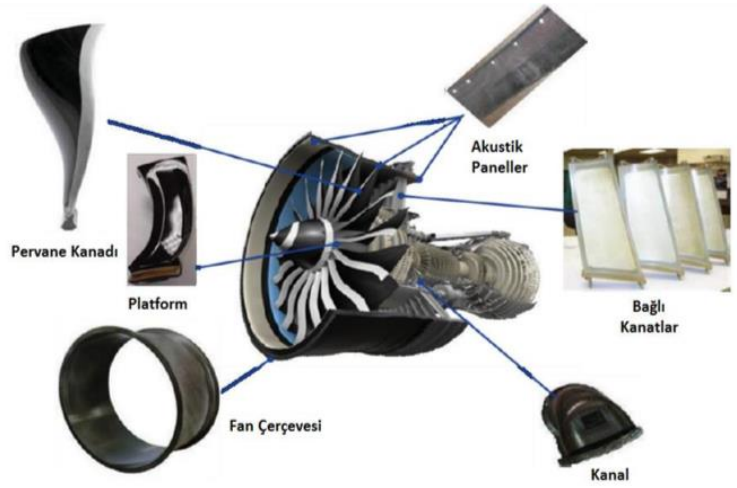
Şekil 2.1 Geleneksel monolitik malzemeler ile kompozit malzemelerin karşılaştırması [11]



Şekil 2.2 Orta sınıf araçlarda kompozit malzemeden yapılmış otomobil parçaları [12]



Şekil 2.3 Sürat teknesinde kompozit malzeme kullanımı örneği [13]



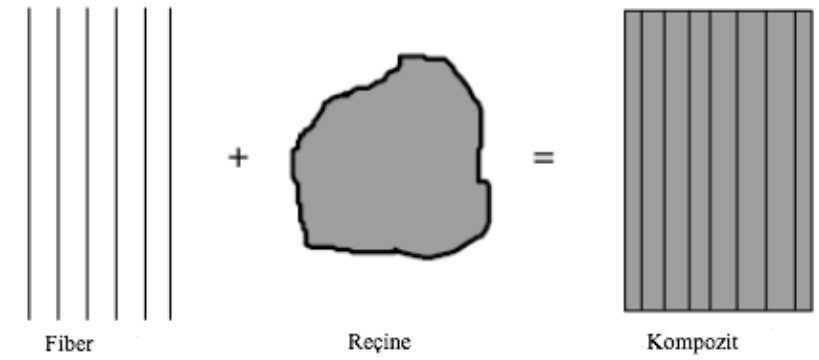
Şekil 2.4 Türbin motorlarının kompozitlerden üretilmiş parçaları

2.2 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzemeler, istenilen özellikleri sağlamak için bir araya getirilen en az iki bileşenin oluşturduğu yapılardır ve birbirleriyle çözünmeyen bileşenleri içerirler. Bu yapı, takviye elemanları ve matrisin uygun şartlarda birleştirilmesiyle oluşur. Kompozit malzemeler genellikle düşük mukavemetli, düşük elastisite modülüne sahip matrisler ve daha az miktarda takviye elemanlarından oluşur. Homojen yapıya sahip alaşımlar, her noktada aynı özellikleri gösterirken, kompozit malzemeler heterojen özelliklere sahiptir ve matris fazı sayesinde homojen yapı özellikleri gösterirler. Kompozit malzemeler, bileşen malzemelerin kendi özellikleri dışında amaçlanan ve istenen yeni özellikleri de barındırabilirler, bu da onların çeşitli uygulama alanlarında kullanılmasını sağlar.

Kompozit malzemeler, istenilen niteliklere sahip yeni bir malzeme oluşturmak için bir araya getirilen, pratik olarak birbiri içinde çözünmeyen en az iki bileşenin bir araya getirilmesiyle yapılan yapılardır. Takviye elemanları (lifler, partiküller, tabakalar) ve bu elemanları bir arada tutan matris, belirli fiziksel ve kimyasal koşullar altında bir araya getirildiğinde kompozit malzeme oluşur. Şekil 2.5'de basitçe kompozit malzeme oluşumu anlatılmaktadır. Kompozit malzemeler genellikle düşük mukavemetli ve düşük elastisite modüllü reçine (matris) ve daha az miktarda takviye elemanının (örneğin fiberler) yapı içerisine dağıtılmasıyla oluşturulur. Kompozit malzemeler, homojen yapıya sahip alaşımların aksine atomik veya moleküler düzeyde homojen değildir, bu nedenle heterojen özelliklere sahiptirler. Ancak matris fazı sayesinde homojen yapı özellikleri

gösterirler ve bileşen malzemelerin kendi özelliklerinin yanı sıra amaçlanan ve istenen yeni özellikleri de gösterebilirler. Bu özellikler arasında korozyon direnci, yüksek mukavemet, rijitlik, hafiflik, tasarım kolaylığı, boyutsal stabilite, kimyasal direnç ve çeşitli kullanım yerlerine özgü özellikler (örneğin UV dayanımı, ısı ve ses yalıtımı) bulunur. Kompozit malzemeler, metal ve alaşımlarıyla karşılaştırıldığında daha hafif olmaları nedeniyle tercih edilirler. Ayrıca eşit ağırlıktaki bir kompozit malzeme, metal malzemelere göre daha yüksek bir mukavemet değerine sahip olabilir. Kuvvet yönüne paralel tasarlanan aramid-karbon fiber kompozitler, çelik ve alaşımlara göre daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Kuvvet yönüne paralel grafit-epoksi kompozitler ise çelik ve alüminyuma kıyasla 3,5-5 kat daha yüksek çekme dayanımına sahiptirler [14].



Şekil 2.5 Kompozit yapı oluşumu [15]

Kompozit malzemelerin özellikleri, kullanılacakları yer ve çalışma koşullarına bağlı olarak özelleştirilebilir. Bu özelliklerin artırılması veya azaltılması, takviye elemanları, matris malzemeleri ve yapısal tasarımları değiştirerek yapılabilir. Kompozit malzemeler, karmaşık şekilli parçaların tek seferde üretilmesine olanak tanıdığı için talaşlı imalata gerek kalmadan üretilebilirler. Bu da daha az enerji ve iş gücü kullanımı anlamına gelir. Ayrıca, kompozit malzemelerin parça sayısında azalma sağlaması, montaj süresini azaltır ve son ürünün daha hafif olmasına olanak tanır.

Kompozit malzemelerin avantajları arasında, farklı bileşenlerin sinerjik etkisiyle malzeme özelliklerinde iyileşme sağlanabilmesi de bulunmaktadır. Örneğin, lifler matris içerisinde yorulma çatlaklarını durdurma görevi görürken, kompozit

malzemenin yorulma performansını da iyileştirebilir. Bu sayede, kompozit malzemelerin dayanıklılığı ve ömrü artırılabilir [16].

Kompozit malzemelerin nihai ürün kalitesi, üretim esnasında kullanılan malzemelerin teknolojik özellikleri, seçilen üretim yöntemleri ve üretim esnasındaki proses parametreleri ile doğru orantılı olarak olumlu ya da olumsuz oranda değişmektedir. Bu nedenle, standartlaştırılmış bir kaliteden bahsetmek zordur ve tekrarlanabilirlik, en büyük problemlerden biridir. Elle yatırma, püskürtme gibi bazı prosesler ve imalat yöntemleri ile aynı kalitenin yakalanması zor olabilir. Her uygulama için optimum malzeme özellikleri farklılık gösterebilir. Ancak, kompozit malzemeler müşteri isteklerine göre uyarlanabildiği için kullanıcılara büyük avantajlar sağlar. Malzemelerin farklı kombinasyonlarından daha fazlası, her bir tabakanın yerleştirilmesi sırasındaki yönelim açısı ve istiflenme sırası gibi faktörler, genel laminat yapının malzeme özelliklerini değiştirebilir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin imalatı ve uygulaması karmaşık bir süreçtir ve uzmanlık gerektirir.

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler açıklandığı üzere, matris ve matrisi bir arada tutan fiber malzemelerden oluşur. İçerisinde pek çok farklı malzeme çeşidini takviye ve fiber malzemesi olarak barındırabilen kompozit malzemelerin sınıflandırılması çok çeşitli yapılabilir. Fakat bu çalışmada pek çok çalışmada da olduğu gibi yaygın sınıflandırma çeşitleri olan matris ve fiber malzemelerine göre kompozit malzemeler sınıflandırılacaktır.

- Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma
- Takviye Elemanına Göre Sınıflandırma

2.3.1 Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma

Kompozit malzemeler matris malzemelerine göre şu şekilde sınıflandırılır;

2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler

Kompozitler, çeşitli metal ve metal alaşımlarının ana malzemeleri olduğu malzemelerdir. Bu malzemelerde, ikinci faz olarak kullanılan takviyeler, farklı geometrik şekillere sahip olabilir ve metal esaslı yapıya gömülüdürler. Metal esaslı malzemeler, takviye malzemesine bağlı olarak üstün özelliklere sahip

olabilirler. Bu malzemeler, seramiklerin yüksek elastiklik modülü özellikleri ile metallerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin bir araya getirilmesiyle üretilerek, yüksek gerilme mukavemetine ve aşınmaya dayanıklı özelliklere sahip olabilirler [17].

2.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklık değerlerinde gösterdiği dayanım ve hafif oldukları için (yoğunlukları 1,6-3,2 gr/cm3 arasında değişebilir) oldukça kullanışlıdır. Yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için kullanılan seramik esaslı kompozit malzemeler, sert ve kırılgan oldukları için süneklik değerleri kötüdür ve iyi tokluk değerlerine sahiptir. Ayrıca sıcaklık değişimlerinden etkilenir ve termal şoklara karşı iyi dayanım göstermezler. Bu nedenle, çoğunlukla liflerle takviye edilirler. Ancak, seramik kompozitler yüksek elastiklik modülüne sahiptir ve çok yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. Yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanıklılık gösterirken, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca, elektriksel iletkenlik değerleri çok düşüktür ve yalıtkan olarak kullanılırlar [17].

2.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Petrokimya esaslı ürünlerin çoğunluğunu oluşturarak günümüzde en yaygın kullanım alanına sahip olan malzemeler, polimerik kompozitlerdir. Bu malzemeler, korozyona dirençli olmalarının yanı sıra uzun süreli kullanıma uygun, işlenmesi kolay, şekillendirilebilir ve birim kütle başına yük kapasitesi yüksektirler. Polimer matrisli kompozitler, termoset ve termoplastik matrisli kompozitler olmak üzere iki gruba ayrılır [17].

- **Termoset Matrisli Kompozitler**

Lif takviyeli kompozit yapımında daha fazla kullanılan malzemeler, sıvı halde bulunan ve katılaştırıcı ilavesiyle önce jel haline gelen ve sonrasında katılaşan malzemelerdir. Bu malzemelerin genellikle düşük viskoziteleri tercih edilir. Termoset reçineler izotropiktir, yani yönüne bağlı olmayan özelliklere sahiptirler. Poliamidler, plastikler arasında şekil verilebilir ve ısıya karşı en yüksek direnç gösteren polimerlerdir [17].

- **Termoplastik Matrisli Kompozitler**

Termoplastik malzemeler sünektir ve ısı ile fiziksel hali değişebilir, soğutma işlemi ile tekrar katılaştırılırlar. Bu sayede bu malzemelere tekrar şekillendirilebilir ve tekrar tekrar kullanılabilir. Termoplastikler amorf veya yarı kristalin yapıda olabilirler. Amorf termoplastiklerde moleküller gelişigüzel düzenlenmiş bir yapıdadır. Kristalin termoplastiklerde ise moleküller sıkı paketlenmiş ve düzenli bir yapıdadır [17].

2.3.2 Takviye Malzemesine Göre Sınıflandırma

Kompozit malzemeler takviye malzemelerine çeşitli şekilde sınıflandırılabilir fakat bu çalışmada fiber takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olarak dört sınıfta incelenecektir [18]. Dolgu türüne ait sınıflandırma Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Dolgu türlerine göre kompozit malzemeler [19]

2.3.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

Kompozit malzemelerde, ince elyaflar matris yapıda bulunarak bir yapı oluşturur. Elyafın matris içindeki konumu, kompozit yapının mukavemeti için kritik bir unsurdur. Uzun elyaf takviyeleri doğrusal şekilde ve kesişmeyecek şekilde yerleştirildiğinde, elyafın doğrultusu boyunca yüksek mukavemet sağlanır. Bu şekilde takviye edilen kompozit malzemeler, uzunlamasına yükler altında daha dayanıklı olabilirler. Ancak, elyafa dik doğrultuda mukavemet düşük olabilir çünkü takviye elyafları arasında düşük bağlantı veya etkisiz bir matriks malzemesi bulunabilir. Bu nedenle, elyafa dik doğrultuda mukavemet gerektiren uygulamalarda ek önlemler veya farklı takviye yöntemleri kullanılması gerekebilir. İki boyutlu konumlandırılmış ve yapıyı oluşturan elyaf takviyeleri,

her iki zıt kutbunda da de eşit mukavemet sağlar. Kısa elyaflar ise homojen dağılmış matris yapıda kullanılarak izotrop bir yapı oluşturulabilir. Elyafın mukavemeti, kompozit yapının mukavemeti için önemlidir ve elyafın uzunluk/çap değeri yükseldikçe, matris tarafından olan elyafın üzerindeki yük miktarı artar. Elyafın yapısındaki hatalar da mukavemet açısından önemlidir [20]. Ayrıca kompozit malzeme içerisindeki elyafların yönelimleri ve dağılımları önem arz etmektedir, bu elyafların yer alabileceği şekiller Şekil 2.7‟de yer almaktadır.

2.3.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir malzeme matrisi, içinde başka bir malzemenin parçacıkları bulunarak oluşturulur ve izotropik bir yapıya sahiptir. Bu yapıdaki mukavemet, parçacıkların sertliği ile belirlenir. En yaygın örnek, plastik matris içindeki metal parçacıklardır; metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matrisli yapılar, seramik parçacıklar içeren yapılar kadar sert değillerdir ve yüksek sıcaklık 11 dayanımı sağlamazlar. Seramik parçacıklar içeren yapılar ise, sahip oldukları yüksek mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle özellikle havacılık sektöründe uçak motoru parçalarının üretiminde tercih edilirler [21].

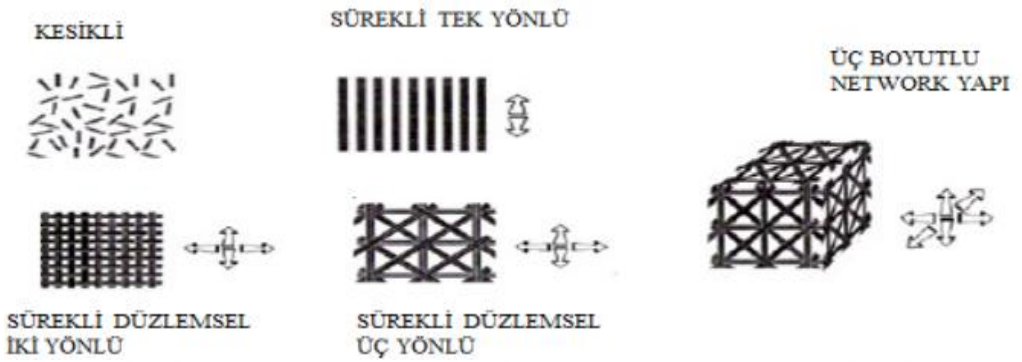
2.3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit yapılar, çeşitli elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bir araya gelmesiyle oluşan ve çok yüksek mukavemet değerleri sağlayan yapı tipleridir. Isı ve neme dayanıklı özelliklere sahip oldukları için tercih edilirler ve metallere göre daha hafif ve aynı zamanda mukavemetlidirler. Uçak yapısal parçalarında, kanat flap ve kuyruk grubunda yüzeyi kaplayacak ve esas malzemeyi koruyacak yapı olarak sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler yaygın bir şekilde kullanılır. Sandviç yapılar ise, düşük yoğunluk değerine sahip bir çekirdek malzemenin üstünde ve altında daha mukavemetli levhaların yapıştırılmasıyla oluşan, yük taşımayan ve sadece yalıtım özelliği olan yapı tipleridir. Tabakalı kompozit malzemelerin bir örneğidir ve uçak yapılarında sıklıkla kullanılırlar [22].

2.3.2.4 Karma Kompozitler

Bir kompozit yapıda iki veya daha fazla farklı elyaf türünün bir araya gelmesiyle oluşan yapılar karma kompozitler olarak adlandırılır. Bu alanda yeni kompozit yapıların geliştirilmesi mümkündür. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaf iken, basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ama iyi bir

basma mukavemeti olan bir elyaf türüdür. Bu iki farklı elyafın bir araya gelmesiyle oluşan karma kompozit yapılarda, tokluk grafit kompozitine göre daha iyi olabilir, maliyeti düşük olabilir ve basma mukavemeti de kevlar elyaf kompozitine göre daha yüksek olabilir [23].



Şekil 2.7 Kompozit malzeme içerisine elyafların yerleşim şekilleri [14]

2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri açık kalıplama ve kapalı kalıplama olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu iki grup arasındaki belirgin fark reçinelerin ve elyaf takviyelerin malzemelerin havaya maruz kalıp kalmamasıdır.

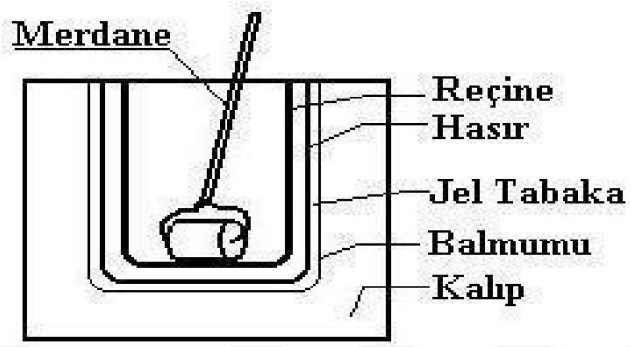
2.4.1 Açık Kalıplama Üretim Yöntemleri

Açık kalıplamada, ham maddeler (reçineler ve elyaf takviyeleri) sertleşirken havaya maruz kalır. Açık kalıplama üretim metodları için; elle yatırma, püskürtme ve filament sarma örnek verilebilir.

2.4.1.1 Elle Yatırma Yöntemi

Günümüzde kullanılan en basit üretim yöntemlerinden biridir ve Şekil 2.8'de görsel olarak özetlenmiştir. Elyafın keçe veya dokuma biçimli halinin önceden hazırlanan kalıp içine yerleştirilmesi ve ardından basit el aletleriyle reçine matrisinin elyafın üzerine sürülmesi olarak açıklanabilir. Bu yöntemde, kalınlık istenen seviyeye ulaşıncaya kadar bu işlem tekrarlanır ve böylece tabakalı kompozit üretilir. Bu yöntem için polyester ve epoksiler en uygun reçinelerdir. Reçineler, tutuşmayı önlemek, hafiflik sağlamak ve estetik görünümü artırmak gibi nedenlerle değişik dolgu maddeleri ile modifiye edilebilir. Ayrıca, reçinelerin kalıplardan kolayca çıkması için polivinil alkol (PVA), silikon, mineral yağlar ve balmumu gibi kalıp ayırıcılar kullanılır. Elyaf reçine oranı %30'a kadar olan

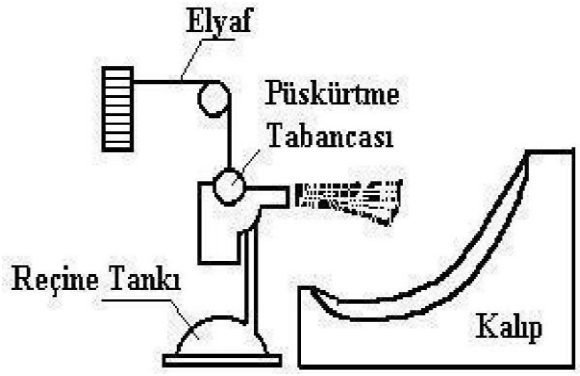
kompozitler üretilebilir, daha yüksek elyaf hacim oranı için prepregler kullanılır. Prepregler, polimer reçine emdirilmiş ve sürekli elyaftan oluşan aynı zamanda da tamamen kurutulmamış kompozitlerdir. Prepregler özellikle uçak ve uzay sanayiinde kullanılır ve yüksek maliyetleri nedeniyle sadece az sayıda parça ve prototip üretiminde kullanılırlar [24].



Şekil 2.8 El yatırma kalıplama yöntemi [25]

2.4.1.2 Püskürtme Yöntemi

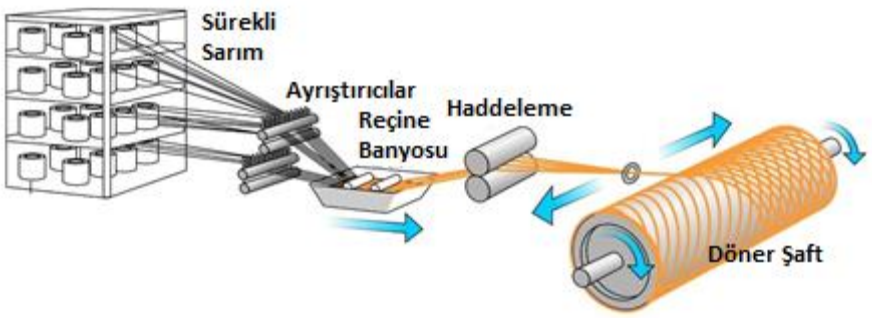
Daha verimli ve yükske miktarda ürün elde etmek amacıyla kullanılan bir yöntem olan püskürtmeli kalıplama, el yatırma yönteminin makinalaşmış halidir ve Şekil 2.9'da görsel olarak özetlenmiştir. Bu yöntemde, kırpılmış elyaf ve reçine karışımı bir püskürtme tabancası yardımıyla kalıba püskürtülerek kalıbın şeklini alması sağlanır. Püskürtme işlemi yüzeye dik olarak yapılmalı ve malzeme israfı önlenmelidir. Püskürtme sonrası, reçine içindeki havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek için rulolama uygulanır. Bu yöntem, oto kaportaları, kayıklar, küvetler ve yüzme havuzlarının iç yüzeylerinin kaplanmasında kullanılır [24].



Şekil 2.9 Püskürtme yöntemi [25]

2.4.1.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, elyafın reçine banyosuna daldırılmasının ardından, üzerine ayırıcı sürülmüş kalıp arasında iki punta arasında döndürülerek sarılması işlemidir ve Şekil 2.10'da görsel olarak özetlenmiştir.. Bu yöntem, silindirik kaplar, silolar, basınçlı kaplar, güç iletim şaftları ve roket motor kasaları gibi ürünlerin üretiminde sıklıkla kullanılır [26]. Bu yöntem, daha yüksek kalite ve mukavemet özelliklerine sahip ürünlerin üretimini mümkün kılar. Mandrel üzerine elyaf sarılması yöntemi kullanıldığı için iç yüzeyi pürüzsüz parçalar üretmek mümkündür. Bu yöntemde polyester, epoksi, silikon gibi farklı reçineler kullanılabilir. Kuru sarma ve yaş sarma olmak üzere iki farklı imalat çeşidi vardır. Ayrıca kalıp üzerine lifler kalıp üzerine düzlemsel ve helisel formlarda çeşitli şekillerde sarılabilirler [14].



Şekil 2.10 Elyaf sarma yöntemi [24]

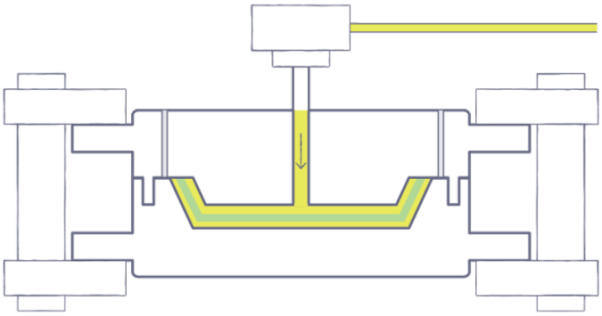
2.4.2 Kapalı Kalıplama Üretim Yöntemleri

Kapalı kalıplama yöntemi, lifler ve reçinelerin bir vakum torbası veya iki taraflı bir kalıp içinde kürlenmesini sağlar. Bu yöntem genellikle büyük üretim tesislerinde kullanılır ve otomatiktir. Özel ekipman gerektirir ve yılda 500.000 parçaya kadar büyük hacimlerde malzeme üretmek için kullanılır.

2.4.2.1 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi (RTM)

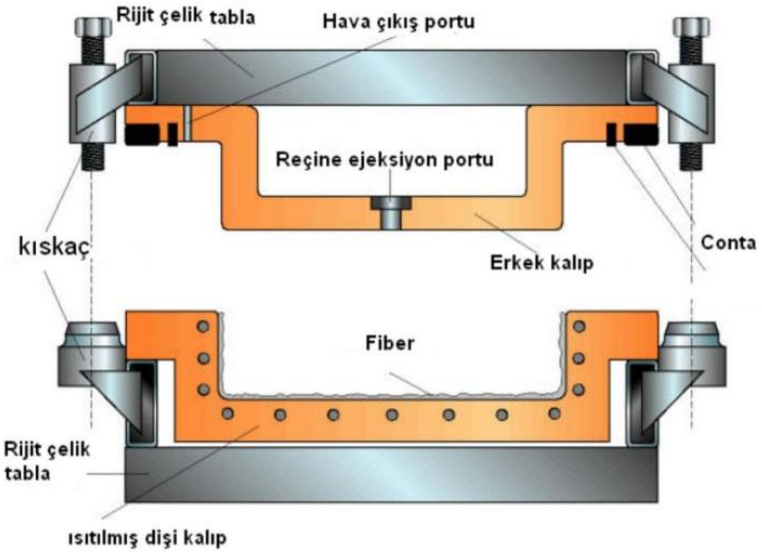
RTM, birçok endüstride kullanılan popüler bir kalıplama yöntemidir. Özellikle, otomotiv, denizcilik ve havacılık gibi sektörlerde sıklıkla kullanılır. Bu yöntem, üretim sürecinde malzeme ve işçilik maliyetlerini azaltmak için tasarlanmıştır. Tasarım görseli Şekil 2.11'de yer almaktadır.

RTM, yüksek mukavemetli, hafif ve kompleks şekillere sahip parçaların üretiminde oldukça etkilidir. Bu yöntem, özellikle karbon fiber ve cam elyafı gibi yüksek mukavemetli takviye malzemeleri kullanılarak üretilen parçalarda sıklıkla tercih edilir [16].



Şekil 2.11 Reçine transfer kalıplama yönteminin temsili gösterimi [27]

RTM işlemi, kalıp kapalı olduğunda, önceden hazırlanmış takviye malzemeleri (elyaf) kalıbın içine yerleştirilir. Daha sonra, reçine enjeksiyonu yapmak için özel bir enjeksiyon sistemi kullanılır. Bu sistem, vakumla çalışan bir pompa ve basınçlı bir rezervuardan oluşur. Rezervuardaki reçine, pompa tarafından vakumla çekilir ve takviye malzemesinin üzerine enjekte edilir [24].



Şekil 2.12 Reçine transfer kalıplama yöntemi [27]

RTM işlemi, diğer kapalı kalıplama yöntemlerine göre daha az reçine kullanır ve malzeme israfını azaltır. Bu yöntem, daha az işçilik gerektirdiği için diğer yöntemlere göre daha hızlı ve ekonomiktir. Ayrıca, kalıplama sürecinde reçine

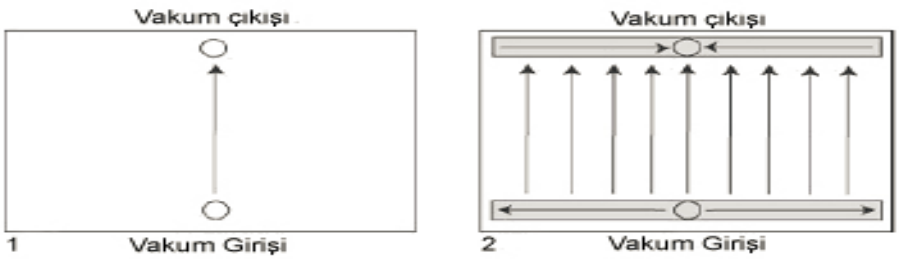
basıncı kontrol edilebilir [17], bu da üretilen parçaların daha yüksek kaliteli ve homojen olmasını sağlar**.** Kalıbın şematik gösterimi Şekil 2.12'de yer almaktadır.

RTM yönteminin en büyük sorunu, kuru bölgelerin oluşmasıdır. Bu nedenle, kalıp çevresine conta yerleştirilerek sızdırmazlık sağlanır. Hava vanaları, contaya yakın bölgelerde bulunarak reçine firesini azaltmak ve hava çıkışını sağlamak için kullanılır. Hava kanallarına vakum uygulayarak, takviye malzemesindeki havanın çıkarılması ile reçine akışı daha düzgün hale getirilir ve kuru bölgelerin oluşması engellenir. Vakum ayrıca, kalıbın daha hızlı dolmasını da sağlar [14].

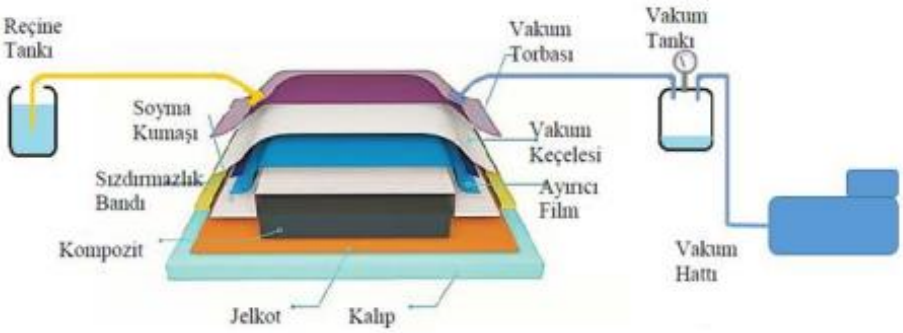
2.4.2.2 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, dünya genelinde farklı sanayi dallarında kullanılan bir kompozit imalat yöntemidir. Bu yöntem, reçinenin vakumlu ortamda ilerlemesi prensibiyle çalışır ve ürünün el değmeden üretilmesi hedeflenir. Reçinenin uygun viskoziteye sahip olması, karmaşık yapıya sahip kompozit elemanların üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemde önemlidir. Özellikle uzun akış yollarına sahip bölgelerde, reçinenin elyaflara mümkün olan en kısa sürede emdirilmesi gerekmektedir. Vakum içerisindeki havanın akışı Şekil 2.13'te yer almaktadır. Reçinenin kalıp içerisindeki akışı, reçinenin düşük viskoziteye sahip olmasıyla sağlanabilir. Ayrıca, dar aralık ölçüleri olan bölgelerde de aynı hızlı emdirme işlemi gereklidir [18].

Infüzyon yöntemi, genel olarak aynı sistemi takip etmekle birlikte uygulama yöntemleri farklılık gösterebilir. Bu yöntemin genel tanımı, kapalı bir ortamda reçinenin vakum deliğine doğru ilerlemesi olarak tanımlanabilir. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi, bu yöntemde takviye malzemesi, kalıp üzerinde bir vakum torbası ile kaplanır ve vakum torbası altındaki çevreleyici bantların bir conta oluşturması sağlanır. Ardından, vakum deliği açılır ve vakum pompa sistemi yardımıyla hava çıkarılır. Bu sayede, reçine enjeksiyonu yapılacak vakum deliği açılır ve reçine enjekte edilir. Reçine, vakum pompa sistemi yardımıyla vakum deliğine doğru ilerleyerek takviye malzemesine emdirilir.

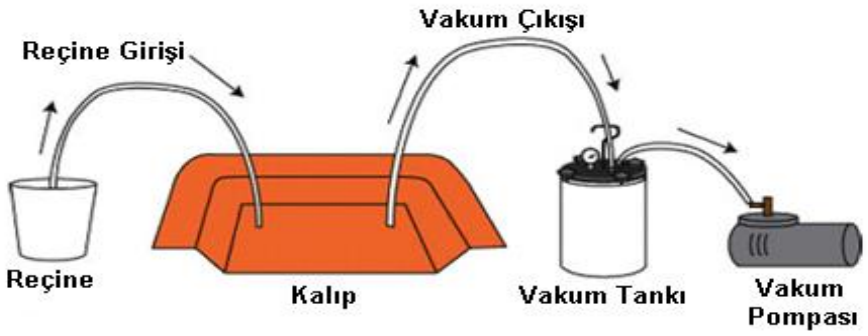


Şekil 2.13 Vakum yönteminde havanın giriş ve çıkış yönleri [23]



Şekil 2.14 Vakum infüzyon yöntemi [26]

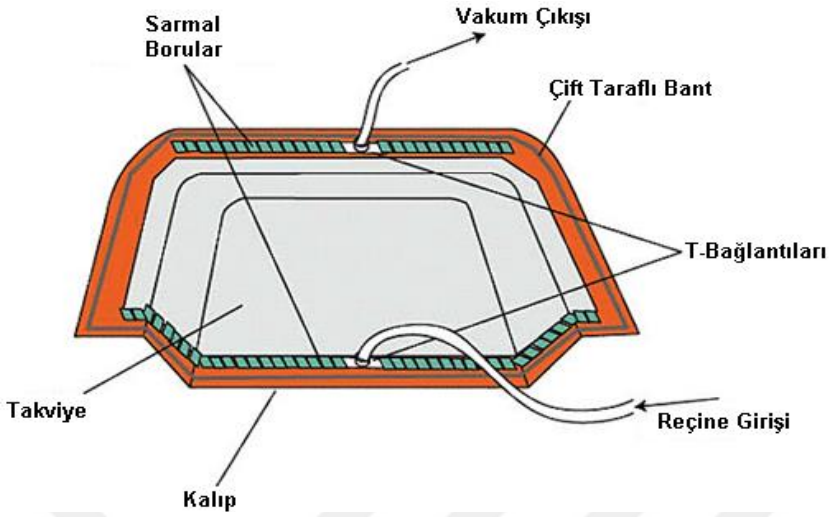
İnfüzyon yöntemi genel olarak dört bölümden oluşur ve bu bölümlerin bağlantıları ve şekilleri uygulamaya göre farklılık gösterebilir. Ancak genel sistem mantığı, kapalı bir ortamda reçinenin vakum deliğine doğru ilerletilmesi prensibine dayanır [17].



Şekil 2.15 Kalıba reçinenin giriş ve çıkış yaptığı bölümler [22]

İki farklı tür vakum infüzyon yöntemi bulunmaktadır ve bu yöntemler arasındaki fark, reçinenin kalıba nasıl verildiğinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.15'de, çevresi vakumlanmış ve tam ortadan reçine verilen bir ürün imalatı resmedilmiştir. Şekil 2.16'da ise aynı ürün farklı bir yöntemle üretilmektedir. Bu

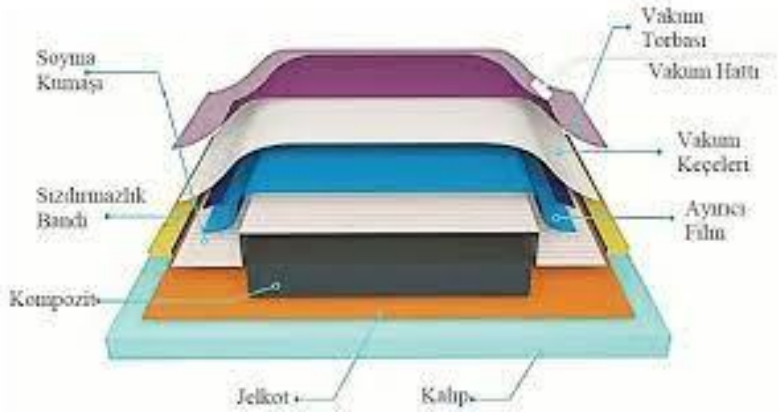
kez, vakum ve reçine zıt yönlerde karşılıklı yerleştirilmiş ve istenen parçanın imalatı bu şekilde gerçekleştirilmektedir [17].



Şekil 2.16 Kalıbın içindeki bölümlerin gösterimi [22]

2.4.2.3 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbası yöntemi, ıslatılmış elyafların veya prepreglerin vakum altında sertleşmesi prensibine dayanan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, kompozit yapı içindeki fazla reçine ve hava boşluklarının çıkarılmasını ve yüksek elyaf oranlı bir ürün elde edilmesini amaçlamaktadır. Oluşturulmaya çalışılan kalıbın şematik hali Şekil 2.17'de yer almaktadır.



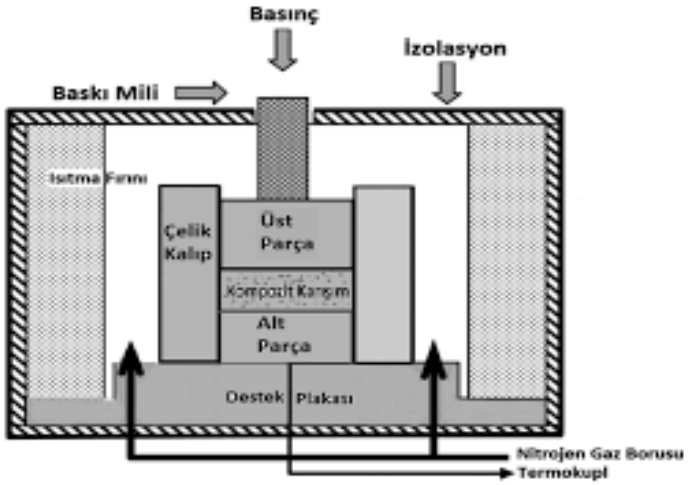
Şekil 2.17 Kalıbın içindeki bölümlerin gösterimi [24]

Prepreg ürünler vakum torbası kullanılarak sertleşebileceği gibi, otoklav adı verilen özel basınçlı makinelerde de sertleştirilebilir. Otoklavda uygulanan ısı, basınç ve vakum etkisi sayesinde, hava boşluğu olmayan daha dayanıklı kompozit parçalar elde edilebilir [18].

Vakum torbalama yöntemi, genellikle elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile birlikte kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca, kompozit malzeme tamiri gibi işlemlerde de bu yöntem kullanılabilir [21].

2.4.2.4 Sıcak Presleme Yöntemi (SMC-BMC-Prepreg) Yöntemi

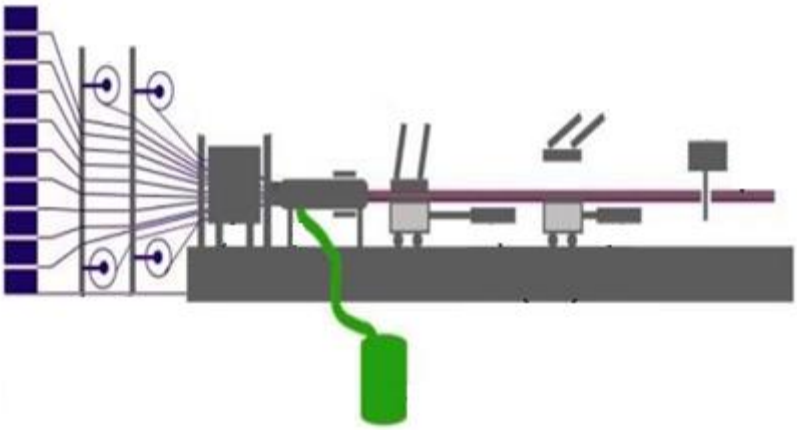
Hazır kalıplama bileşenlerinin seri üretimine uygun bir yöntem olduğu, bu yöntemde bileşenlerin metal kalıplarda preslenerek ısı ve basınç etkisiyle sertleştirildiği belirtilmiştir [19]. Temsili gösterimi Şekil 2.18'de yer almaktadır.



Şekil 2.18 Sıcak presleme yönteminin temsili gösterimi [27]

2.4.2.5 Pultrüzyon Yöntemi

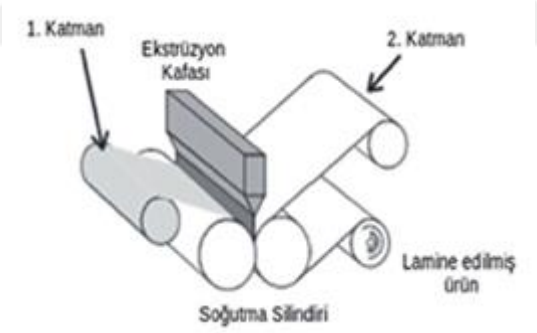
Sürekli profil, boru gibi kompozit ürünlerin üretimi için kullanılan bir yöntem, pull ve extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Bu yöntemde, reçineden geçirilmiş elyaflar veya kumaşlar sıcak kalıplardan geçirilerek şekillendirilir ve sertleştirilmek için beklemeye alınır. Sonrasında, ürün belirli boyutlarda kesilene kadar makine hattı boyunca çekilir [20]**.** Temsili gösterimi Şekil 2.19'da yer almaktadır.



Şekil 2.19 Pultrüzyon yönteminin temsili gösterimi [28]

2.4.2.6 Sürekli Laminasyon Yöntemi

Özel laminasyon makinelerinde elyaf takviyeli reçinenin sıcak preslenmesi ve hızlı sertleştirilmesiyle, bobinlere sarılarak veya kesilerek elyaf takviyeli kompozit paneller üretimi sağlanır [24]. Temsili gösterimi Şekil 2.20 ve 2.21'de yer almaktadır.



Şekil 2.20 Ekstrüzyon laminasyon yöntemi [29]



Şekil 2.21 Polimer eriyiğinde boyun oluşumu [29]

2.4.2.7 Reaksiyonlu Üretim (RRIM, SRIM)

Poliüretan (PUR) ve disiklopentadien (DCPD) gibi reaktif bileşenlerin karıştırılarak kalıp boşluğuna enjekte edilmesi ve burada reaksiyon sonucu sertleşmesi esasına dayalı bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, yüksek mukavemet ve hafiflik özellikleri gerektiren ürünlerin seri üretimi için sıklıkla kullanılır [21].

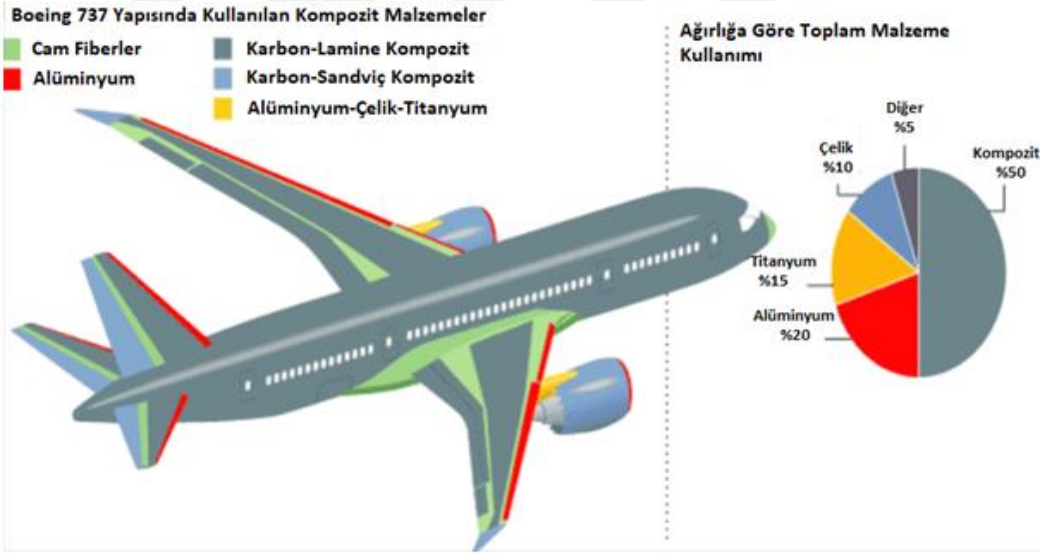
2.5 Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Kompozit Malzemeler

Uçaklar, 1903 yılında Wright Kardeşlerin ilk motorlu uçuşundan bu yana önemli bir değişim süreci geçirmiş ve bu süreçte kompozit malzemeler çelik ve alüminyumun yerini almaya başlamıştır [30]. Bu malzemelerin geniş fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri ve yapısal düzenleme ile değiştirilebilme yetenekleri, havacılık endüstrisinde tercih edilmesinin nedenlerinden biridir. Kompozit malzemelerin en önemli avantajlarından biri, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmalarıdır ve yapıdaki ağırlığın azaltılmasıyla uçakların işlevsellikleri, menzilleri ve taşıma kabiliyetleri artmaktadır. Kompozitlerin bir diğer avantajı, kompleks şekilleri rahatlıkla alabilmeleridir ve tek parça olarak üretilebilen büyük ve kompleks parçaların sayısının azaltılmasıyla yapının rijitliği ve sağlamlığı artmaktadır [31]. Kompozitler, metal yapıların yorulma olaylarına karşı direnç gösterirler ve korozyona uğramazlar. Ayrıca, yüksek yüzey direnci vegerilme çatlakları oluşturmadan esneyebilme yetenekleri de diğer avantajlarıdır.



Şekil 2.22 Airbus A350 XWB modeli bir yolcu uçağında kullanılan malzemelerin sınıflarına göre dağılımı [32]

Uçak yapımında kullanılan malzemeler zaman içerisinde değişikliğe uğramıştır. Alüminyum uzun yıllar boyunca ağırlıklı olarak kullanılmış olsa da, günümüzde kompozit malzemeler daha yaygın hale gelmiştir. Bu malzemeler arasında termoset, termoplastik, seramik elyaflı kompozitler, melez malzemeler ve alüminyum-lityum alaşımı gibi çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Kompozit malzeme kullanımının artış hızı, sertifikasyon zorluğu ve maliyet gibi nedenlerden dolayı yavaş olsa da, günümüzde termoplastik matris malzemelerinin geliştirilmesi üzerinde çalışılmaktadır. PEEK ve PEI gibi termoplastik malzemeler, hem dayanıklı hem de üretimi kolay ve ucuz kompozitlerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Örneğin, yeni bir yolcu uçağı olan Airbus A350 tasarımında %65 kompozit, %11 Al kullanılmaktadır [32]. Diğer malzemelerin kullanım oranları Şekil 2.22'de yer almaktadır. Boeing 787 model uçaklardaki malzeme kullanımına ait durum ise Şekil 2.23'de yer almaktadır.



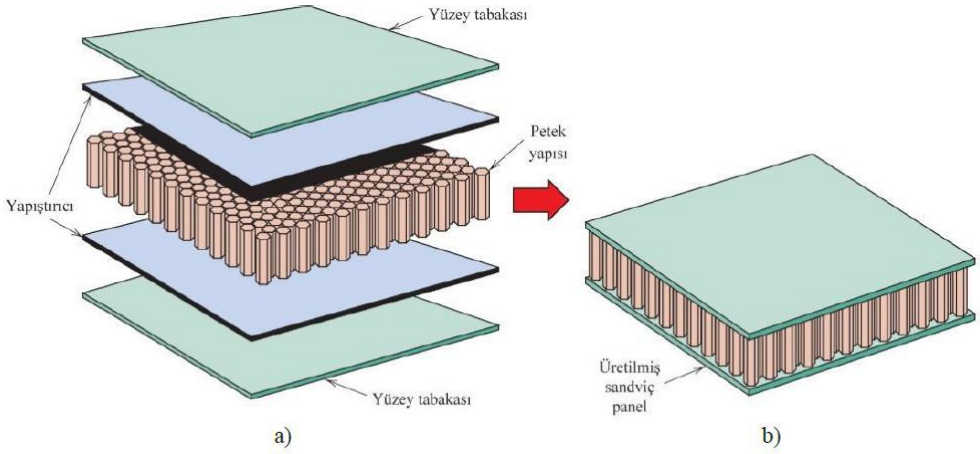
Şekil 2.23 Boeing 787 model yolcu uçağının gövde kısmında kullanılan malzemelerin sınıflarına göre dağılımı [33]

Kompozitlerin havacılık endüstrisinde kullanımının avantajları şunlardır: Geleneksel metalik malzemelere kıyasla daha düşük özgül ağırlığa sahip olmaları, yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları, yorulma dayanımlarının yüksek olması, korozyona karşı yüksek dayanım göstermeleri, karmaşık ve büyük parçaların üretimine uygun olmaları ve bağlantı elemanlarına ihtiyaç duymadan daha rijit ve stabil parçaların üretilmesine olanak sağlamaları, yanma dirençlerinin yüksek olmasıdır.

Havacılık endüstrisinde kullanılan kompozitlerin dezavantajları ise şunlardır: Üretim maliyetlerinin geleneksel malzemelere kıyasla yüksek olması, standart malzeme özelliklerinin ve kalitesinin olmaması ve malzeme özelliklerinin üretim kalitesiyle doğru orantılı olması, dayanım özelliklerinin her yönde eşit olmaması ve fiberlerin yönlerine ve dağılımlarına göre dayanım özelliklerinin değişken olması, bakım ve tamiratlarının zorlu olabilmesi ve üretim tesisi kurulum maliyetlerinin yüksek olmasıdır.Kompozitlerin avantajları ve dezavantajları kıyaslandığında avantajları çok daha baskındır ve bu sebepten dolayı dezavantajları tolere edilmektedir [34].

Havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan kompozit malzemeler arasında, sandviç yapılı kompozit malzemeler ve fiber takviyeli kompozit malzemeler bulunmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin arasında ise, özellikle karbon fiberler ve cam fiberler öne çıkmaktadır [35].

Sandviç yapılı kompozitler özellikle hava araçlarında sıkça kullanılmaktadır, çünkü hafiflikleri ve yüksek eğilme dayanımları sayesinde avantajlıdırlar. Bu tür kompozit malzemeler, çekirdek adı verilen kalın ve hafif bir tabaka ile iki ince ancak sağlam yüzey levhasından oluşurlar. Çekirdek, malzemenin yoğunluğunu azaltırken sert yüzeyler de mukavemeti sağlarlar.

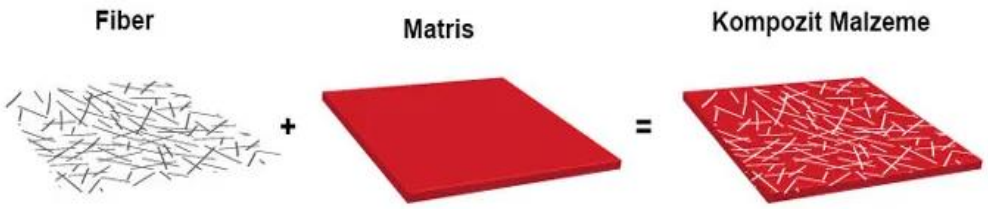


Şekil 2.24 Sandviç yapılı kompozitlerin yapı bileşenleri [32]

Sandviç yapılı kompozitlerin yüzey ve çekirdek arasında oluşan bağlar, ara yüzeyin bozulmasını engelleyerek yapıya esneklik özelliği kazandırır. Bu malzemelerin genel yoğunluğu oldukça düşük olduğu için hafiftirler, ancak mükemmel bükülme direncine sahiptirler. Kolayca tamir edilebilmeleri nedeniyle

dayanım performansları düşmeden kullanılabilirler. Hava araçlarında özellikle kanat yapılarında sıkça kullanılırlar [36].

Fiber takviyeli kompozitlerde fiberlerin yönü, miktarı ve dağılımı gibi faktörler, malzemenin mukavemet ve rijitliğini belirleyen önemli unsurlardır. Bu nedenle, farklı fiber malzemeleri ve fiber oranları, farklı malzeme özellikleri sağlamaktadır. Cam fiberler ve karbon fiberler havacılık sektöründe en yaygın olarak kullanılan fiber malzemeleridir. Temsili gösterimi 2.24'de yer almaktadır.



Şekil 2.25 Fiber takviyeli kompozitlerin bileşenleri [27]

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri fiberlerin devamlılığına, konumlandırma açılarına, yoğunlukları ve boyutları gibi çeşitli etkenlere bağlıdır. Bu faktörlerin değişimi, kompozitin mekanik özellikleri, korozyon direnci ve işlenebilirliği gibi özelliklerinde değişikliklere sebep olabilir [37]. Bu malzemelerin nasıl oluştuğu bilgisi Şekil 2.25'de yer almaktadır.

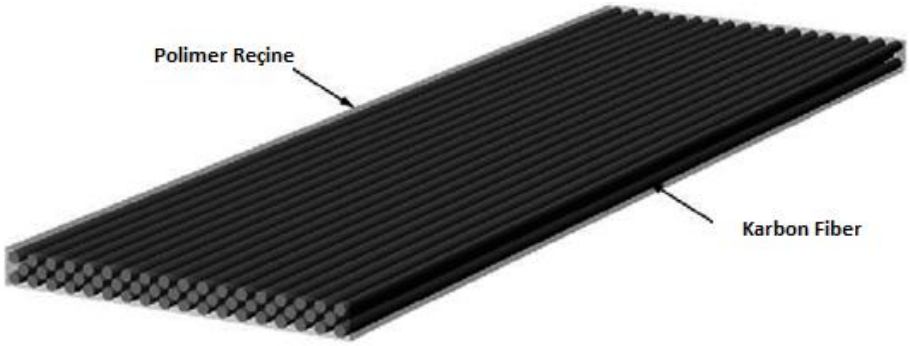
GFRP içindeki fiberi oluşturan cam, kum ve kireçtaşı gibi farklı yapılardaki malzemeleri içeren bileşimlerden oluşur. Farklı cam fiber yapıları, kimyasal bileşimlerin farklı oranlarla ayarlanması ve farklı üretim teknikleriyle elde edilir. Cam türleri tipik cam özellikleri gösterir ve ucuz malzemelerdir. Cam türleri farklı mekanik özelliklere ve çevrenin olumsuz etkilerine karşı farklı dirençlere sahiptir. E camının yalıtım özelliği diğer cam tiplerine göre çok daha iyidir ve Ayrıca bu camlar çekme altında iyi direnç gösterirler ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. S camı diğer cam tiplerine kıyasla en yüksek mekanik özellikleri gösyerirler ancak oldukça pahalı bir cam tipidir. D camı yalıtkan olarak yüksek voltaj seramiklerde çekirdek malzemesi olarak karşımıza çıkar. A camı alkalilere karşı dirençlidir ve R-camı ise E-camının kuzey ve güney Amerikada adlandırılmasıyla ortaya çıkan bir tür olup farkı bulunmamaktadır. Cam fiberler matris içerisinde yerleştirilmeden önce daha yüksek dayanıma sahiptir. GFRP malzemelerin en sık kullanım yerleri; ticari yolcu uçağı kanatlarında, kanat ve

gövde gibi yapısal uçak parçalarının birleşim yerlerinde ve antenlerin kapak bölgeleridir. Glare malzemesi, çelikle birleştirildiğinde elde edilir ve uçak gövdelerinin bazı bölümlerinde kullanılır [38]. E-camının görünümü Şekil 2.26‟da yer almaktadır.



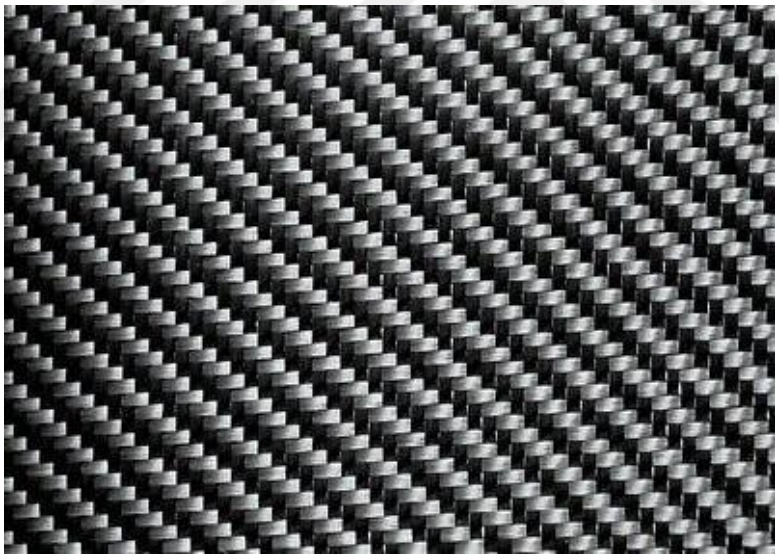
Şekil 2.26 E-camı fiber malzemesi [39]

Polimer matris fazı içinde karbon fiber takviye malzemelerinin bulunmasıyla meydana gelen CFRP malzemeleri, havacılık sanayi için üretilen kompozit malzemelerin temel bileşenlerinden biridir. Karbon fiberler, grafit fiberler olarak da bilinirler ve yüksek dayanım özellikleri, hafiflikleri ve özellikle yakıt olarak kullanılan kimyasallara karşı yüksek dirençleri nedeniyle oldukça pahalı 21 olmalarına rağmen özellikle havacılık sanayi için büyük önemi olan bir malzemedir. Karbon fiberlerin özellikleri bileşenlerine bağlıdır [40]. Karbon fiberin yapısını oluşturan bileşenler Şekil 2.27‟de almaktadır.



Şekil 2.27 Karbon fiber malzemenin yapısı [34]

CFRP‟nin oluşumu esnasında yapıdaki karbonları oluşturan iki temel bileşen vardır. Bunlar poliakrilonitril (PAN) ve zift olmak üzere temel iki bileşendir. PAN, karbon fiberlerin ana bileşenidir ve yüksek performanslı karbon fiberlerin üretiminde kullanılır. PAN lifleri, yüksek oranda uzama özelliği gösterir ve bu nedenle uzun lifler halinde çekilebilirler. Zift ise daha az dayanıma ve mukavemete sahip, aynı zamanda da ucuz olandır. Zift fiberlerin çekme dayanımları PAN‟a göre oldukça düşüktür. Basma dayanımları konularında ise aralarında 3 kat farj vardır ve PAN bu konuda zifte göre oldukça iyidir [41]. Karbon fiberlerin özelliklerini belirleyen faktörlerden biri de işlem sırasında uygulanan sıcaklık ve basınçtır. Bu işlemlerle fiberlerin mukavemet ve rijitlik değerleri değiştirilebilir. Örneğin, yüksek sıcaklıkta fiberler daha rijit hale gelirken, daha düşük sıcaklıklarda daha elastik hale gelirler. Bu özellikleri sayesinde karbon fiberler, uzay ve havacılık sanayinde, otomotiv sektöründe ve spor malzemeleri gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca bu malzemelerin estetik görüntüleri bulunmaktadır ve malzemeye ait görsel şekil 2.28'de yer almaktadır.



Şekil 2.28 Karbon fiber malzeme [35]

Karbon fiberler, geleneksel yapı malzemelerinin ve alaşımların yerini alarak yapıda önemli ölçüde ağırlığın azalmasını sağlar ve en büyük avantajlarından birini sunarlar. Örneğin, karbon fiberlerin M50 türü, çeliğe neredeyse eşit rijitliğe sahipken sadece çeliğin dörtte biri kadar ağırdır. Karbon fiberlerin çalışma sıcaklığı aralığı 300°C ile 550°C arasında değişmektedir ve gerilme korozyonu cam fiberlere göre daha azdır. Ayrıca, karbon fiberler iyi bir elektrik iletkenidir

[42]. Karbon fiberler, metal ile bir arada kullanıldığında, galvanik korozyonu önlemek için metal ve karbon fiberler arasına iletkenliği bozabilecek maddeler kullanılması gerektiği unutulmamalıdır. Sıcaklık değeri 450°C'nin üzerinde 22 olduğunda, karbon fiberler zarar görebilirler. Bu zarar malzemenin yapısının bozulmasına sebep olabilir. Bununla birlikte, yüksek rijitlik ve kırılganlıkları nedeniyle karbon fiberlerin şok direnci düşüktür ve bu da kullanımlarını kısıtlayan bir faktördür [38], [43].

3
KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ VE DELME İŞLEMİ

3.1 Giriş

Talaşlı imalat, işlenen malzemeye yüzey, şekil ve boyut açısından belirli özellikler kazandırmak amacıyla gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu işlem, takımın temas ettiği noktalarda malzeme kaldırarak malzemeyi tabaka şeklinde işleyerek gerçekleştirilir. Talaşlı imalat, işlenen malzemenin sertlik özelliklerinin yanı sıra takımın da farklı sertlik değerlerine sahip olmasına dayanır. Kesici takım iş parçasının altındadır ve parçanın üzerinde kayma deformasyonu ile malzeme kesilir. Kesilen malzeme talaş halinde ayrılır ve iş parçasının istenen şekli oluşturulur. Bu işlemin gerçekleşebilmesi için, kesici takım ile iş parçası arasında belirli bir hareket ve temas gerekir. Geleneksel talaşlı imalat, keskin kesici takımlar kullanarak malzemeyi iş parçasından koparıp yeni yüzeyler açığa çıkarır [44]. Gerçekleştirilen işlem Şekil 3.1'de özetlenmiştir.



Şekil 3.1 Talaş kaldırma esnasında kesici takımın ve iş parçasının etkileşimi [44]

Hemen hemen tüm katı metallerin yanı sıra plastik, seramik ve kompozit malzemeler dahil olmak üzere geniş bir malzeme yelpazesinde uygulanabilmesi talaşlı imalatın avantajlarındandır. Bunun yanında vida dişi, T kanal ve diğer karmaşık geometrilerin uygun takımlarla elde edilebilmesi, düz ve silindirik yüzeylerin oluşturulabilmesi de diğer avantajları arasındadır. Ayrıca yüksek boyutsal doğruluk (0,02 mm'ye kadar) ile çok hassas toleranslar sağlayabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü konusunda ise çok dar toleranslarda parça üretimi sağlamaktadır [45].

Ancak, talaşlı imalatın bazı dezavantajları da vardır. Bunlar arasında en çok öne çıkanlar; talaş formunda malzeme kaybının fazla olması, imalat sürecinin uzun olması ve talaşlı imalat tesisinin oluşturmak için yatırım maliyetinin yüksek olması sayılabilir [45].

Kompozit malzemeler kalıplardan çıkarıldıktan sonra ürünlerin istenen geometriye getirilmesi ya da bağlantı ekipmanlarının görevlerini yerine getirebilmesi amacıyla iş parçası üzerinde frezeleme ve delik delme gibi talaşlı imalat işlemleri uygulanır. Bu işlemler uygulanırken işlenen parça üzerinde delaminasyon, fiber fazının ayrılması ve matriks malzemesinin çatlaması gibi bazı problemlerle karşılaşılabilir. Karşılaşılan bu problemler üretilen parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Bu problemlerin oluşumunun önüne geçebilmek amacıyla CFRP kompozit malzemelerinin delik delme işlemi esnasında belirlenecek parametrelerin seçimi önem arz etmektedir.

3.2 Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalat Özellikleri

Kompozit malzemeler, geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla sahip olduğu yüksek sertlik, mekanik dayanım, hafiflik gibi özelliklerle öne çıkmaktadırlar. Kompozit malzemeler genellikle kalıplardan çıktıktan sonra ölçüsel doğruluk, istenen yüzey hassasiyetine uyum ve bağlantı ekipmanlarının kullanılabilmesi amaçlı talaşlı imalata proseslerine girerler. Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek mekanik özelliklerin yanında aynı zamanda karmaşık yapıya sahip malzemelerdir. Homojen yapıya sahip olmayan bu malzemeler, sahip oldukları karmaşık ve kompleks yapıdan dolayı, talaşlı imalat işlemlerinde elyaf kopması, katman açılması ve delaminasyon gibi hatalara sebep olmaktadır. Bu rastlanan durumlar da malzemenin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır [46].

Kompozit malzemelere uygulunan talaşlı imalat uygulamaları incenelendiğinde delik delme ve frezeleme işlemleri en sık karşılaşılan işlemlerdir. Malzemenin talaşlı şekillendirilebilirliği kompozit yapı içerisindeki fiber malzemenin yoğunluğuna, tipine, serim şekline bağlıdır. Her bir değişen kompozit malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmekte ve bu değişim de talaşlı imalat esnasında uygunlanacak kuvvetlerin, işlem şeklinin, takım malzemesinin ve geometrisinin

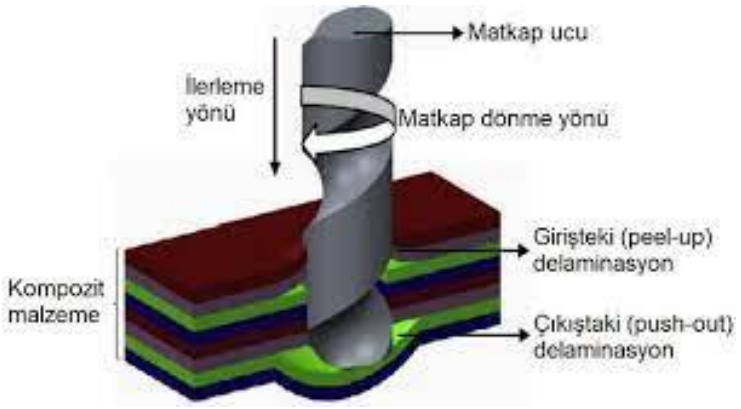
değişmesine neden olmaktadır. Bu sebepten kompozit malzemenin yapı özelliklerine göre talaşlı imalat parametreleri değişiklik göstermektedir [47].



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin talaşlı imalat parametreleri [48]

Hava aracı yapısalları içerisindeki kompozit malzemeler incelendiğinde, yapıdaki parçaların neredeyse tamamında istenen geometrik ölçülerin sağlanması, gerekli yüzey pürüzlülüğün sağlanması ya da bağlantı ekipmanlarının kullanılabilmesi için talaşlı imalat işlemlerine sık sık başvurulmaktadır. Talaşlı imalat işlemleri gerçekleştirilirken; kesme parametreleri, kesici takımın malzemesi ve geometirisi ayrıca da delaminasyon faktörü göz önünde bulundurulmaktadır. Kompozitlerin talaşlı imalatını etkileyen esas faktörler Şekil 3.2'de yer almaktadır.

Delaminasyon, katlı yapı içeren kompozit malzeme gibi malzemelerin talaşlı imalat özellikle de delme işlemi esnasında sık karşılaşılan bir hatadır. Bu işlemde katmanlar arasında açılma karşımıza çıkmaktadır ve yapının bozulduğu görünmektedir. Delaminasyon faktörü ise delme sonucunda ortaya çıkan delik çapının, delme esnasında kullanılan kesici takımın çapına oranlanarak bulunmasıdır. Bu oranın değerinin artması, gerçekleştirilmiş olan işlemin kalitesini düşürmekte, oranın azalması ve 1 değerine yaklaşması işlemin kalitesini arttırmaktadır [49]. Delaminasyonun oluşumu ise Şekil 3.3"de yer almaktadır.



Şekil 3.3 Malzemenin delinirken uğradığı delaminasyon [49]

Geçmişte çeşitli araştırmacılar tarafından, aşağıdaki parametreler doğrultusunda kompozit malzemelerin delinmesiyle alakalı yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Özkaya, Özen, İlhan ve Aslanlar, cam küre takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin delaminasyon faktörünün deneysel olarak incelemesini gerçekleştmiştir. Gerçekleştirilmiş olan çalışmada devir ve buna paralel kesme hızı arttıkça delaminasyonu azaldığı, kesme kalitesinin arttığı belirlenmiştir [7].

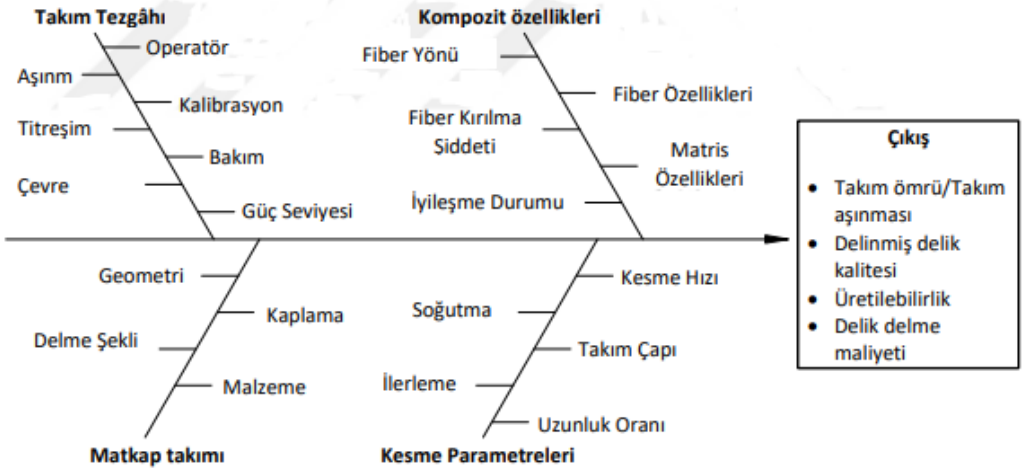
Canpolat, cam elyaf malzemenin delinebilirliği konusunda çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma esnasında farklı takım malzemeleri kullanmıştır. Canpolat, çalışma sonrasında ilerleme hızının artmasıyla birlikte delik dışı ve içi yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve buna ters orantılı olarak delik kalitesinin düştüğünü belirlemiştir [8].

Ekici ve Işık, gerçekleştirdikleri çalışmada 60°, 90° ve 120° uç açılı takımlar kullanmıştır. Kullanılan takımın uç açısının azalmasıyla birlikte daha az yüzey hasarı ve buna bağlı olarak daha yüksek kaliteye sahip delikler ortaya çıktığı belirlenmiştir [9].

Kompozit malzemelerin delinmesi esnasında kullanılan takımlar incelendiğinde genellikle çift ağızlı, standart helisel matkapların kullanıldığı görüntülenmektedir. HSS, karbür ve demir dışı döküm alaşımlı takımların kullanımı seramik malzemelerin işlenmesinde en çok kullanılan takım malzemelerinin başında gelmektedir.

CFRP kompozit malzemeler, yapı itibariyle incelendiğinde kompleks malzemelerdir. Fiber malzemenin yönlenmesi, dağılımı, matris/fiber oranı gibi etkenler bu malzemelerin yapısının değişkenliğini daha da arttırmaktadır. Şekil

3.4’deki şemada bu malzemenin işlenmesini etkileyen faktörler 4 ana başlık altında incelenmiştir.



Şekil 3.4 CFRP malzemenin işlenmesini etkileyen faktörlerin gösterimi

Kompozit malzemelerin talaşlı imalat işlemleri esnasında bu dört ana başlık altındaki tüm şartlar dikkatle incelenmeli ve değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmenin ardından proses oluşturulmalı ve kesme işlemi gerçekleştirilmelidir [50].

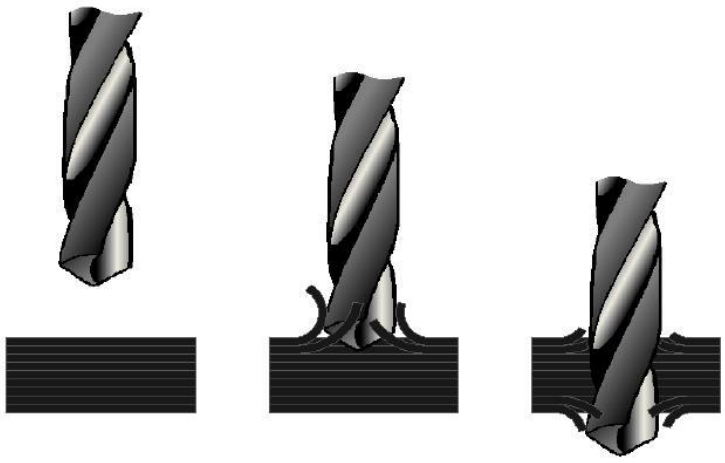
3.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalatında Karşılaşılan Hatalar

Delme işlemi, geleneksel bir talaşlı imalat metodu olup kompleks mekanik olayları içerir. Kompozit malzemelerde ise bu işlem, bu malzemenin gelişimiyle birlikte birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Temel sorun, delik açma işlemi sırasında delik giriş ve çıkış bölgelerinde meydana gelen deformasyondur. Bu deformasyon, malzemenin bütünlüğünü bozarak mekanik özellikleri ve dayanımı azaltır. Tamamen deformasyonu ortadan kaldırmak mümkün olmasa da, çeşitli araştırmalar deformasyonu minimize etmek için çözüm arayışındadır ve bu çalışmalar devam etmektedir [50].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin delik delinmesi sırasında rastlanan hatalar çeşitlidir fakat bu hataların her biri malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemekte ve yapılan çalışmalarla bu hataların önüne geçilmeye çalışılmaktadır. En sık rastlanan hatalar ise aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Delaminasyon: Delik açma işlemi sırasında malzemenin içinde tabakalar arasında ayrılma (delaminasyon) oluşabilir. Bu, malzemenin dayanıklılığını azaltabilir.
- Çatlaklar: Delik açarken kompozit malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar, malzemenin bütünlüğünü bozabilir.
- Rezinasyon: Delik açma işlemi sırasında malzeme üzerinde reçine birikimi veya reçine çıkıntıları oluşabilir.
- Karbon elyaf kırıkları: Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde, delik açma sırasında karbon elyaf kırılmaları olabilir.
- Delik çıkış çökmesi: Delik açma işlemi sırasında deliğin çıkış tarafında çökme veya yüzey hasarı meydana gelebilir.
- Tüylenme: Delik açma işlemi sonucu malzeme yüzeyinde tüylenme veya lif çıkıntıları oluşabilir.
- Delik boyutu sapmaları: Delik açma işlemi sonucu hedeflenen delik boyutundan sapmalar oluşabilir, bu da montaj problemlerine neden olabilir.
- Yüzey pürüzlülüğü: Delik açma işlemi sonucu malzemenin iç yüzey pürüzlülüğü artabilir, bu da dayanıklılığı etkileyebilir.

Bu hatalar, polimer matrisli kompozit malzemelerin delme işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerdir. Uygun ekipman, kesici takımlar ve işlem parametreleri kullanılarak bu hatalar minimize edilmeye veya önlenmeye çalışılmalıdır [8]. Bu seçimlerde hataolmasıı durumunda ise Şekil 3.5'deki delaminasyon durumu yaşanmaktadır.

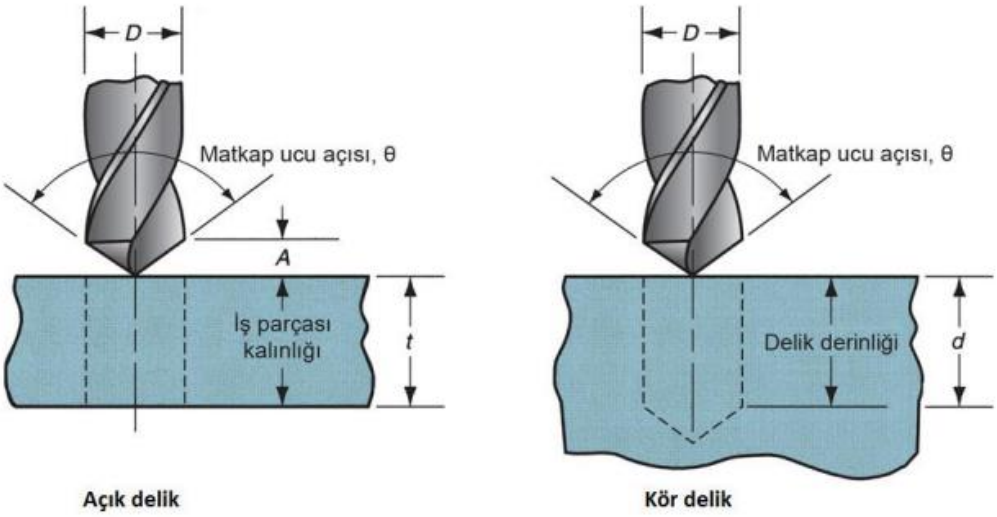


Şekil 3.5 Delik delinmesi esnasında delaminasyon oluşumu

Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler, oldukça yüksek mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen, talaşlı imalat sırasında oluşabilecek hasarları son derece hassas bir şekilde karşılarlar. Bu temel hasarlar, yüksek yerel stres konsantrasyonları altında tabakaların ayrılması, soyulma ve fiber kopmaları gibi olaylar şeklinde tanımlanabilir. Talaşlı işleme kaynaklı hasarlar arasında yer alan delaminasyon, delik büzülmesi ve fiber kopmaları, genellikle tabakalar arasındaki bağlantıyı aşan yüksek yerel streslerin etkisiyle meydana gelir ve yapıya etkisi bir hayli çoktur. Delaminasyon ve mikro çatlaklar, kompozit malzemelerin performansını ve montaj parçalarının davranışını önemli ölçüde etkileyerek performanslarını azaltır. Ek olarak, delme işlemi kaynaklı delaminasyon sadece yüzey kalitesini ve montaj toleranslarını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda deliğin yorulma dayanıklılığını da olumsuz etkiler. Bu nedenle, delme işlemi kaynaklı delaminasyon, endüstride ciddi kayıplara neden olan en kritik hasar türlerinden biri olarak kabul edilmektedir [7].

3.4 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Delik Deliminde Kesme Koşulları

Delik oluşturma işlemi, iş parçası üzerine bir kesici takım yardımıyla dairesel kesme yöntemlerinin kullanılarak yapıldığı bir işlemi ifade eder. Bu işlem, talaşlı imalat yöntemlerinin büyük bir bölümünü oluştururken, toplam işlem süresinin yaklaşık dörtte birini kaplar. Gelişen üretim yöntemlerine rağmen, hala geleneksel delik açma işlemi tercih edilmektedir. Bu, ekonomik ve basit uygulanabilirlik nedenleriyle halen en yaygın kullanılan işleme yöntemidir [7]. Delme işlemi, radyal kesici ağzın iş parçasına temas etmesiyle başlar ve daha sonra ana kesici ağızlar kesme işlemine katılarak devam eder. Bu sırada takımın üzerinde yer alan helisel kanallar aracılığıyla oluşan talaşlar dışarı atılır. Radyal ağız, matkabın iş parçasını keserken dönme ve ilerleme hareketini gerçekleştirir ve aynı zamanda matkabın delme ekseni boyunca da hareketini sağlar. Kesici ağız, matkabın ilerleme hareketiyle iş parçasını kesmeye başlayarak helisel bir yüzey oluşturur. Matkap, helisel yüzey boyunca hareket ederken kesme ağızlarının etki yönü sürekli olarak değiştiği için, matkabın etkili kesme açıları da sürekli olarak değişir. Ayrıca, matkabın giriş seviyesine bağlı olarak kör veya açık delikler oluşturabilir.



Şekil 3.6 Açık delik ve kör delik oluşturulması [44]

Delmede dönme hızı Eşitlik 3.1 ile hesaplanabilir.

$$60v/\pi D \text{ [d/d]} \tag{3.1}$$

Burada; v (mm/s) kesme hızını ve D (mm) matkap uç çapını ifade eder. İlerleme hızı ise devir başına ilerleme miktarı olarak ve Eşitlik 3.2 ile hesaplanabilmektedir.

$$Fr=nf\text{'tir.} \tag{3.2}$$

Buna göre t kalınlığındaki iş parçasında açık delik oluşturmak için gerekli süre ise Eşitlik 3.3 ile hesaplanabilir.

$$Tm = \frac{t+A}{Fr} = \frac{\pi D(t+A)}{60vf} \tag{3.3}$$

d uzunluğundaki bir kör delik oluşturmak için gerekli süre ise Eşitlik 3.4 ile hesaplanmaktadır.

$$Tm = \frac{d+A}{Fr} = \frac{\pi D(d+A)}{60vf} \tag{3.4}$$

Bu iki bağıntıda, A yaklaşma mesafesi olup bu mesafe Eşitlik 3.5 ile hesaplanmaktadır.

$$A=0{,}5D\tan\left(90-\frac{\theta}{2}\right) \tag{3.5}$$

Burada, θ matkap uç açısıdır. Delmede malzeme kaldırma debisi matkap uç kesit alanı ve ilerleme hızının çarpımıdır ve Eşitlik 3.6 ile bu değer bulunur.

$$\text{Rmr}= \pi D^2 \text{fr}/_4\text{'tür.} \quad (3.6)$$

Delme ile alakalı formüller yukarıda olduğu şekilde özetlenebilir. [44-54]

Talaş kaldırma işleminin üç boyutlu hareketi aşağıdaki şekildedir;

- Kesme hızı; v (birincil hareket)
- İlerleme f; (ikincil hareket)
- Kesme derinliği d; (takımın orijinal parça yüzeyinden aşağıya nüfuziyeti)

Talaşlı imalat esnasında malzeme kaldırma hızı Eşitlik 3.7 ile hesaplanabilir.

$$R\text{mr} = \text{v.f.d (mm3/s)} \quad (3.7)$$

Buradaki birimler şu şekildedir:

Burada v = kesme hızı (m/s); f = ilerleme (mm); d = kesme derinliği (mm)

İmalat işleminin gerçekleşebilmesi için bir enerji gerekmektedir.

İşlem ile güç arasında ise Eşitlik 3.8'de olduğu gibi bir bağıntı vardır.

$$\text{Pc} = \text{Fc.V} \quad (3.8)$$

Pc = Kesme için gerekli güç (W)

Fc = Kesme kuvveti (N)

V = Kesme hızı (m/s)

ABD'de güç birimi olarak HP (Horse Power) = Beygir Gücü (BG) kullanılır. 1HP=0,745 KW'dir.

Tezgahın ihtiyacı olan güç Pg'dir ve Eşitlik 3.9 ile hesaplanabilir.

$$\text{Pg} = \text{Pc/E'dir.} \quad (3.9)$$

Burada E = takımın mekanik verimidir. Genellikle E ~ %90 olarak alınır.

Talaşlı imalat esnasında birim hacim için kullanılan güçe aşağıdaki formül ile ulaşılır.

Birim (Özgül) Güç: Pu veya HPu ile gösterilir. Eşitlik 3.10 ile gösterilir.

$$Pu = Pc \,/\, R\text{mr H}Pu = H\text{P}c/R\text{mr} \quad (3.10)$$

Rmr = talaş kaldırma hızı (m3/s)

Birim güç aynı zamanda spesifik enerji U olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.11 ile hesaplanmaktadır.

$$U = Pu = Pc \,/\, R\text{mr} = Fc\ \text{V} \,/\, Vto\text{W} \quad (3.11)$$

Spesifik (özgül) enerji birimleri: Nm/mm3 veya J/mm3'tür.

Talaş kaldırmadaki kesme koşulları formülleri yukarıda olduğu şekilde özetlenebilir [44], [50].

4
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Giriş

CFRP kompozit malzemelerinin farklı dönme devri, ilerleme hızı, takım uç açısı ve kesme sıvısı kullanım durumu değiştirildiğinde iş parçası üzerinde ne gibi değişiklikler yaşandığı incelenmiştir. Bu belirtilen etkenler ile alakalı optimal değerlerin belirlenmesi konusunda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmanın ardından değişen parametrelerin iş parçası üzerinde açılan deliklerin delik içi yüzey pürüzlülüğüne, deliğin ölçüsel doğruluğuna ve delaminasyona olan etkileri incelenmektedir.

4.2 Materyal

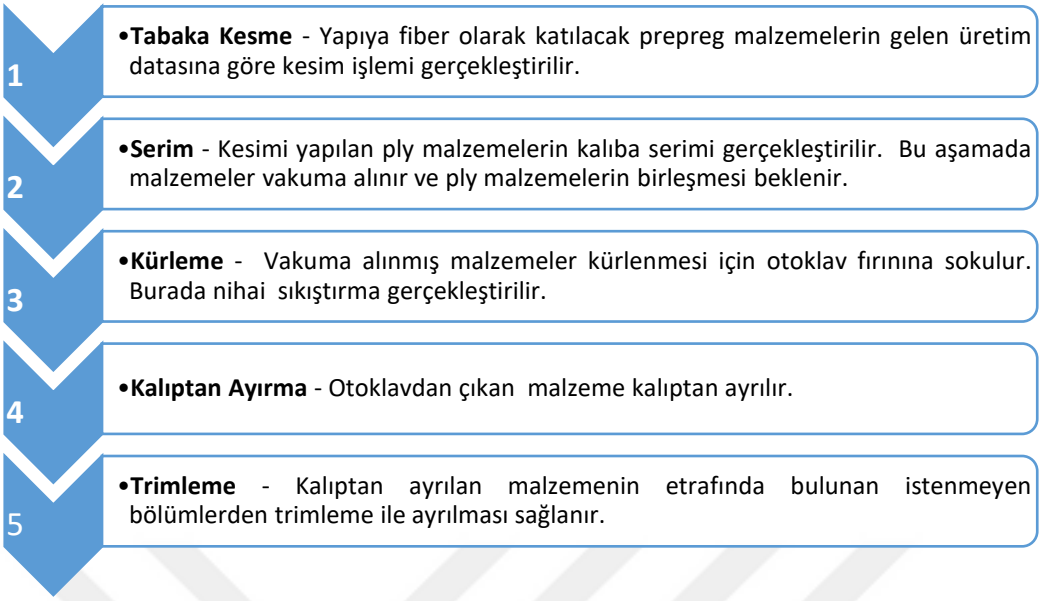
4.2.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan İş Parçası

Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan CFRP kompozit malzemedir ve Şekil 4.21'de yer almaktadır Malzeme 705x260 mm boyutlarında ve 6 mm et kalınlığında olup TUSAŞ kompozit imalat tesislerinde yer alan temiz odalarda prepregler kullanılarak vakum torbalama üretim metoduyla Şekil 4.2'de verilen alış şeması takip edilerek levha formunda üretilmiştir. Bu çalışmalar esnasında kullanılan CFRP malzeme 24 katmandan oluşmaktadır. CFRP malzemelerin ağırlığın azaltılmasının hedeflendiği uçak üzerinde bulunan birçok parçada kullanımaktadır. Bunların başında gövde, kanat, kuyruk yüzeyleri ve döşeme panelleri gelmektedir.



Şekil 4.1 Deney aşamasında kullanılan CFRP iş parçası

CFRP malzemenin üretim proses akış şeması aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 4.2 CFRP malzeme üretim akış şeması

4.2.2 Tezgâh, Takım Tutucu, Kesici Takımlar ve Fikstürleme

Delik delme işlemi CMS Antares marka, 5 eksenli bir CNC tezgahta gerçekleştirilmiştir görseli Şekil 4.3'de yer almaktadır.. Tezgah X, Y, Z, A ve C eksenlerinde çalışabilmektedir. Tezgaha ait tüm teknik özellikler aşağıdaki tablo 4.1 ve 4.2 üzerinde verilmiştir.

Tablo 4.1 CMS antares boyut ve eksen özellikleri

		X	Y	Z	A	C
Eksenler	**Hareket Aralığı**	2600 mm	1500 mm	1200 mm	+/- 120 derece	+/- 270 derece
	Besleme Oranı	80000 mm/dk	80000 mm/dk	70000 mm/dk	25 dev/dk	25 dev/dk

Tablo 4.2 CMS antares spindle ve tabla özellikleri

Spindle	**Dönüş**	20000 dev/dk	**Tabla**	1500*2500 mm
	Güç	20 kW	**Tabla Güç Kapasitesi**	2000 Kg/m^2
	Tork	350 Nm		



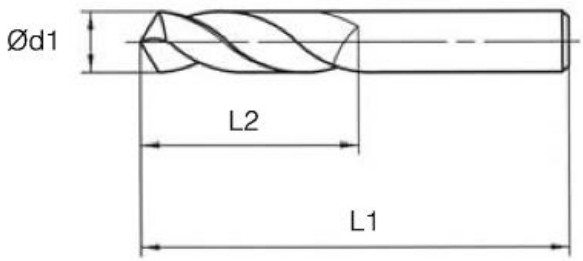
Şekil 4.3 CMS antares 5 eksen işleme merkezi

Tezgah, TUSAŞ kompozit imalat tesislerinde karbon, cam, kevlar, metal bond, aramid, PVC malzeme işleme ve delme işlemlerinde kullanılmaktır.

Tezgah üzerinde çeşitli takım ölçülerinde kullanılabilen rulmanlı takım tutucular kullanılmaktadır. Kullanılan takımlar bu takım tutucularına bağlanır.

Çalışmada kullanılan takımlar ise 2 ağızlı kaplamasız tungsten karbür (WC) takımlardır. Takımlarda içten soğutma bulunmamaktadır. Bu takımların ağız uç açıları farklılık göstermektedir. Takımların her ikisi de aynı geometriye ve aynı ağız sayısına sahiptir fakat uç açıları 118^o ve 135^o olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan takımlara ait detaylar Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 Deney aşamasında kullanılan kesici takım özellikleri

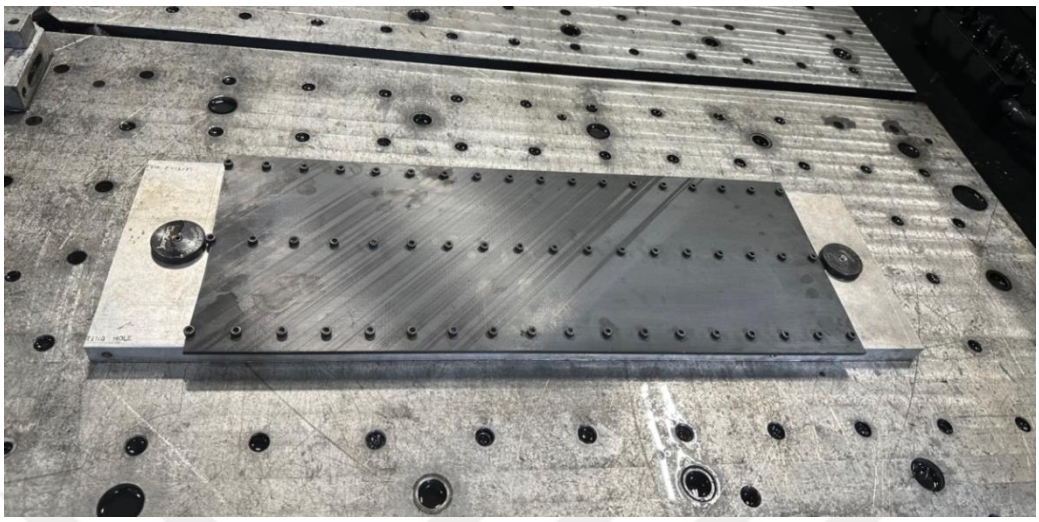


Boyutlar	**d1 (mm)**	**L1 (mm)**	**L2 (mm)**
	10	57	43
Malzeme		Tungsten Karbür (WC)	
Ağız Sayısı		2	
Uç Açıları		118^{o} - 135^{o}	
Kaplama Durumu		Yok	
Kesme Yönü		Sağ	

Tungsten karbür, kesici takım imalatında sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Cevherden ayrılan tungstenin yapısına kobalt ve ardından karbon eklenerek elde edilen malzeme sinterleme işlemine girer ve sertlik derecesi oldukça yüksek tungsten karbürü oluşturur. Sinterleme işlemi ile birlikte şekillendirilebilir. Çelik, alüninyum gibi metallere kıyasla sahip olduğu yüksek sertlik (70 – 81 HRC) sayesinde geleneksel metallerin işlenmesinde kullanılabilmektedir [51].

CFRP iş parçası tezgâh tablasına yapılması planlanan işleme özel olarak fikstürlenmiştir. Bu fikstürleme işlemi esnasında, iş parçasının üzerine yerleştirileceği bir alüminyum 2xxx serisi plaka konulmuş ve iş parçası 6 mm çapa sahip cıvatalar tarafından bu plakaya sabitlenmiştir. Sabitleme işlemi yapılmadan önce plaka üzerinde deliklerin geleceği bölümlere 20 mm genişlik ve 10 mm derinlik boyutlarında kanallar açılarak boşaltılmıştır. Bu fikstürleme metoduyla iş parçası sabitlenmiş ve tezgâh tablasına yerleştirilmiştir. Kullanılan

alüminyum plakanın boyutları 860x240x25 mm'dir. Tezgaha sabitlenmiş hali Şekil 4.4'de yer almaktadır.



Şekil 4.4 Tezgah tablasına fikstürleme yapılarak sabitlenmiş iş parçası

4.2.3 Ölçüm Aletleri

Delik delme işlemlerinin ardından farklı parametrelerin kıyaslanması ve bu çalışmada incelenmesi planlanan parametreler ile alakalı optimum değerlerin anlaşılabilmesi için çeşitli ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler şu şekildedir;

- Delik içi yüzey pürüzlülük değeri,
- Delik boyutsal ölçüm değeri,
- Delinen iş parçası üzerindeki delaminasyon.

Yapılan bu ölçümlerde kullanılan aletler aşağıdaki tablo 4.4'de belirtilmiştir.

Tablo 4.4 Ölçüm çeşitleri ve kullanılan ölçüm aletleri

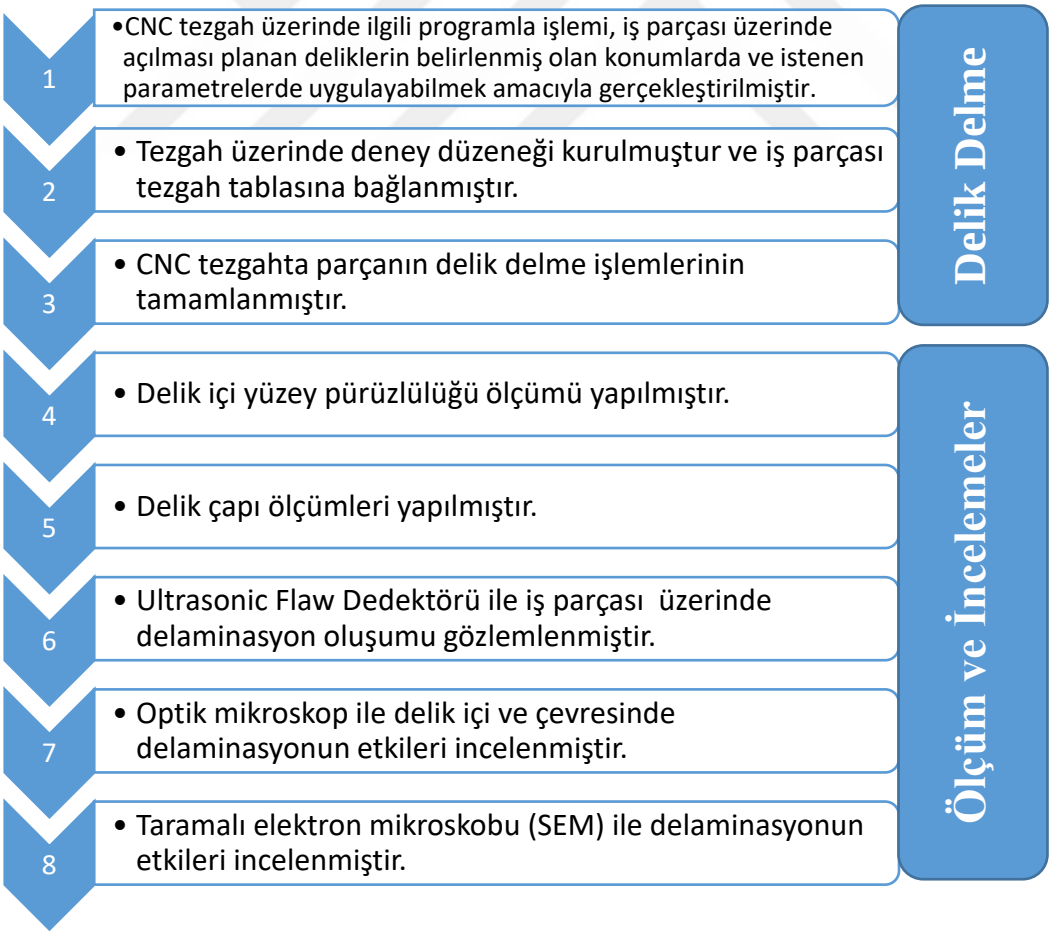
No	Ölçüm Çeşidi	Ölçüm Aleti
1	-Delik İçi Yüzey Pürüzlülük Değeri	-Mahr MarSurf PS 10 Yüzey Pürüzlülük Cihazı
2	-Delik Boyutsal Ölçüm Değeri	-Mitutoyo IP 65 8 – 10 mm. İç Çap Mikrometre

Tablo 4.4 Ölçüm çeşitleri ve kullanılan ölçüm aletleri (devamı)

3	-Delaminasyon Gözlemlenmesi	-Olympus Omniscan SX Ultrasonic Flaw Dedektöktörü -Olympus GX53 Inverted Metalurjik Mikroskop -Zeiss Sigma 300 Taramalı Elektron Mikroskop

4.3 Metod

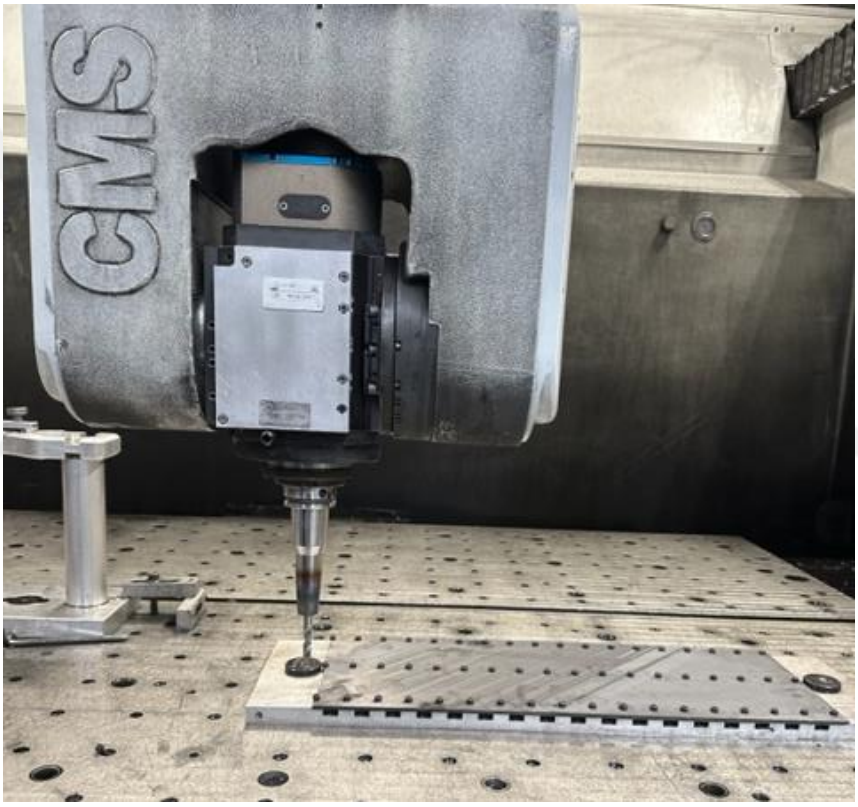
CFRP kompozit malzemenin delik delme işlemleri ile ilgili deneysel akış diyagramının sistematik ilerleyişi aşağıda detaylı olarak Şekil 4.5'de açıklanmıştır.



Şekil 4.5 Deney akış diyagramı

4.3.1 Delik Delme

Deneysel akış diyagramının (Şekil 4.5) ilk üç adımında belirtildiği gibi ilk adım olarak CNC tezgah üzerinde ilgili programla işlemi, iş parçası üzerinde açılması planan deliklerin belirlenmiş olan konumlarda ve istenen parametrelerde uygulayabilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise tezgah üzerinde deney düzeneği kurulmuştur ve iş parçası tezgah tablasına bağlanmıştır. İş parçasının bağlanmasının ardından delik delme aşamasının son adımında Tablo 4.4'te belrilenmiş olan parametreler doğrultusunda delik delme işlemi tamamlanmıştır.

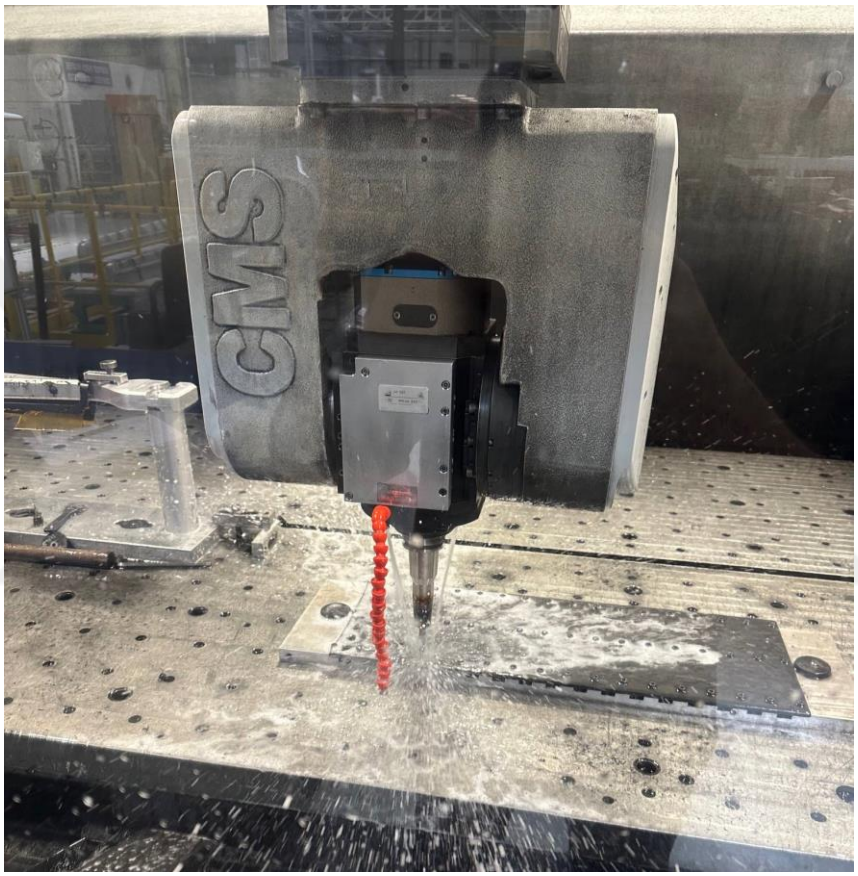


Şekil 4.6 Tezgaha bağlanan iş parçası üzerinde koordinasyon ayarı yapılması

Deney esnasında kullanılan parametreler ve kullanılan CNC tezgah, deney sonuçlarının gözlemlenebilmesi ve ölçülebilmesi için kullanılan ölçüm aletleri göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Tablo 4.5 Deney parametreleri

Delik Derinliği – d (mm)	**Dönme Devri-n (dev/dk)**	**İlerme – F (mm/dk)**	**Kesme Sıvısı Kullanımı**	**Takım Uç Açısı (°)**
10	1250 2500 5000 7500 15000	125 250 500	Evet Hayır	118 135

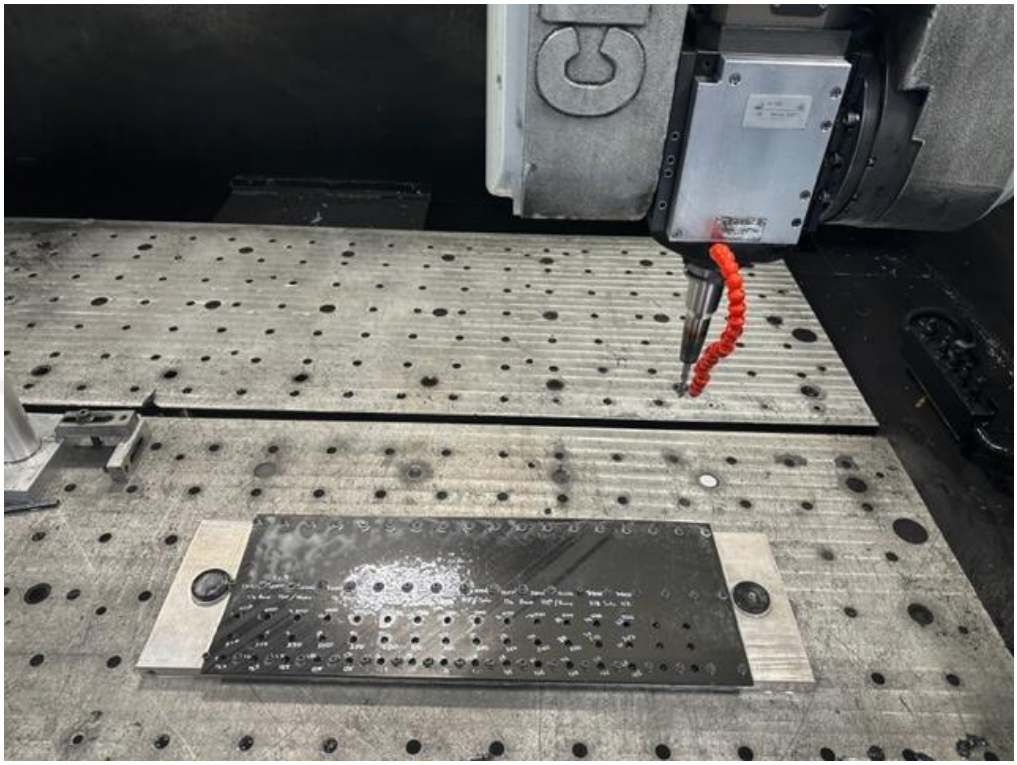


Şekil 4.7 Deney esnasında iş parçasına kesme sıvısı kullanılarak delik açılması

Her bir deney kombinasyonuyla alakalı 3 farklı tekrar alınmıştır ve tüm deneyler esnasında uç açısı 118^{o} ve 135^{o} olan 2 ağıza sahip iki farklı tungsten karbürden üretilmiş takımlar kullanılarak delinmiştir.

Değişken sayısına bağlı olarak ortaya 5x3x2x2 olmak üzere 60 farklı deney şartı ortaya çıkmaktadır. Her bir delikle alakalı olarak doğru sonuca ulaşmak amacıyla 3 tekrar yapılmıştır ve toplamda 180 delik oluşturulmuştur. Deney düzeneğinde Tablo 4.5'te verildiği üzere deneye ait parametreler olan takım ağız açıları, takıma verilen devir ve ilerleme hızlarının karşılaştırmaları yapılmıştır. Takımların çap

değerleri sabit ve 10 mm'dir. Tablo 4.4'te verilen değerlerle alakalı hesaplamalar yapıldığında sonuçlar aşağıdaki formülasyonlar kullanılarak EK-Deney Parametreleri'nde paylaşılmaktadır. Deney aşmasına ait görseller Şekil 4.8 ve 4.9'da yer almaktadır.



Şekil 4.8 Deney esnasında iş parçasına delik açılması

Kesme hızlarının hesabı Eşitlik 4.1 ile gerçekleştirilmektedir.

$$Vc = (\pi * d * n)/1000 \text{ (m/dk)} \quad (4.1)$$

1 numaralı deneydeki değerler yerine koyulduğunda ise Eşitlik 4.2'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$Vc = (3{,}14 * 10 * 1250)/1000 = 39{,}25 \text{ m/dk} \quad (4.2)$$

Devir başına ilerleme hesabı ise Eşitlik 4.3'de verilmiştir.

$$Fn = F/n \text{ (mm/dev)} \quad (4.3)$$

1 numaralı deneydeki değerler yerine koyulduğunda Eşitlik 4.4'de olduğu gibi hesaplanabilmektedir.

$$Fn = 125/1250 = 0{,}1 \text{ mm/dev} \quad (4.4)$$

Diş başına İlerleme hesabı ise Eşitlik 4.5'te verilmiştir.

$$Fz=F/(n*Zc) \quad (4.5)$$

1 numaralı deneydeki değerler yerine koyulduğunda ise Eşitlik 4.6'da olduğu gibi hesaplanabilmektedir.

$$Fz=125/(1250*2) = 0{,}050 \text{ mm/dev} \quad (4.6)$$

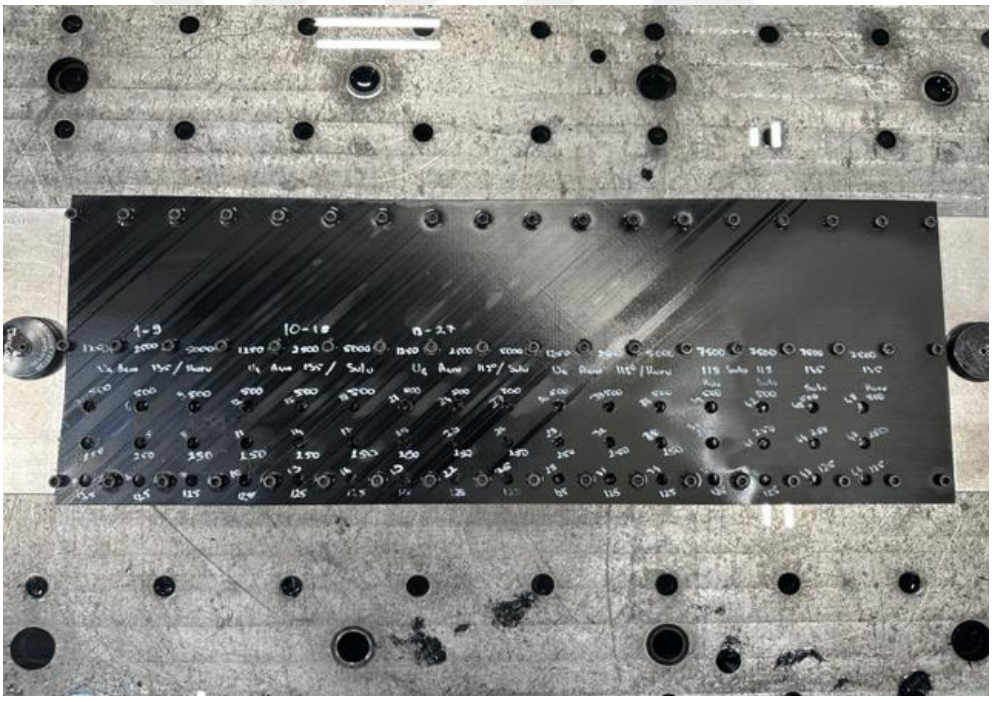
Birim Zamanda Kaldırılan Talaş Miktarı hesabı Eşitlik 4.7'de olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$Mrr = w.d.f \text{ (mm3/dk)} \quad (4.7)$$

1 numaralı deneydeki değerler yerine koyulduğunda Eşitlik 4.8'de hesaplanmışır.

$$Mrr=10.10.125 \text{ (mm3/dk)} = 12.500 \text{ mm3/dk} \quad (4.8)$$

Yukarıda verilen formüller doğrultusunda tüm parametrelerle alakalı yapılan hesaplamalar ve ortaya çıkan tüm sonuçlar EK-Deney Parametreleri'nde verilmiştir.



Şekil 4.9 Deney esnasında iş parçasına delik açılması

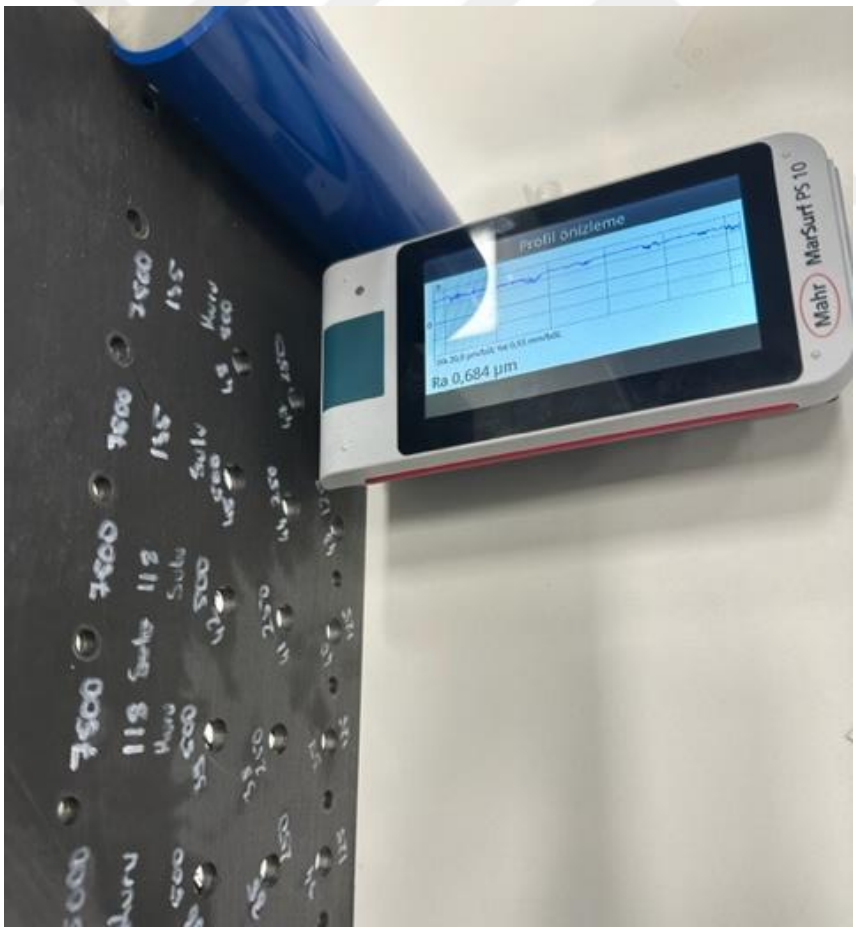
4.3.2 Ölçüm ve İncelemeler

Deliklerin oluşturulmasının ardından geçmişte belirlenmiş kalite parametreleri doğrultusunda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler deliğin boyutsal ölçümü,

delik içi yüzey pürüzlülüğü ölçümü ve delaminasyon ölçümleri olarak 3 farklı değeri ortaya koymak için gerçekleştirilmiştir.

4.3.2.1 Delik İçi Yüzey Pürüzlülük Değeri Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü gerçekleştirmek amacıyla portatif bir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı olan ve Şekil 4.10'da yer alan Mahr MarSurf PS 10 model cihaz kullanılmıştır. Doğru bir ölçümü sağlamak amacıyla deney iş parçası düzlüğünden emin olunan metal bir yüzeye dik olacak şekilde aparatlar yardımıyla sabitlenmiştir. Yüzey pürüzlülük cihazı deliğin içerisinde 5 mm örnekleme uzunluğunda ölçüm gerçekleştirmiştir. Her bir delikle alakalı olarak ölçümler 3 defa gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Alınan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) kaydedilmiştir. ve EK-Ölçüm Sonuçları'nda tüm sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 4.10 Delik içi yüzey pürüzlülük ölçümü

4.3.2.2 Delik Boyutsal Değer Ölçümü

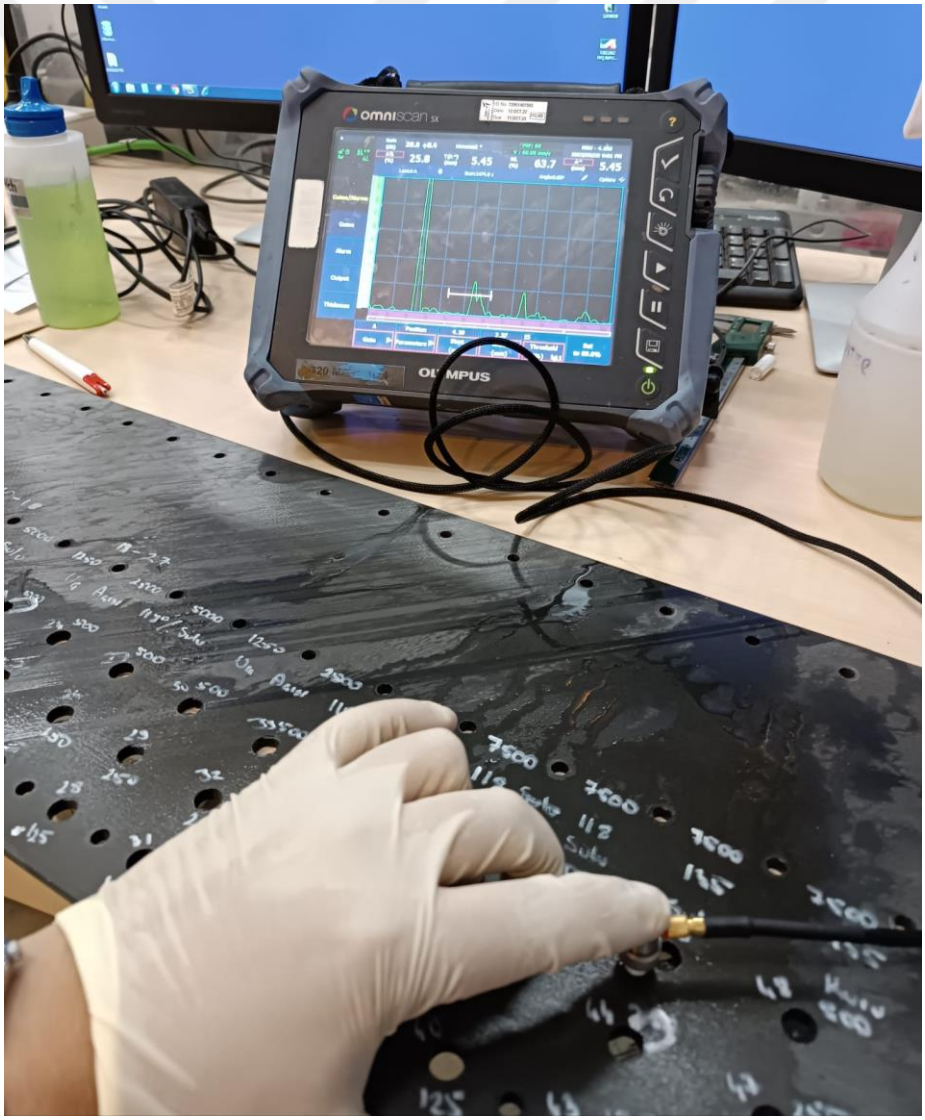
Delik boyutsal ölçüm değerlerini incelemek amacıyla Şekil 4.11'de yer alan Mitutoyo IP 65 (8 – 10 mm) model iç çap mikrometresi kullanılmıştır. Doğru bir ölçümü sağlamak amacıyla deney iş parçası düz bir levha (plate) üzerine yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirmiştir. Her bir delik için 3 ölçüm gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Alınan boyutsal ölçüm değerleri kaydedilmiştir ve EK-Ölçüm Sonuçları'nda yer almaktadır.



Şekil 4.11 Delik boyutsal ölçümü

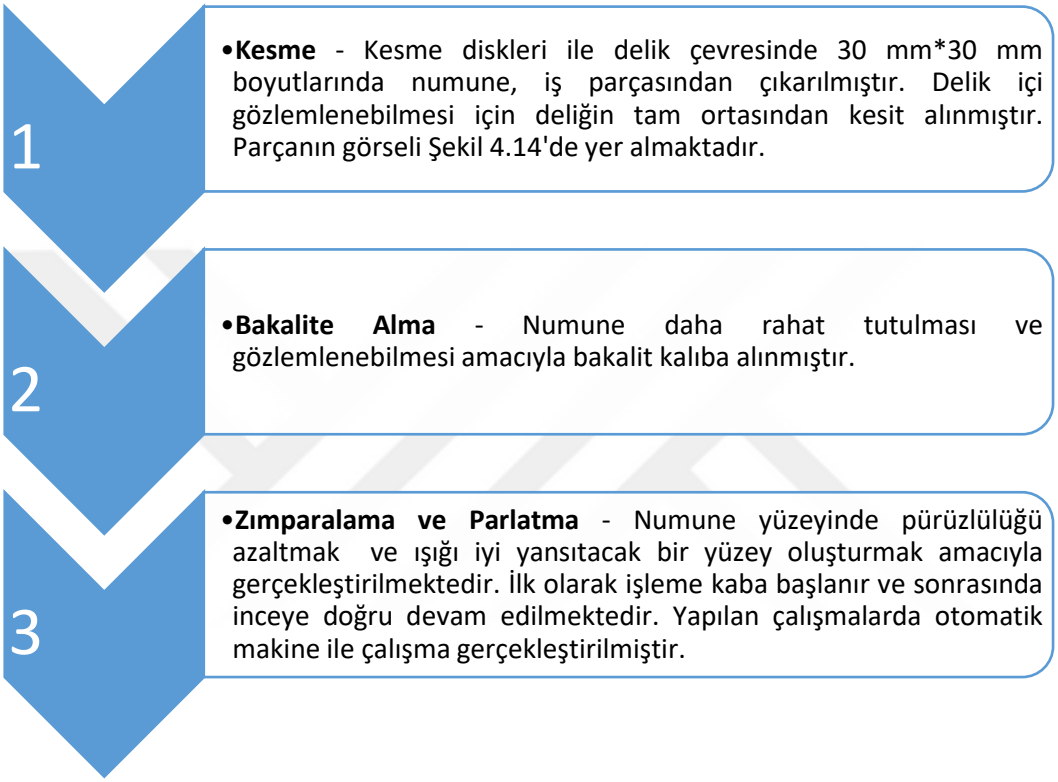
4.3.2.3 Delik ve Çevresindeki Delaminasyonun İnceleme Ölçümü

Delik ve çevresindeki delaminasyonun incelenmesi amacıyla üç farklı ölçüm ve inceleme metodu izlenmiştir. İlk olarak bir tahribatsız muayene cihazı olan Olympos Omniscan SX Ultrasonic Flaw dedektörü kullanılmıştır ve phase array metoduyla ses dalgaları parça içine gönderilmiştir. Ses dalga demetlerinin yansımaları kontrol edilerek kontrol sağlanmıştır. Doğru bir ölçümü sağlamak amacıyla deney iş parçası düzlüğünden emin olunan metal bir yüzeye yerleştirilmiş ve ölçümler gerçekleştirmiştir. Her bir delikle alakalı olarak ölçümler gerçekleştirilmiş ve ölçüm esnasında gözlemlenen fiber kat açılmaları ya da benzeri iş parçasının mekanik özelliklerini etkileyebilecek delik açılması kaynaklı etkiler incelenmiştir.

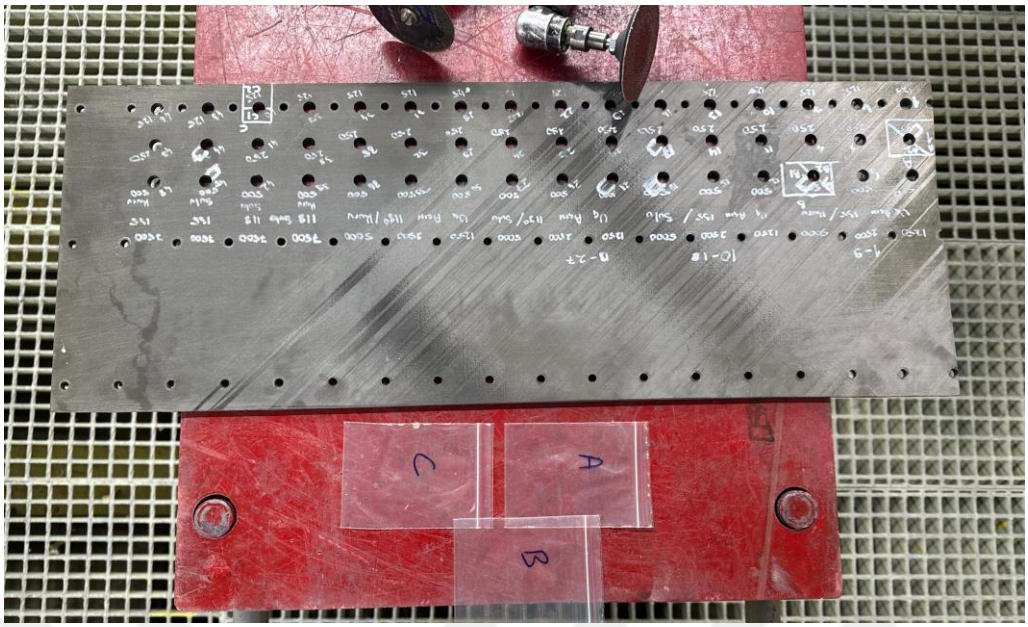


Şekil 4.12 İş Parçası üzerinde açılan deliklerin delaminasyonunun incelenmesi

Delaminasyon olduğu belirlenen deliklerde iş parçasının ne gibi etkilere uğradığı gözlemlenebilmek amacıyla optik mikroskop altında Şekil 4.12'de gösterildiği gibi incelemeler gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop ile görüntüleme gerçekleştirmek amacıyla numune hazırlama çalışması yapılmıştır. Numune hazırlığı Şekil 4.13'de yer almaktadır.



Şekil 4.13 Numune hazırlama çalışmaları



Şekil 4.14 Numune kesme işlemi

Zımparalama esnasında ilk olarak 1 $inç^2$ 'ye yaklaşık 220 adet aşındırıcı barındıran ve tane boyutları daha kaba olan zımpara seçilerek başlanır sonrasında sırasıyla 500 adet ve son olarak da en pürüzsüz yüzeyi elde etmek amacıyla ortalama 800 adet taneye sahip ve çok düşük tane boyutlu aşındırıcılar içeren zımpara kağıdı kullanılır. Bu esnada parçanın et kalınlığı yaklaşık olarak 1,5 mm inceltilir. Parlatma esnasında ise sırasıyla kabadan inceye doğru 9 – 3 – 1 µm tane boyutuna sahip çuhalar ile parlatma gerçekleştirilir. Ayrıca bu işlem esnasında içerisinde polyamid tanecikleri bulunan süspansiyon iş parçası üzerine uygulanır.

Bakalite alınan numuneler optik mikroskop altında x50 ve x75 büyütme gerçekleştirilerek görüntülenmiştir. Mikroskop altında delik içi ve delik çevresi kontrolü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15 Optik mikroskop üzerinde delaminasyon incelemesine ilişkin görseller

Optik mikroskop ile yapılan incelemenin ardından taramalı electron mikroskobu (SEM) ile daha hassas bir inceleme gerçekleştirilmiş ve delaminasyonun deney numuneleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

SEM'de görüntülenmesi planlanan numuneler hazırlanma aşamasında ilk olarak kurutma cihazına girmiştir. Kurutma cihazında malzeme üzerinde bulunan ve bulunması potansiyel olan nemden malzeme arındırılmıştır. Bu işlemin ardından CFRP iş parçasındaki matris iletken olmadığından dolayı, iyi bir görüntüleme sağlayabilmek adına altın film kaplama gerçekleştirilmiştir. Bu sayede numune üzerinde ince bir film tabakası oluşturulmuş ve malzemenin iletkenliği arttırılmıştır. İletkenlik değerinin düşük olması, malzeme üzerine gönderilecek elektronların tekrar yansıyamamasına ve görüntü elde edilememesine neden olmaktadır. Numune hazırlanması Şekil 4.15 ve 16'da, görüntü alınması ise 4.17'de yer almaktadır.



Şekil 4.16 Numune üzerine altın film kaplama işlemi



Şekil 4.17 Numunelerin SEM ile incelenmesi

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Deney Analizi

Delme ve işleme gibi talaşlı imalat içeren deneylerin analizinde deneysel tasarım teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde kontrol edilebilir durumda olan deney girdilerinin prosese etkileri izlenebilir ve deney parametrelerinin kıyası sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Yapılan deney sonucunda iş parçası üzerinde farklı parametreler ve farklı uç açılı takımlar kullanılarak oluşturulan deliklerin kalitelerini kıyaslamak için aşağıdaki kalite parametreleri doğrultusunda ölçümler gerçekleştirilmiştir.

- Delik içi yüzey pürüzlülük değeri (Ra),
- Delik boyutsal ölçüm değeri,
- Delinen iş parçası üzerindeki delaminasyon

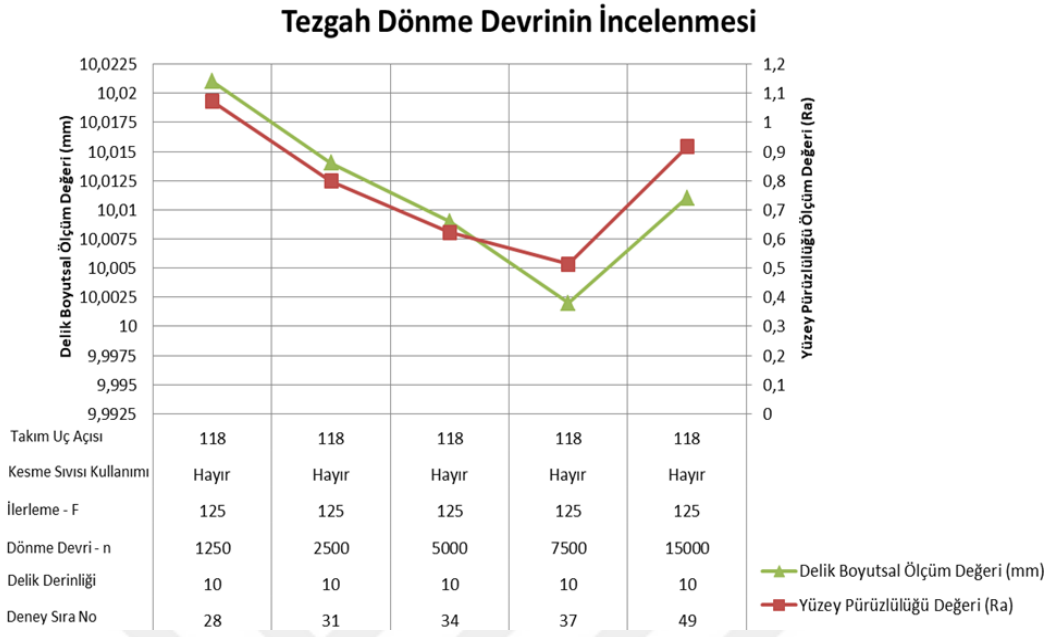
Delik içi yüzey pürüzlülük, delik boyutsal ölçüm ve delaminasyon ölçüm değerlerine ait ölçümler EK-Ölçüm Sonuçları'nda verilen tabloda belirtilmiştir.

Tabloda belirtilen ölçümler, her bir delik için gerçekleştirilmiş 3 farklı yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçümlerin aritmetik ortalamasıdır.

Delaminasyon ile de alakalı farklı parametrelere ait görseller verilmiştir.

5.1.1 Değişken Parametrelerin Etkilerinin İncelenmesi

5.1.1.1 Tezgâh Dönme Devrinin İncelenmesi



Şekil 5.1 Tezgah dönme devrinin incelenmesi

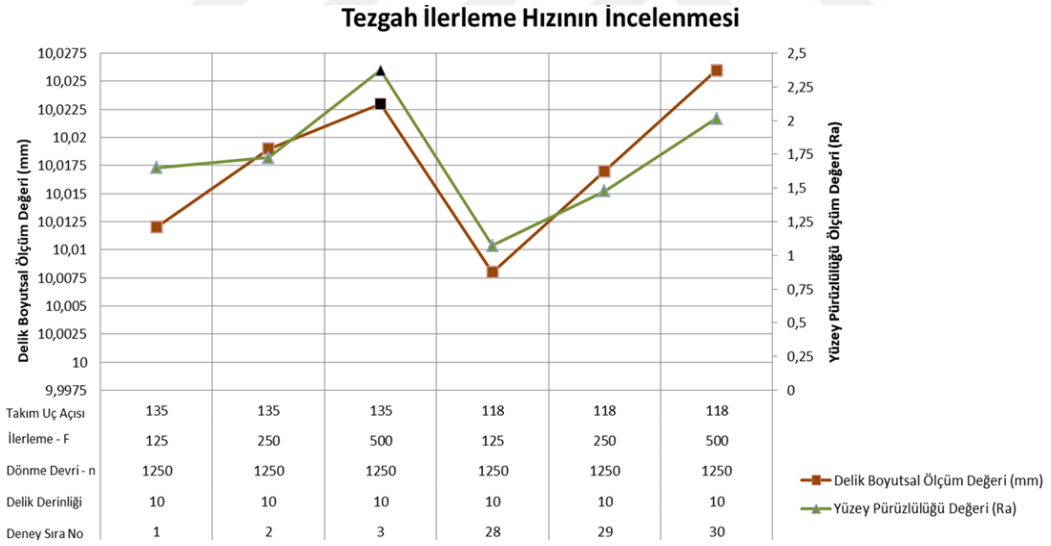
Tezgah dönme devrinin etkisini görmek amaçlı gerçekleştirilen incelemede 125 mm/dk ilerleme hızı, 118° takım uç açısı ve kesme sıvısının kullanılmadığı parametreler belirlenmiştir. Dönme devri sırasıyla 1250, 2500, 5000, 7500 ve 15000 dev/dk olduğu denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler sonucunda ortaya çıkan delik üzerinde delaminasyon, delik içi yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerlerine bakılmıştır. Ölçüm ve inceleme sonuçlarında en az boyutsal ölçüm sapması ve en iyi yüzey pürüzlülük değerinin 7500 dev/dk olduğu belirlenmiştir. İncelenen 5 çalışmada da delaminasyona rastlanmamıştır. Yapılan liretatür çalışmalarında görüldüğü üzere dönme devrinin optimum noktaya gelene kadar artışıyla yüzey pürüzlülüğü düşmüş ve optimum değerden sonra artışıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü tekrar yükselişe geçmiştir. Deney aşamasında kullanılan CFRP malzemenin yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerleri grafiği Şekil 5.1'de paylaşılmıştır.

Literatürde, dönme devri ve buna bağlı olarak kesme hızının artışıyla birlikte neden daha iyi sonuçlar alındığına yönelik yapılan araştırmalar incelenmiştir. Takımın gerçekleştrdiği kesme işlemi, iş parçası ve takım malzemesi arasında sıcaklık oluşturmaktadır. Özellikle fiber takviyeli kompozit malzemelerde, takım ve iş parçası ara yüzeyindeki sıcaklık değerleri çok yüksek derecelere

yükselmektedir. Bu artan sıcaklık ile birlikte kompozit malzeme içerisindeki matris malzeme yumuşamaya başlamaktadır. Matris malzemenin gösterdiği bu tepki, takımın görevini daha kolay yerine getirmesini sağlamakta ve malzeme daha kolay kesilmektedir. Fakat dönme devrinin yani kesme hızının tezgah standartlarının ve optimum değerin üzerinde artışıyla birlikte tezgah üzerindeki gücün aktarıldığı tüm parçalarda beklenenin üzerinde titreşim ve sarsıntı meydana gelmektedir. Bu da iş parçası üzerinde gerçekleştirilen işlemin kalitesini düşürmektedir [7].

5.1.1.2 Tezgâh İlerlemesinin Etkilerinin İncelenmesi

Tezgah dönme devrinin etkisini görmek amaçlı gerçekleştirilen incelemede 1250 dev/dk dönme devri, 118° ve 135° uç açısına sahip takımlar ve kesme sıvısının kullanılmadığı parametreler belirlenmiştir. İlerleme değeri sırasıyla 125, 250 ve 500 mm/dk olduğu denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler sonucunda ortaya çıkan delik üzerinde delaminasyon, delik içi yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerlerine bakılmıştır.



Şekil 5.2 Tezgah ilerleme hızının incelenmesi

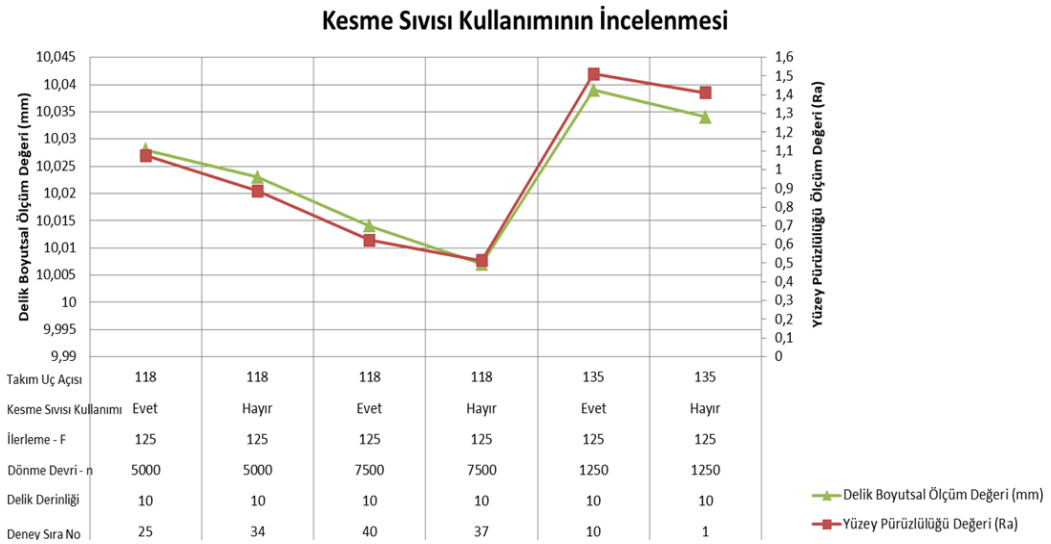
Ölçüm ve inceleme sonuçlarında en az boyutsal ölçüm sapması ve en iyi yüzey pürüzlülük değerine, ilerlemenin en düşük olduğu şartlarda ulaşılmıştır. İncelenen 6 çalışmada delaminasyona yalnızca ilerlemenin en yüksek değer olan 500 mm/dk olduğu, kesme sıvısının kullanılmadığı ve 135° uç açısına sahip takımların kullanıldığı 3 numaralı çalışmada rastlanmıştır. Yapılan liretatür çalışmalarında görüldüğü üzere ilerleme hızının ve delaminasyonun arasında doğrudan bir

bağlantı bulunmaktadır. Ayrıca delik içi yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerleri incelendiğinde ilerleme değerinin azalmasıyla birlikte delik içi yüzey pürüzlülük değerinin ve boyutsal ölçüm sapmasının azaldığı belirlenmiştir. Deney aşamasında kullanılan CFRP malzemenin yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerleri grafiği Şekil 5.2'de paylaşılmıştır.

Tezgah ilerlemesinin kompozit malzemelerin delik delimi konusunda etkilerini görmek amacıyla geçmişte gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde ilerleme hızı düşük olduğunda, delaminasyon faktöründe bir azalma olduğu belirlenmiştir. İlerleme hızındaki artış, itme kuvvetini arttırmaktadır. Bu durum da, yüksek ilerleme hızlarında matris ve takım malzemelerinin ara yüzeyleri arasında yeterince sıcaklık oluşturamamasından kaynaklanır. Fiber malzeme, işlem esnasında ana yapıdan uzaklaşmaya ve ayrılmaya meyillidir. Matris malzeme yeterli sıcaklığa ulaşamadığında bir sönümleme özelliği gösterememektedir. Bu durum da takviyenin yani fiberin kompozit yapısından çıkmasını engelleyememesine yani bir diğer adıyla delaminasyonun önüne geçemesine neden olur. Bu sebeple, yüksek hızlarda daha fazla delaminasyon meydana gelir. Fiber malzemenin sönümlenememesi aynı zamanda boyutsal ölçüm sapmalarına ve delik içerisinde yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olmaktadır [8].

5.1.1.3 Kesme Sıvısı Kullanımının Etkilerinin İncelenmesi

Kesme sıvısı kullanımı etkilerini incelemek amacıyla dönme devri, ilerleme ve takım uç açılarının tamamen aynı değerler olduğu, yalnızca kesme sıvısı kullanımının farklılık gösterdiği şartlar seçilmiştir. Bu şartlarla alakalı örnek olarak da yalnızca kesme sıvısı kullanımı değişiklik gösteren ve aşağıdaki Şekil 5.3'te detayları verilen deneyler belirlenmiştir.



Şekil 5.3 Kesme sıvısı kullanımının incelenmesi

Delik delme esnasında kesme sıvısı kullanımın etkisini göstermek amacıyla gerçekleştirilen incelemede üç farklı deney ikilisi üzerinden yorumlama gerçekleştirilmiştir. Her bir ikilide kesme sıvısı hariç tüm şartlar aynıdır. Bu üç deney ikilisinin diğer deney parametreleri Şekil 51'de belirtilmiştir. Bu denemeler sonucunda ortaya çıkan delik üzerinde delaminasyon, delik içi yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerlerine bakılmıştır. Ölçüm ve incelemeler sonucunda en az boyutsal ölçüm sapması ve en iyi yüzey pürüzlülük değerine kesme sıvısının kullanılmadığı şartlarda ulaşılmıştır. İncelenen çalışmada delaminasyona rastlanmamıştır. Yapılan liretatür çalışmalarında görüldüğü üzere kesme sıvısı kullanımı ile birlikte delik içi yüzey pürüzlülük değerinin ve boyutsal ölçüm sapma değerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca delik içi yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerleri incelendiğinde ilerleme değerinin azalmasıyla birlikte delik içi yüzey pürüzlülük değerinin ve boyutsal ölçüm sapmasının azaldığı belirlenmiştir. Deney aşamasında kullanılan CFRP malzemenin yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerleri grafiği Şekil 5.1'de paylaşılmıştır.

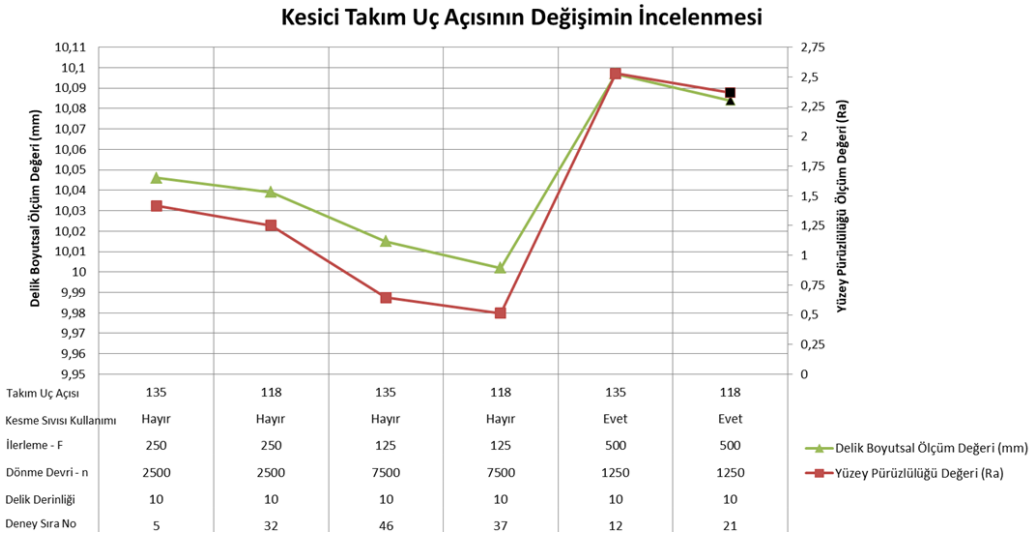
Kesme sıvısının kompozit malzemelerin delik delimi konusunda etkilerini görmek amacıyla geçmişte gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, fiber takviyeli kompozit malzemelerin talaş cinsi kesikli ve talaş tane boyutu geleneksel malzemelere kıyasla çok düşük olduğundan dolayı, takım ve iş parçası ara yüzeyinde sıvamaya ve takım – iş parçası ara yüzeyinde bir tabakamsı yapı oluşturduğuna rastlanmaktadır. Bu sıvama da gerçekleştirilmek istenen işlemin ve iş parçasının yüzey kalitesini düşürdüğünü ortaya çıkarmıştır. Kesme yüzeyinden

uzaklaştırılamayan ve kesme sıvısıyla birlikte oluşan bu tabakamsı yapı, kesme işlemi esnasında delik içi yüzey pürüzlülüğünü arttırmakta ve boyutsal sapmayı yükseltmektedir [46]. Ayrıca bu tezin deneysel çalışmalarının gerçekleştirildiği Türk Havacılık ve Uzay Sanayii şirketinde prepreg kullanılarak üretilen fiber takviyeli malzemelerin talaşlı imalat işlemleri sırasında kesme sıvısı kullanımı gözlemlendiğinde, kesme sıvısı kullanılmadığı ve kuru kesim yapıldığı belirlenmiştir. Bu durum da pratikteki uygulamalarda da kesme sıvısının fiber takviyeli kompozitlerde talaşlı imalat kalitesini olumsuz etkilediğini kanıtlar niteliktedir.

5.1.1.4 Takım Uç Açısı Etkisinin İncelenmesi

Takım uç açısının etkilerini incelemek amacıyla dönme devri, ilerleme değeri ve kesme sıvısı kullanımının tamamen aynı olduğu, yalnızca takım uç açılarının farklılık gösterdiği şartlar seçilmiştir. Bu şartlarla alakalı örnek olarak da yalnızca takım uç açılarının değişiklik gösterdiği ve aşağıdaki Şekil 5.4'te detayları verilen deneyler belirlenmiştir.

Delik delme esnasında kesici takım uç açısının etkilerini incelemek etkisini göstermek amacıyla gerçekleştirilen incelemede üç farklı deney ikilisi belirlenmiştir. Her bir ikilide kesici takım uç açısı hariç tüm şartlar aynıdır. Bu üç deney ikilisinin diğer deney parametreleri Şekil 5.4'de belirtilmiştir.



Şekil 5.4 Takım uç açısının değişimin incelenmesi

Bu denemeler sonucunda ortaya çıkan delik üzerinde delaminasyon, delik içi yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerlerine bakılmıştır. Ölçüm ve

incelemeler sonucunda en az boyutsal ölçüm sapması ve en iyi yüzey pürüzlülük değerine daha düşük kesici takım uç açısına sahip olunan, 118^{o} uç açısına sahip takımda ulaşılmıştır. İncelenen 6 çalışmada delaminasyona yalnızca dönme devrinin 1250 dev/dk, ilerlemenin en yüksek değer olan 500 mm/dk olduğu, kesme sıvısının kullanıldığı ve 118^{o} uç açısına sahip takımların kullanıldığı 3 numaralı çalışmada rastlanmıştır. Bu çalışmanın geçmiş bölümlerinde de belirtildiği üzere delaminasyona sebep olan en büyük etken ilerleme hızıdır. 21 numaralı deneyde de ilerlemenin yüksek olması, delaminasyona neden olmuştur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kesici takım uç açısının delaminasyona doğrudan etkisi olmadığı belirtilmektedir [47].

Yapılan liretatür çalışmalarında görüldüğü üzere takım geometrisi yeterli kesme kuvvetinin oluşumu, takım ömrünün korunması, takım üzerinde oluşan yükleri ve talaş oluşumunu doğrudan etkilemektedir. İşlenmesi planlanan malzemeye uygun takım geometrisi seçilemediğinde istenen verimle çalışma gerçekleştirilemez ve kesici takımın ömrü belirli ölçülerde azalır. Geçmiş çalışmalar incelendiğinde; takım ömrünün uzatılması ve talaşın iş parçası ve takım arasından hızlıca uzaklaştırılabilmesi amacıyla büyük uç açısına sahip matkaplar, düşük kesme kuvvetlerinin sağlanmasının yanı sıra delaminasyonun değerinin de düşürülebilmesi bakımından, matkap uç açısı daha küçük olan matkapların kullanılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca küçük uç açısına sahip matkaplar ile ilerleme kuvvetleri düşürülebilmektedir. Bu sayede delaminasyonun önüne geçilebilmektedir [47]. CFRP gibi görece yumuşak malzemelerde ayrıca ilk batma aşamasında daha sivri bir uca sahip, düşük uç açısına sahip matkaplar daha efektif bulunmaktadırlar [9]. Bu çalışmada da gerçekleştirilen deneyler incelendiğinde düşük uç açısına sahip olan matkapla gerçekleştirilen denemelerde daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve daha az sapmaya sahip boyutsal ölçüm değerlerine ulaşılmıştır. Deney aşaması sonrası ulaşılan CFRP malzemenin yüzey pürüzlülük ve boyutsal ölçüm değerleri grafiği Şekil 54'de paylaşılmıştır.

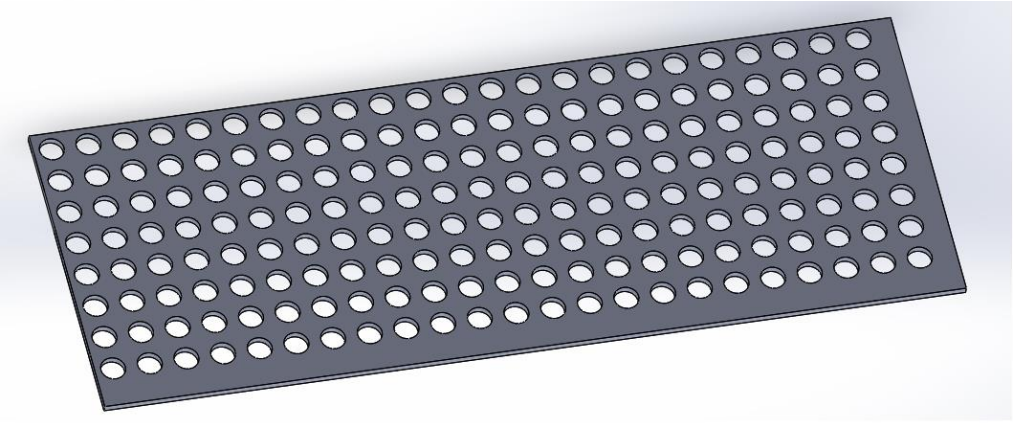
5.1.2 Delaminasyonun İncelenmesi

Farklı parametreler sonrasında oluşturulan deliklerde, delaminasyona uğrayıp, uğramadığı ilk olarak Ultrasonic Flaw Dedektörü ile incelenmiştir. Bu cihaz phase array metoduyla ultrasonic bir muayene gerçekleştirmektedir. Son olarak da delaminayonun etkileri daha yakından görmek ve iş parçası üzerindeki etkilerini

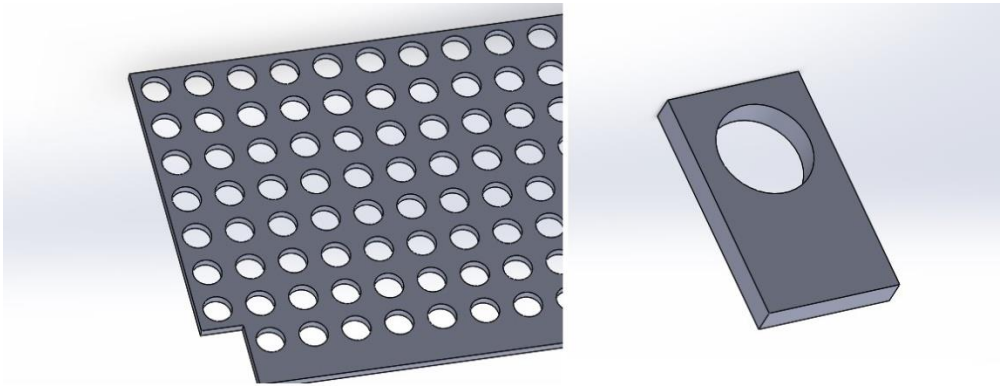
anlamak amacıyla SEM altında bir inceleme yapılmıştır. Hangi parametreler kullanılarak oluşturulan deliklerde delaminasyon olduğu EK-Ölçüm Sonuçları'nda verilmiştir. Delimasyonun gözlemlendiği deliklerle alakalı inceleme yapıldığında, tüm bu deliklerin ortak özelliğinin ilerleme hızının yüksek olduğu değerler kanısına varılmaktadır.

Delaminasyonun gözlemlendiği deliklerde, iş parçası üzerindeki etkilerini görmek amacıyla optik mikroskop altında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler öncesinde ilk olarak numuneler hazırlanmış ve bu numunelerle alakalı görüntüler elde edilmiştir. Alınan görüntüler Inverted Metalurjik Mikroskop ile x50 ve x75 yakınlaştırılarak alınmıştır.

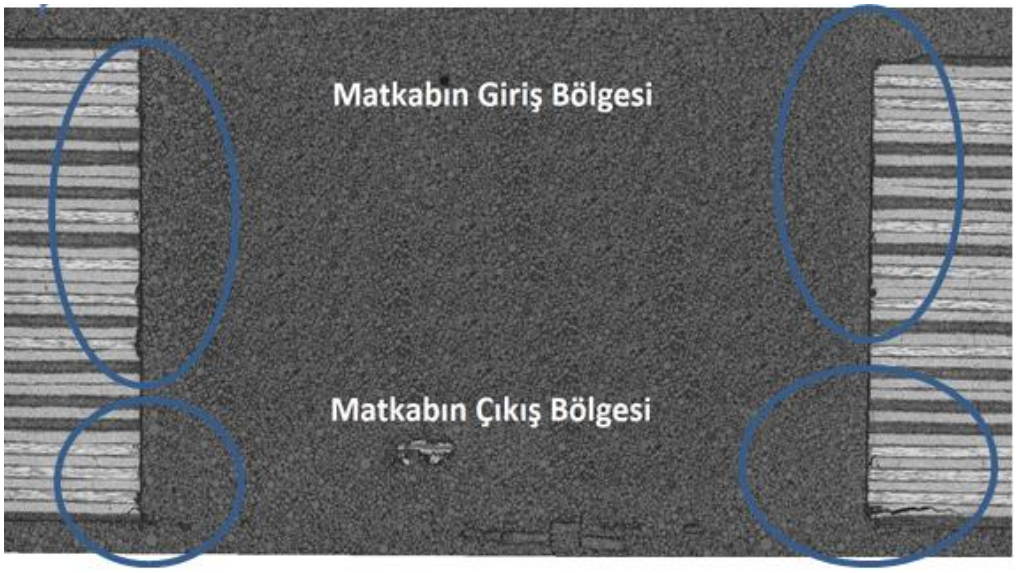
Delaminasyon incelenmesi esnasında alınan kesitler ve bu alınan kesitlerin yönleri aşağıda SolidWorks katı modellere programı üzerinden gerçekleştirilmiş çizimler üzerinden gösterilmektedir. İş parçası üzerinde incelenmek istenen delikler ilk olarak parça yüzeyinden kesme silindirlerleri vasıtasıyla çıkarılmıştır. Çıkarılan parçalar ise ikinci bir işlem olarak tekrardan tam çaptan geçecek şekilde doğrusal olarak tekrar kesilmiştir. Şekil 5.5 ve 5.6 üzerinde numunelerin nasıl kesildiğinden bahsedilmektedir.



Şekil 5.5 İş parçasının solidworks programı üzerinde katı modellemesi

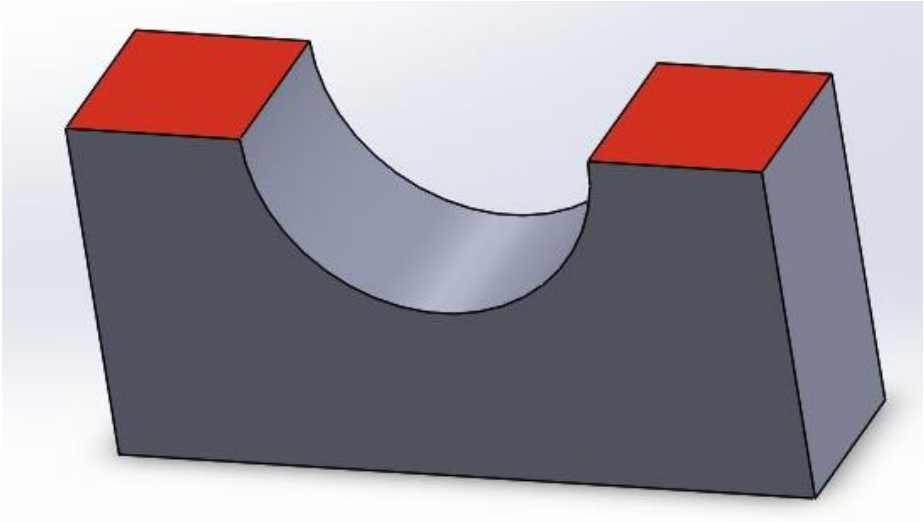


Şekil 5.6 İş parçası üzerinden delaminasyon incelemek üzere parça çıkarılması



Şekil 5.7 9. No'lu deney sonrası delaminasyon gözlemlenen deliğin çevresinin optik mikroskop altında x50 görüntülenmesi

Flaw dedektör ile delaminasyon olduğu belirlenen delikle alakalı numune hazırlanmış ve kesit alınan deliğin çevresi Şekil 5.7'de ve Şekil 5.9'da incelenmiştir. Delik çevresindeki delaminasyon incelenirken çıkarılan parça tam çap doğrultusundan olacak şekilde kesilmiştir. İncelenen yüzeyler Şekil 58'de gösterilmektedir. Matkabın çıkış yaptığı bölgedeki fiber katmanları üzerinde yığılma ve irili ufaklı net şekilde çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca takım ve iş parçasının temas ettiği ara yüzey arasında malzeme kaybı oluşumu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.8 Delik çevresindeki delaminayon etkilerinin incelendiği yüzey



Şekil 5.9 18. no'lu deney sonrası delaminasyon gözlemlenen deliğin çevresinin optik mikroskop altında x50 görüntülenmesi

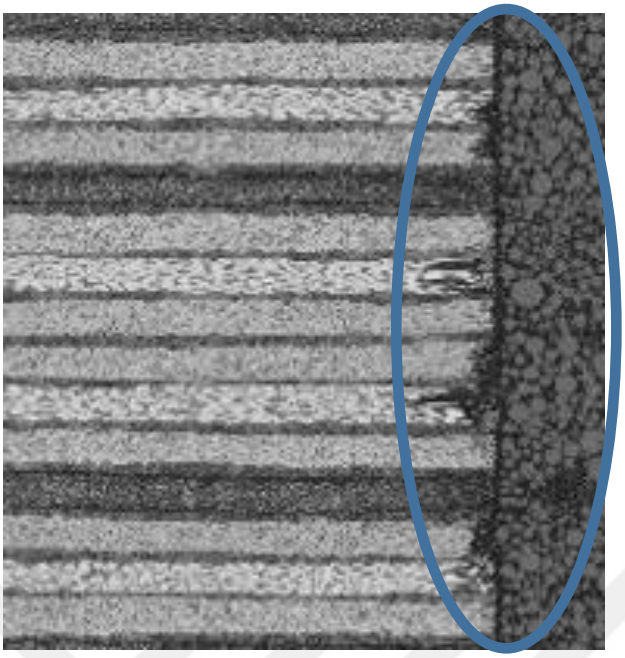
Delaminasyonun oluştuğu incelenen iki delikle alakalı olarak matkabın iş parçasına temas ettiği bölgeler optik mikroskop altında görüntülendiğinde, fiber katmanlarının aşağı yönlü etki kuvvetlerine bağlı olarak katman yüzeyinde çatlak oluşumları gözlemlenebilmektedir. İş parçasının devamlılığı ve özellikle matkabın çıktığı bölgelerde deformasyon belirgin şekildedir. Literatürde benzeri çalışmalar incelendiğinde, Bayraktar, Siyambaş ve Turgut 2016 yılında yaptıkları çalışmada fiber takviyeli kompozit malzemelerin delik delinmesini incelemiş ve gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kesme hızları, ilerleme değerleri ve farklı ağız sayılarına takımlar kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada da ilerleme hızının arttırılmasıyla delaminasyonun arttığı belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmada bu çalışmada da gözlemlendiği gibi takımın oluşturduğu basma yüküyle birlikte katmanlar arasında burkulmalar gerçekleşmektedir. Burkulma ile delaminasyonun etkisinin ilişikisi sonrası çatlaklar oluşmaktadır. Uygulanan kuvvetin yüksek ve fiber katmanları arasındaki yapışmanın az olduğu durumlarda oluşan çatlaklar çok daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle matkabın çıktığı bölgelerde fiber katmaları arasında açılma ve çatlaklar olduğu ortaya çıkmıştır. Gözlemlenen bu çatlaklar, malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan düşürmektedir.

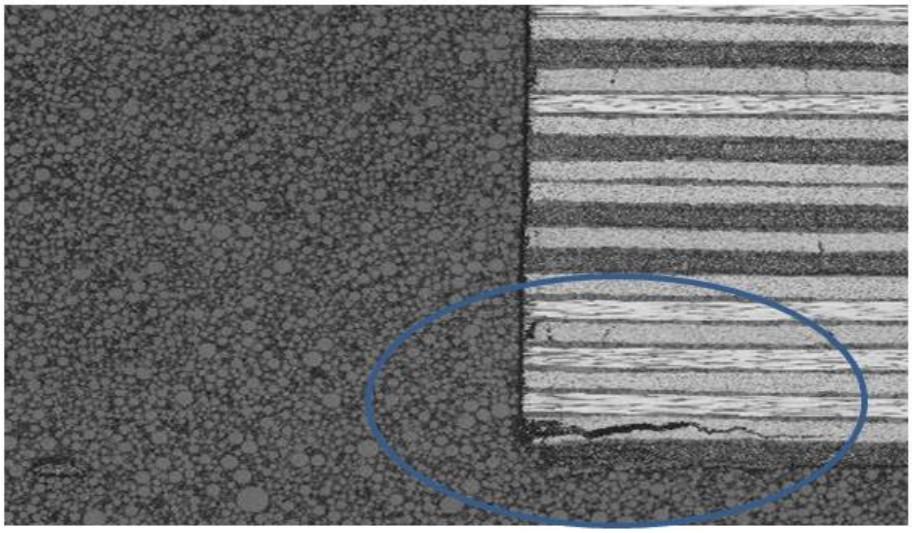
Bu iki incelenen delikle alakalı olarak ölçüm parametreleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.1 İncelenen ölçüm değerleri

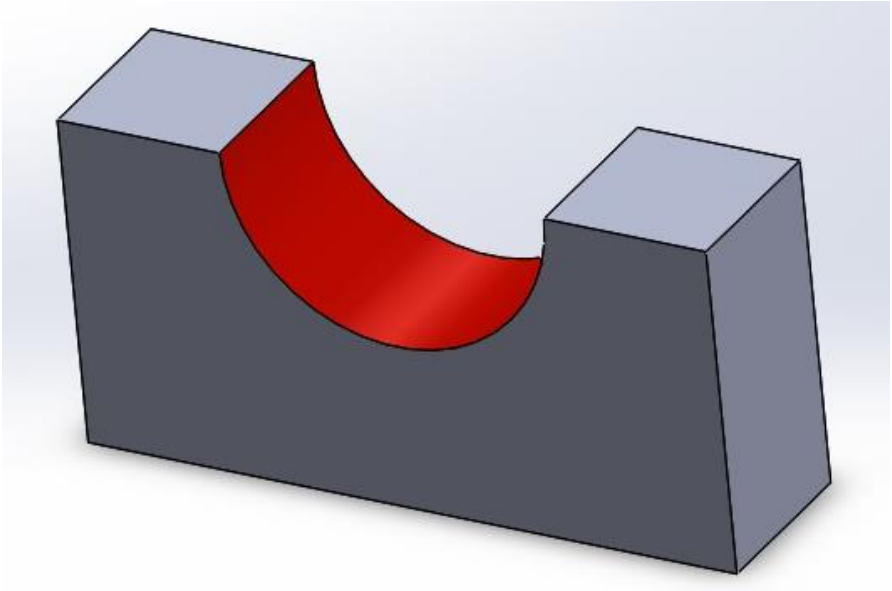
İncelenen Görsel	**Deney No**	**Dönme Devri- n (dev/dk)**	**İlerme – F (mm/dk)**	**Kesme Sıvısı Kullanımı**	**Takım Uç Açısı (°)**
Şekil 5.7 – 5.10	9	5000	500	Hayır	135
Şekil 5.9 – 5.11	18	5000	500	Evet	135



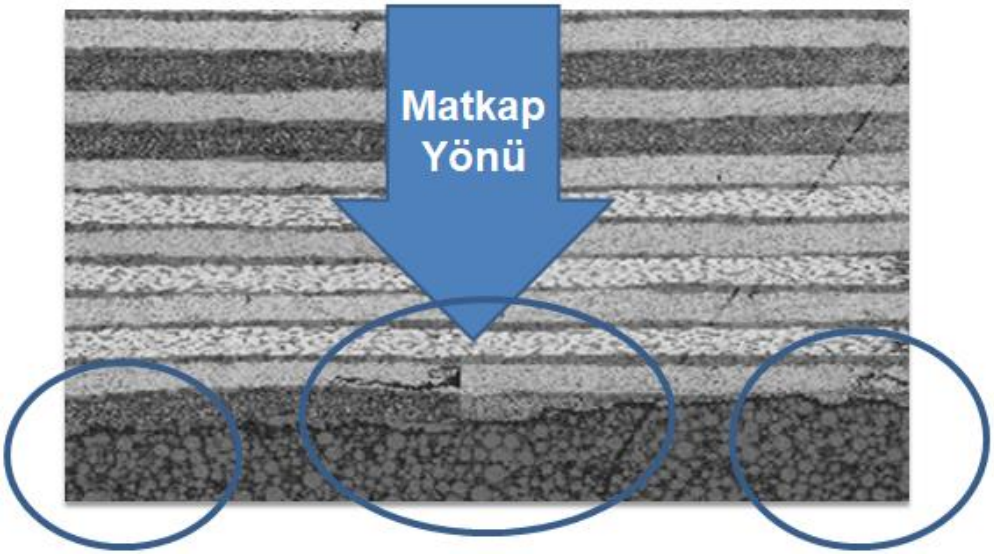
Şekil 5.10 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x75 büyütmede incelenmesi



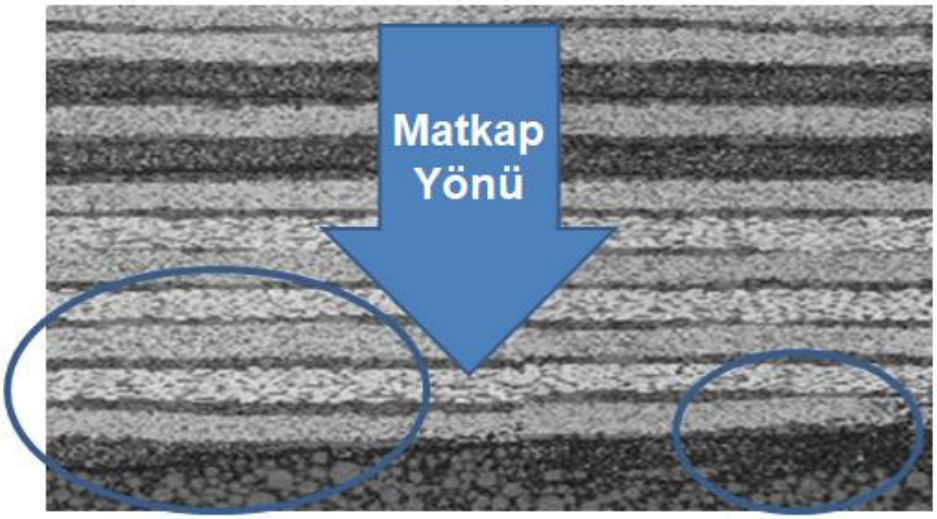
Şekil 5.11 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x75 büyütmede incelenmesi



Şekil 5.12 Delik içi delaminayon etkilerinin incelendiği yüzey



Şekil 5.13 Delik içi delaminasyonun x75 büyütmede incelenmesi



Şekil 5.14 Delik içi delaminasyonun x75 büyütmede incelenmesi

Delik içi delaminasyonu gözlemlemek amacıyla Ultrasonic Flaw Dedektörü ile delaminasyon olduğu belirlenmiş deliklerde optik mikroskop ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.13 ve 5.14'te görüldüğü üzere matkabın çıkış yaptığı yerde fiberlerin takımın aşağı yönlü basma kuvveti ile yönlendiği belirlenmiştir. Fiberlerin bu kuvvet karşısında çatladığı görüntülenmektedir ve matkabın çıkış yaptığı bölgede ise malzeme kaybı yaşandığı tespit edilmiştir.

Literatürde bu konu hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde Özkaya, Özen, İlhan ve Aslanlar'ın yaptığı, cam küre takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin delaminasyon faktörünün deneysel olarak incelenmesi karşımıza çıkmaktadır. Gerçekleştirilmiş olan çalışmada devir ve buna paralel kesme hızı arttıkça delaminasyonu azaldığı, kesme kalitesinin arttığı belirlenmiştir [7]. Bu çalışma esnasında delaminasyon gözlemi de optik mikroskop altında gerçekleştirilmiş ve ilerleme hızının 250 mm/dk üzerinde yapılan denemelerde özellikle maktap çıkış bölgelerinde fiber katmanları arasında çatlakların bulunduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.2 İncelenen ölçüm değerleri

İncelenen Görsel	**Deney No**	**Dönme Devri- n (dev/dk)**	**İlerme – F (mm/dk)**	**Kesme Sıvısı Kullanımı**	**Takım Uç Açısı (°)**
Şekil 5.13	45	7500	500	Evet	135

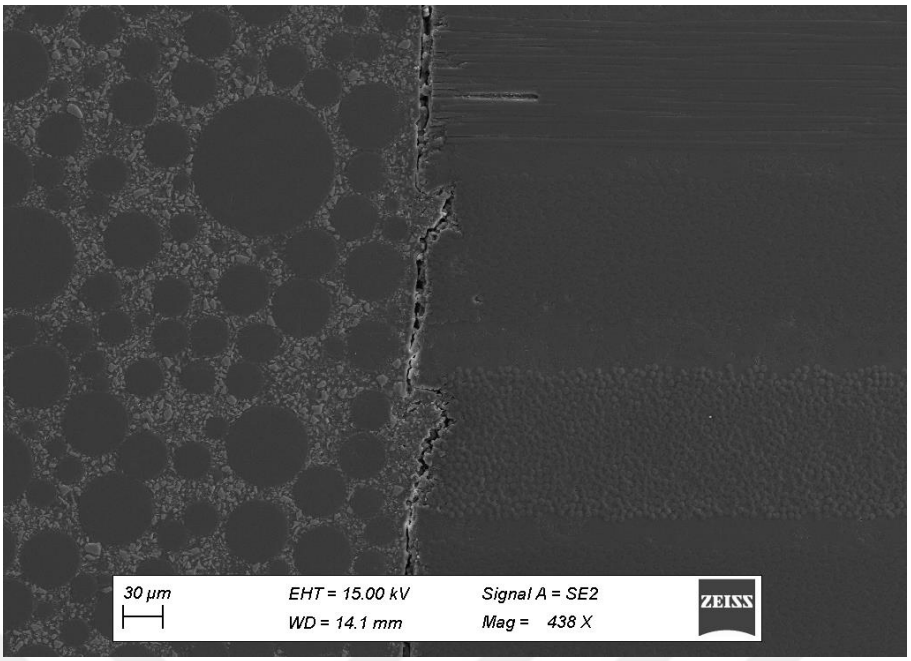
Tablo 5.2 İncelenen ölçüm değerleri (devamı)

Şekil 5.14	57	15000	500	Hayır	135

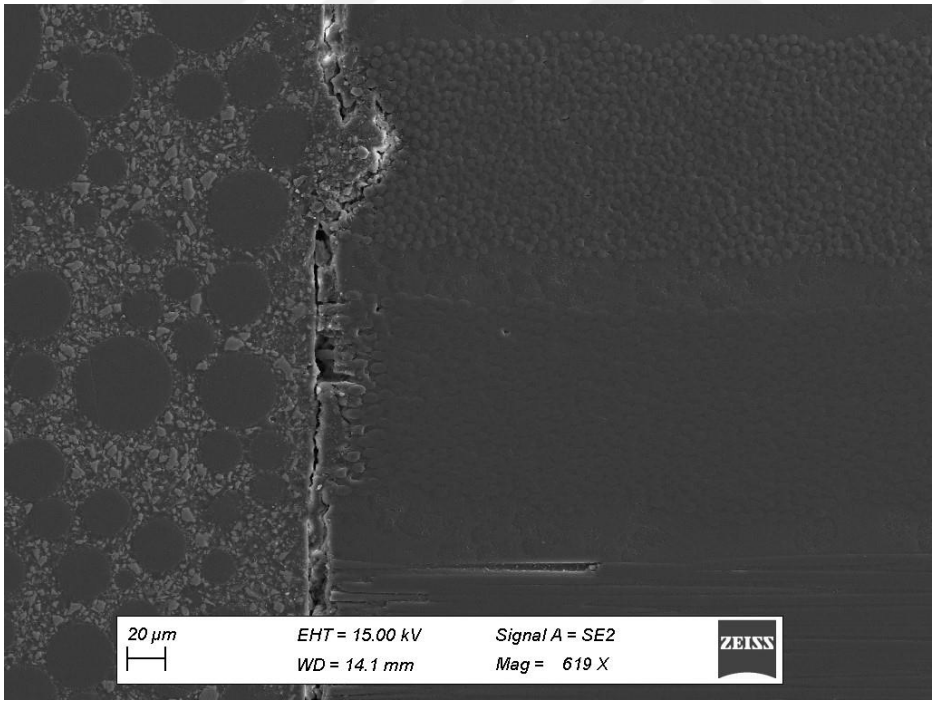
Delaminasyon etkileri daha yakından görmek ve numuneler üzerinde etkilerini incelemek amacıyla SEM ile incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler esnasında optik mikroskopta olduğu gibi taramalı elektron mikroskobunda da delik içi ve delik çevresinin incelemeri gerçekleştirilmiştir. Bu esnada 3 farklı deney numunesi incelenmiştir. Bu incelenen numunelerin delik delme parametreleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 İncelenen ölçüm değerleri

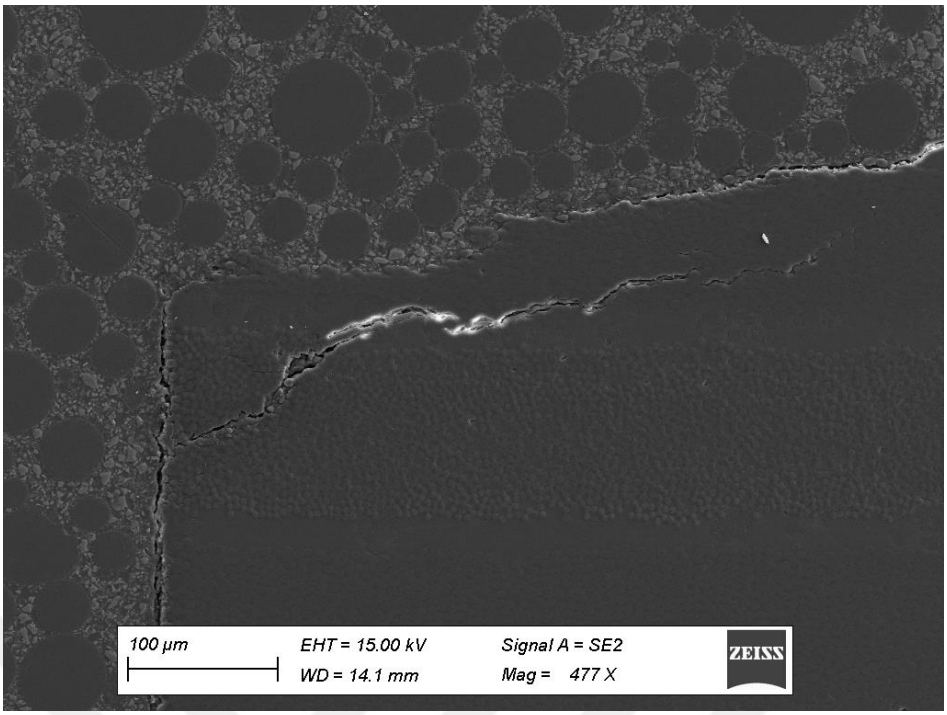
İncelenen Görsel	**Deney No**	**Dönme Devri- n (dev/dk)**	**İlerme – F (mm/dk)**	**Kesme Sıvısı Kullanımı**	**Takım Uç Açısı (°)**	**Delaminasyon Durumu**
5.15-16-17-22-23	9	5000	500	Hayır	135	Var
5.18-19-24-25-26	18	5000	500	Evet	135	Var
5.20-21	40	7500	125	Evet	118	Yok



Şekil 5.15 Deney no 9'a ait delaminasyon etkilerinin x438 büyütmede SEM ile incelenmesi

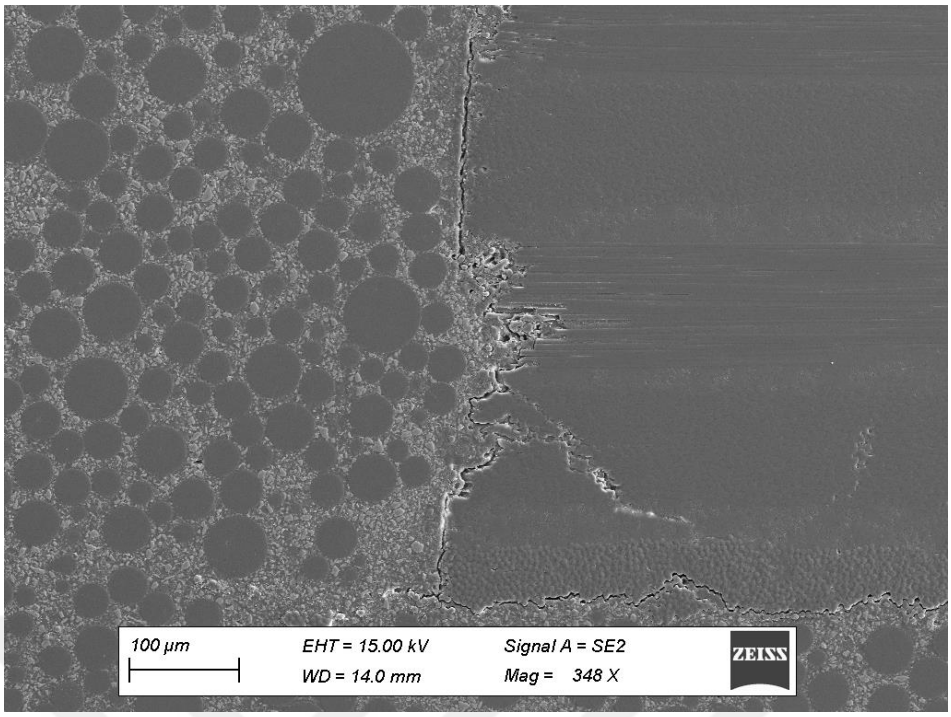


Şekil 5.16 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x619 büyütmede SEM ile incelenmesi

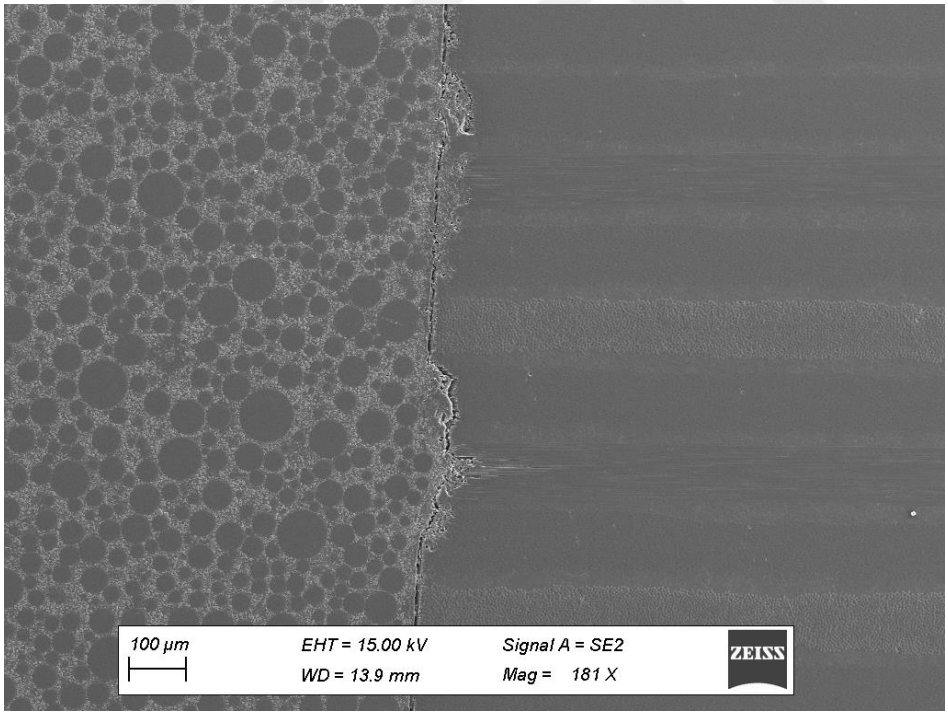


Şekil 5.17 Deney no 9'a ait delaminasyon etkilerinin x477büyütmede SEM ile incelenmesi

Bu incelemeler Şekil 58'de gösterildiği gibi deliğin tam merkezinden alınan kesitler doğrultusunda oluşturulmuştur. Delik delme sırasında fiberlerin yapıdan koparak ayrıldığı ve fiber yapının bozulduğu görüntülenmektedir. Ayrıca matkabın girdiği ve çıktığı bölgelerde çatlak oluşumuna rastlanmaktadır. Fiber katmanlarının aşağı yönlü etki kuvvetlerine bağlı olarak katman yüzeyinde çatlak oluşumları ve yapıdan malzemenin koparak uzaklaştığı belirlenebilmektedir.



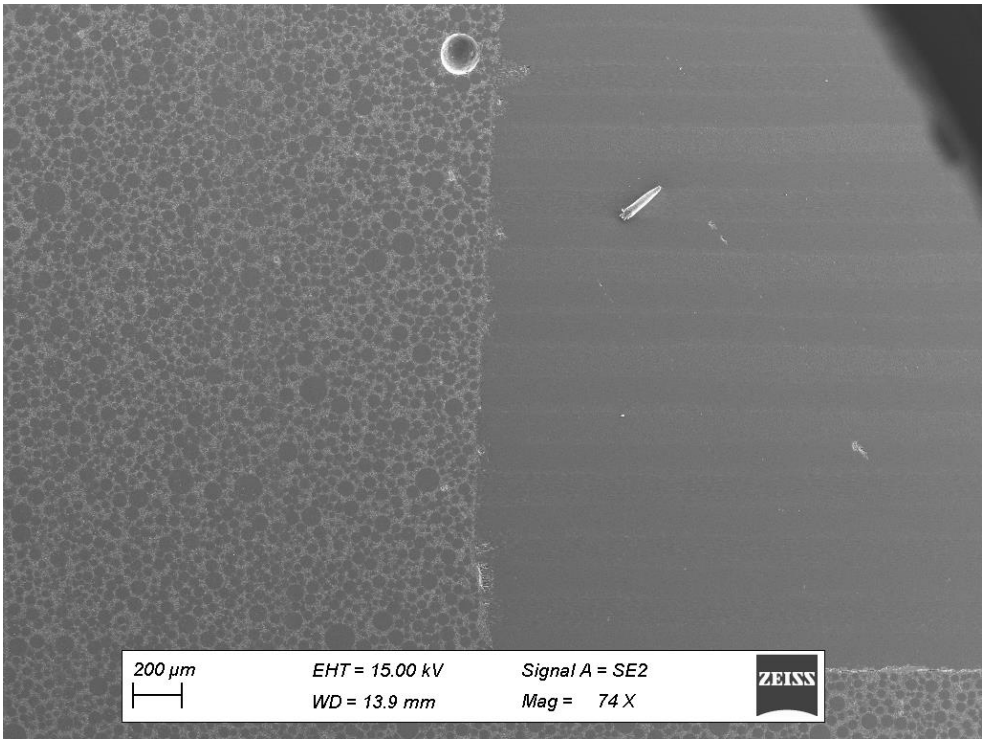
Şekil 5.18 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x348büyütmede SEM ile incelenmesi



Şekil 5.19 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x181büyütmede SEM ile incelenmesi

18 numaralı deney sonrası yapılan incelemelerde 9 numaralı deneyde olduğu gibi tam çaptan geçecek şekilde doğrusal kesit alınmış ve incelemeler

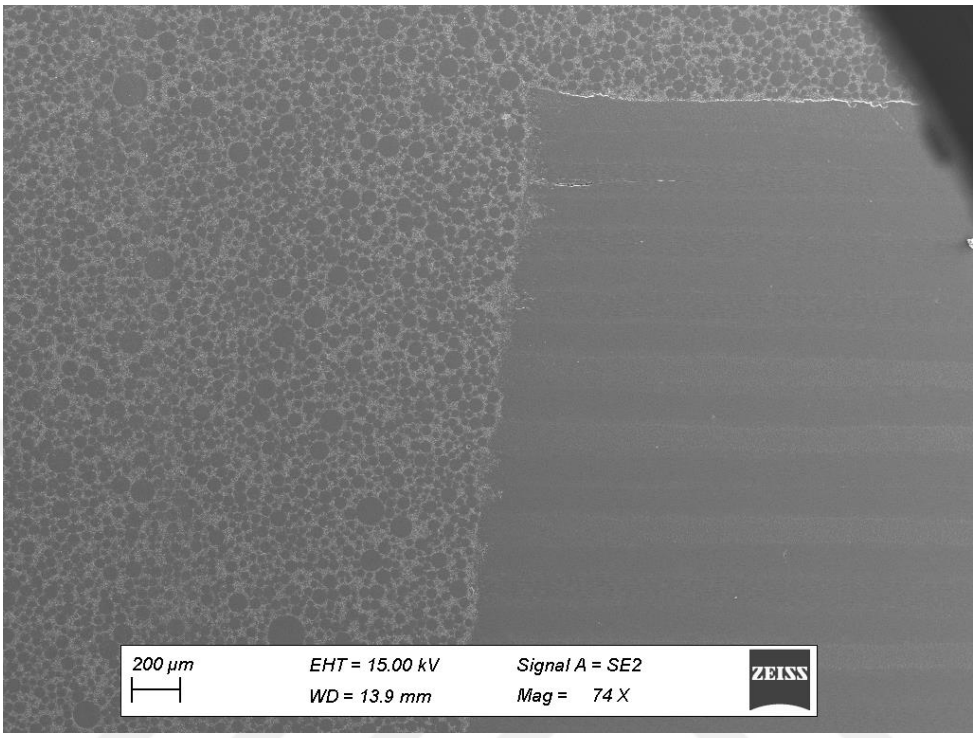
gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonucuna bakıldığında da 9 numaralı deneyden farklılığı olmadığı belirlenmiştir. Delik delme sırasında fiberlerin yapıdan koparak ayrıldığı ve fiber yapının bozulduğu görüntülenmektedir. Ayrıca matkabın girdiği ve çıktığı bölgelerde çatlak oluşumuna rastlanmaktadır. Fiber katmanlarının aşağı yönlü etki kuvvetlerine bağlı olarak katman yüzeyinde çatlak oluşumları ve yapıdan malzemenin koparak uzaklaştığı belirlenebilmektedir.



Şekil 5.20 Deney no:40'a ait delaminasyon etkilerinin x74büyütmede SEM ile incelenmesi

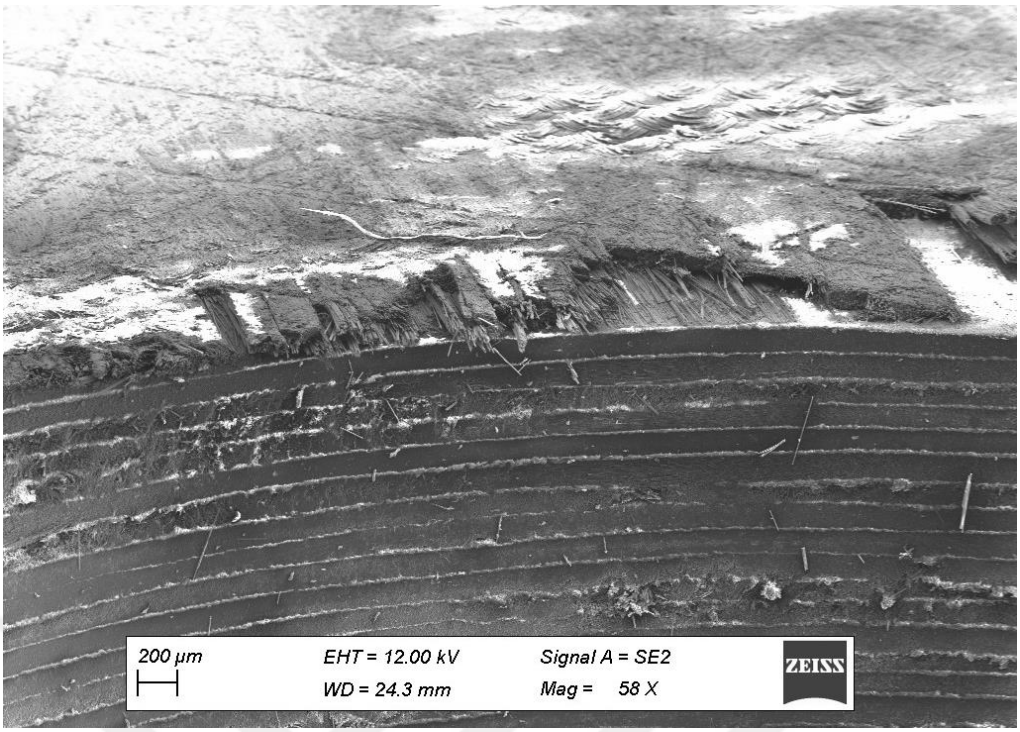
Literatürde benzeri çalışmalar incelendiğinde, Bayraktar, Siyambaş ve Turgut 2016 yılında yaptıkları çalışmada fiber takviyeli kompozit malzemelerin delik delinmesini incelemiş ve gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kesme hızları, ilerleme değerleri ve farklı ağız sayılarına takımlar kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada da ilerleme hızının arttırılmasyla delaminasyonun arttığı belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada bu çalışmada da gözlemlendiği gibi takımın oluşturduğu basma yüküyle birlikte katmanlar arasında burkulmalar gerçekleşmektedir. Burkulma ile delaminasyonun etkisinin ilişikisi sonrası çatlaklar oluşmaktadır. Uygulanan kuvvetin yüksek ve fiber katmanları arasındaki yapışmanın az olduğu durumlarda oluşan çatlaklar çok daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle matkabın çıktığı bölgelerde fiber katmaları arasında

açılma ve çatlaklar olduğu ortaya çıkmıştır. Gözlemlenen bu çatlaklar, malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan düşürmektedir.

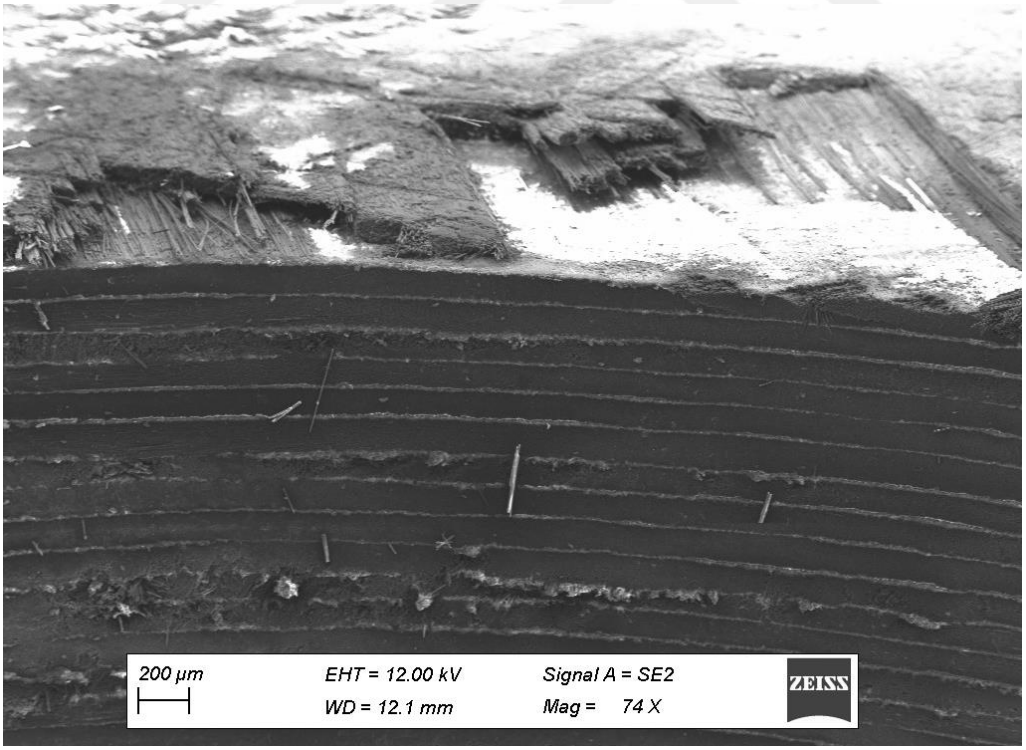


Şekil 5.21 Deney no:40'a ait delaminasyon etkilerinin x74büyütmede SEM ile incelenmesi

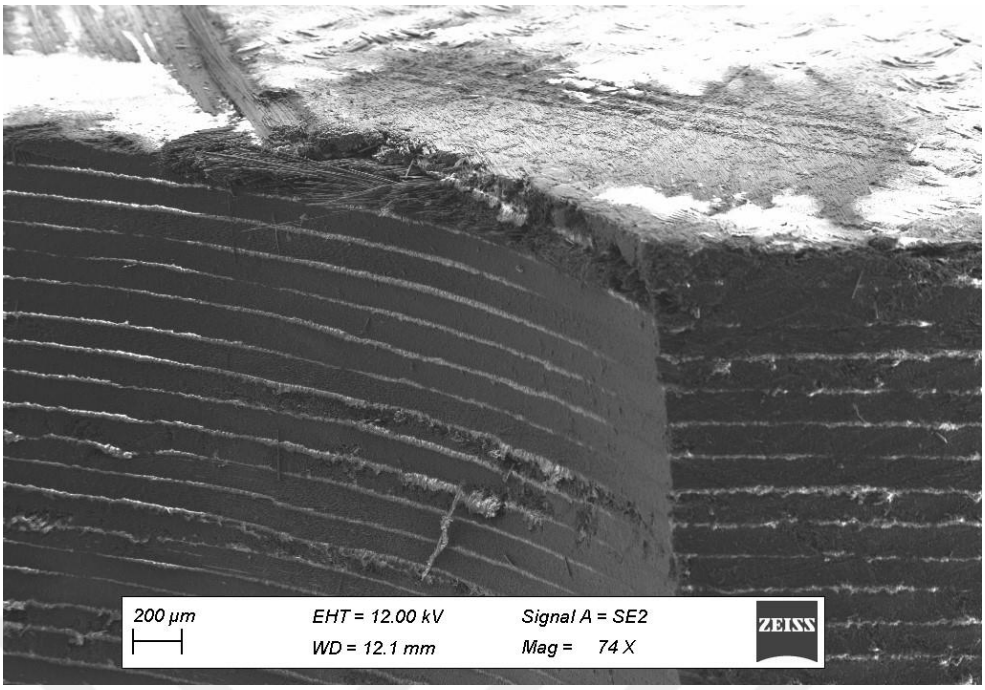
40 numaralı deneye bakıldığında geçmiş tahribatsuz muayene dedektörü ve optik mikroskop dedektörü incelemelerinde olduğu gibi burada da delaminayona rastlanmamış ve malzeme ile takım malzemesi ara yüzeyi arasında malzeme kayıpları, liflenme ve çatlama gibi olumsuzlukların yaşanmadığı belirlenmiştir.



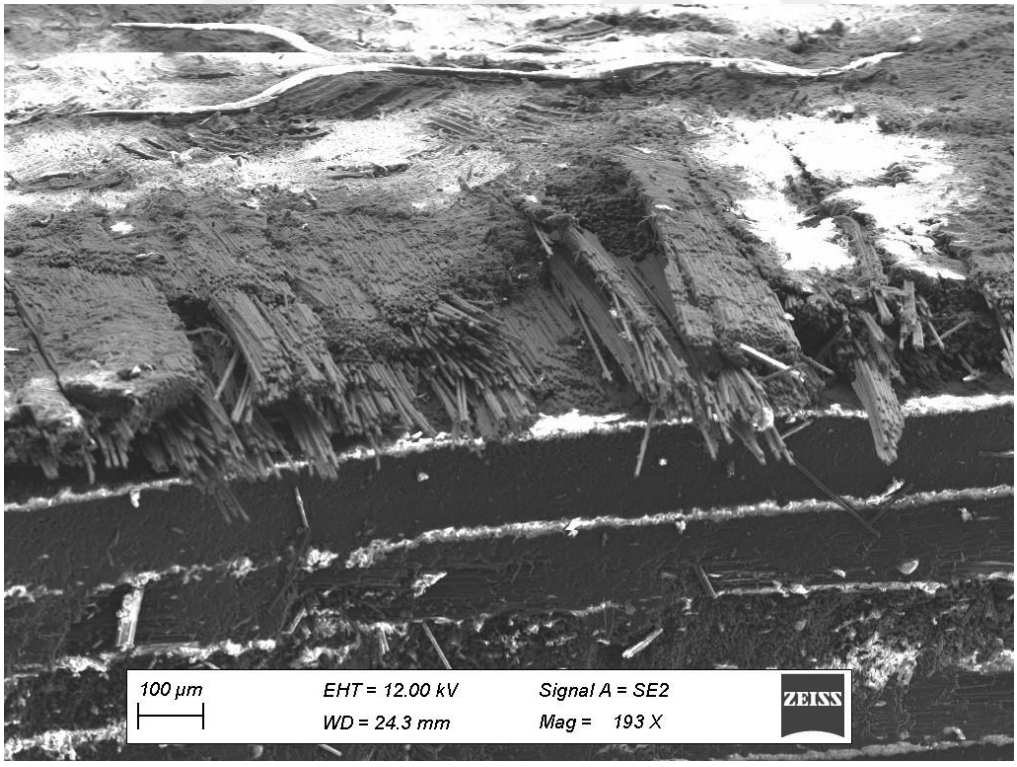
Şekil 5.22 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x58 büyütmede SEM ile incelenmesi



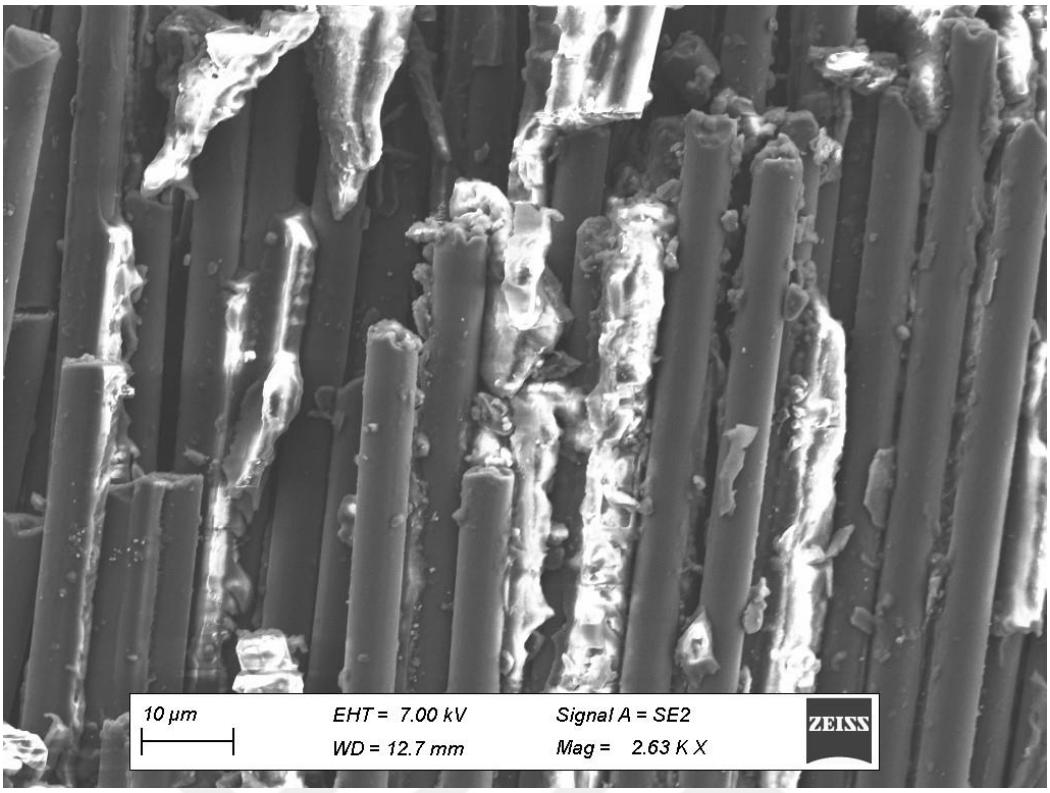
Şekil 5.23 Deney no:9'a ait delaminasyon etkilerinin x74 büyütmede SEM ile incelenmesi



Şekil 5.24 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x74 büyütmede SEM ile incelenmesi



Şekil 5.25 Deney no: 18'e ait delaminasyon etkilerinin x193 büyütmede SEM ile incelenmesi



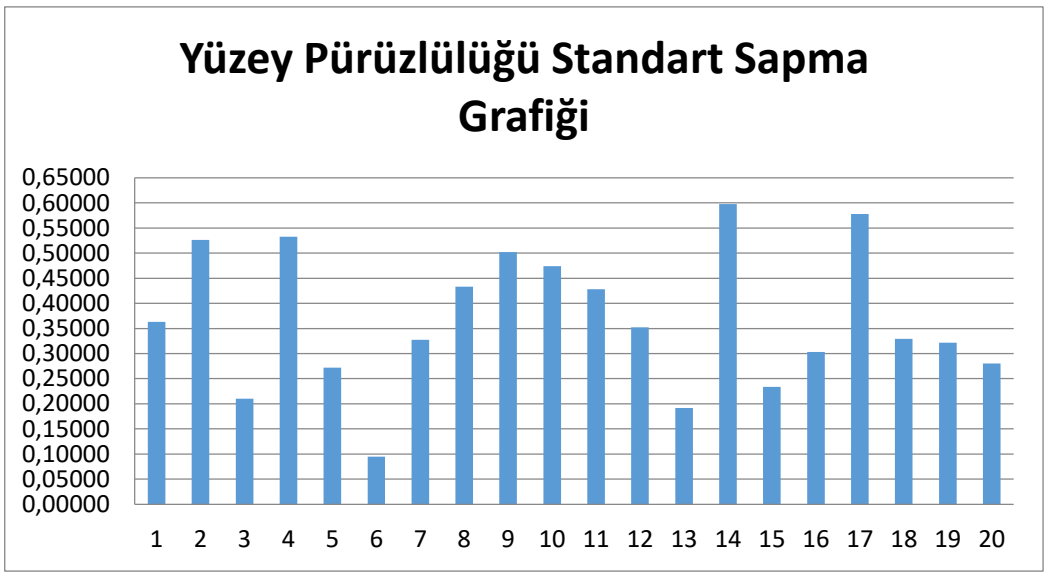
Şekil 5.26 Deney no:18'e ait delaminasyon etkilerinin x2630 büyütmede SEM ile incelenmesi

9 ve 18 numaralı deneylerin matkap çıkış bölgeleri SEM altında incelendiğinde fiber katmanların zarar gördüğü, elyaf kırıklıkların olduğu, yapıdan fiberlerin koparak uzaklaştığı ve liflenme yaşandığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeplerden dolayı malzemenin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği yorumu yapılabilmektedir. Ayrıca son katmanlarda kopan fiber katmanlarında yukarı doğru kalkma ve bir diğer fiber katmanı arasında açılma olduğu görüntülenmektedir.

Optik mikroskop incelemeleri sonucu ile SEM sonuçları birbirleri ile tamamiyle paralellik göstermektedir. Literatürde bu konu hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde Özkaya, Özen, İlhan ve Aslanlar'ın yaptığı, cam küre takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin delaminasyon faktörünün deneysel olarak incelenmesi karşımıza çıkmaktadır. Gerçekleştirilmiş olan çalışmada devir ve buna paralel kesme hızı arttıkça delaminasyonu azaldığı, kesme kalitesinin arttığı belirlenmiştir [7]. Bu çalışma esnasında delaminasyon gözlemi ile alakalı olarak ilerleme hızının 250 mm/dk üzerinde yapılan denemelerde özellikle maktap çıkış bölgelerinde fiber katmanları arasında çatlakların bulunduğu belirlenmiştir.

5.2 Sonuçların İstatiki İncelenmesi

Deney aşaması sonrası gerçekleştirilen nicel ölçümler sonucunda delik içi yüzey pürüzlülük değerine ve delik boyutsal ölçüm değerine ulaşılmıştır. Bu ulaşılan sonuçların tutarlılıkları standart sapma değerleri bulunarak ölçülmeye çalışılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 5.27 ve 5.28'de gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ve delik boyutsal ölçümlerine ait standart sapma grafikleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.27 Dönme devrinin değişiklik gösterdiği her üçlü gruba ait yüzey pürüzlülüğü sapma grafiği



Şekil 5.28 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm dağılım grafiği

Gerçekleştirilen tüm ölçümlerle alakalı bulunan standart sapma ve aritmetik ortalama değerleri aşağıdaki tablo 5.4'de belirtilmiştir.

Tablo 5.4 Ölçümlere ait istatiki değerler

	Aritmek Ortalama Değeri	**Standart Sapma Değeri**
Delik İçi Yüzey Pürüzlülük Ölçümü (µm)	1,442333	0,579362
Delik Boyut Ölçümü (mm)	10,05152	0,054386

Çalışılan veri aralığındaki değerler incelendiğinde delik içi yüzey pürüzlülük için ve delik boyutsal ölçüm değerlerine ait standart sapma değelerinin sıfır değerine oldukça yakın olduğu ve bu da ortaya çıkan ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğunu göstermektedir.

5.3 Sonuç

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve geçmişte gerçekleştirilmiş, aynı zamanda literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde deney sonuçlarının literatür ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Tez esnasında, çalışmaların gerçekleştirildiği Türk Havacılık ve Uzay Sanayii şirketinde CFRP malzemenin talaşlı işlenmesi incelendiğinde tez konusunda yapılan çalışmaların, uygulamada olan işleyiş ile aynı doğrultuda olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde bulunan fiber takviyeli kompozit malzemelerin delik delme işlemlerini konu alan tezler incelendiğinde;

Özkaya, Özen, İlhan ve Aslanlar, cam küre takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin delaminasyon faktörünün deneysel olarak incelemesini gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilmiş olan çalışmada devir ve buna paralel kesme hızı arttıkça delaminasyonu azaldığı, kesme kalitesinin arttığı belirlenmiştir [7]. Bayraktar, Siyambaş ve Turgut 2016 yılında yaptıkları çalışmada fiber takviyeli kompozit malzemelerin delik delinmesini incelemiş ve gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kesme hızları, ilerleme değerleri ve farklı ağız sayılarına takımlar

kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada da devir ve buna paralel kesme hızı arttıkça delaminasyonu azaldığı, kesme kalitesinin arttığı belirlenmiştir [47]. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da tezgah devri ve buna bağlı kesme hızının artışı, yapılan incelemeler ve ölçümler sonrasında delik kalitesini arttırdığını göstermektedir.

Canpolat, cam elyaf malzemenin delinebilirliği konusunda çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma esnasında farklı takım malzemeleri kullanmıştır. Canpolat, çalışma sonrasında ilerleme hızının artmasıyla birlikte delik dışı ve içi yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve buna ters orantılı olarak delik kalitesinin düştüğünü belirlemiştir [8]. Bayraktar, Siyambaş ve Turgut 2016 yılında yaptıkları çalışmada fiber takviyeli kompozit malzemelerin delik delinmesini incelemiş ve gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kesme hızları, ilerleme değerleri ve farklı ağız sayılarına takımlar kullanarak deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada da ilerleme hızı arttıkça delaminasyonun arttığı, kesme kalitesinin azaldığı belirlenmiştir [47]. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da ilerleme hızının artışı, yapılan incelemeler ve ölçümler sonrasında delik kalitesini düşürdüğünü göstermektedir.

Ekici ve Işık, gerçekleştirdikleri çalışmada 60°, 90° ve 120° uç açılı takımlar kullanarak fiber takviyeli kompozitlerin delik delme işlemenini incelemiştir. Kullanılan takımın uç açısının azalmasıyla birlikte daha az yüzey hasarı ve buna bağlı olarak daha yüksek kaliteye sahip delikler ortaya çıktığı belirlenmiştir [9]. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da takım uç açısının azalmasıyla birlikte, yapılan incelemeler ve ölçümler sonrasında delik kalitesini arttırdığını göstermektedir.

Lemma, Chen, Siores ve Wang, gerçekleştirdikleri çalışmada cam fiber takviyeli malzemelerin kesme prosesini incelemişlerdir. Kesme sırasında kesme sıvısı kullandıkları denemelerde, bu gerçekleştirilen çalışmada olduğu gibi takım ve iş parçası ara yüzeyinde sıvamaya rastlanmıştır. Bu sıvama da gerçekleştirilmek istenen işlemin ve iş parçasının yüzey kalitesini düşürdüğünü ortaya çıkarmıştır [46].

Yapılan tüm deneysel çalışmaların ardından CFRP malzemelerin delik delinmesi ile alakalı ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Tezgâh devri ve buna bağlı kesme hızının artışı delik içi yüzey pürüzlülüğü değerini düşürdüğü ve boyutsal sapmanın azaldığı, bu incelemelere bağlı olarak da delik kalitesini iyileştirdiği saptanmıştır.
- Tezgâh ilerlemesinin artışının delaminasyonu arttırdığı, delik içi yüzey pürüzlülük değerini yükselttiği, bu sebeplerden dolayı da delik kalitesini düşürdüğü saptanmıştır.
- Kullanılan 118^{o} ve 135^{o} takım ağız uç açısına sahip takımlardan, 135^{o} sahip takımın kullanılmasıyla birlikte delik çıkışında gözlenen çapak miktarı artmakta ve delik içi yüzey pürüzlülük değeri artış göstermektedir, bu sebeplerden de 135^{o} takım uç açısının kullanılması delik kalitesini düşürdüğü saptanmıştır.
- Delik delinmesi esnasında kesme sıvısı kullanıldığında kesme esnasında ortaya çıkan çapak sıvıyla birleşerek delik içinde takım ve iş parçası arayüzeyinde birikmektedir. Biriken yapı, sürtünmeyi arttırmakta ve pürüzlülüğü arttırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı oluşturulan deliğin kalitesinin kesme sıvısı kullanılmasıyla birlikte düştüğü saptanmıştır.

KAYNAKÇA

[1] F. L. Matthews ve R. D. Rawlings, *Composite Materials: Engineering and Science*, Woodhead Publishing, Oxford, 2007

[2] P. Irving ve C. Soutis, *Polymer Composites in the Aerospace Industry, Aerospace Engineering Requirements In Building With Composites*, in C. Soutis (der.), Woodhead Publishing, Duxford, 2020, ss. 3-4.

[3] G. Santhanakrishnan, R. Krishnamurthy ve S. K. Malhotra, *Machinability Characteristics of Fibre Reinforced Plastics Composites,* Journal of Mechanical Working Technology, cilt 17, 1988, ss. 195-204.

[4] R. Teti, *Machining of Composite Materials,* CIRP Annals, cilt 51, no. 2, 2002, ss. 611-634.

[5] L. A. Gaga ve S. Dilibal, "Havacılık Endüstrisinde Kullanılan Karbon Prepreg Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalat Proses Özelliklerini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi," *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind*., cilt 4, no. 3, 2020, ss. 225-238.

[6] K. K. Chawla, *Composite Materials, Designing with Composites*, Springer, New York, 1987, s. 436.

[7] F. Özkaya, F. Özen, E. İlhan ve S. Aslanlar, "Cam Küre Takviyeli Polipropilen Kompozit Malzemelerin Delaminasyon Faktörünün Deneysel Olarak İncelenmesi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* cilt 19, no. 3, ss. 843-849, 2019. doi:10.35414/akufemubid.543476.

[8] N. Canpolat, "Değişik Takviyeli Kompozit Malzemenin Matkapla Delinebilirliğinin ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* cilt 19, no. 3, ss. 843-849, 2018. doi:10.35414/akufemubid.543476.

[9] E. Ekici, B. Işık, "Cam Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Delinmesi Esnasında Oluşan Yüzey Hasarının Deneysel Olarak İncelenmesi," *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS),* 2009, ss. 1-6.

[10] R. R. Nagavally, "Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications," *International Journal Mechanical Proceedings Engineering,* cilt 5, no. 9, 2017, ss. 82-87.

[11] "Kompozit Malzemeler," Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Bartın Üniversitesi, Ders Notu, Erişim tarihi: 08.04.2023.

[12] Y. Özoğuz, "Kompozitler Dünyası ve Otomotiv," Erişim tarihi: 08.04.2023, URL: slideplayer.biz.tr/slide/2805801/.

[13] A. Smith, "Riva 56: Topless Beauty," Erişim tarihi: 08.04.2023, URL: uk.boats.com/on-the-water/riva-56-topless-beauty/.

[14] F. Yastimoğlu ve A. Özkan, "Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi,* cilt 5, ss. 56-66, 2017.

[15] A. M. Bahar, "Pultrüzyon Yöntemiyle CTP Üretimi ve Üretim Parametrelerinin Malzeme Nihai Özelliklerine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya – Metalurji Fakültesi, İstanbul, 2009.

[16] M. Saçak, *Polimer Kimyası,* GAZİ Kitabevi, Ankara, 2002.

[17] H. İ. İşlek, "Kompozit Hayallerim," Erişim tarihi: 18.03.2023, URL: www.kompozithayalleri.com/matris-nedir/.

[18] R. R. Nagavally, "Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications," *International Journal Mechanical Proceedings Engineering,* cilt 5, 2017, s. 83.

[19] V. V. Vasiliev ve E. Morozov, *Mechanics and analysis of composite materials,* Elsevier, Oxford, 2001, s. 11.

[20] "Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması," Metalurjik, Erişim tarihi: 19.03.2023, URL:www.metalurjik.com/kompozit-malzemelerin-siniflandirilmasi.

[21] Y. Özoğuz, "Kompozitler Dünyası ve Otomotiv," Erişim tarihi: 08.04.2023, URL: slideplayer.biz.tr/slide/2805801/.

[22] A. Smith, "Riva 56: Topless Beauty," Erişim tarihi: 08.04.2023, URL: uk.boats.com/on-the-water/riva-56-topless-beauty/.

[23] A. Abdulrahman, "Kompozit Malzemeler," Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir, 2019, s. 9.

[24] M. M. Schwartz, *Composite Materials Handbook,* McGraw-Hill, Inc., Amerika Birleşik Devletleri, 1984.

[25] D. Akyüz, "Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri," Ders Notu, 2017.

[26] S. K. Mazumdar, "Composite Manufacturing Materials, Product and Process Engineering," CRC Press LLC, Florida, 2002.

[27] "Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri," Levtems, Erişim tarihi: 19.03.2023, URL: levtems.com/kompozit-malzemelerin-uretim-yontemleri/.

[28] "Pultrusion: The Basics," Composite World, Erişim tarihi: 19.03.2023, URL: www.compositesworld.com/articles/pultrusion-the-basics.

[29] S. E. M. Selke ve J. D. Culter, *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations,* Hanser Publishers, Munich Cincinnati, 2016.

[30] "A Brief History of Aircraft Materials," Erişim tarihi: 26.03.2023, URL: www.thomasnet.com/insights/a-brief-history-of-aircraft-materials/.

[31] J. R. Hansen, *The Wind and Beyond: A Documentary Journey into the History of Aerodynamics in America,* NASA, Washington, Amerika Birleşik Devletleri, 2003.

[32] A. Al-Fatlawi, *Optimal Design of a Fiber-Reinforced Plastic Composite Sandwich Structure for the Base Plate of Aircraft Pallets In Order to Reduce Weight,* MDPI Polymers, cilt 13, no. 5, 2021, Erişim tarihi: 21.03.2023, URL: www.mdpi.com/2073-4360/13/5/834.

[33] "Worries About New Composite Made Airplane," Erişim tarihi: 20.03.2023, URL: www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html.

[34] Y. Liu, B. Zwingmann ve M. Schlaich, "Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures," Institute of Civil Engineering, Technische Universität Berlin, Berlin, 2015.

[35] "Karbon Elyaf Kumaş 200 gr/m² 3K Twill," Dost Kimya, Erişim tarihi: 21.03.2023, URL: www.dostkimya.com/tr/urunler/kompozit-malzemeler/karbon-elyaf-kumaslar/karbon-elyaf-kumas-200gr-m2-3k-twill.

[36] B. Gül, "Karbon Elyaf Takviyeli Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Çekirdek Malzemenin Türü ve Kalınlığının Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2018.

[37] Ş. Sabancı, "Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitlerin Enjeksiyon Yöntemi İle Üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya – Metalurji Fakültesi, İstanbul, 2005.

[38] İ. B. Topçu ve T. Uygunoğlu, "GFRP Çubukların Özellikleri ve Prefabrik Altyapı Elemanlarında Kullanımı," *El-Cezeri*, cilt 7, no. 1, ss. 169-178, Oca. 2020, doi:10.31202/ecjse.602224.

[39] "Camfiber Kumaş 300gr/m² Plain," Kompozitsan, Erişim tarihi: 21.03.2023, URL: www.kompozitsan.com/tr/cam-fiber-urunler/573-camfiber-kumas-300grm-plain.html.

[40] "Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP)," Dost Kimya, Erişim tarihi: 26.03.2023, URL: www.dostkimya.com.tr/tr/bloglar/karbon-fiber-takviyeli-polimerler-cfrp.

[41] D. Özkan ve M. S. Gök, "Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Materials, Their Characteristic Properties, Industrial Application Areas and Their Machinability," Bartın Üniversitesi Makine Fakültesi, Bartın, 2020.

[42] P. Bhatt ve A. Goe, *Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use*, Materials Science Research India, cilt 14, no. 1, 2017.

[43] S. M. Sapuan, K. W. Ham, K. M. Ng, C. K. Woo, M. K. A. Ariffin, B. T. H. T. Baharudin, A. A. Faieza, E. E. Supeni ve N. A. A. Jalil, *Design of Composite Racing Car Body For Student Based Competition*, Scientific Research and Essay, cilt 4, no. 11, ss. 1151-1162, 2009.

[44] İ. Ö. Yumurtacı ve H. İ. Yıldırım, *Üretim Teknolojileri ve İmalat Sistemleri*, Nobel Akademik Yayıncılık, 2016.

[45] İ. Kurşun ve İ. Kahraman, *Talaşlı İmalatın Avantajları ve Dezavantajları,* Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt 23, sayı 2, 2008.

[46] S. C. Lin ve I. K. *Chen, Drilling Carbon Fiber-Reinforced Composite Material at High Speed*, Wear, cilt 194, ss. 156–162, 1996.

[47] Ş. Bayraktar, Y. Siyambaş, Y. Turgut, *Assessment Of Cutting Performance On Drilling With Different Drilling Methods Of Fiber Reinforced Polymer Composites*, Department of Mechanical Engineering, Recep Tayyip Erdogan University, Rize, 2016.

[48] A. M. Abrao, P. E. Faria, C. J. C. Rubio, P. Reis ve P. J. Davim, *Drilling of Fiber Reinforced Plastics: A Review*, Kasım 2006, ss. 1-7.

[49] S. O. Ismail, H. N. Dhakal, I. Popov ve J. Beaugrand, "Comprehensive Study on Machinability of Sustainable and Conventional Fibre Reinforced Polymer Composites," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, cilt 19, no. 4, ss. 2043-2052, 2016.

[50] H. Hocheng, C. C. Tsao, C. S. Liu ve H. A. Chen, "Reducing Drilling Induced Delamination in Composite Tube by Magnetic Colloid Back-Up," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, cilt 63, ss. 85–88, 2014.

[51] Ş. Bayraktar, Y. Siyambaş, Y. Turgut, "Tungsten Borür/Tungsten Karbür Kompozit Tozlarının Tungsten Oksit Ve Yerli Bor Oksit Hammaddelerinden Kati Hal Sentezleme Yöntemi İle Üretimi," Department of Mechanical Engineering, Bursa Teknik University, Bursa, 2019.

A
DENEY PARAMETRELERİ

Deney No:	Delik Derinliği – d (mm)	Ağız Sayısı	Dönme Devri - n (dev/dk)	İlerme – F (mm/dk)	Kesme Sıvısı Kullanımı	Takım Çapı (mm)	Takım Uç Açısı (°)	Kesme Hızı - Vc (π*d*n)/1000 (m/dk)	Devir Başına İlerleme Fn=F/n (mm/dev)	Diş Başı İlerleme Fz=F/(n*Zc) mm/dev	Birim Zamanda Kaldırılan Talaş Miktarı Mrr=w.d.f (mm3/dk)
1	10	2	1250	125	Hayır	10	135	39,25	0,100	0,050	12500
2	10	2	1250	250	Hayır	10		39,25	0,200	0,100	25000
3	10	2	1250	500	Hayır	10		39,25	0,400	0,200	50000
4	10	2	2500	125	Hayır	10		78,5	0,050	0,025	12500
5	10	2	2500	250	Hayır	10		78,5	0,100	0,050	25000
6	10	2	2500	500	Hayır	10		78,5	0,200	0,100	50000
7	10	2	5000	125	Hayır	10		157	0,025	0,013	12500
8	10	2	5000	250	Hayır	10		157	0,050	0,025	25000
9	10	2	5000	500	Hayır	10		157	0,100	0,050	50000
10	10	2	1250	125	Evet	10	135	39,25	0,100	0,050	12500
11	10	2	1250	250	Evet	10		39,25	0,200	0,100	25000
12	10	2	1250	500	Evet	10		39,25	0,400	0,200	50000
13	10	2	2500	125	Evet	10		78,5	0,050	0,025	12500
14	10	2	2500	250	Evet	10		78,5	0,100	0,050	25000
15	10	2	2500	500	Evet	10		78,5	0,200	0,100	50000
16	10	2	5000	125	Evet	10		157	0,025	0,013	12500
17	10	2	5000	250	Evet	10		157	0,050	0,025	25000
18	10	2	5000	500	Evet	10		157	0,100	0,050	50000
19	10	2	1250	125	Evet	10	118	39,25	0,100	0,050	12500
20	10	2	1250	250	Evet	10		39,25	0,200	0,100	25000
21	10	2	1250	500	Evet	10		39,25	0,400	0,200	50000
22	10	2	2500	125	Evet	10		78,5	0,050	0,025	12500
23	10	2	2500	250	Evet	10		78,5	0,100	0,050	25000
24	10	2	2500	500	Evet	10		78,5	0,200	0,100	50000
25	10	2	5000	125	Evet	10		157	0,025	0,013	12500
26	10	2	5000	250	Evet	10		157	0,050	0,025	25000
27	10	2	5000	500	Evet	10		157	0,100	0,050	50000
28	10	2	1250	125	Hayır	10	118	39,25	0,100	0,050	12500
29	10	2	1250	250	Hayır	10		39,25	0,200	0,100	25000

30	10	2	1250	500	Hayır	10		39,25	0,400	0,200	50000
31	10	2	2500	125	Hayır	10		78,5	0,050	0,025	12500
32	10	2	2500	250	Hayır	10		78,5	0,100	0,050	25000
33	10	2	2500	500	Hayır	10		78,5	0,200	0,100	50000
34	10	2	5000	125	Hayır	10		157	0,025	0,013	12500
35	10	2	5000	250	Hayır	10		157	0,050	0,025	25000
36	10	2	5000	500	Hayır	10		157	0,100	0,050	50000
37	10	2	7500	125	Hayır	10	118	235,5	0,017	0,008	12500
38	10	2	7500	250	Hayır	10		235,5	0,033	0,017	25000
39	10	2	7500	500	Hayır	10		235,5	0,067	0,033	50000
40	10	2	7500	125	Evet	10		235,5	0,017	0,008	12500
41	10	2	7500	250	Evet	10		235,5	0,033	0,017	25000
42	10	2	7500	500	Evet	10		235,5	0,067	0,033	50000
43	10	2	7500	125	Evet	10	135	235,5	0,017	0,008	12500
44	10	2	7500	250	Evet	10		235,5	0,033	0,017	25000
45	10	2	7500	500	Evet	10		235,5	0,067	0,033	50000
46	10	2	7500	125	Hayır	10		235,5	0,017	0,008	12500
47	10	2	7500	250	Hayır	10		235,5	0,033	0,017	25000
48	10	2	7500	500	Hayır	10		235,5	0,067	0,033	50000
49	10	2	15000	125	Hayır	10	118	471	0,008	0,004	12500
50	10	2	15000	250	Hayır	10		471	0,017	0,008	25000
51	10	2	15000	500	Hayır	10		471	0,033	0,017	50000
52	10	2	15000	125	Evet	10		471	0,008	0,004	12500
53	10	2	15000	250	Evet	10		471	0,017	0,008	25000
54	10	2	15000	500	Evet	10		471	0,033	0,017	50000
55	10	2	15000	125	Evet	10	135	471	0,008	0,004	12500
56	10	2	15000	250	Evet	10		471	0,017	0,008	25000
57	10	2	15000	500	Evet	10		471	0,033	0,017	50000
58	10	2	15000	125	Hayır	10		471	0,008	0,004	12500
59	10	2	15000	250	Hayır	10		471	0,017	0,008	25000
60	10	2	15000	500	Hayır	10		471	0,033	0,017	50000

B
ÖLÇÜM SONUÇLARI

Deney No:	Delik Derinliği – d (mm)	Dönme Devri - n (dev/dk)	İlerme – F (mm/dk)	Kesme Sıvısı Kullanımı	Takım Uç Açısı (°)	Yüzey Pürüzlülüğü Değeri (µm)	Delik Boyutsal Ölçüm Değeri (mm)	Delaminasyon Gözlenmesi
1	10	1250	125	Hayır	135	1,651	10,012	Yok
2	10	1250	250	Hayır	135	1,956	10,0181	Yok
3	10	1250	500	Hayır	135	2,374	10,026	**Var**
4	10	2500	125	Hayır	135	1,047	9,971	Yok
5	10	2500	250	Hayır	135	1,252	10,002	Yok
6	10	2500	500	Hayır	135	2,044	9,994	Yok
7	10	5000	125	Hayır	135	0,571	9,999	Yok
8	10	5000	250	Hayır	135	0,895	9,981	Yok
9	10	5000	500	Hayır	135	0,965	10	**Var**
10	10	1250	125	Evet	135	1,512	10,019	Yok
11	10	1250	250	Evet	135	2,398	10,006	Yok
12	10	1250	500	Evet	135	2,467	10,002	Yok
13	10	2500	125	Evet	135	0,95	10,018	Yok
14	10	2500	250	Evet	135	1,061	10,009	Yok
15	10	2500	500	Evet	135	1,467	9,993	Yok
16	10	5000	125	Evet	135	0,778	9,995	Yok
17	10	5000	250	Evet	135	0,928	9,978	**Var**
18	10	5000	500	Evet	135	0,954	10,071	**Var**
19	10	1250	125	Evet	118	1,929	10,103	Yok
20	10	1250	250	Evet	118	2,456	10,121	Yok
21	10	1250	500	Evet	118	2,529	10,082	**Var**
22	10	2500	125	Evet	118	1,591	10,041	Yok
23	10	2500	250	Evet	118	2,34	10,112	Yok
24	10	2500	500	Evet	118	2,342	10,113	Yok
25	10	5000	125	Evet	118	1,075	9,999	Yok
26	10	5000	250	Evet	118	1,346	9,996	Yok
27	10	5000	500	Evet	118	2,048	10,021	Yok
28	10	1250	125	Hayır	118	1,072	10,008	Yok
29	10	1250	250	Hayır	118	1,478	10,016	Yok
30	10	1250	500	Hayır	118	2,017	10,024	Var
31	10	2500	125	Hayır	118	0,799	10,014	Yok
32	10	2500	250	Hayır	118	1,36	10,112	Yok

33	10	2500	500	Hayır	118	1,64	10,124	Yok
34	10	5000	125	Hayır	118	0,622	10,009	Yok
35	10	5000	250	Hayır	118	1,061	10,063	Yok
36	10	5000	500	Hayır	118	1,319	10,117	Yok
37	10	7500	125	Hayır	118	0,514	10,002	Yok
38	10	7500	250	Hayır	118	0,843	10,092	Yok
39	10	7500	500	Hayır	118	0,848	10,044	Yok
40	10	7500	125	Evet	118	0,765	9,997	Yok
41	10	7500	250	Evet	118	0,902	10,012	Yok
42	10	7500	500	Evet	118	1,862	10,101	Yok
43	10	7500	125	Evet	135	0,718	10,041	Yok
44	10	7500	250	Evet	135	1,066	10,107	**Var**
45	10	7500	500	Evet	135	1,162	10,191	**Var**
46	10	7500	125	Hayır	135	0,643	10,021	Yok
47	10	7500	250	Hayır	135	0,684	10,012	Yok
48	10	7500	500	Hayır	135	1,187	10,061	Yok
49	10	15000	125	Hayır	118	0,917	10,011	Yok
50	10	15000	250	Hayır	118	1,883	10,081	Yok
51	10	15000	500	Hayır	118	2,012	10,091	**Var**
52	10	15000	125	Evet	118	1,349	10,083	Yok
53	10	15000	250	Evet	118	1,772	10,087	Yok
54	10	15000	500	Evet	118	1,998	10,096	**Var**
55	10	15000	125	Evet	135	1,497	10,106	Yok
56	10	15000	250	Evet	135	1,975	10,128	**Var**
57	10	15000	500	Evet	135	2,109	10,137	**Var**
58	10	15000	125	Hayır	135	1,561	10,138	Yok
59	10	15000	250	Hayır	135	1,991	10,141	Yok
60	10	15000	500	Hayır	135	2,088	10,142	**Var**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1- E. Aydın, Y. Erarslan "Havacılık Endüstrisinde Kullanılan CFRP Kompozit Malzemelerin Delik Delme Talaşli İmalat Prosesini Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi" *8. Uluslararası Akademik Öğrenci Çalışmaları Kongresi*, İstanbul, 2023, pp. 320-321.