



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERİN İNCE FİLM
KAPLAMALI KARBÜR TAKIMLAR İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

HAZIRLAYAN

DERVİŞ ÖZKAN

DANIŞMAN

DOÇ.DR. MUSTAFA SABRİ GÖK

BARTIN-2017



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERİN İNCE FİLM
KAPLAMALI KARBÜR TAKIMLAR İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

HAZIRLAYAN

DERVİŞ ÖZKAN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	:	Doç. Dr. Mustafa Sabri GÖK	-	Bartın Üniversitesi
Üye	:	Prof. Dr. Muammer NALBANT	-	Gazi Üniversitesi
Üye	:	Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA	-	Karabük Üniversitesi
Üye	:	Doç. Dr. Etimad EYVAZOV	-	Bartın Üniversitesi
Üye	:	Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR	-	Karabük Üniversitesi

BARTIN-2017

KABUL VE ONAY

Derviş ÖZKAN tarafından hazırlanan “KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERİN İNCE FİLM KAPLAMALI KARBÜR TAKIMLAR İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, 02.06.2017 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mustafa Sabri GÖK (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Muammer NALBANT

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Üye : Doç. Dr. Etimad EYVAZOV

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20...tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. H. Selma ÇELİKAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Mustafa Sabri GÖK danışmanlığında hazırlamış olduğum “KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERİN İNCE FİLM KAPLAMALI KARBÜR TAKIMLAR İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı doktora tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

02.06.2017

Derviş ÖZKAN

ÖNSÖZ

Hazırlanan bu doktora tezinde, karbon fiber takviyeli kompozit malzemesinin farklı kaplamalı kesici takımlar ile işlenebilirliğinin araştırılması gerçekleştirilmiş ve deneyleri yapılmıştır.

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yardımcı olan danışman hocam, Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ana bilim Dalı Başkanı ve Dekan yardımcısı Sayın Doç. Dr. Mustafa Sabri GÖK'e, Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Öğretim Üyesi ve Güzel Sanatlar Fakültesi Dekanı Sayın Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA'ya ve ikinci danışmanım Bartın Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Bölümü Ana bilim Dalı Başkanı Sayın Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Çalışmamın her aşamasında beni yalnız bırakmayan, sabırla bekleyen ve her türlü anlayışı esirgemeyen değerli aileme sonsuz sevgi, saygı ve hürmetlerimi sunarım.

Özellikle bu tezin meydana gelmesinde maddi imkân sağlayan Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve çalışanlarına teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Derviş ÖZKAN

ÖZET

Doktora Tezi

KARBON FİBER TAKVİYELİ PLASTİK KOMPOZİTLERİN İNCE FİLM KAPLAMALI KARBÜR TAKIMLAR İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Derviş ÖZKAN

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa Sabri GÖK

İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2017, sayfa: XXII+180

Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozitler sahip oldukları yüksek taşıma kapasitesi, yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, düşük yoğunluk ve hafiflik gibi üstün özelliklerinden dolayı, uzay, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla kullanım alanı bulmaktadır. CFRP kompozitlerin aşındırıcı yapısından dolayı frezeleme işlemlerinde kullanılan kesici takımlar; kısa süreli çevrim süreçlerinde aşınma hasarları sonucunda ekonomik ömürlerini tamamlamaktadır. Takım aşınması ile birlikte CFRP kompozit malzemelerde delaminasyon, fiber kırılması, kesilmemiş fiber ve yüzey pürüzlülüğü gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Yüzey kalitesinin parça özelliklerini birincil derecede etkilediği başta havacılık endüstrisi ve diğer ilgili sektörlerde optimum niteliklerin sağlanması büyük önem arz etmektedir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasının amacını, CFRP kompozitlerin çevresel (kenar) frezelenmesinde karbür kesici takımların yüzeylerinin PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi kullanılarak farklı nitrür esaslı bileşiklerle kaplanarak aşınma dayanımlarının ve kesme performanslarının artırılması oluşturmaktadır. Ayrıca yüzeyi PVD yöntemi ile farklı

nitrür esaslı bileşiklerle kaplanan kesici takımların, CFRP kompozitlerin işlenmesinde yüzey hassasiyeti ve ölçü tamlığı üzerine etkisinin araştırılmasını sağlamaktır.

Bu çalışmada, kaplamasız karbür kesici takımlar, PVD kaplamalı nanotabakalı AlTiN/TiN, çok tabakalı nanokompozit TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, tek tabakalı TiAlN ve TiN kesici takımlar kesme parametresi olarak 100, 200 ve 300 m/dak kesme hızları, 0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş ilerleme oranları ve 1 mm sabit kesme genişliği değerleri kullanılarak test edilmiştir. Frezeleme deneylerinde elde edilen bileşke kesme kuvveti, ortalama yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve delaminasyon miktarları değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, talaş kaldırma işleminden sonra kesici takımlar taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ve elementel haritalama (mapping) görüntüleri alınarak kesici takım yüzeyindeki kaplamaların mikro yapısal incelemeleri ve ayrıntılı analizleri yapılmıştır. Elde edilen kesme kuvveti, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sonuçlarına göre kesici takımlara uygulanan kaplama işlemlerinin kesici takımların işlenebilirlik performansını artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP), çevresel frezeleme, delaminasyon, kesme kuvveti, ortalama yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması.

Bilim Kodu

625.02.04

ABSTRACT

Ph.D.Thesis

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC COMPOSITES USING THIN FILM COATED CARBIDE TOOLS

Derviş ÖZKAN

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Mustafa Sabri GÖK

Second Advisor: Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2017, pp: XXII+180

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites have been used in a wide range of applications including space, aviation and automotive industries owing to their superior characteristics such as high bearing capacity, strength, rigidity, low density and their lightness. Due to the abrasive structure of CFRP composites, cutting tools used in the milling of these materials complete their economic lives in shorter periods as a result of short cyclic processes. Resulting tool wear induce structural failures such as delamination, fiber breakage, uncut fibers and surface roughness. Provision of optimum surface characteristics holds particular importance in fields such as aviation industry where surface quality has a substantial effect on quality of components.

The aim of this thesis study was to increase the wear resistance and cutting performance of cutting tools, used in the contour milling of CFRP composites, by deposition of different type of nitride based compounds on carbide cutting tools with PVD (physical vapor deposition) method. The effect of use of cutting tools, PVD-coated with different nitride-based compounds, on the surface quality and dimensional accuracy of CFRP composite materials was also investigated.

In the present research, uncoated carbide cutting tools, PVD coated nano-layer AlTiN/TiN, multilayer nano-composite TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, single layer TiAlN and TiN cutting tools were tested with 100, 200 and 300 m/min cutting speeds, 0,05-0,15 and 0,25 mm feed per tooth feed-rate, and 1 mm cutting width. The resultant cutting force, average surface roughness, tool wear and delamination rates, resulting from milling experiments, were evaluated. In addition, following the machining process, cutting tools were subjected to scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), and elemental mapping analyses to make an in-depth analysis of the coated cutting tools' surface microstructure. According to the obtained cutting force, average surface roughness and tool wear test results, the applied coating processes increased the machinability performance of cutting tools.

Key Words

Carbon fiber reinforced plastic, CFRP, peripheral milling, delamination, cutting force, mean surface roughness, tool wear.

Science Code

625.02.04

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KURAMSAL TEMELLER	5
2.1 Kompozit Malzemeler.....	5
2.2 Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP) Kompozitler	6
2.2.1 CFRP Kompozit Malzeme Üretimi.....	8
2.2.2 CFRP Kompozit Malzeme Kullanım Alanları	11
BÖLÜM 3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	14
3.1 CFRP Kompozit Malzeme Üzerine Uygulanan Talaşlı İmalat ile İlgili Çalışmalar	14
3.2 CFRP Kompozit Malzemelerin İşlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	34
3.3 Literatür Araştırmasının Genel Değerlendirilmesi.....	49
BÖLÜM 4 MATERYAL VE METOD	60
4.1 Deney Numunesi	60
4.2 Kesici Takımlar	62
4.3 Takım Tutucu	63
4.4 Frezeleme İşlemi	64

4.5	Kesme Kuvveti Ölçümü	64
4.6	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	65
4.7	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	66
4.8	Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS)	67
4.9	Kaplama Cihazı	68
4.10	Ön Deneylerin Yapılması ve Elde Edilen Bulgular	68
4.10.1	Kaplamasız Karbür Kesici Takım Ön Deneyleri	69
4.10.2	İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi	73
BÖLÜM 5 DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....		75
5.1	Farklı Kesme Hızlarında Elde Edilen Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerindeki Değişim	76
5.1.1	$V_c = 100$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim	76
5.1.2	$V_c = 200$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim	80
5.1.3	$V_c = 300$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim	83
5.2	Farklı Kesme Hızlarında Elde Edilen Talaş Hacmi - Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İlişkisi	86
5.2.1	$V_c = 100$ m/dak Kesme Hızında, Farklı İlerleme Oranlarında ve Kaldırılan Talaş Hacmi Miktarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim	87
5.2.2	$V_c = 200$ m/dak Kesme Hızında, Farklı İlerleme Oranlarında ve Kaldırılan Talaş Hacmi Miktarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim	90
5.2.3	$V_c = 300$ m/dak Kesme Hızında, Farklı İlerleme Oranlarında ve Kaldırılan Talaş Hacmi Miktarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim	93
5.2.4	CFRP Kompozit Malzemede Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Genel Değerlendirilmesi	95
5.3	Farklı Kesme Hızlarında Elde Edilen Kesme Kuvveti Değerlerindeki Değişim ..	95
5.3.1	$V_c = 100$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerindeki Değişim	96
5.3.2	$V_c = 200$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerindeki Değişim	100

5.3.3	$V_c = 300$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerindeki Değişim	103
5.3.4	Kesme Kuvvetlerinin Genel Değerlendirilmesi	105
5.4	Kesici Takım Aşınması	106
5.4.1	Düşük İşleme Koşullarındaki Kesici Takım Aşınması ($V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm)	109
5.4.2	Yüksek İşleme Koşullarındaki Kesici Takım Aşınması ($V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm)	115
5.4.3	Farklı Kesme Hızlarındaki Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımların İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Takım Aşınma Üzerindeki Değişim Grafikleri	121
5.5	İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Elde Edilen Delaminasyon Derinliği Değerlerindeki Değişim	125
5.5.1	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	126
5.5.2	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	129
5.5.3	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	132
5.5.4	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	135
5.5.5	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	138
5.5.6	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	141
5.5.7	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	143

5.5.8	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	145
5.5.9	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim	148
5.5.10	CFRP kompozit Malzemede Delaminasyon Derinliği Bulgularının Genel Değerlendirilmesi	151
5.6	CFRP Kompozit Malzemede Fiber Oryantasyon Açıları Bulguları	153
BÖLÜM 6 SONUÇ VE ÖNERİLER		156
KAYNAKLAR.....		162
ÖZGEÇMİŞ.....		179

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1. Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi.	5
2. a) CFRP kompozit malzeme ve içyapısının gösterimi, b) CFRP kompozit malzemesinin yüzey görünümü	7
3. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber oryantasyon açılarının (foa) gösterimi.....	8
4. Tek yönlü ve çift yönlü fiber sarma gösterimi	9
5. Kumaş dokuma tiplerinin gösterimi; a) Düz doku, b) Saten doku, c) Twil doku	10
6. PAN ve PITCH bazlı karbon fiberin üretim şeması.....	10
7. Askeri uçak (hayalet uçak) görüntüsü.....	12
8. Türk insansız hava aracının (ANKA) görüntüsü	13
9. Formula 1 yarış arabasındaki karbon fiber takviyeli süspansiyon ve vites kutusu görünümü.....	13
10. Foa'larının şematik görüntüsü	16
11. Kesici takımın farklı noktalarındaki fiber kesme açılarının şematik görüntüsü	16
12. a) Eccr aralığındaki ortalama delaminasyon, b) Kanal frezeleme sırasındaki delaminasyon faktörünün şematik gösterimi	17
13. Delaminasyon hasarının (maksimum hasar- W_{max} ile nominal genişlik- W) şematik görüntüsü	18
14. Yukarı yönlü freze uygulamasında kompozit malzemenin yüzeyinde oluşan delaminasyon hasarlarının gösterimi	20
15. Kesici takım aşınmasının (kesme hızı 179 m/dak, ilerleme oranı 0,05 mm/diş); a) Mikroskoptaki ve b) SEM'deki görünümü	26
16. Aşırı kesme koşullarında işlenmiş yüzeylerin görünümü	27
17. Aşırı kesme koşullarındaki delaminasyon gösterimi	28
18. Yanak aşınması; a) ve b) 0,025 m/diş ve 160 m/dak'daki aşınma, ilerleme oranı 0,025 m/diş c) 160 m/dak, d) 200 m/dak	30
19. Karbür helisel freze takımı görünümü	31
20. a) E ($10^{\circ}/7^{\circ}$) takımla işlenmiş yüzey, b) C ($0^{\circ}/14^{\circ}$) takımla işlenmiş yüzey, c) I ($10^{\circ}/21^{\circ}$) takımla işlenmiş yüzey	37
21. d) 30° fiber açılı, e) 90° fiber açılı, f) 90° fiber açılı ve E takımı ile işlenmiş içyapı kesiti	38

22.	a) 0° ve 150° foa'daki delaminasyon, b) 150°, N takımı ile işlenmiş, c) 0°, E takımı ile işlenmiş	39
23.	Çevresel frezeleme deneylerinde kullanılan CFRP kompozit malzemenin görüntüsü.....	61
24.	Kesici takımların görüntüsü.	62
25.	Deneylerde kullanılan takımı tutucu.	63
26.	Deneylerde kullanılan CNC dik işleme merkezi ve deney düzeneğinin genel görüntüsü.....	64
27.	Dinamometre ve veri aktarma elemanlarının görüntüsü.....	65
28.	CFRP kompozit malzemenin beş noktasından alınan uçlu tip yüzey pürüzlülük cihazının ölçüm görüntüsü.	66
29.	TESCAN-MIAI3 model taramalı elektron mikroskop cihazının görüntüsü.....	67
30.	Kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.	67
31.	Au/Pd kaplamasında kullanılan Q15OT-ES modelindeki kaplama cihazının görünümü.	68
32.	Çevresel frezeleme işleminde ön kesme deneyi.....	69
33.	CFRP kompozit malzeme SEM görüntüleri; a) Twill dokuma yapısı, b) Foa'ları, c) Fiberlerin yapısı.....	69
34.	Deney düzeneğinin genel görünümü ve veri elde etme görüntüsü.	71
35.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kaplamasız kesici takımlardaki yanak aşınmanın SEM görüntüsü.	72
36.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kaplamasız kesici takımlardaki yanak aşınmanın SEM görüntüsü.	73
37.	Deney/analiz sonuçları ve tartışma bölümü akış şeması.....	75
38.	$V_c = 100$ m/dak ve farklı ilerleme oranlarındaki R_a 'nın gösterimi: a) İlk paso, b) Onuncu paso ve c) Yirminci paso.	79
39.	$V_c = 200$ m/dak ve farklı ilerleme oranlarındaki R_a 'nın gösterimi: a) İlk paso, b) Onuncu paso ve c) Yirminci paso.	82
40.	$V_c = 300$ m/dak ve farklı ilerleme oranlarındaki R_a 'nın gösterimi: a) İlk paso, b) Onuncu paso ve c) Yirminci paso.	85
41.	Deneylerde işlenen CFRP plaka gösterimi.	86
42.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında ve kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak elde edilen R_a değerlerinin değişim grafikleri.....	89

43.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında ve kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak elde edilen R_a değerlerinin değişim grafikleri.....	92
44.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında ve kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak elde edilen R_a değerlerinin değişim grafikleri.....	94
45.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarına bağlı olarak F_R 'lerin değişim grafikleri, a) İlk paso, b) Onuncu paso, c) Yirminci paso.	99
46.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarına bağlı olarak F_R 'lerin değişim grafikleri, a) İlk paso, b) Onuncu paso, c) Yirminci paso.	102
47.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarına bağlı olarak F_R 'lerin değişim grafikleri, a) İlk paso, b) Onuncu paso, c) Yirminci paso.	104
48.	CFRP kompozit malzeme çevresel frezeleme kesme işlemi görüntüsü.....	107
49.	Kesici takım uç bölgesinin görüntüsü.....	107
50.	Kesici takım arka bölgesinin görüntüsü.....	108
51.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu ve yirminci pasosundaki SEM görüntüleri.....	109
52.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	111
53.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.....	112
54.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	113
55.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.....	114
56.	$V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu ve yirminci pasosundaki SEM görüntüleri.....	115
57.	$V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	117

58.	$V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl- AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.....	118
59.	$V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl- AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	119
60.	$V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl- AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.....	120
61.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarında kesici takımların a) Onuncu ve b) Yirminci pasolarından elde edilen yanak aşınma değişim grafiği.	123
62.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarında kesici takımların a) Onuncu ve b) Yirminci pasolarından elde edilen yanak aşınma değişim grafiği.	124
63.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarında kesici takımların a) Onuncu ve b) Yirminci pasolarından elde edilen yanak aşınma değişim grafiği.	125
64.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	127
65.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	128
66.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	130
67.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	131
68.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	133

69.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	134
70.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	136
71.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	137
72.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	139
73.	$V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	140
74.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	141
75.	$V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	142
76.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	143
77.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	144
78.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	146
79.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.....	147

80.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.	149
81.	$V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.	150
82.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm'deki SEM görüntüleri.	152
83.	$V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş, $a_e = 1$ mm'deki SEM görüntüleri.	152
84.	CFRP kompozit malzemede foa'larının gösterimi.	154
85.	CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi esnasında oluşan hasarların gösterimi; a) 90° foa'da, b) $\pm 45^\circ$ foa'da, c) 0° foa'da ve d) 0° - 90° foa'larında.	155

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
1. İncelenen makalelerle ilgili literatür özet tablosu	52
2. CFRP kompozit malzeme özellikleri.....	61
3. Frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar ve özellikleri	62
4. İşleme parametreleri ve seviyeleri	70
5. Çevresel frezeleme deneylerinde kullanılan deneysel parametrelere ait veriler	73
6. Paso sayısına bağlı olarak kaldırılan talaş hacmi değerleri	86



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μm	: Mikron metre
Mpa	: Mega Paskal
W	: Nominal genişlik
W_{max}	: Maksimum hasar
$^{\circ}\text{C}$	: Derece santigrat

KISALTMALAR

a_p	: Kesme derinliği, mm
a_e	: Kesme genişliği, mm
ACF	: Aktifleştirilmiş karbon fiber
ANN	: Yapay sınır ağları
ANOVA	: Varyans analizi yöntemi (Analysis of variance)
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
AlTiN	: Alüminyum titanyum nitrür
BUE	: Yığıntı talaş (Built up edge)
CBN	: Kübik bor nitrür
CFRP	: Karbon fiber takviyeli plastik
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
CNC	: Bilgisayarlı nümerik kontrol
D_D	: Delaminasyon derinliği, mm
DLC	: Elmas benzeri karbon (Diamond-like Carbon)
DoE	: Deney tasarımı (Design of experiment)
EDS	: Enerji dağılımlı spektrometre (Energy-dispersive X-ray spectroscopy)
Eccr	: Etkili kritik kesme aralığı
f_z	: Kesici ağız ilerleme oranı, mm/diş
F_R	: Bileşke kesme kuvveti, N
F_d	: Delaminasyon faktörü
F_r	: Radyal kesme kuvveti bileşeni, N
F_t	: Teğetsel kesme kuvveti bileşeni, N
foa	: Fiber oryantasyon açısı
fho	: Fiber hacim oranı

FEM	: Sonlu elemanlar metodu
GFRP	: Cam fiber takviyeli plastik
HSC	: Yüksek hızda kesme
HSS	: Yüksek hız çeliği
ISO	: Uluslararası standart (International organization of standardization)
KFRP	: Kevlar fiber takviyeli plastik
N	: Newton
nl	: Nanotabakalı (nanolayer)
nc	: Nanokompozit (nanocomposite)
PAN	: Poliakrilonitril
PITCH	: Ticari karbon fiber zift
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
PCD	: Çok kristalli elmas
RTM	: Reçine transfer kalıplama
R _a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü, µm
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SiAlON	: Silisyum alüminyum nitrür
TAI	: Türk havacılık ve uzay sanayii a.ş.
Ti	: Titanyum
TİHA	: Türk insansız hava aracı
TiN	: Titanyum nitrür
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
TiCN	: Titanyum karbon nitrür
TiAlSiN	: Titanyum alüminyum silisyum nitrür
V _c	: Kesme hızı, m/dak
V _B	: Serbest yüzey aşınması derinliği, mm
WC-Co	: Volfram karbür-kobalt esaslı karbür

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Doğada saf halde var olan ve üretilen birçok malzeme/malzeme grubu bulunmaktadır. Yaşam standartlarımızı geliştirmek için mevcut malzemeler yapı ve sınıflarına göre ayrılmakta ve kullanım yerine göre tercih edilmektedir. Bu nedenle mühendisler, ürünlerin tasarımında ve üretiminde 50,000'den fazla malzeme arasından uygun malzemeyi seçme zorluğuyla karşı karşıya kalmaktadırlar (Mazumdar, 2002; Ashby ve Jones, 2005). Kullanımda olan malzeme grupları; geleneksel malzemeler (metaller, seramikler, plastikler vd.) olabileceği gibi, birden fazla malzemenin farklı özellik ve kombinasyonlarından yararlanılan ve yenilikçi tekniklerle bir araya getirildiği “ileri malzemeler” olarak adlandırılan malzemelerden de meydana gelebilirler.

Malzemeler genel olarak karakteristik özelliklerine göre (sertlik, dayanım, yoğunluk ve erime sıcaklığı gibi); metaller, plastikler, seramikler ve kompozit malzemeler olmak üzere başlıca dört bölüme ayrılırlar. Bu malzemelerin her biri farklı özelliklere, yapılara ve uygulama alanlarına sahip olmakla birlikte, kompozit malzemeler olarak adlandırılan malzeme sınıfı son yıllarda farklı birçok uygulama için yaygın ve kullanışlı mühendislik malzemeleri haline gelmiştir (Askeland vd., 1996; Kalpakjian ve Schmid, 2000; Mazumdar, 2002; Rusinek, 2010; Karpat vd., 2012; Koboević vd., 2012; Phadnis vd., 2013). Üstün özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerin bilim ve mühendisliğin değişik alanlarındaki kullanımları her geçen gün artmaktadır (Chen, 1996). Kompozit malzemeler iyi bir şekilde tasarlandıkları takdirde; ağırlık, aşınma direnci, yorulma ömrü, korozyon direnci, rijitlik, mukavemet ve ısı yalıtımı gibi özelliklerde çok üstün nitelikler göstermektedir (Jones, 1999; Grzesik, 2008). Kompozit malzemelerin yapısının heterojen olması, yapısı homojen olan geleneksel malzemelere göre fiziksel ve kimyasal değişiklikler göstermektedir. Oluşan yapısal farklılıkların metalik malzemeler ile kompozit malzemelerin talaşlı imalat ile işlenmesinde kayda değer bir değişime yol açmıştır (Komanduri, 1997). Kompozit malzemelerin kullanıldığı alanları uzay, havacılık ve savunma endüstrileri başta olmak üzere otomotiv, inşaat, denizcilik endüstrileri oluşturmaktadır (Dandekar ve Shin, 2012). Matris ve takviye fazı olarak iki bileşenden oluşan kompozit malzemelerde matris fazı olarak metal, seramik, plastik malzemeler

kullanılırken takviye malzemesi olarak ise karbon, cam ve kevlerden üretilmiş fiberler, parçacık, partikül, kılcal kristal ve yassı plakalar kullanılmaktadır. Takviye fazı olarak fiber malzemelerin kullanıldığı karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) malzemeler, havacılık endüstrisinde üstün mekanik özellikleri nedeniyle en çok tercih edilen ileri kompozit malzeme sınıfına girmektedir. Otomotiv endüstrisinde ise, otomobillerin görünüm ve performans özelliklerini iyileştirmek ve yakıt tüketimini azaltmak için CFRP kompozit malzemeler güncel olarak kullanım bulmaktadır (Mazumdar, 2002). CFRP kompozit malzemelere nihai şekillerini verebilmek için delme, frezeleme ve tornalama gibi talaşlı imalat işlemlerinden yararlanılmaktadır (Kim vd., 1992; Slamani vd., 2015; Hejjaji vd., 2016; Maegawa vd., 2016). CFRP kompozit malzemenin anizotropik, homojen olmayan (Bhatnagar vd., 1995; Guu vd., 2001; Marques vd., 2009; Shyha vd., 2009; Iliescu vd., 2010; Wang vd., 2013) ve aşındırıcı (abrasif) yapısı (Komanduri, 1997; Teti, 2002; Iliescu vd., 2010; Li vd., 2010; Khairusshima vd., 2011; Karpat vd., 2012; Makhdom vd., 2012; Zitoune vd., 2012; Karpat ve Polat, 2013), sebebiyle işlenmesi sırasında kesici takımında meydana gelen deformasyon ve deformasyonlara bağlı olarak malzeme yapısında hasarlar oluşmakta ve yüzey kalitesi kötüleşmektedir (Kople vd., 1983; Mizutani vd., 2000; Dold vd., 2012; SenthilKumar vd., 2013). Kesme işlemi esnasında oluşan olumsuzluklar, çatlamalara ve fiberlerin ayrılmasına sebep olabilmektedir (Bhatnagar vd., 1995). Prosesin verimli bir şekilde yürütülmesi ve düzgün yüzeyli iş parçası elde edebilmek için, doğru bir talaşlı imalat işlemi ile boyutsal kararlılığın ve arayüzey kalitesinin sağlanması gerekmektedir (Rahman vd., 1999).

CFRP kompozit malzemelerinin boyutlandırılmasında frezeleme yöntemi sıklıkla kullanılan bir prosestir. Frezeleme işleminde yüzey kalitesi, üretilen parçaların montajdaki durumlarını etkilemektedir. Yüzey kalitesi kesme parametrelerine, takım geometrisine ve kesme kuvvetlerine bağlı değişim göstermektedir (Davim ve Reis, 2003). CFRP kompozit malzemelerin frezeleme işlemi esnasında meydana gelen takım aşınması kesme kuvvetlerini artırmakta ve tabaka içi veya katmanlar arası delaminasyona neden olmaktadır (Karpat vd., 2012). Bu nedenle, CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde kullanılan takımların aşınma dayanımı yüzey kalitesi ile doğrudan ilişkilidir (Karpat ve Polat, 2013). Bunun yanında kullanım esnasındaki hızlı takım aşınması ve sık sık takım değişikliği üretimin aksamasına sebebiyet vermektedir (Marques vd., 2009). Kompozit malzemelerin işlenmesi esnasında oluşan delaminasyonun önüne geçebilmek için kesme kuvvetlerinin azaltılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Kople vd., 1983; Ho-Cheng ve

Dharan, 1990; Morandau vd., 2011; Sorrentino ve Turchetta, 2011; Sorrentino ve Turchetta, 2014). İleri üretim teknolojilerinden biri olan yüksek hızda kesme (HSC) uygulaması üretim maliyetlerini azaltmak ve üretim miktarını artırmakla birlikte, kesme kuvvetlerinin de azalmasına yardımcı olmaktadır (Karnik vd., 2008). CFRP kompozit malzemesinin delme işleminde yüksek hız çeliği ve karbür takımlar karşılaştırıldığında, daha düşük aşınma oranından dolayı karbür takımlar ile daha düşük kesme kuvvetlerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır (Shyha vd., 2009). Bunun yanı sıra, nanokompozit kaplamalı kesici takımlar ile yapılan delme işlemlerinde kesme kuvvetlerinde azalma gözlenmiştir (Zitoune vd., 2012). Yüksek hız ve düşük ilerleme oranı, CFRP kompozit malzemelerin işlenmesi için istenilen parametrelerdendir (Ramulu vd., 2001).

CFRP kompozit malzemesinin işlenmesinde karbür takımlar sıklıkla kullanılmaktadır (Teti, 2002). Karbür takımların, fiberlerin oryantasyonuna karşı duyarlılığı bulunmaktadır (Kolar vd., 2014). İşlenmeleri sırasında gözlenen erken takım aşınması nedeniyle, takım ömrünü artırmak ve üretilen parçaların yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla karbür takımlar üzerine CVD (Kimyasal Buhar Biriktirme) ve PVD yöntemleri gibi yöntemler kullanılarak ince film kaplama üretimi gerçekleştirilmektedir.

Üretilen kaplamalar ince film kaplamalar ile soğutma sıvısının fonksiyonları karşılanmakta ve böylece kesici takımın temas karakteristikleri ve aşınma davranışları geliştirilebilmektedir. Talaşlı imalatla farklı birçok tip kaplamalı karbür takımlar bulunmaktadır. Karbür takımların aşınma direncini artırmak için TiN, TiAlN, TiCN, DLC (Elmas benzeri karbon kaplama) vb. gibi tek tabakalı kaplamalar ve/veya sıralı kombinasyonlarından oluşan çok tabakalı kaplamaların kullanımı sayesinde, kesici takım ömrü geliştirilebilmektedir (Hosokawa vd., 2014; Kusuyama vd., 2014; Qin vd., 2014; Konneh vd., 2015). Birden fazla dişe sahip TiAlN kaplamalı kesici takımların CFRP kompozit malzemenin son işlemleri için çok kristalli elmas (PCD) takımlardan daha üstün özelliklere sahip olduğu, TiAlN/TiN gibi çok katmanlı kombinasyonlarının ise delme işlemi uygulamasında kesme hızının ve ilerleme oranının artmasıyla birlikte kesme momentinin, itme kuvvetinin arttığı ve yanak aşınmasının olduğu literatürde rapor edilmiştir (Lacalle vd., 2009; Chatelain ve Zagbani, 2012; Isbilir ve Ghassemieh, 2012).

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanılan ileri kompozit malzeme sınıfından olan CFRP kompozit malzemenin kaplamasız, PVD prosesi

kullanılarak üretilmiş tek tabakalı TiAlN ve TiN, nanotabakalı (nl) AlTiN/TiN ve çok tabakalı nanokompozit (nc) TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımlar ile işlenebilirliği araştırılmıştır. CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde, kesme hızı, ilerleme oranı, kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) gibi işleme ve yüzey parametrelerinin; kesici takımların aşınması üzerindeki etkileri araştırılarak optimum değerlerinin tespit edilmesi ve iş parçası üzerindeki hasar mekanizmalarının ayrıntılı olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

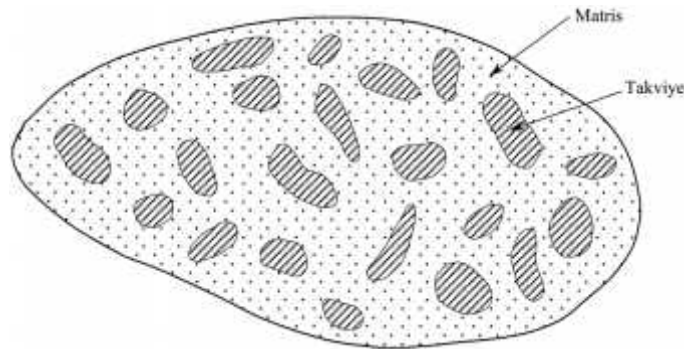


BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin istenen özelliklerini bir araya getirmek amacıyla, bu malzemelerin makro yapıda birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Jones, 1999; Kalpakjian ve Schmid, 2000; Miracle ve Donaldson, 2001; Mitchell, 2004). Bu yeni malzemeler tarihte ilk olarak kabuk ve saman karıştırılarak inşaatlarda yapı malzemesi olarak kullanılmıştır. 1960'lı yıllarda polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesiyle birlikte üreticilerin ilgisini çekmiş ve böylelikle mühendislik malzemeleri olarak kullanılmaya başlanmıştır (Mazumdar, 2002). Günümüzde ise yüksek mukavemet ve hafiflik istenen uygulamalarda metal malzemelere kıyasla daha fazla tercih edilmektedirler. Kompozit malzemeden imal edilen parçalar tasarlanırken, malzemenin kullanılacağı alana yönelik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Matris ve takviye fazı olarak iki bileşenden oluşan kompozit malzemelerde matris fazı (metal, seramik, plastik, vb.) ve takviye fazı (karbon, seramik, kevlar, vb.) olarak farklı malzemeler kullanılabilir (Şekil 1).



Şekil 1: Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi (Berthelot, 1999).

Genel özellikleri bakımından kompozit malzemeler:

- Mikroskobik olarak heterojendir,
- Bileşen malzemelerin mekanik özelliklerinde büyük farklılıklar mevcuttur,
- Bileşen malzemelerin hacimsel oranı % 10'dan büyüktür ve

- Elde edilen kompozit malzeme, performansta iyileşme sağlamalıdır (Wang vd., 2011).

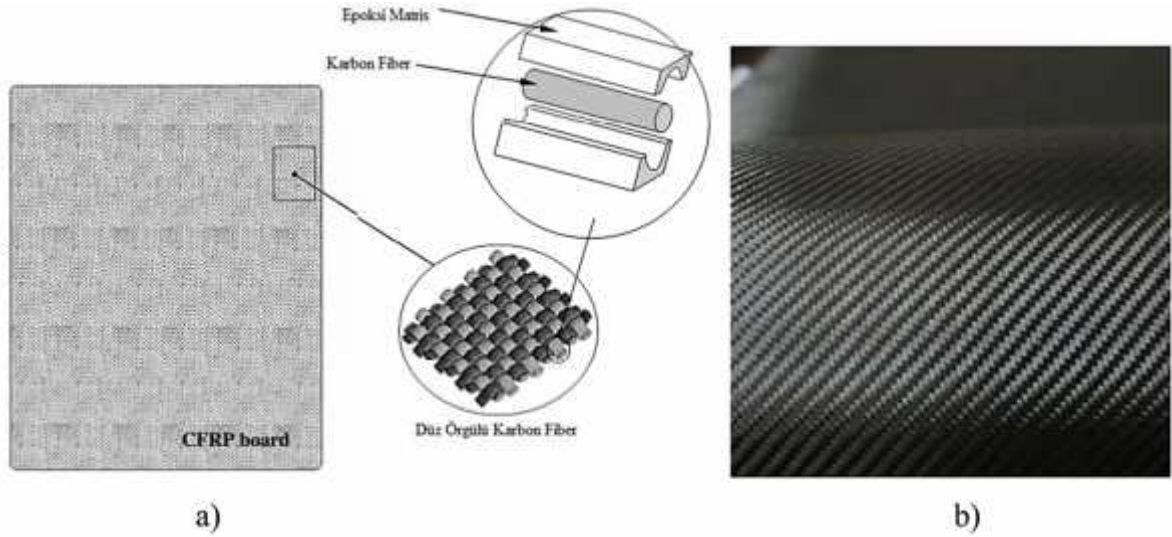
Kompozit malzemelerin bilim ve mühendisliğin değişik alanlarındaki kullanımları gün geçtikçe artmaktadır (Chen, 1996). Diğer metalik malzemelere göre, belirgin anizotropik, heterojen yapıları ve plastik deformasyona uğramayan özellikleri kompozit malzemeleri ön plana çıkarmaktadır (Arul vd., 2006; Gaitonde vd., 2008). Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin oranının ya da kompozit yapısının iyi bir şekilde tasarlanması durumunda daha iyi özelliklerin elde edilmesi, kompozit malzemelerin önemli üstünlüklerindendir. Kompozit malzemeler diğer konvansiyonel malzemeler ile kıyaslandığında da bu malzemelerin özellikle elastisite/yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranlarında üstün oldukları görülmektedir. Ayrıca; ağırlık, aşınma direnci, yorulma ömrü, korozyon direnci, rijitlik, mukavemet, ısı yalıtımı gibi özellikler kompozit malzeme yapısı ile geliştirilebilmektedir (Jones, 1999; Staab, 1999; Grzesik, 2008). Uzay ve havacılık endüstrisindeki sistemlerin performanslarındaki iyileşmeler, malzeme ve tasarım yaklaşımlarındaki yeniliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir (Romano vd., 2009).

2.2 Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP) Kompozitler

Bilim açısından bilinen en önemli kimyasal elementlerden birisi karbondur. Karbonu yaşam için bir şart haline getiren, bu molekülün yeryüzündeki hemen hemen her şeyin (arabamızın lastiklerinden bilgisayarımıza, kullandığımız doğal gazdan selüloza kadar) temelini teşkil eden bir element olmasıdır. Karbon, yaklaşık olarak 1,7 milyon kadar bileşik yapabilmektedir. Karbonun en önemli özelliklerinden birisi, birbiri ardınca dizilerek çok kolay zincir oluşturabilmesidir. Bu nedenle karbon fiberler, yakın zamandan toplum için gerekli ve geniş bir kullanımı olan kömür, petrol ve elmaslarla birlikte yüksek performanslı uygulamalar için elverişli bir malzeme haline gelmektedir ve organik fiberlerin termal dönüşümü ile ya da polimerik ön malzemelerden elde edilmektedirler (Buckley ve Edie, 1993; Berthelot, 1999; Ferreira vd., 2001; Morgan, 2005; Asker vd., 2014).

Düşük yoğunluğa, yüksek mukavemete ve sertliğe sahip, cam fiberlerden daha pahalı olan grafit fiberlere **Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP)** malzeme denilmektedir (Şekil 2) (Kalpakjian ve Schmid, 2000). CFRP kompozit malzemelerin, son derece yüksek çekme

dayanımı/ağırlık oranları, çekme modülü/ağırlık oranları, düşük termal uzama katsayısı, yüksek yorulma dayanımları ve termal iletkenlikleri önemli avantajlarındandır. Yüksek elektrik iletkenliği ve yüksek maliyetlileri ile birlikte düşük kopma uzaması ve darbe dirençleri ise dezavantajlarından sayılmaktadır (Mallick, 2008).



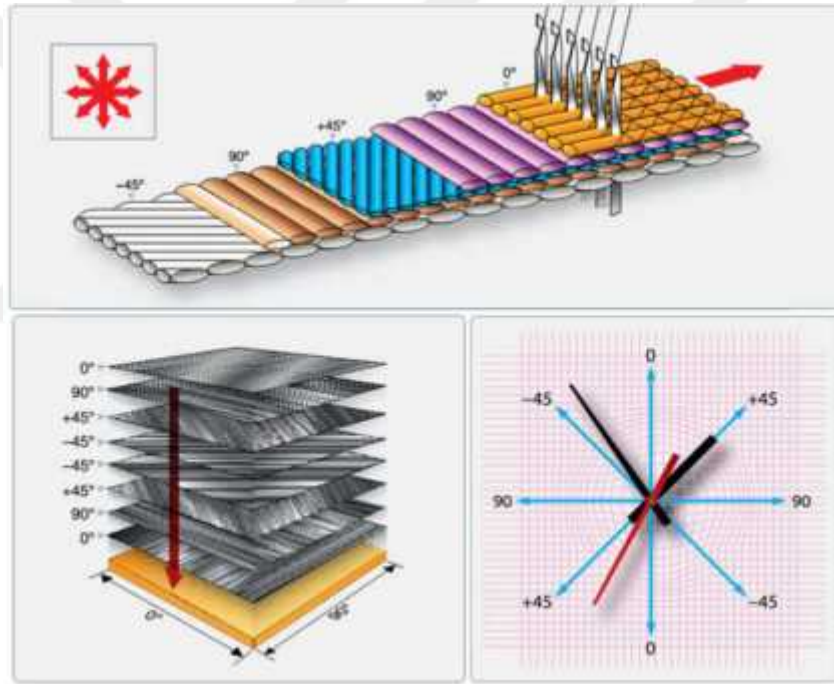
Şekil 2: a) CFRP kompozit malzeme ve içyapısının gösterimi (Karnik vd., 2008), b) CFRP kompozit malzemesinin yüzey görünümü (Żółkiewski, 2011).

Karbon fiberler genellikle % 80 ile 95 oranında karbon içeren, kısa ya da sürekli olabilen, çok iyi mekaniksel özelliklere, 2000 kg/m^3 'den daha az yoğunluğa ve aynı zamanda, hafif olmalarının yanında $2,268 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip olan malzemelerdir. Teorik olarak sıfır ısı genleşme katsayısı, uygun sönümleme özelliği ile birlikte yüksek rijitlik ve 4500 MPa 'a kadar yüksek özgül mukavemet özelliklerinden dolayı tercih edilmekte ve karbon fiberlerin yapısal bütünlüğü bozulmadan $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar dayanabilmektedirler. Bu malzemeler düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen diğer geleneksel malzemelere göre en fazla yük taşıyan malzeme olup, mükemmel ısı (bakırdan bile daha yüksek) ve elektriksel iletkenlik ile $145000\text{-}220000 \text{ MPa}$ değerinde yüksek elastite modülüne, $800\text{-}1200 \text{ MPa}$ çekme mukavemetine sahip ileri kompozit malzemeler sınıfındandır. Ayrıca oda sıcaklığında nemden veya asit ve solventlerden etkilenmezler. $5\text{-}8 \text{ }\mu\text{m}$ çapında küçük 'turbostratik' grafit kristallerinden ve allotropik biçimde oluşmaktadırlar. Eksenel yönde yüksek mukavemet ve modül elde etmek için taban düzleminin eksene paralel olması gerekmektedir. Karbon fiberden yapılmış kompozitler 1020 çelik sınıfı yapısal parçalardan 5 kat daha kuvvetli ve beşte biri ($1/5$) ağırlığında olmaktadır. 6061 alüminyum ile karşılaştırıldığında ise 7 kat daha kuvvetli ve 2 kat daha rijit iken 1,5 kat daha hafiftir ve

metal parçaların yerini almasıyla beraber ticari/endüstriyel kullanım alanlarında ve uygulamalarında hızlı bir artış sağlamaktadırlar (Figueiredo vd., 1989; Hull ve Clyne, 1996; Berthelot, 1999; Kalpakjian ve Schmid, 2000; Miracle ve Donaldson, 2001; Teti, 2002; Morgan, 2005; Asthana vd., 2005; Soutis, 2005; Mallick, 2008, Serp ve Figueiredo 2009; Shyha vd., 2009; Callister ve Rethwisch, 2009; Chawla, 2012, Pekat vd., 2012).

2.2.1 CFRP Kompozit Malzeme Üretimi

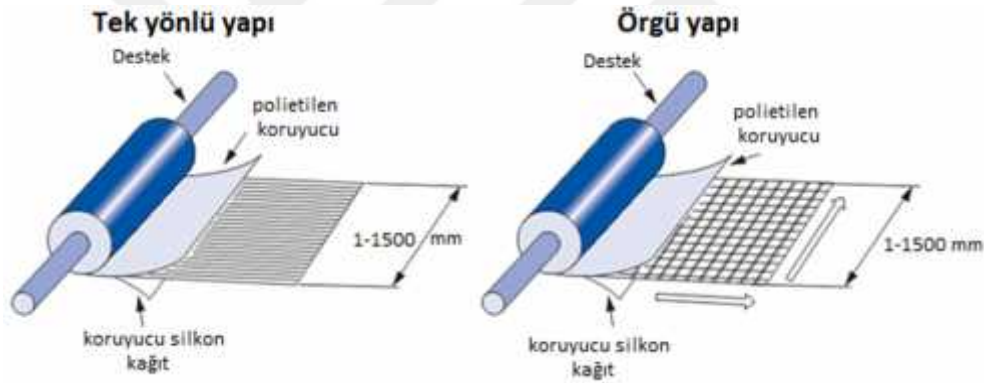
Fiber takviyesi kompozit bir yapı içerisinde yerleştirilme yönüne (oryantasyon) fazlasıyla bağlı olmaktadır (Şekil 3). Çünkü fiber oryantasyonu optimum mekanik özellikleri üretmekte ve yapının mukavemeti ile sertliğini artırmaktadır (Wang vd., 2016).



Şekil 3: Fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber oryantasyon açılarının (foa) gösterimi (AMT-Airframe).

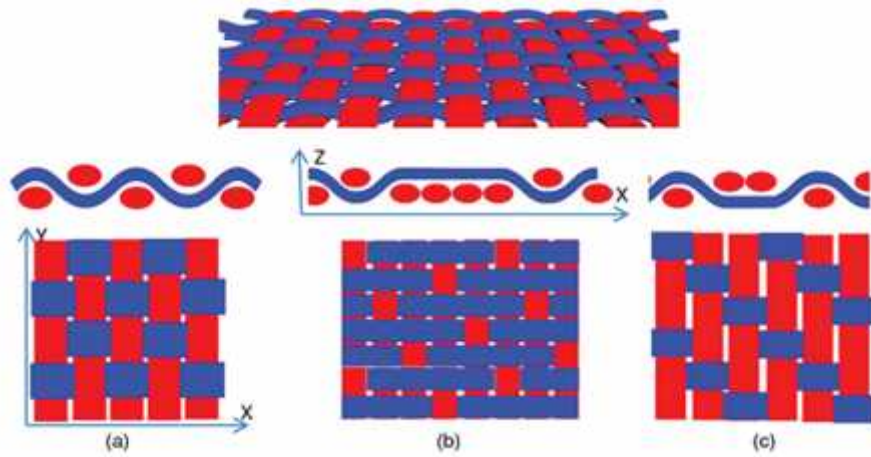
CFRP kompozit malzemelerin tabaka yöneliminin uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu yüzden 0° oryantasyonu eksenel yükleri, $\pm 45^\circ$ oryantasyonu kayma (shear) yükleri ve 90° oryantasyonu yanal yükleri ifade etmektedir (Şekil 3). 0° foa çekme mukavemetinin en yüksek olduğu, çelik kadar sağlam ve bükülmesi zor, $\pm 45^\circ$ foa bükülebilir ve 90° foa çekme mukavemetinin olmadığı doğrudan kopan foa ifade etmektedir (AMT-Airframe). Önemli fiber takviyelerinden olan karbon fiberler; iplik, tek

yönlü dokuma ya da farklı örgü türlerinde üretilmektedir. Karbon fiberlerin tek halleri ipçik (filament) olarak adlandırılmakta ve 3K, 6K, 12K veya 24K olarak sembolize edilmektedir (K=1000 adet ipçik) (Morgan, 2005). Bu malzemelerin filament şeklinde olmasından dolayı elastik modüllerini ve mukavemetlerini arttırmaktadır (Yazıcıoğlu vd., 2014). Tüm filamentler aynı yönde ve bükülmeden küçük demetler (roving) halinde sarılırlar. Bu kuru fiberler sarımdan önce reçineye emdirilerek (prepreg) muhafaza edilip kullanıma hazır hale getirilmektedir. Prepregler son derece sağlam ve hafif bileşenlerinin oluşturulması için ısı ve basınç altında sertleşen fiber takviyeli reçinelerdir. Ayrıca prepreg malzeme de bir matris ve fiber takviyesi kombinasyonundan oluşmaktadır. Böylece nihai ürüne mukavemet sağlamak için uygulanmaktadırlar. Birçok uygulamada mandreller kullanılarak ya tek yönlü (tape) ya da çift yönlü (fabric) biçiminde fiber sarma uygulanmakta ve daha sonra 180 °C’de sertleştirme işlemi (cure) gerçekleştirilmektedir (Şekil 4) (Hexcel, 2016).



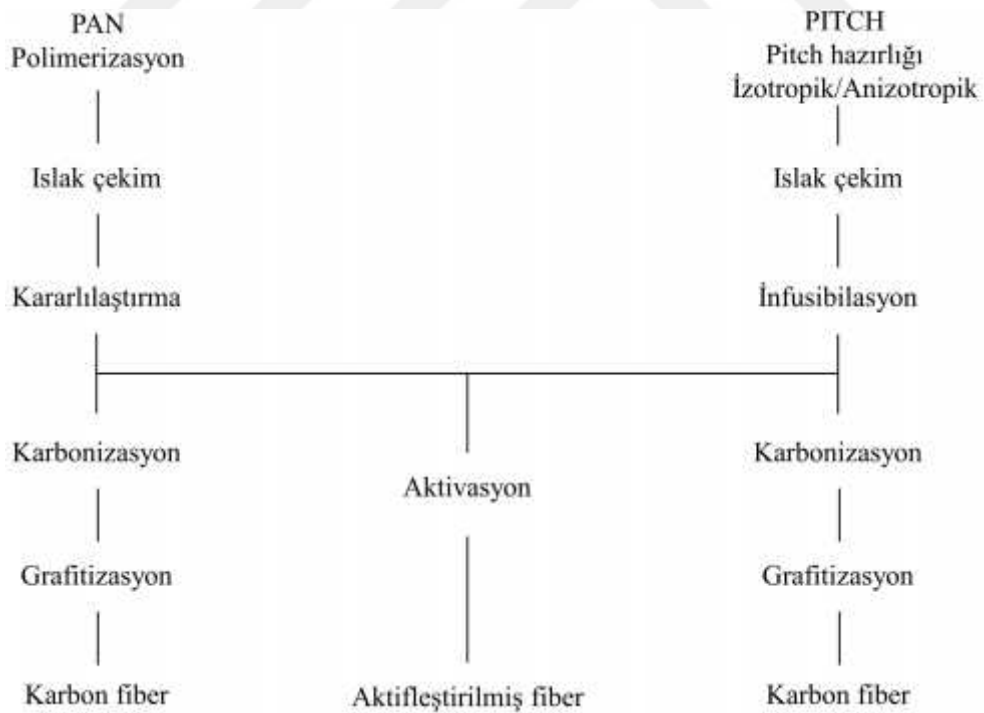
Şekil 4: Tek yönlü ve çift yönlü fiber sarma gösterimi (Hexcel, 2016).

Genellikle fiberlerin aynı ağırlık/boyuna ve enine yönlerinde verim elde etmek için yapısal uygulamalarında kumaşlar (fabric) tercih edilir. Bu nedenle, havacılık ve uzay yapılarının imalat sürecinde ağırlıktan tasarruf etmek için sıkı dokulu kumaşlar, en az reçine boyutu ile birlikte uyumlu olan foa tercih edilmektedir. En çok kullanılan kumaş yapıları düz (plain), twil ve saten (satin) kumaşlardan oluşmaktadır (Şekil 5) (Elmarakbi, 2013).



Şekil 5: Kumaş dokuma tiplerinin gösterimi; a) Düz doku, b) Saten doku, c) Twil doku (Elmarakbi, 2013).

Ticari olarak elde edilen karbon fiberler üç kategoriye ayrılmaktadır, bunlar sırasıyla; genel amaçlı (GP), yüksek performanslı (HP) ve aktifleştirilmiş (ACF) karbon fiberlerdir. Ticari karbon fiberler zift (pitch) ya da poliakrilonitril (PAN) ham maddelerinden imal edilmektedirler (Şekil 6) (Chung, 1994; Burchell, 1999).



Şekil 6: PAN ve PITCH bazlı karbon fiberin üretim şeması (Chung, 1994).

Burada ıslak çekim (wet spinning) yöntemiyle PAN işlemi uygulanırken, eriyikten çekim (melt spinning) yöntemiyle de PITCH işlemi uygulanmaktadır. PAN bazlı karbon

fiberlerin daha iyi mekanik özellik göstermesinden dolayı, PITCH işlemine göre daha çok tercih edilmektedir. Karbon fiberin, karbonizasyon sıcaklığı 700 °C'den 2500 °C'ye çıktıkça elastik modül değeri artarken çekme dayanımı da azalmaktadır. Karbon fiberler yüksek çekme mukavemeti, elastik modülü, düşük yoğunluk, kimyasal ve ısı kararlılık, düşük ısı genleşme katsayısı gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda tercih edilen ileri kompozit malzemelerdir (Chung, 1994; Burchell, 1999; Morgan, 2005; Mallick, 2008; Suresha vd., 2010).

2.2.2 CFRP Kompozit Malzeme Kullanım Alanları

Cam, karbon, boron ve kevlar gibi fiber kompozit malzemeleri endüstri kullanımları için tasarlanmakta ve uygulamaları yaygınlaşmaktadır. İleri kompozit malzeme sınıfından olan CFRP kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi, düşük yoğunluğa sahip olması, titanyuma göre daha sert, yüksek tokluk değeri, uygun formları kullanıldığı takdirde düşük hasar toleransı, yüksek dayanım, yüksek sertlik, hafiflik, düşük sürtünme katsayısı, iyi aşınma direnci, kimyasal ve boyutsal kararlılık, korozyon direnci, düşük elektrik direnci ve titreşim sönümlenme özellikleri kullanımını çekici hale getirmektedir. CFRP kompozit malzemenin döngüsel yükler altındaki kapasitesinden ötürü, çevre dayanıklılığı etkin olan yapı elemanlarının performansını arttırmak için de kullanılmaktadır. Bunun yanında yakıt tüketiminin de azalmasına önemli oranda yardımcı olmaktadır. Bu nitelikler diğer malzemelerden üstün olduğunu ve gelecek vaat ettiğini göstermekte ve endüstriyel uygulamalara alternatif olmaktadır. CFRP kompozit malzemelerin uygulama alanları en çok uzay ve havacılık endüstrisinde görülmektedir (Hull ve Clyne, 1996; Staab, 1999; Kalpakjian ve Schmid, 2000; Brinksmeier ve Janssen, 2002; Davim ve Reis, 2003; Linbo vd., 2003; Davim ve Reis, 2005; Denkena vd., 2008; Karnik vd., 2008; Chung, 2010; Iliescu vd., 2010; Durão vd., 2010; Khairusshima vd., 2011; Isbilir ve Ghassemieh, 2012; Karpas vd., 2012; SenthilKumar vd., 2013).

Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan parçaların yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek mukavemet, yüksek sertlik, düşük ağırlık ile birlikte sağlamlık ve korozyon direncine sahip olan CFRP kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Askeri alanda ise fiber takviyeli kompozitlerin büyük yapısal uygulamaları, ağırlığın azaltılması, yüksek hızlara çıkılması ile beraber yük taşıma kapasitesini arttırmak için kullanılmaktadır. Askeri uçak (hayalet uçak) B-2'nin dış

yüzeyinin neredeyse tamamı CFRP kompozit malzemeden imal edilmiştir (Şekil 7). Bu uçaklar radar yansımalarını, ısı dağılımını, görünmezlik özelliklerini karbon fiberler sayesinde artırmak için tasarlanmıştır (Mallick, 2008, Slamani vd., 2015).



Şekil 7: Askeri uçak (hayalet uçak) görüntüsü (Mallick, 2008).

CFRP kompozit malzemeler ısı ile yumuşamadıkları ve erimedikleri için yüksek sıcaklıklara maruz kalan roketlerde ve uçak frenlerinde kullanılmaktadır. Ağırlığın azaltılması havacılık alanlarında kullanılan ürünlerin tasarımının temel amaçlarından biri olmaktadır. Bu nedenle metal malzemelerin yerine yavaş yavaş CFRP kompozit malzemelerin kullanılmasına olanak sağlamakta ve ticari uçakların yaklaşık % 50 oranında temel yapı parçaları epoksi esaslı malzeme olan fiber takviyeli kompozit malzemelerden üretilmektedir. Böylece iyi mekanik performans, yüksek modül ve mukavemet ile birlikte düşük yoğunluk birleştirilmesi sağlamaktadır. CFRP kompozit malzemenin mükemmel mekanik özellikleri sebebiyle Airbus A350 uçağının % 52'si, Boeing 787 uçağının % 50'si, Bombardier C serisinin % 46'sı CFRP kompozit malzemeden oluşmaktadır. Kanat kutularında, gövdede, kanatçıklarda, kanatlarda, spoylerde, dikey stabilizatörde ve uçak motor kapağında da kullanılmaktadır. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TAI)'nin ürettiği Türk İnsansız Hava Aracı (TİHA) ANKA'nın ise büyük çoğunluğu CFRP kompozit malzemeden imal edilmektedir (Şekil 8) (Miracle ve Donaldson, 2001; Daniel ve Ishai, 2006; Sheikh-Ahmad, 2009; Terenzi vd., 2017).



Şekil 8: Türk insansız hava aracının (ANKA) görüntüsü (URL-1).

Malzeme giderlerinin zaman içinde azaltılmasıyla beraber otomotiv ve imalat takım endüstrisindeki uygulama alanları CFRP kompozit malzemesinin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Otomotiv endüstrisinde elektrikli araçlarda hafiflik konusunda özellikle yakıt tüketiminin en aza düşürülmesi ile ilgili girişimlerde bulunularak verimliliğin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu nedenle, kompozit malzemelerden karbon fiberin yaygın bir şekilde kullanılması otomotiv üreticilerinin tercihi olmaktadır. Günümüzün Formula-1 yarış arabalarının tüm ana gövdesi, şasesi, iç ve süspansiyon parçalarında CFRP kompozit malzeme kullanılmaktadır (Şekil 9). Formula-1 arabalarında CFRP kompozit malzemenin önemli bir uygulaması da bir kaza sırasında sürücüyü koruyan yaşam hücresi diye isimlendirilen parça olmakta ve yaşam hücresinin önünde yer alan burun konisi de CFRP kompozit malzemeden imal edilmektedir (Mallick, 2008; Dold vd., 2012; Mucha vd., 2013; Klotz vd., 2014).



Şekil 9: Formula 1 yarış arabasındaki karbon fiber takviyeli süspansiyon ve vites kutusu görünümü (Mallick, 2008).

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yüksek dayanım, rijitlik, mükemmel aşınma direnci, iyi korozyon direnci ve düşük ağırlık özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerin kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. İleri kompozit malzemeler sınıfından olan CFRP kompozit malzemeler, sahip oldukları yük taşıma kapasitesi, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek rijitlik ve hafifliklerinden dolayı, uzay, havacılık ve otomotiv endüstrisinde uçak kanatları, gövdeleri, fren ekipmanları, roket nozulları ile otomobil tavanları, kaputları gibi yerlerde kullanılmaktadır. Ancak, CFRP kompozit malzemelerin aşındırıcı yapısından dolayı, talaşlı imalatlarında kullanılan kesici takım ömründe büyük oranda azalma meydana gelmekte ve üretimlerinden kaynaklı delaminasyon, fiber kırılması, kesilmemiş fiber ve yüzey pürüzlülüğü gibi hasarlar ortaya çıkmaktadır. Talaşlı imalat sırasında ortaya çıkan hasarların önüne geçebilmek amacıyla, PCD takımlar ve elmas kaplamalı karbür takımlar kullanılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Ancak, PCD ve elmas kaplamalı takımların maliyetlerinin yüksek olması, CFRP kompozit malzemelerin üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, PCD ve elmas kaplamalı takımların yerine ince film kaplamalı karbür takımların kullanılması son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Bu bölümde, CFRP kompozit malzemelerin talaşlı imalatı işlenebilirlikleri üzerine yapılan çalışmalar araştırılmıştır.

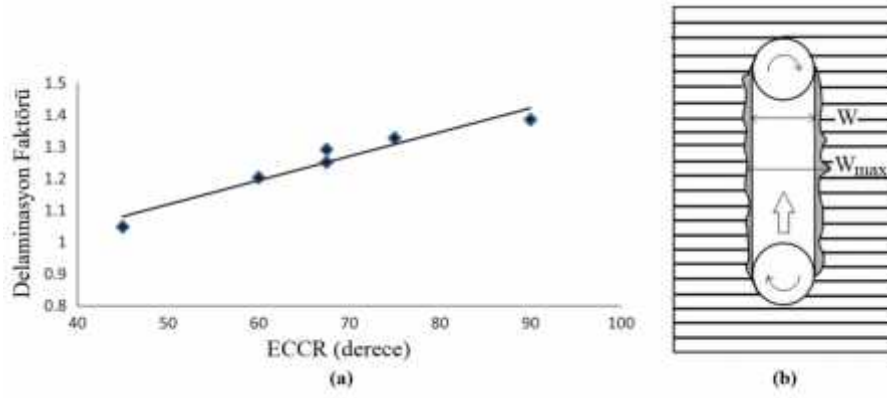
3.1 CFRP Kompozit Malzeme Üzerine Uygulanan Talaşlı İmalat ile İlgili Çalışmalar

Ghafariyadeh vd. (2016), 6,3 mm kalınlığında CFRP kompozit malzemeyi belirlenen işleme parametreleri altında üç eksenli CNC işleme merkezinde yüzey frezeleme işlemine tabi tutmuşlardır. Kesme kuvvetlerini ve işleme hasarını belirlemek için yapmış oldukları deneysel çalışma sonucu ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. CFRP kompozit malzemenin işlenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri, foa'dan önemli bir şekilde etkilendiğini ve bu durumun CFRP kompozit malzemenin anizotropik karakterinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Seçmiş oldukları işleme parametrelerinde (kesme hızı; 250 m/dak, ilerleme oranı; 0,063 mm/dev, kesme derinliği; 0,5 mm) iyi yüzey kalitesi elde etmişlerdir. Araştırmacılar, CFRP kompozit malzeme

yüzey frezeleme işlemindeki modellemelerinde kesme kuvvetleri ve işleme hasarlarının tahmin edilebileceği tezini yapmış oldukları deneylerle de ispatlayarak kesme kuvvetlerinin büyük ölçüde ϕ 'larına bağlı olduğu sonucunu varmışlardır (Ghafari-zadeh vd., 2016).

Wang vd. (2016), helisel frezeleme işleminde CFRP/Ti malzemesinin delik kalitesi, kesme kuvveti ve takım aşınması ile ilgili temel sorunları araştırmışlardır. Deneylerinde, 10 mm kalınlığında % 65 fiber hacim oranına (ϕ) sahip 0° ϕ 'daki $250 \times 120 \times 10$ mm boyutlarındaki CFRP kompozit malzemeyi işlemişlerdir. 10 mm kalınlığındaki Ti alaşımını (toplam kalınlık 20 mm) 7 mm çapında dört ağızlı TiAlN kaplamalı karbür takımlar ile 10 mm çapında delik delme işlemine tabi tutmuşlardır. İşleme parametreleri için ilerleme oranı 0,04 mm/s, aksel ilerleme 0,1 mm/dev ve iş mili hızlarını 4000 ile 6000 dev/dak olarak belirleyerek kuru olarak işlemişlerdir. Kesme kuvveti analizlerinde aksel kuvvetlerin (F_z) radyal kuvvetlerden (F_r) daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. Titanyum alaşımının işlenmesinde F_z ve F_r kuvvetlerin çok az değişim göstermesine rağmen aksel kuvvetin ilk değerini CFRP kompozit malzeme işleminde 150 N ve radyal kuvvetlerde ise 60 N olarak tespit etmişler. Bu durumun delik sayısının artmasıyla arttığını bildirmişlerdir. CFRP kompozit malzeme işleminde artan kesme kuvvetlerinden dolayı takım aşınma etkisinin daha belirgin olduğunu tespit etmişlerdir. Helisel frezeleme işleminde CFRP kompozit malzeme ve titanyum alaşımı arasındaki takım aşınma modelinin farklı olduğunu belirterek titanyum alaşımı işlenmesinde kırılma veya adhesiv aşınmanın sık sık meydana geldiğini, CFRP kompozit malzemelerin işlenmesinde abrasiv aşınmanın oluştuğunu belirtmişlerdir. Helisel frezelemede CFRP kompozit malzeme girişinde herhangi bir hasar görülmediğini çıkışta ise delaminasyon hasarının görüldüğünü belirtmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmaların sonucunda delik sayısının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını ve takım aşınmasının oluştuğu, CFRP kompozit malzeme işleminde oluşan abrasiv aşınmanın kesme kuvvetini arttırdığı, titanyum alaşımında delik kalitesinin iyi olduğu fakat frezelemede freze çıkışının CFRP kompozit malzeme girişinde delaminasyona sebep olduğu sonuçlarına varmışlardır (Wang vd., 2016).

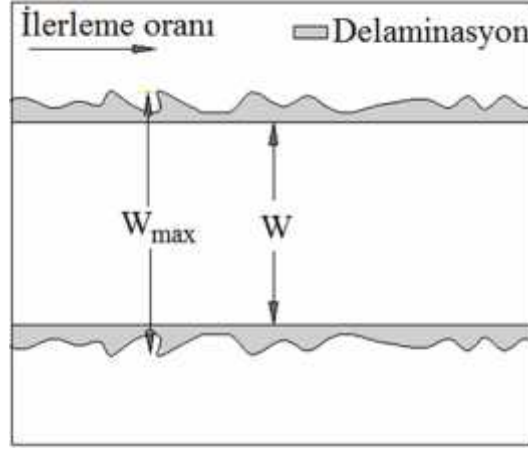
Oryantasyona dayalı hasar mekanizmalarını inceleyen İslam vd. (2015), CFRP kompozit malzemenin frezeleme işlemi sırasında kanal (slot) kenarları üzerinde meydana gelen delaminasyonu ve etkili kritik kesme aralığını (eccr) araştırmışlardır. Kesme hızını 2000 dev/dak, ilerleme oranını 40 mm/dak belirleyerek 5 mm çapında iki oluklu HSS kanal freze



Şekil 12: a) Eccr aralığındaki ortalama delaminasyon, b) Kanal frezeleme sırasındaki delaminasyon faktörünün şematik gösterimi (Islam vd., 2016).

Eccr'nin artmasıyla delaminasyonun arttığını (Şekil 12a) maksimum hasarın 90° ve minimum hasarın ise 45° eccr'de tespit etmişlerdir. Zıt ve aynı yönlü frezelemede delaminasyonun, kritik kesme bölgesi içindeki fiber kesme açısı aralığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, iş mili hızının ve ilerleme oranının kesme kuvvetleri üzerinde önemli etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Düşük ilerleme oranları ve yüksek iş mili hızları kesme kuvvetlerini minimize ederek delaminasyon faktörünü azalttığı sonucuna varmışlardır (Islam vd., 2016).

Ahmed vd. (2015), kanal frezeleme (end milling) yöntemini 0° - 90° fca'daki ve $330 \times 170 \times 8$ mm boyutlarındaki CFRP kompozit malzemeyi soğutma sıvısı kullanmadan işlemişlerdir. Deneylerinde, 6 mm çapında ve 4 oluklu iki farklı freze takımını; üç farklı iş mili hızı, üç farklı ilerleme oranı ve 0,2 mm sabit kesme genişliğinde uygulamışlardır. Kesici takım olarak HSS ve sementit karbür takımlarını belirlemişlerdir. Deneylerinde düşük kesme hızlarında gerçekleştirdikleri frezeleme işleminde karbür takımda iyi performans gözlemlemişlerdir. HSS freze ile gerçekleştirdikleri işlem sonucu epoksi reçinesinin kesici takıma yapıştığını gözlemlemişlerdir. Bu durum, yüksek kesme kuvvetlerinin karşılaştığı kesici takımdaki düşük kesme hızlarından ve kesici takımın termal özelliklerinin iş parçası ile ilişkili olmasından kaynaklanmış olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 13: Delaminasyon hasarının (maksimum hasar- W_{max} ile nominal genişlik- W) şematik görüntüsü (Ahmed vd., 2015).

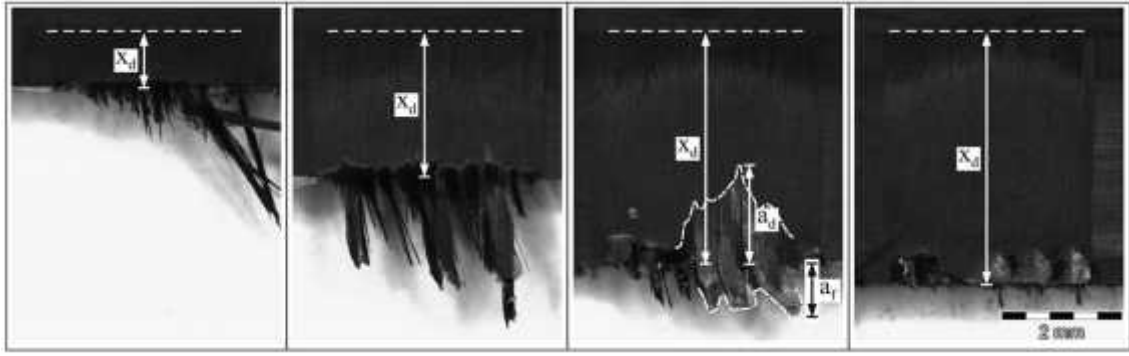
Araştırmacılar, delaminasyon faktörünü frezelenmiş deliğin maksimum genişliğinin teorik deliğin genişliğine oranı olarak tanımlamışlardır (Şekil 13). CFRP kompozit malzemenin kesme genişliği sabit tutulduğunda, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon faktörü üzerine etkili parametrenin ilerleme oranı olduğunu sonucuna varmışlardır. Ayrıca karbür takım ile CFRP kompozit malzemenin işlenmesinin HSS takımlara göre daha uygun olduğu belirterek iş mili hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin iyileştiğini fakat bunun sonucunda takım aşınmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır (Ahmed vd., 2015).

Wang vd. (2015), CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde freze kuvveti, freze sıcaklığı ve kesme parametreleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Tepki yüzey yöntemi (RSM) ve ilgili matematiksel modelleri kesme parametrelerini optimize etmek için kullanmışlardır. Deneylerinde 3,1 mm kalınlığında ve 16 tabakadan oluşan $[0/90]_{2S}$ iş parçasını kullanmışlardır. 6 mm çapında ve kesme kenarlarında birçok kesme ünitesinden bulunan takımla kuru şartlarda işlemişlerdir. Yapmış oldukları deney sonrasındaki sıcaklıkları takım-iş parçası termokuplu kullanarak ölçmüşlerdir. Kauçuksu durum ile camsı durum arasındaki cam geçiş sıcaklığını 185 °C’de elde etmişler. Cam geçiş sıcaklığı arttığı zaman reçinede bozulma meydana geldiğini vurgulamışlardır. İlerleme oranının artmasıyla kesme kuvvetleri artmış ve kesme sıcaklığı çok az değişim göstermiştir. Farklı kesme kuvvetlerinde ve düşük sıcaklıklarda işlenmiş 0° foa’ında önemli bir farklılık gözlemlenmemişlerdir. 90° foa’ında ise kesme kuvvetinin artmasıyla fiberlerde kırılma oluşmuştur. Farklı kesme kuvvetlerinde ve yüksek sıcaklıklarda işlenmiş 0° foa’ında reçine yumuşamış ve fiberler yüzeye çıkmıştır. CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde

yüksek kesme hızlarının tercih edildiğini, ilerleme oranının kesme kuvvetinden etkilendiğini belirtmişlerdir (Wang vd., 2015).

Kılıçkap vd. (2015), CFRP kompozit malzeme frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve delaminasyon faktörü etkisini araştırmışlardır. 0° - 90° fofalı CFRP kompozit malzemenin işlenmesinde 30° helis açılı, 10 mm çapında ve üç ve dört kesici ağızlı sinterlenmiş karbür parmak freze takımını soğutma sıvısı kullanmadan işlemişlerdir. Kesme parametrelerini kesme hızı (31,4-62,8 ve 94,2 m/dak), ilerleme oranı (100, 150 ve 200 mm/dak) ve 1,5 mm sabit kesme genişliği olarak belirlemişlerdir. İlerleme oranının artmasıyla delaminasyon faktörünün ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. CFRP kompozit malzemede oluşan hasarın kesme parametreleri ve takım geometrisi tarafından etkilendiğini belirlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün kesme hızının artmasıyla azaldığı ayrıca ilerleme oranının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığı sonuçlarına varmışlardır. Deneylerde en iyi sonucu dört ağızlı kesici takım tarafından elde etmişlerdir (Kılıçkap vd., 2015).

Hintze vd. (2015), frezeleme işlemlerinde CFRP kompozit malzeme dokuma yapısından kaynaklanan fiber dalgalanması (weave induced fiber undulation) ile delaminasyon bağlantısı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Dalgalanma etkisini analiz etmek için, 1×1 düz bir dokuma yapısına sahip, 12K ipçik (filament) sayısı, 0° - 90° fofalarında ve % 40 fho olan iş parçasını kullanmışlardır. Deneylerinde kesme hızı 400 m/dak, ilerleme oranı 0,08 mm/diş belirleyerek iki diş sayısına sahip farklı çaplardaki PCD freze takımlar ile gözden geçirmişlerdir. 90° fofasının önemli derecede delaminasyon hasarına neden olduğunu belirtmişlerdir. 0° fofasında herhangi bir delaminasyon hasarı oluşmadığı için deneylerini 90° fofasında devam etmişlerdir. Deneylerinde Colligan and Ramulu'nun 1991 yılında yaptıkları çalışmadaki delaminasyon modelini örnek almışlardır.



Şekil 14: Yukarı yönlü freze uygulamasında kompozit malzemenin yüzeyinde oluşan delaminasyon hasarlarının gösterimi (Hintze vd., 2015).

Araştırmacılar, delaminasyon modelini üç tipte incelemişlerdir. Bunlardan ilki olan tip I: işlenen kenarda üst tabaka boyunca uzanan ve fiber demetlerinin ayrıldığı yüzeydir. Tip II: yüzey üzerine algılanabilir hasar vermeden kırılmış kenarın ötesindeki fiberler tarafından yapılması, tip III ise tip I ile tip II'nin birleşiminden oluşmaktadır. Şekil 14'de 90° foa'lı 8 mm çapındaki kesici takım ile işlenmesi sonucunda meydana gelen delaminasyon hasarı görülmektedir. İncelenmiş olan delaminasyon tiplerinden tip I delaminasyonun X_d uzunluğun artmasıyla arttığını, tip II delaminasyonun ise azaldığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak takım geometrisinin dalgalanmadan daha az etkili olduğunu vurgulamışlardır (Hintze vd., 2015).

Ghafari-zadeh vd. (2015), CFRP kompozit malzemenin yukarı frezeleme (up-milling) işleminde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden farklı kesme koşullarını araştırmışlardır. Deneylerinde % 60 fho'na sahip 0°/45°/90°/135° foa'larındaki malzemeyi 10 mm çapında, CVD elmas kaplamalı, iki oluklu ve 30° helis açılı karbür parmak freze takımıyla (solid carbide ball end mill) işlemlerdir. İşleme esnasında sıcaklığı ölçmek için iki adet K tipi ısıölçer kullanmışlardır. Frezeleme deneylerini 200 ile 375 m/dak kesme hızlarında, 0,063 mm/dev ilerleme oranında ve 0,5 mm kesme genişliğinde soğutma sıvısı kullanmadan gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kuru frezeleme işleminin sıcaklığı yükseltmesiyle birlikte işlenmiş yüzeyde termal hasar meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Farklı foa'larında sıcaklığın kesme hızıyla birlikte lineer olarak arttığını belirtmişlerdir. Bu durumun takım/iş parçası temasından (sürtünmeden) kaynaklandığını bildirmişlerdir. Kesme sıcaklığının kesme hızı ile lineer bir şekilde arttığını, maksimum bileşke kesme kuvvetinin kesme hızından etkilendiğini, foa'nın kesme sıcaklığına ve

kuvveti üzerinde önemli etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Minimum ve maksimum yüzey pürüzlülüğü değerlerini 45° ve 135° fofa'larında belirlemişlerdir (Ghafari-zadeh vd., 2016).

Slamani vd. (2015), CFRP kompozit malzemeyi işlenebilirlik açısından değerlendirmiştir. Deneylerinde % 65 fho'na sahip, 24 katmanlı ve farklı boyutlardaki iş parçasını, 3/8 inç çapındaki 6 düz oluğa sahip CVD elmas kaplamalı karbür freze takımını kullanarak farklı işleme parametrelerinde işlemişlerdir. En yüksek, orta ve en düşük değerlerdeki işleme parametrelerini takım ömrü testlerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını takım aşınması kriterine (0,3 mm) ulaşana kadar tekrarlamışlardır. Üç farklı işleme koşullarında kesme kuvveti ve takım aşınmasının aynı davranışı gösterdiğini belirtmişlerdir. Kesme uzunluğunun artmasıyla takım aşınmalarının ve kesme kuvvetlerinin katlanarak arttığını belirlemişlerdir. Bu durum, aşınmış kesici takımla işlenen malzemenin yerinden koparılabilmesi için daha büyük kesme kuvvetlerine ihtiyacından kaynaklanmıştır. Ayrıca düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızında takım ömrünün daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Tam tersi durumun yani yüksek ilerleme oranı ve düşük kesme hızında takım ömrü süresinin azaldığını tespit etmişlerdir. 400 m/dak kesme hızında, 1,525 mm/dak ilerleme oranındaki işleme parametreleriyle 27 m sonra işlenmiş kesici takımın kesici yüzeylerinin hepsinde meydana gelen yanak aşınması kabul edilebilir limitte olduğunu belirtmişlerdir (Slamani vd., 2015).

CFRP kompozit malzemede delaminasyon üzerindeki işleme parametrelerinin (ilerleme oranı, kesme genişliği, iş mili hızı) etkilerini analiz etmek için Konneh vd. (2015), soğutma sıvısı kullanmadan 4 mm çapındaki iki oluklu TiAlN kaplamalı kesici takımını kullanarak işlemişlerdir. 50×50×3 mm boyutlarındaki iş parçasını frezelemişlerdir. Deneylerini üç seviyede (ilerleme oranı, kesme genişliği, iş mili hızı) uygulayarak etki eden faktörlerin belirlenmesi için de ANOVA analizinden yararlanmışlardır. Çalışmalarında yüksek kesme genişliğinde delaminasyonun azaldığını, düşük kesme genişliğinde ise tam tersi durumun meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, yüksek iş mili hızı ve düşük ilerleme oranı kombinasyonunda delaminasyon hasarının minimum seviyede olacağını belirtmişlerdir. Sonuçta iş mili hızının ve kesme genişliğinin delaminasyon üzerinde önemli olduğunu vurgulamalarına rağmen ilerleme oranının daha az etkilendiği sonucuna varmışlardır (Konneh vd., 2015).

Hosokawa vd. (2014), çevresel frezeleme işlemlerinde 0°/-45°/90°/45° fofalı CFRP kompozit malzemeyi kuru işlemişlerdir. Deneylerini 4 mm çapında, 2 ağızlı ve (30° ve 60°) farklı helis açılara sahip DLC kaplamalı karbür kesici takım kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında takım geometrisinin DLC kaplamadan daha iyi etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Takım aşınması önemli ölçüde fofadan etkilenmiştir. 60° helis açısına sahip kesici takımda daha az yanak aşınması gözlemlenmiştir. Büyük yanak aşınmasını 90°-45° fofalarında tespit etmişlerdir. Sonuçta, kullandıkları 60° helis açılı takım sayesinde CFRP kompozit malzemede pürüzsüz bir yüzey elde etmişler ve herhangi bir delaminasyona veya fiber hasarına rastlamamışlardır (Hosokawa vd., 2014).

Kusuyama vd. (2014), yüzey frezeleme (face milling) işlemlerini 0°-90° ve 45°-135° fofalı CFRP kompozit malzemeyi soğutma sıvısı kullanmadan işlemişlerdir. Kesici takım olarak gövde çapı 10 mm olan ve 12,45 mm çapında PCD kaplamalı özel yapım takımla incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda, delaminasyon hasarının fofa'na bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kesme hızı ve CFRP kompozit malzemesinin doğal yapısından dolayı kesme kuvvetlerinin etkilendiği gözlemlenmiştir. Artan kesme genişliğine ve kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün istenilen seviyede olduğunu ve havacılık parçaları içinde uygun olduğunu açıklamışlardır (Kusuyama vd., 2014).

Sorrentino ve Turchetta (2014), yüzey frezeleme çalışmalarında CFRP kompozit malzemenin yüzey kalitesi ve kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneylerini 40 mm çapındaki freze takımıyla (insert APMT1135PDERH1 UTi20T of MITSUBISHI), % 50 ffo'na sahip, 0°-90° fofalı ve 13 mm kalınlığında CFRP kompozit malzemesini soğutma sıvısı kullanmadan işlemişlerdir. İşleme parametreleri olarak üç farklı kesme hızı, dört farklı eksenel kesme derinliği ve iki farklı ilerleme oranlarını belirlemişlerdir. Deneylerde aynı kesme hızında yapılan uygulamada; kesme genişliği ve temas açısıyla (0°-90°) birlikte, teğetsel kesme kuvveti (F_T) bileşeninin ve radyal kesme kuvveti (F_R) bileşeninin arttığını gözlemlenmiştir. Kesme hızının artmasıyla birlikte kesme kuvvetinin azalma göstermesine rağmen, radyal kuvvetin bu durumdan etkilenmediği tespit etmişlerdir. Temas açısının artmasıyla F_z kuvvetinin hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yaptıkları deneyin yüzey analizlerinde ise 0,022 mm ilerleme oranında eksenel kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığını gözlemlenmiştir. Araştırmacıların yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda yüzey

pürüzlülüğü değerin kesme genişliği ve yüksek kesme hızıyla birlikte uygulanması gerektirdiğini bildirmişlerdir (Sorrentino ve Turchetta, 2014).

Ishida vd. (2014), helisel frezeleme işlemini CFRP kompozit malzemede takım aşınmasını, itme kuvvetini ve işleme hassasiyetini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmayı beş farklı kesme işlemine tabii tutmuşlardır. Bunlar sırasıyla, klasik helisel frezeleme, ultrasonik vibrasyon destekli helisel frezeleme, kriyojenik takım soğutularak helisel frezeleme, ultrasonik titreşim destekli ve kriyojenik takım soğutularak helisel frezeleme ve son olarak da kuru helisel frezeleme uygulamalarıdır. Deneyler için delik derinliği 3,5 mm olan küresel parmak freze (Carbide ball endmill) takımı ve kesme sıvısı olarak da çözünebilir kesme yağı, sıvı azot (soluble cutting oil, Liquid nitrogen) kullanmışlardır. Eksenel ultrasonik titreşimi kullanarak kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklı itme kuvvetini azaldığını tespit etmişlerdir. Böylece takım ömrünü uzatmayı amaçlamışlardır. Helisel frezeleme işleminde itme kuvvetini azaltarak yüzey kalitesini geliştirmeyi hedeflemişlerdir. CFRP kompozit malzeme işlenmesi sırasında, meydana gelen takım aşınmasının önemli ölçüde karbon fiberlerin sertliğinden kaynaklandığını belirterek takım aşınmasında beş farklı kesme işlemi sırasında takım aşınması meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Çalışmalarında, işlenen deliklerin sayısı arttırdıkça takım aşınması sürecine göre itme kuvvetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla ultrasonik vibrasyonun uygulayarak itme kuvvetini azaltmışlardır. Delaminasyondaki en yüksek değerin kuru işlemede olduğunu gözlemleyerek kriyojenik takım soğutma ile delaminasyonu azaltabilmişlerdir. Ultrasonik vibrasyonu ve takım soğutma metodunun birlikte kullanılmasıyla itme kuvvetinin azalması sayesinde delik hassasiyetini iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir. Sonuçta girişte delaminasyon meydana gelmesine rağmen kullanılan yöntemler sayesinde çıkıştaki delaminasyonun azaldığını belirtmişlerdir (Ishida vd., 2014).

Yüzey pürüzlülüğü üzerindeki işleme parametrelerinin etkisini araştırmak için Konneh vd. (2014), varyans analizi yöntemini (ANOVA) kullanarak araştırmışlardır. Araştırmacılar, çalışmalarını toplam on yedi denemede uygulayarak 50×50×3 mm ölçülerine sahip on katmanlı CFRP kompozit malzemeyi farklı ilerleme oranlarında ve kesme genişliğinde 4 mm çapında ve iki oluklu TiAlN kaplamalı karbür parmak freze takımını kullanarak işlemişlerdir. Varyans analiz yönteminde istenmeyen değerlerin bulunmasının yanında istedikleri değeri elde ederek işleme parametrelerinin (iş mili hızının, ilerleme oranının ve

kesme genişliğinin) ayrı ayrı etkileri gözlemlemişlerdir. Dönüş hızının ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki belirgin etkisinin görülmesine rağmen kesme genişliğinin neredeyse bağımlı değişken (response variable) üzerinde hiçbir etkiye sahip olmadığını tespit etmişlerdir. Düşük bir bitirme işlemi elde etmek için (attain low finish) yüksek dönüş hızının gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında, yüksek iş mili hızı ve ilerleme oranı arasındaki etkileşimde yüksek değerlerin oluştuğunu ve işleme sırasında kesme genişliğinin bu eğilimi yapmış olabileceğini düşünmüşlerdir. İşleme parametreleri yüzey pürüzlülüğü değerlerini tahmin etmek için matematiksel bir model kullanarak en az yüzey pürüzlülüğünü değerini elde edebilmek için yüksek iş mili hızının 3500 dev/sn, yüksek ilerleme oranının 15 mm/dak ve kesme genişliğinin 100 μ m olduğunu tespit etmişlerdir. İş mili hızının ve ilerleme oranının işleme parametrelerine etkisinde baskın bir faktör olduğunu gözlemlemelerine rağmen kesme genişliği etkisinin neredeyse yok denecek kadar az olduğunu bulmuşlardır (Konneh vd., 2014).

İş parçasındaki yüzey morfolojisi, kesme kuvveti ve takım geometrisi arasındaki ilişkileri bulmayı amaçlayan Chen vd. (2013), CFRP kompozit malzemeyi aşağıya yönlü (down milling) frezelemişlerdir. Deneylerinde 10 mm çaplarındaki; CVD elmas kaplamalı çift helis takımı ve çok kenarlı freze takımı kullanmışlardır. İş parçası olarak % 65 fho'na sahip, 48 katmanlı, $[(45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ)_6]_s$ foa'larında ve 200×150×9 mm boyutlarındaki malzemeyi işlemişlerdir. Her iki takım ile frezeleme sırasında F_y ve F_z kesme kuvvetlerinde benzerlik olduğunu gözlemlemişlerdir. Herhangi bir kesme ve ilerleme oranında, F_x kuvvetinin elde edilen ortalama kesme değeri çift helis takımına göre çok kenarlı takımda daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Yüzey morfolojisinin foa ile ilgili değişikliklerde 45° foa'da ciddi hasarlar tespit etmişlerdir. 0° foa'da daha az hasar tespit ederek fiber ayrılmasını (fiber pull out) 90° ve -45° foa'da gözlemlemişlerdir. Takım geometrisinin yüzey morfolojisinde önemli bir faktör olduğunu, çift helis takımıyla işlenmiş yüzeyin çok kenarlı takıma göre daha düzgün olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu çift helis takımın devamlı kesme kenarlarının iş parçası ve takımın yanak yüzeyi arasındaki ciddi sürtünmeden dolayı kaynaklanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmelerinde çift helis takımda istenilen değerlere ulaşmalarına rağmen havacılık uygulamaları için öngörülen $R_a = 3,2 \mu$ m çok kenarlı takımda daha yüksek bulmuşlardır. Böylece yüzey kalitesi gelişimi için ilerleme oranının azaltılması gerektiğini belirtmişlerdir. Sonuçta araştırmacılar kesme parametrelerinde yüzey morfolojisinin değişeceğini, çift helisli takımda daha iyi yüzey elde edildiği ve yüzey pürüzlülüğünün

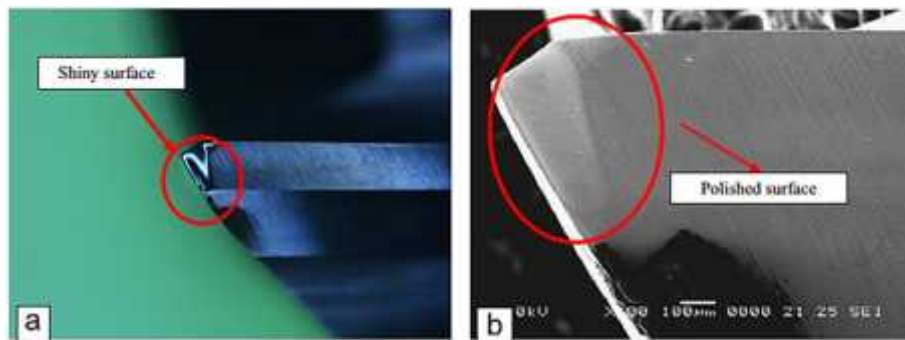
ilerleme oranıyla artacağını, kesme hızıyla da azalacağı sonuçlarına varmışlardır (Chen vd., 2013).

Karpat ve Polat (2013), çevresel frezeleme işlemleri için iki farklı çift helis (elmas kaplamalı karbür) takımlarını kullanarak CFRP kompozit malzemesini işlemişlerdir. Deneylerinde iki farklı tipteki foa'larına ve farklı tabaka kalınlığına sahip iş parçasını kullanmışlardır. İlerleme oranlarını 0,015-0,02 ve 0,025 mm/diş, kesme hızını 3500 dev/dak ve kesme genişliğini 3 mm seçerek uygulamışlardır. Her bir foa'ndaki freze kuvvet ölçümlerinde z-yönündeki F_z kuvvetinin çok küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durum parmak frezedeki helis açısının küçük olduğundan kaynaklanmıştır. Radyal kuvvetlerin teğetsel kuvvetlerden önemli ölçüde daha büyük olduğunu gözlemleyerek, bunun fiberler ve takım kenar radyüsü ile yanak yüzey arasındaki temastan kaynaklandığını bildirmişlerdir. Bu durum işleme kuvvetleri üzerindeki takım kenar yarıçapının önemini göstermektedir. Elmas kaplamalı takımın kaplama kalınlığının 10 μ m olduğunu belirterek takımı aşınmadan koruduğunu ancak kenar yarıçapını (edge radius) arttırdığını aynı zamanda işleme kuvvetlerini arttırdığını belirtmişlerdir. Freze kuvvetlerinde ve yüzey pürüzlülüğü değişimlerindeki 17 geçişten sonra (1 geçiş 900 mm) freze kuvvetlerinin şiddetinin ikiye katlandığını tespit ederek yüzey pürüzlülüğü değerinin ilk geçişten 17. geçişe kadar 2 μ m'den 12 μ m'ye arttığını gözlemlemişlerdir. Böylelikle karbon fiberlerin aşındırıcı yapısı nedeniyle, kenar yuvarlama ve kırılmanın elmas kaplamada freze kuvvetlerini etkilediği sonucuna varmışlardır (Karpat ve Polat, 2013).

Hagino ve Inoue (2013), farklı foa'larındaki CFRP kompozit malzemeyi kenar frezelemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı (0-30-45°) helis açısına sahip parmak freze takımlarını kullanmışlardır. 0° helis açısında herhangi bir tüy ya da kabarıklık (fluffing) belirtisine rastlamamışlardır. Bu durum takımın kesici kenarının dönme işleminde kesme kenarına dikey yönde olmasını istedikleri yüzey bitirme formunu elde etmelerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. 30° helis açılı takımda iş parçasındaki hataları gözlemlemişlerdir. 45° helis açılı takımla gerçekleştirilen işlemlerde hatalar daha belirgin bir şekilde tespit etmişlerdir. Böylece meydana gelen kusurların foa'na bağlı olduğunu belirtmişlerdir. 90° foa'nda en az pürüzlülük değerini elde etmişlerdir. En kötü yüzey pürüzlülüğü değerini $\pm 45^\circ$ foa'nda tespit etmişlerdir. Helis açısının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı sonucuna varmışlardır. Takımlarda yanak aşınmasının çok küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. Tüm takımların yanak yüzeylerinde çizikler

bulmuşlardır. Helis açısının artmasıyla yanak aşınmasının azaldığını tespit etmişlerdir. İlerleme (F_x) ve itme (F_y) kuvvetlerinin foa'larından önemli ölçüde etkilendiklerini belirtmişlerdir. 0° helis açısına sahip takımın en düşük kesme kuvvetine sahip olduğunu ve CFRP kompozit malzemesi işlenmesinde etkili bir takım olduğunu belirterek bütün takımlarda yanak aşınmasının küçük olduğunu sonucuna varmışlardır (Hagino ve Inoue, 2013).

CFRP kompozit malzemeyi oda sıcaklığında soğutulmuş hava (chilled air) uygulayarak inceleyen Khairusshima vd. (2013), kesme parametrelerini, malzeme yüzey etkilerini ve kaplamasız karbür kesici takımın performanslarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada $205 \times 300 \times 3$ mm boyutlarında 0° - 45° foa'lı malzemeyi 8 mm çapında iki oluklu kaplamasız karbür kesici takımı ile işlemişlerdir. Farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında 15 deneysel çalışmada, -10°C sıcaklığında 4,10 m/s akış hızındaki vorteks tüpü uygulamasında gerçekleştirmişlerdir. Takım aşınmasının işleme sırasında önemli bir kriter olduğunu belirterek hem oda sıcaklığında hem de soğuk hava ile uygulamasında aşınmanın arttığını gözlemlemişlerdir. Sabit ilerleme oranıyla oda sıcaklığında ve soğuk hava ile yapılan işlemede fark görmemelerine rağmen oda sıcaklığında yapılan işlemede takım aşınmasının yüksek kesme hızından dolayı önemli olduğunu tespit etmişlerdir. Sabit kesme hızında yapılan uygulamada ise düşük ilerleme oranında bir fark olmadığını, ilerleme oranının artmasıyla takım aşınmasının arttığını tespit etmişlerdir. Böylelikle CFRP kompozit malzemesinin işlenmesi esnasında kesme sıcaklığının soğuk hava uygulamasıyla azaltılabileceğini ve takımın ömrünü uzatabileceğini açıklamışlardır.

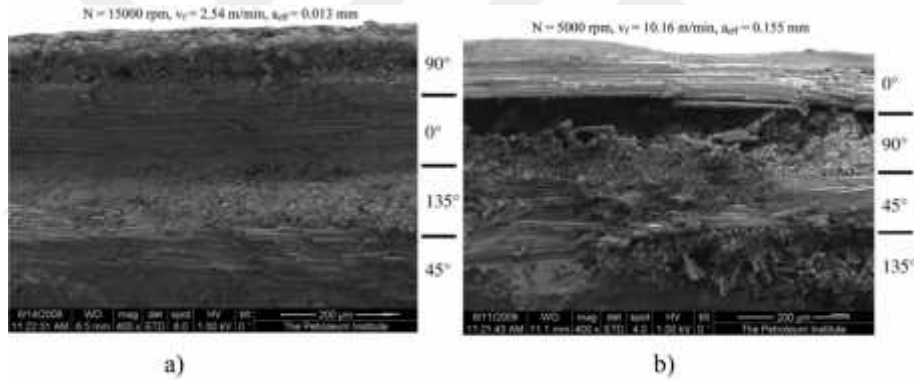


Şekil 15: Kesici takım aşınmasının (kesme hızı 179 m/dak, ilerleme oranı 0,05 mm/diş); a) Mikroskoptaki ve b) SEM'deki görünümü (Khairusshima vd., 2013).

Soğuk hava uygulanmış takımın karbon fiberin aşındırıcı yapısından kaynaklı aşınmış alanında pürüzsüz ve parlak görünüme sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 15). Soğuk

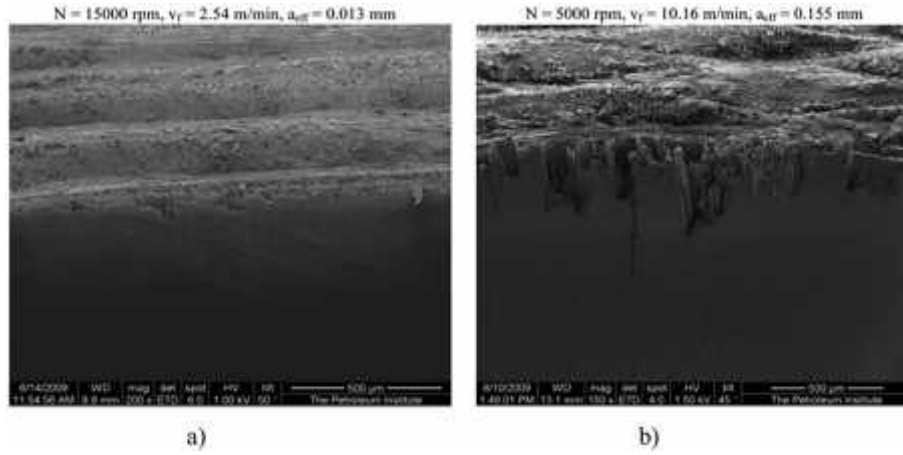
hava uygulanmış takımın kullanılmasıyla sıcaklık oluşumunu azalttığını takımın keskin kesici kenarının işlenen malzemeyi uzun zamanda ve mesafede kesmesine yardımcı olduğunu gözlemlemişlerdir. Her iki koşulda da yüzey pürüzlülüğünde ve delaminasyon hasarında CFRP kompozit malzemesinin soğuk hava ile uygulamasında daha iyi olduğunu belirtmişlerdir (Khairusshima vd., 2013).

CFRP kompozit malzemenin yukarı frezelenmesinde Sheikh-Ahmad vd. (2012), delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü etkilerini araştırmışlardır. Deneylerinde 610 mm uzunluğunda ve 2,5 mm genişliğindeki CFRP kompoziti kullanmışlardır. 6,3 mm çapında piramit görünümlü kesici takımı, 1,6 mm kesme genişliğinde farklı iş mili ve ilerleme oranlarında işlemişlerdir. Çalışmalarında Colligan'ın tanımladığı dört tip delaminasyonu tipini örnek almışlardır. İşleme kalitesinin ilerleme oranına ve kesme hızına bağlı olduğunu savunarak deneylerini iki aşırı koşullarda uygulamışlardır (Şekil 16).



Şekil 16: Aşırı kesme koşullarında işlenmiş yüzeylerin görünümü (Sheikh-Ahmad vd., 2012).

Şekil 16'da işlenmiş yüzeylerin sadece kesme koşullarına bağlı olmadıklarını aynı zamanda f_{oa}'na da bağlı olduklarını belirterek yüzey pürüzlülüğünün yüksek iş mili hızında ve düşük ilerleme oranında daha iyi olduğu gözlemlemişlerdir.



Şekil 17: Aşırı kesme koşullarındaki delaminasyon gösterimi (Sheikh-Ahmad vd., 2012).

Delaminasyonun iş parçası yüzey katlarında daha belirgin olduğunu tespit etmişlerdir. Çünkü bu katlar herhangi bir tabaka tarafından desteklenmemektedir. Şekil 17’de aşırı koşullarda uygulanan işlenmiş kenarın delaminasyonu görülmektedir. Küçük talaş kalınlığının (chip thickness) etkisi ile yapılan işlemde delaminasyon görülmemesine rağmen büyük talaş kalınlığı ile uygulanan kesimde malzeme yüzeyinde yoğun delaminasyon olduğu Şekil 17b’de görülmektedir. Araştırmacılar endüstride kabul edilir delaminasyon derinliğinin 1,5 mm olduğunu, sonrasının reddedildiğini belirtmişlerdir. İlerleme oranının delaminasyon derinliğinde en yüksek etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Böylece yüzey pürüzlüğü ve delaminasyon bakımından en iyi işlenmiş yüzey kalitesinin düşük ilerleme oranında, yüksek kesme hızında olduğu sonucuna varmışlardır (Sheikh-Ahmad vd., 2012).

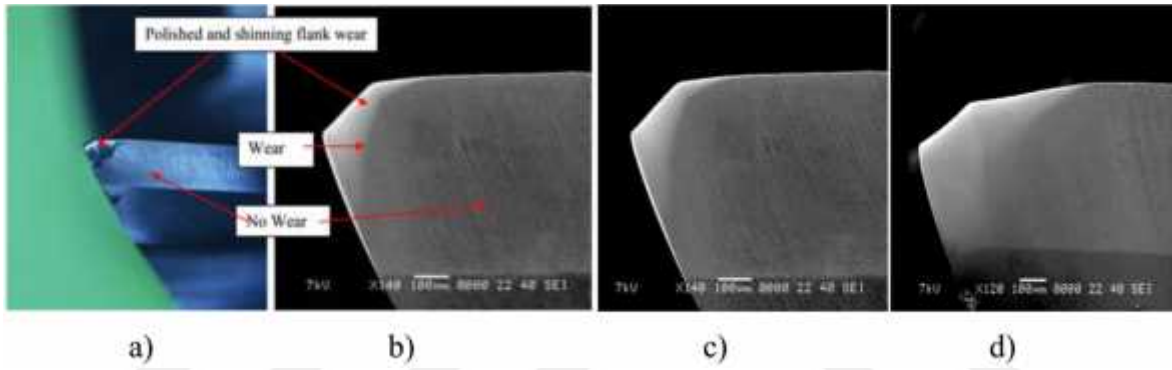
CFRP kompozit malzemenin helisel frezeleme işleminde kesme kuvvetleri etkisini değerlendirmek amacıyla Haiyan vd. (2012), takım aşınmasının kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Delik kalitesi ve kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneylerinde % 65 fho’na sahip, 250×120×100 mm ölçülerindeki iş parçasını kullanmışlardır. İşleme parametrelerini farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında toplam dört seviyede belirlemişlerdir. Çalışmalarında 10 mm olan delik çapı açmak için 6 mm çapında, 55 mm uzunluğunda, dört oluklu ve TiAlN kaplamalı özel takımlarla kuru işlemişlerdir. Diş başına düşen ilerleme oranının kesme kuvvetleri üzerine etkisinde; iş mili hızını 4000 dev/dak, eksenel ilerleme oranını 0,1 mm ve diş başına ilerleme oranını 0,3’den 0,06 mm değiştirmeleriyle, kesme kuvvetlerinin lineere yakın bir biçimde arttığını tespit etmişlerdir. İlerleme oranının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını

gözlemlemiştir. Eksenel ilerleme oranının artmasıyla eksenel ve teğetsel kesme kuvvetlerinin arttığını gözlemlemiştir. Delik sayısının artmasıyla takım aşınmasının daha kötüye gittiğini tespit etmiştir. Aşınmanın tüm kesici kenar boyunca sadece abrasiv aşınma ile düzgün ve eşit olarak dağıldığını tespit etmiştir. Foa'nın yüzey kalitesine önemli bir etkisinin olduğunu belirtmiştir. Delaminasyon faktörünün teğetsel kesme kuvvetinin artmasıyla artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Eksenel kesme kuvvetinin artmasıyla delaminasyon faktörünün sabit kaldığını belirtmiştir (Haiyan vd., 2012).

CFRP kompozit malzemenin işlenmesi için tasarlanmış iki standart dışı özellikleri olan takımların etkilerini inceleyen Chatelain ve Zaghbani (2012), çalışmalarını çapraz kesim (cross-cut) takımlarından pozitif negatif helis açılı (positive negative helix angle) ve oluklu dişlere (grooved-teeth) sahip olanları karbür standart takım (carbide standard cutter) ile karşılaştırmışlardır. İşleme testlerini havacılıkta kullanılan % 64 fho'na sahip kare biçimindeki (square-shaped) CFRP kompozit malzemeyi kuru işlemişlerdir. Deneylerde her bir takım geometrisinin kesme kuvvetlerindeki büyüklüklerinde dalgalanma gözlemlemiştir. Talaş kalınlığının sinüs eğrisi şeklinde değişiminden kaynaklandığını belirterek, 3 takım geometrisinin X ilerleme yönündeki kesme kuvvetlerinde yüksek büyüklük kaydettiğini gözlemlemiştir. Kesme bölgesindeki kesici dişlerin yüksek temas yüzeyinin azalmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Oluklu geometride Y yönünde yüksek büyüklükler kaydetmişlerdir. Bunun da kesici takım ile işlenmiş yüzey arasındaki aşınmanın artmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çapraz geometri takımı dalgalanmanın giderilmesi için katkıda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek dalgalanmaları standart takımlarla bulmuşlardır. Kesme kuvvetlerinin kesici performanslarında iyi bir gösterge sağladığını, çapraz kesim geometrisinin standart ve oluklu geometrilere göre istikrarsızlığa (instability) daha duyarlı olduğunu belirtmişlerdir. Özel olukların eksenel kuvveti azalttığını ve ilerleme ile kesme kuvvetlerinin önemli bir şekilde dalgalanmayı düşürdüğünü bildirmişlerdir (Chatelain ve Zaghbani, 2012).

CFRP kompozit malzemede karbür takımın performansını, yüzey pürüzlülüğünü, delaminasyon etkilerini araştırmayı amaçlayan Khairusshima vd. (2012), 0° - 45° foa'larındaki, $300 \times 250 \times 3$ mm boyutlarındaki malzemeyi işlemişlerdir. 8 mm çapında, 2 oluklu, 30° helis açılı ve 60 mm uzunluğundaki kaplamasız karbür parmak freze (solid uncoated carbide end mill) takımını frezeleme işlemlerinde kullanmışlardır. Kesme

genişliği (0,05 mm), farklı kesme hızları (160, 180, 200, 220 ve 240 m/dak) ve ilerleme oranları (0,0125 ve 0,025 mm/diş) seçerek işleme parametrelerini belirlemişlerdir. Her iki ilerleme oranlarında kesme hızının artmasıyla takım aşınmasının arttığını gözlemlemişlerdir. Özellikle, kesme hızının 200 m/dak ve 220 m/dak için ilerleme oranın ise sırasıyla 0,0125 mm/diş ve 0,025 mm/diş olduğunda aşınmanın hızlı bir şekilde yaklaşık 500 mm mesafede arttığını tespit etmişlerdir. Bu noktada takım aşınmasının kritik bir noktaya eriştiğini ve kesme hızının daha önemli olduğunu vurgulamışlardır. Aşınmanın düşük ilerleme oranıyla ve yüksek ilerleme oranıyla karşılaştırıldığında düşük ilerlemede daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Kesme hızının artmasıyla aşınmanın belirgin hale geldiğini tespit etmişlerdir.



Şekil 18: Yanak aşınması; a) ve b) 0,025 m/diş ve 160 m/dak'daki aşınma, ilerleme oranı 0,025 m/diş c) 160 m/dak, d) 200 m/dak (Khairusshima vd., 2012).

İlerleme oranının 0,025 m/diş ve kesme hızının 160 m/dak olduğu durumda yanak aşınmasının 0,3 mm ulaşmış olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 18a ve Şekil 18b). Bu durumun kenar kesme yüzeyinin aşırı aşınmasından ve karbon ile kesici takımın temasından kaynaklanmıştır. Kesme hızının 160'dan 200 m/dak'ya artmasıyla, yanak aşınmasının arttığını tespit etmişlerdir (Şekil 18c ve Şekil 18d). Buna fiberin kırılkan özelliğinin ve matris malzemesi sertliği neden olmuştur. Daha yüksek kesme hızı kompozit fiberin yüksek deformasyon oranına yol açmakta ve sonradan aşırı takım aşınmasına sebep olmaktadır. Düşük ilerleme oranında daha iyi takım ömrü elde etmişlerdir. Düşük ilerleme oranında yüzey pürüzlülüğü daha iyi ölçmüşlerdir. Delaminasyon faktörünün kesme hızı ve ilerleme oranının artmasıyla yükseldiğini belirtmişlerdir. Bu duruma işleme sırasındaki yüksek kesme kuvvetlerinin neden olmuştur (Khairusshima vd., 2012).

Karpat vd. (2012) ilk çalışmalarında, % 59 fho'na sahip 30 tabakadan oluşan 10 mm kalınlığında farklı foa'da CFRP kompozit malzemeyi ıslak işlemişlerdir. 0° helisli 2 dişli PCD takımla birlikte 0° talaş açılı 10 mm çapında 20° boşluk açılı PCD takımlarını kullanarak kanal frezeleme (slot milling) işlemini sabit kesme hızında uygulamışlardır. Dikey (F_z) yöndeki kuvvetler tüm frezeleme işleminde oldukça küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. Dikey kuvvetlerin küçük tutulmasının delaminasyon sorunundan dolayı önemli bir husus olduğunu belirtmişlerdir. Takımın dönme açısına göre teğetsel ve radyal yönlerde freze kuvvetlerinde; radyal yöndeki kuvvet ölçümlerinin (F_r) teğetsel kuvvet ölçümlerinden (F_t) daha yüksek tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları ikinci çalışmalarında ise 9,575 mm çapında, kesici kenar uzunluğu 19,05 mm ve 3 dişe sahip farklı helis açılı (0°, +5° ve 5°) olan PCD kesici takımı kullanarak kenar frezelemişlerdir. 0°-45°-90°-135° foa'daki CFRP kompozit malzemesin kullanmışlardır. Bu freze takım geometrisini tabaka üzerinde freze kuvvetlerinin yönünü değiştirerek işleme sırasında delaminasyonu azaltmak için tasarladıklarını belirtmelerine rağmen yüzey frezeleme için uygun olmadığını belirtmişlerdir. Yapmış oldukları (pocket milling test) frezeleme testlerini yeni takımla gerçekleştirmişler ve frezeleme işleminden sonra takım kesici kenarında herhangi bir aşınmaya rastlamışlardır. CFRP kompozit malzeme işlenmesi sırasında takım aşınmasının önemli bir husus olduğunu belirterek takım aşınmasıyla birlikte kesme kuvvetlerinin de arttığını tespit etmişlerdir (Karpat vd., 2012).

Kalla vd. (2010), CFRP kompozit malzemenin helisel frezeleme işlenmesinde oluşan kesme kuvvetlerini yapay sınır ağları (artificial neural networks) ANN modelini kullanarak araştırmışlardır. Helisel frezeleme işlemi için 2000 devir, ilerleme oranı için 0,406 m/dak ve kesme genişliği için de 0,5 mm olan kesme parametrelerini seçerek Şekil 19'da görülen 9,5 mm çapında 2 ağızlı, 30° helis açısı ve 16° talaş açısına sahip karbür helisel parmak freze takımını kullanmışlardır.



Şekil 19: Karbür helisel freze takımı görünümü (Kalla vd., 2010).

Deneylerini, % 60 fho'na sahip, 0°-60° foa'lı ve 60°-0°-120° foa'lı CFRP kompozit malzemeler kullanarak kuru olarak işlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada 0° foa'lı CFRP kompozit malzemede, 0°-60° ve 180°-240° dalma açıları aralığı kullanıldığında kesme kuvvetlerinde artış olduğu ve aynı şartlarda 60° foa'lı CFRP kompozit malzemede ise kesme kuvvetlerinin 0° foa'lı malzemeye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 60°-0°-120° foa'lı malzemede ise 0°-120° ve 180°-270° dalma açıları aralığında kesme kuvvetlerinde artış olduğu, ancak yaklaşık olarak 93° ve 220° dalma açılarında kesme kuvvetlerinde düşüş olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca deneyler sonucunda elde ettikleri veriler ile ANN modeli değerlerinin hemen hemen aynı olduğunu da çalışmalarında bildirmişlerdir (Kalla vd., 2010).

Çok dişli freze takımlarını optimize etmek için Lacalle vd. (2009), kanal açma (slotting) işlemlerini uygulayarak, farklı kalınlıklardaki farklı kompozit malzemeyi (carbon fibers=kompozit 1, carbon+kevlar fibers=kompozit 2) işlemişlerdir. Deneylerini beş kategoride farklı kesici takımlarla (helisel parmak freze, nanoyapılı TiAlN-CSi kaplamalı ve PCD) gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sırasıyla;

T0: Elmas kaplamalı helisel parmak freze takımını kullanarak farklı fiber kompozitlerini karşılaştırmak için spesifik kesme kuvvetlerini tanımlamak,

T1: Nanoyapılı TiAlN-CSi kaplamalı çok dişli geometrisi olan takımla birlikte takım altlığı için en uygun karbür derecesini tanımlamak,

T2: T1 testinin sonucuna göre en iyi kaplamaları tanımlamak,

T3: Farklı sayıdaki sağ ve sol oluklara sahip piramit şeklinde kenar geometrisi olan takımı tanımlamak.

İlk dört çalışmalarını endüstri uygulamalarında tercih edilen silindirik takım tutucu ile uygulamışlardır.

T4: CFRP kompozit malzemesini PCD kesici takımları için en iyi verimlilik kesme koşullarını tanımlamışlardır.

Kesme kuvveti sonuçlarına göre, kompozit 2 malzemesinde yüksek kesme kuvveti gerektiğini bunu da malzemenin yüksek dayanımından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Helisel parmak freze takımının (T0 deneyi) performansının yeterince iyi olduğunu fakat Z eksenindeki kuvvetin esnek kısımlardan dolayı iyi olmadığını gözlemlenmiştir. Yüksek kesme kuvvetlerinde takım aşınmasının sebep olmadığını belirterek kesici kenarlar tarafından yüksek aşınmaya maruz kaldığını tespit etmişlerdir. NaCO takımının ilgi çekici bir özelliği olmadığını yani iyi bir performans göstermediğini tespit etmişlerdir. Çünkü çok

daha uzun takım ömrü elde edilmediğini yaptıkları çalışmada tespit ederek takımın tüm dişlerinde küçük kırılmalar tespit etmişlerdir. Bu nedenle tek katlı (monolayer) AlTiN veya AlCrN kaplamaların daha iyi bir seçenek olduğunu belirtmişlerdir. Kaplama testleri için (T2 deneyi), AlTiN veya AlCrN kaplamalarını 8 mm çapında takımlar ile gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu testin sonuçlarını gözlemleyerek işleme durumundaki kuvvetin ilerlemeye bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Yukarı işleme operasyonunun aşağıya işleme operasyonundan daha iyi bir bitirme işlemi olduğunu gözlemleyerek bazı delaminasyonlar tespit etmişler. PCD kesici takımların istenilen yüksek verimlilik derecesini elde etmediğini tespit etmişlerdir. Bu durumun farklı CFRP kompozit malzemesinden kaynaklandığını vurgulamışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları toplam beş deney sonucunda, TiAlN kaplamalı çok dişli takımın en iyi takım ömrü olduğunu, nanoyapılı (TiAlN+SiC) kaplamalı takımdan istenilen sonuçları elde edemediklerini vurgulamışlardır. Bu durumun karbür altığının yapışma eksiliğinden kaynaklanmış olabileceğini düşünmüşlerdir. Piramit kenarlı kesici takımın veya çok dişli takımların Z yönündeki kuvvetlerinin etkisinin az olduğunu tespit ederek uzun (slender) iş parçalarını bükerek (bending) kesme kuvvetinin etkisini engellediğini tespit etmişlerdir. Karbon+kevlar takviyeli kompozit malzemesinin diğer malzemeye göre daha zor işlendiğini, PCD takımların yeterli koşullara (ekonomik açıdan) ulaşamadığını tespit etmişlerdir. Ancak çok dişli freze takımının CFRP kompozit malzemesi için uygun olduğunu ve tavsiye edilebileceğini önermişlerdir (Lacalle vd., 2009).

Davim ve Reis (2005), CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde, kesme parametreleri (kesme hızı- V ve ilerleme oranı- f), yüzey pürüzlülüğü (R_a), delaminasyon faktörü (F_d) ve uluslararası boyutsal hassaslık (IT) etkilerini araştırmışlardır. Bu faktörlerin belirlenmesi için ANOVA analizini kullanmışlardır. Deneylerinde 4 mm kalınlığındaki % 55 fho'na sahip 0°-90° fof'daki CFRP kompozit malzemeyi, 6 mm çaplarındaki 2-6 oluklu sementit karbür (K10) parmak freze takımlarını kullanarak, 2 mm kesme genişliğinde işlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün ilerleme oranı ile farklı kesme hızları değerlendirildiğinde; ilerleme oranının artmasıyla ve kesme hızlarının azalmasıyla pürüzlülüğün arttığını gözlemlemişlerdir. Daha yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme oranı ile daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmenin mümkün olacağını belirtmişlerdir. 2 oluklu parmak freze takımının 6 oluklu parmak freze takımından daha iyi yüzey elde ettiğini vurgulamışlardır. CFRP kompozit malzemenin sementit karbür parmak freze takımlarıyla frezeleme işleminde; her iki parmak freze takımı için kesme parametrelerinin bir

fonksiyonu olarak yüzey kalitesi 1 ile 3 μm arasında elde etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün ve uluslararası boyutsal hassaslığın ilerleme oranının artmasıyla ve kesme hızının azalmasıyla artığını, delaminasyon faktörünün ilerleme oranının artmasıyla artığını belirlemişlerdir. Ancak 6 oluklu freze takımında kesme hızının artmasıyla delaminasyon faktörünün arttığını, 2 oluklu takımla yapılan uygulamada CFRP kompozit malzemenin daha az hasar aldığı sonuçlarına varmışlardır (Davim ve Reis, 2005).

Hocheng vd. (1993), CFRP kompozit malzemenin işlenebilirliği ile ilgili deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerinde, 0° - 90° - 45° foa'ları ile % 60 fho'na sahip, $250 \times 50 \times 4$ mm boyutlarındaki iş parçasını 20 mm çapında tek kare karbür kesici takımla (OSG-Walter F2037) kuru olarak işlemişlerdir. Deneylerini 500, 1500 ve 300 dev/dak iş mili hızlarında, 31,4-94,2 ve 188,4 m/dak kesme hızlarında ve 1 mm sabit kesme genişliği uygulamışlardır. Kayma yükünün uygulandığı 90° foa'ında, daha büyük kesme kuvvetlerine neden olduğundan dolayı daha düşük yüzey kalitesi meydana geldiğini belirtmişlerdir. 90° foa'ında takım aşınması 0° foa'ına göre daha az meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Artan ilerleme oranı ve kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve ilerleme oranlarına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Böylece 188,4 m/dak kesme hızı, 0,017 mm/diş ve 1 mm kesme genişliğinde 0° foa'ında takım ömrü 16 dakika iken 90° foa'ında 19 dakika olduğunu belirtmişlerdir. Sonuçta fiber eksenine paralel kesme yönü frezelemesini tavsiye etmişlerdir (Hocheng vd., 1993).

3.2 CFRP Kompozit Malzemelerin İşlenmesi ile İlgili Yapılan Çalışmalar

CFRP kompozit malzemenin kesme kuvveti model davranışını incelemeyi amaçlayan Maegawa vd. (2016), aşağı frezeleme (down milling) işlemini tungsten karbür (WC-Co) K10 ve PCD takımları kullanarak işlemişlerdir. Kesme hızı 30 m/dak, ilerleme oranı 0,05 mm/dev ve kesme genişliği 2,0 mm olarak belirlemişlerdir. Deneyleri 0° - 90° foa'daki iş parçasının iki deformasyon bölgesinde (chipping-pressing) incelemişlerdir. Kesme kuvvetleri değişiminde, ana kuvveti (principal force) F_p ve itme kuvveti (thrust force) F_T tek pasoda ve 0° foa'ında frezelenmesi esnasında F_T kuvveti F_p kuvvetinden daha büyük olarak ölçmüşlerdir. Bu durumu takım aşınmasından dolayı oluşan kesici kenarın körleşmesinden kaynaklandığını bildirmişler. Kesme yönüne dik olan 90° foa'ında ise F_T

ve F_p kuvvetlerinde kesme mesafesinin artmasına rağmen herhangi bir değişim oluşmadığını ve kesme testlerinden sonra kesici takımın körlendiğini tespit etmişlerdir. PCD takımın WC-Co takımdan daha uzun takım ömrü olduğunu ve takım aşınması bakımından daha üstün olduğunu tespit edilmiştir. WC-Co takımın sürtünme katsayısıyla ($\mu=0,3$), PCD takımın katsayısının ($\mu=0,26$) yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Tüm kesme koşullarındaki kesici takımların kenar (edge) profillerinde büyük yuvarlaklık gözlemlenmiştir. Böylece P kuvveti etkisinin azaltılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, işlenebilirliğin ve takım aşınması süreçlerinin foa'lara bağlı olduğunu sonucuna varmışlardır (Maegawa vd., 2016).

Jia vd. (2016), CFRP kompozit malzemesini yukarı yönlü (zıt) frezelemişlerdir. Çalışmalarında kriyojenik nitrojen gazını ve soğutma sıvısı olmadan işlemişlerdir. Deneylerinde % 65 fho olan, $[0/0/0/(135/0/45/90)_2]_S$ foa'da, $30 \times 20 \times 3$ mm ölçülerindeki iş parçasını, 10° talaş açılı 20° boşluk açılı PCD takımla uygulamışlardır. Kesme hızı 314 m/dak, ilerleme oranı 50 mm/dak ve kesme genişliği 0,3 mm belirlemişlerdir. CFRP kompozit malzemenin ısı iletkenliğinin metal malzemeden daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Kuru işleme işleminde maksimum sıcaklığa ulaşmışlardır. Sıcaklıklar ile kesme kuvveti değişiminin doğrusal olmadığını tespit etmişlerdir. CFRP kompozit malzemenin mekanik özellikleri değişimi -25°C altında işlenen frezelemenin bileşke kuvvetinin çok fazla artmasına yol açtığını belirtmişlerdir. -25°C kesme alanı sıcaklığı altında soğutma uygulanmasıyla R_a 'nın $1,6 \mu\text{m}$ olduğunu tespit etmişlerdir. Kriyojenik sıcaklık altında yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığını tespit ederek kaliteli yüzey elde etmişlerdir. Farklı mesafelerde kriyojenik nitrojen gaz püskürtmenin CFRP kompozit malzemelerin parmak freze işleminde kesim alan sıcaklığını kontrol etmek için etkili bir yol olduğunu belirtmişlerdir. CFRP kompozit malzeme frezeleme analizlerinde -10°C ile 25°C arasında kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğün nispeten küçük kaldığını belirtmişlerdir. İyi yüzey bütünlüğü ve çok az alt yüzey hasarı elde etmişlerdir (Jia vd., 2016).

Zenia vd. (2015), kesme kuvveti ve yüzey altı hasar üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Dikey kesme işlemlerinde DoE'de (Design of Experiments) birbirinden bağımsız (fiber oryantasyon, takım talaş açısı, takım kenar radyüsü ve kesme genişliği) dört parametreleri seçerek uygulamışlardır. CFRP kompozit tabakasını, 60 m/dak kesme hızında belirlemişlerdir. Takımı katı cisim (rigid body) olarak modelleyerek, fiber yönünde plastik

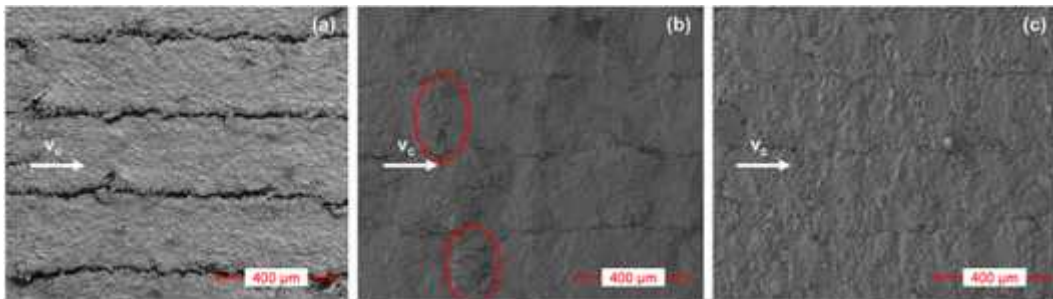
akış olmadığını ve fiberin davranışını gerilim veya sıkıştırma altında elastik kırılğan olduğunu varsaymışlardır. Foa'nın kesme kuvveti üzerine önemli bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Minimum kesme kuvveti değerini 0° ve 45° foa'da gözlemlerken maksimum değerini 90° foa'da arttığını gözlemlemişlerdir. Farklı foa'larında yapmış oldukları FE modellemenin deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir. CFRP kompozit malzemesinin talaş oluşum işleminin metallere farklı olduğunu belirterek bu durumun tamamen kompozit malzemenin heterojen ve anizotropi özelliklerinden kaynaklandığını açıklamışlardır. Kesme kuvveti ve hasar oluşumunda CFRP kompozit malzemesinde dikey (orthogonal) kesme işleminde yüksek oranda foa'na bağlı olduğu sonucunu varmışlardır (Zenia vd., 2015).

Wang vd. (2015), $\pm 45^\circ$ foa'lı, 8 tabakadan oluşan 3 mm kalınlığındaki CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve işleme parametreleri arasındaki ilişkiyi RSM yöntemini kullanarak modellemişlerdir. Deneylerini 6 mm çapında, özel tasarlanmış PCD takımlarla soğutma sıvısı kullanmadan uygulamışlardır. Deneylerde ilerleme oranındaki artışla beraber yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. İş mili hızının artmasıyla yüzey kalitesinin kötüleştiğini belirtmişlerdir. Sonuçta, ilerleme oranı kompozitlerin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerini etkileyen baskın bir faktör olduğunu açıklamışlardır. ANOVA kullanarak, elde ettikleri matematiksel modelin yeterli olduğu savunmuşlardır (Wang vd., 2015).

Çelik vd. (2015), CFRP kompozit malzemenin delme işleminde, mikroyapı özellikleri değişen SiAlON seramik takımların aşınma davranışını incelemişlerdir. WC-Co takımla karşılaştırmışlardır. Deneylerini % 59 fho, 0°/90°/45°/-45° foa'ları ve 10 mm kalınlığındaki CFRP kompozit malzemeyi işlemişlerdir. İşlemlerini 6,4 mm çapındaki takım ile 0,05 mm/dev ilerleme oranında kuru olarak işlemişlerdir. Çalışmalarında 15 delme işleminden sonra, takımların kesme kenarlarının körlendiği tespit etmişlerdir. Karbon fiberler tarafından sert aşınmaya maruz kalmış ve kesme kenarları keskinliğini kaybetmiştir. Bu durum iş parçası ile takım arasındaki sürtünmeyi arttırmış ve kesme kenarındaki sıcaklığı yükseltmiştir. 15 ile 35 delme arasında karbon fiberlere uygulanan aşınmanın etkisinin azalmıştır. Daha fazla delme işlemlerinde çiziklerin önemli biçimde elimine edilmesi parlak bir yüzeyin meydana gelmesine neden olmuştur. SiAlON delme takımlarındaki aşınma WC-Co takımından 2 veya 3 kat daha fazla tespit edilmiştir. Çünkü SiAlON takımların benzer sertlikte olmalarına rağmen WC-Co önemli ölçüde daha az aşınma

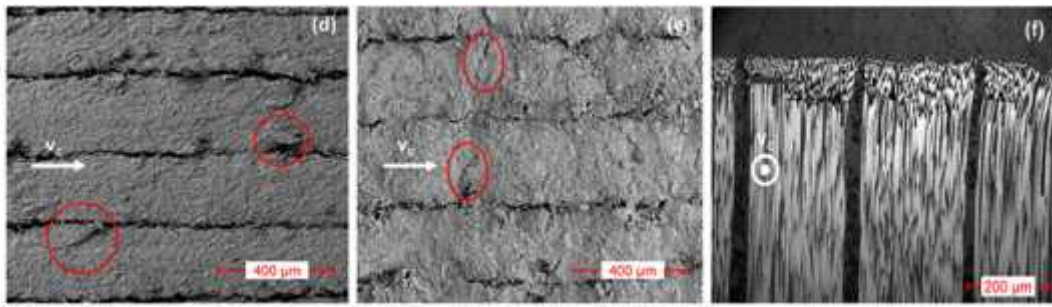
davranışı göstermektedir. Bu durum WC parçacıklarının ince taneleri ve Co fazının nispeten düşük miktarlarda olması nedeniyle WC-Co takımın iyi bir sertlik ve kırılma tokluğu kombinasyonuna sahip olmasından kaynaklanmaktadır. WC-Co aşınma direnci SiAlON delme takımlarından daha yüksek ölçülmüştür. Araştırmacılar, karbon fiberler ve kesici takımlar arasındaki etkileşim farklılıklarında WC-Co takımın SiAlON takımlarından daha iyi bir aşınma direnci olduğunu tespit etmişlerdir. 5. delme işleminden sonra SiAlON takımlarda delaminasyon faktörünün artmış ve kesme kenarı keskinliğini kaybetmiştir. Yüksek aşınma direncine sahip olmasından dolayı WC-Co takımında delaminasyon oranı düşmüştür (Çelik vd., 2015).

CFRP kompozit malzemesi tornalanmasında kullanılan takım geometrileri etkilerini inceleyen Henerichs vd. (2015), kuvvetler sürecini (process-forces), takım aşınmasını (abrasive tool-wear), iş parçası hasarlarını (workpiece damages) ve delaminasyon mekanizmalarını farklı takım geometrilerine ve foa bağlı kalarak araştırmışlardır. Deneylerde % 59 fho'na sahip, farklı foa'daki yarı boru (half pipe) biçimindeki 1 m uzunluğunda, 5 mm genişliğinde ve toplam 200 mm çapında olan CFRP boru malzemesini 55 mm genişliğinde ve 120° parçalara su jeti (water jet cutting) ile keserek kullanmışlardır. Kesme testlerini 20 ile 500 m/dak kesme hızlarında kesintisiz (non-interrupted cut) bir şekilde işlemişlerdir. Kuvvet sürecin tanımlarını X eksenli olan pasif kuvveti (passive force), Y eksenli olan ilerleme kuvveti (feed force) ve Z eksenli olan kesme kuvveti (cutting force) olarak tanımlamalarına rağmen, deneylerde dik kesme işleminden dolayı pasif kuvvetini kullanmamışlardır. Deneylerinde 150° foa'ında en düşük ilerleme kuvvetini gözlemişlerdir. Çünkü ilerleme kuvvetlerinin daha çok talaş açısı (rake angle) tarafından etkilendiğini tespit etmişlerdir. Takım analizlerinde 30° ve 60° foa'larında takımlarda yanak yüzeyi aşınması (flank face wear) tespit etmişlerdir.



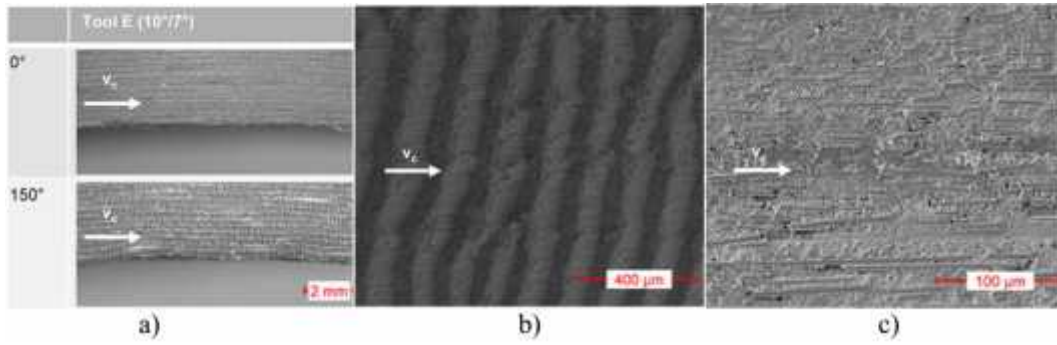
Şekil 20: a) E (10°/7°) takımla işlenmiş yüzey, b) C (0°/14°) takımla işlenmiş yüzey, c) I (10°/21°) takımla işlenmiş yüzey (Henerichs vd., 2015).

Şekil 20’de dört katmanlı CFRP kompozit malzemesinin 60° foa’ında, farklı takımlarla işlenmiş yüzeyleri verilmiştir. En düşük boşluk açısına sahip olan E ($\alpha=7^\circ$) kesici takımının matris malzemesini yoğun bir şekilde kaldırılmasını gözlemlemişlerdir. Bu takım düşük boşluk açısından dolayı malzemeyi aşağıya doğru sıkıştırmıştır. Kesici takımın matris malzemesini ezdiğini bu durumun ise fiberleri geri yaylanmasından (spring-back phenomenon) kaynaklandığını bildirmişlerdir. Büyük boşluk açılı C kesici takımında ise malzeme bükülmesinin daha küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekildeki yuvarlak kısımlar malzeme içinde ilerleyen çatlakları ifade etmektedir. I takımı ile işlenen yüzeyin diğer işlenmiş yüzeylere göre en zayıf yüzeylerden biri olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 21: d) 30° fiber açılı, e) 90° fiber açılı, f) 90° fiber açılı ve E takımı ile işlenmiş içyapı kesiti (Henerichs vd., 2015).

Şekil 21d’de 60° foa’ındaki gibi malzemenin ezildiğini ve eğrilmiş gibi uzadığını gözlemlemişlerdir. Yuvarlak daireler fiber katmanlarının içten kesilmiş olduğunu göstermektedir. Matris arasındaki bağlantıyla fiberlerin kısmen parçalanmış olduklarını gözlemleyerek 60° foa’ındaki gibi bükülmenin daha yoğun olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 21e’de matris katmanının daha küçük bir oranda kaldırıldığı, çatlakların yuvarlak dairelerde görüldüğü izlenmektedir. Şekil 21f’de ise sadece fiberlerin çok azının kusursuz olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 22: a) 0° ve 150° foa'daki delaminasyon, b) 150°, N takımı ile işlenmiş, c) 0°, E takımı ile işlenmiş (Henerichs vd., 2015).

Araştırmacılar incelemelerinde, 0° ve 150° fiber açılarında E takımıyla yapılan işlemden delaminasyona rastlamamalarına rağmen, 150° foa'ında testere dişi görüntüsü gözlemlemişlerdir. Şekil 22b'de şekil geometrisine bakılmaksızın testere görünümünde bir yüzey elde etmelerinin nedenini talaş açısından kaynaklandığını belirtmişlerdir. 150° foa'lı bütün yüzeylerde pürüzlülük değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. 22c'de E takımının düz yüzey göstermesine rağmen yüzeydeki fiberlerin bir kısmının kırıldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, matris iç tabakasının sağlam olduğunu belirterek bunun düşük işlem kuvvetlerinden kaynaklandığını belirlemişlerdir. Delaminasyondan kaçınmak için kesici takımlar tasarlanırken büyük boşluk açılarına dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Tungsten karbür takımlarından imal edilmiş takımların takım aşınmasının önlenemeyeceğini vurgulamışlardır. İyi bir aşınma direnci elde etmek için büyük boşluk açılarının gerekli olduğu sonucuna vararak, delaminasyonun büyük boşluk açılarla azalabileceğini, yüzey pürüzlülüğü değerinin boşluk açısı ile arttığını tespit etmişlerdir (Henerichs vd., 2015).

Gaiyun vd. (2015), iki farklı işleme kategorisini CFRP/Ti-6Al-4V malzemesinde uygulayarak helisel frezeleme yöntemiyle işlemişlerdir. Bunlardan ilk olan helisel frezeleme kategorisi I'de her iki malzemede özdeş işleme parametreleri ile işlenmesi, diğer helisel frezeleme kategorisi II'de ise her iki malzemede iki farklı takım işleme parametrelerini kullanarak incelemişlerdir. İşleme parametrelerini değişkenli ve değişkensiz uygulayarak helisel frezeleme performanslarında takım ömrü, kesme kuvvetleri ve delik kalitesini araştırmışlardır. Deneylerinde 10 mm kalınlığında % 60 ile % 65 fho'na sahip ve 0°/45°/90°/-45° foa'lı CFRP kompozit malzemesini kullanmışlardır. 4 ağızlı, 30° helis açılı ve 6 mm çapında freze takımını kullanarak kuru işlemişlerdir.

Kategori I'in işlenmesi sonucu şiddetli abrasiv aşınması tespit etmişlerdir. Kategori II ile yapılan deneyde takım ömrü % 12,5 arttığını bulmuşlardır. Kesme kuvvetlerinden eksenel itme kuvveti (F_z) ve radyal kesme kuvveti (F_r) kategori II ile işlenmiş CFRP kompoziti, kategori I ile işlenmiş olandan daha küçük bulmuşlardır. Ti-6Al-4V işlemede kesme kuvvetleri açısından kategori I'in kesme kuvvetleri kategori II'ye göre daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. İki farklı işleme kategorilerinin iki malzemedeki yüzey pürüzlülüğü, Ti-6Al-4V malzemesinin işlenmesinde CFRP kompozite göre daha iyi elde etmişlerdir. CFRP kompozit malzemenin doğal aşındırıcı yapısı ve fiber ayrılması gibi hasarlar yüzey pürüzlülüğünü etkileyerek, CFRP kompoziti işleme Ti-6Al-4V malzemesi ile karşılaştırıldığında daha zayıf yüzey bitirme işlemi elde etmişlerdir. Ti-6Al-4V malzemesinin delik giriş ve çıkışında herhangi bir hasar formuna rastlamamışlardır. Fakat CFRP kompozit malzemesinin her iki giriş ve çıkış deliklerindeki delik kalitesi hasarını tespit etmişlerdir. Bu durum kategori II yönteminin yüksek kesme hızında işlenmesinden dolayı istenilen delik kalitesini elde etmişlerdir (Gaiyun vd., 2015).

CFRP kompozit malzemesinin işlenmesi sırasında kesme ve itme kuvvetlerini belirlemek amacıyla Qi vd. (2015), üç deformasyon (slipping-kayma, peeling-kenar kopma, bounding-bağlayıcı) alanındaki kuvvetleri araştırmışlardır. Çalışmalarında % 65 fho'na sahip tek yönlü CFRP kompozit malzemenin analizi üzerine odaklanarak $0^\circ \leq \theta \leq \gamma_\alpha + 90^\circ$ açılarında uygulamışlardır. Deneylerinde farklı fho'larını (0° - 30° - 45° - 60° - 90°), talaş açısını (10° - 20°) ve kesme genişliğini (0,1 ve 0,2 mm) belirleyerek sementit karbür kesici takımlarla işlemişlerdir. Her bir deneyi özel bir parametre ile birlikte üç defa tekrarlayarak tüm deneylerinde kesme hızını 1 m/dak olarak seçmişlerdir. Deneysel kesme kuvvetlerini 45° fho'sında, 10° talaş açısında ve 0,1 mm kesme genişliğinde seçmişlerdir. Tekrarlanan deneysel veri değerini 491,1 N hesaplayarak deneysel ve teorik sonuçlarının karşılaştırmasını yapmışlardır. Araştırmacılar, fho'nın kuvvetler üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Kesme genişliği ile birlikte fho'nın küçük değerlerinde itme kuvvetlerinin arttığını belirlemişlerdir. Bu duruma kesme kuvvetinin neden olduğunu belirtmişlerdir. Yapmış oldukları deneyde CFRP kompozit malzemesi işlenmesinde (delme-frezeleme-tornalama) kuvvetlerin tahmin edilebileceği sonucuna, ayrıca kesme ve itme kuvvetleri üzerinde fho'nın, kesme genişliğinin ve talaş açısının önemli bir etkisinin olduğu sonucuna varmışlardır (Qi vd., 2015).

Frezelemede uygun kesme koşullarını değerlendirmek amacıyla Schorník vd. (2015), farklı ilerleme hızlarında ve sabit kesme hızında 8 mm çapındaki freze takımıyla CFRP kompozit malzemesinden yapılmış 104/90 mm boyutlarındaki boruya altı farklı kesme koşullarında kanal açarak işlemişlerdir. Deneylerinde yatay frezeleme ve geleneksel frezeleme yöntemlerini karşılaştırmışlardır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerini 200 mm/dak ki yatay frezelemede (climb milling) olduğunu tespit etmişlerdir. 200 mm/dak yatay ve geleneksel frezelemeden sonra oluşan iş parçası yüzeylerini gözlemleyerek, yatay frezeleme işleminden sonra meydana gelen bölgesel delaminasyon oluşmasına rağmen daha iyi bir yüzey kalitesi elde edebilmişlerdir. Geleneksel frezeleme ile işlenmiş yüzeyde genellikle temiz bir yüzey gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, istedikleri iyi yüzey kalitesini elde ederek ilerleme oranının ve kesme hızının daha iyi bir kombinasyonları olduğunu vurgulamışlar, lakin ana problemin sabit kesme hızı olduğunu fakat kaba bir taslak için yeterli olduğu kanısına varmışlardır (Schorník vd., 2015).

SiAlON takımların performansını karşılaştırmak amacıyla Çelik vd. (2015), CFRP kompozit malzemenin delme işlemini gözden geçirmişlerdir. Deneylerinde 150×150×10 mm ölçülerinde, % 59 fho'na sahip ve 0°/90°/+45°/-45° fof'larında olan malzemeyi, 6,4 mm çaplarında farklı boşluk açıları ve aynı helis açılarındaki seramik, helisel matkap ve PCD kaplamalı takımları ile farklı ilerleme oranlarında işlemişlerdir. İlerleme oranının artmasıyla itme kuvvetinin ve torkun arttığını tespit etmişlerdir. İş mili hızının bu iki faktöre bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu nedenle deforme olmamış talaş kalınlığının kesit alanı arttırdığını gözlemleyerek bu durumun uygun olduğu kanısına varmışlardır. Takım aşınması incelemelerinde, başlangıçta ilk delme işlemi gerçekleştiği andan itibaren itme kuvveti 105 N olarak ölmüşlerdir. 3. delme işlemi sonucunda 180 N'a yaklaştığını tespit ederek bu durumun kesici kenar aşınmasından kaynaklandığı belirtmişlerdir. Aşındırıcı karbon fiber malzeme ile teması halinde yeterli olmayan dayanımından dolayı hızlı bir takım aşınmasına neden olduğunu 3. delmede tespit etmişlerdir. Delik kalitesi incelemelerinde, matkap giriş bölgesindeki delaminasyonun, takım geometrisi ve kesme koşullarının etkili olduğunu belirlemişlerdir. Deneyler sırasında girişteki delaminasyonun uygun olduğunu belirterek, delik kalitesi bakımından en iyi delaminasyon oranının düşük ilerleme oranında tespit etmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları testler sonucunda, itme kuvvetinin delme işlemi sırasında artış sergilemesiyle SiAlON delme takımlarında kesici kenarlarında abrasiv (abrasive) aşınma meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Çelik vd., 2015).

CFRP/AL malzemesinin delik kalitesini helisel frezeleme tekniğini kullanarak yüzey pürüzlülüğü açısından iyileştirmeyi amaçlayan Rahim vd. (2014), deneylerini üç kesme hızı seviyesinde uygulamışlardır. 6 mm çapında dört oluklu WC-Co takımını dört tip takım tasarımı (iki düz kesici kenarlı-iki radyus kesici kenarlı) ile farklı kesme hızlarında, ilerleme oranlarında ve delik çapını 8 mm belirleyerek kuru işlemişlerdir. CFRP/AL malzemesi 300 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğinde olup CFRP kompozit malzemenin 0°/90°/45°/-45° fofa'larında ve kalınlığı 7,6 mm iken alüminyum malzemesinin kalınlığını 3 mm belirlemişlerdir. Araştırmacılar, itme kuvvetinin etkisini, işleme parametrelerinde ve takım geometrisinde inceleyerek ilerleme oranının artmasıyla kesme kuvvetinin arttığını tespit etmişlerdir. Alüminyum plakasında itme kuvvetinin aşırı bir biçimde yükselişini gözlemlemişlerdir. Kesme hızının artmasıyla itme kuvvetinin azaldığını böylece yüksek iş mili hızının takım ve talaş arasındaki arayüzey temasını azaltmasıyla sürtünme katsayısının düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Kesme derinliğinin artırılmasıyla itme kuvveti değerinin azaldığını ve bu değer alüminyum plakasına nüfuz ettiği zaman yükseldiğini tespit etmişlerdir. Yüksek ilerleme oranlarında özellikle Al malzemesinde yüksek değerlerde yüzey pürüzlülüğü tespit etmişlerdir. Yüksek ilerleme ve kesme derinliğinin yüksek itme kuvveti değerini gösterdiğini ve CFRP/AL malzemesinin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin havacılık sanayinde kabul edilebilir aralıklarda olduğu sonucuna varmışlardır (Rahim vd., 2014).

CFRP kompozit malzemenin işlenebilirliğini incelemek için bir freze takımı geliştiren Kitajima vd. (2014), geliştirilmiş takımın kesme performanslarını araştırmışlardır. Deneylerinde 5 mm kalınlığındaki üç CFRP kompozit malzemeyi 28 mm çapında 20 kesici kenara sahip olan PCD takımla yüzey (face milling) frezelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada farklı ilerleme oranlarını ve farklı kesme derinliklerini belirleyerek toplam dört deneyde gerçekleştirmişlerdir. Havacılık endüstrisinde yüzey pürüzlülüğü toleransını referans alarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme genişliği arasındaki ilişkisini 1,0 μm ve daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Bu nedenle elde edilen bu değerlerin artan kesme genişliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerinin istenilen seviyede ve havacılık parçaları içinde uygun olduğunu belirtmişlerdir. Düşük kesme genişliğinde yüzey pürüzlülüğü değerini arttığını tespit etmişlerdir. Bu durumun takımın büyük salgı yapmasından (the large run-out of the tool) ($\sim 30 \mu\text{m}$) ya da CFRP kompozit malzemesindeki matris malzemesinden kaynaklandığını düşünmüşlerdir. Araştırmacılar deneylerin kesme koşullarını daha da

ilerlettiklerinde takımın inceliğinden dolayı takım da kırılma gözlemlemişlerdir. Bu sebepten dolayı deneylerini daha fazla ilerletmemişlerdir (Kitajima vd., 2014).

Haddad vd. (2014), yatay frezeleme sırasında oluşan yüzey kusurları ve kesme koşulları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneylerinde % 59 fho olan, [90/90/45/0/45/90/45/90/45/90]s foa'larına sahip, 20 tabakadan oluşan ve 5,2 mm kalınlığındaki CFRP kompozit malzemesini 6 mm çaplarındaki 4 oluklu parmak freze takımını, elmas kaplamalı çapak takımını ve kaplamasız tungsten çapak takımını kullanarak standart kesme koşullarında ve yüksek hızda işlemişlerdir. Her iki koşulda radyal kesme genişliğini 2 mm belirlemişlerdir. Standart kesme koşullarının yüzey kusurları incelemesinde üç takım geometrisi için kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü bağlantısında (takım geometrisine bakmaksızın) kesme hızının (V_c) yüzey pürüzlülüğüne etkisini gözlemlememişlerdir. Fakat kaplamalı veya kaplamasız takımlarında ilerleme oranının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Kaplamalı takımda daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Dört oluklu parmak freze takımında ilerleme oranının artması sonucu yüzey pürüzlülüğü değerinin azaldığını bildirmişlerdir. Kaplamalı ve kaplamasız takımlarında ilerleme oranının artması ve kesme hızının azalmasıyla tüm işleme sıcaklığının arttığını ancak, dört oluklu parmak freze takımında ilerleme oranının artmasıyla ve kesme hızının azalmasıyla sıcaklığın azaldığını gözlemlemişlerdir. Böylece işleme kusurlarının her şeyden önce mekanik hasar olduğunu kabul etmişlerdir. Kaplamasız takım ve 4 oluklu parmak freze uygulamasının -45° foa'da en kötü yüzey kusurları oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca takımlarında ilerleme oranının artmasıyla daha fazla hasar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yüksek hızda frezelemede işlenmiş yüzeyin yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme parametreleri etkisinin geleneksel işlemeye göre çok yüksek olduğunu vurgulayarak, bunun gerekçesini takım aşınması etkisine (kesme kenar radyüsü) bağlamışlardır. Kaplamalı takımların kaplamasız olanlardan daha büyük bir kesme kenar radyusunun olduğunu ve bunun kaplama tabakasından kaynaklandığını belirtmişlerdir (Haddad vd., 2014).

Qin vd. (2014), ANN kullanarak CFRP kompozit malzemede delaminasyon ve işleme parametreleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneylerde % 60 fho'na sahip, 10 mm kalınlığında malzemeyi, 6 mm çapında ve 55 mm uzunluğunda TiAlN kaplamalı takım kullanarak kuru işlemişlerdir. Diş adımındaki artışla delaminasyon faktörünün arttığı ve helisel frezelemedeki ilerleme oranıyla doğrusal bir ilişkisi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yüksek diş adımı malzeme üzerinde koparma etkisi uygulayarak itme kuvvetinin delaminasyonda önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Delaminasyon faktörünü artıran başka bir etken ise yüksek ilerleme oranı olduğu belirlemişlerdir. Bunun sonucunda takım aşınması meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Qin vd., 2014).

Lissek vd. (2014), sabit olmayan CFRP kompozit malzemede deneysel ve istatistiksel çalışma yapmışlardır. Frezeleme deneylerini soğutma sıvısı kullanmadan 8 mm çapındaki iki farklı karbür freze takımını kullanmışlardır. Bunlardan ilki helis açısı $+5^\circ$ ile -5° arasında değişen 3 çift ağızlı kesiciler ve diğer ise 30° sağ ve sol spiral olan çok dişli freze takımlarıdır. Kesme hızları her ikisinde 88 m/dak iken ilerleme oranı çok dişlide 0,04 mm/dev çift ağızlıda 0,07 mm/dev olarak uygulamışlardır. Yaptıkları frezeleme uygulamasında delaminasyonunun ana hasar olmadığını gözlemlemişlerdir. CFRP kompozit malzemenin işlenmesinden sonra meydana gelen yüzey tabakası hasarlarında iş parçası üzerinde kesici kenarlarda yıpranmanın etkisini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, takım geometrisinin bu hasarlara etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Çift ağızlı takım yerine çok dişli kesici takımın kullanılmasıyla yıpranmanın belirli ölçüde azaltacağını gözlemleyerek çok dişli kesici takımın iş parçası kalitesine olumlu etki saylayacağını bildirmişlerdir (Lissek vd., 2014).

Kolar vd. (2014), kenar işleme operasyonlarını PCD ve karbür kesici takımlarını kullanarak işlemişlerdir. Yaptıkları deneylerde kullandıkları beş farklı tipteki kesici takımlarla birlikte takım geometrilerinin, diş sayılarının, malzemelerinin ve kaplamalarının her birinde farklı olduğunu belirtmişlerdir. İlk dört takım, PCD ve sementit karbürler, üretim teknolojisine göre üretilen prototiplerdir. Sonuncusu olan standart takım ticari olarak hazır bulunan ve karşılaştırmalar için referans seçilen kesici takımdır. Yaptıkları ilk test çapak oluşumu ile ilgili olup en iyi sonucu demo2 isimli 12 mm çapında olan CVD elmas kaplamalı takımda gözlemlemişlerdir. Ancak, demo3 ve demo4 takımlarından en kötü değerleri elde ederek bu değerlendirmeyi düşük talaş açısına ve helis açısına dayandırmışlardır. Böylece malzeme kesmede yeterli hassasiyeti gösteremediklerini gözlemlemişlerdir. Takım ömrü testinde PCD takımların daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Demo1 ve demo2 isimli takımlarda yanak aşınmasının en az olduğu tespit etmişlerdir. Standart takım ile yapılan uygulamada istenilenin elde edemediğini belirtmişlerdir. Ayrıca meydana gelen yüzey pürüzlülüğünün ve çapak oluşumunun yanak aşınmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. En sonunda demo1 takım ile yapılan testte en iyi performansı elde

ederek bunu yüksek diş sayısına dayandırmışlardır. Diğer yaptıkları testte $0^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}$ foa'larına sahip malzemeyi demo1 ve demo2 ile karşılaştırmışlardır. Çünkü bunlar yüksek diş sayısı olduğu için yüksek verimlilik potansiyeline sahiptir. Deney sonucunda demo1 takımın kaplamalı karbür takım ile karşılaştığında daha düşük yanak aşınması olduğunu gözlemlemişlerdir. Tüm deneyler sonucunda, aşındırıcı bir malzeme olan fiber malzemelerde PCD takımların daha uygun olduğunu bildirmişlerdir. Elmas kaplamalı karbür takımların parça ve düşük seri üretim için ekonomik alternatif olduğunu fakat çift helis karbür takımların iyi bir çözüm olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, karbür takımların fiber yapılarına daha duyarlı olduğunu öne sürmüşlerdir (Kolar vd., 2014).

Delik yüzey kalitesini ve hasarını CFRP kompozit malzemede incelemeyi amaçlayan Eneyew ve Ramulu (2014), kesme parametrelerinin etkisini, yüzey pürüzlülüğü değerini, delaminasyonu ve bölgelerde oluşan fiber hasarlarını araştırmışlardır. Deneylerinde % 60 fho'na sahip $125 \times 175 \times 6,35$ mm boyutlarındaki malzemeyi, farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında belirlemişlerdir. 6,35 mm çapındaki PCD takımını soğutma sıvısı olmadan ve işleme performanslarını analiz etmek için de ANOVA testinden yararlanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada kesme hızı ve ilerleme oranlarına bakılmaksızın çıkıştaki delaminasyon faktörünün her zaman giriştekenden daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun bekledikleri gibi olduğunu fiberlerin çıkışta daha fazla koparak çıkmasını gözlemlemişlerdir. Malzemenin dirençli olmasından dolayı kesme kuvvetlerinin foa'ındaki ve kesme doğrultusundaki bağıl açıyla değişebileceğini ve böylece itme kuvvetindeki bu değişimin deliğin etrafında meydana gelen kesme hareketini temsil ettiğini belirtmişlerdir. Daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için düşük ilerleme oranlarını ve yüksek kesme hızları kombinasyonunun güçlü bir göstergesi olduğunu açıklamışlardır (Eneyew ve Ramulu, 2014).

Zhang vd. (2013), regresyon analiz tahmini metodunu kullanarak CFRP kompozit malzemede yüzey pürüzlülüğü ve işleme parametreleri (kesme hızı, kesme derinliği, kesme genişliği ve ilerleme oranı) arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneylerinde $119 \times 40 \times 27$ mm ölçülerine sahip malzemeyi, 10 mm çapında ve iki oluğa sahip PCD kesici takımını kullanarak işlemişlerdir. Regresyon analizi için dört faktör ve üç seviyede belirleyerek deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametresinin bir fonksiyonu olarak PCD takım için yüzey pürüzlülüğü değerini 1 ile 2 μ m arasında elde etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün artması kesme derinliğine, kesme genişliğine, ilerleme oranına bağlı iken

azalmasını ise kesme hızına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Deney koşulları altında kesme parametresi olan kesme genişliğinin yüzey pürüzlülüğü değerine yüksek bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Daha sonra kesme hızı olduğunu belirtmişlerdir. En az etki eden parametrenin ilerleme oranı olduğunu yaptıkları deney koşullarından anlamışlardır (Zhang vd., 2013).

CFRP kompozit malzemesinin frezeleme yöntemiyle işlenmesi sırasında kesme parametrelerinin etkisini değerlendirmek için Ciecielağ ve Zaleski (2013), AlSi21CuNi alaşımını Al7075 malzemesi ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 0°-90° fofalı 200×200×10 mm boyutlarındaki malzemeyi PCD kesici takım ile farklı kesme ve ilerleme oranıyla birlikte sabit kesme genişliği 1 mm seçerek ölçümlerini altı kez tekrarlayarak gerçekleştirmişlerdir. Bütün kuvvetlerin ilerleme oranının artmasıyla arttığı ancak duralümin (7075) malzemesinde kuvvetlerin azaldığını belirtmişlerdir. Silümin (AlSi21CuNi) ve CFRP kompozit malzemelerde kuvvetlerde kayda değer bir değişiklik olmadığını tespit etmişlerdir. İlerleme oranının artmasıyla birlikte kesme torkunun özellikle CFRP kompozit malzemede en yüksek değere vardığını gözlemlemişlerdir. Kesme hızının artmasıyla birlikte duralümin ve silümin malzemelerinde abartılı bir şekilde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Kesme hızının artmasıyla özellikle duralüminin pasif kuvvetlerinde ve şiddetlerinde azalma olduğunu belirterek maksimum kesme torkunun artışının bütün malzemelerde artmasını gözlemlemişlerdir. Fakat kesme hızının artması alüminyum alaşımında maksimum torku azalttığını diğer taraftan kompozit malzeme işlendiği sırada kesme torkunun arttığını tespit etmişlerdir. Bu durum kesici kenarın incelenen kompozit malzeme gibi kompleks bir malzeme üzerinde farklı bir etkiye sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir (Ciecielağ ve Zaleski, 2013).

Gong vd. (2013), CFRP kompozit malzeme bütünlüğü ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde farklı kesme parametreleri etkisini incelemişlerdir. Deneylerde % 65 fho'na sahip, 45°/0°/-45°/90° fofalı, 200×150×9 mm boyutlarında malzemeyi kesme kuvvetlerini en aza indirmek için çok kenarlı freze takımını, toplam 16 testte iki farklı faktör kullanarak (kesme hızı, ilerleme oranı) dört seviyede uygulamışlardır. Yaptıkları testlerin sonucunda, kesme hızının artmasıyla malzeme yüzeyinde değişimler meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bunlar, malzemede ciddi yumuşama, bozulma ve yanma oluşumuna sebep olmuştur. İlerleme hızının artmasıyla malzemenin yüzey biçimi az etkilendiğini belirtmişlerdir. Böylece, fofanın malzemenin yüzey biçimi ile doğrudan ilgili olduğunu

tespit etmişlerdir. 45° foa'da ciddi hasarın meydana geldiğini, fakat 0° foa'da ise daha az hasar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sonuçta yüzey pürüzlülüğü değerinin ilerleme oranı ile arttığını kesme hızıyla azaldığını belirterek, yaptıkları testlerde bu değer 3,2 µm fazla olduğunu ve havacılık uygulamaları için uygun olmadığını belirtmişlerdir (Gong vd., 2013).

CFRP kompozit malzemenin yukarı frezeleme işleminde Pecat vd. (2012), kesme parametreleri ve iş parçasının yüzey bütünlüğü arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneylerini 0,1 mm ilerleme oranı, 0,6 mm kesme genişliği ve farklı kesme hızlarında belirlemişlerdir. 160 mm çapında disk freze çakısıyla karbür kesici takımlarını kullanarak işlemişlerdir. % 50 fho'na sahip 10×10×50 mm ölçülerinde kompozit malzemeyi kuru işleme koşullarıyla maksimum çalışma sıcaklığında toplam on sekiz farklı kesme denemelerinde gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları ilk dört deneyde +45° ve -45° foa'nın etkilerinin oldukça yüksek olduğunu ve kesme kuvvetlerinde meydana gelen farkın ise 300 N'dan 60 N'a azalma göstermesi sonucunda % 80 oranında bir düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Saf matris malzemesinin işlenmesinde oluşan kesme kuvveti ölçülmesinde -45° foa'da yüksek olduğunu tespit ederek en kötü sonucu bu foa'nda bulmuşlardır. Kesme hızları 20 ve 200 m/dak, iş parçası sıcaklığı 20 ile 80 °C ve sadece 90° foa'nı kullanarak yaptıkları 5, 6, 9 ve 17 deneylerde düşük kesme hızında düşük sıcaklıkta fiber eğilmesi meydana gelmemiştir. Yüksek kesme hızında yüzeye çok yakın kısımda görülebilir bir fiber eğilmesi meydana geldiğini tespit etmişlerdir. En yüksek kesme kuvveti (310 N) ölçümünde kesme hızı 20 m/dak iken iş parçası sıcaklığı -40 °C gelmekte ve kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca -40 °C iş parçası sıcaklığında kesme hızının ve kesme kuvvetinin etkileri de fark edilebilir bir şekilde görülebildiği sonucuna vararak 0° ve +45° foa'da pürüzsüz bir yüzey elde edilirken -45° ve 90° foa'da hasarlar yani çatlaklar ve parçalara ayrılma (segmentations) oluştuğunu belirtmişlerdir. Her bir foa'da farklı kesme mekanizmasını gözlemleyerek yüksek kesme hızlarında işlenmiş yüzeye yakın kesme yönünde fiber bükülmesine neden olduğu bulmuşlardır (Pecat vd., 2012).

CFRP kompozit malzemenin ortogonal kesme işleminde nümerik analizini incelemeyi amaçlayan ve foa'larına bağlı olarak kompozit malzemelerin matris yapısında oluşan hasar hakkında değerlendirmeler yapan Santiuste vd. (2010), havacılık sanayinde kullanılan uzun fiber yapısındaki kompozit malzemeleri sonlu elemanlar (FEM) yöntemini kullanarak

incelemişlerdir. Deneylerinde farklı foa'larındaki (0° - 15° - 30° - 45° - 60° - 75° - 90°) cam fiber takviyeli kompozit (GFRP) ve CFRP kompozit malzemeyi 0,5 mm radius, 5° talaş ve 6° boşluk açısına sahip kesici takımla işlemişlerdir. CFRP kompozit malzemede foa'sının artmasıyla matris malzemesinde ezilmelerin ve kırılmaların azaldığını gözlemlemişlerdir. 45° foa'da GFRP ve CFRP kompozit malzeme arasında karşılaştırma yapıldığında CFRP kompozit malzemenin matris yapısında ezilmeyi ve kırılmayı daha az tespit etmişlerdir. Foa'sının artmasına bağlı olarak deneysel ve sayısal analizler sonucunda elde edilen verilerde kesme kuvvetlerinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak uygulanan nümerik analizinde GFRP ve CFRP kompozit malzemelerin matris yapısındaki deformasyon ve talaş oluşumunun foa'larına bağlı olduğunu açıklamışlardır. Böylece CFRP kompozit malzemenin havacılık (aeronautical) uygulamalarında daha uygun olduğuna karar vermişlerdir (Santiuste vd., 2010).

Rahman vd. (1999), CFRP kompozit malzemenin farklı kesici takımlarla ve farklı işleme parametreleriyle işlenebilirliğini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada kısa ve uzun fiber yapısındaki CFRP kompozit malzemeyi kübik bor nitrür (CBN), seramik ve tungsten karbür kesici takımlarını kullanarak farklı kesme hızlarında, kesme derinliklerinde ve ilerleme oranlarında işlemişlerdir. Tungsten karbür kesici takımıyla yapılan uygulamalarda kesme hızının artmasıyla takım aşınmasının arttığını gözlemleyerek en az takım aşınmasının CBN takımlara 150 m/dak kesme hızında uzun fiber yapısındaki CFRP kompozit malzemenin işlenmesi sırasında meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Seramik kesici takımların darbelere karşı hassas olması ile mekanik ve termal gerilimlere karşı eğilimli olmasından dolayı kompozit malzeme işlenmesi için uygun olmadığını tavsiye etmişlerdir. Kesme genişliğinin artmasıyla uzun fiber yapısındaki CFRP kompozit malzemenin işlenmesinde en iyi yüzey kalitesini ve ayrıca CFRP kompozit malzemelerin işlenmesinde takım ömrü açısından en uygun takımın CBN kesici takım olduğu sonucuna varmışlardır. Bunun haricinde uzun ve kısa fiber yapısındaki CFRP kompozit malzemede toz şeklinde talaşın oluştuğu ve bu toz talaşlardan dolayı kesici takım ucunda krater aşınmasının oluştuğunu yapmış oldukları deneyde tespit etmişlerdir (Rahman vd., 1999).

3.3 Literatür Araştırmasının Genel Değerlendirilmesi

Teknolojik uygulamaların gittikçe arttığı günümüzde; metaller, ametaller, kimyasallar, organikler, inorganikler ve polimer malzemeler kullanılarak geliştirilen özel ürünler üretilmektedir. Bu özel ürünler içerisinde yer alan kompozit malzemeler geniş çaptaki avantajlarından dolayı önem kazanmış olup bu malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalar hala ilerlemektedir. Aynı şekilde seramiklerin, plastiklerin ve metallerin gelişmesiyle birlikte kompozit malzemelerin gelişimleri daha da artmaktadır. Kompozit malzemelerin son yıllarda oldukça yaygın kullanılan mühendislik malzemeleri olmasından dolayı üretim miktarları çelik üretimini aşmaktadır. Özellikle ileri kompozit malzeme sınıfından olan CFRP kompozit malzeme yüksek yük taşıma kapasitesi ve düşük yoğunluk değerleri nedeniyle hafif yapıların tasarımı ve imalatında tercih edilmektedir.

CFRP kompozit malzemelerle ilgili çalışmalar incelendiğinde, CFRP kompozit malzemelere son şeklini vermek için talaşlı imalat yöntemlerinden freze, torna, delme gibi işlemler kullanılmaktadır. Fakat geleneksel imalat yöntemlerinden olan talaş kaldırma işlemi sonucunda hatasız ve istenilen yüzey kalitesi elde etmek mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı, uygulamalarda kullanılacak malzemelerin hatasız olabilmesi için gerekli çalışmaların önceden yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, istenmeyen bu özelliklerin önüne geçilebilmesi için birçok araştırma, uygulama ve çalışma yapılmaktadır. Araştırmalar, hasarların; kesme parametreleri, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve delaminasyon gibi istenmeyen hasar mekanizmalardan kaynaklandığını bildirmektedir. CFRP kompozit malzemeler iyi bir şekilde tasarlandıklarında bileşenlerinde ve yapılarında en iyi özelliklerini gösterecek olup iyi bir tasarım sonucunda diğer malzemelerden önemli derecede üstünlük sağlayacaktır. Ayrıca; ileri kompozit malzeme elde edilmesiyle; ağırlık, aşınma direnci, yorulma ömrü, korozyon direnci, mukavemet, ısı yalıtımı gibi özelliklerde geliştirilecektir.

CFRP kompozit malzemenin delme performanslarında; kesici takımlar delaminasyona neden olmaktadır. Bunun yanında CFRP kompozit malzemelerin yapısından kaynaklı takımların kesici kenar keskinliğini kaybetmesine neden olduğu görülmüştür. WC-Co takım yüksek aşınma direncine sahip olmasına rağmen, itme kuvveti değerleri seramik takımlara göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. Seramik takımların, düşük kesme hızlarında girişte delaminasyon düşük iken çıkışta bu oranın arttığı tespit edilmiştir.

Delaminasyonun itme kuvveti, yüksek ilerleme oranı, yüksek kesme hızından önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Kesme hızı ve ilerleme oranlarına bakılmaksızın çıkıştaki delaminasyon faktörü her zaman giriştekenden daha fazla elde edilmiştir. PCD takım performansında delaminasyon aynı özelliği göstermiştir. TiAlN kaplamalı karbür kesici takım, ilerleme oranı ve kesme hızı işleme parametreleri delaminasyon üzerinde önemli etkiler göstermiştir. Daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için düşük ilerleme oranları ve yüksek kesme hızları kombinasyonu kullanılmıştır. Yüksek helis açılı takım, pürüzsüz bir yüzey elde edilmesine imkân sağlamıştır. Yüksek helis açılı takımın delaminasyon/fiber ayrılmasını, kesme kuvvetlerini ve takım aşınmasını düşürdüğü tespit edilmiştir.

CFRP kompozit malzemenin tornalama performanslarında; kaplamasız karbür takımın ilerleme kuvvetleri, daha çok talaş açısından etkilenmiştir. Boşluk açısında, ilerleme kuvvetinin hiçbir etkisi görülmemiştir. Kesme kuvveti kama açısından etkilenerek ilerleme kuvvetinin düşmesine neden olmuştur. Boşluk açıları büyük olan takımlarda aşınma miktarı azalırken yüzey pürüzlülüğü değerleri artmış olduğu tespit edilmiştir. Tungsten karbür takımlarda takım aşınması önlenememiştir. İyi bir aşınma direnci elde edilmesi için büyük boşluk açıları gerekli olmuştur. Kesilmemiş fiberlerden dolayı matris malzemesinin ezilmesi tespit edilmiştir. Büyük boşluk açılarının delaminasyonu azalttığı belirtilmiştir. Kesici takımlar tasarlanırken, delaminasyondan kaçınmak için büyük boşluk açılarına dikkat edilmelidir. Takım ömrü, takımın karakteristikleriyle ilişkili olup, delaminasyon hasar mekanizmasının foa'larında belirgin şekilde farklı etkiler oluşturduğu belirtilmiştir.

CFRP kompozit malzemenin frezeleme performanslarında; genellikle çok dişli freze ve piramit kenarlı kesici takımlarıyla işlenmesi esnasında olumlu sonuçlar elde edilmiştir. İşleme durumundaki kesme kuvveti ilerleme oranına bağlı olmakta ve bu takımlarda herhangi bir belirgin aşınma görülmemektedir. Malzemenin işlenmesi esnasında kesici kenarın daha az malzemeye temas etmesinden dolayı çok dişli freze takımının ömrünü koruduğu ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşmeler sağladığı anlaşılmıştır. Farklı kesici takımlar ile işlenen CFRP kompozit malzemede en iyi takım ömrü TiAlN kaplamalı çok dişli takımlarda görülmüştür. CFRP kompozit malzemenin farklı malzemeler ile karşılaştırılmasında farklı kesme ve ilerleme oranıyla birlikte sabit kesme genişliğinde kullanılan PCD takımda bütün kesme kuvvetleri ilerleme oranının artmasıyla artış sergilemiş ve takımın aşındığı belirtilmiştir. Böylece aşınmış kesici takımla CFRP kompozit malzeme işlenmesi büyük kesme kuvvetlerine neden olmakta ve işlenen

malzemede istenmeyen hasar mekanizmaları görülmesine sebebiyet vermektedir. CFRP kompozit malzemenin TiAlN kaplamalı kesici takım ile işlenmesinde, işleme parametrelerinin oluşan delaminasyon üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Kesme genişliği düşük olduğunda delaminasyonun oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir. Yüksek kesme hızının ise işlenmiş malzeme yüzeyindeki delaminasyon hatalarını azalttığı belirtilmiştir. İlerleme oranının delaminasyon üzerine daha az etkisi tespit edilmiştir. Ancak TiAlN kaplamalı kesici takımın işlenmesi esnasında kesme kuvvetlerinin artışından dolayı abrasiv aşınma tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ise kesme hızının ve ilerleme oranının baskın bir faktör olmasına rağmen kesme genişliği etkisi neredeyse yok denecek kadar az olduğu vurgulanmıştır. Tek katlı AlTiN veya AlCrN kaplamaların daha iyi bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Buna karşılık nanoyapılı kaplamalı takımdan istenilen performans elde edilememiş ve küçük kırılmaların olduğu belirtilmiştir. Farklı helis açılarındaki tungsten karbür takımın yüzey pürüzlülüğü değerleri sadece ϕ 'larına bağlı olmadığı kesme kuvvetlerinden de etkilendiği tespit edilmiştir. Helis açısının artmasıyla işlenen malzemede hasar meydana geldiği ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmüştür. Yanak aşınması tespit edilmiş ve çizikler biçiminde oluşmuştur.

Dünyada, CFRP kompozit malzemeler birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Metal malzemelerden farklı bir yapıya sahip olmaları, birden fazla ϕ 'larının bulunması, farklı kumaş yapıları vd. gibi özelliklerinden dolayı işlenmesi zor ve sert bir malzeme olmaktadır. Bu yüzden, bu malzemenin işlenmesinde karşılaşılan takım aşınması miktarının azaltılması veya takım ömrünün artırılması, çoğu araştırmacı tarafından hedeflenen konular arasındadır. CFRP kompozit malzemelerin üretim maliyetlerini azaltılmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak, elde edilen sonuçlar, daha yüksek aşınma dayanımına sahip kaplama malzemelerinin kullanımını gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmada, CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde PVD kaplamalı nl-AlTiN/TiN, çok tabakalı nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, konvansiyonel tek tabakalı TiAlN ve TiN kaplamalı karbür kesici takımlarla birlikte kaplamasız karbür kesici takımların işlenebilirliğinin araştırılmasına karar verilmiştir.

Yapılan literatür taramasında incelenen bilimsel makaleler ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: İncelenen makalelerle ilgili literatür özet tablosu

Yazarlar	Yıl	Makale İsmi	İşlem Türü	İşlenen Numune	Uygulanan Takımlar	Kesme sıvısı	Sonuçlar
Ghafarizadeh vd.	2016	Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites	Frezeleme	CFRP	PCD düz parmak freze takımı	Kuru işleme	Tek yönlü CFRP kompozit malzeme yüzey frezeleme işlemindeki modellemede kesme kuvvetleri ve işleme hasarları tahmin edilmiş. Deneylerde uyum sağlayarak kesme kuvveti profilleri büyük ölçüde foa'larına bağlı olmuş.
Wang vd.	2016	A comparative study on helical milling of CFRP/Ti stacks and its individual layers	Frezeleme	CFRP/Ti	TiAlN kaplamalı karbür takım	Kuru işleme	Kesme kuvvetlerinin artmasıyla takım aşınması oluşmuş. CFRP kompozit malzeme işleminde oluşan abrasiv aşınma kesme kuvvetini artırmış. Titanyum alaşımında delik kalitesi iyi ama CFRP kompozit malzemede girişte delaminasyona sebep olmuş.
Islam vd.	2015	A simplified damage prediction framework for milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastics	Frezeleme	CFRP	HSS kanal freze takımı	Kuru işleme	Delaminasyon ve normal kesme kuvvetleri eccr aralığına bağlı olmuş. Kesme kuvveti beklenen hasar işleme parametreleri etkisini belirlemek için iyi bir yaklaşım olarak kullanılmış. Düşük ilerleme oranları ve yüksek kesme hızları kesme kuvvetlerini minimize ederek delaminasyon faktörünü azaltmış.
Ahmed vd.	2015	Experimental Investigation of Surface Integrity of End milled CFRP Composites	Frezeleme	CFRP	HSS ve sementit karbür takım	Kuru işleme	CFRP kompozit malzemenin kesme genişliği sabit tutulduğunda, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon faktörü üzerine en etkili parametre ilerleme oranı olmuş. Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü iyileşmiş fakat bunun sonucunda takım aşınması ve takımın ömrünü kısaltmış.
Wang vd.	2015	Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites	Frezeleme	CFRP	Birçok kesme ünitesinden oluşan takım	Kuru işleme	CFRP kompozit malzeme frezeleme işleminde yüksek kesme hızları tercih edilmiş, ilerleme oranı kesme kuvvetinden etkilenmiş, yüksek işleme verimini elde etmek için yüksek değerdeki kesme genişliği seçilmiş. Düşük kesme hızı, en az ilerleme oranı ve maksimum radyal kesme genişliği belirlenerek optimum kesme parametreleri ve optimum kesme kuvveti ile optimum kesme sıcaklığı bulunmuş.
Kiliçkap vd.	2015	Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite	Frezeleme	CFRP	Sinterlenmiş karbür freze takımı	Kuru işleme	CFRP kompozit malzemedeki hasar kesme parametreleri ve takım geometrisi tarafından etkilenmiş. İlerleme oranının artmasıyla delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti artmış.
Hintze vd.	2015	Influence of weave structure on delamination when milling CFRP	Frezeleme	CFRP	PCD freze takımı	Kuru işleme	Takım geometrisi etkisi daha az olmuş. 90° foa önemli derecede delaminasyon problemine neden olmuş.

Tablo 1: (devam ediyor)

Ghafariadeh vd.	2015	Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic	Frezeleme	CFRP	CVD elmas kaplamalı karbür parmak freze takımı	Kuru işleme	Kuru frezeleme işleminde kesici kenarda sıcaklık yükselmiş. Kesme sıcaklığının artmasıyla kesme hızı artmış ve bu da kesme kuvvetini etkileyerek polimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki sıcaklığı etkilemiş. Kesme sıcaklığı kesme hızı ile lineer bir şekilde artmış, maksimum kesme kuvveti kesme hızından etkilenmiş, foa kesme sıcaklığı ve kuvveti üzerinde önemli etkisi olmuş.
Slamani vd.	2015	Comparison of two models for predicting tool wear and cutting force components during high speed trimming of CFRP	Frezeleme	CFRP	CVD elmas kaplamalı karbür freze takımı	Kuru işleme	Kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte; takım aşınmaları ve kesme kuvvetleri her ikisinde katlanarak artmış böylece aşınmış kesici takımla işlenen malzemenin çıkarılması için daha büyük kuvvetlere ihtiyaç duyulmuş. Düşük kesme oranlarında ve yüksek kesme hızlarında optimum kesme koşulu, yüksek takım aşınması, yüksek ilerleme oranı etkili olmuş.
Konneh vd.	2015	Milling damage on carbon fibre reinforced polymer using TiAlN coated End mills	Frezeleme	CFRP	TiAlN kaplamalı kesici takım	Kuru işleme	Kesme genişliği ve hızı delaminasyon üzerine önemli bir etkisi olmuş fakat ilerleme oranından çok az etkilenmiş. Yüksek kesme hızı işlenmiş malzeme yüzeyindeki delaminasyon kusurlarını azaltmamış. Kesme genişliği düşük olduğunda delaminasyon oldukça yüksek olmuş.
Hosokawa vd.	2014	High-quality machining of CFRP with high helix end mill	Frezeleme	CFRP	DLC kaplamalı karbür kesici takım	Kuru işleme	Takım aşınması önemli ölçüde fiber kesme açısına bağlı olmuş. Kaplamanın dikkate değer bir etkisi olmasının yanında takım geometrisi etkisinin daha az olduğu belirtilmiş.
Kusuyama vd.	2014	Face Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Using Polycrystalline Diamond Tool	Frezeleme	CFRP	PCD kaplamalı özel yapım takım	Kuru işleme	Delaminasyon foa'na bağlı olmuş. Kesme kuvveti CFRP kompozit malzemenin mekanik özelliklerini etkilemiş. Yüzey pürüzlülüğü her durumda 3.2 µm'den küçük olmuş ve havacılık parçaları için kabul edilebilir seviyede ölçülmüş.
Sorrentino ve Turchetta	2014	Cutting Forces in Milling of Carbon Fibre Reinforced Plastics	Frezeleme	CFRP	Yekpare kesici takım	Kuru işleme	Kesme hızının artmasıyla pürüzlülük azalmış. Yüksek ilerleme oranında pürüzlük artmış. Kuvvet bileşenleri kesme parametrelerinden etkilenmiş. Yüzey pürüzlülüğü; düşük eksenel kesme genişliği ve yüksek kesme hızıyla birlikte daha iyi oluşmuş.
Ishida vd.	2014	Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics Using Ultrasonic Vibration and Liquid Nitrogen	Frezeleme	CFRP	Küresel parmak freze takımı	Kriyojenik soğutma sıvısı, çözünabilir kesme yağı, sıvı azot	Delaminasyondaki en yüksek değer kuru işlemede oluşmuş. Kriyojenik takım soğutma ile delaminasyon azaltılmış. Ultrasonik vibrasyon ve takım soğutma metodu ve itme kuvvetinin azalmasıyla delik hassasiyeti iyileştirilmiş. Girişte delaminasyon meydana gelmesine rağmen kullanılan yöntemler sayesinde çıkıştaki delaminasyon

Tablo 1: (devam ediyor)

Konneh vd.	2014	Surface Roughness Study of Milled Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Using 4 mm 2-Flute Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) Coated Carbide End Mills	Frezeleme	CFRP	TiAlN kaplamalı karbür parmak freze takım	Kuru işleme	İş mili hızının ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi görülmüş. Kesme genişliği üzerine görülmemiş. En az yüzey pürüzlülüğü değerini elde edebilmek için, yüksek kesme hızı 3500 dev/sn, yüksek ilerleme oranı 15 mm/dak ve kesme genişliği 100 µm olduğu tespit edilmiş. Kesme hızı ve ilerleme oranı işleme parametrelerinde baskın bir faktör olmuş.
Chen vd.	2013	Influence of Mill Geometry on Cutting Force and Surface Morphology of Multidirectional Cfrp	Frezeleme	CFRP	CVD elmas kaplamalı çift helis ve çok kenarlı freze takımı	Kuru işleme	Yüzey pürüzlülüğü çift helis takımında istenilen değerlere ulaşılmasına rağmen havacılık uygulamaları için öngörülen 3.2 µm çok kenarlı takımında daha yüksek elde edilmiş. Yüzey kalitesi gelişimi için ilerleme oranının azaltılması gerektiği bildirilmiş. Kesme parametrelerinde yüzey morfolojisinin değişeceği, çift helisli takımında daha iyi yüzey elde edildiği ve yüzey pürüzlülüğünün ilerleme oranıyla artacağı, kesme hızıyla da azalacağı sonuçlarına varılmış.
Karpat ve Polat	2013	Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools	Frezeleme	CFRP	Elmas kaplamalı karbür takımlar	Kuru işleme	Radyal kuvvetler teğetsel kuvvetlerden önemli ölçüde daha büyük olmuş. Fiberler ve takım kenar radyüsü ile yanak yüzey arasındaki temastan kaynaklanmış. Yüzey kalitesi doğrudan takım durumuna bağlı olmuş. Karbon fiberlerin aşındırıcı yapısı nedeniyle, kenar yuvarlama ve kırılmanın elmas kaplamada freze kuvvetlerini etkilediği sonucuna varılmış.
Hagino ve Inoue	2013	Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End-Milling	Frezeleme	CFRP	Farklı helis açılı tungsten karbür takımlar	Kuru işleme	Malzemede, eksenel kuvvetin büyük olmasından kaynaklanan tüylenme meydana gelmiş, ancak 0° helis açılı takımında tüylenme ile ilgili herhangi bir kusur görülmemiş, 90° fiber açılı malzemede düzgün bir yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş. İlerleme ve itme kuvvetleri f ₀ 'ından önemli ölçüde etkilenmiş. 0° helis açısına sahip takım en düşük kesme kuvvetine sahip olmuş. Bütün takımlarda yanak aşınması küçük değerler göstermiş.
Khairusshima vd.	2013	Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic	Frezeleme	CFRP	Kaplamasız karbür kesici takım	-10°C sıcaklıkta 4.10 m/s akış hızında vorteks tüpü uygulaması	CFRP kompozitin işlenmesi sırasında kesme sıcaklığı soğuk hava uygulamasıyla azalmış ve takımın ömrü uzamış. Karbon fiberin aşındırıcı yapısından kaynaklı, soğuk hava uygulanmış takımın aşınmış alanında pürüzsüz ve parlak bir görünüm elde edilmiş. Yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon hasarında CFRP kompozit malzemesinin soğuk hava ile uygulanması daha iyi olmuş.

Tablo 1: (devam ediyor)

Sheikh-Ahmad vd.	2012	Machining Damage in Edge Trimming of CFRP	Frezeleme	CFRP	Piramit görünümlü kesici takım	Kuru işleme	İşlenmiş yüzeyler sadece kesme koşullarına bağlı olmamış aynı zamanda foa'nada bağlı olmuş. Tüyenme ve fiber ayrılması biçimindeki hasarlar yüzeyde oluşmuş. Yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon bakımından en iyi işlenmiş yüzey kalitesinin küçük ilerleme oranında, büyük kesme hızında bulunmuş.
Haiyan vd.	2012	Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber-reinforced plastics	Frezeleme	CFRP	TiAlN kaplamalı kesici takım	Kuru işleme	CFRP kompozit malzemenin performansının hemen hemen her yönden diğer malzemelerden farklı olduğu görülmüş. Radyal bileşke ve eksenel kesme kuvvetleri, diş başına ilerleme ile birlikte eksenel ilerleme oranını arttırmış ve kesme hızının artmasıyla da azalmış. Büyük takım aşınması büyük kesme kuvvetlerine neden olmuş.
Chatelain ve Zaghbani	2012	Effect of Tool Geometry Special Features on Cutting Forces of Multilayered CFRP Laminates	Frezeleme	CFRP	Çapraz kesim ve oluk dişli takımlar	Kuru işleme	Kesici takımdaki oluklar eksenel kuvveti azaltmış ve ilerleme ile normal kesme kuvvetlerini düşürmüştür. Kesme kuvvetlerinin kesici performanslarında iyi bir gösterge sağlamış.
Khairusshima vd.	2012	The Effect of Milling Parameters on Laminated Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP)	Frezeleme	CFRP	Kaplamasız karbür parmak freze	Kuru işleme	CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde takım ömrü açısından düşük kesme hızı ve ilerleme oranında yapılması uygun görülmüş. Yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal hassasiyet açısından yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme oranında daha iyi sonuçlanmıştır.
Karpat vd.	2012	Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates	Frezeleme	CFRP	PCD takımlar	Kuru işleme	İlerlemenin artmasıyla teğetsel ve radyal yönlerdeki freze kuvvetleri artmış. Maksimum radyal kesme kuvveti katsayısı 140° fiber kesme açısında ve maksimum teğetsel kesme kuvveti katsayısı 120° fiber kesme açısında meydana gelmiş. Frezeleme sırasında düşük işleme kuvvetleri 45°/135° foa'ında bulunmuş.
Kalla vd.	2010	Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers	Frezeleme	CFRP	Karbür helisel freze takımı	Kuru işleme	Kesme kuvvetlerinde tek yönlü tabakalarda meydana gelen kesme işleminde iyi sonuçlar elde edilmiş. Çok yönlü tabakalarda ise istenilen sonuçlar elde edilememiş.
Lacalle vd.	2009	Design and Test of a Multitooth Tool for CFRP Milling	Frezeleme	CFRP CFRP+Kevlar	Helisel parmak freze, Nanoyapılı TiAlN-CSi kaplama, PCD kesici takım	Kuru işleme	Yüksek kesme kuvvetleri kesici kenarlar tarafından yüksek aşınmaya maruz bırakılmış. NaCO takımın ilgi çekici bir özelliği olmamış. Tek katlı AlTiN veya AlCrN kaplamaları daha iyi bir seçenek olmuş. Takımların sert aşınmaya maruz kaldığı zaman kötü bir kesim oluşmuş. PCD kesici takımlarda istenilen yüksek verimlilik derecesi elde edilememiş. En iyi takım ömrü TiAlN kaplamalı çok dişli takımda tespit edilmiş. PCD takımların yeterli koşullara ulaşamadığı ancak çok dişli freze takımlarının CFRP kompozit malzemesi için uygun olduğu vurgulanmıştır.

Tablo 1: (devam ediyor)

Davim ve Reis 2005	Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments	Frezeleme	CFRP	Farklı oluklu karbür takımlar	Kuru işleme	Yüzey pürüzlülüğü ilerleme oranının artmasıyla ve kesme hızının azalmasıyla artmış. Delaminasyon faktörü ilerleme oranının artmasıyla artmış. 6 oluklu freze takımında kesme hızının artmasıyla delaminasyon faktörü artmış. 2 oluklu takımla CFRP kompozit malzeme daha az hasar almış.
Hocheng vd. 1993	Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics	Frezeleme	CFRP	Yekpare kesici takım	Kuru işleme	Düşük ilerleme oranında ve yüksek kesme hızında yüzey pürüzlülüğü artmış. İlerleme oranlarına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde artış olmuş. Fiber eksenine paralel kesme yönü frezelemesi tavsiye edilmiş.
Maegawa vd. 2016	Mechanism for changes in cutting forces for down-milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates: Modeling and experimentation	Frezeleme	CFRP	Tungsten karbür ve PCD takımlar	Kuru işleme	PCD takım WC-Co takımdan daha uzun takım ömrü ve takım aşınması bakımından üstün olduğu vurgulanmış. WC-Co takımın sürtünme katsayısıyla ($\mu=0,3$), PCD takımın katsayısının ($\mu=0,26$) yakın olduğu tespit edilmiş. Tüm kesme koşullarında kesici takımların kenar profillerinde büyük yuvarlaklık bulunmuş.
Jia vd. 2016	Temperature Effects in End Milling Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites	Frezeleme	CFRP	PCD takım	Kriyojenik nitrojen gazı ve kuru işleme	Yüzey pürüzlülüğü değerleri sıcaklık ile doğrudan orantılı olmuş. Fiberler ile reçine matris talaş yüzeyi ve freze çıkışı kesici kenarı tarafından baskıya maruz kalmış. Çok yönlü CFRP kompozit malzeme frezeleme iyi yüzey bütünlüğü ve çok az alt yüzey hasarı elde edilmiş.
Zenia vd. 2015	Numerical analysis of the interaction between the cutting forces, induced cutting damage, and machining parameters of CFRP composites	FE modelleme	CFRP	-----	-----	Minimum kesme kuvveti değeri 0° ve 45° foa'da maksimum değer 90° foa'da oluşmuş. Foa'nın artmasıyla hasar oluşmuş. Kesme kuvveti ve hasar oluşumunda tek yönlü CFRP kompozit malzemesinde dikey (orthogonal) kesme işleminde yüksek oranda foa'na bağlı olmuş.
Wang vd. 2015	Roughness modelling analysis for milling of carbon fibre reinforced polymer composites	Frezeleme	CFRP	PCD takım	Kuru işleme	İlerleme oranındaki artışla beraber pürüzlülük artmış. İş mili hızının artmasıyla yüzey kalitesi kötüleşmiş. İlerleme hızı kompozitlerin işlenmesinde pürüzlülüğü etkileyen baskın bir faktör olmuş.
Çelik vd. 2015	Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites	Delme	CFRP	SiAlON, WC-Co	Kuru işleme	CFRP kompozitteki hasar kesme parametreleri ve takım geometrisi tarafından oluşmuş. İlerleme oranının artmasıyla delaminasyon faktörü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti artmış. WC-Co takımında delaminasyon oranı azalmış, deliklerde oluşan delaminasyon oranının tüm delme takımının kesici kenarlarındaki aşınma miktarı ile doğrudan orantılı olarak artmış ve itme kuvveti bu duruma neden olmuş.

Tablo 1: (devam ediyor)

Henerichs vd. 2015	Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces	Tornalama	CFRP	Kaplamasız karbür kesici takım	Kuru işleme	İşleme kuvvetleri ve aşınma iş parçası hasarlarına neden olmuş, boşluk açısının artırması ilerleme kuvvetini azaltmış, düşük işleme kuvvetleri abrasiv aşınma miktarını azaltmış, küçük kama açılı ve büyük boşluk açılı takımlarla daha düşük işleme kuvvetleri elde edilmiş. İyi bir aşınma direnci elde etmek için büyük boşluk açıları gerekli olmuş, yüzey pürüzlülüğü boşluk açısı ile artmış.
Gaiyun vd. 2015	Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters	Frezeleme	CFRP/Ti-6Al-4V	4 ağızlı freze takımı	Kuru işleme	İş mili hızının artmasıyla kesme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiş. Yüzey kalitesi açısından Ti-6Al-4V malzemesinin daha kaliteli olduğu CFRP kompozit malzemesinin ise zayıf bir yüzey bitirme işlemi gerçekleştirdiği belirtilmiştir.
Qi vd. 2015	Microscopic mechanism based force prediction in orthogonal cutting of unidirectional CFRP	Delme Frezeleme Tornalama	CFRP	Sementit karbür kesici takım	Kuru işleme	Foa'nın kuvvetler üzerinde önemli bir etkisi olmuş, foa'nın artmasıyla kesme kuvvetleri artmış. Kesme genişliği ve talaş açısının, itme kuvvetlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmış.
Schorník vd. 2015	The Influence of the Cutting Conditions on the Machined Surface Quality When the CFRP is Machined	Frezeleme	CFRP	Parmak freze takımı	Kuru işleme	Yüzey kalitesinde ilerleme oranı ve kesme hızı iyi bir kombinasyon oluşturmuş. Yüksek kesme sıcaklığı malzemenin mekanik özelliklerini etkilemiş ve maksimum sıcaklığın takımın kesici kenarında olmasına rağmen polimer matrisin düşük sıcaklıkta olması kompozit malzemede dayanımı ve sertliği azaltmış.
Çelik vd. 2015	Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites	Delme	CFRP	SiAlON, helisel matkap ve PCD kaplamalı	Kuru işleme	İtme kuvveti delme işlemi sırasında artmış, SiAlON takımlarının kesici kenarlarında abrasiv aşınma meydana gelmiş, itme kuvveti ve tork kesici kenar geometrik özelliklerine bağlı kalmış, kesici takımın uç açısı ve uç kesici kenarı CFRP kompozitin delme işleminde maksimum itme kuvvetini saptamak için ana parametreleri oluşturmuş.
Rahim vd. 2014	Performance of Tools Design when Helical Milling on Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Aluminum (Al) Stack	Frezeleme	CFRP/Al	Sementit karbür kesici takım	Kuru işleme	İlerleme oranının artmasıyla kesme kuvveti artmış ve alüminyum plakasında itme kuvveti yükselmiş. Yüksek iş mili hızı takım ve talaş arasındaki arayüzey temasını azaltmasıyla sürtünme katsayısını azaltmış. Yüksek ilerleme oranları Al malzemede yüksek değerlerde yüzey pürüzlülüğü üretmiş. Yüksek kalitede delikler elde edilmiş ve CFRP/Al malzemenin yüzey pürüzlülük değerleri havacılık sanayinde kabul edilebilir aralıklarda bulunmuş.
Kitajima vd. 2014	Development of PCD milling tool for carbon-fiber-reinforced plastics	Frezeleme	CFRP	PCD takım	Kuru işleme	Artan kesme genişliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü istenilen seviyede oluşmuş. Kesme koşulları ilerlediğinde takımın inceliğinden dolayı takımın kırılma oluşmuş. PCD takımın gerçekleştirilen CFRP kompozitin işlenmesinin uygun olduğu sonucuna varılmış.

Tablo 1: (devam ediyor)

Haddad vd.	2014	Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range	Frezeleme	CFRP	4 oluklu, elmas kaplamalı ve kaplamasız tungsten freze takımları	Kuru işleme	Yüzey kalitesi takım geometrisine ve kesme parametrelerine bağlı olmuş. Kesme hızı ve ilerleme oranının işleme sıcaklıkları üzerine sınırlı bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiş. Kaplamalı takımların kaplamasız takımlardan daha büyük bir kesme kenar radyüsü olmuş ve kaplama tabakasından kaynaklanmış.
Qin vd.	2014	Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model	Frezeleme	CFRP	TiAlN kaplamalı tungsten karbür kesici takım	Kuru işleme	İşleme parametreleri delaminasyon üzerinde önemli etkiler oluşturmuş. Delaminasyon faktörü; itme kuvvetini, ilerleme oranını, kesme hızını etkilemiş. Yüksek kesme hızında en iyi performans ve fiberler daha kolay bir şekilde kesilmiş. Fakat takım aşınması önlenememiş.
Lissek vd.	2014	Machining of Cfrp: Drilling and Milling of Unstable Work Pieces	Delme Frezeleme	CFRP	Tungsten karbür freze takımı	Kuru işleme	Delaminasyonun ana hasar olmadığı vurgulanmış. Freze takımlarından çift ağızlı takım yerine çok dişli kesici takımın kullanılması tavsiye edilmiş.
Kolar vd.	2014	Milling tools for cutting of fiber-reinforced plastic	Frezeleme	FRTC	PCD ve sementit karbür takımlar	Kuru işleme	Herhangi bir delaminasyon problemine rastlanmamış. PCD takımlar daha uygun olmuş ve daha uzun takım ömrü elde edilmiş. Karbür takımların fiber yapılarına daha duyarlı olduğu belirtilmiş.
Eneyew ve Ramulu	2014	Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites	Delme	CFRP	PCD takım	Kuru işleme	İtme kuvveti ve tork, tüm kesme hızlarında ve ilerleme oranında artmış. Kesme hızı artışıyla azalmış. Çıkıştaki delaminasyon faktörü her zaman giriştekenden daha fazla olmuş. Daha iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için düşük ilerleme oranları ve yüksek kesme hızları güçlü bir gösterge olmuş.
Zhang vd.	2013	Study of Surface Roughness in Milling Carbon Fiber Reinforced Plastics Using PCD Tool	Frezeleme	CFRP	PCD takım	Kuru işleme	Yüzey pürüzlülüğünün artması; kesme genişliğine ve ilerleme oranına bağlı olurken yüzey pürüzlülüğünün azalması kesme hızına bağlı olmuş. Yüzey pürüzlülüğüne kesme genişliğinin yüksek bir etkisi olurken ilerleme oranı en az etki eden parametre olmuş.
Ciecieląg ve Zaleski	2013	Comparative Study in The Passive Force and Cutting Torque in The Milling Process of Polymer Matrix Composites and Aluminum Alloys	Frezeleme	CFRP AlSi21CuNi 7075 alüminyum	PCD kesici takım	Kuru işleme	Bütün kuvvetler ilerleme oranının artmasıyla artmış. Düralümin malzemede kuvvetler azalmış, silümin ve CFRP kompozit malzemede bir değişiklik olmamış. İlerleme oranının artmasıyla birlikte kesme torku özellikle CFRP kompozit malzemede en yüksek değere ulaşmış.
Gong vd.	2013	Surface Morphology in Milling Multidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates	Frezeleme	CFRP	Çok kenarlı freze takımı	Kuru işleme	Yüzey pürüzlülüğü değerinin ilerleme oranı ile arttığı kesme hızıyla da azaldığı tespit edilmiş. Bu değer 3.2 µm fazla olduğu ve havacılık uygulamaları için uygun olmadığı belirtilmiş.

Tablo 1: (devam ediyor)

Pecat vd.	2012	Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP	Frezeleme	CFRP	Disk freze karbür kesici takım	Kuru işleme	Yüksek kesme hızında yüzeye çok yakın kısımda görülebilir bir fiber eğilmesi meydana gelmiş. Kesme hızının artmasıyla kesme kuvveti azalmış. 0° ve +45° foa'ında pürüzsüz bir yüzey elde edilmiş, -45° ve 90° foa'ında çatlaklar oluşmuş.
Santiuste vd.	2010	Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components	FE modelleme	GFRP CFRP	-----	-----	Nümerik analizinde GFRP ve CFRP kompozit malzemelerin matris yapısındaki deformasyon ve talaş oluşumu foa'larına bağlı olmuş. CFRP kompozit malzemenin havacılık uygulamalarında daha uygun olduğuna karar verilmiş.

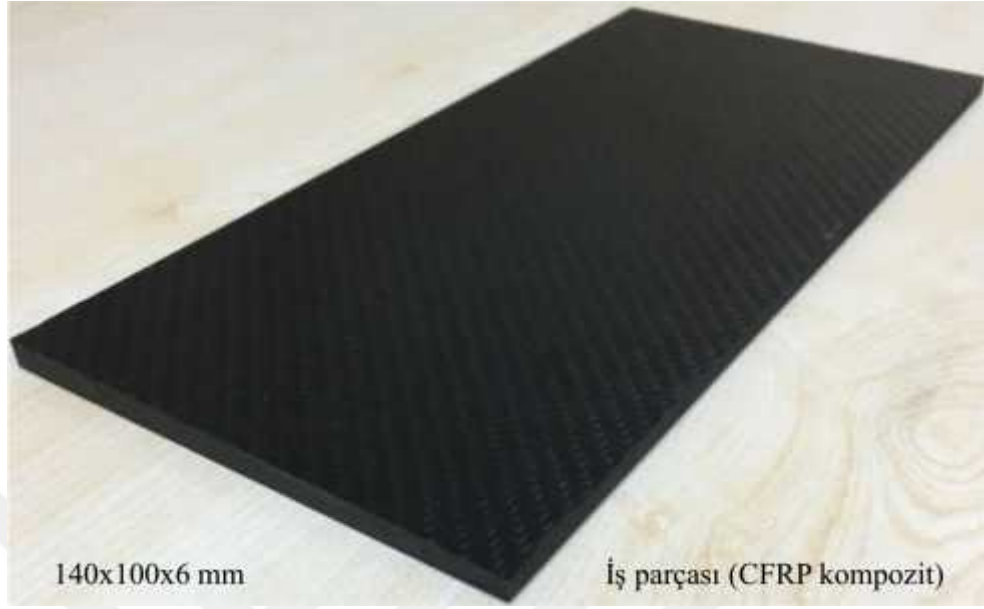
BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOD

Bu çalışma, çok yönlü ve ($0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}$)_s formlarındaki CFRP kompozit malzemenin WC-Co karbür kesici takımlarla işlenebilirliğinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi için kaplamasız karbür, PVD yöntemiyle kaplamalı nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlSiN, TiAlN ve TiN kesici takımlar belirlenmiştir. Çevresel frezeleme deneylerinde kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzeme üzerinde farklı kesme parametrelerinde kesme performansı ve aşınma davranışı incelenmiştir. Talaş kaldırma esnasında oluşan kesme kuvvetleri, talaş kaldırma işlemi sonrası ise iş parçası üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Kesici takımlarda meydana gelen aşınmaları gözlemlemek için takımların aşınma görüntüleri çekilmiştir. Ayrıca SEM, EDS ve elementel haritalama görüntüleri alınarak kesici takım kaplamalarının mikro yapısal incelemeleri ve ayrıntılı analizleri ile iş parçası incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

4.1 Deney Numunesi

Deneyisel çalışmalarda havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan çok yönlü CFRP kompozit malzeme iş parçası olarak kullanılmıştır (Şekil 23). $140 \times 300 \times 6$ mm ölçülerindeki CFRP kompozit malzeme $140 \times 100 \times 6$ mm ebatlarında CNC işleme merkezinde deney numunesi olarak hazırlanmıştır. Uçay ve havacılık endüstrisinde kullanılan parçaların yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek mukavemet, yüksek sertlik, düşük ağırlık ile birlikte sağlamlık ve korozyon direncine sahip olan CFRP kompozit malzemeleri kullanılmaktadır (Slamani vd., 2015).



Şekil 23: Çevresel frezeleme deneylerinde kullanılan CFRP kompozit malzemenin görüntüsü.

Çevresel frezeleme deneylerinde kullanılan CFRP kompozit malzemeye ait özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: CFRP kompozit malzeme özellikleri.

Dokuma tipi	Twill 2×2
Kumaş ağırlığı	200 gr/m ²
Fiber hacim oranı	% 50
Tabaka sayısı	24
Fiber oryantasyon açısı	(0°/45°/90°/-45°) _s
Her bir tabakanın kalınlığı	~ 0,2 mm
Reçine tipi	Epoksi
Karbon fiber tipi	Yüksek sağlamlık (HT)
Demet sayısına göre filamentlerin sayısı	3K
Üretim yöntemi	Vakum torbalama

4.2 Kesici Takımlar

CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi için Sandvik coromant firmasından temin edilen kesme derinliği (a_p) maksimum 10 mm olan kesici takımlar kullanılmıştır. CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi için kullanılan kesici takımların gerçek görüntüleri Şekil 24’de verilmiştir. Değiştirilebilir kesici takımlar ISO 1832’ye uygun olarak belirlenmiştir.



Şekil 24: Kesici takımların görüntüsü.

Çevresel frezeleme işlemlerinde kullanılan kesici takımların listesi Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3: Frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar ve özellikleri

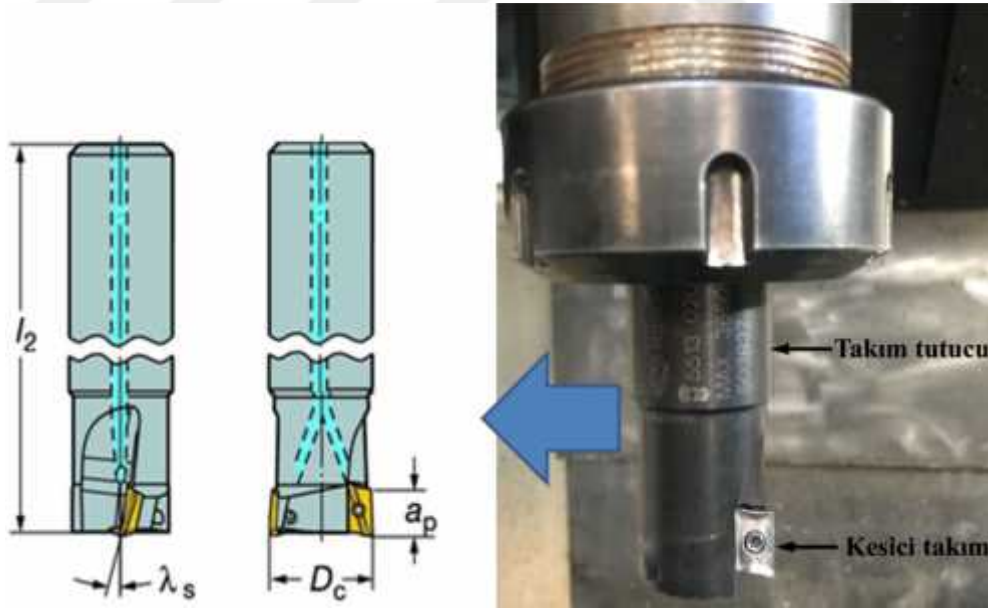
No	Takım Türü	Kodu	Kalitesi	Kaplama türü
1	Sementit karbür (WC-Co)	R390-11 T304E	NL H13A	Kaplamasız
2	PVD kaplamalı WC-Co	R390-11 T304E	NL H13A	nl-AlTiN/TiN
3	PVD kaplamalı WC-Co	R390-11 T304E	NL H13A	nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlSiN
4	PVD kaplamalı WC-Co	R390-11 T304E	NL H13A	TiAlN
5	PVD kaplamalı WC-Co	R390-11 T304E	NL H13A	TiN

TiAlSiN/TiSiN/TiAlN ve AlTiN/TiN kaplamaların sahip olduğu yüksek sertlik, pürüzsüzlük, düşük artık gerilme ve 1100 °C’ye kadar kimyasal kararlılık, bu kaplamaları yüksek işleme operasyonları için öne çıkarmaktadır. Nanokompozit ve nanotabakalı yapılar, oluşan çatlakların enerjisinin dağıtılmasını sağladığından ve çatlak ilerlemesini geciktirdiğinden

dolayı, tok bir yapı elde edilmesini ve kaplamanın ömrünün artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bu kaplamaların sürtünme katsayıları, yüzey pürüzlülükleri volfram karbürler (WC) göre daha düşük olması ve sertliklerinin WC'e göre daha yüksek olmalarından, ayrıca titanyum esaslı bileşenlerin aşınmaya karşı aşınma direncini iyileştirmesinden dolayı bu tez çalışmamızda tercih edilmiştir (Ducros ve Sanchette, 2006; Panjan, 2010; Mkaddem vd., 2013).

4.3 Takım Tutucu

Seçilen kesici takımların freze iş miline bağlanmasında, iki ağızlı Sandvik coromant firması tarafından üretilmiş olan R390-025A25-11L kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Kesme çapı 25 mm olan takım tutucu biçimi ise ISO 5608 referans alınarak seçilmiştir. Sabit kesme şartlarının sağlanabilmesi amacı ile deneyler takım tutucu üzerinde sadece bir kesici takım varken gerçekleştirilmiştir (Şekil 25).



Şekil 25: Deneylerde kullanılan takım tutucu.

4.4 Frezeleme İşlemi

Deney numunelerinin çevresel frezeleme işlemleri 3 eksenli 10 kW gücüne sahip olan Falco VMC 850-B CNC dik işleme tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Şekil 26).

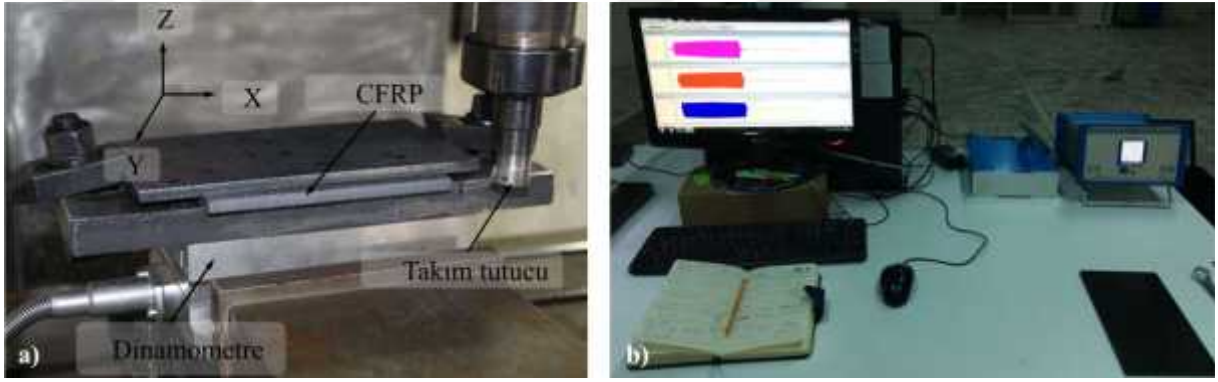


Şekil 26: Deneylerde kullanılan CNC dik işleme merkezi ve deney düzeneğinin genel görüntüsü.

4.5 Kesme Kuvveti Ölçümü

Deney numunesinin çevresel frezelenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin ölçümü için dinamometre (Kistler 9257B) ve amplifikatör (Kistler 5070) kullanılmıştır. Talaş kaldırma uygulamasında, verilen bir koordinat sisteminde kesme işlemleri esnasında oluşan kesme kuvveti elemanları ölçümü dinamometreler ile ölçülmektedir (Youssef ve El-Hofy, 2008). Dinamometre tezgâh üzerine monte edildikten sonra dinamometrenin arasındaki imal edilen

elik plakaya vidalanarak bağlanmıştır. CFRP kompozit malzemenin dinamometre üzerine monte edilmiş hali ve diğer veri aktarma elemanlarının görüntüsü şekil 27’de gösterilmiştir. Ayrıca, dinamometrenin ölçüm yaptığı eksenler ve yönleri şekil 27a’da gösterilmiştir. Kesme işlemi deneyleri esnasında, CFRP kompozit malzeme iş parçasının 140 mm kesme uzunluğu boyunca elde edilen kesme kuvvetleri bilgisayara kaydedilmiştir. Deneylerde, dinamometre yardımı ile tezghın x, y ve z eksenleri doğrultusunda meydana gelen F_x , F_y ve F_z kesme kuvveti bileşenleri llmştir. Elde edilen veriler, Dyno Ware programı ile grafikleri alınmıştır (şekil 27b).



şekil 27: Dinamometre ve veri aktarma elemanlarının görüntüsü.

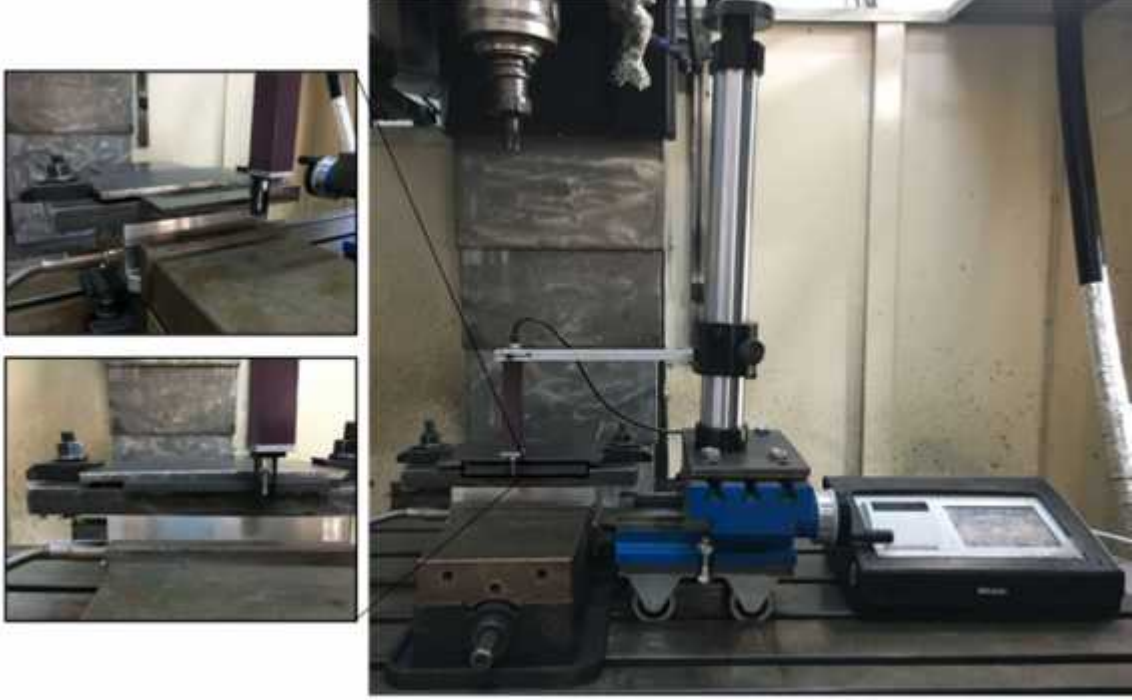
Her bir test için farklı saniyelerde kesme kuvveti sinyali alınmıştır. Bu sinyaller bilgisayara kaydedildikten sonra, amplifikatör sıfırlanmış ve diğer kesme işlemine geçilmiştir. Elde edilen kesme kuvveti bileşenlerinin ortalaması alınmış ve bileşke kesme kuvvetleri (F_R) hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

4.6 Yüzey Pürüzlülüğü lm

CFRP kompozit deney numunesi frezelendikten sonra yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi için şekil 28’de fotoğrafı verilen Mitutoyo Surftest SJ-310 uçlu yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılmıştır. Talaş kaldırma işleminden sonra, CFRP kompozit malzeme kenarının beş farklı

yerinden ardışık olarak ölçümler yapılmıştır. Beş farklı değerlerin ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 28: CFRP kompozit malzemenin beş noktasından alınan uçlu tip yüzey pürüzlülük cihazının ölçüm görüntüsü.

4.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

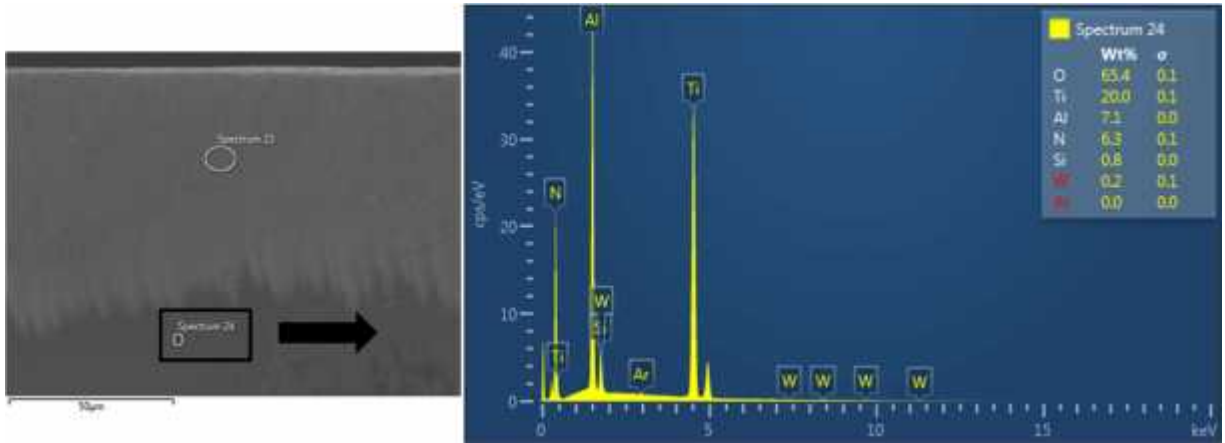
CFRP kompozit malzemedeki hasarların ve delaminasyonların ölçülmesi, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımların yüksek büyütme oranlarında aşınma fotoğraflarının çekilmesi için Şekil 29’da görülen TESCAN firması tarafından üretilen MAIA3 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 29: TESCAN-MIA13 model taramalı elektron mikroskop cihazının görüntüsü.

4.8 Enerji Dağılımlı Spektrometre (EDS)

Kesici takımlardaki kaplamaların karakterizasyonunda ve aşınmış kesici takımların aşınma bölgelerinde meydana gelen durumların element analizini yapmak amacıyla taramalı elektron mikroskobu üzerine monte edilmiş olan Oxford Instruments X-Max50 model enerji dağılımlı spektrometre kullanılmıştır (Şekil 30).



Şekil 30: Kesici takımın SEM görüntüsü ve EDS analizi.

4.9 Kaplama Cihazı

CFRP kompozit malzemenin SEM cihazından görüntüsünün daha kaliteli alınabilmesi (hızlandırılmış elektronların iş parçasına gönderilmesinde epoksi reçinenin olumsuz (elektron yüklenmesi) davranışını engellemek) için iş parçası üzerine ~10 nm kalınlığında altın/paladyum (Au/Pd (80:20)) karışımı sıçratma yöntemiyle oda sıcaklığında kaplanmıştır. CFRP kompozit malzemenin kaplama işleminde Şekil 31'deki Quorum markalı Q150T-ES modelindeki kaplama cihazı kullanılmıştır.



Şekil 31: Au/Pd kaplamasında kullanılan Q150T-ES modelindeki kaplama cihazının görünümü.

4.10 Ön Deneylerin Yapılması ve Elde Edilen Bulgular

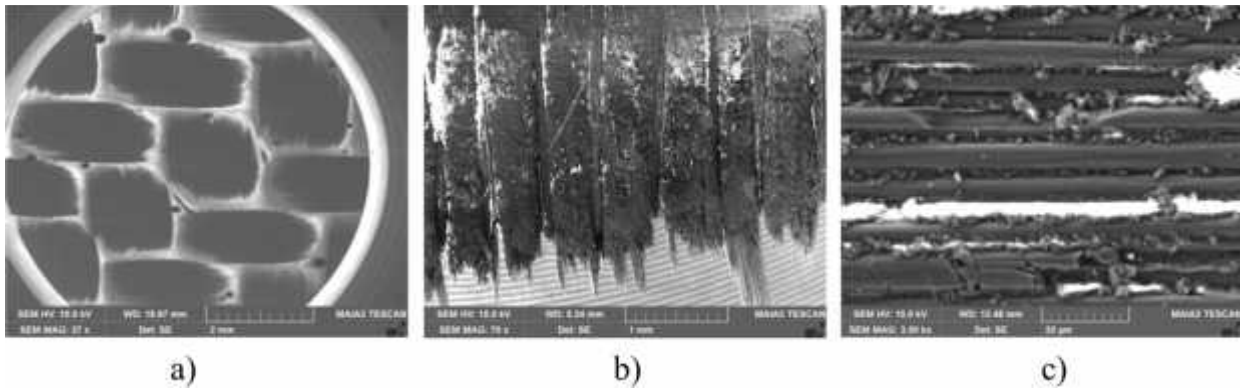
İşleme parametreleri, kesici takım üretici firmasının kataloğu (Sandvik coromant) ve CFRP kompozit ile çalışan firmaların önerileri, literatür verileri dikkate alınarak farklı kesme hızları, ilerleme oranları ve sabit kesme genişliği belirlenmiştir. Kesme genişliği tüm kesici takımlar için 1 mm olarak belirlenmiştir. İlerleme oranı tüm takımlar için 0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş olarak belirlenmiştir. Kesme hızları ise katalog değerlerinden faydalanarak ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kesme performansları araştırılacak olan karbür kesici takımların hangi işleme parametrelerinde test edileceğinin belirlenmesi ve belirlenecek olan işleme parametrelerinin aşınma davranışına olan etkisini incelemek amacıyla CFRP kompozit malzeme üzerinde ön kesme deneyleri yapılmıştır (Şekil 32).



Şekil 32: Çevresel frezeleme işleminde ön kesme deneyi.

4.10.1 Kaplamasız Karbür Kesici Takım Ön Deneyleri

Ön frezeleme deneylerinde kullanılan CFRP kompozit malzeme, minimum f_{ho} % 50 olan 3K twill dokuma yapısına sahip prepregler kullanılarak üretilmiştir. $140 \times 100 \times 6$ mm ölçülerinde, quasi-isotropic yapıda ve $(0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ)$ s foa'larındadır. SEM kullanılarak, kompozit iş parçasının yüzey ve kesit görüntüleri elde edilmiştir. SEM görüntülerinde karbon fiber yapısı ve foa'ları daha detaylı incelenerek yapıları hakkında genel bilgi edinilmiştir. CFRP kompozit malzemedeki fiber yapılarının detaylı görüntüsü Şekil 33'de verilmiştir.



Şekil 33: CFRP kompozit malzeme SEM görüntüleri; a) Twill dokuma yapısı, b) Foa'ları, c) Fiberlerin yapısı.

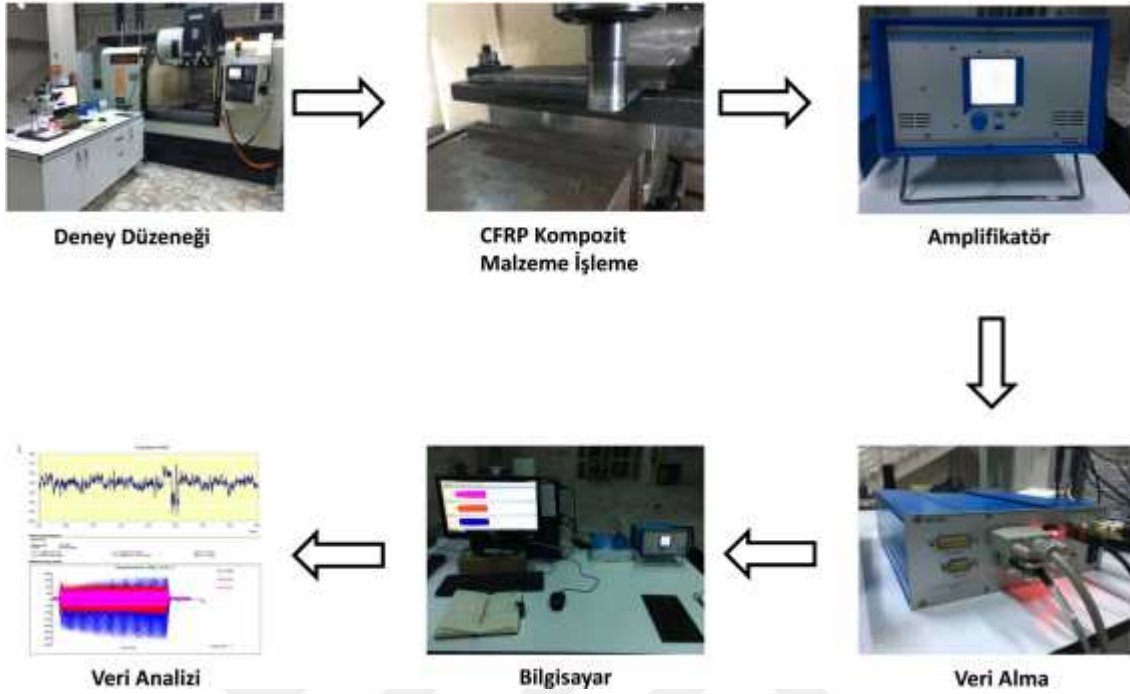
CFRP kompozit iş parçası üzerinde, kaplamasız kesici takımlarla ön kesme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan 25 mm kesme çapına sahip olan takım tutucuya tek bir kesici takım monte edilmiştir. Kesme işlemleri farklı kesme testlerinde; beş farklı kesme

hızında (50, 100, 200, 300 ve 400 m/dak), üç farklı ilerleme oranında (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve sabit eksenel kesme derinliği ($a_p = 6$ mm) ile radyal kesme genişliğinde ($a_e = 1$ mm) uygulanmıştır. Ön deneylerde 50 ve 400 m/dak kesme hızlarında istenilen performans elde edilemediği için 50 ve 400 m/dak kesme hızları parametreleri sonradan deneylerde kullanılmamıştır. 50 m/dak kesme hızında iş parçası yüzeylerinde yıpranma ve tüylenmeler oluşmuştur. 400 m/dak kesme hızında deney esnasında çok fazla titreşim meydana gelmiştir. Bu titreşime bağlı olarak F_y (radyal kesme kuvveti) değeri aşırı bir artış göstermiş olduğundan bu kesme parametresi deney dışı bırakılmıştır. Ayrıca, yukarıda belirtildiği gibi konuyla ilgili çalışma yapan araştırmacıların literatürleri göz önünde bulundurulmuştur. İşleme parametreleri etkileyen parametreler; kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme genişliğidir.

Tablo 4: İşleme parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
(V _c) Kesme hızı (m/dak)	50	100	200	300	400
	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
(f _z) İlerleme oranı (mm/diş)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
(a _e) Radyal kesme genişliği (mm)	1	1	1	1	1
(a _p) Eksenel kesme derinliği (mm)	6	6	6	6	6

Kesme kuvveti deneylerinde, CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı yapısından dolayı, delaminasyon ve takım aşınmasına neden olan kesme kuvvetlerinin araştırılması amaçlanarak kesme parametrelerinin bileşke kesme kuvveti (F_R) üzerine etkisi incelenmiştir. Deneyler kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri dinamometre (Kistler 9257B) yardımıyla ölçülmüş ve dinamometre çıkışına çok kanallı amplifikatör (Kistler 5070) bağlanmış ve bir PC ile 1000 Hz'de veriler elde edilmiştir. Daha sonra Dyno Ware yazılımı ile sonuçlar analiz edilmiştir (Şekil 34).

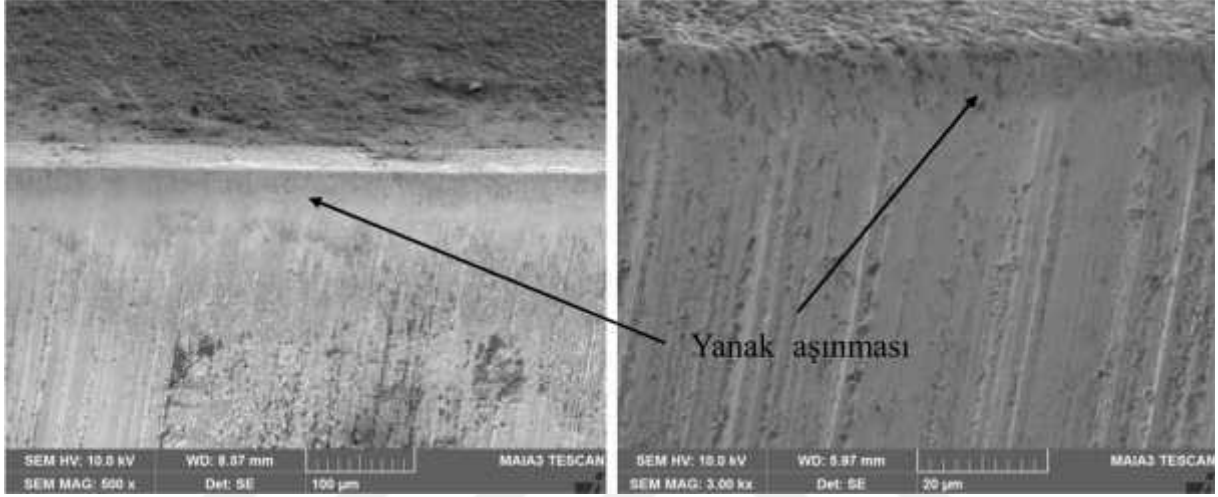


Şekil 34: Deney düzeneğinin genel görünümü ve veri elde etme görüntüsü.

Kuvvet ölçümlerinde kesme uzunluğu 140 mm olarak belirlenmiştir. Testlerde F_x , F_y ve F_z kesme kuvveti bileşenleri ölçülmüştür. Tabla hızına bağlı olarak kesme kuvveti sinyalleri her bir kesme testi için farklı sürelerde kaydedilmiştir. Her kesme kuvveti bileşeni için, ölçülen maksimum kesme kuvvetlerinin ortalaması kullanılmıştır. Kesme kuvvet bileşenlerinin ölçümünden sonra bileşke kesme kuvveti $F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$ eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Kaplamasız kesici takımla uygulanan ön kesme deneyleri neticesinde, titreşim, ısı oluşumu, işlenecek malzemenin ince olması ve sürtünme eğilimini azaltmak amacıyla geleneksel frezeleme şartları (aşağı yönlü frezeleme) uygulanmıştır (Çakır, 2010; Gavas vd., 2013).

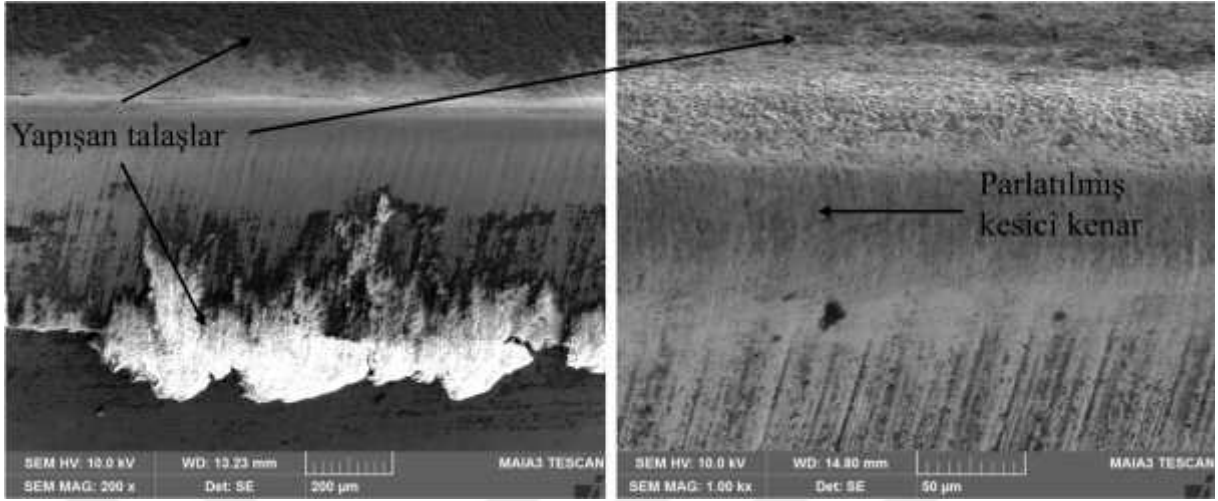
Ön frezeleme deneylerinde düşük ($V_c = 100$ m/dak ve $f_z = 0,05$ mm/diş) ve yüksek ($V_c = 300$ m/dak ve $f_z = 0,25$ mm/diş) kesme koşulları belirlenmiştir. Bu kesme koşulları altında, kesme prosesi boyunca kesme kuvvetlerinin oluşumu karşılaştırılmıştır. Aşağı yönlü frezeleme işleminden dolayı, kesme kuvvetleri maksimum bir değerden başlamıştır. Kesici takım/iş parçası temasının bittiği noktaya doğru ise azalış göstermiştir. Talaşlı imalat esnasında düşük seviyede ses oluşumu olmuştur. Minimum kesme kuvvetleri bakımından en uygun kesme

parametreleri $V_c = 100$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranı olarak elde edilmiştir. Çevresel frezeleme işleminde kaplamasız kesici takımlar ile $V_c = 100$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında CFRP kompozit malzemenin abrasiv yapısından dolayı yanak aşınması tespit edilmiştir (Şekil 35).



Şekil 35: $V_c = 100$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kaplamasız kesici takımlardaki yanak aşınmanın SEM görüntüsü.

Yanak aşınması kesme hızının ve ilerleme oranının artmasıyla artış göstermiştir. Yüksek kesme şartlarında ($V_c = 300$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranı) abrasiv aşınmanın artması nedeniyle iş parçasının işlenmiş yüzeyinin yüzey kalitesinin azalmasına neden olmuştur. Kaplamasız kesici takımında kesici kenar yanak aşınmasına bağlı olarak parlak bir görünüme kavuşmuş ve iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışması (yığıntı talaş (YT), built up edge (BUE)) gözlenmiştir (Şekil 36).



Şekil 36: $V_c = 300$ m/dak kesme hızı ve $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kaplamasız kesici takımlardaki yanak aşınmanın SEM görüntüsü.

4.10.2 İşleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Yapılan ön frezeleme deneylerinden sonra tüm deneylerde Tablo 5'deki işleme parametrelerine karar verilmiş ve üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme oranı ve sabit eksenel kesme derinliği ile radyal kesme genişliği belirlenmiştir.

Tablo 5: Çevresel frezeleme deneylerinde kullanılan deneysel parametrelere ait veriler.

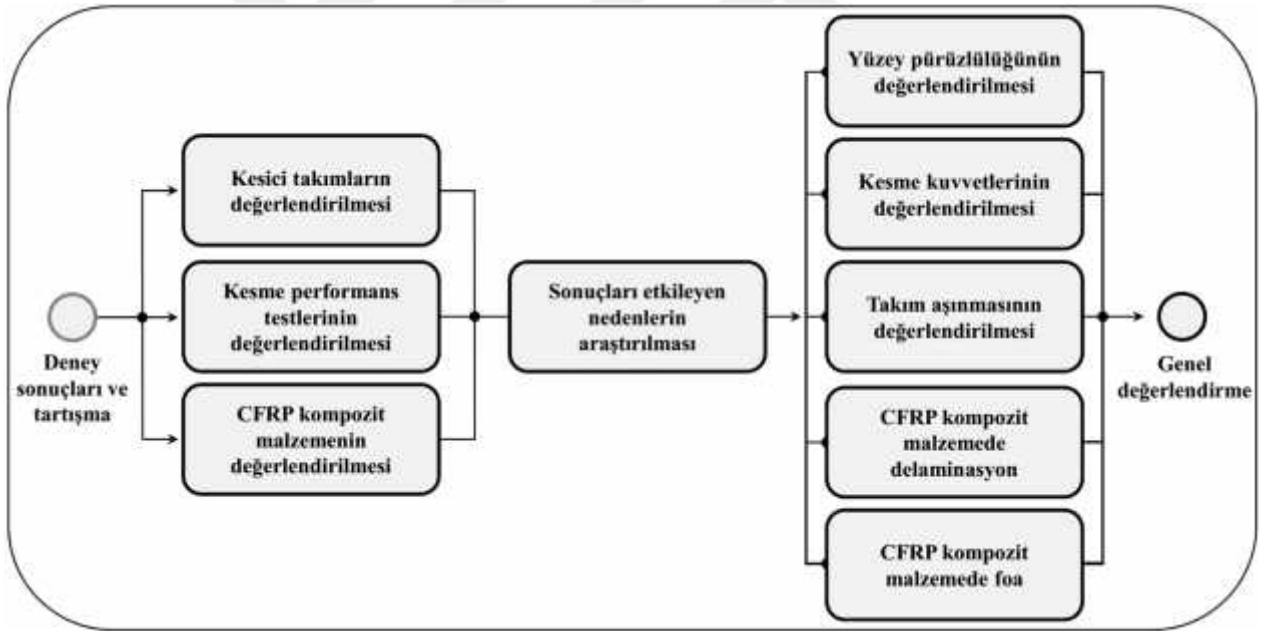
Test No	V_c [m/dak]	f_z [mm/diş]	a_e [mm]	a_p [mm]
1	100	0,050	1	6
2	200	0,050	1	6
3	300	0,050	1	6
4	100	0,150	1	6
5	200	0,150	1	6
6	300	0,150	1	6
7	100	0,250	1	6
8	200	0,250	1	6
9	300	0,250	1	6

Tüm takımlar belirlenen kesme hızı ve ilerleme oranlarında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Her bir kesici takım ile 9 ayrı test yapılmıştır. Her bir test 20 paso (tekrarlı) yapılarak toplamda 180 paso kaldırılmıştır. Her 10 paso işlenmesinden sonra numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır. Çevresel frezeleme işleminden sonra 140 mm uzunluğundaki CFRP kompozit malzemenin yüzey pürüzlülüğü değerleri Mitutoyo Surftest SJ-310 uçlu tip yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Frezeleme işlemi sırasında harici vakum toplama makinesi çalıştırılarak çıkan CFRP kompozit malzeme tozları toplanmıştır. Daha sonra CFRP kompozit malzeme üzerindeki talaşlar hava tutularak temizlenmiştir. İşlenmiş malzeme yüzeyinden beş farklı noktadan alınan pürüzlülük değerlerinin ortalaması kaydedilmiştir. Pürüzlülük cihazı, üç ekseninde (x, y, z) hareket eden sonsuz vidalı aparat üzerine yerleştirildiğinden dolayı pürüzlülük verilerinin ölçüm hatası minimum seviyede tutulmuştur. Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmelerinde uzay ve havacılık oranı olan R_a değeri temel alınarak (CFRP « 3,2 μm) ölçümler gerçekleştirilmiştir (Richards vd., 2007; Isbilir ve Ghassemieh, 2012; Abdul Rahim vd., 2014; Xu vd., 2014).

BÖLÜM 5

DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

CFRP kompozit malzeme çevresel frezeleme işleminde, nl-AlTiN/TiN, çok tabakalı nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, konvansiyonel tek tabakalı TiAlN ve TiN kaplamalı karbür kesici takımlarla birlikte kaplamasız karbür takımların işlenebilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, elde edilen veriler analiz edilmiştir. Deney/analiz sonuçları ve tartışma bölümünün akış şeması Şekil 37’de verilmiştir. Çevresel frezeleme işlemlerinde kuru kesme işlemi uygulanarak soğutma sıvısı ihtiyacı ortadan kaldırılmış, çevreye duyarlı sürdürülebilir kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 37: Deney/analiz sonuçları ve tartışma bölümü akış şeması.

Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla, belirlenen işleme parametrelerine bağlı olarak CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi esnasında oluşan yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri, kesici takım aşınmaları ve iş parçası malzemesi üzerine oluşan deformasyonlar değerlendirilmiştir. CFRP kompozit malzemenin kesici takım performansına

etki eden sebeplerin araştırılması amacıyla kesici takımların ve iş parçasının mikro yapıları incelenmiştir.

5.1 Farklı Kesme Hızlarında Elde Edilen Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerindeki Değişim

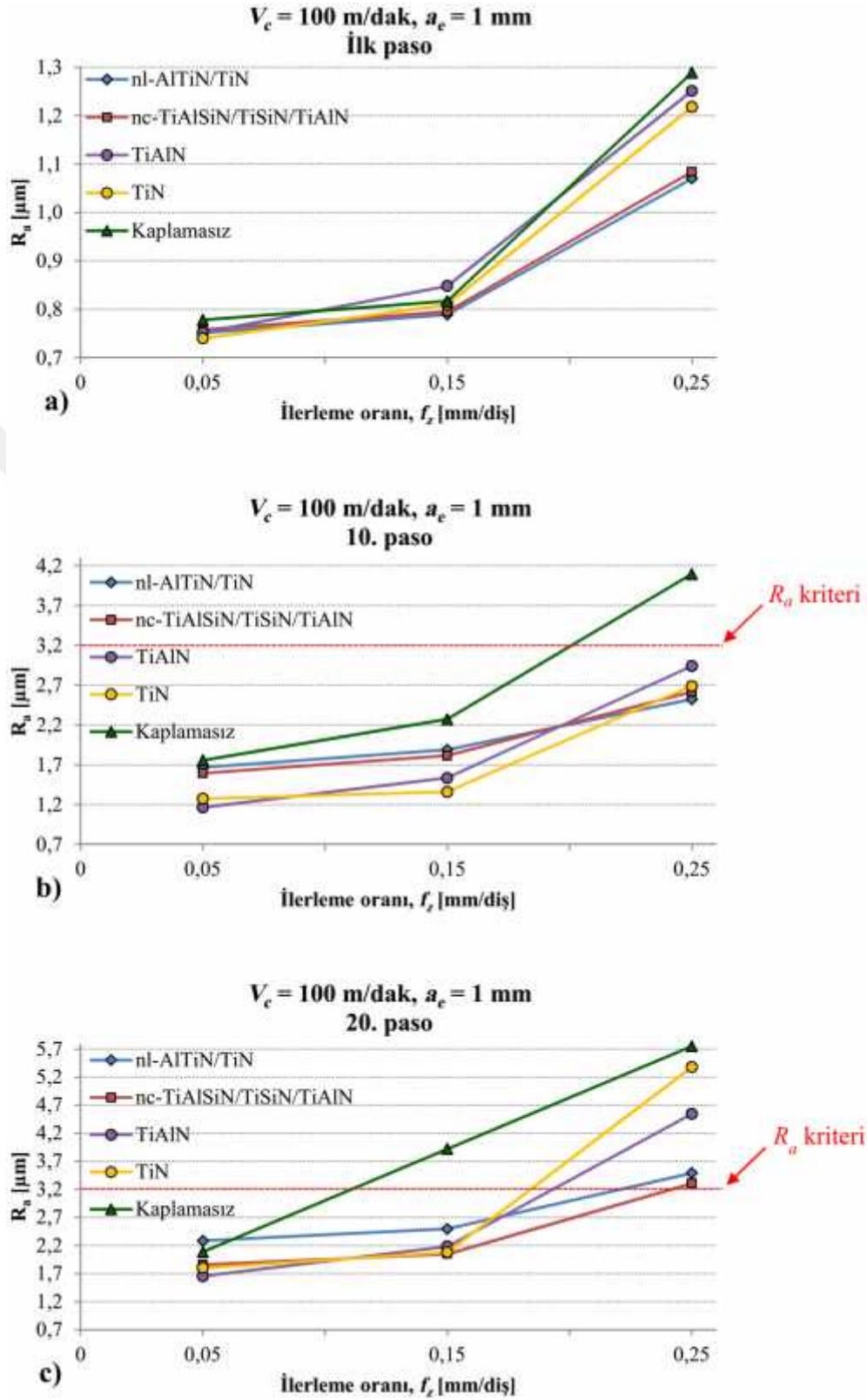
Talaşlı imalatla işleme esnasında yüzeye temas eden kesici takım sürtünmeye, aşınmaya ve ısı iletimine neden olmaktadır. Bu yüzden işlenmiş parçalarda yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi; yüzeyin düzgünlüğü, kalitesi ve ürünlerinin fonksiyonu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için talaşlı imalat endüstrisinde büyük önem taşımaktadır (Dhanasekar ve Ramamoorthy, 2010). İş parçasında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirlenmesinde birçok faktör etkilidir (Gökkaya ve Nalbant, 2007; Najem, 2010; Rajasekaran vd., 2010; Raj ve Karunamoorthy, 2017; Sheikh-Ahmad vd., 2017). Bunlar; ilerleme oranı, kesici takım geometrisi, kesme hızı, kesme genişliği, kesici takım radyüsü ve iş parçası bağlama yöntemleridir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, ileri kompozit malzemeler sınıfından olan CFRP kompozit malzemelerin, yüksek kalite ve verimlilikle işlenebilmesi amacıyla, optimum kesme parametrelerinin ve uygun kesici takımların belirlenmesi önem kazanmaktadır. CFRP kompozit malzemelerde geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle işleme, foa, malzemenin homojen olmayan yapısı ve matris içerisindeki sert aşındırıcı fiberin yüksek hacimli olması, farklı fiber ve matris özelliklerinden dolayı oldukça zor olabilmekte ve kompozit malzemede yüzey kalitesine neden olmaktadır. Yüzey kalitesi, CFRP kompozit malzemede foa'na, işleme kuvvetlerine ve hatta kesme yönüne bağlı olmaktadır (Karpas vd., 2012). Bu bölümde, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezeleme işlemi uygulanmış CFRP kompozit malzeme üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmiştir. Farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü grafikleri Şekil 38, Şekil 39 ve Şekil 40'da verilmiştir.

5.1.1 $V_c = 100$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş), 1

mm kesme genişliği ve 100 m/dak kesme hızında çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 38’de verilmiştir. 100 m/dak ve üç farklı ilerleme oranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri grafikleri birinci, onuncu ve yirminci pasolar için verilmiştir. CFRP kompozit malzeme çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri kesme hızının artışına bağlı olarak düşüş göstermiştir. Kesme hızının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azalması beklenen bir durumdur (Çakır, 2006; Sornakumar ve Kumar, 2008; Anan vd., 2017). CFRP kompozit malzemenin 100 m/dak kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi esnasında elde edilen ilk paso sonucunda yüzey pürüzlülüğü değerleri ilerleme oranının artışına bağlı olarak artış göstermiştir. İlerleme oranının 0,05 mm/diş’ten 0,15 mm/diş oranına artırılması sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ilerleme oranının 0,15 mm/diş’ten 0,25 mm/diş’e artırılması sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinden düşük değeri elde edilmiştir. İlerleme oranının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerinin artışı, ilerleme oranının artmasıyla kesici takımında oluşan titreşim ve kesici takımında oluşan aşınmaya bağlanabilir (Saxena, 1982; Bouzid Saï vd., 2001; Habalı vd., 2006; Neşeli ve Yaldız, 2007). 100 m/dak kesme hızında ve tüm kesici takımların ilk pasodaki yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,05 mm/diş ilerleme oranı % 200 arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü değerleri % 7,4 artış göstermiş ve 0,15 mm/diş ilerleme oranı % 67 arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü değerleri % 56,4 artış göstermiştir. Bu nedenle, CFRP kompozit malzemenin aynı yönlü (down milling) frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkili işleme parametresi (f_z) ilerleme oranıdır (Liu vd., 2017). Şekil 38, Şekil 39 ve Şekil 40’da tüm kesici takımlarla işlenen CFRP kompozit malzeme çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ilerleme oranının artmasıyla artış gösterdiği tespit edilmiştir (Sheikh-Ahmad, 2009). Kullanılan tüm kesici takımlara bağlı olarak elde edilen ilk paso sonucu yüzey pürüzlülüğü değerleri değerlendirildiğinde; en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında TiN kaplamalı takımla, 0,15 mm/diş ilerleme oranında nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımla ve 0,25 mm/diş ilerleme oranında nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla elde edilmiştir. Kaplamalı kesici takımlar kaplamasız kesici takıma göre daha yüksek performans göstermiştir.

CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi sonucunda kesici takım kaplama yöntemi ve kalınlığına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde; artan paso sayısı ve ilerleme oranı artışıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri TiN kaplamalı kesici takımla ($0,740 \mu\text{m}$), en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri kaplamasız kesici takımla ($5,746 \mu\text{m}$) elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin TiN kaplamalı kesici takımla elde edilmesinin nedeni bu kaplamanın yüksek aşınma direncinin yanı sıra düşük sürtünme katsayısı olduğuna bağlanabilir (Gökkaya vd., 2004). En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerinin kaplamasız kesici takımla elde edilmesinin nedeni ilerleme oranının artması ile artan kesme kuvvetlerinin artışına bağlanabilir (Şekil 45c). Kesme kuvvetlerinin artması kesme işlemini zorlaştırmakta ve işleme anında kesici takımda meydana gelen titreşimi arttırmaktadır. Kesme kuvvetlerinin artmasıyla oluşan titreşimlerle birlikte elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmaktadır (Gökkaya, 2006). Tüm kesici takımlarla işlenen CFRP kompozit malzemesinde ilerleme oranına bağlı olarak artış göstermesinin nedeni yüksek ilerleme oranlarında işleme esnasında yüksek titreşimler nedeniyle yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinin oluşmasıyla açıklanabilir (Hamedanianpour ve Chatelain, 2013, Gaitonde vd., 2016).



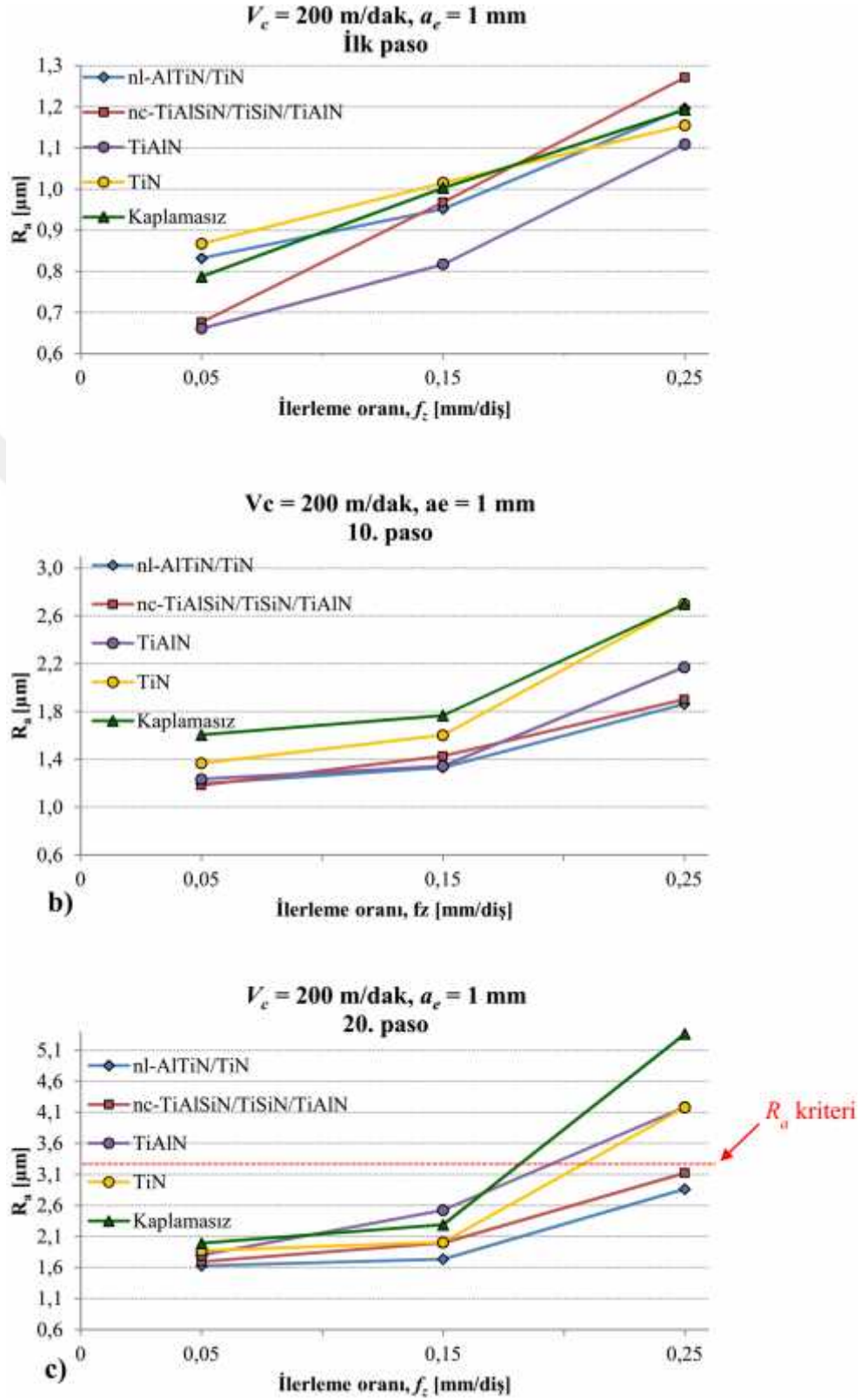
Şekil 38: $V_c = 100 \text{ m/dak}$ ve farklı ilerleme oranlarındaki R_a 'nın gösterimi: a) İlk paso, b) Onuncu paso ve c) Yirminci paso.

5.1.2 $V_c = 200$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-ALTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş), 1 mm kesme genişliği ve 200 m/dak kesme hızında çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 39'da verilmiştir. 200 m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri grafikleri birinci, onuncu ve yirminci pasolar için verilmiştir. 200 m/dak kesme hızı ve ilerleme oranlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. İlerleme oranının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin artış göstermesinin nedeni; ilerleme oranının artmasıyla iş parçasından kaldırılan talaş miktarının artışı ile açıklanabilir (Çakır, 2006, Oyman vd., 2013). İlerleme oranının artması ile kesici takımında oluşan titreşimler yüzey pürüzlülüğü değerini olumsuz etkilemektedir (Saxena, 1982; Yılmaz vd., 2016). İlerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü değerleri etkisi incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir.

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesici takım türünün yüzey pürüzlülüklerindeki değişim değerlendirildiğinde; ilk pasolarda ilerleme oranına bağlı olarak TiAlN kaplamalı kesici takım daha iyi performans göstermiştir. 0,05 mm/diş ilerleme oranında ve 200 m/dak kesme hızında tüm kesici takımlar içinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,661 μm ile TiAlN kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir. Bu durum, TiAlN kaplamalı kesici takımın daha yüksek sıcak sertlik ve aşınma direncine sahip olması sayesinde daha az aşınması ile açıklanabilir (Özbek vd., 2016). 200 m/dak kesme hızında Schornik vd. (2015) yapmış oldukları CFRP kompozit malzemesinde yatay frezeleme ve geleneksel frezeleme çalışmalarında, uygun ilerleme oranlarında en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini 200 m/dak'ki kesme hızında elde ettiklerini ve bu kesme hızının iyi bir yüzey kalitesi göstermiş olduğunu belirtmişlerdir (Schorník vd., 2015). Yirminci pasolarda ilerleme oranına bağlı olarak nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takım daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri sonuçlarına göre yüksek sertlik ve iyi aşınma direncine sahip olmasından dolayı nl-ALTiN/TiN kaplamalı

takım kesme performansını iyileştirerek yüzey pürüzlülüğü değerlerini daha düşük değerlerde elde edilmesini sağlamıştır (Ducros vd., 2003; Khalid vd., 2016). 200 m/dak kesme hızında kaplamalı kesici takımlar kaplamasız kesici takıma göre daha yüksek performans göstermiştir. İlerleme oranına bağlı olarak kaplamasız kesici takımla yüzey pürüzlülüğü değerleri artmıştır. Yirminci pasoda 0,25 mm/diş ilerleme oranında bu değer 5,365 μm olarak ölçülmüştür ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek ilerleme oranlarında işleme esnasında daha büyük titreşimler nedeniyle daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinin meydana gelmesiyle açıklanabilir (Lee vd., 2001). Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir.



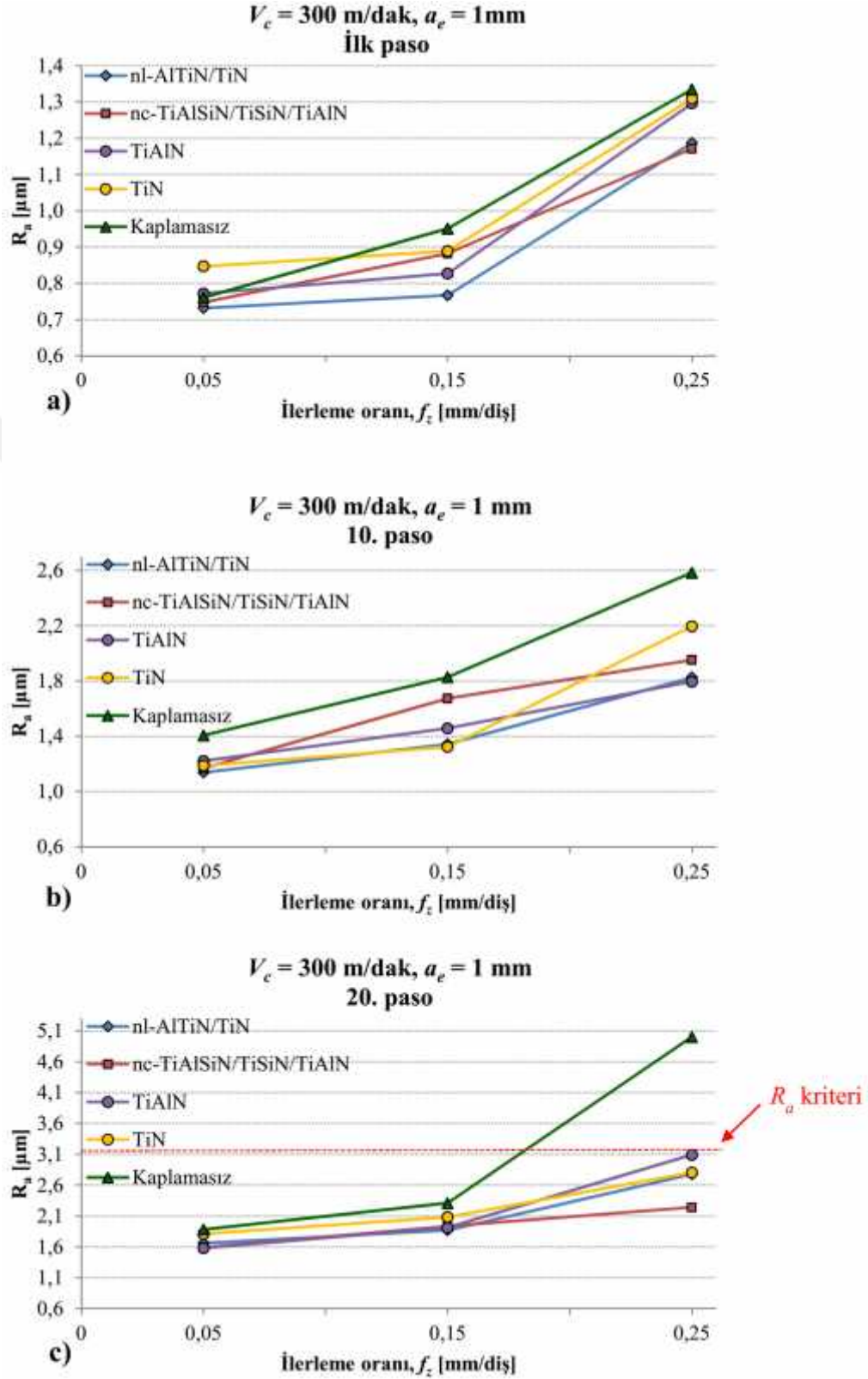
Şekil 39: $V_c = 200 \text{ m/dak}$ ve farklı ilerleme oranlarındaki R_a 'nın gösterimi: a) İlk paso, b) Onuncu paso ve c) Yirminci paso.

5.1.3 $V_c = 300$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş), 1 mm kesme genişliği ve 300 m/dak kesme hızında çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 40'da verilmiştir. 300 m/dak kesme hızı ve üç farklı ilerleme oranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri grafikleri birinci, onuncu ve yirminci pasolar için verilmiştir. 300 m/dak kesme hızındaki CFRP kompozit malzeme çevresel frezeleme işleminde tüm kesici takımlarla ilerleme oranındaki değişime bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri değerlendirildiğinde; kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin iyileştiği tespit edilmiştir (Chatelain vd., 2012). Kesme hızının artmasıyla kesici takım/iş parçası temas yüzeyinde oluşan ısı artmaktadır. Artan kesme hızı talaşı kolay kaldırmakta, titreşimleri azalmakta bunlara bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü değerleri düşüş göstermektedir (Gökkaya, 2006; Altınkaya ve Güllü, 2008; Nalbant vd., 2009). Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü değerlere etkisi açısından bakıldığında en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri 300 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. 300 m/dak kesme hızında ve yirminci pasoda 0,05 mm/diş ilerleme oranı % 200 arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü değerleri % 18,6 artış göstermiş ve 0,15 mm/diş ilerleme oranı % 67 arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü değerleri % 205,2 artış göstermiştir. İlerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü değerleri etkisi incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir.

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla frezelenmesi sonucu kesici takım türünün yüzey pürüzlülüğü etkisine bakıldığında ilk pasoda 0,05 mm/diş ilerleme oranında tüm takımlar arasında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri (0,732 μ m) nl-AlTiN/TiN kesici takımda tespit edilmiş ve ilerleme oranına bağlı olarak artış gösterdiği görülmüştür. CFRP kompozit malzeme frezeleme işlemlerinde düşük ilerleme oranları ve yüksek kesme hızları yüzey kalitesini iyileştirdiği bildirilmektedir (Davim ve Reis, 2005; Khairussima vd., 2012; Chen vd., 2013; Sorrentino ve Turchetta, 2014; Kiliçkap vd., 2015). Kaplamalı kesici

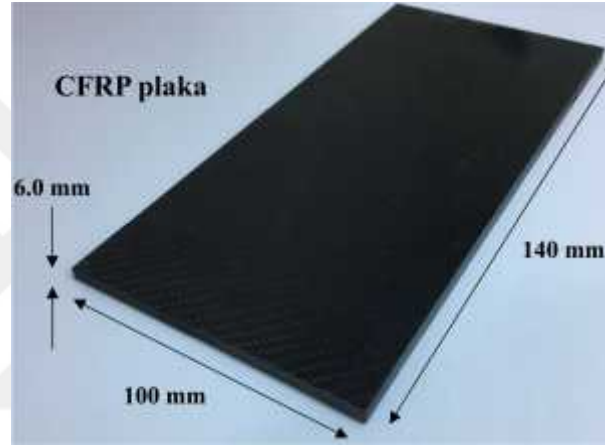
takımlar kaplamasız kesici takıma göre daha yüksek performans göstermiştir. Yirminci paso sonucunda 0,05 ve 0,15 mm/diş ilerleme oranlarında kaplamasız kesici takım, kaplamalı kesici takımlarla benzer davranışı göstermektedir. Ancak 0,25 mm/diş ilerleme oranında diğer takımlara oranla kaplamasız kesici takım daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerine (5,003 μm) ulaşmıştır. Bu durum yüksek kesme hızlarında artan ilerlemeye bağlı olarak kesici takım talaş yüzeyinde yapışan talaştan ve kesici takım kenarının aşınmaya bağlı olarak kalınlığından artmıştır. Böylece CFRP kompozit malzemenin kesme genişliği sabit tutulduğunda, yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerine en etkili işleme parametresi ilerleme oranı (f_z) olmaktadır (Kim vd., 1992; Isbilir ve Ghassemieh, 2012; Ahmed vd., 2015; Wang vd., 2015; Zenia vd., 2015; Ghafarizadeh vd., 2016; Nurhaniza vd., 2016; Wang vd., 2016; Khairusshima vd., 2017; Liu vd., 2017).



Şekil 40: $V_c = 300 \text{ m/dak}$ ve farklı ilerleme oranlarındaki R_a 'nın gösterimi: a) İlk paso, b) Onuncu paso ve c) Yirminci paso.

5.2 Farklı Kesme Hızlarında Elde Edilen Talaş Hacmi - Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İlişkisi

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, farklı kesme hızlarında çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iş parçası 140 mm genişliğinde, 6 mm yüksekliğinde ve 1 mm kesme genişliğinde işlenmiştir (Şekil 41).



Şekil 41: Deneylerde işlenen CFRP plaka gösterimi.

Kaldırılan talaş kalınlığının maksimum değeri ilerleme oranına ve kesme genişliğine bağlı olacağından dolayı kesici takımlarla kaldırılan talaş hacmi 1 paso için 840 mm^3 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle paso sayısına bağlı olarak kaldırılan talaş hacmi değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Paso sayısına bağlı olarak kaldırılan talaş hacmi değerleri.

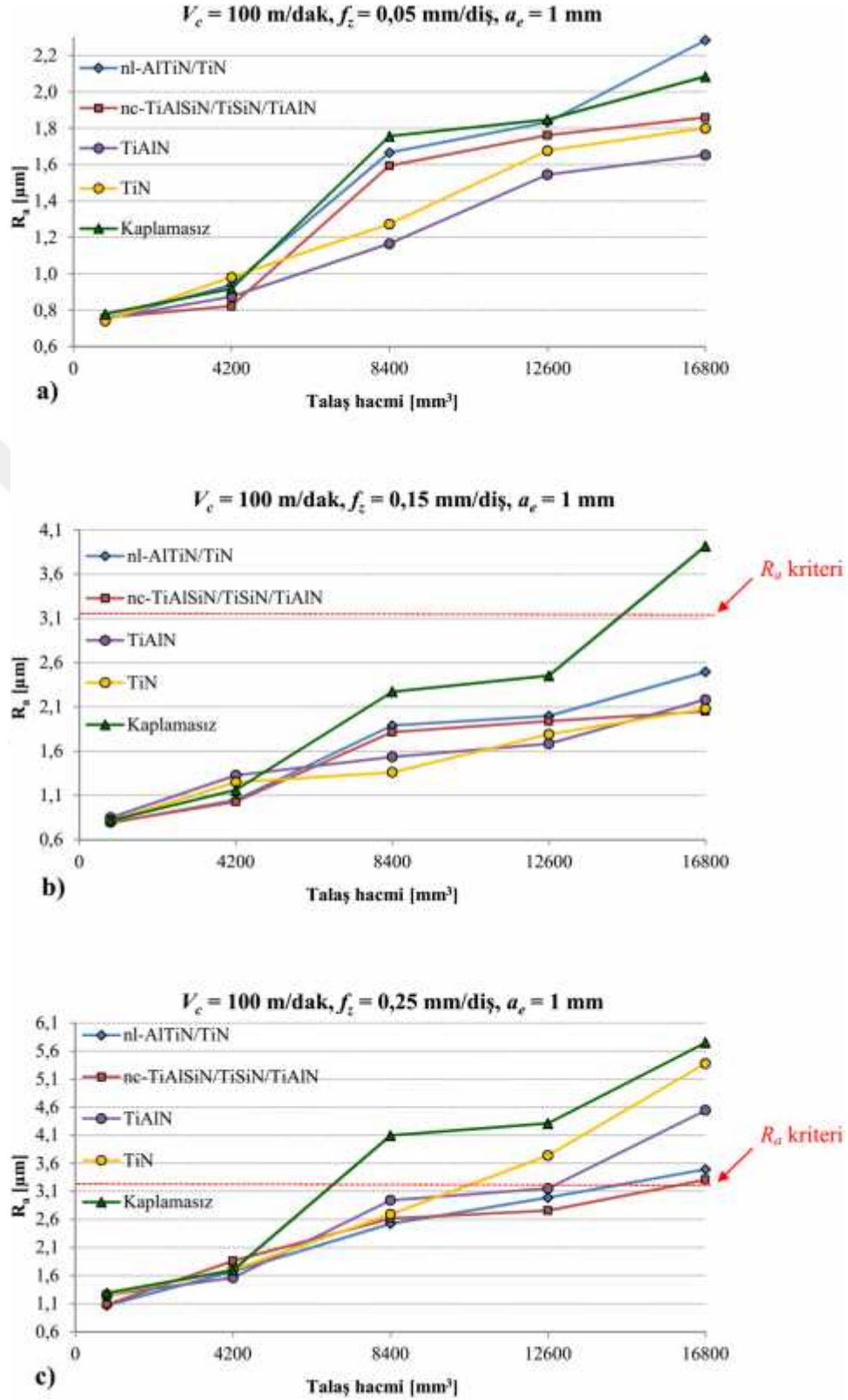
Kaldırılan paso sayısı	Talaş hacmi [mm^3]
1	840
5	4200
10	8400
15	12600
20	16800

Şekil 42, Şekil 43 ve Şekil 44’de farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak işlenen CFRP kompozit malzemenin yüzey pürüzlülüğündeki değişimi verilmiştir. Her üç grafikte de en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin en düşük ilerleme oranlarında elde edildiği görülmektedir. Artan paso sayısına bağlı olarak ise yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermektedir.

5.2.1 $V_c = 100$ m/dak Kesme Hızında, Farklı İlerleme Oranlarında ve Kaldırılan Talaş Hacmi Miktarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, 100 m/dak kesme hızı, üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 42’de verilmiştir. 100 m/dak kesme hızı ve üç farklı ilerleme oranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri grafikleri CFRP kompozit malzeme frezelenmesinden sonra işlenen yüzeyde kesme uzunluğu boyunca birinci, beşinci, onuncu, onbeşinci ve yirminci pasolardan alınan verileridir. Kaplamalı ve kaplamsız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi sonucu paso sayısının artışına bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim incelendiğinde; paso sayısının artışıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi esnasında artan kesme kuvvetleri yüzey pürüzlülüğü değerlerini etkilemektedir (Hocheng vd., 1993; Wang ve Zhang, 2003; Ucar ve Wang, 2005; Han vd., 2014; Sorrentino ve Turchetta, 2014). CFRP kompozit malzeme frezelenmesi esnasında ilerleme oranına bağlı olarak kesme kuvveti değerleri artış göstermiştir. Artan kesme kuvvetleri ilerleme oranına bağlı olarak kesme işlemi esnasında iş parçasından kaldırılan talaş miktarını ve titreşimi artırmıştır. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ilerleme oranına bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, kesici takımlarla işleme esnasında numuneyi tam kesmediği ancak kesici takımın iş parçasına basınç uygulayarak işlemesiyle açıklanabilir (Kople vd., 1983; Bhatnagar vd., 1995). İlerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisi incelendiğinde; 100 m/dak kesme hızında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir.

Takım türünün yüzey pürüzlülüğü etkisine bakıldığında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri (0,740 μm) TiN kaplamalı kesici takımla elde edilmiştir. Kesici takım üzerine uygulanan kaplamaların kesici kenar radyüslerinin iyileştirdiği bilinmektedir (Çakır, 2006; Gökkaya ve Nalbant, 2007). Tek kaplamalı kesici takımlar nano yapılı takımlardan daha iyi performans göstermiştir. Ancak artan ilerleme oranına bağlı olarak nano yapılı kesici takımlarla daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılmıştır. Böylece kesici takımlardaki kaplamaların etkisi kaplamasız kesici takımlara göre daha belirgin bir şekilde izlenmektedir. Kaplamasız kesici takımlar başlangıçta düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahipken ilerleme oranına bağlı olarak en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Kaplamasız kesici takımların başlangıçta daha düşük olmasının nedeni, kaplamalı kesici takımların kesici kenar radyüsü kaplamasız kesici takımlara göre kaplama tabakasından dolayı daha büyük olmasıyla açıklanabilir (Haddad vd., 2014). Kesici takımlar arasında artan ilerleme oranına bağlı olarak en iyi performans 0,25 mm/diş ilerleme oranında nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN takımla elde edilmiştir.



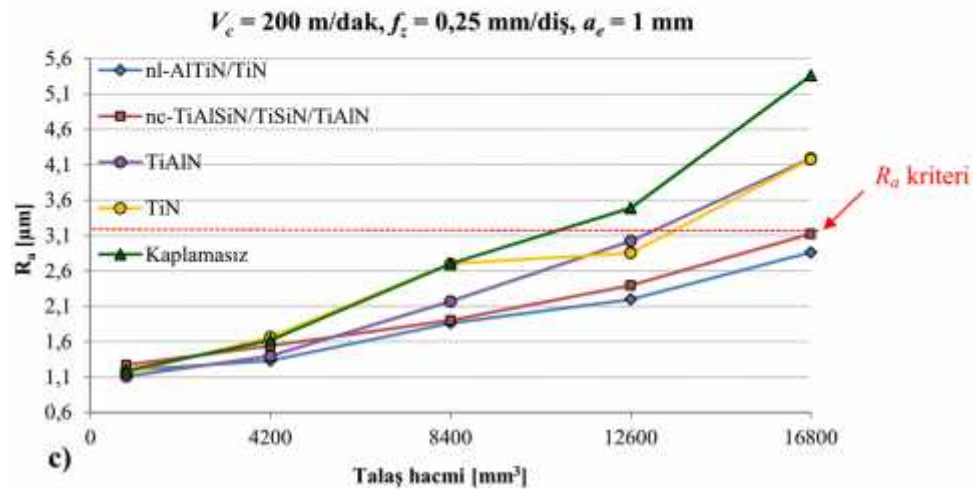
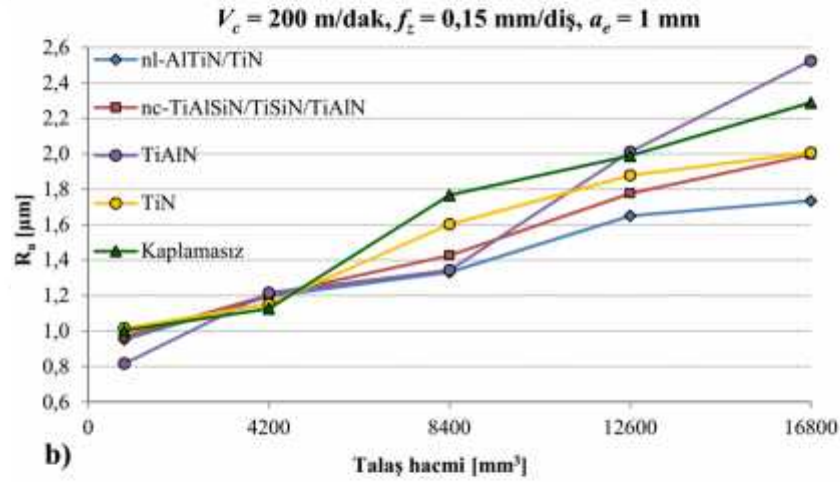
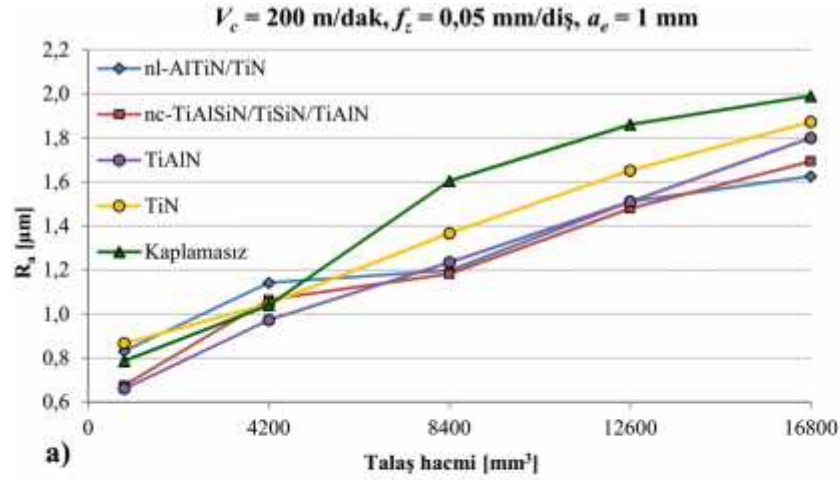
Şekil 42: $V_c = 100 \text{ m/dak}$ kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında ve kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak elde edilen R_a değerlerinin değişim grafikleri.

5.2.2 $V_c = 200$ m/dak Kesme Hızında, Farklı İlerleme Oranlarında ve Kaldırılan Talaş Hacmi Miktarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, 200 m/dak kesme hızı, üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 43’de verilmiştir. 200 m/dak kesme hızı ve üç farklı ilerleme oranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri grafikleri CFRP kompozit malzeme frezelenmesinden sonra işlenen yüzeyde kesme uzunluğu boyunca birinci, beşinci, onuncu, onbeşinci ve yirminci pasolardan alınan verileridir. Kaplamalı ve kaplamsız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi sonucu talaş hacminin artışına bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim değerlendirildiğinde; paso sayısının artışıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir (Pramanik vd., 2003). Artan paso sayısına bağlı olarak kesme kuvvetleri ve takım aşınması artış göstermiştir (Şekil 46 ve Şekil 62). Bu durum, kesici takımın aşınması durumunda, malzemeyi çıkarmak için daha büyük bir kuvvet gerekmesi ile açıklanabilir (Slamani vd., 2015). CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı yapısı ve talaş hacmi artışı kesici takımda ısıyı ve takım/iş parçası arasındaki temastan dolayı sürtünmeyi artırmıştır. Böylece paso sayısının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artış göstermesinin nedeni; artan kesme uzunluğu kesici takımların kenar yarıçapı radiusunun artırması sonucu meydana gelen yanak aşınmasından kaynaklanmaktadır (Ferreira vd., 1999, Sheikh-Ahmad ve Sridhar, 2002, Pramanik vd., 2003, Janardhan vd., 2006, Haddad vd., 2013, Madhavan vd., 2015, Anan vd., 2017). Elde edilen bu sonuç literatürle örtüşmektedir. Maegawa vd. üç farklı kesici takımlarla (WC-Co, PCD ve PCD/WC-Co takımlar) yapmış oldukları çalışma sonucunda CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde kesme uzunluğuna bağlı olarak kesici takımların yanak yüzeylerinde abrasiv aşınma tespit etmişlerdir (Maegawa vd., 2015). CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi esnasında ilerleme oranlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. İlerleme oranının artışına ve paso sayısına bağlı olarak artan yüzey pürüzlülüğü sonucu literatürle aynı doğrultuda benzerlik göstermektedir. Sheikh-Ahmad vd. yapmış oldukları çalışmada 6,3 mm çapındaki karbür freze (solid carbide router burr tool) takımla CFRP kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün kesme uzunluğuna ve ilerleme oranına bağlı olarak artış gösterdiğini

açıklamışlardır (Sheikh-Ahmad vd., 2012). İlerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisi incelendiğinde; 200 m/dak kesme hızında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir.

Takım türünün yüzey pürüzlülüğü etkisine bakıldığında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri (0,661 μm) TiAlN kaplamalı kesici takımla elde edilmiştir. 0,15 mm/diş ilerleme oranında paso sayısına bağlı olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri TiAlN kaplamalı kesici takımda olmasına rağmen aşınmadan dolayı artan paso miktarı sonunda en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerini elde etmiştir. 0,25 mm/diş ilerleme oranında yüzey pürüzlülüğü değerleri artış eğilimleri benzerlik göstermişlerdir. Paso sayısı başlangıcında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri TiAlN kaplamalı kesici takımda ölçülmüştür. Yirminci paso sonunda en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımla elde edilmiştir. 0,25 mm/diş ilerleme oranında nano yapılı kesici takımlar hariç diğer takımlarla ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri havacılık sanayii limitinin üstünde elde edilmiştir. Yirminci paso sonucunda nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımla en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilmesinin nedeni kaplamaya bağlı olarak kesici kenardaki iyileşmeye bağlanabilir.

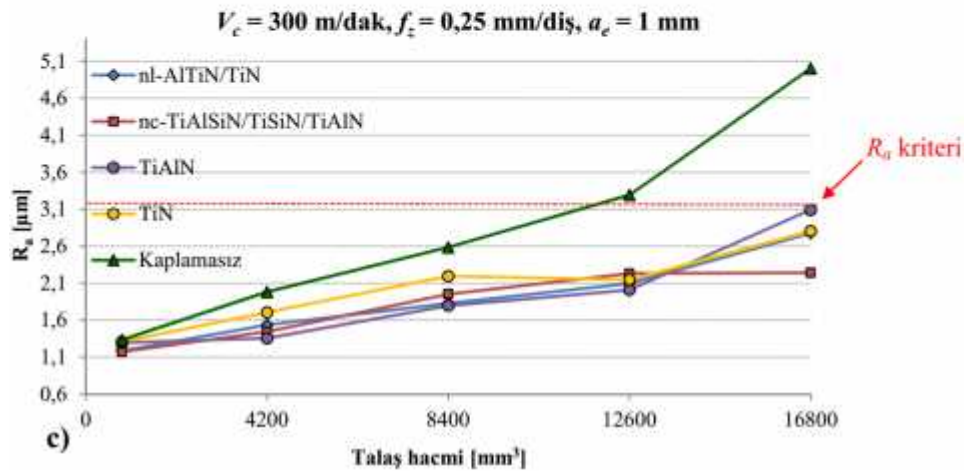
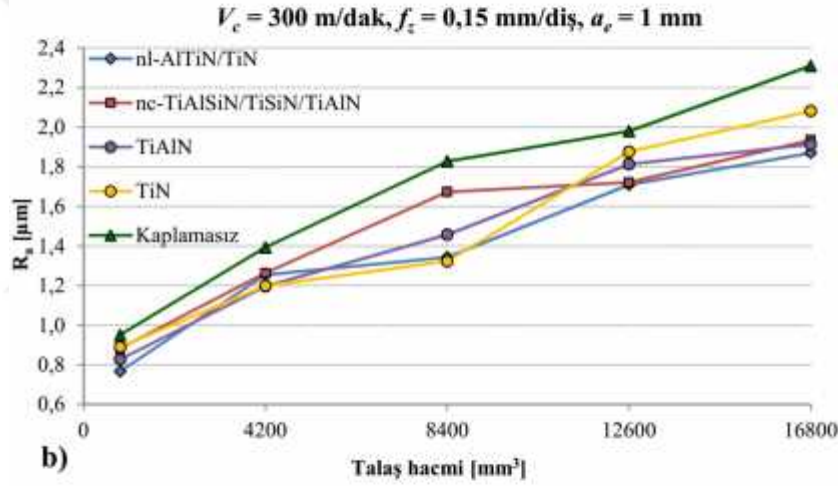
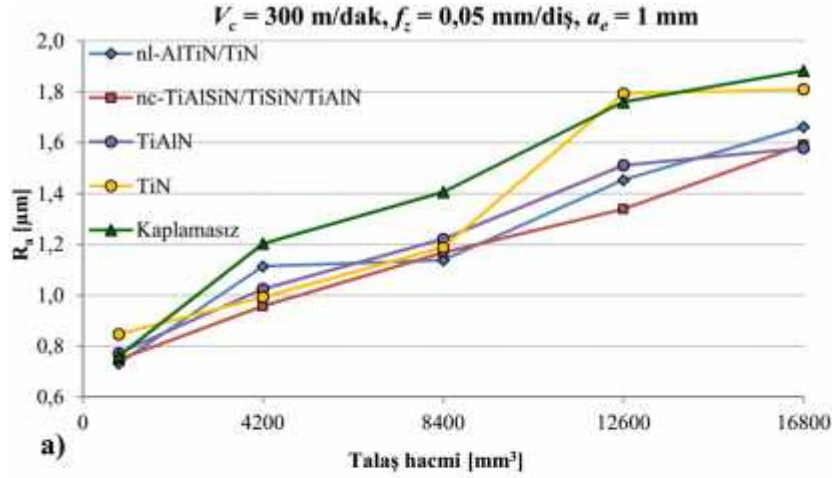


Şekil 43: $V_c = 200 \text{ m/dak}$ kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında ve kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak elde edilen R_a değerlerinin değişim grafikleri.

5.2.3 $V_c = 300$ m/dak Kesme Hızında, Farklı İlerleme Oranlarında ve Kaldırılan Talaş Hacmi Miktarına Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğündeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN) ve kaplamasız kesici takımlarla, 300 m/dak kesme hızı, üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 44’de verilmiştir. 300 m/dak kesme hızı ve üç farklı ilerleme oranında elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri grafikleri CFRP kompozit malzeme çevresel frezelenmesinden sonra işlenen yüzeyde kesme uzunluğu boyunca birinci, beşinci, onuncu, onbeşinci ve yirminci pasolardan alınan verileridir. Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi sonucu talaş hacmi artışına bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim incelendiğinde; kesme hızının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşmeler tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek kesme hızlarından dolayı fiberlerin daha kolay bir şekilde kesilmesiyle açıklanabilir (Qin vd., 2014). Kesme hızının artmasıyla azalan kesme kuvvetleri sayesinde yüzey pürüzlülüğü değerleri de azalmıştır (Şekil 47). Kesme kuvveti değerlerinin azalmasıyla kesici takımlarda oluşan titreşimlerin azalması yüzey pürüzlülüğü değerlerini olumlu yönde etkilemektedir (Nalbant vd., 2007; Dilipak ve Yilmaz, 2012; Bhogal vd., 2015). Genel itibariyle tüm kesici takımların yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermiştir. Bu durum, yüksek kesme hızından kaynaklanmaktadır ve kesme hızının takım-talaş ara yüzeyinde etkili bir parametre olduğu bildirilmektedir (Gökkaya vd., 2004). Talaş hacmine bağlı olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında tespit edilmiştir.

Takım türünün yüzey pürüzlülüğü etkisine bakıldığında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri (0,732 μm) nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla elde edilmiştir. Yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme oranlarından dolayı kaplamasız kesici takımlarda yüzey pürüzlülüğü değerleri havacılık uygulamaları için tavsiye edilen değer üstünde elde edilmiştir. 0,25 mm/diş ilerleme oranında en yüksek sertlik değerine sahip olmasından dolayı paso sayısına bağlı olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla tespit edilmiştir.



Şekil 44: $V_c = 300 \text{ m/dak}$ kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında ve kaldırılan talaş hacmi miktarına bağlı olarak elde edilen R_a değerlerinin değişim grafikleri.

5.2.4 CFRP Kompozit Malzemede Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Genel Değerlendirilmesi

CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde farklı kesme hızları (100, 200 ve 300 m/dak), farklı ilerleme oranları (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm sabit kesme genişliğinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri değerlendirildiğinde; ilerleme oranının ve paso sayısının artışına bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Kesme hızlarına göre değerlendirildiğinde ise kesme hızının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma tespit edilmiştir.

Kesici takımların ilk temaslarından dolayı en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,05 mm/diş ilerleme oranlarında tespit edilmiştir. Artan ilerleme oranına bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermişlerdir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,661 μm ile TiAlN kaplamalı kesici takımın 200 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 5,746 μm ile kaplamasız kesici takımın 100 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranında ölçülmüştür. TiAlN kaplamalı kesici takımda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerinin ilerleme oranı % 400 artırıldığında yüzey pürüzlülüğü değeri kaplamasız kesici takımla % 770 oranında artmış olduğu tespit edilmiştir.

Kesme hızlarının artışına bağlı olarak, en yüksek kesme hızında en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,732 μm ile nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takımın 0,05 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 5,003 μm ile kaplamasız kesici takımın 0,25 mm/diş ilerleme oranında ölçülmüştür. nl-ALTiN/TiN kesici takımla elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ile kaplamasız kesici takıma göre % 583,5'lik iyileşme sağlanmıştır.

5.3 Farklı Kesme Hızlarında Elde Edilen Kesme Kuvveti Değerlerindeki Değişim

İş parçasının talaşlı imalat yöntemleri ile doğru bir şekilde biçimlendirilmesi, iş parçası malzemesinin, işleme yöntemlerinin ve kesici takımların doğru belirlenmesine bağlı olmaktadır. Bu nedenle, imal edilen iş parçası kalitesinin artırılması ve maliyetlerin minimum seviyeye indirilmesinde kesme kuvvetleri son derece önem arz etmektedir (Günay, 2003; Ekici

, 2012). Talaş kaldırma işlemi yapılırken meydana gelen kesme kuvvetleri; iş parçasına, ilerleme oranına, kesme hızına, kesme genişliğine bunlara bağlı olarak kesme uzunluğundan etkilenmektedir. Kesme kuvvetleri, iş parçasının işlenmesi sürecinde kesici takımı iten kuvvet olmasının yanında, harcanan gücü belirleyerek işlenebilirlik açısından da önem arz etmektedir (Schneider, 2001). CFRP kompozit malzemelerde kesme kuvveti işleme koşullarının ve kalitesinin en önemli göstergesidir (Slamani vd., 2015). CFRP kompozit malzemelerde önemli hasar mekanizmalarından bir olan delaminasyon; tek yönlü ve çok yönlü tabakalı kompozitlerin istiflenme düzlemine normal olan kesme kuvveti bileşenine bağlı olmaktadır. Delme işleminde, doğrudan itme kuvveti bileşeniyle alakalı olmasına rağmen kenar frezeleme ve helisel takımla frezelemedeki delaminasyon ise, kesme kuvveti bileşenlerinin aksenal gerilmesinden kaynaklanmaktadır (Kalla vd., 2010). Bu çalışmada, CFRP kompozit malzemenin çevresel frezeleme işlemi esnasında dinamometre yardımı ile elde edilen kesme kuvveti verileri amplifikatör ve diğer veri aktarma elemanları ile bilgisayara kaydedilmiştir. Elde edilen bileşke kesme kuvveti (F_R) değerlerinin ortalaması alınarak yorumlanmıştır.

5.3.1 $V_c = 100$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerindeki Değişim

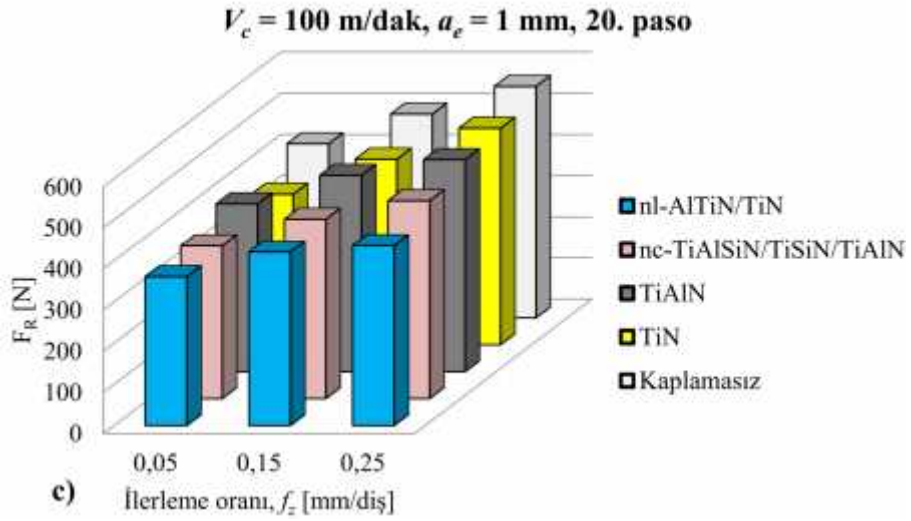
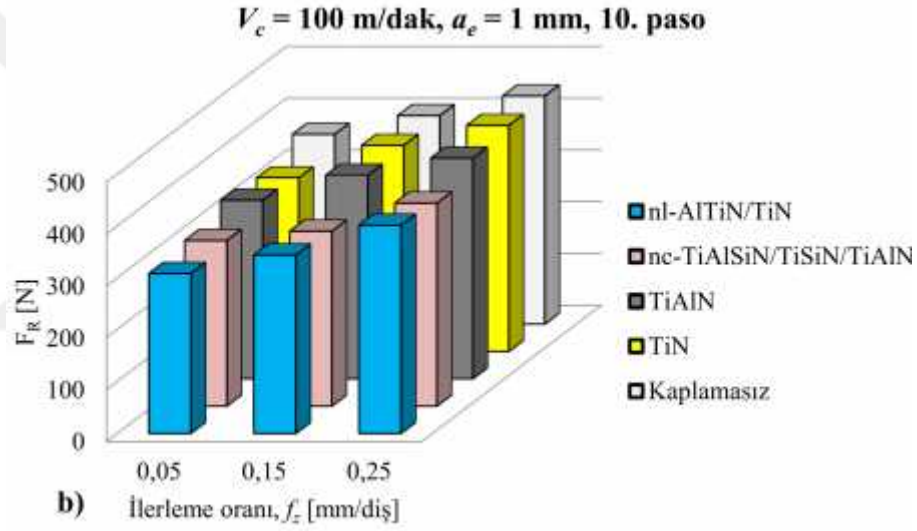
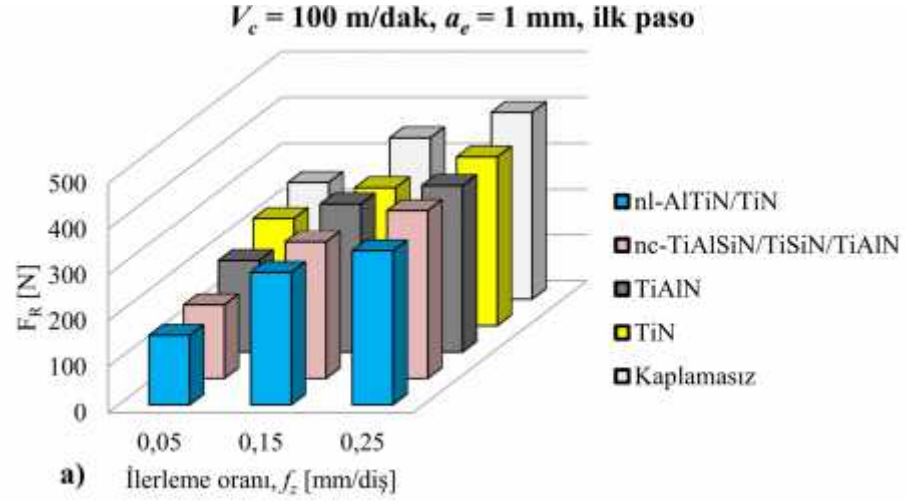
CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla, 100 m/dak kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi esnasında elde edilen kesme kuvveti değerleri Şekil 45'de verilmiştir. Elde edilen kesme kuvvetleri değişim grafikleri birinci, onuncu ve yirminci pasolar verileridir. CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde ölçülen kesme kuvveti değişim grafikleri incelendiğinde kesme hızının artışına bağlı olarak kesme kuvveti değerlerinde düşüş görülmektedir (Ucar ve Wang, 2005; Altın, Gökaya et al. 2006; Rusinek, 2010; Haiyan 2012; Haddad vd., 2013; Kusuyama vd., 2014). İlk pasolar kesici takımların iş parçasına ilk temaslarında ilerleme oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 45a). nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla 100 m/dak kesme hızı 0,05 mm/diş ilerleme oranında ölçülen kesme kuvveti değeri 151,240 N iken, aynı ilerleme oranı 300 m/dak kesme hızında 108,434 N olarak ölçülmüştür. Artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerindeki düşüş kesici takım talaş yüzeyindeki temas alanının ve akış bölgesindeki sıcaklıkların azalması ile açıklanabilir (Çakır, 2006, Gürbüz

vd., 2011). TiAlN ve TiN kaplamalı kesici takımla 100 m/dak kesme hızı 0,15 mm/dış ilerleme oranında ilk pasolarda ölçülen kesme kuvveti değerlerinde TiAlN kaplamalı kesici takımla 323,351 N, TiN kaplamalı kesici takımla 301,143 N olarak ölçülmüştür. 100 m/dak kesme hızı ve aynı ilerleme oranında son paso sonucunda TiN kaplamalı kesici takım TiAlN kaplamalı kesici takıma göre daha düşük kesme kuvveti değeri (TiAlN = 477,148 N, TiN = 450,922 N) elde edilmiştir. Benzer durum farklı kesme hızlarında ve ilerleme oranlarında da görülmüştür. PVD kaplamalı TiN ile kaplanmış kesici takımlarda kesici takım talaş yüzeyinde iş parçası malzemesi daha az yapışma özelliği göstermektedir. Bu daha az yapışma özelliği nedeniyle de, kesici takım talaş yüzeyinde takım-talaş temas uzunluğu kısalmaktadır. Böylece kesme kuvvetlerinde düşüşler sağlanabilmektedir (Çiftçi, 2005, Chen vd., 2013). Kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde kesme kuvvetlerine etkisi değerlendirildiğinde 100 m/dak kesme hızı 0,05 mm/dış ilerleme oranında ölçülen kesme kuvveti değeri 255,381 N iken, aynı ilerleme oranı 300 m/dak kesme hızında 163,427 N olarak ölçülmüştür. 300 m/dak kesme hızında bulunan kesme kuvveti değerleri %56,2 daha düşük elde edilmiştir. Aşındırıcı özelliği ile bilinen CFRP kompozit malzemelerin anizotropik ve homojen olmayan yapıları işleme esnasında titreşimi artırarak kesme kuvvetlerini yükseltmektedir (Karpaz vd., 2012, Kusuyama vd., 2014). Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla elde edilen kesme kuvveti açısından en uygun kesme hızı parametresinin 300 m/dak olduğu tespit edilmiştir.

100 m/dak kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla ölçülen kesme kuvveti değerleri ilerleme oranına bağlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Kesme kuvveti değerlerinin CFRP kompozit malzemede frezelenmesi esnasında kesici takımlara gelen basınçlardan ve sürtünmeden dolayı oluşmaktadır. İlerleme oranının artmasıyla kesici takımlarla kaldırılan talaş miktarı artmaktadır. Artan talaş miktarı ile kesici takımlarda oluşan basınç, aşınma ve titreşim artmaktadır. Bu nedenle, ilerleme oranının artmasıyla CFRP kompozit malzemenin kesme kuvveti değerleri artış göstermektedir (Rusinek 2010, Haiyan, Xuda et al. 2012, Chen, Fu et al. 2013, Ghafarizadeh, Chatelain et al. 2013). nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla 100 m/dak kesme hızı ve 0,05-0,15 ve 0,25 mm/dış ilerleme oranlarında bulunan kesme kuvveti değerleri sırasıyla 159,987 N, 297,112 N ve 366, 272 N olarak bulunmuştur. 0,05 mm/dış ilerleme oranında bulunan kesme kuvveti

değerleri 0,15 ve 0,25 mm/diş ilerleme oranlarında sırasıyla % 14,28 ve % 28,94 daha düşük elde edilmiştir. CFRP kompozit malzemenin nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımlarla frezelenmesinde, tüm işleme parametrelerinde elde edilen kesme kuvveti değerlendirildiğinde en düşük kesme kuvvetlerine 0,05 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır.

100 m/dak kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla ilerleme oranına bağlı olarak artan kesme kuvveti değerleri incelenmesinde iş parçası foa'larının etkili olduğu tespit edilmiştir. Kesme kuvveti değerlerinde en çok 0° foa'nın etkili olduğu görülmüştür. 0° foa'ı çevresel frezeleme esnasında kesici takımlara dik doğrultuda olması kesici takımındaki titreşimi ve aşınmayı artırmıştır. Ayrıca iş parçası hasar mekanizmalarına neden olmuştur. 90° foa'sı paralel yönde olduğu için en az kuvvet harcanmıştır. Yekpare karbür takımlarla işlenen CFRP kompozit malzemede elde edilen kesme kuvveti sonuçları literatürdeki çalışmalarla da örtüşmektedir. Hocheng vd. CFRP kompozit malzeme iş parçasını tek kare karbür kesici takım ile ilerleme oranlarına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde artış olduğu tespit etmişlerdir. 188,4 m/dak kesme hızı, 0,017 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde 0° foa'nda kesici takım ömrü 16 dakika iken 90° foa'nda kesici takım ömrünü 19 dakika olduğunu belirtmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda, fiber eksenine paralel 90° foa'nda frezelemesini 0° foa'nda kesme kuvvetlerinin arttığını açıklamışlardır (Hocheng vd., 1993). 45° foa'ları çapraz yönde istiflendikleri için kesici takımlara ve kesme kuvveti değerlerine 0° foa'dan daha az kuvvet harcanmasına neden olduğu çevresel frezeleme esnasında tespit edilmiştir. Foa'larının farklı yönlerde dizilimi iş parçasına mukavemet ve sertlik sağlamıştır. Bu nedenle, CFRP kompozit malzemede foa'ları kesme kuvvetlerinden olumsuz etkilemektedir (Kalla vd., 2010; Pecat vd., 2012; Zenia vd., 2015; Ghafarizadeh vd., 2016a; Ghafarizadeh vd., 2016b). 100 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde elde edilen sonuçlar kesme kuvvetleri açısından değerlendirildiğinde; bu parametrelerde en iyi kesme kuvveti nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takım ile ulaşılmıştır.



Şekil 45: $V_c = 100$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarına bağlı olarak F_R 'lerin değişim grafikleri, a) İlk paso, b) Onuncu paso, c) Yirminci paso.

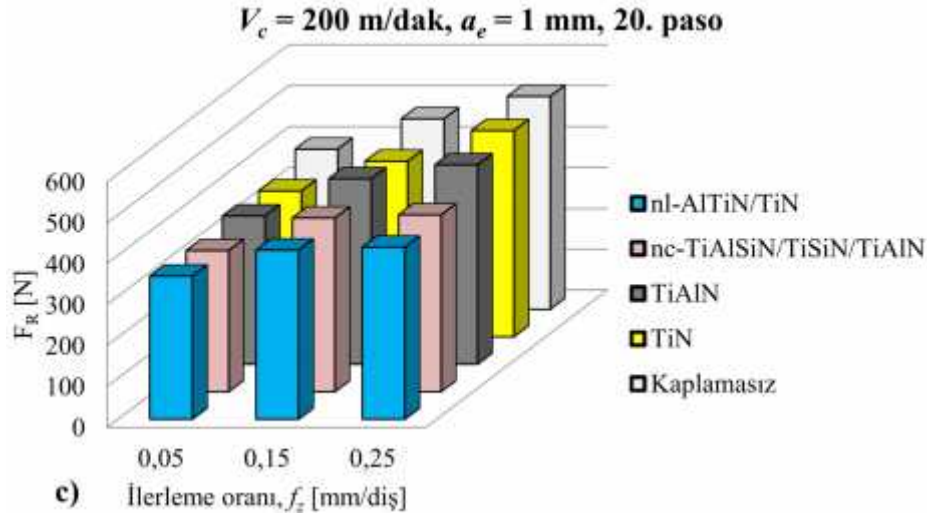
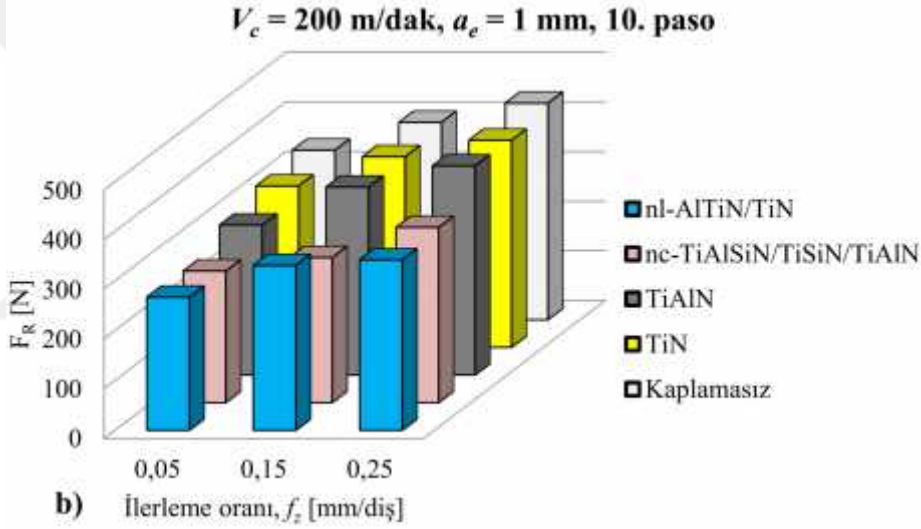
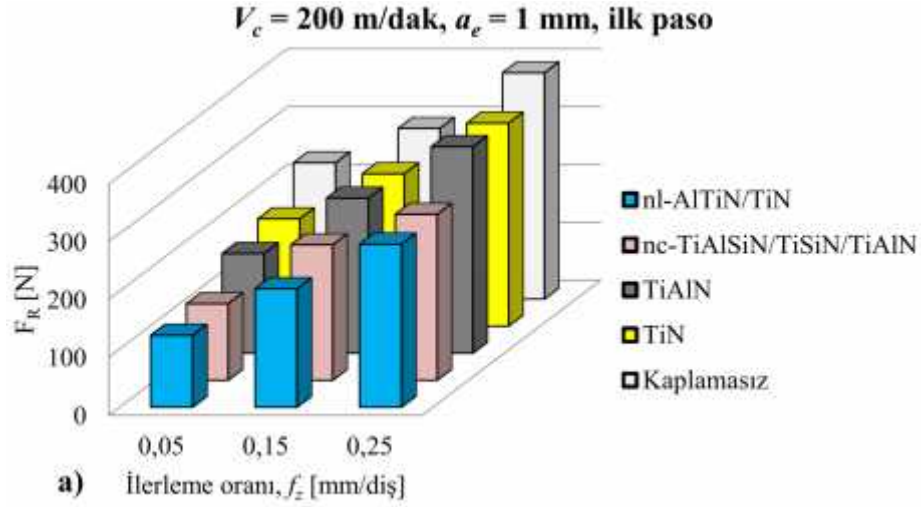
5.3.2 $V_c = 200$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerindeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla, 200 m/dak kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi esnasında elde edilen kesme kuvvetleri değerleri Şekil 46'da verilmiştir. Elde edilen kesme kuvvetleri değişim grafikleri birinci, onuncu ve yirminci pasolar verileridir. İlk pasolar kesici takımların iş parçasına ilk temaslarında ilerleme oranlarına bağlı olarak elde edilmiştir (Şekil 46a). CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde ölçülen kesme kuvveti değişim grafikleri incelendiğinde; ilerleme oranının artmasına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin arttığı belirlenmiştir. CFRP kompozit malzeme frezelenmesi esnasında artan ilerleme oranına bağlı olarak kesici takım ve iş parçası arasındaki temas alanı artış göstermektedir. Bu nedenle malzeme kaldırma miktarının artmasıyla kesme kuvvetlerinin artmaktadır (Chen vd., 2013). CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi esnasında meydana gelen talaş miktarı ve fofaları kesme kuvveti değerlerini artırmaktadır (Kalla vd., 2010). İlerleme oranının kesme kuvveti değerlerine etkisi incelendiğinde en düşük kesme kuvveti değeri 0,05 mm/diş ilerleme oranında tespit edilmiştir.

Tüm kesici takımlarla çevresel frezelemesi esnasında elde edilen kesme kuvveti değerleri değerlendirildiğinde; onuncu paso sonucunda en düşük kesme kuvveti değeri (263,919 N) nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla, 200 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır. Yirminci paso sonucunda en düşük kesme kuvveti değeri (344,281 N) nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla, 200 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır. Sert malzemelerin işlenebilirliğinin artırılması, kuru işleme koşulları altında işlenen kesici takımların oda sıcaklığında düşük bir sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik sağlaması için nano yapılı kaplamalar iyi performans sergilemektedir (Chen vd., 2002). Nanokompozit kaplamalı karbür takımlarla işlenen CFRP kompozit malzemede elde edilen kesme kuvveti sonuçları literatürdeki çalışmalarla da örtüşmektedir. CFRP/Al malzemenin işleminde kaplamasız takımlar ile nanokompozit (yüksek sertlik derecesi gösteren nanometre boyutunda (10 nm) kaplamalı takımlar karşılaştırıldığında, nanotabakalı kaplamaya

sahip takımların kullanılmalarıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ve itme kuvvetlerinde önemli derecede azalma olduğu tespit edilmektedir (Zitoune vd., 2012).

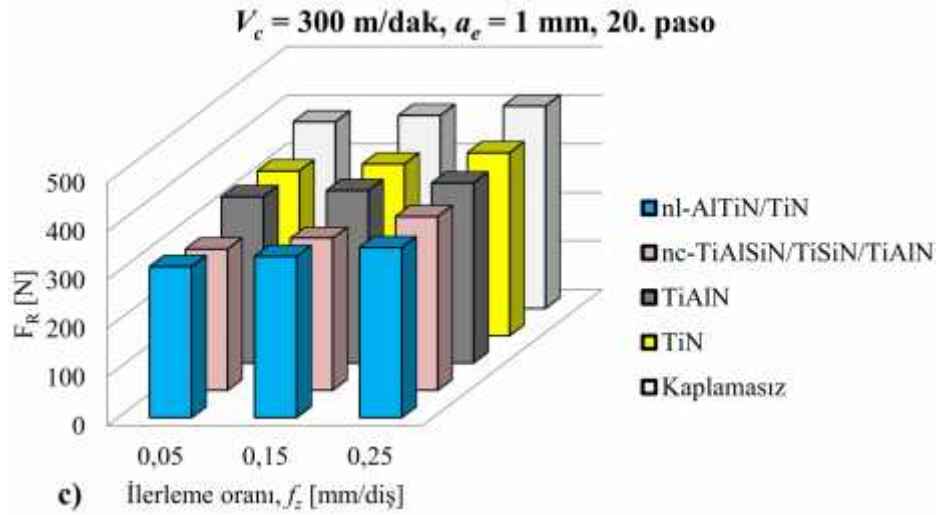
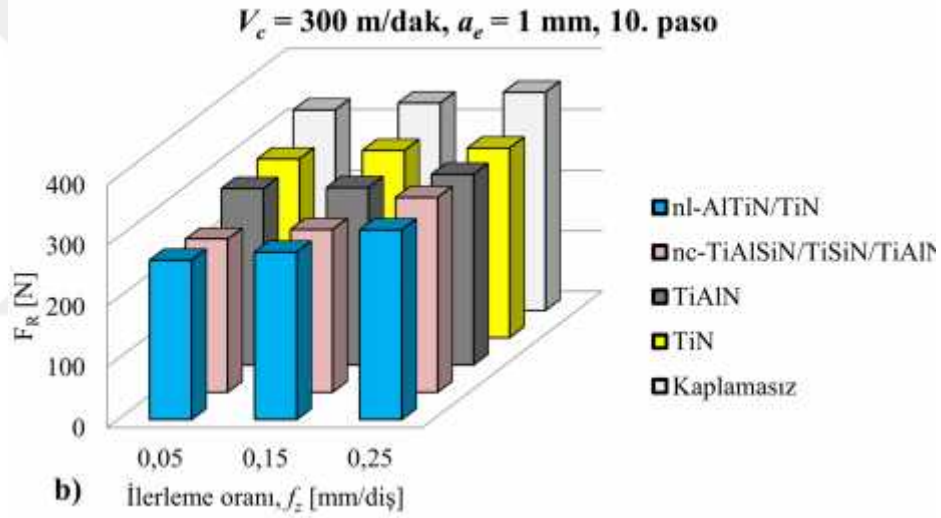
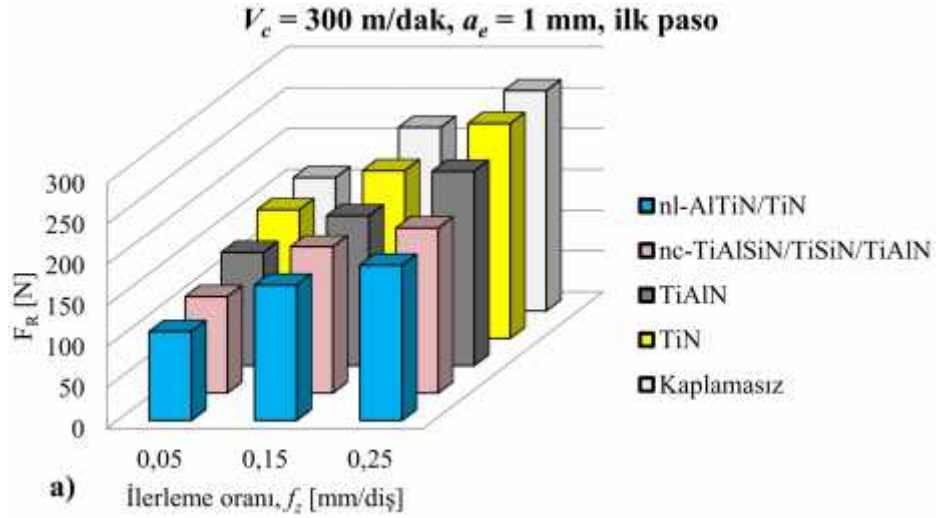




Şekil 46: $V_c = 200$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarına bağlı olarak F_R 'lerin değişim grafikleri, a) İlk paso, b) Onuncu paso, c) Yirminci paso.

5.3.3 $V_c = 300$ m/dak Kesme Hızında Farklı İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Kesme Kuvvetlerindeki Değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla, 300 m/dak kesme hızında, farklı ilerleme oranlarında (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi esnasında elde edilen kesme kuvvetleri değerleri Şekil 47’de verilmiştir. Elde edilen kesme kuvvetleri değişim grafikleri birinci, onuncu ve yirminci pasolar verileridir. Tüm kaplamalı kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesine kesme kuvvetlerine etkisi değerlendirildiğinde; nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımların olumlu etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Kesme kuvvetlerindeki düşüş daha iyi kesme şartlarında elde edilmektedir. Özellikle CFRP kompozit malzemelerin aşındırıcı yapısından dolayı, bu malzemelerin işlenmesinde kullanılan kesici takımların ömründe büyük oranda azalma meydana gelmekte ve malzemede hasarlara neden olmaktadır (Teti, 2002). İlk paso sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde en düşük kesme kuvveti değerini 300 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında 108,434 N ile nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla elde edilmiştir. Kesme hızının artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin düşüş göstermesi beklenen bir durumdur (Sornakumar ve Kumar, 2008). Yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme oranlarında işlenen CFRP kompozit malzemede elde edilen kesme kuvveti sonuçları literatürdeki çalışmalarla da örtüşmektedir. Slamani vd. CFRP kompozit malzeme frezelenmesini üç farklı kesme hızı ve ilerleme oranlarını CVD elmas kaplamalı altı oluklu takımla işlemişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı olduğu ve yüksek kesme hızları ile düşük ilerleme oranlarının optimum kesme parametreleri olduğunu açıklamışlardır (Slamani vd., 2015). En ideal kesme hızı 300 m/dak ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN kaplamalı kesici takımlarla elde edilen kesme kuvveti değerleri sırasıyla 108,434 N, 117,618 N, 138,139 N ve 157,487 N olarak bulunmuştur. TiN kaplamalı kesici takımla 300 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranı ölçülen kesme kuvveti değerleri nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN ve TiAlN kaplamalı kesici takımlarla elde edilen değerlerden sırasıyla % 45,2, % 33,9 ve % 14 daha düşük belirlenmiştir. Tüm kesici takımlar içerisinde en düşük kesme kuvveti değerlerine nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla ulaşılmıştır.



Şekil 47: $V_c = 300$ m/dak kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarına bağlı olarak F_R 'lerin değişim grafikleri, a) İlk paso, b) Onuncu paso, c) Yirminci paso.

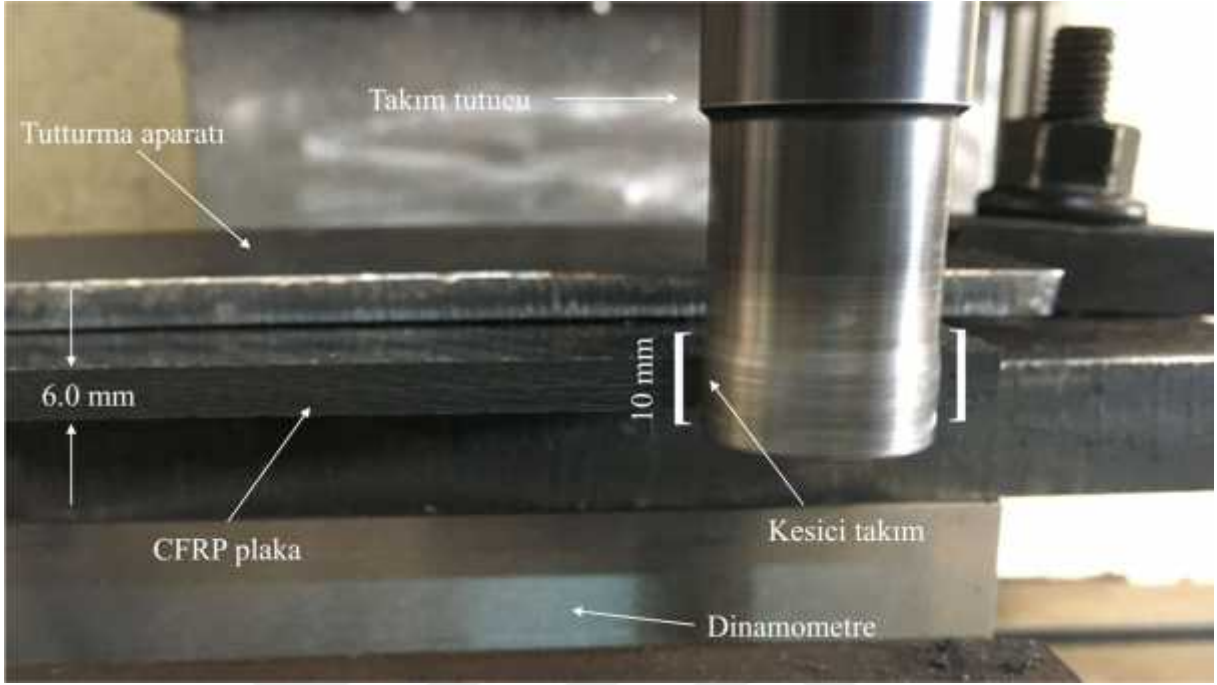
5.3.4 Kesme Kuvvetlerinin Genel Değerlendirilmesi

Genel olarak kesme kuvveti değerlendirildiğinde kaplamalı kesici takımlarla elde edilen kesme kuvvetlerine PVD kaplamanın olumlu katkı sağladığı görülmüştür. En düşük kesme kuvveti kaplamalı takımlarda nl-AlTiN/TiN kesici takımlarla elde edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde düşüş sağlanmış olup, artan ilerleme oranlarıyla kesme kuvvetlerinde artış olduğu tespit edilmiştir. 300 m/dak kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında yapılan çevresel frezeleme işleminde nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN kaplamalı takımlarla elde edilen kesme kuvvetleri farklılık göstermektedir. 100 ve 200 m/dak kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında yapılan çevresel frezeleme işleminde TiAlN ve TiN kaplamalı takımlarla elde edilen kesme kuvvetleri farklılık göstermektedir. 0,05 mm/diş ilerleme oranı, 300 m/dak kesme hızı ve ilk paso sonucunda nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN kaplamalı takımlarla elde edilen kesme kuvveti değerleri sırasıyla 108,434 N, 117,618 N, 138,139 N ve 157,487 N olarak bulunmuştur. nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımlarla 300 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında ölçülen kesme kuvveti değerleri nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN kaplamalı takımlarla elde edilen değerlerden sırasıyla % 8,47, % 27,4 ve % 45,2 daha düşük belirlenmiştir.

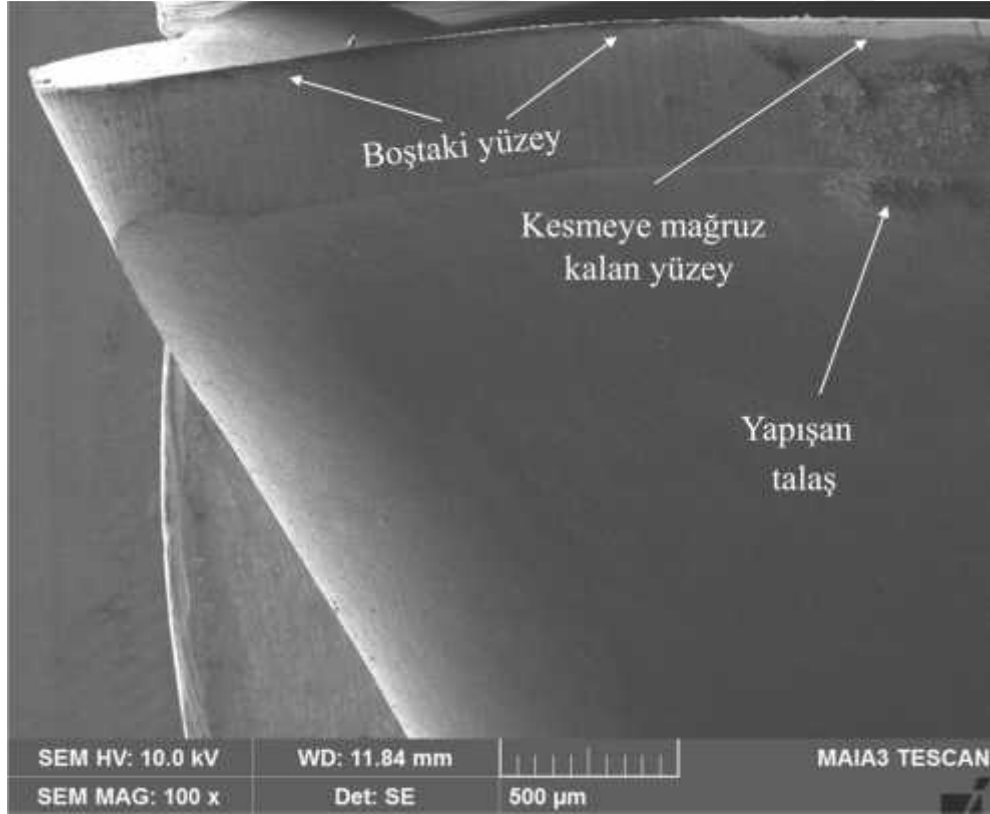
CFRP kompozit malzemenin kaplamasız kesici takımlarla 100, 200 ve 300 m/dak kesme hızları, 0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş ilerleme oranlarında ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi esnasında elde edilen kesme kuvveti değerleri değerlendirildiğinde; en düşük kesme kuvveti değeri (163,427 N) 300 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı ve ilk paso sonucunda ulaşılmıştır. Kaplamasız kesici takımlarla uygulanan çevresel frezeleme işleminde kesme hızının artmasıyla kesme kuvveti değerleri azalmış ve ilerleme oranlarına bağlı olarak kesme kuvveti değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Tüm kaplamasız kesici takımlar ve tüm kaplamalı kesici takımlar arasında 100 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde en yüksek kesme kuvveti değeri 562,590 N olarak elde edilmiştir. Kesme parametreleri içerisinde kesme hızı talaş kaldırma işlemlerini etkileyen en önemli parametredir. Ayrıca, ilerleme oranı ve kesme genişliği talaş kaldırma işlemlerini önemli derecede etkilemektedir (Aydın vd., 2010).

5.4 Kesici Takım Aşınması

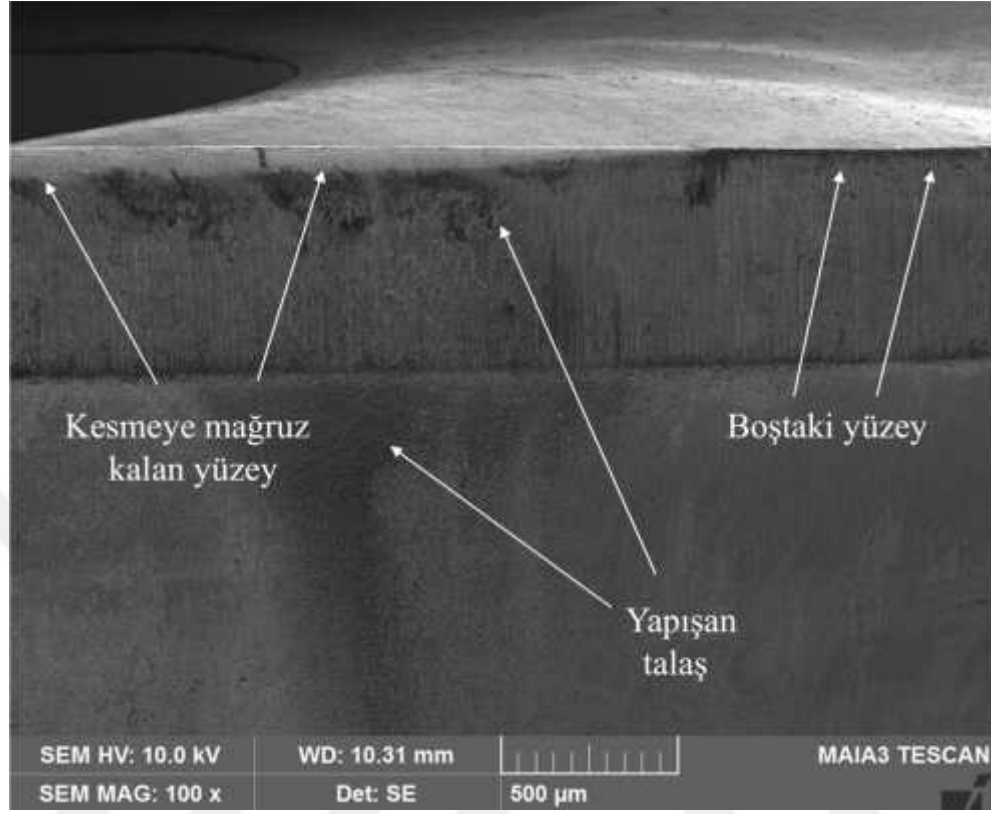
Takım aşınması kesici takımların performansının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olup doğrudan işlenmiş parçaların yüzey kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle, CFRP kompozit malzemenin frezeleme işleminde kullanılan takımların aşınma dayanımı yüzey kalitesi ile doğrudan ilişkilidir (Karpat ve Polat, 2013). Freze takımları çok çeşitli olup, CFRP kompozit malzemenin frezeleme işlemi için kaplamasız karbür takımlar ile birlikte PCD kaplamalı karbür takımlar sıklıkla kullanılmakta ve karbür takımların aşınma direnci büyük ölçüde artmaktadır (Teti, 2002; Dold vd., 2012). Bu nedenler ve maliyet açısından düşünüldüğünde karbür kesici takımların kullanımları hem daha yaygın hem de daha üstündür (Rahman vd., 1999). CFRP kompozit malzemelerin sahip olduğu yüksek sertlik ve düşük ısı iletkenlikten dolayı delinmesinde veya frezelenmesinde kullanılan kesici takımların özellikle abraziv aşınma sonucu kısa sürede ömürlerini tamamlamaktadır. CFRP kompozit malzemelerde tercih edilen kaplamalı takımların kullanımı kesici takım aşınmasını azalmaktadır. İmalat teknolojisinin gelişmesiyle birlikte kaplamalı takımların kullanımları artmakta ve tüm işleme operasyonlarının yaklaşık % 80'i kaplamalı kesici takımlarla gerçekleştirilmektedir (Sarwar ve Haider, 2010). Bu bölümde, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımların belirlenen işleme parametrelerine bağlı olarak takım aşınmasını araştırmak için yapılan çevresel frezeleme işleminde elde edilen aşınması görüntüleri değerlendirilmiştir. Elde edilen aşınma görüntüleri 10 mm uzunluğundaki kesici takımların tam orta bölümünden alınarak incelenmiştir. 6 mm uzunluğundaki CFRP kompozit malzeme kesme işlemi esnasında kesici takımların temas noktaları 2 mm yukarıda ve 2 mm aşağıda olacak biçimde çevresel frezeleme işlemleri uygulanmıştır (Şekil 48, Şekil 49 ve Şekil 50).



Şekil 48: CFRP kompozit malzeme çevresel frezeleme kesme işlemi görüntüsü.



Şekil 49: Kesici takım uç bölgesinin görüntüsü.

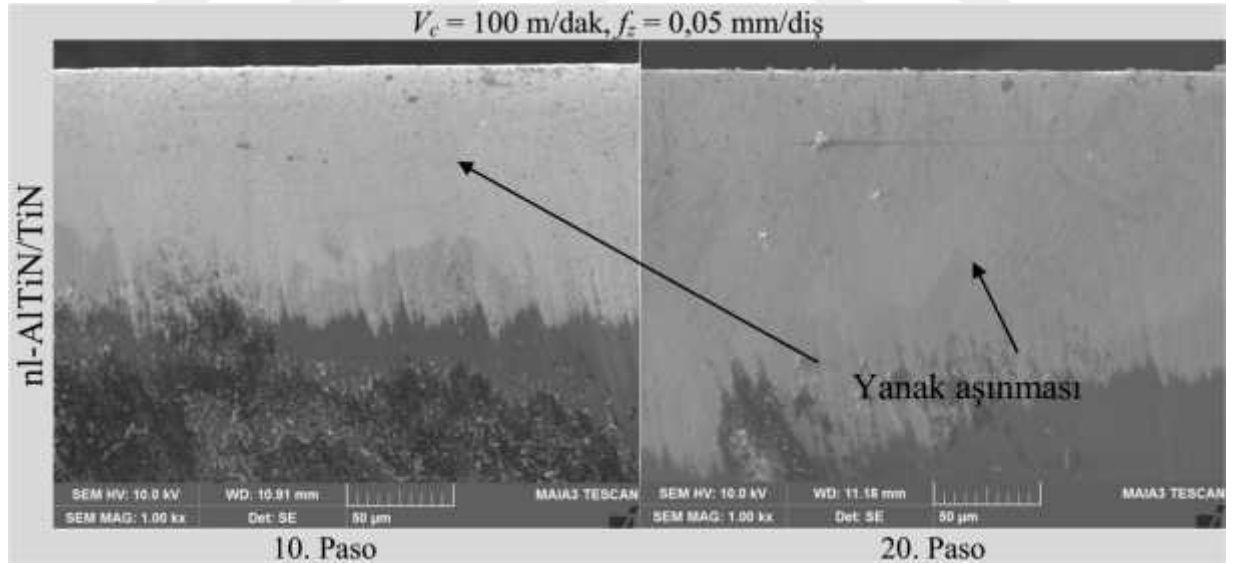


Şekil 50: Kesici takım arka bölgesinin görüntüsü.

CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde kesici takım performansı iki farklı parametrede değerlendirilmiştir. Bunlar; düşük işleme koşulları; $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm işleme parametreleri ve yüksek işleme koşulları; $V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm işleme parametrelerinde incelenmiştir. Yapılan ön deneyler sonucunda CFRP kompozit malzeme frezeleme işleminde kullanılan tüm kesici takımların kesme kenarlarında serbest yüzey aşınması (yanak aşınması) (V_B) dikkate alınmıştır. Deneylerde tüm kesici takımlar oluşan aşınmaların ISO standartları yanak aşınma kriteri $V_B \gg 300$ µm değerini geçmediği görülmüştür (ISO 8688-2). İş parçası üzerinde belirlenen parametrelerde talaş kaldırma işlemi bitiminde kesici takımlar üzerine oluşan aşınma değişim grafikleri Şekil 61, Şekil 62 ve Şekil 63’de verilmiştir.

5.4.1 Düşük İşleme Koşullarındaki Kesici Takım Aşınması ($V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm)

Kesme parametreleri olarak 100 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliği kullanılarak gerçekleştirilen çevresel frezeleme işleminden sonra onuncu ve yirminci pasolar sonunda nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takım yüzeyinden alınan SEM aşınma yüzey fotoğrafı Şekil 51’de verilmiştir. Şekil 51’de görüldüğü gibi onuncu paso sonunda (127,9 μ m) kesici kenardan içeriye doğru kaplama tabakasının 100 μ m aşındığı görülürken yirminci paso sonunda bu değerin 175 μ m’ye çıktığı görülmüştür. 300 m/dak ve 0,05 mm/diş kesme parametrelerinde bu durum 102,2 μ m’den 123,3 μ m’ye ulaştığı görülmüştür. Ancak 100 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında kaldırılan talaş süresi 131,9 sn sürerken 300 m/dak ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında bu durum 44 sn’de gerçekleşmiştir. Bundan dolayı düşük işleme koşullarında kesici takımın iş parçasına temasının fazla olması yanak aşınma oranını da artırmıştır.

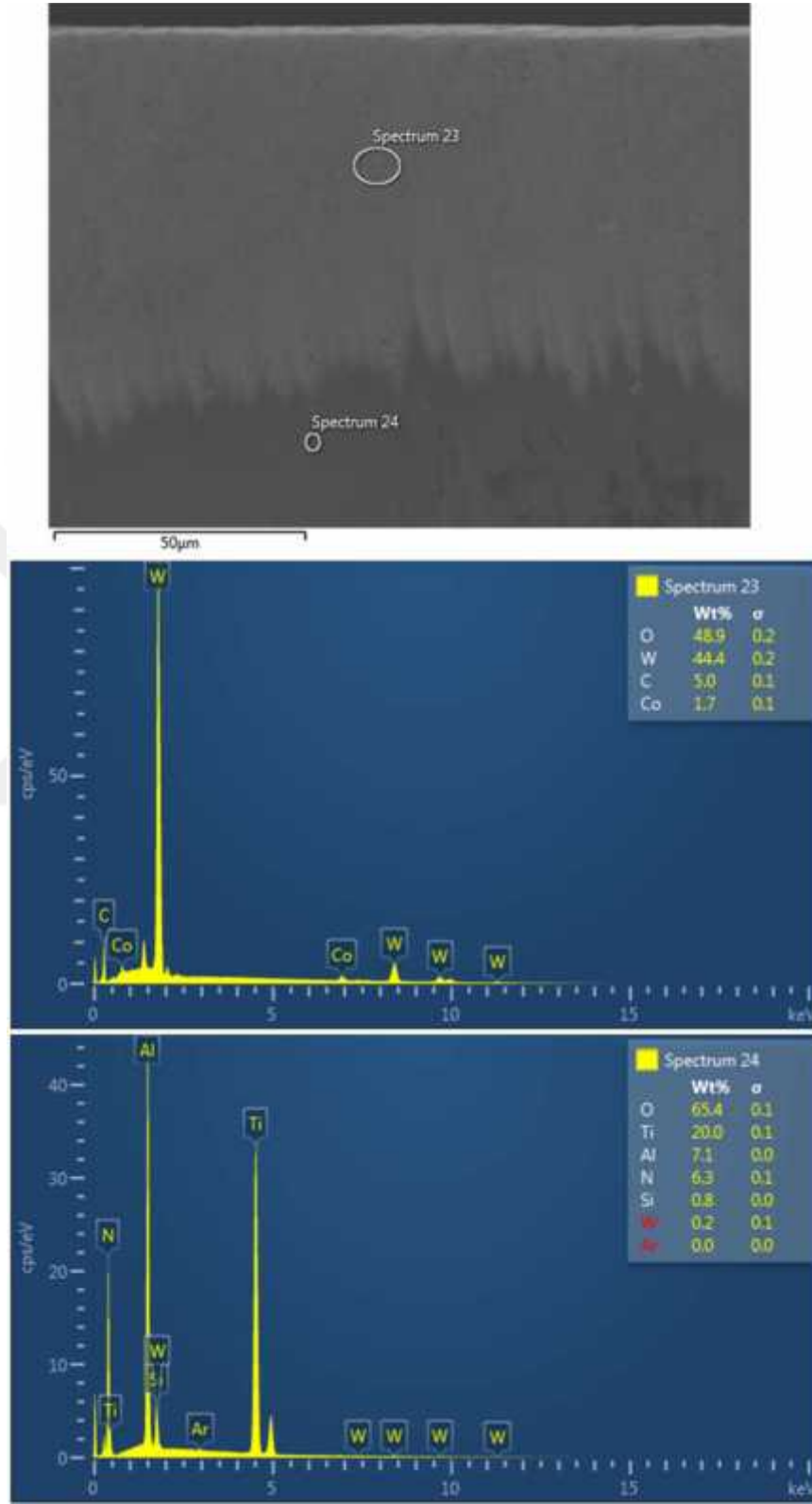


Şekil 51: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu ve yirminci pasosundaki SEM görüntüleri.

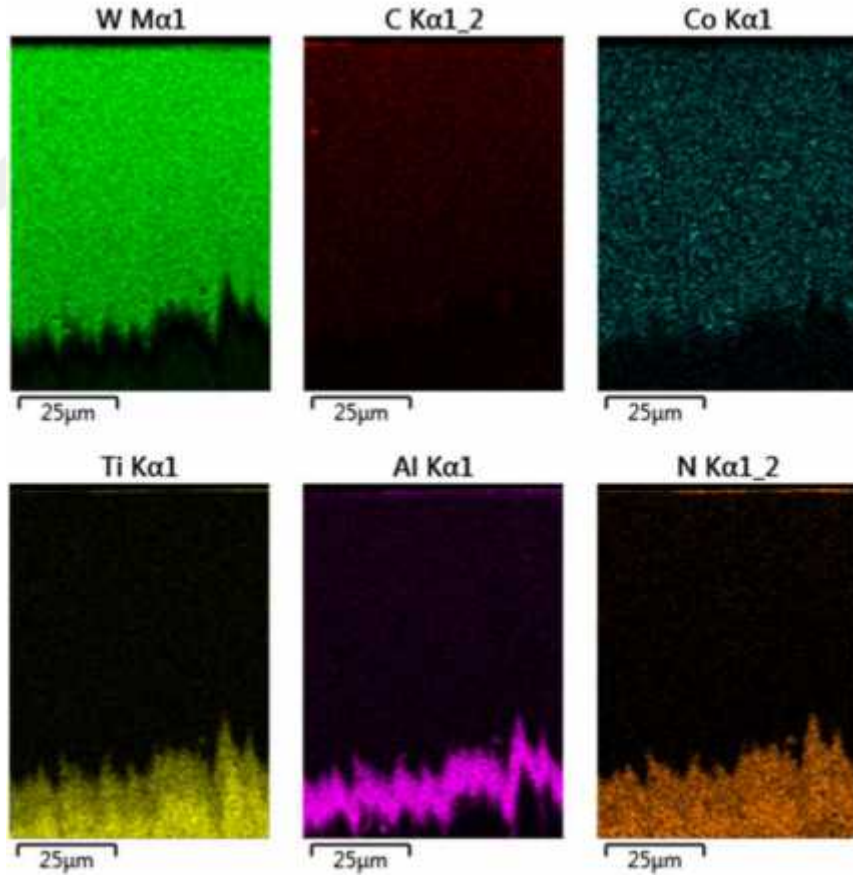
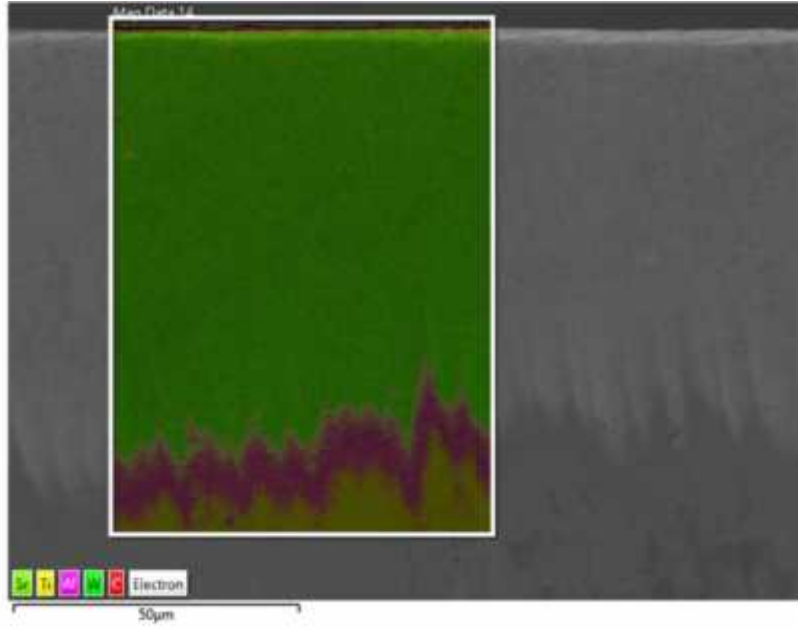
Yanak aşınmasının oluşumunu tespit edebilmek için nl-AlTiN/TiN kesici takımın 100 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/diş ilerleme oranında yapılan çevresel frezeleme işleminden sonra onuncu ve yirminci pasolardan sonra aşınmış yüzeylerden alınan EDS ve elementel haritalama

görüntüleri alınmıştır (Şekil 52 ve Şekil 53). Alınan EDS ve elementel haritalama görüntüleri incelendiğinde onuncu paso sonucu yüzey alanın derinliğinin 65-70 μm seviyesinde olduğu yirminci pasodan sonra ise bu alanın daha da genişleyerek 100 μm 'lik bir tabakanın kesici takım ucundan başlayıp içeriye doğru ilerlediği görülmüştür (Şekil 54 ve Şekil 55).

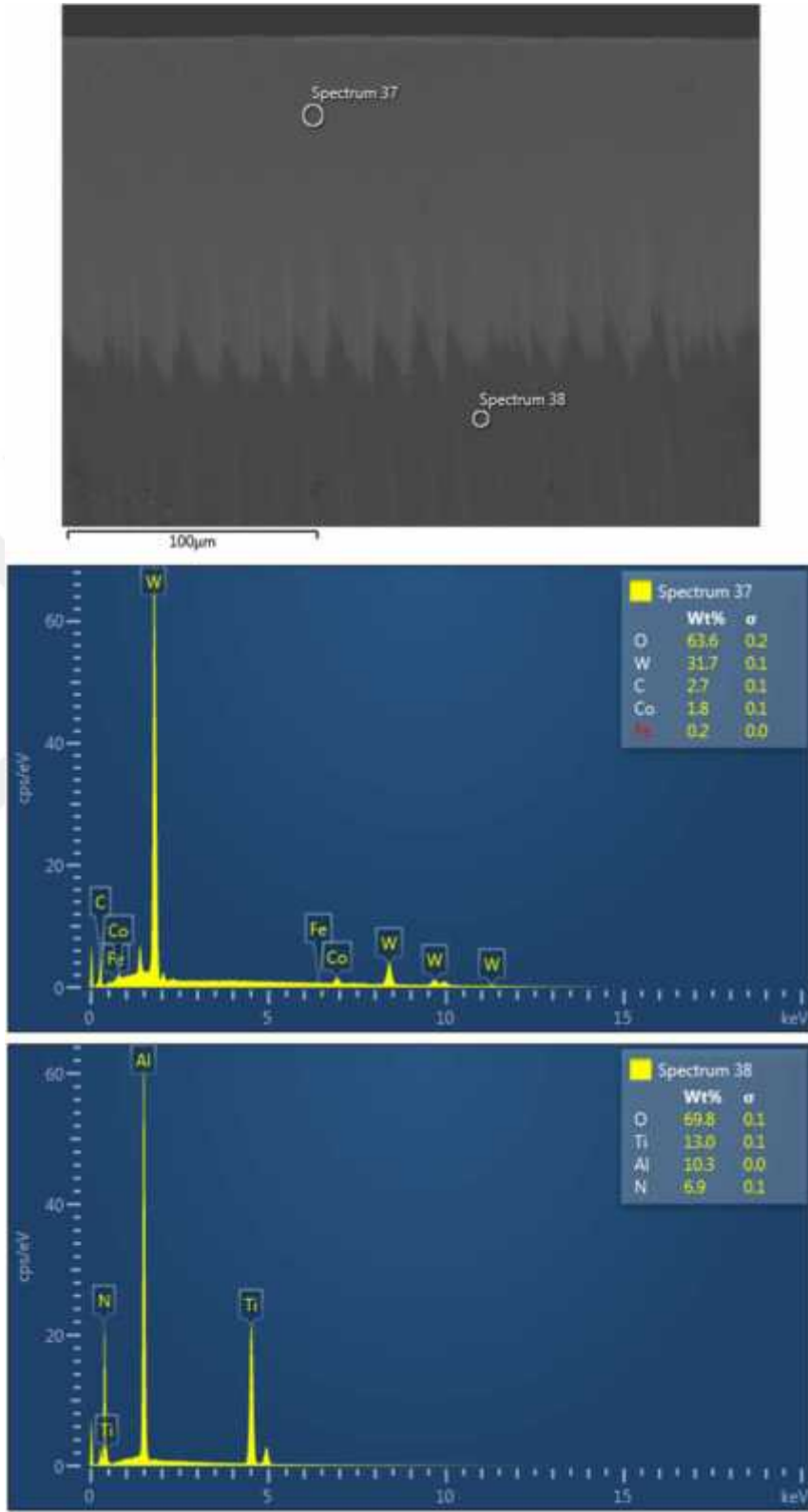




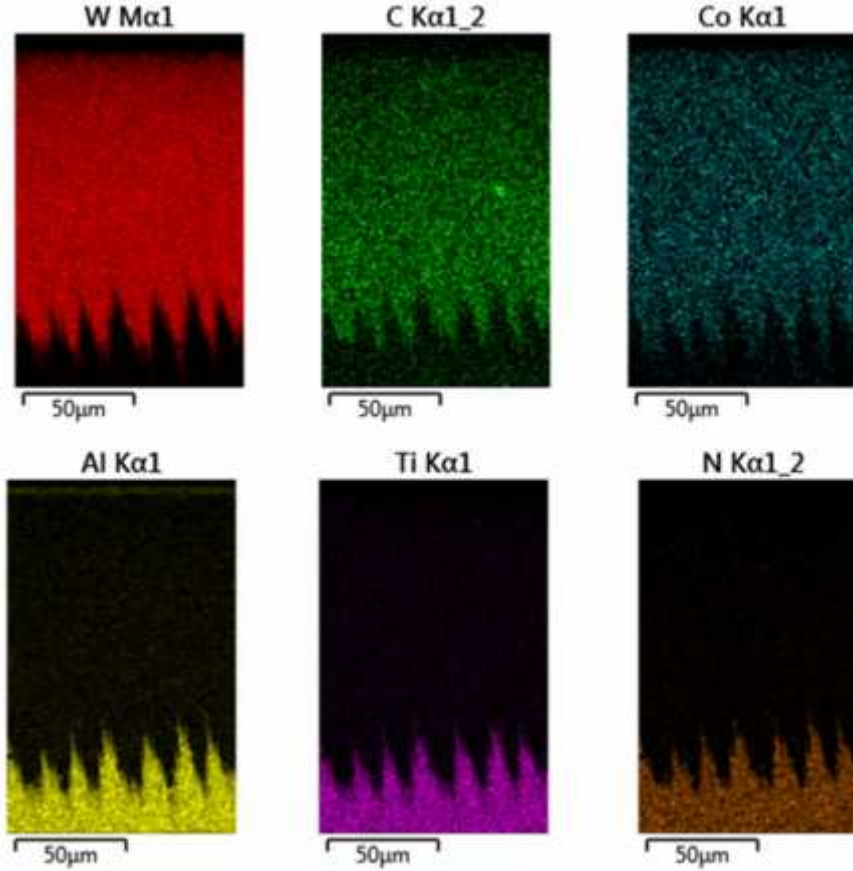
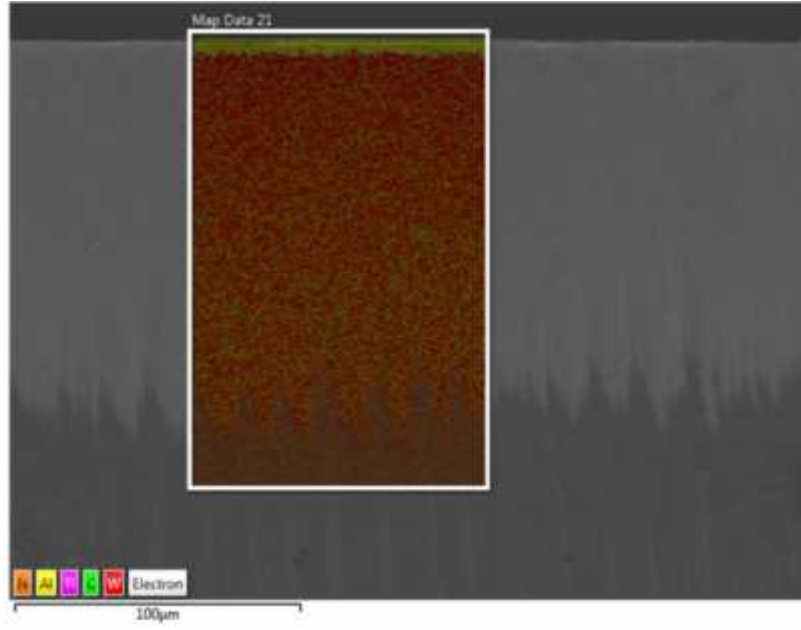
Şekil 52: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.



Şekil 53: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nI-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.



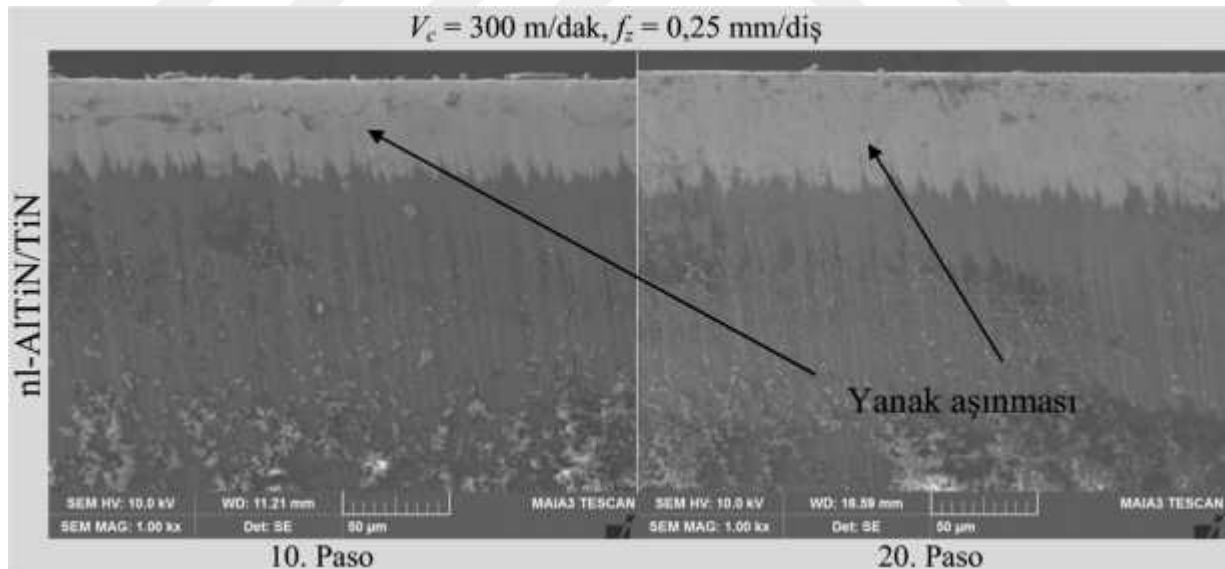
Şekil 54: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.



Şekil 55: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nI-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.

5.4.2 Yüksek İşleme Koşullarındaki Kesici Takım Aşınması ($V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm)

Kesme parametreleri olarak 300 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliği kullanılarak gerçekleştirilen çevresel frezeleme işleminden sonra onuncu ve yirminci pasolar sonunda nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yüzeyinden alınan SEM aşınma yüzey fotoğrafı Şekil 56'da verilmiştir. Şekil 56'da görüldüğü gibi onuncu paso sonunda kesici kenardan içeriye doğru kaplama tabakasının 45,4 μm aşındığı görülürken yirminci paso sonunda bu değerin 65,4 μm 'ye çıktığı görülmüştür. 100 m/dak kesme hızında ve 0,25 mm/diş kesme parametrelerinde bu durum 48,54 μm 'den 77,87 μm 'ye ulaştığı görülmüştür. Ancak 100 m/dak kesme hızında ve 0,25 mm/diş ilerleme oranında kaldırılan talaş süresi 26,4 sn sürerken 300 m/dak ve 0,25 mm/diş ilerleme oranında bu durum 8,8 sn'de gerçekleşmiştir. Bundan dolayı yüksek işleme koşulları kesici takım yanak aşınma oranını arttırmıştır.

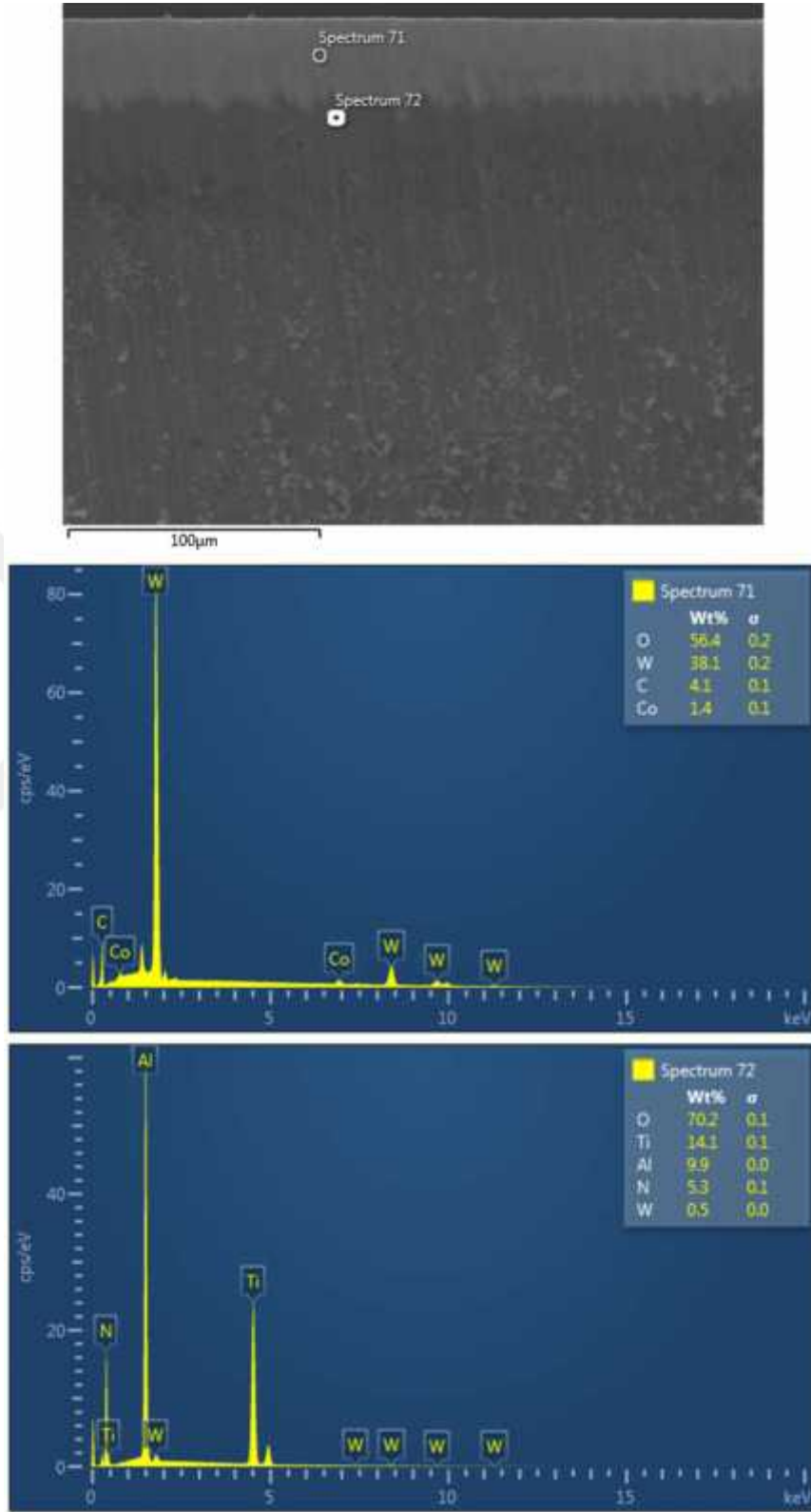


Şekil 56: $V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu ve yirminci pasosundaki SEM görüntüleri.

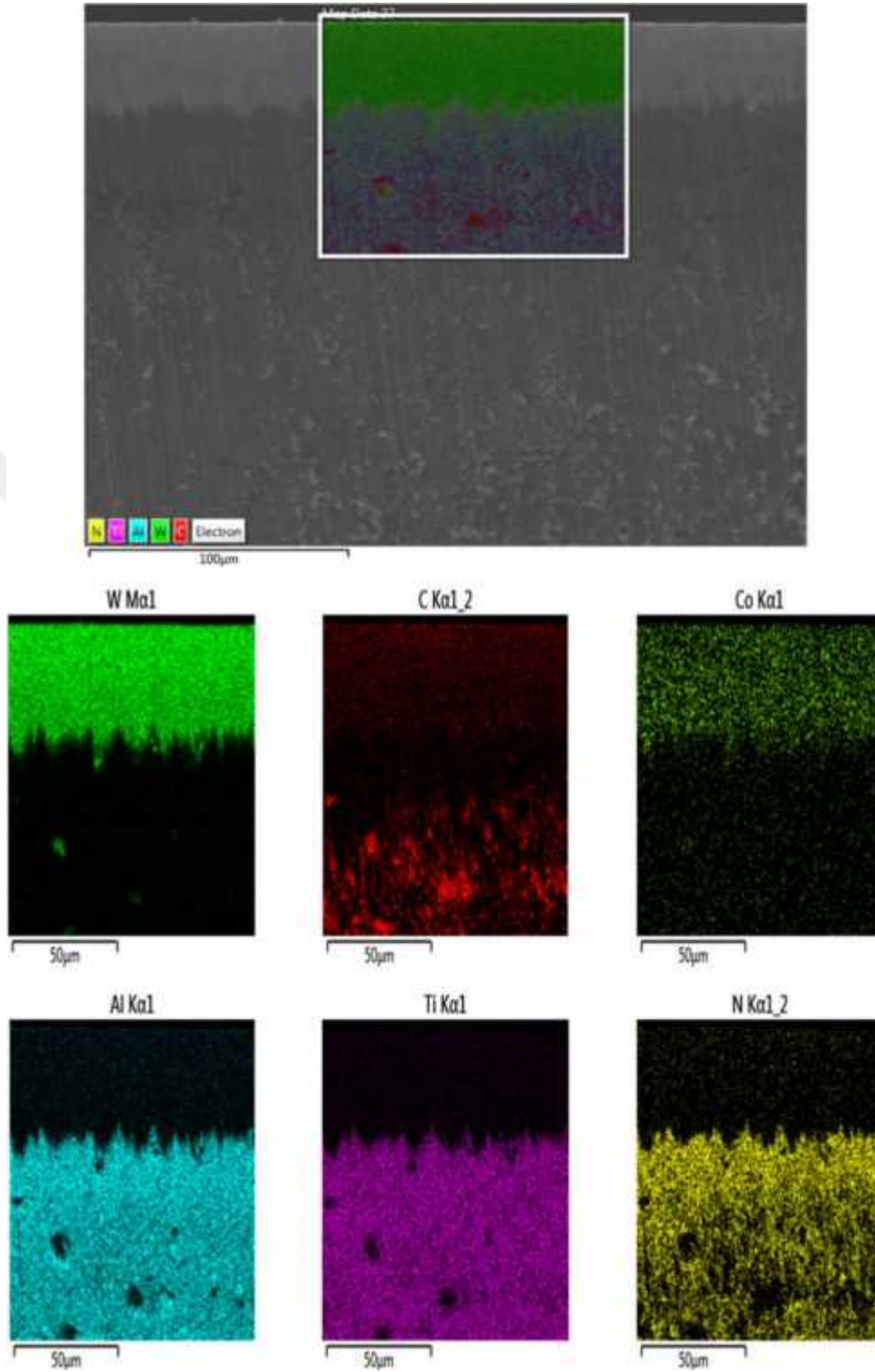
Yanak aşınmasının oluşumunu tespit edebilmek için nl-AlTiN/TiN kesici takımın 300 m/dak kesme hızında ve 0,25 mm/diş ilerleme oranında yapılan çevresel frezeleme işleminden sonra

onuncu ve yirminci pasolardan sonra aşınmış yüzeylerden alınan EDS ve elementel haritalama görüntüleri alınmıştır (Şekil 57, Şekil 58, Şekil 59 ve Şekil 60).

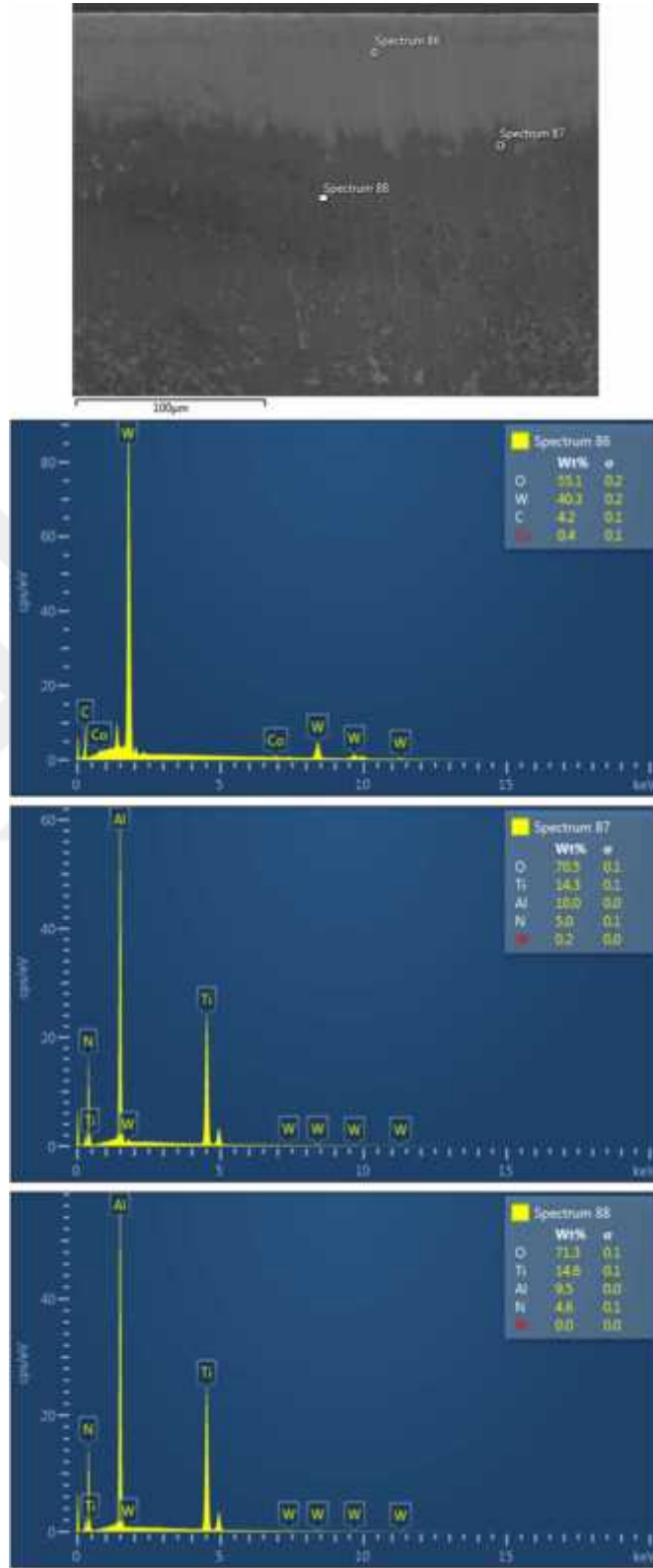




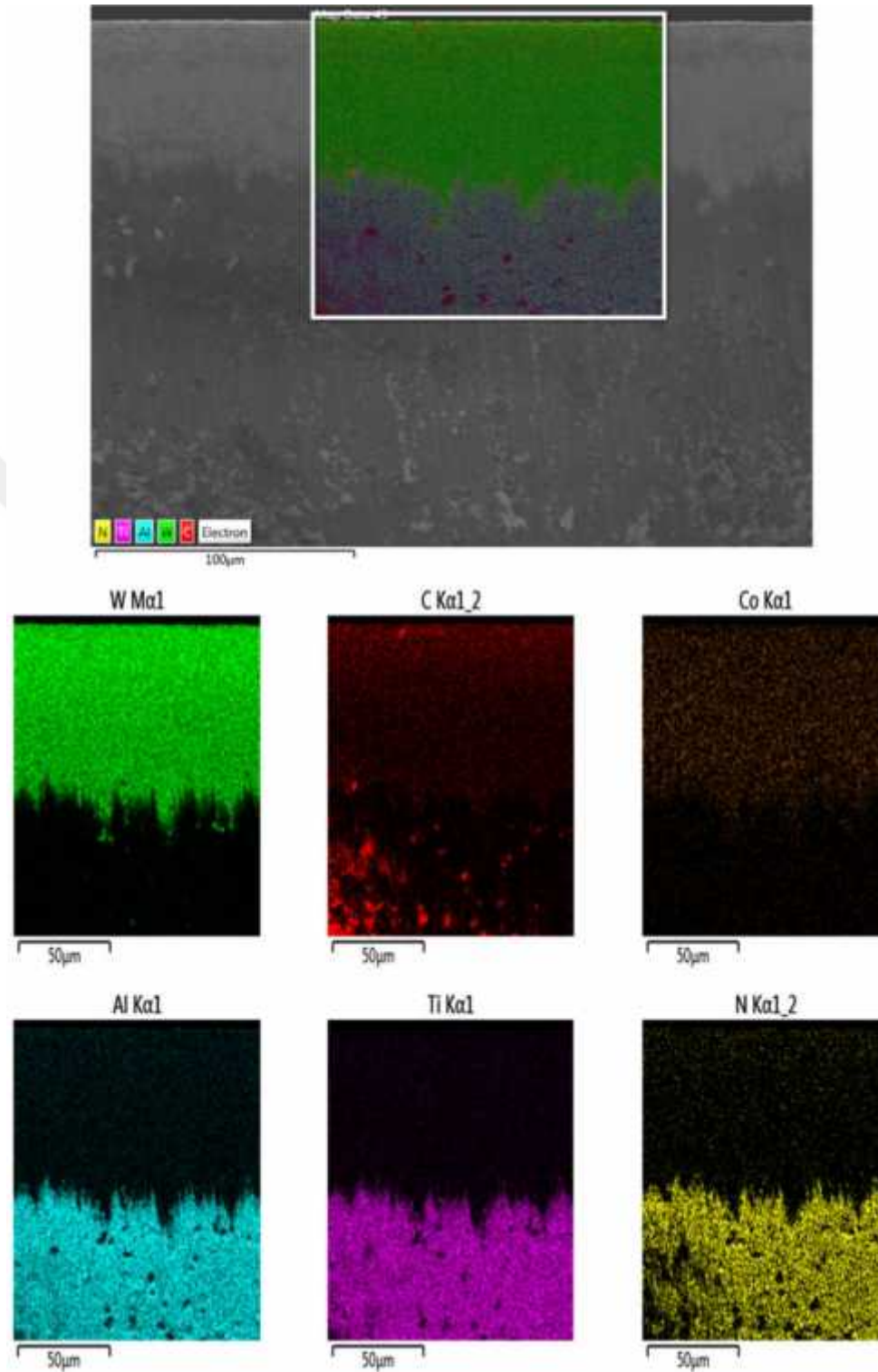
Şekil 57: $V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.



Şekil 58: $V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nI-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın onuncu pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.



Şekil 59: $V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM görüntüsü ve EDS analizi.



Şekil 60: $V_c = 300$ m/dak, $f_z = 0,25$ mm/diş kesme parametrelerinde aşınmış nI-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımın yirminci pasosundaki SEM ve elementel haritalama görüntüsü.

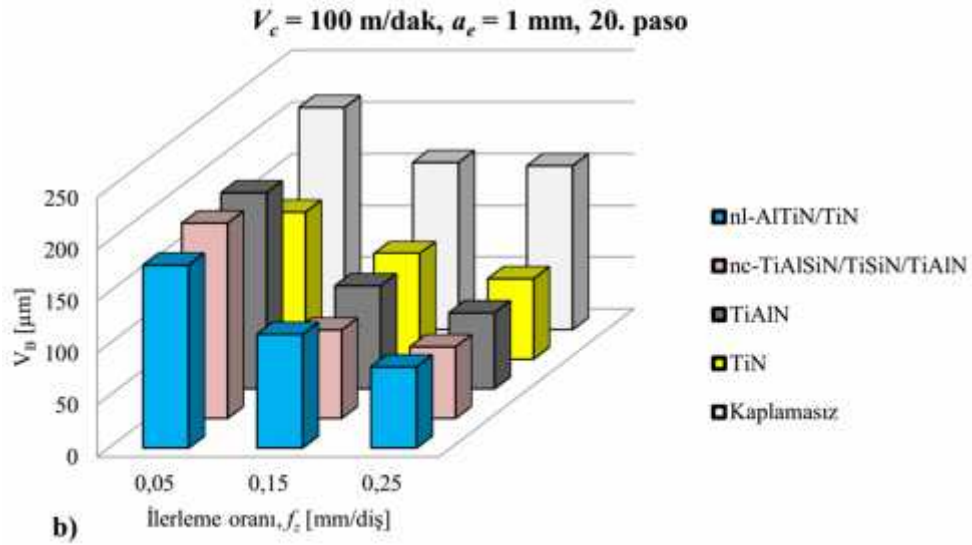
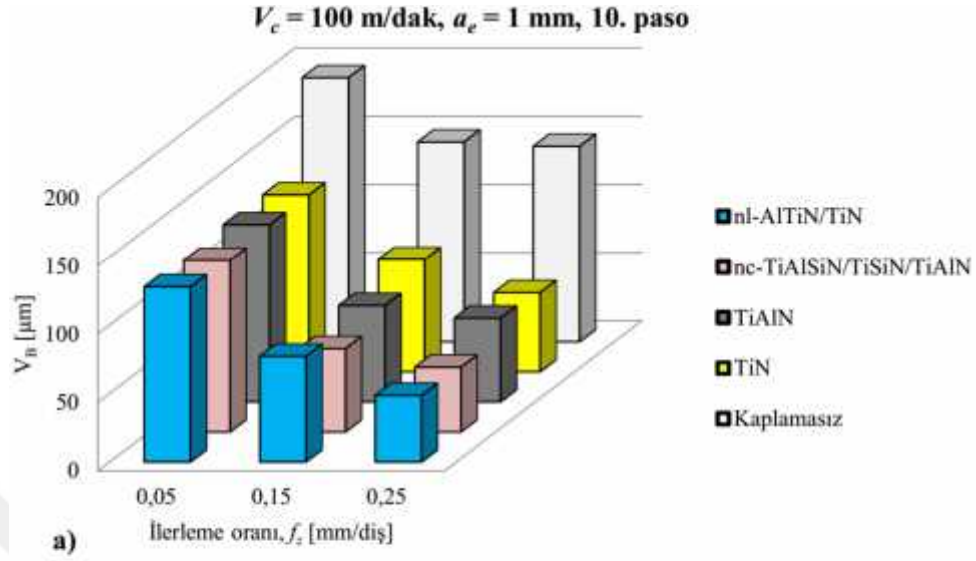
Diğer kaplamalı takımlarda da benzer durum görülmüş sadece bu kaplama tabakasının aşınma oranında hafif değişiklikler meydana gelmiştir.

5.4.3 Farklı Kesme Hızlarındaki Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımların İlerleme Oranlarına Bağlı Olarak Takım Aşınma Üzerindeki Değişim Grafikleri

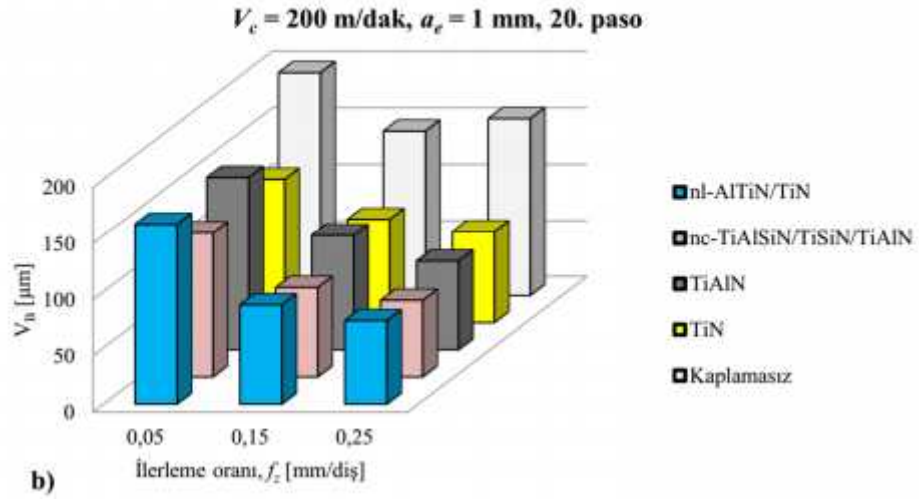
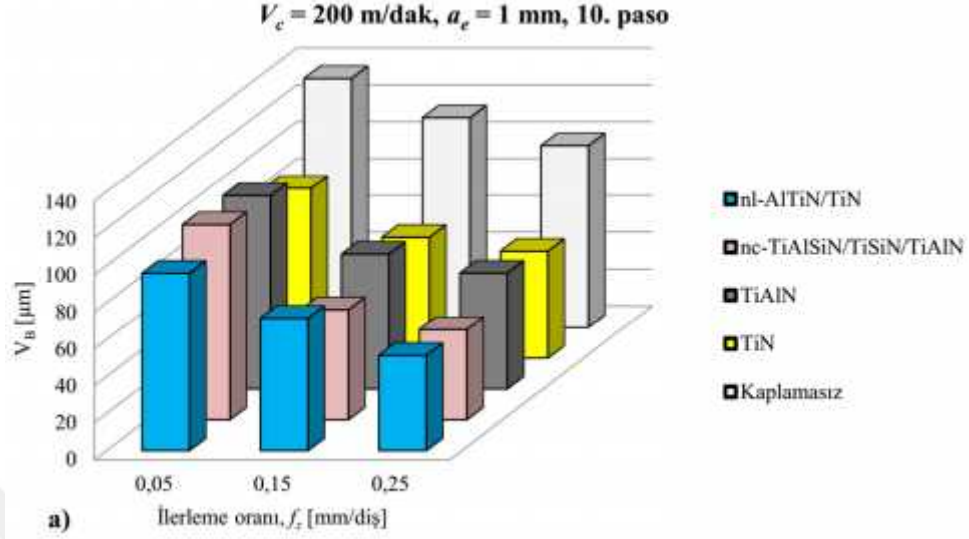
Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi esnasında oluşan takım aşınma değişim grafikleri belirlenen işleme parametrelerinde Şekil 61, Şekil 62 ve Şekil 63’de verilmiştir. CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla farklı kesme hızı ve farklı ilerleme oranlarında tüm kesici takımlarda yanak aşınması tespit edilmiştir. Elde edilen yanak aşınma değerleri tüm kesici takımların onuncu ve yirminci pasoları sonrası alınan SEM görüntüleri verileridir. Yanak aşınması değişim grafikleri incelediğinde; artan ilerleme oranına bağlı olarak azalan yanak aşınma değerlerine ulaşılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi esnasında 0,05 mm/diş ilerleme oranında en yüksek yanak aşınma değerleri ölçülmüştür. Artan ilerlemeye bağlı olarak özellikle kaplamalı kesici takımlarda yanak aşınma değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi esnasında kesici takımlarda oluşan aşınmanın kesme işlemi süresine bağlı olması ile açıklanabilir (Hocheng vd., 1993; Iliescu vd., 2010; Khairusshima vd., 2011; Khairusshima ve Sharifah, 2017; Sheikh-Ahmad vd., 2017). Deneylerde talaş kaldırma esnasında en uzun süre 131,9 sn ile 100 m/dak kesme hızı 0,05 mm/diş ilerleme oranında tüm kesici takımlarla gerçekleşmiştir. Artan kesme hızı ve ilerleme oranı işleme parametrelerine bağlı olarak işleme süreleri azalmıştır. En kısa süre 8,8 sn ile 300 m/dak kesme hızı 0,25 mm/diş ilerleme oranı işleme parametrelerinde uygulanmıştır.

Karbon fiberlerin sert ve aşındırıcı yapısı kesici takımlarda yanak aşınması oluşmasına neden olmuştur (Madhavan vd., 2015). Yüksek tokluk özelliklerine sahip karbür takımlarda kesici takımın aşınması daha çok aşınma (abrasion) nedeniyle oluşur ve fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesinde en iyi performans karbür takımlarla elde edilmektedir (Sheikh-Ahmad, 2009). En yüksek yanak aşınma değerleri farklı kesme hızlarında ve 0,05 mm/diş ilerleme oranlarında tespit edilmiştir. Bu durum kesici takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden ve abraziv tip bir

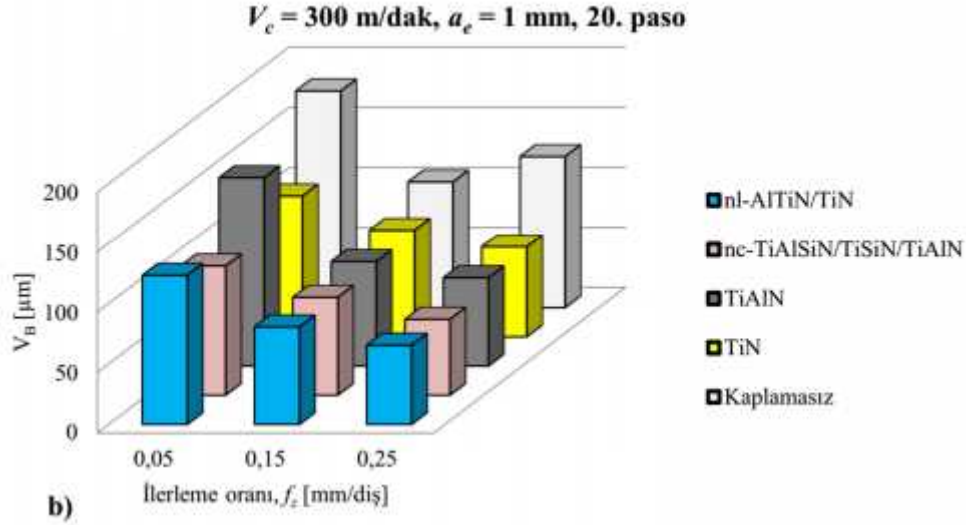
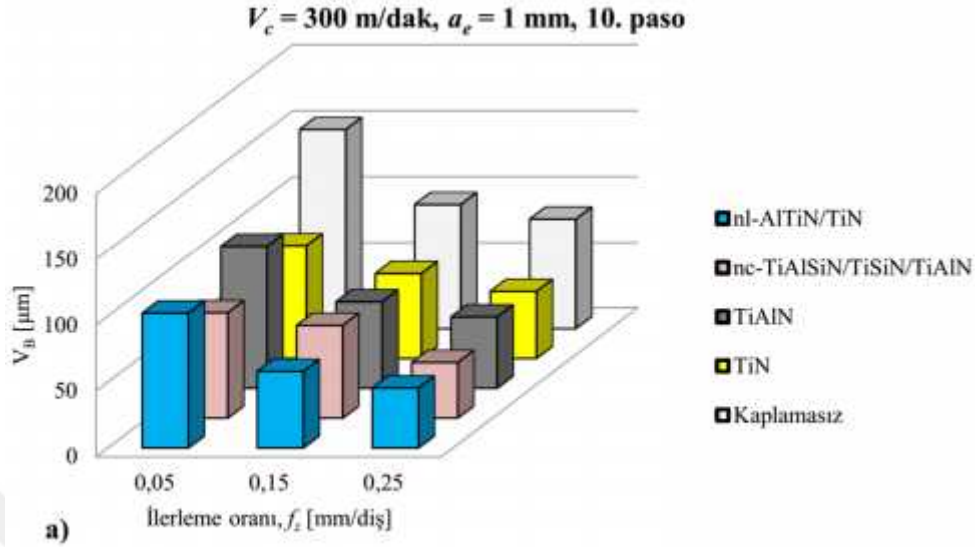
aşınma mekanizmasından kaynaklanmaktadır (Hocheng vd., 1993; Çakır, 2006; Khairusshima vd., 2011; Madhavan vd., 2015; Maegawa vd., 2016; Wang vd., 2016; Khairusshima ve Sharifah 2017). Kaplamalı kesici takımlar arasında en düşük aşınma değeri 42,140 μm ile 300 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımın onuncu paso sonucunda tespit edilmiştir. En yüksek aşınma değeri 189,300 μm ile 100 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde TiAlN kaplamalı kesici takımda bulunmasına rağmen *ISO* standartları yanak aşınma kriteri $V_B \gg 300 \mu\text{m}$ 'yi geçmediği tespit edilmiştir (ISO 8688-2). Kaplamasız kesici takımlarda en iyi aşınma değeri 83,640 μm ile 300 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde onuncu paso sonucunda tespit edilmiştir. En yüksek aşınma değeri 214,410 μm ile 100 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde yirminci paso sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 61: $V_c = 100 \text{ m/dak}$ kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarında kesici takımların a) Onuncu ve b) Yirminci pasolarından elde edilen yanak aşınma değişim grafiği.



Şekil 62: $V_c = 200 \text{ m/dak}$ kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarında kesici takımların a) Onuncu ve b) Yirminci pasolarından elde edilen yanak aşınma değişim grafiği.



Şekil 63: $V_c = 300 \text{ m/dak}$ kesme hızında ve üç farklı ilerleme oranlarında kesici takımların a) Onuncu ve b) Yirminci pasolarından elde edilen yanak aşınma değişim grafiği.

5.5 İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Elde Edilen Delaminasyon Derinliği Değerlerindeki Değişim

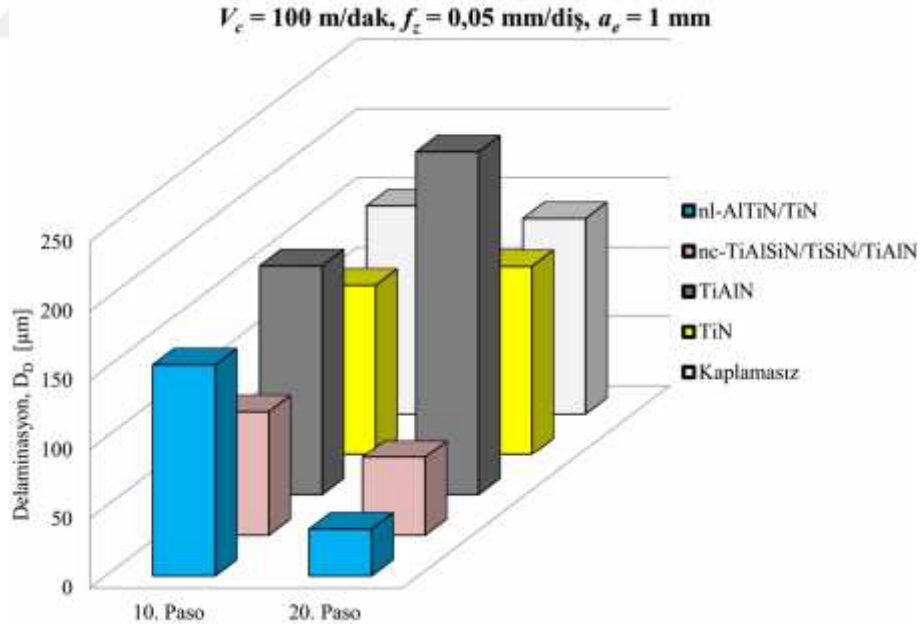
Üretilen parçaların montaj durumlarını etkilediğinden dolayı, CFRP kompozit malzemelerin yüzey kalitesi önemli bir husustur. CFRP kompozit malzemelerin uçak gövdesi montaj için perçin ve cıvata deliklerinde talaşlı imalat yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisinde son montaj sırasında oluşan delaminasyon hasarından dolayı parçaların % 60'ı

gibi yüksek bir oranda reddedildiği bildirilmektedir (Wong vd., 1982; Khashaba, 2004; Krishnaraj vd., 2010; Isbilir ve Ghassemieh, 2012). CFRP kompozit malzemeler üzerinde düz yüzeylerin elde edilmesi için frezeleme işlemi kullanılmaktadır. Fakat bu işlemin yapılması sırasında başta delaminasyon olmak üzere, fiber kırılması, kesilmemiş fiber gibi hasar mekanizmaları meydana gelmektedir. Tabaka içi veya katmanlar arası hata olarak tanımlanan delaminasyon bunlardan en önemlisidir (Teti, 2002; Tsao ve Hocheng, 2008; Krishnamoorthy vd., 2011; Karpas vd., 2012; Chen vd., 2013; Kiliçkap vd., 2015; Epaarachchi ve Kahandawa, 2016; Yao vd., 2016). CFRP kompozit malzemelerde kesme işlemi yerine malzemenin ezerek çıkarılması veya kesici takımın malzemeyi tam kesmemesi durumunda hasar oluşmaktadır (Bhatnagar vd., 1995; Tamin, 2012). Bu bölümde, çok yönlü CFRP kompozit malzeme çevresel frezelenmesinde ($0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$)s formlarındaki iş parçası, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar kullanılarak delaminasyon derinliği kuru kesme koşulları altında araştırılmıştır. Üç farklı kesme hızı (100, 200 ve 300 m/dak), üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm sabit kesme genişliği işleme parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Çevresel frezeleme işleminde her on pasodan sonra iş parçasının SEM görüntüleri alınarak değerlendirilmiştir. SEM görüntüleri alınan iş parçalarının kesme uzunluğuna (140 mm) bağlı olarak her bir ilerleme oranında ve kesme hızında delaminasyon derinliği değişim grafikleri elde edilmiştir. Bu deneylerde ölçülen bütün ölçüm verileri SEM görüntüleri alındığı sırada onuncu ve yirminci pasolar verileridir. CFRP kompozit malzeme çevresel frezelenmesinde işlenen tüm iş parçası kenarlarında delaminasyon oluşmasına rağmen elde edilen değerler D_D « 1500 μm delaminasyon derinliğini aşmadığı tespit edilmiştir. Bu değeri aşan CFRP kompozit malzemelerin delaminasyon derinliği (D_D) değerlerinin havacılık endüstrisinde kabul edilmediği bildirilmektedir (Janardhan vd., 2006; Sheikh-Ahmad vd., 2012).

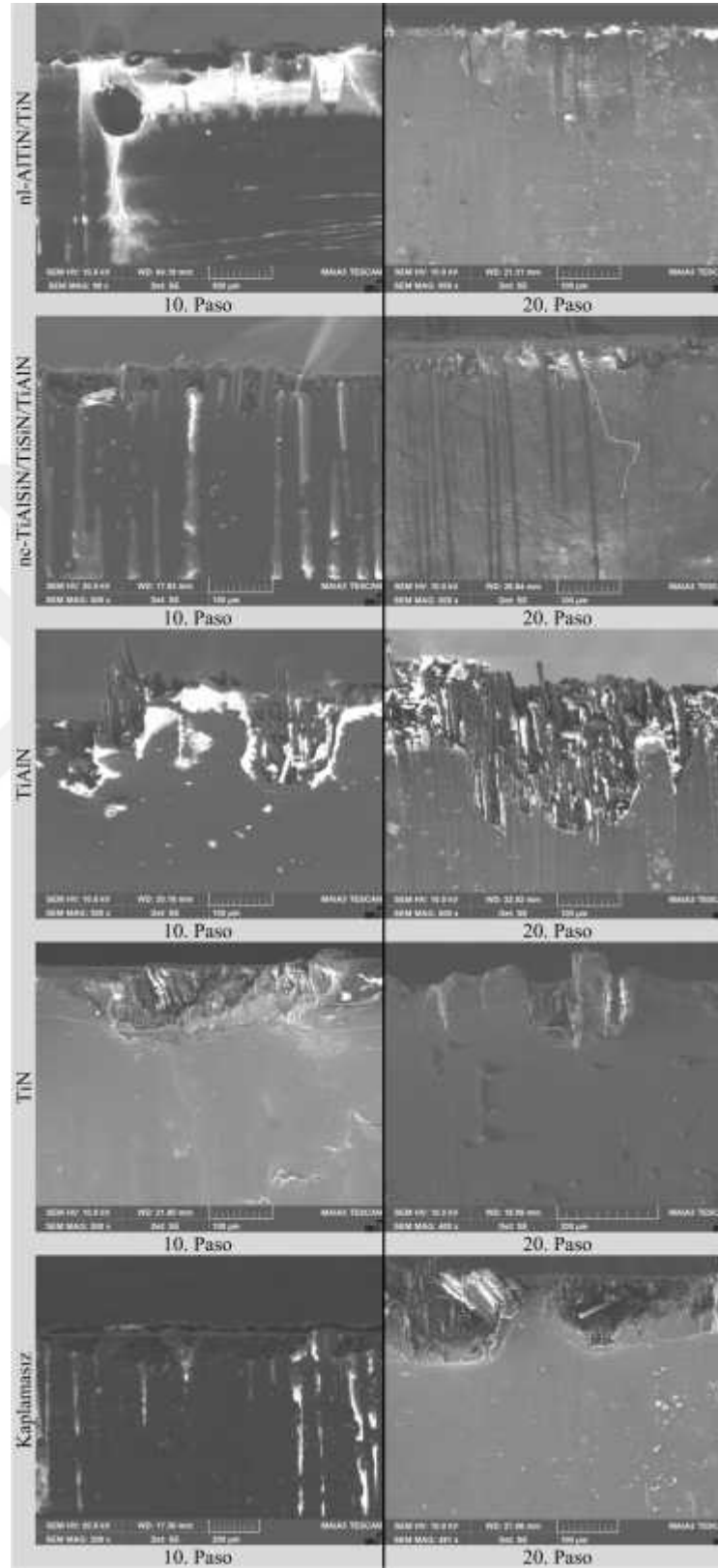
5.5.1 $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemedeki meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 64 ve Şekil 65'de verilmiştir. 100 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme

oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. Kaplamalı ve kaplamasız takımlarla CFRP kompozit malzemenin D_D değerleri artan paso sayısına bağlı olarak dalgalanmalar göstermiştir. CFRP kompozit malzemelerin D_D 'liği bakımından en iyi işlenmiş yüzey kalitesi düşük ilerleme oranı ve yüksek kesme hızı işleme parametreleri olarak bildirilmektedir (Janardhan vd., 2006; Sheikh-Ahmad, 2009; Sheikh-Ahmad vd., 2012; Slamani vd., 2015). Tüm kesici takımlar arasında 247,680 μm ile en yüksek D_D değeri artan paso sayısına bağlı olarak TiAlN kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir. Bu durum, CFRP kompozit malzemenin üst tarafında iş parçasını destekleyecek herhangi bir tabakanın olmamasıyla açıklanabilir (Sheikh-Ahmad vd., 2012; Liu vd., 2017). İş parçasının frezelenmesi esnasında kesici takım fiberleri dışarı doğru bükülür ve tabaka kısmından uzaklaştırmaya çalışır. Bu tabakalar arası gerilim (stress) oluşturur ve tabakaların üst taraftan ayrılmasına neden olur (Hintze ve Hartmann, 2013). CFRP kompozit malzemenin 100 m/dak kesme hızı 0,05 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 35,540 μm ile nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir.



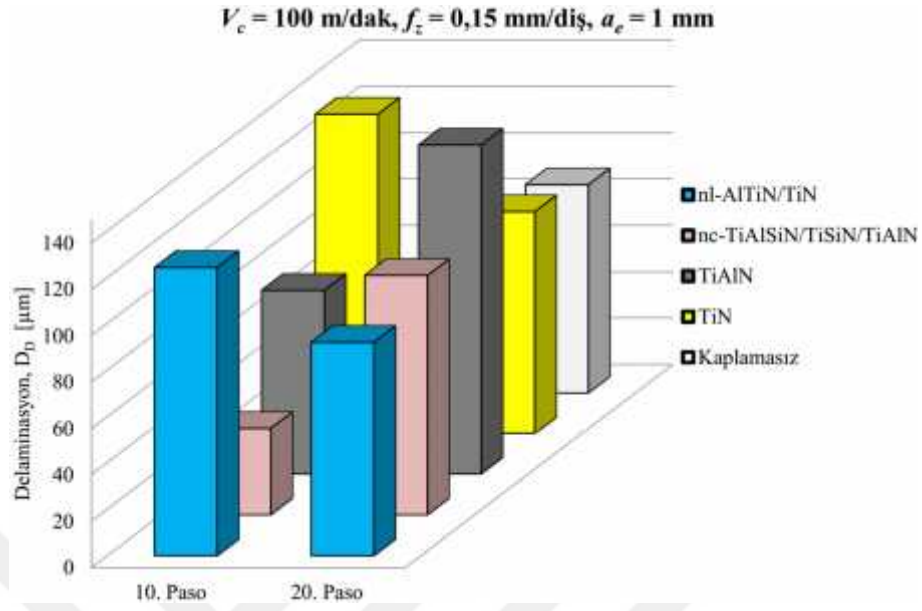
Şekil 64: $V_c = 100 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,05 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzeme de meydana gelen D_D değişim grafiği.



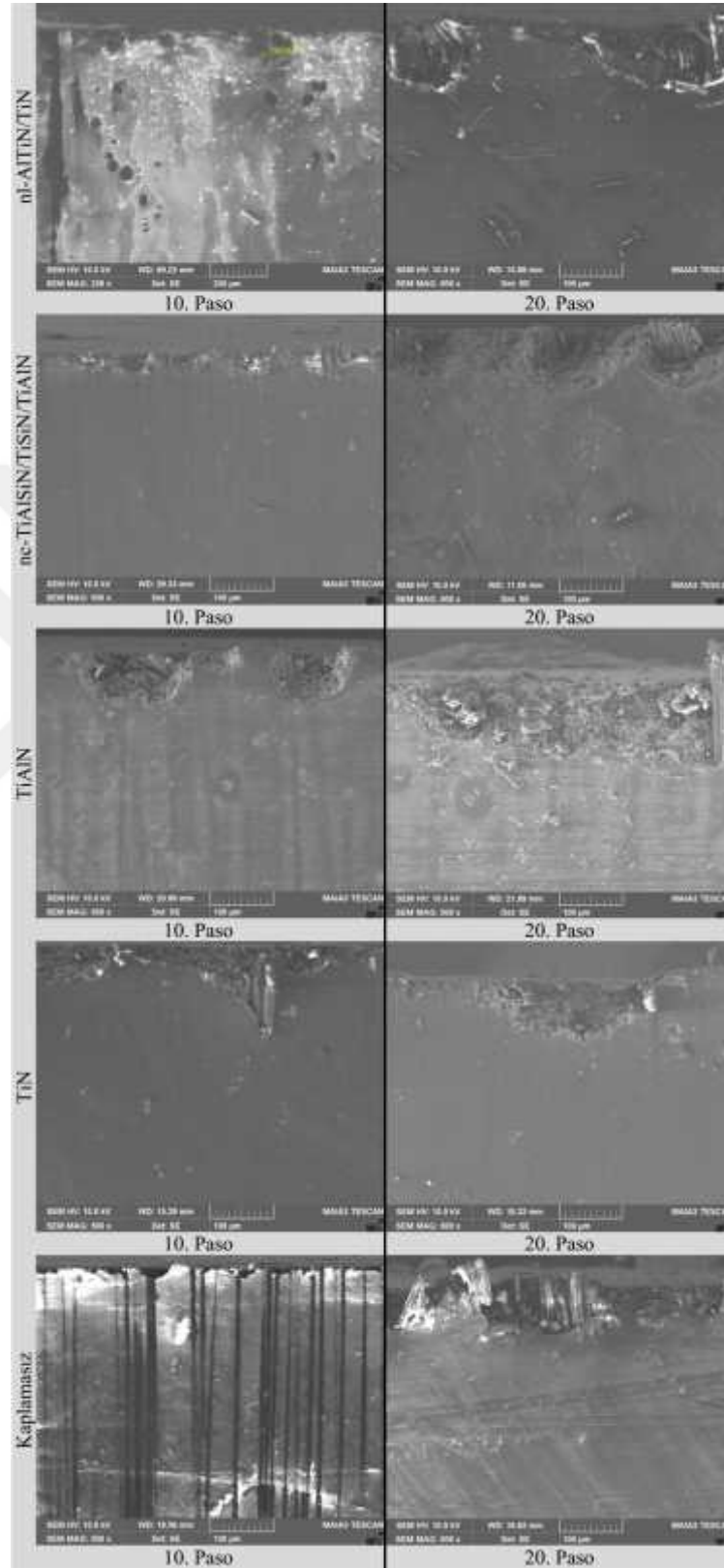
Şekil 65: $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.2 $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 66 ve Şekil 67'de verilmiştir. 100 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. Kaplamalı ve kaplamasız takımlarla CFRP kompozit malzemenin D_D değerleri artan paso sayısına bağlı olarak dalgalanmalar göstermiştir. İlerleme oranının artmasıyla nl-AlTiN/TiN ve TiN kaplamalı kesici takımlarda delaminasyon değerleri son pasoda (sırasıyla 91,820 μm ve 95,660 μm) azalmıştır. nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı ve TiAlN kaplamalı kesici takımında bu durumun tam aksi meydana gelerek bu değerler 103,310 μm ve 142,070 μm oranlarında ölçülmüştür. Bu artışın titreşimden ve kesici takımların kesme kenarlarının temas yüzeylerinin artan ilerleme oranlarına bağlı olarak aşındırıcı yapıya sahip iş parçasına temas etmesinden kaynaklanmaktadır (Khairusshima vd., 2011; Kecik vd., 2012; Nurhaniza vd., 2016). CFRP kompozit malzemede belirlenen işleme parametrelerinin etkisinden dolayı TiAlN kaplamalı kesici takım hariç son pasolarda yaklaşık olarak yakın değerler elde edilmiştir. CFRP kompozit malzemenin 100 m/dak kesme hızı 0,15 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 23,260 μm ile kaplamasız kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir.



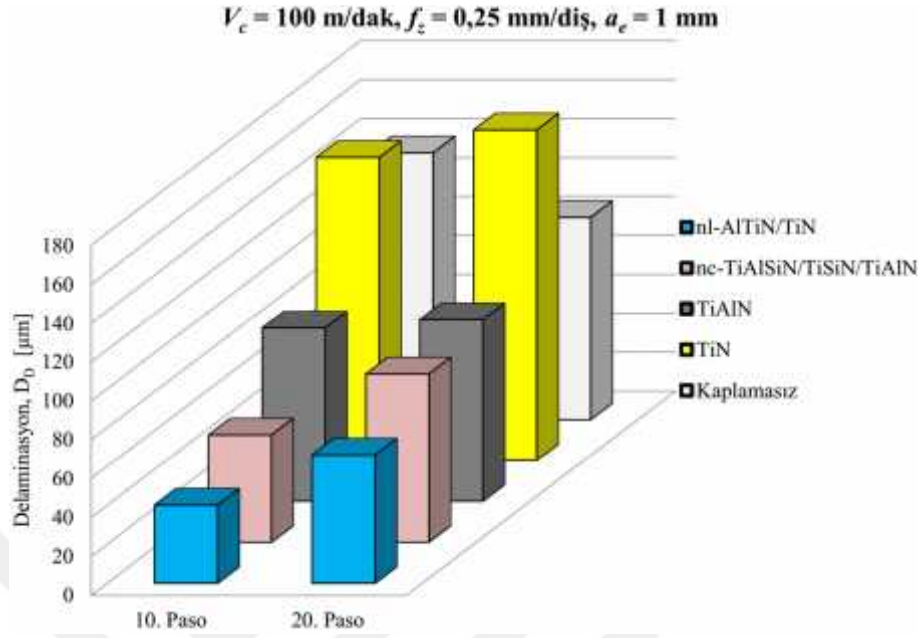
Şekil 66: $V_c = 100 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,15 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzeme de meydana gelen D_D değışim grafiğı.



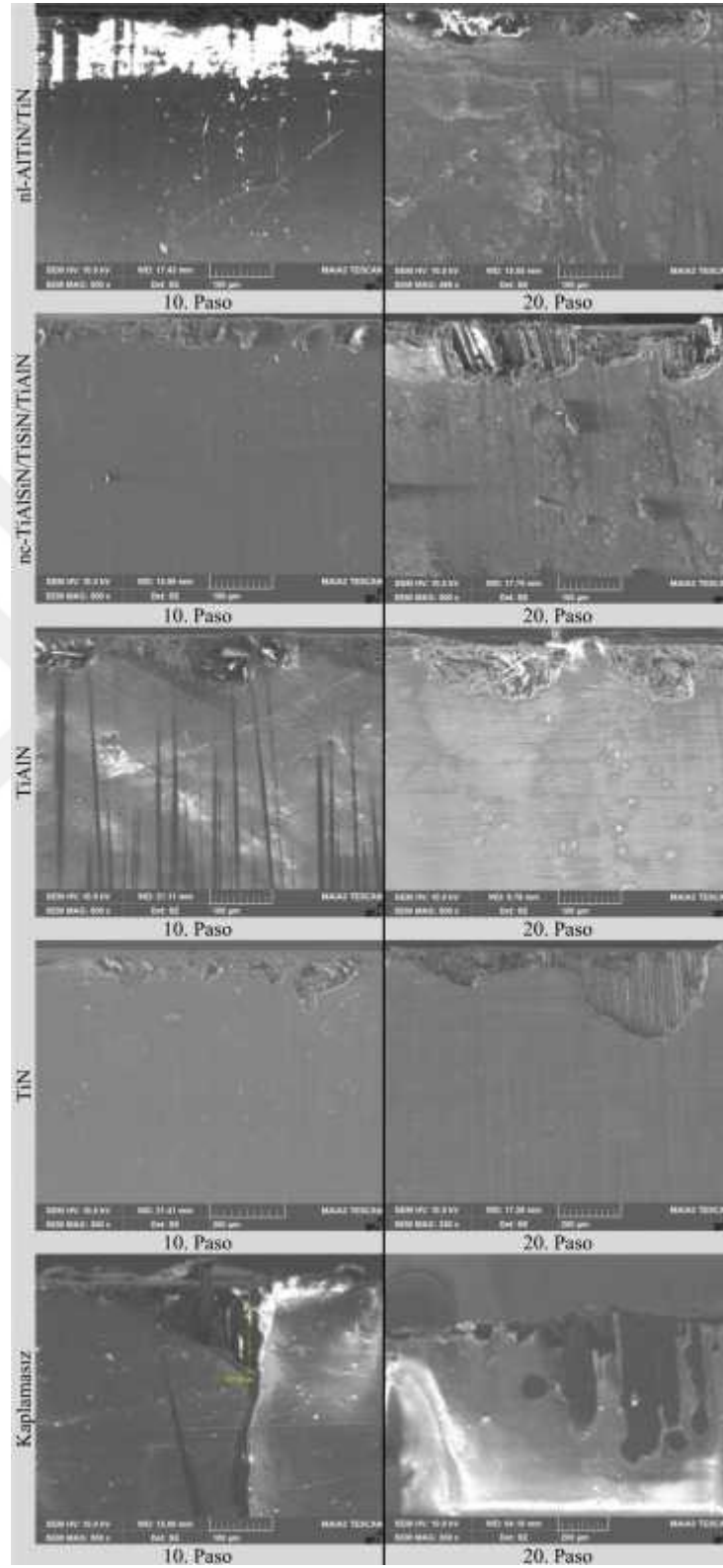
Şekil 67: $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.3 $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 68 ve Şekil 69'da verilmiştir. 100 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. CFRP kompozit malzeme frezelenmesinde artan ilerleme oranına bağlı olarak D_D değerlerinin artışı bildirilmektedir (Sheikh-Ahmad vd., 2012; Ghafarizadeh vd., 2016). Kaplamalı kesici takımlar arasında en yüksek kaplama kalınlığına sahip olan TiN kaplamalı kesici takım ile işlenen CFRP kompozit malzemenin artan paso sayısına bağlı olarak D_D değerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Kaldırılan talaş miktarının artmasıyla TiN kaplamalı kesici takım yüksek ilerleme oranından olumsuz etkilenmiştir. Kaldırılan talaş miktarının % 100 artmasıyla D_D değeri % 79,6 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı ve heterojen yapısı kesici takım ve yüzey kalitesi performanslarını etkilemektedir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin işleme proseslerinde işleme koşullarıyla birlikte kesici takımın seçimi önemli rol oynamaktadır (Ferreira vd., 1999). nl-ALTiN/TiN ve nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımlarla onuncu (40,010 μm ve 55,190 μm) ve yirminci (65,900 μm ve 86,510 μm) pasolarla kesme uzunluğuna bağlı olarak düşük D_D değerleri ölçülmüştür. nl-ALTiN/TiN ve nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımlarla artan paso sayısına bağlı olarak artış tespit edilmiştir. CFRP kompozit malzemenin 100 m/dak kesme hızı 0,25 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 40,010 μm ile nl-ALTiN/TiN kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir.



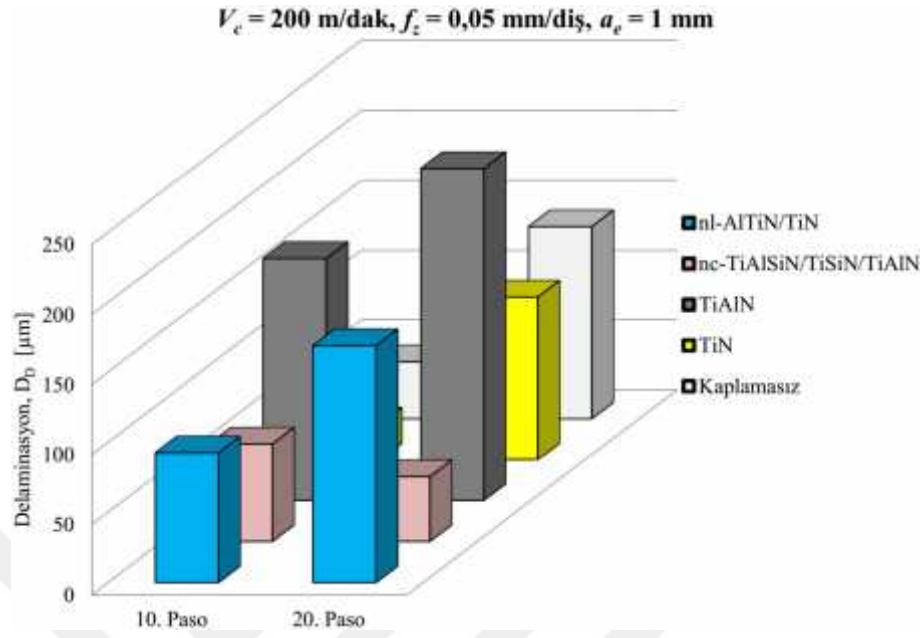
Şekil 68: $V_c = 100 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,25 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



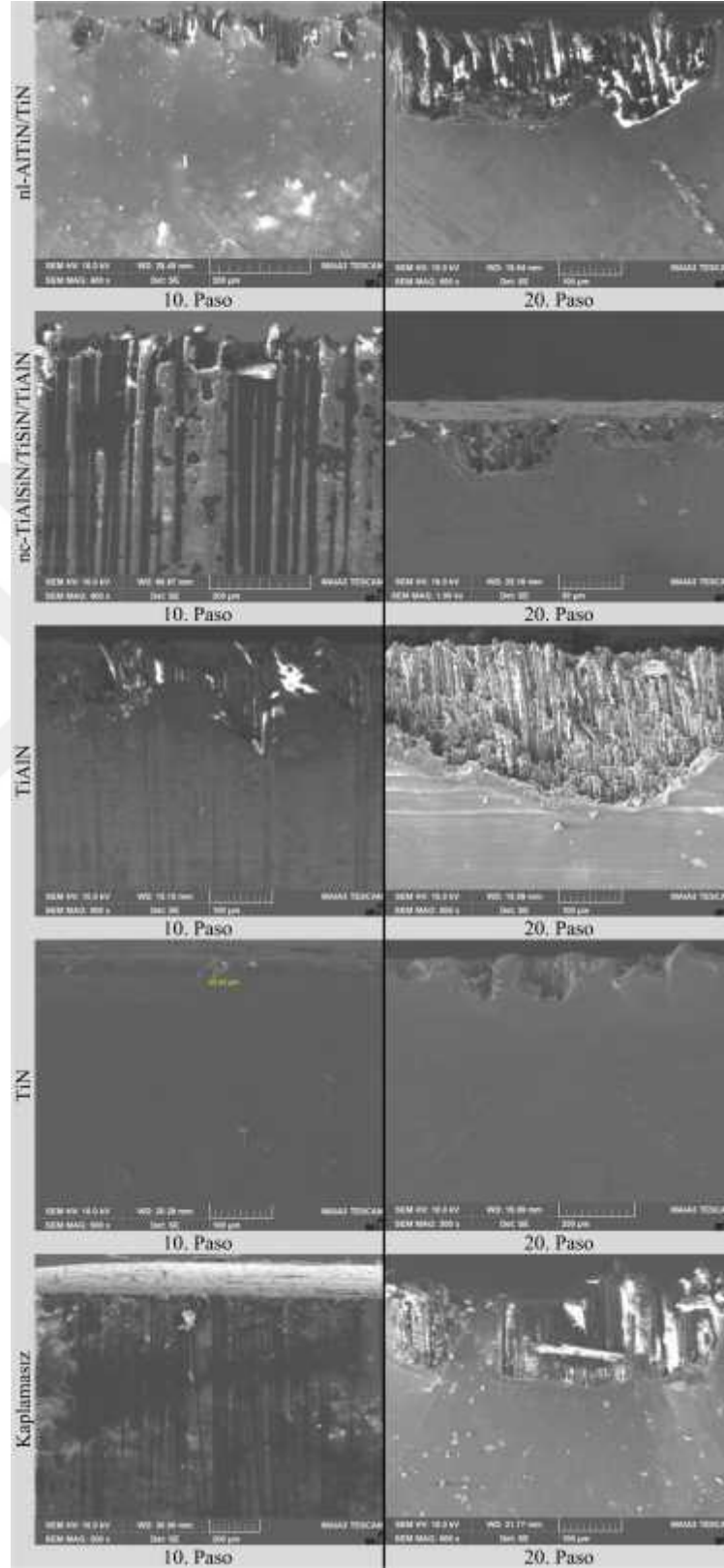
Şekil 69: $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.4 $V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 70 ve Şekil 71'de verilmiştir. 200 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. TiAlN kaplamalı kesici takım ile CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi sonucu paso sayısı artışına bağlı olarak elde edilen D_D değeri artış göstermiştir. 100 m/dak kesme hızı 0,05 mm/diş ilerleme oranı ile 300 m/dak kesme hızı 0,05 mm/diş ilerleme oranı işleme parametrelerinde de TiAlN kaplamalı kesici takım ile işlenen CFRP kompozit malzemenin aynı davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak TiAlN kaplamalı kesici takım 0,05 mm/diş ilerleme oranında D_D değerlerinin olumsuz etkilendiği anlaşılmıştır. Tek tabakalı kaplamalardan TiAlN kaplamalı kesici takımın, TiN kaplamalı kesici takıma kıyasla daha üstün oksidasyon direnci ve aşınma direncine sahip olduğu bildirilmektedir (Barshilia vd., 2005). CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı, heterojen ve plastik deformasyon göstermeyen yapısından dolayı karbür takımlarla frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak D_D 'ni artırmaktadır (Sheikh-Ahmad vd., 2017). Bu durum, D_D 'inin işleme parametrelerinin birbirleriyle etkileşim etkisine bağlı olmadığı esas olarak işleme parametrelerinin ayrı ayrı etkisine bağlı olduğu sonucu çıkarılabilir (Sheikh-Ahmad, 2009). Ayrıca, delaminasyon ölçümlerinin tüm işleme parametrelerine bağlı olduğu ve işleme parametrelerinden en çok ilerleme oranının etkisi olduğu bildirilmektedir (Janardhan vd., 2006). CFRP kompozit malzemenin 200 m/dak kesme hızı 0,05 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 25,420 μm ile TiN kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir.



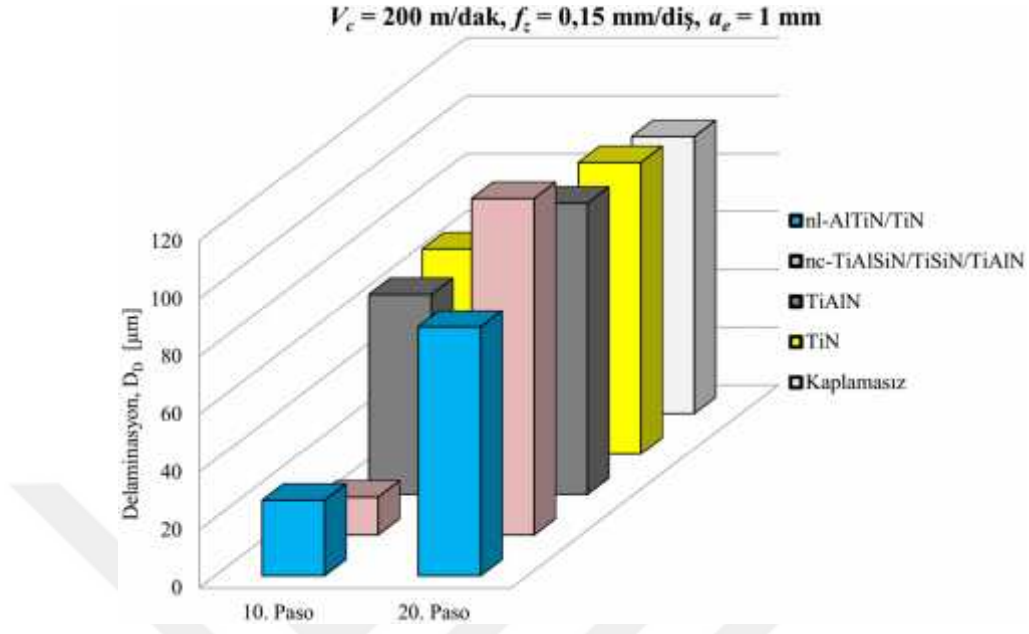
Şekil 70: $V_c = 200 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,05 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



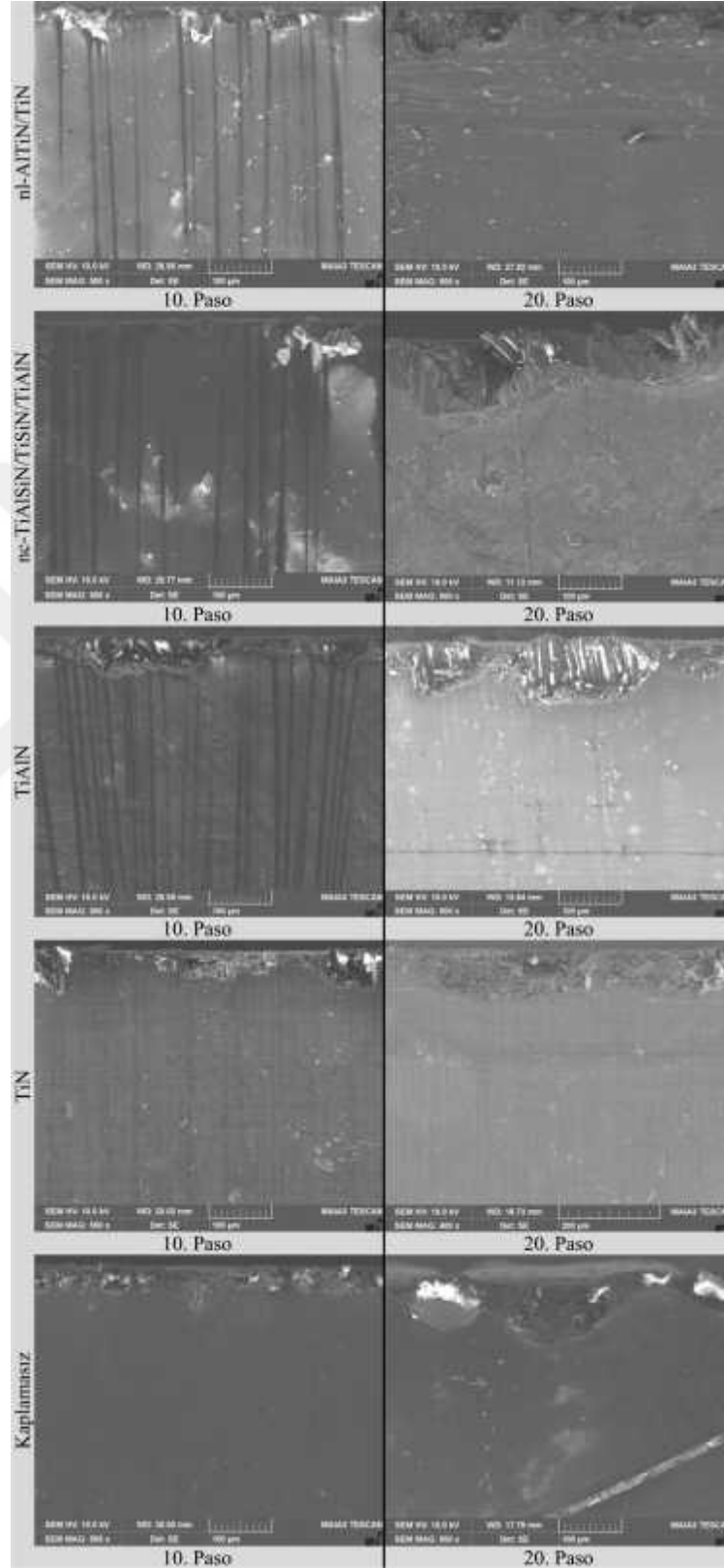
Şekil 71: $V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.5 $V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 72 ve Şekil 73'de verilmiştir. 200 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takım ile CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi sonucu paso sayısı artışına bağlı olarak elde edilen D_D değeri artış göstermiştir. 200 m/dak kesme hızı 0,15 mm/diş ilerleme oranı işleme parametrelerinde CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi sonucunda elde edilen kesme kuvveti değerleri paso sayısına bağlı olarak onuncu paso sonucu 291,015 N ve yirminci paso sonucu 425,246 N olarak tespit edilmiştir (Şekil 46). nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımın kesme kuvvetleri ilişkisinin delaminasyon üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. 200 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme oranında nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takım kesme kuvveti değerleri % 46 oranında artırıldığında D_D değeri % 794,5 artış gösterdiği belirlenmiştir. CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi ile elde edilen delaminasyon sonuçları literatürdeki çalışmalarla da örtüşmektedir. Hintze vd. yapmış oldukları çalışmada, PCD takım ile delaminasyonun artmasını kesici kenar yarıçapının artış göstermesine bağlamışlardır. Takım kesme kenarı ve fiber arasındaki sürtünmeden dolayı artan kesici kenar yarıçapı delaminasyondan sorumlu olan kesme kuvvetlerini artırdığını açıklamışlardır (Hintze vd., 2011). Lacalle vd. çalışmalarında, CFRP ve KFRP kompozit malzemelerinin frezelenmesinde kullanmış oldukları nanokompozit kaplamalı (nc-TiAlN+SiC) takımların iyi bir performans göstermediği sonucuna varmışlardır. Bu durumun ana sebebinin karbür altlıklara bu tabakanın yetersiz yapışmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. AlTiN kaplamalı takımlarla daha iyi takım ömrü elde ettiklerini belirtmişlerdir (Lacalle vd., 2009). CFRP kompozit malzemenin 200 m/dak kesme hızı 0,15 mm/diş ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 12,990 μm ile nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takım ile tespit edilmiştir.



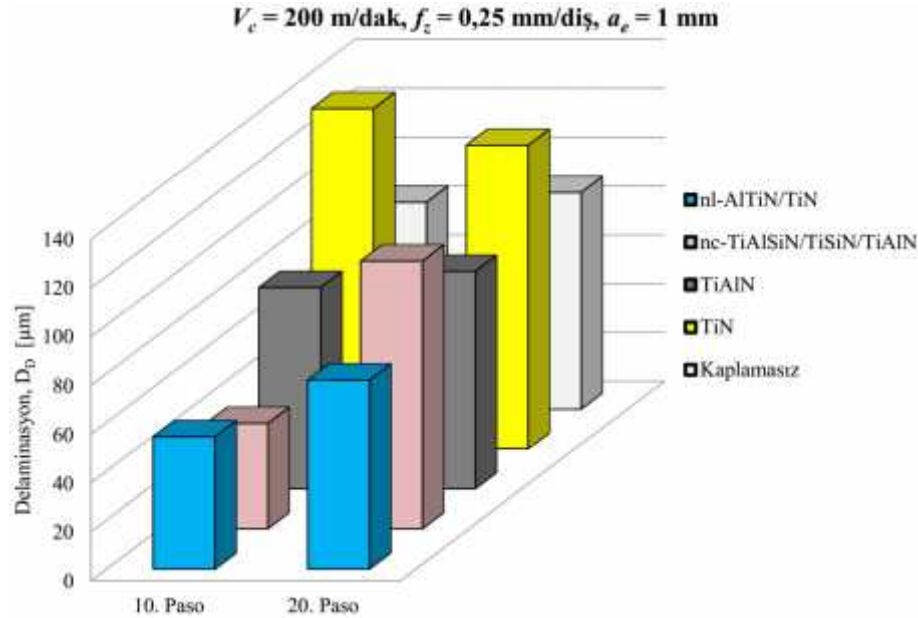
Şekil 72: $V_c = 200 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,15 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



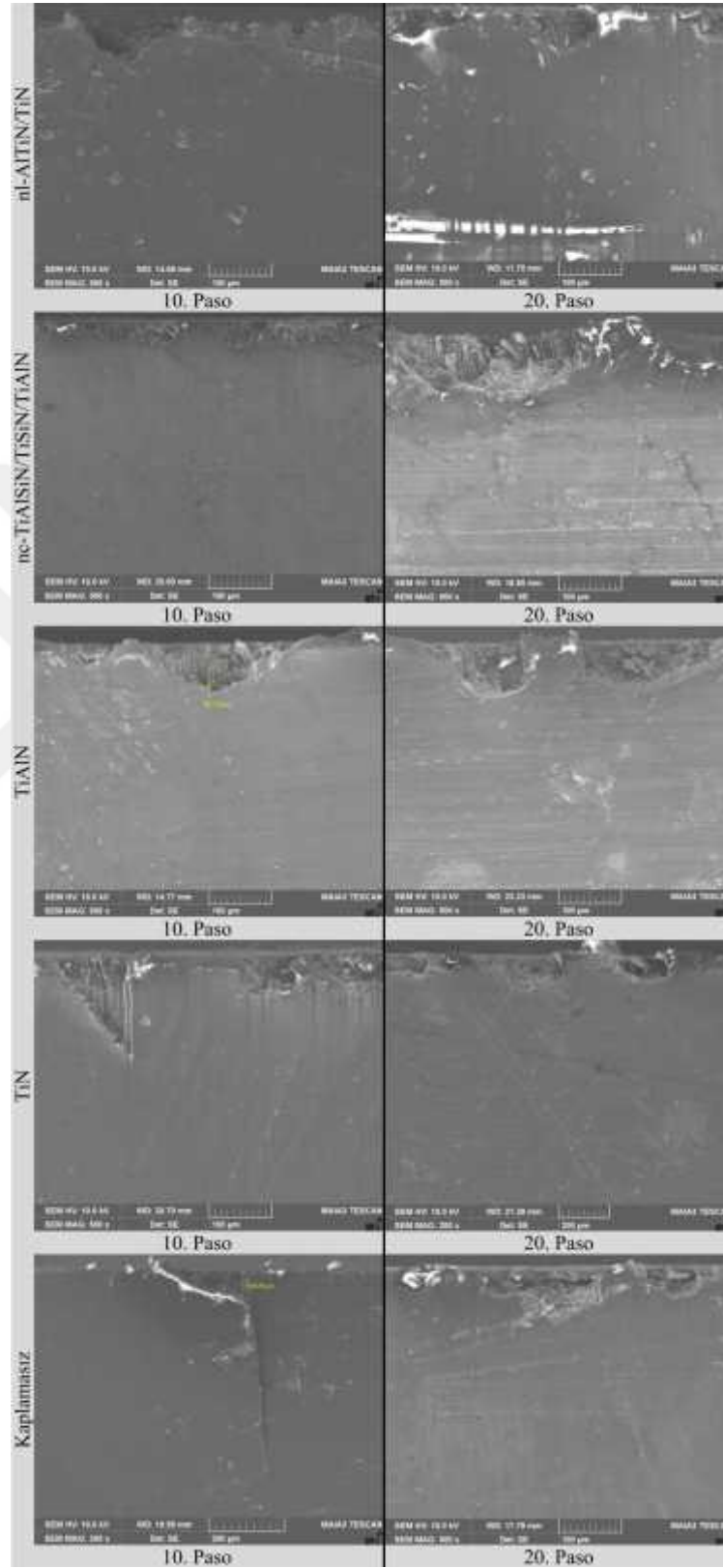
Şekil 73: $V_c = 100$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.6 $V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 74 ve Şekil 75'de verilmiştir. 200 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. TiN kaplamalı kesici takım hariç diğer kesici takımlarda artan paso sayısına bağlı olarak D_D değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde D_D değerleri ilerleme oranının artışına bağlı olarak artmakta ve en etkin işleme parametresi olmaktadır (Sheth vd., 2015). TiN kaplamalı kesici takımın artan paso sayısına bağlı olarak azalmasının nedeni, kaldırılan talaş miktarına bağlı olarak matris ve fiber malzemenin düzgün bir şekilde kesilmesi için yeterli bir kenar keskinliği seviyesinin gerekli olmasıyla açıklanabilir (Sheikh-Ahmad vd., 2012). CFRP kompozit malzemenin 200 m/dak kesme hızı 0,25 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 43,250 μm ile nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla tespit edilmiştir.



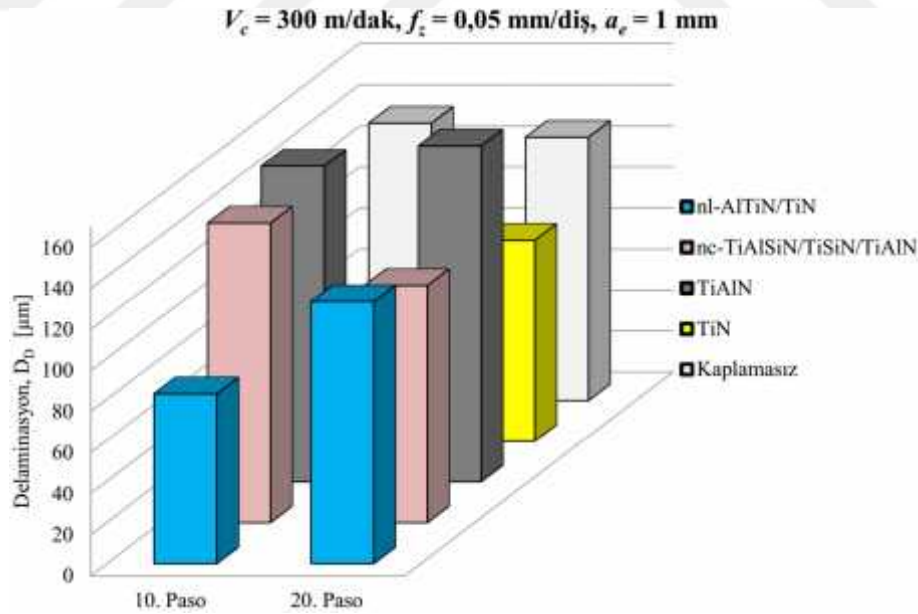
Şekil 74: $V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



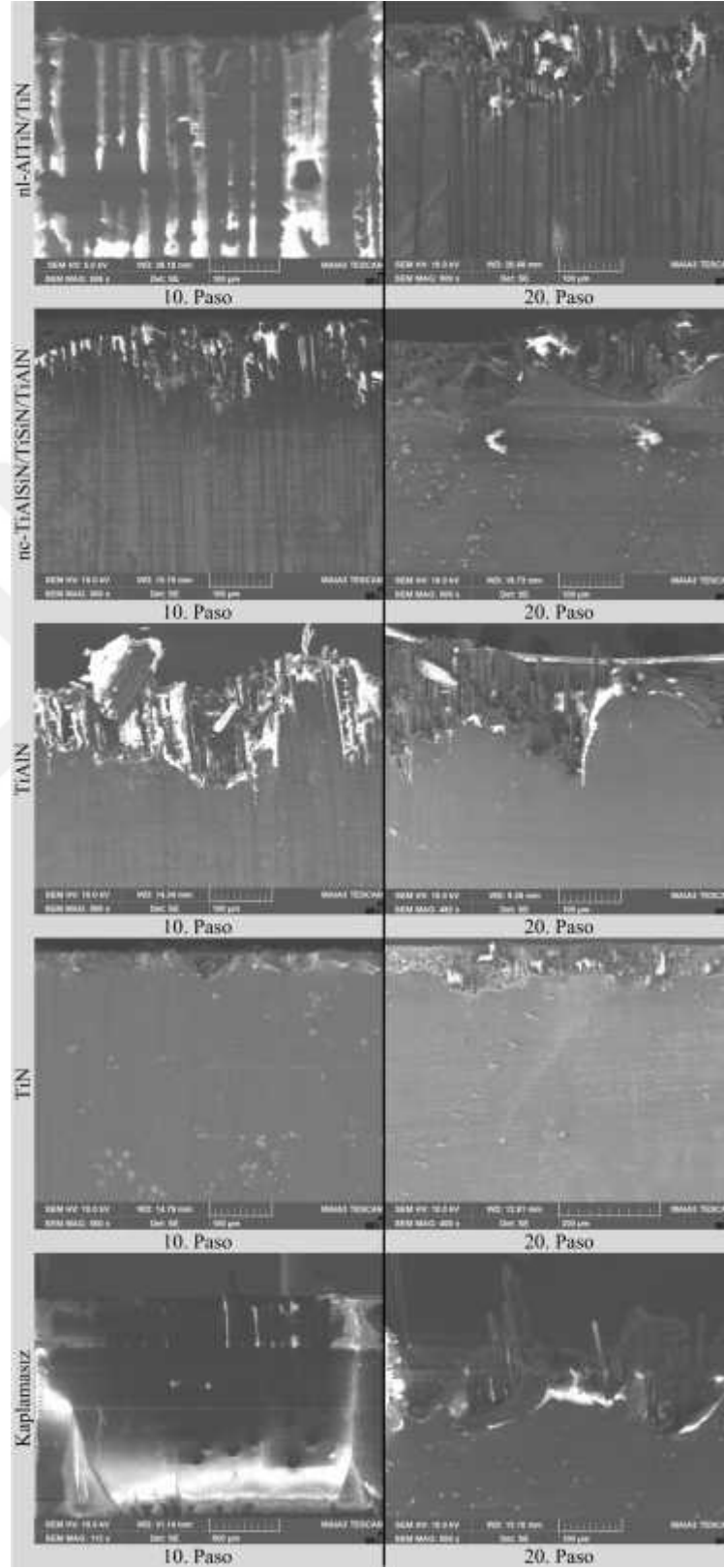
Şekil 75: $V_c = 200$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.7 $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 76 ve Şekil 77'de verilmiştir. 300 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde artan paso sayısına bağlı olarak tüm kesici takımlarda D_D değerlerinde dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu dalgalanmaların oluşumunda CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı yapısı ve kesme kuvvetlerinden dolayı meydana gelen titreşim etkili olmaktadır (Sheikh-Ahmad, 2009). CFRP kompozit malzemenin 300 m/dak kesme hızı 0,05 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 40,550 μm ile TiN kaplamalı kesici takımla tespit edilmiştir.



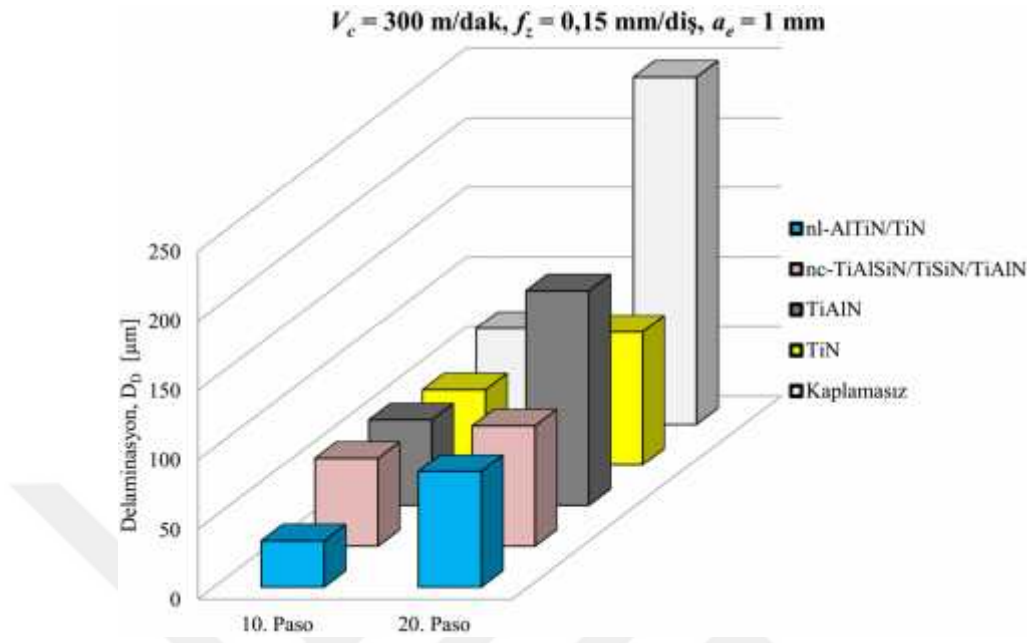
Şekil 76: $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



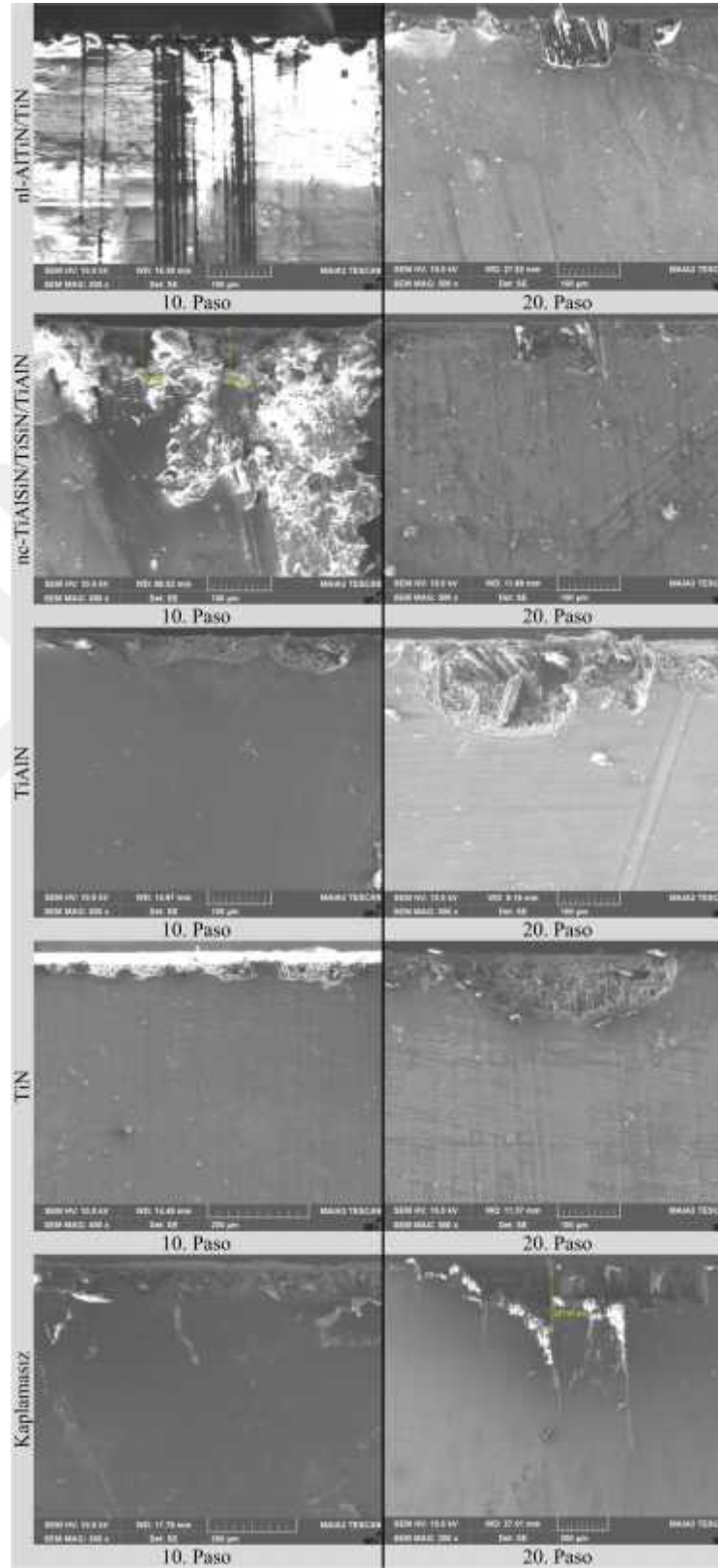
Şekil 77: $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,05$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.8 $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 78 ve Şekil 79'da verilmiştir. 300 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. Kesme hızının ve ilerleme oranının artmasıyla tüm kaplamalı kesici takımlarla işlenen iş parçasındaki D_D değerlerinin hem düşük olması hem de birbirleriyle benzerlik göstermesi CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde ideal kesme koşullarının olumlu etkisini belirtmektedir. CFRP kompozit malzemenin yüksek kesme hızlarında işlenmesiyle daha iyi bir performans elde edilmiştir. Kesme hızının yüksek düzeyde tutulmasıyla fiberlerinin daha kolay kesilebileceği anlaşılmıştır (Qin vd., 2014; Roy vd., 2014; Wei vd., 2015). CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde artan paso sayısına bağlı olarak kaplamasız kesici takımlarda D_D değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Kaplamasız kesici takımla onuncu paso sonunda elde edilen D_D değeri 69,210 μm olarak ölçülmüş ve artan paso sayısına bağlı olarak yirminci paso sonucu 249,410 μm olarak elde edilmiştir. Kaplamasız kesici takımın paso sayısının % 100 artmasıyla elde edilen D_D değeri % 260,4 seviyesinde yüksek bulunmuştur. Kaplamasız kesici takımla 300 m/dak kesme hızı 0,15 mm/diş ilerleme oranında frezelenmesi sonucu kesme kuvveti değerleri paso sayısına bağlı olarak artmıştır (Şekil 47). Şekil 63'deki takım aşınma grafikleri incelendiğinde; kaplamalı takımlara göre kaplamasız kesici takımlarla daha yüksek aşınma değerleri elde edilmiştir. Delaminasyon, işleme hassasiyeti ve yüzey kalitesi doğrudan takım aşınmasıyla ilgilidir. Karbon fiberlerin mekanik direnci en çok takım aşınmasından sorumlu olmaktadır (Slamani vd., 2015). CFRP kompozit malzemenin 300 m/dak kesme hızı 0,15 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 32,960 μm ile nl-AlTiN/TiN kesici takımla tespit edilmiştir.



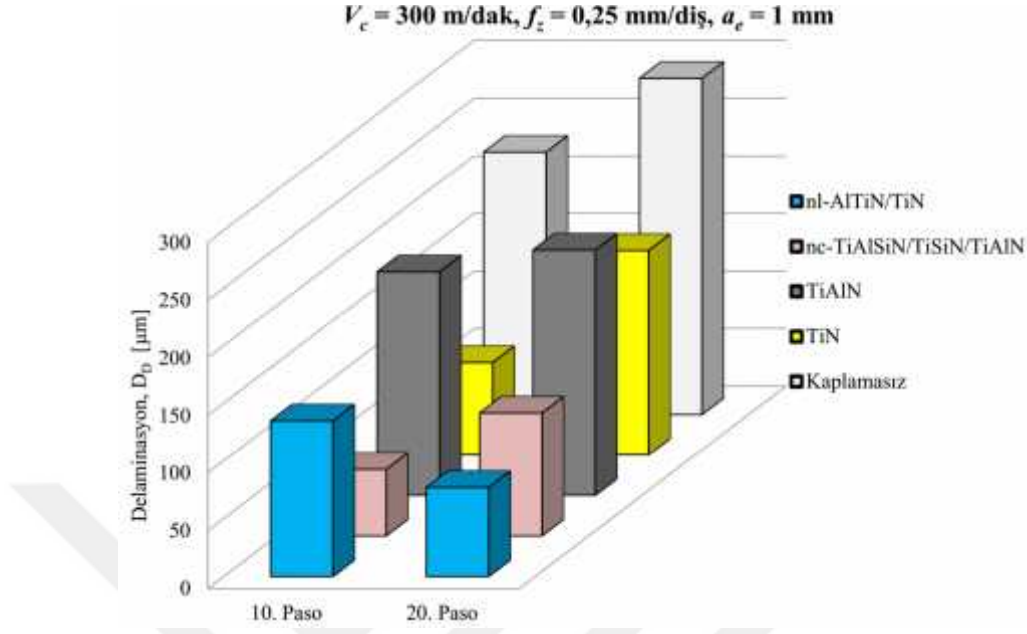
Şekil 78: $V_c = 300 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,15 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



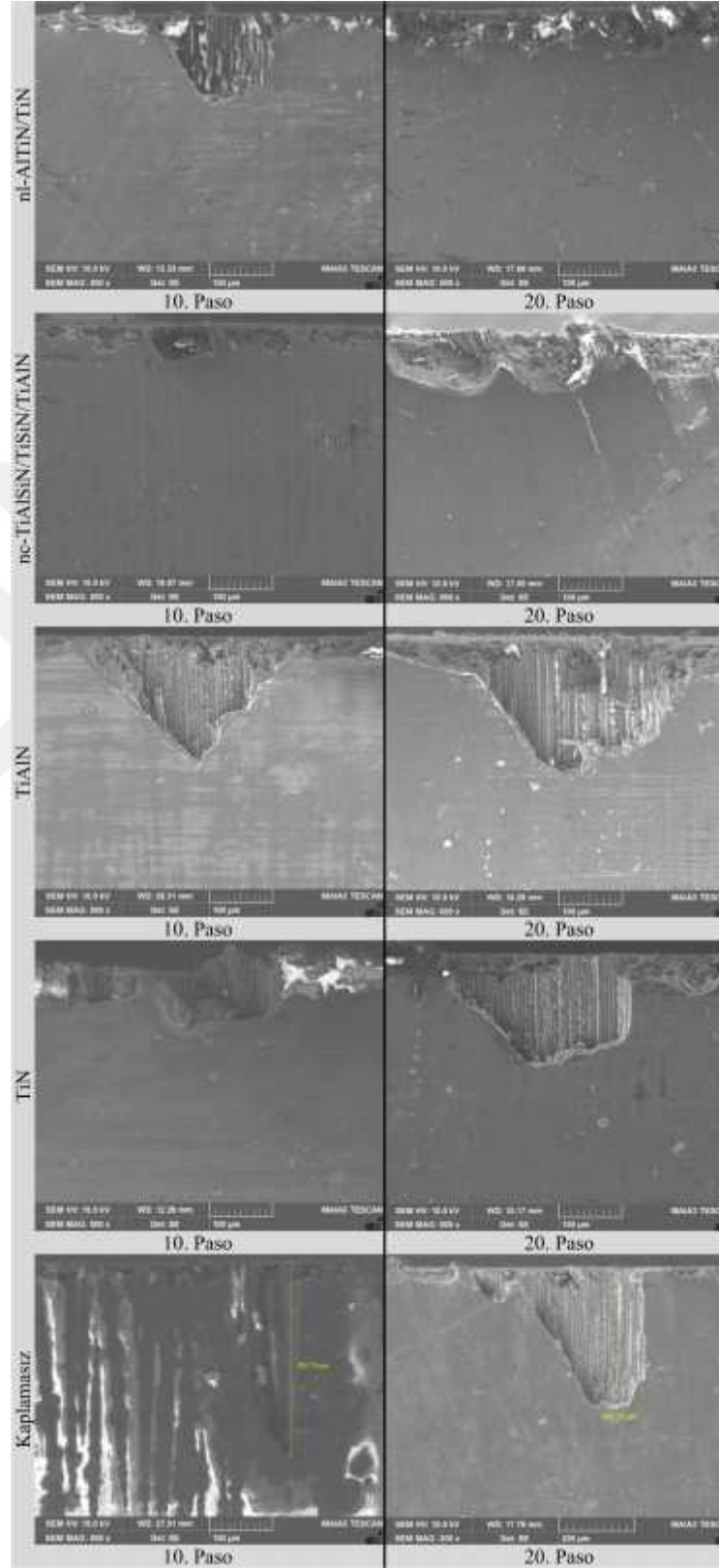
Şekil 79: $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,15$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

5.5.9 $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D 'indeki değişim

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi sonucu kesme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen D_D değerleri değişim grafikleri ve SEM görüntüleri Şekil 80 ve Şekil 81'de verilmiştir. 300 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/diş ilerleme oranı ve 1 mm kesme genişliğinde elde edilen D_D değerleri onuncu ve yirminci pasolar verileridir. 300 m/dak kesme hızı 0,25 mm/diş ilerleme oranında elde edilen D_D değerlerinde paso sayısına bağlı olarak kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarda artış tespit edilmiştir. nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımla elde edilen D_D değeri yirminci pasoda daha düşük belirlenmiş ve paso sayısına bağlı olarak diğer takımlara nazaran D_D değerinde daha iyi performans sergilemiştir. Dayanıklılık ve mükemmel yapışma mukavemetiyle karakterize edilmiş nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımlar işlenmesi zor ve sert malzemeler için uygun olmaktadır (Klocke vd., 2008). Kesme hızının, ilerleme oranının ve titreşimin artmasıyla paso sayısına bağlı olarak kaplamasız kesici takımında en yüksek D_D değerleri (227,91 ve 291,74 μm) elde edilmiştir. Yüksek kesme koşulları kaplamasız kesici takımın keskin kenarında yuvarlatma etkisi oluşturarak kesme kenarını parlatmış ve kütleştirmiştir (Khairusshima ve Sharifah, 2017). CFRP kompozit malzemenin 300 m/dak kesme hızı 0,25 ilerleme oranı işleme parametrelerinde elde edilen en düşük D_D değeri 57,360 μm ile nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla tespit edilmiştir.



Şekil 80: $V_c = 300 \text{ m/dak}$ kesme hızı, $f_z = 0,25 \text{ mm/diş}$ ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D değişim grafiği.



Şekil 81: $V_c = 300$ m/dak kesme hızı, $f_z = 0,25$ mm/diş ilerleme oranında kesme uzunluğuna bağlı olarak CFRP kompozit malzemede meydana gelen D_D SEM görüntüleri.

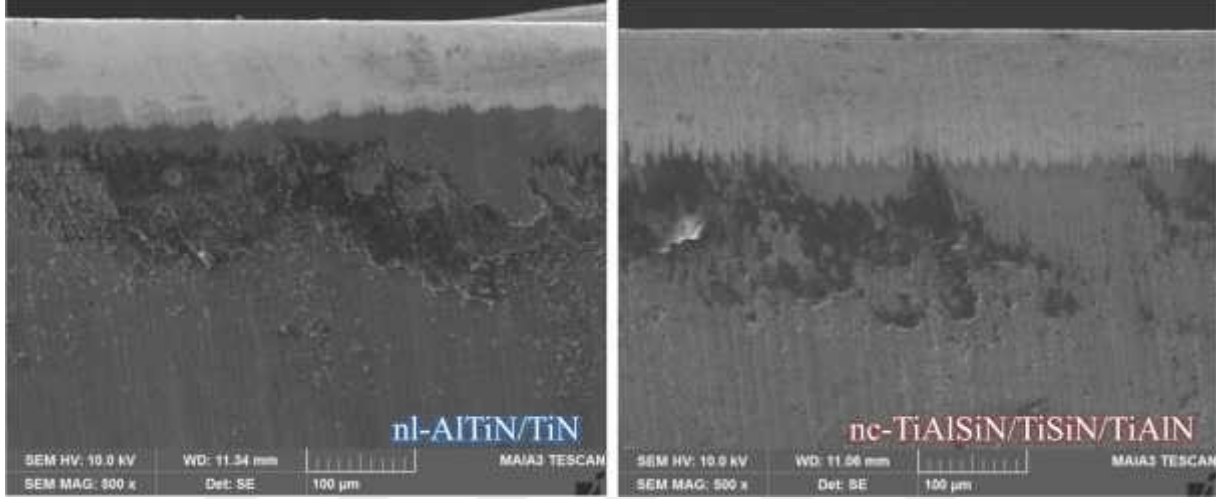
5.5.10 CFRP kompozit Malzemede Delaminasyon Derinliği Bulgularının Genel Değerlendirilmesi

CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız takımlarla, üç farklı kesme hızı (100, 200 ve 300 m/dak), üç farklı ilerleme oranı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ve 1 mm kesme genişliğinde çevresel frezelenmesi esnasında elde edilen D_D değerleri değerlendirildiğinde; en düşük D_D değerı 12,990 μm ile nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN takımla, 200 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır. En yüksek D_D değerı 291,740 μm ile kaplamasız kesici takımla 300 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranında elde edilmiştir. Kaplamasız kesici takımla ulaşılan en yüksek D_D değerinin elde edilmesine rağmen kabul edilebilirlik sınırının altında tespit edilmiştir.

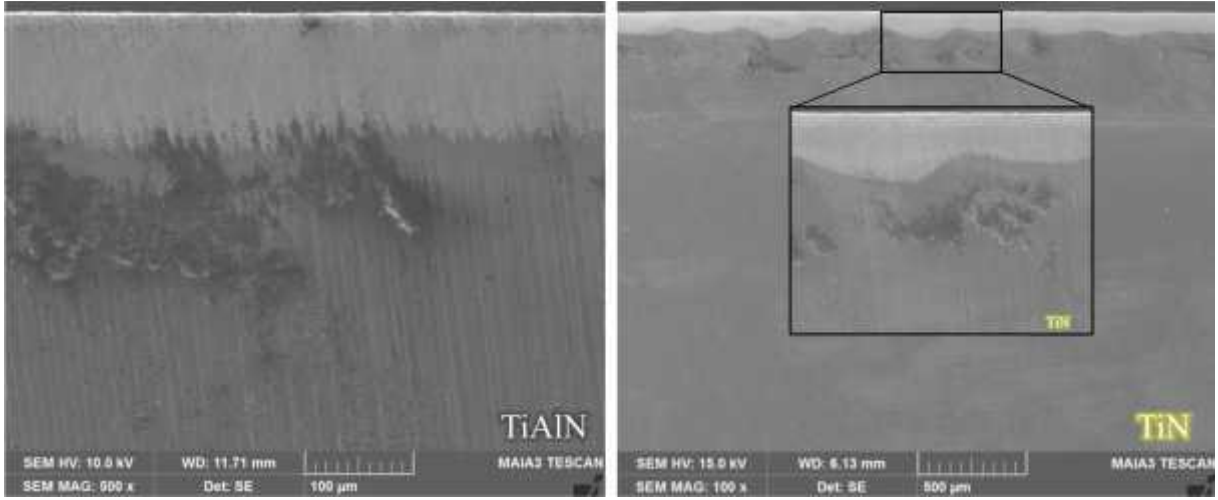
CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız takımlarla elde edilen D_D değerı kesme hızına bağlı olarak değerlendirildiğinde; en iyi performanslar 300 m/dak kesme hızında tespit edilmiştir. İlerleme oranına bağlı olarak ise tüm takımlarla 0,15 mm/diş ilerleme oranında en düşük D_D değerlerine ulaşılmıştır. Ancak TiAlN kaplamalı kesici takımla 0,25 mm/diş ilerleme oranında 0,05 ve 0,15 mm/diş ilerleme oranlarından daha iyi sonuçlar tespit edilmiştir. Artan ilerleme oranı yüksek D_D değerı elde edilen TiAlN kaplamalı kesici takımda olumlu sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır. Takım aşınması sonuçlarına göre TiAlN kaplamalı kesici takımla 0,25 mm/diş ilerleme oranlarında daha düşük yanak aşınması tespit edilmiştir (şekil 61, şekil 62 ve şekil 63).

CFRP kompozit malzemenin D_D değerlerini daha iyi analiz etmek için nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN kaplamalı kesici takımların aşınmış bölge ile kaplama tabakası geçiş ara yüzey SEM görüntüleri incelenecek olunursa bu geçiş bölgelerinin farklı profillerdeki şekillerde oluştuğu tespit edilmiştir (şekil 82 ve şekil 83). TiAlN’de bu bölgede oluşan diş şeklindeki profilin genişliğinin 20 ve 25 μm olarak meydana geldiği görülürken nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN’de bu değerın değişim gösterdiği bazı bölgelerde daha da incelendiği ve uç kısımlarının sivriliği görülmüştür. nl-AlTiN/TiN kaplamalı takımda ise çok daha yuvarlak formda bu bölgenin oluştuğu görülmektedir. Birçok parametre ile birlikte kesme işleminde etkin bir rol oynayan bu geçiş bölgelerinin yüzey pürüzlülüğu üzerinde etkisi olduğu

düşünülmektedir. TiN kaplamalı kesici takımın arayüzey profilinde diğer takımlardan farklı olarak kaplama tabakasındaki aşınmanın büyük ve dalgalı bir şekilde olduğu ancak bu bölgedeki girinti tabakalarının çok daha ince olduğu kaplama tabakasının kalınlığından ve en düşük adhezyon'a sahip olmasından kaynakladığı düşünülmektedir.



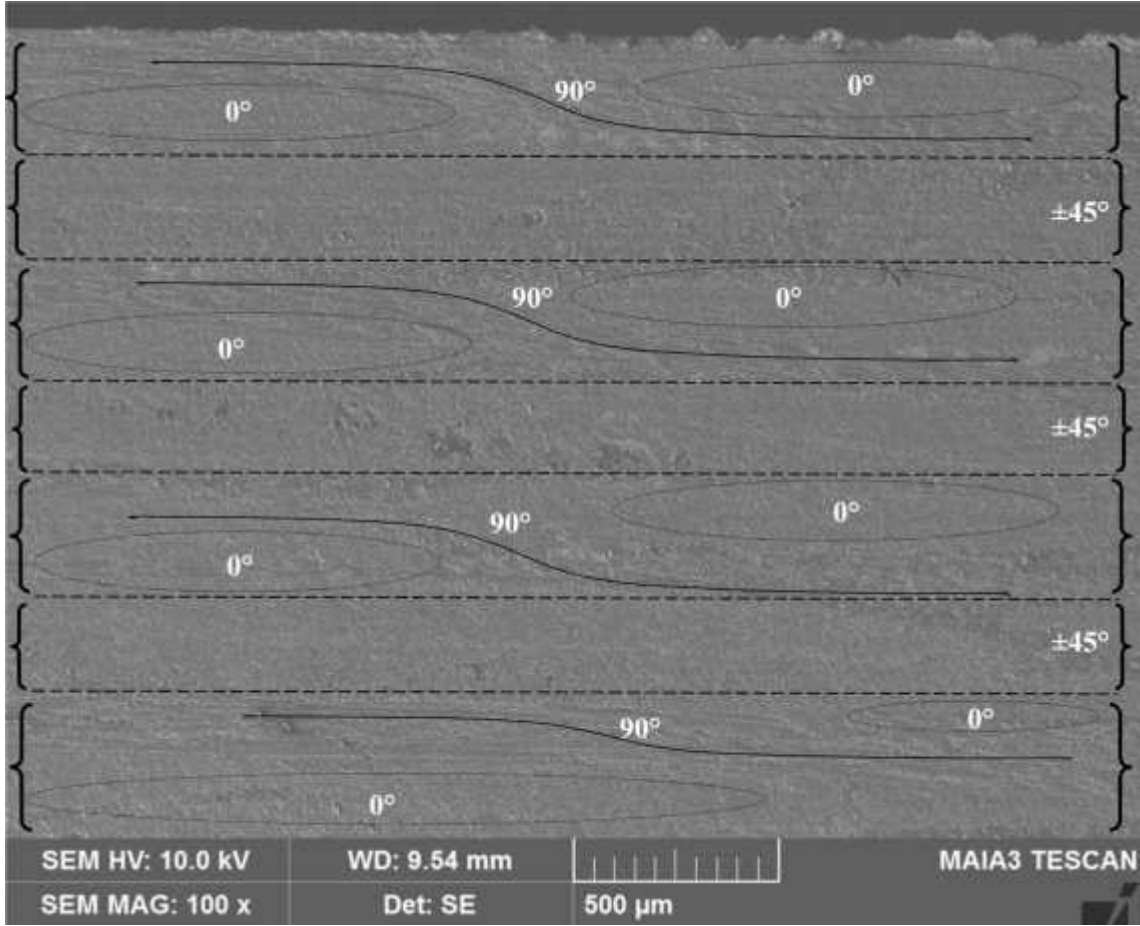
Şekil 82: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş ve $a_e = 1$ mm'deki SEM görüntüleri.



Şekil 83: $V_c = 100$ m/dak, $f_z = 0,05$ mm/diş, $a_e = 1$ mm'deki SEM görüntüleri.

5.6 CFRP Kompozit Malzemede Fiber Oryantasyon Açıları Bulguları

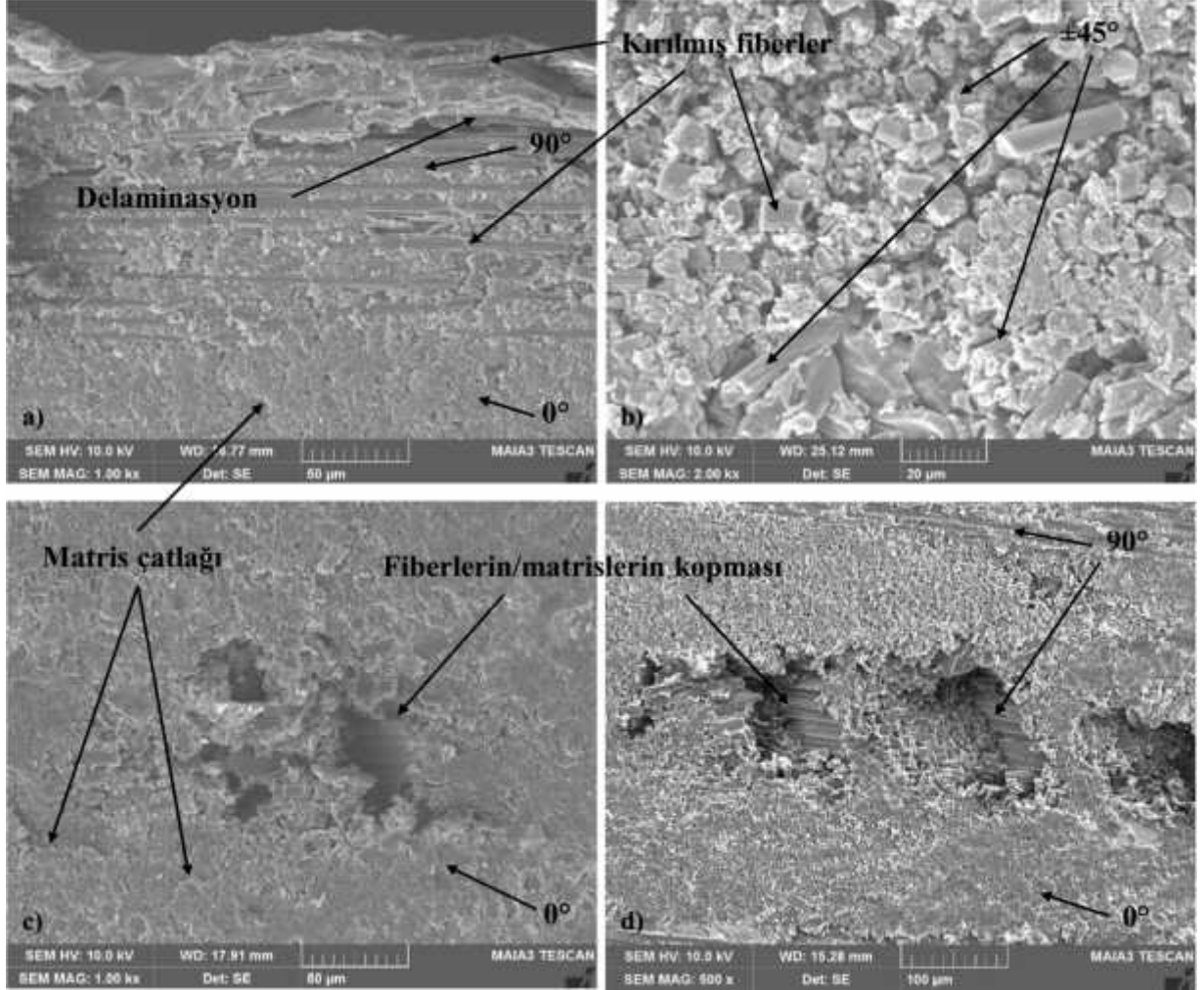
CFRP kompozit malzemelerin aşındırıcı özelliği ve düşük ısı iletim katsayısından dolayı işlenebilirlikleri düşüktür (Karpas ve Polat, 2013). İşleme sırasında delaminasyon, takım aşınması, fiber ayrılması, yüksek yüzey pürüzlülüğü, fiber kırılması ve kesilmemiş fiberler gibi problemler meydana gelmektedir (Lin ve Chen, 1996; Davim ve Reis, 2003; Wang ve Zhang, 2003; Abrao vd., 2007; Krishnamoorthy vd., 2011; Mišković ve Koboević, 2011). Belirtilen işleme problemleri, kesici takım geometrisinin ve malzemesinin uygun seçilmesi ile aşılabilmektedir. CFRP kompozit malzemelerin keskin bir kesici takımla işlenmesi gerekmekte, aksi takdirde, işleme kalitesini düşürerek tabakaların ayrılmasına neden olmaktadır. Kesme işlemi yerine malzemeyi tam kesmemesi durumunda, CFRP kompozit malzemede çatlamalara ve fiberlerin ayrılmasına sebep olabilmektedir (Bhatnagar vd., 1995). Keskin bir kenara sahip takım, doğru bir geometri seçimi ve doğru işleme verilerinin kullanılması ile takımın oluşturduğu basınçların azalmasıyla hassas bir işlem gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, bu malzemelerin işlenmesinde uygun kesici takımların yanı sıra bu malzemelerin yapı bileşenlerinin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Matris ve fiber takviyelerinden oluşan CFRP kompozit malzemede fiber takviyeleri, son derece sert, güçlü ve hafif olup mükemmel yapı malzemeleri oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu nedenle bu malzemelerin sertliği ve mukavemeti uygun bir şekilde tasarlanan ve optimum mekanik özellikler sağlayan fiber oryantasyon açlarına bağlı olmaktadır (Liu vd., 2012; Zenia vd., 2015; Maegawa vd., 2016). Şekil 84’de CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi esnasında oluşan fiber oryantasyon açıları verilmiştir. Havacılık endüstrisinde kullanılan iş parçası malzemesi, twill dokuma yapısından dolayı ilk katta 0° - 90° ve ikinci katta $\pm 45^{\circ}$ fiber oryantasyonları sırasıyla iş parçası kalınlığına göre devam etmektedir. Böylece kullanılan iş parçasına sertlik ve mukavemet sağlayarak kesme işlemlerini yüksek hızlarda daha da kolaylaştırmıştır. Ancak bu durumun aksine düşük kesme hızlarında 0° ve $\pm 45^{\circ}$ fofaları malzemenin işlenmesi sırasında hem kesici takımlarda hem de iş parçasında hasarlara neden olmuştur (El-Hofy vd., 2011). 90° fofalarında iş parçası yüzeyinde daha az hasarsız yüzeyler elde edilerek yüksek ve düşük kesme hızlarında herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır (Kusuyama vd., 2014). Enine ve dikine yerleştirilmiş kumaş yönleri olmasından dolayı bu fofalarında istenilen yüzey kaliteleri yapılan testlerde elde edilmiştir.



Şekil 84: CFRP kompozit malzemedeki foya'larının gösterimi.

CFRP kompozit malzeme foya'ları incelemelerinin daha iyi gözlenmesi için daha iyi çözünürlüklü SEM görüntüleri Şekil 85'de verilmiştir. CFRP kompozit malzemenin anizotropik (anisotropic), homojen olmayan (inhomogeneous) ve plastik deformasyona uğramayan yapılarından dolayı frezeleme işlemi esnasında hasarlarla karşılaşmıştır (Teti, 2002; Mallick, 2007; Dandekar ve Shin, 2012; Karpas vd., 2012; Koboević vd., 2012; Uusitalo, 2013; Kiliçkap vd., 2015). En yaygın olarak görülen ve bilinen; tabaka içi veya katmanlar arası hasar olan delaminasyon Şekil 85a'da görülmektedir. Delaminasyonun burada oluşması üst tarafta iş parçasını destekleyecek herhangi bir tabaka olmamasından ve kesme işlemi sırasında titreşimin meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır (Hintze vd., 2011; Hintze vd., 2015; Wang vd., 2016). Çevresel frezeleme işlemi esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri, iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması Şekil 85b'deki $\pm 45^\circ$ foya'ında kırılmış fiberlere neden olmuştur (Chen vd., 2013; Hagino ve Inoue, 2013; Haddad vd., 2014;

Wang vd., 2016). Kesme kuvvetleri, iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması fiber/matris kopmasına neden olmuştur (Şekil 85c ve Şekil 85d).



Şekil 85: CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi esnasında oluşan hasarların gösterimi; a) 90° foa'da, b) ±45° foa'da, c) 0° foa'da ve d) 0°-90° foa'larında.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte mükemmel özelliklere sahip ileri kompozit malzemeler sınıfından olan CFRP kompozit malzemelerin kullanım alanları ülkemizde ve dünyada gittikçe yaygınlaşmaktadır. Günümüzde özellikle uzay ve havacılık, otomotiv, denizcilik ve demiryolu taşımacılığı gibi endüstriyel sanayi alanlarının birçoğunda tercih edilmektedir. CFRP kompozit malzeme ile üretilen ürünlerin dayanıklılık ve hafiflik gibi sağladıkları avantajlarının yanında kullanımlarında üretim yöntemlerinin de geliştirilmesi gerekmektedir. Düşük termal iletkenlikleri, aşındırıcı ve aşırı sert yapıları nedeniyle CFRP kompozit malzeme grupları arasında yer almaktadır. Üretilen parçaların yüzey kalitesinin montaj durumlarını etkilemesinden dolayı CFRP kompozit malzemelerin frezeleme işleminde yüzey kalitesi önemli bir husustur. Frezeleme işlemi sırasında meydana gelen hızlı takım aşınması sık sık kesici takım değiştirme ihtiyacına sebep olmakta ve üretimin yavaşlamasına ve buna bağlı olarak da maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı, CFRP kompozit malzemelerin işlenmesinde karşılaşılan takım aşınması miktarının azaltılması ve/veya takım ömrünün artırılması araştırmacılar tarafından güncel olarak üzerinde çalışılan konular arasında yer almaktadır.

Detaylı yapılan araştırmalardaki bulgulardan yola çıkılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, kaplamasız karbür kesici takım, PVD kaplamalı nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN ve TiN kesici takımların, CFRP kompozit malzemenin işlenebilirliğine etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde en ideal kesici takım, kesme hızı ve ilerleme oranı elde edilmeye çalışılmıştır. Çevresel frezeleme işlemleri sonucunda elde edilen iş parçası malzeme yüzeyinde özellikle uzay ve havacılık endüstrisi için önemli bir parametre olan ortalama yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon değerleriyle birlikte kesme kuvvetleri ve takım aşınması miktarları değerlendirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

CFRP kompozit malzemenin farklı kesici takım, ilerleme oranı ve kesme hızı çevresel frezelenmesinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde ilerleme oranının değişimine göre elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre tüm kesici takımlardaki (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN, TiN ve kaplamasız kesici takım) en düşük yüzey pürüzlülük değerlerine 0,05 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır.
- Kesme hızının değişimine göre CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülükleri değerlendirildiğinde takım türüne göre kesme hızı değerlerinin değişim gösterdiği saptanmıştır. TiN kaplamalı kesici takımlarla en düşük ortalama yüzey pürüzlülüklerine 100 m/dak kesme hızında ulaşılmıştır. TiAlN kaplamalı kesici takımlarla en düşük yüzey pürüzlülüklerine 200 m/dak kesme hızında ve nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımlarla ise 300 m/dak kesme hızında en düşük yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılmıştır.
- Nano yapıli kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde optimum işleme parametreleri, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla; 200 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranında ve nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla 300 m/dak, 0,05 mm/diş ilerleme oranı işleme parametrelerinde ulaşılmıştır.
- Konvansiyonel kaplamalı kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde optimum işleme parametreleri, TiAlN kaplamalı kesici takımla 200 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranında ve TiN kaplamalı kesici takımla 100 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı işleme parametrelerinde ulaşılmıştır.
- Kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesinde optimum işleme parametreleri ise 300 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde ulaşılmıştır.
- CFRP kompozit malzemenin çevresel frezelenmesi sonucu ilerleme oranına ve paso sayısına bağıli olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığı tüm kesici takımlarla uygulanan deneylerde tespit edilmiştir. Kesme hızının artışına bağıli

olarak CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşme sağlanmıştır. CFRP kompozit malzemenin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla çevresel frezelenmesi esnasında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüklerine etki eden en etkili parametre ilerleme oranı olarak belirlenmiştir.

CFRP kompozit malzemenin farklı kesici takım, ilerleme oranı ve kesme hızı çevresel frezelenmesinde elde edilen kesme kuvveti sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde ilerleme oranının değişimine göre elde edilen kesme kuvveti sonuçlarına göre tüm kesici takımlardaki (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN, TiN ve kaplamasız kesici takım) en düşük kesme kuvveti değerlerine 0,05 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır.
- Kesme hızının değişimine göre CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde elde edilen kesme kuvveti değerlendirildiğinde; en düşük kesme kuvveti değerlerine düşük işleme süresinden dolayı 300 m/dak kesme hızında ulaşılmıştır.
- Nano kaplamalı kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde ölçülen kesme kuvvetleri konvansiyonel kaplamalı kesici takımlara göre ölçülen kesme kuvvetlerinden daha düşük değerlere sahiptir.
- Kaplamasız kesici takımlarla CFRP kompozit malzemenin frezelenmesindeki kesme kuvvetlerinin etkisi değerlendirildiğinde; en yüksek kesme kuvveti değeri 562,590 N ile 100 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranı olarak belirlenmiştir.
- CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi esnasında ölçülen kesme kuvvetlerini etkileyen en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğu görülmüştür.

CFRP kompozit malzemenin farklı kesici takım, ilerleme oranı ve kesme hızı çevresel frezelenmesinde elde edilen takım aşınma sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- Kaplamalı ve kaplamasız kesici takımların aşınma görüntüleri incelendiğinde CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı yapısından dolayı frezelenmesinde yanak aşınmasının tüm kesici takımlarda oluştuğu tespit edilmiştir.

- CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde ilerleme oranının değişimine göre elde edilen takım aşınması sonuçlarına göre tüm kesici takım türlerinde en düşük takım aşınmalarına 0,25 mm/diş ilerleme oranında ulaşılmıştır.
- Kesme hızının değişimine göre CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde elde edilen takım aşınma miktarları değerlendirildiğinde; 300 m/dak kesme hızlarında en düşük takım aşınması değerlerinin elde edildiği görülmüştür.
- CFRP kompozit malzemesinin nano yapıli kesici takımlarla frezelenmesinde en düşük takım aşınma verileri nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı kesici takımla 300 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/diş ilerleme oranında 42,140 µm'dir. nl-AlTiN/TiN kaplamalı kesici takımla 300 m/dak kesme hızı, 0,25 mm/diş ilerleme oranında 45,430 µm olarak tespit edilmiştir.
- Kesici takımların aşınma görüntüleri incelendiğinde 300 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranı işleme koşullarında en düşük takım aşınma değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Kaplamasız kesici takımlarla kaplamasız kesici takımlar karşılaştırıldığında çok daha yüksek takım aşınma değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

CFRP kompozit malzemenin farklı kesici takım, ilerleme oranı ve kesme hızı çevresel frezelenmesinde elde edilen delaminasyon derinliği sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde elde edilen delaminasyon derinliği görüntüleri değerlendirildiğinde; kesici takımlarla elde edilen delaminasyon değerleri CFRP kompozit malzemenin aşındırıcı yapısından ve/veya heterojen yapıya sahip olmasından ötürü farklı delaminasyon derinliği değerleri elde edilmiştir.
- Delaminasyon derinliğinin takım türüne göre değişimleri değerlendirildiğinde; TiAlN kesici takımla farklı (100, 200 ve 300 m/dak) kesme hızları ve farklı (0,05-0,15 ve 0,25 mm/diş) ilerleme oranlarında CFRP kompozit malzemenin frezelenmesi sonucu elde edilen delaminasyon derinliği değerlerinin paso sayısının artışına bağlı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Tüm kesici takımlar arasında en düşük delaminasyon derinliği miktarı, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN takımla 200 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme

oranında 12,990 μm olarak tespit edilmiştir. Kaplamasız kesici takımla elde edilen delaminasyon derinliği değerlerinde; en düşük delaminasyon değeri 23,260 μm ile 100 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme oranı parametrelerinde tespit edilmiştir. Tüm kesici takımlar arasında elde edilen en yüksek delaminasyon değeri ise 300 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/diş ilerleme oranı ile kaplamasız kesici takımlarla elde edilmiştir.

- CFRP kompozit malzemenin delaminasyon görüntüleri incelendiğinde, iş parçasında meydana gelen hasar mekanizmalarında; delaminasyon derinliği ile birlikte kırılmış fiberler, matris çatlağı ve fiber/matris kopmaları gibi oluşumlarda frezeleme esnasında tespit edilmiştir. Oluşan hasarlar kesici takımların temas yüzeyine dikey konumda işlenmelerinden dolayı ve 0° fiber oryantasyon açısında meydana gelmiştir. Bununla birlikte, çapraz konumda istiflendiklerinden dolayı $\pm 45^\circ$ fiber oryantasyon açılarında da hasar oluşumları tespit edilmiştir. Paralel yönde istiflenmelerinden dolayı 90° fiber oryantasyon açılarında belirgin bir hasar oluşmadığı gözlenmiştir.

CFRP kompozit malzemenin işlenebilirliğinin araştırılmasında kullanılan kaplamalı (nl-AlTiN/TiN, nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN, TiAlN, TiN) ve kaplamasız kesici takımların, çevresel frezeleme işleminde karbür kesici takımların kullanımını artırmayı ve imalat maliyetlerini düşürmeyi hedefleyen gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, deneylerin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında elde edilen veriler esas alınarak, gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- CFRP kompozit malzemenin frezelenmesinde, kesici takımlara yeni tip kaplamaların uygulanması ve/veya farklı tür ve geometrideki kesici takımların kullanılabilirliğinin araştırılması,
- Farklı fiber oryantasyon açılarındaki CFRP kompozit malzemelerin işlenebilirliği araştırılabilir,
- Vakum torbalama yöntemi ile imal edilen iş parçasının otoklav yöntemi kullanılarak imal edilip işlenebilirlik açısından değerlendirilmesi gerçekleştirilebilir,

- nl-AlTiN/TiN ve nc-TiAlSiN/TiSiN/TiAlN kaplamalı karbür kesici takımlara kriyojenik işlem uygulayarak CFRP kompozit malzemenin kesme ve aşınma performansları incelenebilir,
- Vorteks tüpü uygulaması ile hem karbür takımlar hem de CFRP kompozit malzemelere frezeleme işlemi uygulanabilir.



KAYNAKLAR

- Abdul, R.E., Mohid, Z., Hamzah, M., Yusuf, A. ve Rahman, N. (2014). Performance of tools design when helical milling on carbon fiber reinforced plastics (CFRP) aluminum (Al) stack. *Applied Mechanics and Materials*, 465: 1075-1079.
- Abrao, A.M., Faria, P.E., Rubio, J.C.C., Reis, P. ve Davim, J.P. (2007). Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3): 1-7.
- Ahmed, H., Seetha, R.N.ve Hussain, M.M. (2015). Experimental Investigation of Surface Integrity of End milled CFRP Composites. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 5(1): 141-145.
- Altın, A., Gökkaya, H. ve Nalbant, M. (2006). İşleme Parametrelerinden Kesme Hızının Inconel 718 Süper Alaşımın İşlenebilirliğine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3).
- Altınkaya, E. ve Güllü, A. (2008). AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliğin İşlenmesinde Talaş Kırıcı Formunun Takım Aşınmasına ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Politeknik dergisi*, 11(1).
- Anan, R., Matsuoka, H., Ono H., Ryu, T., Nakae, T., Shuto, S., Watanabe, S. ve Sato, Y. (2017). A study examining the effects of water-miscible cutting fluids for end milling process of carbon fiber reinforced plastic. *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing.
- Aydın, M., Uçar, M. ve Cengiz, A. (2010). AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Kuru Tornalanabilmesine Kesme Parametrelerinin Etkisi. II. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir: 85-94.
- Arul, S., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S.K. ve Krishnamurthy, R. (2006). The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(3-4): 252-259.
- Asthana, R., Kumar, A. ve Dahotre, N.B. (2005). *Materials Processing and Manufacturing Science*, Elsevier Science & Technology Books.
- Ashby, M.F. ve Jones, D.R. (2005). *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties. Applications and Design*.
- Askeland, D.R., Haddleton, F., Green, P. ve Robertson, H. (1996). *The Science and Engineering of Material*.
- Asker, E., Genç, H., Meriç, G., Saraçoğlu, M., Sürücü, A., Topal, G., Toy, M. ve Yılmaz, H. (2014). *Genel Kimya - 4*, Ankara, Pegem Akademi Yayıncılık.

- Aviation Maintenance Technician Handbook (2012). Airframe, USA.
- Barshilia, H.C., Prakash, M.S., Jain, A. ve Rajam, K.S. (2005). Structure, hardness and thermal stability of TiAlN and nanolayered TiAlN/CrN multilayer films. *Vacuum*, 77(2): 169-179.
- Berthelot, J.M. (1999). *Composite Materials : Mechanical Behavior and Structural Analysis*, New York, Springer.
- Bhogal, S.S., Sindhu, C., Dhami, S.S. ve Pabla, B. (2015). Minimization of surface roughness and tool vibration in CNC milling operation. *Journal of Optimization*.
- Bouazid, S.W., Ben Salah, N.ve Lebrun, J.L. (2001). Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(3): 443-450.
- Brinksmeier, E. ve Janssen, R. (2002). Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 51(1): 87-90.
- Buckley, J.D. ve Edie, D.D. (1993). Carbon-Carbon Materials and Composites. New Jersey, *Noyes Publications*.
- Burchell, T.D. (1999). *Carbon Materials for Advanced Technologies*, Pergamon.
- Chatelain, J. ve Zaghbani, I. (2012). Effect of tool geometry special features on cutting forces of multilayered CFRP laminates. *International Journal of Mechanics*, 6(1): 52-59.
- Chatelain, J.F., Zaghbani, I. ve Monier, J. (2012). Effect of ply orientation on roughness for the trimming process of CFRP laminates. *Optimization*, 419: 8600.
- Chawla, K.K. (2012). *Composite Materials : Science and Engineering*, London, Springer.
- Chen, W.C. (1996). Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates.
- Chen, Y., Fu, Y., Su, H. ve Han, S. (2013). Influence of Mill Geometry on Cutting Force and Surface Morphology of Multidirectional CFRP.
- Chen, Y.H., Guruz, M., Chung, Y.W. ve Keer, L.M. (2002). Thermal stability of hard TiN/SiNx multilayer coatings with an equiaxed microstructure. *Surface & Coatings Technology*, 154(2-3): 162-166.
- Chinmaya, R.D. ve Shin, Y.C. (2012). Modeling of machining of composite materials : A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*.
- Chung, D.D. (2010). *Composite materials: science and applications*. USA, Springer Science & Business Media.

- Chung, D.D.L. (1994). *Carbon Fiber Composites*. Washington, Butterworth-Heinemann.
- Ciecielağ, K. ve Zaleski, K. (2013). Comparative study in the passive force and cutting torque in the milling process of polymer matrix composites and aluminum alloys. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 7(18): 6-12.
- Çakır, C. (2010). *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*. Bursa, Dora Yayıncılık.
- Çakır, M.C. (2006). *Modern Metal Cutting: Modern Talaşlı İmalatın Esasları*. Ankara, Nobel Yayın Dağıtım.
- Çelik, A., Lazoglu, I., Kara A. ve Kara F. (2015). Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 223: 39-47.
- Çelik, A., Lazoglu, I., Kara, A. ve Kara, F. (2015). Wear on SiAlON ceramic tools in drilling of aerospace grade CFRP composites. *Wear*, 338-339: 11-21.
- Çiftçi, İ. (2005). Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenmesinde Kesici Takım Kaplamasının ve Kesme Hızının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2).
- Dandekar, C.R. ve Shin, Y.C. (2012). Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 57: 102-121.
- Daniel, I.M. ve Ishai, O. (2006). *Engineering mechanics of composite materials*. New York, Oxford University Press.
- Davim, J.P. ve Reis, P. (2003). Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave - experimental and statistical study. *Materials & Design*, 24(5): 315-324.
- Davim, J.P. ve Reis, P. (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composite Structures*, 59(4): 481-487.
- Davim, J.P. ve Reis, P. (2005). Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 160(2): 160-167.
- Denkena, B., Boehnke, D. ve Dege, J.H. (2008). Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
- De Lacalle, L.L., Lamikiz, A., Campa, F., Valdivielso A.F. ve Etxeberria, I. (2009). Design and test of a multitooth tool for CFRP milling. *Journal of composite materials*.
- Dhanasekar, B. ve Ramamoorthy, B. (2010). Restoration of blurred images for surface roughness evaluation using machine vision. *Tribology International*, 43(1-2): 268-276.

- Dilipak, H. ve Yilmaz, V. (2012). AISI 1050 Çeliğinin Karbür Takımlarla Frezelenmesinde oluşan Titreşimlerin İncelenmesi ve İstatistiksel Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (2).
- Dold, C., Henerichs, M., Bochmann, L. ve Wegener, K. (2012). Comparison of ground and laser machined polycrystalline diamond (PCD) tools in cutting carbon fiber reinforced plastics (CFRP) for aircraft structures. *Fifth Cirp Conference on High Performance Cutting*, 2012 1: 178-183.
- Ducros, C., Benevent, V. ve Sanchette, E. (2003). Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. *Surface & Coatings Technology*, 163: 681-688.
- Ducros, C. ve Sanchette, F. (2006). Multilayered and nanolayered hard nitride thin films deposited by cathodic arc evaporation. Part 2: Mechanical properties and cutting performances. *Surface & Coatings Technology*, 201(3-4): 1045-1052.
- Ekici, E. (2012). Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi.
- El-Hofy, M.H., Soo, S.L., Aspinwall, D.K., Sim, W.M., Pearson, D. ve Harden, P. (2011). Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. *1st Cirp Conference on Surface Integrity*, (Csi) 19: 94-99.
- Elmarakbi, A. (2013). *Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness*, John Wiley & Sons.
- Eneyew, E.D. ve Ramulu, M. (2014). Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, 3(4): 354-362.
- Epaarachchi, J.A. ve Kahandawa, G.C. (2016). *Structural Health Monitoring Technologies and Next-Generation Smart Composite Structures*, CRC Press.
- Ferreira, J.R., Coppini, N.L. ve Miranda, G.W.A. (1999). Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 93: 135-140.
- Figueiredo, J.L., Bernardo, C.A., Baker, R.T.K. ve Hüttinger, K.J. (1989). Carbon Fibers Filaments and Composites. Portugal, NATO ASI.
- Ferreira, J.R., Coppini, N.L. ve Neto, F.L. (2001). Characteristics of carbon-carbon composite turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 109(1-2): 65-71.
- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Maciel, C.H.A., Rubio, J.C.C. ve Abrao, A.M. (2016). Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 19(2): 360-369.

- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Rubio, J.C., Correia, A.E., Abrao, A.M. ve Davim, J.P. (2008). Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1-3): 431-438.
- Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M. ve Altunpak, Y. (2013). *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri*. Ankara, Seçkin yayıncılık.
- Ghafarizadeh, S., Chatelain, J. ve Lebrun, G. (2013). Multi axis machining of high performance CFRP for aerospace industry. *19th International Conference on Composite Materials (ICCM19)*, Montreal.
- Ghafarizadeh, S., Chatelain, J.F. ve Lebrun, G. (2016). Effect of cutting tool lead angle on machining forces and surface finish of CFRP laminates. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(5): 543-550.
- Ghafarizadeh, S., Chatelain, J.F. ve Lebrun, G. (2016). Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4): 399-409.
- Ghafarizadeh, S., Lebrun, G. ve Chatelain, J.F. (2016). Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic. *Journal of Composite Materials*, 50(8): 1059-1071.
- Gong, Y.H., Yang, N.H., Han, S., Chen, Y., Fu, Y.C. ve Han, S.C. (2013). Surface Morphology in Milling Multidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates. *Advanced Materials Research*.
- Gökkaya, H. (2006). AA5052 Alaşımının İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (3).
- Gökkaya, H., Habalı, K. ve Özçatalbaş, Y. (2004). Kaplamalı Kesici Takımlarda Kaplama Malzemesinin Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 7 (1).
- Gökkaya, H. ve Nalbant, M. (2007). The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel. *Materials & Design*, 28 (2): 717-721.
- Grzesik, W. (2008). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials : Theory, Modelling and Applications*.
- Guu, Y.H., Hocheng, H., Tai, N.H. ve Liu, S.Y. (2001). Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites. *Journal of Materials Science*, 36 (8): 2037-2043.

- Günay, M. (2003). Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gürbüz, H., Kafkas, F. ve Şeker, U. (2011). Kesici Takıma Farklı Yöntemle Uygulanmış Kaplamaların Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *International Advanced Technologies Symposium*, 6: 27-32.
- Hocheng, H., Puw, H.Y. ve Huang, Y. (1993). Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Composites Manufacturing*.
- Habalı, K., Gökkaya, H. ve Hasan, S. (2006). Kesici Takım Kaplama Malzemesi ve Kesme Parametrelerinin AISI 1040 Çeliğinin İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 9(1).
- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F. ve Castanie, B. (2014). Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 66: 142-154.
- Haddad, M., Zitoune, R., Eyma, F. ve Castanié, B. (2013). Machinability and surface quality during high speed trimming of multi directional CFRP. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 13(2-3): 289-310.
- Hagino, M. ve Inoue, T. (2013). Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End-Milling. *International Journal of Automation Technology*, 7(3): 292-299.
- Haiyan, W., Xuda, Q., Hao, L. ve Chengzu, R. (2012). Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber-reinforced plastics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 227(1): 62-74.
- Hamedanianpour, H. ve Chatelain, J.F. (2013). Effect of tool wear on quality of carbon fiber reinforced polymer laminate during edge trimming, *Trans Tech Publication*.
- Han, S.C., Chen, Y., Xu, J.H. ve Zhou, J.W. (2014). Experimental study of tool wear in milling multidirectional CFRP laminates. Materials Science Forum, *Trans Tech Publication*.
- He, G., Li, H., Jiang, Y., Qin, X., Zhang, X. ve Guan, Y. (2015). Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters. *Transactions of Tianjin University*, 21(1): 56-63.
- Hejjaji, A., Singh, D., Kubher, S., Kalyanasundaram, D. ve Gururaja, S. (2016). Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 82: 42-52.

- Henerichs, M., Voß, R., Kuster, F. ve Wegener, K. (2015). Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 9: 136-145.
- Hexcel Handbook (2016). Selection Guide industry.
- Hintze, W., Cordes, M. ve Koerkel, G. (2015). Influence of weave structure on delamination when milling CFRP. *Journal of Materials Processing Technology*, 216(0): 199-205.
- Hintze, W. ve Hartmann, D. (2013). Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP. *14th Cirp Conference on Modeling of Machining Operations (Circ Cmmo)*, 8: 444-449.
- Hintze, W., Hartmann, D. ve Schutte, C. (2011). Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) - An experimental study. *Composites Science and Technology*, 71(15): 1719-1726.
- Hull, D. ve Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*.
- Ho-Cheng, H. ve Dharan, C. (1990). Delamination during drilling in composite laminates. *Journal of Engineering for Industry (Transactions of the ASME)*, 112(3): 236-239.
- Hosokawa, A., Hirose, N., Ueda, T. ve Furumoto, T. (2014). High-quality machining of CFRP with high helix end mill. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 63(1): 89-92.
- Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E. ve Girot, F. (2010). Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50(2): 204-213.
- Isbilir, O. ve Ghassemieh, E. (2012). Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(10): 717-727.
- Ishida, T., Noma, K., Kakinuma, Y., Aoyama, T., Hamada, S., Ogawa, H. ve Higaino, T. (2014). Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics Using Ultrasonic Vibration and Liquid Nitrogen. *Procedia CIRP*, 24(0): 13-18.
- Islam, F., Ramkumar, J. ve Milani, A.S. (2016). A simplified damage prediction framework for milling of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(4): 175-184.
- ISO Standard. (1989). ISO Standard 8688-2 International standard for tool life testing in end milling.
- Janardhan, P., Sheikh-Ahmad, J. ve Cheraghi, H. (2006). Edge trimming of CFRP with diamond interlocking tools, *SAE Technical Paper*.
- Jia, Z., Fu, R., Wang, F., Qian, B. ve He, C. (2016). Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites. *Polymer Composites*.

- Jones, R.M. (1999). *Mechanics of Composite Materials Philadelphia*, Taylor & Francis.
- Kalpajian, S. ve Schmid, S.R. (2000). *Manufacturing Engineering and Technology* (4th edition), Pretice Hall.
- Kalla, D., Sheikh-Ahmad, J. ve Twomey, J. (2010). Prediction of cutting force s in helic al end milling fiber reinfor ced polymers. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*.
- Karnik, S.R., Gaitonde, V.N., Rubio, J.C., Correia, A.E., Abrao, A.M. ve Davim, J.P. (2008). Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Materials & Design*, 29(9): 1768-1776.
- Karpat, Y., Bahtiyar, O. ve Deger, B. (2012). Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 56: 79-93.
- Karpat, Y. ve Polat, N. (2013). Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 62(1): 95-98.
- Kecik, K., Rusinek, R., Warminski, J. ve Weremczuk, A. (2012). Chatter control in the milling process of composite materials. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing.
- Khairusshima, M., Hassan, C.C., Jaharah, A. ve Amin, A. (2012). The effect of milling parameters on laminated carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Jurnal Teknologi*, 59(2).
- Khairusshima, M.K.N., Aqella, A.K.N. ve Sharifah, I.S.S. (2017). Optimization of Milling Carbon Fibre Reinforced Plastic Using RSM. *Procedia Engineering*, 184: 518-528.
- Khairusshima, M.K.N. ve Sharifah, I.S.S. (2017). Study on Tool Wear During Milling CFRP under Dry and Chilled Air Machining. *Procedia Engineering*, 184: 78-89.
- Khalid, H.M., Hasan, S.N. ve Jauhari, I. (2016). Mechanical behaviour of nanolayer hydroxyapatite (HA) coating developed through superplastic embedment of titanium (Ti) alloy (Ti6Al4V). *Materials Chemistry and Physics*, 177: 314-321.
- Khashaba, U.A. (2004). Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures*, 63(3-4): 313-327.
- Kiliçkap, E., Yardimeden, A. ve Çelik Y.H. (2015). Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite. *Science and Engineering of Composite Materials*. 22: 89.

- Kim, K.S., Lee, D.G., Kwak, Y.K. ve Namgung, S. (1992). Machinability of Carbon-Fiber Epoxy Composite-Materials in Turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 32(3): 553-570.
- Kitajima, T., Kusuyama, J., Yui, A., Fujii, K. ve Itoh, Y. (2014). Development of PCD Milling Tool for Carbon-Fiber-Reinforced Plastics. Advanced Materials Research, *Trans Tech Publication*.
- Koplev, A. Lystrup, Aa. ve Vorm, T. (1983). The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP.
- Klocke, F., Quito, F., Arntz, K., Souza, A. ve Ader, C. (2008). Investigation of tool geometry, coating and coolant in micro milling of single crystal Nickel-based superalloy René N5. *3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting*, Dublin-Ireland.
- Klotz, S., Zanger, F. ve Schulze, V. (2014). Influence of Clamping Systems during Milling of Carbon Fiber Reinforced Composites. *Procedia CIRP*, 24: 38-43.
- Kolar, P., Masek, P. ve Zeman, P. (2014). Milling tools for cutting of fiber-reinforced plastic. *Journal of Machine Engineering*, 14.
- Komanduri, R. (1997). Machining of fiber-reinforced composites. *Machining Science and Technology*, 1(1): 113-152.
- Konneh, M., Izman, S. ve Kassim, A.A.R. (2015). Milling damage on Carbon Fibre Reinforced Polymer using TiAlN coated End mills. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing.
- Konneh, M., Sudin, I., Padil, D., Emmil, M. ve Roszat R., (2014). Surface Roughness Study of Milled Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite Using 4 mm 2-Flute Titanium Aluminum Nitride (TiAlN) Coated Carbide End Mills. *Advanced Materials Research*.
- Krishnamoorthy, A., Rajendra, B.S. ve Palanikumar, K. (2011). Delamination Prediction In Drilling of Cfrp Composites Using Artificial Neural Network. *Journal of Engineering Science and Technology*.
- Krishnaraj, V., Zitoune, R. ve Collombet, F. (2010). Comprehensive review on drilling of multi material stacks. *Journal of Machining and Forming Technologies*, 2(3-4): 1-32.
- Kusuyama, J., Yui, A., Kitajima, T. ve Itoh, Y. (2014). Face Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Using Poly Crystalline Diamond Tool. Advanced Materials Research, *Trans Tech Publication*.
- Lee, K.Y., Kang, M.C., Jeong, Y.H., Lee, D.W. ve Kim, J.S. (2001). Simulation of surface roughness and profile in high-speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3): 410-415.

- Li, Z.L., Zheng, H.Y., Lim, G.C., Chu, P.L. ve Li, L. (2010). Study on UV laser machining quality of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 41(10): 1403-1408.
- Lin, S.C. ve Chen, I.K. (1996). Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed. *Wear*, 194(1-2): 156-162.
- Lissek, F.M.K. ve Bergmann, J.P. (2014). Machining of Cfrp: Drilling and Milling of Unstable Work Pieces.
- Liu, D.F.Y.J.T. ve Cong, W.L. (2012). A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite Structures*, 94(4): 1265-1279.
- Liu, G.J., Chen, H.Y., Huang, Z., Gao, F. ve Chen, T. (2017). Surface Quality of Staggered PCD End Mill in Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics. *Applied Sciences-Basel*, 7(2): 199.
- Luís M.P.D., Gonçalves, D.J.S., Tavares, J.M.R.S., Vieira, A.A. ve Marques, A.T. (2010). Drilling Tool Geometry Evaluation for Reinforced Composite Laminates. *Composite Structures*.
- Madhavan, V.G.L, Lane, B. ve Whintenton, E. (2015). Fiber orientation angle effects in machining of unidirectional CFRP laminated composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 20: 431-442.
- Maegawa, S.S.H., Itoigawa, F. ve Nakamura, T. (2015). Development of novel tool for cutting of carbon-fiber-reinforced plastics (Positive use of abrasive wear at tool edge for reduction in cutting force). *Mechanical Engineering Journal*, 2(6): 15-00295-00215-00295.
- Maegawa, S., Morikawa, Y., Hayakawa, S., Itoigawa, F. ve Nakamura, T. (2016). Mechanism for changes in cutting forces for down-milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates: Modeling and experimentation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 100: 7-13.
- Makhadm, F., Jennings, L.T., Roy, A. ve Silberschmidt, V.V. (2012). Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics. *Modern Practice in Stress and Vibration Analysis*.
- Mallick, P.K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, CRC press.
- Mallick, P.K. (2008). *Fiber-Reinforced Composites : Materials, Manufacturing, and Design*. Boca Raton, Taylor & Francis.
- Marques, A.T., Durao, L.M., Magalhaes, A.G., Silva, J.F. ve Tavares, J.M.R.S. (2009). Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill. *Composites Science and Technology*, 69(14): 2376-2382.

- Mazumdar, S.K. (2002). *Composites Manufacturing : Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press.
- Miracle, D.B. ve Donaldson, S.L. (2001). ASM Metal Handbook, *Composites*.
- Mišković, A. ve Koboević, N. (2011). The Effect of Cutting Tool Geometry on Thrust Force and Delamination When Drilling Carbon Fibre Reinforced Composite Materials. *15th International Research/Expert Conference*. Prague, Czech Republic.
- Mitchell, B.S. (2004). *An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers*, A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Mizutani, Y., Nagashima, K., Takemoto, M. ve Ono, K. (2000). Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis. *Ndt & E International*, 33(2): 101-110.
- Mkaddem, A., Soussia, A.B. ve Mansori, M.E. (2013). Wear resistance of CVD and PVD multilayer coatings when dry cutting fiber reinforced polymers (FRP). *Wear*, 302(1-2): 946-954.
- Morandea, A. B., Leroy, J., Bonhoure, R., Chibane, D., ve Bouchou, A. (2011). Carbon Fiber Reinforced Plastics Machining : Surfacing Strategy for Reducing Cutting Forces. *18th International Conference on Composite Materials*. Korea.
- Morgan, P. (2005). *Carbon Fibers and Their Composites*. Boca Raton, Taylor & Francis.
- Mucha, P., Speker, N., Weber, R. ve Graf, T. (2013). Momentum and velocity of the ablated material in laser machining of carbon fiber preforms. *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 113(2): 361-366.
- N. Bhatnagar, Ramakrishnan, N., Naik, N.K. ve Komanduri, R. (1995). On the Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates. *International Journal Machine Tools Manufacture*. 35: 701-716.
- Najem, S.H. (2010). Methodology for assessment of factors influencing surface roughness on the drilling of carbon fiber-reinforced composites. *university of Babylon*: 1-12.
- Nalbant, M., Altin, A. ve Gokkaya, H. (2007). The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel-base Inconel 718 super alloys. *Materials & Design*, 28(4): 1334-1338.
- Nalbant, M., Gokkaya, H., Toktas, I. ve Sur, G. (2009). The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(1): 211-223.
- Neşeli, S. ve Yıldız, S. (2007). Tornalamada Yaklaşma Açısı ve Talaş Açısına Bağlı Tırlama Titreşimlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 10(4).

- Nikša K., Jurjević, M. ve Koboević, Ž. (2012). Influence of Cutting Parameters on Thrust Force, Drilling Torque and Delamination During Drilling of Carbon Fibre Reinforced Composites.
- Nor K.M.K, Che H.C.H, Jaharah A.G. ve AKM, Amin (2011). Tool Wear and Surface Roughness on Milling Carbon Fiber-reinforced Plastic using Chilled Air. *Journal of Asian Scientific Research*.
- Nor K.M.K., Che. H.C.H., Jaharah, A.G., Amin, AKM. ve A.N.M. Idriss (2013). Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre-reinforced plastic. *Wear*, 302(1-2): 1113-1123.
- Nurhaniza, M., Ariffin, M., Mustapha, F. ve Baharudin, B. (2016). Analyzing the effect of machining parameters setting to the surface roughness during end milling of CFRP-Aluminium composite laminates. *International Journal of Manufacturing Engineering*.
- Oyman, E., Aslantaş, K. ve Pazarkaya, İ. (2013). Ortogonal Kesme İşleminde Talaş Morfolojisi ve Kayma Bandını Etkileyen Parametrelerin Araştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(2): 59-71.
- Özbek, N.A., Çiçek, A., Gülesin, M. ve Özbek, O. (2016). AISI 316 Çeliğinin Tornalanmasında Kaplamalı Karbür Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin TAKIM Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkileri. 7. *Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu*, İstanbul.
- Panjan, M. (2010). Physical and chemical properties of nanolayered metal-nitride coatings prepared by sputtering. Doktora tezi, University of Ljubljana.
- Pecat, O., Rentsch, R. ve Brinksmeier, E. (2012). Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP. *Fifth Cirp Conference on High Performance Cutting*, 2012 1: 466-470.
- Phadnis, V.A., Makhadmeh, F., Roy, A. ve Silberschmidt, V.V. (2013). Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 47: 41-51.
- Pramanik, A., Neo, K.S., Rahman, A., Li, X.P., Sawa, M. ve Maeda, Y. (2003). Cutting performance of diamond tools during ultra-precision turning of electroless-nickel plated die materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1): 308-313.
- Qi, Z.C., Zhang, K.F., Cheng, H., Wang, D. ve Meng, Q.X. (2015). Microscopic mechanism based force prediction in orthogonal cutting of unidirectional CFRP. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(5-8): 1209-1219.
- Qin, X.D., Wang, B., Wang, G.F., Li, H., Jiang, Y.D. ve Zhang, X.P. (2014). Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the

- artificial neural network model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(2): 713-719.
- Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J.R.S. ve Tan, D.C.G. (1999). Machinability study of carbon fiber reinforced composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 90: 292-297.
- Rajasekaran, T., Vinayagam, B.K., Palanikumar, K. ve Prakash, S. (2010). Influence of machining parameters on surface roughness and material removal rate in machining carbon fiber reinforced polymer material. *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering*.
- Ramulu, M., Branson, T. ve Kim, D. (2001). A study on the drilling of composite and titanium stacks. *Composite Structures*, 54(1): 67-77.
- Richards, B., Howard, K. ve Williams, S. (2007). Lug cutting and trimming of the carbon fibre wing panels of the Airbus A400m with portable hand positioned tools, *SAE Technical Paper*.
- Romano, F., Fiori, J. ve Mercurio, U. (2009). Structural design and test capability of a CFRP aileron. *Composite Structures*, 88(3): 333-341.
- Roy, Y.A., Gobivel, K., Sekar, K.V. ve Kumar, S.S. (2014). High Speed Turning of Carbon Fiber-Epoxy Composite Material.
- Rusinek, R. (2010). Cutting process of composite materials : An experimental study. *International Journal of Non-Linear Mechanics*.
- Samuel Raj, D. ve Karunamoorthy, L. (2017). Cutting edge flattening and roughness measurement to monitor blunting and chipping of the drill cutting edge when drilling CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 1-16.
- Santiuste, C., Soldani, X. ve Miguelez, M.H. (2010). Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components. *Composite Structures*, 92(3): 691-698.
- Sarwar, M. ve Haider, J. (2010). Development of Advanced Surface Engineering Technologies for the Benefit of Multipoint Cutting Tools. Advanced Materials Research, *Trans Technical Publication*.
- Saxena, J. (1982). Effect of machining conditions on cutting tool vibrations, Advances in Machine Tool Design and Manufacturing Technology. *Proceedings of the 10th All India Machine Tool Design and Research Conference*, Durgapur, India.
- Schneider, G. (2001). *Applied Cutting Tool Engineering: Machinability of Metals*. T & P: Tooling ve production, 66(12): 42-48.

- Schorník, V., Daňa, M. ve Zetková, I. (2015). The Influence of the Cutting Conditions on the Machined Surface Quality when the CFRP is Machined. *Procedia Engineering*, 100: 1270-1276.
- SenthilKumar, M., Prabukarthi, A. ve Krishnaraj, V. (2013). Study on Tool Wear and Chip Formation during Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)/ Titanium Alloy (Ti6Al4V) Stacks. *Procedia Engineering*.
- Serp, P. ve Figueiredo, J. L. (2009). *Carbon Materials for Catalysis*. New Jersey, John Wiley & Sons.
- Sheikh-Ahmad, J. ve Sridhar, G. (2002). Edge trimming of CFRP composites with diamond coated tools: edge wear and surface characteristics, *SAE Technical Paper*.
- Sheikh-Ahmad, J., Urban, N. ve Cheraghi, H. (2012). Machining Damage in Edge Trimming of CFRP. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(7): 802-808.
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites*, Springer.
- Sheikh-Ahmad, J. Y., Dhuttargaon, M. ve Cheraghi, H. (2017). New tool life criterion for delamination free milling of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 1-13.
- Sheth, V., Mehta, A. ve Gharal, A. (2015). Experimental Investigation and Optimization of Milling Parameters in the Machining of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Material using PCD Tool.
- Shyha, I. S., Aspinwall, D. K., Soo, S. L. ve Bradley, S. (2009). Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49(12-13): 1008-1014.
- Slamani, M., Dagger, J. F. ve Hamedanianpour, H. (2015). Comparison of two models for predicting tool wear and cutting force components during high speed trimming of CFRP. *International Journal of Material Forming*, 8(2): 305-316.
- Slamani, M., Gauthier, S. ve Chatelain, J.F. (2015). A study of the combined effects of machining parameters on cutting force components during high speed robotic trimming of CFRPs. *Measurement*, 59: 268-283.
- Sornakumar, T. ve Kumar, A.S. (2008). Machinability of bronze-alumina composite with tungsten carbide cutting tool insert. *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3): 402-405.
- Sorrentino, L. ve Turchetta S. (2011). Milling of carbon fiber reinforced plastics: analysis of cutting forces and surface roughness. *18th International Conference of Composite Materials*.

- Sorrentino, L. ve Turchetta S. (2014). Cutting Forces in Milling of Carbon Fibre Reinforced Plastics. *International Journal of Manufacturing Engineering*.
- Soutis, C. (2005). Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 412(1-2): 171-176.
- Staab, G.H. (1999). *Laminar composites*. United States of America, Butterworth-Heinemann.
- Suresha, B., Kumar, K.S., Seetharamu, S. ve Kumaran, P.S. (2010). Friction and dry sliding wear behavior of carbon and glass fabric reinforced vinyl ester composites. *Tribology International*, 43(3): 602-609.
- Tamin, M.N. (2012). *Damage and fracture of composite materials and structures*, Springer.
- Terenzi, A., Natali, M., Petrucci, R., Rallini, M., Peponi, L., Beaumont, M., Eletskii, A., Knizhnik, A., Potapkin, B. ve Kenny, J M. (2017). Analysis and simulation of the electrical properties of CNTs/epoxy nanocomposites for high performance composite matrices. *Polymer Composites*, 38(1): 105-115.
- Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 51(2): 611-634.
- Tsao, C.C. ve Hocheng, H. (2008). Analysis of delamination in drilling composite materials by core-saw drill. *International Journal of Materials & Product Technology*, 32(2-3): 188-201.
- Ucar, M. ve Wang, Y. (2005). End-milling machinability of a carbon fiber reinforced laminated composite. *Journal of Advanced Materials*, 37(4): 46-52.
- URL-1 (2016). <https://www.tai.com.tr/tr/proje/anka>, TAI, 21 Ağustos 2016.
- Uusitalo, K. (2013). Designing in Carbon Fibre Composites. Chalmers University of Technology, Doktora Tezi, Gothenburg, Sweden.
- Wang, C., Wen, L., Wang, C., Zhang, H., An, Q. ve Chen, M. (2016). Influence of Fiber Orientation on Machined Surface Quality in Milling of Unidirectional CFRP Laminates. *Advanced Materials Research*, 1136.
- Wang, R.M. Zheng, S.R. ve Zheng, Y.P. (2011). *Polymer Matrix Composites and Technology*. Beijing, China, Woodhead Publishing.
- Wang, H., Sun, J., Li, J. ve Li, W. (2015). Roughness modelling analysis for milling of carbon fibre reinforced polymer composites. *Materials Technology*, 30(A1): A46-A50.
- Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L. ve Li, N. (2015). Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 1-9.

- Wang, H.Y., Qin, X.D., Li, H. ve Tan, Y.Q. (2016). A comparative study on helical milling of CFRP/Ti stacks and its individual layers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(5-8): 1973-1983.
- Wang, X., Kwona, P.Y., Sturtevant, C., Kim, D. ve Lantrip, J. (2013). Tool wear of coated drills in drilling CFRP. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(1): 127-135.
- Wang, X.M. ve Zhang, L.C. (2003). An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(10): 1015-1022.
- Wei, Y.Y., An, Q.L., Cai, X.J., Chen, M. ve Ming, W.W. (2015). Influence of Fiber Orientation on Single-Point Cutting Fracture Behavior of Carbon-Fiber/Epoxy Prepreg Sheets. *Materials*, 8(10): 6738-6751.
- William D.C. ve Rethwisch, D.G.J. (2009). *Materials Science and Engineering : An Introduction*.
- Wong, T., Wu, S. ve Croy, G. (1982). An analysis of delamination in drilling composite materials. *14th National Sampe Technical Conference*.
- Xu, J. Y., An, Q.L. ve Chen, M. (2014). A comparative evaluation of polycrystalline diamond drills in drilling high-strength T800S/250F CFRP. *Composite Structures*, 117: 71-82.
- Yao, L., Sun, Y., Alderliesten, R. ve Benedictus, R. (2016). Fatigue Delamination Growth Behavior in Composite Materials under Block Loading. *Proceedings of the American Society for Composites: Thirty-First Technical Conference*.
- Yazıcıoğlu, O., Borat, O. ve Demetgül, M. (2014). *İmalat Yöntemleri*. Ankara, Seçkin yayıncılık.
- Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C.Y. ve Özdemir, M. (2016). Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi/The modeling of results of cutting force, vibration and surface roughness in milling operations. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30(4).
- Youssef, H.A. ve El-Hofy, H. (2008). *Machining technology: machine tools and operations*, CRC Press.
- Zenia, S., Ayed, L. B., Nouari, M. ve Delameziere, A. (2015). An elastoplastic constitutive damage model to simulate the chip formation process and workpiece subsurface defects when machining CFRP composites. *15th Cirp Conference on Modelling of Machining Operations*, 31: 100-105.
- Zenia, S., Ben A.L., Nouari, M. ve Delameziere, A. (2015). Numerical analysis of the interaction between the cutting forces, induced cutting damage, and machining

parameters of CFRP composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4): 465-480.

Zhang L., Lijiang, W. ve Xin, W. (2003). Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method.

Zhang, Y.D., Xiao, H.H. ve Teng, Y. (2013). Study of Surface Roughness in Milling Carbon Fiber Reinforced Plastics Using PCD Tool. Key Engineering Materials, *Trans Tech Publication*.

Zitoune, R., Krishnaraj, V., Almagbouacif, B.S., Collombet, F., Sima, M. ve Jolin, A. (2012). Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich. *Composites Part B-Engineering*, 43(3): 1480-1488.

Żółkiewski, S. (2011). Selection and impact of parameters in composite materials designing. *13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guanajuato, México.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Derviş ÖZKAN
Doğum Yeri ve Tarihi : KAYSERİ / 10.01.1977
E-Posta Adresi : dozkan@kastamonu.edu.tr
dervisozkan@gmail.com



Eğitim Durumu

Ön Lisans : Erciyes Üniversitesi, Kayseri Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü (1999-2001)
Lisans : Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği (2003-2007)
Yüksek Lisans : Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (2008-2010)
Doktora : Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (2013-devam)
Yabancı Dil : İngilizce, Umist Üniversitesi, ELTC (English Language Teaching Centre) (2001-2002)

Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :1. Şahin, M., Mısırlı, C., Özkan, D., 2011. “Aşırı Plastik Deformasyonun Alüminyum Alaşımlarının Kaynağı Üzerine Etkisi”, Geleceğin Teknolojileri Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul, s. 225-236.
2. Şahin, M., Mısırlı, C., Özkan, D., 2012. “Aşırı Plastik Deformasyonun Alüminyum Alaşımlarının Kaynağı Üzerine Etkisi”, TMMOB, MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 630, s. 26-33.
3. Can, A., Engin, S., Özkan, D., 2013. “Energy Efficient Heating of Building”, Clhamed 2013, Mediterranean Congress of Climatization-Proceeding Book, s. 250-270,
4. Şahin, M., Mısırlı, C., Özkan, D., 2015. “Characteristic properties of AlTiN and TiN coated HSS materials”, Industrial

Lubrication and Tribology, 67:2.

5. Çalışkan, H., Özkan D., 2016. ‘Analysis of Cutting Forces in Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (Cfrp) Composites’, MECHATECH '16 / International Mechanical Engineering and Technologies Conference, 63-67.

İş Deneyimi

Stajlar : - Nar Can Pres Metal Makine San. ve Tic. Ltd. Şti. (İstanbul, 1999)
- Özen Dişli ve Makina Ltd. Şti. (İstanbul, 2000)
- Roketsan A.Ş. (Ankara, 2007)

Çalıştığı Kurumlar : Kastamonu Üniversitesi, Abana Sabahat-Mesut Yılmaz Meslek Yüksekokulu, Öğretim Görevlisi, 2013-Halen

Tarih : 02/06/2017