

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI HİBRİT KOMPOZİTLERDE DELİK DELME
İŞLEMİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mete KAYIHAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI HİBRİT KOMPOZİTLERDE DELİK DELME
İŞLEMİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mete KAYIHAN
(503161315)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa BAKKAL
Eş Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Umut KARAGÜZEL**

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503161315 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mete KAYIHAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK PERFORMANSLI HİBRİT KOMPOZİTLERDE DELİK DELME İŞLEMİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa BAKKAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Öğretim Üyesi Umut KARAGÜZEL**
Işık Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Ali Taner KUZU
Yeditepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **3 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **14 Haziran 2019**



Tüm sevdiklerim ve ülkemizi bilim aşkıyla ileriye taşıyacak nesillere,



ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi'nde geçirdiğim lisans ve yüksek lisans eğitimi boyunca derin bilgi birikimi ve tecrübesiyle ileriye dönük, pratik ve sorgulayıcı bakış açısı kazanmamı sağlayıp kendimi geliştirmeme olanak sağlayan, bana yol ve sabır gösteren değerli danışmanım ve hocam Prof. Dr. Mustafa BAKKAL'a, tez süresi boyunca desteklerini esirgemeyip, talaşlı imalattaki pratik tecrübelerini aktarmak için zaman ayıran değerli eş danışmanım Dr. Umut KARAGÜZEL'e teşekkürlerimi sunarım. Test hazırlıklarında çalışmalarına destek olan Osman ÇELEBİ'ye ayrıca teşekkür ederim. Son olarak akademik hayatımın başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi ve temel mühendislik disiplinlerini kazandığım ve halen araştırma görevlisi olarak görevimi sürdürdüğüm İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki sayın hocalarım, çalışma arkadaşlarım ve çalışmalarımı nihayete erdirmemde az ya da çok katkısı olan tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her türlü desteğini benden esirgemeyen ve iyi kötü her durumda yanımda yer alan öncelikle sevgili annem Dr. Sema KAYIHAN, babam Dr. Yavuz KAYIHAN ve kardeşim Meltem KAYIHAN'a minnetlerimi sunarım. Yaptığım çalışmaların gerek ülkemizin imalat sanayisindeki yeni gelişmelere ve malzeme tercihlerine gerekse de ilgili alanlardaki bilimsel çalışmalara ön ayak olmasını temenni ederim.

Haziran 2019

Mete KAYIHAN
İmalat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xxi
ŞEKİL LİSTESİ	xxv
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİ	3
2.1 Hibrit Yapılı Malzemeler	3
2.2 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemesinin Mekanik Özellikleri	4
2.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	6
2.4 Titanyum ve Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	7
2.5 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemesinin İşlenebilirliği	8
2.6 Alüminyum ve Alaşımlarının İşlenebilirliği	9
2.7 Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirliği	9
2.8 Delik Delme İşleminin Mekanikliği	11
2.8.1 Helisel matkabin kesme mekanikliği	12
2.8.2 Helisel matkap seçiminin malzemelerin yüzey kalitesine etkisi	14
2.9 Delaminasyon	15
2.10 Delaminasyon Faktörünün Hesaplanması	17
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	19
3.1 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemenin Delik Delme İşleminin Araştırılması	19
3.2 Hibrit Kompozit Malzemelerin Delik Delme İşleminin Araştırılması	23
3.3 Literatür Araştırması Sonucundaki Değerlendirme	39
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	41
4.1 Kullanılan Cihazlar	42
4.1.1 Takım tezgâhı	42
4.1.2 Dinamometre ve kontrol ünitesi	42
4.1.3 Optik mikroskop	44
4.1.4 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	45
4.2 Ara Plaka ve İş Parçası	45
4.3 Kesici Takımlar ve Aşınma Miktarları	47
4.4 Delik Delme Parametreleri	49
4.5 Deney Düzenekleri	50
5. SONUÇLAR	51
5.1 Kuvvet ve Tork Sonuçları	51
5.2 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	67

5.3 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemenin Delik Çapı ve Yüzey İncelenmesi.....	69
5.4 Giriş ve Çıkış Delaminasyon Faktörlerinin Hesaplanması	83
5.5 Harcanılan Enerji Hesabı.....	87
5.6 Genel Değerlendirme.....	90
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	99



KISALTMALAR

CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Plastics
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Plastics
GPa	: Gigapascal
MPa	: Megapascal
PCD	: Polycrystall Diamond
BHN	: Brinell Hardness Number
mm	: Milimetre
g	: Gram
cm³	: Santimetreküp
Nm	: Newtonmetre
dak	: Dakika
CVD	: Chemical Vapor Deposition
PVD	: Physical Vapor Deposition
ANOVA	: Analysis of Variance
s	: Saniye
KETP	: Karbon Elyaf Takviyeli Plastik
MQL	: Minimum Quantity Lubrication
M6	: Metrik 6
IRT	: Infrared Thermographic Camera
UTS	: Ultimate Tensile Strength
M-CFRP	: Metal-Carbon Fiber Reinforced Plastics
Hz	: Hertz
N	: Newton
kN	: Kilonewton
S/N	: Signal to Noise
DAQ	: Data Acquisition
dev	: Devir
Al	: Alüminyum
Ti	: Titanyum
µm	: Mikrometre



SEMBOLLER

θ	: Derece
$F_{z,i}$	: İtme Kuvveti
A_{th}	: Radyal kesici ağzın anlık iz alanı
H_B	: Brinell sertliği
$2w$	: Radyal ağız genişliği
c	: İlerleme
K_t	: Koniklik açısı
Φ_c	: Açısal hız
K_{te}, K_{fe}, K_{re}	: Kenar sabitleri
K_{tc}, K_{fc}, K_{rc}	: Kesme kuvveti katsayıları
b	: Talaş genişliği
h	: Talaş kalınlığı
i	: Eğik kesme açısı
γ_d	: İki hız bileşeni arasındaki açı
F_d	: Delaminasyon Faktörü
C^0	: Santigrat derece
F_{da}	: Ayarlanmış delaminasyon faktörü
F	: Kuvvet
f	: İlerleme
F^0	: Fahrenheit derece
v	: Hız
f	: İlerleme
A	: Alan
E	: Enerji
v	: Hız
N	: Devir
M_z	: Z yönünde oluşan tork
t	: Zaman

t_m : Tork ölçümünün sona erdiği süre
 t_f : Kuvvet ölçümünün sona erdiği süre



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : CFRP ve GFRP malzemelerinin elastiklik modülü ve yoğunluğu.	6
Çizelge 2.2 : Al6061 malzemesinin mekanik özellikleri.	6
Çizelge 2.3 : Ti-6Al-4V alaşımının içeriği.	7
Çizelge 2.4 : Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri.	7
Çizelge 2.5 : İşlenebilirlik dereceleri [13].	9
Çizelge 4.1 : Taguchi deney tasarımıyla oluşturulan parametreler	49
Çizelge 5.1 : Testler sonucunda malzemelerde oluşan kuvvet değerleri.	52
Çizelge 5.2 : Testler sonucunda malzemelerde oluşan tork değerleri.	52
Çizelge 5.3 : Malzemeler tek olarak delinince oluşan kuvvet değerleri.	53
Çizelge 5.4 : Malzemeler tek olarak delinince oluşan tork değerleri	53
Çizelge 5.5 : Testler sonucunda ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri	67
Çizelge 5.6 : Testlerin gerçekleştirildiği istif sırası, delme hızı ve ilerleme hızı.	70
Çizelge 5.7 : Gözlem sonucunda hesaplanan giriş delaminasyon faktörleri	83
Çizelge 5.8 : Gözlem sonucunda hesaplanan çıkış delaminasyon faktörleri	83
Çizelge 5.9 : Hesaplanan enerji değerleri	88
Çizelge 5.10 : Sonuç listesi.	90



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Uçakta hibrit kompozit malzemelerin kullanıldığı parçalar [3]	4
Şekil 2.2 : Uçaklarda kullanılan malzemelerin yüzdesi [3]	5
Şekil 2.3 : Değişik malzemelerin özgül dayanım-sıcaklık grafiği	5
Şekil 2.4 : CFRP malzemelerde görülen hasar tipleri.....	8
Şekil 2.5 : Kesme sıcaklığının kesme hızına göre değişimi [14].....	10
Şekil 2.6 : Standart silindirik helisel matkapın bölümleri [18].....	12
Şekil 2.7 : Delme esnasında oluşan kuvvetlerin yönü [18].	13
Şekil 2.8 : CFRP'nin delik yüzeyine yapışan titanyum talaşları [3].....	15
Şekil 2.9 : Delaminasyon çeşitleri	16
Şekil 2.10 : Sıyrılma ve itme etkisiyle oluşan delaminasyonların fotoğrafları [19]..	16
Şekil 3.1 : CFRP malzemesinde oluşan kusurlar [12]	20
Şekil 3.2 : CFRP malzemedede farklı devir ve ilerlemeyle oluşan delikler [22]	20
Şekil 3.3 : Özel tasarlanmış matkap ucunun delme stratejisi ve sonucunda parçada oluşturduğu kuvvet [23].....	21
Şekil 3.4 : Matkaplarda yer alan kesme kuvvetlerinin a) zamana b) ilerleme değerine göre değişiminin grafikleri [23].....	21
Şekil 3.5 : Parçanın değişik matkap uçları ve ilerleme değerlerindeki görüntüsü [23].....	22
Şekil 3.6 : Uç açısı ve kesme hızının sabit ilerleme değerindeki etkisi a) 3 eksenli b) 2 eksenli [24]	22
Şekil 3.7 : Tasarlanan matkap ucunun özellikleri [25]	24
Şekil 3.8 : Test düzeneği [25]	24
Şekil 3.9 : Sıcaklık farkları [25]	25
Şekil 3.10 : Malzemelerde oluşan kuvvet farkları [25]	25
Şekil 3.11 : Testler sonucunda elde edilen a) kesme kuvvetleri b) delik sayısı [26].	27
Şekil 3.12 : Delik sayısına göre aşınma miktarlarının kıyaslaması [26]	27
Şekil 3.13 : Kuvvet-tork ve zaman grafiği [27]	28
Şekil 3.14 : Devir-ilerleme ve kuvvet grafiği [27]	28
Şekil 3.15 : Malzemelerin istif sırası [29]	30
Şekil 3.16 : Malzemelerde oluşan yüzey pürüzlülükleri [29].....	30
Şekil 3.17 : Testler sonucunda delik sayısına göre oluşan kuvvet ve tork değerleri [30]	31
Şekil 3.18 : Her bir malzeme için 90 adet delik delme işleminin ardından oluşan kuvvet ve torklar [31]	32
Şekil 3.19 : Testlerin ardından oluşan delik çapları [31].....	32
Şekil 3.20: Delik sayısının artmasıyla kesilemeyen elyaf ve delaminasyon profillerinin değişmesi [32]	33

Şekil 3.21: Belirli yanak aşınması uzunluğunda farklı takımlarda, delme hızı ve ilerleme değerinde ulaşılan delik sayısı [33]	34
Şekil 3.22 : Ti/CFRP/Al malzemelerinin a) ulaştığı kuvvet ve tork değeri b) kuvvet ve tork değerlerinin delik sayısı ile ilişkisi [33].....	35
Şekil 3.23 : Test düzeneği [37]	37
Şekil 3.24 : Test sonrasında elde edilen sonuçlar [37]	38
Şekil 3.25 : Testler sonucunda elde edilen gerilme/yorulma ömrünün grafiği [37].	38
Şekil 4.1 : Spinner markalı VC650 dik işleme merkezi	42
Şekil 4.2 : Kistler markalı 9272 dahili yükselticili dinamometre ve 16xx yüksek dirençli bağlantı kablosu	43
Şekil 4.3 : 6024E DAQ PCMCİ veri toplama kartı	43
Şekil 4.4 : 5070 yük yükseltici	44
Şekil 4.5 : Nikon SMZ800 stereo optik mikroskop	44
Şekil 4.6 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	45
Şekil 4.7 : Alüminyum ara plakanın izometrik resmi	45
Şekil 4.8 : İlk istif sırası (Al/Ti/CFRP).....	46
Şekil 4.9 : İkinci istif sırası (CFRP/Al/Ti).....	46
Şekil 4.10 : Üçüncü istif sırası (Ti/CFRP/Al).....	46
Şekil 4.11 : Testler öncesinde matkabın durumu	47
Şekil 4.12 : 9 delik delindikten sonra matkabın durumu	48
Şekil 4.13 : Malzemelerin ayrı delinmesinde matkaplarda oluşan takım aşınması uzunlukları	48
Şekil 4.14 : İstif sıralarına göre matkaplarda oluşan takım aşınması uzunlukları.	49
Şekil 4.15 : Testin gerçekleştirildiği andaki kurulum.....	50
Şekil 4.16 : Kuvvet ve tork ölçüm düzeneği.....	50
Şekil 5.1 : İlk istif sırası (Al/Ti/CFRP).....	54
Şekil 5.2 : İlk istif sırasında yapılan testlerde elde edilen kuvvet ve tork değerleri ..	54
Şekil 5.3 : İkinci istif sırası (CFRP/Al/Ti).....	55
Şekil 5.4 : İkinci istif sırasında yapılan testlerde elde edilen kuvvet ve tork değerleri	56
Şekil 5.5 : Üçüncü istif sırası (Ti/ CFRP/Al).....	57
Şekil 5.6 : Üçüncü istif sırasında yapılan testlerde elde edilen kuvvet ve tork değerleri	57
Şekil 5.7 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için kuvvet değişim grafiği	58
Şekil 5.8 : CFRP malzemesinde S/N oranları için kuvvet değişim grafiği.....	59
Şekil 5.9 : CFRP malzemesinde oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişim grafiği	59
Şekil 5.10 : Titanyum alaşımında ortalama değerler için kuvvet değişim grafiği	60
Şekil 5.11 : Titanyum alaşımında S/N oranları için kuvvet değişim grafiği	60
Şekil 5.12 : Titanyum alaşımında oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişim grafiği	61
Şekil 5.13 : Alüminyum alaşımında ortalama değerler için kuvvet değişim grafiği .	61
Şekil 5.14 : Alüminyum alaşımında S/N oranları için kuvvet değişim grafiği.....	62
Şekil 5.15 : Alüminyum alaşımında oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişim grafiği	62
Şekil 5.16 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için tork değişim grafiği.....	63
Şekil 5.17 : CFRP malzemesinde S/N oranları için tork değişim grafiği	63
Şekil 5.18 : CFRP malzemesinde oluşan torkun delme parametrelerine göre değişim grafiği	64
Şekil 5.19 : Titanyum alaşımında ortalama değerler için tork değişim grafiği	64

Şekil 5.20 : Titanyum alaşımında S/N oranları için tork değişim grafiği.....	65
Şekil 5.21 : Titanyum alaşımında oluşan torkun delme parametrelerine göre değişim grafiği.....	65
Şekil 5.22 : Alüminyum alaşımında ortalama değerler için tork değişim grafiği	66
Şekil 5.23 : Alüminyum alaşımında S/N oranları için tork değişim grafiği.....	66
Şekil 5.24 : Alüminyum alaşımında oluşan torkun delme parametrelerine göre değişim grafiği.....	67
Şekil 5.25 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği.....	68
Şekil 5.26 : CFRP malzemesinde S/N oranları için yüzey pürüzlülük değişim grafiği.....	69
Şekil 5.27 : CFRP malzemesinde delme parametrelerine göre yüzey pürüzlülük değerlerinin değişim grafiği.....	69
Şekil 5.28 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) giriş delik yüzeyleri.....	71
Şekil 5.29 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) giriş delik yüzeyleri-2	72
Şekil 5.30 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) giriş delik yüzeyleri.	73
Şekil 5.31 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) giriş delik yüzeyleri-2.....	74
Şekil 5.32 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) giriş delik yüzeyleri.	75
Şekil 5.33 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) giriş delik yüzeyleri-2.....	76
Şekil 5.34 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) çıkış delik yüzeyleri	77
Şekil 5.35 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) çıkış delik yüzeyleri-2.....	78
Şekil 5.36 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) çıkış delik yüzeyleri.	79
Şekil 5.37 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) çıkış delik yüzeyleri-2	80
Şekil 5.38 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) çıkış delik yüzeyleri.	81
Şekil 5.39 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) çıkış delik yüzeyleri-2	82
Şekil 5.40 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için giriş delaminasyon faktörünün değişim grafiği	84
Şekil 5.41: CFRP malzemesinde S/N oranları için giriş delaminasyon faktörlerinin değişim grafiği	84
Şekil 5.42: CFRP malzemesinde giriş delaminasyon faktörlerinin delme parametrelerine göre değişim grafiği.....	85
Şekil 5.43 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için çıkış delaminasyon faktörünün değişim grafiği.....	86
Şekil 5.44: CFRP malzemesinde S/N oranları için çıkış delaminasyon faktörlerinin değişim grafiği	86
Şekil 5.45: CFRP malzemesinde çıkış delaminasyon faktörlerinin delme parametrelerine göre değişim grafiği.....	87
Şekil 5.46: Ortalama değerler için hesaplanan enerjinin değişim grafiği.....	88
Şekil 5.47: S/N oranları için hesaplanan enerjinin değişim grafiği	89
Şekil 5.48: Hesaplanan enerji değerinin delme parametrelerine göre değişim grafiği.....	89



YÜKSEK PERFORMANSLI HİBRİT KOMPOZİTLERDE DELİK DELME İŞLEMİNİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Karbon elyaf takviyeli kompozitler (CFRP) ve bu malzemelere metal alaşımlı malzemelerin eklenmesiyle imal edilen hibrit kompozitler sahip oldukları üstün mekanik/fiziksel özellikler, mükemmel özgül dayanım ve korozyona karşı gösterdikleri yüksek dirençleri ile başta günümüz modern havacılık endüstrisinin yanı sıra motor sporları, spor ekipmanları, tıp gereçleri, yat ve yarış tekneleri imalatı gibi çok çeşitli sektörlerde tercih edilen malzemelerdir. Bu tür uygulamalarda CFRP yalnız başına tercih edilebildiği gibi titanyum ve/veya alüminyum alaşımları ile birlikte de kullanılabilmekte bunun sonucunda “hibrit kompozitler” adını almaktadır. Böylelikle her biri malzemenin zayıf mekanik özellikleri ve diğer zaafları, bir diğer malzeme kategorisinin üstün özellikleriyle telafi edilip ortadan kaldırılmaktadır. Örneğin titanyum alaşımları yüksek özgül dayanım ve kırılma tokluğu ile izotropik davranışa sahipken CFRP ise yüksek özgül rijitlik, korozyon dayanımı ve mükemmel yorulma dayanımına sahiptir. Bu malzemeler bir arada kullanıldıklarında ise örneğin metallerin korozyon sorunları ile kompozitlerin darbe dayanımı sorunları aynı anda çözüleceğinden bugün sadece havacılık sektörü için ekonomik olan hibrit kompozit uygulamaları yakın gelecekte tezgâh ve iş makineleri ile diğer pek çok sanayi uygulamasında yer bulabilecektir.

Bu tür malzemelerin havacılık endüstrisinde kullanımları sırasında en çok başvurulmuş talaşlı imalat yöntemi ise delik delme işlemidir. Yukarıda bahsedildiği üzere hibrit kompozitler ortaya koydukları üstün mekanik özellikleri ile bu malzemelerin ayrı ayrı kullanılmasından daha avantajlı bir durum ortaya koyarlar. Ancak, bu malzemeler arasında özellikle dikkatle takip edilmesi gereken CFRP’dir. Zira yapılan delik delme işlemi kompozit malzeme üzerinde çeşitli olumsuz etkiler (mekanik, fiziksel, kimyasal ve metalurjik) yaratarak hem bu malzemenin ömrünü hem de tüm yapıdan beklenen toplam ömrü azalmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada hibrit malzemeler, delik delme işleminde uygulanması gereken istif sırası, delme hızı ve ilerleme değeri gibi faktörler üzerinden test edilmiş ve çeşitli sonuçlar üzerinden analizler yapılmıştır. Testler üç faktörlü ve üç seviyeli L9 Taguchi ortogonal deney tasarımıyla uygulanmıştır. Bu deney tasarımının yardımıyla gerek testler için lazım olan uzun süreden gerekse de malzemelerin getirdiği yoğun maliyetten kaçınılmıştır.

Testler üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme değeriyle üç farklı istif sırasında gerçekleştirilmiştir. Bu değerler literatürdeki uzun araştırmaların sonucunda belirlenmiştir. Her test beklenmedik sonuçların olması ihtimali nedeniyle birer kez daha tekrar edilerek güvence altına alınmıştır. Sonuçlar ise tek yönlü varyans analiziyle tamamlanmış ve en uygun istif sırası ve delme parametreleri belirlenmiştir.

Testlerde öncelikle dinamometre yardımı ile kuvvet ve tork ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Burada tüm testlerde elde edilen kuvvet ve tork sonuçları sonucunda varyans analiziyle malzemeler için ayrı ayrı en uygun istif sırası ve

delme parametreleri belirlenmiştir. Kuvvet ve tork sonuçlarını verecek regresyon formülü oluşturulmuştur.

Kuvvet ve tork sonuçlarının akabinde delik delme işleminde yüzey ve delik kalitesi olarak en çok etkilenen malzeme olan CFRP optik mikroskopla incelenmiştir. Bu inceleme esnasında delik çapı ölçülmüş ve görüntüler alınmıştır. Bu ölçülerin alınmasının ardından CFRP malzemedeki delik içi yüzey pürüzlülüğü de ölçülmüştür. Delik çaplarının, oluşması beklenen delik çaplarına oranıyla belirlenen delaminasyon faktörleri hem giriş hem de çıkış bölgeleri için hesaplanmıştır. Elde edilen delik içi yüzey pürüzlülüğü, giriş ve çıkış delaminasyon faktörlerinin “daha küçük daha iyi” karakteristiğiyle varyans analizi yapılmıştır. Tüm bu işlemler için de en uygun istif sırası ve delme parametreleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu sonuçların parametrelerden hesaplanmasını sağlayacak formüller regresyon analiziyle düzenlenmiştir.

Son olarak ölçülen kuvvet ve tork değerleriyle, delik delme işleminin gerçekleştirilmesi için gereken enerji miktarı hesaplanmış ve benzer mantıkla varyans analizine tabi tutularak daha düşük miktarda enerji gerektiren istif sırası ve delme parametreleri bulunmuştur. Farklı parametreler için gereken enerjilerin hesaplanması yapılan testler sonucu bir regresyon denklemi elde edilmiştir.

Bu çalışma sonucunda özellikle havacılık ve uzay sektöründe sıklıkla kullanılan ve önemi gittikçe artan hibrit yapılı kompozit malzemelerin istenilen özelliklere göre istif sırası ve delme parametreleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Böylece sanayide kabul edilen düşük toleranslar nedeniyle yoğun ürün reddi yaşanan hibrit yapılı kompozit malzemelerin en doğru ve verimli delik delme işleminin gerçekleştirilmesi için en uygun sonuçlar sağlanmaya çalışılmıştır.

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF DRILLING IN HIGH PERFORMANCE HYBRID COMPOSITES

SUMMARY

Composite materials are widely used in the manufacture of products with superior mechanical properties in a wide range from automotive, aviation industry, marine to sports equipment. However, the aviation industry, which is increasing its importance day by day, is frequently preferred by the addition of fiber reinforced composites as well as metal alloys to these materials because of their more rigid, high resistance to fatigue and perhaps most importantly, high density at low density. It is considered appropriate to use carbon which has the highest specific tensile modulus as the fiber material in the composite material.

The idea of using two or more different material types as a single material has gained momentum as the progress in material science has continued unceasingly. Hybrid composite materials produced for this purpose can be made by placing two different types of fibers in the same matrix and in the same direction or by stacking different types of fibers or different types of materials. This group of materials is anisotropic (direction dependent) and has better mechanical properties than single fiber composite materials.

In hybrid composites that are formed by combining different types of materials, the drilling process is a challenging and yet uncontrollable issue. In particular, investigations are continuing on the order in which the materials should be stacked and the parameters to be used during the drilling process.

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites are preferred in many sectors including aerospace industry due to their high strength/density ratio, fracture toughness, excellent corrosion and abrasion resistance. There are several difficulties in the drilling of these materials. As a result of these operations, due to the anisotropic properties of the material, delamination, burr formation, fiber shrinkage and tear defects occur.

Particularly in composite materials manufactured as layer by layer, separation is easier and delamination is frequently seen due to the lower strength of these surfaces compared to other regions. Delamination caused by buckling due to the intensive compressive forces applied in the hole drilling process is the most visible damage type in composite materials. The causes and occurrence of delamination and other types of damage have not been fully explained, even though academically it is highly emphasized. In addition, the high wear resistance of the CFRP results in tool wear and breakage if a large number of holes are drilled. For this reason, it would be useful to design the drilling operations as planned, careful and as much as possible to reduce the damage to the tool used.

Hybrid composites produced by the addition of metal alloys to carbon fiber reinforced composites (CFRP) materials have superior mechanical and physical properties, excellent specific strength and high resistance to corrosion. For manufacturing this type of material, CFRP may be used alone or in combination with titanium and/or aluminum alloys and is therefore referred to as hybrid composites. Thus, the weak mechanical properties and other weaknesses of the material are compensated and

eliminated by the superior properties of another material category. For example, titanium alloys have isotropic behavior with high specific strength and fracture toughness, while CFRP has high specific rigidity, corrosion resistance and excellent fatigue strength. When these materials are used together, for example, corrosion problems of the metals and the impact strength of the composites at elevated temperature will be solved at the same time. Hybrid composite applications which are economical for the aviation sector in the near future will be able to take place in construction machinery and many other industrial applications in the near future.

The most commonly used machining processes in the use of hybrid materials in the aviation industry is the drilling process. As mentioned above, hybrid composites exhibit superior mechanical properties, which are more advantageous than using these materials separately. However there are various difficulties in the drilling of hybrid composite materials. As a result of drilling operations, due to the anisotropic properties of the material, delamination, burr formation, fiber pullout and splitting are observed in CFRP material. For this reason the performance of CFRP after drilling operation must be the main concern. Because the drilling process creates various negative effects (mechanical, physical, chemical and metallurgical) on the composite material and decreases the fatigue life of this material and the total life expectancy of the whole structure. Therefore, in this study, hybrid materials were tested on factors such as stack order, drilling speed and feed rate which should be applied in hole drilling process and analysis were made on various results.

The tests were performed with three-factor and three-level L9 Taguchi orthogonal experiment design. With the help of this experimental design, the long term required for the tests and the cost of the materials were avoided.

The tests were carried out in three different stackorder with three different drilling speeds and three different feed rates. These values were determined as a result of long studies in the literature. Each test is repeated one more time because of the possibility of unexpected results. The results were completed with one-way analysis of variance and the most appropriate stack order and drilling parameters were determined.

In the tests, force and torque measurements were performed with the help of the dynamometer. As a result of the force and torque results obtained in all tests, variance analysis was used to determine the most suitable stackorder and drilling parameters for the materials. A regression formula was created to the force and torque results.

Following the results of the force and torque, the surface and the hole quality of CFRP was investigated via optical microscope. Because CFRP was the most affected material in hybrid materials set. During the examination, the maximum hole diameter was measured and images were taken. After taking these images, in-hole surface roughness was measured in CFRP material. The delamination factors determined by the ratio of the maximum hole diameter to the expected hole diameters were calculated for both the entry and exit of the CFRP material surface. Variance analysis was performed with “smaller is better” characteristics of the in-hole surface roughness, the entrance and exit delamination factors. For all these operations, the most convenient stack order and drilling parameters are determined separately. The regression formulas were created via regression analysis and that brings great opportunity to arrange the drilling parameters.

Finally, with the measured force and torque values, the amount of energy required to perform the hole drilling operation was calculated. After that analysis of variance with

similar logic was subjected. The stacking order and drilling parameters that required a lower amount of energy were found. A regression equation was obtained as a result of the tests performed to calculate the energies required for different parameters.

As a result of this study, the stackorder and drilling parameters of the hybrid composite materials which are frequently used in aerospace industry and are becoming more and more important are determined according to the desired properties. Thus, it is tried to provide the most appropriate results for performing the most accurate and efficient drilling of hybrid composite materials with intense product rejection due to low tolerances accepted in the industry.

The lowest force obtained in the CFRP material occurs during the CFRP/Al/Ti stack at a drill speed of 62 m/min and feed rate of 0.05 mm/rev. The force generated during the Ti/CFRP/Al stack in which the highest force value is obtained is approximately 50 percent higher than the lowest force. It has been observed that the forces measured in the CFRP material increase as the drilling speed increases.

At the forces measured in the titanium alloy, CFRP/Al/Ti stack was the lowest, at a drilling speed of 94 m/min and feed rate of 0.05 mm/rev. The stack order in which the highest force is obtained is the Ti/CFRP/Al stack, similar to the CFRP. The force obtained during the Ti/CFRP/Al stack is 34 percent higher than the force measured during the CFRP/Al/Ti stack.

The results are similar for the forces measured in the aluminum alloy. The lowest force is achieved by the CFRP/Al/Ti stack, 94 m/min drilling speed and 0.05 mm/rev feed rate. The force measured during the Ti/CFRP/Al stack is approximately 45 percent higher than the force determined during the CFRP/Al/Ti stack.

The force and torque values obtained at high drilling speeds and low feed rate are independent from the stack order. However, the stacking order was determined to be the most effective parameter for the exchange of force and torque.

The lowest torque measured in the CFRP material is generated during CFRP/Al/Ti stack at a drilling speed of 94 m/min and feed rate of 0.05 mm/rev. The torque value measured during CFRP/Al/Ti stack is approximately 45 percent less than during the Al/Ti/CFRP stack, where the highest torque value is measured.

In titanium alloy, the lowest torque value is obtained during Al/Ti/CFRP stack, 94 m/min drilling speed and 0.05 mm/rev feed rate. The torque value measured during the Al/Ti/CFRP stack is approximately 33 percent less than during the Ti/CFRP/Al stack where the highest torque is reached.

The lowest torque value in aluminum alloy occurs during CFRP/Al/Ti stack, 94 m/min drilling speed and 0.05 mm/rev feed rate. The torque value measured during CFRP/Al/Ti stack is 25 percent less than during the Ti/CFRP/Al stack, where the highest torque value is obtained.

The minimum surface roughness value measured in the CFRP material is obtained during Al/Ti/CFRP stack at a drill speed of 62 m/min and feed rate of 0.1 mm/rev. The most effective parameter is the stack order and the least effective parameter is feed rate. The surface roughness value measured during the Al/Ti/CFRP stack is approximately half of the other stack order.

The lowest entrance delamination factor value Al/Ti/CFRP is obtained at a drilling speed of 94 m/min and feed rate of 0.1 mm/rev. The lowest exit delamination factor value likewise occurs during Al/Ti/CFRP stack, at a drill speed of 62 m/min and feed rate of 0.1 mm/rev. It is observed that the machinability properties of titanium alloy come into prominence at the surface roughness and delamination factor value. The output delamination factor value was found to be up to 3 percent higher than the input delamination factor value.

It is observed that hole diameters formed during Ti/CFRP/Al stack gradually increase out of tolerance and delamination formations are observed. During Ti/CFRP/Al stacks at the drill exit surface, delamination occurs at a drilling speed of 125 m/min and feed rate of 0.07 mm/rev. During the CFRP/Al/Ti stacks, fiber breakout and uncut fibers are observed.

The lowest energy consumed was measured during Al/Ti/CFRP at a drill speed of 62 m/min and feed rate of 0.1 mm/rev. It was seen that the energy consumed increased linearly with increasing drilling speed. The energies calculated during the Ti/CFRP/Al stack are 20 percent higher than during the Al/Ti/CFRP stack. The energy calculated for the feed rate of 0.07 mm/rev is 10 percent higher than the feed rate of 0.1 mm/rev. Similarly, the energy calculated at a drilling speed of 125 m/min is about 10 percent higher than the energy calculated at a drilling speed of 62 m/min.





1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler otomotivden, havacılık ve uzay endüstrisine, denizcilikten spor ekipmanlarına kadar geniş bir yelpazede üstün mekanik özelliklere sahip ürünler imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak önemini günbegün arttırmakta olan havacılık ve uzay sektöründe elyaf takviyeli kompozitlerin yanı sıra bu malzemelere metal alaşımlarının da eklenmesiyle hibrit kompozitleri daha rijit olması, yorulmaya karşı yüksek dayanım göstermesi ve belki de en önemlisi düşük yoğunlukta yüksek dayanım sağlaması nedeniyle sıklıkla tercih etmektedir. Kompozit malzemedeki elyaf malzemesi olarak da en yüksek özgül çekme modülüne sahip olan karbon kullanılması uygun görülmektedir.

Malzeme bilimindeki ilerlemenin durmaksızın sürmesiyle birlikte iki veya daha fazla farklı malzeme tipinin tek bir malzeme olarak kullanılması fikri hız kazanmıştır. Bu amaçla üretilen hibrit kompozit malzemeler, iki farklı elyaf türünün aynı matris ve aynı doğrultuda yerleştirilmesi şeklinde yapılacağı gibi farklı elyaf veya farklı malzeme tiplerinin katman katman istiflenmesiyle de hazırlanabilir. Anizotropik (yöne bağımlı) olan bu malzeme grubu tek elyaflı kompozit malzemelere göre daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Örneğin; kompozit ve metal tabakalarının istiflenmesiyle oluşturulan yapı, her bir farklı malzeme türünün kattığı üstünlük sayesinde ideal bir malzeme kombinasyonu oluşturmaktadır.

Ortalama bir uçağın yaklaşık olarak 4 milyon adet parçadan oluştuğu hesaba katılırsa bu parçaların birleştirilmesi için parçalarda yoğun şekilde delik delme işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Farklı tip malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşturulan hibrit yapıları kompozitlerde delik delme süreci ise zorlu ve henüz tam olarak hakim olunamayan bir konudur. Özellikle malzemelerin hangi sırada istiflenmesi gerektiği ve delik delme işlemi esnasında kullanılacak parametreler üzerine yapılan araştırmalar sürmektedir.

Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozitler yüksek dayanım/yoğunluk oranı, kırılma tokluğu, mükemmel korozyon ve aşınma direnci nedeniyle havacılık ve uzay

sanayi başta olmak üzere birçok sektörde tercih edilmektedir. Bu malzemelerin delik delme işleminde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Bu operasyonların sonucunda malzemenin anizotropik özelliği nedeniyle delaminasyon, çapak oluşumu, elyaf çekilmesi ve yırtılma şeklinde kusurlar oluşmaktadır.

Özellikle katman katman olarak imal edilen kompozit malzemelerde bu yüzeylerin mukavemetinin diğer bölgelere göre düşük olması nedeniyle ayrılma daha kolay gerçekleşmekte ve delaminasyon sıklıkla görülmektedir. Delik delme işleminde uygulanan yoğun basma kuvvetleri nedeniyle meydana gelen burkulma sonucunda oluşan delaminasyon kompozit malzemelerde en çok görülen hasar tipidir. Delaminasyon ve diğer hasar tiplerinin akademik olarak yüksek oranda üzerinde durulsa bile nedenleri ve oluşumu tam olarak açıklanabilmiş değildir. Buna ek olarak aşınma direnci yüksek olan CFRP, çok sayıda delik açılması durumunda takım aşınması ve kırılmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle delik delme işlemlerinin planlı, özenli ve kullanılan takımın mümkün olduğu kadar malzemedeki hasarları azaltıcı şekilde tasarlanması faydalı olacaktır.

CFRP'ye ek olarak malzeme özelliklerinde bir takım üstünlükler katan ve günümüz havacılık sanayinde hafiflik ve yüksek dayanımının etkisiyle kullanımı artan titanyum ve alüminyum alaşımları da bu malzemenin üzerine istiflenme yoluyla kullanılmaktadır. İkili ikili olarak yer almasının yanı sıra her üç malzemenin de bir arada bulunduğu örnekler mevcuttur. Bir sonraki bölümde bu konudaki literatür araştırması sunulacaktır.

2. TEORİ

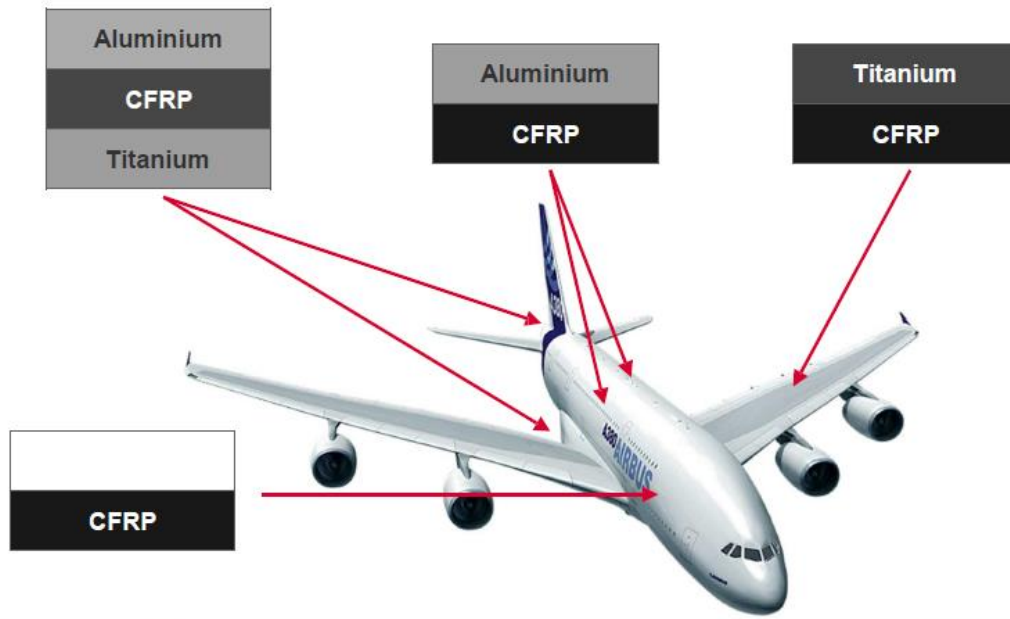
Bu bölümde ilk olarak hibrit kompozit malzemelerin tanıtımı yapıldıktan sonra sırasıyla bu malzemeleri oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri ve işlenebilirliği yorumlanacaktır. Ardından delik delme işleminin mekaniği ve delaminasyon hasar tipi açıklanacaktır.

2.1 Hibrit Yapılı Malzemeler

Hibrit yapılı malzemeler net olarak tanımlanmış bir malzeme kategorisi içinde bulunmamaktadır ancak genel itibarıyla “belirli bir mühendislik amacıyla iki veya daha fazla takviye elemanı ile belirli bir düzenleme ve miktarda bir yapı oluşturmaya” hibrit yapılı malzemeler meydana gelmektedir. [1] Hibrit malzemeler, tek bir takviye elemanı ile oluşturulan kompozitlere nazaran üstün mekanik özellikler göstermektedirler. Bu takviye elemanlar yoğunlukla elyaf-elyaf karışımıyla imal edilse bile katman-katman (tabakalı) ve sandviç panellerle imalat da yapılmaktadır.

Hibrit malzeme teknikleri genel olarak kompozit malzemeler, polimerler veya metal malzemeleri tek bir çatı altında toplamaktadır. Böylece bu teknikler malzeme tiplerinin üstünlüklerini tek bir malzeme içinde toplama fırsatı sağlamaktadır. Metal alaşımlı malzemeler sayesinde yüksek sıcaklıkta dahi malzemelerin rijitliği ve yapısal dayanımı korunmakta, elyaf takviyeli kompozitler ise metal malzemelere işlevsellik katmakta ve malzeme birleşimine aşınma ve özgül dayanımı sağlamaktadır. [2]

Özellikle bu tip malzemeler yoğunlukla havacılık ve uzay sektöründe kullanılmaktadır. Uçakların gövdesi, kanatçıklar, kuyruk takımı, kanat takviyeleri ve ön kenarı ve uçak motoru konisinde hibrit kompozit malzeme olarak CFRP, titanyum ve alüminyum alaşımının kombinasyonları bulunmaktadır. Bu malzemelerin üçü bir arada yer alabileceği gibi ikiye ayrılarak da yer alabilirler. Gelecek 5 yılda kullanımının %50’den fazla artması beklenen hibrit kompozit özellik gösteren bu malzemelerin uçakları oluşturan parçalardaki kullanılan bölümleri Şekil 2.1’de yer almaktadır. [3]



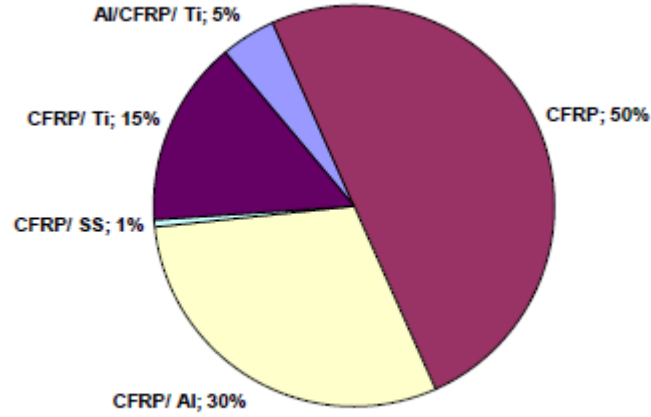
Şekil 2.1 : Uçakta hibrit kompozit malzemelerin kullanıldığı parçalar [3].

Bu malzemelerin mekanik özellikleri içerdiği malzemelerin mekanik özelliklerini göstermektedir. Farklı dizilimler ve kombinasyonlarla bezenen ve üstünlükleri bu şekilde arttırılabilen bu popüler malzemelerin mekanik özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi ve analiz edilebilmesi için kendisini oluşturan malzemelerin mekanik özelliklerinin bilinmesi elzemdir. Bu nedenle kombinasyonların yer alacağı tüm malzemeler ilerleyen bölümlerde detaylıca incelenecektir.

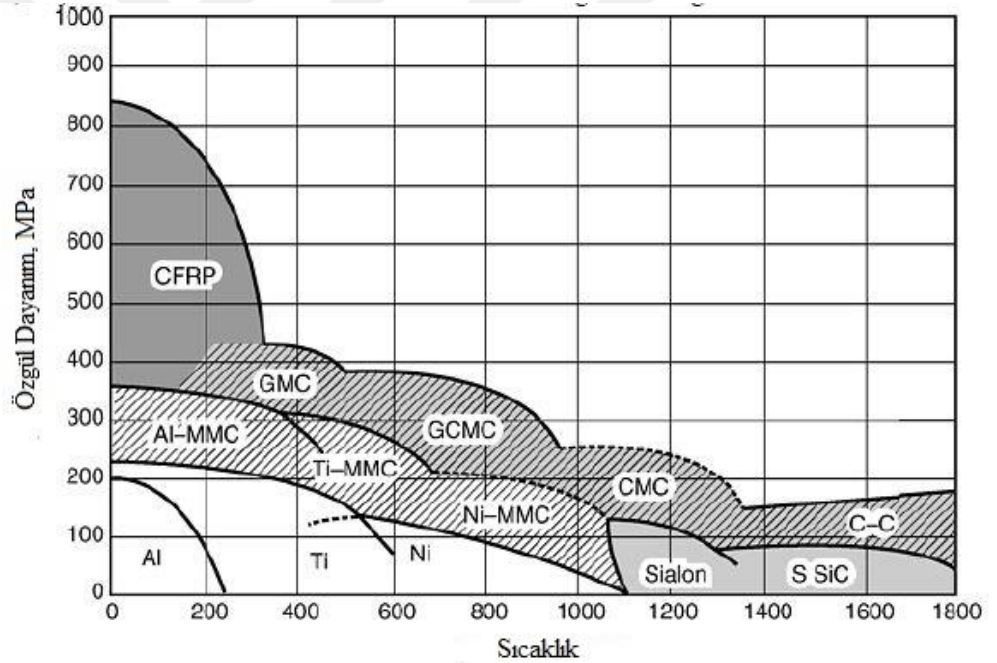
2.2 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemesinin Mekanik Özellikleri

Karbon elyaf takviyeli kompozitler (CFRP), polimer bir matrisin içerisine karbon elyafların yerleştirildiği bir malzemedir. CFRP kompozitler sınıfındaki diğer malzemelere nazaran yüksek elastiklik modülü ve düşük yoğunluğa sahiptir. Özellikle yoğunluk seviyesinin düşük olması ve çelikten %70; alüminyum alaşımından ise %40 daha hafif olması nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. Hatta Boeing 787 uçağının ana gövdesinin yarısı CFRP malzemesinde imal edilmiştir. [4] Bunun yanı sıra, CFRP malzemesi otomotiv ve spor ekipmanlarının imalatında da tercih edilmektedir. Gelecek otomotiv endüstrisini besleyen yarışların yapıldığı Formula 1'deki araçların parçalarının yaklaşık %85'i CFRP malzemeden oluşmaktadır ve bunun bir sonucu olarak araçların ağırlıklarının nerdeyse dörtte bir azaldığı görülmektedir. [5] Bu ağırlık düşüşü sayesinde yakıt tasarrufu üst seviyelere çıkmakta ve karbon emisyonu miktarı azalmaktadır. Uçaklarda kullanılan

malzemelerin yüzdesi Şekil 2.2’de verilmiştir. Ayrıca CFRP malzemenin diğer malzemelere nazaran gösterdiği özgül dayanım üstünlüğü Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Uçaklarda kullanılan malzemelerin yüzdesi [3].



Şekil 2.3 : Değişik malzemelerin özgül dayanım-sıcaklık grafiği.

Düşük yoğunluk ve yüksek dayanım istenen durumlarda tercih edilen CFRP, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere (GFRP) göre yüksek modüle yaklaşık 5.5 kat daha fazla elastiklik modülü sağlamaktadır. Aynı zamanda CFRP malzemesi yüksek dayanımını, bilhassa delik delme operasyonlarında sıklıkla karşılaştığımız yüksek sıcaklık şartlarında sürdürebilir. Bu önemli özelliklerinin yanı sıra CFRP malzemesi, metallere nazaran daha düşük yoğunlukta yorulma dayanımı daha yüksektir ve bu nedenle malzeme havacılık sektöründe ilgiyle takip edilip kullanılmaktadır.

Bahsedilen CFRP ve GFRP malzemelerinin elastiklik modülü ve yoğunluğu Çizelge 2.1’de verilmiştir. [6,7]

Çizelge 2.1 : CFRP ve GFRP malzemelerinin elastiklik modülü ve yoğunluğu.

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
Cam Elyaf	72.5	2.58
Karbon elyaf (standart modül)	230	1.8
Karbon elyaf (orta modül)	285	1.8
Karbon elyaf (yüksek modül)	400	1.8

2.3 Alüminyum ve Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Yüksek dayanım-yoğunluk oranıyla birçok sektörde tercih edilen alüminyum alaşımlarının önemi günümüzde de artarak devam etmektedir. Alüminyumun talaşlı imalatı her ne kadar kolay olsa da daha yumuşak cinsten olan malzemelerde düşük elastiklik modülü ve yüksek ısı genleşme katsayısı nedeniyle yüzeyde yığma kenar oluşma eğilimi gözükür ve bu nedenle yüzey kalitesi düşer. [8] Daha iyi bir işlenmiş yüzey elde etmek için alüminyum alaşımının cinsini özenle seçmek gerekmektedir. Belirli büyüklükteki fazların çöktürülerek dislokasyon hareketlerinin engellenmesine dayanan çökelme sertleşmesi işleminin ardından malzemenin dayanımı ciddi şekilde artar.

Yüzey kalitesinin daha uygun olmasını sağlamak için çalışmalarımızda daha yüksek mekanik özellikleri olan ve piyasada sıklıkla kullanılan 6061 cinsli alüminyum alaşımı kullanıldı. Al 6061 malzemesinin önemli mekanik özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir. [9]

Çizelge 2.2 : Al6061 malzemesinin mekanik özellikleri.

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Erime Sıcaklığı (°C)	Isı İletim Katsayısı (W/(m·K))	Isıl Genleşme Katsayısı (K ⁻¹)
Al 6061	68.9	2.7	124-290	585	151-202	2.32×10^{-5}

2.4 Titanyum ve Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Her ne kadar maliyeti oldukça yüksek olsa da titanyum alaşımları, yüksek dayanım-yoğunluk oranı ve yüksek korozyon direnci sayesinde havacılık sektöründe uçak komponentleri, diş implantları, otomotiv ve motor türbinlerinin imalatında yer almaktadır. [9]

Mukavemet, süneklik, sünme direnci, kırılma tokluğu ve çatlak ilerleme dayanımı gibi mekanik özellikler temel olarak titanyum malzemesinin iç yapısına bağlıdır. Bu nedenle, malzemeyi oluşturan elementlerin kütlece yüzdesi ve farklı ısı işlemlerinde gerçekleşen faz dönüşümleri bu mekanik özelliklerin değişiminde doğrudan etki gösterir. Üstün mekanik özellikleriyle piyasada sıklıkla kullanılan ve testlerin gerçekleştirildiği Ti-6Al-4V alaşımının içeriği ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 2.3 ve 2.4'te yer almaktadır. [10,11]

Çizelge 2.3 : Ti-6Al-4V alaşımının içeriği.

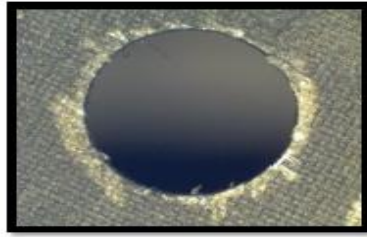
Malzeme (Ti-6Al-4V)	İçerik (%)
Al	6
Fe	En fazla 0.25
O	En fazla 0.2
Ti	90
V	4

Çizelge 2.4 : Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri.

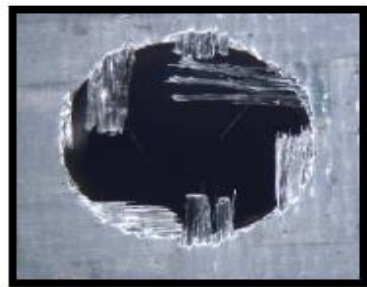
Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Erime Sıcaklığı (°C)
Ti-6Al-4V	113	4.43	950	1660

2.5 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemesinin İşlenebilirliği

Havacılık endüstrisinde kullanımının başlamasıyla birlikte CFRP malzemesinin talaşlı imalatı gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Özellikle çeşitli uçak parçalarında yoğun bir delik delme çalışması yapılması gerekmektedir. CFRP malzemesinin mekanik özelliklerinin getirdiği bir sonuç olan yüksek aşınma direnci nedeniyle parçaya temas ve nüfuz eden takım her ne kadar rijit olsa bile belirli bir delik sayısından sonra aşınmaktadır. İlaveten parça delik delme operasyonu sonucunda kompozit malzemenin anizotropik olması nedeniyle delaminasyon, elyafın yırtılması, çapak oluşumu, elyaf çekilmeleri ve matris bozulması gibi ciddi kusurlar oluşabilir. Bu durumu engellemek için kesme parametrelerinin çok iyi belirlenmesi ve malzemenin özelliklerine uygun açılı matkapların kullanımı yüzey kusurlarını azaltacaktır. [12] CFRP malzemelerdeki delik delme işleminin ardından en çok görülen hasar tipleri Şekil 2.4’te verilmiştir.



Delaminasyon



Kesilemeyen elyaf

Şekil 2.4 : CFRP malzemelerde görülen hasar tipleri.

Buna ek olarak sektördeki talaşlı imalat işlemlerinin yarısından fazlası delik delme uygulamasını içermektedir. Ancak delik delme işlemi sırasında aşınan takımların da etkisiyle yüzey kalitesi bozulmakta, sık sık elyaf ayrılması ve delaminasyon sorunları meydana gelmektedir. CFRP malzemesinin gösterdiği bu yoğun aşınma özelliği nedeniyle karbür veya PCD uçlu matkaplar tercih edilmelidir. [3]

2.6 Alüminyum ve Alaşımlarının İşlenebilirliği

Saf alüminyumun talaşlı imalatı oldukça kolaydır ve sonucunda az kuvvet oluşmaktadır. Ancak düşük ve orta kesme hızlarında meydana gelen yığma kenarlı sürekli talaş nedeniyle işleminden sonra hem yüzey kalitesi oldukça kötü olmaktadır hem de takım alüminyum talaşlarıyla sarılmaktadır. Bu nedenle iş parçasının yüzey kalitesinin arttırılması için alüminyum malzemelerin alaşımlandırılarak daha tok bir hale getirilmesi gerekmektedir. [6,9]

Takım veriminin daha yüksek olması ve delik çapının istenilen toleranslar aralığında kalması için doğru alüminyum alaşımının seçilmesi şarttır. Bu nedenle testlerde kullanılacak Al6061 alaşımı işlenebilirlik indeksi içinden tercih edilmiştir. Bu indekste 160 Brinell değerindeki AISI B1112 düşük karbonlu çeliğinin işlenebilirlik değeri %100 kabul edilmiştir. Bu değer altında kalan malzemelerin işlenebilirliği daha düşükken bu oranı geçen malzemelerin ise işlenebilirlik değeri daha fazladır. Burdaki ölçütler kesme hızı, yüzey kalitesi ve takım ömrü baz alınarak gerçekleştirilmiştir ve akabinde nihai işlenebilirlik değeri verilmiştir. Al6061 alaşımı ise %190'lık değeriyle oldukça yüksek bir işlenebilirlik örneği gösterdiği için testlerde kullanımı uygun bulunmuştur. İşlenebilirlik derecelerini veren tablo Çizelge 2.5'te verilmiştir.

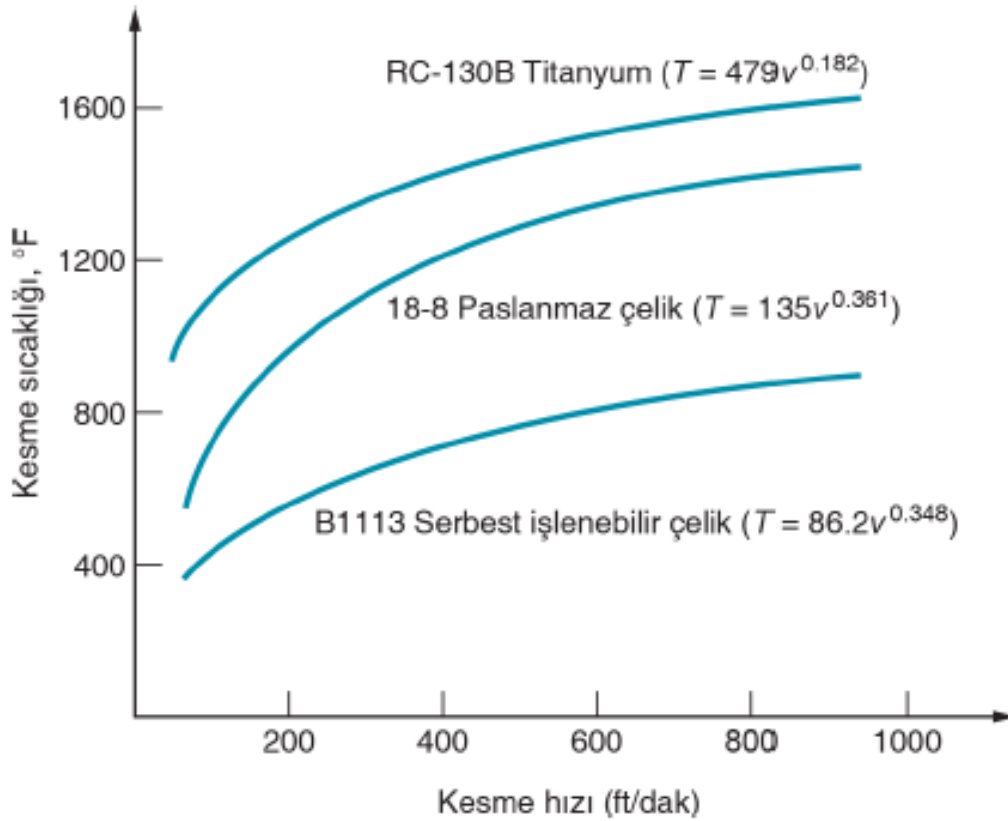
Çizelge 2.5 : İşlenebilirlik dereceleri [13].

Malzeme	Sertlik değeri	İşlenebilirlik derecesi
B1112 Çeliği	160 BHN	%100
Al 6061 7075 alaşımları	-	%190
Alüminyum	-	%120
416 Paslanmaz Çeliği	200 BHN	%90
1120 çeliği	160 BHN	%80
1020 çeliği	148 BHN	%65
8620 çeliği	194 BHN	%60
304 Paslanmaz Çeliği	160 BHN	%40

2.7 Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirliği

Titanyum kolaylıkla kimyasal reaksiyona girmesi ve düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle talaşlı imalatın en zor gerçekleştirilebildiği metal malzemelerden biri olarak

kabul edilmektedir. Aynı zamanda düşük elastiklik modülüne sahip olduğu için iş parçasında bükülmeler de gözükmemektedir. Buna ek olarak yüksek kesme hızlarına çıkılması durumunda çapaklanma, malzemede dökülme, iş parçasında ulaşılan sıcaklığın çok yüksek derecede artması ve takımın normalden çok daha hızlı aşınmaya uğraması görülebilir. Ancak bazı özel önlemlerin uygulanması durumunda iyi yüzey kalitesi gözlemlenmesi mümkündür. Kesme sıcaklığının kesme hızına göre ulaştığı nokta Şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Kesme sıcaklığının kesme hızına göre değişimi [14].

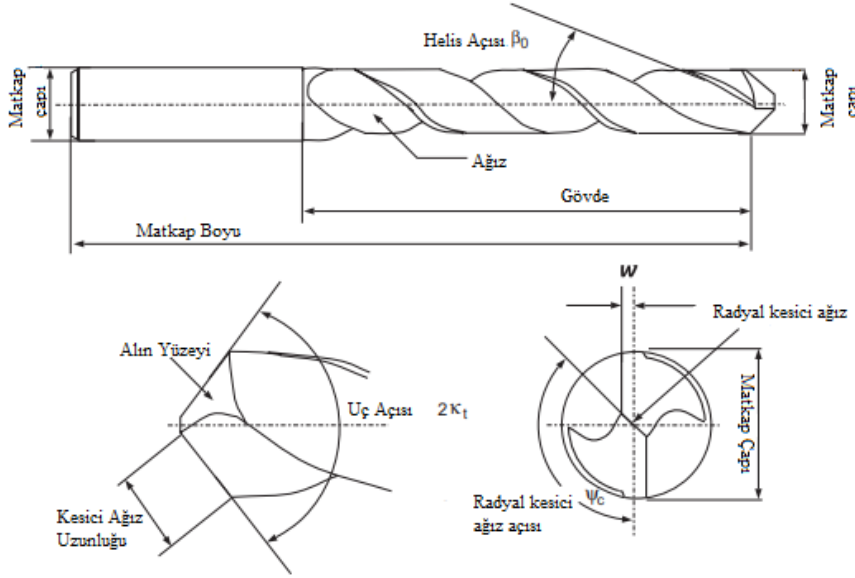
İşleme yapılacak takımın mutlaka keskin ve aşınmamış olması çok önemlidir. Bilhassa Ti-6Al-4V alaşımında kesme hızı alaşımsız bir çeliğin yaklaşık yirmide biri gibi bir yüzde de bulunmalıdır. Aksi takdirde çıkan talaşların tutuşma ve takımın çok hızlı aşınma ihtimali oluşmaktadır. Düşük kesme hızının yanı sıra yüksek ilerleme değeri kullanılmalıdır. Bu şekilde operasyon sonucunda meydana gelen sıcaklık miktarı bir nebze olsun düşük tutulabilir. Aynı zamanda bol miktarda kesme sıvısının kullanılmasıyla talaşların daha kolay ve hızlı tahliyesi kesme hızının düşürülmesi, takım ömrünün artırılması ve işlemeyi kolaylaştıracaktır. [15]

2.8 Delik Delme İşleminin Mekanığı

Kullanımının diğ er talaşlı imalat işlemlerine göre nispeten daha kolay, operasyonun daha hızlı ve montaj işlemlerinde sağladığı büyük getiriler sayesinde delik delme işlemleri, talaşlı imalatın gözde işlemlerinden biridir. Neredeyse yapılan üç talaşlı imalat uygulamasından birisi delik delme olmasına rağmen harcanılan süre olarak tüm işlemlerin yalnızca dörtte birini kapsamaktadır ve bu da işlemin diğ er operasyonlara nazaran hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. [16] Ancak yoğunlukla nihai ürünü elde etmeden önceki son bitirme işlemlerinden biri olan delik delme süreci azami dikkat ve düzenle uygulanmalıdır. Aksi takdirde sadece uçak kanatlarında elli binin üzerinde delik delme işlemleri içeren ve güvenliğin ilk sıraya konulduğu havacılık-uzay endüstrisinde elde edilen birçok son ürün ıskartaya verilmektedir. [17]

Ek olarak plastik matrisli ve elyaf takviyeli kompozit malzemeleri herhangi farklı bir malzemeye birleştirmek için delik delme işlemleri kullanılması şart olan imalat usullerinden biridir. Çünkü kompozit malzemeleri kaynaklı imalatla birleştirmek mümkün olmadığı gibi yapıştırıcılar kullanarak işlenmiş parça haline gelmesi çok uzun adımlar ve karmaşık bir süreç içermektedir. Bu nedenle özellikle endüstride kompozit parçaları başka parçalarla birleştirmek için mekanik bağlantı yöntemleri en çok kullanılan ve en hızlı yöntemlerdir.

Delik delme işlemleri iş parçasının sabitlendiği, deliğı açacak olan takımın ise genel olarak deliğın açılması istenilen ekseninde hareket edeceği bir süreç olarak özetlenebilir. Bu işlemleri özel kılan nokta ise kullanılacak olan takımlardır. Örneğın; konik havşa açma işlemleri için tercih edilen takım silindirik havşa açma işlemleri için kullanılması gereken takım elbette ki farklı olmalıdır. Delik delme işlemlerinde sıklıkla silindirik kesme takımlarıyla çalışıldığı için oluşan delikler de silindirik olmaktadır. Ancak son zamanlarda değışen geometrilere sahip takımlar sayesinde delik tipleri de farklılık göstermektedir. Testlerde ise tungsten karbürden imal edilmiş iki ağızlı helisel silindirik matkap kullanılacaktır. Bu matkap çeşidinin bölümleri Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 : Standart silindirik helisel matkapın bölümleri [18].

Matkaplar sıklıkla yüksek uzunluk/çap oranlarına sahiptirler bu özelliklerinden dolayı derin delik imalatı gerçekleştirebilirler. Standart helisel matkapta iki adet kesici ağız ve bir adet radyal kesici ağız bulunmaktadır. Matkapta bulunan helisel ağızlar delme işleminde herhangi bir kesme yapmaz ancak talaş tahliyesinde oldukça önemli bir görev alır. Delik içerisinde üretilen talaşlar matkabın ileri yönde hareketine zıt yönde tahliye edilmelidir. Bu nedenle talaş tahliyesi delme işleminde ortaya çıkan önemli zorluklardan bir tanesidir.

2.8.1 Helisel matkabın kesme mekaniği

Radyal ağız $2w$ genişliğe sahip ve kesici ağızları matkap merkezinden daha uzağa taşımıştır. Radyal ağızın malzemeyi kesme konusunda herhangi bir işlevi bulunmamaktadır.

Bu unsur malzemenin kenar noktalarına yayılmasını içermektedir ve buna göre analizi gerçekleştirilir. Bu noktaya etki eden itme kuvveti:

$$F_{z,i} = A_{th} H_B \quad (2.1)$$

Denklemde H_B delinecek malzemenin Brinell sertliğini A_{th} ise radyal kesici ağızın oluşturduğu anlık izin alanıdır. A_{th} ise:

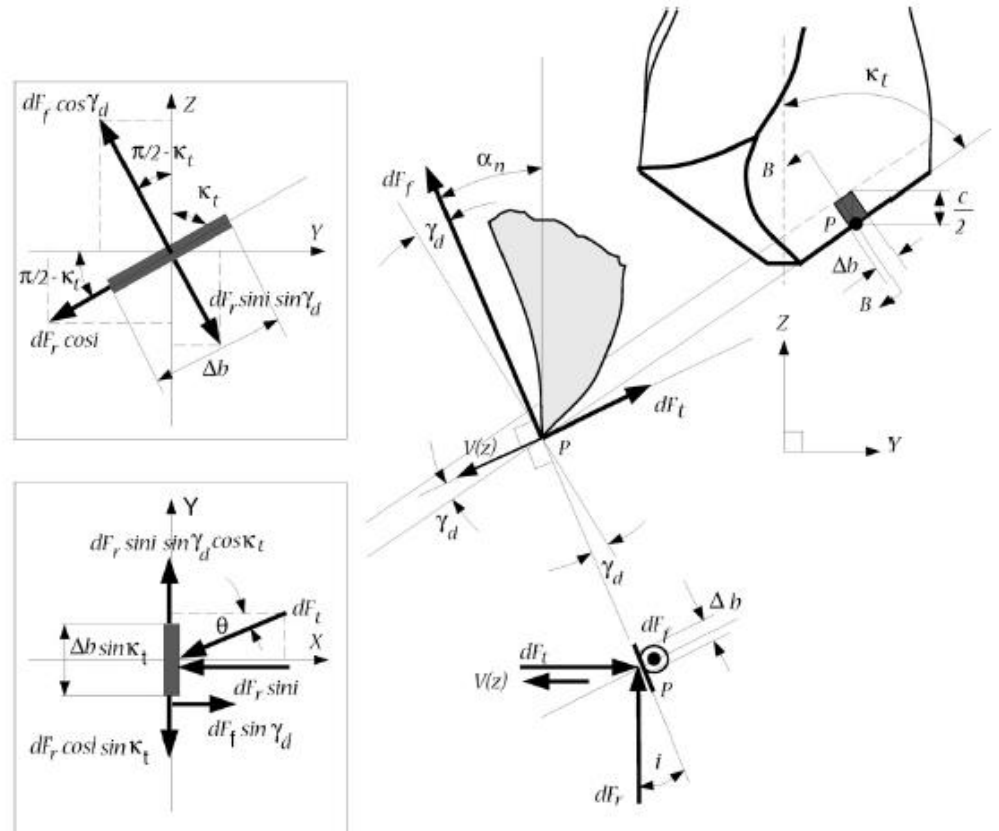
$$A_{th} = \frac{2wc}{\sin(\pi - \varphi_c) \cos \kappa_t} \quad (2.2)$$

olarak bulunur. Burada $2w$ radyal ağızın genişliğini, c matkabın ilerleme değerini [mm/dak], φ_c radyal kesici ağız açısını ve κ_t koniklik açısını göstermektedir.

Son dönemde geliştirilen matkap uçlarındaki radyal ağız geometrileri, parçanın yüzeyinde herhangi kayma işlemine izin vermeyeceği düzeyde geliştirildiği için burada ortaya çıkan kuvvet, kesici ağızda oluşan kuvvetlerin yaklaşık olarak yüzde 10'unu oluşturulduğu için bu şekilde kabul edilir ve tork değeri ise uç ağız genişliğinin dar olması nedeniyle oldukça düşük olacağından ihmal edilebilir. [18]

Kesici ağızda oluşan kuvvet hesaplamaları ise radyal ağıza nazaran daha karmaşıktır. Bu noktada ilk olarak kesici ağızdaki ilgili açıların (helis açısı, normal talaş açısı ve eğik kesme açısı) bilinmesi gerekmektedir ve bu açılar sürekli değişmektedir.

Şekil 2.7'deki görselde delme esnasında oluşan kuvvetlerin yönü verilmiştir.



Şekil 2.7 : Delme esnasında oluşan kuvvetlerin yönü.

$$\begin{aligned}
 dF_t(z) &= K_{tc}(z)dA + K_{te}\Delta b \\
 dF_f(z) &= K_{fc}(z)dA + K_{fe}\Delta b \\
 dF_r(z) &= K_{rc}(z)dA + K_{re}\Delta b
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Denklem 2.3'teki K_{tc} , K_{fc} ve K_{rc} 'deki kesme kuvveti katsayıları ve K_{te} , K_{fe} ve K_{re} ise kesme sabitleridir. Denklem içinde yer alan Δb ise talaş genişliği, $dA(z)$ diferansiyel kesici ağız, h ise talaş kalınlığıdır.

$$h = \frac{c \sin \kappa_t}{2} \tag{2.4}$$

$$\Delta b = \frac{dz}{\cos \kappa_t} \quad (2.5)$$

$$dA(z) = \Delta b h \quad (2.6)$$

Bu değerlerin bulunması ve kesme katasayılarının kullanılmasının ardından x, y ve z eksenlerinde oluşan kuvvetler hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} dF_x(z) &= [dF_f \sin \gamma_d - dF_t \cos \theta - dF_r \sin i] \\ dF_y(z) &= [dF_t (\sin i \sin \gamma_d \cos \kappa_t) - dF_f \cos \gamma_d \cos \kappa_t - dF_t \sin \theta] \\ dF_z(z) &= [dF_t \cos \gamma_d \sin \kappa_t - dF_r (\cos i \cos \kappa_t + \sin i \sin \gamma_d \sin \kappa_t)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'deki γ_d iki hız bileşeni arasındaki açıyı, κ_t koniklik açısını ve i eğik kesme açısını vermektedir.

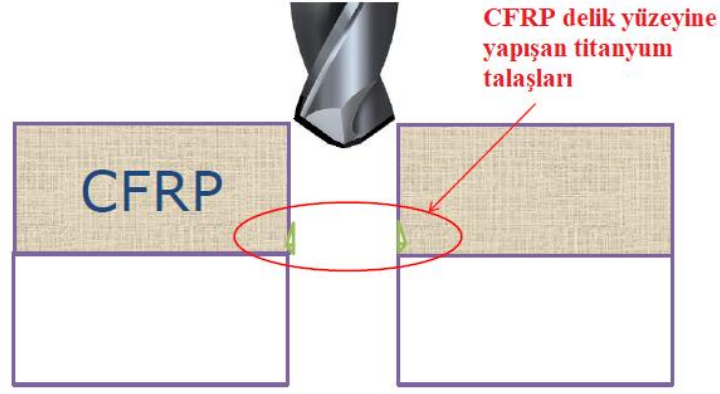
Açığa çıkan kuvvetler ve tork, kesici ağızı oluşturan tüm elemanların toplamıyla hesaplanabilir.

Oluşan toplam kuvvet radyal ağzın ve kesici ağızların oluşturduğu kuvvetlerin toplamından oluşurken, oluşan torku hesaplamak için radyal ağzın oluşturduğu tork yoksayılabilir derecede azdır. [18]

Delme mekaniğini oluşturmak ve anlamak gerek karmaşık geometrilerin varlığı gerekse de kesici ağız boyunca yapılması gereken bilenme işlemleri nedeniyle zorlu bir süreçtir.

2.8.2 Helisel matkap seçiminin malzemelerin yüzey kalitesine etkisi

Farklı özelliklerde malzemeler içeren hibrit kompozitlerin delik delinmesi işleminde matkap seçimi büyük önem kazanmaktadır. Ancak seçilecek kombinasyonlar yüzey kalitesini ve oluşacak kuvvetleri değiştirecektir. Bu nedenle değişik kombinasyonlarda matkapların özellikleri de değişmelidir. Örneğin, delikte istenilen daireselliğin yakalanması için matkap oluğu sayısının mutlaka artırılması gerekmektedir. İlaveten farklı özellikler gösteren titanyum ve alüminyum alaşımı için farklı açılarda matkap kullanılması gerekmektedir. CFRP/Al diziliminde uç açısı olarak 118° sivri uçlu matkap yeterliyken, CFRP/Ti diziliminde uç açısı olarak 135° 'yle daha az sivri ve nispeten daha dayanıklı matkap ucu tercih edilir. Ayrıca titanyum alaşımından çıkan metalik talaşlar CFRP yüzeyine zarar vermektedir. Bunun bir görseli Şekil 2.8'de yer almaktadır. Bu nedenle kademeli matkap kullanımı CFRP'nin delik içi yüzey kalitesinin korunumu için gerekli olmaktadır. [3]

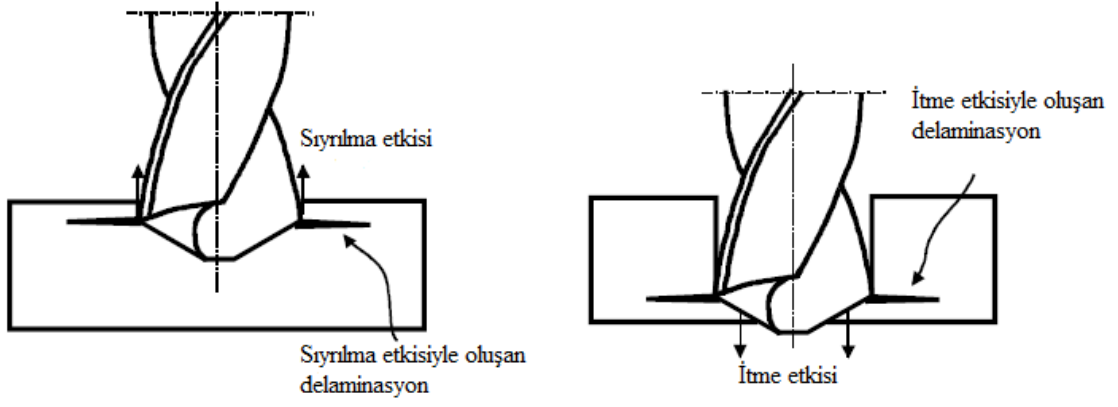


Şekil 2.8 : CFRP'nin delik yüzeyine yapışan titanyum talaşları [3].

2.9 Delaminasyon

Delaminasyon, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinden sonra en yaygın görülen hasar tiplerinden biridir ve elyaf takviyeli kompozitlerin içinde var olan tabakaların katman katman ayrılması sonucu oluşur. Bu oluşumun başlıca sebebi ise bu katmanların birbirine yeterince mukavim olarak bağlı bulunmamasıdır. Delaminasyon miktarı asgari ölçüye indirilmeli ve mümkünse mevcut olmamalıdır çünkü bu hasar tipi kompozit malzemelerin rijitliğinde kayıplar vermesine ve yorulma ömrünün ziyadesiyle kısılmasına neden olmaktadır.

Delaminasyon delik delme işleminde iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki helisel matkabın kompozit malzemenin yüzeyine nüfuz etmesinden sonra malzemedeki talaşı kaldırmak amacıyla gösterdiği sıyrılma etkisidir. Bu etki giriş delaminasyon miktarı ve faktörü hesaplanarak bulunabilir ancak sıyrılma etkisiyle oluşan giriş delaminasyonunu görmek her zaman için mümkün olmaz. İkinci oluşan delaminasyon etkisi ise son katmana yakın noktalarda gözlemlenebilen ve kompozit malzemenin itilmesiyle oluşan delaminasyon çeşididir. Aşağı yönde itme etkisiyle oluşan bu delaminasyonlar genellikle daha kapsamlıdır ve diğerine göre daha tehlikeli olduğu düşünülmektedir. Son kompozit katmanları, delik oluşturulması esnasında matkap katmanı delerek açma eğilimindedir. Ayrıca takım özelliklerinin ve delme parametrelerinin de delaminasyon miktarını etkilediği bilinmektedir. Delaminasyon çeşitlerinin resmedildiği görsel Şekil 2.9'da verilmiştir. Ayrıca bu delaminasyonların fotoğrafları Şekil 2.10'da yer almaktadır. [19]



Şekil 2.9 : Delaminasyon çeşitleri.



Şekil 2.10 : Sıyrılma ve itme etkisiyle oluşan delaminasyonların fotoğrafları [19].

2.10 Delaminasyon Faktörünün Hesaplanması

Malzemelerin rijitliğinin korunması ve yorulma ömrünün düşmemesinin istenmesi nedeniyle delaminasyon miktarı hesaplanmalı ve düzenli olarak takip edilmelidir. Bu nedenle delaminasyon miktarının hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama için çeşitli metodlar mevcuttur. Bu örneklerden bir tanesi ve en sık tercih edilen geleneksel delaminasyon faktörü hesaplanmasıdır. Burdaki, hesaplanma delaminasyon hasarı nedeniyle oluşan en büyük çapın, normalde elde edilmesi gereken çapa oranıyla hesaplanmaktadır. Oldukça temel ve basit bir hesabı olmasına rağmen düzenli bir delaminasyon hasarı görünmesi durumunda halen delaminasyon faktörünün hesaplanmasında en sık tercih edilen yöntemdir. Bu yöntemin dezavantajı ise hasarı uğranan bölgenin alan hesabını içermiyor olmasıdır. Hesaplama Denklem 2.9’da verilmiştir. [20]

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (2.9)$$

Bu denklemde F_d delaminasyon faktörünü, D_{max} azami delik çapını, D_{nom} ise olması gereken delik çapını vermektedir.

Yakın zamanda kullanılan bir diğer yöntem ise ayarlanmış delaminasyon faktörü hesaplanmasıdır. Bu yöntemde denkleme alan hesaplamaları da dahil edilmiştir ancak alanların hesaplanmasının oldukça düzenli ve dikkatli yapılması gerekmektedir. Ayrıca bu yöntem düzensiz bir delaminasyon durumu olması durumunda daha çok tercih edilmektedir. Bilhassa çatlak yüzeylerin gözlemlendiği durumlarda kullanılmalıdır. Bu hesaplamadaki kısıt ise ince çatlakların delaminasyon üzerindeki etkisini hesaba katmamasından kaynaklanmaktadır. İlgili hesaplama yöntemi Denklem 2.10’da verilmiştir. [21]

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d(F_d^2 - F_d)}{A_{max} - A_{nom}} \quad (2.10)$$

F_{da} ayarlanmış delaminasyon faktörünü verir. F_d temel denklemde bulunan delaminasyon faktörünü, A_d delaminasyon alanını, A_{max} deliğin oluşturduğu en büyük alanı, A_{nom} ise deliğin olması gereken alanını ifade eder.

Tezdeki delaminasyon faktörü ise Denklem 2.9’daki denklemle hem giriş hem de çıkış için bulunmuştur.



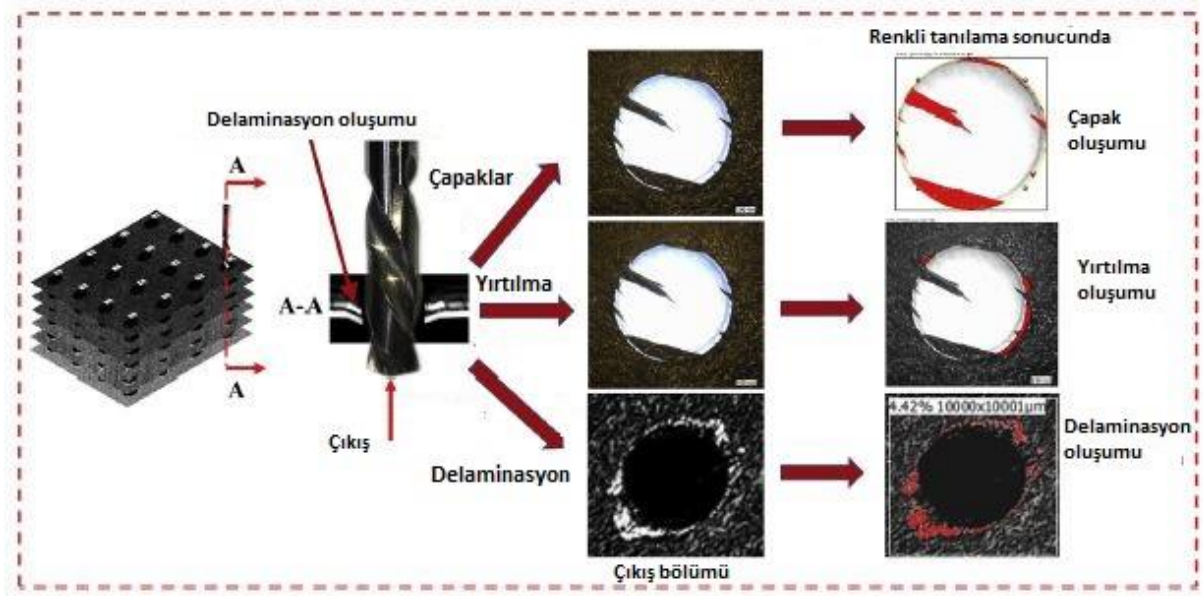
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hibrit yapılı malzemelerin delik delme işleminin delme parametrelerinin bulunması için literatür araştırması yapılmıştır. Yoğun literatür araştırmasından sonra delme hızı ve ilerleme değerleri seçilmesi amaçlanmıştır.

3.1 Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemenin Delik Delme İşleminin Araştırılması

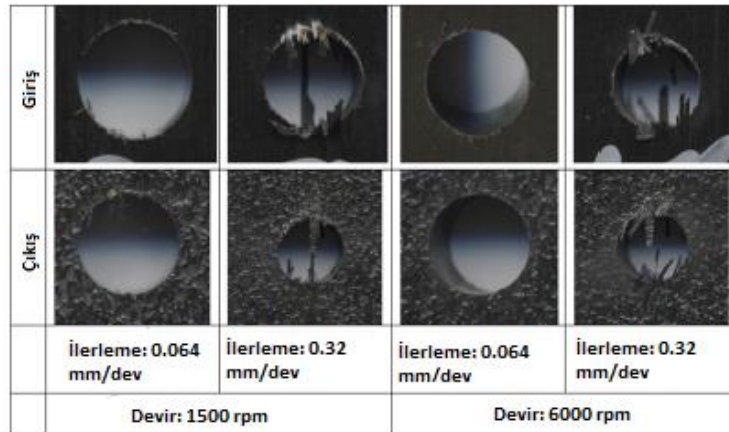
Kullanımı gittikçe yaygınlaşan karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) malzemenin işlenebilmesiyle ilgili çalışmalar önemini korumakta ve günden güne artmaktadır. Aşınma dayanımı yüksek bir malzeme olan CFRP'nin en uygun kesme parametreleriyle işlenmesi gerek takım ömrünün arttırılması gerekse hedeflenen kusursuz nihai ürüne ulaşılması açısından elzemdir. CFRP malzemesi delik delme operasyonlarında oluşan elyafların parçalara ayrılması, elyafların kesilmemesi ve delaminasyon gibi yüzey kusurları oluşmaktadır. Bu nedenle literatürdeki CFRP malzemede uygulanan prosesler üzerine yoğun araştırmalar yürütülmüştür. Bu bölümde CFRP malzemesi üzerine literatürde yer alan delik delme çalışmaları hakkında özet hazırlanmıştır.

Xu ve arkadaşları [12], [(45°/90°/-45°/0°)] diziliminde 9.16 mm kalınlıktaki CFRP malzemesinin delik delme operasyonu 4 farklı devir (1000, 1500, 2000, 2500) ve 4 farklı ilerleme değeriyle (0.01, 0.015, 0.02, 0.025 mm/dev) değerlendirmiştir. Matkap çapı olarak 6.35 mm seçilmiş ve operasyon için üç farklı matkap tipi (helis, düz ve konik, hançer) kullanılmıştır. Helis matkap için tungsten karbür, düz ve konik matkap için CVD elmas, hançer matkap için ise karbür kaplama kullanılmıştır. Matkapların uçların açısı helis için 140°, diğer türler için 118°'dir. Helis açıları ise sırasıyla 35, 38 ve 10° olarak seçilmiştir. Delinen yüzeylerin hepsi taramalı akustik mikroskopla incelenmiş ve ölçümler alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ilerleme değerinin kusurların oluşumunu en fazla etkilediği ortaya çıkmıştır. Şekil 3.1'de malzemede oluşan kusur tipleri verilmiştir. Aynı zamanda en iyi delme performansına düz ve konik matkapların eriştiği gözlemlenmiştir.



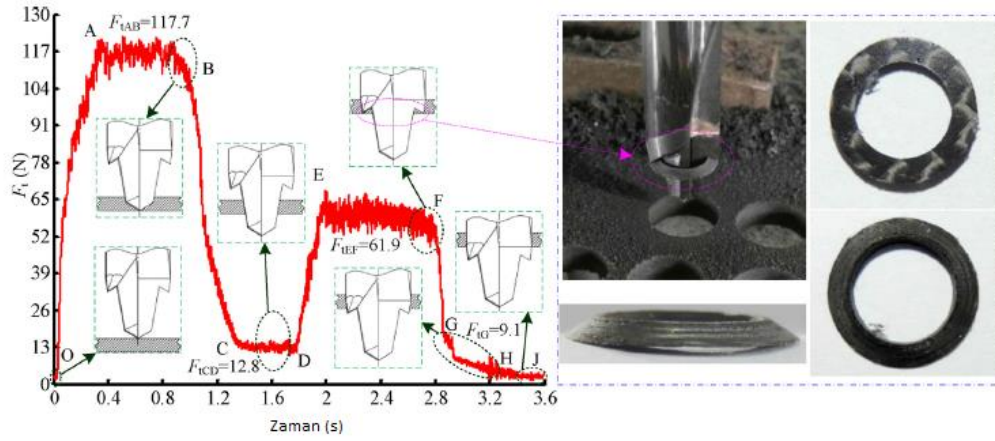
Şekil 3.1 : CFRP malzemesinde oluşan kusurlar [12].

Eneyew ve Ramulu [22], 6.35 mm kalınlıktaki CFRP malzemesindeki delik delme çalışmaları 4 farklı devir (1500, 3000, 4500 ve 6000) ve 4 farklı ilerleme değerinde (0.064, 0.128, 0.192, 0.256 ve 0.320 mm/dak) yapılmıştır. Uç malzemesi çok kristalli elmas (PCD) olan matkabin çapı 6.35 mm olarak belirlenmiştir. Kuru kesme yöntemiyle yapılan çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmış ve delaminasyonun etkisi gözlemlenmiştir. Görseller Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Oluşan kuvvetin ilerleme değerinin artmasıyla arttığını, devirin artmasıyla ise azaldığı tespit edilmiştir. Kuvvet için en etkin parametrenin ise ilerleme değeri olduğu belirlenmiştir. En iyi yüzey kalitesine de benzer şekilde düşük ilerleme ve yüksek devirde ulaşılmıştır.

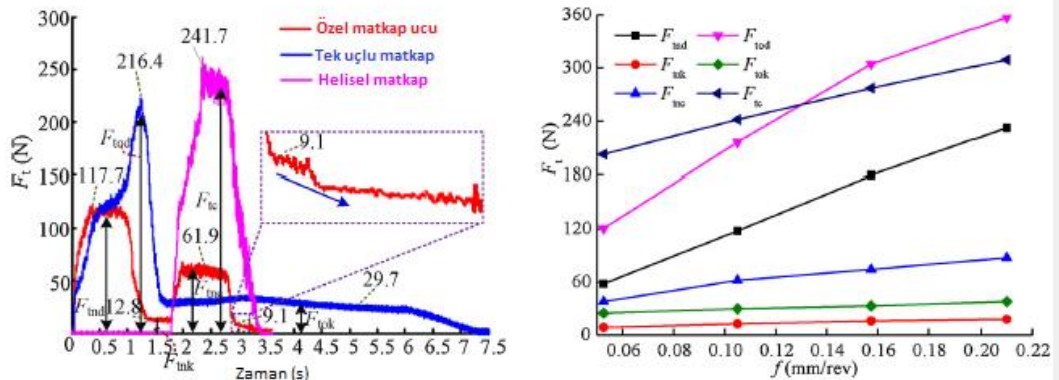


Şekil 3.2 : CFRP malzemede farklı devir ve ilerleme değeriyle oluşan delikler [22].

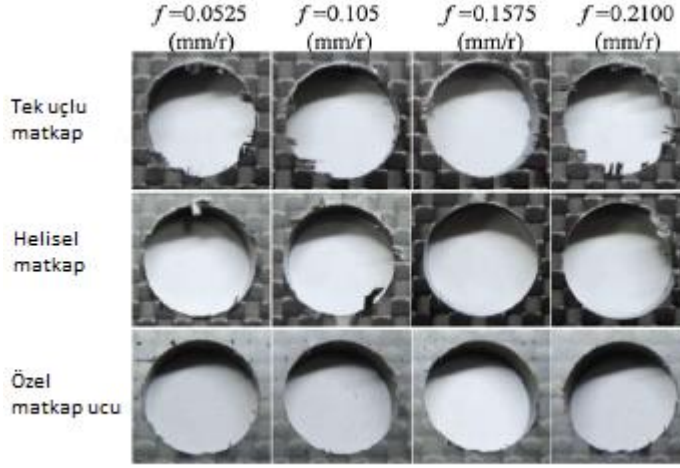
Farklı matkap tipleriyle parçaya uygulanan kuvvet ve oluşturulan hasarlar üzerine çalışan Fei ve arkadaşları [23], 5 mm kalınlıktaki CFRP malzemesinde 2000 devirde 4 farklı ilerleme değerinde (0.0525, 0.105, 0.5175, 0.21 mm/dev) delik delme testleri yapmışlardır. Bu testler sırasında 3 farklı takım (helis, tek uçlu ve bu ikisinin karışımı olan özel imal edilmiş bir matkapla) kullanılmıştır. Özel tasarımı nedeniyle matkap adeta iki adımda delik delme işlemini sonuçlandırmaktadır. Böylece oluşturduğu kuvvet diğer iki matkap tipine göre daha düşük seviyede kalmaktadır. Oluşan düşük kuvvetler, çekme/kayma ve kesme/itme etkileriyle birlikte çapak ve delaminasyon oluşumunu önemli miktarda azaltmış, bunun sonucunda daha doğru delik çapları elde edilmiştir. Ancak ilerlemenin devre oranı arttıkça bu hasar tiplerinin tekrar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Oluşan kuvvetler ve deliklerin görüntüsü sırasıyla Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Özel tasarlanmış matkap ucunun delme stratejisi ve sonucunda parçada oluşturduğu kuvvet [23].

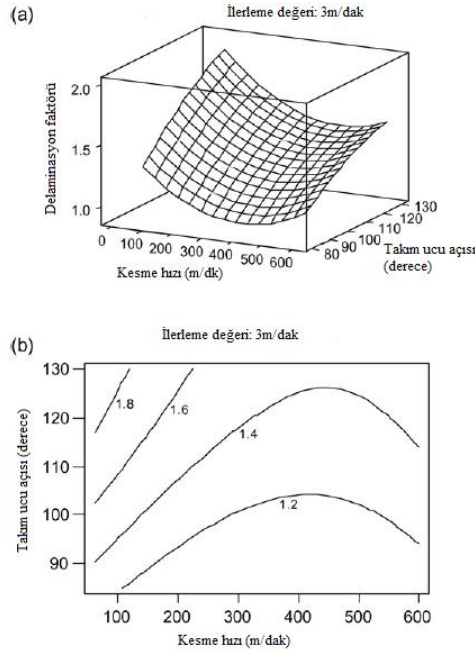


Şekil 3.4 : Matkaplarda yer alan kesme kuvvetlerinin a) zamana b) ilerleme değerine göre değişiminin grafikleri [23]



Şekil 3.5: Parçanın değişik matkap uçları ve ilerleme değerlerindeki görüntüsü [23].

Gaitonde ve ekibi [24], 2.5 mm kalınlıktaki CFRP malzemesindeki delik delme çalışmalarında 3 farklı kesme hızı (60, 120, 600 m/dak), 3 farklı ilerleme (1, 3, 6 m/dak) ve karbür (K20) matkapla üç farklı uç açısıyla (85, 115, 130°) testler gerçekleştirilmiştir. Delaminasyon faktörü sonuçlarının ANOVA yöntemiyle analizi sonucunda kesme hızının artmasıyla delaminasyonun etkisi Şekil 3.6'da verilmiştir. Aynı zamanda ilerleme değeri ve uç açısının azalmasıyla hesaplanan delaminasyon faktörü azalmıştır.

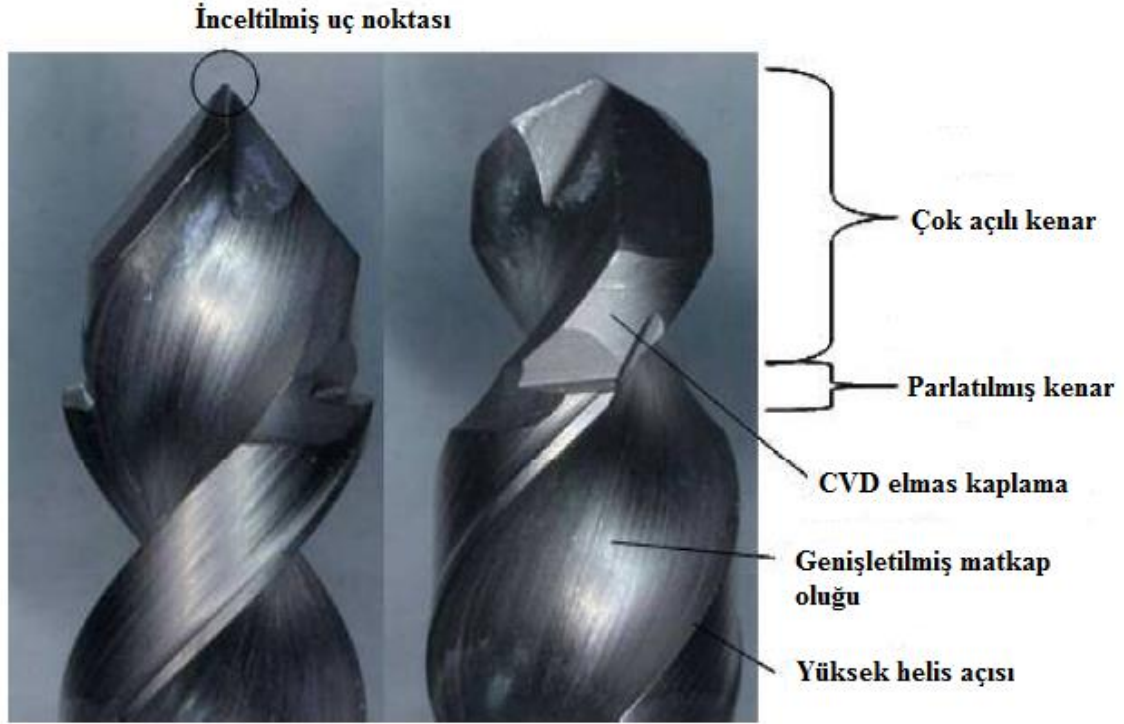


Şekil 3.6 : Uç açısı ve kesme hızının sabit ilerleme değerindeki etkisi a) 3 eksenli b) 2 eksenli [24].

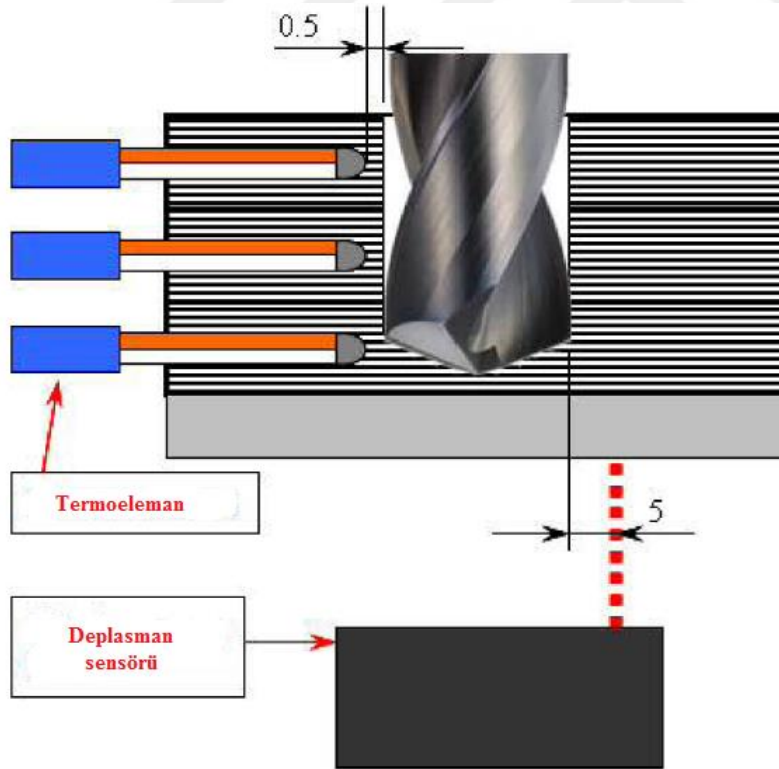
3.2 Hibrit Kompozit Malzemelerin Delik Delme İşleminin Araştırılması

Birçok sektörde önemini her geçen gün arttıran karbon elyaf takviyeli plastik malzemeler, kendilerinden farklı özellikteki malzemelerle de bir arada kullanılabilir. Bilhassa havacılık ve uzay endüstrisinde CFRP malzemesi yalnız başına tercih edilebildiği gibi titanyum ve/veya alüminyum alaşımları ile birlikte de kullanılabilir ve bu birlikte kullanım “hibrit kompozitler” adını almaktadır. Bu metal ile istiflenmiş kompozit malzemeler, metal malzemelerin üstün özelliklerini de kendilerinde barındırmakta ve yoğunlukla talep görmektedir. Bu bölümde şimdiden kullanım sıklığı artan ve gelecekte de daha da yoğun kullanılacağı düşünülen hibrit kompozit malzemeler üzerine gerçekleştirilmiş araştırmalar taranmış ve özeti oluşturulmuştur.

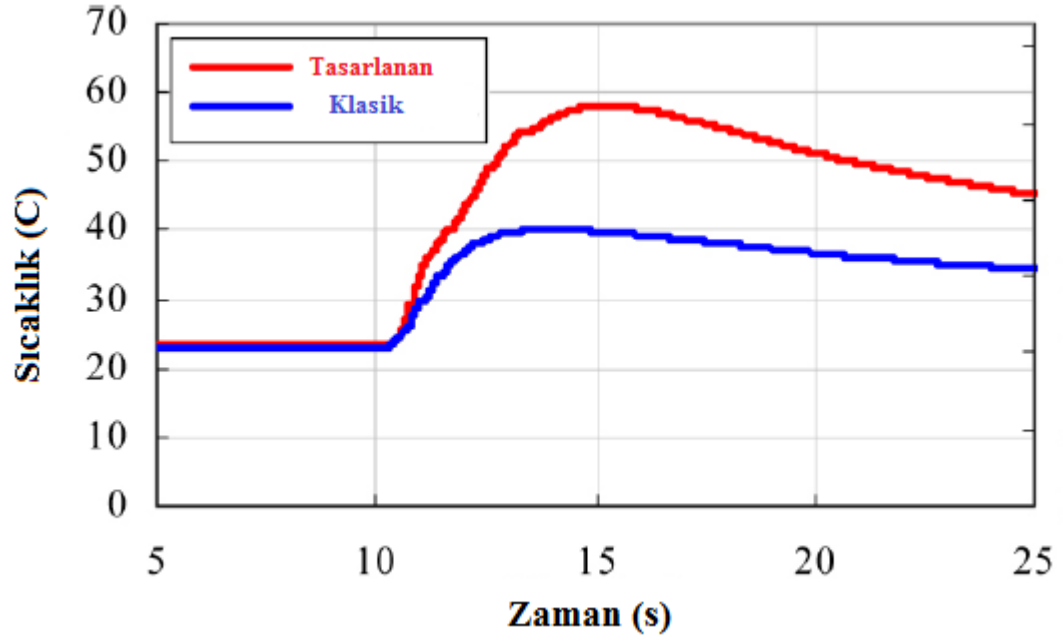
Havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan CFRP/Alüminyum hibrit kompozit malzemesinde verimli delik delme işlemleri uygulanması için matkap tasarlayan Segawa ve arkadaşları [25], 3200 devir ve 0.1 mm/dev ilerleme değerlerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar öncül testlerinde CFRP malzemenin üstte yer aldığı durumda çapak oluşumu, altta yer aldığı durumda ise delaminasyon oluşumunu gözlemlemişlerdir. Delaminasyon oluşumunun kuvvetin artmasıyla görüldüğünün fark edilmesiyle matkaba uygulanan kuvvetin azalması için talaş ve helis açısının yükseltmek veya uç açısını düşürmüşlerdir. Yerleşim sırasında ise CFRP malzemesinin yukarıda yer alması durumunda erozyona uğrayan bir alan olduğu farkedilmiştir. Bu sorunun çözümü içinse kuvvetin azaltılması ve talaşın kolayca tahliye edilmesi için matkap tasarımında uç açısını azaltmış, uç açısıyla işlenmiş olan kenarın arasındaki mesafeyi arttırmışlardır. Tasarlanan matkap ucunun görseli Şekil 3.7’de verilmiştir. Test düzeneği ise Şekil 3.8’de yer almaktadır. İlaveten kenarlara birden çok açılı kenarlar yapılarak matkabın CFRP’nin aşındırıcı özelliklere dayanımının arttırılması sağlanmıştır. Talaş tahliyesinin kolaylaştırılması için matkap olukları genişletilmiştir. Matkapın ucu aşınmaların en az seviyede kalması için kimyasal buharlı kaplama (CVD) elmas malzemesiyle kaplanmıştır. Parçanın maruz kaldığı kuvvetlerin azaltılması için helis açısı arttırılmıştır. Bu tasarlanan matkapla birlikte kuvvet sıcaklık ve sensör yardımıyla yer değişim miktarı belirlenmiştir. Kuvvet ve sıcaklık tasarlanan yeni matkapla önemli miktarda azalmıştır. Sıcaklık ve kuvvet farkları grafikleri ise sırasıyla Şekil 3.9 ve 3.10’da bulunmaktadır.



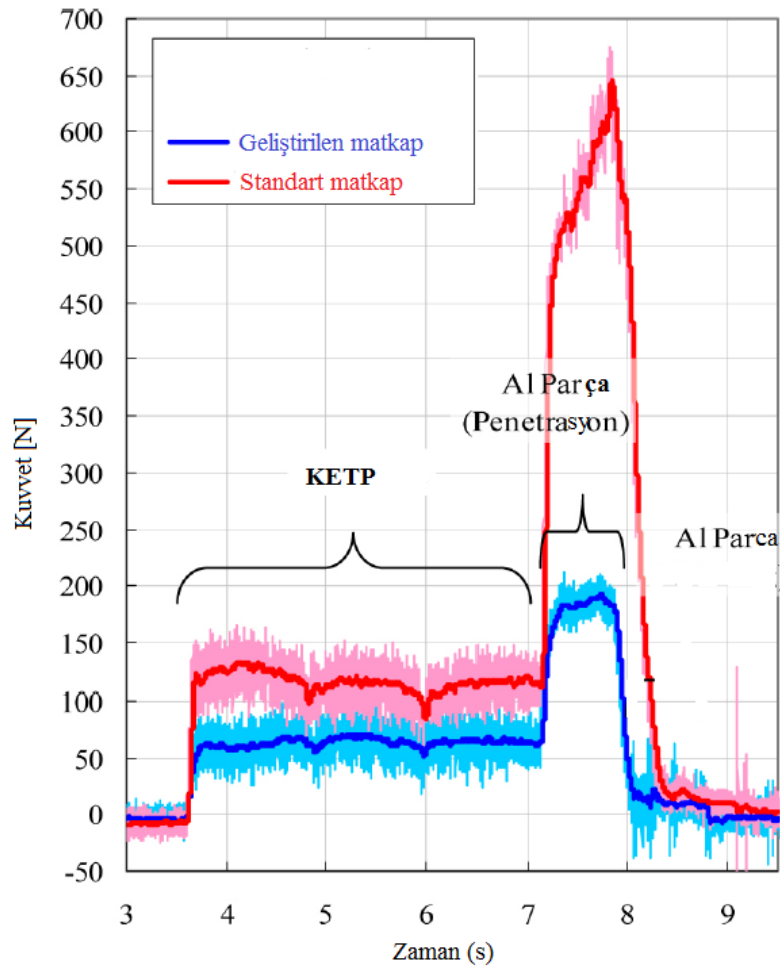
Şekil 3.7 : Tasarlanan matkap ucunun özellikleri [25].



Şekil 3.8 : Test düzeneği [25].



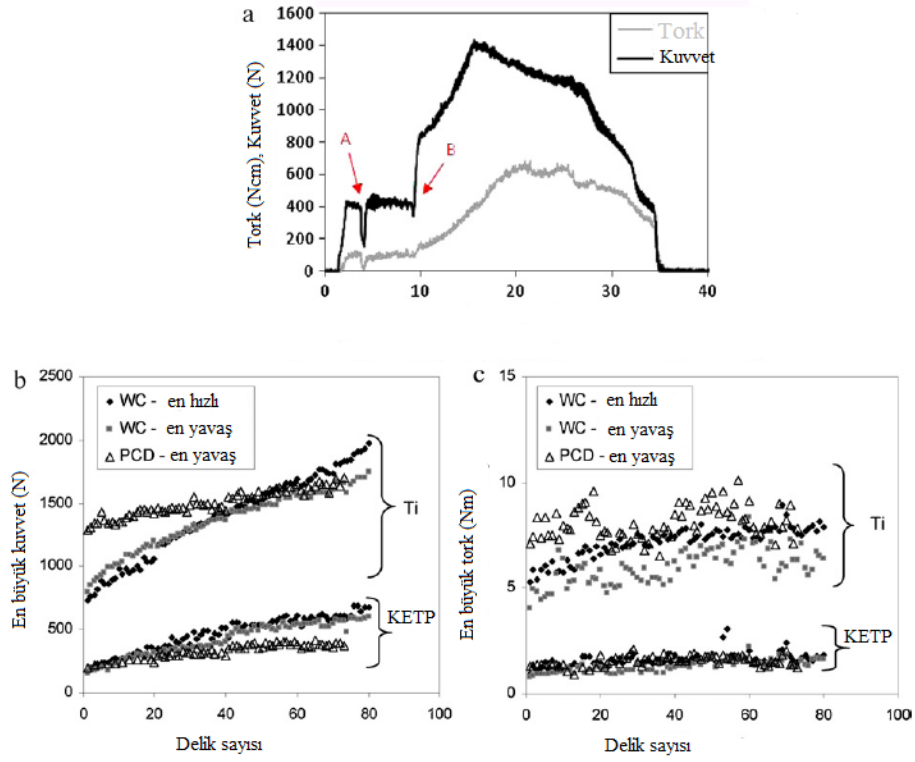
Şekil 3.9 : Sıcaklık farkları [25].



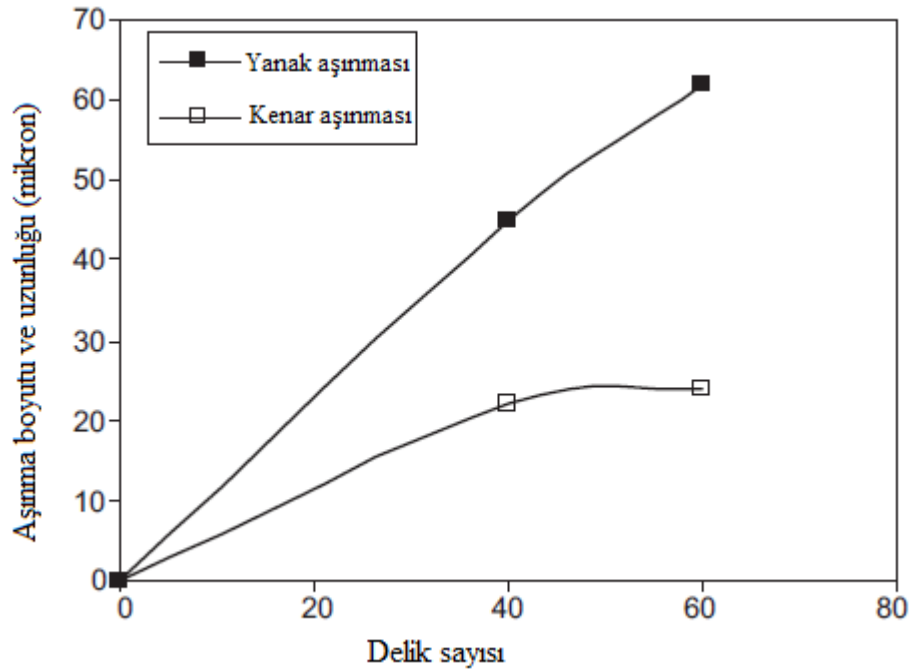
Şekil 3.10 : Malzemelerde oluşan kuvvet farkları [25].

Yüksek korozyon direnci ve hafiflik avantajıyla havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan CFRP/Ti malzemesi Park ve arkadaşları [26] tarafından yapılan bir araştırmada, 2 farklı matkapla (çoklu kristal elmas ve karbür) delik delme işlemine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada 7.54 mm CFRP ve 6.73 mm kalınlıkta Ti6Al4V malzemesi kullanılmıştır. Her iki matkabında çapı 9.525 mm ve uç çapı 135^0 'dir. Yapı birbirine civatalarla bağlanmış ve hava yoluyla soğutma gerçekleştirilerek delik delme işlemi icra edilmiştir. Malzemelerin yerleşimi olarak yukarıda CFRP, aşağıda titanyum alaşımı tercih edilmiştir. Delme işlemi esnasında CFRP malzemesi için 2000 ila 6000, titanyum alaşımı için ise 800, 400 ve 300 devre çıkılmıştır. Bu devirlerin tercih edilmesinin sebebi olarak titanyumun yüksek devirlerde yüksek kuvvet ve torka maruz kalması gösterilmiştir. İlerleme değeri olaraksa CFRP için 0.0762 ve titanyum alaşımı için 0.0508 mm/dev seçilmiştir. Tüm testler boyunca kuvvet ölçümü yapılmıştır.

Açılan delik sayısı arttıkça her iki matkapta da oluşan aşınma artmıştır ancak yanak aşınmasındaki miktar delik sayısı arttıkça ciddi miktarda baskın hale gelmektedir. CFRP ve titanyum alaşımında oluşan hasarların birbirinden farklı özellikte olduğu gözlemlenmiştir. Titanyumda daha çok aşınma ve yüksek devirlerde kıvılcım çıkarma özelliği bulunmaktayken, CFRP malzemesinde çapak oluşumu ve delaminasyon ön plana çıkmaktadır. Karbür matkap takımında artan devirde oluşan kuvvet artmaktadır. Çok kristalli elmas matkap ucunda ise böyle bir etki gözlemlenmemektedir. Parçada yukarıda yer alan CFRP malzemesinin maruz kaldığı kuvvet titanyuma nazaran çok daha düşük kalmaktadır. Testler sonucunda CFRP ve titanyum alaşımından elde edilen delme kuvvetleri, tork değerleri ve malzemede kaçır adet delik delinebildiğiyle ilgili grafikler Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekil 3.12'de ise takımlardaki aşınma boyutu ve uzunluğu ölçülmüş ve delik sayısına göre bir grafik elde edilmiştir. Bu grafikte matkaplardaki yanak aşınması ve kenar aşınması malzemedeki delik sayısına göre kıyaslanmıştır.



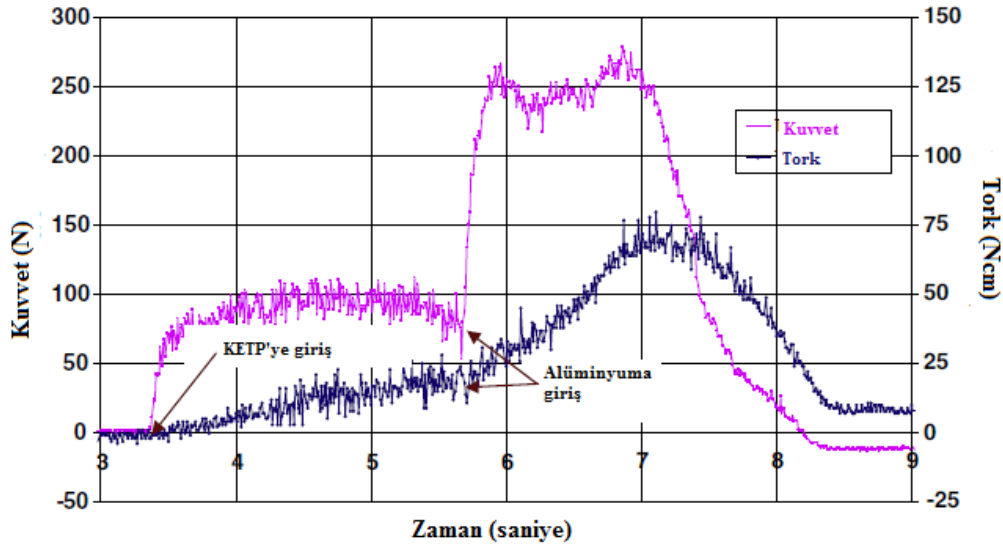
Şekil 3.11 : Testler sonucunda elde edilen a) kesme kuvvetleri b) delik sayısı [26].



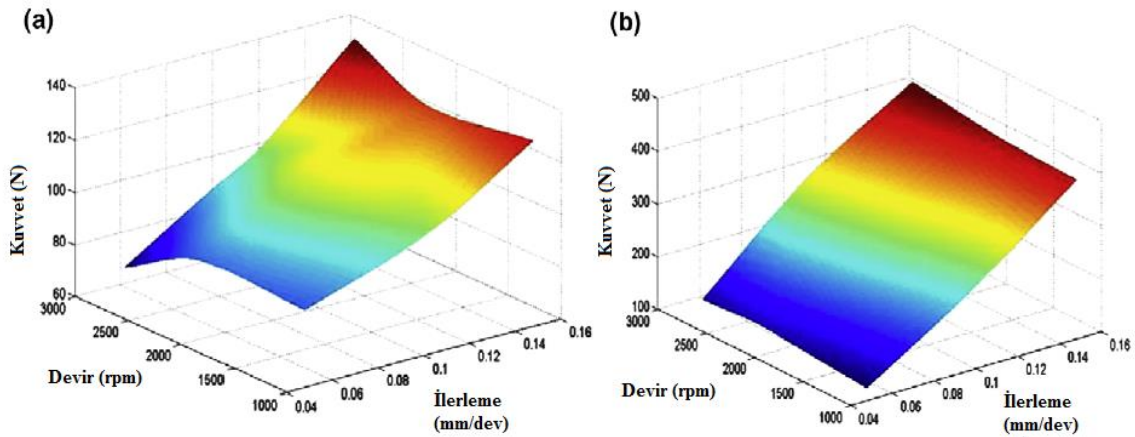
Şekil 3.12 : Delik sayısına göre aşınma miktarlarının kıyaslaması [26].

CFRP/Al hibrit kompozit malzemesiyle delik delme testleri yapan diğer araştırmacılardan Zitoune ve arkadaşları [27], sırasıyla üstte 4.2 mm CFRP ve altında

3 mm Al2024 malzemesinde karbür (K20) matkap kullanmışlardır. Matkabin uç açısı 118° , çapları ise 4, 6 ve 8 mm olarak seçilmiştir. Proses parametreleri olarak 3 farklı devir (1050, 2020, 2750 rpm) ve 3 farklı ilerleme değeri (0.05, 0.1, 0.15 mm/dev) belirlenmiştir. Tüm delik delme işlemi boyunca soğutucu hava kullanılmıştır. CFRP malzemesi ve alüminyum alaşımının oluşturduğu kuvvetlere göz attığımızda alüminyum plakanın delinmesi işleminde gereken kuvvet ve torkun arttığı gözlemlenmektedir. Aynı zamanda devirin artmasıyla ve ilerleme değerinin azalması sonucunda oluşan kuvvet önemli derecede azalmaktadır. İlâveten açılan delik sayısının artmasıyla matkapta oluşan aşınma ve CFRP malzemenin yüzeyinde görülen kusurlar artmaktadır. Kuvvet- tork ve zaman grafiği ve kuvvetin diğer parametrelere göre değişim grafiği sırasıyla Şekil 3.13 ve 3.14'te verilmiştir.



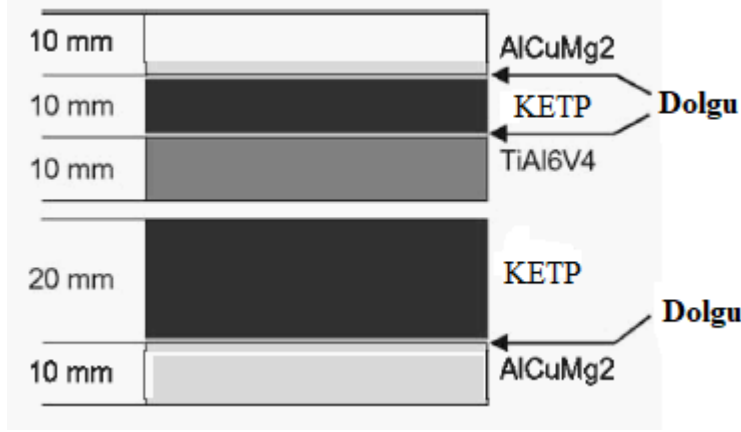
Şekil 3.13 : Kuvvet-tork ve zaman grafiği [27].



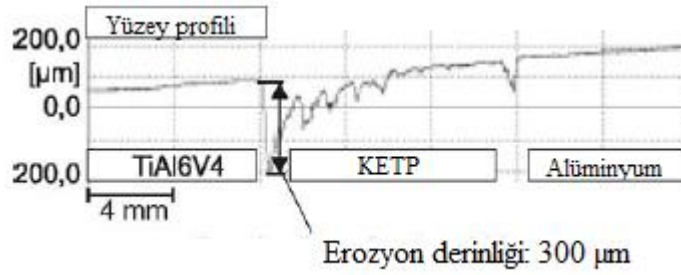
Şekil 3.14 : Devir-ilerleme ve kuvvet grafiği [27].

Yeni metal/kompozit bağlantısının önemini fark edip çalışmalar yapan Kim ve arkadaşları [28], 7.62 mm kalınlığında CFRP ve 6.35 mm kalınlığında Ti6Al4V alaşımının delik delme işlemini 2 farklı matkap ucuyla (karbür ve çok kristalli elmas) analiz etmişlerdir. CFRP malzemesi için 2000 ve 6000 devre çıkılırken, titanyum alaşımı için 300,400 ve 800 rpm devre ulaşılmıştır. İlerleme değerleri ise CFRP için 0.0762 ve titanyum için 0.051 mm/dev olmuştur. Kesme sıvısı olarak sulu hava çözeltisi kullanılmıştır. CFRP malzeme üstte, titanyum alaşımıysa altta yer almıştır. İşlemler sonucunda delik kalitelerinde, CFRP’de oluşan delaminasyon, silindiriklik ve titanyumda oluşan çapak gözlemlenmiştir. Testlerin sonucunda çok kristalli elmas matkap ucu, karbür matkaba nazaran delik çaplarında ve kusurların oluşmaması adına daha uygun sonuçlar sağlamıştır. Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü ve aşınmada da daha uygun sonuçlar vermiştir.

Brinksmeier ve Janssen [29], Al/CFRP/Ti hibrit yapılı kompozitlerinin delik delme işlemi üzerinde çalışmıştır. Soğutma sıvısı olarak MQL (Minimum Quantity Lubrication) kullanılmıştır. İş parçası kalitesinin artırılması için parça sırası 10’ar mm kalınlığında Al/CFRP/Ti olarak belirlenmiştir. Bu konfigürasyona alternatif olarak 20 mm kalınlığındaki CFRP’nin üstte, 10 mm kalınlığındaki alüminyum alaşımının altta yer aldığı bir sıralama da oluşturulmuştur. Parçaların arasına film şeklinde 1 mm kalınlığında dolgu malzemesi yerleştirilmiştir. Öncelikle 6 mm çapında karbür matkapla delikler delinmiş, ardından 16 mm çapındaki matkapla delikler genişletilmiştir. Klasik matkabin yanı sıra, kademeli delik delme işlemi de uygulanmıştır. Kademeli matkaplar kaplamasız, elmas ve TiB₂ kaplama şeklinde üç çeşittir. Matkabin uç açısı 130⁰, helis açısı ise 30⁰’dir. Delme parametreleri olarak 2 farklı kesme hızı (10, 20 m/dak) ve 0.15 mm ilerleme seçilmiştir. Kademeli matkapla delik çaplarının toleransı ve matkap aşınması azalmış, yüzey kalitesi ise artmıştır. TiB₂ ve elmas kaplamayla matkaptaki aşınma miktarı istenilen seviyeye çekilmiştir. Uygulanan ön delik delme işleminin yüzey kalitesine etkisi olumlu olarak gözlemlenmiştir. CFRP malzemesinde oluşan erozyon nedeniyle boyutsal doğruluk değerleri eksi yönde artarken, titanyum ve alüminyum alaşımlarında bu değerler pozitif noktada yer almıştır. Malzemelerin istif sırası ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla Şekil 3.15 ve 3.16’da gösterilmiştir.

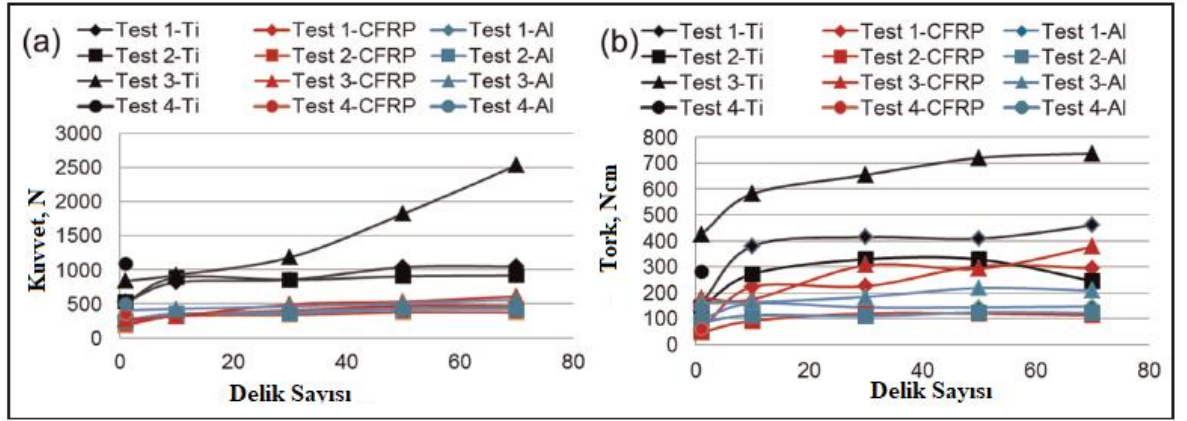


Şekil 3.15 : Malzemelerin istif sırası [29].



Şekil 3.16 : Malzemelerde oluşan yüzey pürüzlülükleri [29].

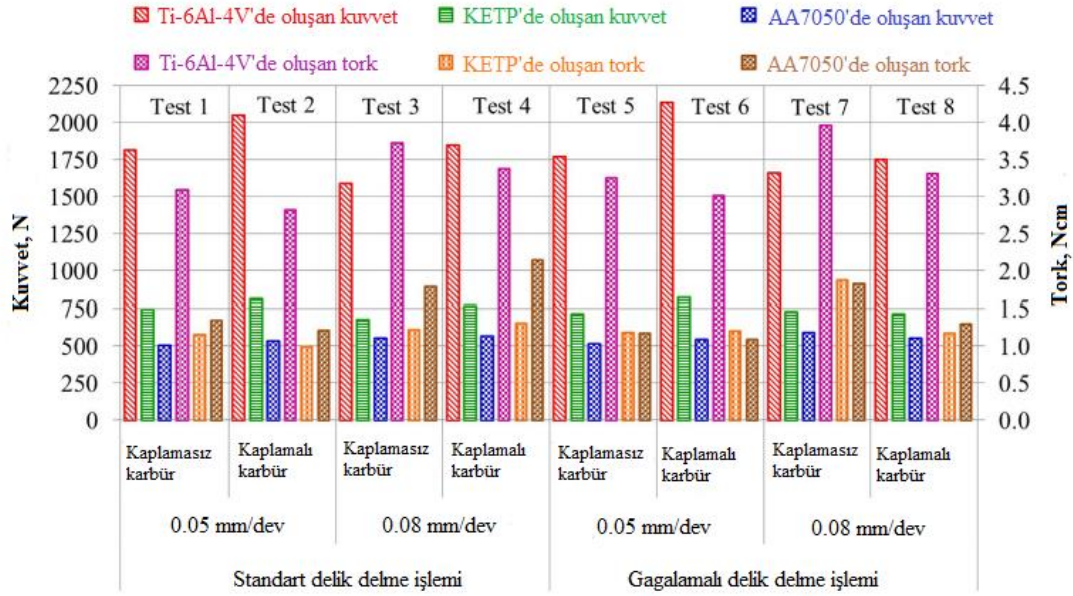
Kuo ve arkadaşları [30], 10'ar mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V/CFRP/Al-7050 hibrit yapılı kompozit malzemenin 2 farklı kesme hızı (10, 20 m/dak) ve 2 farklı ilerleme değeriyle (0.08 ve 0.15 mm/dev) delik delme testleri yapmışlardır. Delik delme işlemleri iki farklı matkapla (elmas benzeri karbon ve CVD kaplama) yapılmıştır. Her proses için 70 adet delik delinmiştir. Matkapların uç açısı 120°'dir. Her delik delme işlemi için kuvvet ölçümü yapılmıştır. Testler sonucunda delik sayısına göre kuvvet ve tork değerlerini gösteren grafik Şekil 3.17'de verilmiştir. Elmas benzeri karbon kaplamadaki kusurlar aşınma, yapışma ve mikro talaş oluşumu nedeniyle oluşmaktadır. CVD kaplamadaki kusurlar ise 70 adet delik delme sonrasında oluşan delaminasyon kaynaklıdır. İlerleme değerinin artmasıyla hem kuvvet hem de tork miktarı büyük miktarda artmıştır. Yüksek ilerleme değerinde elmas benzeri karbon kaplama gevrek kırılmaya maruz kalmıştır.



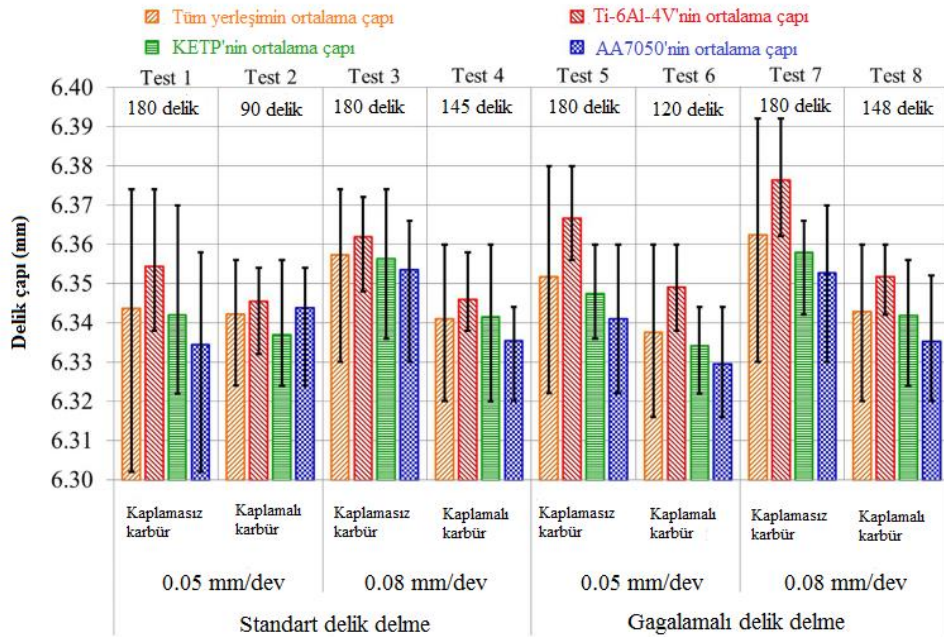
Şekil 3.17 : Testler sonucunda delik sayısına göre oluşan kuvvet ve tork değerleri [30].

Çalışmalarını parçaların ve takımların delik delme işlemi sonrası durumu noktasına da devam ettiren Kuo ve arkadaşları [31], bu sefer TiAlN/TiN kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlar üzerine yoğunlaşmıştır. Tüm matkapların çapı 6,35 mm, helis açısı 30° , uç açısı 140° seçilmiştir. İstiflenmiş malzemelerin kalınlığı 10'ar mm belirlenirken istif sırası titanyum alaşımı, CFRP ve alüminyum alaşımı olarak tercih edilmiştir. Tüm mazlemeler birbirlerine mekanik olarak M6 civatalar ve somunlarla bağlanmış, akabinde kuvvet, tork, delik içindeki yüzey pürüzlülüğü ve deliklerin yuvarlaklığı ölçülmüştür. Tüm testler esnasında kesme sıvısı olarak yüzde 7 ila 8 arasındaki konsantrasyonda çözünebilen mineral yağ takviyesi yapılmış su bazlı bir emülsiyon kullanılmıştır. Delik delme işlemi esnasında 6000 devir sabit olarak tutulmuş iki (0.05, 0.08 mm/dev) farklı ilerleme değeri belirlenmiştir. Operasyon esnasında gagalama (talaş tahliyesi) ve normal olarak delik delme işlemi de düzenlenmiştir. Her bir malzeme için 90 adet delik delme işleminin ardından oluşan tork ve kuvvet değerleri Şekil 3,18'de verilmiştir. Bu 3 farklı parametreyle tam faktöriyel deney tasarımı yapılarak çalışma tamamlanmıştır. Kaplamasız matkabın aşınmaya karşı direncinin kaplamalı matkaba nazaran daha yüksek olduğu tespti edilmiştir. Kaplamasız karbür matkabın 90 adet delik daha fazla delik delme kabiliyetinin yanı sıra 180. delikte bile yanak aşınması 0.3 mm olarak ölçülmüştür. Ancak kaplamalı matkapların deliklerde daha yüksek boyutsal doğruluk sağladığı tespit edilmiştir. Yüksek ilerleme değerinde gerçekleştirilen delik delme işleminde, özellikle titanyum katmanında etkili talaş açısındaki artıştan dolayı oluşan itme kuvvetleri daha düşük seviyede kalmıştır. Bunun yanı sıra yüksek ilerleme değerinde, plastik deformasyondan ziyade daha fazla kayma oluşması nedeniyle delik çıkışında çapak oluşumunun ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca gagalama stratejisinin

kullanılmasıyla, takımın geri çekilmesi sırasında oluşan sürtünme nedeniyle CFRP katmanındaki yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Ancak titanyum katmanında oluşan tırlamayla birlikte deliklerin giriş noktalarına yakın bölgelerde yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Testlerin ardından tüm delik çapları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye ilgili grafik Şekil 3.19'da yer almaktadır.

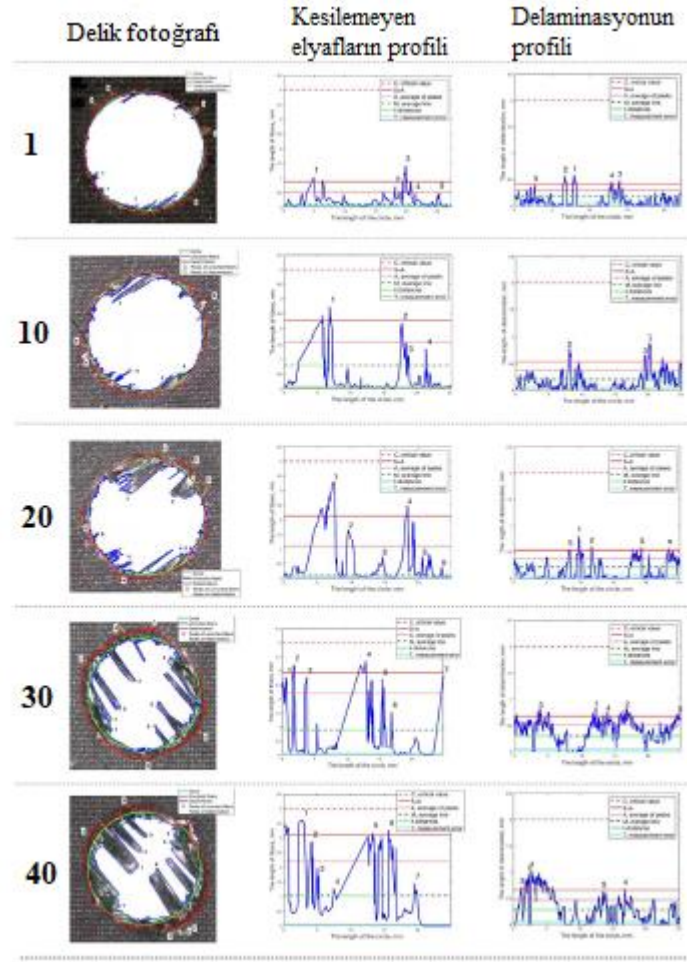


Şekil 3.18 : Her bir malzeme için 90 adet delik delme işleminin ardından oluşan kuvvet ve torklar [31].



Şekil 3.19 : Testlerin ardından oluşan delik çapları [31].

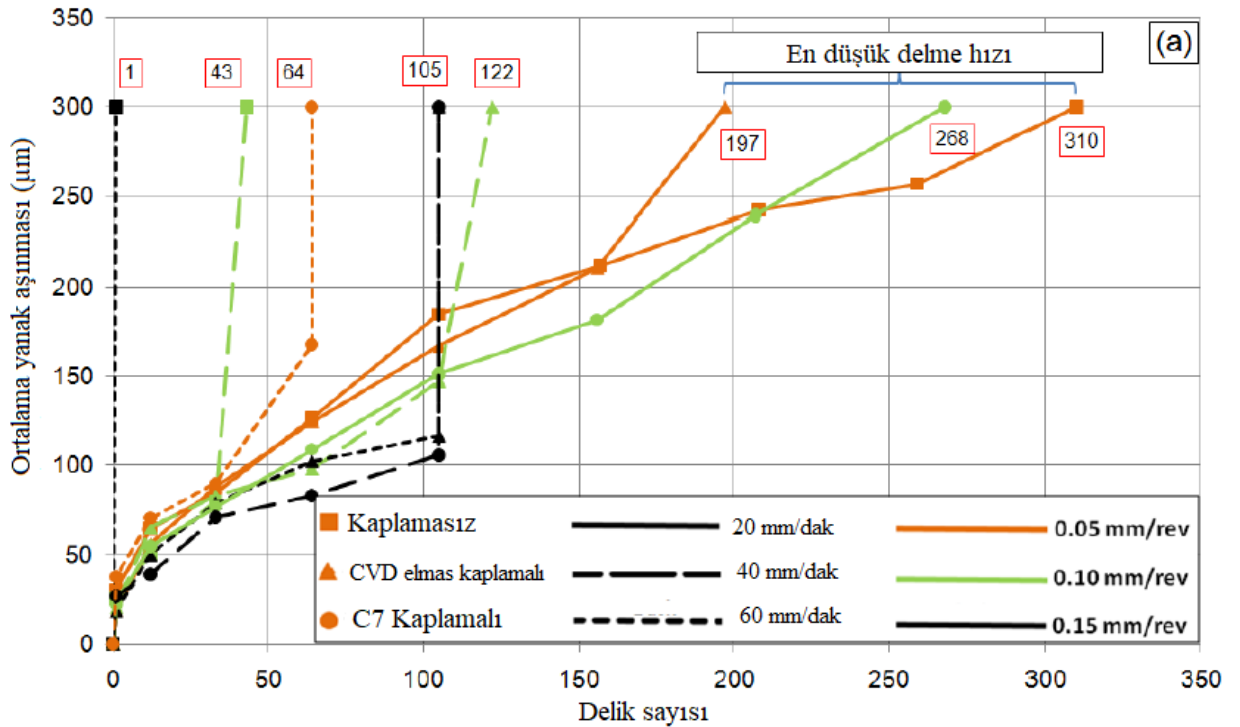
Hrechuk ve arkadaşları [32], CFRP malzemesinin delik delme işleminde deliklerde oluşan kusurları ve boyutsal sapmaları numerik olarak analiz etmişlerdir. Oluşturulan otomatik çevre tanımlaması ve profil biçimlendirmesiyle birlikte kesilemeyen elyaf ve delaminasyon miktarı modüler algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Delik delme işlemi gerçekleştirilen CFRP malzeme 8 mm kalınlığındadır. 8 mm çapında kaplamasız sementit karbür matkabın uç açısı 120°, talaş açısı 26°'dir. Delaminasyonun engellenmesi için delik delme hızı 100 m/dak, ilerleme değeri ise 0.02 mm/dev seçilmiştir. Tüm yüzeyler optik mikroskopla incelenmiştir. Deneyler sonucunda delik sayısının artmasıyla delik kalitesinin düştüğü ve takım aşınmasının arttığı gözlemlenmiştir. Testler sonucunda kesilemeyen elyaf ve delaminasyon profillerinin detayları Şekil 3.20'de verilmiştir.



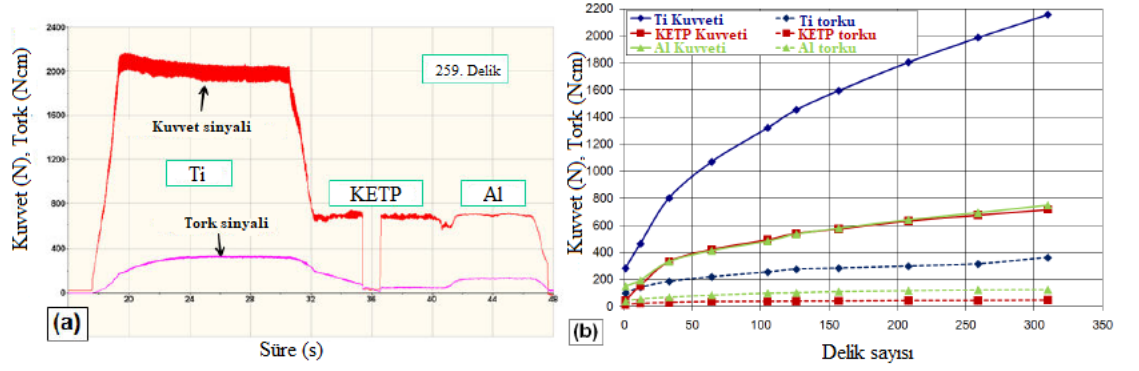
Şekil 3.20 : Delik sayısının artmasıyla kesilemeyen elyaf ve delaminasyon profillerinin değişimi [32].

Hem CFRP, hem alüminyum hem de titanyum alaşımlarını kullanarak delik delme işlemini inceleyen Shyla ve arkadaşları [33], her biri 10'ar mm kalınlığında olan bu 3

malzemenin testlerini ıslak ve havayla gerçekleştirmiştir. Malzemeler birbirine mekanik olarak bağlanmıştır. Taguchi deney tasarımı kullanılarak test adetleri azaltılmış ve 18'e indirilmiştir. Literatür taramalarına göre ise titanyum-CFRP ve allüminyum dizilimi seçilmiştir. 2 farklı ilerleme (0.05, 0.1 mm/dev) ve üç farklı delme hızı (20, 40, 60 mm/dak) ile yapılan testlerde 3 farklı (kaplamasız, CVD elmas ve C7 kaplamalı) da matkap kullanılmıştır. Testler esnasında kuvvet ve tork hesaplanmış akabinde varyans analizi yapılmıştır. En yüksek delik sayısı olan 310 sayısına en düşük delme hızı ve en düşük ilerleme değerlerinde kaplamasız karbür matkapta ulaşılmıştır. En yüksek kuvvet değerleri 600 N'la titanyum alaşımında elde edilirken en düşük kuvvet ise 190 N'la CFRP malzemesinde elde edilmiştir. Islak delmede elde edilen kuvvet miktarları, hava ile olan delme şartlarına göre daha yüksektir. Bunun yanı sıra torkun en çok ilerleme değerine bağlı olduğu varyans analiziyle belirlenmiştir. İlave ten kaplamalı matkapların gerek kuvvet gerek tork gerekse de ömür olarak büyük bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Belirli yanak aşınması uzunluğunda farklı takımlarda, delme hızı ve ilerleme değerinde ulaşılan delik sayısı grafiğine Şekil 3.21'de yer verilmiştir. Kuvvet ve tork grafiği ise Şekil 3.22'de yer almaktadır.



Şekil 3.21 : Belirli yanak aşınması uzunluğunda farklı takımlarda, delme hızı ve ilerleme değerinde ulaşılan delik sayısı [33].



Şekil 3.22 : Ti/CFRP/Al malzemelerinin a) ulaştığı kuvvet ve tork değeri b) kuvvet ve tork değerlerinin delik sayısı ile ilişkisi [33].

Farklı bir malzeme olan GFRP (cam elyaf takviyeli plastik) kompozitteki delik delme operasyonu sonucu oluşan delaminasyonu takip eden Kılıçkap [34], işlemler esnasında Taguchi deney tasarım metodunu uygulayarak 16 adet test yapmıştır. Buna ilaveten delme hızı ve ilerleme değerinin yanı sıra matkap ucu açısının da bu kusur oluşumuna olan etkisini gözlemlemiştir. 4 farklı (5, 10, 15, 20 m/dak) delme hızı , 4 farklı (0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm/dev) ilerleme değeri ve 2 farklı (118 ve 135°) matkap ucu açısı kullanılmıştır. Tüm testler kuru delme olarak yapılmıştır. Matkap çapı 7 mm'dir ve türü yüksek hız çeliğidir. Yapılan testler ve uygulanan varyans analizi sonucunda delik delme parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesinin sonucunda delaminasyon miktarının asgari düzeye indirileceği tespit edilmiştir. Delaminasyona karşı en iyi sonucu ise düşük delme hızı ve ilerleme değeri vermiştir.

Metallerde yorulma maksimum gerilme kuvvetine dik şekilde oluşan tek çatlağın oluşması ve ilerlemesiyle meydana gelir. Bunun aksine, kompozitte, sayısız tabakalararası ve tabaka içindeki çatlakların yanı sıra muhtemel arayüz çatlakları ve elyaf hasarlarını da içeren çok karmaşık ve hâlâ daha araştırılan bir malzeme hasar tipidir. Sonuç olarak, kompozitlerdeki yorulma hasarlarını en bariz şekilde gösteren aksinel kuvvetlere paralel yönde oluşan delaminasyonlardır. Bu nedenle kompozit malzemelerdeki delaminasyon miktarı mutlaka kontrol altında tutulmalıdır.

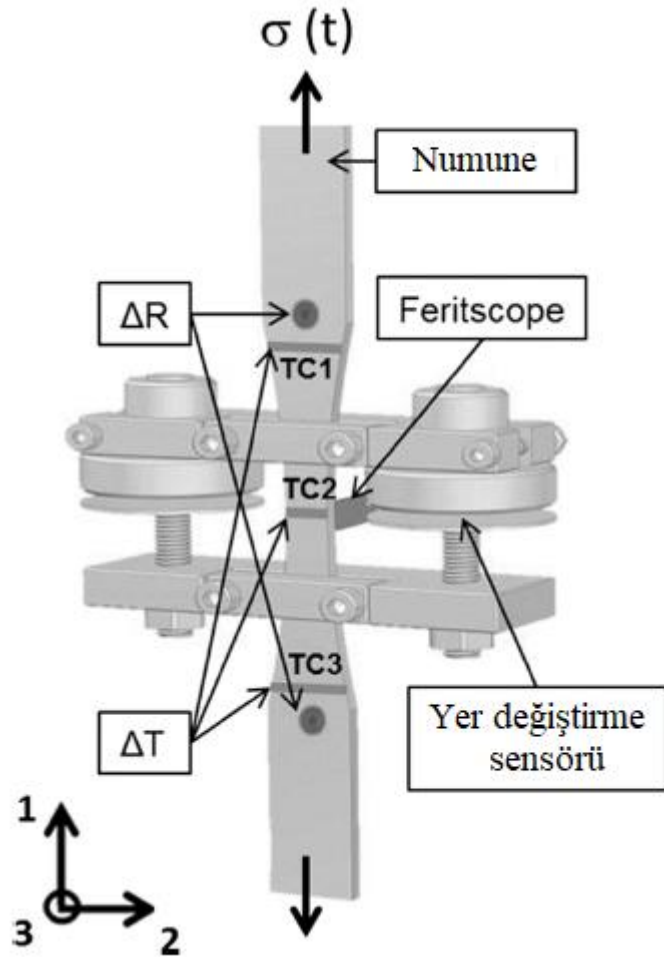
Kashaev ve arkadaşları [35], Ti-6Al-4V/CFRP hibrit malzemesinin alternatif bağlantı tekniklerini ve bu tekniklerin dayanım ve yorulma sınırı gibi mekanik özellikler bakımından incelemiştir. CFRP ve titanyum parçaların geleneksel perçinlenmiş hibrit bağlantıları, titanyum perçinlerdeki düzensiz yük dağılımı nedeniyle yarı statik yükleme altında başarısız olmaktadır. Döngüsel yükleme altında oluşan yorulma kusuru, daha yüksek çentik duyarlılığı nedeniyle genel olarak titanyum parçada

meydana gelmektedir. İlk olarak lazer perçinlemede, Titanyum pinler titanyum parçaya lazerle kaynaklı imalatı yapılmıştır. İkinci olarak geleneksel perçin bağlantısı yapışkanlı bağlamayla desteklenmiştir. Üçüncü olarak, titanyum parçanın yüzeyindeki sürtünmenin artırılması için perçin noktasındaki yüzey yapılandırılmıştır. Alınan sonuçlara göre lazer perçinleme rijitlik açısından üstünlük katsa da dayanım konusunda nerdeyse aynı sonucu vermiştir. Yorulma ömrü ise yapıştırma bağlantısı ve yüzey yapılanmasıyla arttırılmıştır.

Huang ve arkadaşları [36], kızılötesi termografik (IRT) kamerayla ölçülen rijitlik düşüşü ve sıcaklık değişimi birleştirilerek yeni bir yorulma ömrü tahmin yöntemi kullanılmıştır. İyileştirilmiş termografik yöntem, standart olarak seçilen sıcaklık artışı verilerini kullanarak yorgunluk sınırını belirlemek için kullanılır. Üç eksenli örgülü CFRP katmanlarının rijitlik azalma miktarını çevrim sayılarının artmasıyla karakterize etmek için iki parametrelili bir model önerilmiştir. Kalibrasyon parametreleri ve standart hale getirilmiş eşik rijitlik değerinin hesaplanmasından sonra, bütün S - N eğrisi elde edilebilir. Bu çalışmada standart olarak seçilen sıcaklık artışı 6.3 °C seçilmiştir. Elde edilen grafiklerle kesiştirildiğinde yorulma limiti %67.3 UTS olarak tespit edilmiştir. Bu yorulma ömründe malzemenin 10⁶ çevrimde güvenli olarak çalışacağı belirlenmiştir. Kendilerinin ölçüm aldığı UD CFRP malzemesi için ise çekme dayanımı ve Young modülü sırasıyla 1487.8 ± 53.2 MPa ve 122.6 ± 4.8 GPa olarak ölçülmüştür. Grafiksel olarak yorulma sınırı %75.8 UTS olarak görülmüştür. Kızılötesi termografik kamerayla sıcaklık ölçümünde hesaplanan yorulma sınırı ise %73.8 olmuştur. Sıcaklık değişimi bir önceki malzemeye nazaran oldukça düşük seviyede kalmıştır. (0.88 °C). Bu yorulma ömründe de malzemenin güvenli çevrim sayısı 10⁶ olarak belirlenmiştir. Bu uygulama 10-12 saat arasında uygulandığı için hızlı olarak yorulma ömrü tahmin edilebilir.

Backe ve arkadaşları [37], CFRP ve M-CFRP (metal/karbon elyaf takviyeli plastik) malzemelerin yorulma ömrü tahminini daha az sayıda malzeme ve daha kısa bir zamanda gerçekleştirmiştir. CFRP'deki her katman döngüsel yük testine tabi tutulmuştur. Gerilme kontrollü yük artış testleri (LIT) 5 Hz frekansında ve R = 0.1 gerilme oranında sinüzoidal formda yapılmıştır. Hesaplanan S-N eğrilerini doğrulamak için sabit genlik testleri (CAT) de uygulanmıştır. LabView tabanlı bir veri toplama sistemiyle ortalama gerilme seviyesinde toplam birim şekil değişimi genliğinin yarısını hesaplayarak plastik birim şekil değişimi genliğini yakalama imkânı sağlamaktadır. Her bir çevrimde ölçülen gerilme-birim şekil değişimi

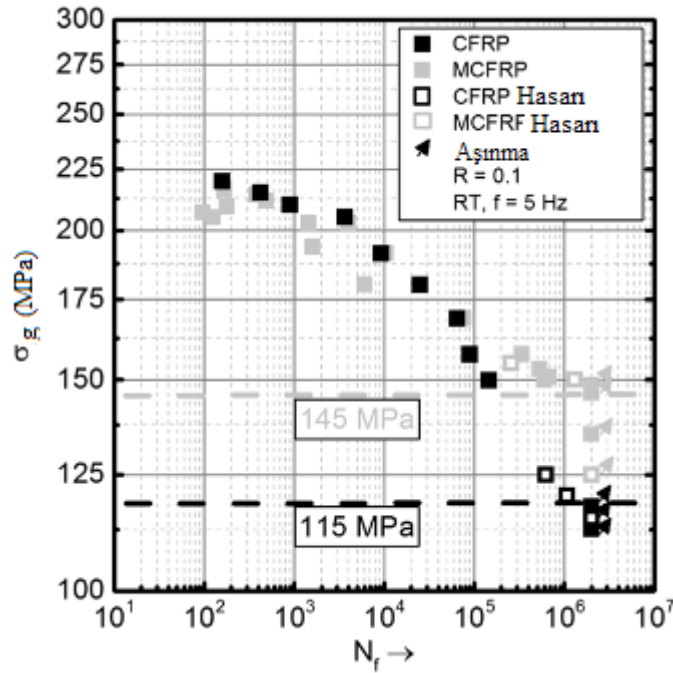
histerezisinin eğimiyle birlikte her bir numunenin başlangıçtaki rijitliğinden oluşan azalma hesaplanmıştır. Sıcaklıklar 3 farklı noktaya termo eleman bağlanarak ölçülmüştür, sıcaklık değişimiyle birlikte hasar ilerlemesi gözlenebilmektedir. 2 numaralı termo eleman en yüksek sıcaklık değerini vermiştir. Aynı zamanda elektrik direnci değişimiyle de yorulma hasarının ilerlemesi izlenmiştir. Metalik cıvatalara 100MPa değerinde sabit elektrik akımı verilmiştir. Bu ölçülen üç değerle birlikte M-CFRP ve CFRP malzemeleri için, çeşitli frekanslarda ve çeşitli sabit genlik durumlarında gerçekleştirilen testlerin deneysel verileri ve hesaplanan S-N eğrileri arasındaki ilişki incelenmiştir. Sabit genlik testleriyle elde edilen yorulma ömür testleri 148,5 MPa için 2×10^6 , 153 MPa için ise 5.3×10^5 çevrim sayısı bulunmaktadır. Gerilme kontrollü yük artış testlerinde elde edilen çevrim sayısı ise 10^4 mertebelerinde olmuştur. Test düzeneği, test sonuçları ve gerilme-yorulma ömrünün grafiği sırasıyla Şekil 3.23, 3.24 ve 3.25'te yer almaktadır.



Şekil 3.23 : Test düzeneği [37].

Malzeme	Yöntem	Frekans	Çevrim sayısı	Testlerin sayısı
CFRP	LIT	0.2 Hz	-	3
CFRP	CAT	0.2 Hz	10^4	10
MCFRP	LIT	0.2 Hz	-	3
MCFRP	CAT	0.2 Hz	10^4	10
CFRP	LIT	5 Hz	-	3
CFRP	CAT	5 Hz	2×10^6	10
MCFRP	LIT	5 Hz	-	3
MCFRP	CAT	5 Hz	2×10^6	10
CFRP	iCAT	5 Hz	2×10^6	3
MCFRP	iCAT	5 Hz	2×10^6	3

Şekil 3.24 : Test sonrasında elde edilen sonuçlar [37].



Şekil 3.25 : Testler sonucunda elde edilen gerilme/yorulma ömrünün grafiği [37].

Yorulma yükü altında delaminasyon büyümesiyle ilgili ilk çalışmalardan birini yapan Pettit ve ekibi [38], kompozit malzemelerdeki cıvata bağlanması için açılan delikte delaminasyon büyümesini anlama konusunda çalışmıştır. Bu çalışmada 9.5 mm çapındaki deliğin, 76 mm deki parçaya olan etkisini incelemiştir. Testlerinde sabit genlikli yorulma yüklerinde 241 MPa maksimum gerilme ve R-oranı olarak -1 değerini seçmiştir. Buna ek olarak yarı izotropik CFRP malzemesi için testlerinde sabit genlikli yorulma yüklerinde 152 MPa maksimum gerilme ve R-oranı olarak -1 değerini kullanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda alan/çevrim grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerden delaminasyonun, üstel bir rejimle büyüdüğü ancak geciktirme etkisi olması durumunda delaminasyon büyümesinin azaldığı ortaya çıkmaktadır.

Mandell ve arkadaşları [39], üç farklı yükte (22.2, 33.4, 44.5 kN) çekme testi gerçekleştirerek CFRP malzemesinin yorulmasıyla ilgili çalışmalarda bulunmuştur. Sabit genlik testleri altında ($R = -1$) yapılan testlerde elde edilen sonuçlara göre en hızlı delaminasyon uzunluğunun en fazla yük altında olduğu ve üstel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerdeki delaminasyon uzunluğu 10 mm olunca çevrim sayıları ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre en fazla yükten en az yüke göre sırasıyla oluşan çevrim sayıları 10^5 , 5×10^5 ve 10^6 olarak belirlenmiştir.

Alüminyum ve CFRP malzemesinin yapıştırılmasıyla edilen yorulma değerlerini elde etmek isteyen Wang ve arkadaşları [40], 240 mm uzunlukta, 30 mm genişlikte, 2 mm kalınlıkta ve merkezinde 5 mm çaplık delik bulunan Al2024 alaşımı ve 140 mm uzunlukta, 30 mm kalınlıkta ve 0.167 mm kalınlıkta CFRP malzemesiyle alüminyum alaşımının tam merkezine kaplanmıştır. Yapılan testler sonucunda S-N eğrileri elde edilmiş ve yorulma ömrü 2 ila 5×10^6 çevrim sayısında belirlenmiştir. Bulunan bu sonuçlar da sonlu elemanlar yöntemi ve matematiksel olarak da doğrulanmıştır. 0.167 mm'lik gibi az kalınlıktaki bir CFRP kaplamasının dahi yorulma dayanımını tek taraflı olarak %25, çift taraflı %42 arttırmaktadır.

3.3 Literatür Araştırması Sonucundaki Değerlendirme

Literatür araştırması sonucunda delme parametreleri seçilmiştir. Testlerde üç farklı delme hızı (62, 94, 125 m/dak) ve üç farklı ilerleme değeri (0.05, 0.07 ve 0.1 mm/dev) seçilmiştir. Literatür araştırmasının sonunda ise hibrit yapılı malzemeleri oluşturan kombinasyonlar ve istif sırasıyla ilgili yeterince çalışma yapılmadığı farkedilmiştir. Bu nedenle yapılacak testlerde bu hususun da üzerinde durulacak şekilde istif sırası da bir faktör olarak eklenilmiştir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Hibrit yapılı malzemelerin delik delme işlemi üzerine literatürde çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, bu malzemelerin delik içi yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon faktörü ve açığa çıkan enerji miktarlarını etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve optimizasyonu üzerine araştırmalar sınırlı kalmaktadır. Literatürdeki bu açığın kapatılması ve malzemelerin en verimli işleme potansiyelinin ortaya çıkarılması adına Taguchi deney tasarımı kullanılmış ve akabinde varyans analizleri yapıldı.

Dörder milimetrelik titanyum ve alüminyum alaşımları ile 8 milimetrelik CFRP malzemesi çeşitli kombinasyonlarla bir araya getirildi. Bu malzemeler birbirlerine mekanik şekilde bağlandı. İstiflenmiş malzemeler ara plakaya, ara plaka ise kuvvet ve tork ölçümlerinin alınacağı dinamometreye mekanik bağlantısı gerçekleştirildi.

Testlerin gerçekleştirileceği matkap havacılık sektöründe de tercih edilen boyutlara yakın şekilde Karcan markalı K5DF010091 ürünüdür ve 10 mm çapındadır. Delinecek malzemeler CFRP’de aşındırıcı ve titanyum alaşımında ise yüksek mukavemet özelliği gösterdiği için keskinliği ve aşınma değerlerinin en az düzeyde tutulması açısından kaplamasız tungsten karbür matkaplar tercih edildi. Deliklerin derinliği tüm istif malzemelerinin kalınlığı kadar 16 milimetre boyundadır.

İstiflenmiş tüm malzemeler 100 mm genişliğinde ve 100 milimetre uzunluğundadır. 3 farklı dizilim, 3 farklı delme hızı (62, 94, 125 m/dak) ve 3 farklı ilerleme (0.05, 0.07 ve 0.1 mm/dev) değeriyle testler iki tekrarlı olarak gerçekleştirildi. Testler, sonuçların harcanan enerji değerlerinin alınması ve enerji verimliliğinin sağlanması açısından kuru şekilde uygulandı. Elde edilen sonuçlarla birlikte en uygun kesme parametreleri ve ulaşılan en yüksek kuvvet ve tork değerleri tespit edildi. Buna ek olarak hibrit kompozitlerdeki dizilim sırasının ve kesme parametrelerinin değişiminin yüzey pürüzlülük değerlerini, yüzey kusurlarını ve oluşan enerji miktarını ne şekilde değiştirdiği gözlemlendi ve analiz edildi. En etkili değişkenler ve sonuçları alındı.

4.1 Kullanılan Cihazlar:

Takip eden başlık altında testler esnasında kullanılmış olan cihazlar, ekipmanlar makinalar ve ölçüm aletleri tanıtılacak ve özellikleri üzerinde durulacaktır.

4.1.1 Takım tezgâhı

Testlerin uygulandığı takım tezgâhı Spinner markalı VC650 dik işleme merkezidir. 8000 devre ulaşılabilen bu takım tezgâhı üç eksenlidir ve çalışma alanının ölçüsü 800x450 milimetredir. Tezgahın görseli Şekil 4.1’de yer almaktadır.



Şekil 4.1 : Spinner markalı VC650 dik işleme merkezi.

4.1.2 Dinamometre ve kontrol ünitesi

Delik delme işleminde Z eksenindeki tork değerlerinin belirleyici olması nedeniyle kuvvet ve tork ölçümlerinin doğru şekilde ölçülmesi için 4 eksenli bir dinamometre kullanılması şarttır. Bu nedenle testler sırasında Kistler markalı 9272 dâhili yükselticili dinamometre, 16xx yüksek dirençli bağlantı kablosu, daha doğru sonuçlara ulaşılması için 5070 yük yükselteci, National Instrument 6024E DAQ PCMCİ veri toplama kartı ve PCMCİ kart girişi mevcut olan bir dizüstü bilgisayar kullanıldı. Kuvvet ve tork değerlerinin anlık olarak çekilmesi ve gözlemlenmesi CutPro yazılımıyla gerçekleştirildi.

Dinamometre ve ekipmanları sırasıyla Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4’te gösterildi. Ardından bu değerlerin MS Excel’e geçirilmesiyle birlikte kuvvet ve tork grafikleri başarıyla elde edildi. Bu değerlerin tespitiyle operasyonun yapılabilmesi için gereken enerji miktarı da hesaplandı.



Şekil 4.2 : Kistler markalı 9272 dahili yükselticili dinamometre ve 16xx yüksek dirençli bağlantı kablosu.



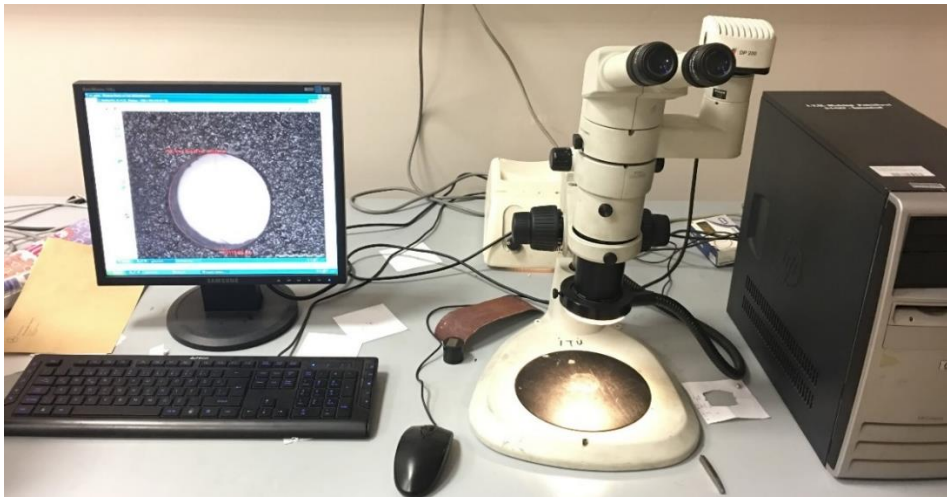
Şekil 4.3 : 6024E DAQ PCMCIA veri toplama kartı.



Şekil 4.4 : 5070 yük yükseltici.

4.1.3 Optik mikroskop

Delik delme işlemlerinin ardından CFRP malzemesinin yanı sıra alüminyum ve titanyum alaşımlarının yüzeyleri, matkaplarda oluşan takım aşınmaları Nikon SMZ800 stereo optik mikroskobu vasıtasıyla incelendi. Mikroskoptan alınan görüntüler bilgisayara geçirildi ve Deltapix View Pro yazılımı kullanılarak her bir malzemenin delik çapları ve takım aşınmalarının uzunluğu ölçüldü. CFRP malzemesinde özel olarak oluşan delaminasyon miktarının tespit edilebilmesi için delaminasyon faktörü hesaplandı. Nikon SMZ800 stereo optik mikroskobu Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : Nikon SMZ800 stereo optik mikroskop.

4.1.4 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

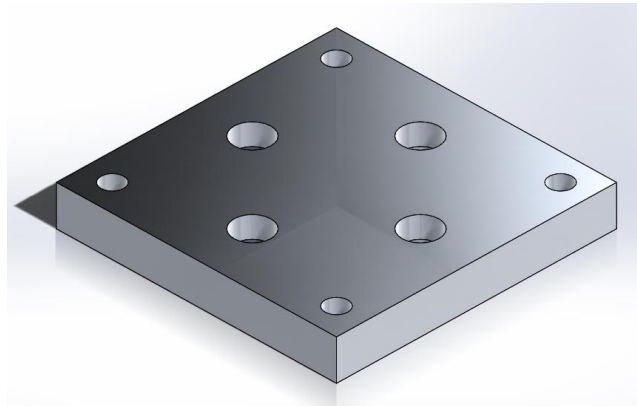
Birbirinden farklı özellikteki malzemelerin bir araya gelmesiyle gerçekleştirilen delik delme işlemi CFRP malzemesinde oluşturulan deliklerin yüzey pürüzlülük sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi şarttır. Bu ölçüm Mitutoyo SJ-201P taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı vasıtasıyla gerçekleştirildi. Cihazın fotoğrafı Şekil 4.6’da yer almaktadır.



Şekil 4.6 : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

4.2 Ara Plaka ve İş Parçası

Malzemelerde tam delik delme işlemi gerçekleştirileceği için dinamometrenin korunması için ara plaka üretilmesi şarttır. Plaka Al6061 malzeme olup 10 milimetre kalınlığında ve 100x100 milimetre boyutundadır. Dinamometre ve iş parçası olan hibrit kompozit yapıda gereken delikler açılmıştır. Ara plaka dinamometrenin üzerine mekanik olarak bağlandıktan sonra köşelerde daha önceden hazırlanmış olan deliklerden diğer istiflenecek hibrit malzemelere bağlanacaktır. Plakanın izometrik resmi Şekil 4.7’de yer almaktadır.



Şekil 4.7 : Alüminyum ara plakanın izometrik resmi.

İş parçası olarak kullanılacak CFRP, Al6061 ve Ti-6Al-4V alaşımları ise üç farklı sırayla bağlanacak ve bu şekilde delik delme işlemleri gerçekleştirilecektir. İlk istif sırası yukarıdan aşağıya sırasıyla alüminyum alaşımı (Al6061), titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) ve CFRP malzemesidir. İkinci istif sırası ise yukarıdan aşağıya sırasıyla CFRP, titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) ve alüminyum alaşımıdır (Al6061). Test edilen son istif sırası ise yukarıdan aşağıya sırasıyla titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V), CFRP ve alüminyum alaşımıdır (Al6061). Malzemelerin her biri 100x100 milimetre boyutundadır. Kalınlıkları ise alüminyum ve titanyum alaşımı için 4'er, CFRP malzemesi için ise 8 milimetredir. İstif sıralarının görselleri sırasıyla Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : İlk istif sırası (Al/Ti/CFRP).



Şekil 4.9 : İkinci istif sırası (CFRP/Al/Ti).



Şekil 4.10 : Üçüncü istif sırası (Ti/CFRP/Al).

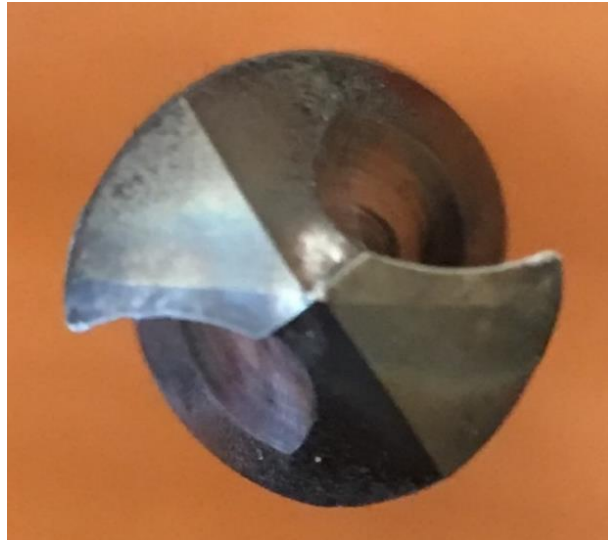
4.3 Kesici Takımlar ve Aşınma Miktarları

Literatür araştırmasından sonra testlerde kullanılması için titanyum alaşımlı malzemenin delinmesinde matkapta daha az aşınmaya neden olduğu için 135^0 'lik uç açısına sahip Karcan markalı K5DF010091 kodlu kaplamasız tungsten karbür matkap seçilmesi uygun bulundu.

Testler ikişer tekrarlı yapılacağı için toplam 18 delik için 2 matkap kullanıldı. Talaş tahliyesi, daha iyi bir yüzey için çok önemli olduğu için takımın iki ağızlı helisel matkap olarak seçilmesine özen gösterildi. Testler esnasında kullanılan matkap Şekil 4.11'de gösterildi.

Malzemelerin tek tek kuvvetleri ölçülürken tüm malzemeler için yeni matkaplar kullanıldı. Hibrit yapılı malzemeler delinirken bir matkapla 9 delik delinmesinin ardından diğer matkaba geçildi. 9 delik delinmesinden sonra matkabin durumu Şekil 4.12'deki gibidir. Kalan testler yeni matkapla yapıldı.

İkinci matkaptaki yan yüzey aşınması ilk matkaba göre yüzde 62 daha fazladır. İlk matkaptaki ortalama yan yüzey aşınması yaklaşık $110\text{ }\mu\text{m}$ iken, ikinci matkapta ise $300\text{ }\mu\text{m}$ 'ye kadar yükselmektedir. Radyal ağız aşınması miktarında ise fark yüzde 32 civarındadır. Bu sonuçlardan ilk istif sırasının diğer istif sıralarına göre daha düşük matkap aşınması sağladığı görülmektedir. Üçüncü istif sırası ise matkap aşınması miktarını oldukça arttırmaktadır.

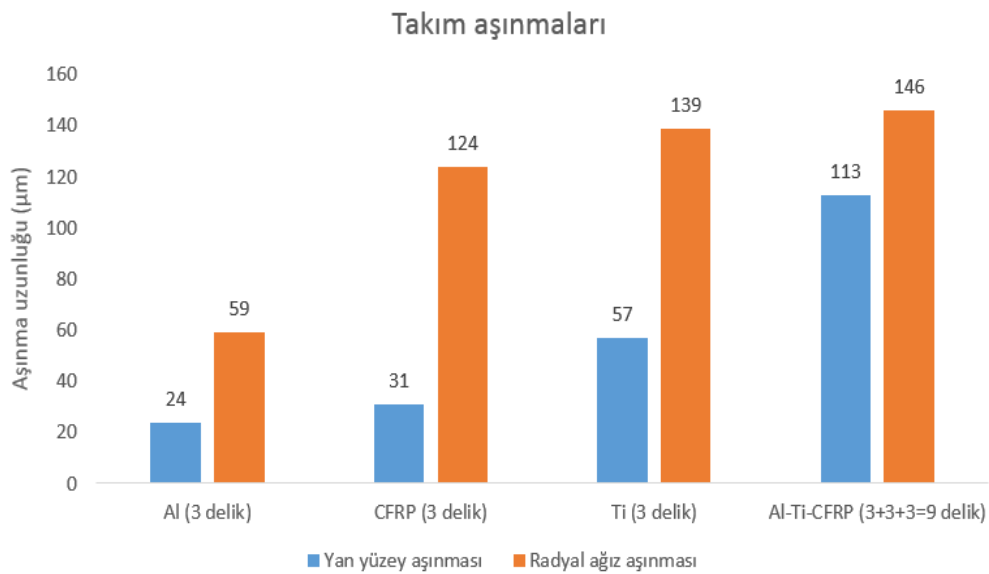


Şekil 4.11 : Testler öncesinde matkabin durumu.

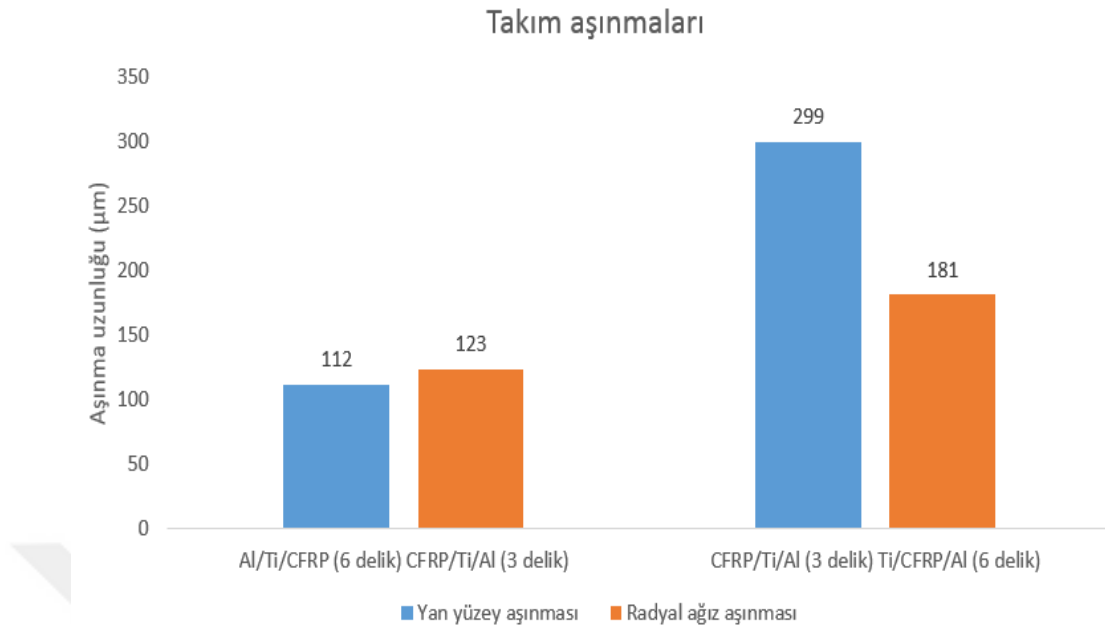


Şekil 4.12 : 9 delik delindikten sonra matkabın durumu.

Ardından malzemelerin tek tek nasıl bir takım aşınması yarattığı üçer delik delinerek gözlemlendi. Alüminyum alaşımının takım aşınması CFRP ve titanyum alaşımına göre ihmal edilecek kadar düşük miktarda kaldı. CFRP’de oluşan yan yüzey aşınması ve radyal ağız aşınması titanyum alaşımına göre sırasıyla yüzde yüzde 11 ve yüzde 41 azdır. Önce alüminyum sonra titanyum ardından CFRP malzemesinden sırasıyla üçer delik açılarak toplam 9 delik delindiğinde ise yan yüzey aşınması yalnızca titanyum alaşımının delinmesine göre yüzde 50 artmaktadır. Radyal ağız aşınmasının artışı ise yalnızca yüzde 4’le sınırlı kalmıştır. Malzemelerin ayrı ayrı delinmesinde matkaplarda oluşan takım aşınmaları Şekil 4.13’te sunulmuştur. Farklı malzemeler ve delik sayılarındaki aşınma miktarları Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.13 : Malzemelerin ayrı delinmesinde matkaplarda oluşan takım aşınması uzunlukları.



Şekil 4.14 : İstif sıralarına göre matkaplarda oluşan takım aşınması uzunlukları.

4.4 Delik Delme Parametreleri

Literatür taramasının ardından bir düşük (62 m/dak), bir orta (94 mm/dak) ve bir yüksek (125 m/dak) delme hızı belirlendi. Benzer şekilde bir düşük (0.05 mm/dev), bir orta (0.07 mm/dev) ve bir yüksek (0.1 mm/dev) ilerleme değeri seçildi. Bu parametreler Taguchi deney tasarımıyla uygun şekilde dağıtıldı ve testler bu şekilde gerçekleştirildi. Deney tasarımının detayları Çizelge 4.1’de bulunmaktadır.

Çizelge 4.1: Taguchi deney tasarımıyla oluşturulan parametreler.

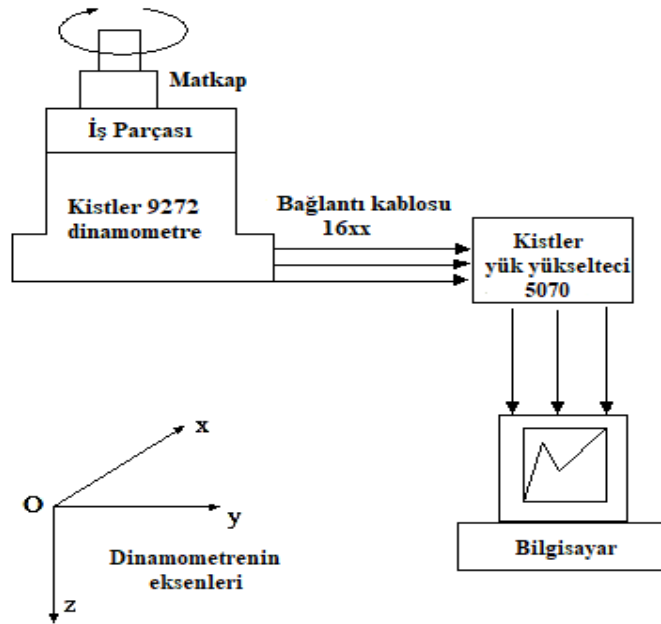
Deney Numarası	İstif sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme değeri (mm/dev)
1	1 (Al/Ti/CFRP)	62	0.05
2	1 (Al/Ti/CFRP)	94	0.07
3	1 (Al/Ti/CFRP)	125	0.1
4	2 (CFRP/Al/Ti)	62	0.07
5	2 (CFRP/Al/Ti)	94	0.1
6	2 (CFRP/Al/Ti)	125	0.05
7	3 (Ti/CFRP/Al)	62	0.1
8	3 (Ti/CFRP/Al)	94	0.05
9	3 (Ti/CFRP/Al)	125	0.07

4.5 Deney Düzeneği

Delik delme esnasında dinamometrenin üzerine bağlanan iş parçasından kuvvet ve tork sonuçları bağlantı kablosuyla yük yükselteciye, oradan da veri toplama kartı vasıtasıyla sonuçlar bilgisayara aktarıldı. Bu delik delme esnasındaki kurulum ve deney teçhizatı Şekil 4.15'te verildi. Kuvvet ve tork ölçümünün gerçekleştirildiği düzeneğe ve mantığı Şekil 4.16'da verildi.



Şekil 4.15: Testin gerçekleştirildiği andaki kurulum.



Şekil 4.16: Kuvvet ve tork ölçüm düzeneği.

5. SONUÇLAR

Çalışmada yapılan delik delme testleri üç faktörlü ve üç seviyeli L9 Taguchi ortogonal deney tasarımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu deney tasarımı sayesinde hem testler için gereken uzun süre hem de malzemelerin getirdiği yoğun maliyet azaltılmıştır. Sonuç olarak en uygun istif sırası ve kesme parametreleri belirlenmiştir. Bunları belirlerken CFRP'nin delik içi yüzey pürüzlülüğü, yüzeyin incelenip giriş ve çıkış delaminasyon faktörlerinin hesaplanması ve harcanılan enerjinin hesabı incelenmiştir. Testler esnasında 3 farklı istif sırası, 3 farklı delme hızı (62, 94 ve 125 m/dak) ve 3 farklı ilerleme değeri (0.05 mm/dev, 0.07 mm/dev ve 0.1 mm/dev) uygulanmıştır. Testlerin ardından izlenilmek istenen her bir faktör tek yönlü varyans analizine tâbi tutulmuş ve sonuçları alınmıştır.

5.1 Kuvvet ve Tork Sonuçları

Yapılan ikişer tekrarlı 9 delik delme çalışmasında farklı istif sırasındaki malzemeler için, farklı delme hızı ve farklı ilerleme değerinde kuvvet değerleri alınmıştır. Değerlendirmeler titanyum ve alüminyum alaşımlı malzemelerin kalınlıklarının düşük ve ilerleme değerlerinin ise yüksek olması nedeniyle istif düzendeki malzeme bölümünde elde edilen ve grafiğe yansıyan en yüksek kuvvet, delik delme işlemi için gereken kuvvet olarak seçilmiştir. Tork ise CFRP için ortalama, malzeme kalınlığı düşük olan titanyum ve alüminyum alaşımı için ise en yüksek tork değeri olarak belirlenmiştir. Alınan kuvvet değerleri her bir delme hızı ve ilerleme değerinde her malzeme için ayrı ayrı kaydedilmiştir. Yapılan ikişer tekrarda elde edilen kuvvet ve tork değerlerinin ortalaması alınmıştır. Aynı zamanda malzemelerin tek hallerindeki kuvvet ve tork değerleri de kaydedilip kıyaslanmıştır.

Farklı istif sırası, delme hızı ve ilerleme değerlerinde elde edilen kuvvet ve tork değerleri çizelge 5.1 ve 5.2'de verilmiştir. Malzemelerin tek tek delinerek elde edilen kuvvet ve tork değerleri çizelge 5.3 ve 5.4'te verilmiştir. Testlerin gerçekleştirildiği istif sıraları sırasıyla Şekil 5.1, 5.3 ve 5.5'te gösterilmiştir. Testler ise istif sırasına göre üçe bölünmüş grafikler ise sırasıyla Grafik 5.2, 5.4 ve 5.6 olarak düzenlenmiştir.

Çizelge 5.1 : Testler sonucunda malzemelerde oluşan kuvvet değerleri.

			Kuvvet (N)		
İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	CFRP	Ti6Al-4V	Al6061
1 (Al/Ti/CFRP)	62	0.05	112.5	380	200
1 (Al/Ti/CFRP)	94	0.07	137.5	412.5	235
1 (Al/Ti/CFRP)	125	0.1	150	475	325
2 (CFRP/Al/Ti)	62	0.07	75	262.5	175
2 (CFRP/Al/Ti)	94	0.1	87.5	312.5	237.5
2 (CFRP/Al/Ti)	125	0.05	75	262.5	187.5
3 (Ti/CFRP/Al)	62	0.1	150	550	400
3 (Ti/CFRP/Al)	94	0.05	137.5	425	275
3 (Ti/CFRP/Al)	125	0.07	200	487.5	412.5

Çizelge 5.2 : Testler sonucunda malzemelerde oluşan tork değerleri.

			Tork (Nm)		
İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	CFRP	Ti6Al-4V	Al6061
1 (Al/Ti/CFRP)	62	0.05	1.5	2.75	2
1 (Al/Ti/CFRP)	94	0.07	1.625	2.75	2.15
1 (Al/Ti/CFRP)	125	0.1	1.5	3.5	3
2 (CFRP/Al/Ti)	62	0.07	1.25	4.25	2.25
2 (CFRP/Al/Ti)	94	0.1	1	3.625	2.625
2 (CFRP/Al/Ti)	125	0.05	1	3.125	2.325
3 (Ti/CFRP/Al)	62	0.1	1.25	4.5	3.375
3 (Ti/CFRP/Al)	94	0.05	1	5	2.625
3 (Ti/CFRP/Al)	125	0.07	2	5	4

Çizelge 5.3: Malzemeler tek olarak delinince oluşan kuvvet değerleri.

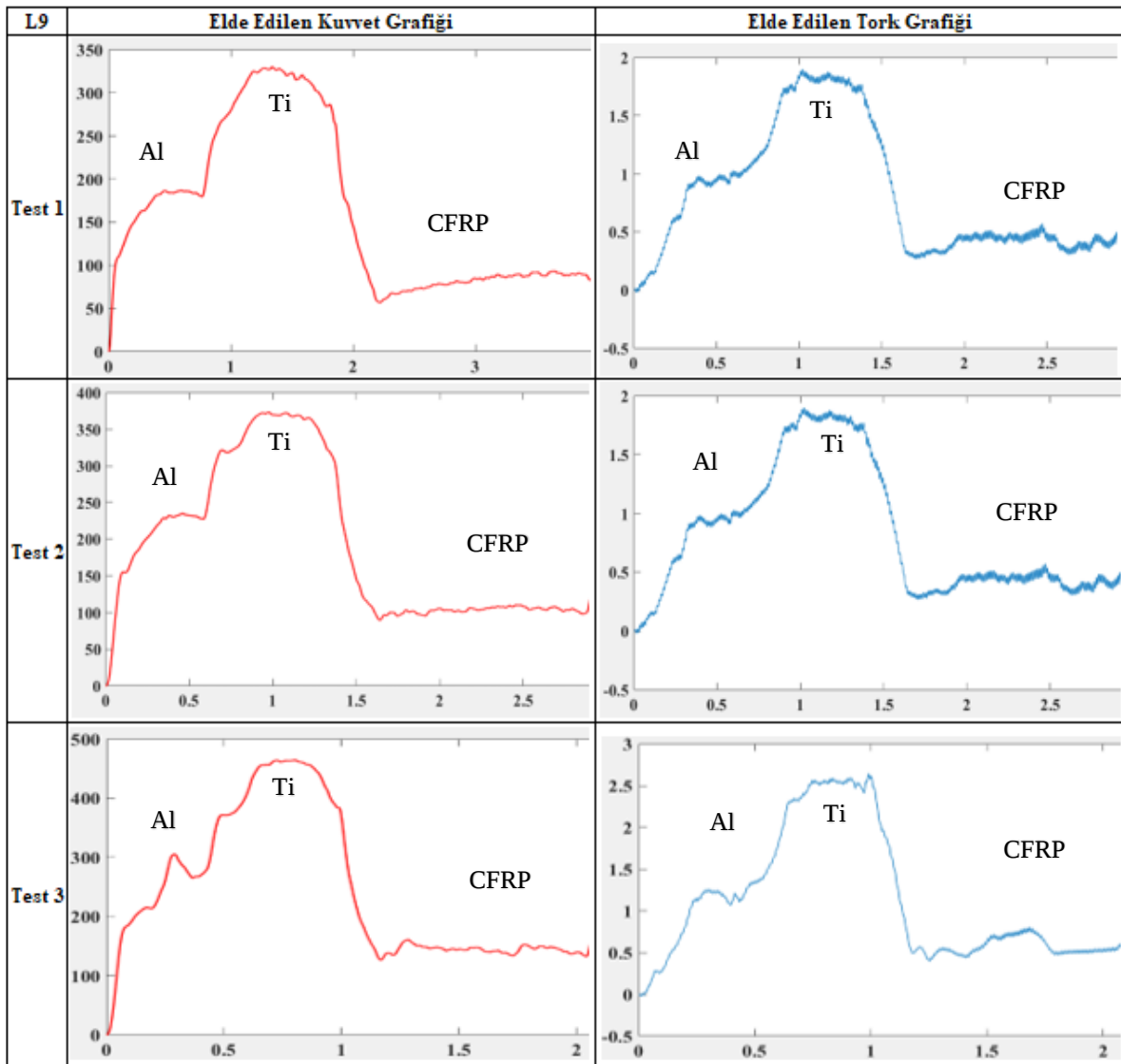
		Kuvvet (N)			
Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	CFRP	Ti6Al-4V	Al6061	
62	0.05	-	-	197	
94	0.07	-	-	210	
125	0.1	-	-	254	
62	0.07	80	-	-	
94	0.1	100	-	-	
125	0.05	80	-	-	
62	0.1	-	502	-	
94	0.05	-	380	-	
125	0.07	-	410	-	

Çizelge 5.4 : Malzemeler tek olarak delinince oluşan tork değerleri.

		Tork (Nm)			
Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	CFRP	Ti6Al-4V	Al6061	
62	0.05	-	-	2	
94	0.07	-	-	2	
125	0.1	-	-	2.25	
62	0.07	1	-	-	
94	0.1	1.25	-	-	
125	0.05	1	-	-	
62	0.1	-	4	-	
94	0.05	-	3.5	-	
125	0.07	-	3.5	-	



Şekil 5.1 : İlk istif sırası (Al/Ti/CFRP).



Şekil 5.2 : İlk istif sırasında yapılan testlerde elde edilen kuvvet ve tork değerleri.

Elde edilen sonuçlarda, ilk istif sırasında CFRP'ye uygulanan ortalama kuvvet 135 N iken bu değerler titanyum için 400 N, alüminyum alaşımı için ise 250 N olarak ölçüldü. Delme hızının ve ilerlemenin birlikte artmasıyla açığa çıkan kuvvetlerin de arttığı gözlemlendi. Sadece alüminyumun orta seviyedeki delme hızı ve ilerleme değerinde en yüksek kuvvete eriştiği görülmektedir.

Torkta ise kuvvet değerleri kadar büyük değişiklikler gözlemlenmese de benzer şekilde yüksek delme hızı ve ilerlemede artış eğilimi göze çarpmaktadır. Değerler CFRP için 1 Nm, titanyum alaşımı için 3 Nm, alüminyum için ise 1.5 Nm'dir. CFRP için ölçülen tork değeri ise orta seviyedeki ilerleme ve delme hızında en yüksek sonuca ulaşmıştır.

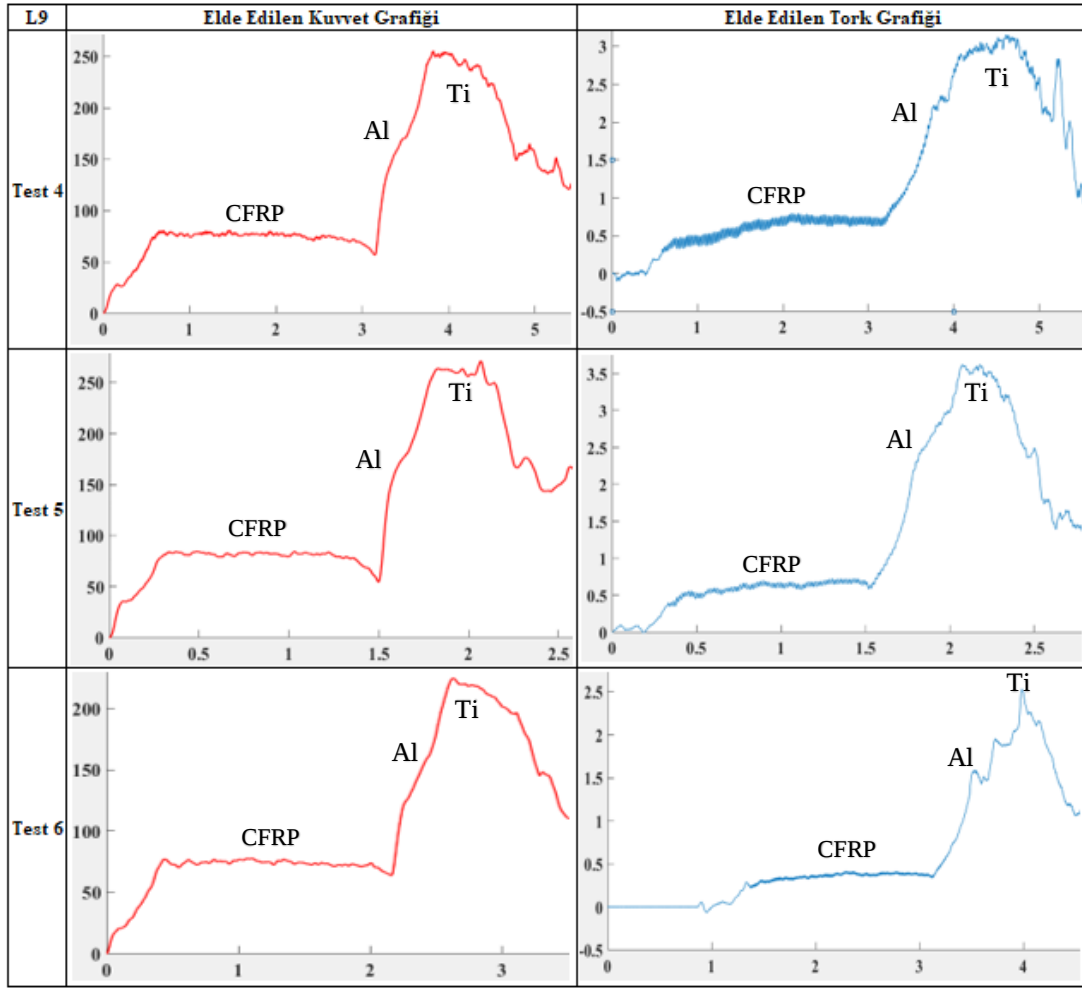
İlk istif sırası için CFRP malzemesinden sonra ölçülen tork ve kuvvet değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Bu artış matkabın CFRP malzemede tam olarak delik açtıktan sonra dinamometreyi korumak için istif malzemelerin altına yerleştirilen alüminyum ara plakaya temas etmesi nedeniyle oluşmaktadır.

Alüminyum malzemenin tek delindiği bu parametrelerde kuvvet ve tork değerleri en yüksek delme hızı ve ilerleme hariç büyük farklılıklar taşımamaktadır.

En yüksek delme hızı ve ilerleme değerinde ise talaş tahliyesinin zor olması nedeniyle hem kuvvet hem de tork değeri arttı.



Şekil 5.3 : İkinci istif sırası (CFRP/Al/Ti).

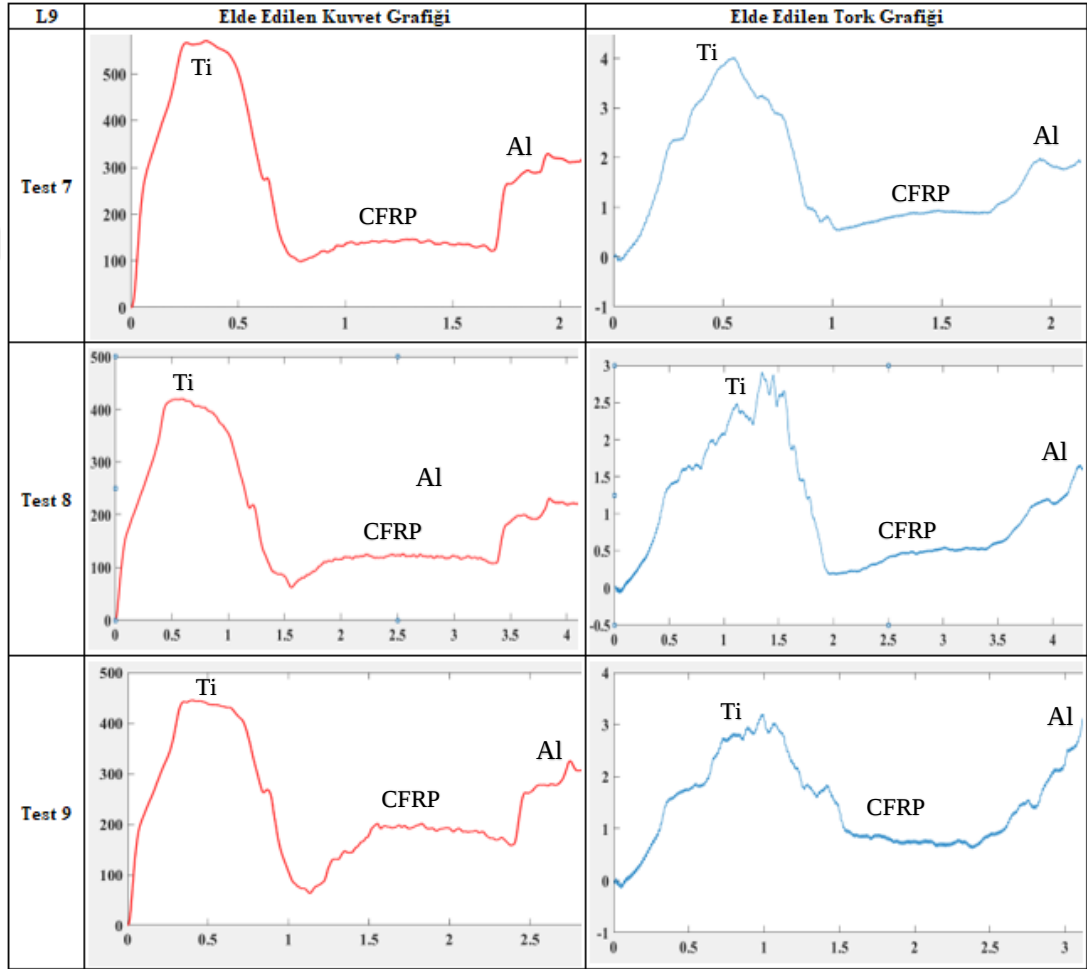


Şekil 5.4 : İkinci istif sırasında yapılan testlerde elde edilen kuvvet ve tork değerleri.

İkinci istif sırasında ise en yüksek kuvvet, her üç malzeme için orta seviyede delme hızı ve en yüksek ilerleme değerinde gözlemlendi. En düşük delme hızı ve orta ilerleme değeriyle, en yüksek delme hızı ve en yüksek ilerleme değerinde elde edilen kuvvet değerleri neredeyse aynıdır. Tork değerleri ise en düşük delme hızı ve orta değerinde ilerlemede en yüksek sonuçları verdi. Genel olarak ikinci istif sırasında kuvvet değerlerinin ilk istif sırasına göre yaklaşık %35 kadar daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. CFRP malzeme istif sırası 2'deki parametrelerle tek başına delindiğinde elde edilen kuvvet ve tork değerleri istiflenmiş şekilde olanla benzer sonuçlar çıkmaktadır. Bunun nedeni CFRP malzemesinin talaş tahliyesinin kolay olmasıdır.



Şekil 5.5 : Üçüncü istif sırası (Ti/CFRP/Al).



Şekil 5.6 : Üçüncü istif sırasında yapılan testlerde elde edilen kuvvet ve tork değerleri.

Üçüncü istif sırasında ise kuvvetlerin ve tork değerlerinin arttığı görülmektedir. CFRP için kuvvet değerleri ortalama 150 N, titanyum alaşımı için 500 N, alüminyum alaşımı için ise 325 N olarak ölçüldü.

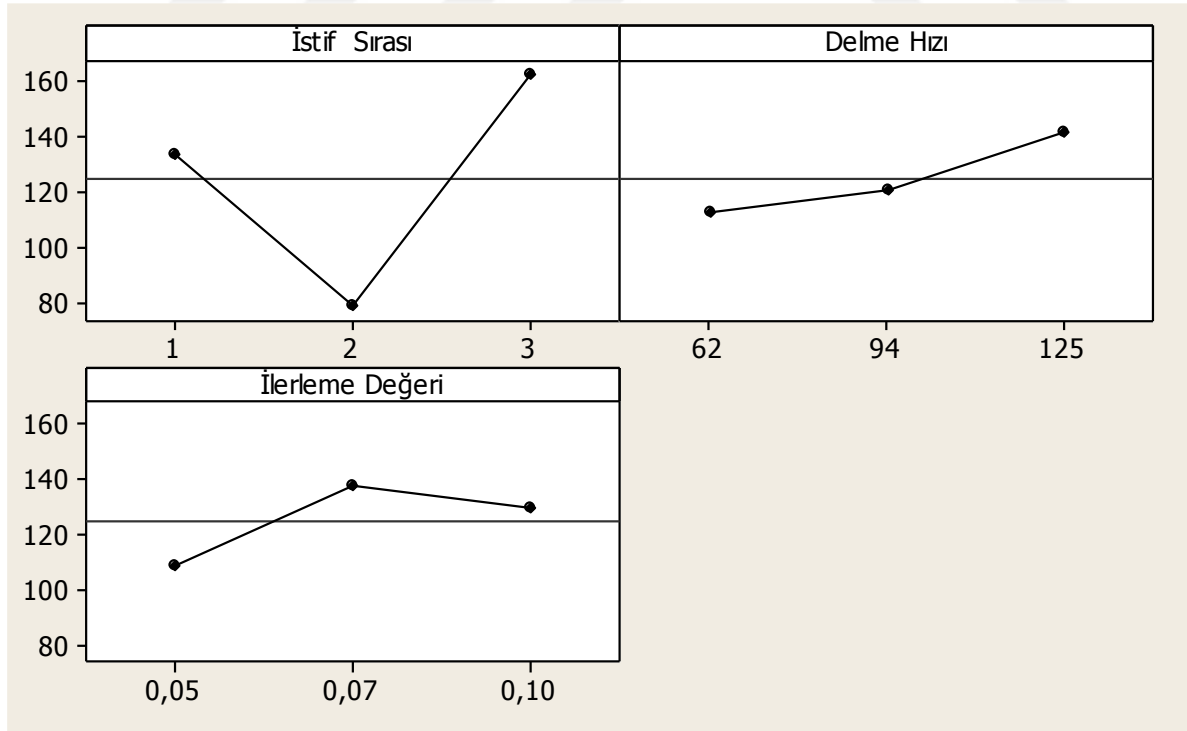
Bu kuvvet değerleri tüm testte ulaşılan en yüksek kuvvet değerleri olarak göze çarpmaktadır ve ikinci istif sırasına göre iki kat fazladır. Tork değerleri de benzer oranda yükseldi, CFRP için ortalama tork değeri 1.5 Nm, titanyum alaşımı için 4.75

Nm, alüminyum alaşımı için ise 3.75 Nm olmaktadır. Titanyum alaşımı tek olarak delindiğinde ise oluşan kuvvet ve tork değerleri %10 azalmaktadır.

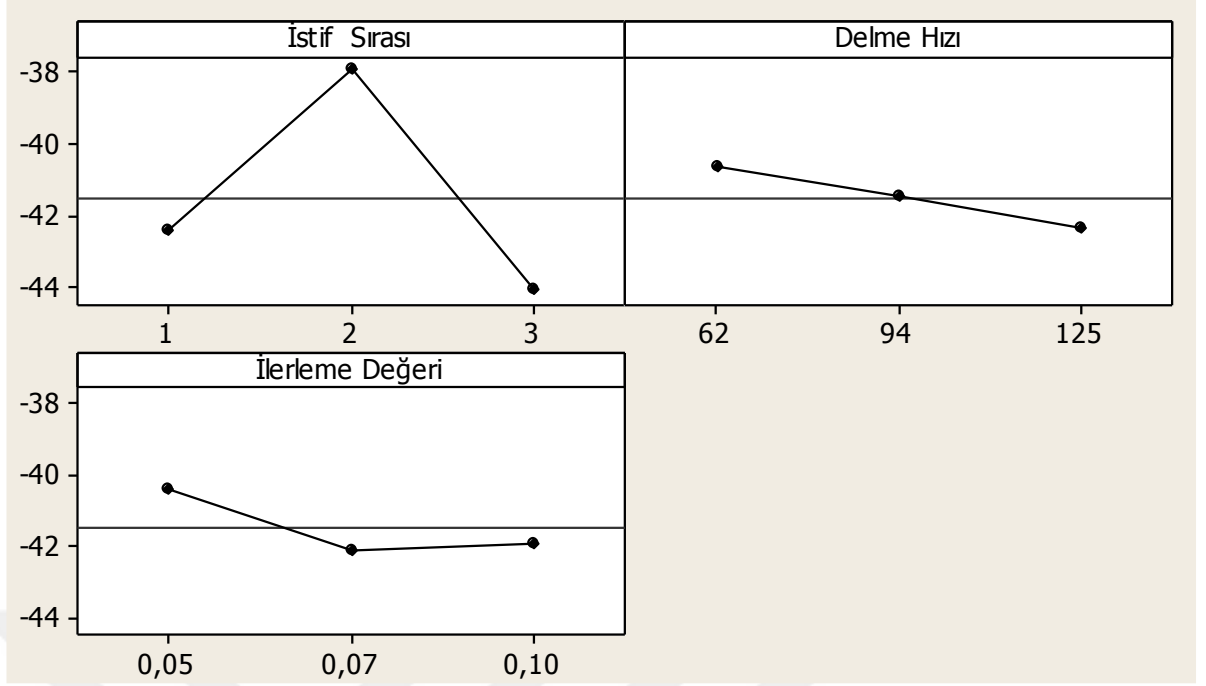
Testlerde elde edilen tüm kuvvet ve tork değerleri Minitab 16 programının da yardımıyla istif sırası, delme hızı ve ilerleme değerlerinin etkisi üzerine varyans, sinyal-gürültü oranı (S/N) analizi ve grafiklerin elde edilmesi yapıldı. S/N oranı, sonucun farklı koşullarda nominal veya hedef değere göre nasıl değiştiğini ölçer. Testlerin amacına bağlı olarak, farklı S/N oranları arasından seçim yapılabilir. Minitab, dört sinyal-gürültü oranı sunmaktadır. Kuvvet ve tork değerlerinin mümkün olan en düşük miktarda olması tercih edildiği için S/N analizinde “daha küçük daha iyi” hipotezi kullanıldı.

CFRP malzemesi için elde edilen ortalama kuvvet değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9’da verildi. İkinci istif sırasındaki kuvvet değerlerinin en düşük olduğu gözlemlendi. Delme hızının artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmaktadır. Bunun yanı sıra kuvvet değerlerini en çok etkileyen parametrenin istif sırası, en az etkileyen parametrenin ise ilerleme değeri olduğu belirlendi. Regresyon denklemi ise;

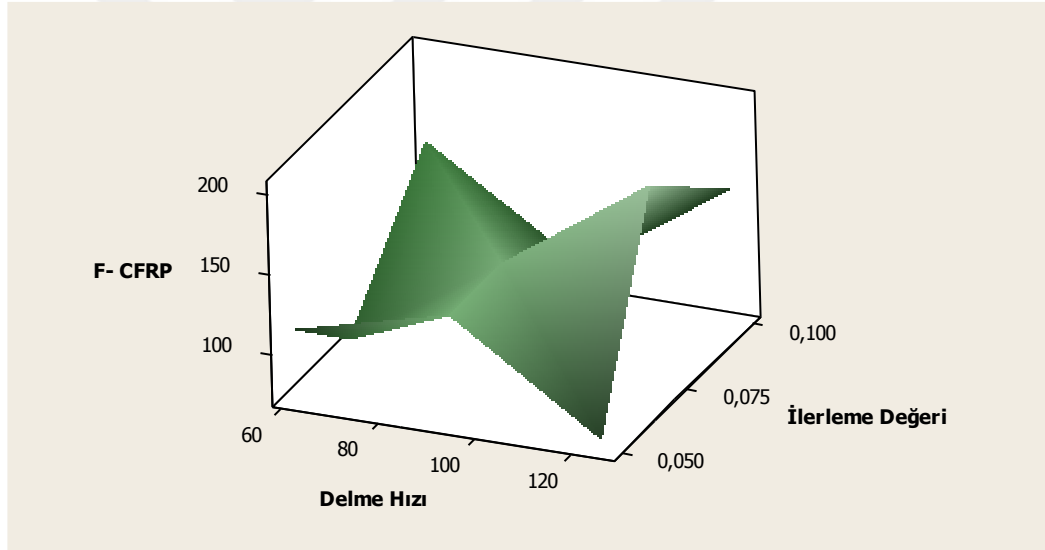
CFRP (kuvvet) = 26 + 14.6 İstif Sırası + 0.462 Delme Hızı + 362 İlerleme Değeri ‘dir.



Şekil 5.7 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için kuvvet değişim grafiği.



Şekil 5.8 : CFRP malzemesinde S/N oranları için kuvvet değişim grafiği.



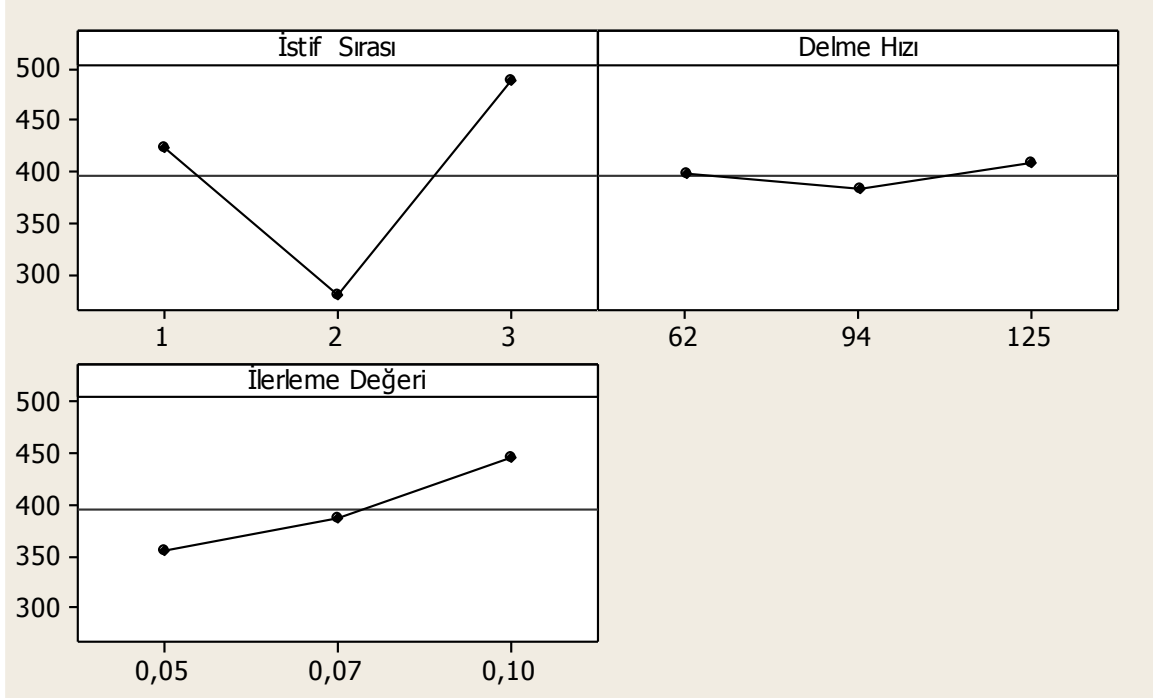
Şekil 5.9 : CFRP malzemesinde oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişim grafiği.

Titanyum alaşımı için elde edilen ortalama kuvvet değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de verildi. CFRP’ye oldukça benzer sonuçlar elde edildiği gözlemlenen bu grafiklerde en düşük kuvvet değerlerine ikinci istif sırasında ulaşıldı.

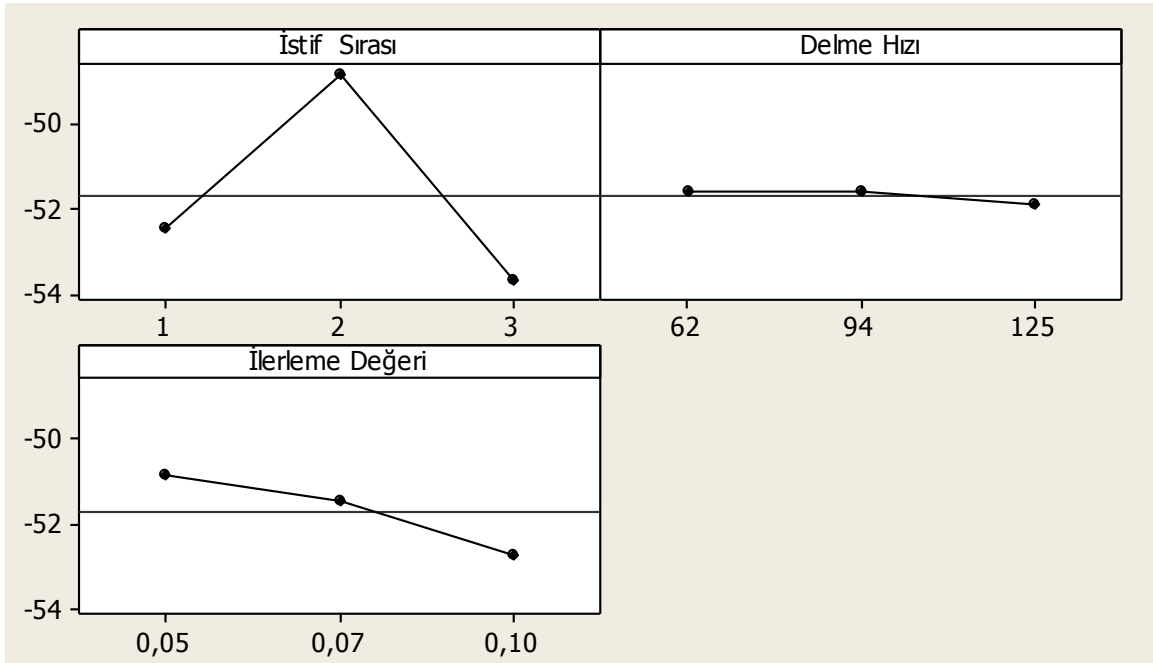
Delme hızının kuvvet değerleri üzerinde çok etkili olmadığı gözlemlenirken, ilerleme değeri arttıkça elde edilen kuvvet değerlerinin arttığı farkedildi. Ancak CFRP malzemesine kıyasla en yüksek ilerleme değerinde kuvvet sonuçlarının orta değerdeki ilerlemeye göre daha yüksek olduğu gözlemlendi. Benzer şekilde istif sırasının hem

delme hızına hem de ilerleme değerine kuvvet sonuçlarını etkileme konusunda büyük üstünlük sağladığı tespit edildi. Regresyon denklemi ise;

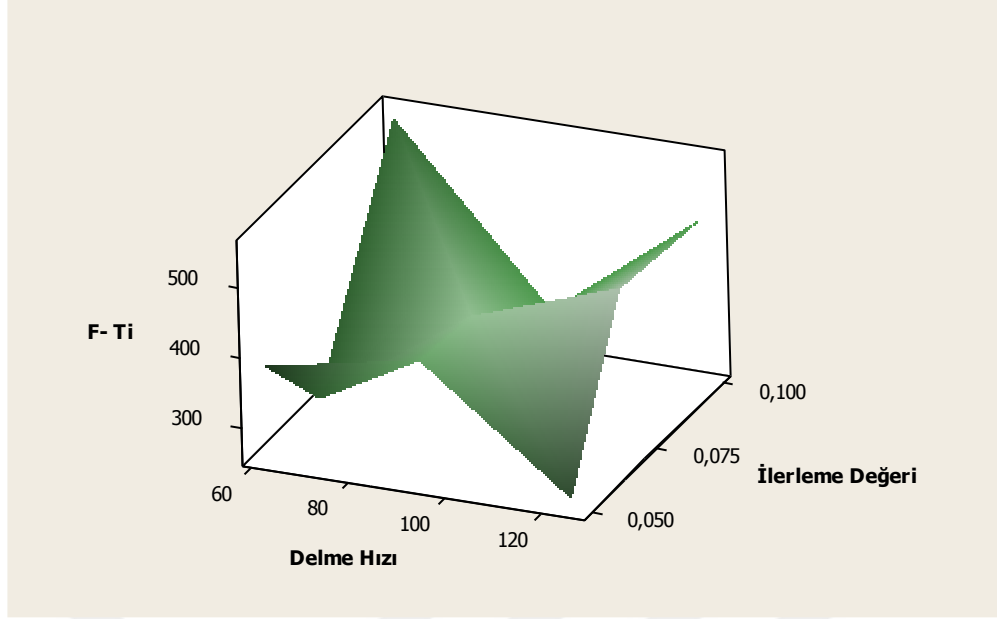
Titanyum (kuvvet) = 183 + 32.5 İstif Sırası + 0.17 Delme Hızı + 1811 İlerleme Değeri'dir.



Şekil 5.10 : Titanyum alaşımında ortalama değerler için kuvvet değişim grafiği.



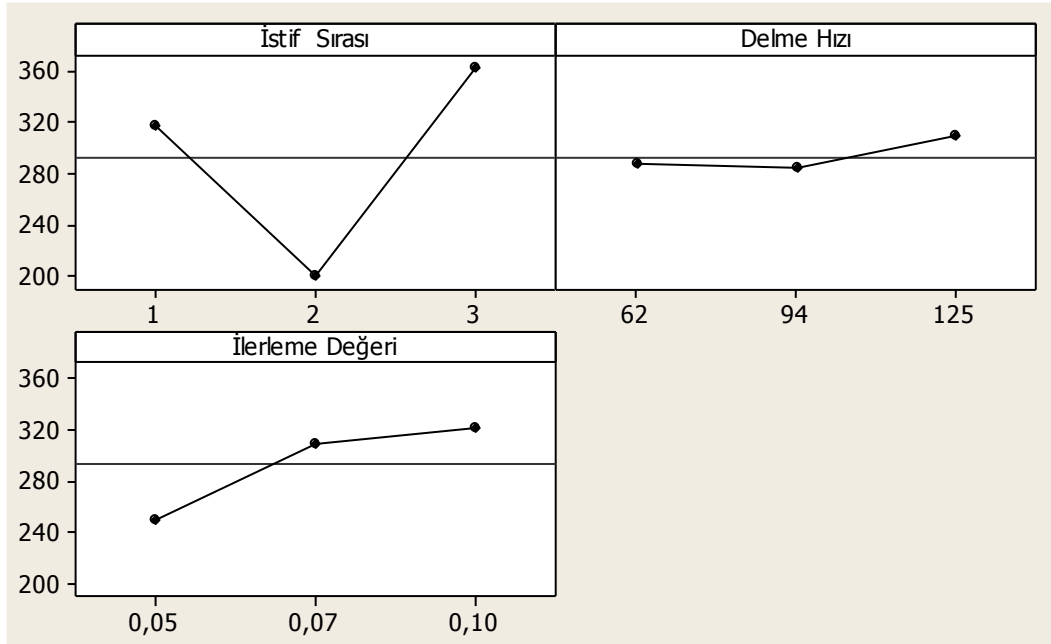
Şekil 5.11 : Titanyum alaşımında S/N oranları için kuvvet değişim grafiği.



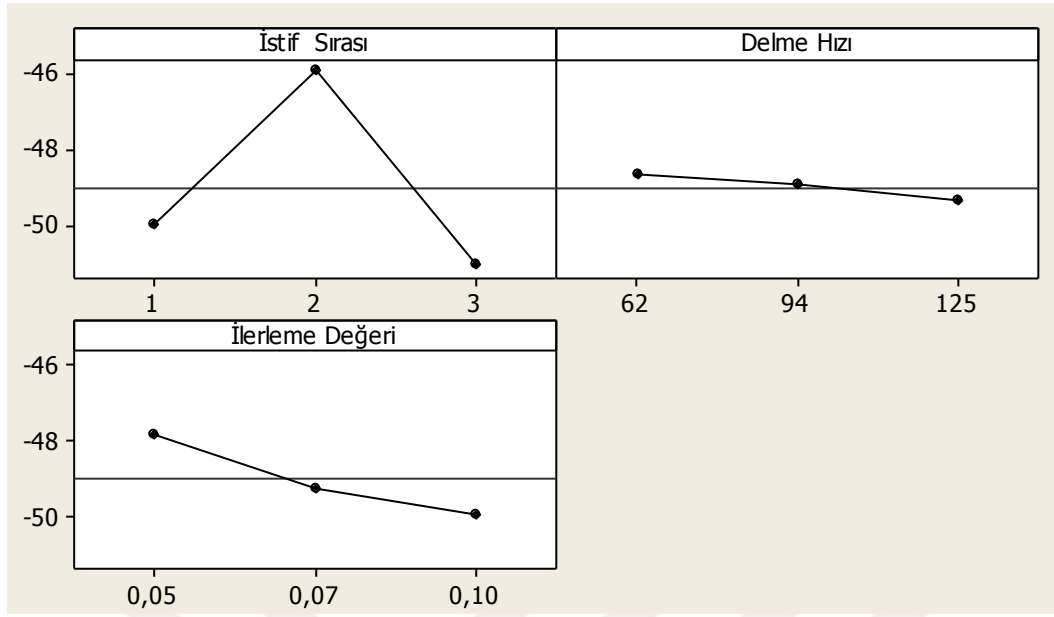
Şekil 5.12 : Titanyum alaşımında oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişim grafiği.

Alüminyum alaşımı için elde edilen ortalama kuvvet değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15’de verildi. Önceki malzemelere benzer sonuçlar elde edilen bu grafiklerde de istif sırasının etkileyici etkisi yerini korurken, ilerleme değeri delme hızının önüne geçti. Regresyon denklemi ise;

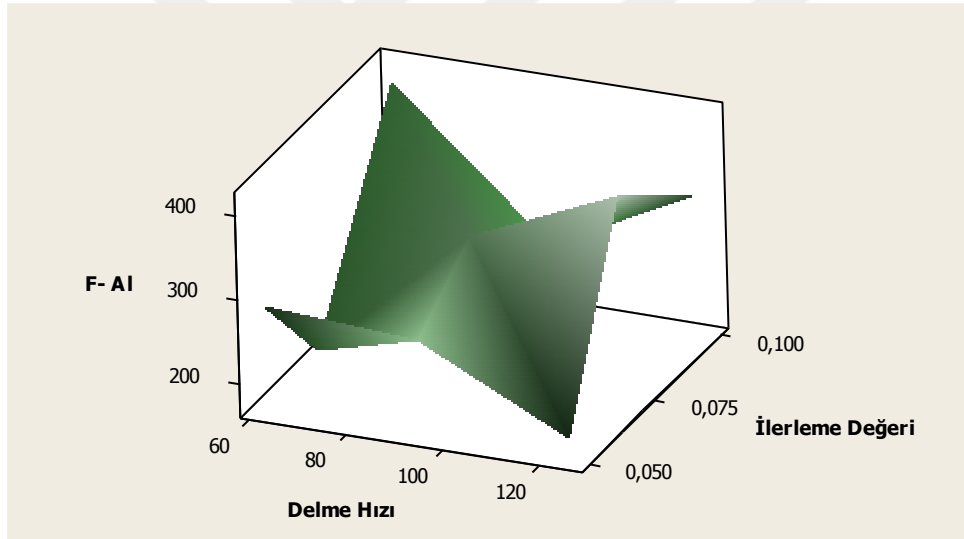
Alüminyum (kuvvet) = 118 + 22.9 İstif Sırası + 0.33 Delme Hızı + 1338 İlerleme Değeri’dir.



Şekil 5.13 : Alüminyum alaşımında ortalama değerler için kuvvet değişim grafiği.



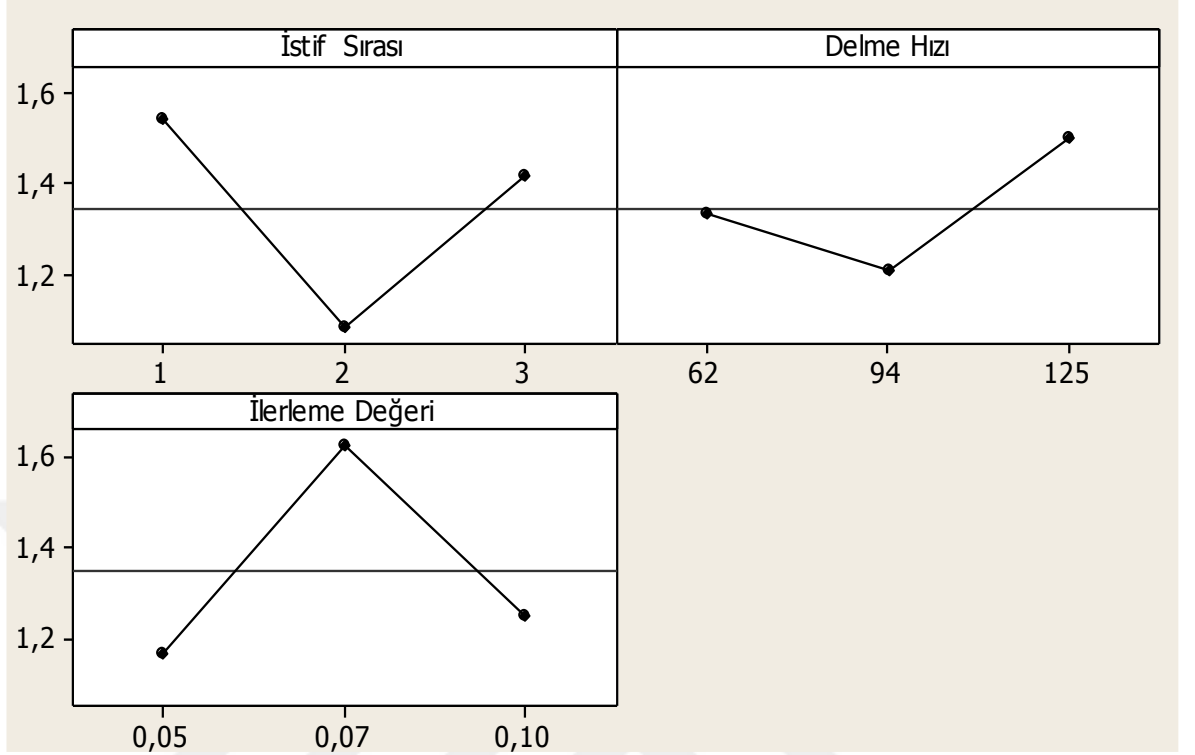
Şekil 5.14 : Alüminyum alaşımında S/N oranları için kuvvet değişim grafiği.



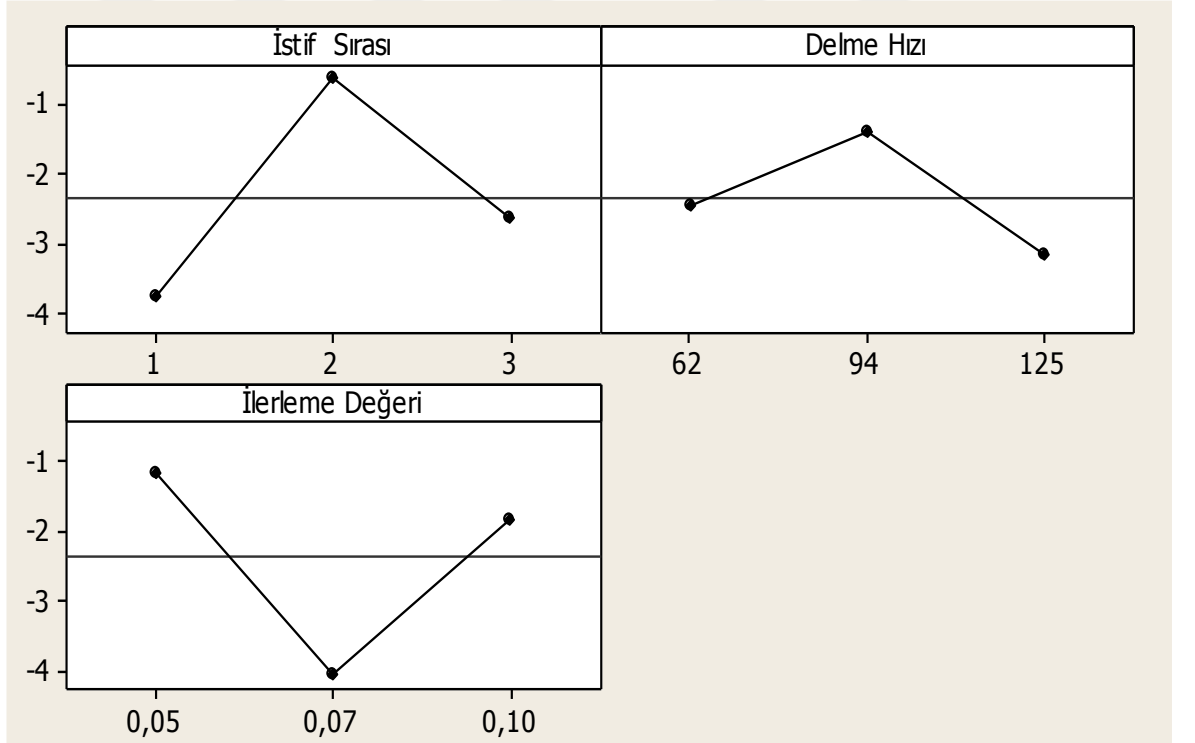
Şekil 5.15 : Alüminyum alaşımında oluşan kuvvetin delme parametrelerine göre değişim grafiği.

CFRP malzemesi için elde edilen ortalama tork değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan torkun delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.16, 5.17 ve 5.18’de verildi. Varyans analizine göre istif sırası en etkili faktör olmaya devam etmesine rağmen, ilerleme değeri ve delme hızının da etkisi arttı. Orta değerdeki ilerleme en yüksek torka neden olurken, orta değerdeki delme hızı ise en düşük tork değerini vermektedir. Düşük ve yüksek değerlerde ise daha yüksek tork değerlerine neden olmaktadır. İkinci istif sırası tekrar en düşük değerleri vermektedir. Regresyon denklemi ise;

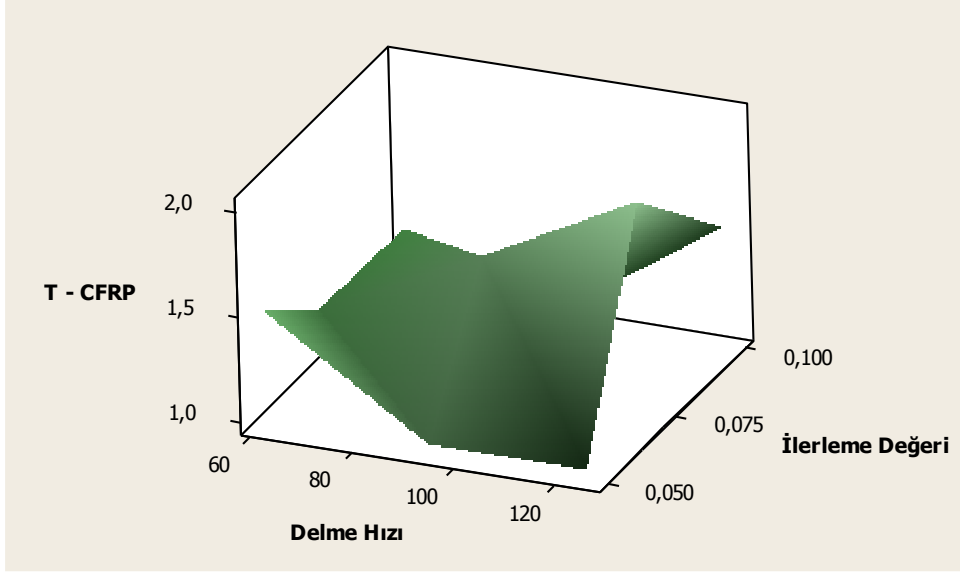
CFRP (tork) = 1.19 – 0.063 İstif Sırası + 0.00261 Delme Hızı + 0.55 İlerleme Değeri'dir.



Şekil 5.16 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için tork değişim grafiği.



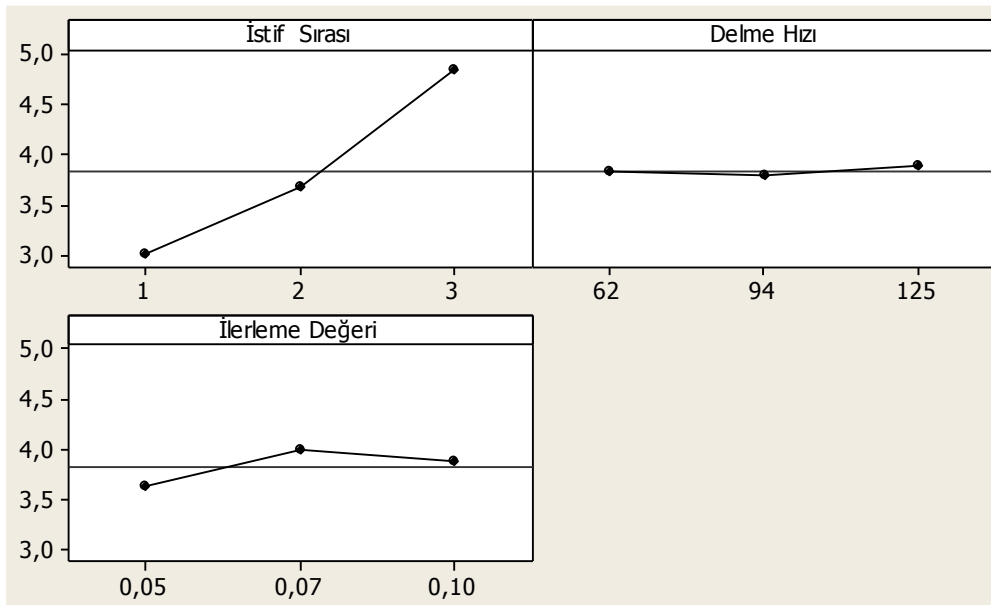
Şekil 5.17 : CFRP malzemesinde S/N oranları için tork değişim grafiği.



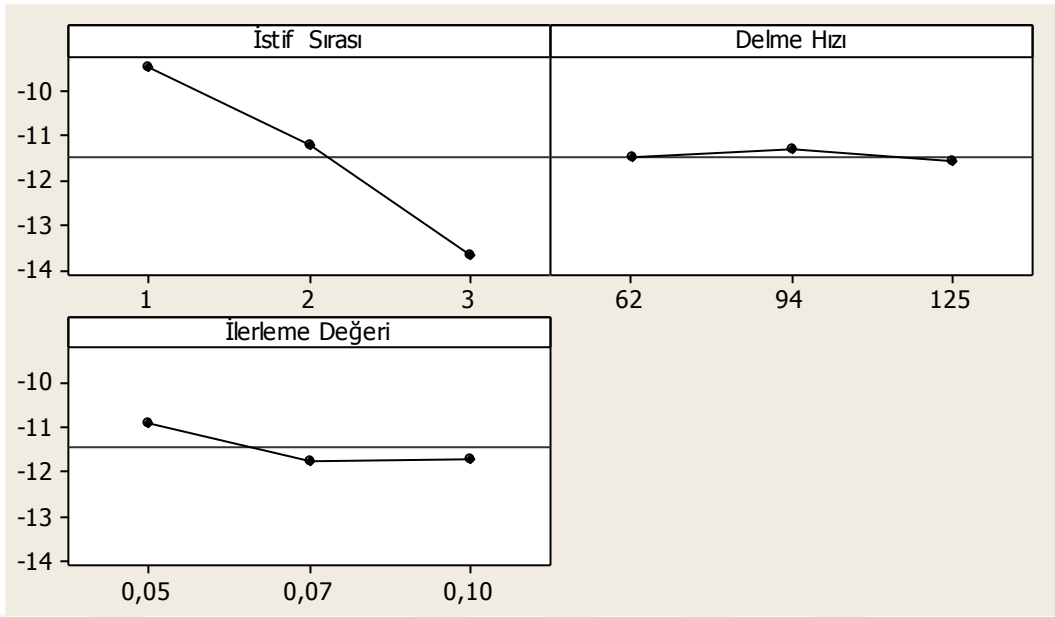
Şekil 5.18 : CFRP malzemesinde oluşan torkun delme parametrelerine göre değişim grafiği.

Titanyum alaşımı için elde edilen ortalama tork değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan torkun delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.19, 5.20 ve 5.21’de verildi. Parametrelerin etksi oranında istif sırası, ilerleme değeri ve delme hızı sırası devam etmektedir. İlk istif sırasında titanyum alaşımının en az tork değerine ulaşıldı. Bu değeri sırasıyla ikinci ve üçüncü takip etmektedir. Delme hızı değişikliğinde ise etki oldukça düşüktür. Regresyon denklemi ise;

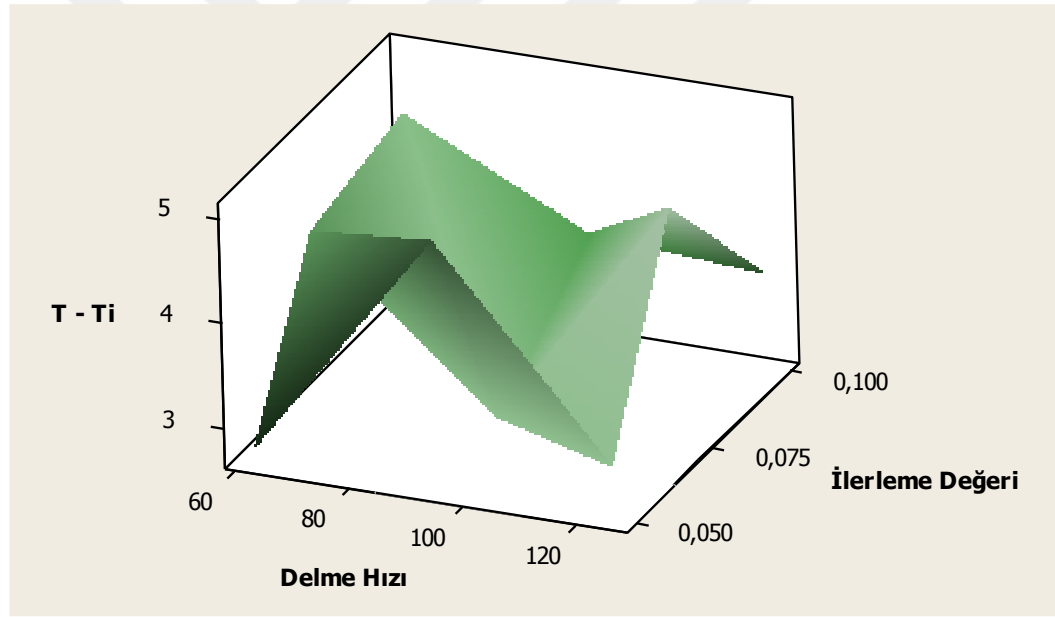
Titanyum (tork) = 1.63 + 0.917 İstif Sırası + 0.00065 Delme Hızı + 4.28 İlerleme Değeri’dir.



Şekil 5.19 : Titanyum alaşımında ortalama değerler için tork değişim grafiği.



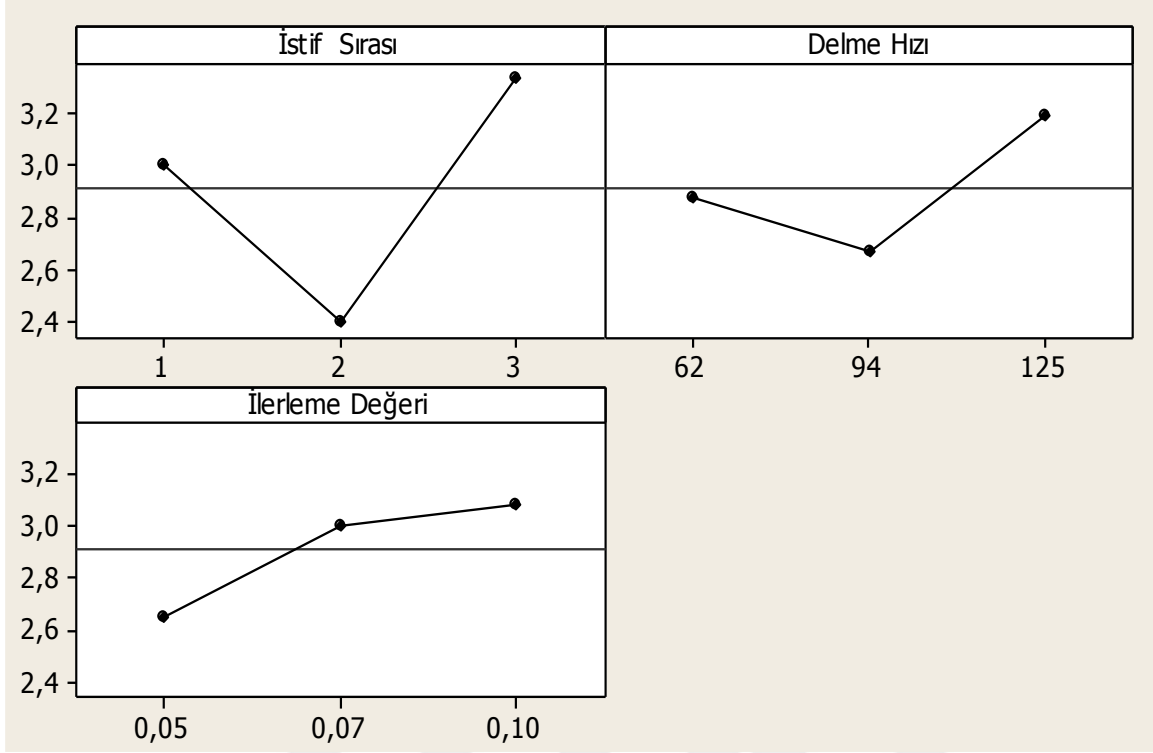
Şekil 5.20 : Titanyum alaşımında S/N oranları için tork değişim grafiği.



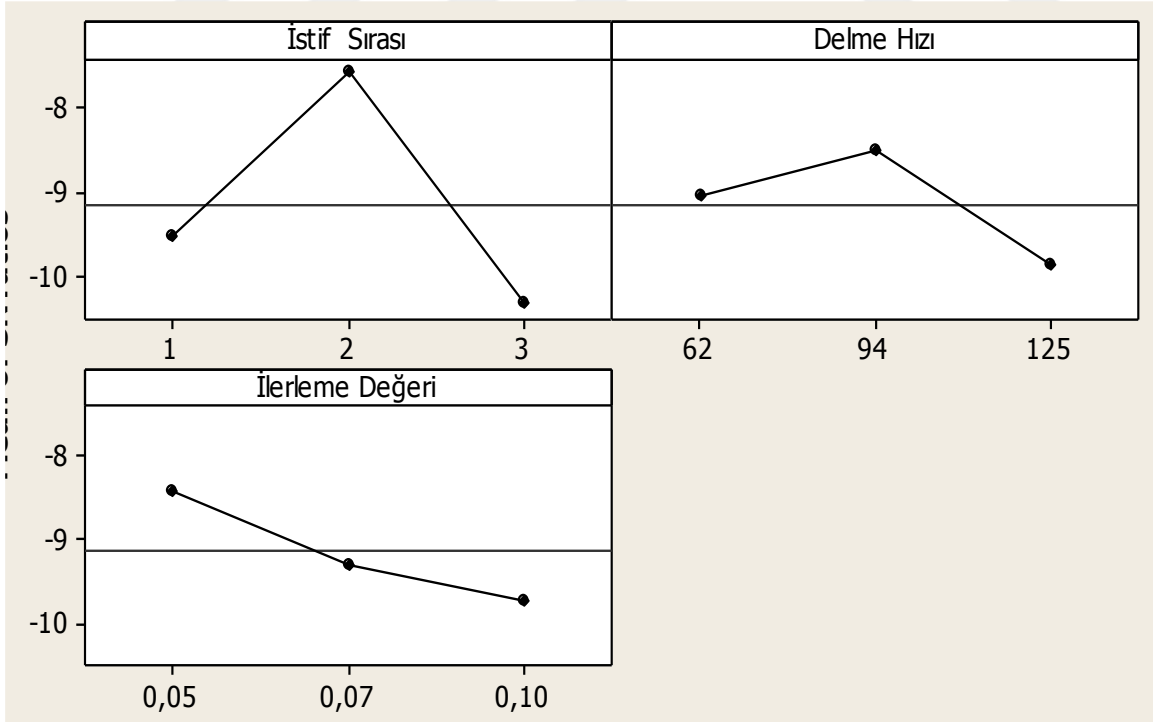
Şekil 5.21 : Titanyum alaşımında oluşan torkun delme parametrelerine göre değişim grafiği.

Alüminyum alaşımı için elde edilen ortalama tork değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan torkun delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.22, 5.23 ve 5.24'te verildi. İstif sırasının en etkili parametre olma özelliği sürerken, delme hızı bu yönden ilerleme değerini geride bıraktı. İkinci istif sırasında en düşük tork değeri elde edilirken, en yüksek tork değerleri en yüksek ilerleme ve delme hızında elde edildi. Orta değerdeki delme hızı ve en düşük ilerleme değerinde elde edilen tork en düşüktür. Regresyon denklemi ise;

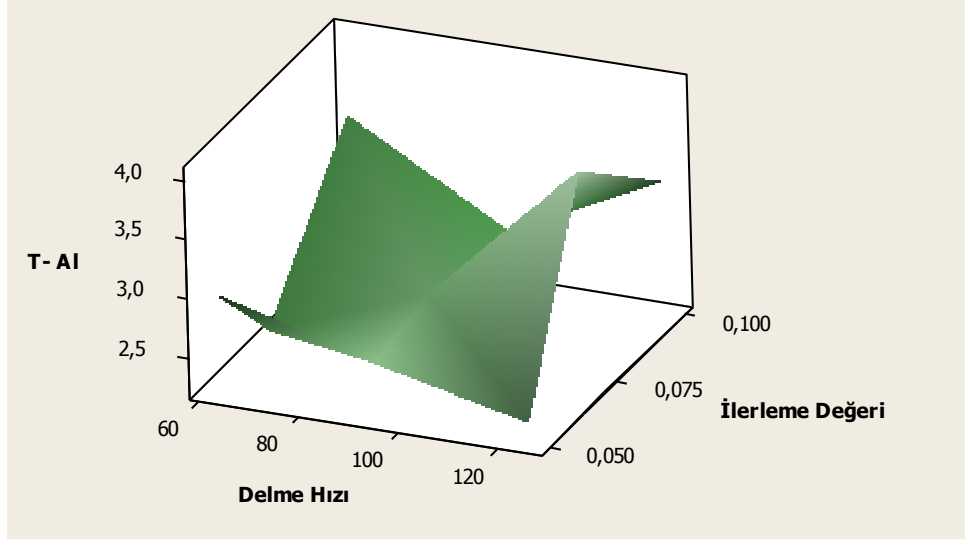
Alüminyum (tork) = $1.51 + 0.167 \text{ İstif Sırası} + 0.00496 \text{ Delme Hızı} + 8.2 \text{ İlerleme Değeri}$ 'dir.



Şekil 5.22 : Alüminyum alaşımında ortalama değerler için tork değişim grafiği.



Şekil 5.23 : Alüminyum alaşımında S/N oranları için tork değişim grafiği.



Şekil 5.24 : Alüminyum alaşımında oluşan torkun delme parametrelerine göre değişim grafiği.

5.2 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Gerçekleştirilen testlerin akabinde CFRP malzemesinin deliklerindeki yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo SJ-201P profilometresiyle ölçülmüştür. CFRP malzemesinin yüzeyinin ve delik içi yüzey pürüzlülüğünün incelenmesinin sebebi delik delme işlemi sırasında aşınan takımların da etkisiyle delik içindeki yüzey kalitesi bozulmakta, sık sık elyaf ayrılması ve delaminasyon sorunları meydana gelmektedir. Her bir delikten 90’ar derecede dört ve en yüksek değerin tekrar ölçülmesiyle toplam beşer tane ölçüm alınmış olup, bu değerlerin aritmetik ortalaması deliklerin yüzey pürüzlülük ölçüsü olarak kabul edilmiştir. Delikler 10 milimetre çapında ve 8 milimetre genişliğindedir. İkişer tekrarlar yapılan deneylerdeki bu yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalaması alınarak nihai yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 5.5’te verilmiştir.

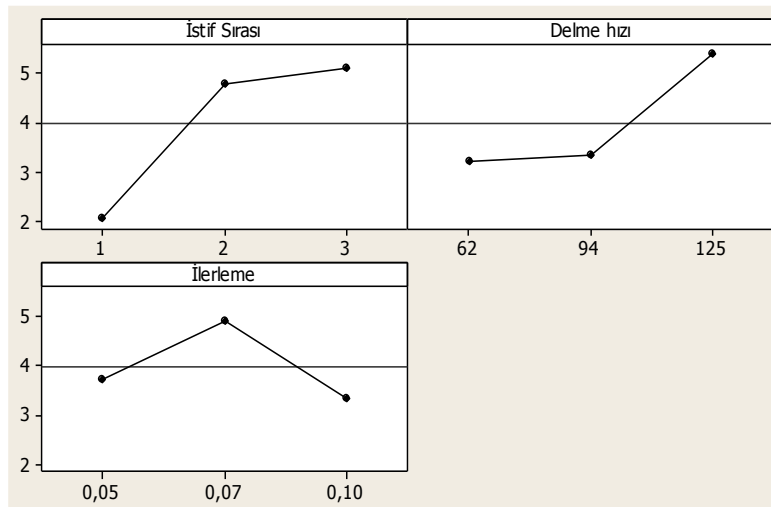
Çizelge 5.5 : Testler sonucunda ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.

İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
Al/Ti/CFRP	62	0.05	1.945
Al/Ti/CFRP	94	0.07	2.04
Al/Ti/CFRP	125	0.1	2.195
CFRP/Al/Ti	62	0.07	4.32
CFRP/Al/Ti	94	0.1	4.425
CFRP/Al/Ti	125	0.05	5.635
Ti/CFRP/Al	62	0.1	3.405
Ti/CFRP/Al	94	0.05	3.565
Ti/CFRP/Al	125	0.07	8.365

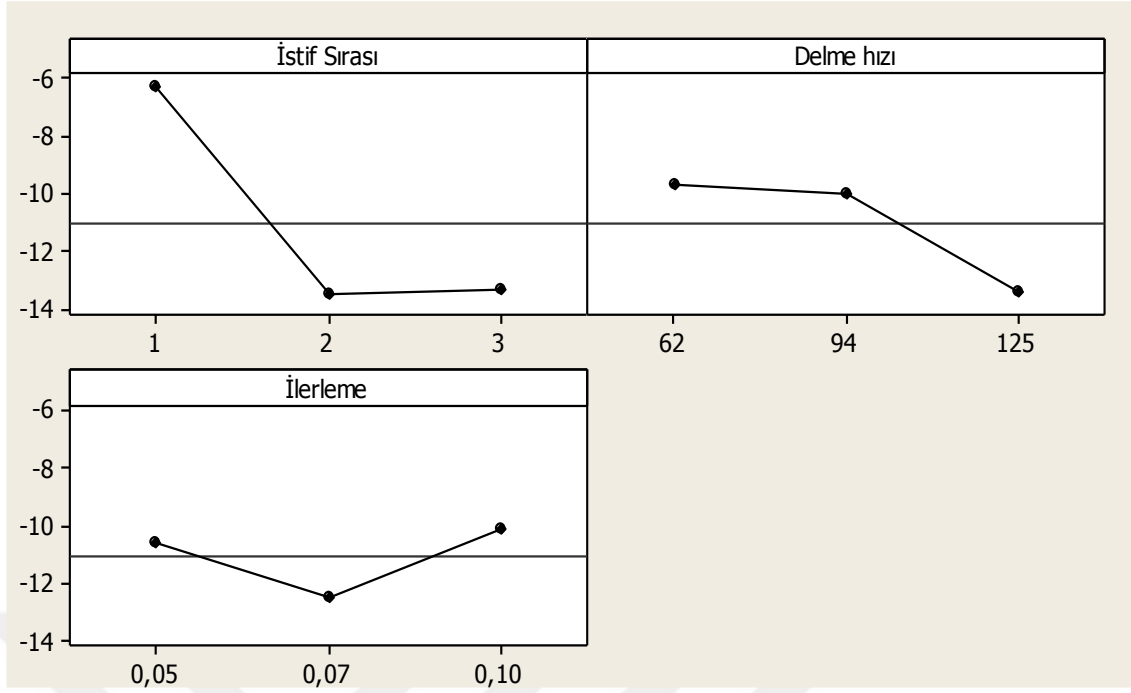
Çizelgede de görüldüğü üzere ilk istif sırası olan Al/Ti/CFRP diziliminde oluşan yüzey pürüzlülük değeri en düşüktür. Delme hızı ve ilerleme değerinin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır.

İkinci istif sırasında da benzer şekilde en düşük yüzey pürüzlülük değeri en düşük delme hızı ve orta değerdeki ilerlemede ortaya çıkmaktadır. Delme hızı ve ilerlemenin arttığı noktada yüzey pürüzlülüğü tekrar artarken, en yüksek delme hızı ve en düşük ilerlemede ise en yüksek yüzey pürüzlülüğüne ulaşılmaktadır. CFRP’de oluşan yüzey pürüzlülük değerlerinin ilk istif sırasına nazaran bu denli artmasındaki en önemli sebep ise orta bölümde yer alan titanyum alaşımından çıkan kızgın haldeki talaşların tahliyesi esnasında CFRP delik yüzeyine zarar vermeleridir. Üçüncü istif sırasında ise en düşük delme hızı ve en yüksek ilerlemede elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ikinci istif sırasındaki tüm değerlerden daha düşüktür. Orta değerdeki delme hızı ve en düşük değerdeki ilerlemede de benzer bir yüzey pürüzlülüğü gözlemlenirken takımın aşınması ve yüksek delme hızı orta değerde ilerlemede ise yüzey pürüzlülük değeri iki kattan fazla arttı. Yüzey pürüzlülüğüyle ilgili yapılan varyans analizi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, S/N oranı grafikleri ve yüzey pürüzlülüğünün delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.25, 5.26 ve 5.27’de verildi. Elde edilen regresyon denklemi ise;

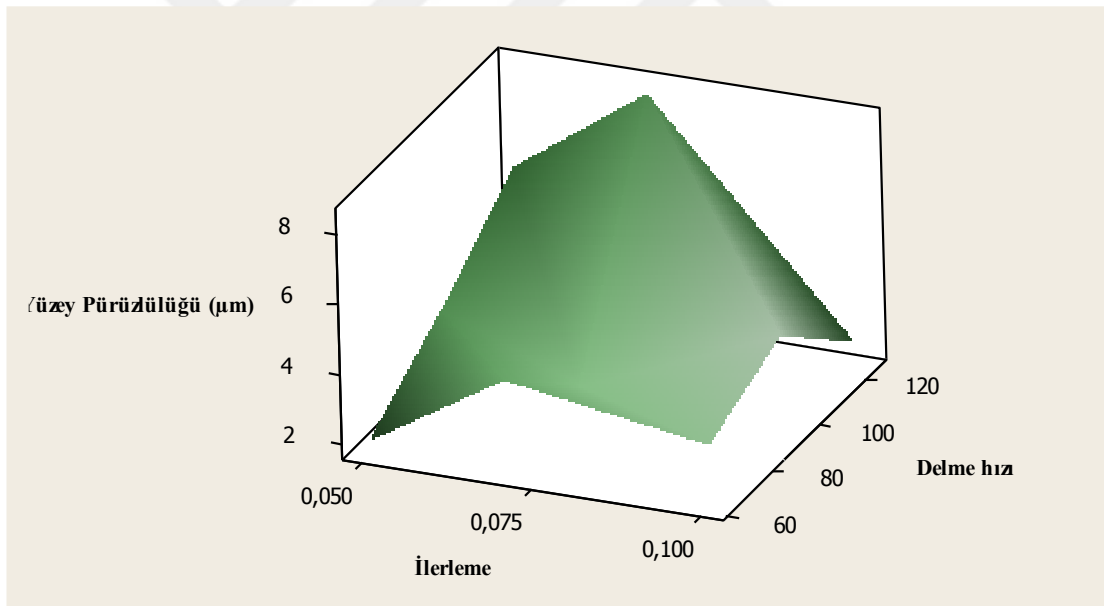
Yüzey Pürüzlülüğü (μm) = $0,51 + 0,000018 (\text{delme hızı})^2 - 1092 (\text{ilerleme})^2 - 0,0067 (\text{istif sırası})(\text{delme hızı}) + 35,6 (\text{istif sırası})(\text{ilerleme}) + 0,83 (\text{delme hızı}) (\text{ilerleme})$ ’dir.



Şekil 5.25 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği.



Şekil 5.26 : CFRP malzemesinde S/N oranları için yüzey pürüzlülük değişim grafiği.



Şekil 5.27 : CFRP malzemesinde delme parametrelerine göre yüzey pürüzlülük değerlerinin değişim grafiği.

5.3 Karbon Elyaf Takviyeli Kompzoit Malzemesinin Delik Çapı ve Yüzey İncelenmesi

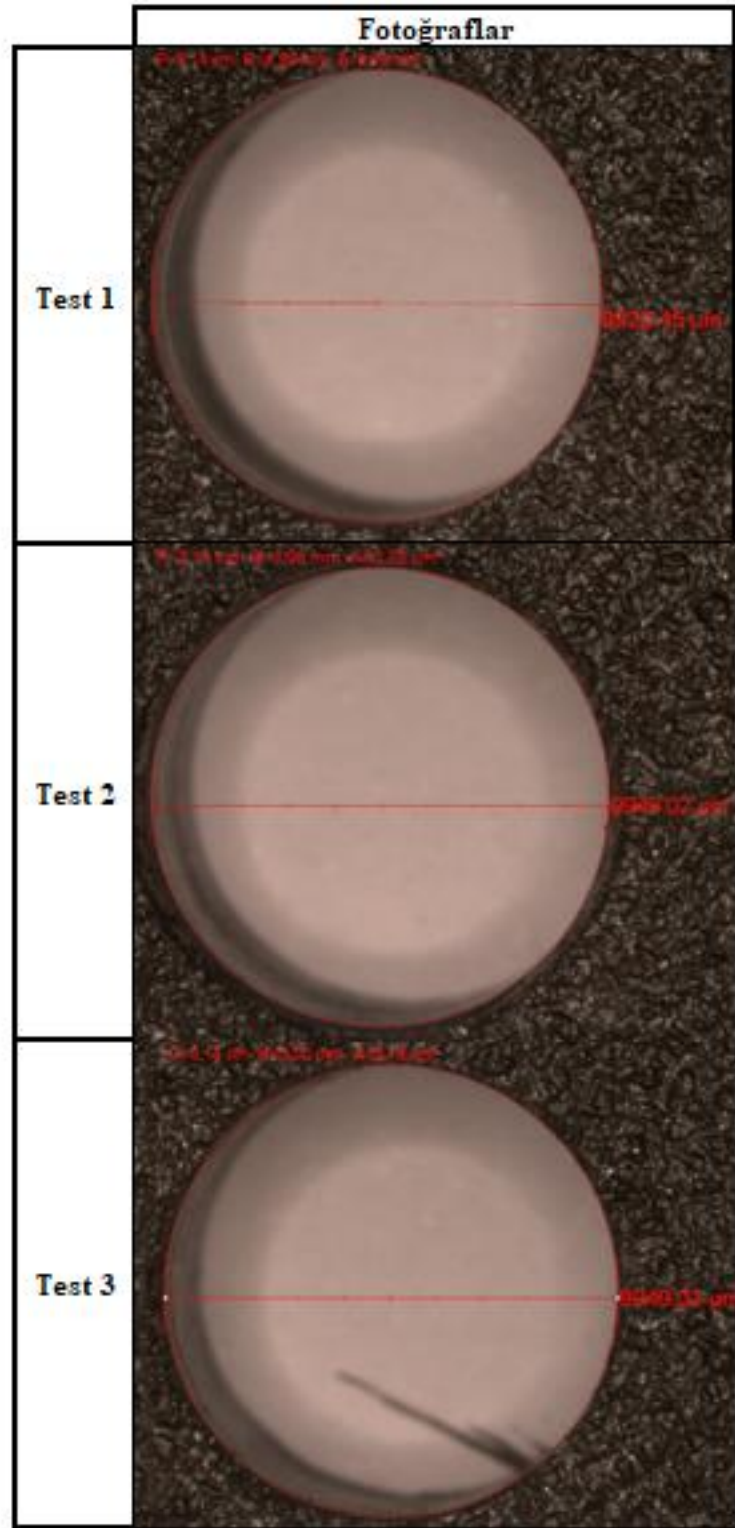
Delik delme işlemi esnasında helisel matkabın oluşturduğu sıyırma-itme etkisinin yanı sıra takım aşınması nedeniyle delik yüzeylerinde çatlaklar, mikro çatlaklar, elyaf ayrılmaları, delaminasyon, kesilmeyen elyaf bölümleri ve farklı malzemelerin talaş

tahliyesi sırasında oluşan çukurlanma şeklinde hasar tipleri oluşabilir. [19] Bu hasar tipleri malzemenin rijitliğini, yorulma ömrünü ve dayanımını etkilemektedir. [36] Özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde delik çapındaki hata toleransı yalnızca 40µm'dir. [3] Bu nedenle delik çapları takip edilmeli ve takımların aşındığı farkedilince değişimi sağlanmalıdır.

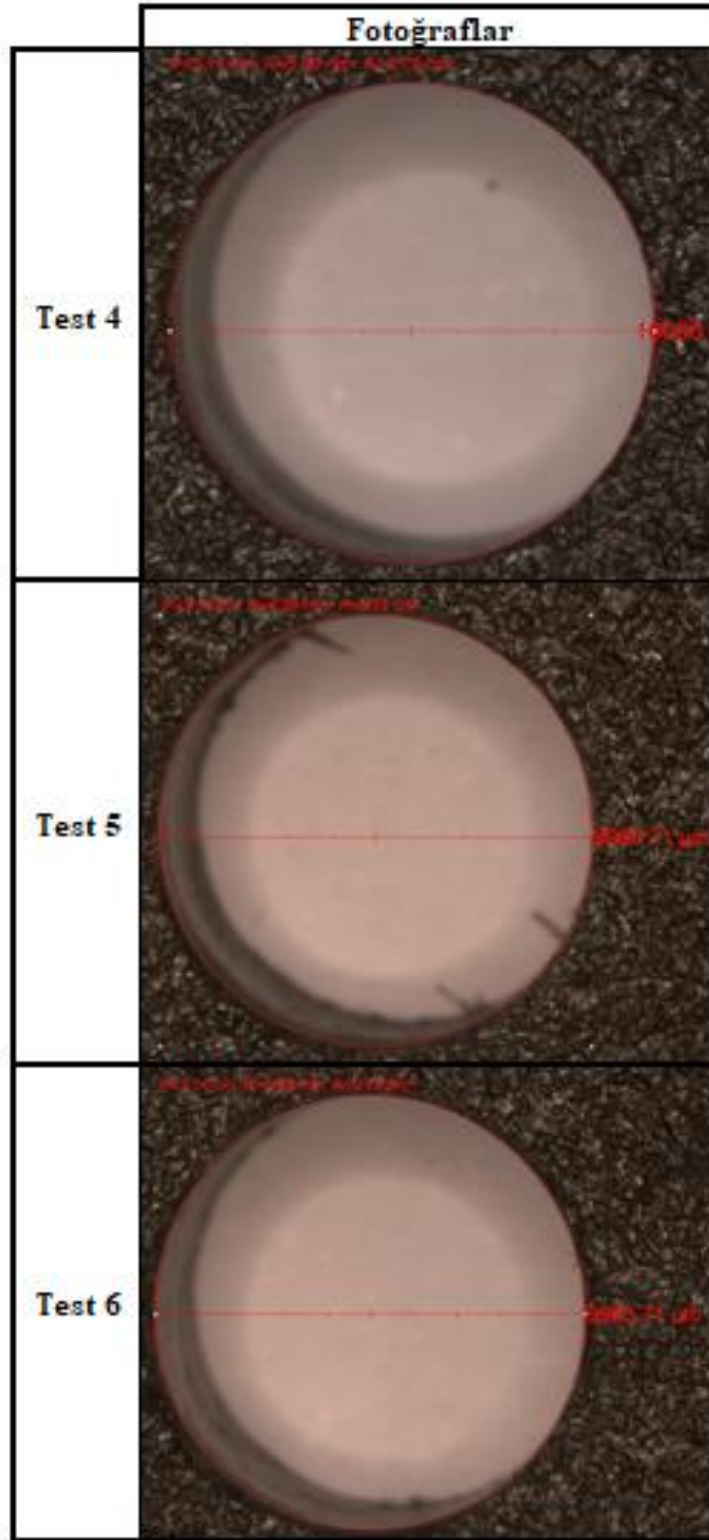
Delik delme işlemi gerçekleştirilen hibrit kompozit malzemenin delik çapları kontrol edilmiş ve yüzeyler incelendi. Bu inceleme esnasında delikler üçer üçer ayrılarak ölçümler alındı ve fotoğraflandı. Üçer üçer ayrılmasının sebebi ilk üçlülerde matkap uçlarının diğer üçlüye göre daha az aşınmış olmasıdır. Bu şekilde ikinci üçlülerde matkapların aşınmasıyla birlikte deliklerin yüzeyinde ve çapında oluşan hataların gözlemlenme fırsatı bulundu. İnceleme esnasında Nikon SMZ800 stereo optik mikroskobu kullanıldı. Görüntü alınma işlemi ise Deltapix View Pro yazılımıyla gerçekleştirildi. Testlerin gerçekleştirildiği istif sırası, delme hızı ve ilerleme değeri Çizelge 5.6'da verildi. Delik delme işlemi uygulanan CFRP malzemelerin giriş delik yüzeyleri sırasıyla Şekil 5.28'den 5.33'e kadar verildi.

Çizelge 5.6 : Testlerin gerçekleştirildiği istif sırası, delme hızı ve ilerleme hızı.

Test	İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)
1	Al/Ti/CFRP	62	0.05
2	Al/Ti/CFRP	94	0.07
3	Al/Ti/CFRP	125	0,1
4	Al/Ti/CFRP	62	0.05
5	Al/Ti/CFRP	94	0,07
6	Al/Ti/CFRP	125	0.1
7	CFRP/Al/Ti	62	0.07
8	CFRP/Al/Ti	94	0.1
9	CFRP/Al/Ti	125	0.05
10	CFRP/Al/Ti	62	0.07
11	CFRP/Al/Ti	94	0.1
12	CFRP/Al/Ti	125	0.05
13	Ti/CFRP/Al	62	0.1
14	Ti/CFRP/Al	94	0.05
15	Ti/CFRP/Al	125	0.07
16	Ti/CFRP/Al	62	0.1
17	Ti/CFRP/Al	94	0.05
18	Ti/CFRP/Al	125	0.07

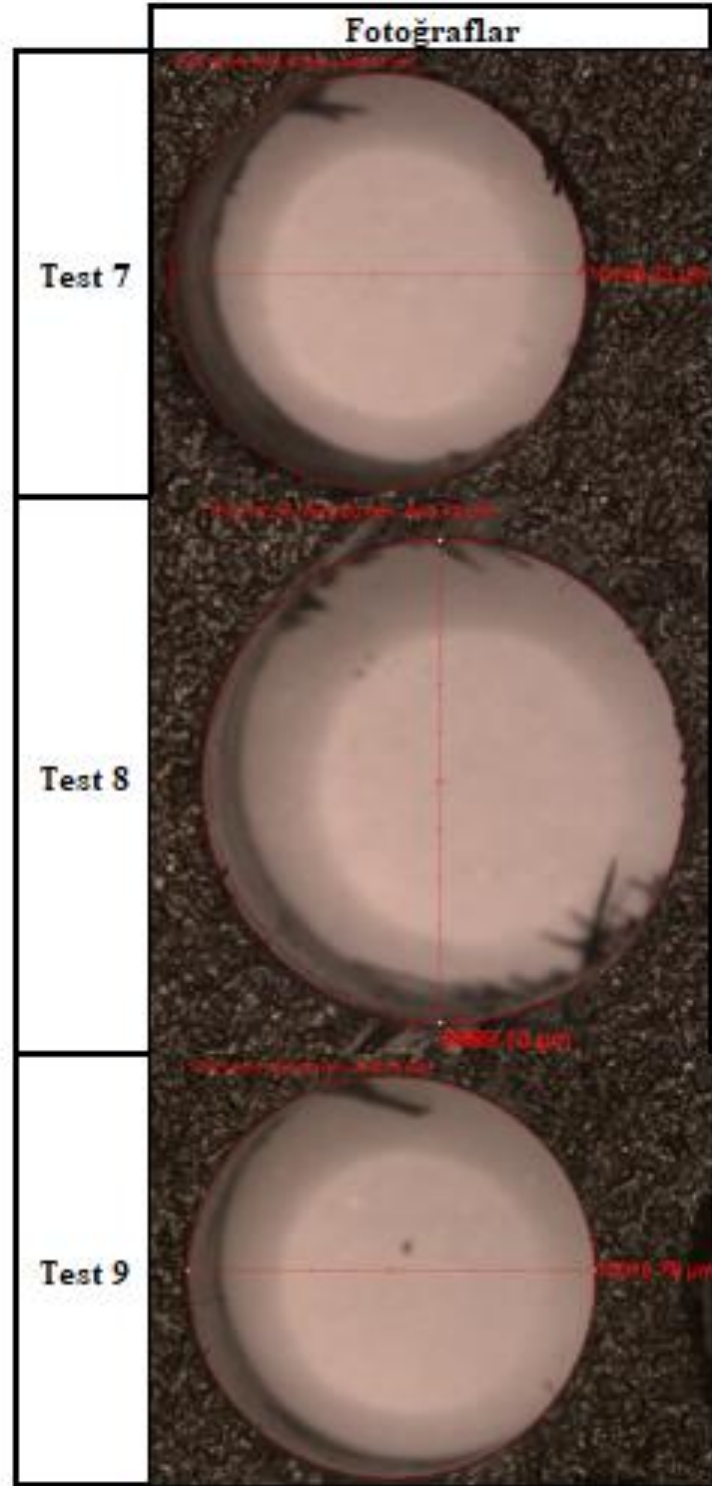


Şekil 5.28 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) giriş delik yüzeyleri.

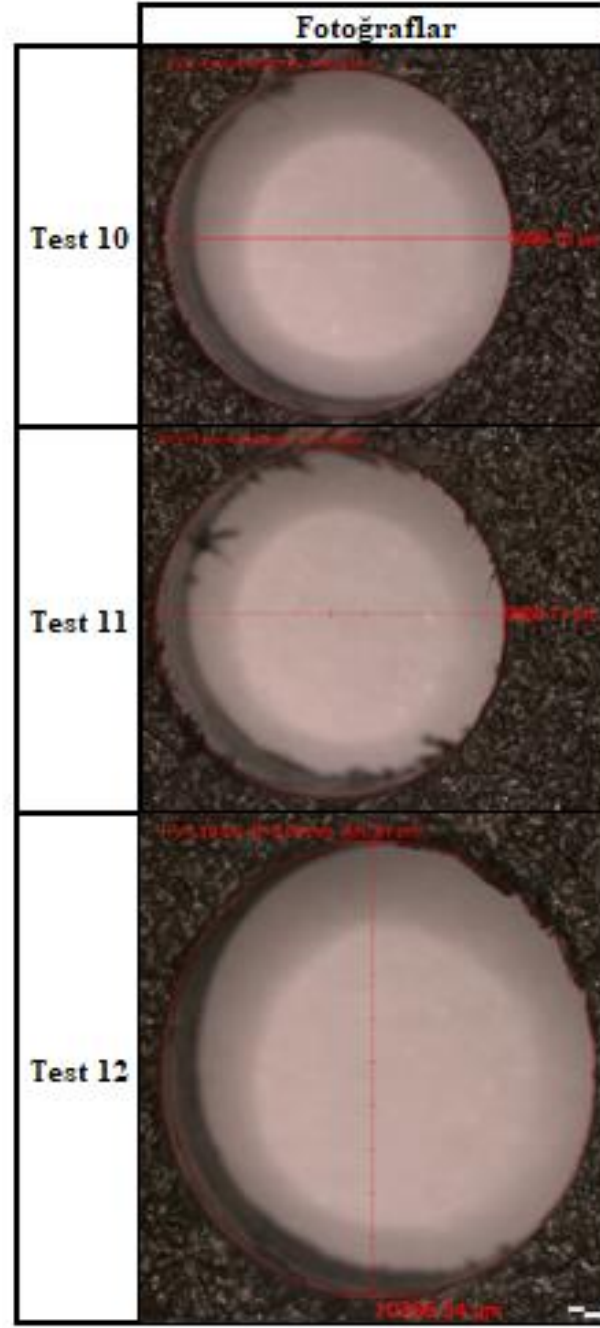


Şekil 5.29 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) giriş delik yüzeyleri-2.

Yapılan incelemeler sonunda ilk istif sırasının giriş yüzeyindeki deliklerinde herhangi bir delaminasyon veya elyaf ayrılması gözlenmedi. Delik çapı da toleranslara uygundur.

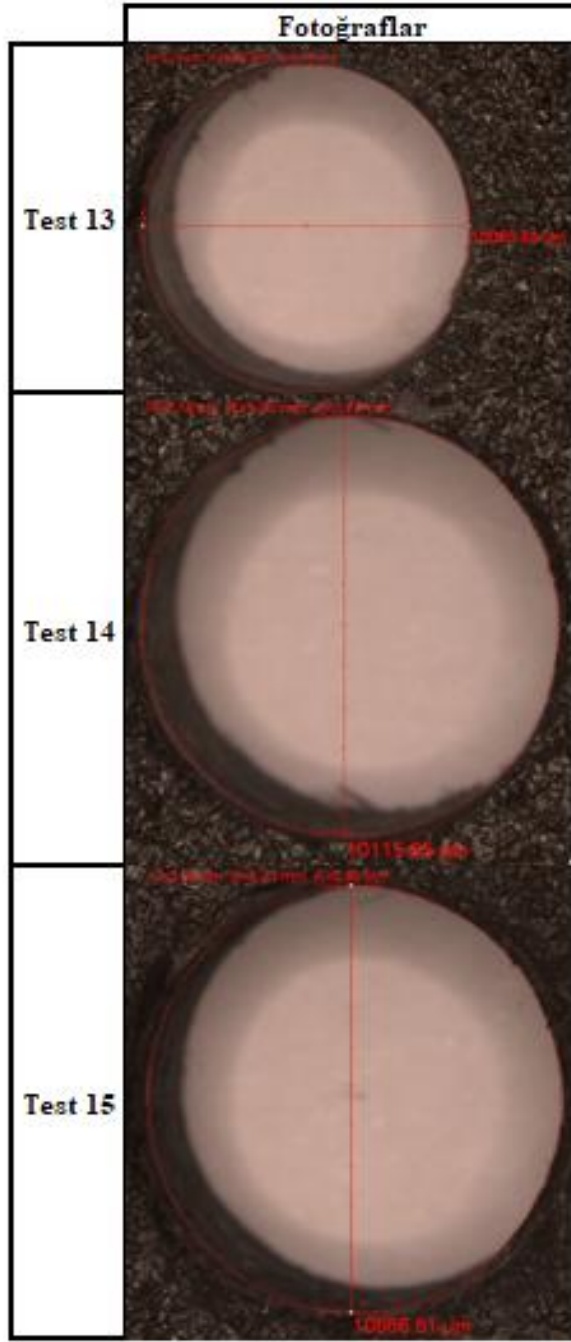


Şekil 5.30 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) giriş delik yüzeyleri.

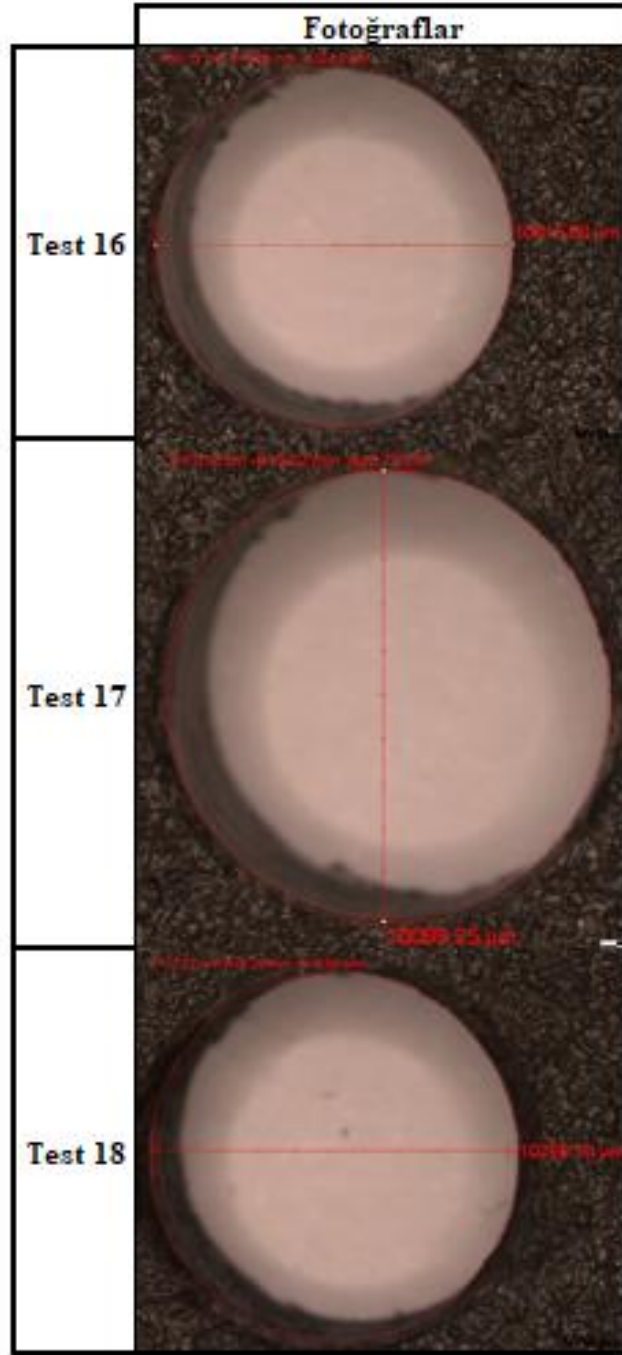


Şekil 5.31 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) giriş delik yüzeyleri-2.

İncelemelerin ardından ikinci istif sırasında girişteki delik çaplarının tolerans içinde kaldığı gözlemlendi. Sadece düşük delme hızı ve orta değerdeki ilerlemede delik çapı miktarı arttı. Test 9'un ardından ikinci takıma geçildi. Test 12'deki en yüksek delme hızı ve en düşük ilerlemede ise delaminasyon olduğu gözlemlendi. Benzer şekilde bu delik çapı da toleransın dışında kaldı.

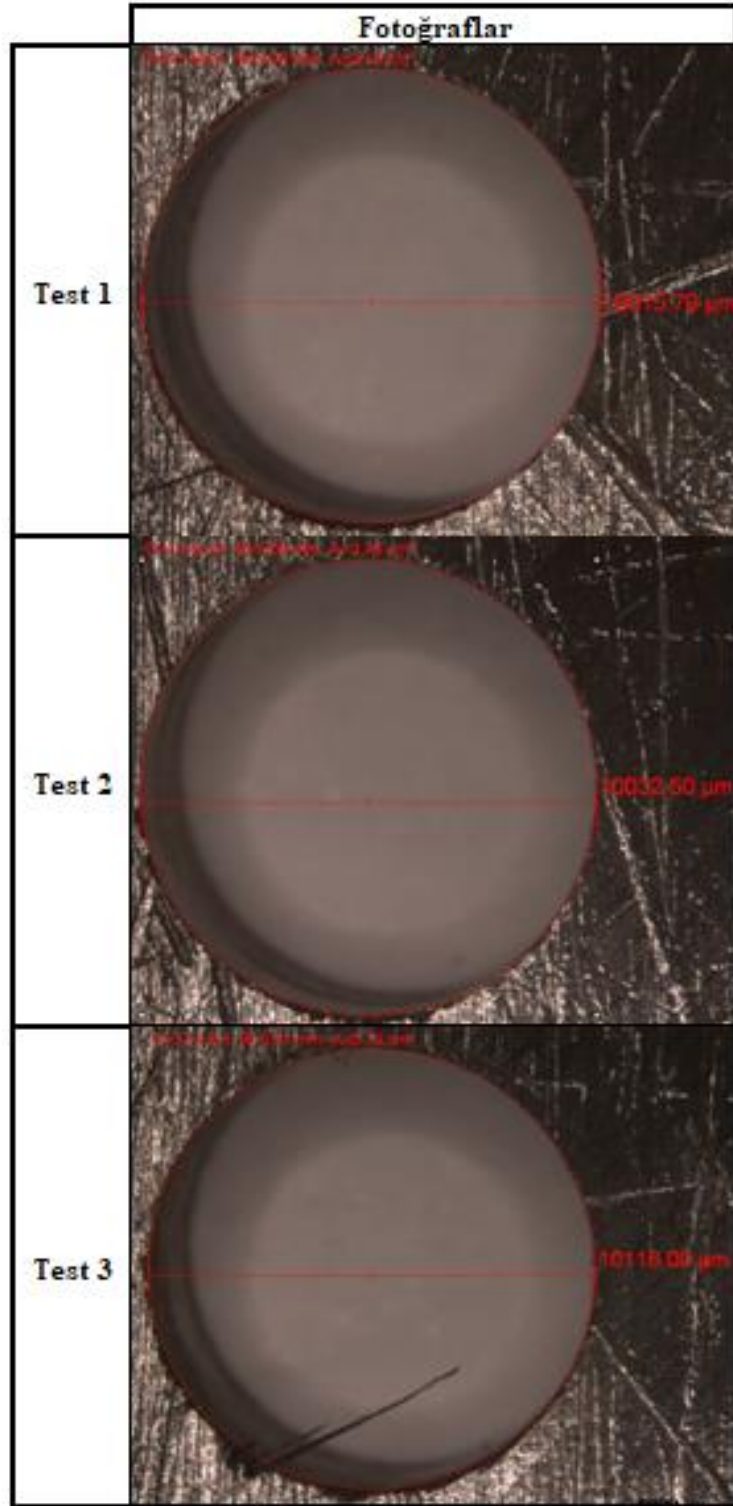


Şekil 5.32 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) giriş delik yüzeyleri.



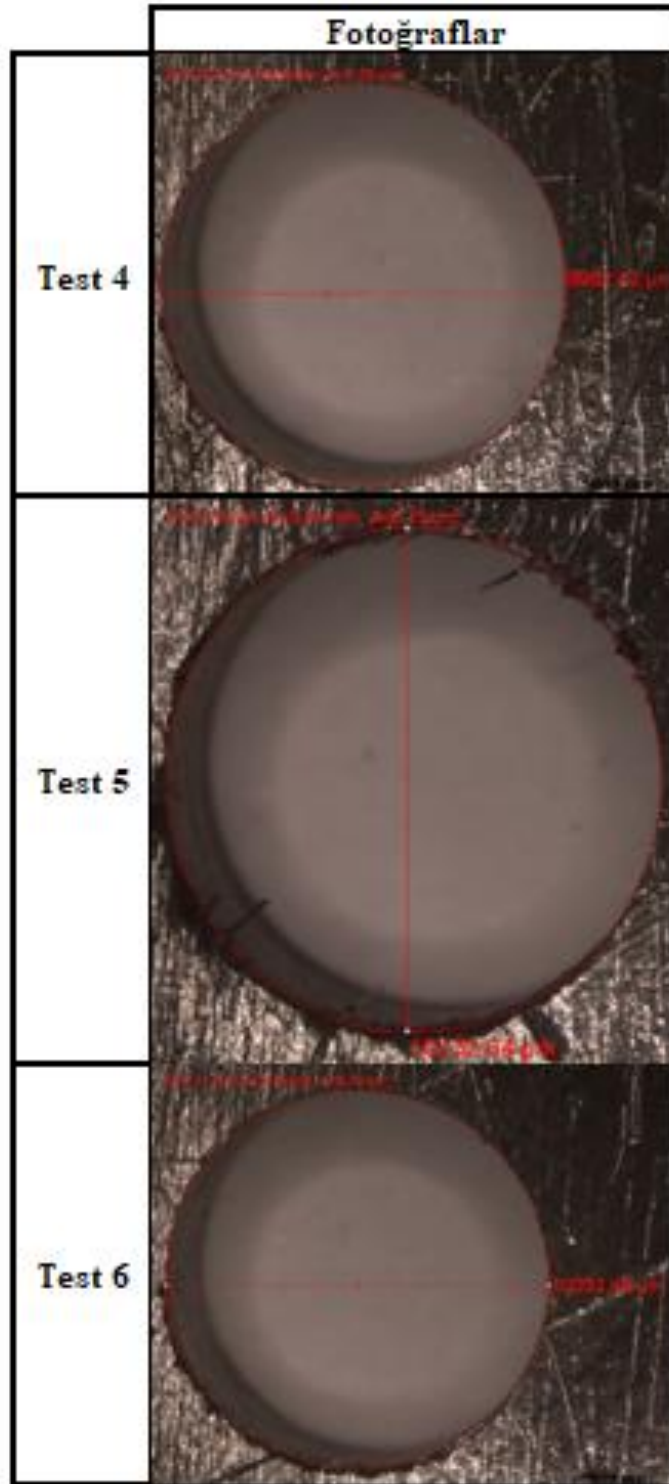
Şekil 5.33 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) giriş delik yüzeyleri-2.

Üçüncü istif sırasındaki testlerin ardından yapılan incelemede ise delik çaplarının arttığını ve delaminasyonların görüldüğü gözlemlendi. Özellikle Test 15 ve 18'deki en yüksek delme hızı ve orta değerdeki ilerlemede delik çapları toleransın oldukça dışında kalmış ve oluşan delaminasyon miktarı diğerlerinden çok daha fazla göze çarpmaktadır. Genel olarak delik yüzeyinin girişinde oluşan delaminasyonların sınırlı olduğu ve elyaf ayrılmalarının gözlemlenmediği söylenebilir. Delik yüzeyinin çıkışındaki incelemeler ise sırasıyla Şekil 5.34'ten 5.39'a kadar verildi.



Şekil 5.34 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) çıkış delik yüzeyleri.

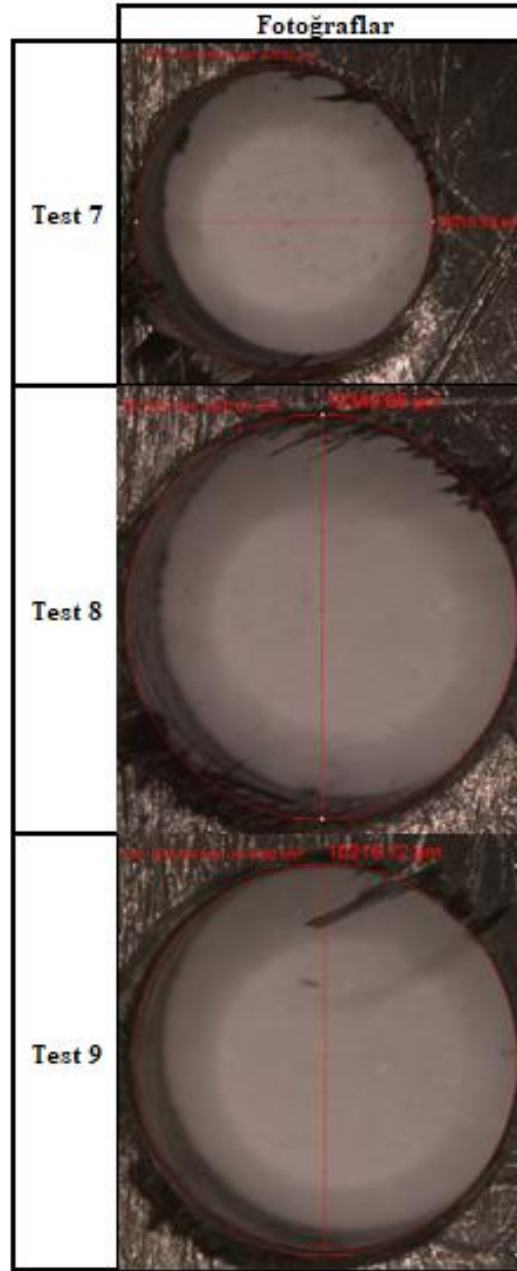
Delik çıkışında oluşan hasarların delik girişine nazaran daha yoğun gözüktüğü literatür araştırmalarında da görülmektedir. [19-21] En yüksek delme hızı ve en yüksek ilerleme değerinde elyaf ayrılması gözükmemektedir. Delik çapları ise toleransın içinde yer almaktadır.



Şekil 5.35 : İlk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) çıkış delik yüzeyleri-2.

Orta değerdeki delme hızı ve orta değerdeki ilerlemede çeşitli elyaf ayrılmaları gözlemlenmektedir. Aynı zamanda delik çapı toleransın dışında kalmaktadır. Genel

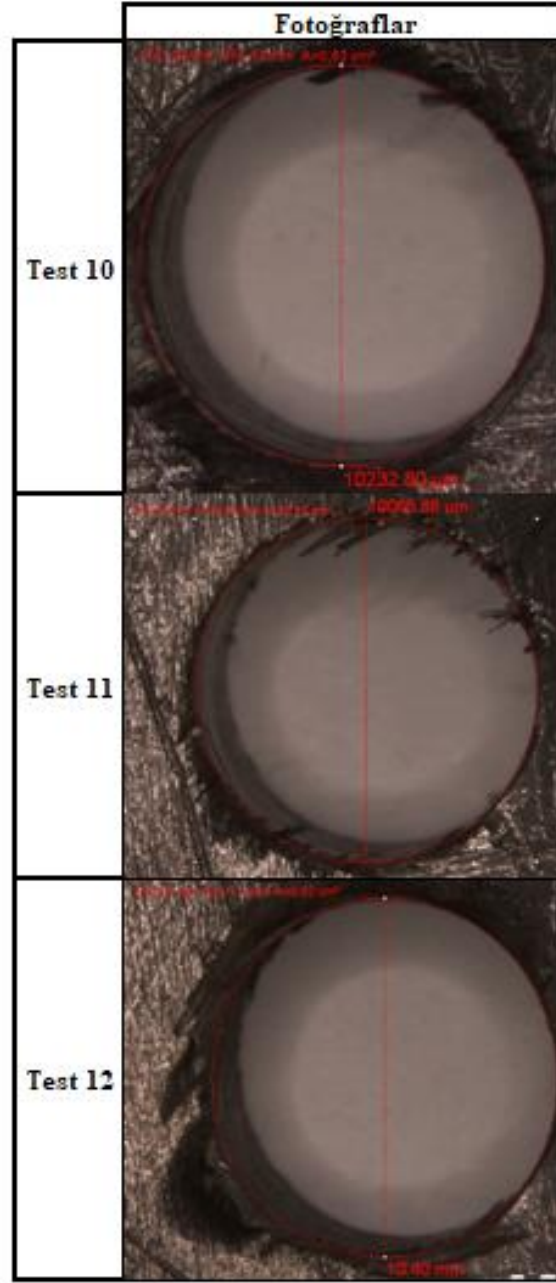
olarak düşük delme hızı ve düşük ilerleme değerinde herhangi bir sorun oluşmamaktadır.



Şekil 5.36 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) çıkış delik yüzeyleri.

İkinci istif sırasındaki delme işlemleri esnasında ise hasar tipleri baş göstermektedir. Tüm incelemelerde kötü bir yüzey elde edilirken orta değerdeki delem hızı ve en yüksek ilerleme değerinde oluşan elyaf ayrılmaları artmakta, delik çapı ise toleransı da aşmaktadır. Benzer şekilde en düşük delem hızı ve orta değerdeki ilerlemede de elyaf ayrılması gözlemlenmekte ancak delik çapı toleransın içinde yer almaktadır. En

yüksek delme hızı ve en düşük ilerlemede ise kesilmemiş elyaf gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra delik çapı toleransı aşmaktadır. Test 9'un ardından diğer matkaba geçildi.



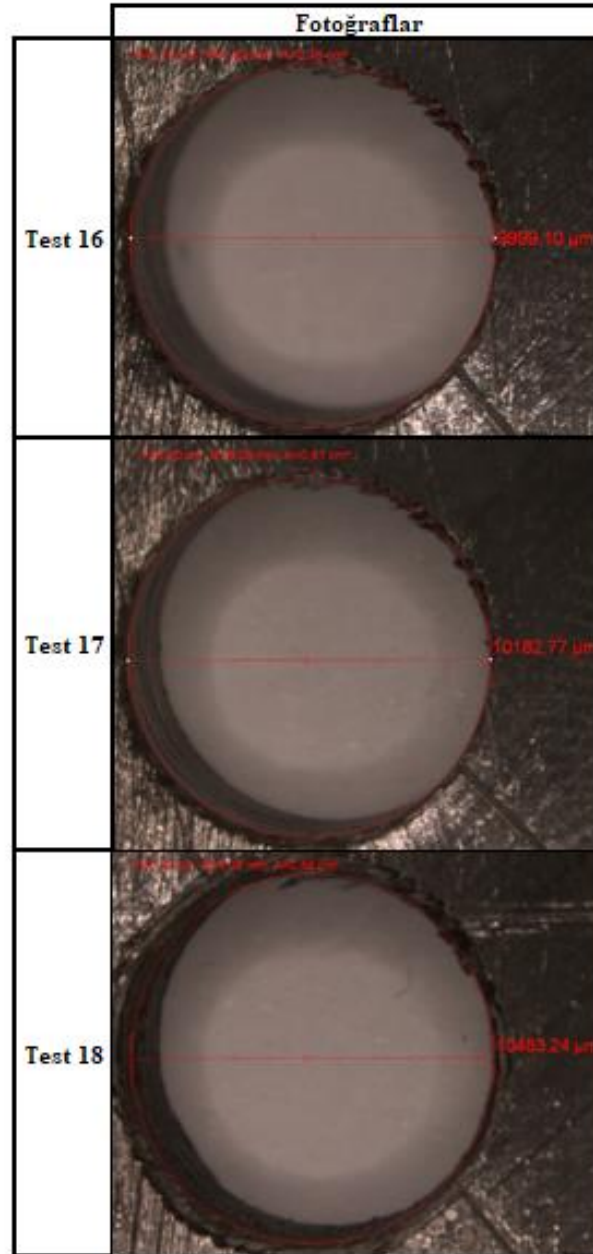
Şekil 5.37 : İkinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) çıkış delik yüzeyleri-2.

İncelemelerin ardından düşük delme hızı ve orta değerdeki ilerlemede kesilmemiş elyaf gözlemlendi. Orta delme hızı ve yüksek ilerlemede ise elyaf ayrılması gözlemlendi. Yüksek delme hızı ve düşük ilerlemede ise delaminasyon oluşmaktadır ve delik çapı toleransı aşmaktadır. Genel olarak ikinci istif sırasında yoğun hasarlar oluşmaktadır ve delik çapı değerleri toleransı aşmaktadır.



Şekil 5.38 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) çıkış delik yüzeyleri.

Üçüncü istif sırasındaki incelemelerde ise düşük delem hızı ve yüksek ilerlemede elyaf ayrılması gözlemlendi. Yüksek delme hızı ve orta ilerleme değerinde ise delaminasyon oluşmakta ve delik çapı toleransı aşmaktadır.



Şekil 5.39 : Üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) çıkış delik yüzeyleri-2.

Son incelemelerde ise yüksek delme hızı ve orta ilerlemede yoğun delaminasyon gözlemlenmekte ve delik çapı toleransları aşmaktadır. Deliklerin tümü incelendikten sonra deliklerin çıkışında oluşan delaminasyon, elyaf ayrılması ve kesilemeyen elyaf miktarlarının deliklerin girişlerine nazaran çok daha fazla olduğu gözlemlendi. İlk istif sırası olan Al/Ti/CFRP diziliminde delikte oluşan kusurların diğer istif sıralarına göre daha düşük miktarda kaldığı tespit edildi. Delme parametrelerinin etkisinin incelenmesi delaminasyon faktörleriyle birlikte yapılacak varyans analiziyle çok daha isabetli şekilde bulunacaktır.

5.4 Giriş ve Çıkış Delaminasyon Faktörlerinin Hesaplanması

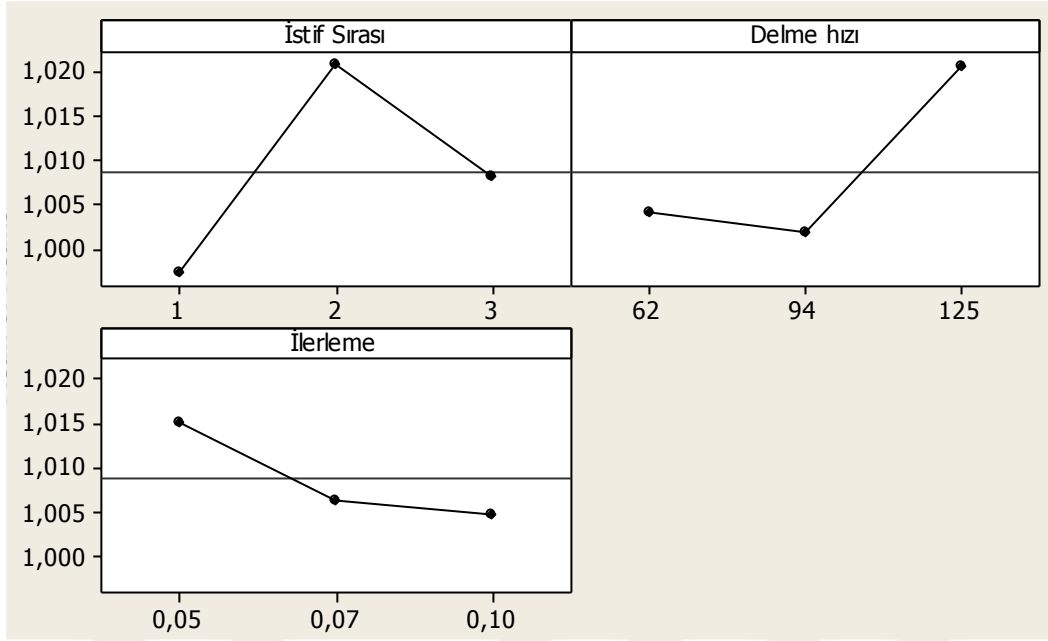
Nikon SMZ800 stereo optik mikroskobu yardımıyla incelenen CFRP malzemenin yüzeyinde gözlemlenen delaminasyonlar genel olarak düzenli bir yapıya sahip olduğu için Denklem 2.9 yardımıyla hesabın gerçekleştirilmesi uygundur. CFRP malzemesine girerken ve çıkarken oluşan delaminasyon miktarlarının farklı olması nedeniyle her iki bölüm için de delaminasyon faktörleri hesaplandı. İkişer tekrarlı yapılan çalışmalar sonucunda tespit edilen iki farklı delaminasyon faktörleri aritmetik ortalama alınmasının ardından teke indirilmiş ve bu hesaplar sonucunda ayrı ayrı varyans analizi uygulanmıştır. Giriş ve çıkış delaminasyon faktörlerinin değerleri sırasıyla Çizelge 5.7 ve 5.8’de verilmiştir. CFRP malzemesi için elde edilen ortalama giriş delaminasyon faktörleri değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan giriş delaminasyon faktörünün delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.40, 5.41 ve 5.42’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Gözlem sonucunda hesaplanan giriş delaminasyon faktörleri.

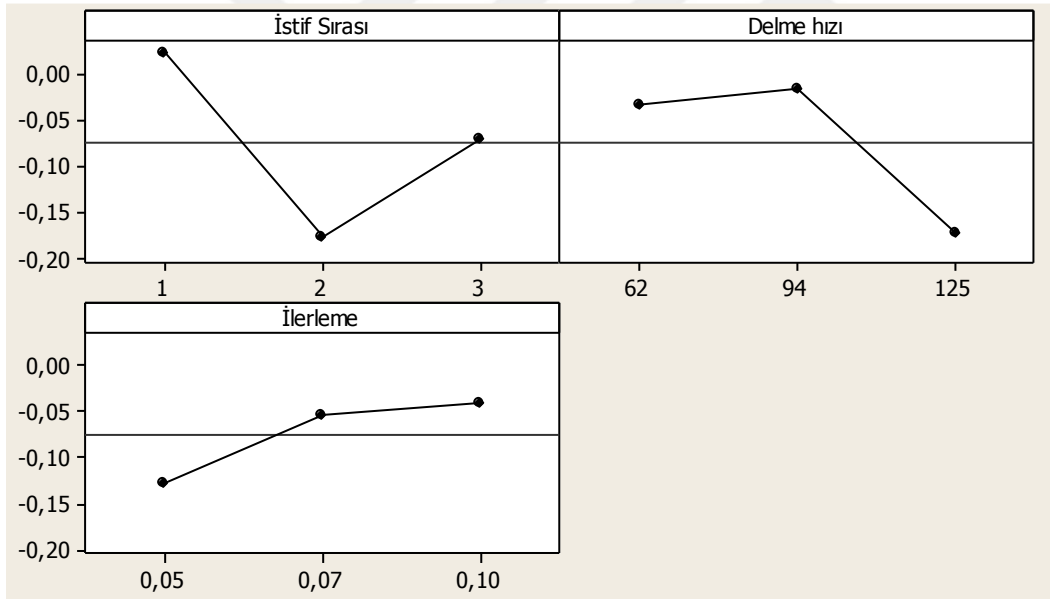
İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	Giriş Delaminasyon faktörü
Al/Ti/CFRP	62	0.05	1
Al/Ti/CFRP	94	0.07	0.996
Al/Ti/CFRP	125	0.1	0.996
CFRP/Al/Ti	62	0.07	1.0045
CFRP/Al/Ti	94	0.1	1.011
CFRP/Al/Ti	125	0.05	1.047
Ti/CFRP/Al	62	0.1	1.0075
Ti/CFRP/Al	94	0.05	0.9985
Ti/CFRP/Al	125	0.07	1.0185

Çizelge 5.8 : Gözlem sonucunda hesaplanan çıkış delaminasyon faktörleri.

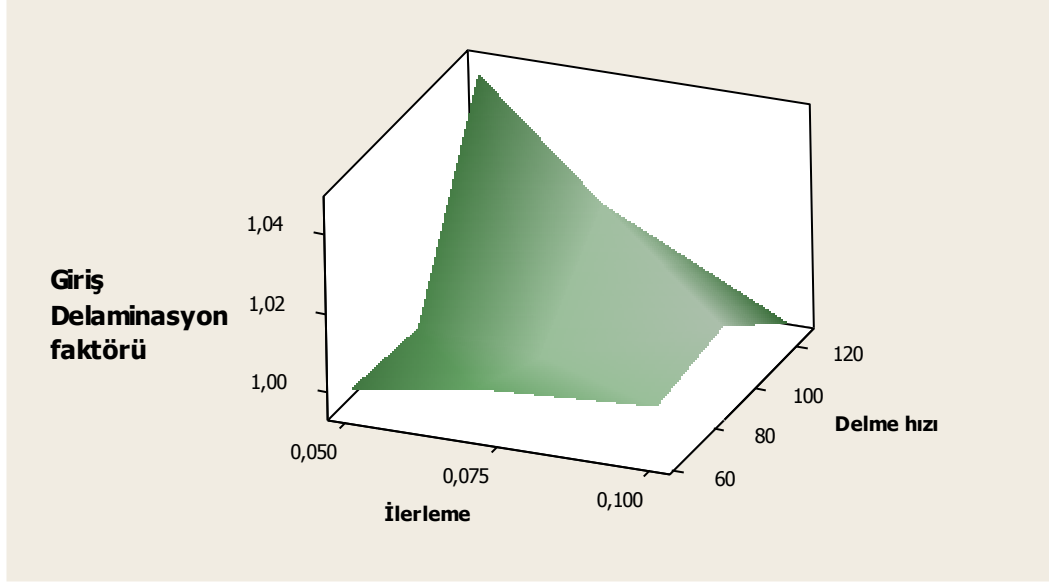
İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	Çıkış Delaminasyon faktörü
Al/Ti/CFRP	62	0.05	1.0045
Al/Ti/CFRP	94	0.07	1.008
Al/Ti/CFRP	125	0.1	1.011
CFRP/Al/Ti	62	0.07	1.0085
CFRP/Al/Ti	94	0.1	1.02
CFRP/Al/Ti	125	0.05	1.0555
Ti/CFRP/Al	62	0.1	1.0125
Ti/CFRP/Al	94	0.05	1.021
Ti/CFRP/Al	125	0.07	1.031



Şekil 5.40 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için giriş delaminasyon faktörünün değişim grafiği.



Şekil 5.41 : CFRP malzemesinde S/N oranları için giriş delaminasyon faktörlerinin değişim grafiği.

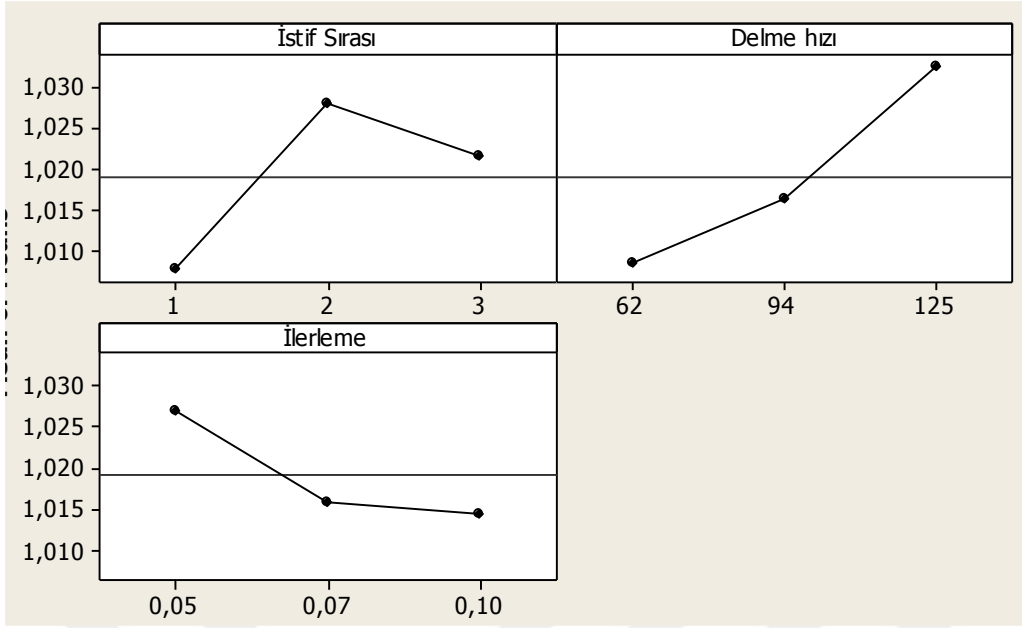


Şekil 5.42 : CFRP malzemesinde giriş delaminasyon faktörlerinin delme parametrelerine göre değişim grafiği.

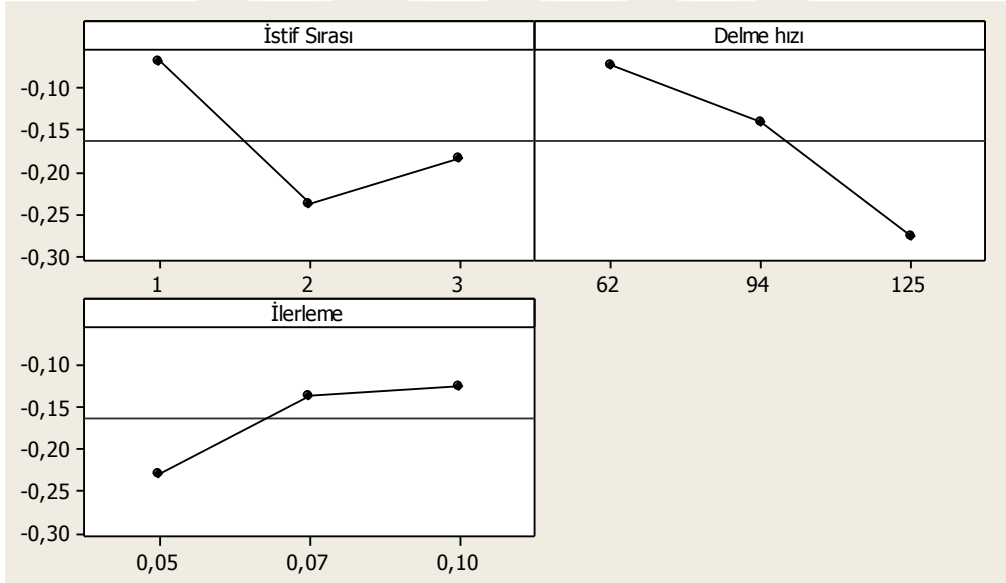
“Daha küçük daha iyi” özelliğine göre oluşturulan S/N oranlarına göre en düşük giriş delaminasyon faktörü Al/Ti/CFRP diziliminde görülürken, en yüksek giriş delaminasyon faktörü CFRP/Al/Ti diziliminde oluşmaktadır. Giriş delaminasyon faktörünü en çok değiştiren faktörün ise istif sırası olduğu görüldü. İkinci sırada gelen delme hızı orta değerde en iyi sonucu verirken, hız arttıkça oluşan delaminasyon faktörü de artmaktadır. Giriş delaminasyon faktörünü en az değiştiren faktör olan ilerlemede ise ilerleme değeri arttıkça elde edilen giriş delaminasyon faktörünün düştüğü gözlemlendi. Regresyon denklemi ise;

$$\text{Giriş Delaminasyon faktörü} = 0.999 + 0.000010 (\text{delme hızı})^2 + 20 (\text{ilerleme})^2 + 0.000167 (\text{istif sırası})(\text{delme hızı}) - 0.284 (\text{istif sırası})(\text{ilerleme}) - 0.0273 (\text{delme hızı})(\text{ilerleme})' \text{dir.}$$

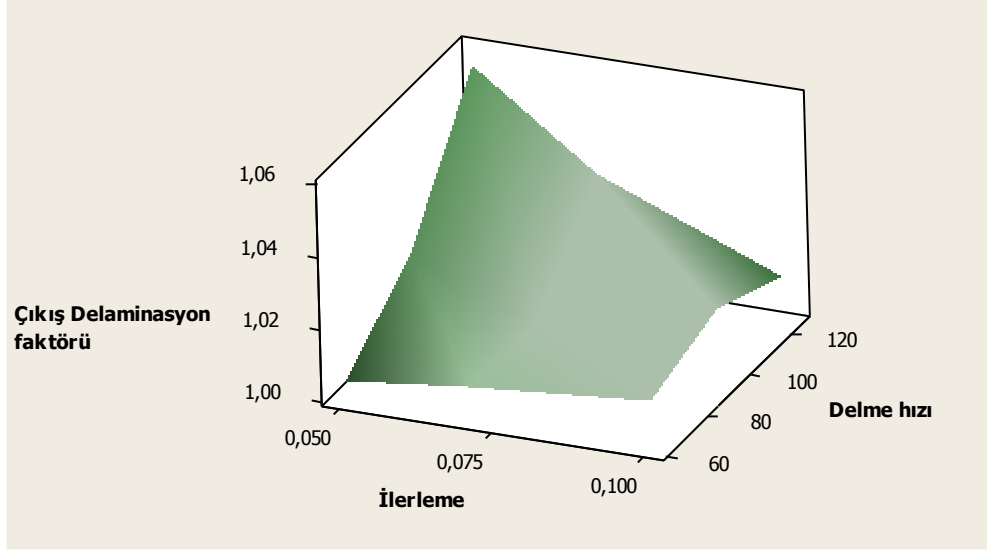
CFRP malzemesi için elde edilen ortalama çıkış delaminasyon faktörleri değerleri, S/N oranı grafikleri ve oluşan çıkış delaminasyon faktörünün delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.43, 5.44 ve 5.45’te verildi.



Şekil 5.43 : CFRP malzemesinde ortalama değerler için çıkış delaminasyon faktörünün değişim grafiği.



Şekil 5.44 : CFRP malzemesinde S/N oranları için çıkış delaminasyon faktörlerinin değişim grafiği.



Şekil 5.45 : CFRP malzemesinde çıkış delaminasyon faktörlerinin delme parametrelerine göre değişim grafiği.

Giriş delaminasyon faktörüne benzer şekilde yapılan varyans analizine göre; ilk istif sırasındaki (Al/Ti/CFRP) çıkış delaminasyon faktörü değeri diğer sıralamalara göre daha düşüktür. En yüksek çıkış delaminasyon faktörüne ise ikinci istif sırasında (CFRP/Al/Ti) ulaşıldı. Ancak giriş delaminasyon faktörlerine göre en büyük fark ise bu değeri en çok değiştiren faktör delme hızıdır. Genel olarak etki sırasında ilk sırada yer alan istif sırası ise ikinci sıraya geriledi. Delme hızı arttıkça çıkış delaminasyon faktörü artmaktadır. Ters şekilde ilerleme değeri arttıkça çıkış delaminasyon faktörü ise düşmektedir. Regresyon denklemi ise;

Çıkış Delaminasyon faktörü = $1 + 0.000008 (\text{delme hızı})^2 + 22.3 (\text{ilerleme})^2 + 0.000306 (\text{istif sırası})(\text{delme hızı}) - 0.447 (\text{istif sırası})(\text{ilerleme}) - 0.0269 (\text{delme hızı})(\text{ilerleme})$ 'dir.

5.5 Harcanılan Enerji Hesabı

Delik delme işleminin gerçekleştirilmesi için gereken enerjinin hesap edilmesi uygulanması açısından elzemdir. Bunun yanı sıra bu süreç içinde mümkün olan en az enerjiyi açığa çıkaracak olan kombinasyonun kullanımı ve delme parametrelerinin seçimi en doğru işlem olacaktır. Enerji hesabı formülü olarak delme hızının ve ilerlemenin değişken olduğu bir formülün kullanılması gerekmektedir.

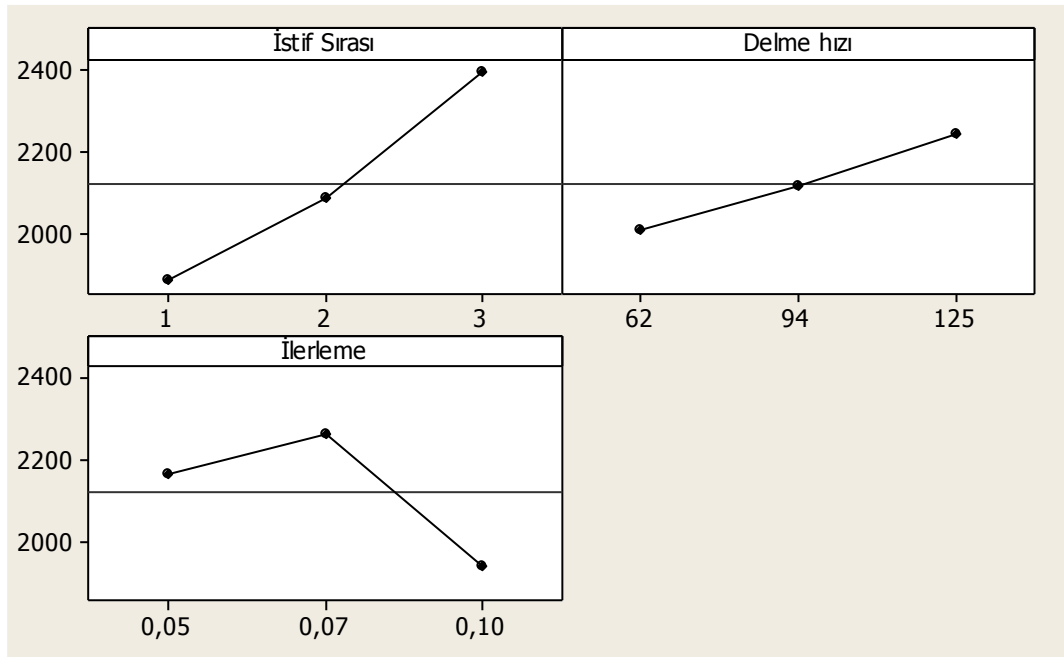
$$E = \left[\int_0^{t_f} F_z(t) f N dt \right] + \left[\int_0^{t_m} M_z(t) N \frac{2\pi}{60} dt \right] \quad (5.1)$$

Bu denklemde E delik delme için gereken enerji, F_z itme kuvveti, f ilerleme değeri, N devir, M_z z yönünde oluşan tork değeri t_f ve t_m ise delik delme işleminin sona erdiği zamanları belirtmektedir. [41]

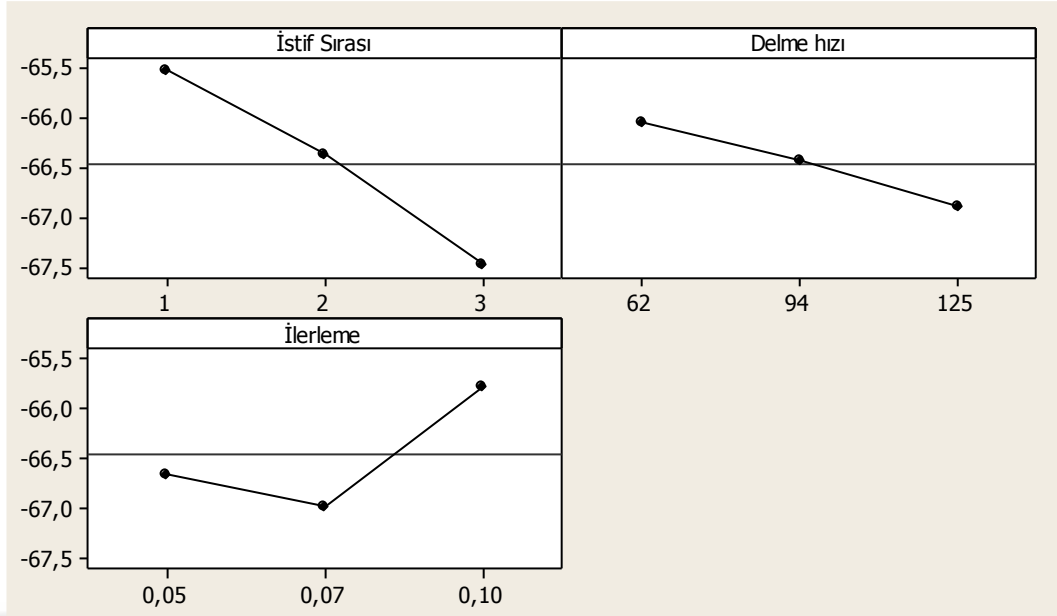
Testlerin ardından yapılan enerji hesaplamaları Çizelge 5.9’da verildi. Hesaplanan ortalama enerji değerleri, S/N oranı grafikleri ve hesaplanan enerjinin delme parametrelerine göre değişimi sırasıyla Şekil 5.46, 5.47 ve 5.48’de verildi.

Çizelge 5.9 : Hesaplanan enerji değerleri.

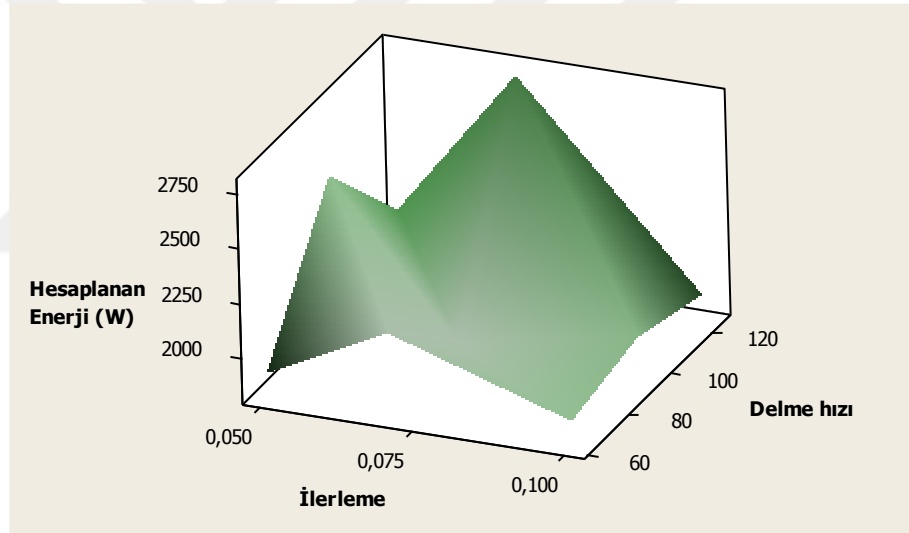
İstif Sırası	Delme hızı (m/dak)	İlerleme Değeri (mm/dev)	Hesaplanan Enerji (W)
Al/Ti/CFRP	62	0.05	1917.645
Al/Ti/CFRP	94	0.07	1844.995
Al/Ti/CFRP	125	0.1	1899.945
CFRP/Al/Ti	62	0.07	2185.785
CFRP/Al/Ti	94	0.1	2000.255
CFRP/Al/Ti	125	0.05	2066.81
Ti/CFRP/Al	62	0.1	1918.555
Ti/CFRP/Al	94	0.05	2504.755
Ti/CFRP/Al	125	0.07	2763.16



Şekil 5.46 : Ortalama değerler için hesaplanan enerjinin değişim grafiği.



Şekil 5.47 : S/N oranları için hesaplanan enerjinin değişim grafiği.



Şekil 5.48 : Hesaplanan enerji değerinin delme parametrelerine göre değişim grafiği.

“Daha küçük daha iyi” özelliğine göre oluşturulan S/N oranlarına göre en düşük harcanan enerji değerine ilk istif sırası (Al/Ti/CFRP) diziliminde ulaşılmaktadır. Harcanan en yüksek enerji değeri ise üçüncü istif sırasında (Ti/CFRP/Al) meydana gelmektedir. Gereken enerjiyi en çok değiştiren faktör de istif sırasıdır. İkinci sırayı ise ilerleme almaktadır. Delme hızı ise en az etkiyi yaratan faktördür. En yüksek ilerleme değerinde hesaplanan enerji en düşük seviyede kalırken, orta değerdeki ilerlemede ise en yüksek enerji gereksinimi bulunmaktadır. Delme hızı parametresine göre ise delme hızı arttıkça harcanan enerji düzenli olarak artmaktadır. Ortaya çıkan regresyon denklemi ise;

Hesaplanan Enerji (W) = 1628 + 254 İstif Sırası + 3.74 Delme hızı - 4972 İlerleme'dir.

5.6 Genel Değerlendirme

Yapılan tüm incelemelerin ardından talep edilen sonuçlar ve bunların elde edilmesi için faktörlerde seçilmesi gereken değerleri veren sonuç listesi Çizelge 5.10'da verildi.

Çizelge 5.10 : Sonuç listesi.

Sonuç Listesi	İstif Sırası	Delme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)
En düşük kuvvet (CFRP)	CFRP/Al/Ti	62	0.05
En düşük kuvvet (Ti)	CFRP/Al/Ti	94	0.05
En düşük kuvvet (Al)	CFRP/Al/Ti	62	0.05
En düşük tork (CFRP)	CFRP/Al/Ti	62	0.05
En düşük tork (Ti)	Al/Ti/CFRP	62	0.05
En düşük tork (Al)	CFRP/Al/Ti	94	0.05
CFRP delik içi yüzey pürüzlülüğü	Al/Ti/CFRP	62	0.1
Giriş delaminasyon faktörü	Al/Ti/CFRP	94	0.1
Çıkış delaminasyon faktörü	Al/Ti/CFRP	62	0.1
Delik delme için harcanan enerji	Al/Ti/CFRP	62	0.1

Sonuçlar analiz edildiğinde genel olarak tüm malzemelerde en düşük kuvvet ve tork değerlerini elde etmek için seçilmesi gereken faktörler sırasıyla ikinci istif sırası (CFRP/Al/Ti), en düşük delme hızı (62 m/dak) ve en düşük ilerleme değeridir (0.05 mm/dev). Sadece titanyum alaşımında en düşük kuvvet ve alüminyum alaşımında en düşük kuvvet ve tork elde etme sırasında delme hızı 94 m/dak'ya çıkartılmalıdır. Aynı zamanda titanyum alaşımı için en düşük torka ulaşmak için ilk istif sırası (Al/Ti/CFRP) kullanılmalıdır.

Sanayide birçok ürünün reddine sebep olan CFRP delik içi yüzey pürüzlülük değerleri ve delaminasyon faktörleri göz önüne alındığında ise istif sırası olarak Al/Ti/CFRP'nin tercih edilmesi gerektiği ön plana çıkmaktadır. Delme hızı ise en düşük değer olan 62 m/dak'ya seçilmesi uygundur. Sadece en düşük giriş delaminasyon faktörünün elde edilmesinde delme hızı 94 m/dak'ya çıkarılması gerekmektedir. İlerlemede ise en yüksek ilerleme değeri olan 0.1 mm/dev tercih edilmelidir.

Varyans analizinin sonuçlarında ise sonuçları en çok etkileyen faktörün istif sırası olduğu göze çarpmaktadır. Bu nedenle delik delme işlemleri gerçekleştirilmeden önce doğru istif sırasının seçimi büyük önem kazanmaktadır. Çalışmalarda ise daha yüksek yüzey kalitesi değerlerini veren istif sırası ise (Al/Ti/CFRP) oldu.

Genel olarak sonuçları en çok etkileyen ikinci faktör ise ilerleme değeri olmuştur. İlerleme değerinin ise titanyum alaşımından oluşan yüksek sıcaklıktaki talaşların hızla tahliyesinin gerçekleşmesi amaçlandığı için yüksek seçilmesi uygundur.

Yüksek delme hızında delik delme işlemi ise hibrit kompozit malzemesinin içinde titanyum alaşımının mevcut olması ve bu malzemenin yüksek delme hızında oluşan yüksek sıcaklıktaki talaşlarının CFRP malzemesinin hem yüzeyine hem de delik içine zarar vermesi nedeniyle istenilen yüzey kalitesi sonuçlarını sağlamadı. Bu nedenle operasyonların düşük veya orta delme hızında yapılması uygundur.

- Titanyum alaşımının neden olduğu takım aşınmasının CFRP malzemesinden kaynaklı oluşan takım aşınmasından daha fazla olduğu gözlenmektedir. Bu değerler radyal ağız aşınması olarak yüzde 11, yan yüzey aşınması olarak yüzde 41 olarak ölçüldü. Alüminyum alaşımında delik delinirken oluşan takım aşınması uzunluğu CFRP malzemesine göre yaklaşık yüzde 35, titanyum alaşımına göre ise yüzde 47 daha düşüktür.
- Al/Ti/CFRP istif sırasında 6 delik ve CFRP/Ti/Al istif sırasında 3 delik delinmesinden sonra ölçülen takım aşınmaları, radyal ağız aşınması için 123 μm , yan yüzey aşınması ise 112 μm 'dir. CFRP/Ti/Al istif sırasında 3 ardından Ti/CFRP/Al istif sırasında 6 delik delinmesi sonucunda oluşan radyal ağız aşınması yüzde 32, yan yüzey aşınması ise yüzde 62 daha fazladır.
- CFRP malzemesinde elde edilen en düşük kuvvet CFRP/Al/Ti istif sırasında, 62 m/dak delme hızında ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde meydana gelir. En yüksek kuvvet değerinin elde edildiği Ti/CFRP/Al istif sırasında oluşan kuvvet, en düşük kuvvetin yaklaşık olarak yüzde 50 daha fazlasıdır. CFRP malzemesinde ölçülen kuvvetlerin delme hızı arttıkça arttığı gözlemlendi.
- Titanyum alaşımında ölçülen kuvvetlerde CFRP/Al/Ti istif sırasında, 94 m/dak delme hızında ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde en düşük olarak ölçüldü. En yüksek kuvvetin elde edildiği istif sırası CFRP'ye benzer şekilde Ti/CFRP/Al

sıralamasıdır. Ti/CFRP/Al istif sırasında elde edilen kuvvet, CFRP/Al/Ti istif sırasında ölçülen kuvvete nazaran yüzde 34 daha fazladır.

- Alüminyum alaşımında ölçülen kuvvetlerde de sonuçlar benzerdir. En düşük kuvvete CFRP/Al/Ti istif sırası, 94 m/dak delme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ulaşılmaktadır. Ti/CFRP/Al istif sırasında ölçülen kuvvet, CFRP/Al/Ti istif sırasında belirlenen kuvvetten yaklaşık olarak yüzde 45 daha fazladır.
- İstif sırasından bağımsız yüksek delme hızlarında ve düşük ilerleme değerinde elde edilen kuvvet ve tork değerleri en düşüktür. Ancak istif sırası kuvvet ve torkun değişimini sağlayan etkili parametre olarak belirlendi.
- CFRP malzemesinde ölçülen en düşük tork CFRP/Al/Ti istif sırasında, 94 m/dak delme hızında ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde oluşmaktadır. CFRP/Al/Ti istif sırasında ölçülen tork değerinin, en yüksek tork değerinin ölçüldüğü Al/Ti/CFRP istif sırasındakinden yaklaşık yüzde 45 daha azdır.
- Titanyum alaşımında ise en düşük tork değeri Al/Ti/CFRP istif sırasında, 94 m/dak delme hızında ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde elde edilmektedir. Al/Ti/CFRP istif sırasında ölçülen tork değerinin, en yüksek tork değerinin erişildiği Ti/CFRP/Al istif sırasındakinden yaklaşık yüzde 33 daha azdır.
- Alüminyum alaşımında en düşük tork değeri CFRP/Al/Ti istif sırasında, 94 m/dak delme hızında ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde oluşmaktadır. CFRP/Al/Ti istif sırasında ölçülen tork değerinin, en yüksek tork değerinin elde edildiği Ti/CFRP/Al istif sırasındakinden yüzde 25 daha azdır.
- CFRP malzemesi içinde ölçülen en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri Al/Ti/CFRP istif sırasında, 62 m/dak delme hızında ve 0.1 mm/dev ilerleme değerinde elde edilmektedir. En etkili parameter istif sırası, etkisi en az olan parameter ise ilerlemedir. Al/Ti/CFRP istif sırasında ölçülen yüzey pürüzlülük değeri, diğer istif sıralarının yaklaşık olarak yarısıdır.
- En düşük giriş delaminasyon faktörü değerinin Al/Ti/CFRP istif sırasında, 94 m/dak delme hızında ve 0.1 mm/dev ilerleme değerinde elde edilmektedir.

- En düşük çıkış delaminasyon faktörü değerinin benzer şekilde Al/Ti/CFRP istif sırasında, 62 m/dak delme hızında ve 0.1 mm/dev ilerleme değerinde meydana gelmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon faktörü değerinde titanyum alaşımının işlenebilirlik özelliklerinin ön plana çıktığı gözlemlenmektedir. Çıkış delaminasyon faktörü değerinin, giriş delaminasyon faktörü değerlerinden yüzde 3'e varan miktarlarda daha fazla olduğu görüldü.
- Ti/CFRP/Al istif sırasında oluşan delik çaplarının artarak tolerans dışına çıktığı ve delaminasyon oluşumları gözlenmektedir.
- Matkap çıkış yüzeyinde Ti/CFRP/Al istif sırasında, 125 m/dak delme hızında ve 0.07 mm/dev ilerleme değerinde delaminasyon oluşmaktadır. CFRP/Al/Ti istif sırasında ise elyaf ayrılması ve kesilmemiş elyaf oluşumları görülmektedir.
- Harcanılan en düşük enerji değeri Al/Ti/CFRP sırasında, 62 m/dak delme hızında ve 0.1 mm/dev ilerleme değerinde ölçüldü. Delme hızının artmasıyla harcanan enerjinin lineer şekilde arttığı görüldü. Ti/CFRP/Al istif sırasında hesaplanan enerjiler, Al/Ti/CFRP istif sırasındakilere göre yüzde 20 daha fazladır.
- 0.07 mm/dev ilerleme değerinde hesaplanan enerji, 0.1 mm/dev ilerleme değerine nazaran yüzde 10 daha fazladır. Benzer şekilde 125 m/dak delme hızında hesaplanan enerji, 62 m/dak delme hızında hesaplanan enerjiye göre yaklaşık yüzde 10 daha fazladır.

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince (Proje Numarası: 41261) desteklenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] **Martinsen K., Hu S. J., & Carlson B. E.** (2015). *Joining of dissimilar materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(2), 679–699.
- [2] **Biron M.** (2004). *Thermosets and Composites: Chapter 1 - Outline of the actual situation of plastics compared to conventional materials*, 1-30.
- [3] **Sandvik Coromant** (2019). *Hole requirement and Quality, Aerospace Composite Training Aircraft Materials*
- [4] **Daniel IM, Ishai O.** (1994). *Engineering Mechanics of Composite Structures*, Oxford University Press
- [5] **Savage G.** (2008). *Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing (Honda Racing F1)*
- [6] **Callister, W. D.** (1997). *Materials science and engineering: An introduction*, New York: John Wiley & Sons.
- [7] **Aran A.** (1990). *Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notlari*
- [8] **Kalpakkian S., Schmid S. R.** (2003). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 4th ed., Pearson Education Inc.
- [9] **Metals Handbook** (1990). *Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International 10th Ed.
- [10] **Güleç Ş., Aran A.** (1995). *Malzeme Bilgisi Cilt II*
- [11] **Sha W., Malinov S.** (2009). *Titanium Alloys: Modelling of Microstructure, Properties and Applications*, Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, s. 1-8
- [12] **Xu J., Li C., Mi S., An Q., Chen M.** (2018). *Study of drilling-induced defects for CFRP composites by using new criteria*, Composite Structures
- [13] **Aran A.** (2007). *Manufacturing Properties of Engineering Materials Lecture Notes*
- [14] **Groover M.P.** (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- [15] **Boyer R., Welsch G., Collings E.W.** (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, Materials Park, OH
- [16] **Tonshoff H.L., Spintig W., Konig W., Neises A.** (1994). *Machining of Holes Developments in Drilling Technology*, Annuals of the CIRP, 43(2): 551-560.
- [17] **De Lacalle L.L., Fernandez A., Olvera D., Lamikiz A., Rodriguez C., Elias A.** (2011). *Monitoring deep twist drilling for a rapid manufacturing of light high-strength parts*, Mechanical systems and signal processing, 25(7), 2745-2752

- [18] **Altintas, Y.** (2012). *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [19] **Davim J.P.** (2008). *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Springer, ISBN 978-1-84800-212-8, 184-188
- [20] **Chen WC.** (1997). *Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates*, International J Mach Tools Manufacturing, 37(8): 1097–1108.
- [21] **Davim J, Rubio J, Abrao A.** (2007). *A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates*. Composite Science and Technology; 67: 1939–1945.
- [22] **Eneyew E. D., Ramulu M.** (2014). *Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites*, Journal of Materials Research and Technology, 3(4): 354-362
- [23] **Fei S., Zheng L., Sun F., Wang Z., Deng Z., Qiu X.** (2018). *Novel drill bit based on the step-control scheme for reducing the CFRP delamination*, Journal of Materials Processing Technology, 262: 157–167
- [24] **Gaitonde V.N., Karnik S. R., Rubio J.C., Correia A.E., Abrao A.M., 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: 431-438
- [25] **Segawa S., Tamura J., Suzuki S., Oka H., Meguro K., Satou Y.** (2013). *Development of a Drill Bit for CFRP/Aluminum- Alloy Stack: To Improve Flexibility, Economical Efficiency and Work Environment*, SAE International, 01-2227, ISSN 0148-7191
- [26] **Park K.H., Beal A., Kim D., Kwon P., Lantrip J.** (2011). *Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools*, Wear, 271: 2826– 2835
- [27] **Zitoune R., Krishnaraj V., Collombet F.** (2010). *Study of drilling of composite material and aluminium stack*, Composite Structures, 92: 1246–1255
- [28] **Kim D., Beal A., Kwon P.** (2016). *Effect of Tool Wear on Hole Quality in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic– Titanium Alloy Stacks Using Tungsten Carbide and Polycrystalline Diamond Tools*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 138
- [29] **Brinksmeier E., Janssen R.** (2002). *Drilling of Multi-Layer Composite Materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and Aluminum Alloys*
- [30] **Kuo C.L., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Thomas W., M'Saoubi R., Pearson D., Leahy W.** (2014). *Tool wear and hole quality when singleshot drilling of metallic-composite stacks with diamond-coated tools*, Journal of Engineering Manufacture, 228(10): 1314-1322
- [31] **Kuo C.L., Soo S.L., Aspinwall D.K., Carr C., Bradley S., M'Saoubi R., Leahy W.** (2018). *Development of single step drilling technology for multi layermetallic-composite stacks using uncoated and PVD coated carbide tools*, Journal of Manufacturing Processes, 31: 286–300

- [32] **Hrechuk A., Bushlya V., Stahl J.** (2018). *Hole-quality evaluation in drilling fiber-reinforced composites*, Composite Structures, 204: 378-387
- [33] **Shyla I., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Dawson S., Pretorius C.J.** (2010). *Drilling of Titanium/CFRP/Aluminium Stacks*, Key Engineering Materials Vols, 447-448
- [34] **Kılıçkap E.** (2012). *CETP Kompozitlerin Delinmesinde Oluşan Deformasyona Delme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi*, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 76-84
- [35] **Kashaev N., Ventzke V., Riekehr S., Dorn F., Horstmann M.** (2015). *Assessment of alternative joining techniques for Ti-6Al-4V/CFRP hybrid joints regarding tensile and fatigue strength*, Materials and Design 81: 73–81
- [36] **Huang J., Pastor M.L., Garnier C., Gong X.J.** (2019). *A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates*, International Journal of Fatigue 120: 87–95
- [37] **Backe S., Balle F., Hannemann B., Schmeer S., Breuer U.P.** (2019). *Fatigue properties of multifunctional metal- and carbon- fibre- reinforced polymers and intrinsic capabilities for damage monitoring*, Fatigue Fract Eng Mater Struct. 42: 143–151.
- [38] **Pettit D.E., Lauraitis K.N., Cox J.M.** (1979). *Advanced Residual Strength Degradation Rate Modeling For Advanced Composite Structures Volume I – Task I: Reliminary Screening*, AFWAL-TR-79-3095
- [39] **Mandell, J.F., Agastra, P., Cairns, D.S., Badaliance, R., Sears, A.,** (2010). *Damage Threshold Characterization in Structural Composite Materials and Composite Joints*, Final Technical Report, for FA9550-06-1-0444, AFOSR/DEPSCOR 06. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD¼ADA516534&Location¼U2&doc...pdf>
- [40] **Wang Z., Zhang T., Li X., Wang Q., Huang W., Shen M.** (2018). *Characterization of the effect of CFRP reinforcement on the fatigue strength of aluminium alloy plates with fastener holes*, Engineering Structures 177: 739–752
- [41] **Karpat Y., Bahtiyar O.** (2016). *Energy based investigation of process parameters while drilling carbon fiber reinforced polymers*, CIRP Conference on High Performance Cutting, 46 s. 59 – 62



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mete KAYIHAN
Doğum Tarihi ve Yeri : Fatih / İSTANBUL, 29.10.1993
E-posta : kayihanm@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011-2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İmalat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016-2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme ve İmalat Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2018 yılında 7 ay süresince Yıldız Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.
- Temmuz 2018'den itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görevini sürdürmektedir.