



**HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KOMPOZİT METAL MALZEME
KOMBİNASYONLARINDA DELİK DELME PROSESİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Tamer ÇOBANOĞLU

**DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tamer ÇOBANOĞLU

11/02/2021

HAVACILIK SEKTÖRÜNDE KOMPOZİT METAL MALZEME KOMBİNASYONLARINDA DELİK DELME PROSESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Tamer ÇOBANOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2021

ÖZET

Bu çalışmada, havacılık sektöründe kompozit ve kompozit/metal istif yapılar üzerinde gerçekleştirilen ve montaj aşamasındaki tüm delme sürecini kapsayan manuel ve otomatik delik delme operasyonlarında matkap geometrisinin ve kesme hızının, delik kalitesi ve kesme performansına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmalar dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Faz-1 aşamasında ticari olarak elde edilebilen matkap geometrisi ile bu çalışma için geliştirilen üç yeni matkap geometrisi; delik çapı, silindiriklik ve delaminasyon verilerine göre deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Faz-2 aşamasında, kompozit/metal istif plakada test edilmek üzere geliştirilen üç adet matkap geometrisi; delik çapı, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve takım aşınması verilerine göre deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Faz-3A aşamasında, daha başarılı olduğu tespit edilen Tip-A matkap ile üç farklı kesme hızı değeri (51 m/dak, 94 m/dak, 163 m/dak); delik çapı, dairesellik, silindiriklik, ve yüzey pürüzlülüğü verilerine göre deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Faz-3B aşamasında 94 m/dak kesme hızı ile delinen delikler; delik çapı, dairesellik, silindiriklik, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve delaminasyon verilerine göre deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları varyans analizi ve proses yeterlilik analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmalar montaj aşamasında kullanılan havalı portatif ekipmanlar ile tüm delik delme prosesini analiz edecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, montaj aşamasında delik delme operasyonlarında matkap geometrisinin ve optimum kesme hızının belirlenmesinde farklı yaklaşımların deney sonuçları üzerindeki önemi ve etki oranları ortaya konmuştur. Faz-1 aşamasında yeni geliştirilen 17 nolu matkap geometrisinin, Faz-2 aşamasında Tip-A matkap geometrisinin, Faz-3A aşamasında 94 m/dak kesme hızının daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Faz-1 aşamasındaki çalışma ile delik delme süresi delik başına 1,5 dakikadan 1 dakikaya düşürülmüştür. Faz-3B aşamasında delinen 30 adet delik sonuçlarına göre Tip-A matkap ve 94 m/dak kesme hızı için proses yeterlilik indisi değerlerinin 1,33 üzerinde çıktığı gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Havacılık, kompozit delme, metal kompozit istif delme, montajda delme, otomatik delme, matkap tasarımı, delaminasyon

Sayfa Adedi : 148

Danışman : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

IMPROVING OF THE HOLE DRILLING PROCESS FOR METAL COMPOSITE
COMBINATIONS AT AEROSPACE INDUSTRY

(Ph. D. Thesis)

Tamer ÇOBANOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2021

ABSTRACT

In this study, the effect of drill geometry and cutting speed on hole quality and cutting performance in manual and automatic drilling operations performed on composite and composite / metal stack structures by covering the entire drilling process during the assembly phase in the aviation industry was investigated. Studies were carried out in four stages. In Phase-1, three new drill geometries developed for this study and commercially available drill geometries were compared experimentally according to the hole diameter, cylindricity and delamination data. In Phase-2, three drill geometries developed for testing on composite / metal stack were compared experimentally according to the hole diameter, surface roughness, delamination and tool wear data. In Phase-3A, three different cutting speed values (51 m / min, 94 m / min, 163 m / min) by using Type-A drill were compared experimentally according to the hole diameter, circularity, cylindricity, and surface roughness data. In phase-3B, the holes drilled at 94 m / min cutting speed were compared experimentally according to the hole diameter, circularity, cylindricity, surface roughness, tool wear and delamination data. Experimental results were evaluated using variance analysis and process capability analysis. The studies were carried out to analyze the whole drilling process with pneumatic portable equipments used during the assembly operations. As a result, the importance and effect rates of different approaches on the test results in determining the drill geometry and optimum cutting speed in drilling operations during the assembly were revealed. It was observed that the newly developed drill geometry no 17 in Phase-1, Type-A drill geometry in Phase-2, cutting speed of 94 m / min in Phase-3A yielded more successful results. With the work in Phase-1, the drilling time has been reduced from 1.5 minutes per hole to 1 minute per hole. According to the results of 30 holes drilled in Phase-3B, it was observed that the process capability index values for Type-A drill and 94 m / min cutting speed were higher than 1,33.

Science Code : 91438

Key Words : Aerospace, composite drilling, metal composite stack drilling, drilling at assembly, automatic drilling, drill design, delamination

Page Number : 148

Supervisor : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama sürecimin tamamında bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren çok değerli danışmanım Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e "Gazi Üniversitesi", çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen ve yol gösteren Prof. Dr. Abdullah KURT "Gazi Üniversitesi" ve Doç. Dr. İhsan TOKTAŞ'a "Yıldırım Beyazıt Üniversitesi" , tez kapsamında yapılan çalışmalara her türlü imkanı sağlayan "TUSAŞ-TAI" ile "Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığı" na ve tezimin gerçekleşmesinde "1140164" numaralı proje ile maddi destek sağlayan TUBİTAK'a teşekkür ederim.

Kesici takımların geliştirilmesi ve üretilmesi sırasında katkı sağlayan HTG Makine Sanayi ve Tic. Ltd. Şirketi ve Karcan Kesici Takım Sanayi ve Tic. Ltd. Şirketi'ne teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında yanımda olan ve hiçbir zaman manevi desteğini benden esirgemeyen ve bu süreçte beni yalnız bırakmayan başta annem ve babama, eşime ve çocuklarıma bana duydukları güven, verdikleri destek, gösterdikleri anlayış ve sevgi için sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri.....	5
2.1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	5
2.1.2. Fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	7
2.1.3. Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozitler.....	9
2.2. Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği	12
2.2.1. FRP kompozitlerin işlenebilirliği	12
2.2.2. CFRP kompozitlerin delme işlemleri.....	15
2.3. Alüminyum Malzemelerin İşlenebilirliği.....	18
2.3.1. Alüminyum malzemeler ve özellikleri.....	20
2.3.2. Alüminyum malzemelerde delik delme işlemi	21
2.4. Kesici Takım	23
2.4.1. Kesici takım geometrisi ve kesme açıları.....	23

	Sayfa
2.4.2. Kesici takım malzemeleri.....	24
2.4.3. Takım aşınması	26
2.4.4. Takım ömrü.....	29
2.5. Kompozit/Metal İstif Yapıların Delinmesi	29
2.5.1. Kompozit/Aluminyum istif delme	31
2.5.2 Delik kalitesini belirleyen faktörler	31
2.6. Delik Delme Ekipmanları	34
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	37
4. MALZEME VE YÖNTEM	51
4.1. İş Parçası Malzemeleri	51
4.1.1. Faz-1/Faz-2/Faz-3 için kullanılan CFRP kompozit malzemeler.....	52
4.1.2. Faz-2 ve Faz-3 testleri için istif malzeme hazırlanması.....	53
4.2. Takım Tasarımı ve Geometrileri.....	54
4.2.1. Faz-1 matkap tasarımı	55
4.2.2. Faz-2 ve Faz-3 matkap tasarımları.....	59
4.3. Kullanılan Delme Ekipmanları	62
4.3.1. Faz-1 delme ekipmanı	62
4.3.2. Faz-2 ve Faz-3 delme ekipmanları	63
4.4. Ölçme ve Kontrol	67
4.4.1. Faz-1.....	68
4.4.2. Faz-2 ve Faz-3.....	68
4.5. Deney Desenleri	70
4.5.1. Faz-1.....	71
4.5.2. Faz-2.....	74

	Sayfa
4.5.3. Faz-3A.....	76
4.5.4. Faz-3B	77
4.6. İstatistiksel Analiz.....	79
5. DENEY SONUÇLARI VE TAŞTIRMA.....	81
5.1. Faz-1.....	81
5.1.1. Silindiriklik	81
5.1.2. Delik çapı	85
5.1.3. Delaminasyon.....	88
5.1.4. Proses zamanı ve matkap maliyet sonuçları.....	93
5.2. Faz-2.....	94
5.2.1. Delik çapı	94
5.2.2. Yüzey pürüzlülüğü	101
5.2.3. Delaminasyon.....	103
5.2.4. Takım aşınması	106
5.3. Faz-3A.....	107
5.3.1. Delik çapı	108
5.3.2. Dairesellik	110
5.3.3. Silindiriklik	113
5.3.4. Yüzey pürüzlülüğü	115
5.4. Faz-3B	117
5.4.1. Delik çapı	118
5.4.2. Dairesellik	121
5.4.3. Silindiriklik	123
5.4.4. Yüzey pürüzlülüğü	123

	Sayfa
5.4.5. Takım aşınması	126
5.4.6. İç delaminasyon	127
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	131
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ	147



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çeşitli karbon fiberlerinin özellikleri.....	8
Çizelge 2.2. Karbon fiberlerinin sınıflandırılması	8
Çizelge 2.3. Epoksi reçine ile çelik ve alüminyumun mekanik ve termal özellikleri..	9
Çizelge 2.4. Karbon fiber laminanın mekanik özellikleri.....	11
Çizelge 2.5. CFRP, GFRP ve AFRP laminaların mekanik özellikleri.....	11
Çizelge 2.6. Muhtemel hasarlar	11
Çizelge 2.7. Müsaade edilen kritik değerler	11
Çizelge 2.8. Kompozitlerde delik delmeye etki eden faktörler	15
Çizelge 3.1 Literatür taraması sonuçlarının tablo halinde özetlenmesi	48
Çizelge 4.1. CFRP kompozit özellikleri	52
Çizelge 4.2. Al-7075-T6 Mekanik özellikleri.....	54
Çizelge 4.3. Matkap özellikleri.....	56
Çizelge 4.4. Matkap tasarım kriterleri	60
Çizelge 4.5. Delik çap toleransları.....	60
Çizelge 4.6. Tip-A matkap geometrik özellikleri	62
Çizelge 4.7. Havalı manuel delik delme ekipmanı teknik özellikleri.....	63
Çizelge 4.8. Faz-2 testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı özellikleri	64
Çizelge 4.9. Faz-3A testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı özellikleri.....	67
Çizelge 4.10. Faz-3B testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı özellikleri.....	67
Çizelge 4.11. Zoller ölçüm cihazı özellikleri.....	70
Çizelge 4.12. Faz-1 deney deseni	73
Çizelge 4.13. Faz-1 ölçümleri için delaminasyon ve silindiriklik sınır değerleri	74

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.14. Faz-1 ölçümleri için çap sınır değerleri	74
Çizelge 4.15. Faz-2 deney deseni	75
Çizelge 4.16. Faz-3A deney deseni.....	77
Çizelge 4.17. Faz-3B deney deseni.....	78
Çizelge 4.18. Faz-2, Faz-3A ve Faz-3B delik çapı alt ve üst sınır değerleri	78
Çizelge 4.19. Faz-2, Faz-3A ve Faz-3B yüzey pürüzlülüğü sınır değerleri	78
Çizelge 4.20. Faz-3A ve Faz-3B dairesellik ve silindiriklik sınır değerleri	78
Çizelge 4.21. Faz-2 ve Faz-3B delaminasyon sınır değerleri	79
Çizelge 5.1. Silindiriklik için ANOVA analizi sonuçları	85
Çizelge 5.2. Delaminasyon için ANOVA analizi sonuçları	91
Çizelge 5.3. Yeni tasarlanan matkapların proses süresine katkısı	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bazı metal ve kompozitlerin özellikleri.....	6
Şekil 2.2. Kompozitlerin sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.3. En çok kullanılan örgü tipleri ; (a) Düz örgü, (b) İkili örgü, (c) Beş koşumlu saten örgü	7
Şekil 2.4. CFRP laminanın mikroskobik kesit görüntüsü.....	9
Şekil 2.5. FRP kompozitlerde kesme mekanizmaları, a) Tip-I, b) Tip-II, c) Tip-III, d) Tip-III, e) Tip-IV, f) Tip-V	14
Şekil 2.6. Farklı kesici malzemeleri için serbest yüzey aşınması sonuçları	14
Şekil 2.7. Delaminasyon tipleri gösterimi a) Çekme delaminasyon oluşumu, b) itme delaminasyon oluşumu.....	16
Şekil 2.8. Delaminasyon faktörü Fd şematik gösterimi	17
Şekil 2.9. CFRP kompozit malzemede delme sırasında oluşan itme kuvveti.....	18
Şekil 2.10. Delik delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması...	21
Şekil 2.11. Delik delme performansını belirleyen kriterleri etkileyen faktörler.....	21
Şekil 2.12. Delme işlemlerinde talaş kesit alanı (a) ve kesici kenar başına ilerleme (b).....	23
Şekil 2.13. Matkapta uç, helis ve enine kesme kenarı açıları	24
Şekil 2.14. Helisel matkap geometrisi	24
Şekil 2.15. Çeşitli takım malzemelerinin tokluk ve sertlik değerleri arasındaki ilişki ..	25
Şekil 2.16. Helisel matkaplarda oluşan aşınma mekanizmaları a) Köşelerin yuvarlanması, b) Serbest yüzey aşınması, c) Zırh aşınması	27
Şekil 2.17. Serbest yüzeyde oluşan aşınmanın gösterimi	28
Şekil 2.18. Takım aşınma kontrolünün yapılacağı bölgeler	30
Şekil 2.19. Dairesellik toleransının anlamı ve gösterimi	32
Şekil 2.20. Silindiriklik toleransı gösterimi	33

Şekil	Sayfa
Şekil 2.21. Alüminyum/CFRP istif yapıda delinen delik iç yüzeyine ait görüntü ve Ra hesabı	33
Şekil 2.22. Alüminyum malzemede delik çıkışında talaş yığını oluşumu	34
Şekil 2.23. Havalı manuel matkap motoru.....	35
Şekil 2.24. Hidrolik kontrol ünitesi matkap motoru.....	35
Şekil 4.1. a) Faz-1 aşamasında kullanılan CFRP kompozit malzeme ölçüleri, b) Çapraz örgülü kompozit malzemenin 10 kat büyütülmüş kesit görüntüsü.....	53
Şekil 4.2. 30 mm kalınlığında 300 x 200 mm Al/CFRP/Al istif yapı.....	54
Şekil 4.3. Kademesiz 18° uç açılı matkap tasarımı	57
Şekil 4.4. Kademesiz 36° uç açılı matkap tasarımı	57
Şekil 4.5. Kademeli 18° uç açılı matkap tasarımı	57
Şekil 4.6. Kademeli 36° uç açılı matkap tasarımı	58
Şekil 4.7. Delme işleminde kullanılan mevcut takımın özellikleri.....	60
Şekil 4.8. Matkaplara ait katı modeller; a) Tip A, b) Tip B, c) Tip C	61
Şekil 4.9. Yeni tasarım matkapların uç geometrilerinin gösterimi	61
Şekil 4.10. Tip-A matkaba ait katı model ve teknik detay şekilleri.....	62
Şekil 4.11. Faz-2 ve Faz-3 testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı.....	64
Şekil 4.12. Faz-2 ve Faz-3 testlerinde kullanılan test platformu	65
Şekil 4.13. Delme takımı ve istif test plakasının test platformu üzerine yerleşimi	65
Şekil 4.14. a) Eşmerkezli pensin delme takımına yerleşimi, b) Otomatik delme ekipmanının yerleşimi.....	66
Şekil 4.15. CFRP malzemede delik çıkışında oluşan delaminasyon	68
Şekil 4.16. Proses adımlarının gösterimi a) Mevcut durum, b) İyileştirilmiş durum	71
Şekil 4.17. Manuel matkap motoru ile CFRP parçada yapılan delme işlemi gösterimi .	72
Şekil 4.18. Delik çıkışında oluşan talaşın elmas takım ile temizleme işlemi	74

Şekil	Sayfa
Şekil 4.19. Otomatik delme ekipmanının test düzeneğine yerleşimi.....	75
Şekil 4.20. 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında delinen 15'er adet delik.....	76
Şekil 4.21. 94 m/dak kesme hızında performans testi için delinen 30 adet delik	77
Şekil 5.1. Kaplamasız ve 18° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması	82
Şekil 5.2. Kaplamalı ve 18° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması	82
Şekil 5.3. Kaplamasız ve 36° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması	83
Şekil 5.4. Kaplamalı ve 36° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması	84
Şekil 5.5. Silindiriklik sonuçları için çap, aç ve kaplama faktörlerinin ana etki grafiği	84
Şekil 5.6. Ø3,25 mm kademesiz matkap çap sonuçları	86
Şekil 5.7. Ø4,80 mm kademesiz matkap çap sonuçları	86
Şekil 5.8. Ø5,94 mm kademesiz matkap çap sonuçları	87
Şekil 5.9. Ø3,25-4,80 mm kademeli matkap çap sonuçları	87
Şekil 5.10. Ø4,80-5,94 mm kademeli matkap çap sonuçları	88
Şekil 5.11. Ø4,80 mm çaplı matkaplara ait delaminasyon sonuçları.....	89
Şekil 5.12. Ø5,94 mm matkaplara ait delaminasyon sonuçları.....	89
Şekil 5.13. Ø3,25-4,80 mm kademeli matkaplara ait delaminasyon sonuçları.....	90
Şekil 5.14. Ø4,80-5,94 mm kademeli matkaplara ait delaminasyon sonuçları.....	90
Şekil 5.15. Delaminasyon sonuçları için çap, aç ve kaplama faktörlerinin etki grafiği	91
Şekil 5.16. Ø3,25 mm, 36°, kademesiz, kaplamasız matkap UT test sonucu	92
Şekil 5.17. Ø5,94 mm, 18°, kademesiz, kaplamalı matkap 3.delik UT test sonucu	92
Şekil 5.18. Ø5,94 mm, 36°, kademesiz, kaplamasız matkap 2.delik UT test sonucu	93
Şekil 5.19. Ø5,94 mm, 36°, kademesiz, kaplamasız matkap 5.delik UT test sonucu....	93

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. a) Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap delik çıkışı UT test sonucu b) Ø4,80-5,94 mm, 18°, kademeli, kaplamalı matkap 4.delik UT test sonucu.....	93
Şekil 5.21. Üst plaka (Al) delik girişleri çap ölçüm değerleri	95
Şekil 5.22. Üst plaka (Al) delik çıkışları çap ölçüm değerleri	96
Şekil 5.23. Orta plaka (CFRP) delik girişleri çap ölçüm değerleri	96
Şekil 5.24. Orta plaka (CFRP) delik çıkışları çap ölçüm değerleri	97
Şekil 5.25. Alt plaka (Al) delik girişleri çap ölçüm değerleri.....	97
Şekil 5.26. Alt plaka (Al) delik çıkışları çap ölçüm değerleri	98
Şekil 5.27. Çap sonuçları için matkap geometrisi faktörünün etki grafikleri	99
Şekil 5.28. Al-CFRP-Al delik girişi çap değerleri için proses yeterlilik analizi grafikleri.....	100
Şekil 5.29. Al-CFRP-Al delik çıkışı çap değerleri için proses yeterlilik analizi grafiği	100
Şekil 5.30. Üst plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	102
Şekil 5.31. Orta plaka (CFRP) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	102
Şekil 5.32. Alt plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.....	103
Şekil 5.33. Matkap geometrisi faktörlerinin ortalama Ra verileri için ana etki grafikleri.....	104
Şekil 5.34. Faz-2 delme testleri CFRP plaka delik girişleri gösterimi.....	105
Şekil 5.35. Faz-2 delme testleri CFRP plaka delik çıkışları gösterimi	105
Şekil 5.36. Delik çıkışları delaminasyon sonuçları.....	105
Şekil 5.37. Tip-A matkap ilk hali ve işlem sonrası aşınma görüntüleri.....	106
Şekil 5.38. Tip-B matkap ilk hali ve işlem sonrası aşınma görüntüleri	107
Şekil 5.39. Tip-C matkap ilk hali ve işlem sonrası aşınma görüntüleri	107
Şekil 5.40. Üst plaka (Al) çap değerleri.....	109

Şekil	Sayfa
Şekil 5.41. Orta plaka (CFRP) çap değerleri	109
Şekil 5.42. Alt plaka (Al) çap değerleri	110
Şekil 5.43. Kesme hızı faktörlerinin çap üzerindeki ana etki grafiği.....	110
Şekil 5.44. Üst plaka (Al) dairesellik değerleri.....	111
Şekil 5.45. Orta plaka (CFRP) dairesellik değerleri	112
Şekil 5.46. Alt plaka (Al) dairesellik değerleri	112
Şekil 5.47. Kesme hızı faktörlerinin dairesellik üzerindeki ana etki grafiği	113
Şekil 5.48. Silindiriklik ölçüm değerleri.....	114
Şekil 5.49. Kesme hızı faktörlerinin silindiriklik üzerindeki ana etki grafiği	114
Şekil 5.50. Üst plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	116
Şekil 5.51. Orta plaka (CFRP) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	116
Şekil 5.52. Alt plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.....	117
Şekil 5.53. Kesme hızı faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki ana etki grafiği	118
Şekil 5.54. 94 m/dak kesme hızında üst plaka çap ölçüm sonuçları.....	119
Şekil 5.55. 94 m/dak kesme hızında alt plaka çap ölçüm sonuçları	120
Şekil 5.56. 94 m/dak kesme hızında CFRP orta plaka çap ölçüm sonuçları	120
Şekil 5.57. Delik giriş ve çıkışları için proses yeterlilik analizi grafikleri	121
Şekil 5.58. 94 m/dak kesme hızında dairesellik değerleri	122
Şekil 5.59. Dairesellik için proses yeterlilik analizi grafikleri.....	122
Şekil 5.60. 94 m/dak kesme hızında ölçülen silindiriklik değerleri.....	123
Şekil 5.61. Silindiriklik için proses yeterlilik analizi grafiği	124
Şekil 5.62. 94 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülük değerleri	125
Şekil 5.63. Yüzey pürüzlülüğü için proses yeterlilik analizi grafikleri	125
Şekil 5.64. 94 m/dak kesme hızında Tip-A matkapta oluşan aşınma görüntüleri	126

Şekil	Sayfa
Şekil 5.65. “1” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri.....	127
Şekil 5.66. “2” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri.....	128
Şekil 5.67. “29” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri.....	128
Şekil 5.68. “30” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri,.....	129



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Otomatik delme ekipmanları a) düz model, b) timsah çene model	36
Resim 4.1. a) 18° kaplamasız, b) 18° kaplamalı, c) 36° kaplamasız, d) 36° kaplamalı..	58
Resim 4.2. a) 18° kaplamasız kademeli, b) 18° kaplamalı kademeli, c) 36° kaplamasız kademeli, d) 36° kaplamalı kademeli	58
Resim 4.3. Faz-1 çalışmasında kullanılan havalı manuel delik delme ekipmanı	63
Resim 4.4. Faz-2 testlerinde delinmiş plakalar; a) Üst plaka, b) Orta plaka, c) Alt plaka.....	69
Resim 4.5. Insize marka mikroskop ve Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	70
Resim 4.6. Zoller Genius 3s kesici takım ölçüm cihazı.....	70
Resim 4.7. CFRP plaka delik giriş tarafı görüntüsü	73
Resim 4.8. CFRP plaka delik çıkışlarında oluşan çapaklanma gösterimi.....	73
Resim 4.9. Faz-2 testlerinde delinen Al-CFRP-Al istif plaka	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

γ	Talaş açısı ($^{\circ}$)
α	Serbest açısı ($^{\circ}$)
β	Kama açısı ($^{\circ}$)
η	Eğim açısı ($^{\circ}$)
a_p	Talaş derinliği (mm)
D_{max}	En büyük delaminasyon çapı (mm)
D_o	Nominal delik çapı (mm)
F_c	Kesme kuvveti (N)
F_d	Delaminasyon faktörü (mm)
KB	Krater genişliği (mm)
KM	Krater orta eksen mesafesi (mm)
KT	Krater derinliği (mm)
T	Takım ömrü (sn)
V	Kesme hızı (m/dak)
VB	Serbest yan yüzey aşınması (mm)
VB_{max}	Maksimum serbest yan yüzey aşınması (mm)
V_f	İlerleme oranı (mm/dev)

Kısaltmalar

Açıklamalar

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hy.
ANOVA	Analysis of Variance (Varyans Analizi)
BUE	Built Up Edge (Yığıntı Talaş)
DC	Diamond Coating (Elmas Kaplama)
CBN	Cubic Boron Nitrid

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic (Karbon Fiber Takviyeli Plastik)
CMC	Ceramic Matrix Composite (Seramik Matrisli Kompozit)
CVD	Chemical Vapour Deposition (Kimyasal Buhar Çökertme)
FE	Finite Element (Sonlu Elemanlar)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
FRP	Fiber Reinforced Plastic (Fiber Takviyeli Plastik)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic (Cam Fiber Takviyeli Plastik)
GM	Geometrical Measurement (Geometrik Ölçüm)
HSS	High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
MMC	Metal Matrix Composite (Metal Matrisli Kompozit)
PAN	Poliakrilanitril
PCB	Basılmış devre kartı
PCD	Policristalin Diamond (Polikristalin Elmas)
PMC	Polimer Matrix Composite (Polimer Matrisli Kompozit)
PVD	Phisical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Çökertme)
TWA	Time Weighted Average (Zaman Ağırlıklı Ortalama)
UD	Uni Directional (Tek Yönlü)
PEEK	Polieter Eter Keton Kompozit

1. GİRİŞ

Havacılık ve otomotiv endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde kompozit malzemelerin kullanım oranları, hafifliği, dayanıklılığı gibi unsurlardan ötürü giderek artmaktadır. Özellikle artan boyutlar, uçuş süreleri ve ekonomik olmaları açısından hava aracının mümkün olan en hafif şekilde yapılması hedeflenmektedir [1].

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan kompozitler çoğunlukla karbon fiber ile takviye edilmiş epoksi veya vinilesterden (CFRP) üretilmektedir. Bu kompozitlerin avantajları düşük ağırlık, yüksek dayanım, yüksek elastikiyet modülü vb. özellikleridir. Hava aracı komponentlerinin yapımında, mukavemet özelliklerinin sağlanabilmesi için kompozit malzemeler, alüminyum, titanyum gibi metal malzemeler ile birlikte istif panel şeklinde kullanılmaktadır. Özellikle kanat, flaperon, aileron gibi bileşenlerde, CFRP-Al ve/veya CFRP-Ti ve/veya CFRP-Ti-Al ve/veya CFRP-CFRP şeklinde istif yapılar kullanılmaktadır [2].

Kompozit malzemelerin işlenmesi metalik malzemelere oranla daha zordur. Yüksek dayanım işlemeyi zorlaştırırken yüksek elastikiyet modülü de takımda abrasiv aşınmayı hızlandırır. Metal malzemelerdeki homojen iç yapı malzemelerin işleme şartlarının ve parametrelerinin kategorize edilmesine imkân sağlamıştır. Ancak kompozit malzemelerde standardize edilmiş işleme parametrelerini belirlemek mümkün değildir. Bu durum kesici takımlar ve kullanılan ekipmanın seçimi açısından önemlidir [3].

Hava aracı üretiminde ilk etapta detay parçalar takım tezgahlarında üretilmektedir. Daha sonra detay parçaların belirlenen prosesler uygulanarak bir araya getirilmesi ile alt-montaj parçaları oluşturulmaktadır. Alt-montaj parçalarının belli proses ve standartlar çerçevesinde bir araya getirilmesi sonrasında ise komponent montajı tamamlanmaktadır. Kompozit komponentlerin üretimi sırasında en zorlu işlemlerden bir tanesi CFRP-Ti-Al malzemelerden oluşan istif panel yapıların bir arada delinmesi gerekliliğidir. Bu parçaların komponent üzerinde delinmesi gerektiğinden dolayı takım tezgahlarının kullanılması mümkün değildir. Dolayısı ile komponent üzerinde çalışacak delici ekipmanların kullanımı gerekmektedir, bu ekipmanlar; 1- manuel delik delme ekipmanı, 2- yarı otomatik delik delme ekipmanı, 3-otomatik delik delme ekipmanlarıdır [4].

CFRP malzemelerin delinmesinde yaşanan en büyük sorun delik çıkışında delaminasyon (katman ayrılması) oluşmasıdır. Delaminasyonun oluşmasına sebep olan etkenler ise; CFRP malzemenin imalat yöntemi – UD (Tek yönlü) veya örgü, kesici takım geometrisi, kullanılan ekipman, kesme parametreleridir. CFRP-UD malzemelerde yapısı gereği delaminasyona çok duyarlıdır ve buradaki etkenlerin en iyi şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Kesici geometrisi öyle ayarlanmalıdır ki delik çıkışında delaminasyon ve kesilmemiş fiber oluşturmazın, burada da yine yapılan deneysel çalışmalar önem kazanmaktadır, çünkü CFRP malzemelerde standart bir işleme parametresi bulunmamaktadır ve belirlenmesi için de uzun çalışmalar yapılması gerekmektedir [5]. CFRP kesici konusunda ise dünyada sayılı firma çalışma yapmakta ve uzmanlaşmaktadır. Kullanılacak ekipman ise çok iyi seçilmelidir. Günümüz teknolojik şartlarında her durum için ayrı bir ekipman tasarlanmış ve yerine göre uygulamaya alınmaktadır. Delaminasyon oluşmaması için en önemli noktalardan birisi delme sırasında kesici ilerlemesidir. İlerleme hızı belirli bir değerde, yavaş olmalı ve delik çıkışında çok yavaş çıkış yapılması sağlanmalıdır. Bu durumda ekipmanı kullanan teknisyenin el becerisi ve deneyimi devreye girmektedir. Bu ise kaliteyi olumsuz yönde etkileyen en önemli unsurdur [6]. Bu olumsuzluğu eleyebilmek için hidrolik kontrol üniteli el motorları tasarlanmıştır. Bu motorlar sayesinde kesici ilerleme hızı ve basıncı sabit tutulabilmekte, teknisyenin baskı kuvvetinden bağımsız olarak ilerleme sabit bir hızda gerçekleşmekte ve delik çıkışında yavaş bir ilerleme sağlandığı için delaminasyon riski çok büyük oranda azaltılabilmektedir. Küçük çaplı deliklerde bu tür çözümler uygulanabilirken, daha büyük çaplı (7,92 mm-15,863 mm) deliklerde ise manuel cihazlar yerine kademe sayısını azaltacak ve tek kademe delik delmeyi sağlayacak otomatik cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar eşmerkezli pens ile delme takımı üzerine havalı şekilde bağlanabilmekte ve delme işlemini belirli bir devir ve ilerleme hızı ile yapmaktadır. Tüm işlem otomatik olarak gerçekleşmektedir [7].

Önerilen bu çalışmada, literatürde daha önceki çalışmalarda kullanılmamış olan havalı manuel ve otomatik delme ekipmanları ile uçak kanat montajı aşamasındaki tüm delik delme prosesine ait testler yapılmıştır. Delik delme operasyonu simülasyonu için test düzeneği hazırlanmış ve dört fazda testler gerçekleştirilmiştir. Birinci fazda, uçak kanat yüzeylerinin yapımında kullanılan karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozit malzemede manuel matkap motoru kullanılmış ve yeni tasarlanan kademeli matkaplar ile ticari olarak temin edilebilen mevcut matkaplar incelenmiştir. Bu fazda, yeni tasarımı yapılan matkap geometrilerinin delik kalitesine ve işlem süresinin kısaltılmasına etkisini

tespit etmek amaçlanmıştır. İkinci fazda, Al-CFRP-Al istif yapı üzerinde otomatik delme ekipmanı kullanılarak yeni tasarlanan üç farklı matkap geometrisi ile delme testleri gerçekleştirilmiştir. Delik çapı, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon, kesici aşınması ölçümleri yapılmıştır. Proses yeterlilik analizi ile yeterlilik indisleri Cp ve Cpk değerleri hesaplanarak en iyi sonuçları veren matkap geometrisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üçüncü fazda, Al-CFRP-Al istif yapı üzerinde, ikinci fazda en iyi sonuçları veren kesici takım ile üç farklı kesme hızında (51 m/dak, 94 m/dak, 163 m/dak) delme testleri gerçekleştirilmiştir. Delik çapı, yüzey pürüzlülüğü, silindiriklik, dairesellik, delaminasyon ölçümleri yapılmıştır. Proses yeterlilik analizi ile Cp ve Cpk değerleri hesaplanarak en iyi sonuçları veren kesme hızının belirlenmesi amaçlanmıştır. Dördüncü fazda, en iyi sonuçları veren matkap ve kesme hızı ile delme testleri yapılarak kesici takıma ait kabul edilebilir sınırların deneysel olarak ve proses yeterlilik testleri ile analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada, delme ekipmanlarının, test plakalarının, kesme hızının, matkap geometrisinin, matkap çaplarının ve kaplamanın farklı kombinasyonları kullanılmıştır. Manuel delmede kuru ve otomatik delmede ıslak kesme şartları uygulanmıştır. Delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü, delik kalitesi (delik çapı, dairesellik, silindiriklik) ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenmiştir. ANOVA ve proses yeterlilik analizleri yapılarak optimum delme şartlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. KAVRAMSAL TEMELLER

2.1. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri

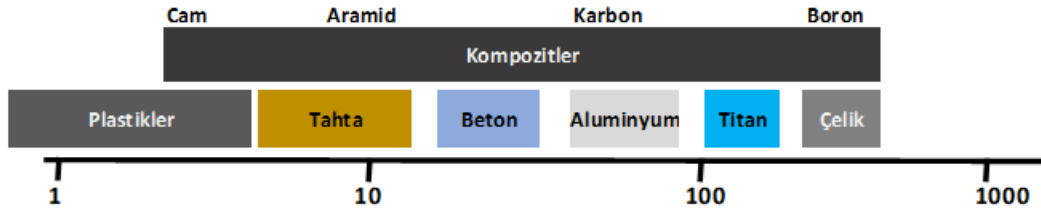
Kompozitler iki veya daha fazla bileşen parçadan oluşan malzemelerdir ve içeriğinde bulunan elemanların kendine kıyasla üstün özelliklere sahip bir ürün ortaya çıkarır [2]. Kompozit malzemelerde çeşitli form ve oranlarda sert, katı ve güçlü olan takviye fazı ile bu malzemenin çevresinde daha yumuşak olan ve hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan matriks malzeme bulunmaktadır [8]. Takviye malzemesi kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlayan parçacık, fiber, tel, kıl vb formda cam, karbon, kevlar, seramik ve metal bileşilerden oluşur. Matriks malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini ve malzemenin kopmasını geciktirir ve plastik, metal ve seramikten oluşur [9]. Bu elementler kompozit oluşturmak için bir araya geldiklerinde kendi karakteristik özelliklerini de muhafaza ederken, ayrıca ortaya çıkan kompozit malzemenin özelliklerini de etkiler. Son zamanlarda, uygun bir reçine matris ile ön hazırlanmış fiber levhaların birleştirilmesi sonucu oluşan malzemeleri tanımlamak için ileri kompozit terimi kullanılmaktaydı [10]. Kat veya hazır yarı mamul olarak da bilinen levhalar, genelde 100-150 µm kalınlığındadırlar. İleri kompozitlerin en büyük özelliği ağırlığına oranla yüksek mukavemete sahip olması ve bu sayede hissedilir ağırlık azaltma, mükemmel rijitlik ve sönümleme, yükleme gereksinimlerini karşılayacak ayarlanabilir karakteristik ve işleme gerektirmeyen son şekil vermeyi sağlamaktadır. Çoğunlukla havacılık, otomotiv, yağ ve gaz, spor ekipmanları ve tıbbi cihaz sektörlerinde kullanılmaktadır [11,12]. Metal ve kompozit içeren çeşitli malzemeler arasındaki karşılaştırmalar Şekil 2.1’de gösterilmiştir [10].

2.1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

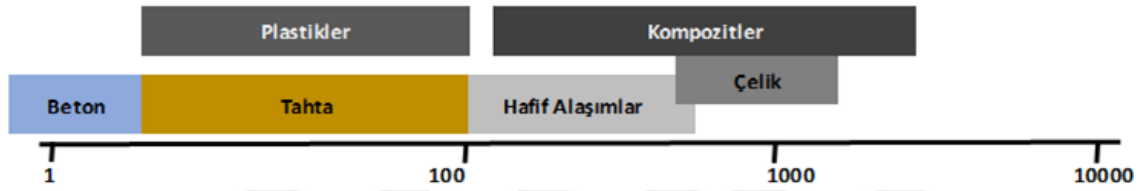
Kompozitler genellikle kullanılan matris malzemelere göre sınıflandırılırlar. Bunlar, metal matrisli kompozit (MMC), seramik matrisli kompozit (CMC), polimer matrisli kompozitlerdir (PMC). Alternatif olarak kompozit malzemeler kullanılan takviye elemana göre de sınıflandırılırlar. Bunlar, partikül takviyeli, yapısal (tabakalı, sandviç) ve fiber takviyeli (sürekli, süreksiz, hizalı, rastgele) kompozit malzemelerdir, Şekil 2.2’de gösterilmiştir [9].

(a) Yoğunluk (kg/m^3)

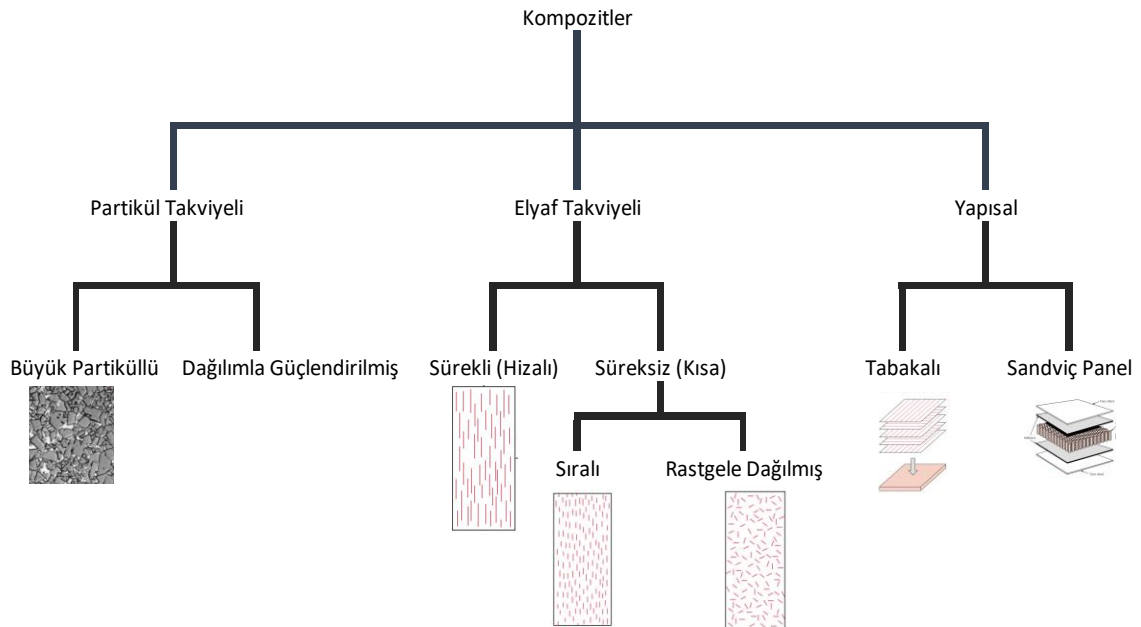
(b) Elastikiyet modülü (GPa)



(c) Çekme mukavemeti (MPa)



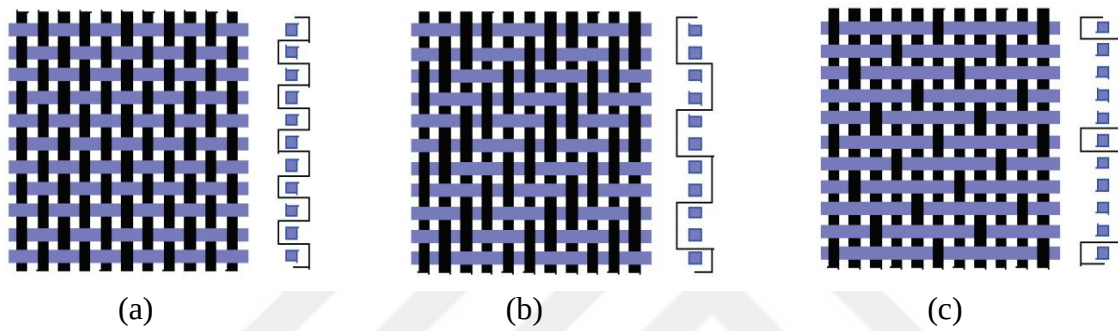
Şekil 2.1. Bazı metal ve kompozitlerin özellikleri [10]



Şekil 2.2. Kompozitlerin sınıflandırılması [9]

2.1.2. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Fiber takviyeli kompozitler yumuşak ve sünek bir matris içinde sert ve dayanıklı fiberlerin ilavesiyle oluşturulur. Sürekli fiberler tek yönlü (UD) ya da dokuma kumaş şeklinde yapılırlar. Tek yönlü dizilimde malzemeyi oluşturan fiberler birbirini kesmeyecek şekilde tek yönde dizilirler, dokuma kumaşta ise birbirini doksan derece kesecek şekilde dizilirler. Dokuma kumaşlar düz örgüler, ikili örgüler ve beş koşumlu saten örgüler olarak yapılabilirler, Şekil 2.3’de gösterilmiştir [13].



Şekil 2.3. En çok kullanılan örgü tipleri ; (a) Düz örgü, (b) İkili örgü, (c) Beş koşumlu saten örgü [10]

Bazı fiberlerin özellikleri

Fiberler sıvı malzemenin veya ön işleminden geçmiş fiberin bir delik kalıbının içinden çektilmesi yöntemi ile imal edilirler. Elde edilen ürün lif yumağı şekline getirilerek depolanır. İçinde birbirinden bağımsız ince fiber lifleri bulunur ve sayıları yaklaşık 3000 ile 30000 lif arasındadır [13]. Piyasada en çok kullanılan fiber lifleri cam, kevlar/aramid ve karbon fiberdir [14]. Fiberlerin çapını küçültmekle, yüzey alanı küçülür ve fiberdeki hata oranı düşer, bu da kırılma oranı azaltır. Kompozit malzemeye uygulanan yükün taşınması açısından uzun fiberler tercih edilir [15].

Cam fiber

Cam fiber yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, mükemmel kimyasal, yanmama ve ısı direnci özelliklerinden dolayı polimer matrisi içerisinde takviye elemanı olarak en yoğun kullanılan fiber tipidir. Yüksek aşındırıcı özelliğinden dolayı da işlenmeleri zordur [16].

Kevlar Fiber

Ticari ismi aramid fiber olarak bilinmektedir. Yüksek çekme mukavemeti ve elastikiyet modülü ($\sigma_u = 3720$ MPa ve $E = 63-143$ GPa) ile düşük yoğunluğa ($1,44$ g/cm³) sahiptir [16]. Kırılgan matrikslerin içine tokluk özelliği katmak için kullanılır. Aramid fiberi kesmek için keskin kenarlı ve küçük kesme kenarı radyüsüne sahip kesiciler kullanılır [17].

Karbon fiber

Geniş bir aralıkta modulus ve çekme mukavemeti ile düşük yoğunluğa sahiptir ($\sim 1,6$ g/cm³). Çeliğin 3 katına kadar katılık ve imalat çeliklerinin 15 katına kadar mukavemete sahiptir ($\sigma_T \sim 5000$ MPa) [18]. Çizelge 2.1’de farklı karbon fiberlerinin detaylı özellikleri, Çizelge 2.2’de karbon fiberlerinin çekme mukavemeti ve mukavemet/modül oranına göre sınıflandırmaları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli karbon fiberlerinin özellikleri [18]

Tip	Çap (μ m)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastikiyet modülü (GPa)
Genel amaçlı	(7-15)	700	40
Yüksek performanslı	(9-11)	5000	350
Aktif karbon fiber	(7-15)	200	1500

Çizelge 2.2. Karbon fiberlerinin sınıflandırılması [18]

Tip	Elastikiyet modülü (GPa)	Modül-Mukavemet oranı %
Çok yüksek modül	>500	-
Yüksek modül	>300	<1
Orta seviye modül	<300	>1
Düşük modül	<100	Isotropik yapı
Yüksek mukavemet	Çekme dayanımı >3 GPa	1,5-2

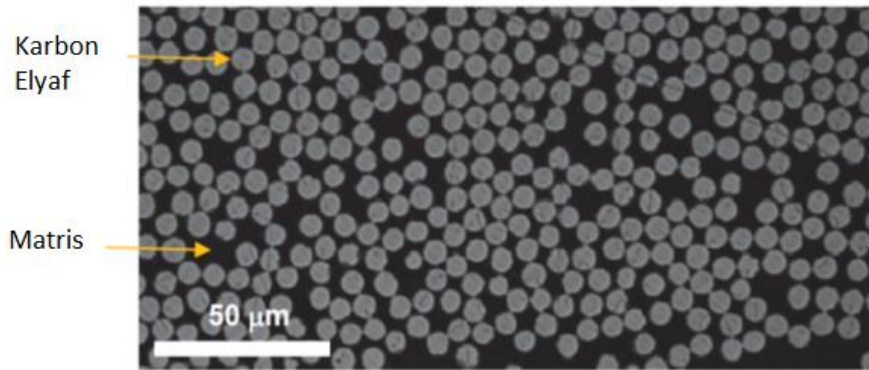
Çizelge 2.3 karbon fiber takviyeli plastik kompozit (CFRP) üretiminde kullanılan epoksi reçine ile AISI 1020 ve Al-7050-T6 alüminyum arasındaki mekanik ve termal özelliklerinin karşılaştırmasını göstermektedir.

Çizelge 2.3. Epoksi reçine ile çelik ve alüminyumun mekanik ve termal özellikleri [17]

Malzeme	Epoksi reçine	AISI 1020 çelik (soğuk çekme)	Aluminyum alaşım (Al-7075-T6)
ρ (g/cm ³)	1,1-1,3	7,85	2,8
E (GPa)	2,6-3,8	207	71
σ_T (MPa)	60-85	420	572
Süneklik (%)	2-10	15 (min)	11
K (W/m°C)	0,17-0,2	51,9	130

FRP kompozit bileşenlerinin tanımı

Sürekli fiber kompozit parçanın en temel elemanı tek yönlü lamina/katdır, Şekil 2.4 [19]. N tabakalı bir lamina için, her kat, üst yüzeyden numaralandırılan farklı bir fiber oryantasyonuna sahiptir. Lamina, kat içindeki takviye liflerinin referans eksene (0°) göre açıları baz alınarak kodlanır. (+) ve (-) işaretleri, her katın istif içerisindeki oryantasyon yönünü gösterir. Simetrik bir lamina çift sayıda kata sahiptir, bu katlardan yarısı sembolde gösterilir [8]. Örneğin, $[0_2/90/90/0_2]_s$ kodlaması 12 katlı, birinci kat 0° oryantasyonda ve iki kere tekrar eden ve orta düzleme göre simetrik olan bir laminaya aittir.



Şekil 2.4. CFRP laminanın mikroskobik kesit görüntüsü [19]

2.1.3. Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozitler

Kompozitler elle kalıplama yaptırma, püskürtme, vakumlu torba kalıplaması, otoklavda torba kalıplaması, reçine enjeksiyon kalıplama, filament fiber sarma, profil çekme, preste kalıplama yöntemlerinden biri ile imal edilebilirler [17]. Karbon fiberler rayon (selüloz),

poliakrilanitril (PAN) ve zift gibi organik maddelerden üretilirler. Bunların içinde en yaygın olarak PAN kullanılır. Bu organik fiberler başlangıçta eritilerek kovandan geçirildikten sonra bir germe işlemine tabii tutulurlar. Oksidasyon ortamına sahip bir fırının içine yerleştirilerek karbon fiber (80-95% karbon) veya grafit fiber (99% karbon) oluşumu sağlanır. Karbonlaştırma (piroliz) işlemi 1000-1500°C de N₂ veya argon atmosferi altında gerçekleştirilir. Grafitleştirme işlemi 1800°C üstündeki sıcaklıkta N₂ veya argon atmosferi altında gerçekleştirilir. Bu işlemde PAN fiberlerde bulunan karbon olmayan elementler (O, H ve N) uzaklaştırılır. Grafitleştirme işlemi, çekme dayanımındaki düşme pahasına elastik modülde bir artış isteniyorsa uygulanır. Reaksiyon sıcaklıklarının kontrolü ile farklı özelliklerde fiberlerin üretilmesi mümkündür. Üretilen fiberlerin çapları 7-10 mikrondur [17].

CFRP özellikleri

Karbon fiber takviyeli plastik kompozitler fiber lifi boyunca düşük ısı iletkenliğe sahiptir [20]. Tek yönlü lamina %60 fiber hacmine sahipken örgü dokuma lamina %55 fiber hacmine sahiptir. Bu sayede tek yönlü lamina dokuma malzemeye göre daha üstün özelliklere sahiptir. Çizelge 2.4'te fırında vakumlu torba kürleme yöntemi ile imal edilmiş tek yönlü ve dokuma yöntemleri ile imal edilmiş kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, Çizelge 2.5'te en çok kullanılan CFRP kompozitler ile cam fiber takviyeli plastik ve aramid fiber takviyeli plastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Sağlık ve güvenlik unsurları

CFRP imalatı sırasında ortaya çıkan duman ve toz sebebiyle oluşabilecek hasarlardan dolayı dikkat edilip önlem alınması gerekir. Karbon fiberleri kanserojen olmayabilir fakat tahriş, öksürük ve akciğer ödemesine sebep olabilir. Çizelge 2.6'da çeşitli kompozit malzemelerin verebilecekleri hasarlar gösterilmiştir [21]. Çizelge 2.7'de karbon fiber ve epoksi reçineye ait müsaade edilen kritik değerler gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Karbon fiber laminanın mekanik özellikleri [10]

Özellik	145 gr/m ² * 12b HTS5631 UD	283 gr/m ² * 3b HTA5131 CF0604 5-HS Örgü
Elastikiyet modülü (GPa)	128,9	62,6
Çekme mukavemeti (MPa)	2159	927
Basma modülü (GPa)	123,2	59,4
Basma mukavemeti (MPa)	1330	729
*gr/m ² : fiber alansal yoğunluğu 12b , 3b : bir demetteki fiber sayısı		

Çizelge 2.5. CFRP, GFRP ve AFRP laminaların mekanik özellikleri

FRP malzeme	Çekme mukavemeti (MPa)	Elastikiyet modülü E (MPa)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
CFRP				
Tek yönlü (UD) (V _f =60%)	1200	145000	0,9	1,6
GFRP				
Tek yönlü (UD) (V _f =60%)	1000	45000	2,3	2,1
Örgü (V _f =20-50%)	100-300	10000-20000	-	1,5-2,1
AFRP				
Tek yönlü (UD) (V _f =60%)	1000	75000	1,6	1,4

Çizelge 2.6. Muhtemel hasarlar [21]

Kompozit bileşeni	Hedef organ	Sağlığa muhtemel etkisi
Epoksi reçine	Cilt, akciğer, gözler	Temas ve alerjik dermatit, konjonktivit
Karbon fiber	Cilt ve akciğer	Cilt ve solunum yolu tahrişi, dermatit

Çizelge 2.7. Müsaade edilen kritik değerler [22]

Bileşen	Tip	Değer
Karbon fiber	ACGIH-TWA	10 mg/m ³
Epoksi reçine	TWA (toplam)	15 mg/m ³
	TWA (Solunabilir)	5 mg/m ³
ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists TWA : Zaman bazlı ortalama (Time weighted average)		

- Karbon fiber yakınında elektriksel ekipman ve benzeri malzemeler sızıntı ihtimaline karşı yakın konumlandırılmamalıdır.
- Karbon tozu oluşumuna engel olacak şekilde uygun depolarda tutulmalıdır.
- Çalışma alanında bulaşma riskine karşı yiyecek, içecek bulundurulmamalıdır. İşe uygun şekilde kişisel koruyucu ekipman kullanılmalıdır (eldiven, tek kullanımlık, giysi). Ortam havalandırması olmalıdır. Temas halinde eller sabunla yıkanmalıdır.

Karbon fiber işlenmesi sırasında ortaya yüksek miktarda duman ve toz çıkmaktadır. Bunların ortamdaki uzaklaştırılması için uygun havalandırma sistemleri kullanılmalıdır. Yapılan bir çalışmada FRP işlenirken ortaya çıkan fiber konsantrasyonunun yaklaşık $3\text{mg}/\text{m}^3$ olduğu tespit edilmiş ve bu değer sınır değerin ($5\text{ mg}/\text{m}^3$) altında kalmıştır [23].

2.2. Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği

Kompozit malzemelerin işlenmesi ile metal malzemelerin işlenmesi arasında talaş oluşumu, kesici takım geometrisi ve ilerleme hızı parametreleri gibi birçok alanda farklılıklar vardır [24,25]. Bunun sebepleri kompozit malzemelerde matriks ile takviye malzemelerin birbirinden farklı termal ve mekanik özelliklere sahip olması gelmektedir. Aynı zamanda kompozitlerin homojen olmayan ve anizotropik yapısı da bunda etkili olmaktadır [26]. Kompozit tabakalar arasındaki yapışma mukavemetinin düşük olması ve yüksek kesme kuvvetlerinden dolayı kesme sırasında lif kalkması veya delaminasyon oluşmaktadır. Kesici takım geometrisinin doğru seçilmesi bu hataların azaltılması için önemlidir [17].

2.2.1. FRP kompozitlerin işlenebilirliği

FRP kompozit malzemeler genellikle imal edildikten sonra kenar kesme, frezeleme, delme vb. işlemlerden geçerek son hallerine getirilmektedirler. Özellikle montaj işlemleri sırasında parçaların birbiri ile uyumunu sağlamak için delik delme işlemleri genelde montaj sırasında yapılmaktadır [26]. Kompozitlerde işleme performansı kompozit imalatı sırasında kullanılan matriks ve fiberlerin özelliklerinden, liflerin yönlerinden, kuruma koşullarından, malzemelerin hacim oranlarından, kesici takım geometrisi ve malzemesinden, işleme parameterlerinden etkilenir [27].

Malzeme özelliklerinin etkisi

FRP kompozitlerde kesme kuvvetlerini, torku, yüzey kalitesini, talaş geometrisini ve kesici geometrisini etkileyen en önemli etken fiber liflerinin yönüdür [28]. Kompozitlerde kesme mekanizması 5 tipe ayrılabilir. Delaminasyon (Tip-I) lif yönüne paralel olarak yapılan işleme sırasında gerçekleşir (Şekil 2.5 a). Lif kırılması (Tip-II) oluşumu kesici takım ağzında sıfır veya negatif kesme açısı ile fiber yönünde yapılan işleme sırasında meydana gelir (Şekil 2.5 b). Fiber kesilmesi (Tip-III) 0° - 90° arasındaki fiber lif yönlerinde yapılan işleme sırasında basma kuvvetleri ile oluşmaktadır (Şekil 2.5 c-d). Tip-IV işlemede fiber açısı kesme yönüne doksan derecede gerçekleşir ve deformasyon ile kesme yapar (Şekil 2.5 e). Tip-V kesme, fiber yönü 105° - 150° arasında olduğunda gerçekleşir (Şekil 2.5 f). Bu tür işlemede yüzey kalitesi düşüktür, düzensiz bir lif kesimi oluşur [29].

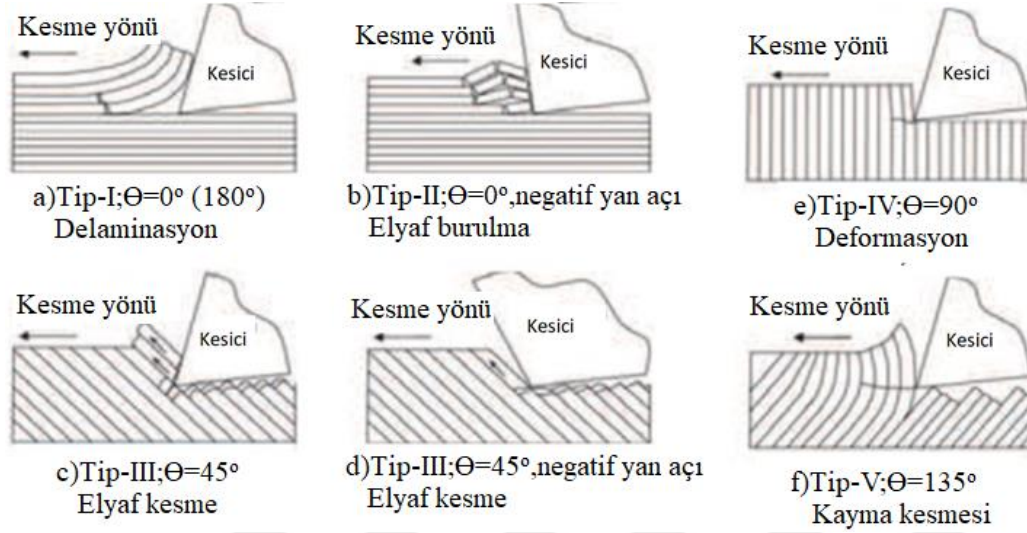
Kesme şartlarının etkisi

CFRP kompozitlerin işlenmesi sırasında ilerleme hızı, kesme hızı ve ilerleme kuvvetinin delaminasyon oluşumu üzerinde etkileri bulunmaktadır. İlerleme hızının artması ile kesme kuvvetlerinde artış meydana gelmektedir. Aynı zamanda ilerleme kuvveti artmakta, bundan dolayı da yüzey kalitesi kötüleşmektedir. İlerleme hızındaki artış aynı zamanda delaminasyon oluşumunu da arttırmaktadır. Kesme hızının delaminasyon üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Delik delme sırasında kesme hızının yüzey kalitesine ve kesme kuvvetlerine belirgin bir etkisi görülmemiştir. Kesme hızı belirgin şekilde kesici Takım aşınmasını etkilemektedir [24]. Örneğin ilerleme hızının 5 katına çıkartılması sonucunda yüzey pürüzlülük değeri 2,5 kat artmıştır [26].

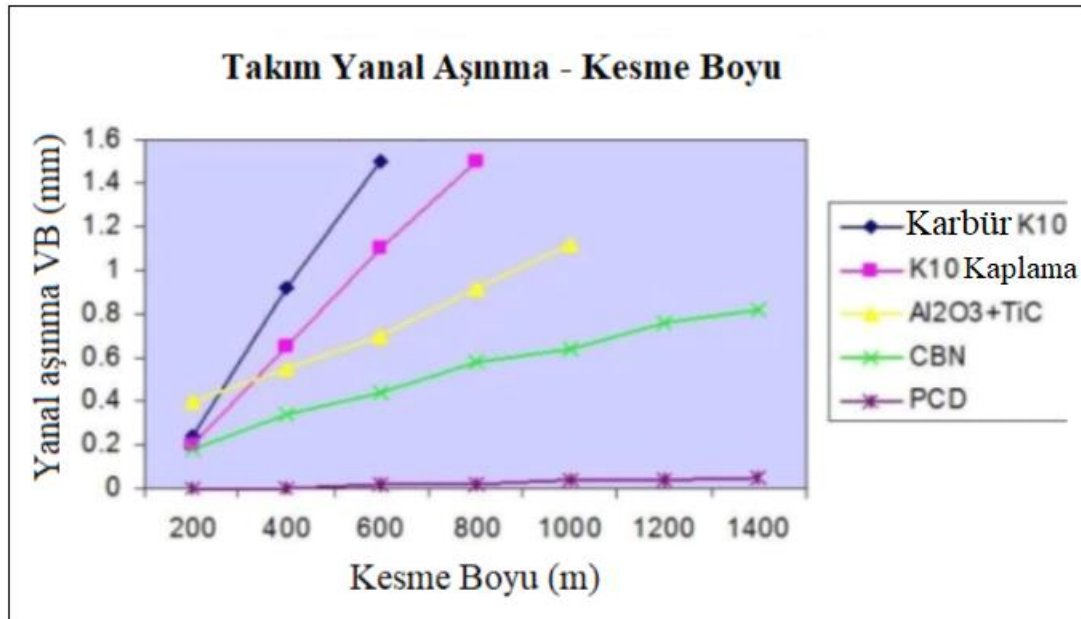
Kesici takım etkisi

Kesici takım malzemesi ve geometrisinin takım ömrü üzerinde ve işlenen yüzeyin kalitesi üzerinde önemli etkileri vardır. Karbon fiberli kompozitlerin işlenmesinde polikristalin elmas (PCD), tungsten karbür (WC) ve CBN malzemeden yapılmış kesiciler kullanılarak işleme yapılabilir. Delik delme işlemleri için PCD takımlar tungsten karbür takımlara göre daha kaliteli yüzey çıkarır ve kesme kuvvetlerini düşürür. Ancak PCD yapısı gereği çok kırılgandır ve malzeme içinde kırılması durumunda delaminasyon, kesilmemiş lif hasarı verir. Delik toleransının dışına çıkmasına sebep olur. Tornalama işleminde CBN kullanımı

yüzey kalitesini artırır ve takım ömrünü uzatır [30]. Pozitif talaş açısı özellikle düşük ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğünü düşürür. İnceltmiş web, 85° uç açısı ve üç ağızlı bir matkap ilerleme kuvvetini düşürmekte ve delaminasyonu kontrol etmede fayda sağlamıştır [31]. Farklı kesici takım malzemelerinde oluşan yanıl aşınmalar Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.5. FRP kompozitlerde kesme mekanizmaları, a) Tip-I, b) Tip-II, c) Tip-III, d) Tip-III, e) Tip-IV, f) Tip-V [29]



Şekil 2.6. Farklı kesici malzemeleri için serbest yüzey aşınması sonuçları [31]

2.2.2. CFRP kompozitlerin delme işlemleri

Metalik malzemelerin delme işleminde kullanılan iki kesme ağızlı ve iki kanallı matkaplar kompozit malzemelerin delinmesinde de yoğun olarak kullanılır. Burada matkap ömrü kaliteli delik sayısının miktarı ile ölçülmektedir. Matkap aşınması sonucunda itme kuvveti ve tork artmaktadır. Bunun sonucunda da delik kalitesi ve toleransı bozulmaktadır.

Kompozit malzemelerin imalatları sırasında uygulanan kurutma işlemi sırasında malzemede meydana gelen çekmelerden dolayı, kompozitlerde fırınlama öncesi parçaya delik açılması uygun değildir. Bundan dolayı kompozitlerde delme işlemi kurutma işlemi tamamlandıktan sonra gerçekleştirilir. Delme işlemi genelde detay parçaların tezgahta işlenmesi sırasında 2-2,5 mm pilot delik olarak yapılır. Detay parçaların montaj işlemleri sırasında ise pilot delikler üzerinden son delik ölçüsüne göre taşınabilir ekipmanlar ile delme işlemi yapılır. Bu sayede parçaların delik eksenleri aynı merkezde açılarak montaj işlemi kusursuz yapılabilir.

Kompozit malzemelerin delinmesi sıradan bir işlem değildir. Delme sırasında delik kalitesinde oluşan problemler, kompozit parçanın hurdaya ayrılması veya tamirata gitmesine sebep olan unsurların %60'ını kapsamaktadır. Bundan dolayı delme operasyonuna büyük bir önem verilmeli ve en kaliteli şekilde yapılması sağlanmalıdır. Kompozit malzemelerde delme işlemi daha ticari malzemelere göre fiber yönü, kurutma şartlarını da kapsayan daha fazla parametreden etkilenmektedir. Çizelge 2.8'de delme işlemine etki eden faktörler gösterilmiştir.

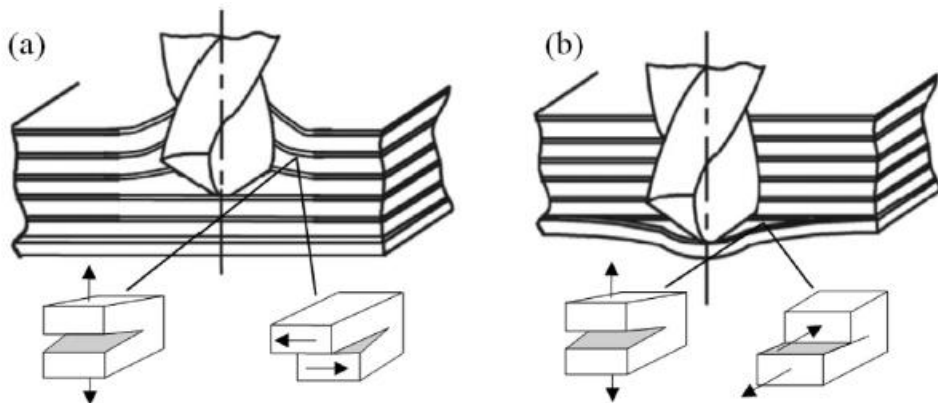
Çizelge 2.8. Kompozitlerde delik delmeye etki eden faktörler

Kompozit Özellikleri	Fiber yönü	Fiber hacimsel yoğunluğu	Kurutma koşulları	Fiber özellikleri	Matriks özellikleri
Kesici Takım	Geometri	Kaplama	Malzeme		
Ekipman	Operatör	Bakım	Kalibrasyon	Vibrasyon	Güç
Kesme parametreleri	İlerleme hızı	Soğutma	Matkap çapı	Kesme hızı	

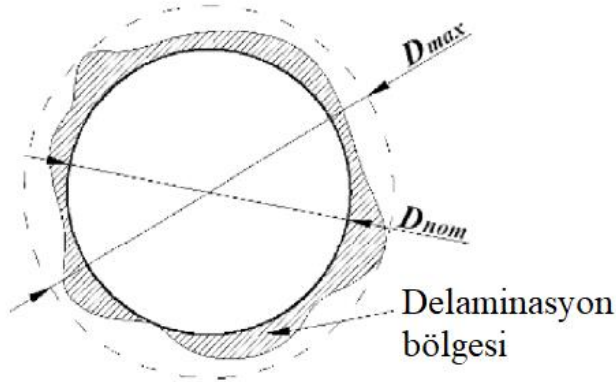
Delik kalitesi

Delme işlemi kompozit parçalarda diğer imalat yöntemleri arasında en önemli yere sahiptir. Delik kalitesi montaj işlemi sonrasında kompozit parçanın ömrüne ve çalışma kalitesine etki eden en önemli kriterlerden biridir. Kompozit malzemelerde delik kalitesinin belirlenmesinde kullanılan hasar tipleri; çatlak formasyonu, delaminasyon, dairesellik, yüzey pürüzlülüğü, çap sapması, kesilemeyen fiberler olarak sınıflandırılabilir [32]. Kesici takım aşınması, yüzey delaminasyonu, parça içi delaminasyonu, fiber/reçine atması hasarları kompozit parçanın mukavemetini ve yorulma ömrünü olumsuz olarak etkilemektedir [33]. Delaminasyon hasarı CFRP kompozitlerde en çok rastlanan hasar tipidir ve parçanın mukavemet ve katılık kaybetmesine sebep olur. Delaminasyon, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi delik girişinde fiber çekilmesi ve delik çıkışında fiber itilmesi şeklinde görülebilir. Kesici takım deliğe giriş yaptıktan sonra belli bir yol alıp geri yönde çıkış yaptığı durumda fiber çekmesi oluşur. Kesici takımın delik çıkışına doğru ilerlemesi ile birlikte son laminat tabakasına gelindiğinde ince olan tabaka daha fazla deformasyona karşı duramaz ve kesici bir panç gibi davranarak kesilmemiş ince fiber tabakasını laminatdan ayırır [34]. Sonuç olarak itme delaminasyonu delik çıkışında itme kuvvetinin malzemenin katları arasındaki yapışma mukavemetini yenmesi sonucu oluşur.

Delaminasyon ölçümü için delaminasyon faktör hesabı yapılır. Hesaplama, hasarlanan alanın en büyük çapı ile olması gereken nominal delik çapının birbirine oranlanması ile gerçekleştirilir. Şekil 2.8'de delaminasyon bölgesi gösterilmiştir. Delaminasyon faktörü hesabı Şekil 2.8 ve 2.1 No.lu formülde gösterildiği gibi yapılmaktadır [35].



Şekil 2.7. Delaminasyon tipleri gösterimi a) Çekme delaminasyon oluşumu, b) itme delaminasyon oluşumu [36]



Şekil 2.8. Delaminasyon faktörü F_d şematik gösterimi [35]

$$F_d = D_{max} / D_o \quad (2.1)$$

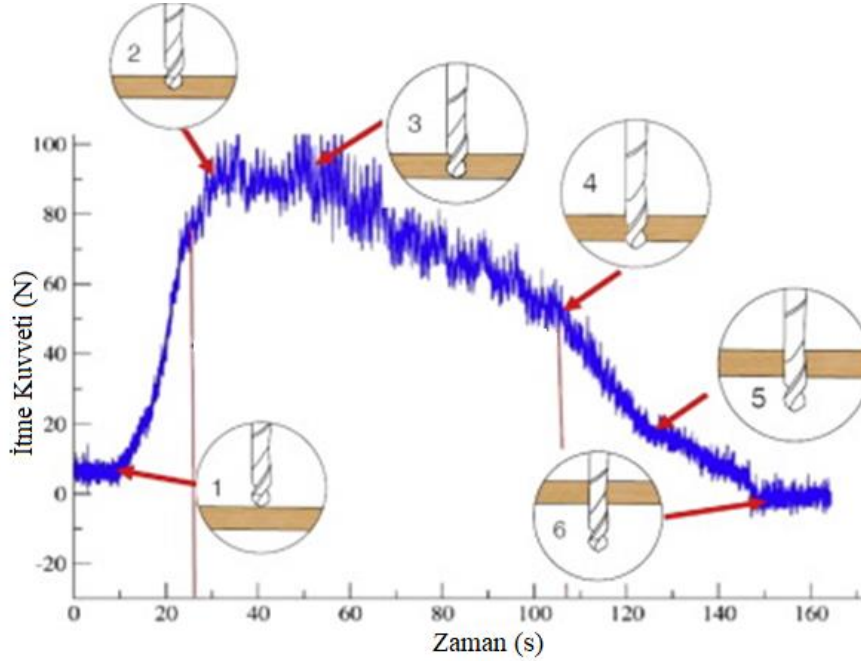
İtme kuvveti ve tork

Kompozit malzemelerde en çok meydana gelen kalite problemi delaminasyon oluşumudur. Delaminasyon büyük çoğunlukla delik çıkışında meydana gelmektedir. Delaminasyon oluşumuna etki eden en önemli kesme kuvveti itme kuvvetidir. İlerleme hızının artması ile itme kuvveti artmakta ve bunun sonucunda da delik çıkışında delaminasyon meydana gelmektedir. İtme kuvvetinin izlenebilir olması sayesinde kesici takım aşınmasının önlenmesi ile delik kalitesinde oluşabilecek problemler önlenabilmektedir. Şekil 2.9'da CFRP kompozit malzemede iki ağızlı matkap ile yapılan delme sırasında oluşan itme kuvveti gösterilmiştir [37].

Kesici takım ömrü

FRP kompozit malzemelerde delik delme operasyonunda kullanılan matkapların ömrünü etkileyen en önemli aşınma tipleri serbest yüzey aşınması ve keski kenar aşınmasıdır. Delinen delik sayısı arttıkça ve yüksek ilerleme hızlarına çıkıldığında bu aşınma miktarları artmaktadır [17]. FRP kompozitlerde görülen diğer bir aşınma mekanizması ise abrasyondur. Abrasyon, malzeme içindeki sert partiküllerin kesici ağıza mikro çekiçleme yapması ile gerçekleşir. Mikro çekiçlemenin gerçekleşmesindeki en büyük sebep kompozit malzemenin iç yapısının homojen olmaması sonucunda kesme kuvvetinde meydana gelen dalgalanmadır [17]. Metallerin aksine kompozitlerde difüzyon aşınması, daha düşük

sıcaklık ve basınçtan dolayı, nadir olarak görülür. Büyük kırılmalar ve kenar çekiçlemesi kesikli işleme şartlarında, takviye malzeme ile matriks malzeme arasındaki mekanik özelliklerin değişmesi sonucunda oluşabilir [37].



Şekil 2.9 CFRP kompozit malzemede delme sırasında oluşan itme kuvveti [37]

2.3. Alüminyum Malzemelerin İşlenebilirliği

Alüminyumun işlenebilirliğini etkileyen faktörler, işleme şartları ve malzemenin metalürjik yapısı olarak sınıflandırılabilir. Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesici takım geometrisinin önemi çok büyüktür. Bu alaşımların işlenmesinde pozitif talaş açılı takımlar kullanılır. Pozitif talaş açısının büyüklüğü malzemenin sertliği de göz önünde bulundurularak 0° - 30° arasında değişmektedir [38].

Genelde alüminyum alaşımlarının işlenmesinde takım kuvvetleri düşüktür ve kesme hızı artarken azalma eğilimi gösterir. Ticari saf alüminyumun özellikle düşük hızlarda kesilmesi sırasında yüksek kuvvetler oluşur. Özellikle düşük kesme hızlarında çoğu alaşım katkılarının ya da soğuk işçiliğin saf alüminyum üzerine etkisi takım kuvvetlerini azaltır.

Alüminyumun temel işlenebilirlik problemi talaşların kontrolündedir. Çatlaktan önceki yaygın plastik deformasyon hegzagonal yapıli magnezyuma göre yüzey merkezli kübik yapıya sahip alüminyumda daha kolay oluşur. Alüminyum ve bazı alüminyum alaşımlarının işlenmesi esnasında talaş sürekli, oldukça kalındır, güçlüdür ve kolay kırılmaz. Talaşın gerçek şekli oldukça değişkendir. Alüminyumun işlenmesinde kontrol edilebilir talaş olumunu sağlayabilmek için çeşitli takım tasarımları geliştirilmiştir. Talaş oluşumu, talaş ve yaklaşma açısının değişimi ile veya talaş kırıcıların etkisi ile iyileştirilebilir. Kırılmış veya daha kolay talaş üretmek için diğeri bir yaklaşım, alaşımların kompozisyonunu değiştirmektir [39].

Çoğu alüminyum alaşımları, yüksek kesme hızlarında işlenerek, iyi yüzey kalitesi ve uzun takım ömrü verirler. Genellikle, sertleşmiş ve temperlenmiş alaşımlar, tavllanmış alaşımlardan daha kolay işlenir ve daha iyi yüzey meydana getirirler. Takım talaş ara yüzeyi temas alanı çok büyük olduğunda, yüksek ilerleme kuvveti (F_f) düşük kayma düzlemi açısı ve çok kalın talaşların oluşmasına yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak, yüksek kesme kuvveti (F_c) ve fazla güç sarfiyatı ortaya çıkmaktadır. Bu etki, alaşım yaparak veya soğuk çekme ile özellikle düşük hızlarda, azaltılır. Genellikle, çoğu alüminyum alaşımlarının (döküm ve çekme alaşımlar), sahip olduğu düşük kayma dayanımlarına rağmen işlenmesi saf alüminyumdan daha kolaydır. Saf Alüminyum işlendiğinde talaş sıvanması oluşmaz. Fakat çok yüksek kesme hızı dışında kötü yüzey kalitesi oluşur. Çoğu Al alaşımlarında, birden fazla faz ihtiva ettiğinden, düşük hızlarda kesici köşelerde kenar birikimleri oluşumu (BUE) meydana gelir. Bu sorun kesme hızındaki artışla giderilebilir [40].

Standart alüminyum alaşımları kurşun, kurşun-bizmut ya da kalay-antimuan katkılarını içerir. Bu ilavelerle talaşlar küçük parçalara daha hızlıca ayrılır. Bunlar düşük ergime noktalı metallerdir. Alüminyum içinde ince damlacıklara parçalanarak yapı içinde mevcut olurlar. Bunlar talaşı oluşturmak için kesme kenarı boyunca Alüminyum talaşının sürekliliğini azaltıcı rol oynarlar. Alüminyum alaşımları içindeki katkı malzemelerinin temel amacı takım ömründen daha çok, talaş oluşumunu iyileştirmek ve metal taşınma hızını artırmaktır [39].

2.3.1. Alüminyum malzemeler ve özellikleri

Alüminyum ve alaşımlarının gösterdiği mukavemet özellikleri malzemenin saflığına ve imal edildiği yöntem şekline göre farklılıklar gösterir. Alüminyuma katılan alaşım elemanları, mukavemet özelliklerini yükseltir. Başlıca alaşım elemanları: Magnezyum (Mg), manganez (Mn), silisyum (Si), bakır (Cu), çinko (Zn) ve bazen de kurşun (Pb), nikel (Ni) ve titanyumdan ibarettir.

Alüminyum alaşımları başlıca aşağıdaki özelliklere sahiptir:

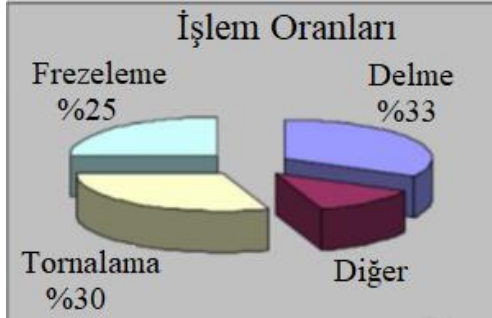
- Belirli bir hacim için yoğunluğu düşüktür ($2,6 - 2,8 \text{ g/cm}^3$)
- Mekanik özelliklerinin geniş dağılım aralığı vardır. Mukavemet, sertlik ve diğer özellikler ısıtılma işlemi ile farklı değerlere ulaşabilir
- Düşük ergime ve döküm sıcaklıkları nedeniyle özellikle çelik, dökme demir gibi malzemeler göre eritme işlemi ve dökümü kolaydır
- Atmosferik ve nemli ortama karşı korozyon direnci yüksektir
- Kimyasal stabilitesi nispeten iyidir
- Zehirlenme özelliği yoktur. Bu özelliğinden dolayı gıda endüstrisinde yaygın olarak koruma amacı ile kullanılır
- Elektrik iletkenliği ve hafif olması nedeni ile yüksek gerilim hatlarında kablo ve iletken parça olarak kullanılmaktadır. İşlenebilmesi kolaydır.
- Hafifliğinden ötürü taşıma kolaylığı ve ucuzluğu vardır.

Mühendislik açısından alüminyum alaşımlarının kullanımını sınırlayan nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Sürtünme ve aşınmaya karşı direnci düşüktür
- Korozyon direnci; paslanmaz çelik, bakır esaslı alaşımlara ve nikel esaslı alaşımlara göre düşüktür
- Alüminyum alaşımlarında kopma mukavemeti, tokluk ve sertlik düşük değerdedir. Ancak özel alaşımlandırma ile geliştirilebilir

2.3.2. Alüminyum malzemelerde delik delme işlemi

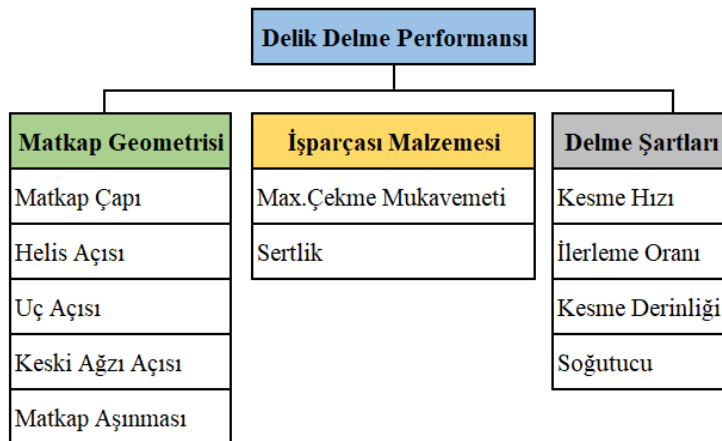
Delik delme, imalat endüstrisinde yaygın olarak uygulanan talaş kaldırma işlemidir. Delik delme işleminin yaklaşık %33'lük uygulanma oranı ile en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biri olduğu görülmektedir (Şekil 2.10) [41].



Şekil 2.10. Delik delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması [41].

Delik delme işlemini etkileyen faktörler

Talaş kaldırma sürecinde işlenebilirliği etkileyen faktörler kesme hızı, ilerleme hızı, takım malzemesi ile geometrisi, soğutma şartları, işlenen malzemenin metalurjik yapısı, işlemin yapıldığı tezgah özellikleri vb. olarak sayılabilir. Bu faktörler diğer işleme performanslarında olduğu gibi delik delme performansında da etkilidirler. Delik delme işleminde performans kriterleri ve bu kriterleri etkileyen faktörler Şekil 2.11'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Delik delme performansını belirleyen kriterleri etkileyen faktörler [42]

Kesme parametreleri

Delik delme işleminde takımın kendi etrafında dönüşü ve ilerleme hareketi olmak üzere iki hareket söz konusudur. Bu hareketler kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerini belirler. Aynı zamanda takım geometrisi ile birlikte bu iki hareket talaş kesitini belirlemektedir (Şekil 2.12).

Kesme Hızı (V_c), çevresel hızdan yararlanılarak belirlenir. Takım çapı (D) olmak üzere matkap bir dönüşte, çevresi $\pi \cdot D$ olan bir daire çizer. Dönme hızına (n) bağlı olarak kesme hızı hesaplanır.

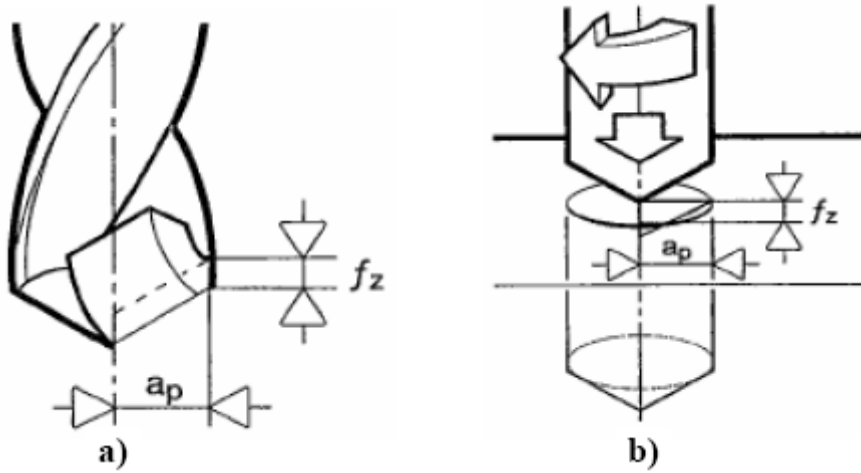
$$V_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \text{ \{m/dk\}} \quad (2.2)$$

İlerleme oranı (V_f), birim zamanda alınan yol olarak tanımlanır ve takımın iş parçasına göre ilerlemesidir. Bu aynı zamanda tezgahın veya tablanın ilerleme hızı olarak da bilinir. Devir başına ilerleme (f) ilerleme hızı ve devir hızına bağlı olarak hesaplanır.

$$V_f = f \cdot n \text{ \{mm/dk\}} \quad (2.3)$$

Talaş kesiti, talaş akışını sınırlandıran sadece matkapta oluşan talaş kalınlığıdır. İşlem sırasında delik içerisinde oluşan talaşlar işlenen yüzeye zarar vermeden, kolaylıkla kesme bölgesinden uzaklaştırılacak bir şekle sahip olmalıdırlar [43]. Talaş genişliği veya radyal talaş derinliği (a_p), takımın temasta olduğu iş parçası yüzeyidir ve tornalamada olduğu gibi yarıçap cinsinden ifade edilir.

$$a_p = D/2 \text{ \{mm\}} \quad (2.4)$$



Şekil 2.12. Delme işlemlerinde talaş kesit alanı (a) ve kesici kenar başına ilerleme (b) [44]

2.4. Kesici Takım

Takım seçimi; delik çapı, delik derinliği, sağlanması gereken toleranslar, iş parçası malzemesi, üretim hacmi ve mevcut tezgah gibi çeşitli parametrelerce belirlenir [43]. Delme işleminde, takım geometrisi, takım malzemesi ve kaplama seçimi delik kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir.

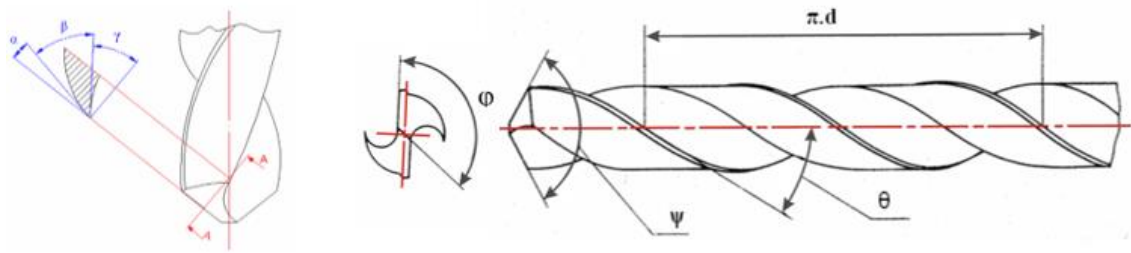
2.4.1. Kesici takım geometrisi ve kesme açıları

Delik delmede takım geometrisi, talaş şekli ve akışına tesir eden çok önemli bir faktördür. Matkapta iki ana kesici kenarların birbirine göre açısal konumu *uç açısı* (ψ), enine kesme ağzının konumu *enine kesme açısı* (ϕ), kanalların matkap eksenine göre konumu *helis açısı* (θ) olarak tanımlanır. Şekil 2.13' te bir matkaptaki açılar genel olarak gösterilmiştir. Matkaplar tek uçlu kesici takımlara oranla çok daha karmaşık bir geometriye sahiptir. Matkabın bir ağzı tek uçlu kesicilere benzetilerek basite indirgenebilir. Böylece matkabın ana kesme ağzının geometrisi tek ağzılı takımlarda olduğu gibi tayin edilir. Burada talaş açısı (γ), serbest açısı (α) ve kama açısı (β) gibi kesme açıları vardır [45].

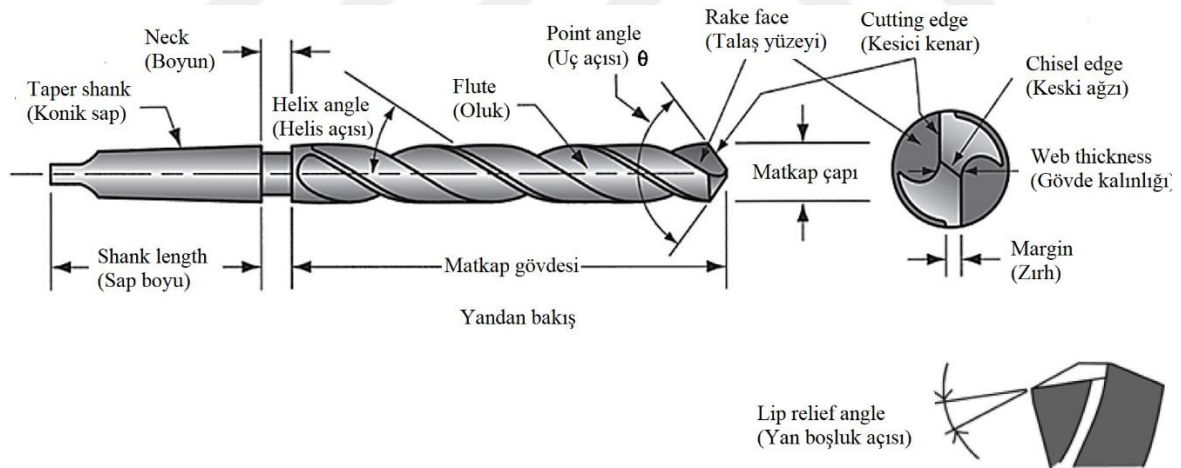
Matkap geometrisine ait görsel Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Yüksek Si içerikli alüminyumların işlenmesinde 115° - 120° uç açısı tercih edilirken, Si içeriği düşük alüminyumlarda 130° - 140° uç açısı tercih edilir. Genelde helis açısı uygulamaya bağlı olarak 12° - 38° aralığında seçilirken, standart uygulamalarda 30° olarak tercih edilir. Büyük

uç açısı ve büyük helis açısı yığıntı talaş oluşumunu azaltmada etkilidir. Yan boşluk açısı alüminyum malzeme delmede etkili olurken 12° - 13° aralığında seçilir. Matkap kırılmasını engellemek veya yumuşak malzeme delerken daha büyük açılar tercih edilebilir. Havacılık sektöründe genel matkap çapları 5-10 mm arasındadır. Helisel matkaplar belirli imalat standartlarına sahiptir ve genel olarak iyi sonuçlar verirler [46].

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^{\circ} \quad (2.5)$$



Şekil 2.13. Matkapta uç, helis ve enine kesme kenarı açıları [45]

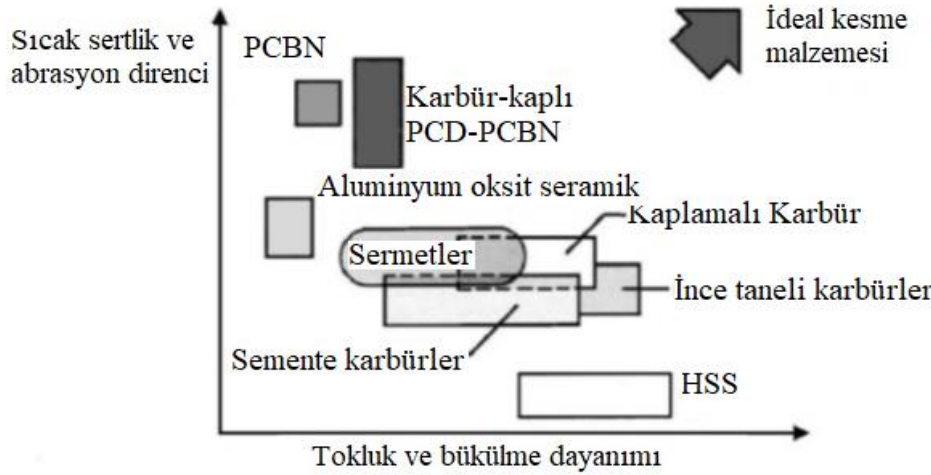


Şekil 2.14. Helisel matkap geometrisi [46]

2.4.2. Kesici takım malzemeleri

Takım malzemesi seçimi, işlenecek malzemenin kalitesine, üretim gereksinimlerine, parça tasarımına, tezgah yapısına ve takım maliyetine göre yapılır. İyi bir kesici malzemesinde bulunması istenen özellikler, yüksek sıcak sertliği, termal iletkenlik, kimyasal etkileşime girmemesi, yüksek tokluk ve yorulma direncidir [47]. Kesici takım malzemeleri sertlik,

tokluk ve mukavemet gibi mekanik özelliklerine göre üçe ayrılabilirler. Bunlar yüksek hız çelikleri (HSS), tungsten karbürler ve seramik/süper sert malzemelerdir [48]. Bazı kesici malzemelerine ait tokluk ve sertlik değerleri Şekil 2.15'te gösterilmiştir. HSS malzemeler yüksek tokluk değerine sahip olmasına rağmen düşük sertlik değerinden dolayı FRP benzeri aşındırıcılığı yüksek malzemelerin işlenmesinde kullanımı uygun olmamaktadır.



Şekil 2.15. Çeşitli takım malzemelerinin tokluk ve sertlik değerleri arasındaki ilişki [49]

Tungsten karbür takımlar

Tungsten karbür, sert tungsten parçacıkları ile kobalt gibi daha yumuşak bir metal bağından oluşan, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen kesici takım malzemesidir. Kobalt miktarının artışıyla tokluğun artmasına karşılık sertlik, basma mukavemeti, elastik modül ve abrasif direnç azalır. Kobalt miktarı karbürün kalitesine bağlı olarak %4-12 arasındadır [50]. Kesme kenarı 1200°C civarındaki sıcaklıklarda dahi sertliğini kaybetmeden kesme yapabilmektedir.

Üzeri 0,05-0,08 mm kalınlıkta TiC, Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ya da Titanyum Nitrit (TiN) tabakası ile kaplanabilir. İki ya da daha fazla kaplama işlemi birbirinin üstüne yapılabilir. Kobalt ile zenginleştirilmiş ana malzeme üzeri CVD ve onun da üzeri PVD ile kaplanan özel uç, frezeleme işleminde aralıklı kesme sırasında kenar talaşlanması direncini arttırmak için tasarlanmıştır. Ayrıca 120-275 m/dak. (400-900 ft/dak) devirde kuru frezeleme de yapabilmektedir [51].

Polikristalin elmas (PCD) takımlar

Sentetik elmas olarak da bilinen polikristalin elmas takımlar, elmas parçacıklarının (2-50 μm) yüksek sıcaklıkta (1500° C) ve basınçta (60 GPa) sinterlenmesi ile yapılır. Bir metal yapıştırıcının, genelde kobalt, kullanılması ile elmas iç yapı büyümesi desteklenir ve daha sık bir yapı oluşturulur [52]. Ortaya çıkan malzeme yüksek sertliğe sahiptir ve doğal elmasa göre daha uniform özellikte bir yapıya sahiptir. PCD takımların özellikleri elmas tane boyutuna ve kobaltın iç yapıda dağılımına göre belirlenir [53]. 800°C üzerindeki sıcaklıklarda elmas grafitte dönüşür ve bundan dolayı kesme işlemi bu sıcaklık üzerinde olması durumunda PCD takım kullanımı önerilmez. Ancak FRP kompozitlerde sıcaklıklar bu seviyenin altında kaldığı için PCD kullanımı gerçekleştirilebilmektedir [54].

Elmas Kaplama (DC)

Elmas kaplama uygulaması kesici takımların aşınma direncini yükseltme ile performansını arttırmak için kullanılabilir. Kobalt yapıştırıcılı tungsten karbür malzeme üzerine yapılan elmas kaplama, kesici takımın aşınma direncini yükselterek daha uzun süreler kullanılmasını sağlar.

Tungsten karbür malzeme üzerine elmas emdirme işleminin problemlerinden bir tanesi, takım yüzeyinde bulunan kobaltın, elmas çekirdeğini ve büyümesini engelleyerek yapışmanın zayıf olmasına sebebiyet vermesidir [55]. Diğer bir sebep ise elmas ve tungsten-kobalt malzemelerin termal genişleme katsayılarındaki farklılıkların, kimyasal buhar çöktürme (CVD) odasındaki yüksek sıcaklığın etkisiyle, ara yüzeyde büyük artık stres oluşmasına sebep olmasıdır [55].

2.4.3. Takım aşınması

Bütün kesici takımlar talaş kaldırma işlemleri sırasında aşınır ve bu aşınma takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam eder. Takım aşınması kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [56]. Kesici takım geometrisi bozulmuş, üretilen parçada istenen yüzey kalitesi sağlanamıyor ve yeni takıma göre kullanılan gerekli kesme gücü artıyorsa kesici takım aşınmış olarak nitelendirilir [57]. Kesici kenar ömrü,

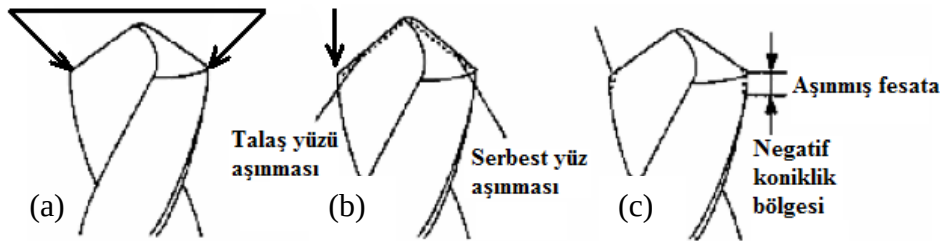
takım geometrisini değiştirmeye çalışan mekanik, termal, kimyasal ve aşındırıcı yüklerle belirlenir.

Aşınma mekanizmaları

Talaş kaldırma sırasında kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin bir sonucu olarak, bazı temel aşınma mekanizmaları metalden talaş kaldırma işlemine etki eder. Bunlar;

- Abresiv (aşındırıcılarla) aşınma
- Difüzyon aşınma
- Oksidasyon aşınması
- Yorulma ile aşınma (statik ve dinamik)
- Yapışma ile (adhesiv) aşınma olarak yazılabilir.

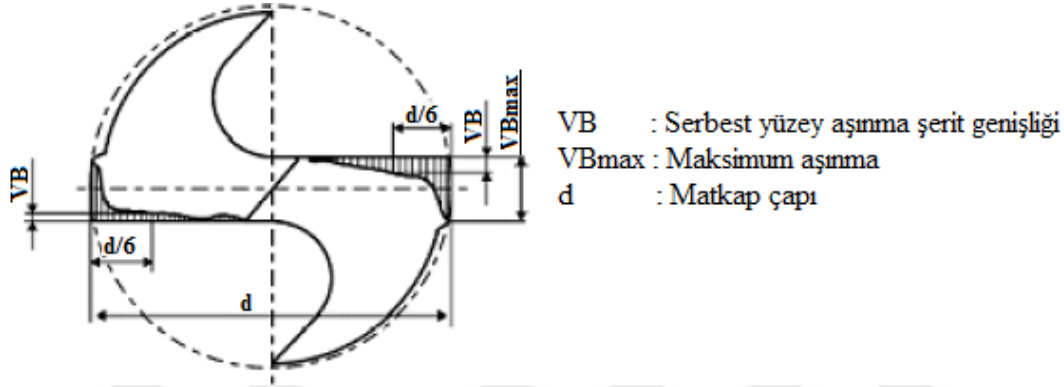
Delik delme işlemlerinde, kesme parametrelerinin optimize edilmesi oldukça önemlidir. Çünkü delme parametreleri efektif takım acılarını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, ilerleme hızının artması, helis acısını arttıracak ve boşluk acısını azaltacaktır. Boşluk acısının azalması, takımın ana serbest yüzeyinin, işlenen yüzeye sürtünmesini artırarak, serbest yüzey aşınmasını (flank wear) hızlandıracaktır [58,59]. Matkap takımlarında aşınma, Şekil 2.16'da görüldüğü gibi serbest yüzeylerde serbest yüzey aşınması, köselerin yuvarlanması, kesici kenarla zırhın birleştiği noktada zırhın aşınması, krater aşınması ve radyal ağız (enine kenar) aşınması şeklinde oluşur [60].



Şekil 2.16. Helisel matkaplarda oluşan aşınma mekanizmaları a) Köşelerin yuvarlanması, b) Serbest yüzey aşınması, c) Zırh aşınması [60]

Genelde aşınma, kesici kenarın zırh (fesata) ile birleştiği noktada başlar, kesici ağızlar ve serbest yüzeylerde gelişir. Kesici ağızlarda aşınmanın artması, serbest yüzeylerde boşluk açısı kaybolmuş konik yüzey meydana getirir. Oluşan bu konik yüzey, serbest yüzeylerde

aşınma şeritlerini (VB) temsil eder (Şekil 2.17). Serbest yüzeylerdeki aşınma, kesme işleminin yerini sürtünme ve zorlamalara bırakarak, ısı oluşumunu artırır ve aşınma hızlanarak takımı köreltir [60].



Şekil 2.17. Serbest yüzeyde oluşan aşınmanın gösterimi [60]

Takım aşınma şekilleri

Kesici kenarın büyütülerek incelenmesi ve aşınma tipinin verdiği ipuçları doğrultusunda hareket etmek suretiyle kesici kenar için uygun bir takım ömrü kontrol edilebilir, artırılabilir ve emniyetli hale getirilebilir. Toplam 9 adet aşınma tipi mevcuttur.

- Yan kenar (yanak) aşınması, kesici kenarın yan yüzeylerinde oluşan, genellikle abresiv aşınma mekanizmasından kaynaklanan bir aşınma tipidir.
- Krater aşınması veya çukur aşınma olarak bilinen aşınma tipi, talaş yüzeyinde abresiv ve difüzyon aşınma mekanizmaları sebebiyle oluşur.
- Plastik deformasyon, kesici kenar üzerindeki yüksek basınç ve yüksek sıcaklık birleşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkar.
- Termal çatlaklar genellikle ısıl değişimlerden kaynaklanan yorulma aşınmasıdır. Özellikle frezelemede oluşan sıcaklık değişimleri bu tip aşınmanın oluşmasına sebep olur.
- Çentik aşınması, yardımcı kesici kenarda oluşan çentik aşınması tipik bir adhezyon (yapışma) aşınması olmakla beraber oksidasyon aşınma mekanizması ile birlikte büyüyebilir.
- Çıtlama, kesici kenarda meydana gelen çentikler, aşınmadan ziyade kesici kenardaki küçük boyutlu kırılmalardır.

- Yığılma – Sıvanma (BUE), kesici kenarda yığılma oluşması, genellikle sıcaklık ve sıcaklıkla ilişkili bir durum olan kesme hızının etkisiyle meydana gelir.
- Mekanik yorulma kırılmaları, kesme kuvveti darbeleri aşırı olduğu zaman oluşur. İşleme sırasında kesme kuvvetlerinin etkisi ile sert metal uçlar mekanik şokların etkisi altına girer.
- Kırılma, kesici kenar görevinin tamamen sona ermesidir. Kenar kırılması genellikle diğer aşınma tiplerinin en son noktasıdır.

2.4.4. Takım ömrü

Bir takımın yararlı çalışma süresi, kesici ucun iş parçası üzerinde kaldığı toplam zamandır. Bu zaman zarfında uçta oluşan aşınmaların kontrol edilmesi ile takım ömrünün azalması, ölçülerde sapmaların meydana gelerek ölçü kontrolünü zorlaşması ve işlenmiş yüzeylerin bozuk çıkması engellemiş olur [56]. Şekil 2.18’de takım aşınması kontrolünün yapılabileceği bölgeler gösterilmiştir.

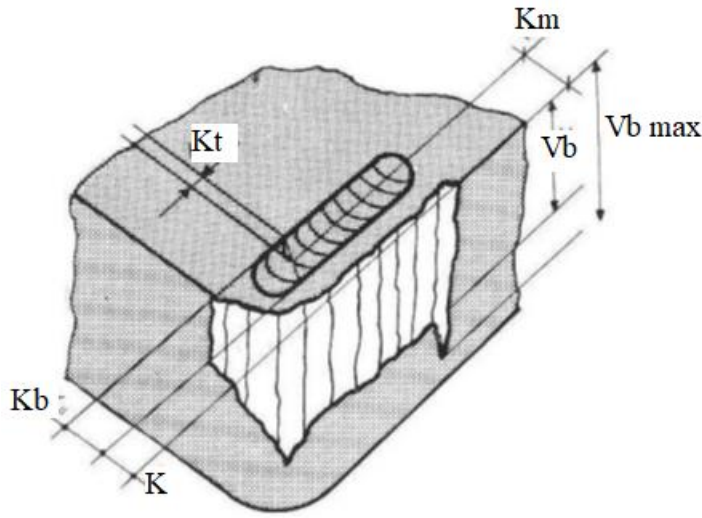
Takım aşınması takım ömrünü değerlendirmek için en önemli kriter olmakla beraber takım ömrünü değerlendirmek için başka kriterlerin kullanılması da söz konusu olabilir. Bu kriterler:

- İşlenen yüzeyin yüzey kalitesinin değişmesi,
- Kesme kuvvetinin büyümesi sonucu oluşan değişikliklerin tezgah ve iş parçasında sapmalara sebep olmasından dolayı iş parçasının boyutlarının beklenenden farklı çıkması,
- İşleme sıcaklığının değişmesi [61].

2.5. Kompozit/Metal İstif Yapıların Delinmesi

Havacılık sektöründe kullanılan parçaların yüksek mekanik yüklemelere maruz kalması sebebiyle malzeme kalitesi seçimi gerek ağırlık gerekse dayanım gereksinimlerinden dolayı önemli bir yere sahiptir. Son zamanlarda özellikle hava araçlarının kanat, elevatör, kanatçık gibi parçalarında kompozit ve metal malzemelerden yapılan parçalar istif şeklinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu sayede gerekli dayanım sağlanırken ağırlık düşürmek

mümkün olabilmektedir. Bu tür istif yapıları oluşturan parçaların detay imalatları yapılırken üzerlerine parçaların birleşimini yapabilmek için 2-2,5 mm çapında pilot delik dışında hiçbir delik delinmez. Parçaların birleştirilmesi için delinmesi gereken delikler montaj aşamasında gerçekleştirilir. Bunun sebebi ise montaj sırasında büyük oranda oluşabilecek kaçıklıklardan dolayı parça birleşimlerinde sıkıntı yaşanmasını önlemektir. Bu sayede istif yapıyı oluşturan kompozit ve metal parçalar montaj sırasında birlikte delinerek istenen hassasiyette bir birleştirme sağlanmış olur [62].



Şekil 2.18. Takım aşınma kontrolünün yapılacağı bölgeler [56]

Ancak mekanik özellikleri birbirinden farklı olan malzemelerin birlikte delinmesi bazı sorunların da oluşmasına sebep olmaktadır. Parçaların ön deliksiz gelmesi ve deliklerin tam çapının dolu malzemeye istif yapıda delinmesi gerekmektedir. Bu sayede istif yapıyı oluşturan parçalar üzerindeki ön deliklerin eksenlerinin birbirinden kaçık olması durumunda matkap kırılması, kesici kenar aşınması, yüksek ısı kaynaklı kompozit malzemede yanmalar, dairesellik ve silindiriklikte bozukluklar, giriş ve çıkışında çap büyümesi, delik çıkışında talaş yığılması gibi sorunlar meydana gelebilmektedir [63].

İstif yapıda dolu malzemeye delik delinmesi işleminde ise bu tür problemler çok daha az yaşanmaktadır. Kompozit malzemelerin tek başına delinmesi için montaj sırasında havalı motorlar kullanılarak el ile delme işlemi yapılmaktadır. Kompozit ve metal istif yapılarda ise delik çapları büyüdükçe el ile delik delmek çok uzun zaman almakta ve kalite problemlerine yol açmaktadır. Son yıllarda havacılık sektöründe pozitif beslemeli delme

ekipmanları kullanılmaya başlanmıştır. Bu ekipmanlar ile istif yapıdaki malzemeler çok daha hızlı, kontrollü ve kaliteli delinebilmektedir. Bu ekipmanlar parça üzerinde kurulan delme takımına bağlanır ve otomatik ilerleme ile delik delme işlemini gerçekleştirir. Bu çalışmanın yenilikçi yönü, montaj aşamısındaki delme işleminin simüle edilerek havalı matkap motoru ve otomatik delme ekipmanı kullanılarak yapılmış olmasıdır.

2.5.1. Kompozit/Alüminyum istif delme

Kompozit-alüminyum istif yapılarda delme işlemi sırasında karşılaşılan en önemli problemler, kesici takım aşınmasının hızlı gerçekleşmesi, yüksek itki kuvveti ve tork meydana gelmesi olarak sıralanabilir. Yüksek tork ve itki kuvveti, yüksek ilerleme hızı ve kesme hızında meydana gelmektedir. Ancak yüksek iş mili hızlarında kompozit malzemede itki kuvvetinin düştüğü söylenebilir. Bu düşüşün sebebi, yüksek sıcaklıkta kompozit içindeki epoksi malzemenin kesmeye karşı direncinin düşmesidir [64]. Kesici çapının artması da itki kuvvetinin artmasına sebep olabilmektedir. Burada etken parametre keski kenarı boyunun çap artışı ile birlikte artmasıdır. 4 mm çaplı bir kesicide keski kenarı boyu 0,6 mm iken, 8 mm çaplı bir kesicide 1,6 mm olabilmektedir. Talaş kırılması, 6 mm üzeri çaplarda ve 0,1 mm/dev ilerleme hızında daha iyi gerçekleşebilmektedir [64]. 10 mm alüminyum ve 10 mm CFRP plakalar ile oluşturulmuş istif yapıda ve 10,8 mm çaplı matkap ile delinen deliklerde kararlı ve kabul edilebilir kesme kuvvetleri 60 deliğe kadar gerçekleşebilir ve CFRP malzemede 0,05 ilerleme hızında 4 µm değerine kadar yüksek Ra değerleri elde edilir. Alüminyum malzemede ise 2,4 µm Ra değerine kadar çıkabilmektedir [65].

2.5.2 Delik kalitesini belirleyen faktörler

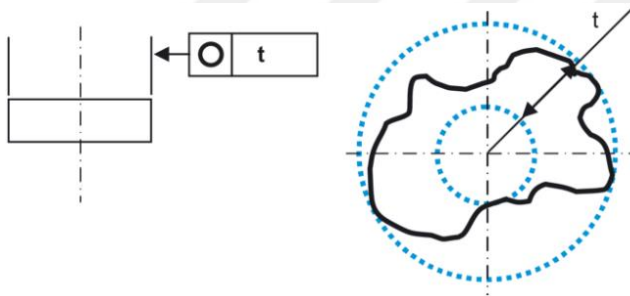
Hava aracı montaj aşamasında gerçekleştirilen delme operasyonu montaj aşamasının en önemli işlemlerinden biridir. Tüm talaş kaldırma işlemlerinin %40'a yakını delme işlemi oluşturmaktadır [66]. Birleştirilecek olan parçalara delinen deliklerin hassasiyeti montaj prosesinin kalitesini gösteren önemli bir parametredir. Montaj aşamasında delme işlemleri el ile kullanılan matkaplar ile yapılmaktadır. Bundan dolayı delik kalitesinin ölçülmesi ve problemlerin tespit edilmesi montaj işlemlerinin hatasız ve zamanında yapılması için önemlidir. Delik kalitesini belirleyen faktörler delik çapı, dairesellik, silindiriklik, yüzey pürüzlülüğü, talaş yığılması, delaminasyon olarak sıralanabilir.

Delik çapı

Delinen deliklerin çap ölçümleri gerçekleştirilerek toleranslar dahilinde olup olmadığına bakılır. Çap ölçümleri üretim alanında yapılan kalite kontrollerinde geçer-geçmez masterlar ile yapılmaktadır. Bu sayede hızlı bir ölçüm işlemi gerçekleştirilir. Yeni proje başlangıcında veya master ölçümü sonucunun şüpheli olduğu durumlarda çap kontrolü için delik mikrometreleri ile ölçüm gerçekleştirilmektedir.

Dairesellik

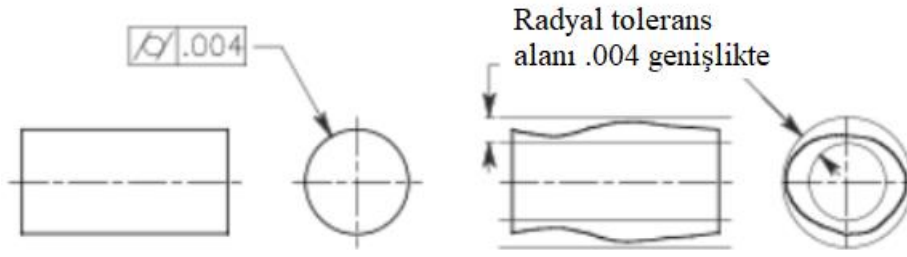
İki konsantrik dairenin çevrelediği alan toleransı olarak tanımlanır. Dairesellik ölçümü bir çok uygulamada önemli bir yere sahiptir. Mühendislik komponentlerinde en önemli temel formlardan biri dairesel kesitlerdir [66]. Montaj yapılan parçalardan geçen bağlayıcıların, delik içine düzgün şekilde oturması ve zamanla abrasiv aşınmanın engellenmesi için dairesellik önemli bir konum toleransıdır, Şekil 2.19’da gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.19. Dairesellik toleransının anlamı ve gösterimi [66]

Silindiriklik

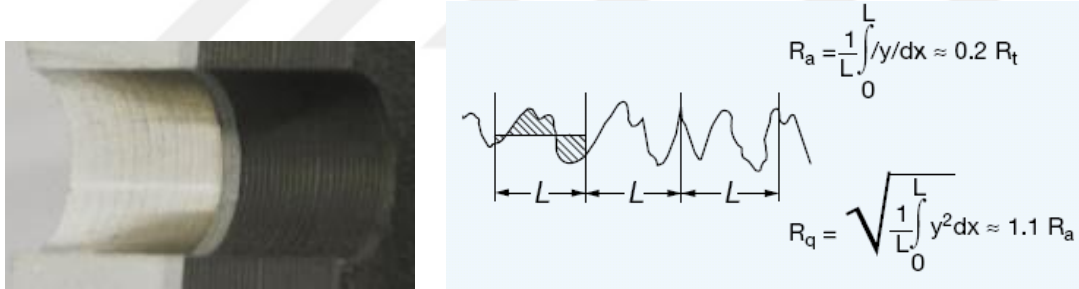
Silindiriklik, bir silindirik yüzeyin mükemmel silindirden ne kadar uzak olduğunu gösterir. Silindiriklik toleransı iki konsantrik silindir tarafından çevrelenen alanın içinde yer alan yüzeyi tanımlar [67]. Montaj yapılan parçalarda delik içinden geçen bağlayıcının delik duvarlarında istenmeyen basma gerilmelerinin oluşmaması için önemli bir yere sahiptir, gösterimi Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20. Silindiriklik toleransı gösterimi [67]

Yüzey pürüzlülüğü

Ra bir pürüzlülük parametresidir. Profilin orta çizgisinden ayrılmalarının aritmetik ortalamasıdır ve Şekil 2.21'in incelenmesi ile görüleceği üzere birbiri ardına gelen birkaç L örnekleme uzunluk boyunca meydana gelen tepe ve çukurların oluşturduğu alanların ortalamasının sonucu olarak belirlenir. Grafikteki Ra değerleri yüzey kalitesinin yetersiz göstergeleridir, yalnızca ortalama sapmayı gösterir ve dalgalılığı içermez [68].

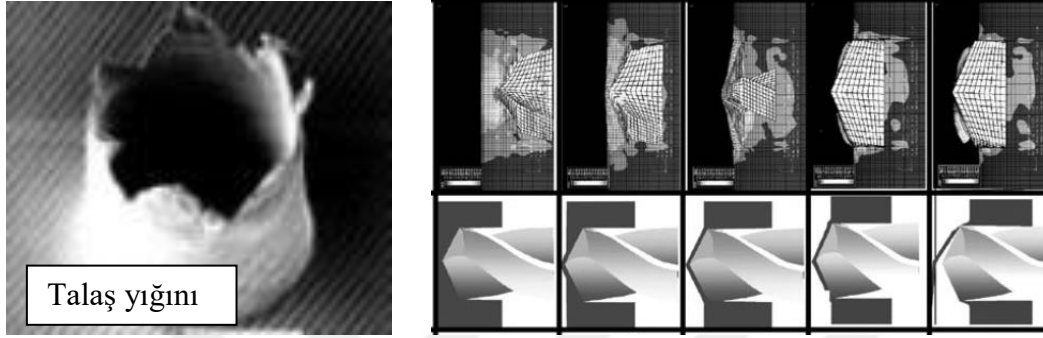


Şekil 2.21. Alüminyum/CFRP istif yapıda delinen delik iç yüzeyine ait görüntü ve Ra hesabı [68]

Delik çıkışında talaş yığını oluşumu

Talaş yığını kompleks bir yapıdadır ve bir problem kaynağıdır. Ek bir işlem yaparak parçanın temizlenmesi gerekir ve bu da zaman kaybı anlamına gelmektedir. Talaş yığını parça hassasiyetini ve kalitesini çeşitli şekillerde etkiler. Parça kenarında ölçüsel bozulmalar olması, montaj ve taşıma alanlarında zorluklar meydana gelmesi, montajda eş parçanın yüzeyine zarar vermesi vb. sorunlara sebebiyet verir. Delme işleminde talaş yığını oluşumu birincil olarak takım geometrisine ve takım/iş parçası oryantasyonuna bağlıdır (Şekil 2.22). Havacılık sektöründe yoğun olarak kullanılan metal-kompozit-sıvı şim istif

yapılarda talaş yığını oluşumu önemli bir yere sahiptir. Metal katmandan sonra gelen kürleşmiş sıvı şim ve kompozit katmanlarında, metalden delik çıkışında oluşan talaş yığını kürleşmiş sıvı şimi kırarak zarar vermektedir. Bazı durumlarda da kompozit yüzeye zarar verebilmektedir. Bundan dolayı montaj prosesinden önce katmanların ayrılıp hasarın onarılması gerekmektedir [69].



Şekil 2.22. Alüminyum malzemede delik çıkışında talaş yığını oluşumu [69]

Delaminasyon

Delaminasyon oluşumu kompozit malzemelerde delik delme sırasında delik giriş ve çıkışında katman kalkması olarak gerçekleşir. İki tip delaminasyon vardır, birincisi delik girişinde katman çekilmesi, ikincisi delik çıkışında katman itmesi şeklinde gerçekleşir. Çekme kuvveti yukarı yönlü olup üst katmandaki kesilmemiş fiberleri birbirinden ayırmaya çalışır. İlerleme hızının düşürülmesi bu delaminasyon tipinin azalmasını sağlar. İtme tipi delaminasyon oluşumu fiber ve resin tipi ile özelliklerine bağlıdır. Delik çıkışında matkap uc noktası her zaman kesilmemiş fiber üzerinde baskı oluşturur [70]. Fiber ve resin yapışma mukavemetinin bu baskıya yenildiği anda delaminasyon oluşur. En çok gerçekleşen delaminasyon tipi delik çıkışında oluşan itme tipi delaminasyondur.

2.6. Delik Delme Ekipmanları

Montaj esnasında parçaların birleştirilebilmeleri için delik delme işlemi yapılması gereklidir. Delikler perçin deliği olabileceği gibi hassas geçme toleransına sahip bağlayıcı delikleri de olabilmektedir. Delik delme işleminde kullanılabilecek cihazlar; manuel delik delme cihazları, yarı otomatik delik delme cihazları ve otomatik delik delme cihazları olarak sınıflandırılabilirler.

Manuel delik delme cihazlarında delme işlemi boyunca gerekli olan ilerleme hareketi cihazın kullanıcısı tarafından itirmek suretiyle sağlanmaktadır (Şekil 2.23). Özellikle kompozit malzemelerde delik çıkışında delaminasyonun sebeplerinden biri bu uygulamadır.

Yarı otomatik delik delme cihazlarında ise yine ilerleme hareketi kullanıcının itme kuvveti ile sağlanmaktadır. Ancak bu cihazlarda ilerleme hareketini kontrol altında tutabilmek için hidrolik kontrol ünitesi kullanılmaktadır (Şekil 2.24). Bu sayede delik çıkışında delaminasyon oluşumu büyük oranda engellenebilmektedir.

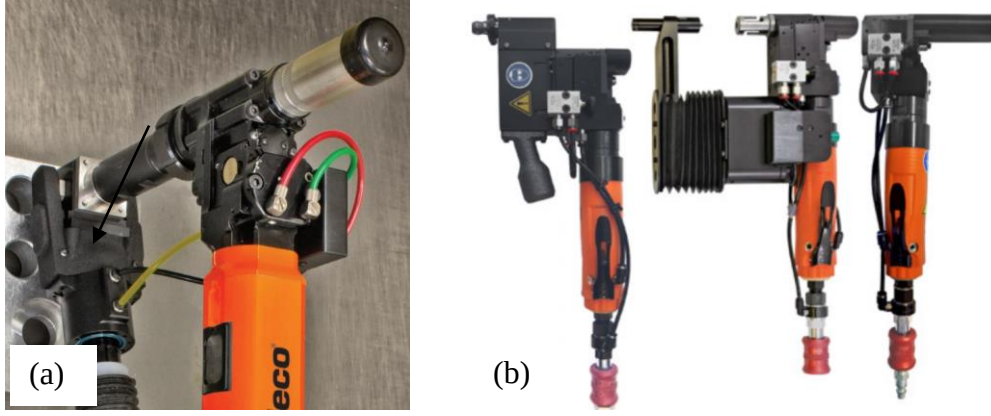


Şekil 2.23. Havalı manuel matkap motoru

Otomatik delik delme cihazlarında cihazın takım üzerine kitlenmesi eşmerkezli pens veya mekanik sıkımalı olarak sağlanmaktadır. Farklı erişime sahip alanlarda kullanmak üzere düz (Resim 2.1.a) ve timsah çeneli (Resim 2.1.b) modelleri bulunmaktadır. İş mili ilerleme hareketi işlem boyunca kontrollü olarak hareket dişlileri tarafından sağlanmaktadır [71].



Şekil 2.24. Hidrolik kontrol üniteli matkap motoru



Resim 2.1. Otomatik delme ekipmanları a) düz model, b) timsah çene model

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Urban (2005) tarafından yapılan çalışmada iş mili hızı, ilerleme hızı ve takım durumu parametrelerinin CFRP kompozit malzemenin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kullanılan işleme operasyonu kenar frezelemedir. Bu deneyin amacı en iyi yüzey kalitesini elde edebilmek için optimum parametrelerin belirlenmesidir. Yüzey kalitesi, delaminasyon derinliği ve yüzey pürüzlülüğü ile belirlenmiştir. Sonuçta yüzey pürüzlülüğünün ve delaminasyon derinliğinin ilerleme hızının ve kesme derinliğinin artmasıyla arttığı, iş mili hızının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Yüzey kalitesinin en iyi olduğu kesme durumunun yüksek iş mili hızı ve düşük ilerleme hızı, en kötü olduğu durumun ise düşük iş mili hızı ve yüksek ilerleme hızı olduğu bulunmuştur. [72].

Karpat ve Polat (2013) çift helisli frezeleme tasarımı üzerinde araştırma yaparak, frezenin spiral ters yönlü helis kanallarının, malzemenin alt ve üst katmanlarına basma kuvveti uygulayarak delaminasyonu engellediğini gözlemlemişlerdir. CFRP malzemenin özelliklerinin işlenebilirliği diğer malzemelere göre farklıdır, bu yüzden CFRP işlenmesi için özel kesici takımlar tasarlanıp geliştirilmiştir. Çift helisli takımın tasarımı ve uygun frezeleme parametrelerinin belirlenmesi araştırılmıştır [73].

Santiuste, Olmedo, Soldani, Miguelez (2012) yaptıkları çalışmada, hem klasik hasar modeli hem de düz yatay etkileşimli üç boyutlu modellemeleri uygulamıştır. Bu uygulamanın amacı, tabakalar arasında olan hasarların daha sadeleştirilmiş bir biçimde LFRP kompozitinin dikey olarak kesilerek incelenmesidir. Daha fazla gerçekçi hasar tahminleri, yatay etkileşimler ile gözlemlenmiştir. Tabaka sıralamasının tabakalar arası hasarlanma üzerindeki güçlü etkisi gösterilmiştir [74].

Asaithambi ve Gowri tarafından yapılan deneysel çalışmada, CFRP'nin kaplamasız ve TiN kaplamalı PCBN kesiciler kullanılarak tornalanması incelenmiştir. CFRP kompozit malzemeler sahip oldukları üstün özellikler sayesinde yeni teknolojiye daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar bir kalıp içinde üretilmesine rağmen, işlenerek şekillendirilmeleri gereklidir. Bu çalışmanın amacı ise CFRP kompozitin tornalanma sürecinin nasıl yapıldığını araştırmaktır. Bu deney kaplanmamış PCBN ve TiN kaplamalı PCBN takımların aşınmasını araştırmaktadır. Aşınmalar, elektron mikroskopuyla ve

CFRP' nin yüzey sertliğinin incelenmesiyle tespit edilmiştir. Kesme sıcaklığının kritik aralığı da bu deneyde gözlenmiştir [75].

Kolar, Masek ve Zeman (2014) tarafından yapılan çalışmada, köşe frezeleme operasyonunda kullanılan takımlar karşılaştırılmıştır. En büyük zorluk uzun takım ömrü ile talaş yığılması ve delaminasyon olmadan mükemmel işlenmiş kompozit parça yüzeyinin kombinasyonudur. Bu iki opsiyonun yerine getirilmesinde özel kesme geometrileri ve yumuşak ve katı malzemelere sahip olan ve aşınmaya dirençli olan kesici takımlara ihtiyaç vardır. Çapak yığılma boyu ve takım ömrü, iki tip termoplastik kompozit malzemenin, polipropilen kompozit (PPS/C) ve polieter eter keton kompozit (PEEK/C), frezeleme işlemi için hesaplanmıştır [76].

Sorrentino ve Turchetta (2011) tarafından yapılan araştırmada, kesme şartları ve kesme kuvvetlerinin etkileri tekrar gözden geçirilmiştir. Özellikle bu çalışmanın amacı kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü ile kesme hızı, eksenel kesme derinliği ve ilerleme hızı gibi kesme parametrelerinin arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmaktır. Kesme kuvvetlerinin tahmin edilebilmesi işleme hasarının minimuma indirilmesini sağlayan proses parametrelerinin seçilmesi için çok önemlidir [77].

Voss, Henerichs, Kuster ve Wegener (2014), beş farklı tek yönlü olan fiber yönlendirmesi hakkında ortogonal kesme takımı kullanarak CFRP talaş kökleri hakkında geniş çaplı bir araştırma yapmıştır. Kasıtlı olarak güçsüzleştirilmiş çalışma parçaları üretilmiştir. Bu parçalar, sürekli ve değişken hızda kesmeden kaynaklanan kesme durumlarını doğru bir biçimde temsil edebilmektedir. Bu talaş köklerinin analizinde ışık mikroskopisi, SEM ve mikrografikler kullanılmıştır. Daha önceki çalışmalarla kombinasyonlandığı zaman, işlenen CFRP'nin özellikleri daha net anlaşılmaktadır. Sonuçta çatlak hareketi, aşındırıcı partiküller, talaş oluşumu ve talaş hareketi, CFRP talaş oluşumunun anlaşılmasını mümkün kılmıştır [78].

Shahrajabian, Hadi ve Farahnakian (2012), işleme parametrelerinin ve takım geometrilerinin (ksen hızı, ilerleme hızı ve takım uç açısı) delme işlemi sırasında CFRP' nin yüzey pürüzlülüğü, delaminasyonu ve itki kuvvetleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Delik delme parçaların birleştirilmesinde çok önemli bir operasyondur. Buna bağlı olarak, istatistiksel deney tasarım tekniklerinin avantajları ile deneysel

ölçümlerin entegrasyonu gösterilmiştir. CFRP üzerinde yapılan deneyler, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon faktörü ve itki kuvveti değerlerini elde etmek için gerçekleştirilmiştir ve ANOVA'da çalışılmıştır [79].

Don, Popa, Sattel ve Gauggel (2013) yaptığı çalışma, CFRP'nin delinmesi için yeni çözümler ortaya sürmüştür. Çok yönlü ve tek yönlü CFRP için, Dagger matkap, 90°'li matkap, "Fishtail" matkap gibi değişik matkap geometrileri kullanılmıştır. Matkabın dayanıklılığını arttıran Signum veya Diamond kaplama gibi yeni kaplama teknikleri kullanılmıştır. Manuel delme çözümleri için gerekli şartlar araştırmada gösterilmiştir. İlerleme hızını yavaşlatma ünitesi uygun bir çözümdür, ilerleme kuvvetini düşürür ve herhangi bir cihaza adapte edilebilir. Bu araştırmada aynı zamanda CFRP ve CFRP-metal panellerin frezelenmesi için yeni çözümler de gösterilmiştir. Delaminasyon oluşmadan frezeleme işlemi yapabilmek için karbon fiberlerini bastıran sıkıştırma işlemi yapan kesiciler gibi farklı kesiciler sunulmuştur [80].

Nor, Che, Jaharah ve Nurul (2012) frezeleme işlemi sırasında, karbür freze takımlarının performansları ve CFRP parçanın yüzey kalitesini incelemişlerdir. İşleme sırasında, CFRP'nin içinde bulunan karbondan dolayı çeşitli problemler oluşmaktadır. CFRP'nin işlenmesi sırasında kesici takımında abrasif aşınma görülür, bu da kesici ömrünün azalmasına ve yüzey kalitesinin bozulmasına sebep olur. Bu deneyde 160 m/dak ile 200 m/dak arasındaki kesme hızı ve 0,025 mm/dev ile 0,05 mm/dev arasındaki ilerleme hızları kullanılmıştır. Sonuçlara göre, takım aşınması yüksek ilerleme hızı ve düşük kesme hızında artmış, uzun takım ömrü ise düşük ilerleme hızı ve ortalama kesme hızlarında elde edilmiştir. Ayrıca iyi yüzey kalitesi yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme hızlarında elde edilmiştir [81].

Asp (1998) tarafından yapılan çalışmada, HTA/6376C kompozitinin, sıcaklık ve nem etkisi altında orta katmanlarının sertliği mod 1, mod 2 ve karışık mod durumlarında incelenmiştir. Kuru ve nemli numuneler -50°C/100°C aralığında test edilmiştir. Yük/yer değiştirme ve yük ölçümlerine dayalı hesaplama metodları uygulanmıştır. Saf mod 2'de kritik gerinim-enerji salınım oranının düşmesi sıcaklığın arttığı ve nem olduğu durumda gözlemlenmiştir. Fakat, sıcaklığa bağlı olan herhangi bir genel eğilim gözlenmemiştir. Kritik gerinim-enerji salınım oranı saf mod 1'de nem değişiminden etkilenmemiş ve hafif sıcaklık artışları ile arttığı görülmüştür [82].

Hu ve Zhang (2004), tek yönlü karbon fiberler ile takviyelendirilmiş epoksi matris kompozitlerin, alüminyum taşlama taşı kullanılarak yapılan taşlama performansını incelemiştir. Fiber yönünün ve taşlama derinliğinin taşlama kuvveti ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Taşlama mekanizması, ortogonal kesme ile kıyaslanmak suretiyle anlaşılmasına çalışılmıştır. 60° ve 90° arasındaki fiber yönlerinde yüksek taşlama kuvvetlerinin olduğu bulunmuştur. Ama 120° ve 180° arasında ise kötü taşlanmış yüzey kalitesinin gerçekleştiği görülmüştür. Yüzey kalitesinin büyük oranda fiber yönüne ve taşlama derinliğine bağlı olduğu görülmüştür ve bu durum ortogonal kesme ile benzer sonuçlara sahiptir [83].

Ramulu (1997), deneysel ortogonal kesme ile tek yönlü ve çok yönlü grafit/epoksi kompozitlerin çok kristalli elmas takım kullanarak köşe frezelemesi üzerinde çalışmışlardır. Takım geometrisinin ve işleme şartlarının etkileri, talaş oluşumu, kesme kuvveti ve işlenmiş yüzey topoğrafya analizi ile bulunmuştur. Malzeme akışının öncelikle fiber yönlerine bağlı olduğu gözlenmiştir. İşleme şartlarından bağımsız olarak, sürekli olmayan talaş oluşumları görülmüştür. Fiber takviyeli kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde, kesme kombinasyonları, demetler ve fiber/matris arayüzü boyunca çatlama olmak üzere üç farklı mekanizma gözlenmiştir [84].

Kim, Lee, Kwak ve Namgung (1992) yüksek güçlü olan karbon fiber-epoksi kompozit materyallerinin tornalama operasyonu ile işlenebilirliği deneysel olarak araştırmışlardır. Hava aracında veya makine parçalarında kullanılacak olan karbon fiber-epoksi kompozit malzemelerinde, yataklama yüzeyleri ya da yapıştırma eklemleri için çok kaliteli yüzeyler sağlanmalıdır. Bu da çok kaliteli bir işleme operasyonu gerektirir. Talaş oluşum mekanizması ve Taylor takım-aşınma sabitleri bulunmuştur ve yüzey pürüzlülüğü kesme hızlarına ve ilerleme hızlarına göre ölçülmüştür [85].

Santhanakrishnan, Krishnamurthy ve Malhotra (1988) tarafından yapılan çalışmada, elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve fiber takviyeli plastik (FRP) kompozitlerin işlenmiş yüzeylerinin yüzeyel biçim bilgisi karşılaştırılmıştır. Malzeme kaldırma mekanizması ve takım aşınması tartışılmış ve SEM mikroskopu ile gösterilmiştir. Kompozitlerin işlenmesi sırasında karşılaşılan kesme kuvvetleri de ölçülmüştür [86].

Koplev, Lystrup ve Vorm (1983), fiber yönüne dik ve paralel olacak şekilde tek yönlü CFRP'nin işlenmesini incelemişlerdir. Şekillendirme deneyleri, hızlı-durma deneyleri ve yeni talaş hazırlama tekniği bu araştırma için kullanılmıştır. Talaş oluşumu ve işlenmiş yüzeylerin kalitesi tartışılmıştır. Kesme yönüne dik ve paralel olan kesme kuvvetleri bazı parametreler için ölçülmüş ve sonuçlar talaş oluşumunu ve takım aşınmasını doğrulamıştır [87].

Chand ve Sharma (2008) kompozit imalatında sentrifüj hızının etkisini araştırmışlardır. En hızlı sentrifüj numunesi, geçiş bölgesine kadar, diğerleriyle karşılaştırıldığında en fazla aşınma direncini göstermiştir. Geçiş bölgesinden sonra, aşınma direnci aniden azalmıştır. Çünkü frezelenmiş karbon fiberlerin maximum sıkışması dış yüzeylerde 1100 dev/dak hızda meydana gelmiş ve bu durum kompozitin aşınmış mikro yapısının mikroskop ile incelenmesiyle doğrulanmıştır. 900 dev/dak hızda hazırlanan numune, geçiş bölgesinden sonra, karbon fiber sayısının fazla olmasından dolayı, en yüksek aşınma direncini göstermiştir. Aşınmış mikroyapıda bazı bölgelerde çiçek oluşumu görülmüştür [88].

Dharan ve Won (2000) yaptığı çalışmada, kompozitin işlenmesi için bu tür modellerin geliştirilmesi ve modellerin birleştirilerek akıllı bir kontrol stratejisinin elde edilmesi araştırılmıştır. Delme işleminde, itme kuvveti eşik değeri geçtiğinde, özellikle matkap ucunun giriş ve çıkışında, delaminasyon oluşmaktadır. Hasarı en aza indirmek için işleme kuvvetleri ve iş parçasına göre kesici takımın bağlı pozisyonu gibi proses parametrelerinin izlenmesi çok önemlidir. Akılcı bir kontrol senaryosu ile birleştirilmiş uygun bir modelin varlığı kompozit katmanların işlenmesinde önemli bir ilerleme sağlayabilir. Çeşitli kesme şartlarında önemli proses parametrelerinin belirlenmesi için karbon fiber takviyeli kompozit malzeme üzerinde delik delme deneyleri yapılmıştır. Akılcı bir işleme senaryosu, yeni bir işleme takımının tasarımı için temel alınmıştır [89].

Denkena, Boehnke ve Dege (2008) tarafından yapılan çalışmada helisel frezeleme sırasında aksel ve teğetsel ilerlemenin, proses kuvvetleri ve delik kalitesine olan etkisi gösterilmiştir. Helisel frezeleme, freze takımı kullanarak delik işleme amacıyla kullanılmaktadır. Delik çapı helisel yolun çapı ile ayarlanabilmektedir. Geleneksel delik delme yöntemleriyle kıyaslandığında helisel delik açma yöntemi daha düşük talaş yığılmasına ve fiber delaminasyonuna sebep olmaktadır. Bu sebeple helisel frezeleme

yöntemi havacılık sektöründe kompozit ve kompozit-metal yapıların işlenmesinde kullanılır. [90].

X. Wang, L. Wang ve Tao (2004), karbür matkap ve yüksek hız çeliği matkap kullanarak, cam fiber takviyeli plastik kompozit (GFRP), karbon fiber takviyeli plastik kompozit (CFRP) ve basılmış devre kartı (PCB) üzerinde, titreşim ile delme ve geleneksel delme deneyleri yapmışlardır. Fiber takviyeli plastiklerin (FRP) anisotropikliği, delme işlemi sırasında talaş oluşumunu ve itmeyi etkilemektedir. Kesicinin eksenel hareketi arttırıldığında, itki kuvvetinde devam eden bir azalma olduğu bulunmuştur. Bu durum malzeme içindeki çatlak ve kırıkların başlayıp büyümesi ile ilgilidir. Deney sonuçlarına göre, titreşim ile delme yönteminde oluşan itme kuvveti geleneksel delme metoduna göre daha düşüktür, bu durum titreşim ile delme metodunun fiber takviyeli plastiklerde mikro delik delmek için en uygun yöntem olduğunu göstermiştir [91].

Arul, Vijayaraghavan, Malhotra ve Krishnamurthy (2006) yaptığı çalışmada, polimerik kompozitlerin delinmesi sırasında en az kusur ve daha uzun takım ömrü oluşturacak bir teknoloji geliştirilmesi araştırılmıştır. Delme sırasında, ilerleme yönünde düşük frekans ve yüksek genlikli titreşim oluşturacak yeni bir delme metodu tasarlanmıştır. Karbür ve yüksek hız çeliği matkaplar ile cam fiber takviyeli plastik kompozit üzerinde, itki kuvveti, serbest yüzey aşınması ve delaminasyon faktörünü bulabilmek için, titreşimli delme ve geleneksel delme deneyleri yapılmıştır. İş parçasında oluşan akustik emilim izlenerek titreşimli delme sırasında proses durumu elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, titreşimle delme yönetiminde, talaşların sürekli kırıldığı ve itki kuvvetinin düştüğü görülmüştür [92].

Abeao, Rubio, Faria ve Davim (2008) yaptığı çalışmada, cam fiber takviyeli epoxy kompozitin delinmesi sırasında, kesici takım geometrisinin ve malzemesinin, itki kuvveti ve delaminasyon üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. Farklı geometri ve malzemedeki dört adet kesici test edilmiştir. Ayrıca, kesme parametrelerinin de etkisine bakılmıştır. EDP27199 matkabı ile en düşük itki kuvveti meydana gelirken, A1167A (üç kesme kenarlı matkap) matkabı en yüksek itki kuvvetini vermiştir. İtme kuvveti ile delaminasyon arasında doğrudan bir ilişki bulunamamıştır. Sonuçlara göre, hasarlanan bölge ilerleme hızının artmasıyla ve kesme hızının azalmasıyla artmıştır [93].

Velayudham ve Krishnamurthy (2007) tarafından yapılan çalışmanın amacı uç geometrisinin itme ve delaminasyon üzerindeki etkisini araştırmaktır. Polimerik kompozitler doğal özellikleri itibarıyla yapısal parçalar için daha uygunlardır. Fakat bu kompozitler montaj sırasında delik delerken farklı şekillerde zarar görürler. Bu zararlar arasında en tehlikelisi delaminasyon olarak kabul edilir. Bunun sebebi ise parçanın servis ömrünü düşürmesidir. İtme ise delaminasyonun oluşmasında önemli bir faktördür. İtme ve dolayısıyla delaminasyon uygun matkap uç geometrisiyle kontrol edilebilir. Delme testleri cam fiberle güçlendirilmiş plastik üzerinde yapılmıştır. Bu testlerde farklı uç geometrilerine sahip karbür matkaplar kullanılmıştır. Delaminasyon ultrasonik 'C' tarama sayesinde değerlendirilmiştir. Bulunan sonuçlara göre matkap uç geometrisinin, itme ve delaminasyon üzerinde ciddi bir etkisi olduğu görülmüştür. Sonuçlar aynı zamanda, üç açılı uç geometrisinin en az delaminasyonu yaptığını ortaya koymuştur [94].

Singh, Bhatnagar ve Viswanath (2008) tarafından yapılan bu çalışma, delme parametrelerinin itme kuvveti ve tork üzerindeki görece önemini istatistiki olarak araştırmaktadır. Kompozit malzemelerin delinmesi üzerine yapılan araştırmalar, operasyon değişkenlerinin optimizasyonu, parça geometrisi ve kritik itme kuvvetlerinin teorik modellemesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. FRP kompozit malzemelerin, sonsuz elemanlar (FE) ile delme modellemesi üzerinde yapılan çalışmaları sınırlıdır. Değişkenlerin analizi (ANOVA) sonuçları, delme kaynaklı hasarların sonlu elemanlar metodu ile bulunması için kabul şartları olarak kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu sonuçlarıyla deneysel sonuçlar birbiriyle uyumaktadır [95].

Mohan, Kulkarni ve Ramachandra (2007) tarafından yapılan çalışmada, cam fiber takviyeli plastik (GFRP) kompozit tabakaların delinmesi sırasında, sinyal/gürültü oranı, değişik parametrelerin katman kalkması ve patlaması delaminasyonları faktörü üzerinde ki etkisini analiz etmek için kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, Taguchi ve yüzey tepkisi metodunu kullanarak delaminasyonu etkileyen faktörleri veya faktörler kombinasyonlarını belirlemek ve en az delaminasyonu oluşturacak işleme şartlarını optimize etmektir. Çalışmalara göre, bütün kayda değer parametreler arasında, malzeme kalınlığı ve kesme hızının kalkma delaminasyonunun üzerinde belirgin etkisi olduğu, malzeme kalınlığı ve ilerleme hızının ise patlama delaminasyonu üzerindeki belirgin etkisi olduğu açıkça görülmüştür. Tahmin edilen optimum parametrelerin deneysel sonuçlarla doğrulamak için deneyler yapılmıştır. %99 oranında tahmin edilen verilerle deneysel verilerin uyduğu gözlenmiştir [96].

David ve Reis (2003), HSS ve çeşitli karbür matkapları kullanarak örgü kompozit malzemeyi delerek delaminasyon incelemesi yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri deliklere ait en büyük hasarlı çapın beklenen nominal delik çapına oranlayarak delaminasyon faktörlerini (F_d) hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar kesme hızındaki ve ilerleme hızındaki artışların F_d 'yi arttırdığını göstermiştir. En büyük etkenin ise ilerleme hızı olduğunu tespit etmişlerdir [97].

Tsao ve Hocheng (2004) tarafından yapılan çalışmada, farklı matkap geometrilerinin (iki ağızlı, testere ve şamdan tipli matkaplar), kesme parametrelerinin ve matkap çapının örgü kompozit malzeme delinmesi ve delaminasyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. İki ağızlı matkap kullanımında ilerleme hızının delaminasyon oluşumunu arttıran en büyük faktör olduğu, şamdan tip matkapta matkap çapının delaminasyon oluşumuna önemli bir etkiye sahip olduğu, testere ağızlı matkapta ise ilerleme hızının, matkap çapının ve kesme hızının delaminasyon oluşumuna önemli etkileri olduğu görülmüştür [98].

Person, Eriksson ve Zackrisson (1997) tarafından yapılan çalışmada, kompozit malzemelere eksenel ve radyal yönde yapılan işlemler ile çekirdek matkap kullanılarak delikler açılmıştır. Matkapların çapı deliklerin istenen çapından biraz daha düşük yapılmıştır. Elde edilen kompozit parçaların mukavemetleri ve yorulma ömürleri, standart PCD uçlu ve karbür malzemelerden yapılan hançer tipi matkaplar ile elde edilen sonuçtan daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin matkap ekseninin sabit olmayıp değişken olmasına bağlı olarak itme kuvvetindeki azalma olduğu kanısına varılmıştır [99].

Tsao (2008) tarafından yapılan çalışmada, kompozit malzemelerde delaminasyonu önleyebilmek için yeni bir matkap tasarımı yapılmıştır. Matkap, elmas kaplı kademeli çekirdek matkap olarak tasarlanmıştır. Çekirdek matkabın içine iki ağızlı matkap, testere matkap ve şamdan matkap yerleştirilerek kademeli hale getirilmiştir. İç ve dış matkap çapları oranlanarak çap oran değerleri oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda çap oranının 0,55 olduğu durumda 0,74 olduğu duruma göre daha az delaminasyon gerçekleştiği tespit edilmiştir. Buna göre iç ve dış matkap çaplarının birbirine yakın olmasının delaminasyonu azalttığı görülmüştür [100].

İsmail, Dhakal, Popov ve Beaugrand (2016) tarafından FRP kompozitlerin işlenebilirliği çalışmasında, delme parametrelerinin (ilerleme hızı, kesme hızı ve itme kuvveti), matkap

çapının ve talaş oluşumunun delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada hemp fiber takviyeli polimer (19/HFRP) ve karbon fiber takviyeli polimer (MTM 44-1/CFRP) kompozit laminalar, HSS matkaplar ile kuru işleme şartlarında delinmiştir. Kesme hızından bağımsız olarak ilerleme hızının artırılması ile delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğünün her iki malzemede de arttığı görülmüştür. Matkap çapının büyümesi ile malzeme kaldırma oranı arttığından dolayı delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğünde artışlar gerçekleşmiştir. En iyi delaminasyon ve yüzey pürüzlülük değerleri 0,05-0,10 mm/dev ilerleme hızı ile 30 m/dak kesme hızında elde edilmiştir [101].

Meshreki, Damir, Sadek ve Attia (2016) tarafından CFRP/Aluminyum istif yapılar üzerinde yapılan delik delme çalışmasında, takım geometrisi, takım malzemesi ve yağlama şartlarının delik kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Plaka kalınlıkları 19 mm, helisel matkap çapı 9,52 mm olarak alınmış ve kuru, düşük basınçlı MQL, yüksek basınçlı MQL ve yüksek debili akış olacak şekilde dört farklı soğutma şartında deneyler yapılmıştır. Delik çapı, yüzey kalitesi, dairesellik ve delaminasyona bakılmıştır. Kesme kuvvetlerinin itme kuvvetinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Alüminyumda oluşan ortalama kuvvetler CFRP malzemede oluşan kuvvetlerin iki katı olarak gerçekleşmiştir. Kuru ve yüksek akışlı soğutma şartlarında delik girişlerinde delaminasyon görülmemiştir. MQL ile delinen deliklerde oluşan delaminasyon miktarı delik çapının %24'ü içinde gerçekleşmiştir [102].

Zitoune, Krishnaraj, Almabouacif ve Collombet (2012) tarafından CFRP/Aluminyum istif yapı üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, nano kaplama yapılmış matkaplar ile delik delme testleri yapılarak, kesme parametrelerinin delik kalitesi, talaş formasyonu ve takım aşınması üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Talaş şekil ve boyutunun ilerleme hızından etkilendiği görülmüştür. Kaplamalı matkaplar ile CFRP üzerinde delme sırasında oluşan itme kuvvetinin kaplamasız matkaplar ile oluşan itme kuvvetinden %10-15 oranında daha az gerçekleştiği, alüminyumda ise kaplamalı matkaplar ile kaplamasız göre %50 daha az gerçekleştiği görülmüştür. Çalışmada kullanılan nano kaplamalı matkapların kaplamız matkaplara göre yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü görülmüştür [103].

Aydın (2019) tarafından yapılan çalışmada, CFRP/Aluminyum istif plakada delik delme testleri gerçekleştirilmiştir. Kuru delme şartlarında 50 m/dak ve 0,05 mm/dev kesme parametreleri kullanılarak 120°-130°-140° uç açılı karbür matkaplar ile delikler delinmiştir.

130° uç açılı matkap ile itme kuvveti daha düşük gerçekleşmiş ve daha az takım aşınması oluşmuştur [104].

Krishnaraj, Zitoune ve Collombet (2012) tarafından yapılan çalışmada CFRP/Aluminyum-2024 istif yapı üzerinde gerçekleştirilen delme testleri Taguchi metodu kullanılarak tasarlanmış ve ANOVA kullanılarak sonuçlar analiz edilmiştir. İlerleme hızının ve matkap çapının en etkili parametreler olduğu tespit edilmiştir. CFRP delik çaplarının nominal matkap çapından 10 µm daha düşük olduğu bulunmuştur. Dairesellik düşük ilerleme hızında 6 µm olarak tespit edilmiş, ilerleme hızının artırılması ile daireellik değerinin 25 µm'ye çıktığı görülmüştür [105].

Literatür Taramasının Değerlendirilmesi

Yapılan literatür araştırmasında, CFRP ve CFRP-Aluminyum istif başta olmak üzere çeşitli kompozit malzemelerin delinmesi ve frezelenmesi sırasında, işleme şartlarının ve kesme parametrelerinin, hasarlanma ve delik kalitesi üzerine etkilerinin incelendiği gözlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan havalı manuel ve otomatik delme ekipmanlarının yer aldığı ve montaj aşamasındaki delik delme prosesinin tümünü içeren bir çalışmaya rastlanmamıştır.

İncelenen malzeme tipleri:

- Karbon fiber takviyeli plastik (CFRP)
- CFRP/Aluminyum istif yapı
- Cam fiber takviyeli plastik (GFRP)

İncelenen kesme şartları şu şekildedir:

- İşlem türü (Delme, Frezeleme)
- Kesici takım geometrisi
- Kesici takım malzemesi
- Kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği)
- Malzeme kalınlığı
- Vibrasyonlu delme

Yapılan çalışmalarda performans değerlendirmesi için kullanılan kriterler şunlardır:

- Kompozit malzemede meydana gelen hasarlanmalar (delaminasyon, kırılma vs.)
- Takım aşınması ve takım ömrü
- Kesme kuvvetleri (itki)
- Delik çapı ve daireselliği
- Yüzey pürüzlülüğü

Araştırmalarda kesme şartları ve işleme kriterleriyle ilgili elde edilen sonuçları değerlendirmek için kullanılan analiz yöntemleri şunlardır:

- Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)
- Elektron Mikroskop Tarama (SEM)
- Geometrik ölçüm (GM)
- Varyans Analizi (ANOVA)
- Taguchi Metodu

Yapılan literatür araştırmasında, kompozit ve kompozit-metal istif yapılarda delik delinmesi üzerine yapılan çalışmalarda kesici takım geometrisi karşılaştırmalarının ve kesme parameterelerinin optimizasyonlarının yapıldığı ve güncel çalışmalar ile de yapılmaya devam edildiği görülmüştür. Özellikle günümüz havacılık endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaya başlanan bu tür istif yapıların delinmesi için gerekli olan kalite, süre ve maliyetler düşünüldüğünde, istif yapıların delinmesi için optimum kesme şartlarının, uygun kesici takım ve cihaz kullanımının belirlenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Yapılan çalışmaların takım tezgahları kullanılarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Montaj aşamasında tüm prosesi kapsayacak şekilde kullanılan manuel ve otomatik delme ekipmanları ile yapılmış çalışmalara rastlanmamıştır. Literatür çalışmaları Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı, hava aracı komponenti montajı aşamasındaki tüm delik delme sürecini yansıtacak şekilde yapılmış olmasıdır. Havalı manuel ve otomatik delme ekipmanları kullanılarak CFRP ve Alüminyum-CFRP-Alüminyum istif yapılardan oluşan parçaların delinmesi sürecinde yaşanan zorlukların sebepleri araştırılarak,

delaminasyon, delik kalitesi (çap, dairesellik, silindiriklik) ve yüzey pürüzlülüğü problemlerine en uygun çözümleri bulmak amacıyla deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, özgün tasarlanmış geometrilere sahip kesici takımlar kullanılmış ve delik kalitesi üzerine etkileri karşılaştırılmıştır. Bu yeni çalışmanın literatürde, kompozit ve kompozit-metal istif yapılarda, havacılık sektöründe montaj aşamasındaki tüm delik delme prosesini kapsayacak şekilde manuel ve otomatik delme ekipmanları kullanılarak hassas delik delinmesi alanındaki boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

Çizelge 3.1 Literatür taraması sonuçlarının tablo halinde özetlenmesi

Kaynak No	Yapılan İşlem	İşleme parametreleri	İş Parçası Malzemesi	Kesici Takım Türü	İncelenen Kriterler
[72]	Frezeleme	Kesme hızı, ilerleme hızı	CFRP	Karbür	Delaminasyon, yüzey kalitesi
[73]	Frezeleme	Matkap geometrisi	CFRP	Çift helisli freze	Delaminasyon
[74]	Frezeleme	Kesme yöntemi	LFRP Karbon	-	Delaminasyon
[75]	Tornalama	Kaplama	CFRP	PCBN ve TiN kaplı PCBN	Takım aşınması
[76]	Frezeleme	Matkap geometrisi	Kompozit	Karbür	Delaminasyon, takım ömrü
[77]	Frezeleme	Kesme parametreleri	Kompozit	Karbür	Kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, kesme hızı, ilerleme hızı
[78]	Frezeleme	Ortogonal kesme	CFRP	Karbür	Talaş oluşumu

Çizelge 3.1 (devam) Literatür taraması sonuçlarının tablo halinde özetlenmesi

[79]	Delme	Kesme parametrisi, takım geometrisi	CFRP	Karbür	Delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü, itme kuvveti
[80]	Delme	Takım geometrisi	CFRP	Kaplamalı karbür	Delaminasyon
[81]	Frezeleme	Kesme parametreleri	CFRP	Karbür	Yüzey kalitesi
[82]	Frezeleme	Nem	Kompozit	-	-
[83]	Taşılama	Fiber yönleri	CFRP	Taşılama taşı (Al)	Yüzey kalitesi
[84]	Frezeleme	Kesme parametreleri, takım geometrisi	Kompozit	Karbür	Talaş oluşumu, kesme kuvvetleri
[85]	Tornalama	Kesme parametreleri	CFRP	Karbür	Yüzey pürüzlülüğü
[86]	Frezeleme	Kesme parametreleri	Kompozit	Karbür	Yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti
[87]	Frezeleme	Malzeme yapısı	UD CFRP	Karbür	Takım aşınması, talaş oluşumu
[88]	Delme	İtme kuvveti	CFRP	Karbür	Kesme parametreleri
[89]	İstif delme	Eksenel ve teğetsel ilerleme	CFRP/Ti	Karbür	Proses kuvvetleri, delik kalitesi
[90]	Delme	Titreşimle geleneksel ve delme	CFRP, GFRP	Karbür, HSS	İtme kuvveti

Çizelge 3.1 (devam) Literatür taraması sonuçlarının tablo halinde özetlenmesi

[91]	Delme	Titreşim parametreleri	Kompozit	Karbür	Talaş oluşumu, itme kuvveti
[92]	Delme	Takım geometrisi ve malzemesi	GFRP	Karbür	İtme kuvveti, delaminasyon
[93]	Delme	İtme kuvveti	Kompozit	Karbür	Delaminasyon
[94]	Delme	İtme kuvveti	Kompozit	Karbür	Delaminasyon
[95]	Delme	Kesme hızı, kalınlık	GFRP	Karbür	Delaminasyon
[96]	Delme	Kesme hızı, kalınlık	GFRP	Karbür	Delaminasyon
[97]	Delme	Kesme hızı, ilerleme hızı	Kompozit	HSS, Karbür	Delaminasyon
[98]	Delme	Kesme hızı, ilerleme hızı, matkap çapı	Kompozit	Karbür	Delaminasyon
[99]	Delme	İşleme şekli	Kompozit	Karbür	Mukavemet ve yorulma ömrü
[100]	Delme	Matkap geometrisi	Kompozit	Karbür	Delaminasyon
[101]	Delme	Kesme hızı, ilerleme hızı, itme kuvveti, matkap çapı,	Kompozit	HSS	Delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü
[102]	İstif Delme	Takım malzemesi, geometrisi, soğutma şartları	CFRP/Alu	Karbür	Delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü, dairesellik, çap
[103]	İstif Delme	Kaplama	CFRP/Alu	Karbür	İtme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü
[104]	İstif Delme	Uç açısı	CFRP/Alu	Karbür	İtme kuvveti, takım aşınması
[105]	İstif Delme	Matkap çapı, ilerleme hızı	CFRP/Alu	Karbür	Delik çapı, dairesellik

4. MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalar üç ana fazda gerçekleştirilmiştir. Faz-1’de uçak kanatlarında kullanılan CFRP kompozit malzemelerin delinme süresini kısaltabilmek için yeni tasarlanan kademeli matkap geometrisi ve mevcut kademersiz matkap geometrisi ile delme testleri yapılmıştır. Kaplama ve matkap açısının etkileri incelenmiştir. Faz-2’de, uçak kanatlarının CFRP ve Alüminyum parçalarının birleşmesini sağlayan deliklerin delinmesi prosesinde kullanılması için üç adet farklı matkap geometrilerinden en iyi matkap geometrisinin belirlenmesi amacıyla Alüminyum/CFRP/Alüminyum istif yapıda delme testleri yapılmıştır. Faz-3A’da, Faz-2’de belirlenen matkap kullanılarak 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında istif yapıda 15’er adet delik delinerek en iyi kesme hızının belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Faz-3B’de, Faz-3A’da belirlenen kesme hızı ve Faz-2’de belirlenen matkap ile istif plakaya 30 adet delik delinerek proses yeterlilik çalışması yapılmıştır.

- i. Faz-1 : Mevcut geometrideki Ø3,25; Ø4,80 ve Ø5,94 mm matkaplar ile yeni tasarlanan kademeli Ø3,25-4,80 ve Ø4,80-5,94 mm matkapların delme testleri, silindiriklikten sapma ve delaminasyon sonuçlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.
- ii. Faz-2 : Alüminyum/CFRP/Alüminyum istif yapılarda Ø11,57 mm delik delmede kullanılan otomatik delme ekipmanlarında kullanılmak üzere uygun matkap geometrisinin belirlenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir.
- iii. Faz-3A : Faz-2’de belirlenen matkap geometrisi ile otomatik delme ekipmanının kesme hızı parametresinin belirlenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir.
- iv. Faz-3B : Faz-2 ve Faz-3A çalışmalarında belirlenen matkap ve kesme hızı ile proses yeterlilik deneyleri ve analizleri yapılmıştır.

4.1. İş Parçası Malzemeleri

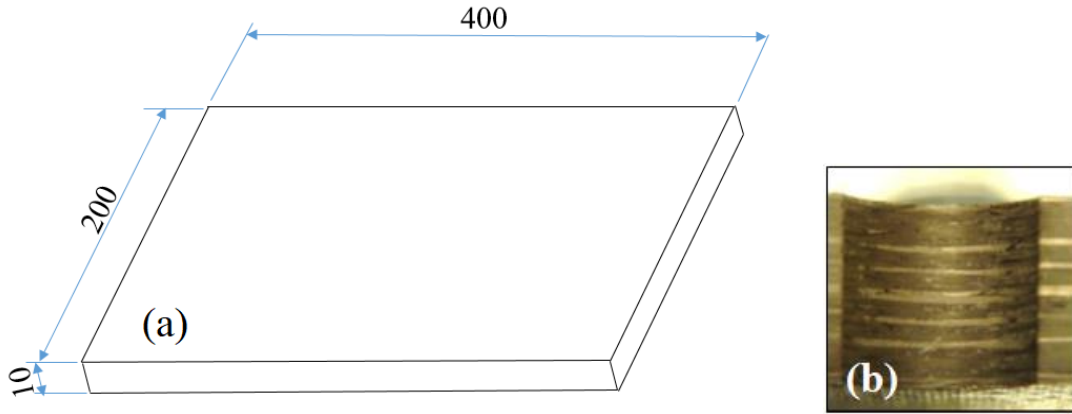
Faz-1, Faz-2 ve Faz-3’de yapılan delme testlerinde uçak parçasını simüle etmek amacıyla karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozit malzemeler kullanılmıştır. Faz-2 ve Faz-3 çalışmalarında Alüminyum/CFRP/Alüminyum istif yapıda Al-7075-T6 kalite alüminyum malzeme kullanılmıştır.

4.1.1. Faz-1/Faz-2/Faz-3 için kullanılan CFRP kompozit malzemeler

Faz-1, Faz-2 ve Faz-3’de kullanılan CFRP kompozit malzemeler, 30 adet hazır laminanın (prepreg) simetrik şekilde serilmesi ile 10 mm kalınlığında plakalar şeklinde elde edilmiştir. Bütün CFRP hazır laminalar çapraz örgü kumaş yöntemi ile imal edilmiştir. Faz-1 için üretilen CFRP plaka 400 x 200 mm ebatlarında (Şekil 4.1.a), Faz-2 ve Faz-3 için üretilen CFRP plakalar 300 x 200 mm ebatlarında üretilmiştir. Şekil 4.1.b’de mikroskopta 10 kat büyütülmüş kompozit malzemeye ait kesit görüntüsü verilmiştir. Çizelge 4.1’de kullanılan CFRP kompozit malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. CFRP kompozit özellikleri

Prepreg üreticisi	Hexcel Composites, Dagneux
Prepreg tanımı	Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Prepreg Twill 2x2 örgü stili / 180°C kür sınıfı Standart Modülüs Fiber Hexply M21/40%/46280
Reçine (Hexcel Composites)	Epoksi Reçine 180°C kür sınıfı Gösterimi : M21
Fiber (TENAX Fiber)	Standart modülüs karbon fiber, 6K Gösterimi : HTA40 E13 6K Özellikler : HFSM 513
Dokuma Kumaş (Hexcel Takviye)	Gösterimi : G0986 D 1200 Özellik : TRMS0109
Fiber Örgü Tipi	Twill 2x2 örgü tipli kumaş
Fiber oryantasyonu (serim yönü)	(45°/45°/0°/45°/0°/45°/45°/0°/45°/0°/45°/45°/0°/45°/0°) _s
Kür	Vakum: -800 (+/-200) mbar Sıcaklık : Isıtmaya başlama : Otoklav bağlı basıncı 7 bara ulaştıktan sonra Isıtma Hızı 1: 0,4 – 2,5 °C/dak Durma Sıcaklığı : 135 (+/- 5) °C Durma Noktası Bekleme Süresi : 60 (0/60) dakika Isıtma Hızı 2 : 0,4 – 2,5 °C/dak Kür Sıcaklığı : 180 (+/- 5) °C Kür Süresi : 120 (0/60) dakika Otoklav Açılışı : <65°C Soğutma Hızı : 0,5 – 3,0 °C/dak Basınç: Otoklav Basıncı (Bağlı) : 7 (-1/+3) bar



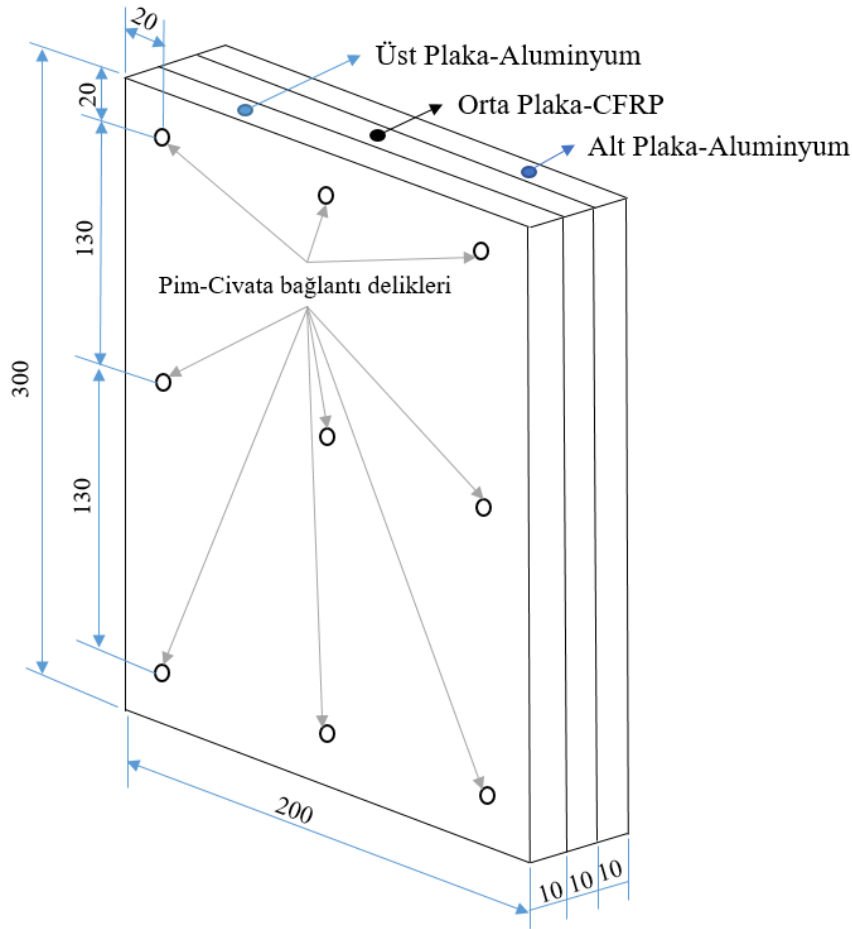
Şekil 4.1. a) Faz-1 aşamasında kullanılan CFRP kompozit malzeme ölçüleri, b) Çapraz örgülü kompozit malzemenin 10 kat büyültülmüş kesit görüntüsü

4.1.2. Faz-2 ve Faz-3 testleri için istif malzeme hazırlanması

Alüminyum ve CFRP malzemelerin kalınlıkları 10 mm olarak imal edilmiş ve alüminyum-CFRP-alüminyum sıralaması ile dizilip montaj işlemi yapılarak istif yapı elde edilmiştir. Uçak parçalarının birleştirilmesi sırasında bazı üretici firmalar her katman arasına nominal boşlukları doldurmak için sıvı şim uygulaması yaparken bazı uçak üreticisi firmalar ise ara katmanlara herhangi bir şim uygulaması yapmamaktadır. Bu çalışmamızda hazırlanan istif yapılar da ara yüzeylere şim uygulaması yapılmamıştır. Testlerde kullanılan 30mm kalınlığında ve 300 x 200 mm ebatındaki istif malzeme Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Her kenara üç sıra olmak üzere toplam altı noktadan pimli civatalar ile bağlantı sağlanıp sıkılmıştır.

Alüminyum Al-7075-T6 alaşımı

Çinkonun dominant alaşım elementi olduğu 7075 alüminyum alaşımı, Al-Zn-Mg-Cu elementlerinden oluşan ilk yüksek mukavemetli alaşımdır ve havacılık alüminyumu olarak da isimlendirilmektedir. 7075-T6 alüminyumu T6 temperleme işlemine tabi tutulur. 450°C sıcaklıktaki solüsyon içinde birkaç saat tutulduktan sonra suya daldırılıp soğutulur ve 120°C sıcaklıkta 24 saat boyunca yaşlandırma işlemine tabi tutulur. Al-7075-T6 alaşımına ait mekanik özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. 30 mm kalınlığında 300 x 200 mm Al/CFRP/Al istif yapı

Çizelge 4.2. Al-7075-T6 Mekanik özellikleri

Sertlik	150 Brinell	Kırılma Uzaması	7,9 %
Elastik Modül	70 GPa	Yorulma Dayanımı	160 MPa
Nihai Çekme Dayanımı	560 MPa	Termal İletkenlik	130 W/m-K
Akma Çekme Dayanımı	480 MPa	Termal Uzama	23 $\mu\text{m/m-K}$

4.2. Takım Tasarımı ve Geometrileri

Kompozitler malzemeler, liflerin tabakalar halinde reçine ile yapıştırılması yöntemiyle imal edikleri için lif ve matris malzemelerinin farklı mekanik özelliklerinden dolayı delme işlemi sırasında kesici takımın aşınması çabuk olabilmektedir. Kesici kenarın aşırı aşınması halinde lifler kesilemeyip kopacak, bu da tabakaların ayrılmasına neden olacaktır.

4.2.1. Faz-1 matkap tasarımı

Yapılan bu deneysel çalışmada mevcut takım malzemesi olması, yüksek sertlik, yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilme, yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı kompozit ve metal malzemelerin işlenmesi için karbür takımlar tercih edilmiştir. Matkapların tasarımında dikkate alınan kriterler aşağıda sıralanmıştır.

- Takımın oluşturduğu basınçları azaltarak, çok daha hassas bir talaş kaldırma işlemi gerçekleştirmelidir
- Keskin bir kesme kenarı geometrisine sahip olmalıdır
- Delik delme süresini azaltmak amacıyla en az iki kademeli olmalıdır
- Takım kesici kenarı, kompozit fiberlerde matris yumuşaması (erimesi), fiber (lif) çekilmesi, parçalanma, kesilmemiş fiberler ve yüzey yanması gibi hataları engelleyecek şekilde olmalıdır
- Delik giriş ve çıkışlarında katman kalkması (delaminasyon) eğilimlerini engelleyecek geometriye sahip olmalıdır

Tasarımı yapılan yeni matkapların aşağıdaki kalite kriterlerini sağlaması beklenmektedir.

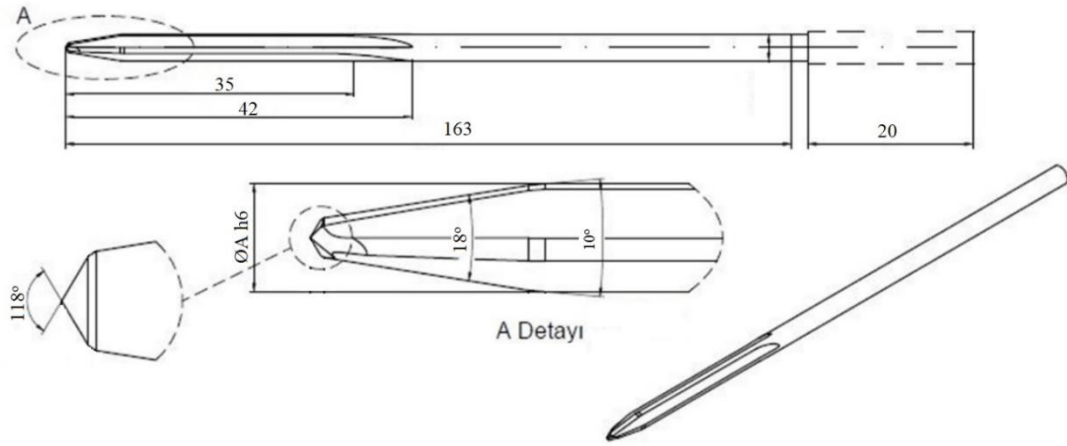
- Delik giriş ve çıkış ağzlarında delaminasyon ve kesilmemiş fiber oluşmaması,
- Reçine erimesi meydana gelmemesi,
- Delik içi yüzey pürüzlülük değerlerinin tolerans değerler içinde olması,
- Delik silindiriklik değerlerinin tolerans değerler içinde olması,

Ticari olarak mevcut kullanılan takımlar 4 ağızlı, ön kısmı 118° burun açılı, konik matkap kısmı 18° açılı ve rayba kısmı düz olarak tasarlanmışlardır [106]. Yapılan bu çalışmada amaçlanan hedef proses süresini kısaltabilmektir. Yeni matkapların tasarımında proses hızını arttırabilmek için ikinci bir kademe eklenerek istenen delik çapının tek seferde delinmesi hedeflenmiştir. Aynı zamanda mevcut tasarımda yer alan 18° lik konik matkap açısı farklı bir kombinasyonda 36° olarak da tasarlanmıştır. Bu sayede açının büyümesi ile delik kalitesi arasındaki kıyaslamaya da bakılabilecektir. Kaplama faktörünün delik kalitesine etkisinin incelenebilmesi için her geometri tasarımının kaplamasız ve elmas benzeri karbon (DLC) kaplama şeklinde kombinasyonları yapılmıştır.

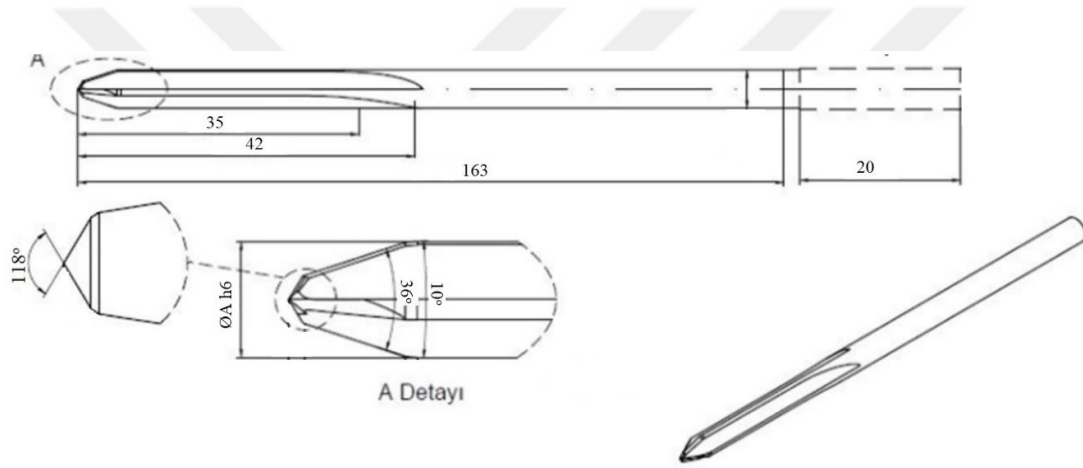
Deneyisel çalışmada 20 farklı tasarıma sahip matkap kullanılmıştır. 5 farklı çap, kaplamalı/kaplamasız, 18°/36° matkap uç açısı, kademeli/kademesiz olarak farklı varyasyonlar oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan matkaplara ait özellikler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Matkapların tasarımlarına ait teknik çizimler sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. İmalat sonrası matkap resimleri Resim 4.1 ve Resim 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Matkap özellikleri

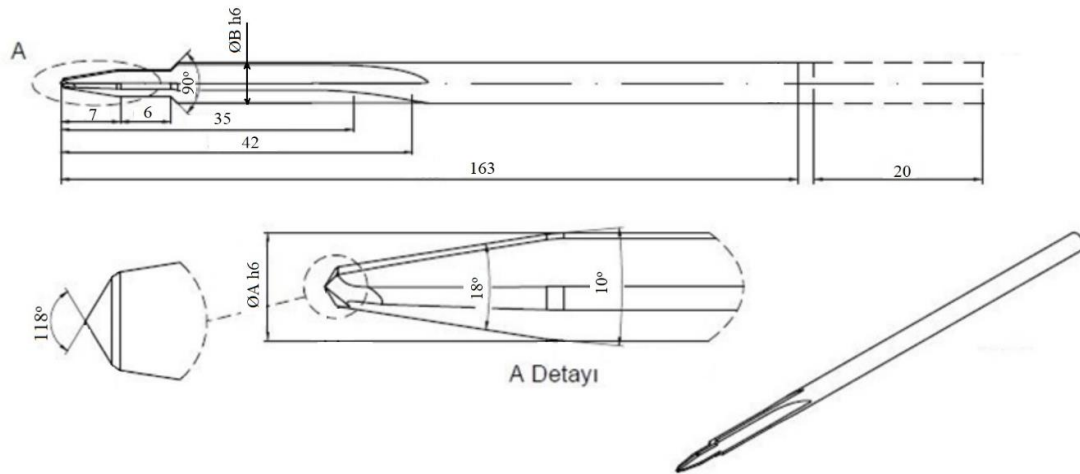
Matkap No	ØA h6 (mm)	ØB h6 (mm)	Açı (°)	Kademe	Kaplama
1	3,25	-	18°	Yok	Yok
2	3,25	-	18°	Yok	Var
3	3,25	-	36°	Yok	Yok
4	3,25	-	36°	Yok	Var
5	4,80	-	18°	Yok	Yok
6	4,80	-	18°	Yok	Var
7	4,80	-	36°	Yok	Yok
8	4,80	-	36°	Yok	Var
9	5,94	-	18°	Yok	Yok
10	5,94	-	18°	Yok	Var
11	5,94	-	36°	Yok	Yok
12	5,94	-	36°	Yok	Var
13	3,25	4,80	18°	Var	Yok
14	3,25	4,80	18°	Var	Var
15	3,25	4,80	36°	Var	Yok
16	3,25	4,80	36°	Var	Var
17	4,80	5,94	18°	Var	Yok
18	4,80	5,94	18°	Var	Var
19	4,80	5,94	36°	Var	Yok
20	4,80	5,94	36°	Var	Var



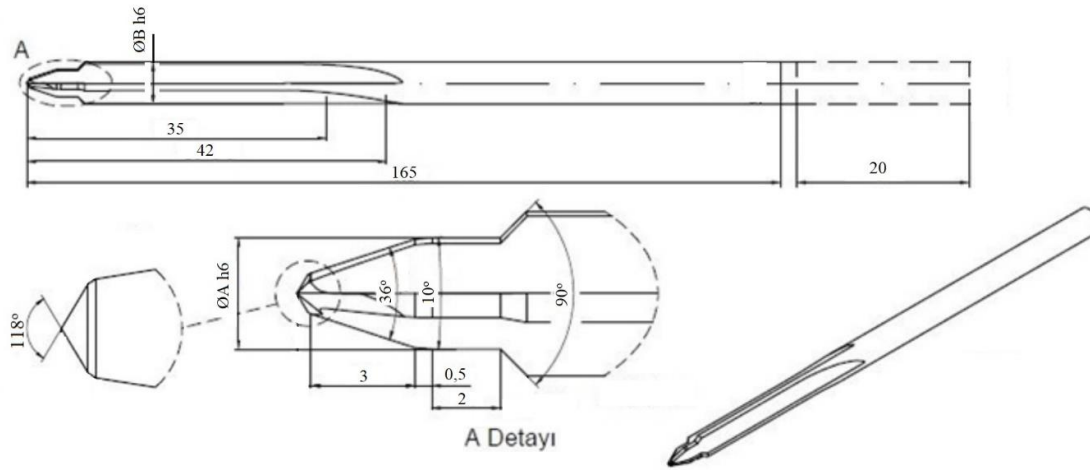
Şekil 4.3. Kademesiz 18° uç açılı matkap tasarımı



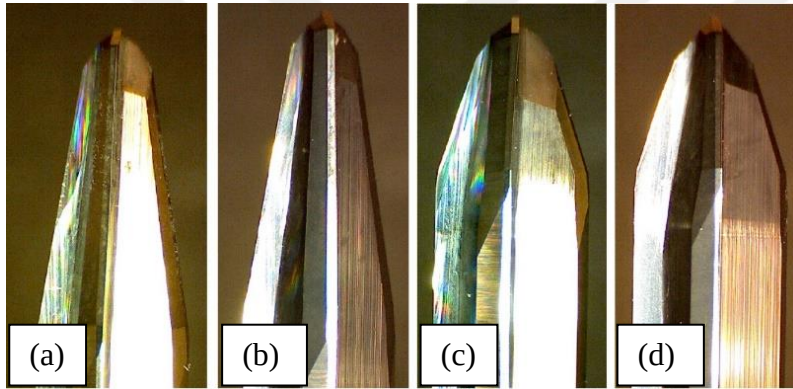
Şekil 4.4. Kademesiz 36° uç açılı matkap tasarımı



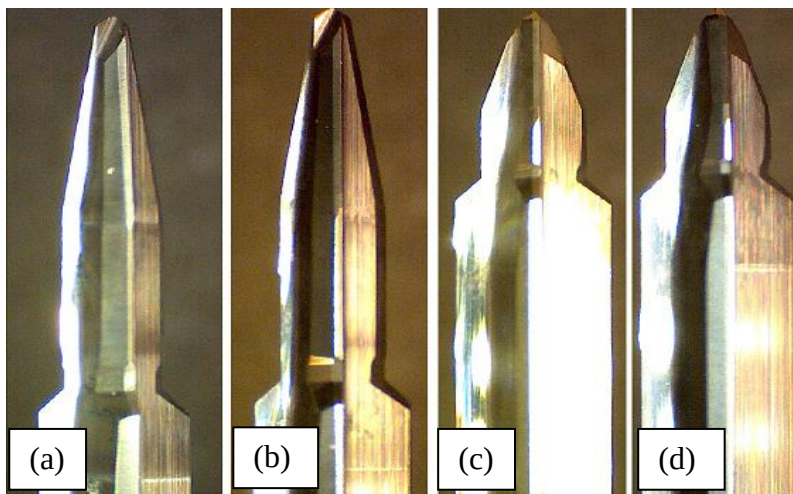
Şekil 4.5. Kademeli 18° uç açılı matkap tasarımı



Şekil 4.6. Kademeli 36° uç açılı matkap tasarımı



Resim 4.1. a) 18° kaplamasız, b) 18° kaplamalı, c) 36° kaplamasız, d) 36° kaplamalı



Resim 4.2. a) 18° kaplamasız kademeli, b) 18° kaplamalı kademeli, c) 36° kaplamasız kademeli, d) 36° kaplamalı kademeli

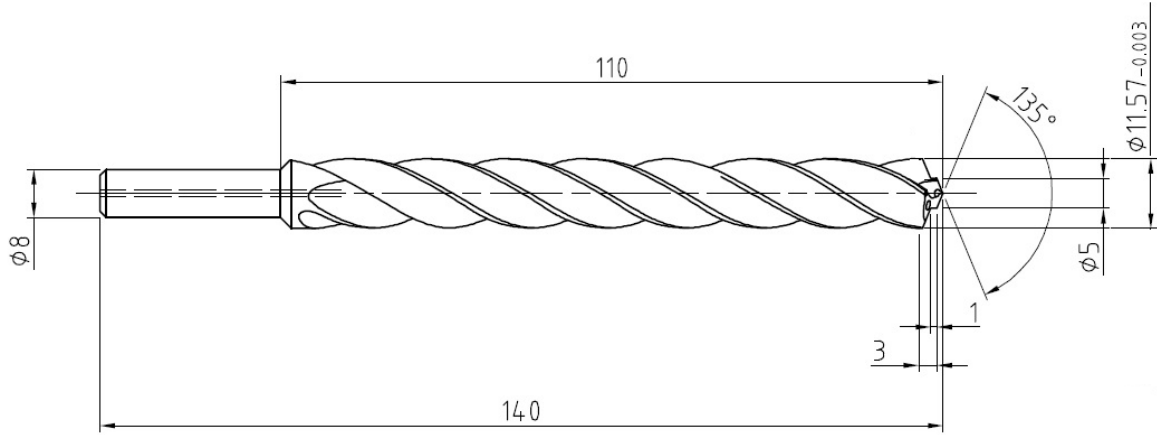
4.2.2. Faz-2 ve Faz-3 matkap tasarımları

Bu çalışma, hava aracına ait hareketsiz sabit kanatçık komponentinin istif yapıdaki birleşme noktalarının delinmesini simüle etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Montaj hattında kullanılan bir uygulama olmasından dolayı, çalışmanın çıktıları üretimde kullanılarak iyileştirme sağlanacaktır. Faz-2 testlerinde 30 mm kalınlığında Al-CFRP-Al istif panelin delinmesi için üç adet matkap geometrisi tasarlanmıştır. Tasarımların temelini mevcut matkap geometrisi oluşturmaktadır (Şekil 4.7). Otomatik delme ekipmanı ile kullanılmakta olan mevcut matkabın iyileştirilmesi amacıyla yeni tasarlanan matkaplar için aşağıdaki kriterler uygulanmıştır:

- Delme işlemi, montaj hattında komponent üzerindeki delme takımlarına bağlanan otomatik delme ekipmanı ile yapılmaktadır. Tasarlanan matkapların malzemesi titreşimli ve rijit olmayan çalışma koşullarına dayanabilecek kalitede seçilmelidir.
- Ekipman içinde metal talaşlarının sürekli kırılmasını sağlayan mikro gagalama ünitesi bulunmaktadır. Bu sayede talaşlar delik içinde kırılmaktadır. Matkapta ek olarak talaş kırıcı formu olmasına gerek yoktur.
- Kırılan talaşlar, ekipman üzerine bağlanan vakumlama sistemi sayesinde çekilmektedir. Tasarımı yapılan matkaplarda talaşların dışarı çıkmasını sağlayacak ekstra talaş odaları olmalıdır. Bu sayede delik içinde talaş sıkışması engellenmelidir.
- Ekipmanın iş mili içinden soğutma sıvısı çıkışı bulunmaktadır. 3 bar basınçta yalnızca kesme işlemi sırasında yüzeyin yağlanmasını sağlamak ve matkabın aşırı ısınmasını engellemek için kullanılmaktadır. Soğutma sıvısı çıkışı için yeni matkaplarda soğutma delikleri bulunmalıdır.
- Ekipmanın iş mili esnek olduğundan delme eksenı boyunca sabit olmayıp radyal salınım yapmaktadır. Matkabın delme eksenı boyunca hareket etmesi için ekipmanın ucunda matkabı yataklamak amacıyla hassas merkezleme burcu bulunmaktadır. Merkezlemenin delik boyunca en iyi şekilde yapılabilmesi için matkap kesme ağzından sonraki kısmın arka koniklik değeri 0,05/100 mm' yi geçmemelidir.

Çalışmada kullanılan matkaplara ait genel tasarım kriterleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.5'te istif malzemede yer alan deliklerin üst ve alt sınır değerleri ile nominal delik çapı değeri gösterilmiştir. Yeni tasarlanan matkap geometrilerine ait katı modeller Şekil

4.8’de, uç geometrileri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Deneyler öncesinde her bir matkabın çap ve geometri ölçümleri yapılarak gerçek değerleri çıkartılmıştır. Ölçümler için Zoller Genius 3s hassas takım ölçüm cihazı kullanılmıştır.



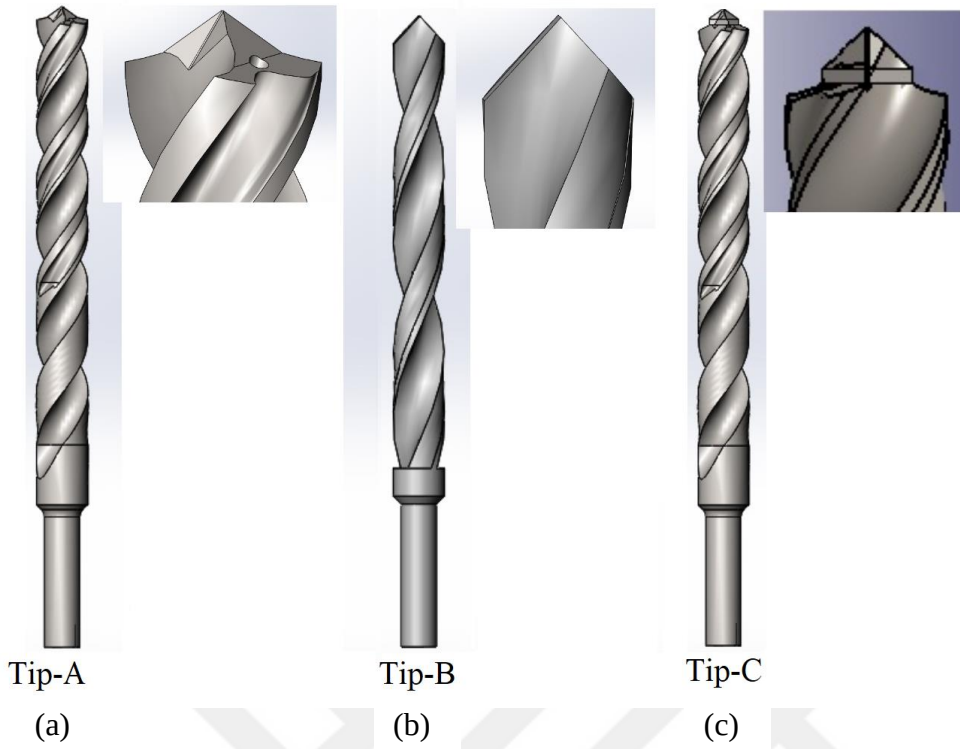
Şekil 4.7. Delme işleminde kullanılan mevcut takımın özellikleri

Çizelge 4.4. Matkap tasarım kriterleri

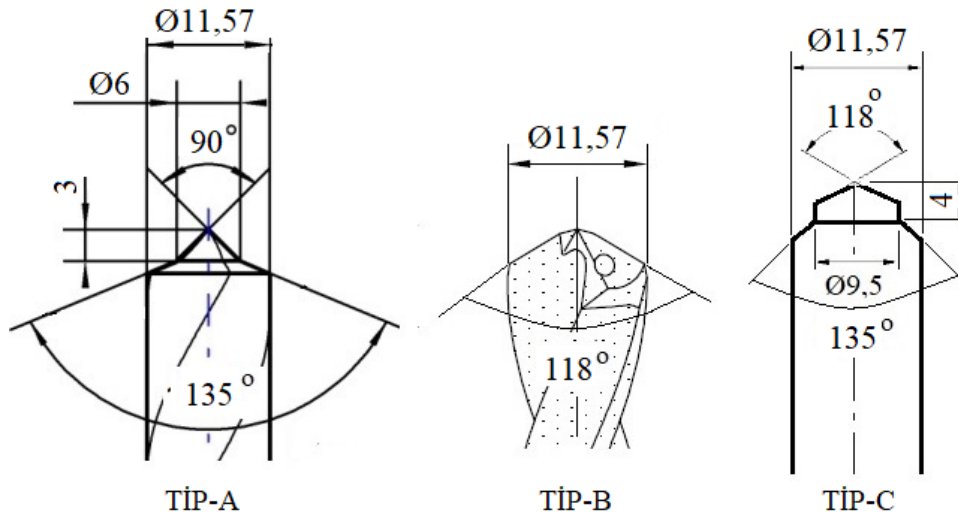
Kesici Çapı	11,57 mm	Çap Toleransı	0/-0,003 mm
Kesici Boyu	140 mm	Soğutma Deliği	Helisel çift kanal
Helis Boyu	~110 mm	Margin sayısı	4 adet
Bağlama Çapı	8 mm	Arka koniklik	< 0,05/100 mm

Çizelge 4.5. Delik çap toleransları [107]

Matkap Çapı (mm)	Alt Sınır Delik Çap Ölçüsü (mm)	Üst Sınır Delik Çap Ölçüsü (mm)
11,57	11,53	11,61



Şekil 4.8. Matkaplara ait katı modeller; a) Tip A, b) Tip B, c) Tip C

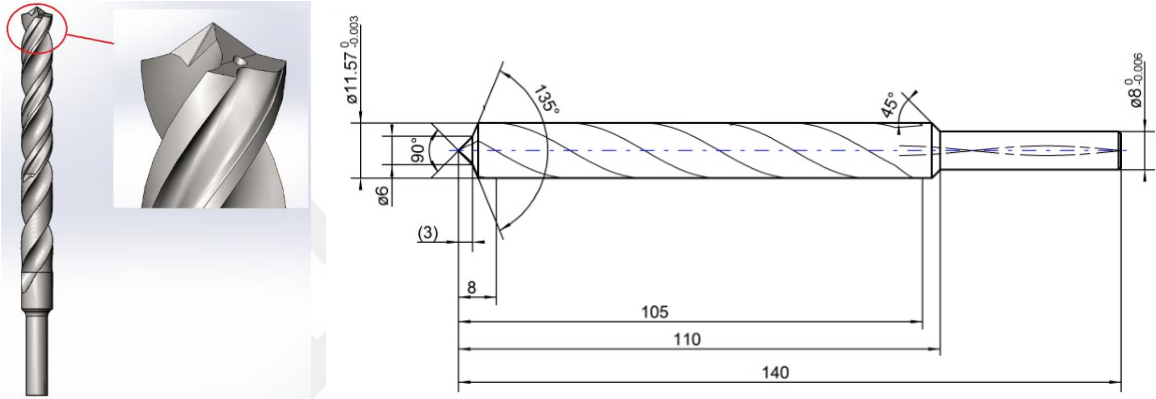


Şekil 4.9. Yeni tasarım matkapların uç geometrilerinin gösterimi

Faz-2 çalışmasında en başarılı geometriye sahip olan Tip-A matkabı Faz-3 testlerinde kullanılmıştır. Tip-A matkap geometrisine ait özellikler Çizelge 4.6'da, teknik resmi Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Tip-A matkap geometrik özellikleri

Matkap tipi	Tip-A	Toplam boy	140 mm
Kesici çapı	11,57 mm	Helis boyu	105 mm
Pilot çapı	6 mm	Arka konik-1	0,01/100 mm
Pilot açısı	90°	Arka konik-2	0,1/100 mm
Matkap açısı	135°	Pilot boyu	3 mm



Şekil 4.10. Tip-A matkaba ait katı model ve teknik detay şekilleri

4.3. Kullanılan Delme Ekipmanları

Hava aracı komponentinin montaj işlemleri sırasında delik delme operasyonu yapılan montaj işlemlerinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Delik delme işlemi tek plakada ve birden fazla malzemeden oluşan istif yapılarda farklı ekipmanlar kullanılarak yapılabilmektedir. Bu ekipmanlar havalı ve taşınabilir yapıda olup manuel veya otomatik olarak kullanıma imkan vermektedir.

4.3.1. Faz-1 delme ekipmanı

Literatürde yapılan daha önceki çalışmalarda delme işlemleri takım tezgahları kullanılarak yapılmıştır. Bu şekilde stabil, rijit ve kesme parametreleri kontrol edilebilir deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak havacılık sektöründe kompozit malzemeler üzerindeki delme işlemleri %80 oranında parçaların montajı sırasında yapılmaktadır. Bundan dolayı da takım tezgahı kullanılabilmesi mümkün olmadığından, delme işlemleri havalı matkap motorları kullanılarak el ile teknisyenler tarafından yapılmaktadır. Delme

işlemi sırasında kesicinin dikliği bazı delik takımlarının ve aparatlarının kullanılması ile sağlanmaya çalışılmaktadır. Ancak takım tezgahında olduğu kadar rijit ve stabil koşullar sağlamak mümkün olmamaktadır. İlerleme hızı, itme kuvveti, devir gibi parametreler ise sabit olmayıp teknisyenin kullanım şekline göre değişebilmektedir.

Resim 4.3'te çalışmada kullanılan havalı matkap motoru gösterilmiştir. Ekipman 6,2 bar hava basıncı ile çalışmaktadır. İtme kuvveti teknisyen tarafından el ile baskı uygulayarak gerçekleştirilmektedir. Çizelge 4.7'de ekipmanın teknik özellikleri verilmiştir. CFRP malzeme üzerinde yapılan delme çalışmasında takım tezgahı spindle devrinin 12000 dev/dak olduğu hızda en optimum sonuçların elde edildiği literatürde görülmüştür [108].



Resim 4.3. Faz-1 çalışmasında kullanılan havalı manuel delik delme ekipmanı

Çizelge 4.7. Havalı manuel delik delme ekipmanı teknik özellikleri

İş mili hızı (dev/dak)	Güç (Watt)	Hava Basıncı (kPa)	İlerleme
12 000	450	620	Manuel

4.3.2. Faz-2 ve Faz-3 delme ekipmanları

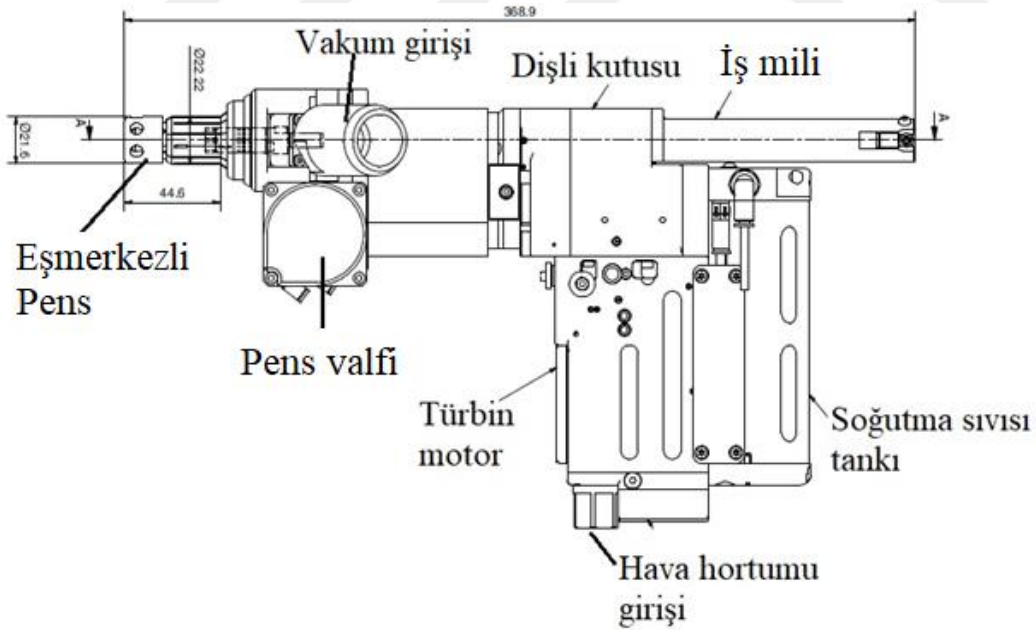
Literatürde, uçak kanadı montaj hattında kullanılan ekipmanlar ile montaj şartlarında yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Faz-2 ve Faz-3 çalışmalarında kullanılan otomatik delme ekipmanı montaj hattında delme takımlarının üzerine sabitlenerek delme işlemini gerçekleştirmektedir. Bundan dolayı, üretim şartlarına uygun olması, bu çalışmayı literatürdeki çalışmalardan farklı kılmak ve sanayide kullanılan pratik uygulamalara katkı sağlamak amacıyla deneyler için benzer şartlar sağlanmıştır. Bunun için montaj

işlemlerinde test amaçlı kullanılan test düzeneği yapılan çalışmaya uygun hale getirilerek kullanılmıştır. Faz-2 testlerinde kullanılan sabit devir ve ilerleme hızına sahip otomatik delme ekipmanına ait özellikler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Faz-2 testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı özellikleri

Tezgah Tipi	Otomatik Delme	En yüksek strok	35 mm
Kitleme Sistemi	Eşmerkezli Pens	İçten soğutma	Mist
Devir	2600 dev/dak	Gagalama Frekansı	3/0,5
Kesme Hızı	94,5 m/dak	Kesici yataklama	Önden
İlerleme Hızı	0,05 mm/dev	Hava Basıncı	6,3 bar

Otomatik delme ekipmanının, malzeme yapısına ve yapılan test çalışmalarına göre devir ve ilerleme hızı mekanik olarak ayarlanarak sabitlenmektedir. İçten soğutma ve gagalama özellikleri bulunmaktadır. Şekil 4.11’de otomatik delme ekipmanı gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Faz-2 ve Faz-3 testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı

Şekil 4.12’de deneysel çalışmalarda kullanılan test platformu gösterilmiştir. Al-CFRP-Al dizilimi ile hazırlanan istif yapı test platformu üzerinde yer alan destekler üzerine civatalar vasıtası ile sabitlenmektedir. Sabitleme işlemi için civatalar havalı sıkıcı ile sıkılmaktadır.

Delme işleminin yapılması için otomatik delme ekipmanının sabitlenmesi ve referans alması gereken delme takımı ise istif yapının üzerine gelecek şekilde ayarlanarak cıvataları havalı sıkıcı ile sıkılır. İstif plaka ve delme takımının yerleşimi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



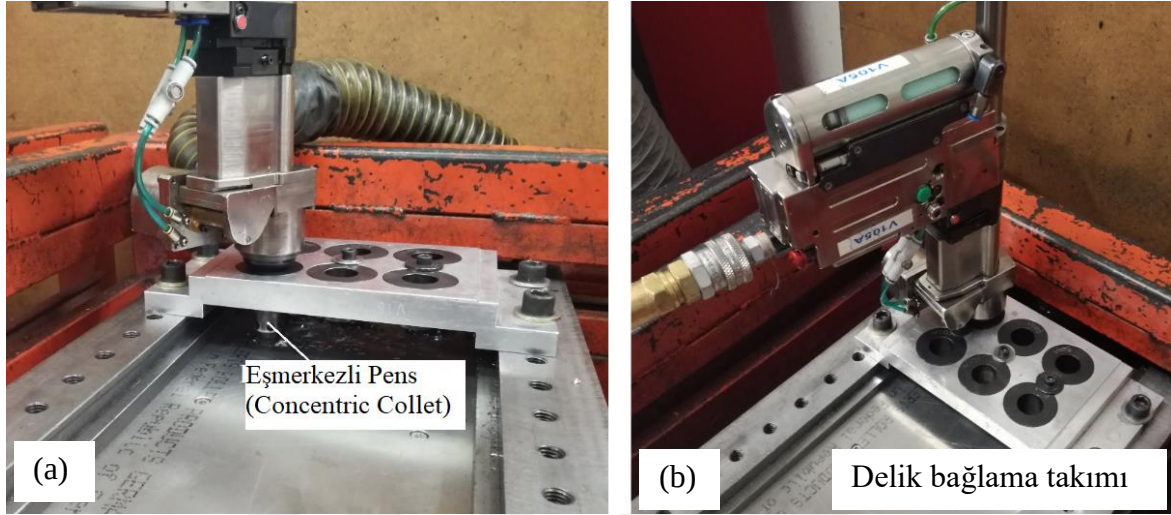
Şekil 4.12. Faz-2 ve Faz-3 testlerinde kullanılan test platformu



Şekil 4.13. Delme takımı ve istif test plakasının test platformu üzerine yerleşimi

Test parçası düzenek üzerine yatay olarak yerleştirilmektedir. Otomatik delme ekipmanının burun kısmında yer alan eşmerkezli pens (konsantrik kollet) , platform üzerinde yer alan delme takımı üzerinde bulunan hassas yataklama burcu içine gelecek

şekilde yerleştirilir. Eşmerkezli pens valfi serbest bırakılarak delik içinde sıkışma sağlanır. Ekipmanın yerleştirme yönü, montaj sırasında delme takımı yerleştirme yönü esas alınarak belirlenmiştir. Şekil 4.14'te ekipmanın ve eşmerkezli pensin yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 4.14. a) Eşmerkezli pensin delme takımına yerleşimi, b) Otomatik delme ekipmanının yerleşimi

Faz-3A çalışmasında, Faz-2 çalışmasında kullanılan otomatik delme ekipmanı kullanılmıştır. Her kesme hızı deneyi sonunda ekipman bir sonraki kesme hızına ayarlanmıştır. Faz-3A çalışmasında, Faz-2 çalışmasında belirlenen Tip-A matkabı kullanılarak 1400 dev/dak, 2600 dev/dak ve 4500 dev/dak iş mili hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Faz-3B çalışmasında, Faz-3A çalışmasında belirlenen 94 m/dak (2600 dev/dak) kesme hızı ve Faz-2 çalışmasında belirlenen Tip-A matkap ile proses yeterlilik testleri gerçekleştirilmiştir.

Kesme hızlarının seçilmesinde otomatik delme ekipmanın özellikleri dikkate alınmıştır. Bu ekipmanda hız ayarı mekanik dişliler ile yapılmaktadır. Deney şartlarına ve amacına uygun olacak şekilde düşük, orta ve yüksek kesme hızları seçilmiştir. Başlangıç değeri olarak Airbus AIAH-G-500 dökümanında belirtilen kesme hızı değeri esas alınmıştır. Dökümanda 11,12 mm çap ve alüminyum malzeme için 1700-2700 dev/dak hız aralığı belirtilmektedir. Kullanılan istif malzemenin ikinci test hızı olarak bu değere en yakın ekipman hızı ayarlanmış ve bu hızın bir alt ve bir üst değerleri alınarak kesme hızı parametresi belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan ekipmanlar ile ilgili teknik bilgiler Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Faz-3A testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı özellikleri

Ekipman Tipi	Ekipman-1	Ekipman-2	Ekipman-3
Kitleme Sistemi	Eşmerkezli Pens	Eşmerkezli Pens	Eşmerkezli Pens
Devir Hızı	1400 dev/dak	2600 dev/dak	4500 dev/dak
Kesme Hızı	51 m/dk	94 m/dk	163 m/dk
İlerleme Hızı	0,05 mm/dev	0,05 mm/dev	0,05 mm/dev
Hava Basıncı	6,3 bar	6,3 bar	6,3 bar
Max strok	35 mm	35 mm	35 mm
İçten soğutma	Mist	Mist	Mist
Gagalama	3/0,5	3/0,5	3/0,5
Kesici yataklama	Mevcut	Mevcut	Mevcut

Çizelge 4.10. Faz-3B testlerinde kullanılan otomatik delme ekipmanı özellikleri

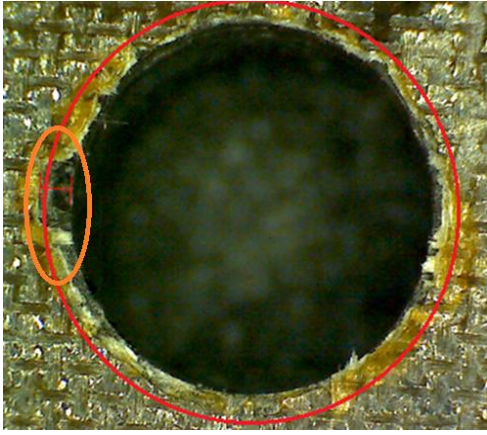
Ekipman Tipi	Ekipman
Kitleme Sistemi	Eşmerkezli Pens
Devir Hızı	2600 dev/dak
Kesme Hızı	94 m/dk
İlerleme Hızı	0,05 mm/dev
Hava Basıncı	6,3 bar
Max strok	35 mm
İçten soğutma	Mist
Gagalama	3/0,5
Kesici yataklama	Mevcut

4.4. Ölçme ve Kontrol

Deneysel çalışmaların tamamlanmasından sonra delik çapı, dairesellik, silindiriklik, yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm amacıyla farklı ekipmanlar ve tezgahlar kullanılmıştır. Her faz çalışması için benzer ve farklı deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir ve kullanılan ekipmanlar alt başlıklarda açıklanmıştır.

4.4.1. Faz-1

Faz-1 çalışmasında CFRP malzeme üzerinde delinen deliklerin çıkış tarafında oluşan çapaklar elmas takım ile temizlenmiştir. Çap, silindiriklik ve delik çıkışlarındaki delaminasyon ölçümleri yapılmıştır. Çap ve silindiriklik ölçümleri için CMM cihazı, delaminasyon ölçümleri için Insize 200x marka dijital mikroskop cihazı kullanılmıştır. Hasarlanan en büyük çap değeri mikroskop altında belirlenmiştir. En büyük fiber hasarının çapı ölçülerek delik çapına oranlanmış ve delaminasyon faktörü hesaplanmıştır (Şekil 4.15).



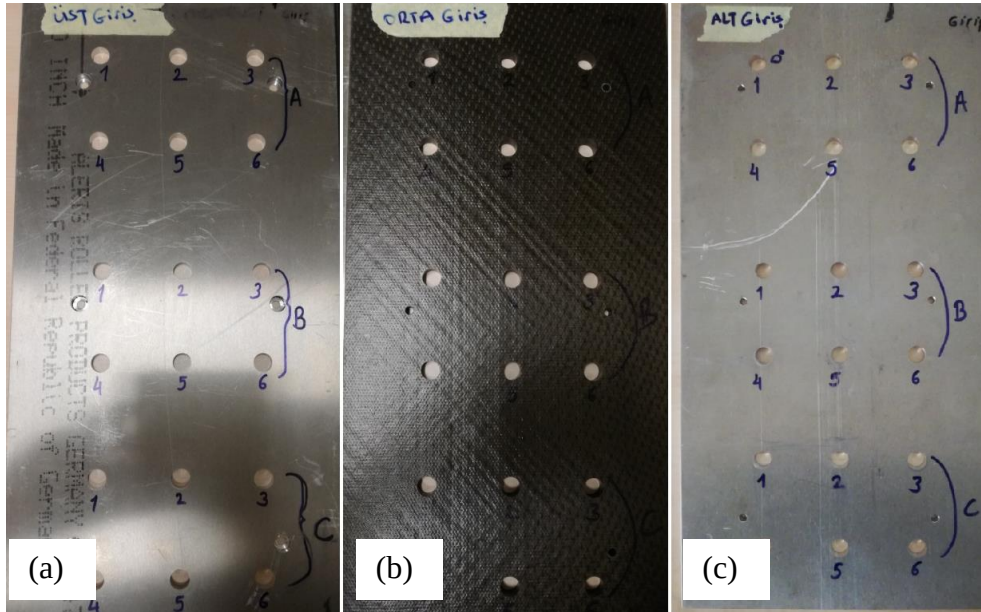
Şekil 4.15. CFRP malzemedede delik çıkışında oluşan delaminasyon

4.4.2. Faz-2 ve Faz-3

Delik delme işlemi tamamlandıktan sonra test plakasını bağlamada kullanılan cıvatalar sökülerek istif yapıdaki plakalar ayrılmıştır (Resim 4.4). Üst plaka alüminyum, orta plaka karbon fiber takviyeli plastik kompozit (CFRP), alt plaka alüminyum malzemeden oluşmaktadır.

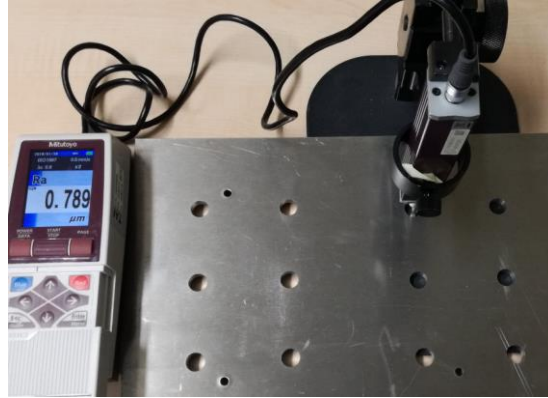
Faz-2 çalışmasında her matkap modeli ile altışar adet delik delinmiştir. Her bir plaka üzerinde yer alan deliklerin giriş ve çıkışlarında çap ölçümleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri 0° ve 180° açılardan yapılarak ortalamaları alınmıştır. CFRP plakada delik giriş ve çıkışlarındaki delaminasyonlara bakılmıştır. Altı delik sonunda matkaplarda oluşan aşınmalar incelenmiştir.

Faz-3A çalışmasında Tip-A matkap ile 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında 15'er adet delik delinmiştir. Çap, dairesellik, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri $0^\circ/90^\circ/180^\circ$ açılarda yapılarak ortalaması alınmıştır. Faz-3B çalışmasında, 94 m/dak kesme hızında Tip-A matkap ile 30 adet delik delinerek proses yeterlilik çalışması yapılmıştır. Bir adet matkap kullanılmıştır. Her delik için silindiriklik, dairesellik, çap, yüzey pürüzlülük ve CFRP plaka için delaminasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri $0^\circ/90^\circ/180^\circ$ açılarda yapılarak ortalaması alınmıştır. Her on delikte bir matkap aşınmalarına bakılmıştır. Delik iç katmanlarında delaminasyon incelemesi yapılmıştır.

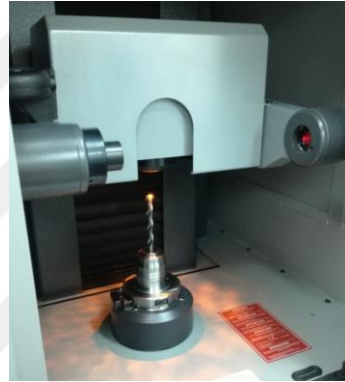


Resim 4.4. Faz-2 testlerinde delinmiş plakalar; a) Üst plaka, b) Orta plaka, c) Alt plaka

Faz-2 ve Faz-3 çalışmalarında delik kaliteleri (dairesellik, silindiriklik, çap) DEA Global Image CMM koordinat ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir parçadaki delik çap ölçümleri, delik girişi ve çıkışı olarak iki ayrı noktadan yapılmıştır. CFRP malzemede delik giriş ve çıkışında delaminasyon oluşumu incelenmiştir. Bu ölçümler için Insize 200X marka dijital mikroskop kullanılmıştır (Resim 4.5). Faz-3B'de iç katman delaminasyon ölçümleri Nikon Eclipse MA100 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir plakadaki deliklerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ-210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Resim 4.5). Kesici takım geometri ölçümleri, aşınma analizleri Zoller Genius 3s tezgahında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.6). Çizlge 4.11'de cihaza ait özellikler verilmiştir.



Resim 4.5. Insize marka mikroskop ve Mitutoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı



Resim 4.6. Zoller Genius 3s kesici takım ölçüm cihazı

Çizelge 4.11. Zoller ölçüm cihazı özellikleri

Marka	Zoller	Kontrol tipi	CNC
Model	Genius 3s	En yüksek takım boyu	600 mm
Eksen	5 Eksen	En yüksek takım çapı	340 mm
Enine eksen Y	+/-50 mm	Kamera	0-90°

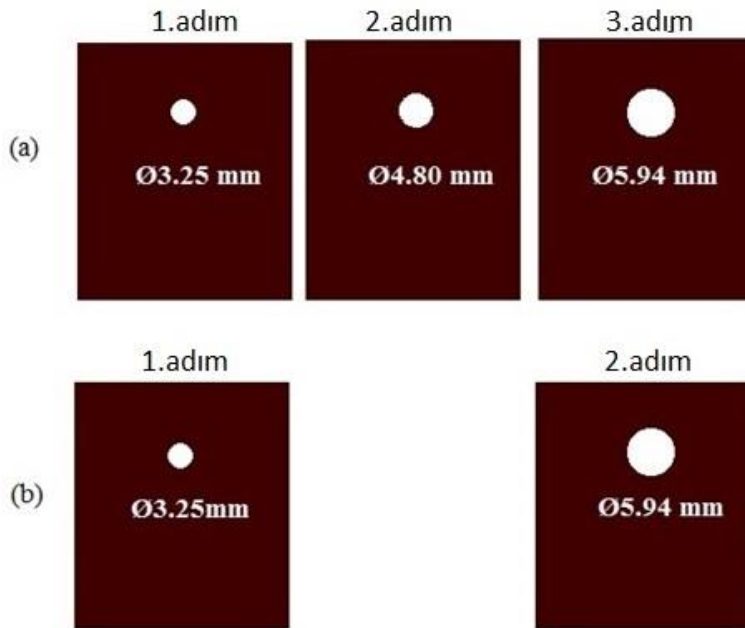
4.5. Deney Desenleri

Faz-1, Faz-2, Faz-3A ve Faz-3B çalışmalarının gerçekleştirilmesinde üretim alanında kullanılan ekipmanların kullanılması tercih edilmiştir. Bu çalışmalar ile üretimde gerçekleştirilen mevcut proseslerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Her faz çalışması için mevcut prosesler esas alınarak deney desenleri oluşturulmuştur.

4.5.1. Faz-1

Bu çalışmada amaç mevcut proses ile gerçekleştirilen zamanın yeni tasarlanan matkaplar ile kısaltılabilmesini sağlamaktır. Bu sayede direkt olarak havacılık sektöründe ticari bir ürün ortaya koyulabilecek ve üretimin hızlanması, maliyetlerin düşmesi ile çevre korunmasına da katkı sağlanması gerçekleştirilebilecektir.

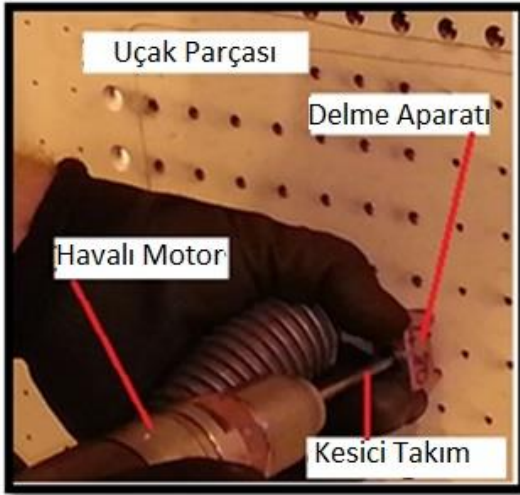
Şekil 4.16'da mevcut durumda kullanılan matkap ile Ø5,94 mm olan delik çapının elde edilmesi için delik kalitesinin bozulmamasını sağlamak üzere üç adımda delme işlemi gerçekleştirilmektedir. Proje başında gerçekleştirilen proses yeterlilik çalışması sonucuna göre prosesin kalite şartlarının sağlanabilmesi amacıyla 3 adımda uygulanmasına karar verilmiştir. İlk adımda dolu parçaya Ø3,25 mm çapında delik delinir. Ardından ikinci matkap ile delinen delik Ø4,80 mm çapına büyütülür. Üçüncü adımda ise Ø5,94 mm matkap ile delinerek son ölçüye getirilir. Çalışmanın amacı, ikinci adımı ortadan kaldırarak ilk delikten sonra son çapın delinmesi işlemini iki kademeli yeni matkap ile sağlayarak proses süresini kısaltmaktır. Yapılan deneysel çalışma üretim prosesine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmalarında, CFRP plakaya Ø4,80 mm delikten önce Ø3,25 mm ön delik delinmiştir. Ø5,94 mm delikten önce Ø4,80 mm ön delik delinmiştir.



Şekil 4.16. Proses adımlarının gösterimi a) Mevcut durum, b) İyileştirilmiş durum

Delme işlemi sırasında kesici takımın iş parçasına olan dikliğini sağlayabilmek için delme aparatı kullanılmıştır. Şekil 4.17’de gösterildiği üzere, teknisyen matkap motorunu tutarak aynı zamanda delme aparatını da tutmaktadır. Delme aparatı içindeki H7 toleransındaki merkezleme burcundan matkap geçerek iş parçasına delik açma işlemi gerçekleştirilmektedir.

Deney çalışmalarında 20 adet matkap kombinasyonu kullanılmıştır. Bu kombinasyonlar matkap uç açısı, kaplama ve kademe sayısı ile gerçekleştirilmiştir. Deney deseni Çizelge 4.12’de gösterilmiştir. Deney çalışmaları tek bir teknisyen tarafından gerçekleştirilmiştir. Teknisyen, önce başka bir plakada el hassasiyetini sağlamak için alıştırma amaçlı delikler deldikten sonra deney plakasında delik delmeye başlamıştır.



Şekil 4.17. Manuel matkap motoru ile CFRP parçada yapılan delme işlemi gösterimi

Matkaplara delik işlemi öncesinde numaralandırma yapılmıştır. Her matkap tipinden beşer adet delik delinmiştir. Delme işlemi 12000 dev/dak iş mili hızına sahip havali delme motoru ile gerçekleştirilmiştir. Delik girişleri Resim 4.7’de, delik çıkışları Resim 4.8’de gösterilmiştir. Delme işleminden sonra delik çıkışında oluşan çapaklar elmas çapak alma takımı ile temizlenmiştir (Şekil 4.18). Bu temizliğin amacı delik etrafındaki çapaklanmayı almak ve delaminasyon ölçümü için hazırlık yapmaktır.

Çizelge 4.12. Faz-1 deney deseni

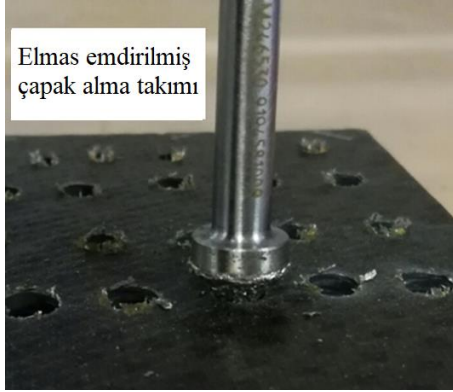
Matkap No	Ön Delik Çapı (mm)	Matkap Çapı (mm)	Açı (°)	Kaplama	Delik Sayısı
1	Yok	3,25	18	Yok	5
2	Yok	3,25	18	Var	5
3	Yok	3,25	36	Yok	5
4	Yok	3,25	36	Var	5
5	3,25	4,80	18	Yok	5
6	3,25	4,80	18	Var	5
7	3,25	4,80	36	Yok	5
8	3,25	4,80	36	Var	5
9	4,80	5,94	18	Yok	5
10	4,80	5,94	18	Var	5
11	4,80	5,94	36	Yok	5
12	4,80	5,94	36	Var	5
13	Yok	3,25-4,80	18	Yok	5
14	Yok	3,25-4,80	18	Var	5
15	Yok	3,25-4,80	36	Yok	5
16	Yok	3,25-4,80	36	Var	5
17	3,25	4,80-5,94	18	Yok	5
18	3,25	4,80-5,94	18	Var	5
19	3,25	4,80-5,94	36	Yok	5
20	3,25	4,80-5,94	36	Var	5



Resim 4.7. CFRP plaka delik giriş tarafı görüntüsü



Resim 4.8. CFRP plaka delik çıkışlarında oluşan çapaklanma gösterimi



Şekil 4.18. Delik çıkışında oluşan talaşın elmas takım ile temizleme işlemi

Deneysel çalışmada elde edilen çap, delaminasyon ve silindiriklik verilerine ait alt ve üst limit değerleri Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’te verilmiştir. Sınır değerler Airbus firmasına ait proses dökümanlarından alınmıştır [109,110].

Çizelge 4.13. Faz-1 ölçümleri için delaminasyon ve silindiriklik sınır değerleri [109]

Delik Çapı (mm)	Delaminasyon, Dmax (mm)	Fd (mm)	Silindiriklik (mm)
3,25	7,25	2,23	0,05
4,80	9,8	2,04	0,05
5,94	10,94	1,18	0,05

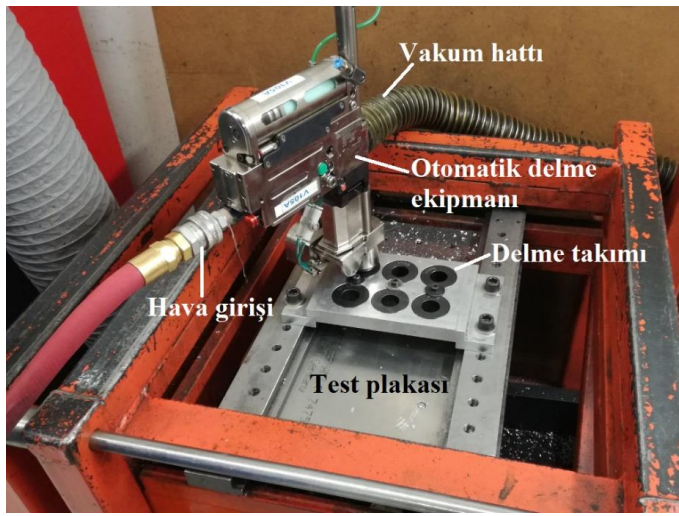
Çizelge 4.14. Faz-1 ölçümleri için çap sınır değerleri [110]

Delik Çapı (mm)	Alt limit (mm)	Üst limit (mm)
3,25	3,235	3,277
4,80	4,785	4,827
5,94	5,924	5,966

4.5.2. Faz-2

Aluminyum ve karbon fiber takviyeli plastik kompozit (CFRP) malzemelerden oluşan üç katmanlı istif yapı için uygun kesici geometrisinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışma yapılmıştır. Kesici geometrilerine ait modeller çıkarılmış ve kanal geometrileri ölçülmüştür. Bu çalışma özellikle havacılık sektöründe kullanılan istif malzemelerin son

montaj aşamasında uygulanan delme operasyonunun sorunsuz yapılabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Çalışmada üç farklı geometriye sahip matkap kullanılmıştır. Matkaplarda kaplama bulunmamaktadır. Her bir matkap için Al-CFRP-Al istif plakaya 6 adet toplamda 18 adet delik delinmiştir. Her delikten sonra ekipmanın içine dolan toz ve talaşlar temizlenmiş ve sonraki delme işlemine başlanmıştır. Vakum bağlantısı yapılarak delme sırasında kırılan talaşlar dışarı çekilmiştir. Soğutma sıvısı kullanılarak matkap içinden 3 bar basınçla atılarak delik içi yağlanmış ve matkap aşırı ısınması önlenmeye çalışılmıştır. Ekipmanın yerleşimi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

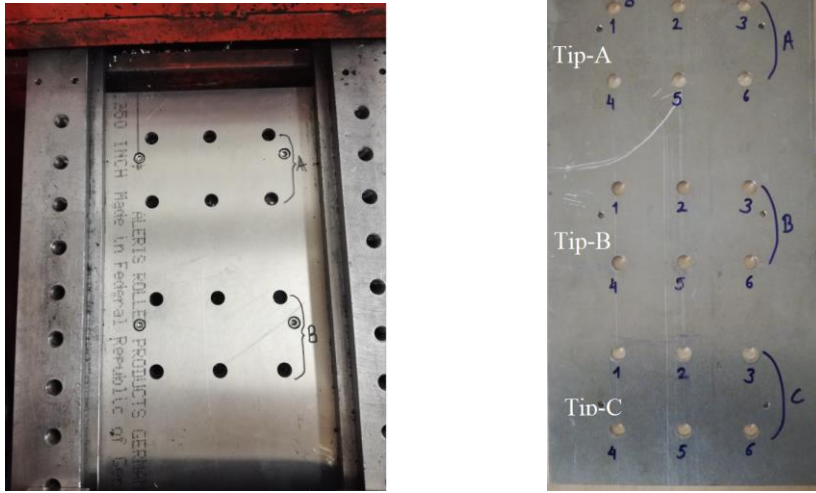


Şekil 4.19. Otomatik delme ekipmanının test düzeneğine yerleşimi

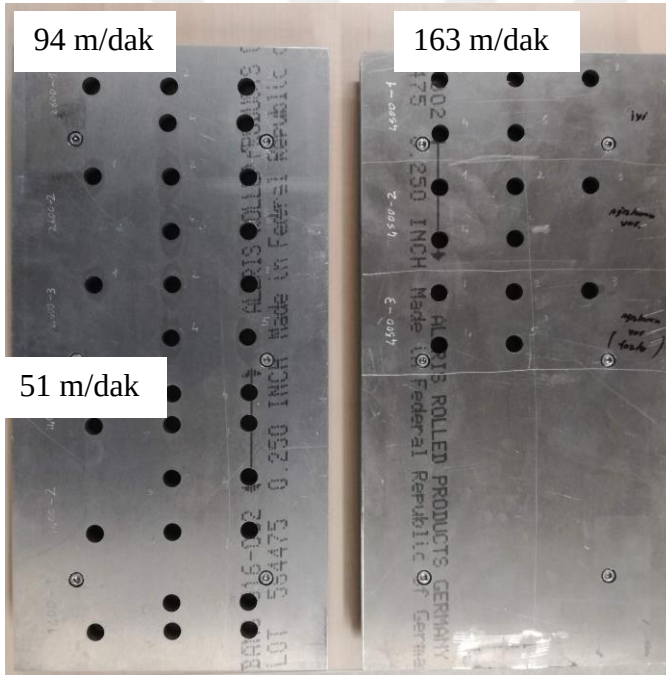
Delme işlemi sonrasında test plakasının görüntüsü Resim 4.9’da verilmiştir. İstif yapı test düzeneğinden civatalar sökülerek dışarı alınmış ve sonrasında istif yapıyı bir arada tutan civatalar açılarak alüminyum ve CFRP plakalar ayrılmıştır. Plakalar üzerinden giriş ve çıkış delik çapları, CFRP plakada delik çıkışı delaminasyon ölçümü ve tüm plakalarda yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kesicilerin aşınma resimleri çıkarılmıştır. Faz-2 testlerine ait deney deseni Çizelge 4.15’te verilmiştir.

Çizelge 4.15. Faz-2 deney deseni

Test adı	Faz-2	Kesme hızı	94,5 m/dak
Matkap kodları	Tip-A, Tip-B, Tip-C	İlerleme	0,05 mm/dev
Kaplama durumu	Kaplamasız	Delik sayısı	6 adet/matkap
Soğutma	Matkap içinden Mist	Talaş kırma	Mikro gagalama
Talaş tahliyesi	Vakumlama		



Resim 4.9. Faz-2 testlerinde delinen Al-CFRP-Al istif plaka



Şekil 4.20. 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında delinen 15'er adet delik.

4.5.3. Faz-3A

Aluminyum ve karbon fiber takviyeli plastik kompozit (CFRP) malzemelerden oluşan üç katmanlı istif yapı için uygun kesici geometrisinin belirlenmesi amacıyla yapılan Faz-2 çalışmasında en uygun geometri Tip-A olarak belirlenmiştir.

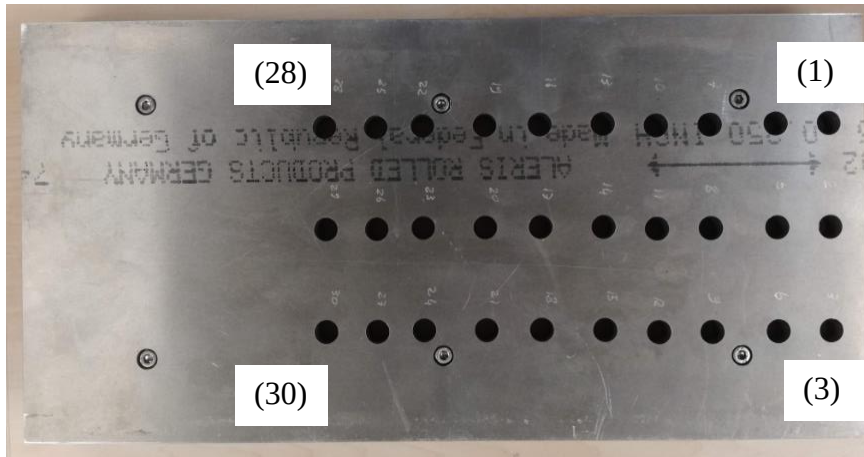
Faz-3A çalışmasında Tip-A matkabı ile 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında Al-CFRP-Al istif malzemede 15'er adet delik delinmiştir. Teste ait deney deseni Çizelge 4.16'da verilmiştir. Delme işlemi sonunda test plakalarının görüntüsü Şekil 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.16. Faz-3A deney deseni

Test adı	Faz-3A
Matkap kodu	Tip-A
Kaplama durumu	Kaplamasız
Soğutma	Matkap içinden Mist
Talaş tahliyesi	Vakumlama yaparak
Kesme hızları	51 m/dk, 94 m/dk, 163 m/dk
İlerleme	0,05 mm/dev
Delik sayısı	15 adet
Talaş kırma	Mikro gagalama

4.5.4. Faz-3B

Faz-3A deneysel çalışması sonrası yapılan değerlendirmeler sonucunda en iyi değerleri veren 94 m/dak kesme hızı ile Faz-3B çalışması yapılmıştır. Faz-3B çalışmasında 94 m/dak kesme hızı ile istif plakaya tek matkap ile 30 adet delik delinmiş ve proses yeterlilik analizleri yapılmıştır (Şekil 4.21). Deliklerin hepsi tek bir kesici ile delinmiştir. Kullanılmadan önce ve her on delikte kesici aşınmalarına bakılmıştır.



Şekil 4.21. 94 m/dak kesme hızında performans testi için delinen 30 adet delik

Delinen deliklere plakalar üzerinde 1-30 aralığında delik numaraları işaretlenmiştir. Plakalar sökildükten sonra her bir plakanın giriş ve çıkış yönleri plaka üzerine işaretlenmiştir. Faz-3B testlerine ait deney deseni Çizelge 4.17’de verilmiştir. Faz-2, Faz-3A ve Faz-3B deney çalışmalarında ölçümü yapılan çap, yüzey pürüzlülüğü, silindiriklik, dairesellik ve delaminasyon parametrelerine ait sınır değerler Airbus ve Bombardier firmalarının proses dökümanlarından alınmış ve Çizelge 4.18, Çizelge 4.19, Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Faz-3B deney deseni

Test adı	Faz-3B
Matkap kodu	Tip-A
Kaplama durumu	Kaplamasız
Soğutma	Matkap içinden Mist
Talaş tahliyesi	Vakumlama
Kesme hızları	94 m/dk (2600 rpm)
İlerleme	0,05 mm/dev
Delik sayısı	30 adet
Talaş kırma	Mikro gagalama

Çizelge 4.18. Faz-2, Faz-3A ve Faz-3B delik çapı alt ve üst sınır değerleri [107]

Alt Sınır Delik Çap Ölçüsü (mm)	Üst Sınır Delik Çap Ölçüsü (mm)
11,53	11,61

Çizelge 4.19. Faz-2, Faz-3A ve Faz-3B yüzey pürüzlülüğü sınır değerleri [107, 111]

CFRP için en yüksek yüzey pürüzlülük değeri (Ra)	Aluminyum için en yüksek yüzey pürüzlülük değeri (Ra)
5,0 μm	3,2 μm

Çizelge 4.20. Faz-3A ve Faz-3B dairesellik ve silindiriklik sınır değerleri [109]

En yüksek silindiriklik değeri (mm)	En yüksek dairesellik değeri (mm)
0,05	0,05

Çizelge 4.21. Faz-2 ve Faz-3B delaminasyon sınır değerleri [109]

En yüksek hasarlı delik çapı (mm)	En yüksek delaminasyon faktörü, Fd (mm)	En yüksek hasarlı katman kalınlığı (µm)
19,57 mm	1,69 mm	990

4.6. İstatistiksel Analiz

Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler ANOVA ve Proses Yeterlilik Analizi (PYA) ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Faz-1 çalışmasında, çap, aç ve kaplama olmak üzere üç faktör bulunmaktadır. Faktör sayısının birden fazla olmasından dolayı Faz-1 çalışmasında istatistiksel sonuçları değerlendirmek amacıyla ANOVA-Genel Doğrusal Model analizi ile ana etki grafiği analizi kullanılmıştır. Genel doğrusal model ile hangi faktörün sonuçlar üzerinde etkili olduğuna ve etki düzeyinin hangi oranda olduğuna bakılmıştır. Ana etki grafikleri optimum sonuçların elde edilebilmesi için optimum tasarım şartlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır [112]. Faz-2 çalışmasında çap ve yüzey pürüzlülük değerleri için ana etki grafiklerine ve proses yeterlilik analizi ile delik giriş ve çıkışlarında yapılan çap ölçüm sonuçlarının proses yeterlilik indisi Cpk değerlerine bakılarak en iyi değerleri veren matkap tipi belirlenmiştir. Faz-3A çalışmasında, çap, dairesellik, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri için ana etki grafiklerine bakılarak en iyi Cpk değerlerini veren kesme hızı tespit edilmiştir. Faz-3B çalışmasında, delik giriş ve çıkış çap değerleri, dairesellik, silindiriklik ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları için proses yeterlilik analizleri yapılarak proses yeterlilik indisleri değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olup olmadığına bakılmıştır. Cp ve Cpk proses yeterlilik indislerinin hesabında 1,33 değeri sınır değer olarak kabul edilmektedir [109]. 1,33 değerinin üstünde sonuç çıkması durumunda proses yeterli kabul edilerek üretim alanında kullanılmasına izin verilmektedir. 1,33 değerinin altında çıkması durumunda proses yeterli kabul edilmeyerek kullanılmasına izin verilmemektedir. Tüm istatistiksel analiz çalışmaları Minitab programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



5. DENEY SONUÇLARI VE TAŞTIRMA

5.1. Faz-1

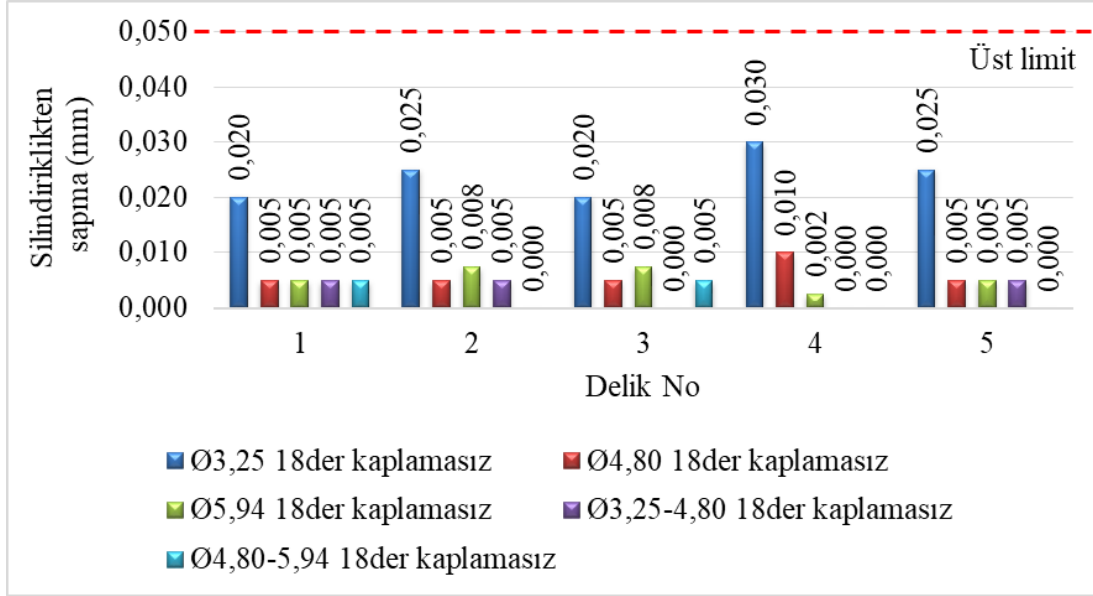
Her delik için silindiriklik, çap ve delaminasyon ölçümleri yapılarak grafiklerde karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Faz-1 aşamasında, kademeli olarak yeni tasarlanan matkaplar ile ticari olarak temin edilebilen kademeli matkaplar kullanılarak delinen deliklerin kalite ölçümleri yapılmış ve limit değerler ile karşılaştırılmıştır. ANOVA ve ana etki grafikleri ile etkin olan parametreler belirlenmiştir. Bu sayede yeni tasarlanan kademeli matkapların uygunluğunu tespit edip kullanımını sağlayarak, delik delme prosesinde önemli bir zaman kazancı sağlanabilecektir.

5.1.1. Silindiriklik

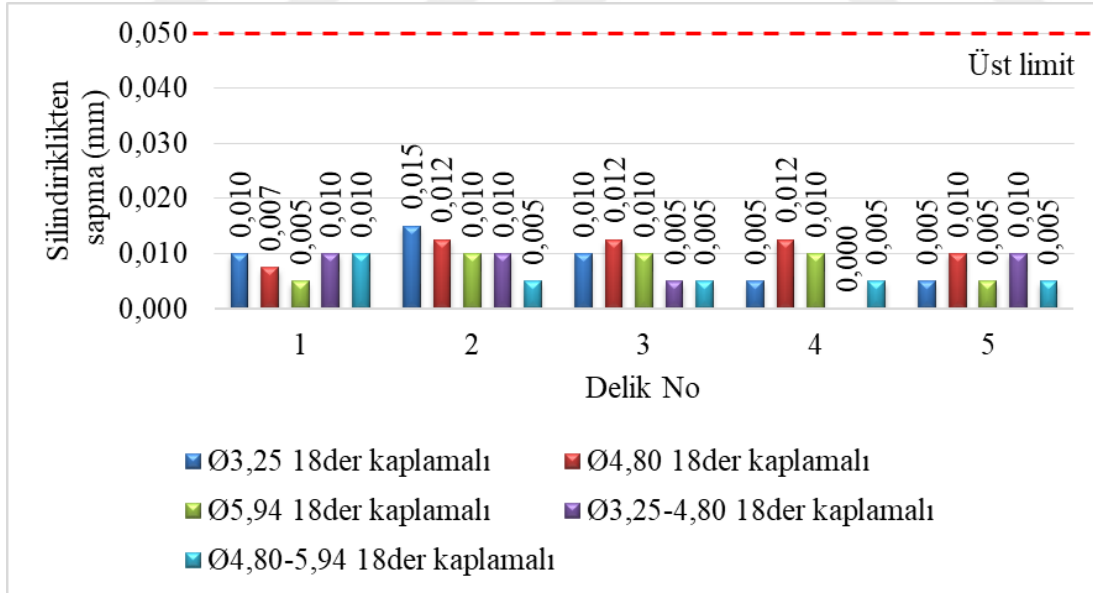
Şekil 5.1’de en büyük silindiriklikten sapma değeri kademeli Ø3,25 mm matkap ile delinen deliklerde 0,03 mm olarak elde edilmiştir. 12000 dev/dak iş mili hızında silindiriklik değerlerinin yüksek çıktığı literatürdeki çalışmalarda görülmüştür. Özellikle yüksek devir düşük ilerleme hızı kombinasyonunda en yüksek silindiriklik değerleri elde edilmiştir [113]. Bu çalışmada itme kuvveti ölçümü yapılamamasına rağmen, dolu malzemeye delik delinmesi sırasındaki itme kuvvetinin, ön delik üzerine delme işlemi yapıldığı durumdakinden daha büyük olduğu söylenebilir. Yüksek itme kuvvetinden dolayı, teknisyen tarafından uygulanan ilerleme hızının düşmesinin silindiriklikten sapma değerlerinde artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Ø4,80 mm delik, Ø3,25 mm ön delik üzerine ve Ø5,94 mm delik, Ø4,80 mm ön delik üzerine delinmiştir.

Şekil 5.2’ye göre kaplama yapılmış matkaplar ile delinen delikler kaplamasız matkaplar ile delinen deliklere göre daha yüksek silindiriklikten sapma değerlerinin çıkmasına sebep olmuştur. En büyük fark, dördüncü delikte Ø5,94 mm’de 0,002 mm’den 0,010 mm’ye çıkarak gerçekleşmiştir. DLC kaplama kesici takımın aşınma direncini yükseltmek amacıyla kullanılmaktadır. Tungsten malzeme üzerine yapılan kaplama kesme kenarı üzerinde kalınlık oluşturarak kesme kenarının keskinliğinin düşmesine neden olur. DLC kaplamalı matkap ile yapılan delme işleminde oluşan itme kuvveti ve tork değeri

kaplamasız matkapdan daha yüksek çıkmaktadır [117]. İtme kuvvetinin yüksek olmasından dolayı silindiriklikten sapma değerlerinin yüksek çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 5.1. Kaplamasız ve 18° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması

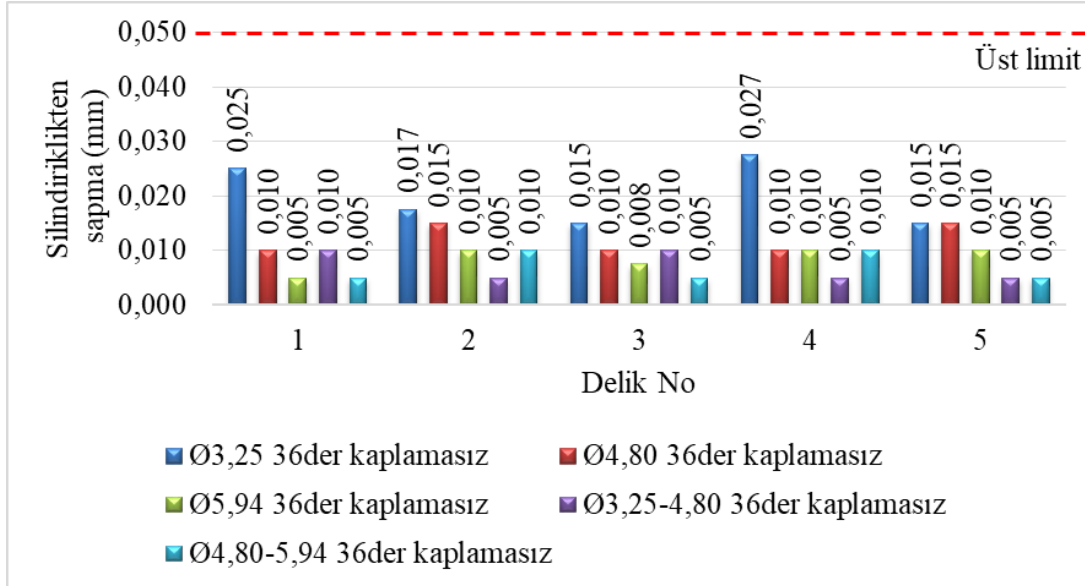


Şekil 5.2. Kaplamalı ve 18° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması

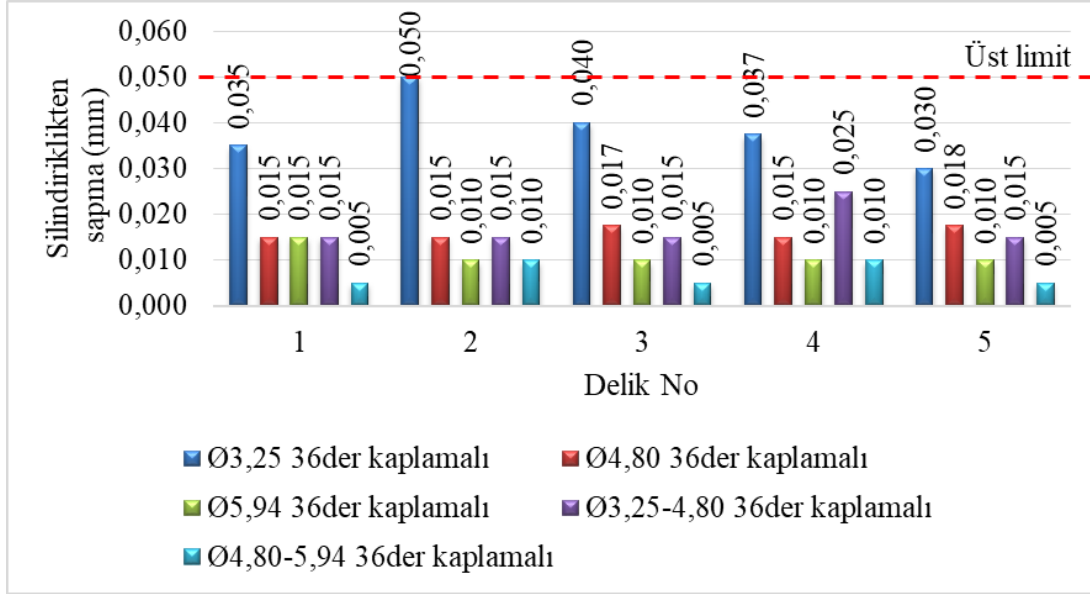
Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'e göre uç açısının 36° olduğu matkaplar ile delinen deliklerde silindiriklikten sapma değerleri 18° uç açılı matkaplar ile delinen deliklere göre 2-3 kat arasında yüksek çıkmıştır. Matkap uç açısının artması itme kuvvetinin ve torkun artmasına

sebeptir [114]. İtme kuvvetinin artışı, teknisyenin ilerleme hızını düşürmesine ve kesici takımın kompozit malzeme içinde daha uzun süre kalarak kesici ile kompozit yüzeyi arasındaki temas süresinin uzaması ile sıcaklığın artmasına neden olduğu ve silindiriklikten sapma miktarını artırdığı düşünülmektedir [115]. Düşük ilerleme hızlarında yapılan delme sonrasında deliklerin silindiriklik değerlerinin yüksek çıktığı literatürde gösterilmiştir [116].

Kademeli matkaplarda elde edilen silindiriklikten sapma değerleri kademeli matkaplara göre daha düşük çıkmıştır. Şekil 5.4'te birinci, üçüncü ve beşinci deliklerde Ø5,94 mm'de sapma miktarları sırasıyla 0,015 mm, 0,010 mm ve 0,010 mm iken, Ø4,80-5,94 mm kademeli matkapta tüm deliklerde 0,005 mm olarak gerçekleşmiştir. Matkap delik içine girdiğinde birinci kademe, delik içinde eksen boyunca pilotlama yaparak kesicinin daha iyi merkezlenmesini sağlamıştır. Özellikle elle yapılan manuel delme işlemlerinde kesiciyi eksen boyunca salgı yapmadan delebilmek için delme aparatı vb. ekipmanlar kullanılmaktadır. Buna rağmen salgıyı tamamen bitirmek mümkün olamamaktadır. Kademeli matkap geometrisinde birinci kademe boyunun yeterince uzun olmasının pilotlama görevi yapmasından dolayı daha iyi delik kalitesi meydana getirdiği söylenebilir.



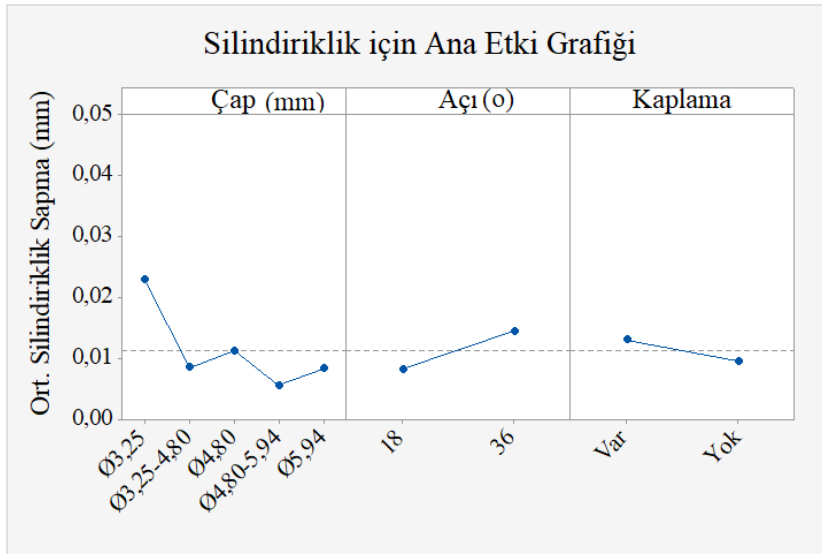
Şekil 5.3. Kaplamasız ve 36° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması



Şekil 5.4. Kaplamalı ve 36° uç açılı matkapların silindiriklik kıyaslaması

Silindiriklik için istatistiksel analiz

Şekil 5.5'te gösterilen ana etki grafiğinde çap, açı ve kaplamanın ortalama silindiriklikten sapma değerleri üzerindeki etkileri yer almaktadır. Uç açısı değerinin 18° den 36° ye çıkması ile ortalama silindiriklikten sapma değerlerinde artış görülmektedir. Kaplama uygulamasının ortalama silindiriklikten sapma değerlerini artırdığı görülmektedir. Yeni tasarlanan kademeli matkapların ortalama sapma değerlerini düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 5.5. Silindiriklik sonuçları için çap, açı ve kaplama faktörlerinin ana etki grafiği

Çizelge 5.1’de ANOVA analizine ait veriler gösterilmiştir. P değerleri anlamlılık düzeyi olan 0,05’in altında olduğu için çap, açısı ve kaplama faktörlerinin ortalamalar üzerinde fark oluşturduğu söylenebilir. En büyük etki %46,96 ile çap faktörünündür. Kaplamanın ortalamalar üzerine etkisi %4 olarak en az etkide gerçekleşmiştir.

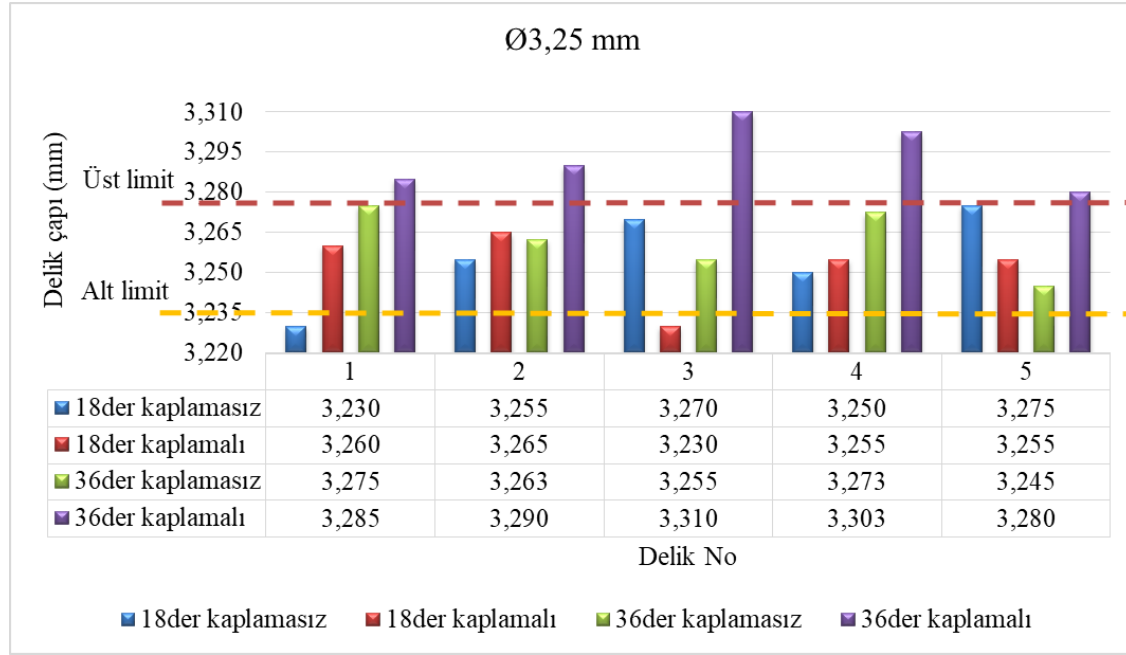
Çizelge 5.1. Silindiriklik için ANOVA analizi sonuçları

Faktör	SD	Etki Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çap	4	%46,96	0,003695	0,000924	29,81	0,000
Açısı	1	%12,42	0,000977	0,000977	31,51	0,000
Kaplama	1	%4,00	0,000315	0,000315	10,17	0,002
Hata	93	%36,62	0,002882	0,000031		
Toplam	99	%100,00				

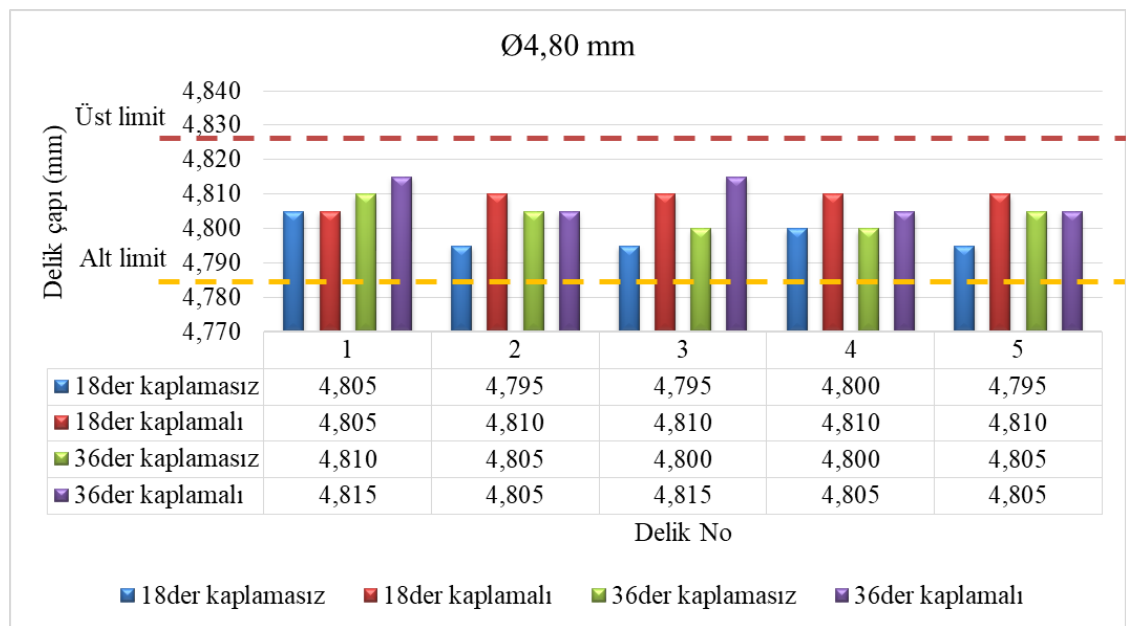
5.1.2. Delik çapı

Tüm matkap çaplarında uç açısının 18° den 36° ye çıkması ile delik çaplarında büyüme gözlenmiştir. Şekil 5.6’da 36° kaplamalı Ø3,25 mm matkap ile delinen 5 delik çapı değeri 3,277 mm olan üst çap limit değerinin üzerinde çıkmıştır. Şekil 5.6’da üçüncü delikte Ø3,230 mm’den Ø3,310 mm’ye çıkmıştır. Şekil 5.7’de ikinci delikte Ø4,795 mm’den Ø4,805 mm’ye çıkmıştır. Şekil 5.8’de ikinci delikte Ø5,940 mm’den Ø5,960 mm’ye çıkmıştır. Şekil 5.9’da Ø3,25-4,80 mm kademeli 36° matkap ile delinen delik çapları alt sınır değerinde çıkmıştır. Şekil 5.10’da 36° kaplamasız Ø4,80-5,94 mm çaplı kademeli matkap ile delinen 5 adet delik çap değerleri üst limit değerin üzerinde çıkmıştır. Benzer sonuçlar yapılan literatürdeki çalışmalarda yer almış ve uç açısı arttırıldığında delik çaplarının büyük çıktığı gözlenmiştir [112]. Açının büyümesi sonucu kesici kenar ile malzeme arasındaki temas yüzeyi artmakta ve bu da itme kuvvetinin büyümesine sebep olmaktadır [118]. Manuel delmede itme kuvveti artışının teknisyen tarafından yapılan ilerleme hızının düşmesine sebep olduğu ve matkabın delik içinde daha fazla kaldığı söylenebilir. Bunun da delik içinde sıcaklığın artmasına ve elastik toparlanma sonrası delik çapının büyümesine sebep olduğu düşünülmektedir. Kaplamalı matkaplar ile delinen deliklerde kaplamasızlara göre daha büyük çap değerleri meydana gelmiştir. Şekil 5.10’da

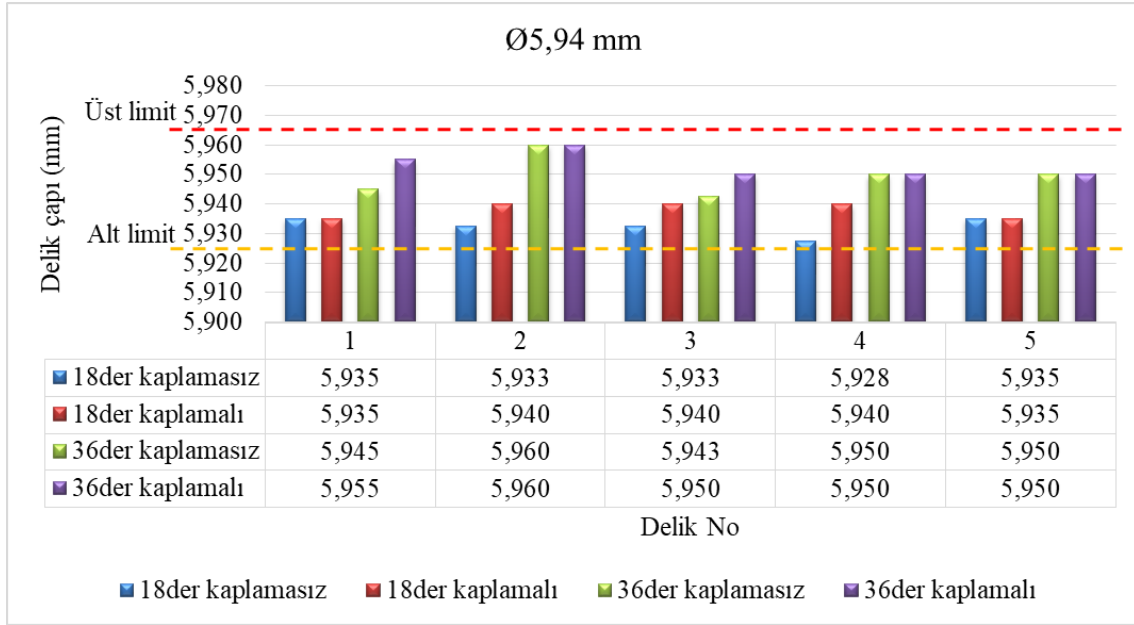
görüldüğü üzere 36° açılı kaplamalı Ø4,80-5,94 mm kademeli matkapta ikinci delik sonucu 5,970 mm gelerek üst limit değerinin üzerinde çıkmıştır. Kaplamasız matkaplarda kaplamalı matkaplara göre çap değerleri nominal değere daha yakın çıkmıştır. DLC kaplamanın delik ölçüleri üzerinde iyileştirici etki göstermediği literatürdeki çalışmalarda da görülmüştür [119].



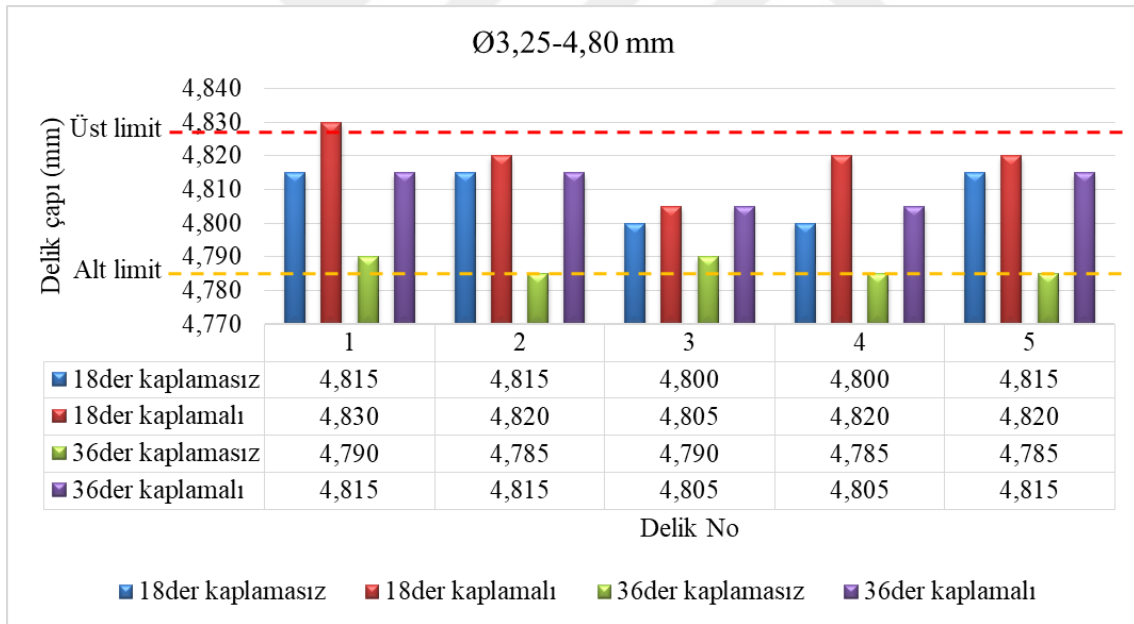
Şekil 5.6. Ø3,25 mm kademersiz matkap çap sonuçları



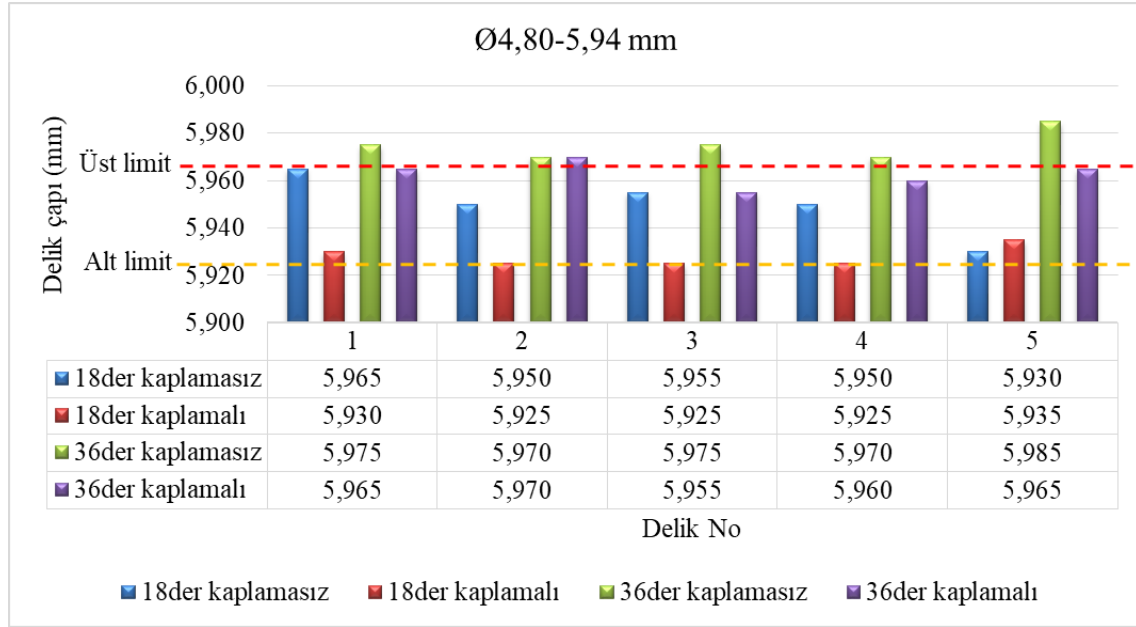
Şekil 5.7. Ø4,80 mm kademersiz matkap çap sonuçları



Şekil 5.8. Ø5,94 mm kademersiz matkap çap sonuçları



Şekil 5.9. Ø3,25-4,80 mm kademeli matkap çap sonuçları



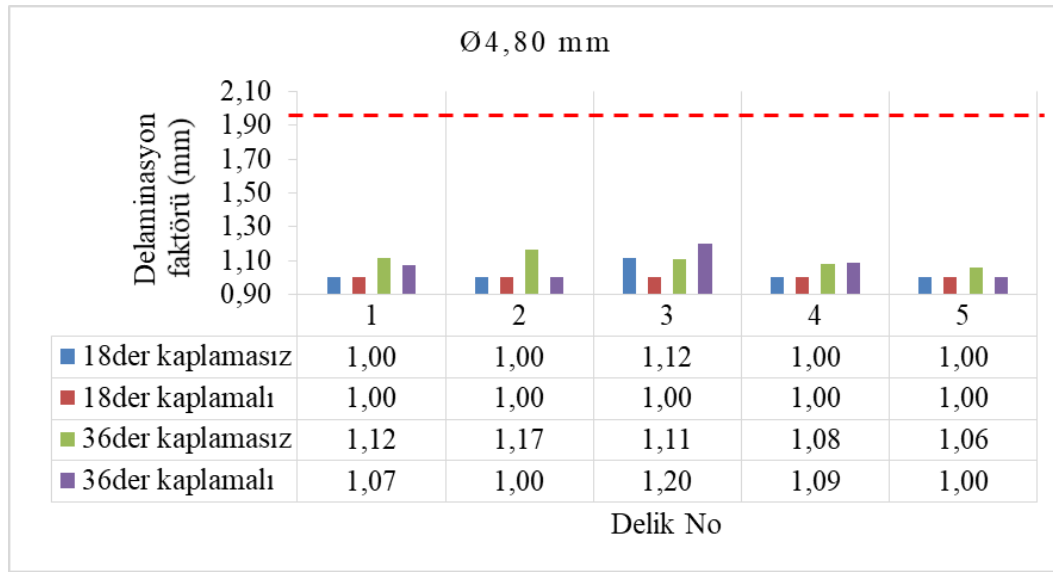
Şekil 5.10. Ø4,80-5,94 mm kademeli matkap çap sonuçları

5.1.3. Delaminasyon

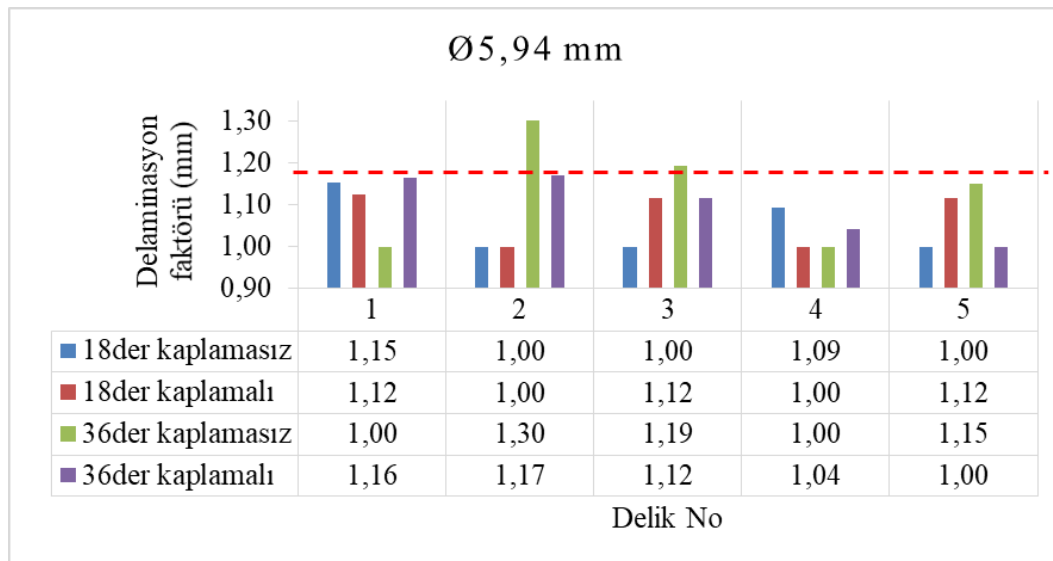
Delaminasyon ölçümleri delik çıkışlarında yapılmıştır. Sonuçlarını kıyaslamak için elde edilen ölçüm değerleri ile her delik çıkışında gerçekleşen delaminasyon faktörleri hesaplanmıştır (Bkz. Eş. 2.1). Delik çaplarına göre ve açı ile kaplama durumuna göre değişimler grafiklerde gösterilmiştir. Ultrasonik delaminasyon ölçüm tezgahında plakanın iç katmanlarında delaminasyon incelemesi yapılmıştır.

18° kaplamasız matkaplarda Ø3,25 mm delik çıkışlarında delaminasyon gözlenmemiştir. Çap değerinin küçük olmasının bu sonuca etki ettiği söylenebilir. Küçük matkap açısının itme kuvvetinin azalmasını sağlayarak hasar oluşumunu düşürdüğü literatürde gösterilmiştir [120]. Şekil 5.11'e göre Ø4,80 mm matkap ile delinen deliklerde en büyük delaminasyon faktörü 1,20 mm olarak 36° kaplamalı kombinasyonda gerçekleşmiştir. Şekil 5.12'ye göre en büyük delaminasyon faktörü değeri 1,30 mm ile 36° kaplamasız Ø5,94 mm matkapta gerçekleşmiştir. Çap değerindeki büyüme ve matkap uç açısının bu sonuca sebep olduğu düşünülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda matkap çapının delaminasyon üzerine etki eden en önemli parametre olduğu görülmüştür. Çap büyüdükçe itme kuvvetindeki artıştan dolayı delik çıkışında hasarlanan çap büyümektedir [121]. Matkap kademe açısı büyüdükçe itme kuvvetinde artış meydana gelmekte ve bu da delaminasyon oluşumunu artırmaktadır [118]. Kaplamasız matkaplar ve DLC kaplama uygulanmış

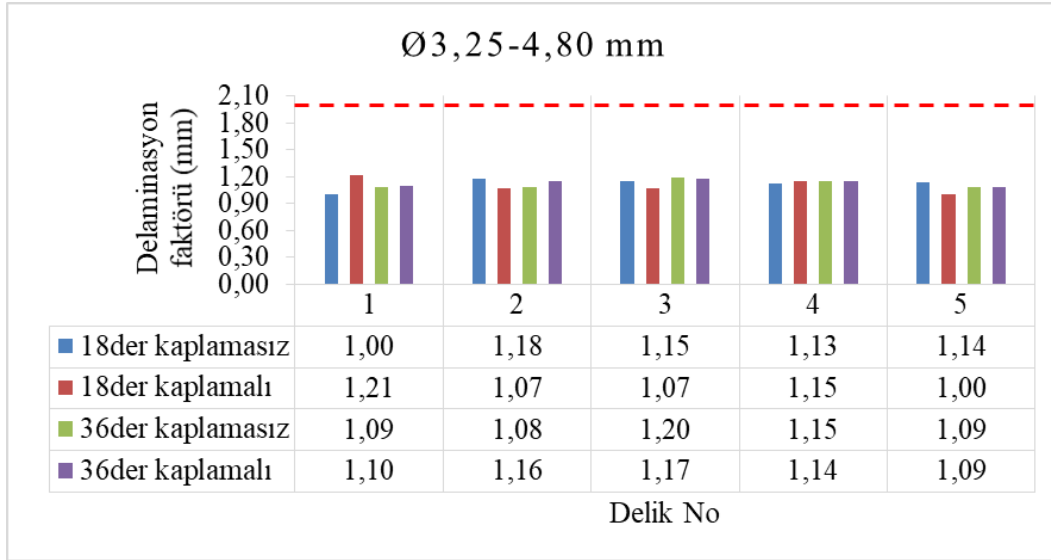
matkaplar ile elde edilen sonuçlar arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Delaminasyon üzerine yapılan çalışmalarda DLC kaplamanın sonuçlara bir etkisi olmadığı ve kaplamasız matkap ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür [119]. Şekil 5.13'e göre Ø3,25-4,80 mm kademeli matkapta en yüksek delaminasyon faktörü 1,21 mm ile 18° kaplamalı kombinasyonda gerçekleşmiştir. Şekil 5.14'e göre Ø4,80-5,94 mm kademeli 18° kaplamalı matkap ile delinen dördüncü delikte 1,29 mm ile 36° kaplamasız matkap ile delinen birinci ve üçüncü deliklerde 1,25 mm ve 1,20 mm tolerans dışı değerler gözlenmiştir [109].



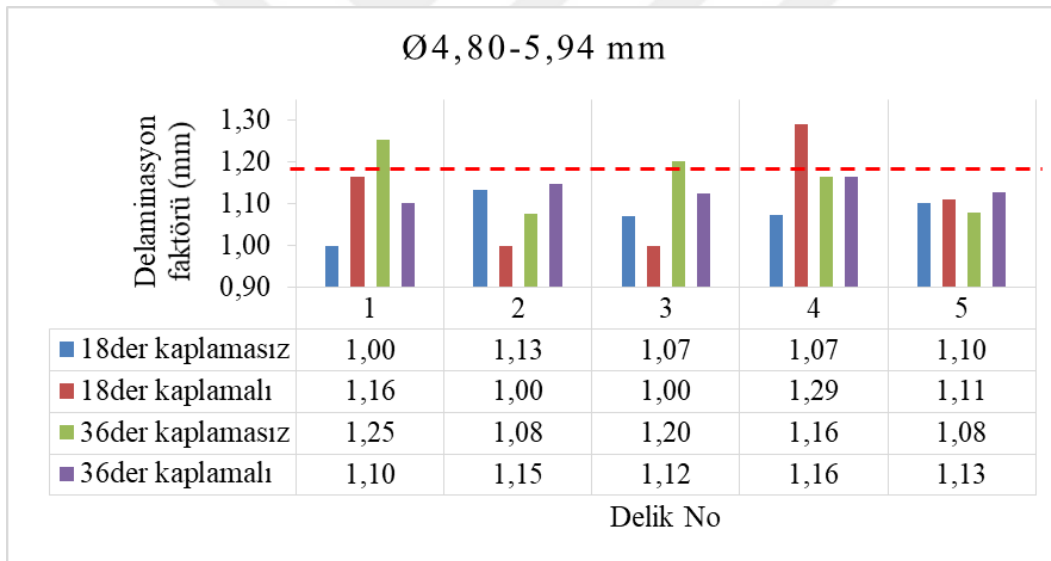
Şekil 5.11. Ø4,80 mm çaplı matkaplara ait delaminasyon sonuçları



Şekil 5.12. Ø5,94 mm matkaplara ait delaminasyon sonuçları



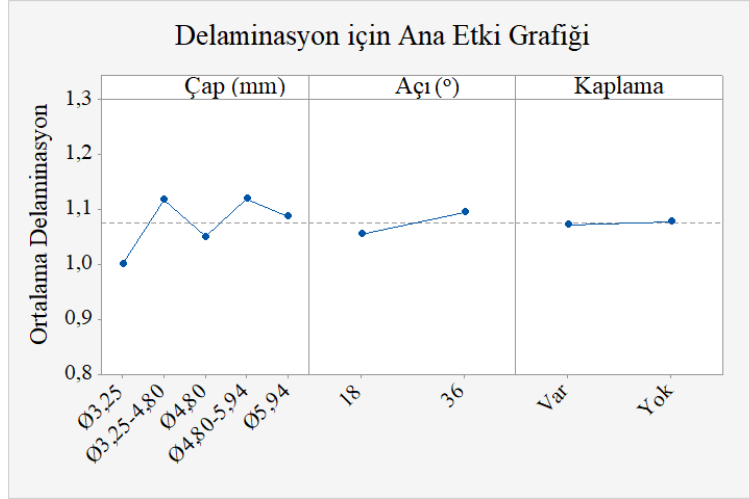
Şekil 5.13. Ø3,25-4,80 mm kademeli matkaplara ait delaminasyon sonuçları



Şekil 5.14. Ø4,80-5,94 mm kademeli matkaplara ait delaminasyon sonuçları

Delaminasyon için istatistiksel analiz

Şekil 5.15'te gösterilen ana etki grafiğinde çap, açı ve kaplamanın ortalama delaminasyon değerleri üzerindeki etkileri yer almaktadır. Uç açısı değerinin 18° den 36° ye çıkması ile ortalama delaminasyon değerlerinde artış görülmemiştir. Kaplama uygulamasının ortalama delaminasyon değerleri üzerinde bir fark oluşturmadığı görülmüştür. Yeni tasarlanan kademeli matkapların ortalama delaminasyon değerlerini artırdığı ancak limit değerlerin altında kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.15. Delaminasyon sonuçları için çap, açı ve kaplama faktörlerinin etki grafiği

Çizelge 5.2’de ANOVA analizine ait veriler gösterilmiştir. P değerleri anlamlılık düzeyi olan 0,05’in altında olduğu için çap ve açı faktörlerinin ortalamalar üzerinde fark oluşturduğu söylenebilir. En büyük etki %35,56 ile çap faktörünüdür. Kaplamanın ortalamalar üzerine etkisinin olmadığı söylenebilir. Açı faktörünün etkisi %6,40 olarak çıkmıştır.

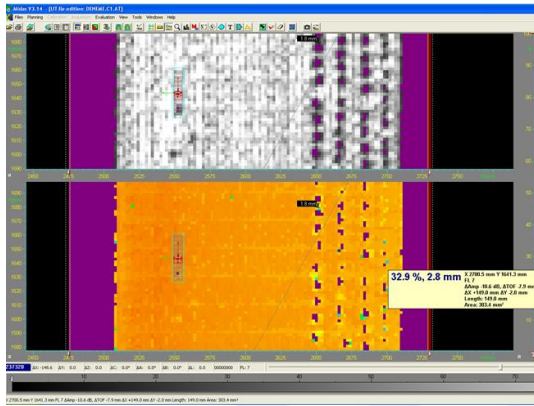
Çizelge 5.2. Delaminasyon için ANOVA analizi sonuçları

Faktör	SD	Etki Oranı	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Çap	4	%33,56	0,203510	0,050878	13,02	0,000
Açı	1	%6,40	0,038799	0,038799	9,93	0,002
Kaplama	1	%0,14	0,000851	0,000851	0,22	0,642
Hata	93	%59,90	0,363335	0,003907		
Toplam	99	%100,00				

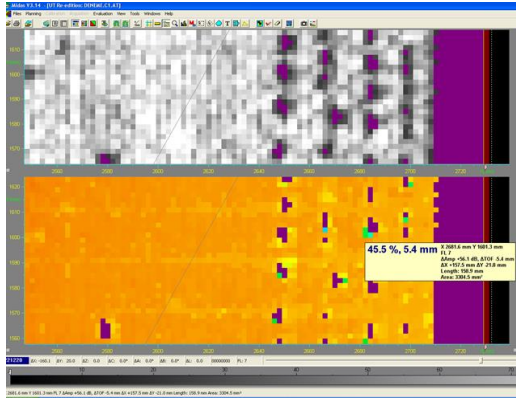
Ultrasonik delaminasyon ölçüm sonuçları

Ultrasonik tarama tezgahı ile CFRP plakanın iç katmanlarında oluşan delaminasyonlara bakılmıştır. Ø3,25 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap ile delinen delikte, 3mm derinlikte 2x2 mm delaminasyona rastlanmıştır. Şekil 5.16’da, Ø3,25 mm, 36°, kademersiz,

kaplamasız matkap ile delinen üçüncü delikte 3 mm derinlikte 2x2 mm delaminasyon gösterilmiştir. Şekil 5.17’de, Ø5,94 mm, 18°, kademersiz, kaplamalı matkap ile delinen üçüncü delikte, 3,9-5,4 mm derinlikte 4x4 mm delaminasyon sonucu gösterilmiştir. Şekil 5.18’de, Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap ile delinen ikinci delikte 3,3 mm derinlikte oluşan 4x2 mm delaminasyon gösterilmiştir. Şekil 5.19’da, Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap ile delinen beşinci delikte 5,2 mm derinlikte oluşan 2x4 mm delaminasyon ile 3,5 mm derinlikte oluşan 2x2 mm delaminasyon gösterilmiştir.

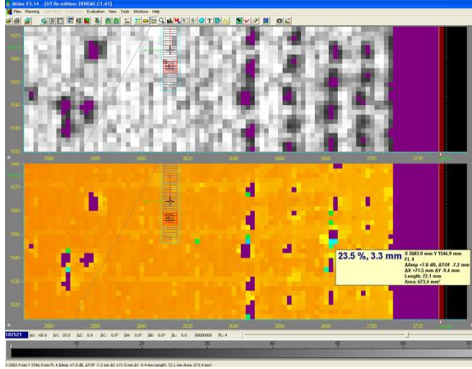


Şekil 5.16. Ø3,25 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap UT test sonucu

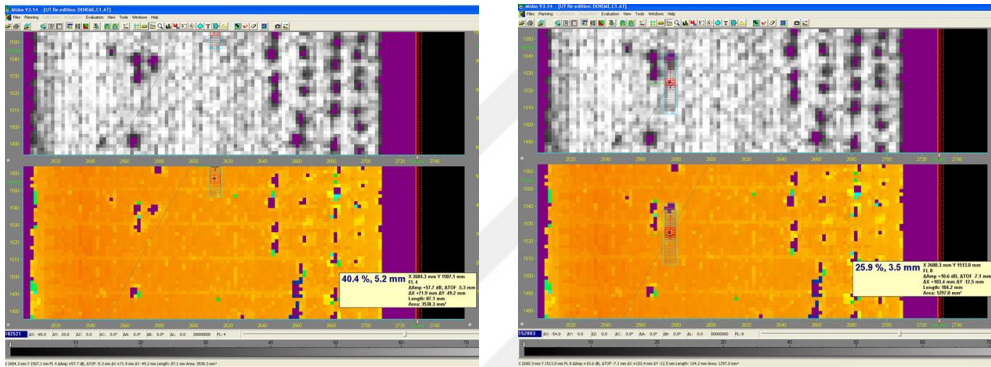


Şekil 5.17. Ø5,94 mm, 18°, kademersiz, kaplamalı matkap 3. delik UT test sonucu

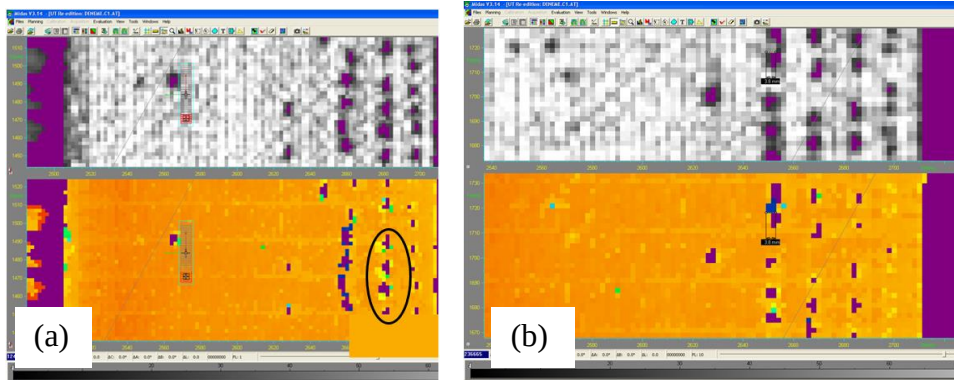
Şekil 5.20-a’da Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap ile delinen deliklerin çıkışlarında 0,6 mm civarında oluşan komple tabaka kalkması gösterilmiştir. Sarı renkli pikseller oluşan kalkmaları göstermektedir. Şekil 5.20-b’de Ø4,80-Ø5,94 mm kademeli, 18°, kaplamalı matkap ile delinen dördüncü delikte 5,5 mm derinlikte oluşan 3x3 mm boyutundaki delaminasyon gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap 2. delik UT test sonucu



Şekil 5.19. Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap 5. delik UT test sonucu



Şekil 5.20. a) Ø5,94 mm, 36°, kademersiz, kaplamasız matkap delik çıkışı UT test sonucu
b) Ø4,80-5,94 mm, 18°, kademeli, kaplamalı matkap 4. delik UT test sonucu

5.1.4. Proses zamanı ve matkap maliyet sonuçları

Yapılan testler sonucunda mevcut metodun 3 aşamadan 2 aşamaya düşürülmesi için yeni tasarlanan kademeli matkapların kullanımının mümkün olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede proses zamanı kısaltılabilecek ve toplam matkap seti maliyetinde azalma sağlanabilmektedir.

Birinci aşamada Ø3,25 mm kademersiz matka, ikinci aşamada Ø4,80-5,94 mm kademeli matkap kullanımı ile Ø5,94 mm delik delinmesi sayesinde delik başına 1,5 dakika olan proses süresi 1 dakika düşürülebilmektedir. Ölçümler saniye sayıcı kullanılarak yapılmıştır. Bir komponent üzerinde ortalama 250 adet delik bulunmakta olup yeni metod ile toplam delme süresinde 125 dakika (2,1 saat) kazanç elde edilebilmektedir. Yılda üretilen 157 adet komponent için yıllık zaman kazancının 327 saat (20 gün) olacağı hesaplanmıştır. Yeni geliştirilen matkap geometrisi ile zaman kazancı sağlanırken, delik kalitesinde iyileştirmeler de sağlayarak, hem komponent maliyetini düşürmede etkili olabilecek hem de enerji maliyetini ve çevreye verilen zararları da düşürebilecektir. Yılda yaklaşık 40 set matkap kullanılmakta olup yeni matkaplar ile maliyet yaklaşık %30 oranında düşürülebilecektir. Çizelge 5.3'te yeni matkap tasarımları sayesinde delik başına delme süresindeki iyileştirme ve yıllık elde edilebilecek kazanç gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Yeni tasarlanan matkapların proses süresine katkısı

Mevcut Proses (dak/delik)	Yeni Proses (dak/delik)	Delik Sayısı (adet/komponent)	Komponent Sayısı (adet/yıl)	Yıllık Kazanç (saat)
1,5	1	250	157	327

5.2. Faz-2

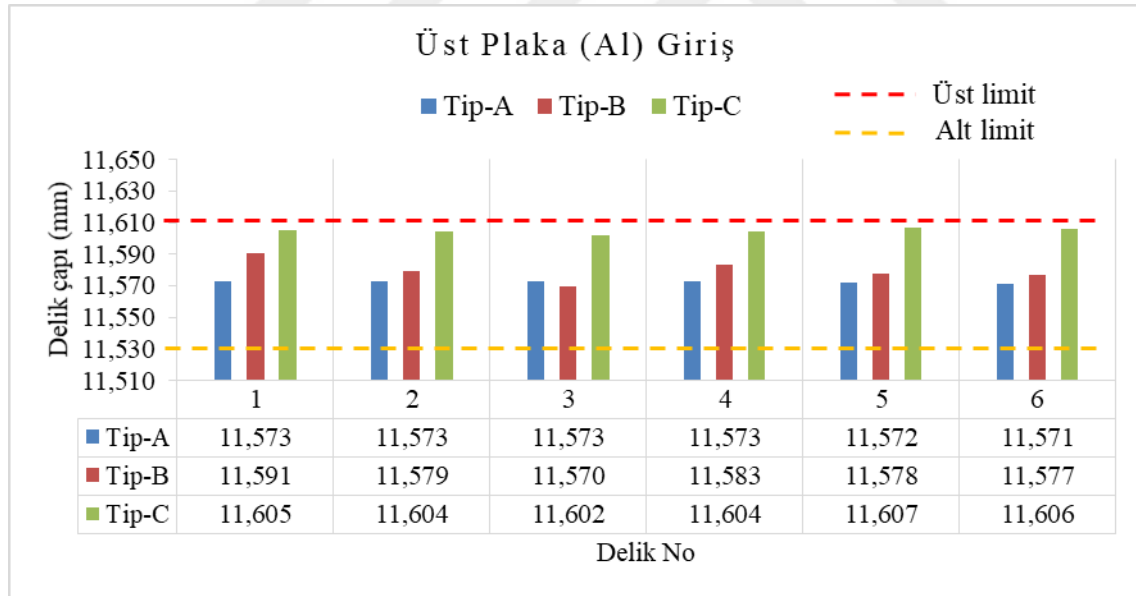
Havacılık sektöründe son yıllarda hafif ve mukavemeti yüksek yapısal parçalar yapmak için yoğun olarak metal ve kompozit istif yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Komponent montaj işlemi sırasında istif yapılara hassas delik delme işlemi yapılmaktadır. Faz-2 aşamasında üç tip farklı geometriye sahip matkap ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Delik kalitesini belirlemede önemli parametrelerden olan delik çapı, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve takım aşınmaları ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar kullanılarak istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Delik çapı

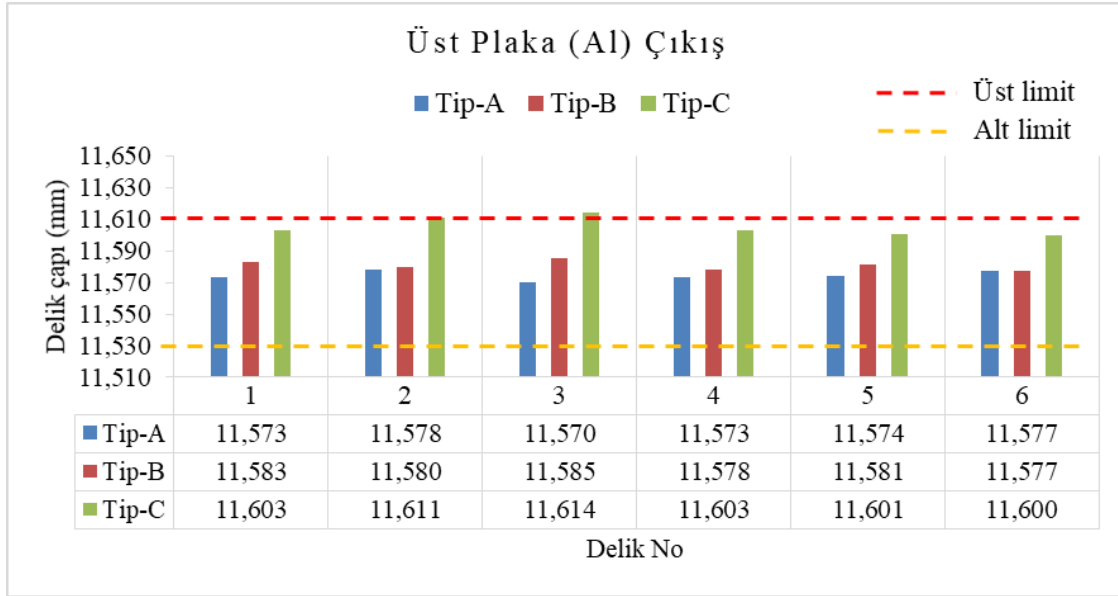
Tip-A, Tip-B ve Tip-C matkaplar kullanılarak test plakası üzerine her matkap için 6 adet delik delinmiş, toplamda 18 adet delik delinmiştir. Havacılık sektöründe kesici takım ve kesme parametreleri için uygulanan proses yeterlilik testlerinde 4 mm ile 10 mm arasında

kalınlığa sahip plakalar için deliklerin orta noktasından ölçüm almak yeterli olur iken 10 mm ve 40 mm arasındaki kalınlıklarda delik giriş ve çıkışı olmak üzere 2 noktadan ölçüm almak gerekmektedir. Üretim aşamasında ise yalnızca ilk ve son delik ölçülerek aradaki delikler yalnızca geçer-geçmez masterlar ile kontrol edilirler [122]. Bu çalışmada, plaka kalınlıkları en fazla 10 mm olmasına rağmen, delik giriş ve çıkışından çap ölçümleri yapılarak daha detaylı bir analiz yapılması amaçlanmıştır.

Üst plaka delik girişlerinde ve çıkışlarında Tip-C matkap geometrisinin en yüksek çap değerlerini verdiği gözlenmiştir. Şekil 5.21’de, üst limite en yakın değer Tip-C matkapta beşinci delik girişinde 11,607 mm olarak gerçekleşmiştir. Şekil 5.22’de, üst limite en yakın değer Tip-C matkapta ikinci delik çıkışında 11,611 mm ve üçüncü delik çıkışında 11,614 mm tolerans dışı olarak gerçekleşmiştir. Tip-A matkap geometrisinin nominal değere en yakın sonuçları verdiği gözlenmiştir. Üst plakada delik giriş ve çıkışları arasında çap değerleri birbirine yakın çıkmıştır.

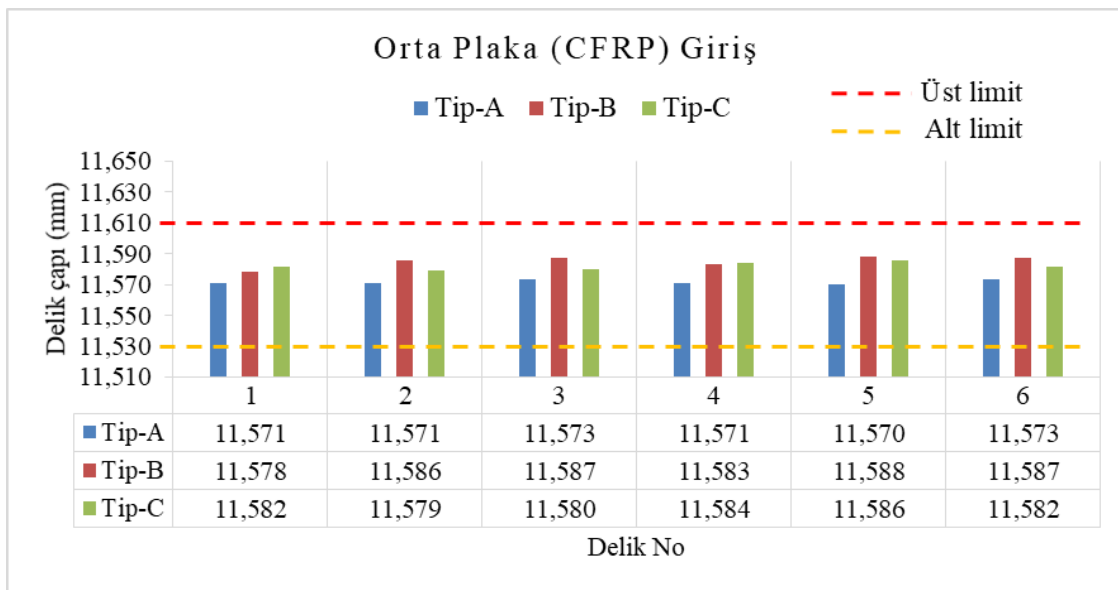


Şekil 5.21. Üst plaka (Al) delik girişleri çap ölçüm değerleri

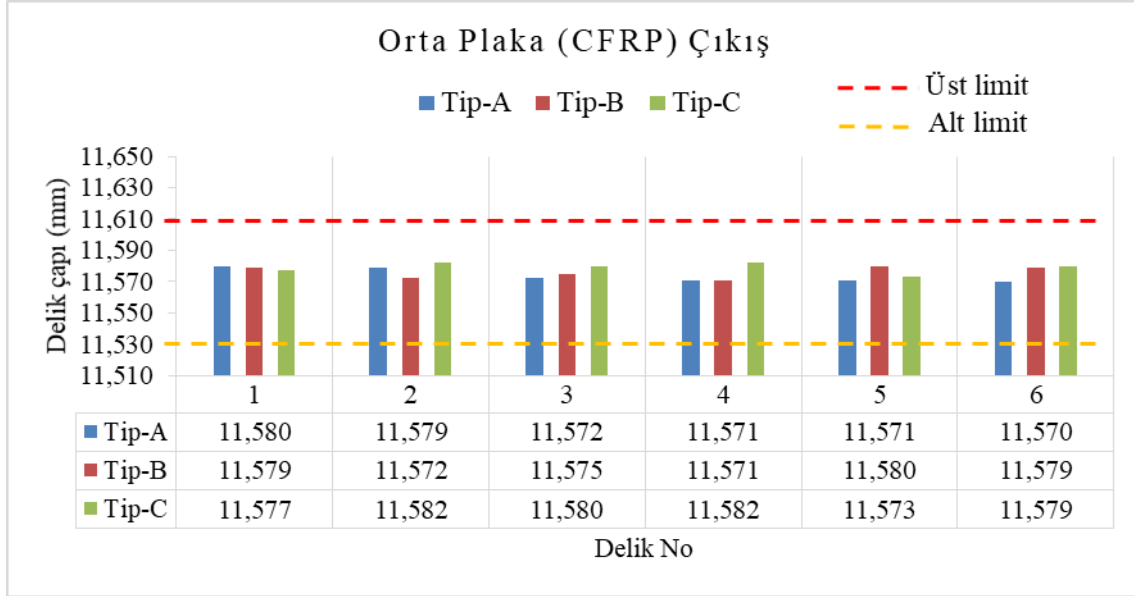


Şekil 5.22. Üst plaka (Al) delik çıkışları çap ölçüm değerleri

Orta plakada delik giriş ve çıkışlarında Tip-A matkap geometrisi nominal çap değerine en yakın sonuçları vermiştir. En yüksek çap değerleri Şekil 5.23'te delik girişinde Tip-B matkap geometrisinde 11,587 mm ve Şekil 5.24'te delik çıkışında Tip-C matkap geometrisinde 11,582 mm olarak gerçekleşmiştir. Literatürdeki çalışmalarda, kademeli matkap geometrisi ile aynı şartlarda kademesiz matkap geometrisine göre çap değişiminde daha düşük değerler elde edilmiştir [123]. Orta plaka delik giriş ve çıkışlarında limit dışında değerler gözlenmemiştir.

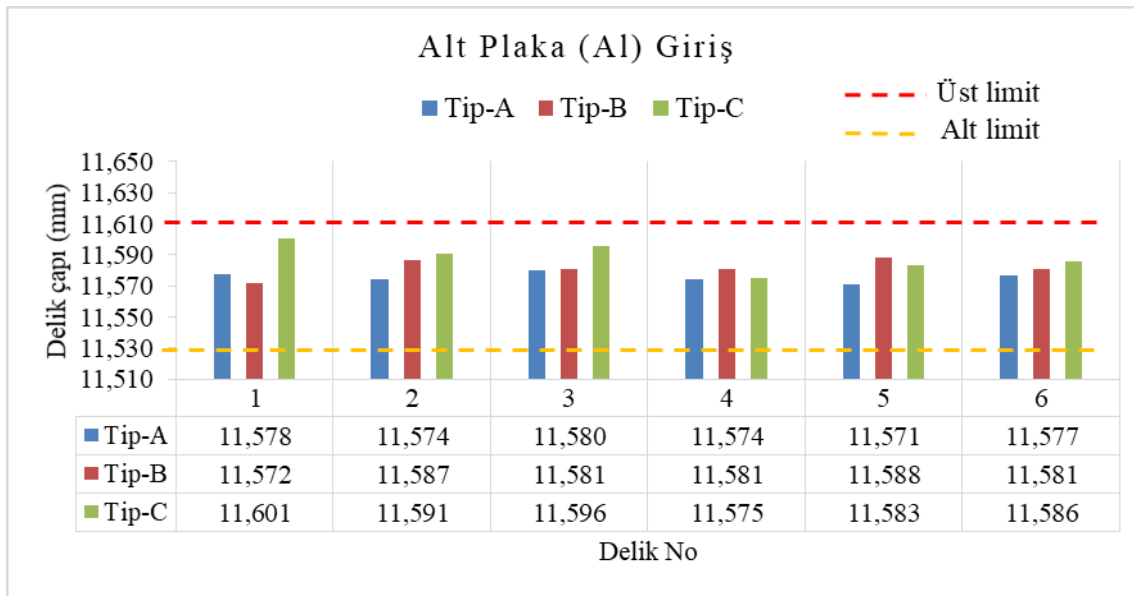


Şekil 5.23. Orta plaka (CFRP) delik girişleri çap ölçüm değerleri



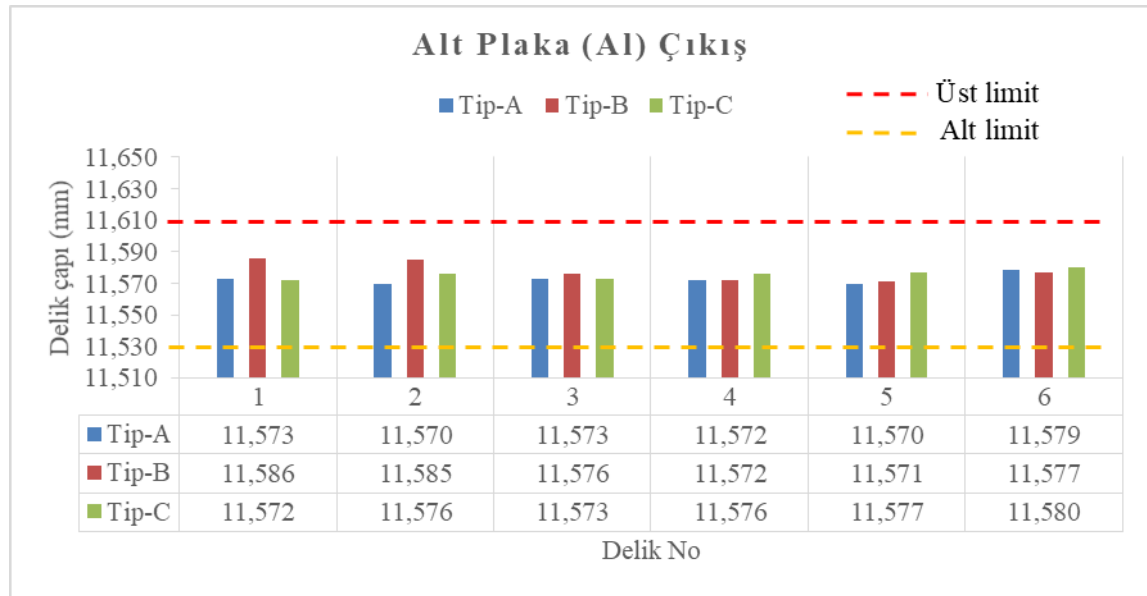
Şekil 5.24. Orta plaka (CFRP) delik çıkışları çap ölçüm değerleri

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da alt plakada delik giriş ve çıkışlarında nominal değere en yakın sonuçları Tip-A matkap geometrisinin verdiği gözlenmiştir. Delik girişinde Tip-C ve delik çıkışında Tip-B matkap geometrilerinin en yüksek değerleri verdiği gözlenmiştir. Delik girişinde en yüksek değerler 11,601 mm olarak Tip-C matkap geometrisi ile birinci delikte, delik çıkışında en yüksek değer 11,586 mm olarak Tip-B matkap geometrisi ile birinci delikte gerçekleşmiştir.



Şekil 5.25. Alt plaka (Al) delik girişleri çap ölçüm değerleri

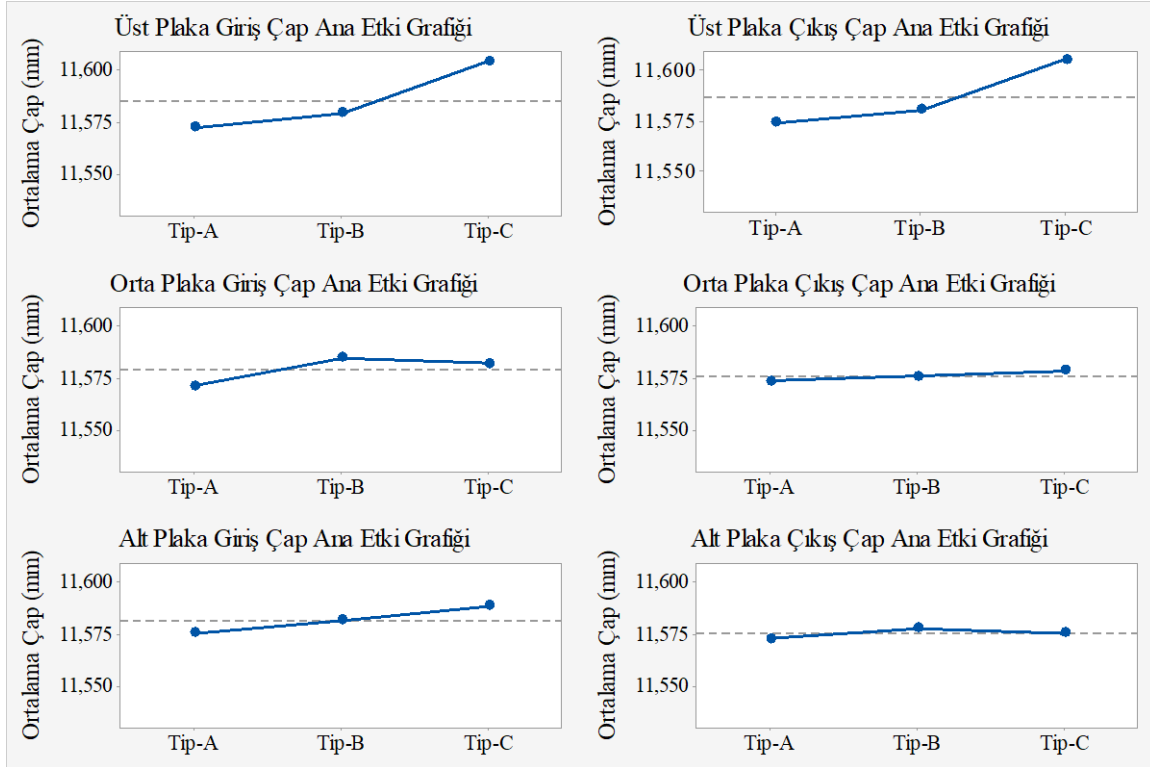
Alt plakada delik girişindeki çaplar delik çıkışındaki çaplardan daha büyük çıkmıştır. Tip-A matkabın ölçülen radyal salgı değeri 0,008 mm olarak en düşük değere sahiptir. Tip-B matkapta 0,015 ve Tip-C matkapta 0,011 olarak ölçülmüştür. Radyal salgının çap değerinin nominal değerden uzaklaşmasına neden olan faktörlerden biri olduğu söylenebilir.



Şekil 5.26. Alt plaka (Al) delik çıkışları çap ölçüm değerleri

Çap için istatistiksel analiz

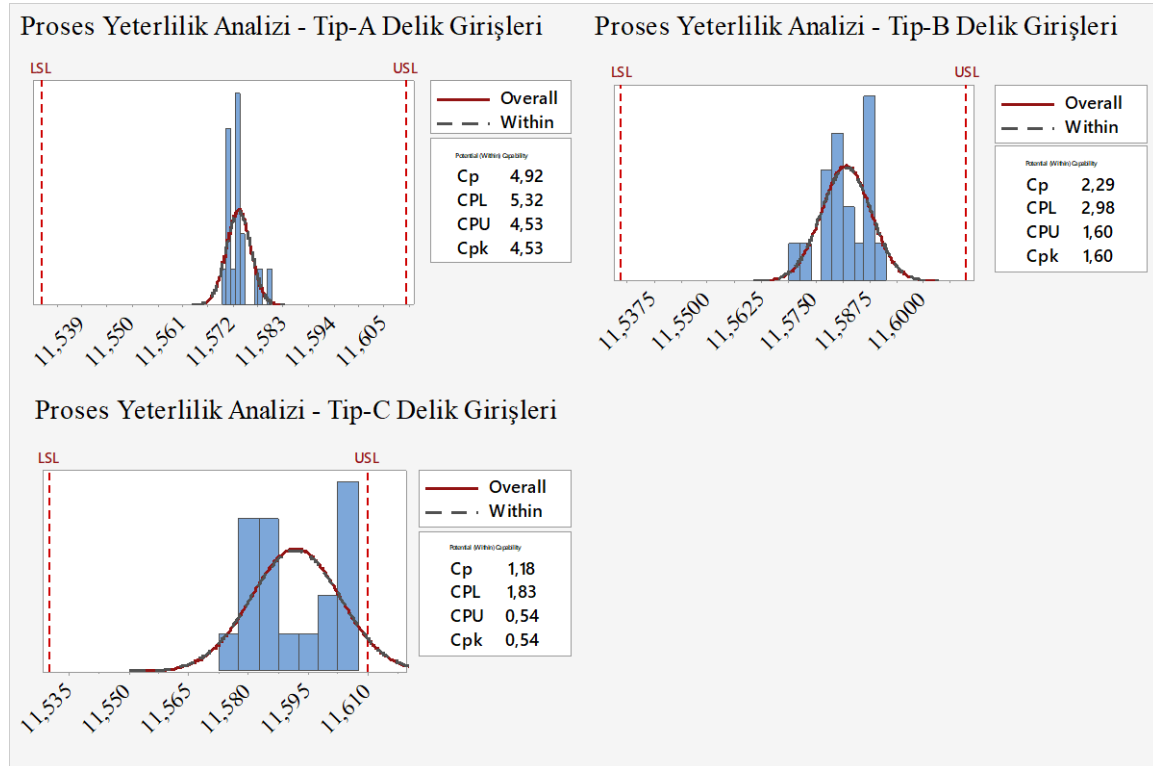
Şekil 5.27’de delik giriş ve çıkış çap değerlerine ait ana etki grafik verileri gösterilmiştir. Üst plaka delik girişinde ve çıkışında nominal çap değeri olan 11,570 mm’ye en yakın ortalama değerlerin Tip-A matkap geometrisinde 11,573 mm ve 11,574 mm olarak gerçekleştiği görülmüştür. En yüksek giriş ve çıkış çap değerlerinin Tip-C matkap geometrisinde 11,605 mm ve 11,605 mm olarak gerçekleştiği görülmüştür. Orta plakada en iyi giriş ve çıkış çap değerlerinin 11,572 mm ve 11,574 mm olarak Tip-A matkap geometrisinde gerçekleştiği görülmüştür. En yüksek değerlerin delik girişinde 11,585 mm ile Tip-B matkap geometrisinde ve delik çıkışında 11,579 mm ile Tip-C matkap geometrisinde gerçekleştiği görülmüştür. Alt plakada Tip-A matkap geometrisinin delik girişinde ve çıkışında 11,576 mm ve 11,573 mm ile Tip-A matkap geometrisinde gerçekleştiği görülmüştür.



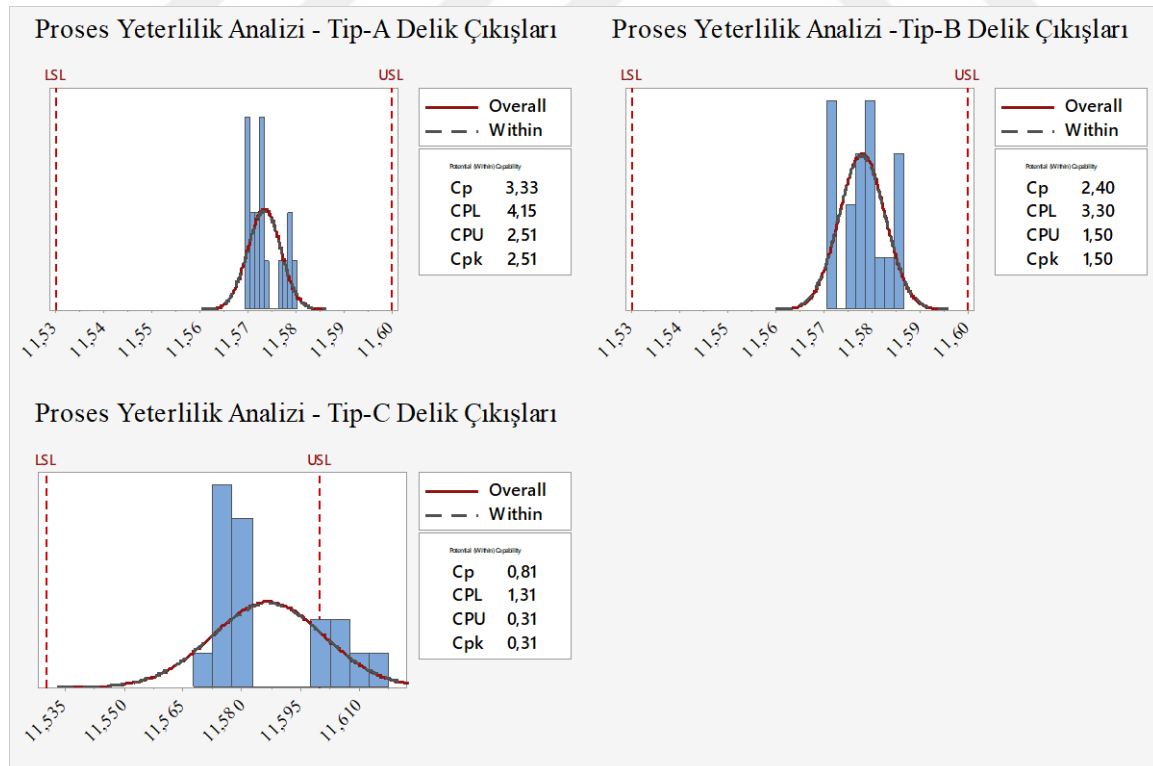
Şekil 5.27. Çap sonuçları için matkap geometrisi faktörünün etki grafikleri

Üç plakanın delik girişlerindeki çap değeri verilerine göre proses yeterlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.28’de yer alan sonuçlara göre en düşük proses yeterlilik indisi Cpk değeri 0,54 olarak Tip-C matkap geometrisinde gerçekleşmiş ve 1,33 kabul sınırının altında kalmıştır. Tip-B matkapta Cpk değeri 1,60 olarak hesaplanmış ve kabul değeri olan 1,33 kabul sınırının üstünde kalmıştır. Tip-A matkapta ise proses yeterlilik indisi Cpk değeri 4,53 olarak hesaplanmış ve 1,33 kabul değerinin üstünde kalmıştır.

Üç plakanın delik çıkışlarındaki çap değeri verilerine göre proses yeterlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.29’da yer alan sonuçlara göre en düşük proses yeterlilik indisi Cpk değeri 0,31 ile Tip-C matkapta gerçekleşmiş ve 1,33 kabul sınırının altında kalmıştır. Tip-B matkapta Cpk değeri 1,50 olarak hesaplanmış ve kabul değeri olan 1,33 üstünde kalmıştır. Tip-A matkapta ise Cpk değeri 2,51 olarak hesaplanmış ve 1,33 kabul değerinin üstünde çıkmıştır.



Şekil 5.28. Al-CFRP-Al delik girişi çap değerleri için proses yeterlilik analizi grafikleri



Şekil 5.29. Al-CFRP-Al delik çıkışı çap değerleri için proses yeterlilik analizi grafiği

5.2.2. Yüzey pürüzlülüğü

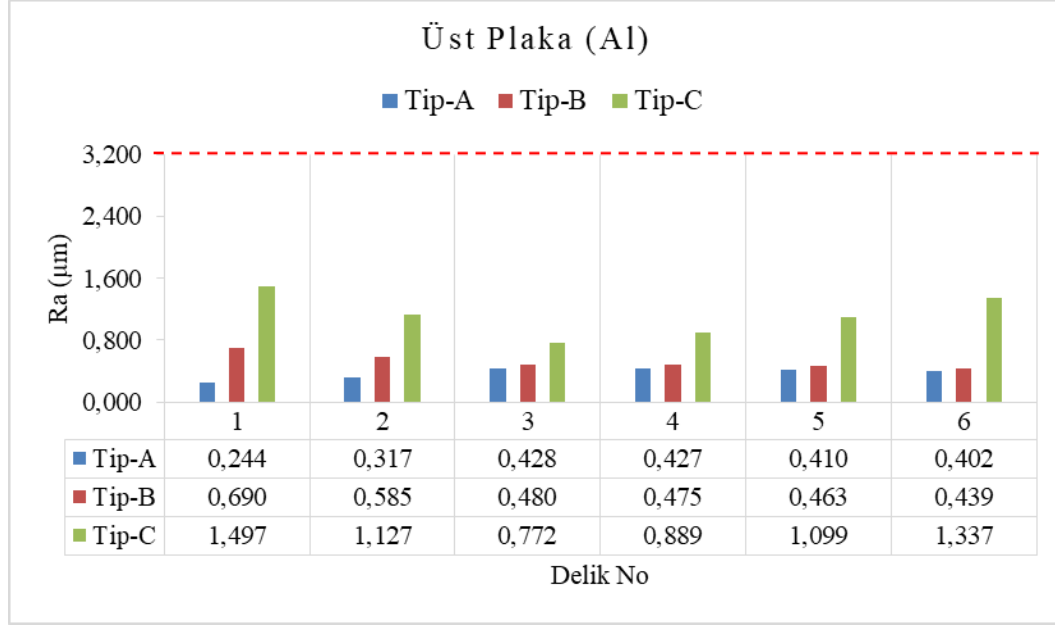
Delik kalitelerinin belirlenmesinde bakılan en önemli kalite parametrelerinden biri yüzey pürüzlülük değeridir. Plakalarda yer alan deliklerin iç yüzeylerinden 0° , 90° ve 180° açılarda üç adet ölçüm alınmıştır. Bu ölçümlerin ortalamaları alınarak delik yüzey pürüzlülük değeri belirlenmiştir. Alüminyum paçalarda yüzey pürüzlülüğü üst sınırı $Ra\ 3,2\ \mu m$, CFRP deliklerde yüzey pürüzlülük üst sınırı $Ra\ 5\ \mu m$ olarak alınmıştır [107,111]. Alüminyum ve CFRP malzemeler tek başlarına delindikleri durumda limit Ra değerleri alüminyum için $1,6\ \mu m$ ve CFRP için $3,2\ \mu m$ alınabilmektedir [124].

Üst plakada yer alan deliklerin yüzey pürüzlülük değeri sonuçları Şekil 5.30'da verilmiştir. Tip-C matkap geometrisi ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin diğer matkap geometrilerine göre daha yüksek sonuçlar verdiği gözlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri Tip-A matkap geometrisi ile elde edilmiştir. Çift uç açılı Tip-A matkap geometrisinin benzer çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünün düşük çıkmasına etki ettiği gösterilmiştir [125].

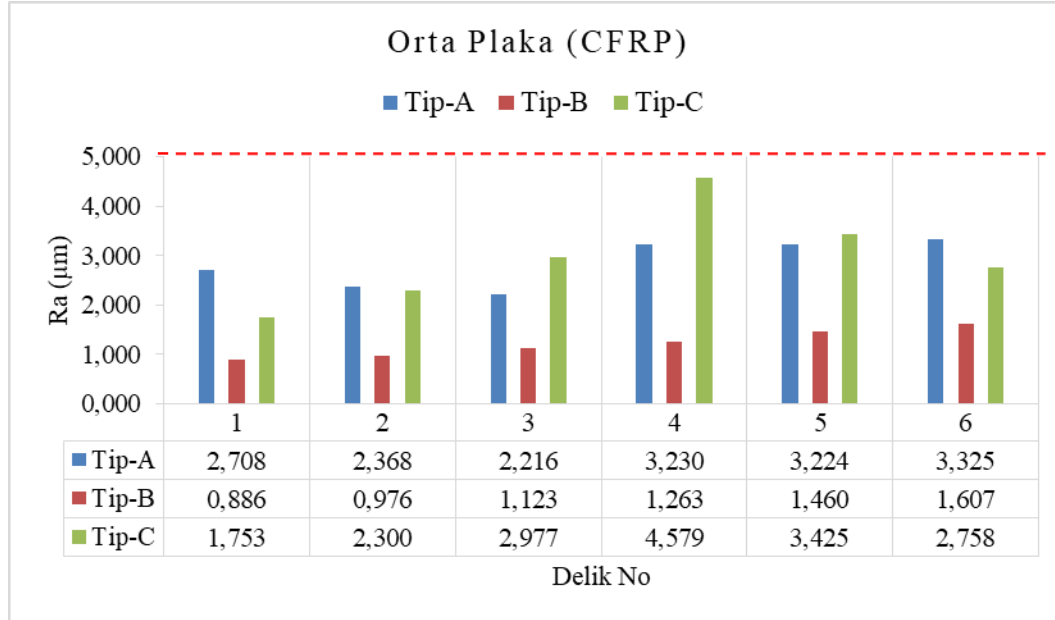
Orta plakada yer alan deliklerin yüzey pürüzlülük değeri sonuçları Şekil 5.31'de verilmiştir. En yüksek değerler Tip-C matkap geometrisinde gerçekleşmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değeri Tip-B matkap ile elde edilmiştir. Tip-B matkap geometrisinin kompozit malzemede daha iyi sonuçlar vermesinin 118° uç açısına sahip olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Tip-A ve Tip-C matkap geometrilerinde uç açısı 135° olarak tasarlanmıştır. CFRP malzemede, uç açısının $120^\circ - 130^\circ$ olduğu matkaplar ile delinen deliklerdeki yüzey pürüzlülük değerinin 130° üzerindeki uç açıları ile delinen deliklerdeki yüzey pürüzlülük değerinden daha düşük gerçekleştiği görülmüştür [124]. Delme sırasında CFRP ile kesici takım arasındaki sürtünme büyük önem taşımaktadır. Önceki çalışmalarda $75^\circ C$ sıcaklığa kadar sürtünme kuvveti artışı ve sonrasındaki sıcaklıklarda düşme eğilimi ile sürtünme katsayısında düşüş tespit edilmiştir. CFRP malzemelerde yüzey pürüzlülüğü değerinin alüminyuma göre daha yüksek çıkmasının sebeplerinden biri olarak yüksek sürtünme kuvveti ile fiber kırılmalarının meydana gelmesi söylenebilir [126].

Alt plakada yer alan deliklerin yüzey pürüzlülük değeri sonuçları Şekil 5.32'de verilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri Tip-C matkap geometrisinde gerçekleşmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri Tip-A matkap geometrisi ile elde edilmiştir.

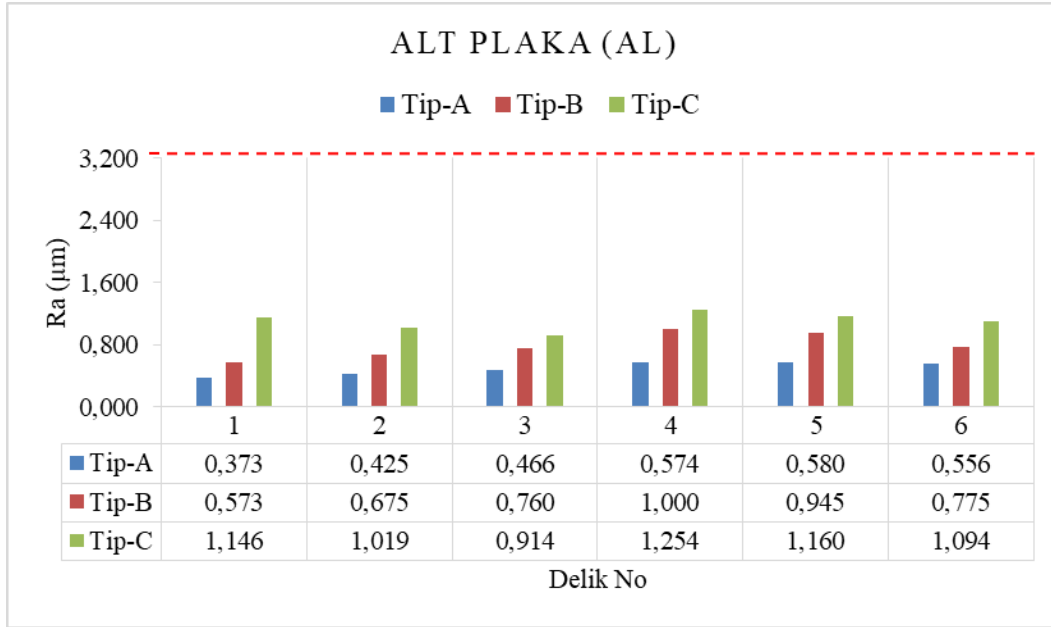
Alüminyum malzemelerde delik içi en iyi yüzey pürüzlülük değerleri Tip-A matkap geometrisi, kompozit malzemede ise en iyi değerler Tip-B matkap geometrisi ile elde edilmiştir.



Şekil 5.30. Üst plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri



Şekil 5.31. Orta plaka (CFRP) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri



Şekil 5.32. Alt plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

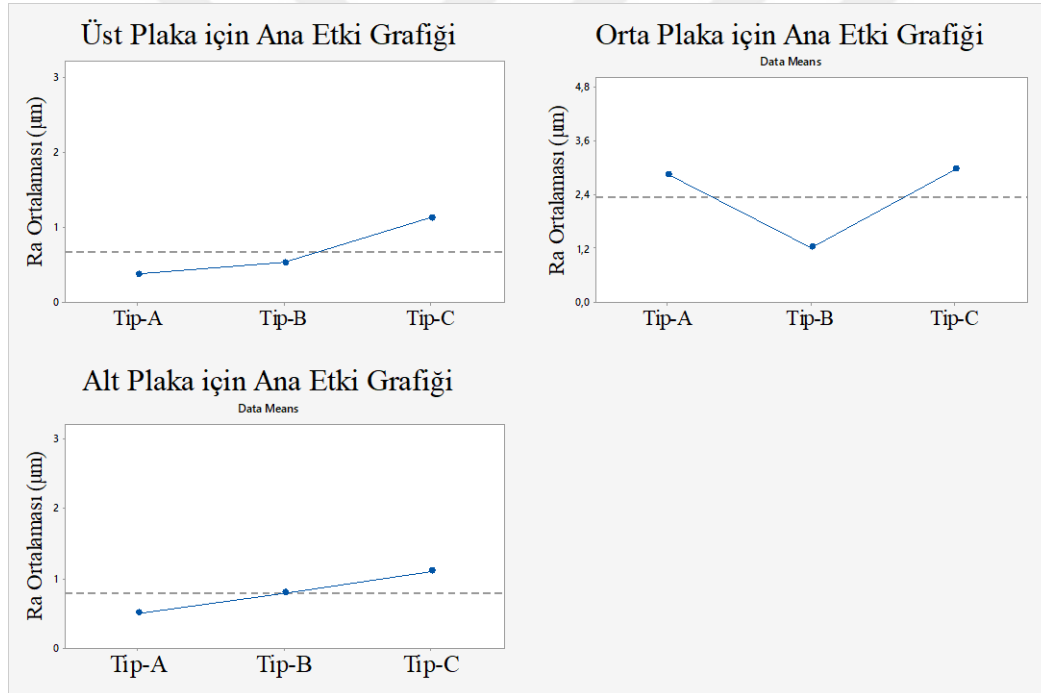
Yüzey pürüzlülüğü değerleri için istatistiksel analiz

Yüzey pürüzlülüğü değerleri için ana etki grafikleri Şekil 5.33'te gösterilmiştir. Alüminyum üst plakada en düşük Ra değeri ortalaması Tip-A matkap geometrisinde 0,371 μm olarak gerçekleşmiştir. En yüksek Ra değeri ortalaması Tip-C matkap geometrisinde 1,120 μm olarak gerçekleşmiştir. CFRP orta plakada en düşük Ra değeri ortalaması Tip-B matkap geometrisinde 1,219 μm olarak, en yüksek değer Tip-C matkap geometrisinde 2,965 μm olarak gerçekleşmiştir. Alüminyum alt plakada en düşük Ra değeri ortalaması Tip-A matkap geometrisinde 0,495 μm olarak gerçekleşmiştir. En yüksek Ra değeri ortalaması 1,098 μm olarak Tip-C matkap geometrisinde gerçekleşmiştir.

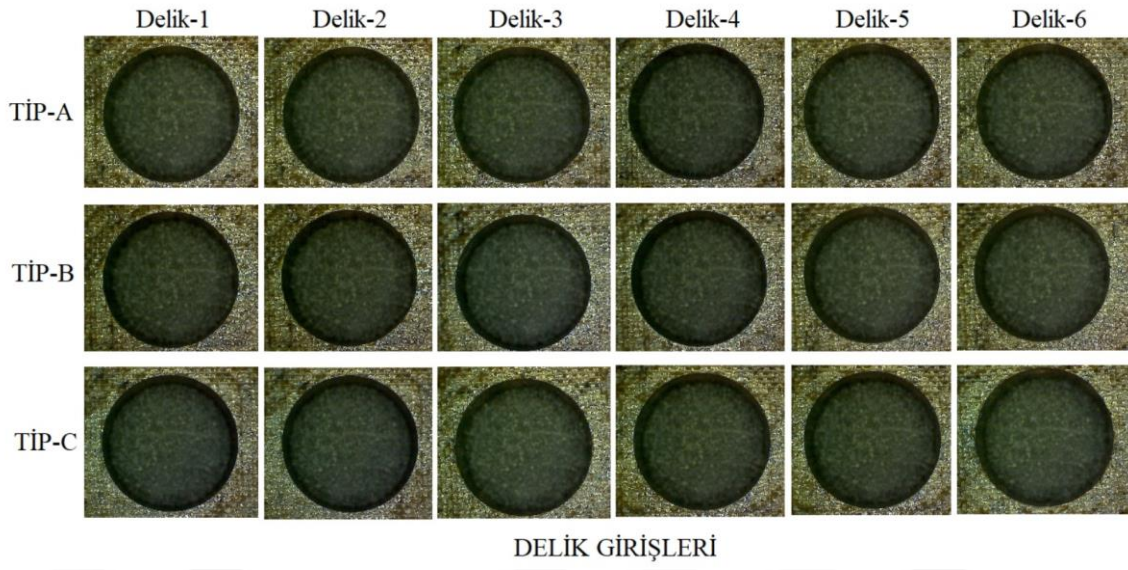
5.2.3. Delaminasyon

Delik giriş ve çıkışlarında mikroskop ile delaminasyon incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.34'te delik girişlerine ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Delik girişlerinde herhangi bir delaminasyon oluşmadığı gözlenmiştir. Matkap uç açısının 118° - 135° aralığında olması durumunda CFRP malzemede delik girişlerinde delaminasyon oluşumu azalmaktadır [127]. Şekil 5.35'te verilen delik çıkışlarında 3 adet delikte delaminasyon görülmüştür. Delaminasyonlar, Tip-B ile delinen birinci delik çıkışında 0,357 mm boyunda ve 1,062 delaminasyon faktörü değerinde, Tip-C ile delinen üçüncü delik çıkışında 0,194 mm

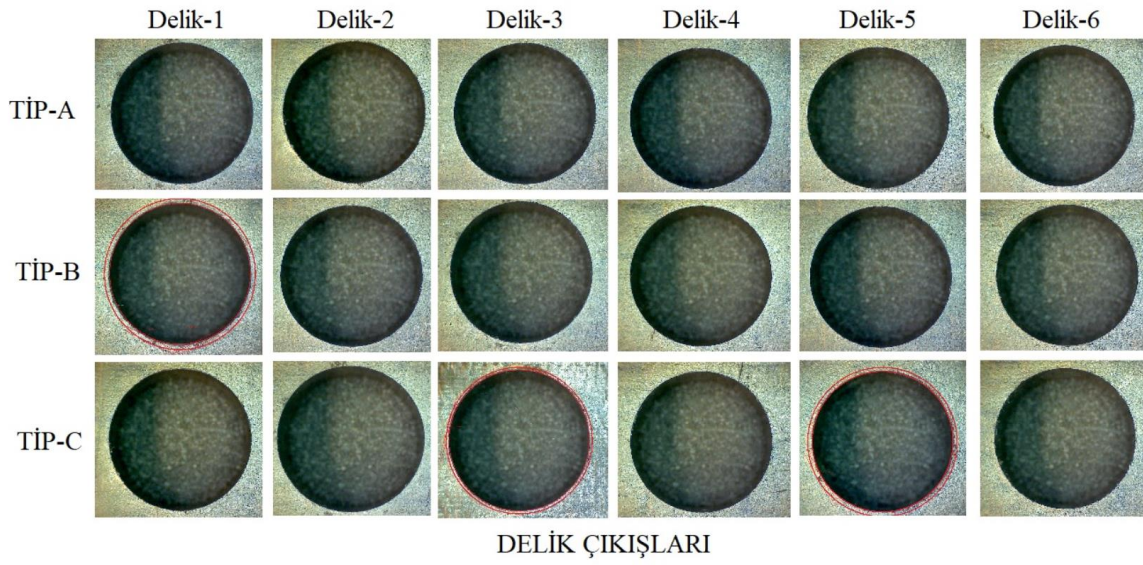
boyunda ve 1,034 delaminasyon faktörü değerinde, beşinci delik çıkışında 0,34 mm boyunda ve 1,059 delaminasyon faktörü değerinde gerçekleşmiştir. Görüntüler Şekil 5.36'da verilmiştir. Daha büyük uç açısına sahip matkap ile delinen deliklerin çıkışlarında delaminasyon oluşumu artmaktadır [127]. Uç açısı artışının itme kuvvetini artırdığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. İtme kuvvetinin artışının delaminasyon oluşumu artırdığı söylenebilir [128]. Uç açısının 140° olduğu durumda itme kuvvetinin arttığı ve en yüksek delaminasyon faktörü oluşumuna sebep olduğu önceki çalışmalarda gösterilmiştir [129]. Tip-A matkap ikinci kademe açısının 135° olmasına rağmen delik çıkışlarında delaminasyon oluşmamasının nedeninin birinci kademe uç açısının 90° olmasından dolayı gerçekleştiği söylenebilir. Bu sayede çift uç açılı bir matkap gibi davrandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.33. Matkap geometrisi faktörlerinin ortalama Ra verileri için ana etki grafikleri



Şekil 5.34. Faz-2 delme testleri CFRP plaka delik girişleri gösterimi



Şekil 5.35. Faz-2 delme testleri CFRP plaka delik çıkışları gösterimi

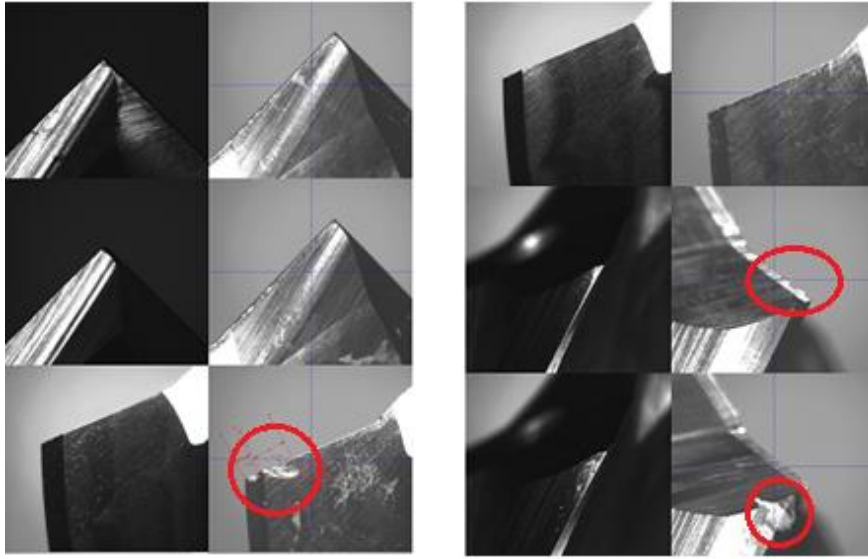


Şekil 5.36. Delik çıkışları delaminasyon sonuçları

5.2.4. Takım aşınması

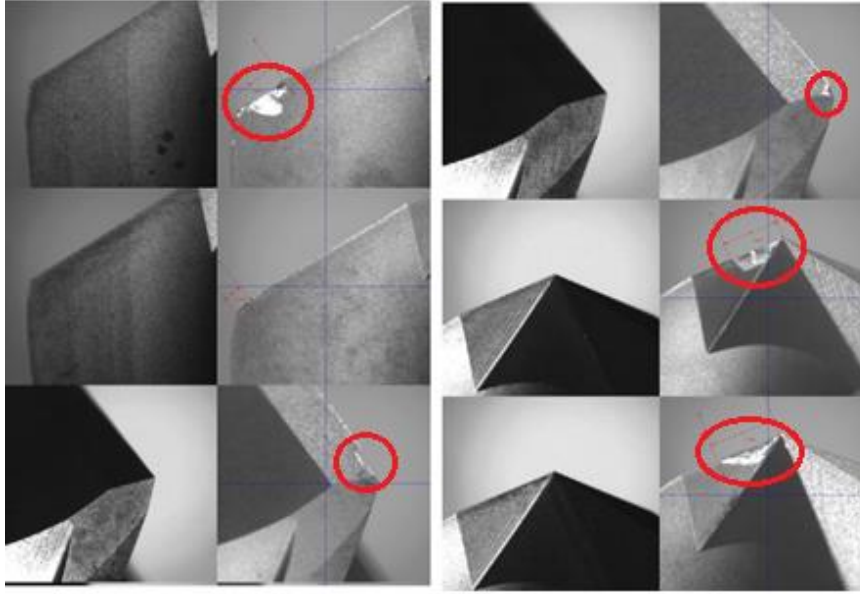
Delik delme işlemi sonrasında matkaplar optik incelemeden geçirilerek oluşan aşınmalara bakılmıştır. Şekil 5.49’da Tip-A matkabında, Şekil 5.50’de Tip-B matkabında, Şekil 5.51’de Tip-C matkabında oluşan aşınmalar gösterilmiştir.

Tip-A matkabın ilk kademesinde serbest yüzey aşınmaları, ikinci kademe kesme kenarlarında ise çekiçleme ve kopma aşınmaları gözlenmiştir (Şekil 5.37). Tip-B matkabın tepe noktasında, kesme kenarlarında ve köşede çekiçleme ve parça kopması aşınmaları gözlenmiştir (Şekil 5.38). Tip-C matkabın ilk kademe tepe batma noktasında plastik deformasyon ve kesme kenarı boyunca serbest yüzey aşınması, ikinci kademe kesme kenarında ufak parça kopması ve serbest yüzey aşınmaları gözlenmiştir (Şekil 5.39).

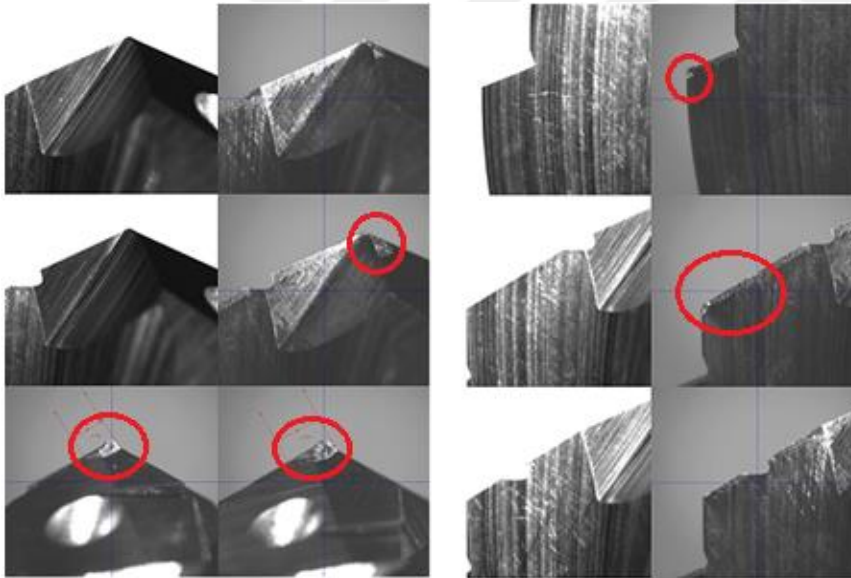


Şekil 5.37. Tip-A matkap ilk hali ve işlem sonrası aşınma görüntüleri

CFRP malzemelerde kesici takım aşınmaları abrazyon olarak gerçekleşmekte, yan yüzey aşınması ilk sırada gelirken arka yüzey aşınması onu takip etmektedir. Yapılan çalışmalarda uç açısının 118° olduğu durumlarda çekiçleme ve kırılmanın daha etkili olduğu görülmüştür. Fiber malzemenin kesici takım kenarı üzerinde çekiçleme etkisi gösterdiği söylenebilir [127].



Şekil 5.38. Tip-B matkap ilk hali ve işlem sonrası aşınma görüntüleri



Şekil 5.39. Tip-C matkap ilk hali ve işlem sonrası aşınma görüntüleri

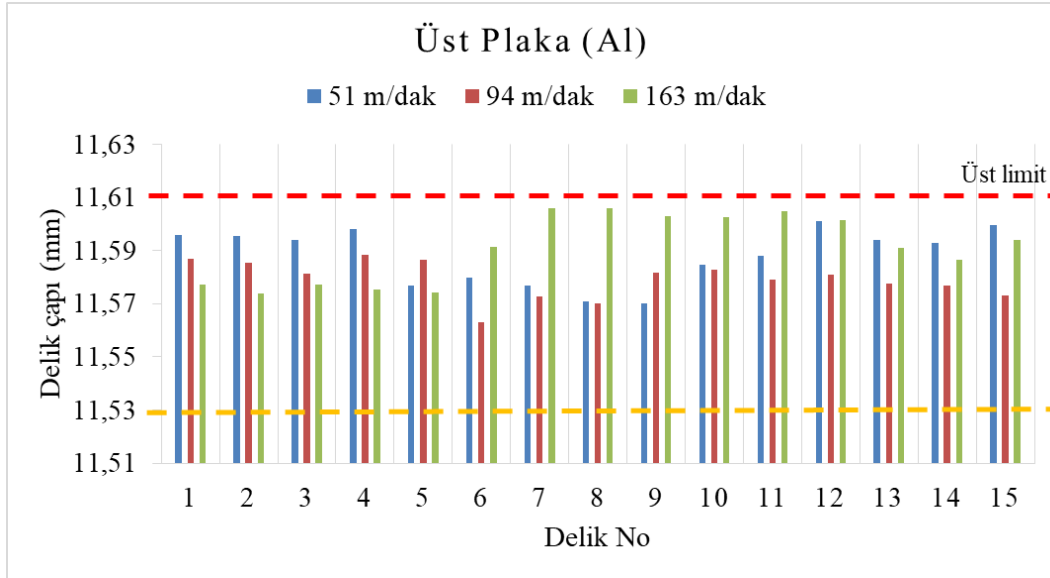
5.3. Faz-3A

Faz-2 deneysel çalışmalarında üç farklı matkap geometrisi ile delik delme testleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelere göre Tip-A matkap geometrisinin en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Faz-3A çalışmasında, Tip-A matkap ile üç farklı kesme hızında 15'er adet delik toplamda 45 adet delik delinerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde her kesme hızı için 1 adet Tip-A matkap kullanılmıştır.

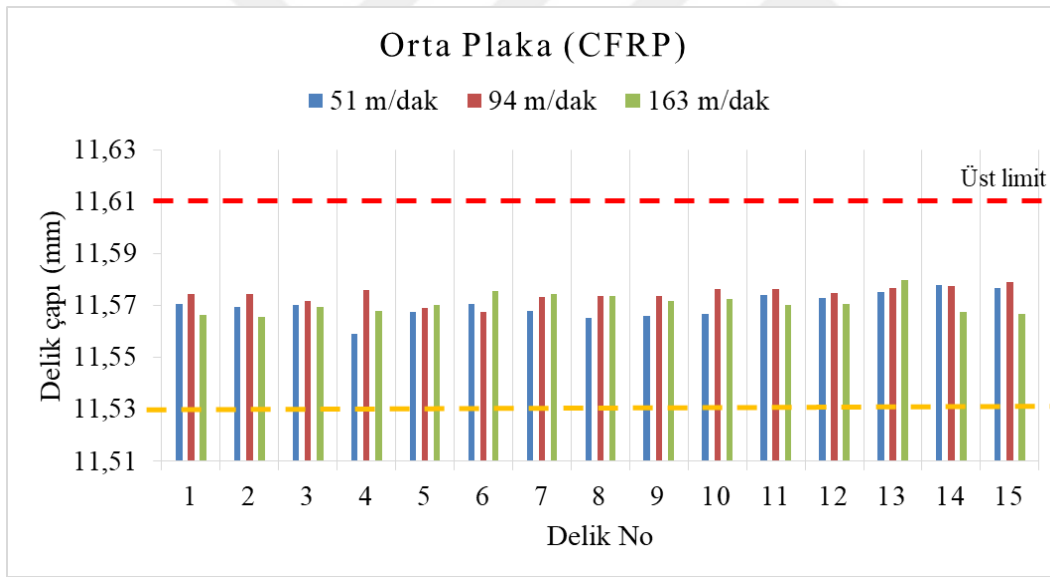
5.3.1. Delik çapı

Üç farklı kesme hızı ile yapılan delik delme işlemleri sonrasında üst plaka (alüminyum), orta plaka (CFRP) ve alt plaka (alüminyum) delik çapları CMM tezgahında ölçülmüştür. Çap ölçümleri her bir plaka için yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınarak delik çap değeri elde edilmiştir. Matkap çapları ölçülerek nominal delik çapı ile aradaki fark kadar kompanzasyon yapılmıştır.

Şekil 5.40'da üst plakada üç farklı kesme hızı değerinde delinen deliklerin çap ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Nominal değer olan Ø11,57 mm değerine en yakın sonuçlar 94 m/dak kesme hızında delinen deliklerde elde edilmiştir. İstif yapılarda yapılan çalışmada 90 m/dak kesme hızının alüminyum ve CFRP malzemelerde en iyi delik kalitesi sonuçlarını verdiği tespit edilmiştir [130]. Şekil 5.41'de orta plakada üç farklı kesme hızı değerinde delinen deliklerin çap ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Her üç kesme hızı değerinde de birbirine yakın sonuçlar elde edilmesine rağmen en iyi sonuçlar 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında elde edilmiştir. CFRP malzemedeki delik çap değerlerinin alüminyum malzemedeki delik çap değerlerinden yaklaşık 10 µm daha düşük gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum literatürdeki sonuçlar ile benzerlik vermektedir [131]. CFRP delme işlemi sonrasında malzemedeki elastik toparlanmanın buna neden olduğu söylenebilir. Şekil 5.42'de alt plakada üç farklı kesme hızı değerinde delinen deliklerin çap ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Nominal değere en yakın çap değerleri 94 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.



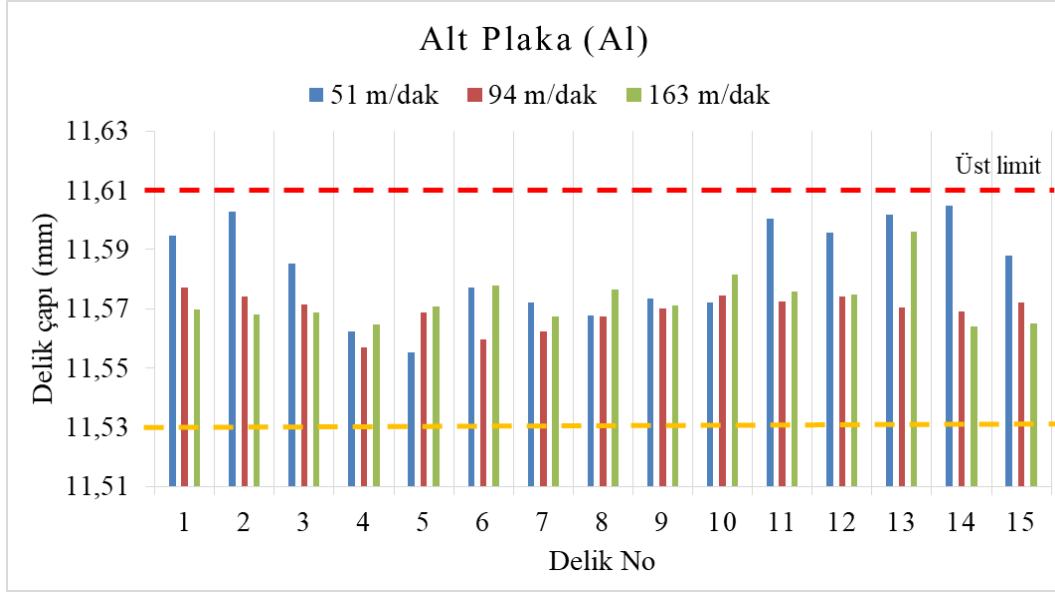
Şekil 5.40. Üst plaka (Al) çap değerleri



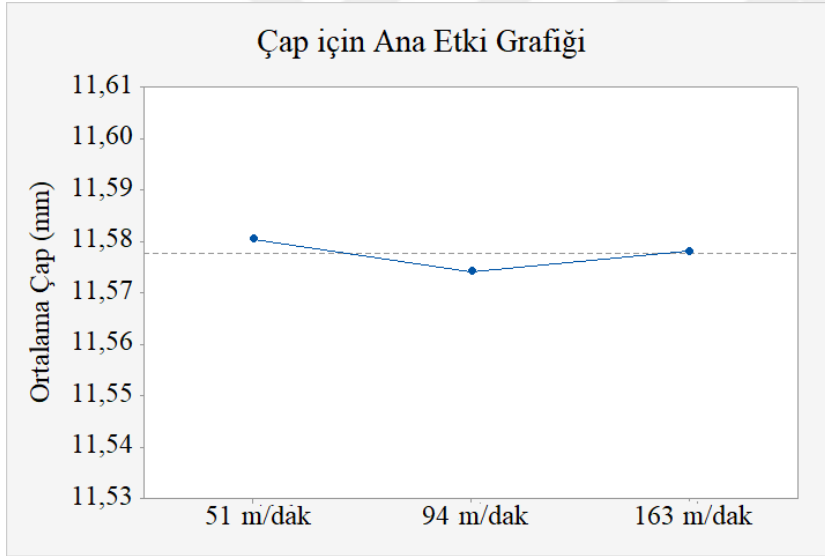
Şekil 5.41. Orta plaka (CFRP) çap değerleri

Çap için istatistiksel analiz

Üst plaka, orta plaka ve alt plakada 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızları ile yapılan delme testleri delik çap verileri için ana etki grafikleri Şekil 5.43'te gösterilmiştir. 94 m/dak kesme hızı ile delinen deliklerin ortalaması Ø11,574 mm ile nominal çap değerine en yakın değeri vermiştir.



Şekil 5.42. Alt plaka (Al) çap değerleri



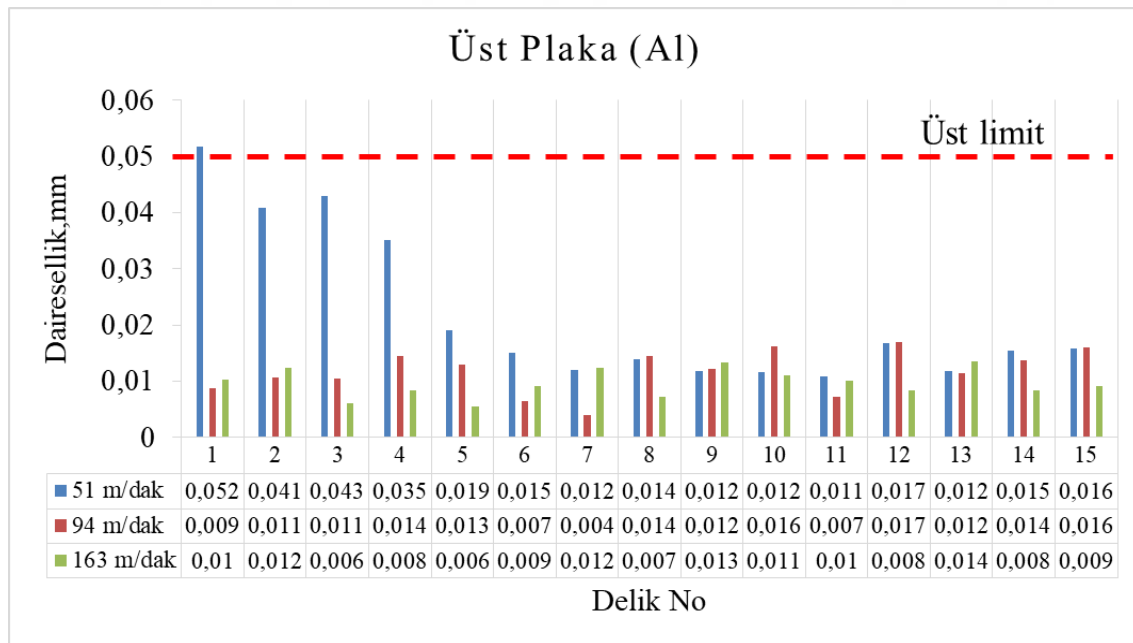
Şekil 5.43. Kesme hızı faktörlerinin çap üzerindeki ana etki grafiği

5.3.2. Dairesellik

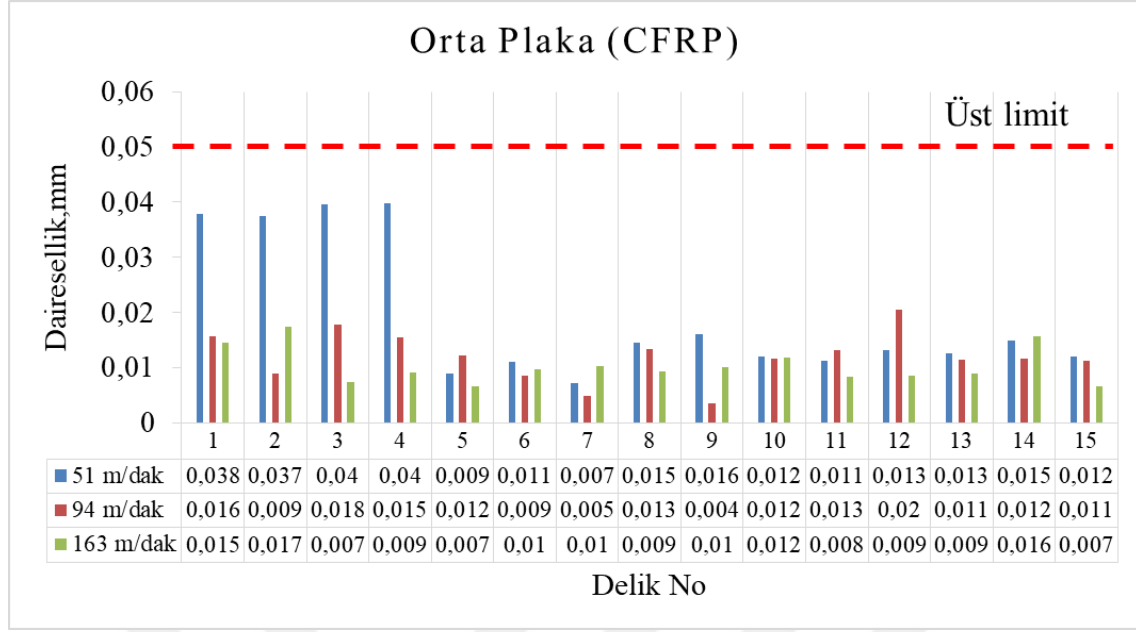
Delik çap değeri ile birlikte dairesellik değerleri de delik kaltesinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Hava aracı parçalarının montajı sırasında birleştirilecek olan parçaların içinden geçen bağlayıcının delik içine istenilen sıkılık değerinde yerleştirilebilmesi için deliğin hem çap hem de dairesellik durumu önemli olmaktadır. Bu çalışmada deliklerin dairesellik ölçümleri yapılmış ve grafikler ile gösterilmiştir.

Şekil 5.44'te üst plakaya ait dairesellik sonuçları gösterilmiştir. Alüminyum plakada en iyi sonuçlar 94 m/dak ile 163 m/dak kesme hızlarında elde edilmiştir. Düşük kesme değerlerinde malzeme kaldırma hızının düşük olması ve otomatik delme ekipmanının çalışma şartlarından (titreme, hava basıncı düşmesi, talaş sıkışması) dolayı yüksek değerler bazı durumlarda ilk deliklerde oluşabilmektedir. İstif yapıda yapılan delme çalışmasında alüminyum malzemede en iyi dairesellik değerlerinin 90 m/dak kesme hızında elde edildiği görülmüştür [130]. Başka bir çalışmada 0,05 mm/dev ilerleme hızında en iyi dairesellik değerlerinin 89 m/dak kesme hızında gerçekleştiği gösterilmiştir [132].

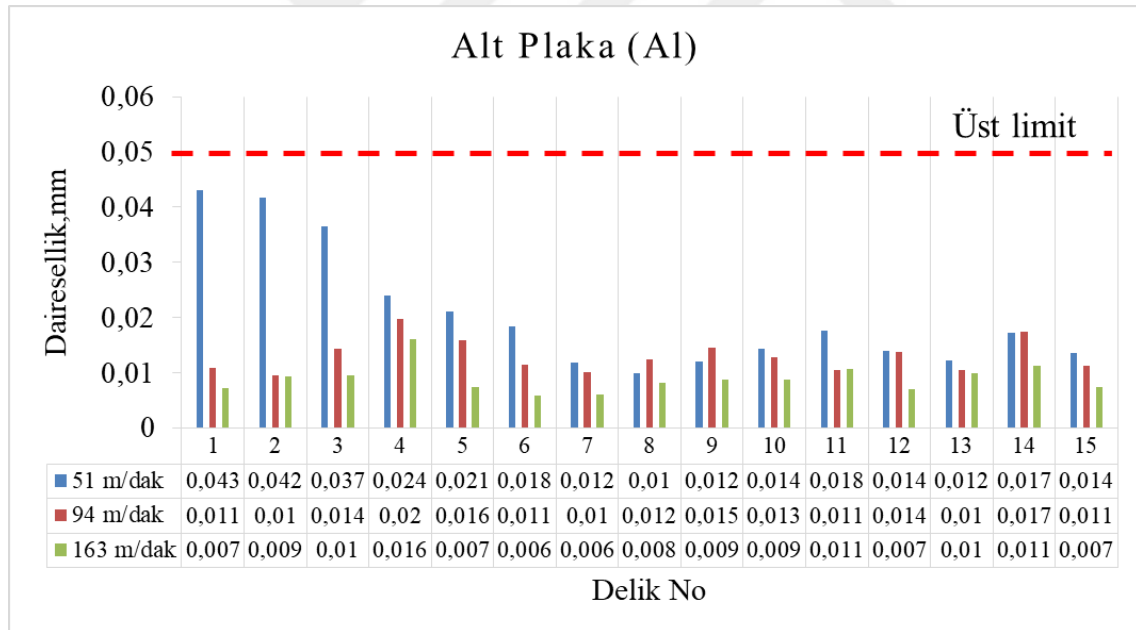
Şekil 5.45'te orta plakaya ait dairesellik sonuçları gösterilmiştir. CFRP plakada en iyi dairesellik sonuçları 94 m/dak ile 163 m/dak kesme hızlarında elde edilmiştir. 51 m/dak kesme hızında delme sırasında matkabın ağızlama ve merkezleme yapabilmesi daha güç olmaktadır. 94 m/dak kesme hızına elde edilen sonuç literatürde yapılmış olan çalışmaya ait sonuçlar ile uyum göstermektedir [130]. Şekil 5.46'da alt plakaya ait dairesellik sonuçları gösterilmiştir. Alüminyum alt plakada en iyi sonuçlar 163 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.



Şekil 5.44. Üst plaka (Al) dairesellik değerleri



Şekil 5.45. Orta plaka (CFRP) dairesellik değerleri

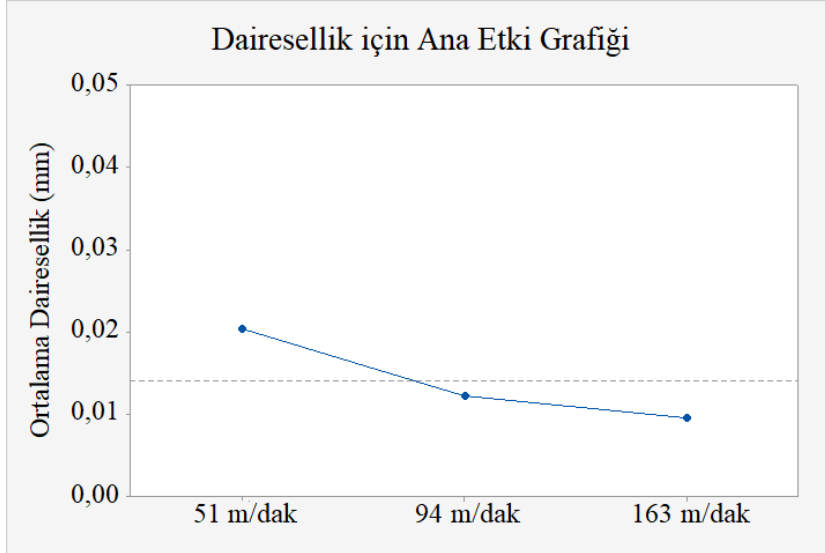


Şekil 5.46. Alt plaka (Al) dairesellik değerleri

Dairesellik için istatistiksel analiz

Üst plaka, orta plaka ve alt plakada 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızları ile yapılan delme testleri dairesellik verileri için etki grafiği Şekil 5.47’de gösterilmiştir. 163 m/dak kesme hızı ve 94 m/dak kesme hızında delinen deliklerin ortalamasında yakın

sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, kesme hızının artması ile dairesellik değerinde düşüş gerçekleştiğini gösteren literatürdeki çalışmalar ile benzer sonuçlar göstermektedir [133].

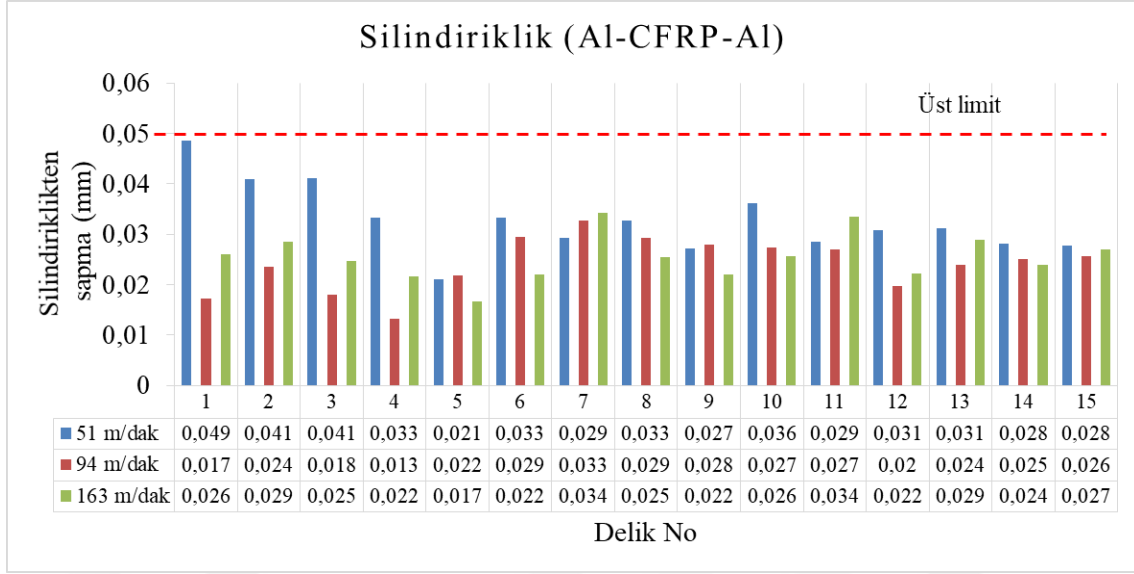


Şekil 5.47. Kesme hızı faktörlerinin dairesellik üzerindeki ana etki grafiği

5.3.3. Silindiriklik

Hava aracı montajında önemli bir kalite kriteri de silindirikliktir. Montaj sonrası kalite kontrol sırasında silindiriklik ölçümü yapılması pratik olarak mümkün olmayan bir ölçümdür. Bu çalışmada, CMM tezgahında ölçümler yapılarak uygun kesme hızının belirlenmesi amacıyla silindiriklik değerlerine de bakılmıştır.

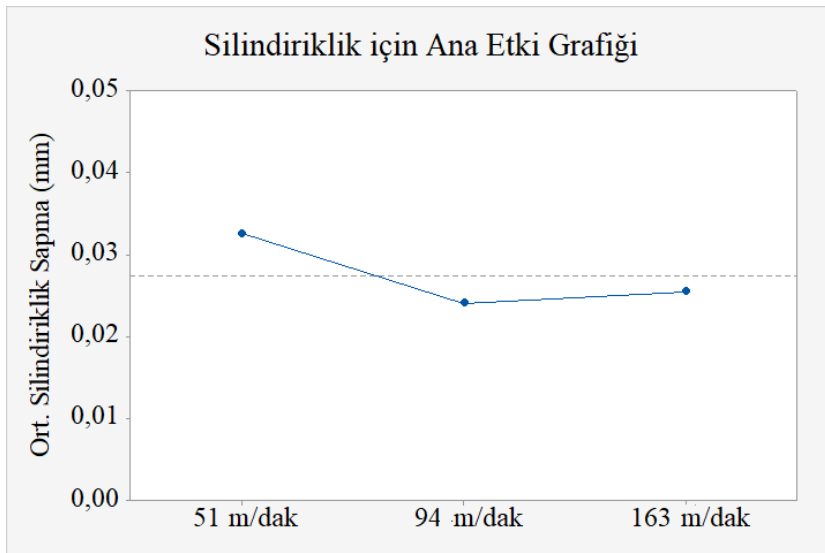
Şekil 5.48’de gösterilen silindiriklikten sapma değerlerine göre 94 m/dak kesme hızında en iyi değerler elde edilmiştir. Delik delme sırasında iş mili devrinin artışı ile oluşan sıcaklık artışı reçinenin kesme direncini düşürdüğü için CFRP malzemedeki alüminyum malzemeye göre daha düşük itme kuvveti oluşur [131]. Kesme hızının artışı itme kuvvetini düşürdüğü için silindiriklikten sapma değerlerinin düşmesine sebep olduğu söylenebilir. En yüksek silindiriklikten sapma değeri 51 m/dak kesme hızında 0,041 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük silindiriklikten sapma değeri 94 m/dak kesme hızında 0,013 mm olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.48. Silindiriklik ölçüm değerleri

Silindiriklik için istatistiksel analiz

Üst plaka, orta plaka ve alt plakada 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızları ile yapılan delme testleri silindiriklik verileri için etki grafikleri Şekil 5.49’da gösterilmiştir. 94 m/dak kesme hızı ile delinen deliklerin ortalaması en düşük değeri vermiştir.

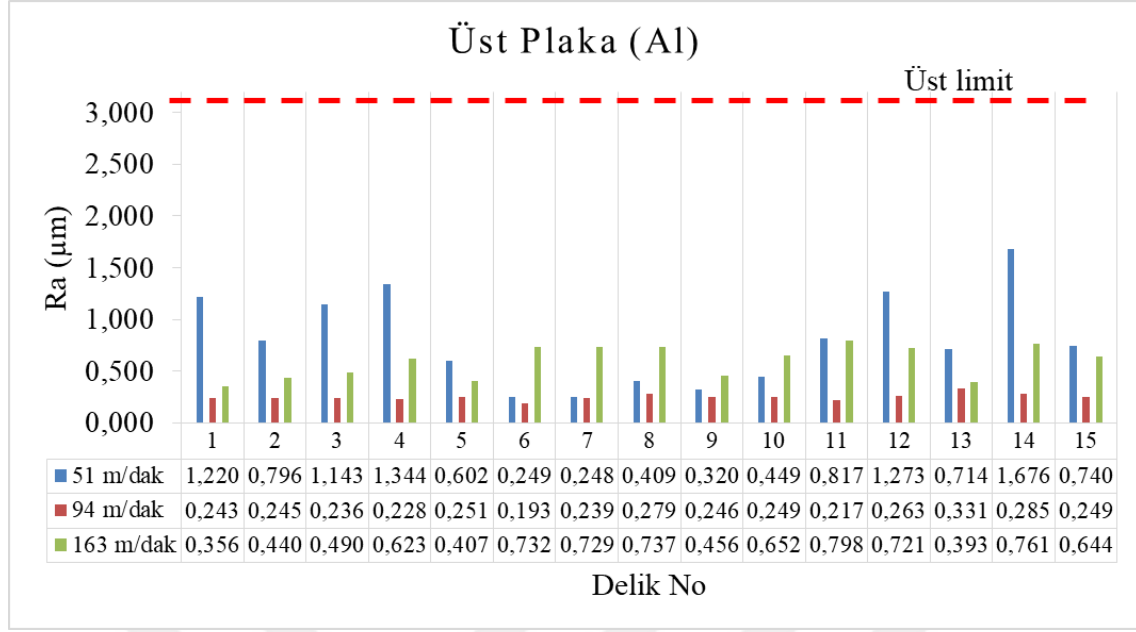


Şekil 5.49. Kesme hızı faktörlerinin silindiriklik üzerindeki ana etki grafiği

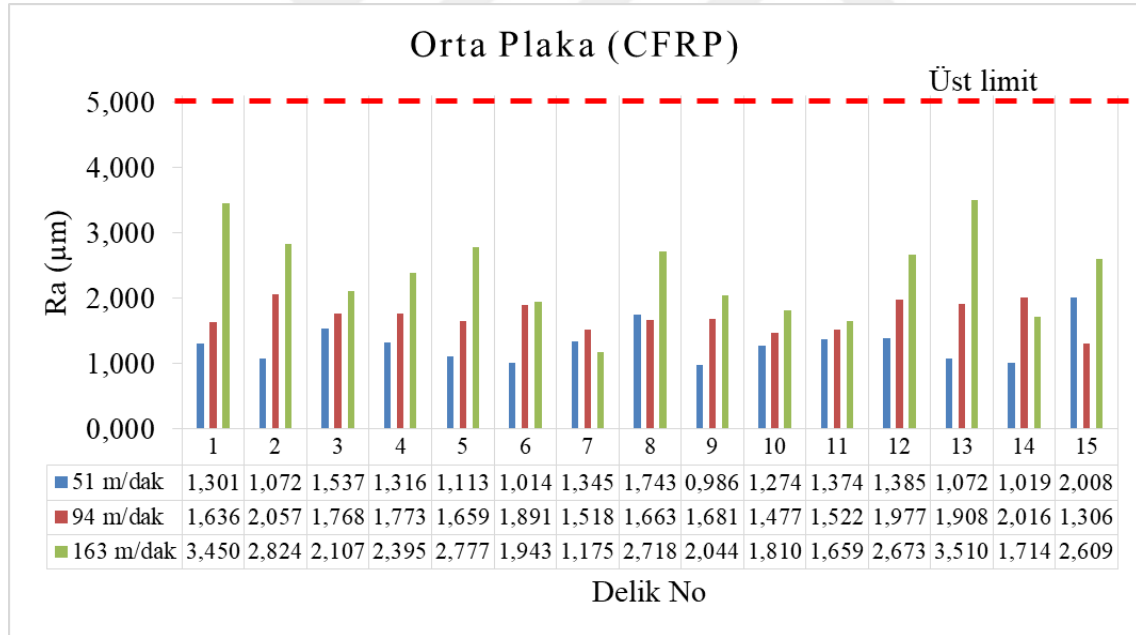
5.3.4. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülük değeri delik kalitesinin belirlenmesinde en önemli kriterlerin başında gelmektedir. Hava aracı parçalarının birbirine montajı sırasında delik iç yüzeylerinin belirlenen yüzey pürüzlülük değerinin altında kalacak şekilde uygun parametrelerde delme işlemi yapılması gerekmektedir. Kullanılan ekipmanın montaj sırasında parça üzerine yerleştirilerek delme işlemi yapması birçok hesap edilemeyen faktörün sonuç üzerinde olumsuz etki etmesine sebep olmaktadır. Hava kalitesi, basıncı, vakum kalitesi, cihazın temizliği, kesici takımın aşınması, kırılması, delme esnasında kontrol edilemeyen titreşimler bunlardan bazılarıdır. Testler sırasında bunlardan hava basıncı ve vakum kalitesi belirli aralıklarla ölçülerek, cihazın temizliği her delme işleminden sonra yapılarak kontrol edilmeye çalışılmıştır. Delik içi yüzey pürüzlülük değeri bağlayıcının montajının yapılması sonrasında uçuş esnasında meydana gelen titreşimlerin abrasiv aşınma sonucu delik içindeki pürüzlülüğü oluşturan tepelerin ezilmesi sonucu delik çapının büyümesi ve sonrasında da bağlayıcının kopmasına kadar oluşacak sonuçlara sebep vermesi açısından çok önemli bir kalite kriteridir.

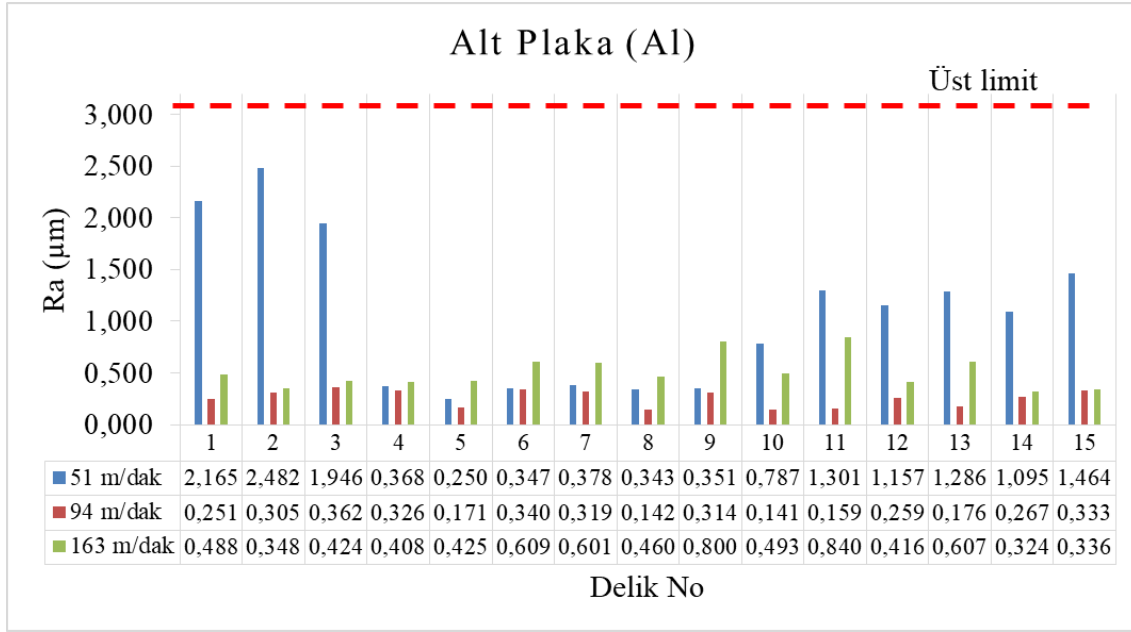
Şekil 5.50'e göre üst plakada en iyi yüzey pürüzlülük değerinin 94 m/dak kesme hızında 0,193 μm olarak elde edildiği gözlenmiştir. Kesme hızının azalmasının delik içinde kesme yerine yontma yapılmasına sebebiyet verdiği söylenebilir. Yüksek kesme hızlarında ise delik içinde talaş sıkışması sonucu yüzeyde çizikler oluştuğu söylenebilir. Şekil 5.51'de kompozit orta plakada yer alan deliklerin yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları 1-3,45 μm arasındaki gerçekleşmiştir. Benzer sonuçların literatürde, 0,05 mm/dev ilerleme hızında tüm iş mili devirlerinde 2-4 μm olarak gerçekleştiği görülmüştür [131]. Şekil 5.52'de alt plakadaki deliklere ait yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Üst plakada olduğu gibi alt plakada da benzer sonuçlar elde edilmiş ve alüminyum malzemede 94 m/dak kesme hızının en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. En düşük değer 0,142 μm olarak gerçekleşmiştir. Alüminyum malzemede yüzey pürüzlülük değerinin CFRP malzemeye göre daha düşük gerçekleşmesinin nedenlerinden en önemlisi alüminyumun isotropik yapıda olmasıdır denilebilir. Düşük kesme hızı değerlerinde yüksek sonuçlar elde edilse de 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında sonuçların çok yakın olduğu söylenebilir. Literatürde kesme hızının alüminyum malzemede oluşan yüzey pürüzlülüğüne etkisinin CFRP malzemeye göre daha az olduğu tespit edilmesine rağmen bu çalışmaya göre istif yapı delmede önemli bir parametre olduğu görülmüştür [131].



Şekil 5.50. Üst plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri



Şekil 5.51. Orta plaka (CFRP) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri



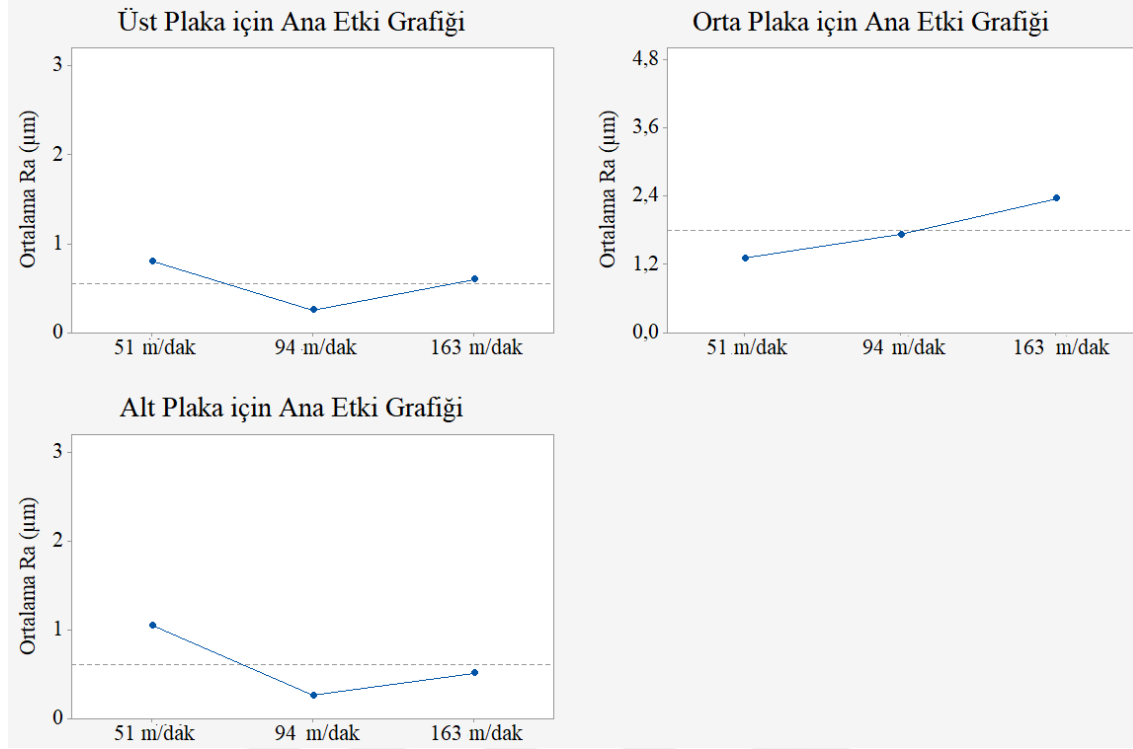
Şekil 5.52. Alt plaka (Al) yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri

Yüzey pürüzlülüğü için istatistiksel analiz

Üst plaka, orta plaka ve alt plakada 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızları ile yapılan delme testleri yüzey pürüzlülük verileri için etki grafikleri Şekil 5.53'te gösterilmiştir. Alüminyum plakalarda 94 m/dak kesme hızı ile delinen deliklerin ortalaması en düşük değeri vermiştir. CFRP plakada 51 m/dak kesme hızı ile delinen deliklerin ortalaması en düşük değeri vermiştir.

5.4. Faz-3B

Faz-3A deneysel çalışmasında 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak olmak üzere üç farklı kesme hızında testler yapılmış ve değerlendirmeler sonucunda en iyi kesme hızı parametresinin 94 m/dak olduğuna karar verilmiştir. Faz-3B deneysel çalışmasında, Tip-A matkap ile 94 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında Al-CFRP-Al istif plakaya 30 adet delik delinmiş ve ölçümler yapılmıştır. Deliklerin tümü aynı matkap kullanılarak delinmiştir.



Şekil 5.53. Kesme hızı faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki ana etki grafiği

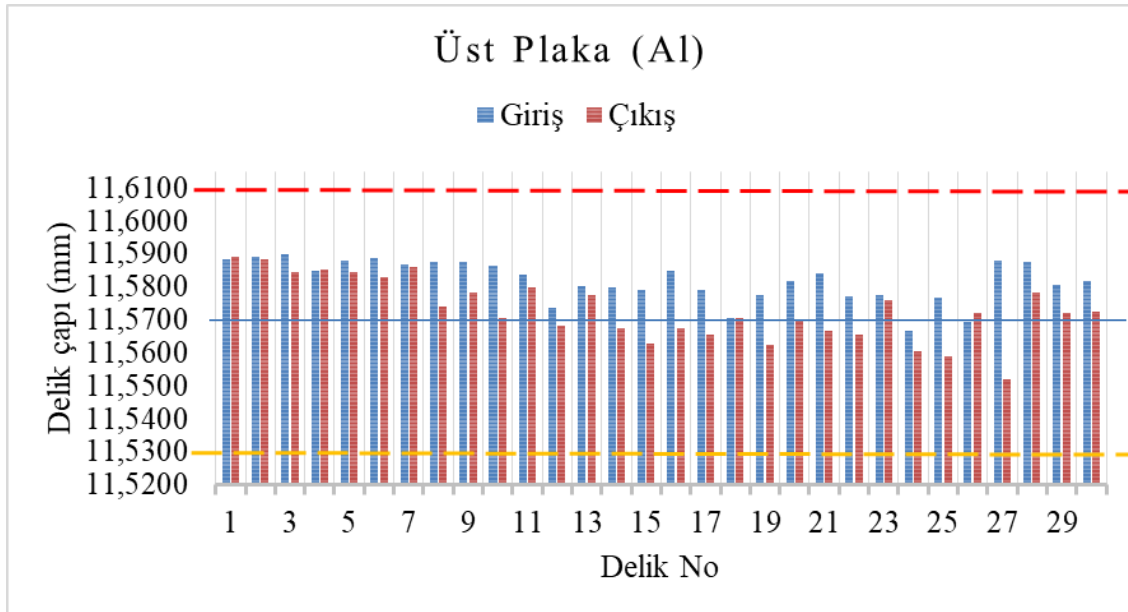
Hava aracı montajı sırasında otomatik delme ekipmanı ile birlikte delinen istif yapıda delme operasyonu sonrasında aynı kesici ile delinen delik sayıları ömür takip çizelgesine kaydedilerek ömür takibi yapılmaktadır. Kesici takım ve ekipmanın kalifikasyon çalışması sırasında 30 adet delik delinip yüzey pürüzlülük değeri, Cp, Cpk, çap değerleri, delaminasyon sonuçlarına bakılarak kalifikasyon tamamlanır ve uygun bulunur ise montaj prosesinde kullanılmak üzere envantere dahil edilir. Bu çalışma ile hava aracı sabit kanatçık üzerinde Al-CFRP-Al malzemelerden oluşan istif bölgede delme işlemlerinde kullanılacak kesicinin, ekipmanın ve parametrelerin kalifikasyon şartları kapsamında uygunluğu incelenmiştir.

5.4.1. Delik çapı

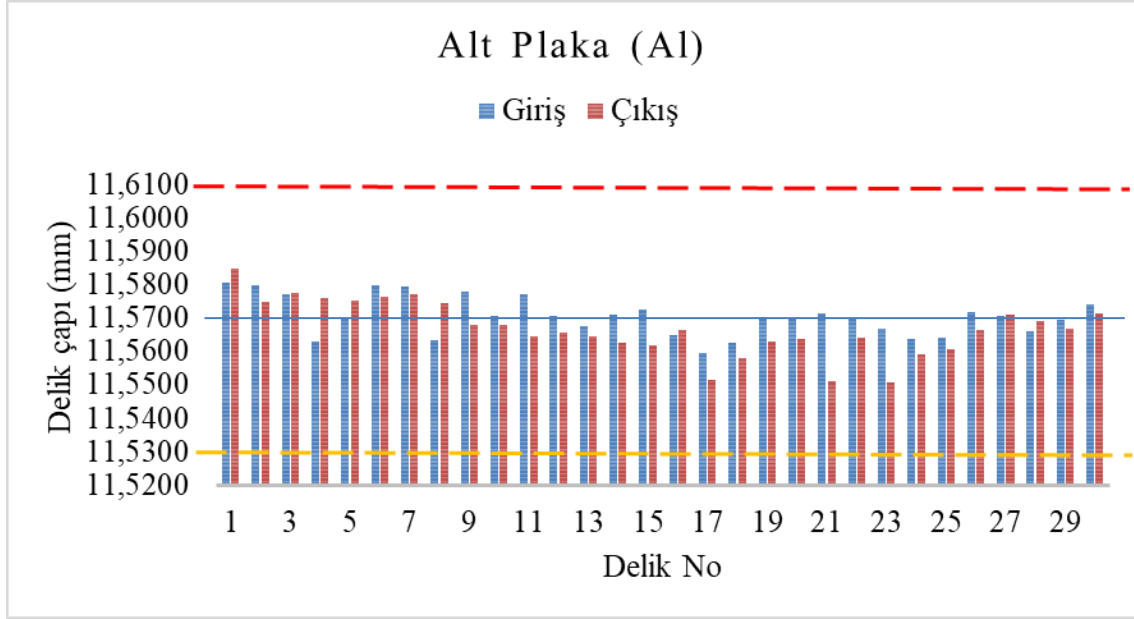
Delik çapı kalite kontrol aşamasında kullanılan en önemli ölçüm değerlerinden biridir. İstif plakaya delinen 30 adet deliğin çap ölçümleri CMM tezgahında gerçekleştirilmiştir. İstif yapıyı oluşturan her plakada yer alan deliklerin giriş ve çıkışlarından çap ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.54'te gösterilen sonuçlara göre üst plakada delik çıkışı çap değerleri nominal çapa daha yakın çıkmıştır. Otomatik delme ekipmanı çalışma sistematığından dolayı, pens içinde bulunan merkezleme burcu sayesinde kesiciyi yataklayarak, malzemeye delik ekseninde girmesini sağlar. Ancak merkezleme burcu içindeki boşluktan dolayı kesici malzemeye ilk giriş anında itme kuvvetinin yüksek olmasından dolayı salgı yaparak deliğin büyümesine sebep olabilmektedir. Şekil 5.55'te gösterilen sonuçlara göre alt plada delik çıkışları nominal değere daha yakın çıkmıştır. Matkap deliği deldikten sonra plakadan çıktığı noktada kesme ağzında merkezleme etkisi kalktığından, matkabın delik çıkışında salgı yapmasına sebep olabilmekte ve bu da alt plakada delik çıkışında çap değerlerinin nominal değere uzak çıkmasına sebep olabilmektedir.

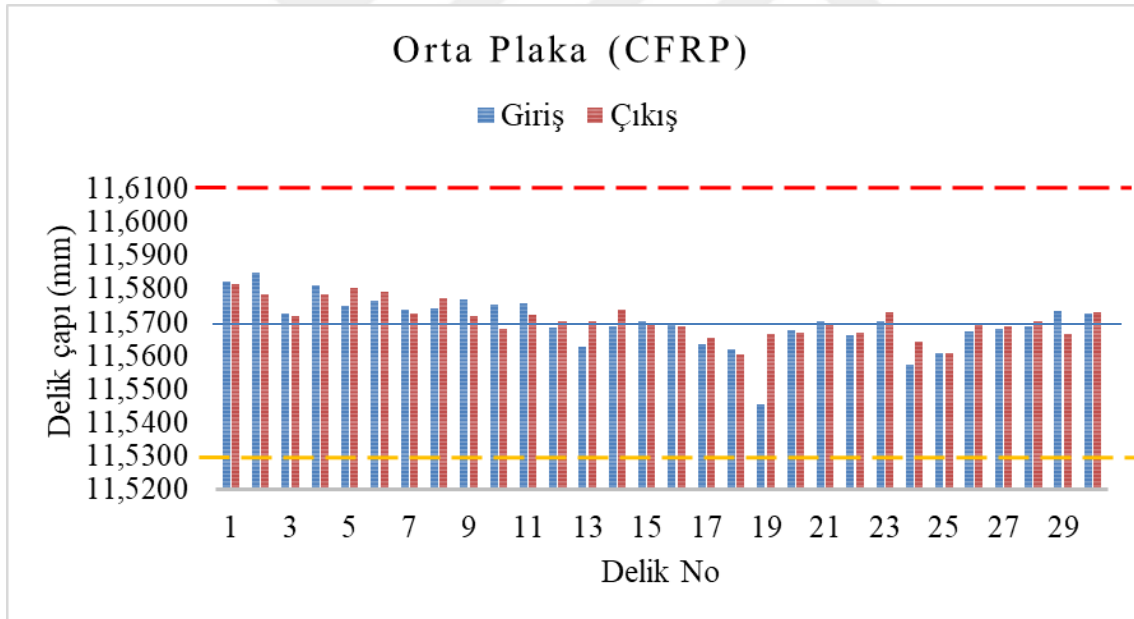
Şekil 5.56'ya göre, CFRP orta plaka delik çıkışlarında ölçülen çap değerlerinin delik girişlerindeki çap değerlerinden büyük olduğu gözlenmiştir. Alt alüminyum plakanın delinmesi sırasında matkaptaki salgının artması sonucu CFRP delik çıkışında çap büyümesine sebep olduğu söylenebilir [133]. Delik sayısı arttıkça matkap kesme kenarında gerçekleşen aşınmalar sonucu matkap çapında küçülme olduğu ve son deliklerde çap değerinde azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.54. 94 m/dak kesme hızında üst plaka çap ölçüm sonuçları



Şekil 5.55. 94 m/dak kesme hızında alt plaka çap ölçüm sonuçları

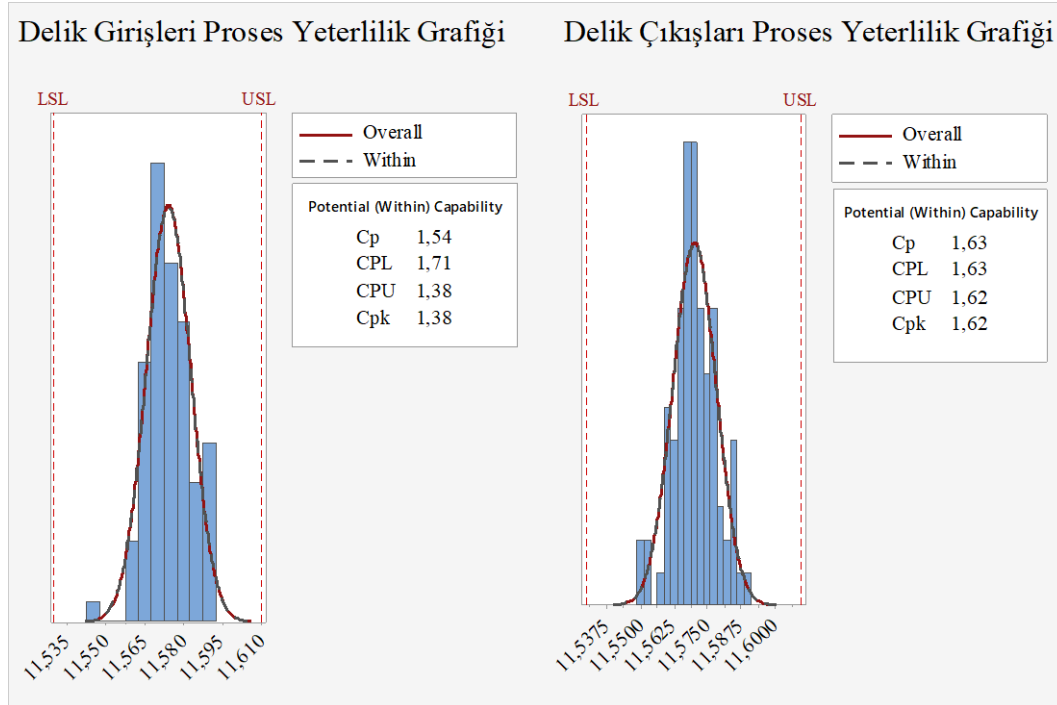


Şekil 5.56. 94 m/dak kesme hızında CFRP orta plaka çap ölçüm sonuçları

Çap için istatistiksel analiz

Şekil 5.57’de gösterilen proses yeterlilik analizi sonuçlarına göre her üç plakanın delik giriş ve çıkışlarına ait delik çap değerleri ile yeterlilik indisleri Cp ve Cpk değerlerine bakılmıştır. Buna göre, delik girişlerinde 30 delikte Cp değeri 1,54 ve Cpk değeri 1,38 çıkmıştır. Delik çıkışlarında 30 delikte Cp değeri 1,63 ve Cpk değeri 1,62 çıkmıştır.

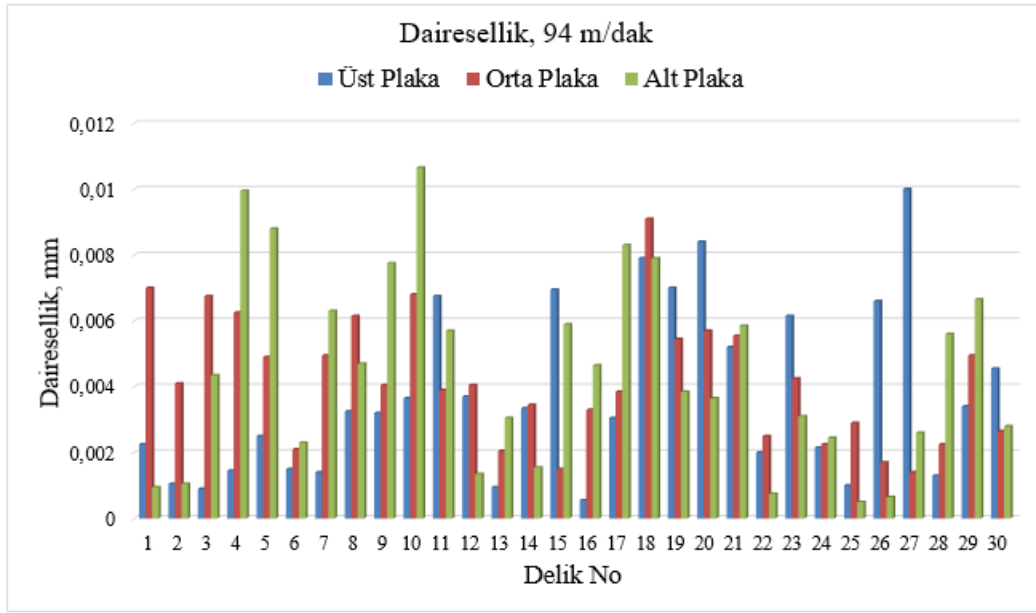
Değerler kabul sınırı olan 1,33 değerinin üzerinde çıktığından dolayı çap değerleri için proses yeterlidir denilebilir [109].



Şekil 5.57. Delik giriş ve çıkışları için proses yeterlilik analizi grafikleri

5.4.2. Dairesellik

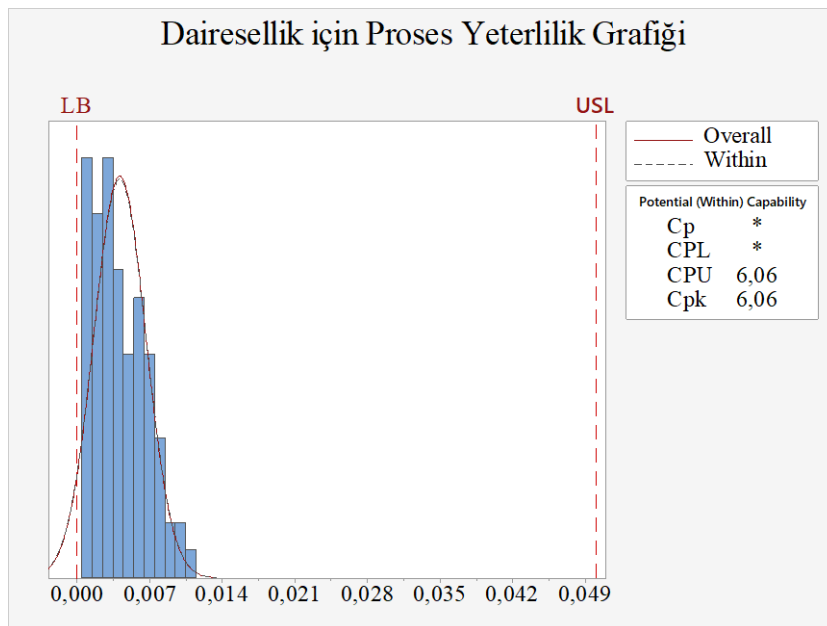
Şekil 5.58’de 94 m/dak kesme hızında gerçekleştirilen performans testinde delinen 30 adet deliğe ait dairesellik ölçüm sonuçlarına göre üst plakadaki dağılım 10 μ m seviğinde kalabilmiştir. Alt plakada en yüksek değer 10 μ m olarak ölçülmüş ve iki delikte bu seviye geçilmiştir. CFRP plakada dağılım 9 μ m seviyesini geçmemiştir. İlk deliklerde alt plakada yüksek dairesellik değerleri oluşmuştur. Son deliklere doğru dairesellik değeri düşmüştür. Dairesellik değerinin 0,05 mm/dev ilerleme hızında yapılan testlerde 50 m/dak kesme hızında 0,005 mm civarında ve 69 m/dak kesme hızında 0,005 mm’nin altında gerçekleştiği literatürdeki çalışmalarda görülmüştür. Kesme hızının artması ile dairesellik değerinde düşüş görülmüştür [134]. Yapılan bu çalışmada, 94 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme hızında delinen 30 adet delik için, üst plakada ortalama 0,0037 mm, orta plakada ortalama 0,0042 mm ve alt plakada ortalama 0,0045 mm dairesellik değerleri tespit edilerek literatürdeki çalışmalar ile benzer sonuçlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.58. 94 m/dak kesme hızında dairesellik değerleri

Dairesellik için istatistiksel analiz

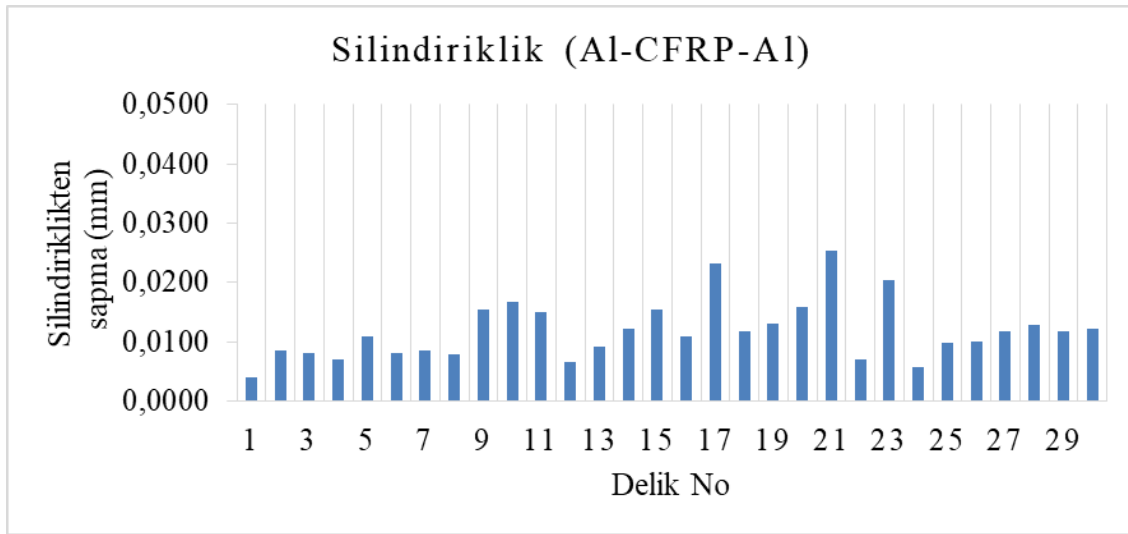
Şekil 5.59’da daireellik için proses yeterlilik analizi ile yeterlilik indisi Cpk değeri gösterilmiştir. Buna göre, 30 delikte toplam 90 daireellik değeri için Cpk değeri 6,06 çıkmıştır. Değerler kabul sınırı olan 1,33 değerinin üzerinde çıktığından dolayı daireellik için proses yeterlilik kriterleri sağlanmıştır [109].



Şekil 5.59. Dairesellik için proses yeterlilik analizi grafikleri

5.4.3. Silindiriklik

Şekil 5.60'da gösterilen silindiriklikten sapma değerlerinin artışının sebepleri arasında delik içinde talaş sıkışması, kompozit plakada takviye elemanı ve reçine özelliklerine bağlı olarak sıcaklık artışı ile kesme şartlarının değişimi, ekipmanın bağlantı şeklinde oluşan titreşim sayılabilir. En yüksek silindiriklikten sapma miktarı yirmibirinci delikte 0,0253 mm olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.60. 94 m/dak kesme hızında ölçülen silindiriklik değerleri

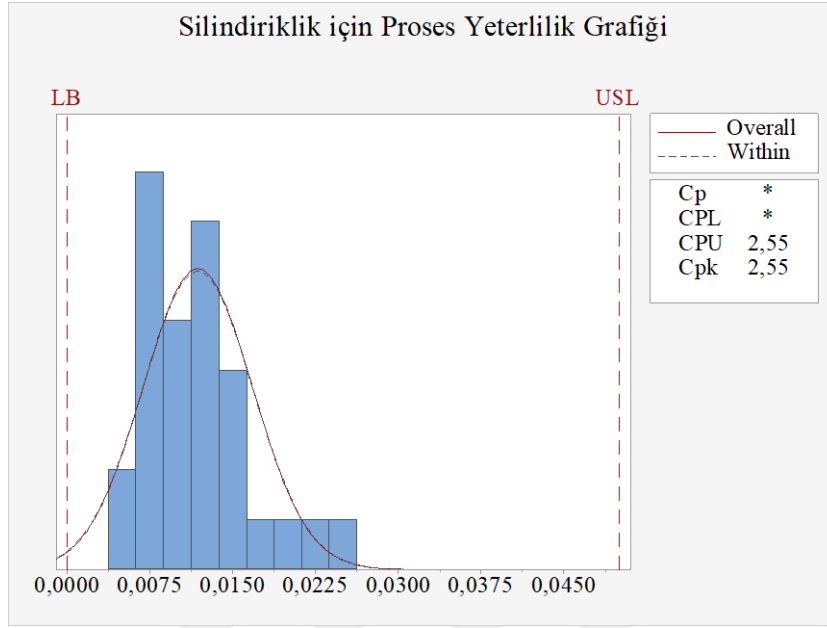
Silindiriklik için istatistiksel analiz

Şekil 5.61'de silindiriklik için proses yeterlilik analizi ile yeterlilik indisi Cpk değeri gösterilmiştir. Buna göre, 30 delikte toplam 30 silindiriklik değeri için Cpk değeri 2,55 olarak gerçekleşmiştir. Değerler kabul sınırı olan 1,33 değerinin üzerinde olduğundan silindiriklik için proses yeterlilik kriteri sağlanmıştır [109].

5.4.4. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülük değeri en önemli kalite göstergelerinden biridir. Alüminyum plakalarda gerçekleşen yüzey pürüzlülük değeri kompozit plakaya göre çok daha düşük kalmaktadır (Şekil 5.62). Bunun sebebi kompozit malzeme yapısının homojen olmaması, takviye elemanı ve reçinenin dağılımının homojen olmaması, yapı içinde boşluklar oluşması, delme

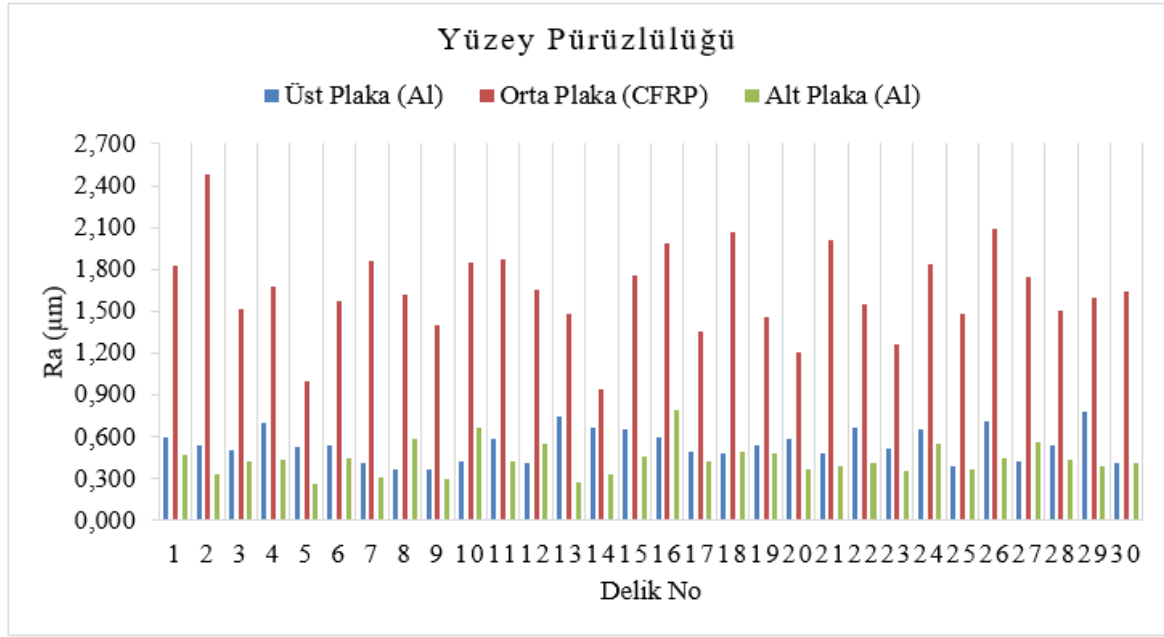
işlemi sırasında iç katmanlar arasında delaminasyon oluşması gösterilebilir. İç katmanlar arasında delaminasyon oluşmasına neden olan parametrelerden bir tanesinin alüminyum talaşlarının delik içinden çekilmesi sırasında CFRP malzeme yüzeyine zarar vermesi ve katman kalkmasına sebep olması söylenebilir [125].



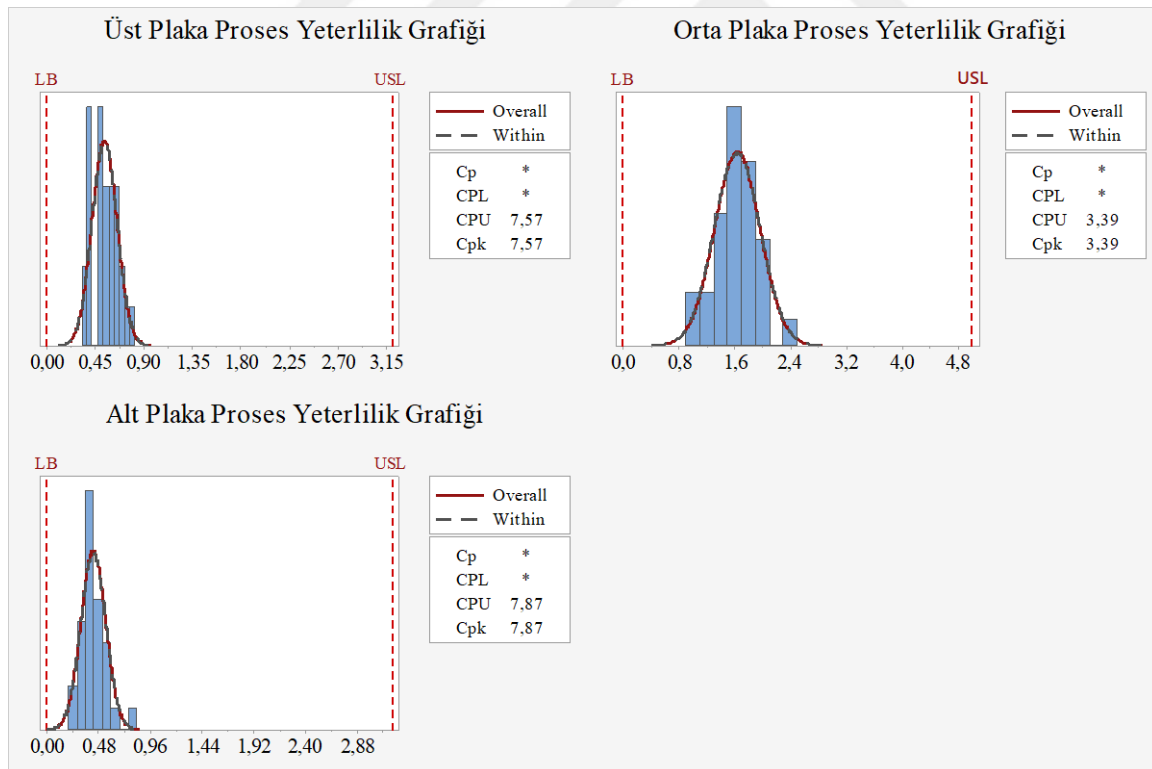
Şekil 5.61. Silindiriklik için proses yeterlilik analizi grafiği

Yüzey pürüzlülüğü için istatistiksel analiz

Şekil 5.63'te üst, orta ve alt plakalara ait yüzey pürüzlülüğü için proses yeterlilik analizleri ile yeterlilik indisi Cpk değerleri gösterilmiştir. Buna göre, üst plakada 30 delik için Cpk değeri 7,57; orta plakada 30 delik için Cpk değeri 3,39; alt plakada 30 delik için Cpk değeri 7,87 çıkmıştır. Değerler kabul sınırı olan 1,33 değerinin üzerinde çıktığından yüzey pürüzlülüğü için proses yeterlilik kriteri sağlanmıştır [109].



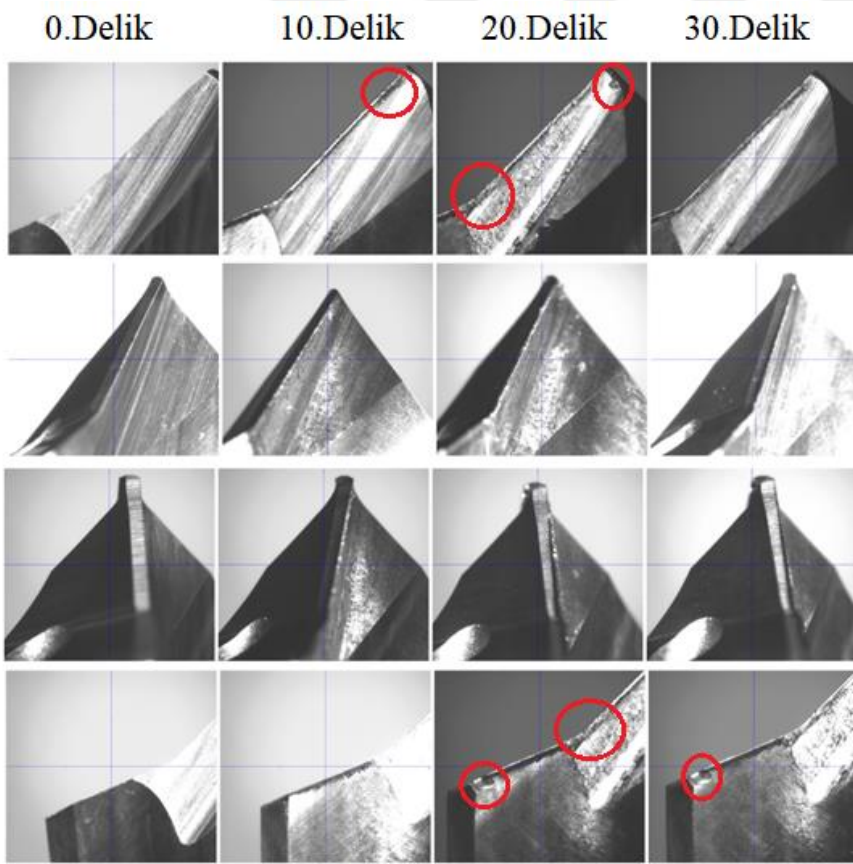
Şekil 5.62. 94 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülük değerleri



Şekil 5.63. Yüzey pürüzlülüğü için proses yeterlilik analizi grafikleri

5.4.5. Takım aşınması

Delme işlemleri sırasında her on delikte bir kesici kenarlarında oluşan aşınmalar mikroskopta incelenmiştir. Kesici takım ekipmandan sökülerek Zoller cihazında farklı açılardan aşınmalara bakılmıştır. 0, 10, 20, 30 nolu deliklerden sonra aşınma görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.64'te delik sayısı arttıkça kesme kenarında yan yüzey aşınmalarının arttığı görülmektedir. Onuncu delikten itibaren birinci ve ikinci kademe kesme kenarı boyunca abrazyon aşınması gerçekleşmiştir. Yirminci delik sonunda ikinci kademe kesme kenarında talaş çekiçlemesi sonucunda kırılmalar ile kesme kenarında yuvarlama oluşmuştur. Otuzuncu delik sonunda mevcut kırılmalarda büyüme ve ek kırılmalar gözlenmemiştir. Kompozit malzemede fiberlerin çekiçleme etkisi ile matkap kenarında kırılmaların oluştuğu söylenebilir [127]. Onuncu delikten sonra meydana gelen ani aşınmaların kesici kenar yuvarlamasını ve köşe radyüsünü arttırdığı söylenebilir [135].

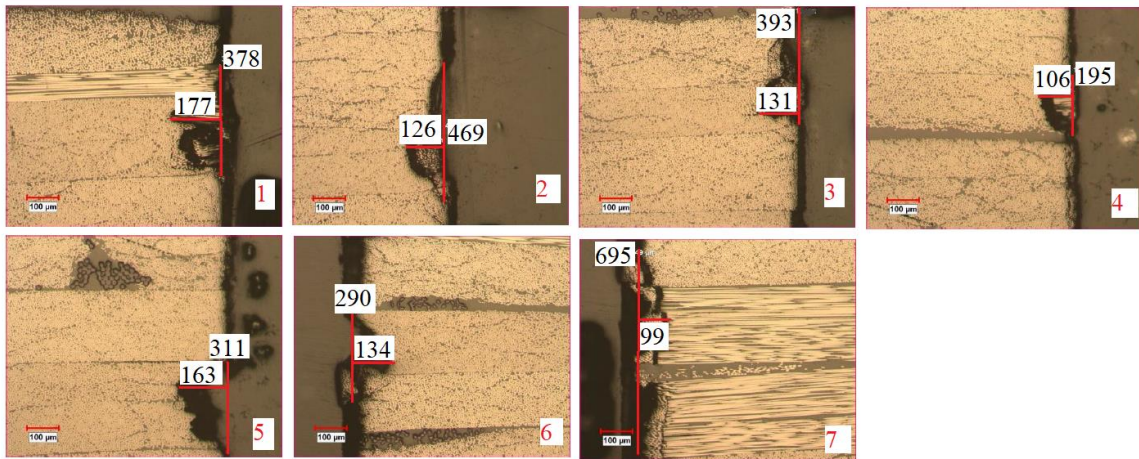


Şekil 5.64. 94 m/dak kesme hızında Tip-A matkapta oluşan aşınma görüntüleri

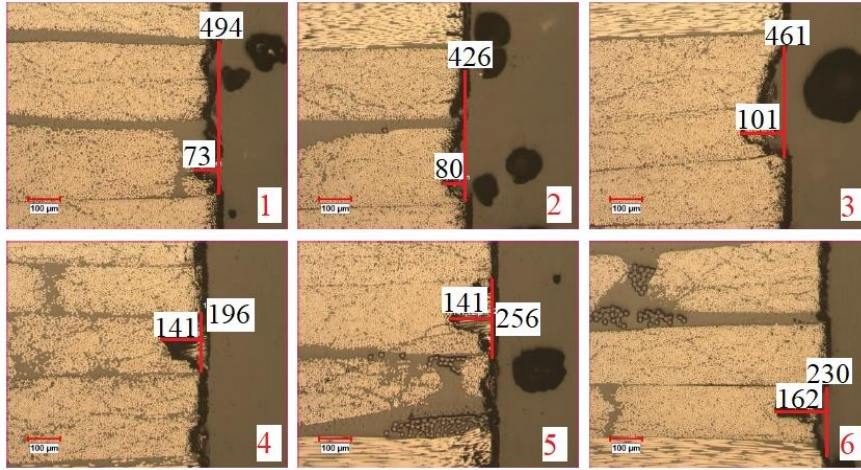
5.4.6. İç delaminasyon

İstif yapılarda CFRP malzemenin metal malzemeler arasında olması ve uygun bir tork ile sıkılarak desteklenmesi sonucunda delik giriş ve çıkışlarında ölçülebilir bir delaminasyon oluşumuna rastlanmamıştır. Benzer durum literatürdeki farklı çalışmalarda da gözlenmiştir [102]. Bu çalışmada, CFRP malzemedeki deliklerin içyapısında meydana gelen delaminasyonların incelemesi gerçekleştirilmiştir. Birinci, ikinci, yirmidokuzuncu ve otuzuncu deliklerin içyapısında meydana gelen delaminasyonlar incelenmiştir. İlk iki ve son iki delik incelemesi standartlarda belirtilen inceleme yöntemidir [107]. İnceleme yapabilmek için kompozit plaka delikler orta eksenlerinden kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında delaminasyon oluşmamasına dikkat edilmiştir. Kesme işlemi öncesinde plaka göz ile muayene edilmiş, katmanlarda ayrılma, delik çıkışında şişme ve aşırı sıcaklık etkisi ile yanma oluşumlarına rastlanmamıştır. Numune parçalar 100X büyütme yapılarak incelenmiştir. İlk iki ve son iki delik, kesme, bakalite alma, taşlama ve parlatma işlemlerinden geçirilerek mikroskobik inceleme için hazırlanmıştır.

Birinci delikte yedi noktada delaminasyon oluşumu gözlenmiştir. Bu oluşumlara ait 100X büyütülmüş mikro görüntüler Şekil 5.65'te verilmiştir. Oluşan iç katman delaminasyonlarının sebeplerinden birinin alüminyum talaşının delikten çıkışı sırasında CFRP katmanlarını kaldırmasından dolayı gerçekleştiği söylenebilir [128]. İkinci delikte altı adet noktada delaminasyon oluşumu gözlenmiştir. Bu oluşumlara ait 100X büyütülmüş mikro görüntüler Şekil 5.66'da verilmiştir.

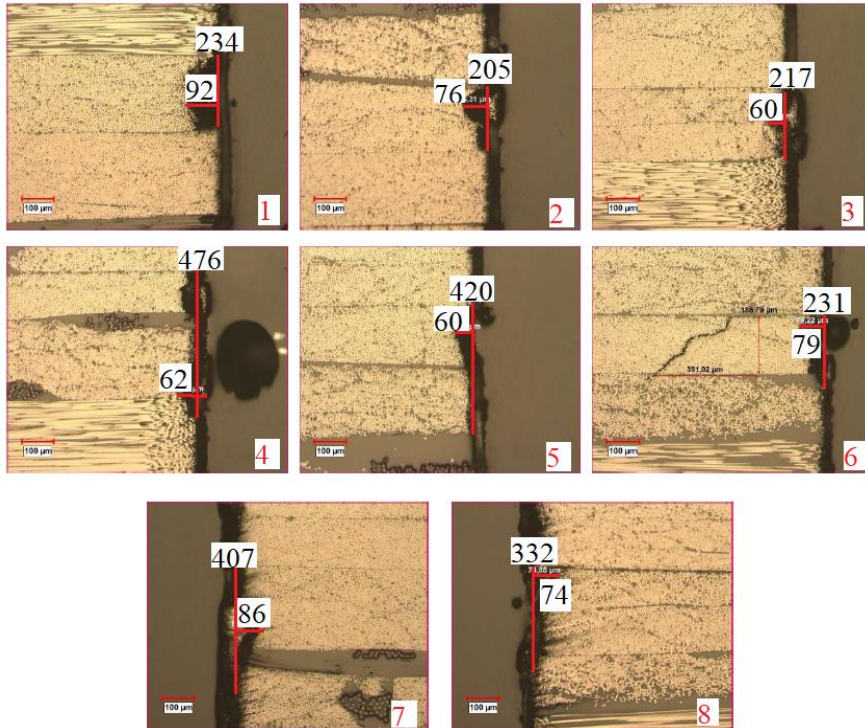


Şekil 5.65. “1” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri

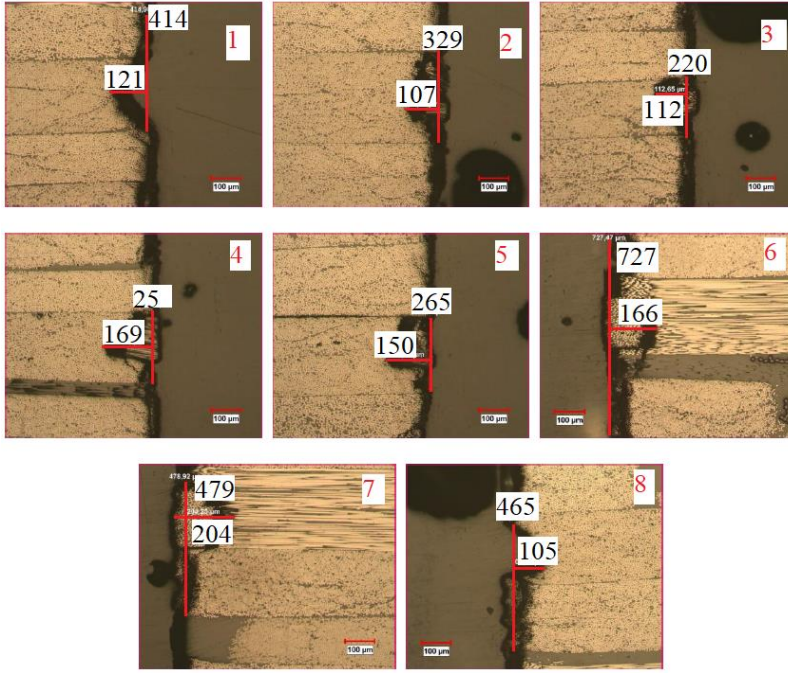


Şekil 5.66. “2” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri

Yirmi dokuzuncu delikte altı adet noktada delaminasyon gözlenmiştir. Bu oluşumlara ait 100X büyütülmüş mikro görüntüler Şekil 5.67’de verilmiştir. Otuzuncu delikte beş adet noktada delaminasyon gözlenmiştir. Bu oluşumlara ait 100X büyütülmüş mikro görüntüler Şekil 5.68’de verilmiştir.



Şekil 5.67. “29” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri



Şekil 5.68. “30” No’lu delik 100X delaminasyon görüntüleri,



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, havacılık sektöründe komponentlerin montajı aşamasında manuel ve otomatik delme ekipmanları ile gerçekleştirilen tüm delik delme prosesine ait deneysel ve istatistiki çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Birinci faz çalışmasında, CFRP malzeme için manuel delik delmede kademe sayılarının azaltılması amacıyla özgün geometriye sahip kademeli matkaplar tasarlanmış ve yapılan deneysel çalışma sonucunda delik kaliteleri ölçülerek yeni matkapların uygunluğu incelenmiştir. İkinci fazda, Al-CFRP-Al istif yapı üzerinde otomatik delme ekipmanı kullanarak üç farklı matkap geometrisi ile delme testleri yapılmış ve en iyi sonuçları veren matkap geometrisi belirlenmiştir. Üçüncü fazın ilk aşamasında Al-CFRP-Al istif yapı üzerinde, en iyi sonuçları veren kesici takım ile 51 m/dak, 94 m/dak ve 163 m/dak kesme hızlarında testler yapılarak en uygun kesme hızı tespit edilmiştir. Üçüncü fazın ikinci aşamasında, en iyi sonuçları veren kesme hızı ile plaka üzerine 30 adet delik delinip proses yeterlilik analizleri yapılmıştır. Çalışmaların sonuçları istatistiki analizler ile desteklenmiştir.

Literatür taramasında ulaşılan daha önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, hava ile çalışan manuel ve otomatik delme ekipmanları kullanılarak montaj aşamasında gerçekleştirilen delik delme prosesinin tümü incelenmiştir.

- Faz-1 çalışmasında, 20 farklı matkap kombinasyonu ile beşer adet delik delinmiş ve ölçümler yapılmıştır. Delik çapı, silindiriklik ve delaminasyon ölçümleri gerçekleştirilerek sunulmuştur.
- Kaplamasız ve 18° matkap kombinasyonlarında en yüksek silindiriklikten sapma değeri 0,030 mm ile Ø3,25 mm kademesiz matkap ile gerçekleşmiştir. Ön delik olmaması en büyük etken olmuştur.
- Kaplamasız ve 36° matkap kombinasyonlarında en yüksek silindiriklikten sapma değeri 0,027 mm değeri ile kademesiz Ø3,25 mm matkapta gerçekleşmiştir. Ön delik olmamasının etkisinin uç açısının etkisinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Kaplama uygulanmış matkaplarda en yüksek silindiriklikten sapma değeri 0,050 mm ile 36° uç açılı Ø3,25 mm çaplı matkapta gerçekleşmiştir. Açının büyümesi ile sapma değerinde yükselme olmuştur.

- Kaplamasız matkaplar arasında en yüksek delaminasyon faktörü değeri 1,30 mm ile 36° uç açılı Ø5,94 mm matkapta gerçekleşmiştir. Kademeli matkaplar arasında en yüksek delaminasyon değeri 1,25 mm ile 36° uç açılı Ø4,80-5,94 mm matkapta gerçekleşmiştir.
- Kaplamalı matkaplar arasında en yüksek delaminasyon faktörü değeri 1,29 mm ile 18° uç açılı Ø4,80-5,94 mm matkap ile dördüncü delikte gerçekleşmiştir. Kademesiz matkaplar içinde en yüksek değer 1,20 mm ile 36° uç açılı Ø4,80 mm matkapta üçüncü delikte gerçekleşmiştir.
- Ø3,25 mm matkapta en büyük delik çapı değeri 3,31 mm olarak 36° uç açılı kaplamalı kombinasyonda üçüncü delikte gerçekleşmiştir. Ø4,80 mm matkapta en büyük çap değeri 4,82 mm olarak 36° uç açılı kaplamalı kombinasyonda birinci ve üçüncü deliklerde gerçekleşmiştir. Ø5,94 mm matkapta en büyük çap değeri 5,96 mm olarak 36° uç açılı kaplamalı kombinasyonda ikinci delikte gerçekleşmiştir.
- Kademeli matkaplarda en büyük çap değerleri Ø3,25-4,80 mm matkap için 4,83 mm olarak 18° uç açılı kaplamalı kombinasyonda birinci delikte, Ø4,80-5,94 mm matkap için 5,99 mm olarak 36° uç açılı kaplamasız kombinasyonda beşinci delikte gerçekleşmiştir.
- Kademeli matkaplarda en yüksek delaminasyon faktörü değerleri Ø3,25-4,80 mm matkapta 1,21 mm ile 18° uç açılı kaplamalı kombinasyonda birinci delikte, Ø4,80-5,94 mm matkapta 1,29 mm ile 18° kaplamalı kombinasyonda dördüncü delikte gerçekleşmiştir.
- Faz-2 aşamasında üç tip matkap geometrisi kullanılarak delme çalışması yapılmıştır. Her bir matkap ile altı adet delik delinmiştir. Değerlendirmede en iyi sonuçları veren matkap geometrisini tespit edebilmek için deliklerin giriş ve çıkışlarındaki çap değerleri, yüzey pürüzlülük değerleri, delaminasyon ve kesici takım aşınmaları ölçülmüştür.
- Alüminyum üst plakada delik girişinde en yüksek çap değeri 11,606 mm ile altıncı delikte Tip-C geometrisinde, en düşük değer 11,571 mm ile altıncı delikte Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir. Delik çıkışında en yüksek çap değeri 11,614 mm ile üçüncü delikte Tip-C geometrisinde, en düşük çap değeri 11,570 mm ile üçüncü delikte Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir.
- CFRP orta plakada delik girişinde en yüksek çap değeri 11,588 mm ile beşinci delikte Tip-B geometrisinde, en düşük çap değeri 11,570 mm ile beşinci delikte Tip-A

geometrisinde gerçekleşmiştir. Delik çıkışında en yüksek çap değeri 11,582 mm ile ikinci ve dördüncü deliklerde Tip-C geometrisinde, en düşük çap değeri 11,570 mm ile altıncı delikte Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir.

- Alüminyum alt plakada delik girişinde en yüksek çap değeri 11,601 mm ile birinci delikte Tip-C geometrisinde, en düşük değer 11,571 mm ile beşinci delikte Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir. Delik çıkışında en yüksek çap değeri 11,586 mm ile birinci delikte Tip-B geometrisinde, en düşük çap değeri 11,570 mm ile ikinci ve beşinci deliklerde Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir.
- Yüzey pürüzlülük sonuçlarında alüminyum üst plakada en yüksek Ra değeri 1,497 μm olarak birinci delikte Tip-C geometrisinde, en düşük Ra değeri 0,244 μm olarak birinci delikte Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir.
- CFRP orta plakada en yüksek Ra değeri 4,579 μm olarak dördüncü delikte Tip-C geometrisinde, en düşük Ra değeri 0,866 μm olarak birinci delikte Tip-B geometrisinde gerçekleşmiştir.
- Alüminyum alt plakada en yüksek Ra değeri 1,254 μm olarak dördüncü delikte Tip-C geometrisinde, en düşük Ra değeri 0,372 μm olarak birinci delikte Tip-A geometrisinde gerçekleşmiştir.
- Delaminasyon ölçümlerinde delik girişlerinde bulgu gözlenmemiştir. Delik çıkışlarında Tip-B matkapta birinci delikte 1,061 mm, Tip-C matkapta üçüncü delikte 1,034 mm ve beşinci delikte 1,059 mm delaminasyon faktörleri hesaplanmıştır.
- Faz-3A aşamasında Tip-A matkap ile üç farklı kesme hızı değerinde (51 m/dak, 94 m/dak, 163 m/dak) deneyler yapılmıştır. İstif plakaya her kesme hızında 15 adet delik delinmiştir. Delikler aynı matkaplar ile delinmiştir.
- Alüminyum üst plakada en yüksek çap değeri 163 m/dak kesme hızında 11,606 mm olarak sekizinci delikte, en düşük çap değeri 11,563 mm olarak 94 m/dak kesme hızında altıncı delikte gerçekleşmiştir.
- CFRP orta plakada en yüksek çap değeri 11,5796 mm olarak 163 m/dak kesme hızında on üçüncü delikte, en düşük çap değeri 11,559 mm olarak 51 m/dak kesme hızında dördüncü delikte gerçekleşmiştir.
- Alüminyum alt plakada en yüksek çap değeri 11,6048 mm olarak 51 m/dak kesme hızında on dördüncü delikte, en düşük çap değeri 11,5551 mm olarak 51 m/dak kesme hızında beşinci delikte gerçekleşmiştir.

- Dairesellik sonuçlarına göre en yüksek dairesellik değerleri üst plakada birinci delikte 0,0518 mm olarak 51 m/dak kesme hızında, orta plakada 0,0397 mm olarak 51 m/dak kesme hızında, alt plakada 0,043 mm olarak 51 m/dak kesme hızında gerçekleşmiştir.
- Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre en yüksek Ra değerleri alt plakada 1,6763 μm olarak 51 m/dak kesme hızında on dördüncü delikte, orta plaka 3,5100 μm olarak 163 m/dak kesme hızında on üçüncü delikte, alt plakada 2,482 μm olarak 51 m/dak kesme hızında ikinci delikte gerçekleşmiştir.
- Faz-3B çalışmasında, üst plakada delik giriş ve çıkış çap değerleri arasındaki en büyük fark yirmi yedinci delikte $\varnothing 11,5879$ mm ve $\varnothing 11,552$ mm olarak gerçekleşmiştir. Orta plakada delik giriş ve çıkışındaki en yakın sonuçlar yirmi birinci delikte $\varnothing 11,5703$ mm ve $\varnothing 11,5695$ mm olarak gerçekleşmiştir. Alt plakada delik giriş ve çıkışındaki en büyük fark yirmi birinci delikte $\varnothing 11,5716$ mm ve $\varnothing 11,5511$ mm olarak gerçekleşmiştir.
- Dairesellik sonuçlarında en büyük değerler alüminyum olan üst plaka ve alt plakada 0,0106 ve 0,01 mm olarak onuncu ve yirmi yedinci deliklerde gerçekleşmiştir.
- Silindiriklikten sapma sonuçlarında istif plaka tek bir parça olarak kabul edilerek ölçüm yapılmıştır. En büyük değer yirmi birinci delikte 0,0253 mm olarak gerçekleşmiştir. Silindiriklikten sapma değerlerinde son deliklere doğru artan bir eğilim oluşmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre en yüksek değerler kompozit plakada gerçekleşmiştir. En büyük değer Ra 2,481 μm olarak ikinci delikte gerçekleşmiştir. Alüminyum olan üst ve alt plakalarda en büyük Ra değeri 0,794 μm olarak on altıncı delikte gerçekleşmiştir.
- Bu çalışmada, havacılık sektöründe komponent imalatında yoğun olarak kullanılmaya başlanan CFRP ve Alüminyum-CFRP-Alüminyum malzeme kombinasyonlarında kullanılan matkap geometrilerinin optimizasyonu için özgün matkaplar tasarlanmıştır. Daha önceki literatür çalışmalarından farklı olarak tüm çalışmalar montaj aşamasında kullanılan manuel ve otomatik delme ekipmanları ile tüm delik delme prosesini kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Otomatik delme ekipmanı testlerinde ayrıca kesme hızı optimizasyonu yapılmış, matkap ve kesme hızı optimizasyonu proses yeterlilik analizi ile değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın daha ileriye taşınması için yapılması değerlendirilen maddeler şunlardır:

- Manuel delik delmede kesme hızı ve ilerleme hızının sabitlenmesi hava basıncındaki değişimlerden ve teknisyenin uyguladığı baskının değişiminden dolayı mümkün olmamaktadır. Elektrikli ekipman kullanılarak kesme hızı sabitlenebilir. İlerleme oranında değişimin en düşük miktarda gerçekleşmesi için hidrolik kontrol ünitesi kullanılabilir. Bu şekilde gerçekleştirilen deneyler ile kesme hızının manuel delmeye etkilerine bakılabilir ve havalı ekipman ile elde edilen delik kalitesi sonuçları ile karşılaştırılabilir.
- Bu çalışmada, otomatik delme ekipmanının yalnızca kesme hızı değiştirilebilmiş ve deneyler kesme hızı optimizasyonu için gerçekleştirilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda ilerleme hızının değiştirilmesi ile delik kalitesi üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Metal-kompozit istif yapılarda son yıllarda kullanılmaya başlanan adaptif delme ekipmanları ile testler gerçekleştirilebilir. Bu ekipmanlar farklı malzemelerde farklı kesme hızı ve ilerleme hızı ayarlanarak kullanılabilir. Bu sayede delik kalitesi üzerindeki değişimler incelenerek optimizasyon çalışması yapılabilir.
- Özgün tasarlanan matkapların itme kuvveti ve tork değerlerine bakılabilir. Kuvvetlerin delik kalitesi üzerindeki etkileri incelenebilir.



KAYNAKLAR

1. Rathod, C. M. and Chudasama, M. (2015). An Investigation of Hole Size, Circularity and Delamination during Drilling Operation of Carbon Fiber Reinforced Polymer-A Review. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(10), 3-7.
2. Rathod, C. M., Chudasama, M. and Darji, S. (2015). An Investigation of Hole Size, Circularity and Delamination During Drilling Operation of Carbon Fiber Reinforced Polymer with using ANOVA. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2(1), 53-59.
3. Arisawa, H., Akama, S. and Nitani, H. (2012). High-Performance cutting and grinding technology for CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic). *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 49(3), 3-9.
4. Tönshoff, H.K., Spintig, W., König, W. and Neises, A. (1994). Machining of holes developments in drilling technology. *CIRP Annals*, 43(2), 551-561.
5. Marques, A. T., Durao, L. M., Magalhaes, A. G., Tavares, J. M. R. S. and Silva, J. F. (2009). Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill. *Composite Science and Technology*, 69(14), 2376-2382.
6. Koplev, A., Lystrup, A. and Vorm, T. (1983). The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites*, 14(4), 371-376.
7. Çobanoğlu, T. ve Öztürk, S. (2014, Ekim). *Hava aracı ön kanatçığı üzerinde yapılan delme prosesinin iyileştirilmesi*. 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumunda sunuldu, Bursa, 289-301.
8. Peters, S. T. (1998). *Introduction, composite basic and road map*, in *Handbook of Composites*. London: Chapman & Hall, 1-20.
9. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2018). *Fundamentals of materials science and engineering* (Fifth Edition). New York: John Wiley & Sons Inc., 600-611.
10. Umeco, (2013). *An Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology*. USA: Advanced Composites Group Ltd., 1-9.
11. Burton, R. (2008). *Of developing importance, in aerospace manufacturing*. Kent, UK: MIT publishing limited, 21-22.
12. Soutis, C. (2005). Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction. *Materials Science and Engineering A*, 412(1-2), 171-176.
13. Herakovich, C. T. (1997). *Mechanics of fibrous composites*. York: John Wiley & Sons Inc., 110-150.
14. Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *Annals of the CIRP*, 51(2), 611-634.

15. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering An Introduction* (Eighth Edition). USA: John Wiley & Sons. Inc., 636-646.
16. Reinhart, T. J. (1998). *Overview of composite materials, in Handbook of Composites*. London: Chapman & Hall, 21-26.
17. Sheikh-Ahmed, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites*. New York: Springer, 1-37.
18. Chung, D. D. L. (1994). *Carbon Fiber Composites*. Newton: Butterworth-Heinemann, 215.
19. Capello, E., Langella, A., Nele, L., Paoletti, A., Santo, L. and Tagliaferri, V. (2008). *Drilling polymeric matrix composites, in Machining: Fundamentals and recent advances*. London: Springer, 167-194.
20. Shim, H., Seo, M. and Park, S. (2002). Thermal conductivity and mechanical properties of various cross-section types carbon fiber- reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 37(9), 1881-1885.
21. Occupational safety and health administration. (2010). *Polymer matrix materials: Advanced composites, in OSHA technical manual*. USA: United States Department of Labor.
22. Agro, M. (2018). *Safety data sheet for SL-2 ComfortWalk Prepreg*. Minneapolis: Otto Bock Health Care, 1-8.
23. Klocke, F., Koenig, W., Wuertz, C. and Dietz, C. (1999). *Machining of ceramics and composites: Environmental effects and safety in machining fibrous composites*. New York: Basel, Marcel Dekker Inc., 411-425.
24. Konig, W., Wulf, C., Grass, P. and Willerscheid, H. (1985). Machining of fibre reinforced plastics. *Annals of the CIRP*, 34(2), 537-548.
25. Mkaddem, A., Demirci, I. and Mansori, M. E. (2008). A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis. *Composites Science and Technology*, 68(15-16), 3123-3127.
26. Ferreira, J. R., Coppini, N. L. and Miranda, G. W. A. (1999). Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, 135-140.
27. Singh, I., Bhatnagar, N. and Viswanath, P. (2008). Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study. *Materials & Design*, 29(2), 546-553.
28. Wang, D. H., Ramulu, M. and Arola, D. (1995). Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(12), 1623-1638.

29. Wang, X. M. and Zhang, L. C. (2003). An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(10), 1015-1022.
30. Rahman, M., Ramakrishna, S., Prakash, J. R. S. and Tan, D. C. G. (1999). Machinability study of carbon fiber reinforced composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 292-297.
31. Velayudham, A. and Krishnamurthy, R. (2007). Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3), 204-209.
32. König, W. and Grass, P. (1989). Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. *Annals of the CIRP*, 38(1), 119-124.
33. Malhotra, S. K. (1990). Some studies on drilling of fibrous composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 24, 291-300.
34. Abrate, S. and Walton, D. A. (1992). Machining of composite materials. Part I: Traditional methods. *Composites Manufacturing*, 3(2), 75-83.
35. An, Q., Cai, X., Xu, J. and Chen, M. (2014). Experimental investigation on drilling of high strength T800S/250F CFRP with twist and dagger drill bits. *International Journal of Abrasive Technology*, 6(3), 183-196.
36. Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X. and Jiang, X. (2019). Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*, 216, 168–186.
37. Shaw, M. C. (2004). *Metal cutting principles* (First edition). New York: Oxford University Press Inc., 594.
38. American Society for Metals (1989). *Machining of Aluminum and Aluminum Alloys*, Machining, Vol 16, ASM Handbook, ASM International, 761-804.
39. Mills, B. and Redford, A. H. (1983). *Machinability of Engineering Materials*. New York: Springer Science, 8-50.
40. Sahin, Y. (2000). *Talas Kaldırma Prensipleri II*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Sti., 57-91.
41. Tonshoff, H. L., Spintig, W., König, W. and Neises, A. (1994). Machining of Holes Developments in Drilling Technology. *Annals of the CIRP*, 43 (2), 551-560.
42. Hassan, M., Abdullah, J., Mahmud, A.S. and Supran, A. (2018). Effects of twist drill geometry and drilling parameters on CFRP/Aluminum stack up in single shot drilling. *SciFed Mater ResLett*, 2(2), 1-14.
43. Kutlu, L. (2008). *AL2024-T4 Alüminyumun Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplanmış Matkaplarla Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi ve Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 63-65.

44. Çakır, M. C. (2000). *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*. Bursa: Vipaş A.Ş, 390.
45. Akkurt, M. (1998). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları*. Ankara: Birsen Yayınevi, 23-90, 117-181.
46. Aamir, M., Giasin, K. and Rad, M. T. (2020). A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Material Research and Technology*, 9(6), 12484-12500.
47. Ezugwu, E. O. and Wang, Z. M. (1997). Titanium alloys and their machinability--a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 68(3), 262-274.
48. Mills, B. (1996). Recent developments in cutting tool materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 56(1-4), 16-23.
49. Heath, P. J. (2001). Developments in applications of PCD tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(1), 31-38.
50. Brookes, K. (1996). *World dictionary and handbook of hardmetals and hard materials* (Sixth Edition). Hertfordshire: International carbide data, 750.
51. Ostwald, P. F. and Munoz, J. (1997). *Manufacturing processes and systems* (Ninth Edition). New York: John Wiley & Sons., 148-162.
52. Smith, G. (2008). *Cutting Tool Technology*. London: Springer, 25.
53. Coelho, R. T., Yamada, S., Aspinwall, D. K. and Wise, M. L. H. (1995). The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(5), 761-774.
54. Schouwenaars, R., Jacobo, V. H. and Ortiz, A. (2009). Transition from normal to severe wear in PCD during high-speed cutting of a ductile material. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27(2), 403-408.
55. Polini, R., Barletta, M., Rubino, G. and Vesco, S. (2012). Recent Advances in the Deposition of Diamond Coatings on Co-Cemented Tungsten Carbides, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012 (1-2), 0-14.
56. Böhler Sert Maden ve Takım Sanayi ve Ticaret A.Ş. (1990). *Talaş kaldırma bilgileri*. İstanbul: Yeni Karar Yayıncılık, 31-42.
57. Kayacan, M. C., Çelik, S. A. ve Salman, Ö. (2004). Tornalama İşlemlerinde Kesici Takım Aşınmasının Bulanık Mantık ile Modellenmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 526.
58. Çakır, M. C. (2000). *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*. Bursa: Vipaş A.Ş, 350-390.
59. Yalçın, B. ve Yılmaz, N. (2004). Ark PVD Yüzey Kaplama Metoduyla Titanyum Nitrür (Tin) Kaplanmış Matkap Takımlarında Takım Aşınmasının Deneysel Olarak İncelenmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 531.

60. Avuncan, G. (1998). *Kesici Takımların Bilenmesi*. Gebze: Mavi Tanıtım ve Pazarlama Ltd. Sti. Yayınları, 62-80.
61. Şeker, U. (2000). *Talaşlı İmalatta Takım Tasarımı*. Yüksek Lisans Ders Notları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 39-45.
62. Çobanoğlu, T. ve Şeker, U. (2017 Kasım). *Karbon fiber takviyeli plastik kompozit ve titanyum malzemelerden oluşan istif panel yapıda delik delme sırasında titanyum sıcaklığındaki değişimin delik kalitesine ve talaş yığılmasına etkisi*. 8.Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumunda sunuldu, Antalya, 432-442.
63. Kim, D. and Ramulu, M. (2004). Drilling process optimization for graphite/bismaleimidetitanium alloy stacks. *Composite Structures*, 63(1), 101-114.
64. Zitoune, R., Krishnaraj, V. and Collombet, F. (2010). Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures*, 92(5), 1246-1255.
65. Çobanoğlu, T. (2016). *Kalifikasyon testleri*. Ankara: TUSAŞ-TAI, 1-50.
66. Kivak, T., Habalı, K. and Şeker, U. (2012). The Effect of Cutting Paramaters on The Hole Quality and Tool Wear During The Drilling of Inconel 718, *Gazi University Journal of Science*, 25(2), 533-540.
67. Sheth, S., Chauhan, P., Modi, B. S. and Pancholi, A. (2014, June). *Study and Investigate Effect of Cutting Parameters in Drilling on Cylindricity and Perpendicularity*. Paper presented at the 4th National Conference on “Recent Advances in Manufacturing”, Gujarat, 43-48.
68. Butler, D. (2014). *Surface Roughness Measurement*. Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics. Boston: Springer, 1944.
69. Dornfeld, D. and Min, S. (2010). *A Review of Burr Formation in Machining*. UC Berkeley, Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, 3-11.
70. Marques, A. T., Durao, L. M., Magalhaes, A. G. and Tavares, J. M. R. S. (2009). Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill. *Composites Science and Technology*, 69(14), 2376-2382.
71. Jahanjou, A. (2015). *Atlas Copco Hand Held Drills*. USA: Atlas Copco Tools and Assembly Systems LLC, 1-20.
72. Urban, N. A. (2005). *Analysis of machining quality in edge trimming of carbon fiber reinforced composite*. MS Thesis, Wichita State University, College of Engineering, Dept. of Industrial and Manufacturing Engineering.
73. Karpas, Y. and Polat, N. (2013). Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 62, 95-98.

74. Santiuste, C., Olmedo, A., Soldani, X. and Miguelez, H. (2012). Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(13), 875-885.
75. Asaithambi, S. and Gowri, S. Study on machining of CFRP composite using tin coated PCBN and uncoated PCBN cutting tool. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 37-42.
76. Kolar, P., Masek, P. and Zeman, P. (2014). Milling tools for cutting of fiber-reinforced plastic. *Journal of Machine Engineering*, 14 (2), 93-103.
77. Sorrentino, L. and Turchetta, S. (2011, August). *Milling of carbon fiber-reinforced plastics: Analysis of cutting forces and surface roughness*. Paper presented at the 18. International Conference on Composite Materials, Korea, 1-6.
78. Voss, R., Henerichs, M., Kuster, F. and Wegener, K. (2014). Chip root analysis after machining carbon fiber reinforced plastics (CFRP) at different fiber orientations. *Procedia Cirp*, 14, 217-222.
79. Shahrajabian, H., Hadi, M. and Farahnakian, M. (2012). Experimental investigation of machining parameters on machinability of carbon fiber/epoxy composites. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(3), 30-36.
80. Don, C. O. C., Popa, M. S., Sattel, S. and Gauggel, C. (2013). High performance tools for carbon fibre reinforced plastics machining. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 1, 39-48.
81. Nor, K. M. K., Che, H. C. H., Jaharah, A. G. and Nurul, A. A. (2012). Tool wear and surface roughness on milling carbon fiber-reinforced plastic using chilled air. *Journal of Asian Scientific Research*, 2(11), 593-598.
82. Asp., L. E. (1998). The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite. *Composite Science and Technology*, 58, 967-977.
83. Hu, N. S. and Zhang, L. C. (2004). Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 333-338.
84. Ramulu, M. (1997). Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites. *Sadhana*, 22(3), 449-472.
85. Kim, K. S., Lee, D. G., Kwak, Y. K. and Namgung, S. (1992). Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 32, 553-570.
86. Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R. and Malhotra, S. K. (1988). Machinability characteristics of fibre reinforced plastics composites. *Journal of Mechanical Working Technology*, 17, 195-204.
87. Koplev, A., Lystrup, A. and Vorm, T. (1983). The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites*, 14(4), 371-376.

88. Chand, N. and Sharma, M. K. (2008). Development and sliding wear behaviour of milled carbon fibre reinforced epoxy gradient composites. *Wear*, 264, 69-74.
89. Dharan, C. K. H. and Won, M. S. (2000). Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 415-426.
90. Denkena, B., Boehnke, D. and Dege, J. H. (2008). Helical milling of CFRP-titanium layer compinds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1, 64-69.
91. Wang, X., Wang, L. J. and Tao, J. P. (2004). Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 239-244.
92. Arul, S., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S. K. and Krishnamurthy, R. (2006). The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 252-259.
93. Abeao, A. M., Rubio, J. C. C., Faria, P. E. and Davim, J. P. (2008). The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composites. *Materials and Design*, 29, 508-513.
94. Velayudham, A. and Krishnamurthy, R. (2007). Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 204-209.
95. Singh, I., Bhatnagar, N. and Viswanath, P. (2008). Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study. *Materials and Design*, 29, 546-553.
96. Mohan, N. S., Kulkarni, S. M. and Ramachandra, A. (2007). Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 265-271.
97. Davim, J. P. and Reis, P. (2003). Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study. *Materials and Design*, 24(5), 315-324.
98. Tsao, C. C. and Hocheng, H. (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10), 1085-1090.
99. Persson, E., Eriksson, I. and Zackrisson, L. (1997). Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(2), 141-151.
100. Tsao, C. C. (2008). Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 206 (1-3), 405-411.

101. Ismail, S. O., Dhakal, H. N., Popov, I. and Beaugrand, J. (2016). Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites. *International Journal, Engineering Science and Technology*, 19, 2043-2052.
102. Meshreki, M., Damir, A., Sadek, A. and Attia, M. H. (2016, November). *Investigation of drilling of CFRP-aluminum stacks under different cooling modes*. Paper presented at the International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2016, Phoenix, 1-7.
103. Zitoune, R., Krishnaraj, V., Almabouacif, B. S. and Collombet, F. (2012). Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich. *Composites: Part B*, 43, 1480-1488.
104. Aydın, E. (2019). CFRP/Al istifli delmede matkap uç açısının itme kuvveti (Fz) ve takım aşınması üzerine etkilerinin araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1574-1583.
105. Krishnaraj, V., Zitoune, R. and Collombet, F. (2012). Study of drilling of multi-material (CFRP/Al) using Taguchi and statistical techniques. *Usak University Journal of Material Sciences*, 2, 95-109.
106. Feito, N., Alvarez, J. D., Cantero, J. L. and Miguelez, M. H. (2015). Influence of Special Tool Geometry in Drilling Woven CFRPs Materials. *The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015 Procedia Engineering*, 132, 632-638.
107. BAPS 188-007. (2015). *Drilling of composites and composite/metallic assemblies*. Canada: Bombardier Aerospace Process Specifications, 1-20.
108. Krishnaraj, V., Prabukarthi, A., Ramanathan, A., Elanghovan, N., Kumar, M. S., Zitoune, R. and Davim, J. P. (2012). Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) laminates. *Composites Part B Engineering*, 43(4), 1791-1799.
109. AIPS 01-02-005. (2014). *Preparation of holes in fibre reinforced plastic (FRP) and mixed (FRP/METAL) assemblies for fastening*. France: Airbus S.A.S. Engineering Directorate, 7-12.
110. ABS 1707. (2016). *Hole geometries for use with protruding and countersunk head fasteners and specific nuts*. France: Airbus S.A.S. Engineering Directorate, 14-24.
111. AIPS 03-11-001. (2012). *Machining of metallics*. France: Airbus S.A.S. Engineering Directorate, 4-7.
112. Rathod, C. M., Chudasama, M. and Darji, S. (2015). An Investigation of hole size, circularity and delamination during drilling operation of carbon fiber reinforced polymer with using ANOVA. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, 2(1), 53-59.

113. Ameer, M. F., Habak, M., Kenane, M., Aouici, H. and Cheikh, M. (2017). Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: cases of exit delamination and cylindricity error. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9), 2557-2571.
114. Heisela, U. and Pfeifrothb, T. (2012). Influence of Point Angle on Drill Hole Quality and Machining Forces when Drilling CFRP. *Procedia CIRP*, 1, 471-476.
115. Rawat, S. and Attia, H. C. (2009). Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach. *CIRP Annals*, 58, 105-108.
116. Alcon, M. A., Lacalle, L. N. L. and Zacarias, F. F. (2020). Multiple Sensor Monitoring of CFRP Drilling to Define Cutting Parameters Sensitivity on Surface Roughness, Cylindricity and Diameter. *Materials*, 13(12), 2796.
117. Nguyen, D., Voznyuk, V., Bin Abdullah, M. S., Kim, D. and Kwon, P. Y. (2019, June). *Tool Wear of Superhard Ceramic Coated Tools in Drilling of CFRP/Ti Stacks*. Paper presented at the 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Pennsylvania, V002T03A089.
118. Melentiev, R., Priarone, P. C., Robiglio, M. and Settineri, L. (2016). Effects of Tool Geometry and Process Parameters on Delamination in CFRP Drilling: An Overview. *Procedia CIRP*, 45, 31-41.
119. Murphy, C., Byrne, G. and Gilchrist, M. D. (2002). The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials. *Journal of Engineering Manufacture*, 216(2), 143-152.
120. Jia, Z., Fu, R., Niu, B., Qian, B., Bai, Y. and Wang, F. (2016). Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, 110, 55-65.
121. Ramirez, C., Poulachon, G., Rossi, F. and M'Saoubi, R. (2014). Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling. *Proc CIRP*, 13, 163-168.
122. AIPI 01-02-005. (2012). *Preparation of holes in fibre reinforced plastic (FRP) and mixed (FRP/METAL) assemblies for fastening*. France: Airbus Operations Manufacturing Engineering Directorate, 22-27.
123. Alonso, U., Calamaz, M., Girot, F. and Iriondo, E. (2019). Influence of flute number and stepped bit geometry when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 356-370.
124. Aydın, E. ve Nalbant, M. (2020). CFRP/Al-7075 istifli delmede matkap uç açılarının delinebilirlik üzerine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 917-931.
125. Zitoune, R., Krishnaraj, V., Collombet, F. and Roux, S. L. (2016). Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks. *Composite Structures*, 146, 148-158.

126. Liang, X. and Wu, D. (2019). Tribological properties of carbon-fibre-reinforced plastic against tungsten carbide under dry condition. *Tribology International*, 134, 118-128.
127. Geier, N., Davim, J. P. and Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A*, 125, 1-15.
128. Bayraktar, Ş. and Turgut, Y. (2020). Determination of delamination in drilling of carbon fiber reinforced carbon matrix composites/Al 6013-T651 stacks. *Measurement*, 154, 1-11.
129. Feito, N., Alvarez, J. D., Alvarez, A. D., Cantero, J. L. and Miguelez, M. H. (2014). Experimental Analysis of the Influence of Drill Point Angle and Wear on the Drilling of Woven CFRPs. *Materials*, 7, 4258-4271.
130. Angelone, R., Caggiano, A., Improta, I., Nele, L. and Teti, R. (2019). Characterization of hole quality and temperature in drilling of Al/CFRP stacks under different process condition. *Procedia Manufacturing*, 79, 319-324.
131. Zitoun, R., Krishnaraj, V. and Collombet, F. (2010). Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures*, 92, 1246-1255.
132. Barik T., Sarangi S. and Pal K. (2020). *Assessment on Hole Quality During Drilling of Al/CFRP Stack*. Advances in Unconventional Machining and Composites, Singapore: Springer, 757-770.
133. Wang, C. Y., Chen, Y. H., An, Q. L., Cai, X. J., Ming, W. W. and Chen, M. (2015). Drilling Temperature and Hole Quality in Drilling of CFRP/Aluminum Stacks Using Diamond Coated Drill. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(8), 1689-1697.
134. Zitoun, R., Krishnaraj, V. and Collembet, F. (2010). Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures*, 92, 1246-1255.
135. Kuo, C. L., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Thomas, W., Bradley, S., Pearson, D., Saoubi, R. M. and Leahy, W. (2014). The effect of cutting speed and feed rate on hole surface integrity in single-shot drilling of metallic-composite stacks. *Procedia CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI)*, 13, 405-410.



GAZİ GELECEKTİR...