



**AA7XXX VE SERAMİK PARÇACIKLARDAN
OLUŞAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE İŞLENEBİLİRLİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tuğçe YILDIZ

**2021
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR**

**AA7XXX VE SERAMİK PARÇACIKLARDAN OLUŞAN FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE
İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tuğçe YILDIZ

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR**

**KARABÜK
Mayıs 2021**

Tuğçe YILDIZ tarafından hazırlanan “AA7XXX VE SERAMİK PARÇACIKLARDAN OLUŞAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 21/05/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Muammer NALBANT (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ (GÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. İsmail ESEN (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Tuğçe YILDIZ

ÖZET

Doktora Tezi

AA7XXX VE SERAMİK PARÇACIKLARDAN OLUŞAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tuğçe YILDIZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR

Mayıs 2021, 130 sayfa

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik ve delik delme yöntemi ile işlenebilirlik özelliklerinin incelenmiştir. Bu amaçla, alüminyum matrisli, seramik takviyeli, üç, dört ve altı tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak AA7075 alaşımı ve takviye elemanı olarak ise alüminyum oksit (Al_2O_3) seramik partikülleri kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonları için, mikroyapı analizleri, mikro sertlik ölçümleri ve çapraz kırılma testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda seramik partiküllerin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı ve takviye miktarının artması ile topaklanma eğiliminin de arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek mikro sertlik değeri dört tabakalı numunenin ağırlıkça %45 Al_2O_3 içeren tabakasinda 182 Hv olarak ölçülmüştür. En

yüksek çapraz kırılma mukavemeti üç tabakalı numunelerde yükün yüksek takviye içeren tabakaya uygulanması durumunda 658 MPa olarak ölçülmüştür.

İşlenebilirlik performanslarının belirlenmesi amacıyla AA7075/Al₂O₃ üç tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler 6 mm çapında kaplamasız karbür matkap kullanılarak sabit $V_c = 25$ m/dk kesme hızında delinmiştir. Delik delme işleminde farklı uç açısı ($\epsilon = 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ$), helis açısı ($\omega = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$), ve ilerleme miktarı ($f_n = 0,075, 0,1, 0,15$ mm/dev) değerleri kullanılmıştır. En düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü değerini elde edildiği kesme parametrelerin belirlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda giriş parametrelerinin, işlenmiş delik yüzeyleri, takım aşınmaları ve talaş formları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Gri ilişkisel analiz sonucuna göre en düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 19 numaralı deneyde ($\epsilon = 140^\circ, \omega = 0^\circ, f_n = 0,075$ mm/dev), $F_z = 269,32$ N, $M_c = 45,00$ Ncm, $R_a = 0,160$ μ m olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme, delik delme, gri ilişkisel analiz, ANOVA, AA7075, Al₂O₃.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

PRODUCTION OF FUNCTIONAL GRADED MATERIALS CONSISTING OF AA7XXX AND CERAMIC PARTICLES AND INVESTIGATION OF MACHINABILITY CHARACTERISTICS

Tuğçe YILDIZ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Machine Engineering**

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Gökhan SUR

May 2021, 130 pages

In this study, the mechanical and drilling properties of functionally graded materials were investigated. For this purpose, aluminum matrix, ceramic reinforced, three, four and six layered functionally graded materials were produced by using powder metallurgy method. AA7075 alloy as matrix material and aluminum oxide (Al_2O_3) ceramic particles were used as reinforcement elements. Microstructure analysis, microhardness measurements, and transverse rupture strength tests were performed for the characterization of the produced composites. As a result of the studies, it was observed that the ceramic particles were homogeneously distributed in the matrix material and the agglomeration tendency increased with the increase in the amount of reinforcement. The highest microhardness value was measured as 182 Hv in the layer containing 45 wt.% Al_2O_3 of the four-layered sample. The highest transverse rupture

strength was measured as 658 MPa in the three layered samples when the load was applied to the layer with high reinforcement.

In order to determine the machinability performances, AA7075 / Al₂O₃ three-layered FDMs were drilled using an uncoated carbide drill with a diameter of 6 mm at a constant $V_c = 25$ m/min cutting speed. In the drilling process, different tip angles ($\epsilon = 120^\circ, 130^\circ, 140^\circ$), helix angles ($\omega = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$), and feed rate ($f_n = 0,075, 0,1, 0,15$ mm/rev) values were used. Gray Relational Analysis method, which is one of the multi-criteria decision-making methods, was used to determine the cutting parameters from which the lowest thrust force, drilling moment, and surface roughness value were obtained. As a result of experimental studies, the effects of input parameters on machined hole surfaces, tool wear, and chip morphology were investigated. According to the gray relational analysis result, the lowest thrust force, drilling moment and average surface roughness values were determined as $F_z = 269.32$ N, $M_c = 45.00$ Ncm, $R_a = 0.160$ μ m in the experiment numbered 19 ($\epsilon = 140^\circ, \omega = 0^\circ, f_n = 0,075$ mm/rev) .

Keywords : Functionally graded materials, drilling, gray relational analysis, ANOVA, AA7075, Al₂O₃.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni yönlendiren başta danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SUR olmak üzere, tez izleme komisyonumda bulunan değerli hocalarım Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA ve Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ hocalarıma yardım ve katkılarından dolayı teşekkür ederim. Bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımda sağladıkları imkanlardan dolayı Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ve İmalat Mühendisliği Bölümlerine teşekkür ederim. Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen canım annem Fadime KÖDEN'e, biricik eşim Hacı Bayram YILDIZ' a ve sabırla benim işlerimin bitmesini bekleyen oğlum Hamza Alp YILDIZ'a teşekkür ederim.

.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
GENEL BİLGİLER	5
2.1. KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER.....	7
2.2.1. FDM’lerin Sınıflandırılması	8
2.2.2. FDM’lerin Kullanım Alanları.....	10
2.2.3. FDM’lerin Üretim Yöntemleri	11
2.2.3.1. Toz Metalurjisi Yöntemi	12
2.3. TALAŞLI İMALATTA DELİK DELME İŞLEMİ VE TERMİNOLOJİSİ ..	13
2.3.1. Matkap Geometrisi ve Kısımları	15
2.3.2. Delik Delme İşlemini Etkileyen Kesme Parametreleri.....	21
2.3.3. Delme Kuvveti ve Moment Etkileri	24
BÖLÜM 3	31
LİTERATÜR TARAMASI.....	31
3.1. FDM’LERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	31
3.2. DELİK DELME İŞLEMİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	42

3.3. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRMESİ	51
BÖLÜM 4	52
MALZEME VE YÖNTEM	52
4.1. FDM ÜRETİMİNDE KULLANILAN TOZLAR.....	53
4.2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİMİ	54
4.2.1. Tozların Hazırlanması	55
4.2.2. Tozların Preslenmesi	55
4.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU	56
4.4. SERTLİK TESTİ.....	56
4.5. ÇAPRAZ KIRILMA TESTİ	57
4.6. DELİK DELME TESTLERİ.....	58
4.6.1. Takım Tezgâhı ve Takım Tutucu	58
4.6.2. Kesici Takımlar ve Özellikleri.....	59
4.6.3. Delik Delme Parametreleri ve Deney Tasarımı.....	60
4.6.4. Kesme Kuvveti ve Delme Momentinin Ölçümü	61
4.6.5. Delme Testi Verilerinin Değerlendirilme Metodolojisi	62
4.6.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü	63
4.6.7. İşlenmiş Yüzey, Takım aşınması ve Talaş Yapısının Görüntülenmesi ..	64
4.7. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)	64
4.8. GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ (GİA).....	65
BÖLÜM 5	68
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	68
5.1. METALOGRAFİK VE MEKANİK ÖZELLİKLER İLE İLGİLİ SONUÇLAR	68
5.1.1. FDM’lerin Mikroyapı İncelemeleri	68
5.1.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları	72
5.1.3. Çapraz Kırılma Deneyi Sonuçları.....	74
5.2. FDM’LERİN DELİK DELME DENEYLERİ	76
5.2.1. Delme Parametrelerine Göre İlerleme Kuvveti ve Delme Momentinin Değerlendirilmesi	77
5.2.1.1. Helis Açısının İlerleme Kuvvetine ve Delme Momentine Etkisi ...	79
5.2.1.2. Uç Açısının İlerleme Kuvvetine ve Delme Momentine Etkisi	82

Sayfa

5.2.1.3. İlerleme Miktarının İlerleme Kuvvetine ve Delme Momentine Etkisi	83
5.2.2. Delme Parametrelerinde Göre Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi	84
5.2.3. ANOVA ile Veri Analizi ve Değerlendirilmesi	87
5.2.4. Gri İlişkisel Analiz Sonuçları	90
5.2.5. İşlenmiş Yüzeylerin Değerlendirilmesi	94
5.2.6. Takım Aşınmalarının Değerlendirilmesi	97
5.2.7. Talaş Yapılarının Değerlendirilmesi.....	100
 BÖLÜM 6	 104
SONUÇ VE ÖNERİLER	104
 KAYNAKLAR	 108
 EK AÇIKLAMALAR A.	 117
ÖZGEÇMİŞ	130

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi.	5
Şekil 2.2. Takviye elemanına göre sınıflandırılan kompozit malzeme türlerinin gösterimi; (a) sürekli elyaf takviyeli kompozit, (b) kılcal kristal (wiskers) takviyeli kompozit, (c) partikül takviyeli kompozit, (d) tabakalı kompozit.	6
Şekil 2.3. FDM'lerin şematik gösterimi: a) Sürekli derecelendirilmiş, b) kademeli derecelendirilmiş FDM	8
Şekil 2.4. Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM.....	9
Şekil 2.5. Gözenekliliği derecelendirilmiş FDM – İnsan kemiği.....	9
Şekil 2.6. Mikroyapısı derecelendirilmiş FDM.....	10
Şekil 2.7. FDM kullanım alanları.....	11
Şekil 2.8. Toz metalurjisi yöntemi ile FDM üretiminin şematik gösterimi	12
Şekil 2.9. Helisel oluklu matkap ucunun geometrik unsur ve kısımları.	15
Şekil 2.10. Matkap ucu kesme hattı geometrik unsurlarının incelendiği takım ve kesit düzlemleri.	16
Şekil 2.11. Kesici kenar üzerinde kesit düzlemlerinde kesme geometrisinin değişimi.....	17
Şekil 2.12. Matkap ucu öz kalınlığının değişimi.....	18
Şekil 2.13. Kesici ağız sayısına göre matkap uçları. a) iki ağızlı ve b) üç ağızlı matkap ucu.	19
Şekil 2.14. Farklı matkaplara ait uç açılarının gösterimi.	19
Şekil 2.15. Farklı matkaplara ait helis açılarının gösterimi.	20
Şekil 2.16. Matkap ucu helisel oluk geometrisi.	21
Şekil 2.17. Matkap uçlarında yaygın olarak kullanılan uç bileme geometrileri.	21
Şekil 2.18. Matkap ucu ve kesme kenarı boyunca kesme hızının değişimi.	22
Şekil 2.19. Matkap uçlarıyla delme işleminde talaş kesiti.	24
Şekil 2.20. Matkap ucu ile delme işlemi kuvvet ve moment şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.21. Özgül kesme direncinin hesaplanması; a) Kırılma tokluğu test yönleri, b) Talaş kalınlığının özgül kesme kuvvetine logoritmik etki grafiği ve “m” üs katsayısı.	26
Şekil 3.1. Numune kalınlığı boyunca SiC ve sertlik dağılımı. a) A356, b) AA2124	32

Şekil 3.2. Takviye boyutunun ve % ağırlıkça oranının numunenin mekanik özelliklerine etkisi	34
Şekil 3.3. AA7075/B ₄ C FDM'lerin presleme sıcaklığına ve basıncına göre sertlik ve çapraz kırılma dayanımları	38
Şekil 3.4. Çapraz kırılma deneyinde yükü taşıyan yüzeylerin şematik gösterimi. a) AA7075/B ₄ C kompozit yüzeyi. b) Takviyesiz AA7075 malzeme yüzeyi.....	39
Şekil 3.5. Farklı boyutlara sahip B ₄ C partiküllerinin mikroyapı içerisindeki dağılımlarının görüntüsü. a) ve b) 56,9 µm boyutundaki B ₄ C. c) ve d) 4 µm boyutundaki B ₄ C. e) ve f) 2 µm boyutundaki B ₄ C' nin mikroyapı içerisindeki dağılımı	40
Şekil 3.6. ZrO ₂ / NiCr FDM'nin tabakalarına ait tozların bileşimi.....	41
Şekil 3.7. İşlem parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri	43
Şekil 3.8. Delme sıcaklığı için kontrol faktörlerinin ortalama yanıt grafikleri	45
Şekil 4.1. Deney akış şeması.....	52
Şekil 4.2. a) AA7075 ve b) Al ₂ O ₃ tozlarının SEM görüntüleri.....	54
Şekil 4.3. Üretilen FDM'lerin şematik görüntüsü. a) üç tabakalı, b) dört tabakalı ve c) altı tabakalı numunenin şematik gösterimi.	54
Şekil 4.4. Fonksiyonel derecelendirilmiş numune üretiminde kullanılan kalıba ait	55
Şekil 4.5. FDM üretiminin şematik gösterimi.....	56
Şekil 4.6. Çapraz kırılma test cihazı. a) Çapraz kırılma test cihazının fotoğraf görüntüsü, b) Çapraz kırılma test aparatı ve test numunesinin şematik gösterimi.	57
Şekil 4.7. Delik delme işleminin fotoğraf görüntüsü. a) Takım tezgahı, b) Hidrolik.....	59
Şekil 4. 8. İşleme deney düzeneğinin şematik gösterimi.	62
Şekil 4.9. Delme işleminde matkap ucunun konumu.....	63
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü. a) Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı, b) Ölçüm yapılan numune.....	64
Şekil 5.1. N3, N4 ve N6 numunelerinin tabakalarına ait SEM görüntüleri.	69
Şekil 5.2. N3, N4 ve N6 numunelerinin tabakalar arası geçiş bölgelerine ait SEM görüntüleri.....	70
Şekil 5.3. N3, N4 ve N6 numunelerinin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakalarının SEM görüntüleri; a) N3-60, b) N4-60 ve c) N6-60 tabakasının görüntüsü.	71
Şekil 5.4. FDM'lerin tabakalarına ait mikro sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi; a) N3 numunesinin, b) N4 numunesinin ve c) N6 numunesinin tabakalarına ait mikro sertlik değerleri.	73
Şekil 5.5. N3, N4 ve N6 numunelerinin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakalarının mikro sertlik değerleri.	73

Şekil 5.6. N3 ve N6 numunelerinin aynı miktarda takviye içeren tabakalarının mikro sertlik değerleri.....	74
Şekil 5.7. N3,N4 ve N6 numunelerin çapraz kırılma dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi: a) N3 numunesinin, b) N4 numunesinin ve c) N6 numunesinin çapraz kırılma dayanımı değerleri.....	75
Şekil 5.8. N3, N4 ve N6 numunelerin çapraz kırılma dayanım değerlerinin karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.9. Delme işleminde kesme kuvvetleri ve moment etkileri.....	78
Şekil 5.10. Helis açısının ilerleme kuvvetine etkisinin grafiksel gösterimi.....	80
Şekil 5.11. Helis açısının delme momentine etkisinin grafiksel gösterimi.....	81
Şekil 5.12. Uç açısının ilerleme kuvvetine etkisinin grafiksel gösterimi.....	82
Şekil 5.13. Uç açısının delme momentine etkisinin grafiksel gösterimi.....	83
Şekil 5.14. İlerleme miktarının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi.....	86
Şekil 5.15. En düşük gri ilişkisel dereceye sahip olan deneye ait delik yüzey görüntüleri.....	95
Şekil 5.16. En yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olan deneye ait delik yüzey görüntüleri.....	96
Şekil 5.17. Farklı uç açısına sahip takımlar üzerinde oluşan aşınma görüntüleri: a) 120°, b) 130° ve c) 140°.....	98
Şekil 5.18. Farklı helis açısına sahip takımlar üzerinde oluşan aşınma görüntüleri: a) 0°, b) 15° ve c) 30°.....	99
Şekil 5.19. Delik delme deneyleri sonucunda elde edilen genel talaş formunun SEM görüntüsü.....	100
Şekil 5.20. Farklı ilerleme miktarının değerlerinde göre oluşan talaş formlarının görüntüsü: $\varepsilon = 120^\circ$, $\omega = 0^\circ$, a) $f_n = 0,075$ mm/dev, b) $f_n = 0,010$ mm/dev ve c) $f_n = 0,150$ mm/dev.....	101
Şekil 5.21. Farklı helis açısına sahip takımlarla elde edilen talaş formlarının görüntüsü: $\varepsilon = 120^\circ$, $f_n = 0,150$ mm/dev a) $\omega = 0^\circ$, b) $\omega = 15^\circ$, c) $\omega = 30^\circ$	102
Şekil 5.22. Farklı uç açısına sahip takımlarla elde edilen talaş formlarının görüntüsü: $\omega = 0^\circ$, $f_n = 0,150$ mm/dev a) $\varepsilon = 120^\circ$, b) $\varepsilon = 130^\circ$, c) $\varepsilon = 140^\circ$	103
Şekil Ek A.1. Üç tabakalı FDM'nin %20 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.....	118
Şekil Ek A.2. Üç tabakalı FDM'nin %40 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.....	118
Şekil Ek A.3. Üç tabakalı FDM'nin %60 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.....	119

Şekil Ek A.4.	Üç tabakalı numunenin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %40 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	119
Şekil Ek A.5.	Üç tabakalı numunenin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %40 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	120
Şekil Ek A.6.	Dört tabakalı FDM'nin %15 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	120
Şekil Ek A.7.	Dört tabakalı FDM'nin %30 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	121
Şekil Ek A.8.	Dört tabakalı FDM'nin %45 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	121
Şekil Ek A.9.	Dört tabakalı FDM'nin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	122
Şekil Ek A.10.	Dört tabakalı numunenin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %45 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	122
Şekil Ek A.11.	Dört tabakalı numunenin %45 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %30 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	123
Şekil Ek A.12.	Dört tabakalı numunenin %30 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %15 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	123
Şekil Ek A.13.	Altı tabakalı FDM'nin %10 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	124
Şekil Ek A.14.	Altı tabakalı FDM'nin %20 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	124
Şekil Ek A.15.	Altı tabakalı FDM'nin %30 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	125
Şekil Ek A.16.	Altı tabakalı FDM'nin %40 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	125
Şekil Ek A.17.	Altı tabakalı FDM'nin %50 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	126
Şekil Ek A.18.	Altı tabakalı FDM'nin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.	126
Şekil Ek A.19.	Altı tabakalı numunenin %60 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %50 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	127
Şekil Ek A.20.	Altı tabakalı numunenin %50 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %40 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	127
Şekil Ek A.21.	Altı tabakalı numunenin %40 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %30 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	128
Şekil Ek A.22.	Altı tabakalı numunenin %30 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %20 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	128

Şekil Ek A.23. Altı tabakalı numunenin %20 Al ₂ O ₃ içeren tabakası ile %10 Al ₂ O ₃ içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.	129
---	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	Matkap ucunun kesit görünümündeki açı değerleri	17
Çizelge 2.2.	Bazı iş malzemeleri için ilerleme oranına bağlı özgül kesme direnci değerleri.	27
Çizelge 3.1.	Numune üretiminde kullanılan değişken türleri ve değerleri.	33
Çizelge 3.2.	Deneylerde kullanılan FDM türleri ve kimyasal bileşimlerinin gösterimi.	35
Çizelge 3.3.	Numunelerin farklı tabaka ve takviye oranlarındaki özellikleri	37
Çizelge 3.4.	AA6061 / B ₄ C kompozitlerinin frezeleme işleminde kullanılan işleme parametreleri.	43
Çizelge 3.5.	Delik delme işlem faktörleri ve seviyeleri.	44
Çizelge 3.6.	Delik delme işlemlerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri. .	45
Çizelge 3.7.	İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.	46
Çizelge 3.8.	Delik delme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri...	47
Çizelge 3.9.	Delme işlemlerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.	48
Çizelge 3.10.	Ramulu vd. çalışmalarında kullandıkları kontrol faktörleri ve seviyeleri.	49
Çizelge 3.11.	Ahamed ve arkadaşlarının metal matrisli hibrit kompozitlerin delinmesinde kullandıkları kontrol faktörleri ve seviyeleri.	50
Çizelge 4.1.	AA7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu.	53
Çizelge 4.2.	Numune üretiminde kullanılan tozların özellikleri	53
Çizelge 4.3.	Johnford VMC-550 dik işleme merkezi teknik özellikleri	58
Çizelge 4.4.	Delik delme işleminde kullanılan matkap uçları ve teknik özellikleri.	59
Çizelge 4.5.	Delik delme deneylerinde kullanılan delme parametreleri ve seviyeleri.	60
Çizelge 4.6.	Tam faktöriyel deney tasarımı.	61
Çizelge 5.1.	FGM'nin delinmesinde delme parametrelerine bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvveti ve delme momenti ortalama değerleri.	79
Çizelge 5.2.	FDM'nin delinmesinde delme parametrelerine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.	84
Çizelge 5.3.	İlerleme Kuvvetine etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.....	87
Çizelge 5.4.	Deney parametrelerine ait ortalama ilerleme kuvveti değerleri.	88
Çizelge 5.5.	Delme Momentine etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.....	88

Sayfa

Çizelge 5.6. Deney parametrelerine ait ortalama delme momenti değerleri.....	89
Çizelge 5.7. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.....	89
Çizelge 5.8. Deney parametrelerine ait ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.	90
Çizelge 5.9. Gri ilişkisel analizde kullanılan deney tasarımına bağlı olarak elde edilen bağımlı ve bağımsız değişkenler.	91
Çizelge 5.10. Gri ilişkisel analiz sonuçları.....	92
Çizelge 5.11. Gri ilişkisel dereceye etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları...	93
Çizelge 5.12. Deney Parametrelerine ait ortalama gri ilişkisel dereceye değerleri. ..	93



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al_2O_3	: alüminyum oksit
SiC	: silisyum karbür
B_4C	: bor karbür
AA	: alüminyum alaşımı
Al	: alüminyum
Ti	: titanyum
Cu	: bakır
Mg	: magnezyum
γ	: talaş açısı
α	: boşluk açısı
β	: kama açısı
V_c	: kesme hızı
D_M	: matkap çapı
n	: devir sayısı
V_f	: ilerleme hızı
fn	: devir başına ilerleme
a_e	: kesme genişliği
a_p	: kesme derinliği
b	: kesici kenar uzunluğu
h	: deforme olmamış talaş kalınlığı
A	: talaş kesiti
k_C	: özgül kesme direnci
F_R	: radyal kuvvetler
F_F	: ilerleme kuvveti
F_C	: esas kesme kuvveti
M_T	: delme momenti

M_μ	: sürtünme momenti
M_D	: delme momenti
k_T	: takım faktörü
k_γ	: talaş açısı faktörü
k_a	: aşınma faktörü
k_v	: kesme hızı faktörü
Z	: kesici uç aız sayısı
ω	: helis açısı
ε	: matkap uç açısı
Q	: talaş debisi
N3	: Üç tabakalı numune
N4	: dört tabakalı numune
N6	: altı tabakalı numune
HBN	: brinel sertliği
HV	: vickers sertliği
$^{\circ}\text{C}$	: santigrat derece
$^{\circ}$	: derece
%	: yüzde oran
MPa	: mega paskal
m	: metre
mm	: milimetre
μm	: mikrometre
dev	: devir
dk	: dakika
max	: maksimum

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit

FDM : Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
CVD : Buhar Biriktirme
ANOVA : Analysis of Variance (Varyans Analizi)
GİA : Gri İlişkisel Analiz
SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopi)



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv, havacılık, uzay, nükleer enerji, optik ve elektronik gibi birçok endüstriyel alanlarda geleneksel malzemeler yerine kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kompozit malzemeler ihtiyaç duyulan özelliklere göre farklı kombinasyonlarda üretilebilmektedir. Buna bağlı olarak da kompozit malzemeler düşük yoğunluklarına karşı mükemmel mekanik, kimyasal, elektriksel ve termal özellikler sergilemektedir [1]. Kompozit yapı; ana faz (matris malzemesi), takviye elemanı ve ara yüzey bağı olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Matris fazının görevi; tasarlanan kompozit yapının takviye elemanlarının yer değiştirmesini engellemek, yapıyı bir arada tutmak ve oluşan dış kuvvetleri ara yüzey bağı vasıtasıyla takviye elemanlarına eşit oranlarda iletmektir. Takviye elemanının görevi; ana fazın tane büyüklüğünü kontrol etmek ve ana faz tarafından iletilen yüklere karşı koymaktır. Ara yüzey bağının görevi ise ana fazın takviye fazına iletmek istediği yükü herhangi bir deformasyona uğramadan takviye fazına iletmektir [2].

Kompozit malzemelerin oluşum seçeneklerindeki çeşitlilik sınıflandırılmalarında da çeşitliliğe yol açmaktadır. Kompozit malzemeler, takviye elemanı ve matris elemanının türüne göre iki şekilde sınıflandırılırlar. Kompozit malzemeler takviye elemanın türüne göre; elyaf takviyeli kompozit, kılcal kristal (wiskers) takviyeli kompozit, partikül takviyeli kompozit ve tabakalı kompozit olmak üzere dört gruba, matris malzemesinin türüne göre ise; metal matrisli kompozit (MMK), seramik matrisli kompozit (SMK), polimer matrisli kompozit (PMK) ve karbon esaslı kompozit malzemeler olmak üzere dört gruba ayrılırlar [2].

Kompozit malzemeler arasında MMK'ler en fazla kullanılan malzeme gruplarındandır. MMK'ler düşük yoğunluklu alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg) ve bakır (Cu) gibi matris malzemelerine, yüksek dayanımlı

seramiklerin farklı üretim yöntemleri kullanılarak takviye edilmesiyle üretilirler [3]. Alüminyum düşük yoğunluğa, iyi mekanik özelliklere ve korozyon dayanımına sahip olmasından dolayı MMK'lerde en çok tercih edilen matris malzemesidir. Alüminyum esaslı matrisli kompozitler, yaygın olarak alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) gibi seramik partiküllerin ilavesi ile farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilirler [4]. İleri teknoloji uygulamalarında geleneksel yöntemlerle üretilen kompozit malzemelerin yetersiz kalmasından dolayı kademeli veya sürekli değişim gösteren fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere (FDM'lere) ihtiyaç duyulmaktadır. FDM'ler kalınlık boyunca istenilen özelliklere göre farklı malzemelerin değişen oranlarda bir araya getirilmesi ile üretilirler [5]. FDM'ler ileri teknoloji uygulamalarında farklı termal genleşme katsayısı, mukavemet, süneklik veya sertliğe sahip malzemelerin birleştirilmesinde katmanlar arası ayrılmanın önüne geçebilmek için kullanılırlar [6]. FDM'lerin üretiminde, termal püskürtme, kimyasal buhar biriktirme, santrifüj döküm ve toz metalurjisi gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır [7]. Yaygın olarak toz metalurjisi yöntemi kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi ergitme yöntemleriyle karşılaştırıldığında en önemli avantajı üretim esnasında düşük işlem sıcaklığı gereksinimidir. Düşük sıcaklık matris fazı ile takviye fazı arasında istenmeyen fazların oluşum ihtimalini ortadan kaldırmaktadır. Metal matris içerisinde seramik partiküllerin homojen bir şekilde dağılması ve gözeneklilik oranlarının düşük olması, toz metalurjisinin FDM üretiminde yaygın olarak kullanılmasının bir diğer nedenlerindendir [8].

Toz metalurji yöntemleriyle üretilen kompozitlerde zaman zaman ikinci bir imalat ile işleme ihtiyacı duyulmaktadır. İmalat işlemlerinde yaygın olarak; tornalama, frezeleme ve delme işlemleri gibi geleneksel talaş kaldırma işlemleri kullanılmaktadır. FDM'ler bünyelerindeki sert, aşındırıcı özelliğe sahip takviye elemanlarından dolayı işlenmesi zor malzemelerdir [9]. Takviye elemanlarının aşındırıcı özellikleri, kesici takımın hızlı aşınmasına, takım ömrüne, iş parçası yüzey kalitesine, iş parçası ölçü hatalarına ve iş kayıplarına neden olmaktadır. FDM'ler yaygın olarak özel tasarlanmış kesici takımlarla ve önceden belirlenmiş işleme şartları ile şekillendirilmektedir. Delme operasyonu, genellikle birleştirme ve montaj öncesi yapılması gereken son talaş kaldırma işlemidir. Delme işlemi esnasında oluşabilecek problemler, malzemenin hurdaya ayrılması ve maliyet kayıplarına neden olmaktadır [10]. Yapılan literatür

araştırmalarında, FDM'lerin delme özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan araştırmaların az olduğu gözlemlenmiştir. İleri teknoloji ürünlerinde kullanılan ve gelecekte büyük önem arz edeceği düşünülen FDM'lerin delme şartlarının belirlenmesi ve temel işlenebilirlik çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, farklı takviye oranlarına ve farklı kademe sayılarına sahip FDM'lerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi, üretilen malzemelerin karakterizasyonu, delme özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak alüminyum serileri arasında en yüksek mukavemet değerine sahip ve ısıl işlem ile mukavemetlen dirilebilen, havacılık ve yapısal uygulamalarda sıklıkla tercih edilen AA7XXX serisi alaşımlarından AA7075 alaşımı kullanılmıştır. Takviye elamanı olarak ise yüksek sertlik ve aşınma dayanımına sahip olan, alüminyum matris içerisinde homojen partikül dağılımı gösteren Al₂O₃ seramik partikülleri kullanılmıştır [11]. Bu çalışmada hedeflenen amaca ulaşmak için aşağıda belirtilenler gerçekleştirilmiştir.

- Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak FDM'lerin üretilmesi ve numunelerin karakterizasyonu işleminin yapılması. Bu süreçte, üretilecek olan FDM grubuna göre AA7075 ($\leq 150 \mu\text{m}$) toz malzemeye Al₂O₃ ($\leq 10 \mu\text{m}$) tozu ilave edilmiş ve kademelere ait toz karışımları ayrı ayrı kaplarda üç boyutlu karışım sağlayan bir cihaz yardımıyla karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar kalıp içerisine malzeme gruplarına göre ayrı ayrı serilerek malzeme üretimleri gerçekleştirilmiştir. 3 farklı grupta FDM  retilmiştir. 1. Grup numuneler 3 kademeli olup kademelerdeki Al₂O₃ miktarı ağırlıkça %20-40-60 şeklindedir. 2. Grup numuneler 4 kademeli olup kademelerdeki Al₂O₃ miktarı ağırlıkça %15-30-45-60 şeklindedir. 3. Grup numuneler 6 kademeli olup kademelerdeki Al₂O₃ miktarı ağırlıkça % 10-20-30-40-50-60 şeklindedir.
- Literatür incelemesi ve kesici takım firmasının önerilerine göre belirlenen kesici takım ve kesme parametrelerine göre delme işleminin yapılması, oluşan kuvvet ve momentin dinamometre ile  l  lmesi. Bu süreçte deney şablonları oluşturulmuştur ve şablonda bulunan tüm deneyler yeni takım kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerden elde edilen kesme kuvveti, moment ve yüzey pürüzlülük değerleri kesme parametrelerine ve malzeme gruplarına göre değerlendirilmiştir.

- Delik delme deneyleri sonucunda elde edilen işlenmiş yüzeylerin ve talaş yapılarının incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Takımlarda meydana gelen hasarın tespiti için takım yüzeyleri incelenmiştir.



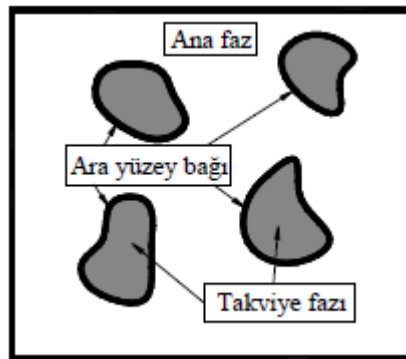
BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1. KOMPOZİT MALZEMELER

Endüstriyel olarak kullanılan malzemeler genel olarak metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Kompozit malzemeler, diğer gruplara göre ayrı özellikler taşıyor olsada bu gruplardan tamamen bağımsız olarak düşünülemezler [12]. Kompozit malzemeler, istenilen özelliklere göre en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi ile üretilirler. Kompozit malzemeler; malzemelerin en iyi özelliklerini yeni bir malzemede toplamak amacıyla, fiziksel biçimleri veya kimyasal bileşimleri farklı olan en az iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleşmesiyle elde edilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır. [12, 13].

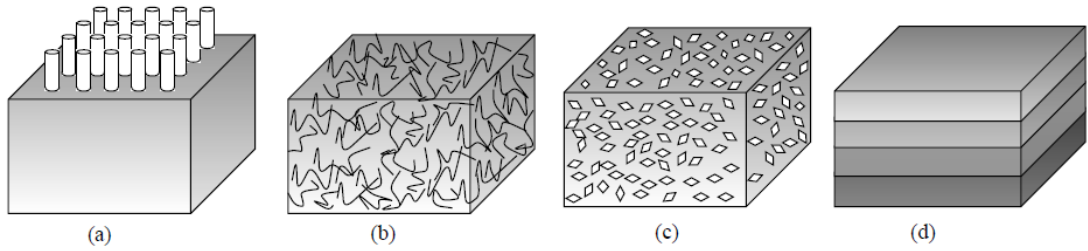
Kompozit malzemeler yapısında en az bir ana faz (matris fazı) ve en az bir takviye fazı olacak şekilde tasarlanır. Çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmiş olan ana faz ve takviye fazı aralarında arayüzey bağı olarak tabir edilen bir bağlantı bölgesi oluşturarak tasarlanan formları korumaktadırlar (Şekil 2.1) [14].



Şekil 2.1. Kompozit malzeme yapısının şematik gösterimi [14].

Kompozit yapıyı meydana getiren ana faz, takviye fazı ve ara yüzey bağının, tasarlanan malzeme formunun bir arada tutulması için üstlendikleri bir takım görevler vardır. Burada, ana fazının görevi; tasarlanan kompozit yapının takviye elemanlarının yer değiştirmesini engelleyerek yapıyı bir arada tutmak ve oluşan dış kuvvetleri herhangi bir deformasyona uğramadan ara yüzey bağı vasıtasıyla takviye elemanlarına eşit oranlarda iletmektir. Takviye fazının görevi ise; ana fazın tane büyüklüğünü kontrol etmek ve ana faz tarafından iletilen yüklere karşı koymaktır. Ara yüzey bağının görevi ise ana fazın takviye fazına iletmek istediği yükü herhangi bir deformasyona uğramadan takviye fazına iletmektir [2].

Kompozit malzemeler takviye cinsine ve matris malzemesine göre sınıflandırılmaktadır. Kompozitler kullanılan takviye elemanının şekline göre; sürekli elyaf takviyeli kompozit, kılcal kristal (wiskers) takviyeli kompozit, partikül takviyeli kompozit ve tabakalı kompozit olmak üzere dört gruba ayrılmaktadırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Takviye elemanına göre sınıflandırılan kompozit malzeme türlerinin gösterimi; (a) Sürekli elyaf takviyeli kompozit, (b) Kılcal kristal (wiskers) takviyeli kompozit, (c) Partikül takviyeli kompozit, (d) Tabakalı kompozit.

Elyaf takviyeli kompozitlerde, elyafların gömüldüğü malzeme matris malzemesi olarak adlandırılır. Malzemeye gelen yükler matris malzemesi tarafından elyaflara iletilir ve yükün büyük bir kısmı elyaflar tarafından taşınır. Elyaf takviyeli fiberler anizotropik özellik gösterirler [15]. Kılcal kristal takviyeli kompozitlerde, takviye elemanı 3-5 mm çapında ve 0,5-6 mm uzunluğundadır. Kılcal kristallerin çap-uzunluk oranlarının ($l/d \approx 50-100$) yük transferine elverişli olması ve şekil verme yeteneklerinin yüksek olması kılcal takviyeli kompozitlerin avantajlarından [16]. Partikül takviyeli kompozitlerde takviye elemanı olarak sert partiküller tercih edilirler. İleri teknoloji malzemelerinde sıklıkla kullanılan titanyumun yerini seramik partikül

takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler almaktadır [17]. Tabakalı kompozitler, farklı bileşenlere sahip tabakaların üst üste birleştirilmesi ile üretilirler.

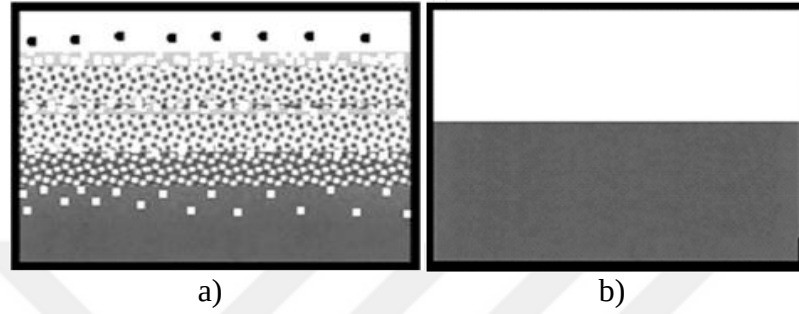
Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesinin türüne göre ise metal matrisli kompozit, seramik matrisli kompozit, polimer matrisli kompozit ve karbon esaslı kompozit olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Matris malzemesi seçimi yaparken malzemelerin, mukavemet, yoğunluk, sertlik, ısıl iletim katsayısı, ısılatılabilirlik gibi özellikleri dikkate alınırlar. Kompozit malzeme, anizotropik özelliğinden dolayı gerilme yığılmalarına karşı hassastır. Tasarımlar yapılırken bu durumlara dikkat edilmelidir. Metal matrisli kompozitler, matris malzemesi metal veya metal alaşımlarından oluşan kompozit malzemelerdir. Matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilir. Alüminyum, titanyum, magnezyum, nikel, kurşun, demir, çinko ve bakır metalleri kompozit üretiminde kullanılırlar. Alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımları yaygın olarak kullanılan metallerdir. Takviye elemanı olarak ise sert seramik malzemeler tercih edilirler. Seramiklerin yüksek sertlik özellikleri ile metallerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin birleşmesiyle yüksek basma ve çekme gerilmesine sahip, aşınmaya dayanıklı malzemeler elde edilmektedir. Takviye elemanı olarak genellikle Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiC, TiN, TiB, cBN, Si_3N_4 , AlN seramikleri kompozit üretiminde kullanılırlar. Bunların arasında Al_2O_3 , SiC ve B_4C yaygın olarak kullanılan seramiklerdir [18].

2.2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

Tarihsel bakış açısından fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme fikri 1970'lerde ortaya çıkmıştır. Ancak 1984 yılına kadar bu konu üzerine dikkate değer bir çalışma bulunmamaktadır. İlk olarak 1987 yılında Japonya'da metal matrisli kompozit malzemeden üretilen uzay araçlarının tahrik motorlarında meydana gelen termal gerilmenin azaltılması amacıyla başlatılan proje ile FDM'ler kapsamlı olarak araştırılmaya başlanmıştır [19, 20].

FDM, geleneksel homojen malzemelerle elde edilemeyen yenilikçi özelliklerin veya fonksiyonların gerçekleştirilmesi için ortaya çıkan bir kavramdır. En basit haliyle FDM'ler yapısında, bir tarafında bir malzemenin diğer tarafında ise ikinci malzenin

bulunduğu ve arada bileşimi ve morfolojisi mikron kalınlığında bir malzemedenden diğetine yumuşak geçiş sağlayan ara bölgenin bulunduğu malzemelerdir. FDM'ler, malzeme özelliklerinin bir konum fonksiyonuna bağlı olarak, bir yüzeyden diğetine geçerken kademeli veya sürekli değişim gösterdiği malzemelerdir [21]. FDM'lerin içyapısı şekil 2.3' de şematik olarak gösterilmiştir.



şekil 2.3. FDM'lerin şematik gösterimi: a) Sürekli derecelendirilmiş, b) kademeli derecelendirilmiş FDM [22].

2.2.1. FDM'lerin Sınıflandırılması

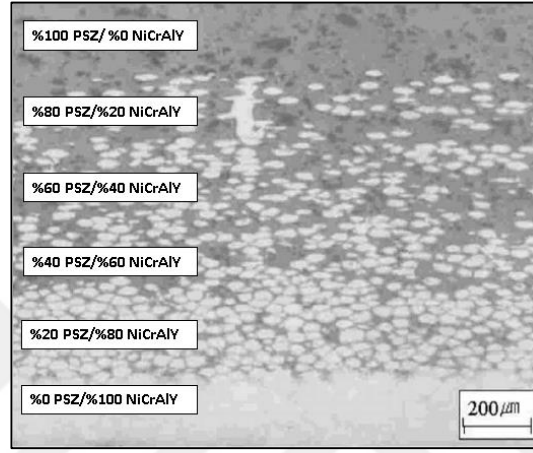
Hacmi boyunca bileşimi, mikro yapısı veya gözenekliliği değişen malzemeler FDM olarak adlandırılmaktadır. Keskin arayüz yerine kademeli olarak değişen arayüzün kullanılması bu malzeme türünün farklı alanlarda kullanılmasına da olanak sağlamış ve buna bağlı olarak farklı türlerinin geliştirilmesine de yol açmıştır. Amaçlanan uygulamanın türü FDM'nin türünü belirlemektedir.

FDM'ler üç grupta sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM'ler.
- Gözeneklilik ve gözenek boyutu derecelendirilmiş FDM'ler.
- Mikroyapısı derecelendirilmiş FDM'lerdir.

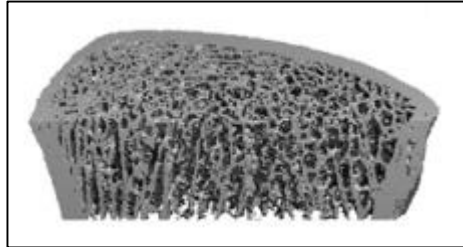
Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM'ler, malzemenin kimyasal bileşiminin malzeme içerisinde kademeli olarak değiştiği malzeme grubudur. Kimyasal yapısı farklı iki malzemenin yapı içerisindeki oranlarının kalınlık boyunca değişmesi, sertlik, tokluk, aşınma direnci, korozyon direnci, ısıl iletkenlik ve ısıl direnç gibi özelliklerin

malzeme kalınlığı boyunca kademeli olarak değişmesine neden olmaktadır. Örneğin; ısıtıl proselerde yüksek sıcaklığa maruz kalan malzemelerin ısıdan etkilenmemesi için ısıtıl direnci yüksek olan seramik malzemeler ile kaplanması gerekir. Fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar ile malzemeler arası yumuşak bir geçiş sağlanarak oluşabilecek termal uyumsuzluklar en aza indirilirken, kaplama malzemesi ile kaplanan malzeme arasındaki bağlanma ve malzeme uyumluluğu artar (şekil 2.4).



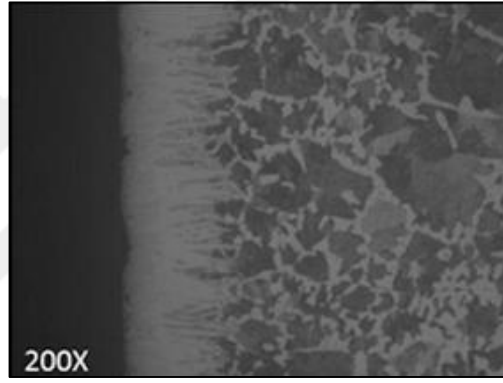
şekil 2.4. Kimyasal bileşimi derecelendirilmiş FDM [23].

Gözenekliliği derecelendirilmiş FDM’ler malzemedeki gözenekliliğinin ve gözenek boyutunun malzeme kalınlığı boyunca değiştiği malzeme grubudur. FDM’lerin bu grubu özellikle biyomedikal uygulamaları için önemlidir. Kemik, gözenekli yapıya sahip ve gözeneklerin boyutunun yüzeye doğru değiştiği doğal bir FDM’dir (şekil 2.5). Biyomedikal alanında kullanılan FDM’lerde bulunan gözenekli yapı kemik implant uygulamalarında doku entegrasyonu için önem arz etmektedir [22].



şekil 2.5. Gözenekliliği derecelendirilmiş FDM – İnsan kemiği.

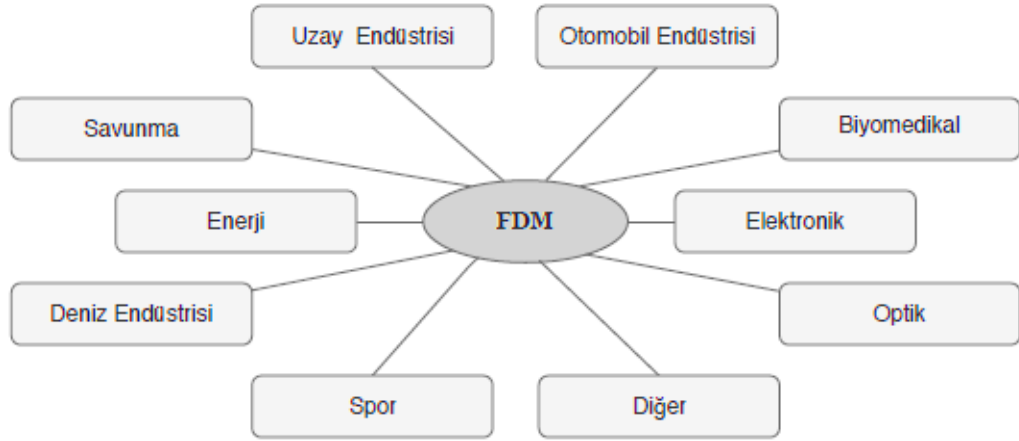
Mikroyapısı derecelendirilmiş FDM'ler, mikroyapının istenilen özellikleri karşılayacak şekilde malzeme içerisinde kalınlık veya genişlik boyunca değiştiği malzemelerdir (Şekil 2.6). Dişliler bu malzeme grubuna örnek olarak gösterilebilirler. Dişlilerin yüzeyde aşınmaya dayanıklı sert, merkeze doğru gidildikçe darbelere dayanıklı tok bir yapıya sahip olması makine elemanın işlevselliğini arttıran özelliğidir. Dişliler yüzeyde martenzitik iç kısımlarda ferritik ve beynitik mikroyapı gösteren mikroyapısı derecelendirilmiş malzemedir. Mikroyapısal derecelenme, malzemelerin katılaşması sırasında da oluşabilir. Malzeme yüzeyinin hızlı soğuması yüzeyin ince taneli olmasına neden olurken çekirdeğinin yavaş soğuması yüzeye göre daha kaba taneli olmasına neden olur [22].



Şekil 2.6. Mikroyapısı derecelendirilmiş FDM.

2.2.2. FDM' lerin Kullanım Alanları

FDM'ler derecelendirilmiş yapıları sayesinde tek bir malzemede bulunması mümkün olmayan özellikleri bir arada bulundurlar. FDM'ler bu mükemmel yapıları sayesinde pek çok endüstri alanında kullanılmaktadır ve gelecekte diğer uygulamalarda kullanılmak üzere büyük bir potansiyele sahiptirler.



Şekil 2.7. FDM kullanım alanları.

Mevcut uygulama alanları uzay, otomobil ve deniz endüstrisi, biyomedikal, savunma, enerji, elektronik, optik ve spor olarak özetlenebilir. Şekil 2.7’de FDM’lerin uygulama alanları gösterilmektedir. Bu önemli mühendislik malzemelerinin üretim maliyetleri düştüğünde gelecekteki kullanım alanlarının daha fazla genişleyeceği düşünülmektedir.

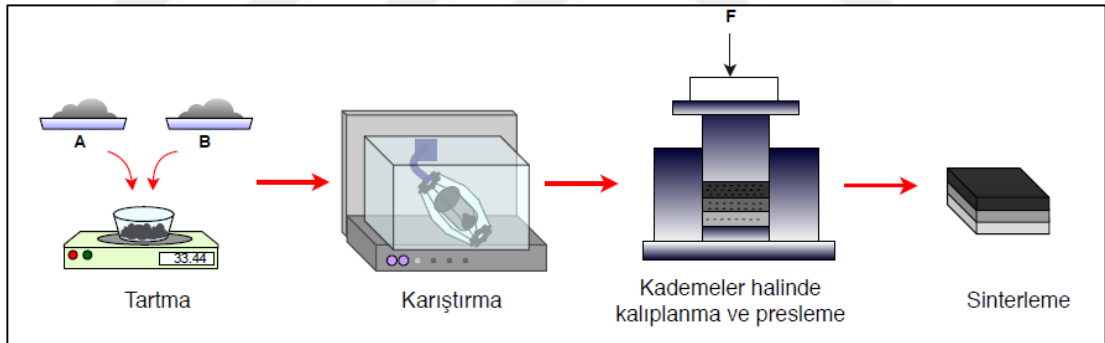
2.2.3. FDM’lerin Üretim Yöntemleri

FDM’ler sınırsız sayıda varyasyon ile üretilebilirler. Malzeme yapısındaki çeşitliğin yanında yaygın kullanım alanlarının bulunması, FDM’lerin üretiminde farklı üretim yöntemlerinin de gelişmesine neden olmuştur. FDM’nin üretim yöntemlerinden bazıları aşağıda listelenmiştir.

- Buhar biriktirme (CVD)
- İnfiltrasyon
- Termal püskürtme
- Santrifüj döküm
- Şerit döküm
- Slip döküm
- Yönlü katılaştırma
- Hızlı prototip üretme
- Toz metalurjisi

2.2.3.1. Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz metalurjisi yöntemi temelde, toz halindeki ana faz ve takviye elemanının tartılması, karıştırılması, kalıplama ve preslenmesi ile sinterlenmesi aşamalarından oluşur [24] (Şekil 2.8). İlk olarak; tozların kademe içerisindeki % oranlarına göre tartma işlemi gerçekleştirilir ve her kademeye ait karışım ayrı kaplarda alınır. Ardından tozların boyutu, türü ve şekli dikkate alınarak karıştırma işlemi gerçekleştirilir. Kademe içerisinde toz karışımının homojen şekilde dağılması için karıştırma parametrelerinin dikkatlice seçilmesi önem arz etmektedir [25]. Toz karışımlarının hazırlanan kalıp boşluklarına serilmesi ve tozların sıkıştırılması ile malzemeye istenilen şekli kazandırılır. Son olarak sinterleme işlemi ile malzeme tasarım mukavemetine ve yoğunluğuna ulaşır. Basınç, sıcaklık ve zaman gibi işlem parametreleri toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen FDM'nin özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu sebeple işlem parametreleri seçiminde dikkat edilmelidir.



Şekil 2.8. Toz metalurjisi yöntemi ile FDM üretiminin şematik gösterimi.

Toz metalurjisi yöntemi, malzemelerin son şekline yakın geometride üretilmesine olanak sağlar. Diğer yöntemlere göre toz metalurjisi ile üretimde düşük sıcaklıkların kullanılması matris ile takviye fazı arasında istenmeyen reaksiyonların oluşmasını engeller. Takviye elemanının matris içerisinde dağılımının kontrol edilebilmesi, kimyasal bileşimi ve mikroyapısı kontrol edilebilen malzemelerin üretilmesine olanak sağlar. Farklı özelliklere sahip metal tozlarına, seramik partiküllerinin takviye edilmesi ile yüksek performanslı malzemelere dönüştürülmesi ve bu sürecin ekonomik olarak gerçekleştirilmesi toz metalurjisi yöntemini cazip hale getirmiştir. Havacılık ve

savunma sanayisinde hafif ve dayanıklı metallere olan ihtiyaç toz metalurjisi ile üretilmiş FDM'lere olan ilginin artmasına neden olmuştur [26]. Biyomedikal implantlar, ısı değıştircileri, roket parçaları ve WC kesici takımlar toz metalurjisi ile üretilen FDM'lere örnek olarak verilebilirler [27–29].

2.3. TALAŞLI İMALATTA DELİK DELME İŞLEMİ VE TERMİNOLOJİSİ

Günümüzde delik delme işlemi, makine parçalarının imalatı esnasında en çok kullanılan (~% 33) talaşlı imalat işlemleri arasında yer almaktadır. Delik delme, matkap ucu adı verilen kesicilerin dönme ve ilerleme hareketi sonucunda iş parçasından talaş kaldırılarak silindirik boşluk oluşturma işlemidir. Matkap uçları ile delme işlemi nispeten tek ağızlı kesici takımlarla talaş kaldırma işlemine benzer bir yapıdadır. Fakat kaldırılan talaş hacminin fazlalığı, aynı anda birden fazla kesme ağzının talaş kaldırması, talaşların şekillenmesi/kırılması ve tahliyesi açısından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Talaş kaldırma işleminin kapalı bir ortamda gerçekleştirilmesi ve delik derinliğine bağlı olarak artan sürtünme ve sıcaklık etkileri matkap uçları ile delme işlemini zorlaştırmaktadır. Matkap uçlarının delme işlemi esnasında iş malzemesi üzerinde oluşturdıkları hatalar/kusurlar en aza indirilerek hammadde sarfiyatının azaltılması önem arz etmektedir. Ayrıca birim işleme maliyetinin de düşürülmesi gerekmektedir. Bu amaçlar doğrultusunda araştırmacılar ve kesici takım üreticileri aşağıdaki başlıklara odaklanmaktadır. Bunlar;

- Kesici takım üretiminde kullanılan hammaddelerin içyapı karakteristik özelliklerinin iyileştirilmesi, (HSS takım malzemelerinde alaşım elementlerinin ve ısıl işlem tekniklerinin etkileri, karbür takımlarda ise karbür kalitelerinin; aşınma dirençli faz tipi, tane boyutu, bağlayıcı faz alaşım tipi ve oranı, vb.)
- Kesicinin kesme performansına etki eden geometrik unsurların iyileştirilmesi, (Uç açısı, helis açısı, öz kısmında oluşturulan kesme geometrisi, zırh formu, vb.)
- Kesici takım yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, (İnce sert malzeme kaplama teknikleri ve kaplama materyallerinin etkileri, vb.),

- Kesme ortamında kullanılan kesmeye yardımcı ilave ekipmanlar ve etkinliğinin iyileştirilmesi, (Kesme/Soğutma solüsyonlarının kimyasal bileşim ve oranları ile zerk edilme şekli, ultrasonik titreşim, vb.)
- Kesme şartlarının istatistiki veri analiz metotlarıyla en iyi değerlerinin seçilmesinin sağlanması, (Kesme hızı/devir sayısı, ilerleme miktarı)
- Delme işleminde takım yolunun en iyi motifinin belirlenmesi, (kesintisiz delme, gagalayarak delme, delik giriş ve çıkışında düşük ilerleme kullanılarak delme, vb.) şeklindedir.

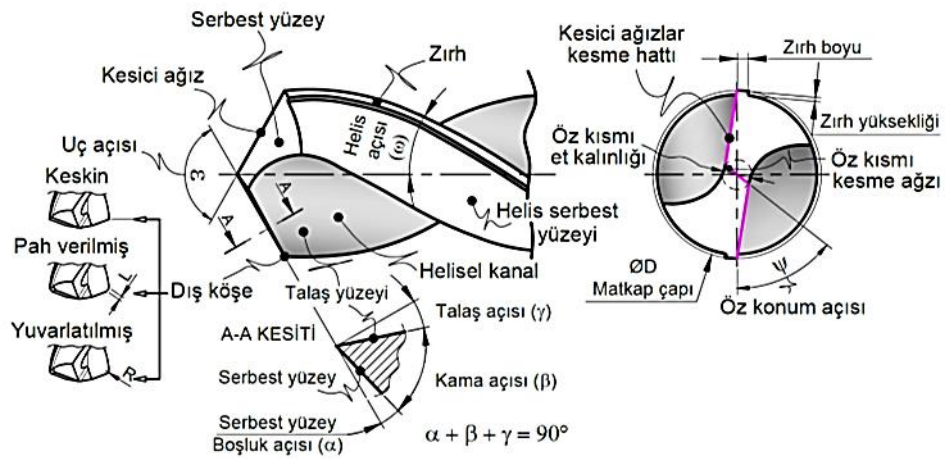
Yukarıdaki maddelerin iyileştirilme süreçlerinde aşağıdaki unsurlar dikkate alınmaktadır. Bunlar;

- Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan delme (ilerleme) kuvveti ve delme momenti,
- Delik giriş ve çıkışında hasar oluşum mekanizmaları,
- Takım aşınma mekanizmaları,
- Geometrik ve boyutla ilgili tolerans sapmaları,
- Delik içi yüzey kalitesi,
- Delme esnasında oluşan talaş formu ve kırılma şekilleri,
- Delme işleminde talaş kökü morfolojisi ve talaş oluşum mekanizması, şeklindedir.

Talaşlı imalat, imalat işleminin gerçekleştirildiği tezgâh, iş malzemesi ve kesici takım karakteristik özellikleri ve seçilen işleme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, vb.) delik delme işlemi sırasında oluşan, kesme kuvvetleri, sıcaklık ve sürtünme etkileri ile birlikte takım hasar mekanizmaları ve iş malzemesi yüzey kalitesi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Matkap uçlarının delik delme esnasındaki kesme performanslarının belirlenmesinde çoğu zaman kesme esnasında oluşan delme kuvveti ve momenti ile delik içi yüzey kalitesi, delik geometrisi ve doğrultusunun sapma değerleri kullanılır. Delik delme işleminin düşük delme kuvveti ve momenti ile gerçekleştirilmesi matkap geometrisinin ve işleme şartlarının en iyi değerlerini belirlemede kullanılan birincil kontrol şartıdır. Diğer etkenler ise yüzey kalitesi, ölçü tamlığı, geometrik sapma miktarlarıdır.

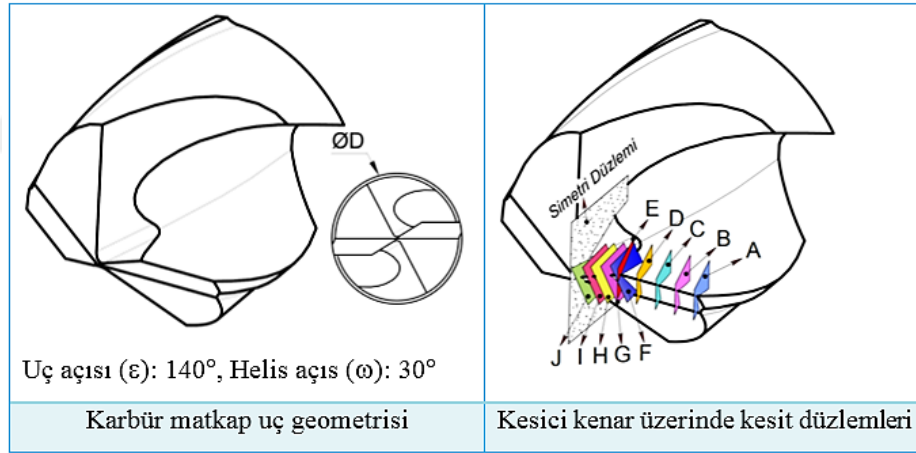
2.3.1. Matkap Geometrisi ve Kısımları

Daha sert ve kesme geometrisine sahip matkap ucu, dönme hareketi ile birlikte tek bir doğrultudaki ilerleme hareketiyle, iş parçasından kendi ölçüsü kadar talaşlar kopartarak delme işlemini gerçekleştirir. Makine parçaları üzerinde matkap uçları ile delme işlemi sonrasında elde edilen delikler, genelde geometrik (silindiriklik, diklik, düzlemsellik, vd.) ve boyutsal tolerans aralıkları geniş ($\pm 0,2$ mm), yüzey pürüzlülüğü önemsenmeyen, sadece matkap ucunun dönme formuna benzer bir boşluktur. Genelde montaj işlemleri için gerekli, silindirik formda bağlama yuvalarının elde edilmesinde kullanılırlar. Ayrıca, akışkan (sıvı ve gaz) geçiş yolları ile parça ağırlığını hafifletme amacıyla da açılmaktadır. İkincil talaşlı imalat işlemleri; tornalayarak parça delik içi geometrisinin oluşturulması, raybalama, kılavuzla vida açma ve freze tezgâhlarında parmak frezelerin kesme başlangıcını kolaylaştırmak amacıyla giriş yuvasının oluşturulması için de delik delme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde karbür matkap uçlarının geliştirilmesiyle, sadece delik delme işlemiyle, boyut ve geometrik tolerans aralığı ve yüzey kalitesi arzu edilen sınırlar içerisinde delikler üretilebilmektedir. Matkap uçları ağız sayısına bağlı etkin kesici ağızlar (iki veya üç) ve öz kısmında oluşan kesme geometrisi ile talaş kaldırmaktadır. Şekil 2.9'da helisel oluk geometrisine sahip bir matkap ucunun geometrik unsur ve kısımları gösterilmiştir.

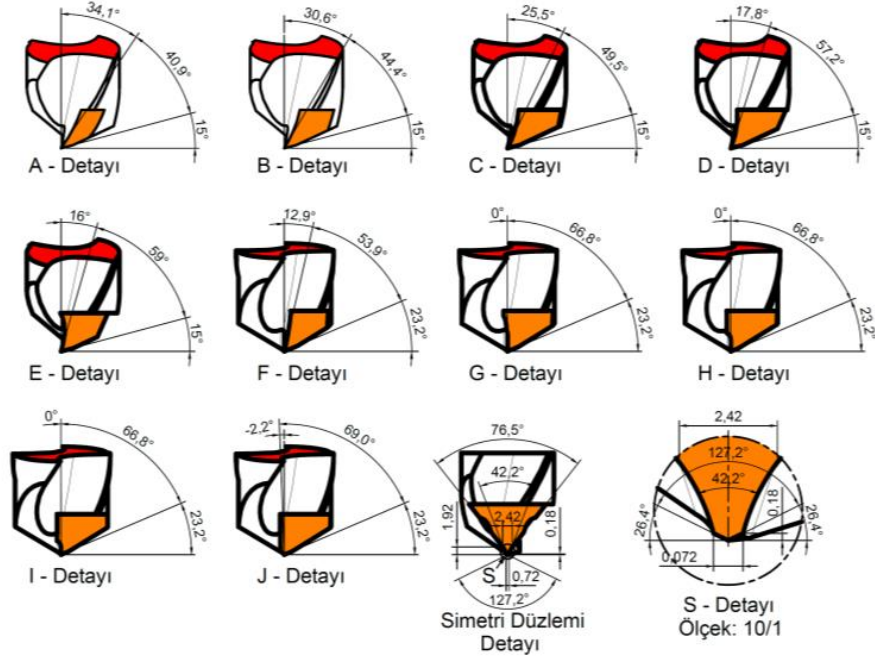


Şekil 2.9. Helisel oluklu matkap ucunun geometrik unsur ve kısımları.

Şekil 2.9’da görüldüğü üzere matkap uçları, ağız sayısına bağlı etkin kesici ağızlar ve öz kısmında oluşan kesme geometrisi ile talaş kaldırmaktadır. Kesici ağızlar, helis açısı ve helisel oluk formuna bağlı olarak kesme hattı üzerinde matkap ucu merkezinden zırh kısmına doğru değişen talaş açısı (γ) değerleri ile kesme işlemini gerçekleştirir. Matkap ucunun zırh kısmı kesme yapmaz. Oluşan delik içerisinde matkap ucuna yataklama sağlar. Ayrıca bir miktar ezme yaparak delik içi yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine katkı sağlar. Serbest yüzeylerin delik tabanına sürtmesini engellemek amacıyla pozitif yönde, bir veya birden fazla boşluk açısı (α) ile matkap ucu bilenir. Bu yüzey de düzgün bir formda olmayıp eliptik forma sahiptir. Bu nedenlerle matkap ucunun kesme ağızlarının kama açısı (β) da merkezden zırha doğru değişir. Örnek bir matkap ucunun kesme hattı boyunca; talaş açısı (γ), kama açısı (β) ve serbest yüzey boşluk açısının (α) değişimi ile ilgili görsel anlatımlar Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’ de, kesit görünüşlerindeki açı değerleri de Çizelge 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.10. Matkap ucu kesme hattı geometrik unsurlarının incelendiği takım ve kesit düzlemleri.



Şekil 2.11. Kesici kenar üzerinde kesit düzlemlerinde kesme geometrisinin değişimi.

Delme işleminde talaş kesitinin diğer geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla (tornalama, frezeleme, vb.) nispeten büyük olması, kesici takım ve iş malzemesi üzerinde yüksek kesme yükleri oluşturur. Ayrıca delme ucunun bir kesme ağzı dikkate alındığında, en dış noktadan merkeze doğru, değişen kesme hızı değerlerinde talaş kaldırma işlemini gerçekleştirdiği görülür. Bu durum, talaş kaldırma işlemini zorlaştırmaktadır.

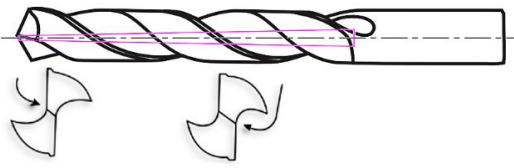
Çizelge 2.1. Matkap ucunun kesit görünümündeki açı değerleri.

Kesit Düzlemi	Talaş Açısı (γ), °	Kama Açısı (β), °	Serbest Yüzey Boşluk Açısı (α_1), °
A	34,1	40,9	15
B	30,6	44,4	15
C	25,5	49,5	15
D	17,8	57,2	15
E	16	59	15
F	12,9	53,9	23,2
G	0	66,8	23,2
H	0	66,8	23,2
I	0	66,8	23,2
J	-2,2	69	23,2
Simetri Düzlemi	-63,6	127,2	26,4

Matkap ucu için kesme hızı değeri ve matkap çapına bağlı hesaplanan devir sayısı kesme hattı boyunca sabit olmasına rağmen, kesme ucunun merkezinden dış çapa doğru değişken kesme hızı ile talaş kaldırdığı bilinmektedir. Özellikle delik merkezinde kesme hızı değeri neredeyse sıfırdır. Matkap ucu delik merkezindeki bu kısımları kesmekten ziyade, verilen ilerleme hızı/oranına bağlı, batarak, kazıma ile talaş kaldırmak zorundadır. Delme esnasında ilerleme kuvvetinin büyüklüğü üzerinde bu bölge önemli bir etkiye sahiptir.

Matkap ucu öz ve kanal geometrisi

Matkapların burulma ve eğilme dayanımları, matkap ucu çap-öz oranından doğrudan etkilenmektedir. Matkapların mukavemeti matkap öz kalınlığına bağlıdır. Matkap öz kısmının et kalınlığı ve delik merkezinde oluşturulan kesme geometrisi ilerleme (delme) kuvvetinin düşürülmesinde önemli bir rol oynar(Şekil 2.12).



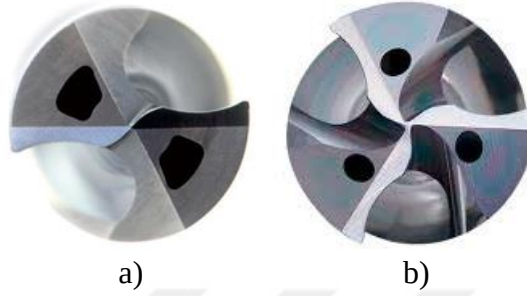
Şekil 2.12. Matkap ucu öz kalınlığının değişimi.

Silindirik çubuk takım malzemelerinden bilenerak imal edilen matkap uçlarının öz kalınlığı, uç kısmından sap kısmına doğru belli bir koniklik değerinde artar. Bileme yapıldıkça matkap ucunun öz kalınlığı da artar. Bu durumda matkap ucunun delik konumunu merkezlemesi ve iş parçasına batması zorlaşır, delme kuvveti artar.

Matkap kanal sayısı

Matkap uçları genelde iki ağızlı olarak imal edilirler. Fakat başta delme işlem maliyeti olmak üzere, iş parçası malzemesine, istenilen delik yüzey kalitesi ve matkap çapına bağlı olarak kanal sayısı 1' den 4'e kadar değişiklik göstermektedir. İki ağızlı matkap uçlarının talaş tahliyesi iyidir, üretimi kolay ve ucuzdur (Şekil 2.13a). Titreşim eğilimi yüksektir. Fakat kesme kuvveti ve delme momenti diğer matkaplara kıyasla daha düşüktür. Üç ağızlı matkap uçlarının üretim maliyetleri yüksektir (Şekil 2.13b).

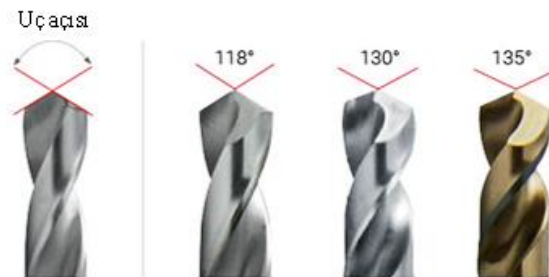
Matkap dönme ekseninde titreşim daha düşüktür. Talaş tahliyesi diğer takımlara kıyasla zordur. Delme işleminde yüksek ilerleme kuvveti ve delme momenti değerleri elde edilir. Uzun boyda üretilmeleri zordur. Yüksek delme momenti etkisiyle kırılma riski yüksektir.



Şekil 2.13. Kesici ağız sayısına göre matkap uçları. a) İki ağızlı ve b) Üç ağızlı matkap ucu.

Matkap ucu uç (bileme) açısı

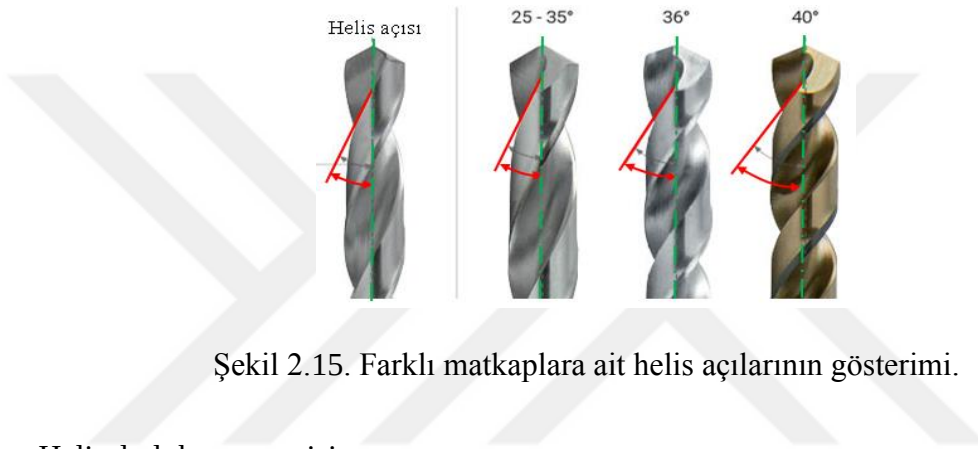
Kesicinin bilenererek elde edilmiş, kesme ağızları arasındaki açı değeridir (Şekil 2. 14). Matkap uçları genel kullanım amaçlı 118° uç açılı bilenir. Matkap ucunun uç açısı delinecek malzeme özelliklerine (sertliği, özgül kesme direnci, talaş formu, vd.) göre belirlenir. Genelde, iş malzemesi sertliği arttıkça uç açısı değeri de arttırılır ($118\sim 140^\circ$). Uç açısı, matkap ucunun kesme ağızlarının boyutuna ve iş malzemesine batma özelliğine etki eder. Matkap uç açısının değeri büyüdükçe kesici ağız uzunluğu küçülür, daha düşük kesme kuvveti ve delme momenti değerlerinde delme işlemi gerçekleştirilir. Fakat matkap ucunun delme başlangıcında, merkezleme ve iş malzemesine batma özellikleri kötüleşir ve titreşim artar.



Şekil 2.14. Farklı matkaplara ait uç açılarının gösterimi.

Matkap ucu helis açısı

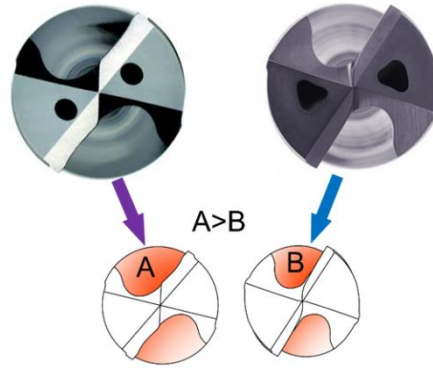
Helisel oluklarının matkap ucu eksenine olan açı değeridir (Şekil 2. 15) . Helis adımı bu açıya bağlıdır. Helis açısı, matkap ucu kesme ağızlarının talaş açısı (γ) ve kama açısını (β) belirler. Delme işlemi esnasında talaş oluşum formunu ve talaşın tahliye şekli ile hızını kontrol eder. Helis açısı iş parçası malzemesinin özelliklerine göre ideal değerlerde belirlenir. Genelde iş malzemesi sertliği arttıkça helis açısının arttırılması önerilir.



Şekil 2.15. Farklı matkaplara ait helis açılarının gösterimi.

Helisel oluk geometrisi

Helis açısı oluşturulurken açılan kanal boşluğunun geometrisi de belirlenir (Şekil 2. 16). Bu geometri matkap ucunun talaş tahliye kabiliyeti ile delme esnasında oluşan kesme kuvveti ve delme momentine matkap ucunun dayanım sınırını da belirler. Oluk genişliği arttıkça talaş tahliyesi kolaylaşır. Bu durum kesme ortamından sıcaklığın talaş ile hızlı bir şekilde atılmasına olanak tanır. Matkap ucu, delme esnasında aşınma mekanizmaları üzerinde etkili bir parametre olan sıcaklık etkilerine karşı az da olsa korunmuş olur. Ayrıca talaş sıkışmalarından kaynaklı artan kesme kuvveti ve moment etkileri de minimize edilebilir. Matkap öz kalınlığı oluk geometrisi ile şekillenir. Öz kalınlığının artması matkap ucunun dayanım özelliklerini iyileştirirken, uç/gaga formunun iş malzemesine batmasını zorlaştırır.



Şekil 2.16. Matkap ucu helisel oluk geometrisi.

Matkap Ucu Uç (Gaga) Formu

Matkap ucunun öz kısmının kesme geometrisine sahip olması amacıyla bileme tekniklerinin uygulanmasıdır. Delinecek dolu iş malzemesine matkap ucunun merkezleme yapmasını sağlamak ve batmasını kolaylaştırmak amacıyla öz kısmında ikincil kesme hattının formu farklı geometrilerde bilenebilmektedir. Yaygın kullanılan bileme formları Şekil 2.17’de gösterilmiştir.

Bileme Formu					
Uç bileme geometrisi					
	Normal	X Tipi	XR Tipi	S Tipi	N Tipi

Şekil 2.17. Matkap uçlarında yaygın olarak kullanılan uç bileme geometrileri.

2.3.2. Delik Delme İşlemini Etkileyen Kesme Parametreleri

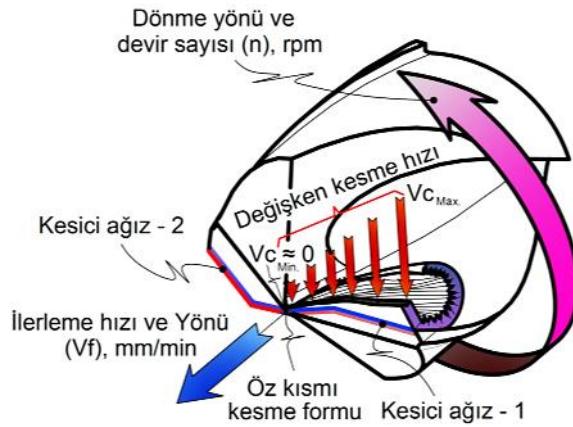
Delik delme işleminde matkap ucunun aynı anda gerçekleştirdiği dönme ve ilerleme hareketi sonucunda malzemenin akma mukavemeti aşılarak iş parçasında plastik deformasyon meydana gelir. Matkap ucunun dönme ve ilerleme hareketi, kesme hızı ve ilerleme hızına bağlıdır. Ayrıca takım geometrisi ile takım hareketlerinin belirlediği talaş kesiti de delik delmeyi etkileyen önemli parametrelerden biridir.

Kesme Hızı (V_c)

Talaşlı imalat işlemlerinde kesme hızı, kesici takım kesme kenarı üzerinde referans kabul edilen bir noktada iş malzemesinin talaş formuna dönüştürülme hızı olarak tanımlanmaktadır. Delik delme işleminde kesme hızı (V_c , m/dak), matkabın kesici ağızları üzerinde matkap çapının (D_M , mm) ifade edildiği kesici ağız en dış noktası dikkate alınarak hesaplanır. Bir başka deyişle matkap ucuun devir sayısına bağlı, matkap çapını belirleyen en dış noktada çevresel hız olarak tanımlanır. Matkap çapı ve devir sayısı (n , dev/dak) kullanılarak “Eşitlik 2.1” ile hesaplanır.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Matkap uçları kesme kenarı boyunca kesme hızı değişkendir (Şekil 2.18). Matkabın en dış kısmı olan çevresinde maksimum değerde iken, merkeze doğru ilerledikçe azalır ve merkezde sıfır olur. Bu sebeple matkabın merkezinde ideal şartlarda kesme işlemi gerçekleştirilemez, ezme işlemi ile plastik deformasyonla talaş formu oluşturulur.



Şekil 2.18. Matkap ucu ve kesme kenarı boyunca kesme hızının değişimi.

Kesme hızı takım ömrünün belirlenmesinde en temel faktörlerden biridir. Delik delme işleminin yüksek kesme hızlarında (ideal sınır değerinden yüksek) gerçekleştirilmesi, serbest yüzey ve kesme kenarlarında aşınmaya ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olur. Düşük kesme hızlarında kesme işlemi ise yüksek maliyet oluşturma yanında yığıntı talaş oluşumu ile talaş tahliyesinin zorlaşmasına yol açar.

İlerleme Hızı (V_f)

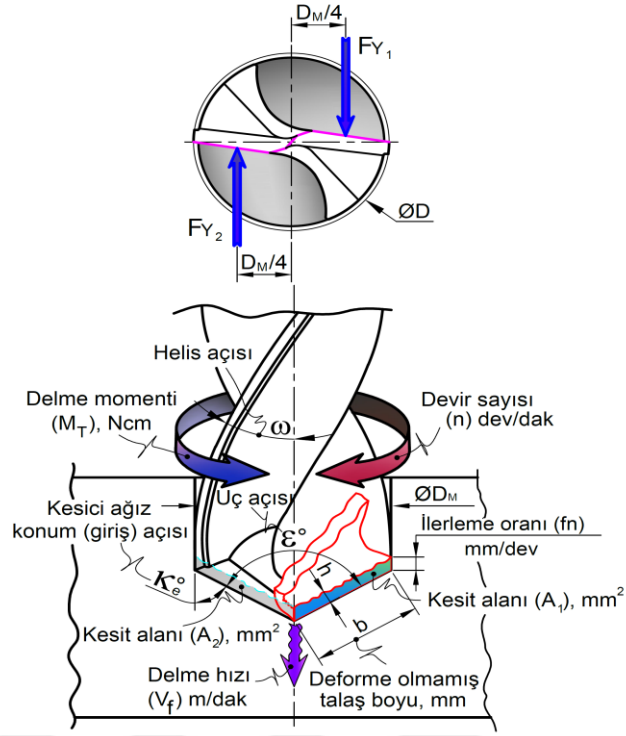
İlerleme hızı (V_f) (mm/dk), takımın birim zamanda iş parçasına göre aldığı yol olarak tanımlanır. İlerleme hızının hesaplanmasında, iş parçası veya takımın devir başına aldığı yolu gösteren devir başına ilerleme (f_n) değeri ve devir sayısı (n) kullanılır (Eşitlik 2.2).

$$v_f = f_n \cdot n \quad (2.2)$$

İlerleme hızı, kesme hızı ile birlikte talaş deformasyon hızını belirler. İlerleme hızı talaş oluşumunu ve şeklini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Yüksek ilerleme hızı talaş tahliyesini kolaylaştırır. Takım – iş malzemesi temas uzunluğunun (kesme süresinin) düşmesi ile daha düşük takım aşınması sağlar. Fakat yüksek ilerleme hızı artan delme kuvveti ve monont etkileri ile takım kırılma risklerini arttırırken, aynı zamanda yüzey kalitesini de olumsuz yönde etkiler. Düşük ilerleme hızı yüzey kalitesinin artmasına neden olurken takım aşınmasının da artmasına neden olur. Ayrıca bu durum kesme sürelerinin artmasına da neden olur.

Talaş kesiti (A)

Talaşlı imalat işlemlerinde deforme edilmemiş talaş kesit alanı; kesme genişliği (a_e) ve kesme derinliği (a_p) parametrelerinin çarpımı ile tespit edilir. Matkap uçlarıyla delme işlemlerinde tek bir kesme ağzının kestiği deforme olmamış talaş kesit alanı, her bir kesici ağız için matkap uç açısı ile değişen kesici kenar uzunluğu (b) ve ilerleme miktarına bağlı oluşan deforme olmamış talaş kalınlığının (h) çarpımı ile tespit edilir (Eşitlik 2.3) (Şekil 2.19). Diğer bir hesaplama şekli ise matkap yarıçapı ($D_M/2$) ile ilerleme miktarının (f_n) çarpımıdır (Eşitlik 2.4). Tek bir kesici ağız için talaş kesiti (A_1 veya A_2), matkap ucu kesici ağız sayısı ile çarpılarak aynı anda kesilen toplam deforme olmamış talaş kesiti (A) hesaplanır (Eşitlik 2.5).



Şekil 2.19. Matkap uçlarıyla delme işleminde talaş kesiti.

Her bir kesici ağız için deforme olmamış talaş kesit alanı (A_1 ve A_2);

$$A_1 = A_2 = b \times h \quad (2.3)$$

$$A_2 = A_1 = f_n \times (D_M/2) \quad (2.4)$$

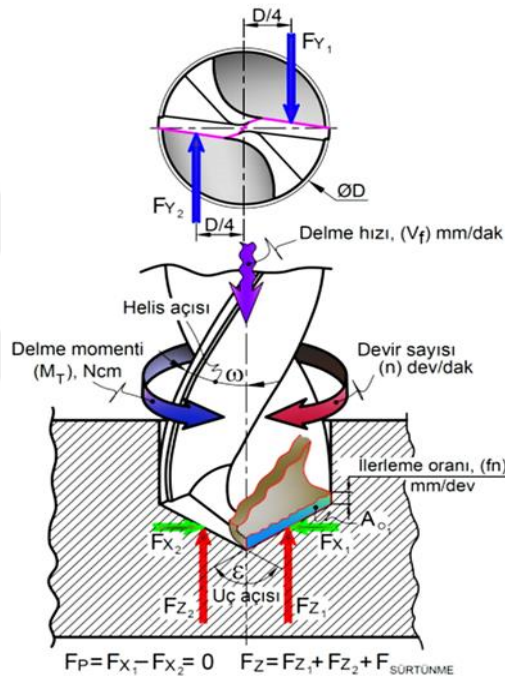
Toplam kesit alanı (A);

$$A = A_1 + A_2 = f_n \times D_M \quad (2.5)$$

2.3.3. Delme Kuvveti ve Moment Etkileri

Matkap uçları içyapı ve yüzeyi ile ilgili karakteristik özellikleri ve kesme hattı geometrik unsurları (matkap çapı, kesici ağız sayısı, uç açısı, kama açısı, talaş açısı, öz kalınlığı ve kesme geometrisi, helis açısı, vd.) ile işleme parametrelerine bağlı (kesme hızı ve ilerleme hızı) oluşan bileşke hız vektörü doğrultusunda iş malzemesini plastik deformasyonla şekillendirir. Bu şekillendirme sürecinde iş malzemesinin özgül

kesme direncine (k_c) bağılı olarak, matkap ucu ve iş malzemesine tesir eden delme kuvveti ve delme momenti etkileri gözlenir. Delme kuvveti her bir kesici ağız üzerinde üç eksen (F_x , F_y ve F_z) yönünde oluşan kuvvet bileşenlerinin bileşkesidir. Simetrik eşdeğer konum açılı kesici ağızlar üzerinde oluşan kuvvetlerden X eksen yönündeki radyal kuvvetler ($F_R \rightarrow F_{x1}$ ve F_{x2}) birbirini nötürlemektedir. Bu nedenle delik delme işlemlerinde sürtünme yükleri etkileri de göz önünde bulundurularak, takım ilerleme yönüne zıt yönde tesir eden ilerleme kuvveti ($F_F \rightarrow F_z$) ve esas kesme kuvveti ($F_C \rightarrow F_y$) ile şekillenen dönme yönüne zıt yönde delme momenti (M_T) oluşur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Matkap ucu ile delme işlemi kuvvet ve moment şematik gösterimi.

Esas kesme kuvveti (F_c)

Talaşlı imalat işlemlerinde esas kesme kuvveti “Kienzle” göre en temel kapsamda; deforme olmamış talaş kesiti ile malzemenin özgül kesme direncinin çarpılmasıyla teorik olarak hesaplanabilmektedir (Eşitlik 2.6)

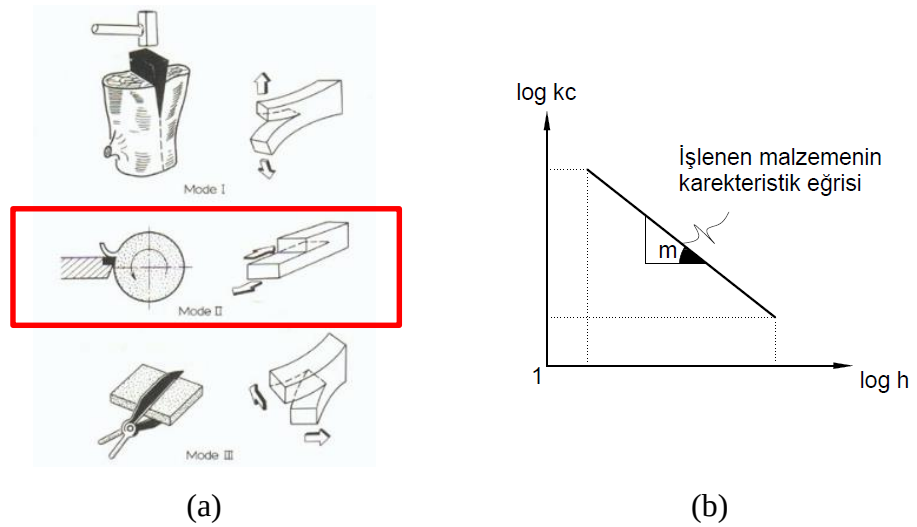
$$F_c = A \times k_c \quad (2.6)$$

Ayrıca esas kesme kuvveti üzerinde, talaş kaldırma işleminde kullanılan takım malzemesinin cinsi (Takım faktörü: k_T ; HSS, karbür, CBN, seramik ve elmas), kesici kenar etkin talaş açısı (Talaş açısı faktörü: k_g), takım aşınma etkileri (Aşınma faktörü: k_a) ve kesme işleminin gerçekleştirildiği kesme hızı (Kesme hızı faktörü: k_v) da belirleyici faktörlerdir. Bu etkiler de dikkate alındığında tek bir kesme ağızında oluşan esas kesme kuvveti Eşitlik 2.7 ile hesaplanır. Bu diğer etkili parametreler esas kesme kuvveti üzerinde yaklaşık 0,95~1,1 oranında değişime neden oldukları dikkate alınarak çoğu zaman göz ardı edilmektedir.

$$Fc_1 = A \times k_c \times k_T \times k_g \times k_v \times k_a \quad (2.7)$$

Özgül kesme direnci (k_c):

Özgül kesme direnci; iş malzemesinin talaşlı imalatla şekillendirilme özelliğinin bir göstergesidir. Malzemenin kırılma tokluğunun talaşlı imalata uygun yönde ölçülmesiyle elde edilen kırılma tokluğu değeri (τ_K : Mod II) (Şekil 2.21), talaş kalınlığının özgül kesme direncine etkisi göz önünde bulundurularak hesaplanır (Eşitlik 2.8). Deforme olmamış talaş kalınlığının artmasına bağlı olarak, talaşın daha kolay deforme edilmesi nedeniyle malzemenin özgül kesme direnci düşer.



Şekil 2.21. Özgül kesme direncinin hesaplanması; a) Kırılma tokluğu test yönleri, b) Talaş kalınlığının özgül kesme kuvvetine logaritmik etki grafiği ve “m” üs katsayısı.

$$k_C = \frac{k_{II}}{h^m} \quad (2.8)$$

Bu formülde;

k_C : Talaş kalınlığına bağlı özgül kesme direnci; N/mm²

k_{II} : İşlenecek malzemenin (a x b) 1x1 mm ebadındaki kesitinin “Mode II” ye göre kırılma tokluğu; $MPa \cdot \sqrt{m}$ veya MN/m².m^{1/2} (Şekil 2.21. (a))

h : Deforme olmamış ortalama talaş kalınlığı; mm

m : Özgül kesme direncinin talaş kalınlığına bağlı değişim sabiti; birimsiz [Logaritmik grafikte çizginin eğimi (Şekil 2.21 (b))]

Özgül kesme direnci, pratik hesaplamalarda, genelde çizelgelerden faydalanılarak tespit edilir. Çizelge 2.2’de bazı malzemelere ait talaş kalınlığını belirleyen ilerleme miktarının değişimine bağlı belirlenmiş özgül kesme direnci değerleri sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Bazı iş malzemeleri için ilerleme oranına bağlı özgül kesme direnci değerleri.

İş Malzemesi	Çekme Dayanımı (σ_t) veya Sertlik (HBN/HRC)	Özgül Kesme Direnci (K_c), N/mm ²				
		0,1 mm/rev	0,2 mm/rev	0,3 mm/rev	0,4 mm/rev	0,6 mm/rev
Düşük karbonlu Çelik	520 N/mm ²	3610	3100	2720	2500	2280
Alaşımli Çelik	620 N/mm ²	3080	2700	2570	2450	2300
Sertleştirilmiş Çelik	720 N/mm ²	4050	3600	3250	2950	2640
Takım Çeliği	670 N/mm ²	3040	2800	2630	2500	2400
Takım Çeliği	770 N/mm ²	3150	2850	2620	2450	2340
Krom-Manganlı Çelik	770 N/mm ²	3830	3250	2900	2650	2400
Krom-Manganlı Çelik	630 N/mm ²	4510	3900	3240	2900	2630
Krom-Molibdenli Çelik	730 N/mm ²	4500	3900	3400	3150	2850
Krom-Molibdenli Çelik	600 N/mm ²	3610	3200	2880	2700	2500
Nikel-Krom-Molibdenli Çelik	900 N/mm ²	3070	2650	2350	2200	1980
Nikel-Krom-Molibdenli Çelik	352 HBN	3310	2900	2580	2400	2200
Sert Dökme Demir	46 HRC	3190	2800	2600	2450	2270
Lamel Grafitli Dökme Demir	360 N/mm ²	2300	1930	1730	1600	1450
Gri Dökme Demir	200 HBN	2110	1800	1600	1400	1330

Talaş açısı faktörü (k_g)

Kesici takım kesme hattının etkin talaş açısı (γ) arttıkça genelde esas kesme kuvveti düşer. Talaş açısının artması takım kama açısının küçülmesine ve kesici kenar dayanımının azalmasına neden olur. Bu nedenle talaş açısının her iki durum içinde en

ideal beklentileri karşılayabilecek değerde belirlenmesi önem arz etmektedir. Talaş açısı faktörü Eşitlik 2.9 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Talaş açısının ideal değeri (γ_{IDEAL}) malzeme cinsine bağlı (Çelikler için 6° , dökme demirler için 3°) değişmektedir. İdeal talaş açısı değerinden farklı bir açı değerine (γ_e) sahip kesici takımla talaş kaldırma işleminde; artan talaş açısında faktör küçülürken, azalan talaş açısı değerlerinde ise faktör katsayısı artmaktadır.

$$k_g = \left(1 - \frac{\gamma_{IDEAL} - \gamma_e}{100}\right) \quad (2.9)$$

Delme Momenti (M_T):

Matkap uçlarıyla delme esnasında oluşan esas kesme kuvveti delme momentinin hesaplanmasında kullanılır. Matkap ucu kesici ağız sayısına bağlı olarak aynı geometrik formdaki her bir kesme ağızı üzerinde aynı büyüklükte esas kesme kuvveti oluşur. Esas kesme kuvvetinin kesici ağız orta noktasında ($D_M/4$) vektörel etki ettiği varsayılır. Delme momenti hesaplanırken her bir kesici ağız için “moment = kuvvet x mesafe” formülüne göre esas kesme kuvveti, matkap ucunun çap ölçüsünün “ $1/4$ ” ile çarpılır (Eşitlik 2.11). Bulunan delme momentine (M_D), matkap ucunun iş malzemesine temas eden kısımlarının oluşturduğu sürtünme kuvveti etkileri ile şekillenen sürtünme momenti (M_μ) eklenerek toplam delme momenti hesaplanır (M_T) (Eşitlik 2.10). Moment birimi genelde “Ncm” kullanıldığından, Nmm olarak çıkan değer 10’a bölünür. Delme momenti, esas kesme kuvveti formül açılımı eklenerek düzenlendiğinde, Eşitlik 2.12 ile hesaplanabilmektedir.

$$M_T = M_D + M_\mu \quad (2.10)$$

$$M_D = (Z \times F_{c1} \times D_M)/40 \quad (2.11)$$

$$M_D = (Z \times f_n \times k_c \times D_M^2)/80 \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.10, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12’de;

- M_T : Toplam delme momenti, Ncm
 M_D : Delme momenti, Ncm
 M_m : Kesici ağız kesme hattı, serbest yüzey ve zırh kısmının iş malzemesine temasıyla oluşan sürtünme momenti, Ncm
 A_1 : Tek bir kesici ağız ile deforme edilecek talaş kesit alanı, mm²
 Z : Matkap ucu kesici ağız sayısı, adet
 k_C : Talaş kalınlığına bağlı özgül kesme direnci; N/mm²
 F_{c_1} : Tek bir kesici ağızda oluşan esas kesme kuvveti, N
 D_M : Matkap ucu çap ölçüsü, mm

ifade etmektedir. Delme esnasında delik derinliğinin artmasıyla sürtünme etkilerinin artmasıyla birlikte, birikimli delme momenti de ($M_D = M_D + M_\mu$) artar.

Sürtünme momenti (M_μ), kesici takım ve iş malzemesinin birbiriyle kuvvet, temas alanı, sıcaklık değişimine bağlı sürtünme kuvveti değişim grafiği dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Ayrıca sürtünme kuvveti değişim grafiği hazırlanırken, talaş kaldırma işlemi sürecinde yeni elde edilen yüzeyde oluşan pürüzlülük izlerinin takım malzemesine temas etkileri, kesici kenar kesme hattında oluşan aşınma izlerinin ve etkili aşınma mekanizmalarının sürtünme kuvveti üzerindeki etkileri de dikkate alınır. Matkap uçlarıyla delme esnasında matkap uç açısının ve helis açısının değişimine bağlı olarak sürtünme momenti de değişir. Matkap ucu çap ölçüsü (D_M) ve helis açısı (ω) sabit tutulduğunda, matkap uç açısı (ε) büyüdükçe kesici kenar kesme hattının iş malzemesi ile temas uzunluğu kısalmış, sürtünme etkileri azalmış. Matkap ucu çap ölçüsü (D_M) ve matkap uç açısı (ε) sabit tutulduğunda, helis açısı (ω) küçüldükçe kesici takım talaş yüzeyinde iş malzemesinin temas alanı küçülür. Benzer şartta aynı delik boyunda matkap ucunun zırh boyunda kısalmış. Bu nedenlerle sürtünme etkileri ve sürtünmeden kaynaklanan moment etkileri azalmış.

İlerleme/Delme kuvveti (F_F):

Matkap ucunun, delik ekseninde ilerleme yönüne zıt yönde kesici ağızlar üzerine etki eden kuvvettir. Matkap ucunun, kesme hattını oluşturan ana kesici ağızlar ile öz kısmında yer alan kesme geometrisinin, ilerleme hızıyla iş malzemesine batarak talaşı

deforme etmesine karşı oluşan kuvvettir. Kesici takımın flanbaja uğramasına neden olmaktadır. Kesici takım çapı, öz kalınlığı ve ilerleme miktarının arttırılması ile doğru orantılı olarak artar. Eşitlik 2.13 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$F_F \cong 0.5 \times k_c \times \left(\frac{D_M}{2} \times f_n \right) \times \sin k_e \quad (2.13)$$

Talaş Debisi (Q):

Delik delme işlemini etkileyen faktörlerden biri de talaş debisidir (Q veya R_{MR}). Talaş debisi dakikada kaldırılan talaş hacmi olarak tanımlanır ve matkap ucunun tam çapı kesmede olduğu andaki talaş kesit alanının (A), ilerleme oranıyla (f_n) çarpımı ile hesaplanır (Eşitlik 2.14).

$$Q = (\pi \times f_n \times D_M^2)/4 \quad (2.14)$$

BÖLÜM 3

LİTERATÜR TARAMASI

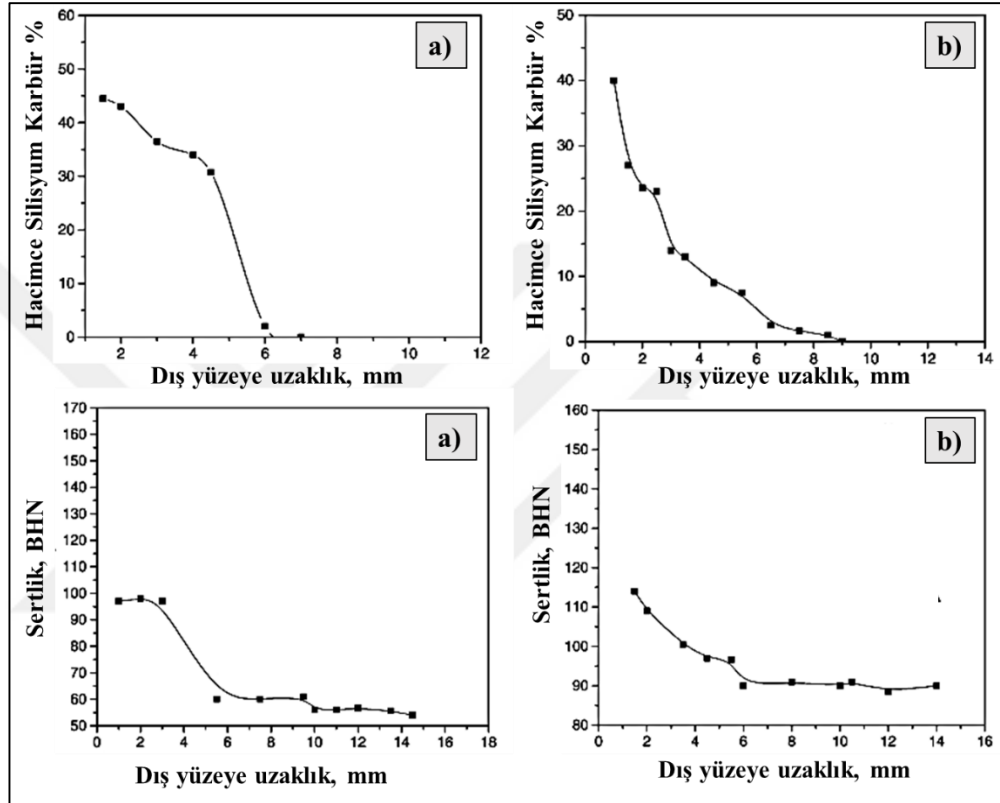
Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kalınlık boyunca istenilen özelliklere göre malzemelerin değişen oranlarda bir araya getirilmesi ile üretilirler. Geleneksel kompozitlere kıyasla üstün mekanik, kimyasal, elektriksel ve termal özellikler sergilemektedirler. FDM'lerin tıp, nükleer ve savunma endüstrisi gibi pek çok alanda kullanımları giderek artmaktadır. Araştırmacılar, ihtiyaçlarına göre en uygun özelliklere sahip FDM'leri elde etmek için farklı üretim yöntemleri geliştirmişlerdir. FDM'lerin üretiminde mekanik ve metalürjik özelliklerini, üretim parametrelerine, matris ve takviye malzemesinin türüne ve miktarına bağlı olarak değerlendirmişlerdir.

3.1. FDM'LERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Rajan vd., “Santrifüj döküm yöntemi ile üretilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin metalürjik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi” isimli çalışmalarında, santrifüj döküm yöntemi ile ürettikleri numunelerde matris malzeme türünün, numune kalınlığı boyunca takviye elemanı ve sertlik dağılımına etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla numune üretiminde ana matris malzemesi olarak A356 ve AA2124, takviye elemanı olarak ise 23 µm boyutunda SiC partiküllerini kullanmışlardır. Çalışmada, ana matris malzemesi ve takviye elemanı (ağırlıkça %15 SiC) metal kalıp içerisine alınak 750-760 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Metal kalıp içerisine alınan ve sıvı halde buluna kompozit karışım santrifüj kalıp içerisine alınmış ve kalıp 1100 dev/ dk hızla döndürerek deney numuneleri üretilmiştir [30].

Rajan vd. numunelerde kalınlık boyunca merkezkaç etkisi ile oluşan SiC partiküllerinin hacimce dağılımlarını gözlemlemek amacıyla numune yüzeyinden merkeze doğru farklı noktalardan mikroyapı fotoğraflarını optik mikroskop kullanarak

görüntülemişler ve optik mikroskobun görüntü analizi özelliğini kullanarak hacimce SiC partüküllerinin dağılımlarını belirlemişlerdir (Şekil 3.1). Numunelerin sertlik değerlerini Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak belirlemişlerdir. Bu amaçla numunelerin dış yüzeyinden içeriye doğru 11 farklı noktadan sertlik ölçümleri yapmışlar ve sonuçları grafik üzerinde göstermişlerdir (Şekil 3.1) [30].



Şekil 3.1. Numune kalınlığı boyunca SiC ve sertlik dağılımı. a) A356, b) AA2124 [30].

Araştırmacılar SiC dağılımının ve buna bağlı olarak sertlik dağılımının matris türüne göre farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir. A356 matrisli kompozitin yüzeyinde maksimum %45 SiC, AA2124 matrisli kompozitin yüzeyinde ise maksimum %40 SiC tespit etmişlerdir. Ayrıca maksimum sertlik değerleri A356 matrisli numunede 155 HBN, AA2124 matrisli numunede ise 145 HBN olarak ölçüldüğünü belirtmişlerdir [30].

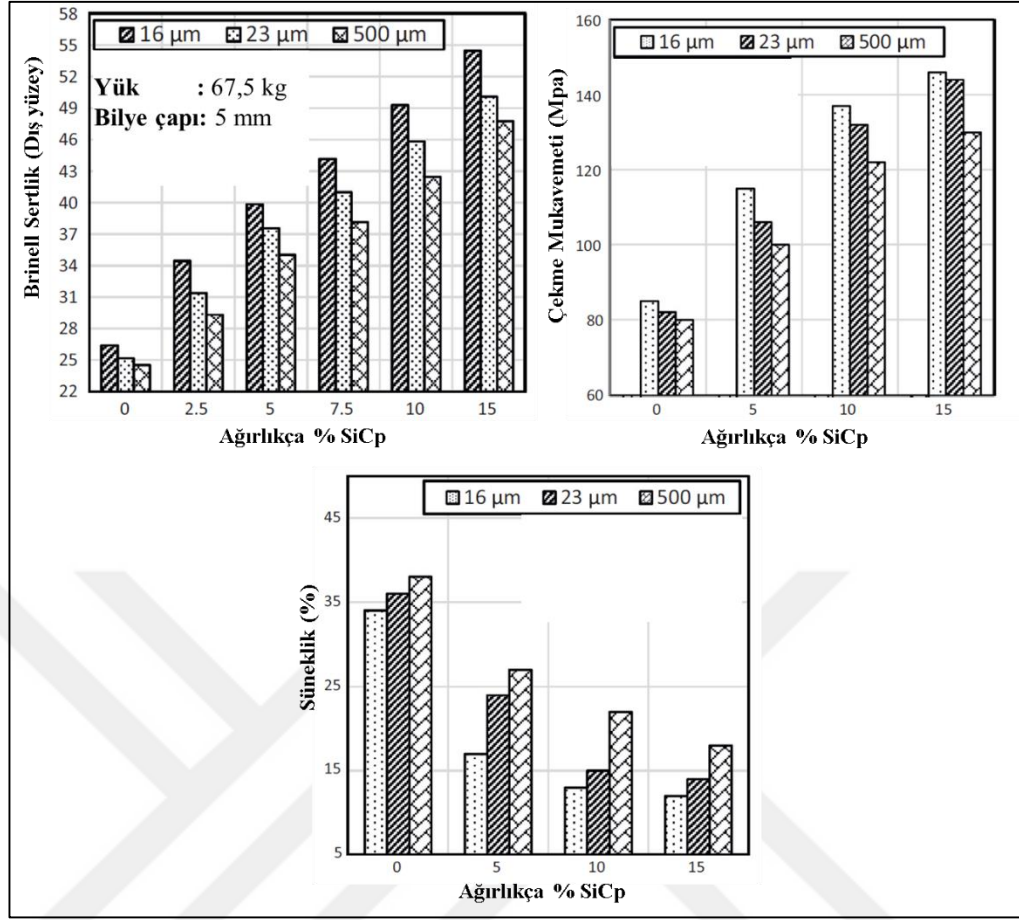
El Galy vd., SiC takviyeli saf alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin metalürjik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, numune üretimi için santrifüj döküm yöntemini kullanmışlardır. Numune

üretiminde kullanılan SiC partikül boyutunun, matris içerisindeki ağırlıkça takviye miktarının ve santrifüj döküm parametrelerinin, numunelerin mikroyapı, sertlik ve gerilme davranışları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. El Glay ve arkadaşlarının çalışmalarında etkilerini inceledikleri deney parametreleri ve seviyeleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir [31].

Çizelge 3.1. Numune üretiminde kullanılan değişken türleri ve değerleri.

Değişken	Parametre değerleri					
SiC miktarı (ağırlıkça %)	0	2,5	5	7,5	10	15
Partikül boyutu (µm)	16	23	500			
Santrifüj dönüş hızı (dev/dk)	800	900	1000			

Araştırmacılar, elde edilen numunelerin mikro yapılarını optik mikroskop kullanarak incelemişler, sertlik değerleri 62,5 kg yük altında 5 mm çapında bilye ile Brinell test yöntemi kullanılarak ölçmüşler ve gerilme özelliklerini ISO 1608:1995 standardına göre belirlemişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında, santrifüj dönüş hızının numune kalınlığı boyunca SiC partiküllerinin dağılımında etkili olduğunu, takviye boyutunun artması numunenin sertlik ve çekme mukavemetini düşürdüğünü, sünekliğinin ise arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca takviye miktarının artması ile numunenin sertlik ve çekme mukavemetinin arttığı, fakat sünekliğinin azaldığını belirtmişlerdir (Şekil 3.2) [31].



Şekil 3.2. Takviye boyutunun ve % ağırlıkça oranının numunenin mekanik özelliklerine etkisi [31].

Aydın ve Apalak, “Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş AA6061/SiC sandviç plakaların balistik etki altındaki hasar analizlerinin deneysel olarak belirlenmesi” isimli çalışmalarında, takviye elemanının matris içerisindeki miktarının ve dağılımının, FDM’lerin balistik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında matris malzemesi olarak 10 µm boyutunda AA6061, takviye elemanı olarak ise 50 µm boyutunda SiC kullanarak toz metalurjisi yöntemiyle farklı kompozisyonlara sahip numuneler üretmişlerdir. Üretimi gerçekleştirilen numuneleri; %100 AA6061, metalce zengin, lineer ve seramikce zengin olarak adlandırmışlardır [32].

Araştırmacılar FDM’lerin üretimi esnasında, AA6061 ve SiC tozlarını kademelerdeki oranlarına göre ayrı kaplarda 5 saat süreyle karıştırmışlar ve hazırlanan toz karışımlarını AISI 2344 sıcak iş çeliğinden üretilen kalıba istifleyerek, argon gazı ortamında, 600 °C sıcaklıkta, 100 MPa basınç altında 90 dakika preslemişler ve

presleme işlemi sonrasında oda sıcaklığında soğumaya bırakmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalar sonucunda seramikce zengin FDM hariç diğer numunelerde takviye miktarının artması balistik penetrasyon derinliğinin düşmesine ve balistik penetrasyon çapının artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Takviye miktarının belirli oranların üzerine çıkılması durumunda FDM numunelerin gevrek kırılmasına yol açtığını belirtmişlerdir [32].

Übeyli vd., alüminyum AA7075 matrisli, SiC takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin balistik davranışlarını inceledikleri çalışmalarında, iki farklı kimyasal bileşime sahip (Çizelge 3.2) üç farklı kalınlığa sahip (15, 20 ve 25 mm) numuneleri toz metalurjisi yöntemi kullanarak üretmişler ve malzeme kalınlığı ile kimyasal bileşimin, metalürjik, mekanik ve balistik davranış üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [33].

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan FDM türleri ve kimyasal bileşimlerinin gösterimi.

	FDM	
	1	2
Üst tabak	%20 SiC- %80 AA 7075	%40 SiC- %60 AA 7075
Orta tabaka	%10 SiC- %90 AA 7075	%20 SiC- %80 AA 7075
Alt tabak	%0 SiC- %100 AA 7075	%0 SiC- %100 AA 7075

Übeyli ve arkadaşları, üretmiş oldukları FDM'lerin mikroyapı özelliklerini taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Yapmış oldukları SEM ıcelemesinde yüksek takviye oranına sahip tabakaların, düşük takviye oranına sahip tabakalara göre daha fazla porozite miktarlarına sahip olduğunu ve takviye miktarının atışının yapı içerisindeki porozite miktarının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Numuneleri oluşturan kademelerin sertliklerini Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak, 187,5 kg yük ve 2,5 mm çapındaki çelik bilye ile ölçmüşlerdir. Kadame içerisindeki takviye miktarının artmasıyla kademe sertliklerinin arttığını tespit etmişlerdir. 7,62 mm çaplı zırh delici mermi ile uyguladıkları balistik testlerinde, incelenen tüm kalınlıklarda ve kompozisyonlardaki FDM'ler arasında hiç bir numunenin balistik başarıya ulaşamadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, tam bir balistik koruma

için 25 mm'den daha kalın FDM'lerin üretilmesi gerektiği tavsiyesinde bulunmuşlardır [33].

Lin vd., “AA2124 matrisli SiC takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi” isimli çalışmalarında, numune üretiminde kullanılan tozların kalıplanması işlemi sonrasında uygulanan mekanik titreşimin, malzemenin mekanik ve metalurjik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, matris malzemesi olarak AA2124, takviye elemanı olarak ise SiC toz kullanmışlar ve tozların kalıplama işlemini titreşimli ve titreşimsiz olmak üzere iki farklı yöntem kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri numuneler beş kademeli olup alt kademedan üst kademeye doğru ağırlıkça %0-10-20-30-40 takviye oranına sahiptir. Numunelerin mikroyapılarını optik mikroskop yardımıyla incelenmişlerdir. Numunelerin sertlik ölçümlerini ise Vickers sertlik ölçme yöntemi ile 30 kg yük altında gerçekleştirmişlerdir. Kırılma tokluğu özelliklerinin belirlenmesi için tek taraflı eğme testini kullanmışlardır [34].

Lin ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, titreşimsiz üretilen numunelerde tabakalar arası geçişin daha belirgin olduğunu, titreşimli üretilen numunelerde ise bu geçişin daha yumuşak olduğunu belirtmişlerdir. Takviye oranı arttıkça kademelerdeki topaklanma miktarının arttığını ve artan takviye oranıyla kademelerin sertliğinin de arttığını tespit etmişlerdir. Kırılma davranışlarında ise titreşimli ve titreşimsiz olarak üretilen numuneler arasında belirgin bir fark olmadığını belirtmişlerdir. Geleneksel kompozitlerde maksimum yüke ulaşıldığında çatlak oluşumu ile kırılmanın aniden meydana geldiği fakat FDM'lerin çatlak başlangıcından sonra bir miktar daha yük taşıdıklarını tespit etmişler ve buna FDM'lerin yapısındaki SiC düzgün dağılımının neden olduğunu belirtmişlerdir [34].

Erdemir vd., “Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen AA2024/SiC fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi” isimli çalışmalarında, toz metalurjisi yöntemiyle FDM üretiminde tabaka sayısının ve takviye oranının mekanik ve metalurjik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla matris malzemesi olarak AA2024, takviye elemanı olarak ise SiC toz partiküllerini kullanarak farklı tabaka sayılarına ve farklı takviye

oranlarına sahip numuneler üretmişlerdir (Çizelge 3.3) [35]. Üretimini gerçekleştirdikleri numunelerin sertlik, porozite ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir [35].

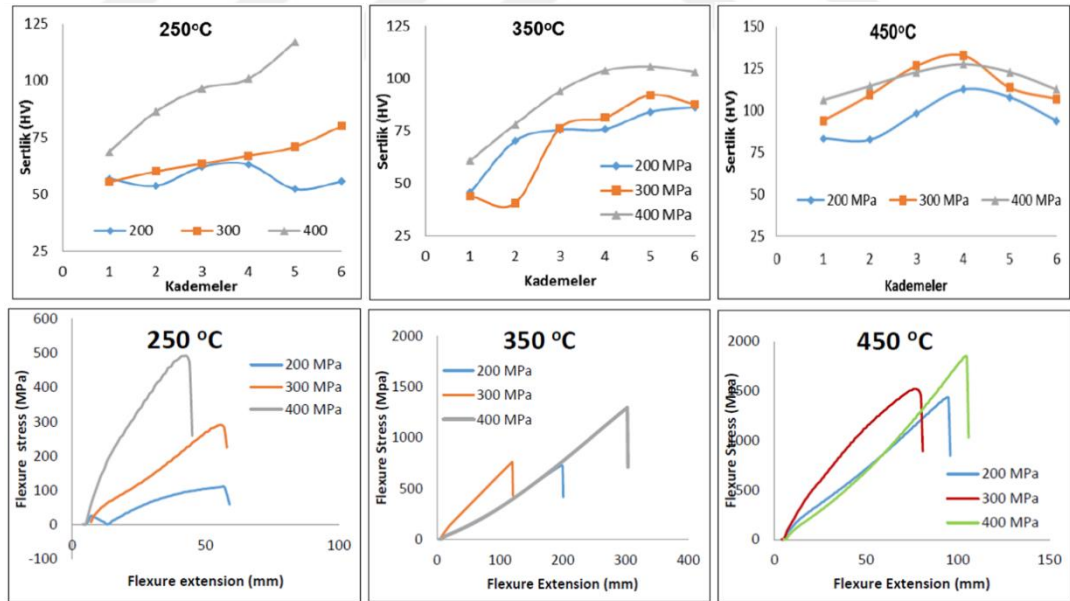
Çizelge 3.3. Numunelerin farklı tabaka ve takviye oranlarındaki özellikleri [35]

Numune	Metal/seramik Al2024/SiC	Mikrosetlik (HV)	Ort. Mikrosertlik (HV)	Porozite (%)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)
A3	70/30	170	170	0.5674	845
A4	60/40	225	225	0.5978	1052
A5	50/50	205	205	1.3811	940
A6	40/60	180	180	2.0272	914
AS3	100-70/30	90-174	132	0.061	860
AS4	100-60/40	96-230	163	0.1925	1400
AS5	100-50/50	100-210	155	0.2445	1342
AS6	100-40/60	105-185	145	0.2015	1169
AS34	100-70/30-60/40	108-180-238	175	0.5907	800
AS45	100-60/40-50/50	112-240-215	190	0.63	1185
AS56	100-50/50-40/60	115-217-190	174	0.6612	780
AS345	100-70/30-60/40-50/50	120-185-242-195	185	0.3059	723
AS456	100-60/40-50/50-40/60	125-245-195-192	190	1.4134	1000

Erdemir ve arkadaşları yapmış oldukları sertlik ölçümlerinde %40 SiC oranının dönüm noktası olduğunu, bu değere kadar tabakaların sertlik değerlerinin arttığını fakat %40'ın üzerindeki değerlerde tabakaların sertliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Bunun nedenini artan takviye oranı ile birlikte artan porozite miktarına bağlamışlardır. Maksimum sertlik değerini dört tabakalı numunenin %40 SiC içeren tabakasından elde ettiklerini ve tabaka sayısının artmasının ortalama mikrosertliği arttırdığını belirtmişlerdir. Eğilme mukavemetinin ise SiC miktarının ağırlıkça % 30'dan % 40'a arttırılması ile arttığını fakat % 40'tan sonra % 60'a arttırılmasında ile azaldığını gözlemlemişlerdir. Kompozitlerin eğilme mukavemetindeki azalmaya, zayıf bağlanmış Al2024 / SiC arayüzün, daha az metaller arası oluşumun ve daha düşük mikro sertlik değerlerinin sebep olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek eğilme mukavemetini üst tabakası %40 SiC içeren iki tabakalı FDM'lerde 1400 Mpa olarak ölçmüşlerdir [35].

Çinici vd., sıcak presleme yöntemiyle üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapmış oldukları

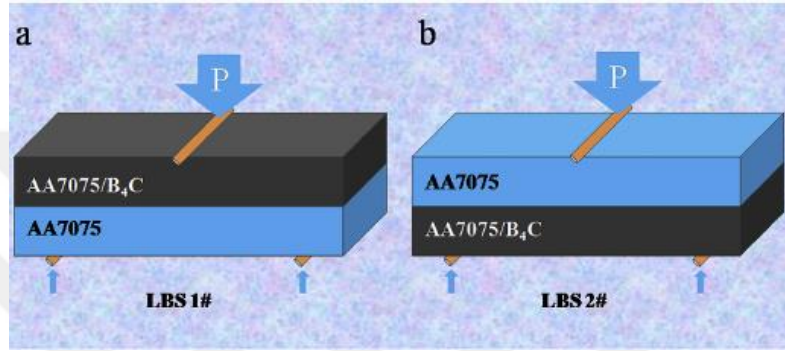
çalışmalarında, presleme basıncının ve sıcaklığının malzemelerin çapraz kırılma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, matris malzemesi olarak AA7075, takviye elemanı olarak ise B₄C kullanarak toz metalurjisi yöntemiyle FDM'ler üretmişlerdir. FDM üretimi için ayrı ayrı ağırlıkça % 10-20-30-40-50-60 B₄C içeren toz karışımlarını hazırlanmışlar ve tozları kalıbın alt yüzeyinden yukarı doğru takviye miktarını %10 arttırarak istiflemişlerdir. Numune üretiminde üç farklı sıcaklık (250, 350 ve 450 °C) ve üç farklı basınç değerleri (200, 300 ve 400 Mpa) kullanmışlardır. Numunelerin sertlik değerlerini Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak ölçmüşler ve çapraz kırılma testlerini ise ASTM B528-05 standardına göre yapmışlardır. Çinici ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada presleme basıncının ve sıcaklığının artması ile numunelerin çapraz kırılma dayanımının ve sertliğinin arttığını tespit etmişlerdir (Şekil 3.3). En yüksek çapraz kırılma mukavemetinin 450 °C sıcaklıkta 400 Mpa basınç altında üretilen numune 1800 Mpa olduğunu ve artan presleme basıncı ve sıcaklığı ile matris-partikül ara yüzey boşluklarının azaldığını ve matris-partikül uyumunun arttığını belirtmişlerdir [36].



Şekil 3.3. AA7075/B₄C FDM'lerin presleme sıcaklığına ve basıncına göre sertlik ve çapraz kırılma dayanımları [36].

Wu vd., plazma sinterlemesi yöntemiyle üretilmiş oldukları iki tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapmış oldukları çalışmalarında, FDM'lerin üretiminde matris malzemesi olarak AA7075

takviye elemanı olarak ise B₄C seramik partiküllerini kullanmışlardır. Çalışmalarında üretmiş oldukları FDM'lerin alt tabakasında takviyesiz AA7075 malzeme, üst tabakasını ise ağırlıkça %7,5 B₄C içeren AA7075/ B₄C malzeme bulunmaktadır. Elde edilen numunelerin mikroyapı ve çapraz kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Mikroyapı incelemelerini SEM cihazı yardımıyla gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin çapraz kırılma davranışlarını ise yükü taşıyan yüzeyleri değiştirerek incelemişlerdir (Şekil 3.4) [37].

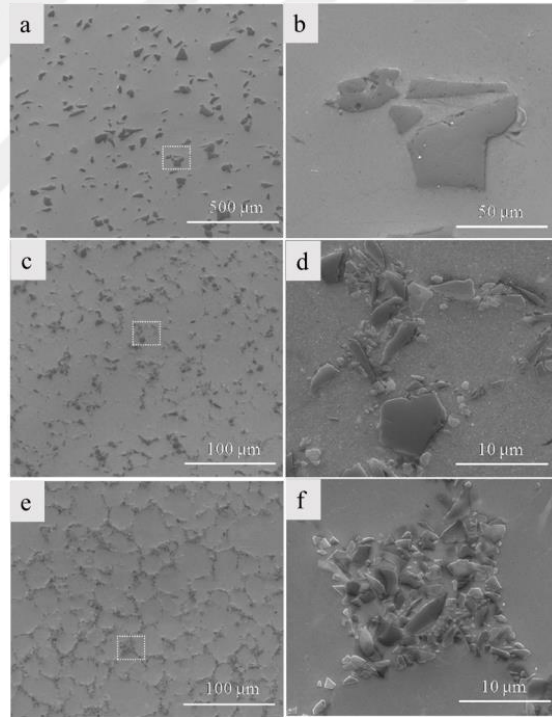


Şekil 3.4. Çapraz kırılma deneyinde yükü taşıyan yüzeylerin şematik gösterimi
a) AA7075/B₄C kompozit yüzeyi, b) Takviyesiz AA7075 malzeme yüzeyi [37].

Wu vd. yapmış oldukları mikroyapı incelemelerinde boşluk, çatlak ve tabakalar arası delemantasyonun gözlenmediğini belirtmişlerdir. Numunelerin çapraz kırılma davranışlarının yükü taşıyan yüzeye bağlı olarak değiştiğini ve en yüksek dayanımı değerini, yükün AA7075/B₄C kompozit yüzeye uygulanması durumunda 1234 ± 72 MPa olarak belirlemişlerdir [37].

Watanabe ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında, santrifüj döküm yöntemi ile üretilen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerde takviye elemanı boyutunun, matris içerisindeki dağılımına etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, alçı matris içerisine beş farklı boyutta (87 μ m, 102,5 μ m, 115 μ m, 137 μ m ve 179,5 μ m) corundum partikülleri ilave ederek hazırladıkları numunelerini farklı açısız hızlarda döndürerek üretmişlerdir. Yapmış oldukları metalografik incelemeler sonucunda silindirik numunelerin dış kısmından iç kısmına doğru partikül boyutunun küçüldüğünü ve artan açısız hız ile dış kabukta toplanan partikül boyutunun da arttığını belirtmişlerdir [38].

Wu vd, metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanı boyutunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırdıkları çalışmalarında, numune üretiminde matris malzemesi olarak 29,3 μm boyutundaki AA7075, takviye elemanı olarak ise 3 farklı boyutta (56,9 μm , 4,2 μm , 2 μm) B₄C toz partiküllerini kullanmışlardır. Plazma sinterlemesi yöntemiyle üretmiş oldukları numunelerin yoğunluk, mikroyapı ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri numunelerin yoğunluk ölçümlerinin Arşiment prensibine göre yapıldığını, tüm numunelerde yoğunluğun %99 oranından büyük olduğunu ve takviye elemanı boyutunun numune yoğunluğuna etkisinin gözlenmediğini belirtmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu kullanarak yapmış oldukları mikroyapı incelemelerinde ise takviye boyutunun B₄C partiküllerinin matris içerisindeki dağılımlarında etkili olduğunu ve partikül boyutunun azalması ile mikroyapı içerisindeki topaklanmanın arttığını belirtmişlerdir (Şekil 3.5) [39].



Şekil 3.5. Farklı boyutlara sahip B₄C partiküllerinin mikroyapı içerisindeki dağılımlarının görüntüsü. a) ve b) 56,9 μm boyutundaki B₄C. c) ve d) 4 μm boyutundaki B₄C. e) ve f) 2 μm boyutundaki B₄C' nin mikroyapı içerisindeki dağılımı [39].

Wu ve arkadaşları ürettikleri numunelerin mukavemetlerinde takviye elemanı boyutunun etkili olduğunu, partikül boyutunun azalması ile numunelerin

mukavemetinin arttığını ve kırılma mukavemetlerinin 56,9 μm , 4,2 μm ve 2 μm boyutunda takviye içeren numunelerde sırasıyla, 593 MPa, 669 MPa ve 701 MPa olarak ölçüldüğünü belirtmişlerdir [39].

Radhika yapmış olduğu çalışmasında, santrifüj yöntemiyle üretilen Al-Si12Cu matrisli Al_2O_3 takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş numunelerin dış (1 mm), orta (7 mm) ve iç (13 mm) bölgelerinin metalürjik, sertlik ve mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacı silindirik şekilde ürettiği numunelerinin içerisine toplamda ağırlıkça %10 Al_2O_3 toz partikülleri ilave etmiş ve partiküllerin kalınlık boyunca dağılımını gözlemlemiştir. Yapmış olduğu mikroyapı incelemesi sonucunda, partikül miktarının dış bölgede daha fazla olduğunu ve iç bölgeye doğru azaldığını belirtmiştir. Araştırmacı yapmış olduğu mikro sertlik ölçümlerinde ortalama dış yüzeyden iç yüzeye doğru sırasıyla, 145, 130, 105 Hv değerlerini elde ettiğini, ayrıca dış bölgenin mukavemetini 229 MPa, orta bölgenin mukavemetini 201 MPa ve iç bölgenin mukavemetini ise 152 MPa olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı yapmış olduğu çalışma sonucunda santrifüj döküm yöntemi ile başarılı şekilde FDM'lerin üretilebileceğini ve partikül miktarının artması ile elde edilen sertlik ve mukavemet değerlerinin arttığını belirtmiştir [40].

Jin vd., “ ZrO_2 / NiCr fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri” isimli çalışmalarında, toz metalurjisi yöntemiyle ürettikleri FDM'lerin mekanik ve metalürjik özelliklerini incelemişlerdir. ZrO_2 ve ağırlıkça %20 Cr içeren NiCr karışımı kullandıkları çalışmalarında, ZrO_2 miktarının ağırlıkça %10 olarak değiştiği on iki tabakakalı numuneler üretmişlerdir (Şekil 3.6) [41].

100% ZrO_2
90% ZrO_2 +10%NiCr
80% ZrO_2 +20%NiCr
70% ZrO_2 +30%NiCr
60% ZrO_2 +40%NiCr
50% ZrO_2 +50%NiCr
40% ZrO_2 +60%NiCr
30% ZrO_2 +70%NiCr
20% ZrO_2 +80%NiCr
10% ZrO_2 +90%NiCr
100%NiCr

Şekil 3.6. ZrO_2 / NiCr FDM'nin tabakalarına ait tozların bileşimi [41].

Numuneleri üretiminde, tabakalara ait bileşime göre önceden hazırladıkları toz karışımlarını çelik kalıp içerisine sermişler, ardından 30 Mpa basınçla ön sıkıştırma işlemi uygulamışlardır. Numuneyi oluşturan tüm tabakaları üst üste istiflendikten sonra 1300 °C sıcaklıkta 5 MPa basınç altında 5 saat süreyle preslemişlerdir. Yapılan mikroyapı analizinde ZrO₂ partiküllerinin yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını belirtmişlerdir. ZrO₂ miktarının artması ile mikro sertlik değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca ZrO₂ miktarının %100 olduğu tabakanın maksimum poroziteye sahip olmasına rağmen mukavemetinin yüksek olduğunu bu sebeple de mukavemet ile porozitenin ilişkilendirilemeyeceğini belirtmişlerdir. En düşük mukavemet değerini ağırlıkça %50 ZrO₂ ve %50 NiCr içeren tabakada, 260 MPa olarak ölçmüşlerdir [41].

Surya ve Prasanthi, SiC ile takviye edilmiş alüminyum matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mikroyapı özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, farklı oranlarda takviye içeren üç tabakalı numuneleri toz metalurjisi yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Saf alüminyum ve SiC tozlarını belirledikleri oranlarda karıştırmışlar ve hazırladıkları toz karışımlarını tabaka tabaka kalıp içerisine yerleştirmişlerdir. Çalışmalarında bağlayıcı olarak stearik asit kullanmışlardır. Tozların serildiği kalıbı soğuk olarak 1 KPa basınç altında preslemişler ve ardından 580 °C sıcaklıkta 1,5 saat süreyle sinterlemişlerdir. Yapmış oldukları mikroyapı analizlerinde SiC partiküllerinin yapı içerisinde homojen olarak dağılmadığını belirtmişlerdir. Bu duruma, üretim sırasında atmosferde bulunan nemin veya tozların homojen olarak karıştırılmamasının sebep olabileceğini belirtmişlerdir [42].

3.2. DELİK DELME İŞLEMİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

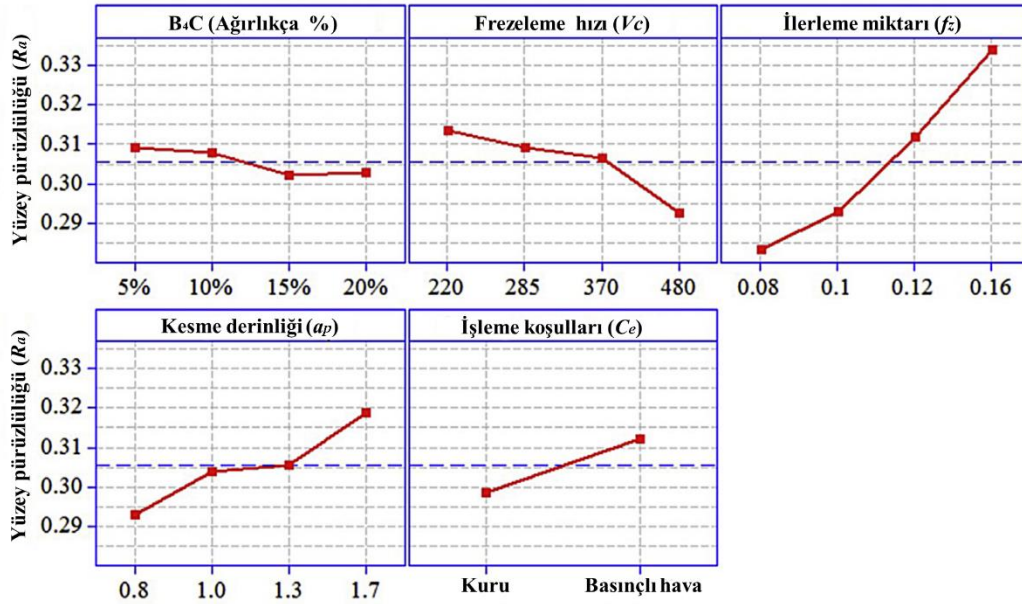
Karabulut vd., “B₄C parçacık takviyesinin Al6061 / B₄C kompozitlerinin mekanik ve işleme özelliklerine etkisi” isimli çalışmalarında, kompozit malzeme içerisinde bulunan takviye elemanı miktarının ve işleme parametrelerinin numunelerin frezeleme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri numunelerde, matris malzemesi olarak ortalama 100 µm partikül boyutuna sahip AA6061, takviye elemanı olarak ise ortalama 10 µm partikül boyutuna sahip B₄C seramik partikülleri kullanmışlardır. Elde ettikleri numunelerin işlenebilirlik testlerini çok kristalli elmas takım kullanarak, farklı frezeleme hızı, ilerleme miktarı, kesme

derinliği ve soğutma koşulunda gerçekleştirmişlerdir (Çizelge 3.4). Deney planı için Taguchi'nin L_{16} ($4^4 \times 2^1$) ortogonal dizisini kullanmışlardır. Çalışmalarında, kontrol faktörlerinin ortalama pürüzlülüğüne etkilerini belirlemişlerdir [43].

Çizelge 3.4. AA6061 / B₄C kompozitlerinin frezeleme işleminde kullanılan işleme parametreleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye			
	1	2	3	4
B ₄ C miktarı (ağırlıkça %)	5	10	15	20
Frezeleme hızı (m/dk)	220	285	370	480
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,08	0,1	0,12	0,16
Kesme derinliği (mm)	0,8	1	1,3	1,7
Soğutma ortamı	Kuru	Basınçlı hava		

Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü takviye miktarının ve frezeleme hızının artması ile azaldığını, kesme derinliği ve ilerleme miktarının artması ile arttığını belirtmişlerdir (Şekil 3.7). Araştırmacılar en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini ağırlıkça %15 B₄C içeren numunelerde kuru işleme koşullarında, 0,8 mm kesme derinliği, 0,08 mm/dev ilerleme miktarı, 480 m/dk frezeleme hızında elde ettiklerini belirtmişlerdir [43].



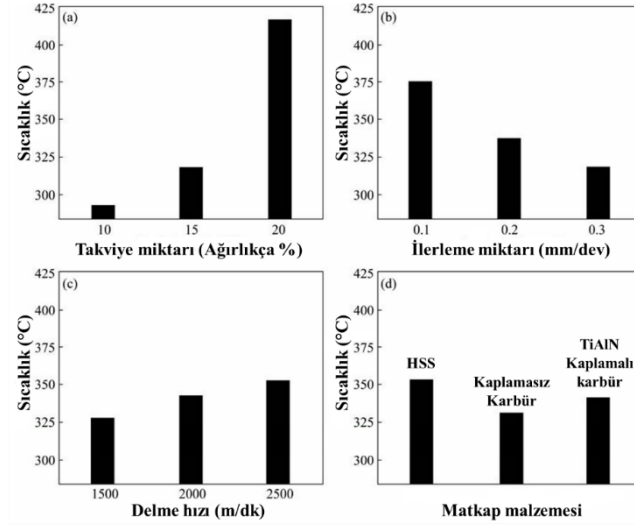
Şekil 3.7. İşlem parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri [43].

Taşkesen ve Kütükde, B₄C ile takviye edilmiş alüminyum kompozitlerinin delinebilirlik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, kesme hızı, ilerleme miktarı, kesici takım malzemesi ve kompozit içerisinde bulunan B₄C miktarının delik delme işlemi sırasında oluşan sıcaklık üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (Çizelge 3.5). Toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri numunelerinde matris fazı olarak içerisinde %5 Zn, %3,5 Cu ve %2,5 Mg bulunan alüminyum 7xxx alaşımını, takviye elemanı olarak ise B₄C partiküllerini kullanmışlardır. Delik delme deneylerini kuru işleme şartlarında 8 mm çapında matkaplar kullanarak yapmışlardır. Araştırmacılar deney planı için Taguchi'nin L₂₇ (3¹³) ortogonal dizisini kullanmışlardır [44].

Çizelge 3.5. Delik delme işlem faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye		
	1	2	3
B ₄ C miktarı (ağırlıkça %)	10	15	25
Delme hızı (m/dk)	1500	2000	2500
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,1	0,2	0,3
Matkap malzemesi	HSS	Kaplamasız karbür	TiAlN kaplamalı karbür

Taşkesen ve Kütükde delik delme işlemleri sonucunda (Şekil 3.8), ilerleme miktarının artmasıyla işleme sıcaklığının düştüğünü, bu duruma işleme esnasında oluşan sıcaklığın %80'inin talaşla birlikte ortamdan uzaklaştırması ve artan ilerleme miktarının talaş boşaltımını kolaylaştırmasının neden olduğunu belirtmişlerdir. Malzeme içerisindeki takviye oranının artması sonucunda işleme sıcaklığının arttığını ve bu sonuca artan takviye oranıyla birlikte kesici takım-malzeme arasındaki aşındırıcı kuvvet artışının sebep olduğunu belirtmişlerdir. Delme hızındaki artışların işleme sıcaklıklarında küçük artışlara sebep olduğunu ve delme hızının, ilerleme miktarı ve takviye miktarına göre daha az etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacılar en düşük işleme sıcaklığının kaplamasız karbür takımla ölçüldüğünü belirtmişlerdir [44].



Şekil 3.8. Delme sıcaklığı için kontrol faktörlerinin ortalama yanıt grafikleri [44].

Taşkesen ve Kütükde, gri ilişkisel analiz kullanılarak B₄C takviyeli metal matrisli kompozitlerin delme özelliklerini deneysel olarak araştırdıkları çalışmalarında, toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri numunelerinde matris fazı olarak AA7075, takviye elemanı olarak ise B₄C partiküllerini kullanmışlardır. Delik delme deneylerinde, farklı kesici takım malzemesi, ilerleme oranı, delme hızı ve B₄C oranının (Çizelge 3.6), kesme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. Delik delme deneylerini 8 mm çapında matkaplar ile kuru işleme şartlarında yapmışlar ve deney planı için Taguchi'nin L₂₇ (3¹³) ortogonal dizisini kullanmışlardır. Delme işlemi sonucunda ölçülen itme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün en aza indirilmesi amacıyla gri ilişkisel analiz yönteminde "En küçük daha iyidir" hesaplama yöntemini kullanmışlardır.

Çizelge 3.6. Delik delme işlemlerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye		
	1	2	3
B ₄ C miktarı (ağırlıkça %) (A)	10	15	25
Delme hızı (m/dk) (B)	1500	2000	2500
İlerleme miktarı (mm/dev) (C)	0,1	0,2	0,3
Matkap malzemesi (D)	HSS	Kaplamasız karbür	TiAlN kaplamalı karbür

Araştırmacılar çalışmalarında, B₄C takviye oranının ve ilerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetinin arttığını fakat delme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin azaldığını belirtmişlerdir. En iyi yüzey kalitesinin kaplamalı karbür takımlarda en kötü yüzey kalitesinin ise HSS takımlarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, gri ilişkisel analiz sonucunda minimum itme kuvveti, tork ve yüzey pürüzlülüğünü aynı anda dikkate aldıklarında önerilen faktör seviyelerinin, ağırlıkça % 10 B₄C miktarı, 0.1 mm/dev ilerleme hızı, 2000 m/dk delme hızı ve TiAlN kaplamalı karbür takım olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca gri ilişkisel derecelerin varyans analizi (ANOVA) sonucuna göre delme deneyleri üzerine B₄C miktarının %47,19'lük, matkap malzemesinin %20,53'lük, ilerleme miktarının %8,89'luk ve delme hızının %8,73'lük etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir [45].

Ekici vd., seramik partiküllerle takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin delik delme ile işlenebilirlikleri üzerine yapmış oldukları çalışmalarında, kompozit içerisine grafit ilavesinin, kesme hızının ve ilerleme miktarının (Çizelge 3.7), kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. Delme parametrelerinin işlenebilirlik üzerindeki yüzde katkılarını ANOVA kullanılarak belirlenmişlerdir. Delik delme deneylerini kuru işleme şartlarında ve 5 mm çapında kaplamasız karbür takım kullanarak yapmışlardır. Toz metalurjisi yöntemi kullanarak ürettikleri numunelerde matris malzemesi olarak Al-Cu alaşımını kullanmışlardır. Matris malzemesi içerisinde (ağırlıkça %) Si (%0,6), Cu (%4,5) Mg (%0,5) ve geri kalan oranda alüminyum bulunmaktadır. Araştırmacılar çalışmalarında, iki farklı kompozit numune (Al/10B₄C ve Al/10B₄C/Gr) üretmişlerdir. Numunelerin içerisinde ağırlıkça %10 B₄C oranı sabit tutulmuş hibrit kompozit içerisine %5 grafit eklemişlerdir [46].

Çizelge 3.7. İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye		
	1	2	3
Delme hızı (m/dk)	18	25	35
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,08	0,112	0,16
Grafit takviyesi (ağırlıkça %)	0	5	

Ekici ve arkadaşları deneysel çalışmaları sonucunda, delme hızındaki artışla birlikte kesme kuvvetinin azaldığını belirtmişlerdir. Al/10B₄C/5Gr hibrit kompozitin delinmesinde, grafit takviyesinin katı yağlayıcı gibi davrandığını ve Al/10B₄C numunesine kıyasla kesme kuvvetinde %25'e varan düşüşler gözlemlediklerini belirtmişlerdir. Her iki numunenin delme işlemi sonucunda ilerleme miktarındaki artışa paralel olarak yüzey pürüzlülüğünün de arttığını ve yüzey pürüzlülüğüne en etkili parametrenin % 88,4'lük oran ile grafit takviyesi olduğunu tespit etmişlerdir [46].

Jadhav vd., “Al6061 / Al₂O₃p metal matrisli kompozitlerin delme işleminde kesme parametrelerinin, takım uç açısının ve takviye yüzdesinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi” isimli çalışmalarında, toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri AA6061 matrisli Al₂O₃ takviyeli numunelerin işlenebilirlik özelliklerini kesme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirmişlerdir. Delik delme işlemlerinde farklı takviye oranı, takım uç açısı, delme hızı ve ilerleme miktarı değerleri kullanmışlardır (Çizelge 3.8). Deney planı için Taguchi'nin L₁₈ (2¹x3³) ortogonal dizisini kullanmışlardır [4].

Çizelge 3.8. Delik delme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye		
	1	2	3
Al ₂ O ₃ (ağırlıkça %)	0	10	
Takım uç açısı (°)	118	128	138
Delme hızı (m/dk)	2200	2600	3000
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,05	0,1	0,2

Jadhav ve arkadaşları çalışmalarında, %0 Al₂O₃ partikül içeren numunelerde yüzey kalitesinin %10 Al₂O₃ partikül içeren numunelere göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Numune içerisinde bulunan Al₂O₃ partiküllerinin takım ile numune arasındaki aşınmayı arttırdığını ve bu durumun yüzey kalitesini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Yüksek delme hızı ve takım uç açısı değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, ilerleme miktarında ise bu durumun tersi olduğunu ve ilerleme miktarının azalması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, %10 Al₂O₃ partikül içeren numunelerin delik delme işlemi esnasında

oluşan kesme kuvveti ve delme momentinin daha düşük olduğunu belirtmişler ve sebebini yapı içerisindeki Al_2O_3 partiküllerinin numuneyi gevrekletirmesi sayesinde talaş oluşumunun kolaylaşması olarak açıklamışlardır. En düşük kesme kuvveti değerlerini 118° uç açısında ve 0,05 mm/dev ilerleme değerinde elde ettiklerini ve delme hızının kesme kuvveti üzerinde etkili olmasını belirtmişlerdir [4].

Tosun ve Muratoğlu, Al/SiCp metal matrisli kompozitlerin delik delme yöntemi ile işlenebilirliklerini araştırdıkları çalışmalarında, kesici takım türü, takım uç açısı, ilerleme miktarı ve delme hızının delme işlemi sonrasında numunenin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (Çizelge 3.9). Delik delme deneylerini kuru işleme şartlarında ve 5 mm çapında matkap kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri numunelerinde matris malzemesi olarak AA2124, takviye elemanı olarak ise ortalama 3 μm boyutunda SiC partiküllerini kullanmışlardır. Ürettikleri numuneler ağırlıkça %17 SiC içermektedir [47].

Çizelge 3.9. Delme işlemlerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye		
	1	2	3
Matkap malzemesi	HSS	TiN kaplamalı HSS	Kaplamasız karbür
Takım uç açısı ($^\circ$)	90	118	130
Delme hızı (m/dk)	260	1330	
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,08	0,16	

Tosun ve Muratoğlu çalışmalarında ilerleme miktarının ve takım uç açısının artması ile yüzey pürüzlüğünün azaldığını fakat delme hızının etkisinin kullanılan takıma göre farklılık gösterdiğini, en kötü yüzey kalitesinin HSS takımlar ile elde edildiğini en iyi yüzey kalitesinin ise karbür takımlar ile elde edildiğini tespit etmişlerdir [47].

Basavarajappa vd. “ Alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin delinmesi” isimli çalışmalarında, kompozit malzemelerin delinmesinde kesme parametrelerinin ilerleme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [48]. Araştırmacılar çalışmalarında, yüksek mukavemeti sebebi ile matris malzemesi olarak AA2219 alaşımını

kullandıklarını belirtmişlerdir. Takviye elemanı olarak ise 25 µm büyüklüğünde %15 oranda SiC_p ve 45 µm büyüklüğünde %3 oranda grafit parçacıkları kullanmışlardır. Numunelerini sıvı metalurjisi yöntemiyle iki farklı bileşimde (AA2219/15SiC_p ve AA2219/15SiC_p-3Gr) üretmişlerdir. Delik delme deneylerini 5 mm çapında 118° matkap uç açısına sahip kaplamalı karbür matkaplar kullanarak, üç farklı devir sayısı (1000 dev/dak, 2000 dev/dak ve 3000 dev/dak) ve ilerleme hızında (0,05 mm/dev, 0,15 mm/dev ve 0,25 mm/dev) yapmışlardır. Araştırmacılar çalışmalarının sonucunda devir sayısının ilerleme kuvveti üzerinde etkili olmadığını, ilerleme kuvveti üzerindeki en etkili faktörün ilerleme hızı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, kompozit içerisine %3 grafit ilavesinin takım-iş parçası arasındaki sürtümenin azalmasına neden olduğunu ve dolayısıyla kesme kuvvetinde de önemli ölçüde düşüşler gözlemlediklerini belirtmişlerdir [48].

Ramulu ve arkadaşları, farklı oranlarda takviye içeren metal matrisli kompozitlerin delinmesinde kesme parametrelerinin, kesme kuvvetleri üzerine etkisini araştırdıkları çalışmalarında matris malzemesi olarak AA6061 ve takviye elemanı olarak Al₂O₃ partiküllerini kullanmışlardır (Çizelge 3.10) [49]. Deneysel çalışmalarında kullandıkları numunelerini toz metalurjisi yöntemi ile üretmişlerdir.

Çizelge 3.10. Ramulu vd. çalışmalarında kullandıkları kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye			
	1	2	3	4
Al ₂ O ₃ miktarı (ağırlıkça %)	10	20	-	-
Devir sayısı (dev/dak)	1320	2230	3500	5440
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,0635	0,127	0,1905	0,254
Matkap malzemesi	HSS	Kaplamasız karbür	PCD elmas	-

Araştırmacılar çalışmalarında, metal matrisli kompozitlerin delinmesinde takım seçimin önemini vurgulamışlar ve PCD elmas takım ile yapılan deneylerde en iyi performansı elde ettiklerini belirtmişlerdir. PCD elmas takım ile delik delme işlemlerinde minimum kesme kuvvetinin oluştuğunu ve diğer takımlara göre en iyi yüzey kalitesini elde ettiklerini belirtmişlerdir. Kesme kuvvetinin iş parçası malzemesinden etkilendiğini ve iş parçası içerisinde bulunan takviye elemanı

miktarının artması ile kesme kuvvetlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Devir sayısının kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını fakat ilerleme miktarının artması ile kesme kuvvetinde ve delme momentinde ciddi oranlarda artışlar gözlemlediklerini bildirmişlerdir [49].

Ahamed ve arkadaşlarının metal matrisli hibrit kompozitlerin delinmesinde işlem parametrelerinin takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, numunelerini karıştırarak dökme yöntemi ile üretmişlerdir [50]. Matris malzemesi olarak AA1100, takviye elemanı olarak ise ağırlıkça %5 B₄C_p ve %5SiC_p seramiklerini kullanmışlardır. Numunelerin delinmesinde 5 mm çapında 118° uç açısına sahip HSS matkap kullanmışlardır. Araştırmacıların çalışmalarında kullandıkları kontrol faktörleri Çizelge 3.11’ de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Ahamed ve arkadaşlarının metal matrisli hibrit kompozitlerin delinmesinde kullandıkları kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Kontrol Faktörleri	Seviye		
	1	2	3
Devir sayısı (dev/dak)	160	315	630
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,125	0,200	0,315

Araştırmacılar, delik delme işlemi sonucunda takım üzerinde abrazyif ve adhezif aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu yüksek hızlarda ek olarak kreter aşınmasının oluştuğunu bildirmişlerdir. İlerleme miktarının azalması ile aşınmanın arttığını, bu duruma artan takım-iş parçası temasının etkili olduğunu belirtmişlerdir. Devir sayısının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve takım üzerinde oluşan adhesif aşınma miktarının azaldığını belirtmişlerdir [50].

Davim ve arkadaşları çalışmalarında, A356/20/SiC_p metal matrisli kompozitlerin delinmesinde ilerleme miktarının, kesme hızının ve kesme zamanının, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkilerini araştırmışlardır [51–53]. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarda yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin %43 oranla ilerleme hızı olduğunu belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğüne diğer etkili parametrelerin %41 oranla kesme hızı ve %14 oranla ilerleme hızının kesme hızı ile etkileşimi olduğunu belirtmişlerdir [52]. Kesme hızının

artması ile yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişim gözlemlenemediklerini fakat ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, SiC takviyeli malzemelerin delinmesinde oluşan en etkili takım aşınmasının takım serbest yüzeyinde oluşan abrasiv aşınma olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca takımlarda, adhesif aşınma ve krater aşınmasını gözlemlediklerini belirtmişlerdir [52]. Taguchi deney tasarımına göre yapmış oldukları deneylerin ANOVA analizi sonucunda kesme zamanının %50 oranında ve ilerleme hızının %24 oranında takım aşınması üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir [53].

3.3. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRMESİ

FDM'lerin üretimi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde alüminyum esaslı kompozitlerde takviye elemanı olarak SiC ve B₄C takviyelerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Al₂O₃ seramikleri düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir. Son yıllarda Al₂O₃ seramiklerinin balistik uygulamalarında yaygın olarak kullanımı sağlanmaktadır.

FDM'lerin üretiminde kullanılan toz metalurjisi yöntemi, matris içerisinde takviye elemanının homojen şekilde dağılması, üretimin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi sebebi ile istenmeyen faz oluşumun engellenmesi ve düşük maliyetli olması sebebi ile üretim yöntemleri arasından en çok tercih edilen üretim yöntemlerindendir.

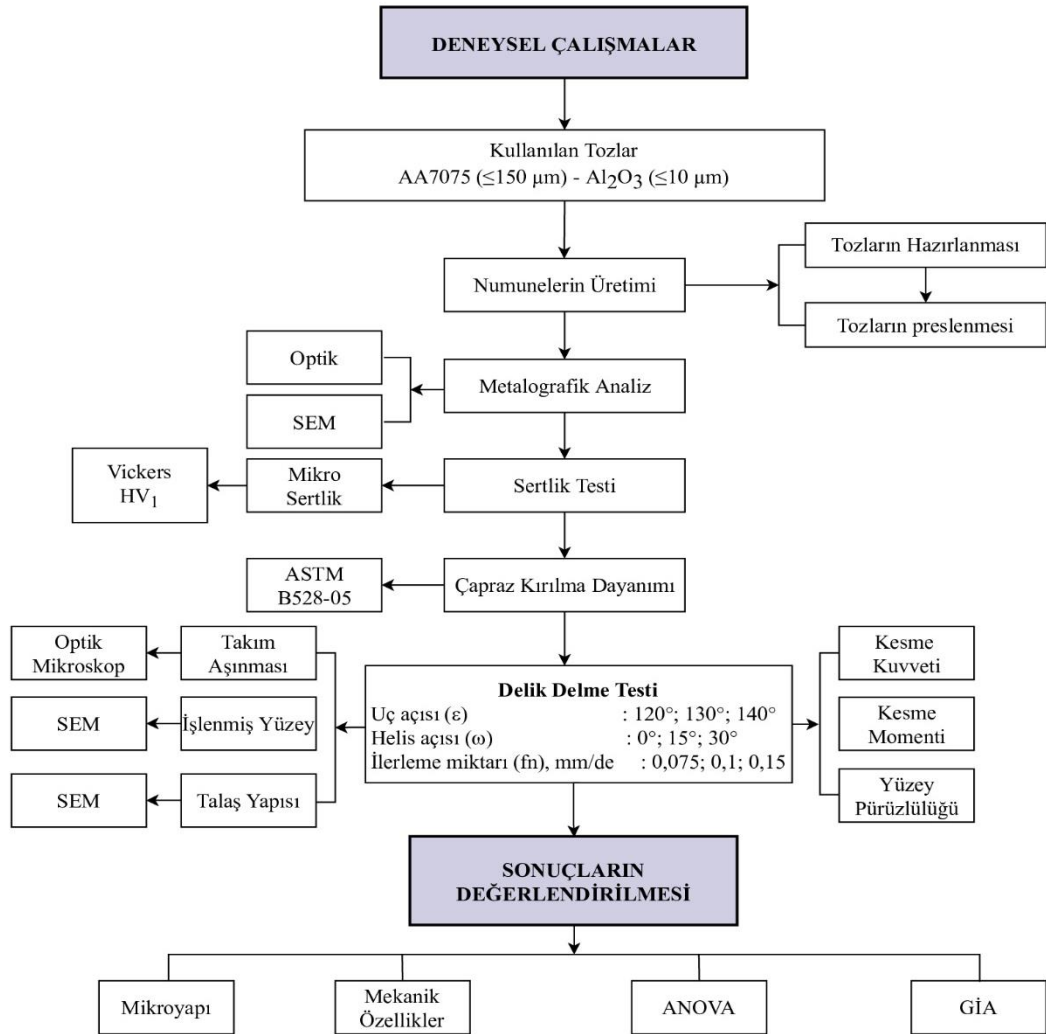
Endüstriyel ürünlerin üretiminde parça geometrisinin küçük delik ve ince bitirme toleransına sahip olduğu durumlarda özellikle büyük kalıp maliyetlerini düşürmek ve kalıp ömrünü uzatmak için ikincil işlemlere (örneğin, delme, tornalama, frezeleme vb.) ihtiyaç duyulur. FDM'lerin işlenebilirliği ile ilgili yeterince çalışma olmadığı görülmektedir.

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş FDM'lerin işlenmesinde takım geometrisinin ve kesme parametrelerinin, delme kuvvetleri ve momenti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, işlenmiş yüzey ve talaş yapıları üzerine etkileri araştırılmıştır.

BÖLÜM 4

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, AA7075 ($\leq 150 \mu\text{m}$) toz malzemeye farklı oranlarda Al_2O_3 ($\leq 10 \mu\text{m}$) tozu ilave edilerek toz metalurjisi yöntemi ile 3 farklı grupta fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin metalürjik, mekanik ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. Çalışmaya ait deney akış şeması Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney akış şeması.

4.1. FDM ÜRETİMİNDE KULLANILAN TOZLAR

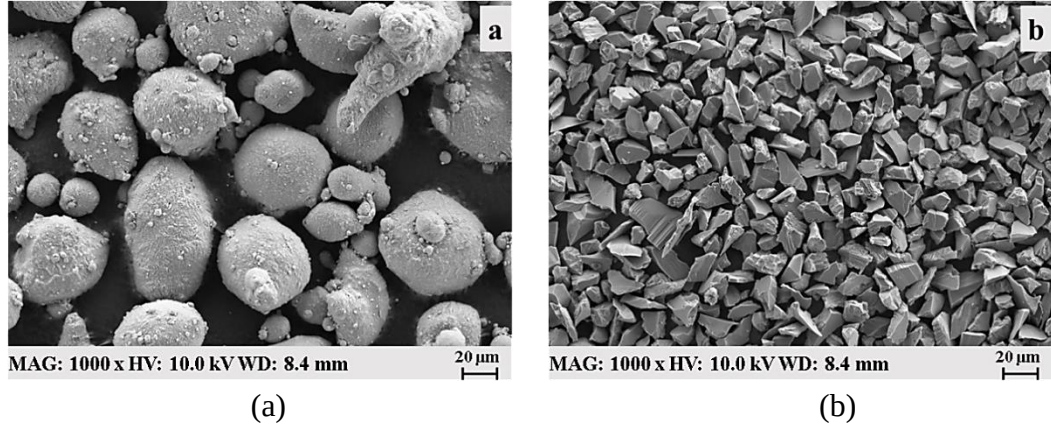
FDM'lerin üretiminde matris malzemesi olarak Aldrich firmasından temin edilen küresel şekilli ve ortalama $\leq 150 \mu\text{m}$ parçacık boyutuna sahip ön alaşımlı AA7075 tozu kullanılmıştır (Çizelge 4.1). Takviye elemanı olarak ise Aldour firmasından temin edilen ortalama $\leq 10 \mu\text{m}$ parçacık boyutuna sahip Al_2O_3 tozları kullanılmıştır. Numune üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri Şekil 4.2'de ve teknik özellikleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AA7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Element	% Kimyasal Bileşim
Çinko	5,50
Magmezyum	2,50
Bakır	1,6
Krom	2,5
Demir	0,5
Silisyum	0,4
Manganez	0,3
Titanyum	0,2
Alüminyum	Geri Kalan

Çizelge 4.2. Numune üretiminde kullanılan tozların özellikleri.

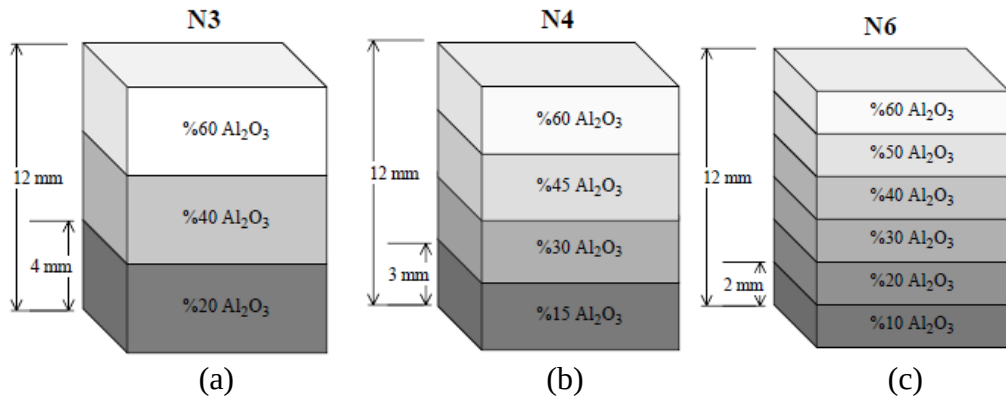
Özellikler	Malzeme	
	AA7075	Al_2O_3
Yoğunluk [g/cm^3]	2,80	3,96
Termal iletkenlik katsayısı [W/m K]	130	25
Termal genleşme katsayısı [10^{-6}K^{-1}]	23,2	8,3
Elastiklik modülü [GPa]	72	410
Erime Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	480-500	2072



Şekil 4.2. a) AA7075 ve b) Al_2O_3 tozlarının SEM görüntüleri.

4.2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERİN ÜRETİMİ

Yapılan tez çalışmasında, AA7075 matrisli, Al_2O_3 takviyeli FDM'ler üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Üretilen FDM'ler 3, 4 ve 6 tabakalı yapıya sahiptir ve numunelerin toplam kalınlığı 12 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. 3 tabakalı FDM'ler, kademelerindeki Al_2O_3 miktarı ağırlıkça %20-40-60 olacak şekilde üretilmiştir, N3 olarak kodlanmıştır. 4 tabakalı FDM'ler, tabakadaki Al_2O_3 miktarı ağırlıkça %15-30-45-60 olacak şekilde üretilmiştir, N4 olarak kodlanmıştır. 6 tabakalı FDM'ler ise tabakadaki Al_2O_3 miktarı ağırlıkça % 10-20-30-40-50-60 olacak şekilde üretilmiştir ve N6 olarak kodlanmıştır (Şekil 4.3).



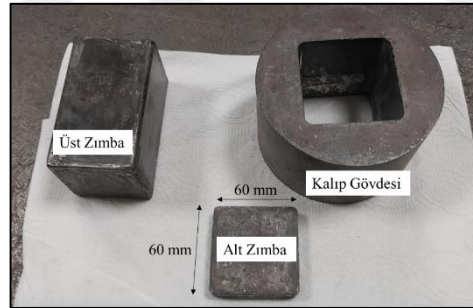
Şekil 4.3. Üretilen FDM'lerin şematik görüntüsü. a) üç tabakalı, b) dört tabakalı ve c) altı tabakalı numunenin şematik gösterimi.

4.2.1. Tozların Hazırlanması

AA7075 ve Al_2O_3 tozları, tabakalardaki ağırlık oranlarına göre Precisa marka 0,1mg hassasiyete sahip hassas terazi kullanılarak tartılmıştır. Tartılan tozlar homojen bir karışım elde etmek amacıyla 45 dakika süreyle Turbula marka üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılmıştır.

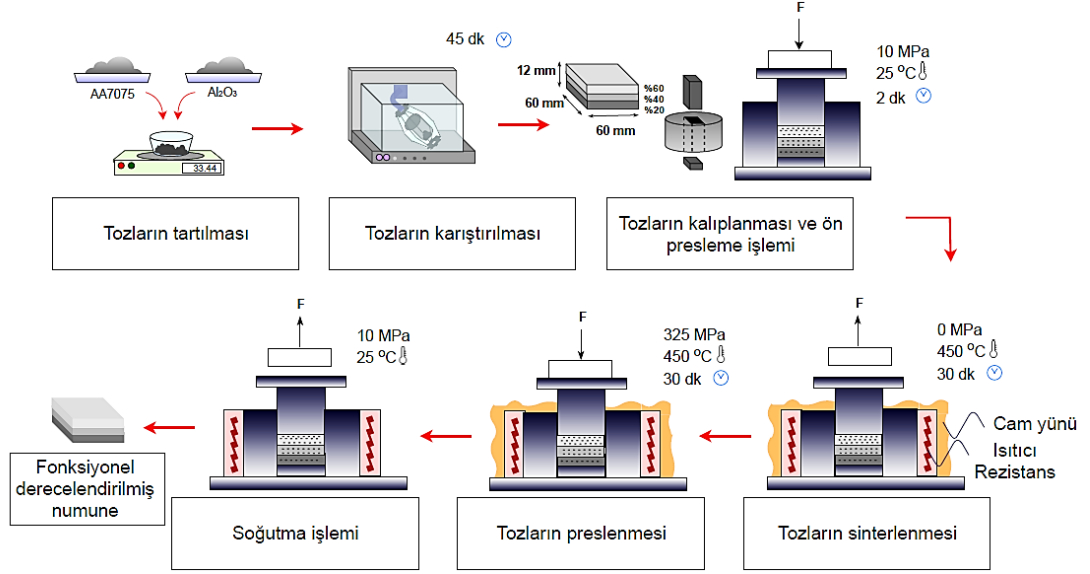
4.2.2. Tozların Preslenmesi

Numunelerin üretimi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde sıcak iş çeliğinden üretilen ve 60 X 60 mm² boyutlarına sahip kalıp kullanılmıştır (Şekil 4.4). Numunelerin kalıptan kolayca çıkarılması amacıyla kalıp parçaları katı yağlayıcı ile yağlanmıştır. Karışımları sağlanan AA7075 ve Al_2O_3 toz karışımları Şekil 4.4’de gösterilen kalıp içerisine kademelerine göre serilmiştir.



Şekil 4.4. Fonksiyonel derecelendirilmiş numune üretiminde kullanılan kalıba ait fotoğraf görüntüsü.

Kalıp içerisine yerleştirilen toz karışımlarına 280 ton kapasiteli hidrolik pres ile 10 MPa basınç altında ön sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Ardından sıkıştırılmış numuneler 450 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve 30 dakika bekletilmiştir. 450 °C sıcaklıkta sinterlenen blok numuneler 325 MPa yük altında, 30 dakika boyunca sıcak preslenmiştir. Sıcak presleme işleminden sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretiminin şematik gösterimi Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. FDM üretiminin şematik gösterimi.

4.3. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU

Üretilen numunler mikroyapı karakterizasyonu için Struers marka hassas kesme cihazı ile uygun boyutlarda kesilmiştir. Kesilen numuneler sıcak bakalite alınmıştır. Bakalit numunler sırası ile 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı SiC zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler, 1-3 μm boyutlarında elmas solüsyon ve keçe kullanılarak parlatılmıştır. Daha sonra numuneler Keller (1 ml HNO_3 + 1 ml HF + 1,5 ml HCl + 200 ml H_2O) çözeltisinde dağlanmıştır. Yapılan işlemlerin ardından numunelerin mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Mikroyapısal karakterizasyonlar kapsamında, AA7075 matris ile Al_2O_3 partiküllerinin oluşturduğu arayüzey bölgeleri, Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisindeki dağılımları ve tabakalar arasındaki geçiş bölgeleri incelenmiştir.

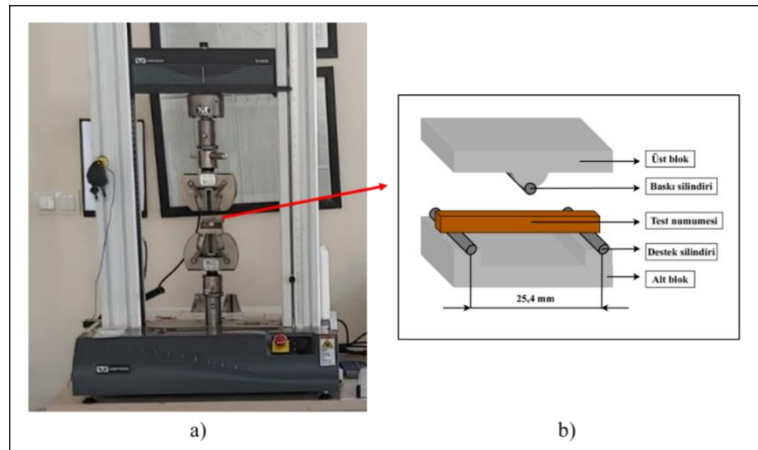
4.4. SERTLİK TESTİ

AA7075/ Al_2O_3 fonksiyonel derecelendirilmiş numunler sertlik ölçümleri yapılmadan önce standart metalografik numune hazırlama işlemlerine tabii tutulmuştur. Mikrosertlik ölçümleri QNESS Q10 A marka mikrosertlik ölçüm cihazında Vickers

sertlik ölçme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin mikrosertlikleri 1 kg yükün 15 saniye uygulanması ile belirlenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri 3 farklı numuneden ve numunelerin kademeleri boyuca 5 farklı noktadan yapılmıştır. Mikrosertlik değerleri ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Tabakaların mikrosertlik değerleri çizelgelenirken önce numune kodu ardından tabaka içerisinde bulunan Al_2O_3 miktarı verilmiştir. Örneğin; üç tabakalı (N3) numunenin ağırlıkça %20 Al_2O_3 içeren tabakasının sertliği N3-20 şeklinde kodlanmıştır.

4.5. ÇAPRAZ KIRILMA TESTİ

AA7075/ Al_2O_3 fonksiyonel derecelendirilmiş numunelerin eğilme davranışlarının incelenmesi amacıyla çapraz kırılma testleri ASTM B528-05 standardına uygun olarak yapılmıştır. Üretilen numuneler ASTM B528-05 standartında belirtilen boyutlarda olacak şekilde hassas kesme cihazı ile kesilerek hazırlanmıştır. Çapraz kırılma testleri Instron 3369 model 50 kN kapasiteli çekme cihazında (Şekil 4.6) 1 mm/dk hızda yapılmıştır. Numunelerin çapraz kırılma davranışları yükün en yüksek ve en düşük Al_2O_3 içeren tabakaların üzerine uygulanması durumlarında ayrı ayrı incelenmiştir. Çapraz kırılma test verileri, her bir numune grubu için 3 farklı numune ile tekrarlanmış ve elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.6. Çapraz kırılma test cihazı a) Çapraz kırılma test cihazının fotoğraf görüntüsü, b) Çapraz kırılma test aparatı ve test numunesinin şematik gösterimi.

4.6. DELİK DELME TESTLERİ

İşlenebilirlik testleri kapsamında, 3 kademeli FDM'nin delik delme yöntemiyle işlenebilirlikleri incelenmiştir. 3 tabakalı numunelerdeki tabaka kalınlığının daha geniş olması, takım performansının ve çıktı parametrelerinin (Kesme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) değerlendirilmesinde tabakalar arası geçişlerin etkisinin minimuma indirilmesi amacıyla delik delme testleri 3 tabakalı numunelerde gerçekleştirilmiştir. Delik delme işlemlerinde kesici takım geometrisi (3 farklı uç açısı ve helis açısı) ve ilerleme miktarının (3 farklı), ortalama yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve delme momenti üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

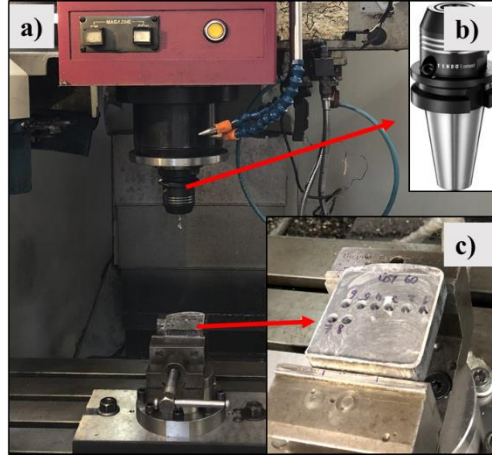
4.6.1. Takım Tezgâhı ve Takım Tutucu

Delik delme işlemleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölüm Laboratuvarlarında bulunan Johnford (VMC-550 Fanuc Serisi O-M) marka sayısal kontrollü (NC) dik işleme tezgâhı kullanılarak yapılmıştır. Tezgaha ait teknik özellikler Çizelge 4.3' de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Johnford VMC-550 dik işleme merkezi teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Markası	Johnford
İşletim sistemi	Fanuc Serisi O-M
Tezgâh gücü, [kW]	15
En yüksek devir sayısı, [dev/dk]	3500

Deneylerde matkap uçları iş miline, JIS B 6339 standardına uygun “Schunk-206436” marka BT40-hidrolik takım tutucu ve bu tutucuya ait 6 mm çaplı pens ile sabitlenmiştir. Matkap uçları helis kanalı dışarıda kalacak şekilde, pens yüzeyinden aynı uzunlukta (<4D) takım tutucuya bağlanmıştır. Delme işlenimine hazırlanmış üç tabakalı FDM'nin tezgaha bağlanmış görüntüsü Şekil 4.7' da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Delik delme işleminin fotoğraf görüntüsü. a) Takım tezgahı, b) Hidrolik takım tutucu, c) İş parçası (üç tabakalı FDM).

4.6.2. Kesici Takımlar ve Özellikleri

Delik delme deneylerinde kullanılan matkap uçları, 6 mm çapında sementit karbür çubuk (Ceratizit; P-line, Submicron carbide grade code: CTS12D) malzemeden, üç farklı helis (0° , 15° ve 30°) ve uç açısında (120° , 130° ve 140°) KARCAN A.Ş (Eskişehir/Türkiye) tarafından özel olarak üretilmiştir. Matkap uçları; her biri 3D kanal boyuna sahip, geometrik açıdan birbirinden farklı, toplam 9 çeşittir (Çizelge 4.4). Ayrıca matkap ucu kesici ağızlarının dış köşesine 1 mm ebatlı pah kırılmıştır. Matkap ucu pah uygulaması, sementit karbür matkap ucunun en zayıf bölgesi olan kesici ağız köşesine, çentik/darbe hasar etkilerine karşı dayanım kazandırmak amacıyla yapılmıştır. Her yeni bir delik delme işleminde yeni matkap ucu kullanılmıştır.

Çizelge 4.4. Delik delme işleminde kullanılan matkap uçları ve teknik özellikleri.

Takım malzemesi	Helis açısı (ω), $^\circ$	Uç açısı (ϵ), $^\circ$
Karbür (Ceratizit; P-line, Submicron carbide grade code: CTS12D)	Helis açısı ($\omega:0^\circ$)	120
		130
		140
	Helis açısı ($\omega:15^\circ$)	120
		130
		140
	Helis açısı ($\omega:30^\circ$)	120
		130
		140

4.6.3. Delik Delme Parametreleri ve Deney Tasarımı

Delik delme deneyleri kuru işleme şartlarında, sabit 25 m/ dk kesme hızında, üç farklı uç açısı, üç farklı helis açısı ve üç farklı ilerleme miktarı seçilerek yapılmıştır. Delik delme deneylerinde kullanılan delme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 4.5’ de verilmiştir. Önceki çalışmalarda standart matkap helis açısının 25 ile 30° arasında olduğu fakat uygulama alanlarına göre helis açısının 12° ile 40° arasında değişiklik gösterdiği, ayrıca 0° helis açılı matkapların kısa talaş üreten demir dışı metallatin işlenmesinde kullanıldığı belirtilmiştir [54–56].

Çizelge 4.5. Delik delme deneylerinde kullanılan delme parametreleri ve seviyeleri.

Konrol faktörleri	Seviye		
	1	2	3
Uç açısı (ϵ), °	120	130	140
Helis açısı (ω), °	0	15	30
İlerleme miktarı (f_n), mm/dev	0,075	0,1	0,15

Çalışmada, delik delme parametrelerinin FDM’ler üzerindeki etkisini gözlemlemek için full faktöriyel deney tasarımı tercih edilmiştir. Full faktöriyel deney tasarımı kapsamında toplam 27 [(seviye sayısı)^{faktör sayısı} = 3³] deney yapılmıştır. Deney tasarımı Çizelge 4.6’ de verilmiştir.

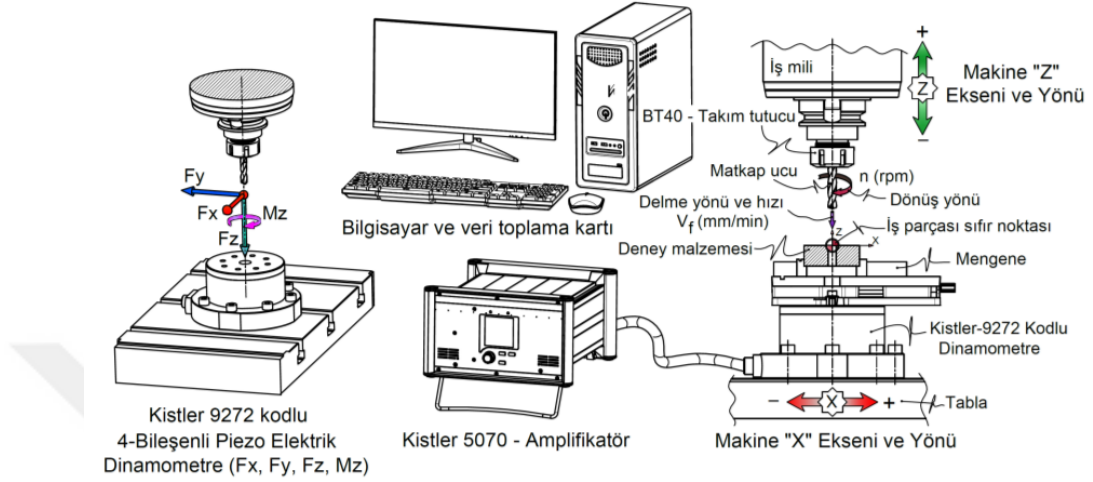
Çizelge 4.6. Tam faktöriyel deney tasarımı.

Deney numarası	Uç açısı (ϵ), °	Helis açısı (ω), °	İlerleme miktarı (f_n), mm/dev
1	120	0	0,075
2	120	0	0,100
3	120	0	0,150
4	120	15	0,075
5	120	15	0,100
6	120	15	0,150
7	120	30	0,075
8	120	30	0,100
9	120	30	0,150
10	130	0	0,075
11	130	0	0,100
12	130	0	0,150
13	130	15	0,075
14	130	15	0,100
15	130	15	0,150
16	130	30	0,075
17	130	30	0,100
18	130	30	0,150
19	140	0	0,075
20	140	0	0,100
21	140	0	0,150
22	140	15	0,075
23	140	15	0,100
24	140	15	0,150
25	140	30	0,075
26	140	30	0,100
27	140	30	0,150

4.6.4. Kesme Kuvveti ve Delme Momentinin Ölçümü

Delik delme işlemi esnasında oluşan kesme kuvveti ve moment ölçümleri, Johnford VMC-550 dik işleme merkezine mekanik el mengenesi yerleştirilmiş “Kistler Type 9272” model dinometre kullanılarak yapılmıştır. Dinometreden alınan veriler

Kistler Type 5070 marka dönüştürücüye ve ardından Dynoware yazılımına aktarılmıştır. Oluşturulan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.8’ de verilmiştir.

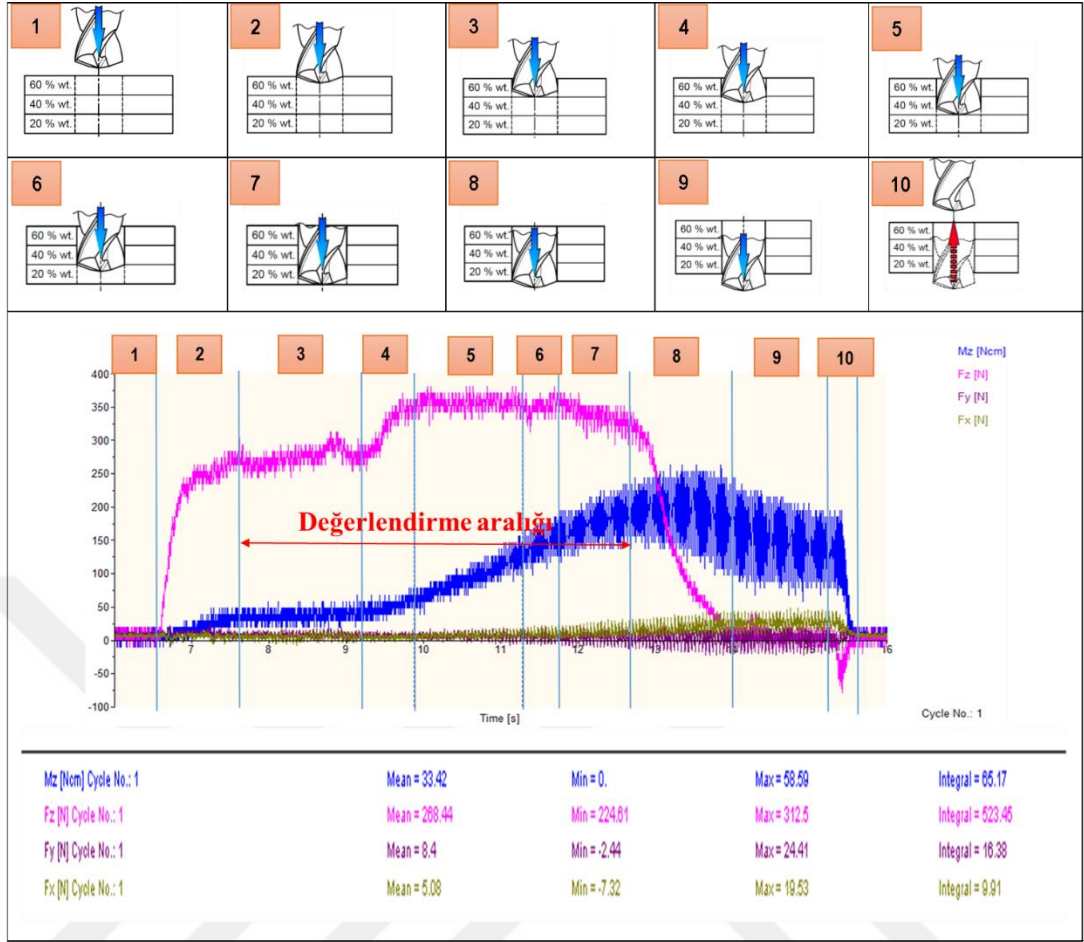


Şekil 4.8. İşleme deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Dynoware programı ile delme numunesi üzerinde oluşan kesme kuvvetinin üç bileşeni ve moment, delme işlemi boyunca ölçülmüştür. Delme esnasında kuvvet ve moment değerlerinin doğru ölçülebilmesi için NC program iş referansı (X ve Y eksen), dinamometrenin ölçüm orijini ile karşılaştırılmıştır. NC program Z eksen orijini ise iş malzemesi yüzeyinde seçilmiştir.

4.6.5. Delme Testi Verilerinin Değerlendirilme Metodolojisi

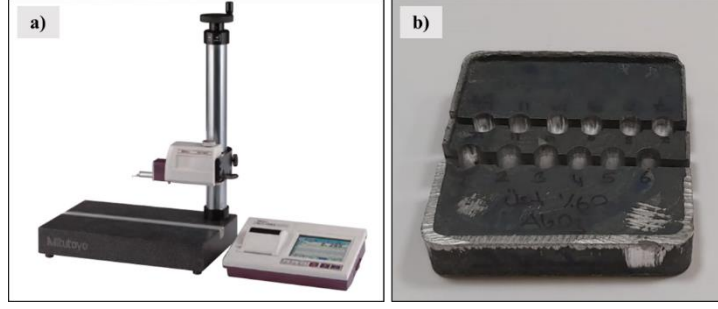
Dynoware yazılımı tarafından delme sürecinde zamana bağlı oluşan kesme kuvvetleri ve moment grafikleri bölgelere ayrılarak değerlendirilmiştir. Dynoware programı ile oluşan ilerleme kuvveti (F_z) ve delme momenti (M_z) ile ilgili “en düşük – ortalama – en yüksek” değerler ölçülebilmektedir. Değişik uç ve helis açılarındaki matkap uçlarının FDM’ yi delirken sergiledikleri performansın değerlendirilmesinde, her deney için Şekil 4.9 üzerinde görülen üçüncü bölge ayırım çizgisi başlangıcı ile yedinci bölge ayırım çizgisi bitimi arasındaki aralık, değerlendirme uzunluğu olarak seçilmiştir. Bu bölgedeki ilerleme kuvveti ve delme momenti için ölçülen ortalama değerler, takım performansının değerlendirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Delme işleminde matkap ucunun konumu.

4.6.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Delinmiş yüzeylerin pürüzlülüğü, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan Mitutoyo SJ-410 marka profilometre cihazı ile ISO 1997 standardına göre ölçülmüştür (Şekil 4.10). Ölçümler, 2 μ m çapındaki propla 0,08 mm örneklem uzunluğunda ve delme yönünde yapılmıştır. Deliklerin ortalama örneklem uzunluğu 12 mm' dir ve her delik 90° döndürülerek toplamda 4' er kez ölçülmüştür. Elde edilen ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü. a) Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı, b) Ölçüm yapılan numune.

4.6.7. İşlenmiş Yüzey, Takım aşınması ve Talaş Yapısının Görüntülenmesi

Delik delme işlemi sonucunda elde edilen işlenmiş yüzeylerin ve talaş yapılarının inceleme işlemleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Delme işlemi sonucunda takımlara meydana gelen hasarın tespiti için takım yüzeyleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan Nikon ShuttlePix optik mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

4.7. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Bilimsel çalışmaların değerlendirilmesinde, iki değişken arasında uyum olup olmadığı, eğer uyum varsa bunun derecesinin belirlenmesi istatistiksel açıdan önem arz etmektedir. ANOVA değişkenler arasındaki ilişkinin incelenmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu değişkenlerden biri bağımsız değişken(ler)dir ve araştırmacı tarafından farklı seviyeleri belirlenir. İşlenebilirlik deneylerinde kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici takıma ait geometrik unsurlar bağımsız değişkenlere örnek olarak verilebilir. Diğer değişken ise bağımlı değişken(ler)dir. Bağımlı değişkenler, bağımsız değişkenler ile açıklanmaya çalışılan değişkenlerdir. Kesme kuvveti, delme momenti, yüzey pürüzlülüğü, ölçü tamlığı ve takım aşınması bağımsız değişkenlere örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmada FDM'lerin matkapla delme işlemi sonrasında bağımsız değişkenlerin ve etkileşimlerinin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisi ANOVA ile belirlenmiştir.

İstatistiksel analizler MINITAB 17 paket programı kullanılarak, % 95 güvenirlik seviyesinde ve % 5 anlamlılık seviyesinde gerçekleştirilmiştir.

4.8. GİRİ İLİŞKİSEL ANALİZ (GİA)

Giri ilişkisel analiz (GİA), çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. GİA yeterli veri içermeyen ve belirsizlikler nedeniyle modellenemeyen bir sistemin faktörleri arasındaki temel ilişkileri belirler [57]. GİA bir derecelendirme, sınıflandırma ve karar verme tekniğidir. GİA’da karmaşık formül ve hesaplamaların bulunmaması bu tekniğin kolay ve uygulanabilir olmasını sağlamaktadır [58]. GİA’nın hesaplama adımları aşağıdaki gibidir.

1. Adım: “n” tane değişkenin oluşturduğu referans serisi $x_0(k)$ ve birbirleriyle karşılaştırılacak olan “n” tane değişkenin oluşturduğu faktör serisi $x_i(k)$ belirlenir.

$$x_0(k) = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.1)$$

$$x_i(k) = (x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n)) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4.2)$$

$n, m \in N$ biçiminde ifade edilir.

$x_0(k)$: Referans faktör seri, kıyas yapılacak olan seridir.

$x_i(k)$: İncelenen faktör serisi, karşılaştırılacak olan seridir.

2. Adım: Verilerin normalize edilmesi.

Farklı ölçü birimlerine sahip serilen yer aldığı sistemlerde seriler arası karşılaştırma yapabilmek için veriler normalize edilir. Normalizasyon $1 \leq x_i \leq 0$ arasındadır.

En yüksek daha iyidir.

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (4.3)$$

En düşük daha iyidir.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (4.4)$$

İdeal değer daha iyidir.

$$x_i(k) = \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (4.5)$$

3. Adım: Gri ilişkisel katsayısının hesaplanması.

İdeal ve gerçek deneysel sonuçlar arasındaki ilişkiyi ifade etmek için gri ilişkisel katsayısı (ε) hesaplanır. Aşağıdaki denklemde $\varepsilon(k)$, k . noktadaki gri ilişkisel katsayı, x_0 referans serisi, $j:1, 2, \dots, n$; $k:1, 2, \dots, m$ olmak üzere n deneysel veri sayısı, m gözlenen performans karakteristiği sayısını göstermektedir. Ayırt edici katsayı ζ ile gösterilir, $0 < \zeta < 1$ aralığında tanımlanır ve genellikle 0.5 alınır [9].

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)| \quad (4.6)$$

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (4.7)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \quad (4.8)$$

$$\varepsilon(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \quad (4.9)$$

4. Adım: Gri ilişkisel derecesinin hesaplanması.

Gri ilişkisel derece, gri bir sistemdeki $\gamma(x_0, x_i)$ serisi ile referans serisi arasındaki geometrik benzerliğin bir ölçüsü olup seriler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Gri ilişkisel derece, karşılaştırılan serinin referans seriye ne kadar benzer olduğunu gösterir. Gri ilişkisel derece değeri ne kadar büyük ise x_i ile x_0 arasında o kuvvetli bir

ilişki var demektir. Gri ilişkisel derece gri ilişki katsayısı ile kriterin önem derecesine ilişkin ağırlık değeri çarpılarak hesaplanır [59].

$$\gamma(x_0, x_i) \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(x_0(k), x_i(k) \cdot W_i(k)) \quad (4.10)$$

5. Adım: Gri ilişkisel derecesinin sıralanması.

En yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olan 1.sırayı alır ve gri ilişkisel katsayısı yüksek olan değerden düşük olana doğru sıralanır.

6. Adım: ANOVA ile optimum parametrelerin belirlenmesi.

Gri ilişki derecesi üzerinde anlamlı etkisi olan faktörün belirlenmesi için varyans analizi yapılır.

7. Adım: Optimum faktör seviyesinin tahmini.

Gri ilişkisel derece yanıt değerleri, Gri ilişkisel derece değerlerine göre optimum parametre seviyelerini çıkarmak için belirlenir. Faktörler için maksimum tepki değerlerine sahip seviye değerleri, deney tasarımı için optimum seviyeyi verir [60].

BÖLÜM 5

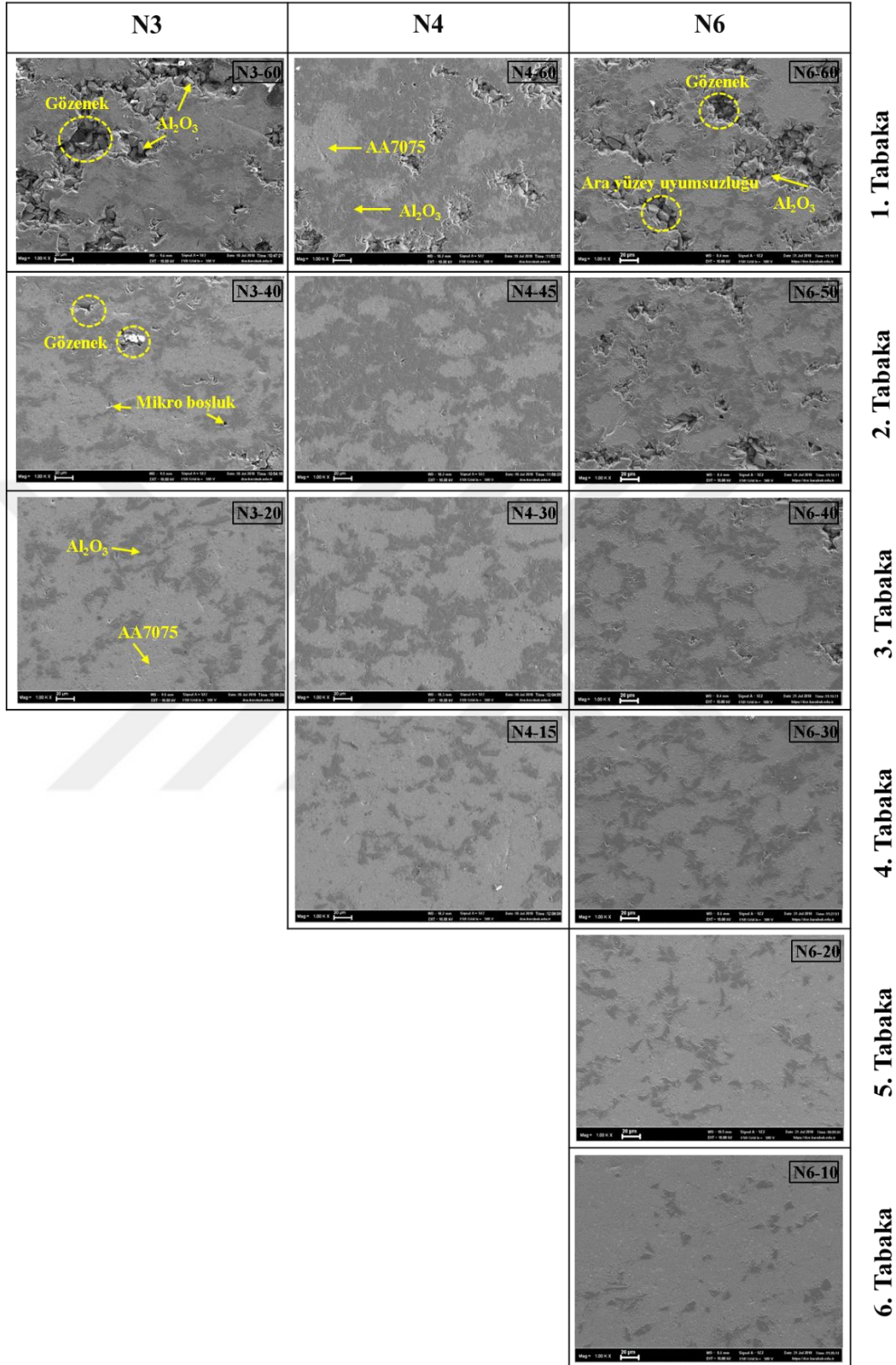
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. METALOGRAFİK VE MEKANİK ÖZELLİKLER İLE İLGİLİ SONUÇLAR

5.1.1. FDM'lerin Mikroyapı İncelemeleri

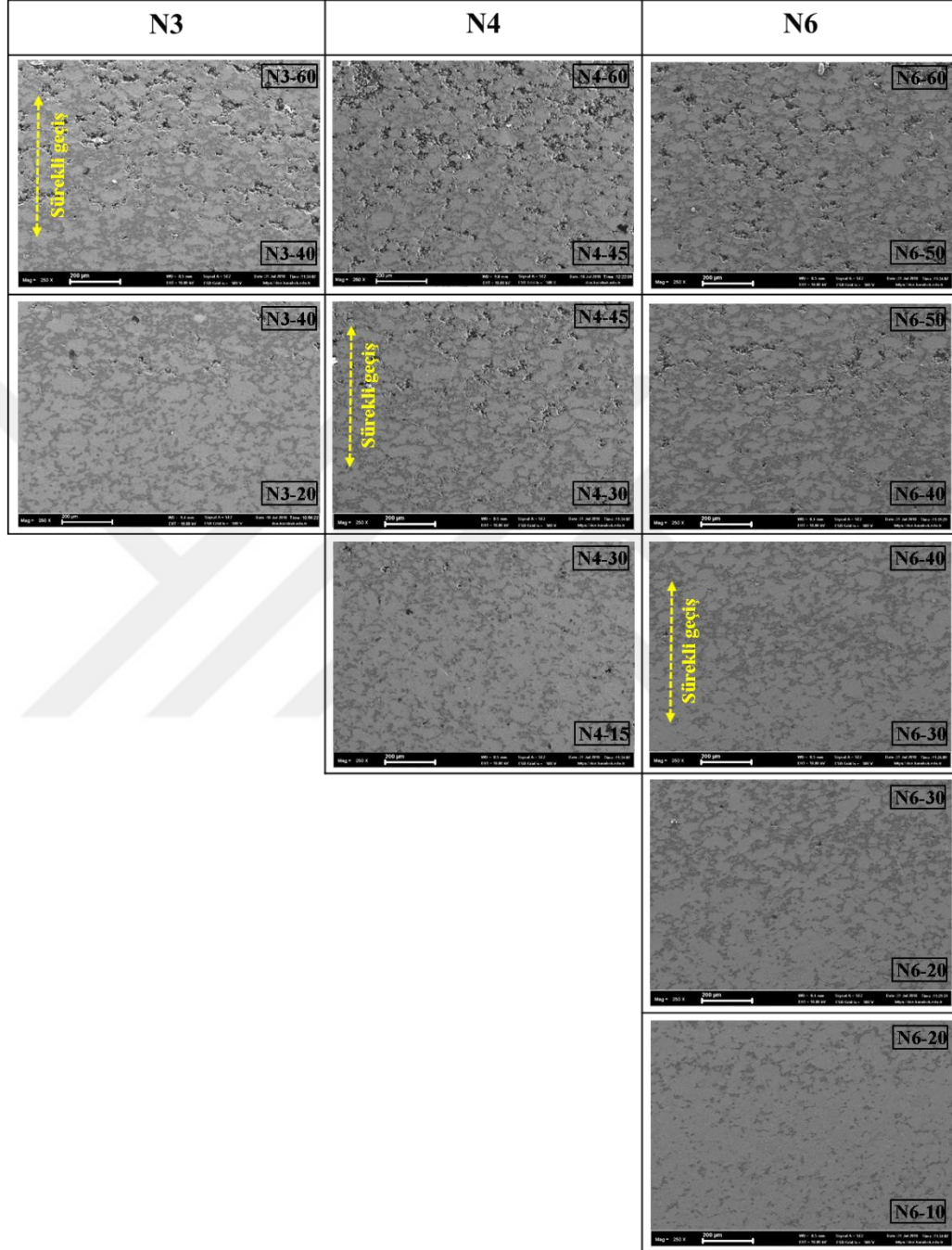
Bu çalışmada AA7075/ Al_2O_3 fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin tabaka ve tabakalar arası geçiş bölgelerinin metalografik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen N3, N4 ve N6 kodlu numunelerin tabakalarına ait SEM görüntüleri Şekil 5.1' de verilmiştir. SEM görüntülerinde koyu ve açık renli bölgeler bulunmaktadır. Açık bölgeler AA7075 matrisini, koyu bölgeler ise Al_2O_3 partiküllerinin dağılımlarını göstermektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde, Al_2O_3 partiküllerinin yapı içerisinde homojene yakın dağılım sergiledikleri tespit edilmiştir. Al_2O_3 partiküllerinin AA7075 matris içerisinde tane sınırlarında dağıldığı gözlemlenmiştir. Numunelere ait mikroyapı görüntüleri Ek Açıklamalar A.'da verilmiştir.

N3 koldu numunelerde %20 Al_2O_3 partikül içeren, N4 kodlu numunelerde %15 Al_2O_3 partikül içeren ve N6 koldu numunelerde %10 Al_2O_3 partikül içeren tabakalarda Al_2O_3 partiküllerinin tane sınırlarında düzgün ve homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. En yüksek topaklanma ve boşluk miktarı %60 Al_2O_3 partikül içeren tabakalarda tespit edilmiştir. Alt tabakadan üst tabakaya doğru artan takviye oranı ile tane sınırlarında biriken partikül miktarının artması ile yapı içerisindeki topaklanma, mikro boşluk ve gözenek miktarının arttığı tespit edilmiştir. Boşluk ve gözeneklerin matris/partikül arayüzey uyumsuzluğundan dolayı oluştuğu ve yapı içerisindeki artan Al_2O_3 miktarının matris/partikül arayüzey uyumsuzluğuna sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.1. N3, N4 ve N6 numunelerinin tabakalarına ait SEM görüntüleri.

Şekil 5.2’ de N3, N4 ve N6 kodlu numunlerin tabaka arasındaki geçiş bölgelerine ait SEM görüntüleri verilmiştir.

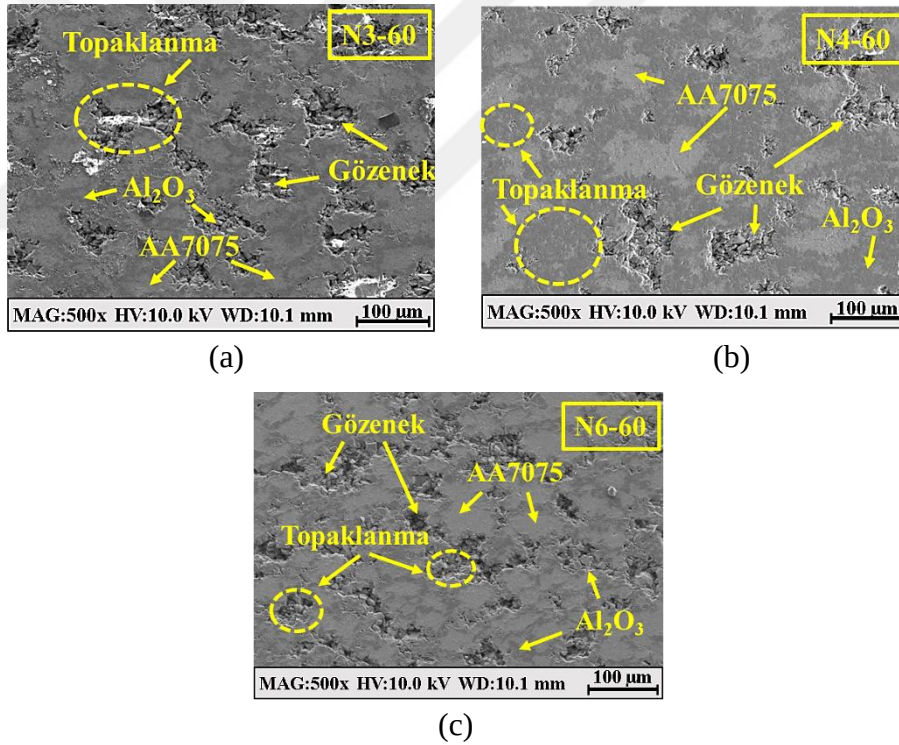


Şekil 5.2. N3, N4 ve N6 numunlerinin tabakalar arası geçiş bölgelerine ait SEM görüntüleri.

Numunelerin tabakalar arası geçiş bölgeleri incelendiğinde numune kalınlığı boyunca mukavemeti, ısı iletkenliği ve direnci etkileyebilecek hiçbir ayrılma veya kırılma izine

rastlanmamıştır. Tüm numune gruplarında tabakalar arası geçişlerin sürekli olduğu belirlenmiştir. N6 kodlu numunede tabakalar arası Al_2O_3 miktarındaki değişim N3 ve N4 kodlu numunelere kıyasla daha az olduğu için tabakalar arası geçişlerin N3 ve N4 kodlu numunelere göre daha belirsiz olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek takviye oranına sahip tabakalarda, tabakalar arası geçişler belirsiz hale iken takviye oranının düşük olduğu tabakalarda ise tabakalar arası geçişlerin daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Tabakalar arası geçişler mikroyapıda oluşan değişiklik sayesinde tespit edilmiştir.

N3,N4 ve N6 numunelerinin ağırlıkça %60 Al_2O_3 içeren tabakalarının görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.3), N3 numunesinde gözenek oranının diğer numunelere kıyasla daha fazla olduğu, en az gözenek miktarının ise N6 numunesinde bulunduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. N3, N4 ve N6 numunelerinin %60 Al_2O_3 içeren tabakalarının SEM görüntüleri; a) N3-60, b) N4-60 ve c) N6-60 tabakasının görüntüsü.

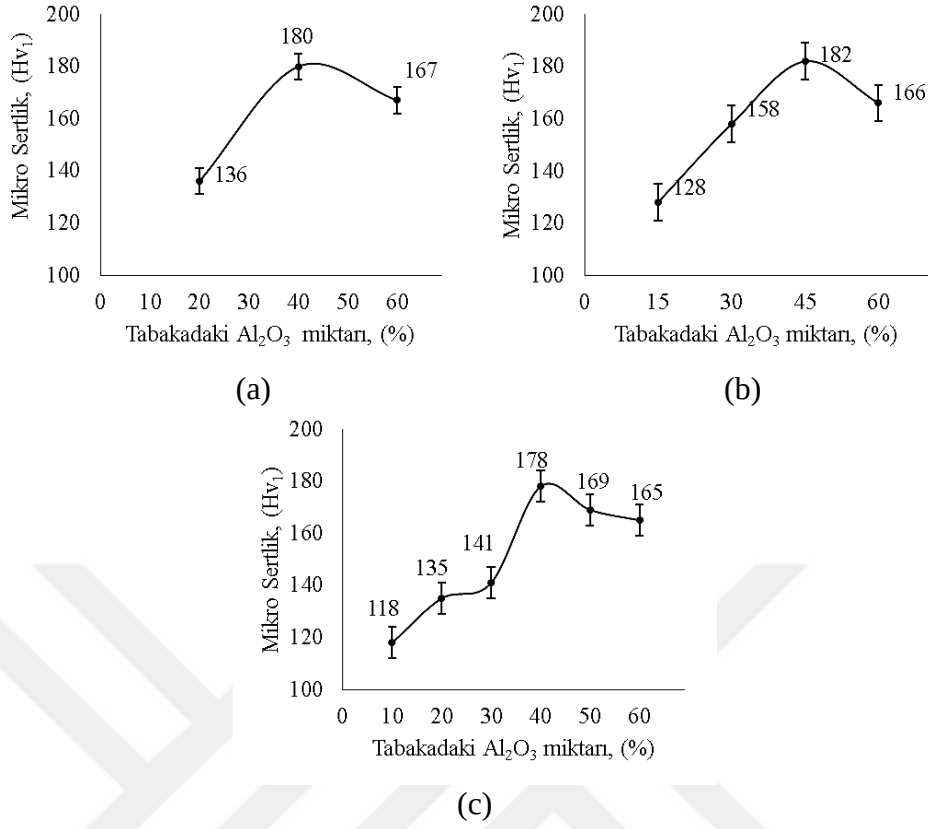
Bu duruma, N6-60 tabakasının altında bulunan tabakanın diğer numunelere kıyasla daha yüksek oranda sert partikül içermesi ve presleme sırasında kuvvet iletiminin daha iyi olmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca N6 numunesinin tabaka

kalınlığının (2 mm) diğer numelere oranla daha düşük olması N6-60 tabakasının daha iyi paketlenmesine neden olduğu düşünülmektedir.

5.1.2. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

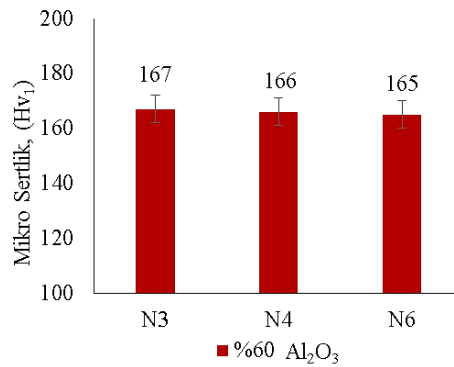
Bu kısımda, AA7075/Al₂O₃ FDM'lerin tabakalarına ait mikro sertlik değerleri incelenmiştir (Şekil 5.4). N3, N4 ve N6 numunelere ait tabakaların mikro sertlik değerlerinin partikül oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. En yüksek mikro sertlik değeri N4-45 numunesinde 182 Hv, en düşük mikro sertlik değeri N6-10 numunesinde 118 Hv olarak ölçülmüştür. Tabaka içerisindeki Al₂O₃ partiküllerinin ağırlıkça oranının %40-45 değerlerine kadar artması ile mikro sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum dağılım sertleşmesi olarak bilinen mekanizma ile açıklanabilir. Erdemir [61] yapmış olduğu çalışmada maksimum mikro sertlik değerlerini, AA2024 matrisli SiC takviyeli dört tabakalı FDM'lerin %40 SiC içeren tabaksında 245 Hv olarak ölçmüştür. Erdemir' in elde ettiği değer ile bu çalışmada elde edilen değer arasındaki farklılığın, matris malzemesi, takviye elemanı ve üretim parametrelerindeki değişikliğin sebep olduğu düşünülmektedir.

Yapılan mikroyapı analizlerinde Al₂O₃ partiküllerinin tane sınırlarına dağıldığı ve partikül miktarının artması ile bu bölgelerde biriken partikül miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Numuneler aynı sıcaklık ve yük altında preslenmiş olmalarına rağmen artan takviye miktarı, AA7075 matris malzemesi ile Al₂O₃ partikülleri arasında daha fazla gerilmelerin oluşmasına ve matris malzemesinde oluşan plastik deformasyonun artmasına sebep olmuştur [61]. Al₂O₃ miktarı %40-45' den %60'a çıkması durumunda ise mikro sertlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Artan takviye miktarıyla topaklanmanın arttığı ve matris ile takviye arasında düzgün ara yüzey bağlarının kurulamaması sebebiyle bu bölgelerde boşluk miktarının arttığı ve mikro sertlik değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.



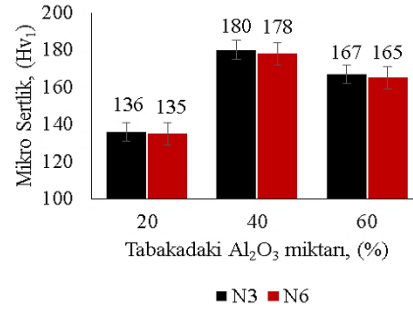
Şekil 5.4. FDM'lerin tabakalarına ait mikro sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi; a) N3 numunesinin, b) N4 numunesinin ve c) N6 numunesinin tabakalarına ait mikro sertlik değerleri.

N3, N4 ve N6 numunelerinin %60 Al_2O_3 içeren tabakalarının mikro sertlik değerleri sırasıyla 167, 166 ve 165 Hv olarak ölçülmüş ve tabakaların sertlik değerleri arasında belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. N3, N4 ve N6 numunelerinin %60 Al_2O_3 içeren tabakalarının mikro sertlik değerleri.

N3 ve N6 numunelerinin aynı miktarda takviye içeren tabakalarının mikro sertlik değerleri Şekil 5.6’ de verilmiştir. Numunelerin aynı miktarda takviye içeren tabakalarının sertlikleri arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.



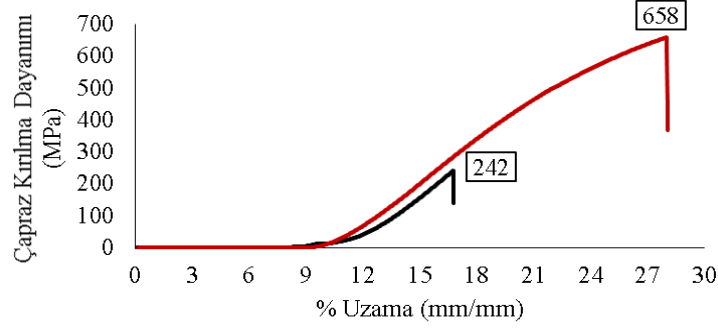
Şekil 5.6. N3 ve N6 numunelerinin aynı miktarda takviye içeren tabakalarının mikro sertlik değerleri.

Sarıkan, yapmış olduğu çalışmada en yüksek sertlik değerini %40 B₄C içeren tabakada 241 HB olarak elde ettiğini belirtmiştir [62]. Bu çalışmada ise AA7075/Al₂O₃ kompozitlerde mikro sertlik değerinin maksimum olduğu Al₂O₃ oranı %45 olarak belirlenmiştir. Tabakaların mikro sertlik değerlerine en etkili parametrenin takviye miktarı olduğu gözlemlenmiştir. Tabakalar sayısının ise tabakaların sertlik değerleri üzerinde etkili olmadığı gözlemlenmiştir.

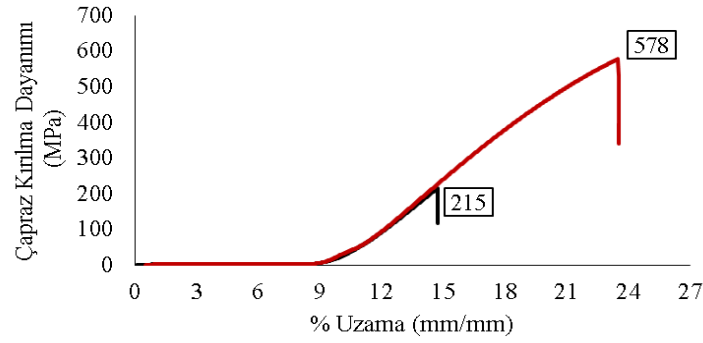
5.1.3. Çapraz Kırılma Deneyi Sonuçları

Çalışmada, farklı tabaka sayısına sahip numunelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla çapraz kırılma testi uygulanmıştır. Testlerde yükün, takviye oranı en yüksek olan tabakaya ve en düşük olan tabakaya uygulanma durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 5.7’de çapraz kırılma testleri sonucunda oluşan numunelere ait gerilme-uzama grafikleri verilmiştir. N3 numunesinin çapraz kırılma dayanımları, yükün en yüksek takviye içeren tabakaya uygulanması ve en düşük takviye içeren tabakaya uygulanması durumunda sırasıyla 658 MPa ve 242 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 5.7a). Bu durum kuvvetin uygulandığı tabakanın elastikiyet modülü ile açıklanabilir. Elastikiyet modülü malzemelerin mukavemetini etkileyen önemli bir özelliktir ve seramik takviyeli kompozitlerde, kompozit içerisinde bulunan takviye elemanının miktarı ile orantılıdır [63]. Malzemelerin kırılması, çatlak oluşumu,

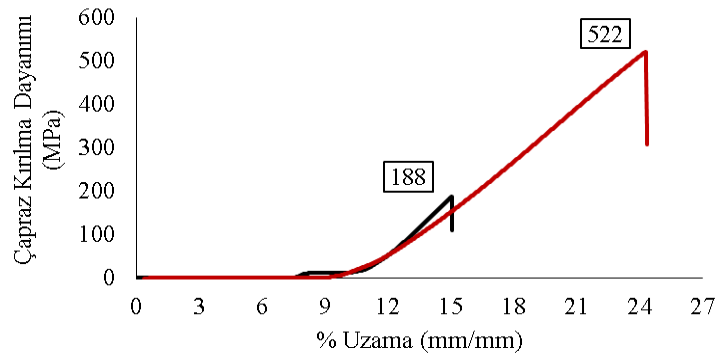
çatlağın ilerlemesi ve kırılma aşamalarından oluşur [64]. Al_2O_3 partiküllerinin çatlak oluşumunu engellediği ve çatlağın yönünü değiştirerek çatlak ilerlemesini yavaşlattığı belirlenmiştir. Deneyler sonucunda malzemelerin mukavemetinde yükün uygulandığı yüzeyin etkili olduğu tespit edilmiştir.



(a)



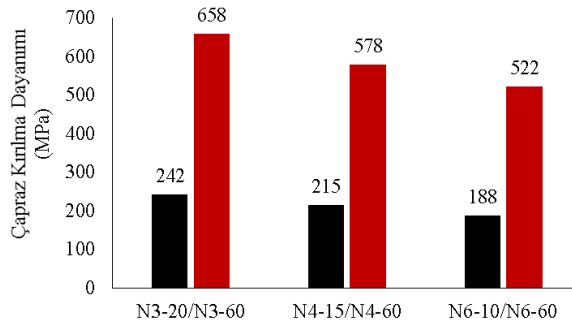
(b)



(c)

Şekil 5.7. N3,N4 ve N6 numunelerin çapraz kırılma dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi: a) N3 numunesinin, b) N4 numunesinin ve c) N6 numunesinin çapraz kırılma dayanımı değerleri.

Numunelerin çapraz kırılma dayanımlarının, numuneyi oluşturan tabakaların sayısının artması ile azaldığı tespit edilmiştir. Yükün %60 Al_2O_3 içeren tabakaya uygulanması durumunda N3, N4 ve N6 numunelerin çapraz kırılma dayanımları sırasıyla 658 MPa, 578 MPa ve 522 MPa' dır (Şekil 5.8). Literatürde, FDM'lerin kırılmaya karşı en zayıf bölgelerinin tabakalar arası arayüzeylerin olduğu ve çatlak oluşumu ile çatlak ilerlemesinin tabakalar arası arayüzeylere yakın bölgelerde ve porozitenin bulunduğu bölgelerde meydana geldiği belirtilmiştir [65, 66]. N3, N4 ve N6 numunelerinde tabaka sayısının artmasıyla kırılmaya karşı direncin düşük olduğu bölgelerin arttığı ve bu durumun kırılma dayanımının azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.8. N3, N4 ve N6 numunelerin çapraz kırılma dayanım değerlerinin karşılaştırılması.

5.2. FDM'LERİN DELİK DELME DENEYLERİ

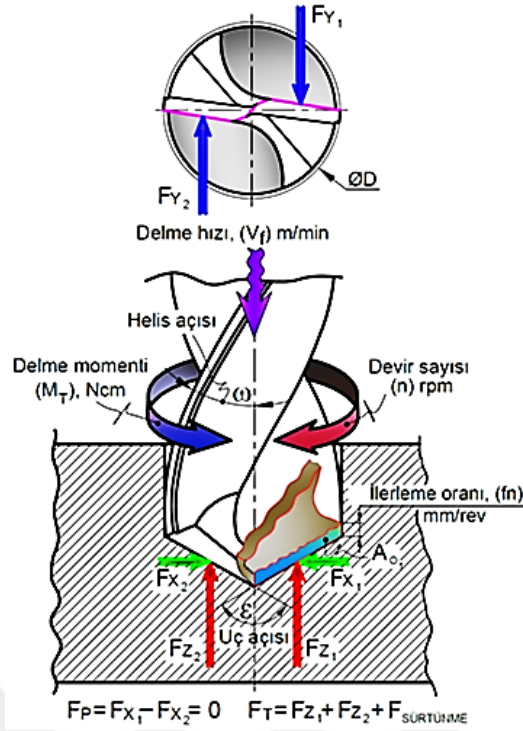
Son yıllarda, FDM'lerin havacılık, uzay ve balistik alanlarında kullanımları artmaktadır [67–69]. FDM'ler farklı özelliklere sahip malzemelerin belirlenen yön ve doğrultularda bir araya getirilmesi ile üretilirler. Farklı özelliklere sahip malzemelerin bir arada delinmesi işlemi karmaşık bir olaydır. Üretilen malzemelerin istenilen verimde çalışabilmesi için yüzey kalitesinin önemi büyüktür. Yüzey kalitesinin azalması, malzeme üzerinde mikro çatlak oluşumuna, yorulma, sürünme ve korozyon dayanımının azalmasına neden olur [70]. Yüzey kalitesinin belirlenmesinde kullanılan yüzey pürüzlülüğüne ek olarak ilerleme kuvveti ve momenti malzemelerin işlenebilirliğini gösteren parametrelerdir. Genellikle, işleme esnasında bu parametrelerin en düşük değerleri istenmektedir [71]. Delme işleminin kapalı bir alanda gerçekleşmesi talaş kontrolünü de zorlaştırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı

uygun kesme parametrelerinin ve takım geometrisinin belirlenmesi, delik delme performansı açısından büyük öneme sahiptir[72].

Bu çalışmada, AA7075/Al₂O₃ üç tabakalı FDM'lerin kaplamasız karbür matkap ile delme işleminde matkap helis açısı ($\omega = 0^\circ, 15^\circ$ ve 30°), uç açısı ($\epsilon = 120^\circ, 130^\circ$ ve 140°) ve ilerleme miktarının ($f_n = 0,075, 0,1, 0,15$ mm/dev) , ilerleme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaç için full faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Faktörlerin anlamlılık seviyeleri ANOVA ile belirlenmiştir. En düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü değerini veren kesme parametrelerin belirlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden “Gri İlişkisel Analiz” yöntemi kullanılmıştır. Deney çıktılarının değerlendirilmesinde MS Excell hesaplama programı kullanılmıştır. GİA yöntemine göre en iyi ve en kötü delme parametrelerinin kullanıldığı deliklerin yüzey görüntüleri değerlendirilmiştir. Takımlarda meydana gelen hasarlar tespit edilmiş olup, delme parametrelerinin takım hasarı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

5.2.1. Delme Parametrelerine Göre İlerleme Kuvveti ve Delme Momentinin Değerlendirilmesi

Delik delme işleminin gerçekleşebilmesi için kesicinin dönme ve ilerleme hareketlerini birlikte yapması gerekmektedir. Etki-tepki prensibine göre kesicinin bu hareketine karşılık iş parçasından matkaba doğru zıt yönde bir kuvvet (İlerleme kuvveti; F_t) ve dönme momenti oluşmaktadır. F_t kuvveti F_x, F_y ve F_z bileşenlerinden meydana gelmektedir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Delme işleminde kesme kuvvetleri ve moment etkileri.

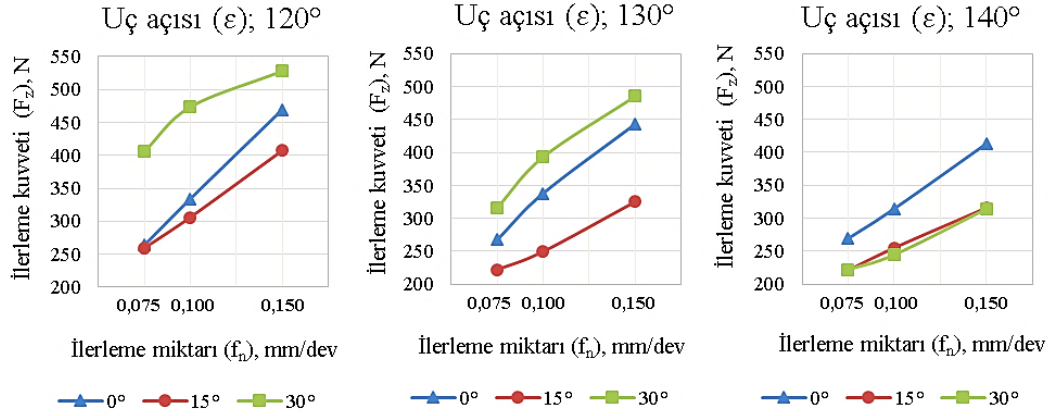
Deneyler sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde, x ve y doğrultularında oluşan F_x ve F_y kuvvetlerinin önemsenmeyecek kadar küçük değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde yalnızca F_z kuvveti dikkate alınmıştır. Ayrıca delme işleminde oluşan delme momenti, matkabın kesici ağzında oluşan F_x ve F_y kuvvetlerinin bileşkesi olan F_c kuvvetine bağlıdır. Deney sonuçlarında oluşan ilerleme kuvveti ve delme momenti değerleri Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

Çizelge 5.1. FGM'nin delinmesinde delme parametrelerine bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvveti ve delme momenti ortalama değerleri.

Deney No	Uç Açısı, ε (°)	Helis Açısı, ω (°)	İlerleme Miktarı, f_n (mm/dev)	İlerleme Kuvveti, F_z (N)	Delme Momenti, M_c (Ncm)
1	120	0	0,075	263,78	51,57
2	120	0	0,100	333,97	81,11
3	120	0	0,150	469,43	84,38
4	120	15	0,075	259,33	45,78
5	120	15	0,100	306,08	54,30
6	120	15	0,150	407,24	71,30
7	120	30	0,075	405,99	71,10
8	120	30	0,100	473,62	55,91
9	120	30	0,150	528,00	69,36
10	130	0	0,075	267,59	72,58
11	130	0	0,100	338,01	91,26
12	130	0	0,150	443,21	85,00
13	130	15	0,075	221,97	46,73
14	130	15	0,100	249,65	53,27
15	130	15	0,150	325,08	68,60
16	130	30	0,075	316,19	83,18
17	130	30	0,100	393,10	104,70
18	130	30	0,150	485,32	77,20
19	140	0	0,075	269,32	45,00
20	140	0	0,100	314,53	62,94
21	140	0	0,150	413,38	81,20
22	140	15	0,075	221,00	75,60
23	140	15	0,100	254,98	64,96
24	140	15	0,150	315,82	70,87
25	140	30	0,075	222,11	85,20
26	140	30	0,100	244,60	83,15
27	140	30	0,150	314,18	77,45

5.2.1.1. Helis Açısının İlerleme Kuvvetine ve Delme Momentine Etkisi

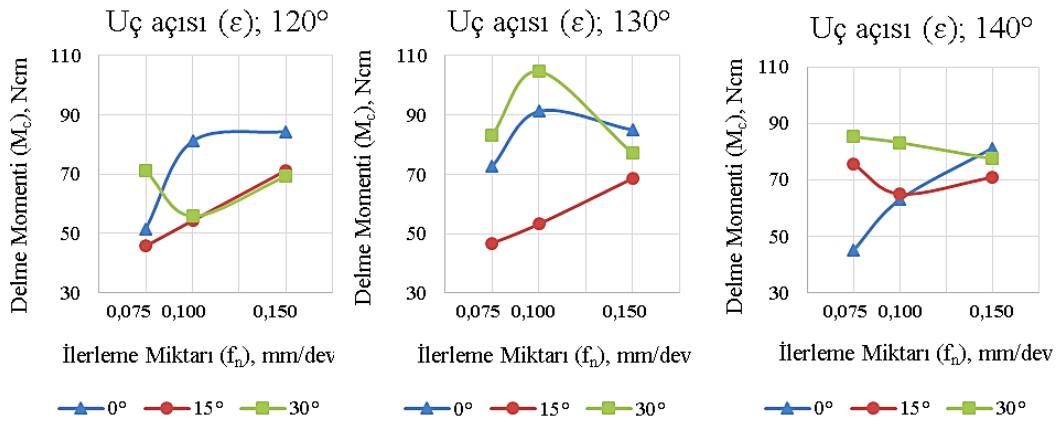
Deney sonuçlarına göre 3 tabakalı FDM'lerin kuru delme şartlarında delinmesi işleminde, farklı uç açılarında helis açısının ilerleme kuvveti üzerine etkileri sırasıyla Şekil 5.10'de gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Helis açısının ilerleme kuvvetine etkisinin grafiksel gösterimi.

120° uç asısına sahip takımlarla yapılan deneylerde ilerleme kuvvet değerleri 259 N ile 528 N aralığında değişim göstermiştir. En düşük ilerleme kuvveti değerleri 15° helis açısında, en yüksek ilerleme kuvveti değerleri ise 30° helis açısında elde edilmiştir. 0,075 ilerleme miktarında, 0° ve 15° helis açılarında elde edilen değerlerin birbirine yakın ve 30° helis açısında yapılan deneylerden ortalama % 55 daha düşük değerler olduğu tespit edilmiştir. 130° uç açısına sahip takımlarla yapılan deneylerde ilerleme kuvvet değerleri 222 N ile 485 N aralığında değişim göstermiştir. İlerleme kuvveti değerleri küçükten büyüğe doğru 15° < 0° < 30° şeklinde ölçülmüştür. En düşük değer 15° helis açısında 0,075 mm/dev ilerleme miktarında, en yüksek değer ise 30° helis açısında ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında ölçülmüştür. En yüksek değer ile düşük değer arasında % 118 fark bulunmaktadır. 140° uç açısına sahip takımlarla yapılan deneylerde ilerleme kuvvet değerleri 221 N ile 413 N aralığında değişim göstermiştir. 15° ve 30° helis açılarında ölçülen değerler arasındaki farkın mak % 4 olduğu belirlenmiştir. Helis açısı, delik delme işlemi sırasında oluşan talaşların tahliyesinde önemli bir rol oynar [56]. Bu çalışmada helis açısının 0° dan 15° ye yükselmesi ile ilerleme kuvvetlerinin azaldığı fakat 30° ye yükseltildiğinde kuvvetlerin arttığı gözlemlenmiştir. Neşeli ve Davoudinejad, helis açısındaki artışın delme momentinde düşüşe sebep olduğunu belirtmişlerdir [73, 74]. Helis açısındaki artış dolaylı olarak talaş açısında artışa sebep olması delme işlemi esnasında oluşan talaşın tahliyesini kolaylaştırır ve bu durum ilerleme kuvvetlerinin düşmesine neden olur. Fakat bazı çalışmalarda helis açısındaki aşırı artışın talaş akışını zorlaştırması, ikincil deformasyon bölgesindeki takım-talaş temas alanının artması sebebi ile yüksek helis açılarında ilerleme kuvvetlerinin artacağı belirtilmiştir [75].

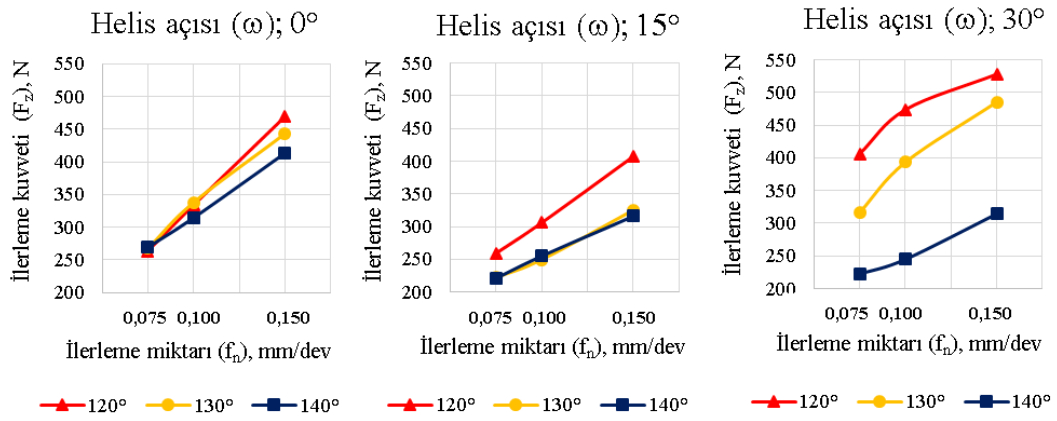
Deney sonuçlarına göre en yüksek delme momenti değeri 104 Ncm değeri ile 130° uç açısı, 30° helis açısını ve 0,100 mm/dev ilerleme miktarı parametrelerinin kullanıldığı 17 numaralı deneyde elde edilmiştir. En düşük delme momenti değeri ise 45 Ncm değeri ile 140° uç açısı, 0° helis açısını ve 0,075 mm/dev ilerleme miktarı parametrelerinin kullanıldığı 19 numaralı deneyde elde edilmiştir. En yüksek değer ile düşük değer arasında % 131 fark bulunmaktadır. Şekil 5.11’ de helis açısının delme momenti üzerine etkisinin grafiksel gösterimi verilmiştir. 120° uç açısında en düşük ilerleme kuvveti 15° helis açısı ve 0,075 mm/dev ilerleme miktarı parametrelerinde elde edilmiştir. En yüksek değer ise 0° helis açısında ve 0,150 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiştir. İlerleme miktarının artması ile 15° ve 30° helis açılarında ölçülen değerlerin birbirine yaklaştığı tespit edilmiştir. 130° uç açısına sahip takımlarla yapılan deneylerde delme momenti değerleri 46,7 Ncm ile 104,7 Ncm aralığında değişim göstermiştir. Delme momenti değerleri küçükten büyüğe doğru 15° < 0° < 30° helis açılarında ölçülmüştür. 140° uç açısında yapılan deneylerde delme momenti değerlerinde sabit bir eğilim elde edilememiştir. Literatürde helis açısının artması delme momentlerinin azaldığı belirtilmektedir [76, 77]. Delik delme işlemi üç boyutlu kesme geometrisine sahiptir. Kompozit malzemelerin anizotropik yapıya sahip olmaları, delme esnasında kararlı davranış sergilememelerine neden olmaktadır [78].



Şekil 5.11. Helis açısının delme momentine etkisinin grafiksel gösterimi.

5.2.1.2. Uç Açısının İlerleme Kuvvetine ve Delme Momentine Etkisi

Deney sonuçlarına göre matkap uç açısının ilerleme kuvveti üzerine etkileri Şekil 5.12’ de gösterilmiştir. Tüm helis açılarında matkap uç açısının artması ile ilerleme kuvvetlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük ilerleme kuvveti 140° uç açısında, 15° helis açısında, 0,075 mm/dev ilerleme miktarında 221 N olarak, en yüksek ilerleme kuvveti ise 120° uç açısında, 30° helis açısında, 0,150 ilerleme miktarında 528 N olarak ölçülmüştür. 0° helis açısında uç açısının etkisinin düşük olduğu, 30° helis açısında ise uç açılarının etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.

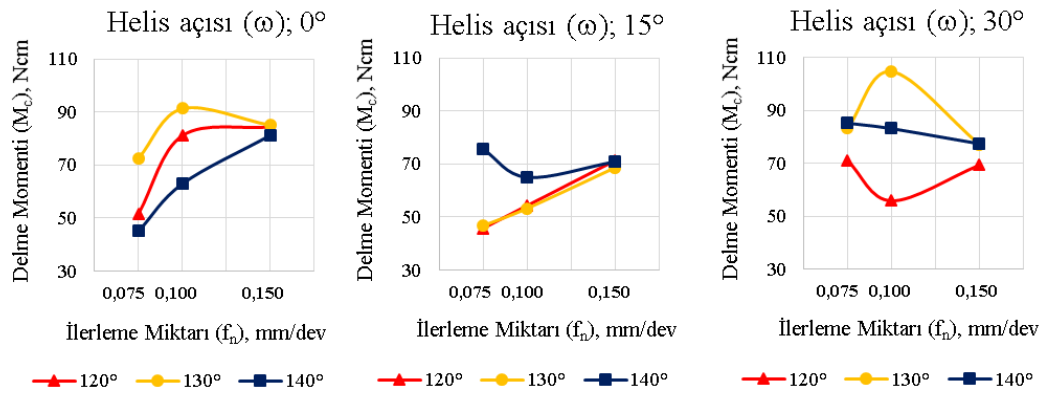


Şekil 5.12. Uç açısının ilerleme kuvvetine etkisinin grafiksel gösterimi.

Aynı çap ölçüsüne sahip takımlarda uç açısının artması ile kesme kenar uzunluğu azalır. Bu durumun kesici kenar ile iş parçası arasındaki sürtünmenin azalmasıyla birlikte ilerleme kuvvetlerinin azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yapılan literatür araştırmasında uç açısının artması ile ilerleme kuvvetinin azaldığı belirtilmiştir [79, 80]. Ayrıca yapılan bazı çalışmalarda uç açısının artması ile ilerleme kuvvetlerinin arttığı da belirtilmiştir [81, 82]. Matkaplarda en çok aşınan bölgeler kesici kenarın köşe kısımlarıdır. Uç açısının artması ile köşe açısının azalmasına bağlı olarak aşınma miktarı artması ile ilerleme kuvvetinde artışa neden olacağı düşünülmektedir.

Deney sonuçlarına göre matkap uç açısının delme momenti üzerine etkileri Şekil 5.13’ de gösterilmiştir. 0° helis açısında en yüksek delme momenti, 130° helis açılarında

yapılan deneylerde, en düşük delme momentini 140° helis açılarında yapılan deneylerde elde edilmiştir. En yüksek moment değeri ile en düşük değer arasında % 102 fark bulunduğu belirlenmiştir. 15° helis açısında ise en yüksek moment değerleri 140° uç açılarında elde edilmiştir. 120° ve 130° uç açıları ile yapılan deneylerde delme momentleri yaklaşık olarak benzer değerlerde ölçülmüştür. Aydın ve Nalbant çalışmalarında benzer sonuçlar elde edilmiştir [83]. 30° helis açısında en yüksek moment değerleri ise 130° helis açılarında yapılan deneylerde, en düşük delme momentini 120° helis açılarında yapılan deneylerde elde edilmiştir.



Şekil 5.13. Uç açısının delme momentine etkisinin grafiksel gösterimi.

Yavuz vd., çalışmalarında düşük uç açısının delme momentini arttırdığını belirtmişlerdir. [71]. Yapılan çalışmada uç açısının delme momentine etkileri incelendiğinde, ölçülen değerlerin farklı helis açılarında değişen eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Genel olarak uygun delme şartlarını sırasıyla 120° - 140° - 130° uç açılı matkapların sağlayabildiği görülmüştür. Moment değerlerindeki meydana gelen dalgalanmalar genel olarak kompozit malzemelerin anizotropik yapısına atfedilmektedir [78].

5.2.1.3. İlerleme Miktarının İlerleme Kuvvetine ve Delme Momentine Etkisi

Delik delme işlemlerinde, ilerleme miktarının artması ile ilerleme kuvvetinin ve delme momentinin arttığı gözlemlenmiştir. Tüm uç açılarında en düşük değerler 0,075 mm/dev ilerleme miktarında ölçülmüştür. İlerleme miktarının artması, takımın devir başına kaldırdığı talaş miktarının artmasına neden olmaktadır. Takımın devir başına

kaldırması gereken talaş miktarının artması ise ilerleme kuvvetlerinin ve delme momentinin artışına neden olmaktadır [9].

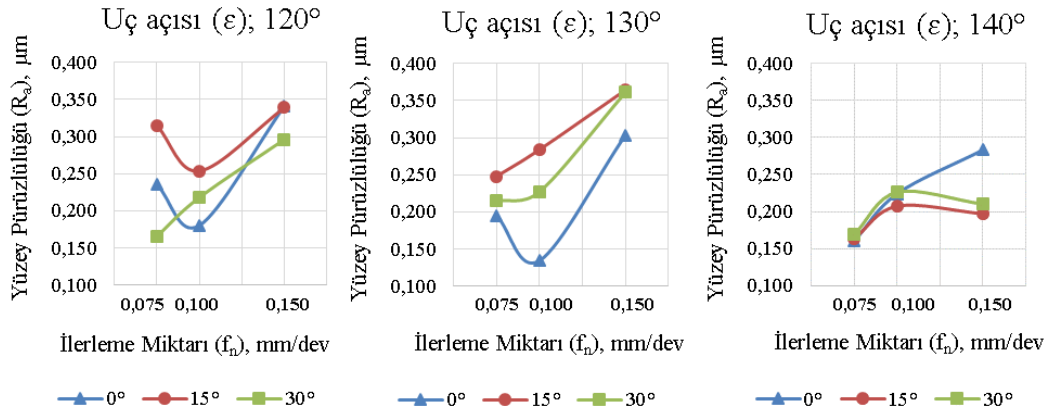
5.2.2. Delme Parametrelerinde Göre Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, FDM'lerin üç farklı uç açısı (120, 130 ve 140°), helis açısı (0, 15 ve 30°) ve ilerleme miktarında (0,075, 0,100 ve 0,150 mm/dev) matkap ile delinmesi sonucunda delik yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ölçülmüştür. Ölçümler ortam sıcaklığında, 10 mm uzunluğunda, delik eksenine paralel dört farklı noktadan alınmıştır. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ortalaması Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. FDM'nin delinmesinde delme parametrelerine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Deney No	Uç Açısı, ϵ (°)	Helis Açısı, ω (°)	İlerleme Miktarı, f_n (mm/dev)	Ort. Yüzey Pürüzlülüğü R_a (μm)
1	120	0	0,075	0,235
2	120	0	0,100	0,180
3	120	0	0,150	0,341
4	120	15	0,075	0,315
5	120	15	0,100	0,254
6	120	15	0,150	0,339
7	120	30	0,075	0,166
8	120	30	0,100	0,218
9	120	30	0,150	0,296
10	130	0	0,075	0,195
11	130	0	0,100	0,134
12	130	0	0,150	0,304
13	130	15	0,075	0,248
14	130	15	0,100	0,284
15	130	15	0,150	0,365
16	130	30	0,075	0,215
17	130	30	0,100	0,227
18	130	30	0,150	0,361
19	140	0	0,075	0,160
20	140	0	0,100	0,224
21	140	0	0,150	0,283
22	140	15	0,075	0,164
23	140	15	0,100	0,207
24	140	15	0,150	0,197
25	140	30	0,075	0,169
26	140	30	0,100	0,226
27	140	30	0,150	0,210

En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 130° uç açısında, 0° helis açısında, 0,100 mm/dev ilerleme miktarında 0,134 μm olarak 11 numaralı deneyde ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ise 130° uç açısında, 15° helis açısında, 0,150 mm/dev ilerleme miktarında 0,365 μm olarak 15 numaralı deneyde ölçülmüştür. Seramik takviyeli kompozitlerde bulunan sert partiküllerin karbür takım ile temasının malzeme yüzeyinde taşlama ve honlama etkisi yaptığı ve yüzey kalitesini iyileştirdiği belirtilmektedir [84]. Daha önce yapılan çalışmalarda, alüminyum matrisli kompozitlerin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,200- 16 μm aralığında olduğu belirtilmiştir [74, 84]. Bu çalışma kapsamında ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin literatürde belirtilen alt değere yakın olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre ilerleme miktarındaki değişimin, ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri Şekil 5.14’ de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, ilerleme miktarındaki değişime bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Bu durumda, ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin uç açısına bağlı olduğu söylenebilir. Yapılan literatür taramasında ilerleme miktarındaki artışın yüzey pürüzlülüğü değerlerinde düşüşe neden olduğunu belirten çalışmaların olduğu belirlenmiştir [47, 85]. Fakat bu çalışmada, ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Yapılan literatür taramasında, Karabulut’un yapmış olduğu çalışmasında benzer sonuçları elde ettiği tespit edilmiştir [86]. Bu duruma sebep olan en etkili mekanizma, ilerleme miktarının artması ile takımın bir turda kaldırması gereken talaş miktarının artmasıdır [87]. Ayrıca metal matrisli kompozitlerin yapısında bulunan sert partiküllerin talaş kaldırma işlemi esnasında artan ilerleme miktarı ile yerlerinden koparak ve delik yüzeylerinde oyuklar ve çizikler oluşturması yüzey kalitesini olumsuz etkileyen bir diğer etkidir [86].



Şekil 5.14. İlerleme miktarının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi.

120° uç açısına sahip takımlarla yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,166 μm ile 0,341 μm aralığında değişim göstermiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ile en düşük değer arasında % 205,42 fark bulunduğu belirlenmiştir. 130° uç açısına sahip takımlarla yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,134 μm ile 0,365 μm aralığında değişim göstermiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ile en düşük değer arasında % 272,39 fark bulunduğu belirlenmiştir. 140° uç açısına sahip takımlarla yapılan deneylerde ise yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,160 μm ile 0,283 μm aralığında değişim göstermiştir. Ayrıca en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri ile en düşük değer arasında % 176,87 fark bulunduğu belirlenmiştir. Uç açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi genel olarak değerlendirildiğinde en uygun delme şartlarını sırasıyla 140°-130°-120° uç açılı matkapların sağlayabildiği görülmüştür. Matkap uç açısının artması ile yüzey pürüzlülüğün azaldığı tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlara rastlanmaktadır [4, 47]. Bu durum, uç açılarının artması ile kesici kenar uzunluklarının azalmasına ve dolaylı olarak takım- iş parçası arasındaki sürtünmenin azalmasına atfedilmektedir.

Helis açısındaki değişimin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri değerlendirildiğinde, en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri 15° helis açılarında, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ise 0° helis açılarında yapılan deneylerde elde edilmiştir. Önceki çalışmalarda helis açısının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı belirtilmiştir [54]. Bu çalışmada helis açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinde doğrusal bir eğilim tespit edilmemiştir. Kompozit malzeme içerisinde

bulunan takviye elemanının yapı içerisindeki topaklanma eğiliminin, talaş kaldırılan yüzeyin kalitesine etki ettiği düşünülmektedir.

5.2.3. ANOVA ile Veri Analizi ve Değerlendirilmesi

Bu kısımda deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler istatistiksel yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Değişkenlerin deney sonuçları üzerine etkilerinin sayısal olarak belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. İstatistiksel analizler MINITAB 17 programı kullanılarak, P:0,05 hata payında ve % 95 güven aralığında yapılmıştır. Deney modelinin sonuçları açıklayabilme oranı R-sq (adj) değeri ile açıklanmaktadır [88]. Bu çalışmada bağımsız değişkenler olarak üç farklı uç açısı (120, 130 ve 140°), helis açısı (0, 15 ve 30°), ilerleme miktarının (0,075, 0,100 ve 0,150 mm/dev) ve etkileşimlerinin, bağımlı değişkenler olarak ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine olan etkileri değerlendirilmiştir. Çizelge 5.3’ de ilerleme kuvvetine etki eden değişkenlerin ANOVA sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.3. İlerleme Kuvvetine etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Uç Açısı (A)	2	42853,3	21426,65	98,802	<0,0001*	20,29
Helis Açısı (B)	2	39008,9	19504,45	89,938	<0,0001*	18,47
İlerleme Miktarı (C)	2	89454,4	44727,21	206,245	<0,0001*	42,36
AxB	4	32801,3	8200,32	37,813	<0,0001*	15,53
AxC	4	1990,0	497,49	2,294	0,1476	0,94
BxC	4	3321,3	830,33	3,829	0,0503	1,57
Hata	8	1734,9	216,90			0,82
Toplam	26	211164,1				100,00
		R ² : 0,991784	R ² (adj): 0,973298			

Çizelge 5.3’ de verilen P değerleri incelendiğinde uç açısındaki (A), helis açısındaki (B), ilerleme miktarındaki (C) değişim ile uç açısının helis açısıyla etkileşimin (AxB) ilerleme kuvveti üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Uç açısının ilerleme miktarıyla ve helis açısının ilerleme miktarıyla etkileşiminin ise delme işlemi üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan varyans analizinde ilerleme miktarının % 42,36 etki oranıyla ilerleme kuvveti üzerindeki en etkili parametre olduğu

belirlenmiştir. İlerleme miktarından sonra % 20,29 oranla uç açısı, % 18,47 oranla helis açısı ve % 15,53 oranla uç açısının helis açısıyla etkileşimi ilerleme kuvvetine etki etmiştir. Elde edilen buldular literatür ile benzerlik göstermektedir [89–91]. Faktörlerin seviyelerinin deney sonuçlarına etkilerinin belirlenmesi amacıyla, seviyelere ait ortalama ilerleme kuvveti değerleri Çizelge 5.4’ de verilmiştir. Ortalama ilerleme kuvvetleri değerleri için optimum değerler, A3B2C1 seviyelerinde elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. Deney parametrelerine ait ortalama ilerleme kuvveti değerleri.

Faktör	Seviye		
	1	2	3
Uç Açısı (A)	383,0489	337,7911	285,5467
Helis Açısı (B)	345,9133	284,5722	375,9011
İlerleme Miktarı (C)	271,9200	323,1711	411,2956

Deney parametrelerinin delme momenti üzerine etkilerinin belirlendiği ANOVA sonuçları Çizelge 5.5’ de verilmiştir. ANOVA sonuçları incelendiğinde, $R^2(\text{adj}):0,6112$ olduğu görülmektedir. Oluşturulan deney modelinin moment değerlerini açıklayabilme oranının % 61,12 olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma, işlenen malzemenin homojen olmayan yapısının ve delme sırasında delme tezgâhında oluşan titreşimin sebep olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.5. Delme Momentine etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Uç Açısı (A)	2	542,4	271,1796	3,055	0,1034	9,13
Helis Açısı (B)	2	1398,2	699,0957	7,874	0,0129*	23,55
İlerleme Miktarı (C)	2	686,7	343,3715	3,868	0,0668	11,57
AxB	4	1272,7	318,1833	3,584	0,0587	21,43
AxC	4	326,5	81,6363	0,920	0,4977	5,50
BxC	4	1001,1	250,2747	2,819	0,0991	16,86
Hata	8	710,2	88,7800			11,96
Toplam	26	5937,9				100
		$R^2:0,880388$	$R^2(\text{adj}):0,611263$			

Varyan analizi sonuçları delme momenti üzerindeki anlamlı etkisi olan parameterinin % 23,55 oranla helis açısı olduğunu göstermektedir. Helis açısı hariçindeki diğer

parametrelerin, delme momenti üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Faktörlerin deney sonuçlarına katkı oranları dikkate alındığında ise helis açısının uç açısıyla (AxB) ve ilerleme miktarıyla (BxC) etkileşimlerinin sırasıyla % 21,43 ve % 16,86 oranlarıyla sonuçlara etki ettiği belirlenmiştir. Helis açısı, delik delme işleminde talaş açısı görevi yapmaktadır. Talaş tahliyesinde yaşanan aksaklıklar delme momentini doğrudan etkilemektedir [75]. Faktörlerin seviyelerinin delme momentine etkilerinin belirlenmesi amacıyla, seviyelere ait ortalama delme momenti değerleri Çizelge 5.6’ da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Deney parametrelerine ait ortalama delme momenti değerleri.

Faktör	Seviye		
	1	2	3
Uç Açısı (A)	64,9789	75,8356	71,8189
Helis Açısı (B)	72,7822	61,2678	78,5833
İlerleme Miktarı (C)	64,0822	72,4000	76,1511

Ortalama delme momenti değerleri için optimum değerler, A1B2C1 seviyelerinde elde edilmiştir. Deney parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerinin belirlendiği ANOVA sonuçları Çizelge 5.7’ de verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre $R^2(\text{adj})$ değeri 0,8433 olarak belirlenmiştir. Analiz kapsamında belirlenen tüm faktörlerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.7. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Uç Açısı (A)	2	0,018414	0,009207	13,610	0,0027*	16,40
Helis Açısı (B)	2	0,006768	0,003384	5,002	0,0390*	6,03
İlerleme Miktarı (C)	2	0,046125	0,023063	34,090	0,0001*	41,09
AxB	4	0,015822	0,003956	5,847	0,0168*	14,09
AxC	4	0,012791	0,003198	4,727	0,0298*	11,39
BxC	4	0,006934	0,001734	2,562	0,1199	6,18
Hata	8	0,005412	0,000677			4,82
Toplam	26	0,112266				100,00
		R^2 :0,951793	$R^2(\text{adj})$:0,843326			

En etkili parametrenin % 41,09 oranla ilerleme miktarı olduğu tespit edilmiştir. İlerleme miktarından sonra % 16,40 oranla uç açısı, % 14,09 oranla uç açısının helis açısıyla etkileşimi, % 11,39 oranla uç açısının ilerleme miktarıyla etkileşimi, % 6,18 oranla helis açısının ilerleme miktarıyla etkileşimi ve % 6,03 oranla helis açısının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatür ile uyum göstermektedir [47, 92]. Faktörlerin seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin belirlenmesi amacıyla, seviyelere ait ortalama yüzey pürüzlülüğüne değerleri Çizelge 5.8’ de verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne değerleri için optimum değerler, A3B1C1 seviyelerinde elde edilmiştir.

Çizelge 5.8. Deney parametrelerine ait ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Faktör	Seviye		
	1	2	3
Uç Açısı (A)	0,26044	0,25922	0,20444
Helis Açısı (B)	0,22844	0,26367	0,23200
İlerleme Miktarı (C)	0,20744	0,21711	0,29956

5.2.4. Gri İlişkisel Analiz Sonuçları

Bu kısımda, GİA yöntemi kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin delinmesi sonucunda ölçülen ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü açısından sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Bu yöntemin amacı, en düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği faktörlere ait seviyelerin belirlenmesidir. Çizelge 5.9’ da çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda ölçülen ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.9. Gri ilişkisel analizde kullanılan deney tasarımına bağlı olarak elde edilen bağımlı ve bağımsız değişkenler.

Deney No	Uç Açısı, ε (°)	Helis Açısı, ω (°)	İlerleme Hızı, f_n (mm/dev)	Kesme Kuvveti, F_z (N)	Delme Momenti, M_c (Ncm)	Ort. Yüzey Pürüzlülüğü R_a (μm)
1	120	0	0,075	263,78	51,57	0,235
2	120	0	0,1	333,97	81,11	0,180
3	120	0	0,15	469,43	84,38	0,341
4	120	15	0,075	259,33	45,78	0,315
5	120	15	0,1	306,08	54,30	0,254
6	120	15	0,15	407,24	71,30	0,339
7	120	30	0,075	405,99	71,10	0,166
8	120	30	0,1	473,62	55,91	0,218
9	120	30	0,15	528,00	69,36	0,296
10	130	0	0,075	267,59	72,58	0,195
11	130	0	0,1	338,01	91,26	0,134
12	130	0	0,15	443,21	85,00	0,304
13	130	15	0,075	221,97	46,73	0,248
14	130	15	0,1	249,65	53,27	0,284
15	130	15	0,15	325,08	68,60	0,365
16	130	30	0,075	316,19	83,18	0,215
17	130	30	0,1	393,10	104,70	0,227
18	130	30	0,15	485,32	77,20	0,361
19	140	0	0,075	269,32	45,00	0,160
20	140	0	0,1	314,53	62,94	0,224
21	140	0	0,15	413,38	81,20	0,283
22	140	15	0,075	221,00	75,60	0,164
23	140	15	0,1	254,98	64,96	0,207
24	140	15	0,15	315,82	70,87	0,197
25	140	30	0,075	222,11	85,20	0,169
26	140	30	0,1	244,60	83,15	0,226
27	140	30	0,15	314,18	77,45	0,210

Gri ilişkisel analizin birinci aşamasında, farklı birimlere sahip deney çıktıları arasında karşılaştırma yapılabilmesi için deney verileri normalize edilmiştir (Çizelge 5.10). Normalizasyon için “En düşük daha iyidir” yöntemi kullanılmıştır [44, 60, 93–95]. İkinci aşamasında ise gri ilişkisel katsayısı hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada ise, gri ilişkisel derecesi hesaplanmıştır. Gri ilişkisel derece hesaplanırken, ilerleme kuvveti, delme momentleri ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün önem dereceleri eşit olarak alınmış ve ağırlık katsayısı olarak $W=0,333$ değeri alınmıştır [44, 60, 96].

Çizelge 5.10. Gri ilişkisel analiz sonuçları.

Deney No	Normalizasyon			Gri İlişkisel Katsayısı			Gri İlişkisel Derecesi	Sıralama
	Kesme Kuvveti, F_z (N)	Delme Momenti, M_c (Ncm)	Ort. Yüzey Pürüzlülüğü R_a (μm)	Kesme Kuvveti, F_z (N)	Delme Momenti, M_c (Ncm)	Ort. Yüzey Pürüzlülüğü R_a (μm)		
1	0,861	0,890	0,561	0,782	0,820	0,533	0,711	6
2	0,632	0,395	0,800	0,576	0,453	0,715	0,581	16
3	0,191	0,340	0,101	0,382	0,431	0,357	0,390	27
4	0,875	0,987	0,215	0,800	0,975	0,389	0,721	5
5	0,723	0,844	0,481	0,643	0,762	0,491	0,632	11
6	0,393	0,559	0,111	0,452	0,532	0,360	0,448	22
7	0,397	0,563	0,863	0,453	0,534	0,785	0,591	15
8	0,177	0,817	0,636	0,378	0,732	0,579	0,563	18
9	0,000	0,592	0,296	0,333	0,551	0,415	0,433	24
10	0,848	0,538	0,736	0,767	0,520	0,655	0,647	10
11	0,619	0,225	1,000	0,567	0,392	1,000	0,653	9
12	0,276	0,330	0,264	0,409	0,427	0,404	0,413	25
13	0,997	0,971	0,506	0,994	0,945	0,503	0,814	2
14	0,907	0,861	0,350	0,843	0,783	0,435	0,687	7
15	0,661	0,605	0,000	0,596	0,558	0,333	0,496	20
16	0,690	0,360	0,650	0,617	0,439	0,588	0,548	19
17	0,439	0,000	0,596	0,471	0,333	0,553	0,453	21
18	0,139	0,461	0,014	0,367	0,481	0,336	0,395	26
19	0,843	1,000	0,888	0,761	1,000	0,817	0,859	1
20	0,695	0,699	0,610	0,621	0,625	0,562	0,603	13
21	0,373	0,394	0,353	0,444	0,452	0,436	0,444	23
22	1,000	0,487	0,873	1,000	0,494	0,797	0,764	3
23	0,889	0,666	0,683	0,819	0,599	0,612	0,677	8
24	0,691	0,567	0,727	0,618	0,536	0,647	0,600	14
25	0,996	0,327	0,849	0,993	0,426	0,768	0,729	4
26	0,923	0,361	0,602	0,867	0,439	0,556	0,621	12
27	0,696	0,456	0,671	0,622	0,479	0,603	0,568	17

Deneylere ait hesaplanmış gri ilişkisel derece değerleri Çizelge 5.10' da verilmiştir. En yüksek ilişkiye sahip olan deneyden, en düşük ilişkiye sahip olan deneye doğru sıralama yapılmıştır. Buna göre en düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 19 numaralı deneyde elde edilmiştir. En yüksek ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ise 3 numaralı deneyde elde edilmiştir.

Faktörlerin ve etkileşimlerinin, gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olup olmadıklarını belirlemek amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Çizelge 5.11’ de verilen P değerleri incelendiğinde uç açısındaki (A), helis açısındaki (B), ilerleme miktarındaki (C) değişimin gri ilişkisel derece üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Faktörlerin etkileşimlerinin ise gri ilişkisel derece üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan varyans analizinde ilerleme miktarının % 61,94 etki oranıyla gri ilişkisel derece üzerindeki en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. İlerleme miktarından sonra % 11,27 oranla helis açısının ve % 10,22 oranla uç açısının gri ilişkisel derece üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.11. Gri ilişkisel dereceye etki eden değişkenlere ait ANOVA sonuçları.

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P-Değeri	Katkı Oranı (%)
Uç Açısı (A)	2	0,04467	0,02233	8,540	0,0101*	10,22
Helis Açısı (B)	2	0,04922	0,02461	9,410	0,0077*	11,27
İlerleme Miktarı (C)	2	0,27062	0,13531	51,720	<0,0001*	61,94
AxB	4	0,02243	0,00561	2,140	0,1670	5,13
AxC	4	0,00703	0,00176	0,670	0,6298	1,61
BxC	4	0,02203	0,00551	2,100	0,1724	5,04
Hata	8	0,02093	0,00262			4,79
Toplam	26	0,43692				100,00
		R ² :0,952101	R ² (adj):0,844313			

Faktörlerin seviyelerinin deney sonuçlarına etkilerinin belirlenmesi amacıyla, seviyelere ait ortalama gri ilişkisel derece değerleri Çizelge 5.12’ de verilmiştir. Gri ilişkisel derece üzerinde en yüksek gri ilişki derecesine sahip olan optimum değerler, A3B2C1 seviyelerinde elde edilmiştir.

Çizelge 5.12. Deney Parametrelerine ait ortalama gri ilişkisel dereceye değerleri.

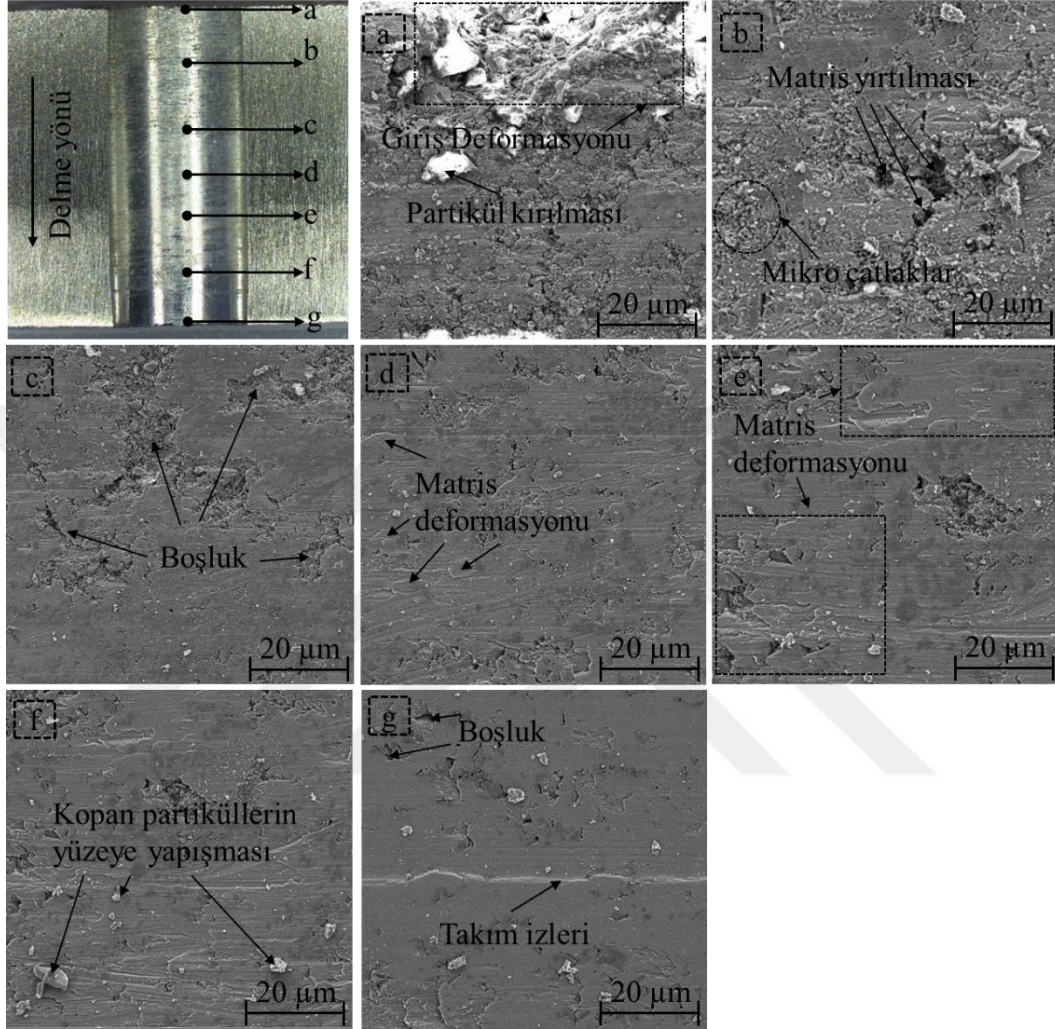
Faktör	Seviye		
	1	2	3
Uç Açısı (A)	0,5633	0,5673	0,6517
Helis Açısı (B)	0,5980	0,6487	0,5445
İlerleme Miktarı (C)	0,7093	0,6077	0,4652

5.2.5. İşlenmiş Yüzeylerin Değerlendirilmesi

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kalınlıkları boyunca değişen oranlarda takviye miktarı içermektedirler. Bu yüzden delik delme işlemi sonucunda deliğin yüzey yapısının ve yüzey kusurlarının delik kalınlığı boyunca belirlenmesi önem arz etmektedir. Kademeli kompozitlerin delinmesinde yaşanan en büyük problemlerden biri katmanlar arası ayrılmalardır [83]. Çalışmanın bu kısmında en düşük gri ilişkisel dereceye sahip üçüncü deneye ve en yüksek gri ilişkisel dereceye sahip on dokuzuncu deneye ait delik yüzeyleri incelenmiştir.

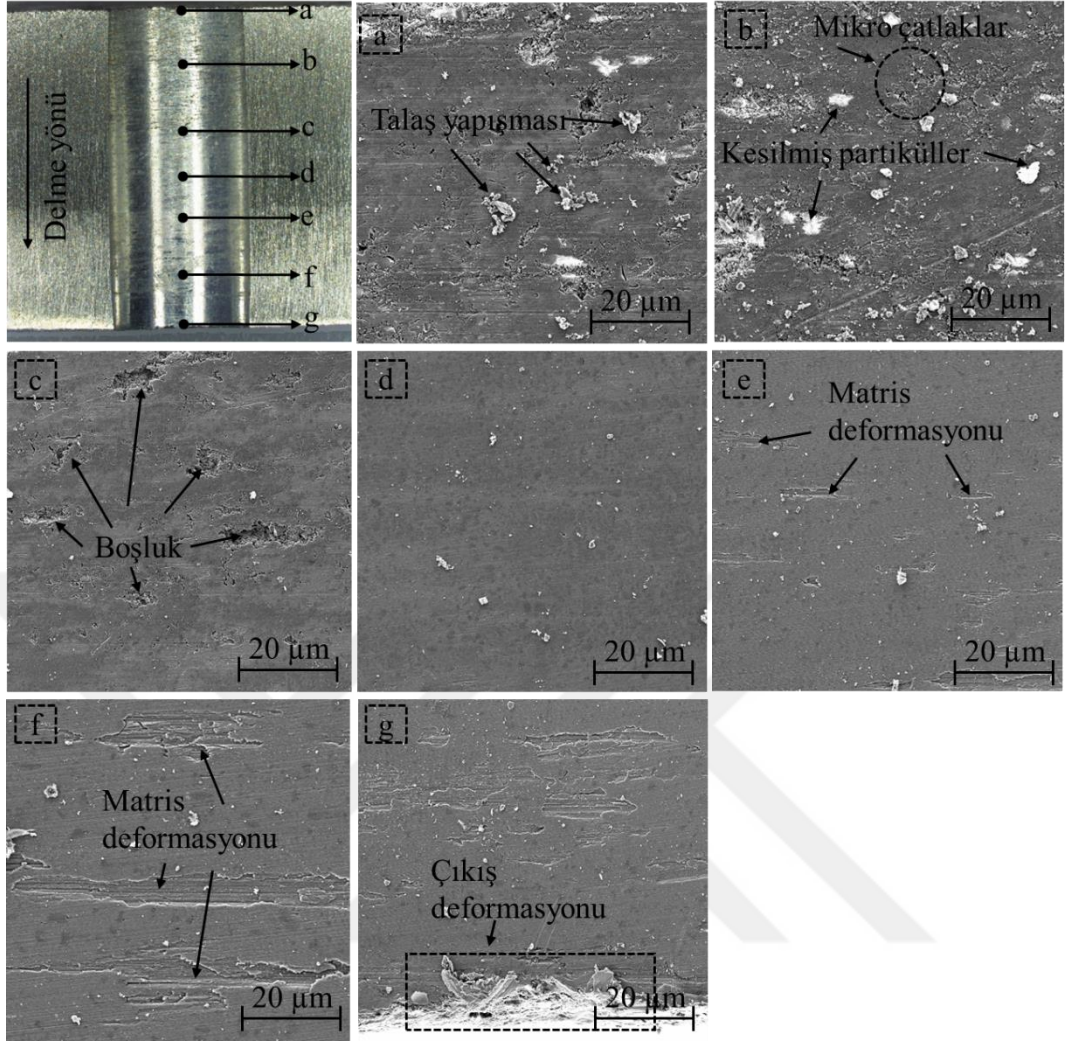
En düşük gri ilişkisel dereceye sahip olan deneye ait delik yüzey görüntüleri Şekil 5.15’ de gösterilmiştir. Delik girişinden çıkışına kadar bölgeler harflendirilmiştir. Delme işlemine %60 Al_2O_3 takviye içeren yüzeyden başlanmıştır. Delik girişi incelendiğinde matris bütünlüğünün bozulduğu, mikro ölçekte kitlesel kopma şeklinde malzeme kayıplarının olduğu ve matris yapısı içerisinde mikro çatlakların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.15a-b). Bu bölgede takviye oranına yüksek olması, partiküllerin topaklanma oranının artmasına sebep olmuştur. Matris tarafından tam olarak ısılatılamamış olan takviye elemanının, deformasyon sırasında ilerleme kuvvetinin de etkisiyle yerinden çıktığı düşünülmektedir. Önceki yapılan çalışmalarda, işleme sıcaklığının kesme kuvvetleriyle orantılı olduğu belirtilmiştir [97, 98]. Matris yapısı içerisinde bulunan mikro çatlakların ilerleme kuvvetinin etkisiyle olduğu düşünülmektedir. % 60 Al_2O_3 takviye içeren tabaka ile % 40 Al_2O_3 takviye içeren tabaka arasındaki geçiş incelendiğinde (Şekil 5.15c) ise tabakalar arasında delaminasyon gözlemlenmemiştir. Tabakalar arası geçiş mikroyapı değişikliğinden tespit edilmiştir. % 40 Al_2O_3 takviye içeren yüzeye ait görüntü (Şekil 5.15d) incelendiğinde matris yapısı içerisinde oluşan mikro çatlakların azaldığı ve matris fazının deformasyon sırasında sıvanma şeklinde akma gösterdiği tespit edilmiştir. % 40 Al_2O_3 takviye içeren tabaka ile % 20 Al_2O_3 takviye içeren tabaka arasındaki geçiş incelendiğinde (Şekil 5.15e) tabakalar arasında delaminasyon gözlemlenmemiştir. % 20 Al_2O_3 takviye içeren yüzeye ait görüntüler (Şekil 5.15f-g) incelendiğinde matris fazında oluşan sıvanma izlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu duruma artan martis miktarının sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca çıkış bölgesinde takım izlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma artan ilerleme kuvvetinin ve takım zırh kısmının

kopan takviye elemanları ile birlikte oluşturduğu izlerin sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.15. En düşük gri ilişkisel dereceye sahip olan deneye ait delik yüzey görüntüleri.

En yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olan deneye ait delik yüzey görüntüleri Şekil 5.16' de gösterilmiştir. Delik girişinde (Şekil 5.16a) giriş deformasyonu oluşturacak kitlesel malzeme kayıpları gözlemlenmemiştir. % 60 Al_2O_3 takviye içeren yüzeyde bölgesel mikro çatlakların yanında kesilmiş takviye elemanlarının olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.16b). % 60 Al_2O_3 takviye içeren tabaka ile % 40 Al_2O_3 takviye içeren tabaka arasında herhangi bir delaminasyona rastlanılmamıştır (Şekil 5.16c). Şekilde gösterilen boşluk bölgelerinin delik delme işleminden kaynaklanmadığı, malzeme üretimi sırasında olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.16. En yüksek gri ilişkisel dereceye sahip olan deneye ait delik yüzey görüntüleri.

% 40 Al_2O_3 takviye içeren tabaka ile % 20 Al_2O_3 takviye içeren tabaka arasında da herhangi bir delaminasyona rastlanılmamıştır (Şekil 5.16e). Tabakalar arası geçişler mikroyapıdaki değişikliklerden tespit edilmiştir. % 20 Al_2O_3 takviye içeren tabaka incelendiğinde ise uzun ve yassı şekilde sıvanmaların olduğu gözlemlenmiştir. Çıkış bölgesinde oluşan talaşın delik içerisine sıvandığı fakat kitlesel malzeme kayıplarının oluşmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.16f-e).

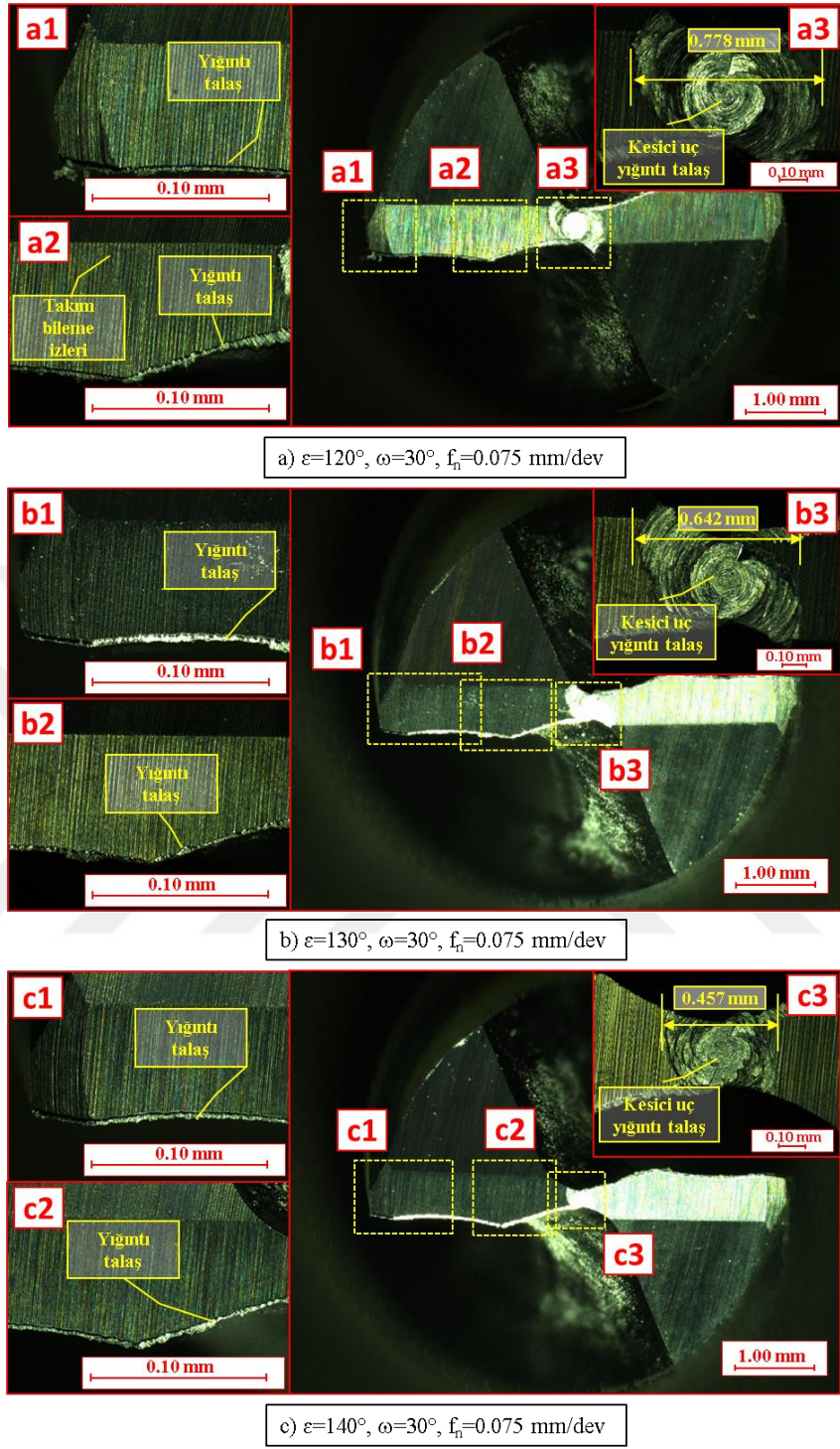
Delik içi deformasyonları incelemelerinde, başlıca deformasyon mekanizmalarının abrasif ve adhezif aşınma mekanizmaları olduğu bunlarla birlikte diğer aşınma mekanizmalarının da olduğu gözlemlenmiştir. Takımın talaş kaldırma işlemi esnasında oluşturduğu kuvvet ve sıcaklığın etkisi ile işlenen yüzeylerde matris

sıvanması gözlemlenmiştir. Matris miktarının artması ile sıvanma miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca işlenmiş yüzeylerin tamamında toz şeklinde yapışan talaşların ve oksit bileşenlerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.

5.2.6. Takım Aşınmalarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde Al_2O_3 takviye edilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin delinmesinde, matkap ucu üzerinde oluşan aşınma mekanizmaları incelenmiş ve takım geometrik unsurların (uç açısı ve helis açısı) takım aşınması üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Takımların 0,10 mm hassasiyette çekilen görüntüleri incelendiğinde, takımlar üzerinde üretim esnasında oluşan bileme izlerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Tüm takımlarda, alüminyum matrisli kompozitlerin işlenmesinde meydana gelen tipik aşınma tipleri gözlemlenmiştir. Deneylerde belirlenen en önemli aşınma mekanizması yığıntı talaş oluşumudur. Matkabın kesici kenarında, kesici uç bölgesinden başlayan ve köşesine doğru daralan yığıntı talaş aşınması gözlemlenmiştir. Ayrıca takım üzerine tabaka şeklinde yapışan yığıntı talaşların varlığı da tespit edilmiştir. En yüksek aşının kesici uç tepe bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Takımın kesme hızının (V_c) matkabın merkezine doğru azaldığı ve merkez noktasında sıfır olduğu ve bu sebeple merkezde kesme işleminin gerçekleşmediği, iş parçasının ezilere plastik deformasyona uğratıldığı daha önce yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [56, 70, 99]. Matkap merkezinde takım ile iş parçası arasındaki temasın artması nedeniyle aşınmanın o bölgede arttığı düşünülmektedir.

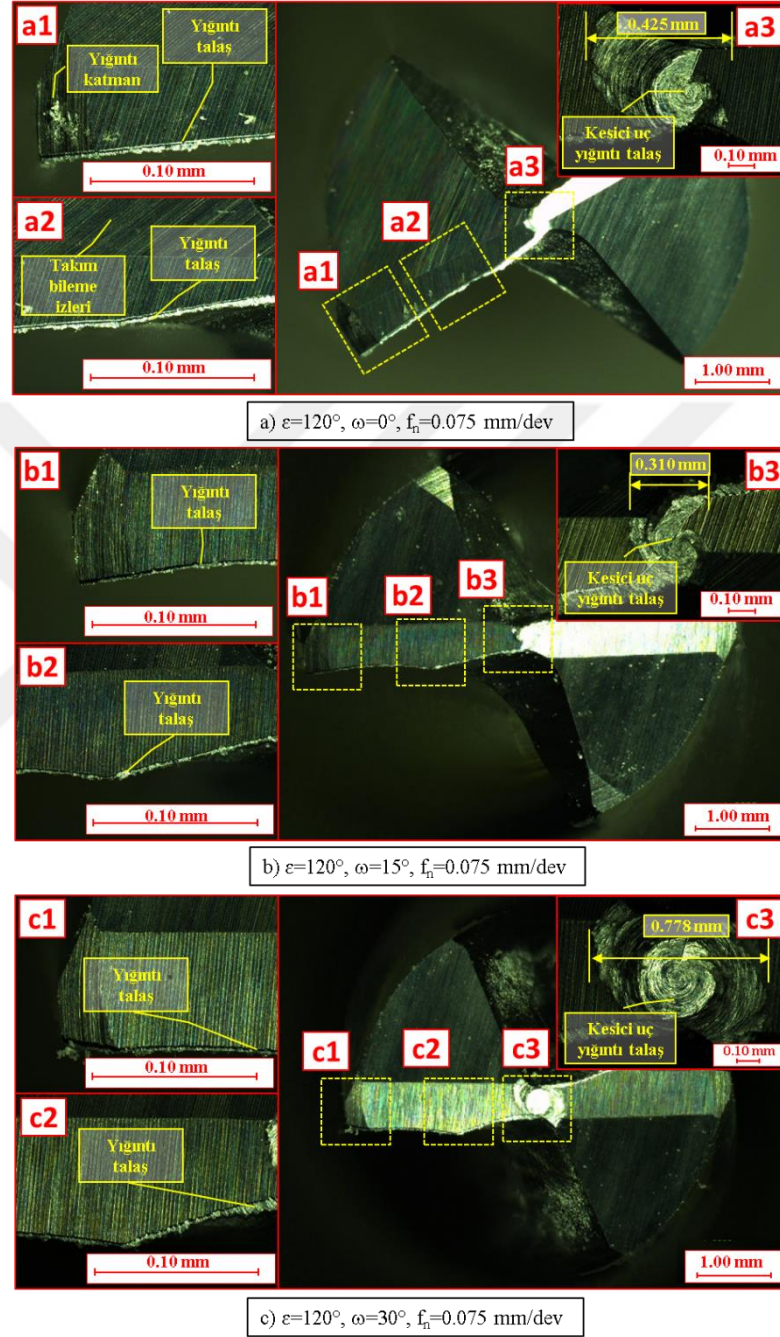
Şekil 5.17' de farklı uç açlarına sahip takımlarda meydana gelen takım aşınmaları gösterilmiştir. Matkabın merkesinde oluşan yığıntı talaş genişliğinin 120° , 130° ve 140° uç açısına sahip takımlarda sırasıyla, 0,778, 0,642 ve 0,457 mm olduğu tespit edilmiştir. Takım uç açısının artmasıyla takım üzerinde oluşan aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, takım uç açısının artması ile kesici kenar uzunluğunun azalmasına bağlı olarak azalan sürtünme kuvvetlerinin etkisine atfedilebilir [85, 100].



Şekil 5.17. Farklı uç açısına sahip takımlar üzerinde oluşan aşınma görüntüleri: a) 120° , b) 130° ve c) 140° .

Şekil 5.18' de farklı helis açlarına sahip takımlarda delme işlemi snucunda oluşan takım aşınmalarının görüntüleri verilmiştir. En yüksek aşınmanın gözlemlendiği matkap merkezindeki aşınma genişliği ölçüldüğünde, en düşük aşınma genişliği 0,310

mm ile 15° helis açısında elde edilmiştir. Ardından aşınma genişlikleri sırasıyla 0,425 mm olarak 0° helis açısında, 0,778 mm olarak 30° helis açısında ölçülmüştür.



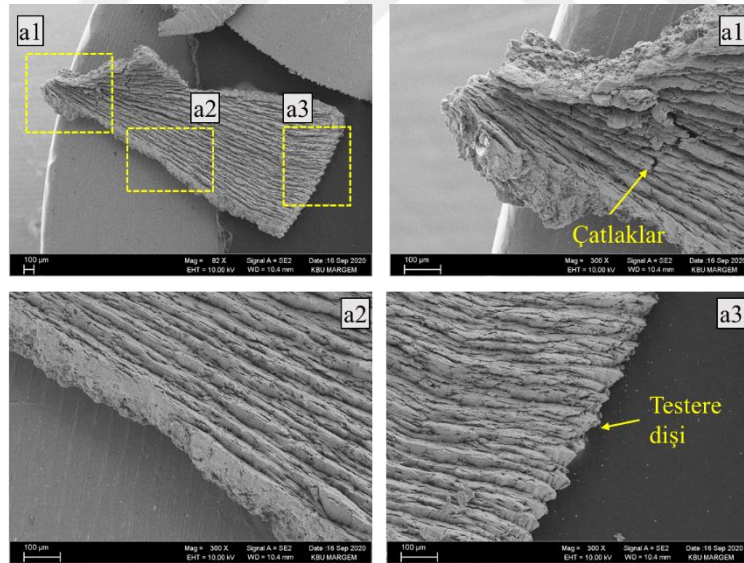
Şekil 5.18. Farklı helis açısına sahip takımlar üzerinde oluşan aşınma görüntüleri: a) 0° , b) 15° ve c) 30° .

Önceki yapılan çalışmalarda takım aşınmasının ilerleme kuvveti ile orantılı olduğu belirtilmiştir. İlerleme kuvvetinin artması ile işleme sıcaklığının arttığı ve bu durumun iş parçasının takıma yapışmasına sebep olduğu belirtilmiştir [97, 98, 100].

5.2.7. Talaş Yapılarının Değerlendirilmesi

Talaş formları, delik delme işlemi ardında oluşan deliklerin yüzey kalitesi ve matkaplarda oluşan aşınmaların değerlendirilmesinde önemli bir etkidir. Talaş formları, iş parçası malzemesine, işleme parametrelerine, kullanılan takım türüne ve takım geometrilerine göre farklılık gösterir.

Bu kısımda farklı takım geometrilerine sahip takımlarla ve farklı ilerleme miktarı ile yapılan delik delme deneyleri sonucunda oluşan talaş formları incelenmiştir. Delik delme deneyleri sonucunda elde edilen genel talaş formuna ait SEM görüntüsü Şekil 5.19’ da gösterilmiştir.

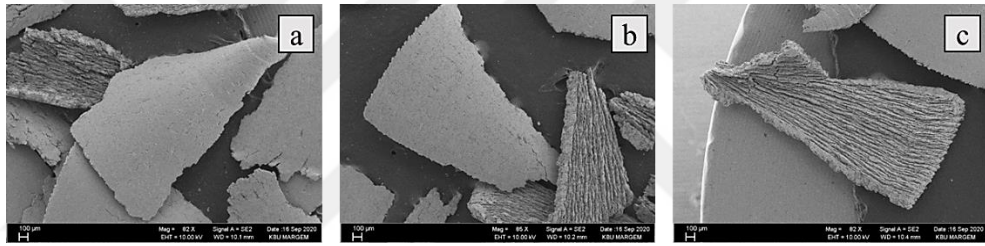


Şekil 5.19. Delik delme deneyleri sonucunda elde edilen genel talaş formuna ait SEM görüntüsü

Metal matrisli kompozitlerin işlenmesi sırasında, sert parçacıkların varlığından dolayı kesme bölgesi boyunca talaş deformasyonları ve gerilme yığılmaları meydana gelir [11, 56]. Çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerde testere dişli ve kısa talaş formunda talaşlar elde edilmiştir. Alüminyum matris içerisinde bulunan sert Al_2O_3

partiküllerinin talaş kırıcı olarak görev yaptığı ve testere dişine benzer forma talaş oluşumuna yardım ettiği düşünülmektedir. Ayrıca, Al_2O_3 partikülleri alüminyum matrisin mekanik özelliklerini değiştirerek daha gevrek bir yapı oluşturması, matrisin plastik deformasyon özelliklerinin de değiştirmesine neden olmuştur. Delme işlemi sonrasında oluşan bu testere dişli, parçalanmış ve kırılğan talaş formu iş parçasının gevrek yapısına da atfedilebilir. Önceki yapılan çalışmalarda da araştırmacılar benzer sonuçlar bulmuşlardır [11, 45, 49].

Üç farklı ilerleme miktarları kullanılarak gerçekleştirilen delik delme işlemleri neticesinde elde edilen talaş formları Şekil 5.20’ de gösterilmiştir. Talaş formlarının ilerleme miktarının göre değerlendirilmesi amacıyla uç açısı 120° ve helis açısı 0° olarak sabit tutulmuştur.

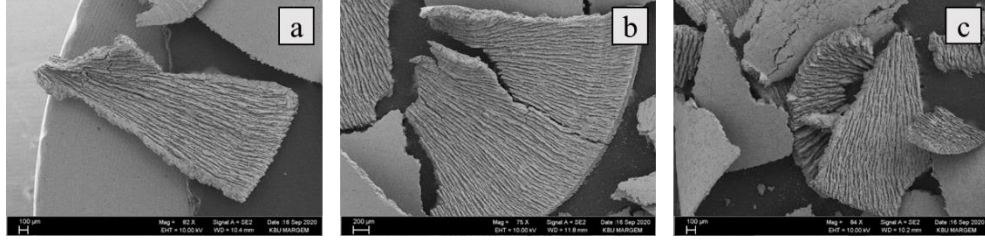


Şekil 5.20. Farklı ilerleme miktarının değerlerinde göre oluşan talaş formlarının görüntüsü: $\epsilon = 120^\circ$, $\omega = 0^\circ$, a) $f_n = 0,075$ mm/dev, b) $f_n = 0,010$ mm/dev ve c) $f_n = 0,150$ mm/dev.

Farklı ilerleme miktarı değerlerinde alınan talaşlar görüntülendiğinde, kısa formda ve testere dişli talaşların olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan talaşların boyutlarının ve talaş eğrilik yarıçaplarının birbirine benzer olduğu gözlemlenmiştir. İlerleme miktarının değişmesi ile elde edilen talaş formları arasında belirgin bir farklılık gözlemlenememiştir. Önceki yapılan çalışmalar incelendiğinde ise ilerleme miktarının artması ile talaş eğrilik yarıçapının arttığı belirtilmiştir [45, 101]. Bu çalışmada literatürde belirtilen değişimin gözlemlenememesinin nedeninin, iş parçası içindeki yüksek oranlarda bulunan takviye miktarının olduğu düşünülmektedir.

Farklı helis açılara sahip takımların kullanıldığı delik delme işlemleri neticesinde elde edilen talaş formları Şekil 5.21’ de gösterilmiştir. Talaş formlarının helis açısının

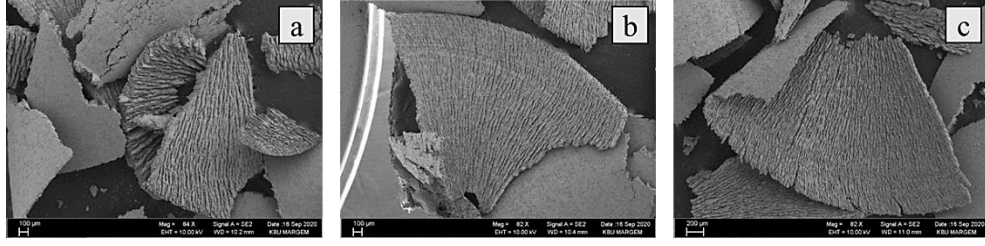
değişimine göre değerlendirilmesi amacıyla uç açısı 120° ve ilerleme miktarı 0,150 mm/dev olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 5.21. Farklı helis açısına sahip takımlarla elde edilen talaş formlarının görüntüsü: $\varepsilon = 120^\circ$, $f_n = 0,150$ mm/dev a) $\omega = 0^\circ$, b) $\omega = 15^\circ$, c) $\omega = 30^\circ$.

Farklı helis açılarına sahip takımlarla yapılan delik delme işlemleri neticesinde elde edilen talaşlar incelendiğinde, 0° ve 30° helis açılarında kısa formda talaşların yanında toz talaşlar da elde edilmiştir. İşlenen malzemenin toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş olması, delme işlemleri sırasında toz talaşların oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Kısa ve süreksiz talaşlar, talaşın delinmiş yüzeyden kolayca atılmasına ve yüzey kalitesinin artmasına neden olmaktadır. 15° helis açısı ile yapılan deneylerde ise elde edilen talaşların diğer helis açılarına oranla daha uzun yapıda olduğu ve talaş eğrilik yarıçapının daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerinin 15° helis açısında elde edilmesine, oluşan talaşların yüzeyde oluşturduğu olumsuzlukların sebep olduğu düşünülmektedir.

Farklı uç açılarına sahip takımların kullanıldığı delik delme işlemleri neticesinde elde edilen talaş formları Şekil 5.22’ de gösterilmiştir. Talaş formlarının uç açısının değişimine göre değerlendirilmesi amacıyla helis açısı 0° ve ilerleme miktarı 0,150 mm/dev olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 5.22. Farklı uç açısına sahip takımlarla elde edilen talaş formlarının görüntüsü:
 $\omega = 0^\circ$, $f_n = 0,150$ mm/dev a) $\varepsilon = 120^\circ$, b) $\varepsilon = 130^\circ$, c) $\varepsilon = 140^\circ$.

Farklı uç açılarına sahip takımlarla yapılan delik delme işlemleri neticesinde elde edilen talaşlar incelendiğinde, helis açısının artması ile daha kıvrımlı talaşların oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca matkap uç açısının artması ile talaş eğrilik yarıçapının da arttığı gözlemlenmiştir. Talaş formu, itme kuvveti ve takım aşınması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Takımlarda uç açısının artması ile kesme kenar uzunluğunun azalması kesici kenar ile iş parçası arasındaki sürtünmenin azalmasına ve kesici takımlarda oluşan aşınma miktarının da azalmasına neden olur. Azalan sürtünme kuvvetleri nedeniyle uç açısının artması, talaşların eğrilik yarıçapının artmasına ve talaşların daha kıvrımlı bir yapıda oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Önceki yapılan çalışmalarda araştırmacıların benzer sonuçlar elde etmişlerdir [83, 102].

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin mekanik ve delik delme ile işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi amacıyla toz metalurji yöntemi kullanılarak AA7075 matrisli ve Al_2O_3 takviyeli, üç, dört ve altı tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. İşlenebilirlik performanslarının belirlenmesi amacıyla AA7075/ Al_2O_3 üç tabakalı FDM'ler, 6 mm çapında kaplamasız karbür matkap kullanılarak farklı matkap helis açısı ($\omega = 0^\circ, 15^\circ$ ve 30°), uç açısı ($\epsilon = 120^\circ, 130^\circ$ ve 140°) ve ilerleme miktarı ($f_n = 0,075, 0,1, 0,15$ mm/dev) değerleri kullanılarak delinmiştir. İşlenebilirlik deneyleri full faktöriyel deney tasarımına göre yapılmıştır. Faktörlerin ilerleme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki anlamlılık seviyeleri ANOVA ile belirlenmiştir. En düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve yüzey pürüzlülüğü değerini elde edildiği kesme parametrelerinin belirlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda giriş parametrelerinin, işlenmiş delik yüzeyleri, takım aşınmaları ve talaş formları üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen üç, dört ve altı tabakalı AA7075/ Al_2O_3 FDM'ler başarıyla üretilmiştir. Kompozitlerin üretim sonrasındaki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde tabakalar arasında, FDM'nin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyecek her hangi bir ayrılma, kopma veya boşluk tespit edilmemiştir.
- AA7075/ Al_2O_3 FDM'lerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde Al_2O_3 partiküllerinin tane sınırlarında homojene yakın olarak dağıldığı tespit

edilmiştir. Takviye miktarının artması ile topaklanmanın ve gözenek miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

- N3, N4 ve N6 numunelerinin %60 Al₂O₃ içeren tabakalarının mikroyapı görüntüleri incelendiğinde tabaka sayısı arttıkça gözenek miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Mikro sertlik test sonuçlarına göre en yüksek mikro sertlik değeri dört kademeli N4-45 numunesinde 182 Hv, en düşük mikro sertlik değeri altı kademeli N6-10 numunesinde 118 Hv olarak elde edilmiştir. Tabaka içerisindeki Al₂O₃ partiküllerinin miktarının %40-45 değerlerine kadar artması ile mikro sertlik değerlerinin arttığı bu değerden sonra ise partikül miktarının artması ile mikro sertik değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Yapılan çapraz kırılma deney sonuçları incelendiğinde, yükün uygulandığı yüzeyin numunelerin mukavemeti üzerinde ekili olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çapraz kırılma mukavemeti, yükün yüksek takviye içeren yüzeyden uygulanması durumunda, N3 numunesinde 658 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük çapraz kırılma mukavemeti ise yükün düşük takviye içeren yüzeyden uygulanması durumunda, N6 numunesinde 188 MPa olarak elde edilmiştir.
- Çapraz kırılma test sonuçlarına göre tabaka sayının artması ile çapraz kırılma mukavemet değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

Üç tabakalı FDM'lerin delik delme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ANOVA sonuçlarına göre ilerleme kuvvetine, % 42,36 oranla ilerleme miktarının, % 20,29 oranla uç açısının, % 18,47 oranla helis açısının ve % 15,53 oranla uç açısının helis açısıyla etkileşiminin etkili olduğu tespit edilmiştir. İlerleme miktarının artması ile ilerleme kuvvetinin arttığı, uç açısının artması ile ilerleme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir. En düşük ilerleme kuvveti değeri 140° uç açısı, 15° helis açısı ve 0,075 mm/dev ilerleme miktarında 221 N olarak, en yüksek ilerleme kuvveti değeri 120° uç açısı, 30° helis açısı ve 0,150 mm/dev ilerleme miktarında 528 N olarak ölçülmüştür.
- Varyans analizi sonuçlarına göre delme momenti üzerindeki anlamlı etkisi olan parametrenin % 23,55 oranla helis açısı olduğu tespit edilmiştir. Helis açısı

hariçindeki diğer parametrelerin, delme momenti üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. En düşük delme momenti değeri 140° uç açısı, 0° helis açısı ve $0,075$ mm/dev ilerleme miktarında 45 Ncm olarak, en yüksek delme momenti değeri 130° uç açısı, 30° helis açısı ve $0,100$ mm/dev ilerleme miktarında $104,70$ Ncm olarak ölçülmüştür.

- ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin % $41,09$ oranla ilerleme miktarı olduğu tespit edilmiştir. İlerleme miktarından sonra % $16,40$ oranla uç açısı, % $14,09$ oranla uç açısının helis açısıyla etkileşimi, % $11,39$ oranla uç açısının ilerleme miktarıyla etkileşimi, % $6,18$ oranla helis açısının ilerleme miktarıyla etkileşimi ve % $6,03$ oranla helis açısının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 130° uç açısı, 0° helis açısı ve $0,100$ mm/dev ilerleme miktarında $0,134$ μm olarak, en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 130° uç açısı, 15° helis açısı ve $0,150$ mm/dev ilerleme miktarında $0,365$ μm olarak ölçülmüştür.
- Yapılan gri ilişkisel analiz sonucuna göre en düşük ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 19 numaralı deneyde ($\epsilon=140^\circ$, $\omega=0^\circ$, $f_n=0,075$ mm/dev), en yüksek ilerleme kuvveti, delme momenti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ise 3 numaralı deneyde ($\epsilon=120^\circ$, $\omega=0^\circ$, $f_n=0,150$ mm/dev) elde edilmiştir.
- Faktörlerin ve etkileşimlerinin gri ilişkisel derece üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan varyans analizi sonuçlarına göre ilerleme miktarının % $61,94$ etki oranıyla gri ilişkisel derece üzerindeki en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. İlerleme miktarından sonra % $11,27$ oranla helis açısının ve % $10,22$ oranla uç açısının gri ilişkisel derece üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Delik delme işlemleri sonrasında yapılan delik yüzeyi incelemelerinde, FDM' nin tabakaları arasında her hangi bir delaminasyona rastlanmamıştır. Takviye oranın yüksek olduğu bölgelerde delme işlemi sebebi ile mikro çatlakların oluştuğu, takviye oranının düşük olduğu bölgelerde ise matris malzemesinin işleme esnasında oluşan ısının da etkisiyle sıvanma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

- Delik delme deneyleri sonrasında yapılan takım aşınması incelemelerinde, takımlarda meydana gelen en önemli hasar mekanizmasının yığıntı talaş olduğu belirlenmiştir. En yüksek aşınmaların kesici uç bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Takım aşınmasının ilerleme kuvveti ile ilişkili olduğu, ilerleme kuvvetinin düşük olduğu durumlarda takım aşınmasının az olduğu tespit edilmiştir. Takım uç açısının artması ile takım aşınmasının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Talaş formları incelendiğinde, alüminyum matrisin içerisine ilave edilen sert partiküllerin etkisiyle gevrekleşmesi ve kompozit içerisinde bulunan takviye elemanlarının delme esnasında talaş kırıcı olarak görev yapması sebebi ile testere dişli ve kısa talaş oluşumunun gerçekleştiği görülmektedir. Matkap uç açısının artması ile talaşların eğrilik yarıçapının arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmayı daha ileriye taşımak için aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir.

- Bu çalışmada üretilen FDM'lere ısıtma işlemi uygulanarak elde edilen kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özellikleri araştırılabilir.
- Farklı tabaka sayısına sahip numunelerin işlenmesi ile tabaka sayısının işlenebilirlik üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Bu çalışmada delik delme işlemlerine yüksek takviye oranına sahip tabakalardan başlanmıştır. Sonraki çalışmalarda düşük takviye oranına sahip tabakadan delme işlemine başlanarak, delik delme yönünün FDM'ler üzerindeki etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Kaw, A. K. and Group, F., "Mechanics of Composite Materials", 2nd. Ed., **Taylor & Francis Group**, United States Of America, 1–457 (2006).
2. R.C. Adams, "ASM Handbook Volume 21 Composite", Technology, **ASM International Handbook Committee**, 3470 (2001).
3. Karbalaee Akbari, M., Mirzaee, O., and Baharvandi, H. R., "Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al₂O₃ particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method", **Materials And Design**, 46199–205 (2013).
4. Jadhav, S. S., Kakde, A. S., Patil, N. G., and Sankpal, J. B., "Effect of Cutting parameters, Point angle and reinforcement percentage on surface finish, in drilling of AL6061/Al₂O₃p MMC", **Procedia Manufacturing**, 202–11 (2018).
5. Watanabe, R., Nishida, T., and Hirai, T., "Present Status of Research on Design and Processing of Functionally Graded Materials", **Metals And Materials International**, 9 (6): 513–519 (2003).
6. Jha, D. K., Kant, T., and Singh, R. K., "A critical review of recent research on functionally graded plates", **Composite Structures**, 96833–849 (2013).
7. Naebe, M. and Shirvanimoghaddam, K., "Functionally graded materials: A review of fabrication and properties", **Applied Materials Today**, 5223–245 (2016).
8. Varol, T., Canakci, A., and Ozsahin, S., "Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al₂O₃-B₄C composites produced by powder metallurgy", **Composites Part B: Engineering**, 54 (1): 224–233 (2013).
9. Taşkesen, A. and Kütükde, K., "Optimization of the drilling parameters for the cutting forces in B₄C-reinforced Al-7XXX-series alloys based on the Taguchi method", **Materiali In Tehnologije**, 47 (2): 169–176 (2013).
10. Kütükde, K., "Seramik takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin delinebilirlik özelliklerinin belirlenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi**, (2014).
11. Karabulut, Ş., Gökmen, U., and Çinici, H., "Study on the mechanical and drilling properties of AA7039 composites reinforced with Al₂O₃/B₄C/SiC particles", **Composites Part B: Engineering**, 93:43–55 (2016).

12. Chung, D. D., "Composite Materials: Science and Applications", **Springer Science & Business Media**, (2010).
13. Pilato, L. A. and Michno, M. J., "Advance Composite Materials", **Springer-Verlag**, Berlin, (1994).
14. Sur, G., "Karma takviyeli alüminyum matriksli kompozitlerin üretimi, mekanik özellikler ve işlenebilirliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi**, (2008).
15. Karataş, Altin, M. and Gökkaya, H., "A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials", **Defence Technology**, 14:318–326 (2018).
16. Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., and Lavernia, E. J., "Particulate reinforced metal matrix composites - a review", **Journal Of Materials Science**, 26 (5): 1137–1156 (1991).
17. Kwon, H., Leparoux, M., and Kawasaki, A., "Functionally graded Dual-nanoparticulate-reinforced aluminium matrix bulk materials fabricated by spark plasma sintering", **Journal Of Materials Science And Technology**, 30 (8): 736–742 (2014).
18. Sobczak, J. J. and Drenchev, L., "Metallic Functionally Graded Materials: A Specific Class of Advanced Composites", **Journal Of Materials Science And Technology**, 29 (4): 297–316 (2013).
19. Kawasaki, A. and Watanabe, R., "Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials", **Ceramics International**, 23 (1): 73–83 (1997).
20. Bever, M. B. and Duwez, P. E., "Gradients in composite materials", **Materials Science And Engineering**, 10 (C): 1–8 (1972).
21. Gupta, A. and Talha, M., "Development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures", **Progress In Aerospace Sciences**, 1–14 (2015).
22. Mahamood, R. M. and Akinlabi, E. T., "Functionally Graded Materials", **Springer**, Porto Alegre, (2013).
23. Jung, Y. G., Ha, C. G., Shin, J. H., Hur, S. K., and Paik, U., "Fabrication of functionally graded ZrO₂/NiCrAlY composites by plasma activated sintering using tape casting and it's thermal barrier property", **Materials Science And Engineering A**, 323 (1–2): 110–118 (2002).
24. Selva Kumar, M., Chandrasekar, P., Chandramohan, P., and Mohanraj, M., "Characterisation of titanium-titanium boride composites processed by powder metallurgy techniques", **Materials Characterization**, 73 (1): 43–51 (2012).

25. Kieback, B., Neubrand, A., and Riedel, H., "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science And Engineering A*, 362 (1–2): 81–106 (2003).
26. Ighodaro, O. L. and Okoli, O. I., "Fracture Toughness Enhancement for Alumina Systems : A Review", *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 5 (1): 313–323 (2008).
27. Liu, Z., Meyers, M. A., Zhang, Z., and Ritchie, R. O., "Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications", *Progress In Materials Science*, 88 (1): 467–498 (2017).
28. Swaminathan, K. and Sangeetha, D. M., "Thermal Analysis of FGM Plates – A Critical Review of Various Modelling Techniques and Solution Methods", *Composite Structures*, 160 (A): 43–60 (2016).
29. Rajan, T. P. D., "Developments in Processing of Functionally Gradient Metals and Metal – Ceramic Composites : A Review", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27 (5): 825–838 (2014).
30. Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., and Pai, B. C., "Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites", *Materials Characterization*, 61 (10): 923–928 (2010).
31. El-Galy, I. M., Ahmed, M. H., and Bassiouny, B. I., "Characterization of functionally graded Al-SiCp metal matrix composites manufactured by centrifugal casting", *Alexandria Engineering Journal*, 56 (4): 371–381 (2016).
32. Aydin, M. and Apalak, M. K., "Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact", *Materials Science And Engineering A*, 671107–117 (2016).
33. Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yildirim, R. O., and Keleş, Ö., "The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy", *Materials And Design*, 5631–36 (2014).
34. Lin, C. Y., Bathias, C., McShane, H. B., and Rawlings, R. D., "Production of silicon carbide Al 2124 alloy functionally graded materials by mechanical powder metallurgy technique", *Powder Metallurgy*, 42 (1): 29–33 (1999).
35. Erdemir, F., Canakcı, A., and Varol, T., "Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al2024/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 25 (11): 3569–3577 (2015).
36. Çinici, H., Gökmen, U., Kırmızı, G., and Çamkerten, R., "Sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş B4C takviyeli AA 7xxx matrisli fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin çapraz kırılma dayanımlarını belirlenmesi", *MSU Fen Bil.Dergisi*, 5 (1): 383–386 (2017).

37. Wu, C., Wu, J., Ma, K., Zhang, D., Xiong, S., Zhang, J., Luo, G., Chen, F., Shen, Q., Zhang, L., and Lavernia, E. J., "Synthesis of AA7075-AA7075/B4C bilayer composite with enhanced mechanical strength via plasma activated sintering", *Journal Of Alloys And Compounds*, 701: 416–424 (2017).
38. Watanabe, Y., Kawamoto, A., and Matsuda, K., ." A Novel Fabrication Method for Functionally Graded Materials under Centrifugal Force: The Centrifugal Mixed-Powder Method", *Materials*, 2 (1): 2510-2525 (2009)
39. Wu, C., Ma, K., Wu, J., Fang, P., Luo, G., Chen, F., Shen, Q., Zhang, L., Schoenung, J. M., and Lavernia, E. J., "Influence of particle size and spatial distribution of B4C reinforcement on the microstructure and mechanical behavior of precipitation strengthened Al alloy matrix composites", *Materials Science And Engineering A*, 675: 421–430 (2016).
40. Radhika, N., "Mechanical Properties and Abrasive Wear Behaviour of Functionally Graded Al-Si12Cu/Al2O3 Metal Matrix Composite", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 70 (1): 145–157 (2017).
41. Jin, X., Wu, L., Sun, Y., and Guo, L., " Microstructure and mechanical properties of ZrO2/NiCr functionally graded materials", *Materials Science and Engineering A*, 509 : 63–68 (2009).
42. Surya, M. S. and Prasanthi, G., "Manufacturing and Micro structure study of Al-SiC Functionally graded material", *Materials Today: Proceedings*, 4 (2): 621–627 (2017).
43. Karabulut, Ş., Karakoç, H., and Çıtak, R., "Influence of B4C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061 /B4C composites", *Composites Part B: Engineering*, 101:87–98 (2016).
44. Taskesen, A. and Kutukde, K., "Non-contact measurement and multi-objective analysis of drilling temperature when drilling B 4 C reinforced aluminum composites", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 25 (1): 271–283 (2015).
45. Tas, A., "Experimental investigation and multi-objective analysis on drilling of boron carbide reinforced metal matrix composites using grey relational analysis", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 47:321–330 (2014).
46. Ekici, E., Motorcu, A. R., and Uzun, G., "An investigation of the effects of cutting parameters and graphite reinforcement on quality characteristics during the drilling of Al/10B4C composites", *Measurement*, 95:395–404 (2017).
47. Tosun, G. and Muratoglu, M., "The drilling of Al/SiCp metal-matrix composites. Part II: Workpiece surface integrity", *Composites Science And Technology*, 64 (10–11): 1413–1418 (2004).

48. Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Prabu, M., Mukund, K., and Ashwin, M., "Drilling of hybrid metal matrix composites — Workpiece surface integrity", 47:92–96 (2007).
49. Ramulu, M., Rao, P. N., and Kao, H., "Drilling of (Al₂O₃)p/6061 metal matrix composites", *Journal Of Materials Processing Technology*, 124:244–254 (2002).
50. A. R. Ahamed, P. Asokan, S. Aravindan, M. K. P., "Drilling of hybrid Al-5%SiCp-5%B₄Cp metal matrix composites", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 49:871–877 (2010).
51. Davim, J. P. and Conceição António, C. A., "Optimal drilling of particulate metal matrix composites based on experimental and numerical procedures", *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 41 (1): 21–31 (2001).
52. Davim, J. P. and Baptista, M. A., "Cutting force, tool wear and surface finish in drilling metal matrix composites", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part E: Journal Of Process Mechanical Engineering*, 215:177–183 (2001).
53. Davim, J. P., "Study of drilling metal-matrix composites based on the Taguchi techniques", *Journal Of Materials Processing Technology*, 132 (1–3): 250–254 (2003).
54. Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., and Vafadar, A., "A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (6): 12484–12500 (2020).
55. Sataloff, R. T., Johns, M. M., and Kost, K. M., "Machining ", *Asm Handbook*, (1989).
56. Smith, G. T. and Smith, G. T., "Cutting Tool Technology", *CNC Machining Technology*, 65–129 (1993).
57. Ramesh, S., Viswanathan, R., and Ambika, S., "Measurement and optimization of surface roughness and tool wear via grey relational analysis, TOPSIS and RSA techniques", *Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation*, 78:63–72 (2016).
58. Haq, A. N., Marimuthu, P., and Jeyapaul, R., "Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 37 (3–4): 250–255 (2008).

59. Senthilkumar, N., Tamizharasan, T., and Anandakrishnan, V., "Experimental investigation and performance analysis of cemented carbide inserts of different geometries using Taguchi based grey relational analysis", ***Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation***, 58:520–536 (2014).
60. Yaşar, N., "Thrust force modelling and surface roughness optimization in drilling of AA-7075: FEM and GRA", ***Journal Of Mechanical Science And Technology***, 33 (10): 4771–4781 (2019).
61. Erdemir, F., "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al₂O₃/SiC Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, ***Karadeniz Teknik Üniversitesi***, (2016).
62. Sarıkan, B., "İşlevsel derecelendirilmiş bor karbür takviyeli ,AA7075 esaslı kompozitlerin 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi***, (2013).
63. Çam, Y. and Karcı, A., "Silisyum Karbür Takviyeli Al üminyum Matrisli Kompozitlerin Tek Aşırı Yükler Altın da Yorulma Davranışı Fatigue Crack Behaviour of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites Under Single Overloads Abstract", 2019 (November): 994–1007 (2019).
64. Fujii, T., Tohgo, K., Isono, H., and Shimamura, Y., "Fabrication of a PSZ-Ti Functionally Graded Material by Spark Plasma Sintering and Its Fracture Toughness", ***Materials Science And Engineering: A***, 682 (November 2016): 656–663 (2016).
65. Huang, C. Y. and Chen, Y. L., "Effect of varied alumina/zirconia content on ballistic performance of a functionally graded material", ***International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials***, 67 (February): 129–140 (2017).
66. Decker, S. and Krüger, L., "Mechanical properties of a CrMnNi steel/Mg-PSZ-FGM processed by asymmetric Spark Plasma Sintering", ***Materials And Design***, 115:8–16 (2017).
67. Balcı, E., "Silisyum karbür ve alümina takviyeli alüminyum esaslı işlevsel dereceli malzemelerin balistik performansının incelenmesi", Doktora Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi***, (2014).
68. Samer, N., Andrieux, J., Gardiola, B., Karnatak, N., Martin, O., Kurita, H., Chaffron, L., Gourdet, S., Lay, S., and Dezellus, O., "Microstructure and mechanical properties of an Al-TiC metal matrix composite obtained by reactive synthesis", ***Composites Part A: Applied Science And Manufacturing***, 72:50–57 (2015).
69. Kılıç, M., Kırık, İ., Kurt, B., and Orhan, N., "Investigation of Preheat Temperature Effect on the Sturcture of Functionally Graded Ni₃Al/NiAl/NiTi Intermetallic Compound", ***Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences***, 21 (8): 358–364 (2015).

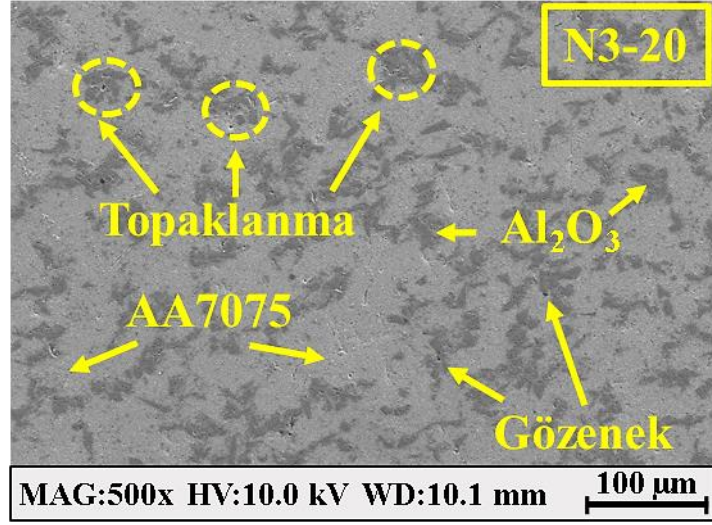
70. Bayraktar, Ş., Sıyambaş, Y., and Turgut, Y., "Drilling process: a review", **Sakarya University Journal Of Science**, 21 (2): 124–124 (2017).
71. Yavuz, M., Gökçe, H., and Şeker, U., "Matkap Geometrisinin Takım Aşınması ve Talaş Oluşumu Üzerine Etkisinin Araştırılması", **Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 3 (1): 11–19 (2017).
72. Çakır, A., Kavak, N., and Duran, A., "Kesici Takım Geometrisinin Delik Delme Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi", **5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu**, (2014).
73. Soylu, A., "Bir delme dinamometresi tasarım ve imalatı ile HSS-1040 malzeme çiftinde ilerleme kuvveti ve döndürme momentinin analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi**, (2007)
74. Yavuz, M., "Delme işlemlerinde takım geometrisinin etkilerinin deneysel ve teorik olarak araştırılması", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi**, (2017).
75. Ema, S., "Effects of Twist Drill Point Geometry on Torque and Thrust", **Sci. Rep. Fac. Educ. Gifu Univ. (Nat. Sci.)**, 36: 165-174 (2012).
76. Neseli, S., "Optimization of Process Parameters with Minimum Thrust Force and Torque in Drilling Operation Using Taguchi Method", **Advances In Mechanical Engineering**, 6925382 (2014).
77. Ali Davoudinejad, Sina Alizadeh Ashrafi, Raja Ishak Raja Hamzah, and Abdolkarim Niazi, "Experimental Analysis of Wear Mechanism and Tool Life in Dry Drilling of Al2024", **Advanced Materials Research Vol.**, 566:217–221 (2012).
78. Mudhukrishnan, M., Hariharan, P., and Palanikumar, K., "Delamination Analysis in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polypropylene (CFR-PP) Composite Materials", **Materials Today: Proceedings**, 16:792–799 (2019).
79. Rajeswari, B. and Amirthagadeswaran, K. S., "Experimental investigation of machinability characteristics and multi- response optimization of end milling in aluminium composites using RSM based grey relational analysis", **Measurement**, 105:78–86 (2017).
80. Ueda, T., Wada, A., Hasegawa, K. I., Endo, Y., Takikawa, Y., Hasegawa, T., and Hara, T., "The Effect of Drill Design Elements on Drilling Characteristics when Drilling Bone", **Journal of Biomechanical Science and Engineering**, 5 (4): 399-407 (2010)
81. Díaz-Álvarez, A., Díaz-Álvarez, J., Santiuste, C., and Miguélez, M. H., "Experimental and numerical analysis of the influence of drill point angle when drilling biocomposites", **Composite Structures**, 209 (July 2018): 700–709 (2019).

82. Yuvaraj, G., Fannan, C. B. V., Junaidh, A. P., and Aakash, V., "Investigation the Effect of Point Angle While Drilling Titanium", ***Materials Today: Proceedings***, 16:824–831 (2019).
83. Aydın, E. and Nalbant, M., "The effect of drill point angles on drillability in CFRP/Al-7075 stacking drilling", ***Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University***, 35 (2): 917-931 (2020).
84. Kütükde, K., "Seramik takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin delinebilirlik özelliklerinin belirlenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi***, (2014).
85. Hakami, F., Pramanik, A., and Basak, A. K., "Tool wear and surface quality of metal matrix composites due to machining: A review", ***Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture***, 231 (5): 739–752 (2017).
86. Karabulut, Ş., "Optimization of surface roughness and cutting force during AA7039/Al₂O₃ metal matrix composites milling using neural networks and Taguchi method", ***Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation***, 66:139–149 (2015).
87. Nalbant, M., Gokkaya, H., and Sur, G., "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning", ***Materials And Design***, 28 (4): 1379–1385 (2007).
88. Kabave Kilincarslan, S., "Nano gümüş ve organik borat katkılı kesme sıvılarının frezeleme işlemindeki performansının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Karabük Üniversitesi***, (2019).
89. Kurt, M., Kaynak, Y., Bağcı, E., "Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy" ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 37 (11-12): 1051-1060 (2008).
90. Kilickap, E., "Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology", ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 49 (9-12): 911-923 (2010)
91. Lauderbaugh, L. K., "Analysis of the effects of process parameters on exit burrs in drilling using a combined simulation and experimental approach", ***Journal of Materials Processing Technology***, 209 (4): 1909-1919 (2009)
92. Tosun, G. and Muratoglu, M., "The drilling of an Al/SiCp metal-matrix composites. Part I: Microstructure", ***Composites Science And Technology***, 64 (2): 299–308 (2004).
93. Soorya Prakash, K., Gopal, P. M., and Karthik, S., "Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis in turning of Rock dust reinforced Aluminum MMC", ***Measurement: Journal Of The International Measurement Confederation***, 157:107664 (2020).

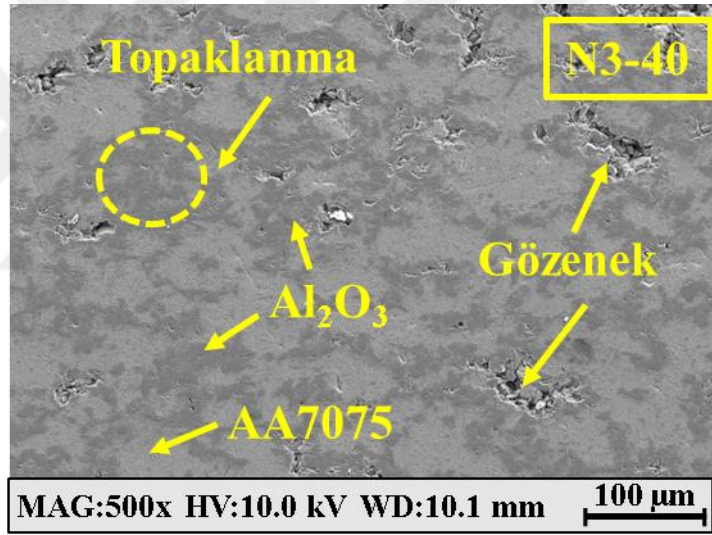
94. Zhang, N. and Shi, Y., "Improvement of cutting force and material removal rate for disc milling TC17 blisk tunnels using GRA–RBF–PSO method", ***Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science***, 233 (16): 5556–5567 (2019).
95. Das, D., Chapagain, A., Nayak, R. K., and Routara, B. C., "Multiple-response optimization for surface quality and productivity during turning Al 7075 / SiC p composite in spray cooling environment", ***Materials Today: Proceedings***, 5 (9): 18052–18060 (2018).
96. Rajmohan, T., Palanikumar, K., and Kathirvel, M., "Optimization of machining parameters in drilling hybrid aluminium metal matrix composites", ***Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China (English Edition)***, 22 (6): 1286–1297 (2012).
97. Sathish, S., Ramkumar, S., and Geetha, M., "Drilling performances and wear characteristics of coated drill bits during drilling reinforced concrete", ***International Journal Of Applied Ceramic Technology***, 16 (1): 357–366 (2019).
98. Wang, Q., Wang, F., Zhang, C., and Chen, C., "Combined effects of various materials on tool wear in drilling of Ti/CFRP stacks", ***Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science***, 234 (14): 2750–2759 (2020).
99. Rasti, A., Sadeghi, M. H., and Farshi, S. S., "An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies", ***Engineering Failure Analysis***, 95 (November 2017): 66–81 (2019).
100. Thirukkumaran, K., Menaka, M., Mukhopadhyay, C. K., and Venkatraman, B., "A Study on Temperature Rise, Tool Wear, and Surface Roughness During Drilling of Al–5%SiC Composite", ***Arabian Journal For Science And Engineering***, 45 (7): 5407–5419 (2020).
101. Gente, a., Hoffmeister, H.-W., and Evans, C. J., "Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds", ***CIRP Annals - Manufacturing Technology***, 50 (1): 49–52 (2001).
102. Senthilkumar, M., Prabukarthi, A., and Krishnaraj, V., "Study on Tool Wear and Chip Formation during Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)/ Titanium Alloy (Ti6Al4V) Stacks", ***Procedia Engineering***, 64:582–592 (2013).

EK AÇIKLAMALAR A.

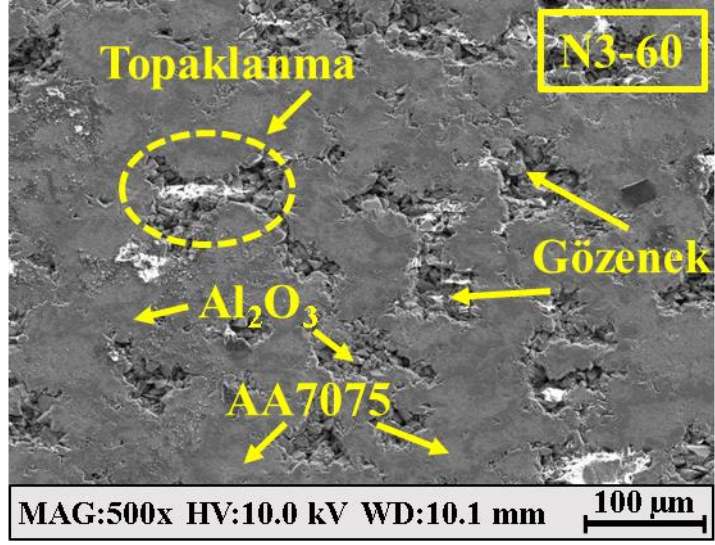
NUMUNELERE AİT MİKROYAPI GÖRÜNTÜLERİ



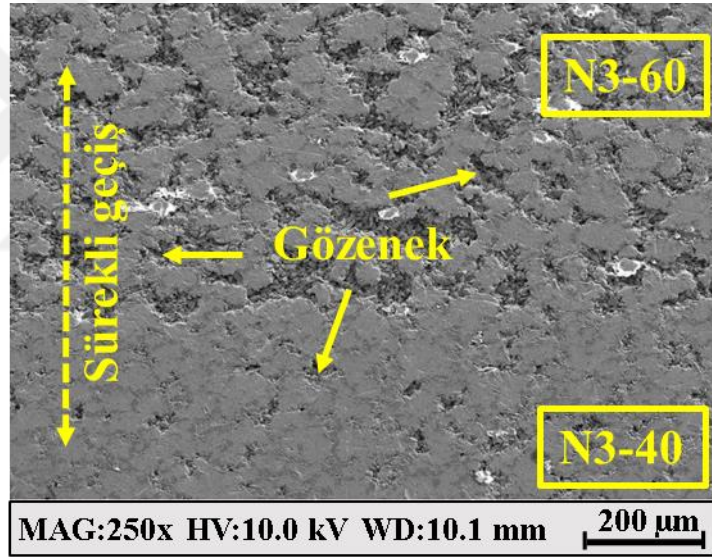
Şekil Ek A.1. Üç tabakalı FDM'nin %20 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



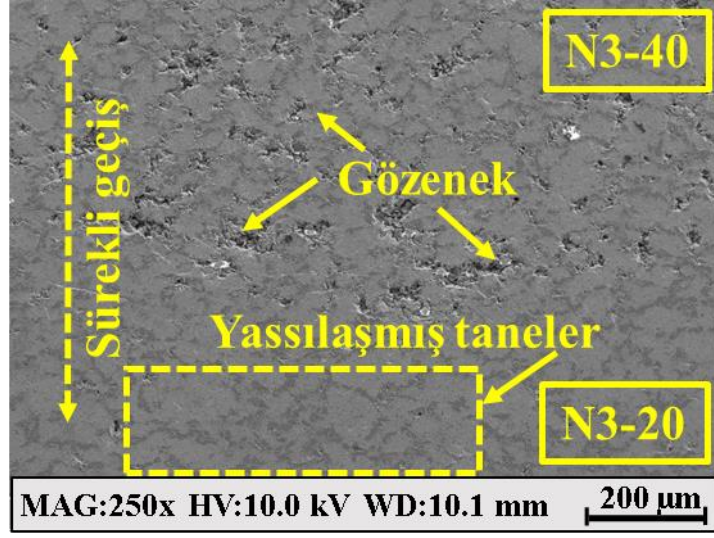
Şekil Ek A.2. Üç tabakalı FDM'nin %40 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



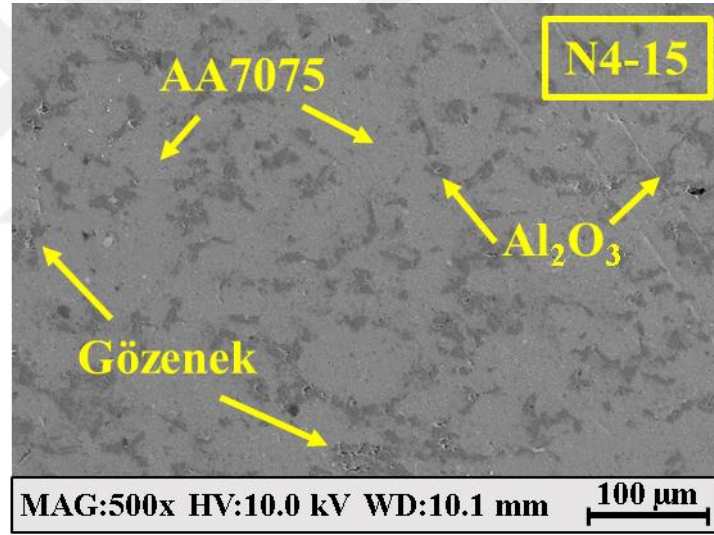
Şekil Ek A.3. Üç tabakalı FDM'nin %60 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



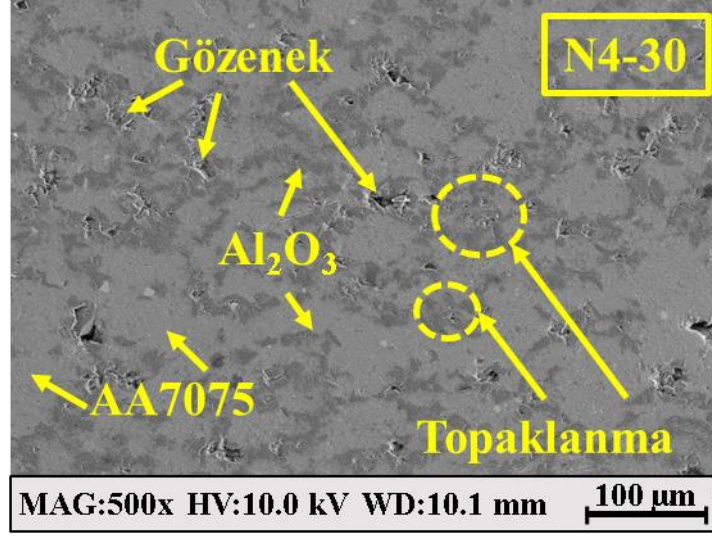
Şekil Ek A.4. Üç tabakalı numunenin %60 Al_2O_3 içeren tabakası ile %40 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



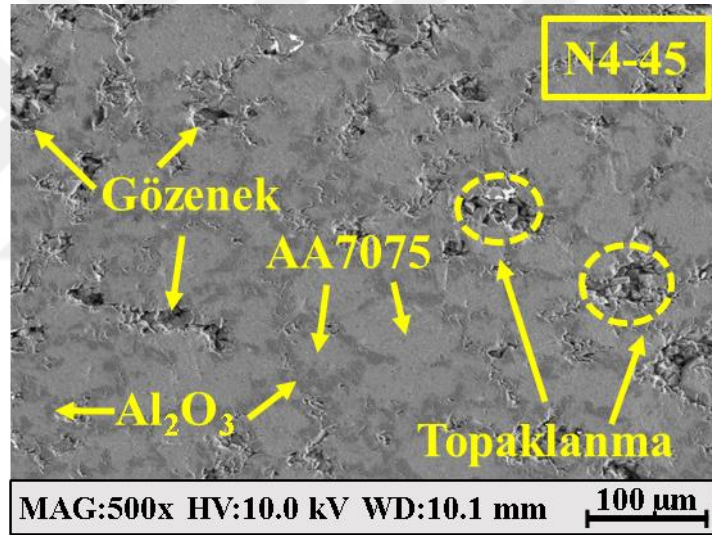
Şekil Ek A.5. Üç tabakalı numunenin %60 Al_2O_3 içeren tabakası ile %40 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



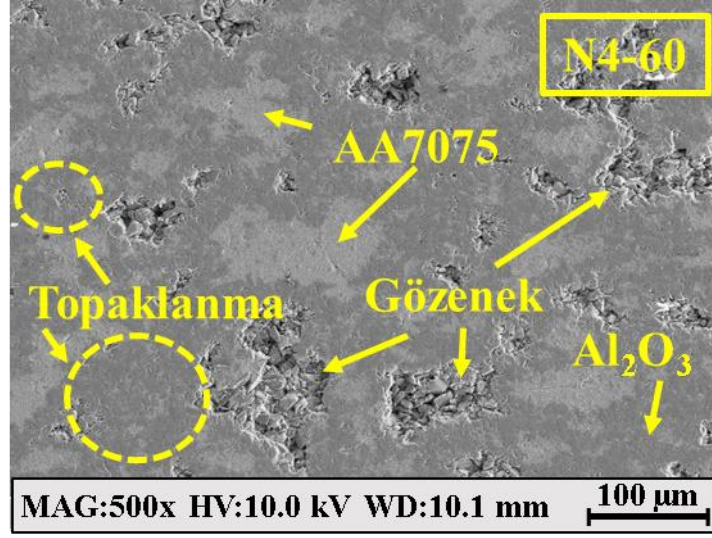
Şekil Ek A.6. Dört tabakalı FDM'nin %15 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



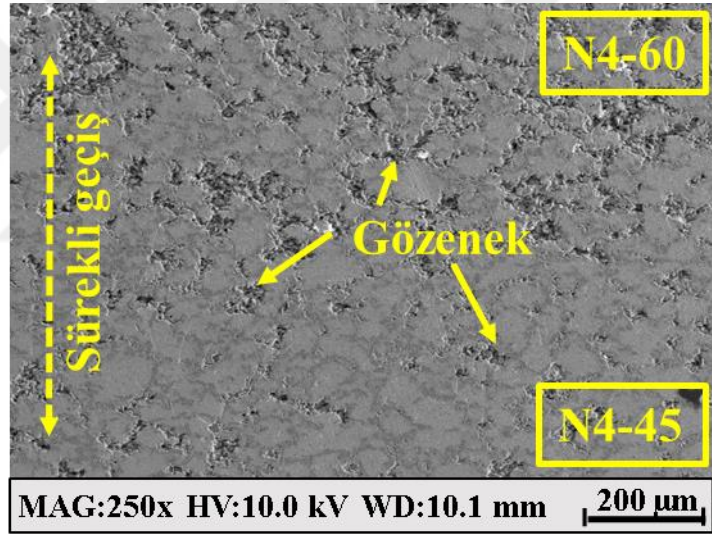
Şekil Ek A.7. Dört tabakalı FDM'nin %30 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



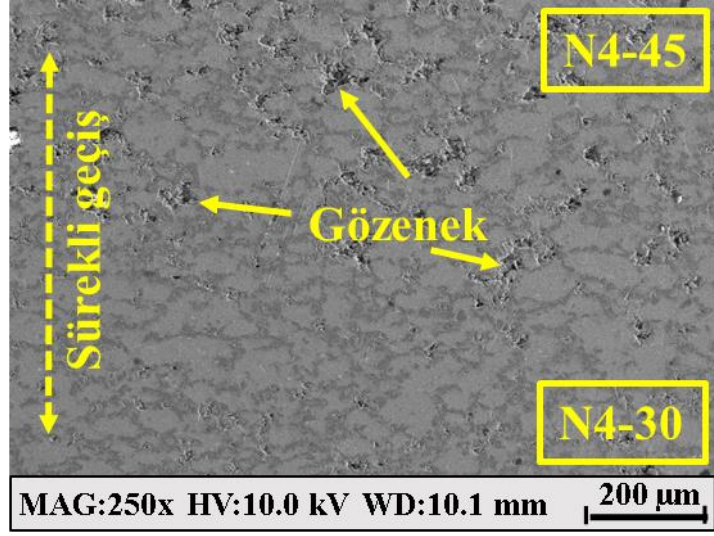
Şekil Ek A.8. Dört tabakalı FDM'nin %45 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



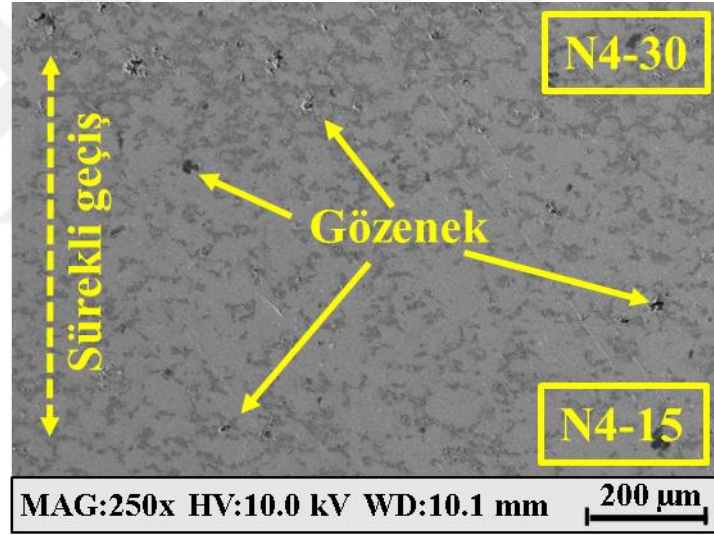
Şekil Ek A.9. Dört tabakalı FDM'nin %60 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



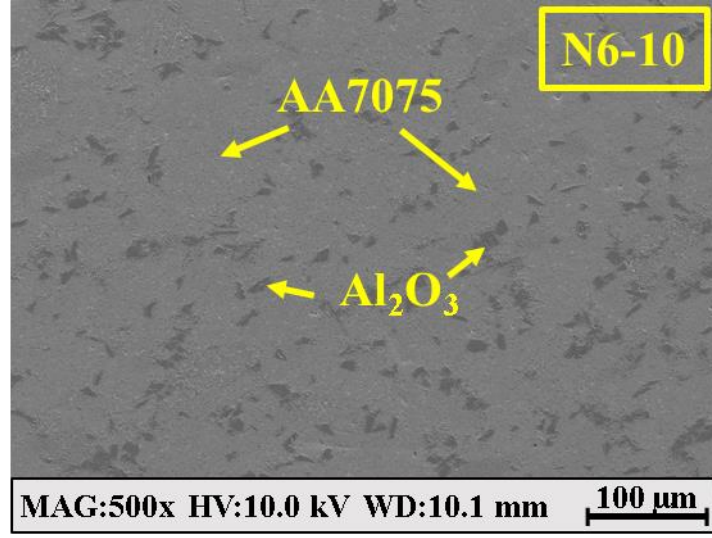
Şekil Ek A.10. Dört tabakalı numunenin %60 Al_2O_3 içeren tabakası ile %45 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



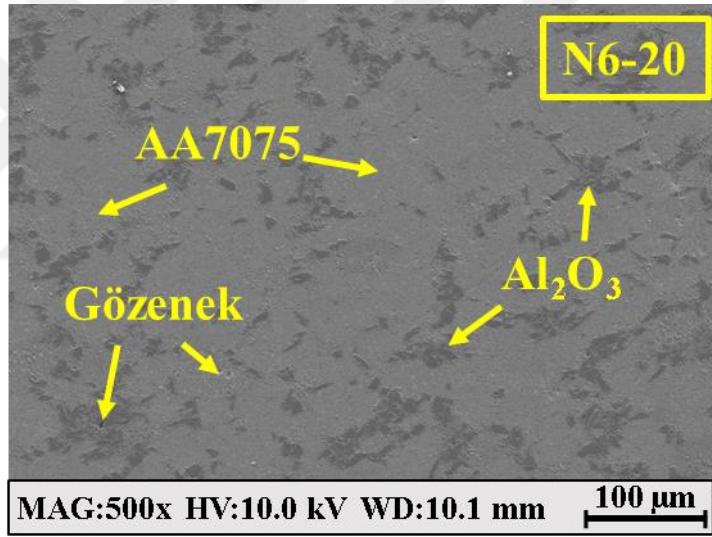
Şekil Ek A.11. Dört tabakalı numunenin %45 Al_2O_3 içeren tabakası ile %30 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



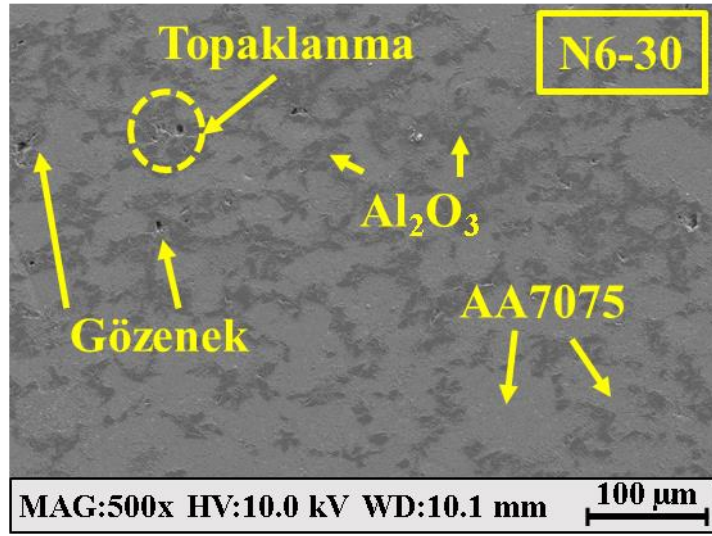
Şekil Ek A.12. Dört tabakalı numunenin %30 Al_2O_3 içeren tabakası ile %15 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



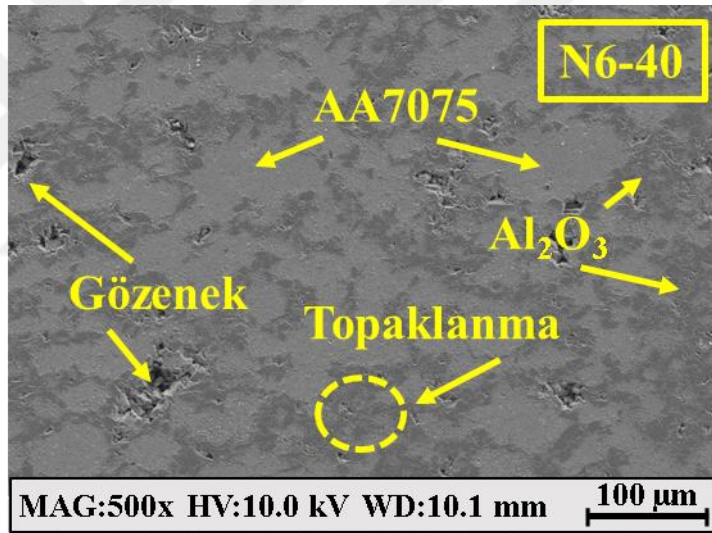
Şekil Ek A.13. Altı tabakalı FDM'nin %10 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



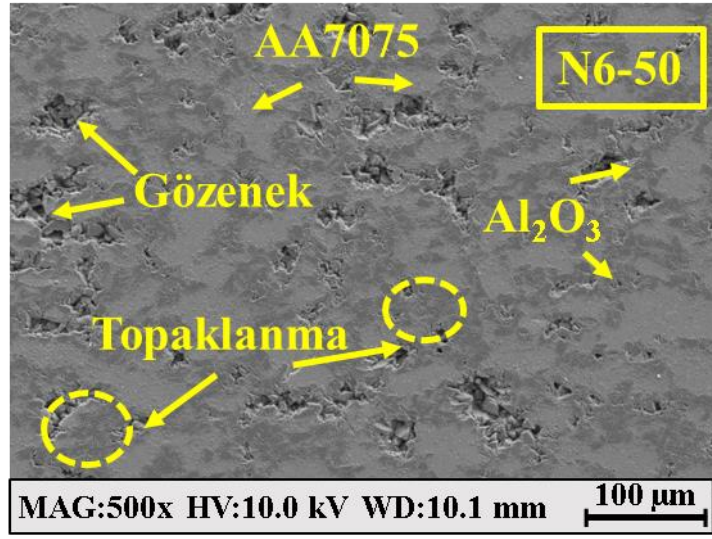
Şekil Ek A.14. Altı tabakalı FDM'nin %20 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



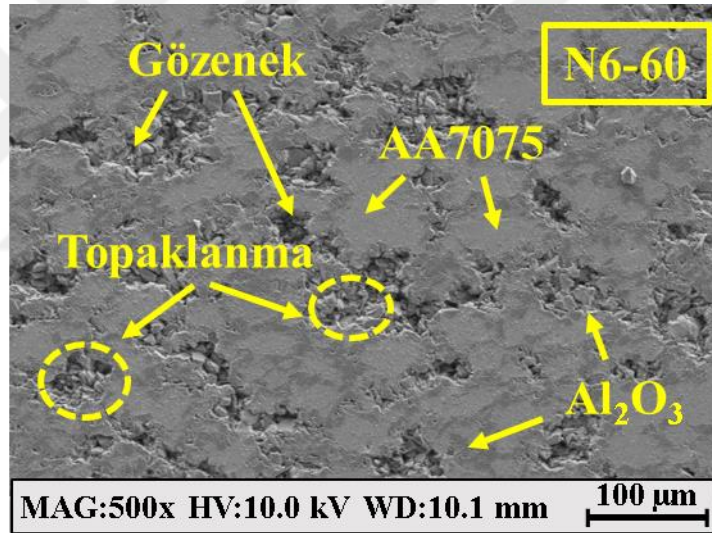
Şekil Ek A.15. Altı tabakalı FDM'nin %30 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



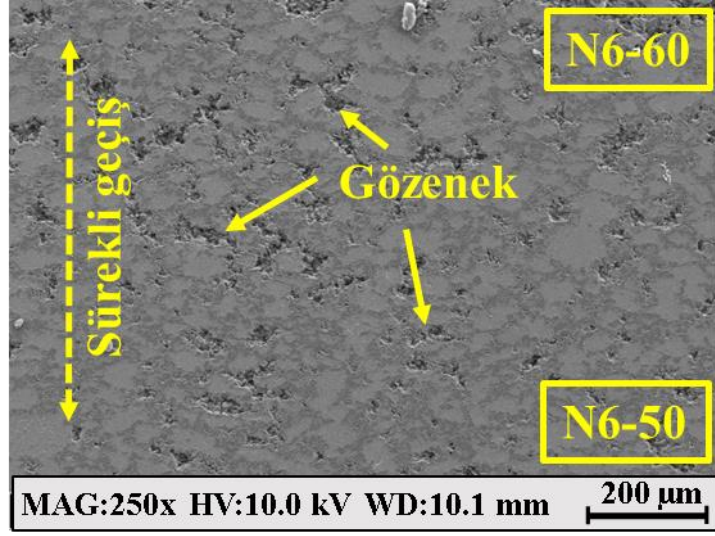
Şekil Ek A.16. Altı tabakalı FDM'nin %40 Al_2O_3 içeren tabakasının SEM görüntüsü.



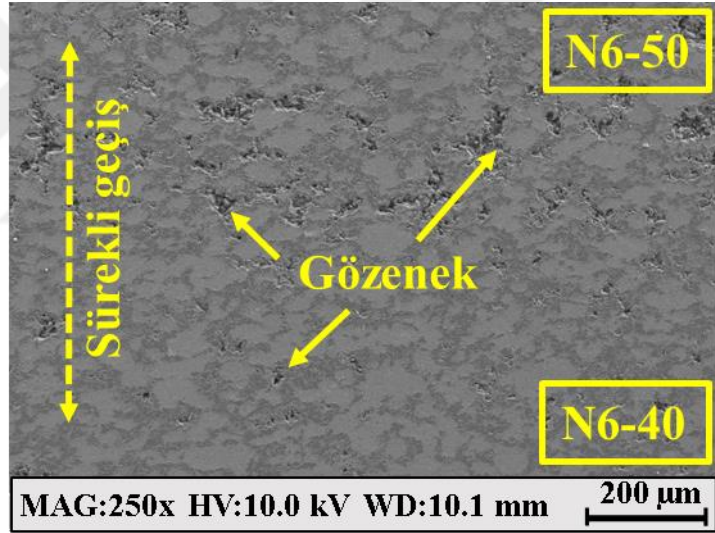
Şekil Ek A.17. Altı tabakalı FDM'nin %50 Al₂O₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.



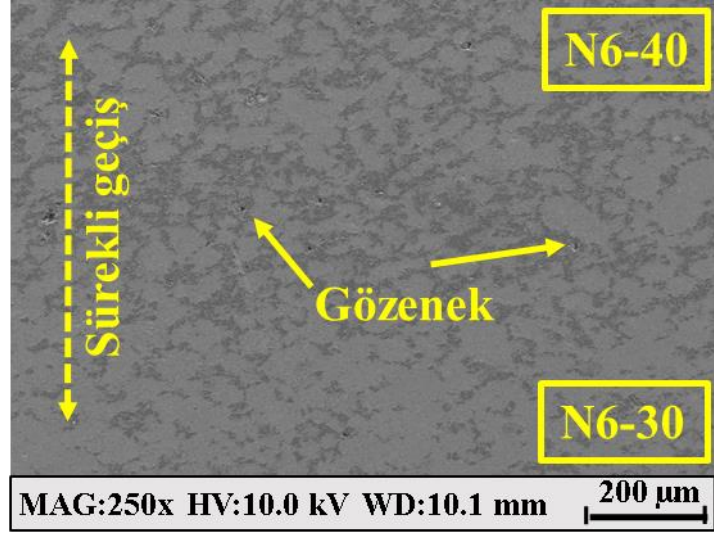
Şekil Ek A.18. Altı tabakalı FDM'nin %60 Al₂O₃ içeren tabakasının SEM görüntüsü.



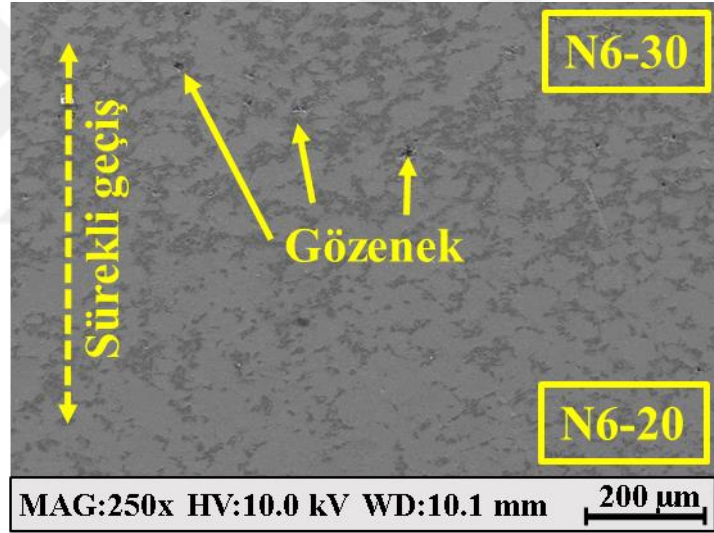
Şekil Ek A.19. Altı tabakalı numunenin %60 Al_2O_3 içeren tabakası ile %50 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



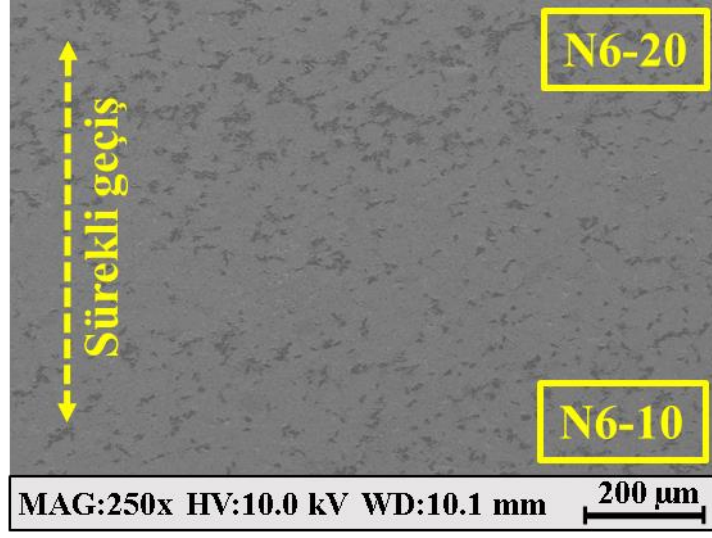
Şekil Ek A.20. Altı tabakalı numunenin %50 Al_2O_3 içeren tabakası ile %40 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



Şekil Ek A.21. Altı tabakalı numunenin %40 Al_2O_3 içeren tabakası ile %30 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



Şekil Ek A.22. Altı tabakalı numunenin %30 Al_2O_3 içeren tabakası ile %20 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.



Şekil Ek A.23. Altı tabakalı numunenin %20 Al_2O_3 içeren tabakası ile %10 Al_2O_3 içeren tabakası arasındaki geçişin SEM görüntüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğçe Yıldız ilk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. Çankaya Anıttepe Lisesi’nden mezun oldu. 2007 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayarak 2012 yılında 3.50 ortalama ile bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2012 yılında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, 2015 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi’nde göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

