

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRAFİT/Al₂O₃ TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
METAL MATRİS KOMPOZİTLERİN FREZELENMESİNDE
TAKIM AŞINMALARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cebrail ÖLMEZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Erkan BAHÇE

ARALIK 2020

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRAFİT/Al₂O₃ TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
METAL MATRİS KOMPOZİTLERİN FREZELENMESİNDE
TAKIM AŞINMALARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cebrail ÖLMEZ

36183618012

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Erkan BAHÇE

Aralık 2020

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca desteğini, bilgilerini ve tecrübelerini benden esirgemediği yönlendiren saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Erkan BAHÇE'ye;

Yüksek lisans tez çalışmamda deneylerin yapılmasına her daim yardımcı olup desteğini esirgemeyen ve bu süreçte kendisini kaybettiğimiz Rahmetli Makine Teknikeri Ümit ATEŞ'e;

Tez çalışması boyunca karakterizasyon analizlerinde bilgilerini ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Süleyman KÖYTEPE'ye;

Tez çalışmamda bilgilerini ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR'a;

FYL-2020-2060 nolu proje ile desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne;

Sosyal ve eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen dostlarıma;

Yaşamım boyunca desteklerini benden esirgemeyen, maddi ve manevi her zaman yanımda bulunan, bu yaşlara gelmemde büyük emekleri ve fedakarlıkları olan, motivasyon kaynağım canım aileme,

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Grafit/Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Metal Matris Kompozitlerin Frezelenmesinde Takım Aşınmalarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Cebrail ÖLMEZ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Tezin Literatürdeki Yeri ve Organizasyon Şeması.....	11
3. GENEL BİLGİLER	14
3.1. Talaş Kaldırma Mekanığı (Ortogonal Kesme)	14
3.2. Kompozit Malzemeler	16
3.3. Metal Matris Kompozit (MMK).....	17
3.3.1. Metal matris kompozitlerde matris malzemeleri.....	18
3.3.2. Metal matris kompozitlerde takviye malzemeleri.....	18
3.4. Metal Matris Kompozitlerin İşlenmesi	20
3.5. Talaşlı İmalatta Isı Oluşumu.....	22
3.6. Takım Aşınması	23
3.6.1. Serbest yüzey aşınması.....	24
3.6.2. Krater aşınması.....	24
3.6.3. Çentik aşınması	25
3.6.4. Burun yarıçap aşınması	25
3.6.5. Ağız birikimi oluşumu (BUE).....	25
3.6.6. Isıl ve mekanik çatlaklar	25
3.7. Soğutma Sıvıları ve Yağlayıcılar	25
3.7.1. Su ile karıştırılabilen kesme sıvıları	26
3.7.2. Yağ bazlı kesme sıvıları	26
3.7.3. Gaz bazlı kesme sıvıları	27
3.8. Çevreye Duyarlı İşleme	27
3.8.1. Kuru işleme	27
3.8.2. Minimum miktar yağlama (MMY)	28

3.8.3. Kriyojenik işleme	28
3.8. Katı Yağlayıcılar	29
4. MATERYAL ve YÖNTEM	30
4.1. Takviye Malzeme ve Özellikleri.....	30
4.1.1. Grafit	30
4.1.2. Seramik: Alüminyum oksit (Al_2O_3).....	31
4.2. Alüminyum Metal Matris Kompozit Üretimi	32
4.3. Alüminyum Metal Matris Kompozitin Karakterizasyonu	35
4.4. Alüminyum Metal Matris Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	35
4.5. Alüminyum Metal Matris Kompozitlerin İşlenmesi.....	37
4.6. İşleme Sırasında Meydana Gelen Sıcaklıkların Ölçümü	38
4.7. İşleme Sonrası Yüzey Kalitesi ve Takım Aşınmalarının Belirlenmesi	39
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	41
5.1. Alüminyum Metal Matris Kompozitin Karakterizasyonu	41
5.2. Alüminyum Metal Matris Kompozitin Mekanik Özellikleri	46
5.2.1. Çekme testi.....	46
5.2.2. Sertlik testi.....	47
5.3. Talaşlı İşleme Sırasında Meydana Gelen Sıcaklıklar	48
5.4. İşlemede Kullanılan Takımlarda Meydana Gelen Aşınmalar.....	54
5.6. İşleme Sonrası AMMK'lerin Yüzey Pürüzlülüğü	60
5.7. Takviye Malzemelerin ve İşleme Parametrelerinin Oluşan Talaş Tiplerine Etkisi ..	65
6. GENEL SONUÇLAR.....	68
KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. MMK üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan metallerin yoğunluk ve mukavemet değerleri.	18
Çizelge 3. 2. Takviyelerin sınıflandırılması.	19
Çizelge 4.1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi	32
Çizelge 4.2. AMMK'lerin frezelenmesinde kullanılan işleme parametreleri.	38
Çizelge 5.1. AMMK'nin dayanım ve uzama değerleri.	47
Çizelge 5.2. İşleme sırasında meydana gelen sıcaklık değerleri.	49
Çizelge 5.3. İşleme orası yüzey pürüzlülük değerleri.	61



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çalışmanın şeması.....	13
Şekil 3.1. Ortogonal kesme modeli.	14
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	17
Şekil 3.3. Talaşlı imalatta ısı oluşumu	22
Şekil 3.4. Takım aşınma tipleri	224
Şekil 4.1. a) Partikül halindeki grafit. b) Bilyeli öğütücü ile Grafitin toz haline getirilmesi. c) Grafitin 40 µm boyutundaki toz hali	30
Şekil 4.2. Grafit tozlarının tartım işlemi.....	31
Şekil 4.3. Al ₂ O ₃ seramik tozlarının tartım işlemi.....	32
Şekil 4.4. Elektrikli eritme ocağı kullanılarak alüminyum alaşımlarının eritilmesi işlemi. 33	
Şekil 4.5. Alüminyum alaşımlarının grafit ve seramik potalarda eritilmesi.	33
Şekil 4.6. Takviye malzemelerin Skori döküm çanaklarında ısıtılması.....	34
Şekil 4.7. AMMK'lerin metal kalıplara döküm işlemi.	34
Şekil 4.8. Döküm yöntemiyle üretilmiş AMMK'ler.....	35
Şekil 4.9. ASTM E8 standartlarında çekme test numunesinin ölçüleri.....	36
Şekil 4.10. Kompozitin sertlik değerinin ölçülmesi.....	36
Şekil 4.11. Talaşlı işlemin gerçekleştirildiği HAAS marka 5 eksenli CNC freze tezgâhı.	37
Şekil 4.12. İşlenmiş Al7075 alaşımı ve AMMK'ler.	37
Şekil 4.13. Frezeleme işlemesi sırasında sıcaklık değerinin termal kamera ile ölçülmesi..	39
Şekil 4.14. SEA metodu ile gerçekleştirilen frezeleme işlemi.....	39
Şekil 4.15. Frezeleme işleminde kullanılan takımlarının görüntülerinin alınması (SEM)....	40
Şekil 4.16. İşlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi.....	40
Şekil 5.1. Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 grafit kompozitine ait XRD sonucu.....	41
Şekil 5.2. Kompozite ait SEM-BS görüntüleri.....	42
Şekil 5.3. a) I. lokasyon b) II. lokasyon c) III. lokasyon d) IV. lokasyona ait EDX sonuçları	43
Şekil 5.4. a) 2500X büyütmede ki element haritası, b) 5000X büyütmede ki element haritası.	43
Şekil 5.5. Kompozite ait DTA analiz eğrisi	44
Şekil 5.6. Kompozite ait DSC analiz eğrisi.....	45
Şekil 5.7. Kompozite ait TGA termogramı.	45
Şekil 5.8. AMMK malzemesine ait sertlik değerleri.....	48
Şekil 5.9. Kesme bölgesinde ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklıklar.....	48
Şekil 5.10. Takviye malzemelerin ve ağırlıkça oranlarının sıcaklığa etkisi.....	51
Şekil 5.11. Devir sayısının sıcaklık değerlerine etkisi (0.2 mm/dev).	52
Şekil 5.12. İlerlemenin sıcaklık değerlerine etkisi (1300 dev/dak).	52
Şekil 5.13. İlerleme değerlerinin değişimine bağlı SEA kuvvet sonuçları. a) 0.1 mm/dev b) 0.2 mm/dev c) 0.3 mm/dev.....	53
Şekil 5.14. %5 Al ₂ O ₃ takviyeli AMMK'lerin işlenmesinde kullanılan takımlarda meydana gelen aşınmalar.	55
Şekil 5.15. %5 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımın aşınması (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev).	56
Şekil 5.16. %10 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımın aşınması (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev).	56
Şekil 5.17. %15 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımın aşınması (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev).	57
Şekil 5.18. İşlemede kullanılan takımların burun bölgelerinde meydana gelen aşınmalar (1700 dev/dak, 0.3 mm/dev).....	58

Şekil 5.19. İşlemede kullanılan takımlarda oluşan serbest yüzey aşınması.	58
Şekil 5.20. Takımlarda meydana gelen BUE ve talaş katmanları	59
Şekil 5.21. Kesici ağızda yapışan talaş parçası, talaş katmanları ve BUE varlığı.	59
Şekil 5.22. Takviye malzemelerin ve ağırlıkça oranlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (900 dev/dak ve 0.1 mm/dev).	63
Şekil 5.23. Devir sayısı değişiminin pürüzlülüğüne etkisi (0.2 mm/dev).	64
Şekil 5.24. İlerleme değerlerinin pürüzlülüğüne etkisi (1300 dev/dak).	65
Şekil 5.25. AMMK'lerin işleme sonrası oluşan talaşlara ait SEM görüntüleri.....	66
Şekil 5.26. İlerleme değerlerinin artmasıyla bükülmelerde meydana gelen artış. (a: 0.1 mm/dev, b: 0.2 mm/dev, c: 0.3 mm/dev).....	66
Şekil 5.27. Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit AMMK'nin işlenmesi sonrası talaşlarda görülen çatlaklar ve kırılmalar.....	67



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

MMK	: Metal Matris Kompozit
AMMK	: Alüminyum Metal Matris Kompozit
Al	: Alüminyum
Gr	: Grafit
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
°C	: Santigrat derece
MMY	: Minimum Miktar Yağlama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-ışını kırınım analizi
DTA	: Diferansiyel Termal analizi
TGA	: Termo Gravemetrik
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
f	: İlerleme
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
µm	: Mikrometre
α	: Talaş açısı
β	: Kama açısı
θ	: Boşluk açısı
r	: Talaş oranı
BUE	: Built Up Edge
mm	: Milimetre
s	: Saniye
dev	: Devir
dak	: Dakika
N	: Newton
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
ISO	: ISO International Organization for Standardization
%	: Yüzde
MPa	: Megapascal
HV	: Vickers sertliği

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRAFİT/Al₂O₃ TAKVİYELİ ALÜMİNYUM METAL MATRİS KOMPOZİTLERİN FREZELENMESİNDE TAKIM AŞINMALARININ İNCELENMESİ

Cebrail ÖLMEZ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

79 + Xsayfa

2020

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Erkan BAHÇE

Alüminyum metal matrisli kompozitler (AMMK) korozyona ve aşınmalara karşı gösterdikleri direnç, özgül ağırlıkları, yüksek sıcaklıklarda çalışılabilmesi, temini ve üretim kolaylıkları nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin işlenmesi sırasında takım ve parça arasında ki aşınmadan dolayı istenmeyen yüksek sıcaklıklar ortaya çıkar. Bu sıcaklığı ortadan kaldırmak için geleneksel kesme sıvıları ihtiyacı karşılamasına rağmen çevreye verdikleri zararlar ile insan sağlığını etkilemektedir. Bu etkeni ortadan kaldırmak için katı yağlayıcı malzemeler endüstride yer edinmeye ve araştırmacıların konusu olmaya başlamıştır.

Katı yağlayıcılar ilave edildiği bölgelerde aşınma ve sürtünmeyi azaltmaya yönelik bir rol üstlenir. Endüstride hareketlere maruz kalan yataklarda, korozyona ve aşınmaya dayanıklı parçaların şekillendirilmesinde aktif olarak kullanılmaktadır. Kullanım şekillerine bakıldığında Minimum Miktar Yağlama (MMY) sistemlerine ilave malzeme olarak, kesme bölgesine saf halde ilave edilerek ve kesici takımların kaplanması ile birlikte kullanımı araştırma konularına dahil edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, kendinden yağlama özelliğine sahip AMMK'lerin üretimini gerçekleştirerek kuru ortamda işlenebilirliğini incelemektir. AMMK'lerin üretilmesinde karıştırma döküm yöntemi kullanıldı. Matris malzemesi olarak Al7075 alaşımı, takviye malzemeleri olarak ise katı yağlayıcı grafit (%5-10-15) ve Al₂O₃ seramik (%5) malzemeleri seçildi. AMMK'lerin karakterizasyonu için XRD, SEM, EDX, DTA/TGA ve DSC analizleri yapıldı. Ayrıca takviye malzemelerin mekanik özelliklere etkisini belirlemek amacıyla çekme ve mikro sertlik testleri gerçekleştirildi. AMMK'lerin işlenebilirliğini inceleyebilmek için kuru ortamda üç farklı devir ve ilerleme parametrelerinde frezeleme işlemi yapıldı. Yapılan frezeleme işlemi sonrası grafit takviyesinin ağırlıkça artan oranlarıyla kesme bölgesi sıcaklıkların düştüğü, takım aşınmalarının azaldığı ve yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşmelerin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katı yağlayıcılar, Grafit, Alüminyum Metal Matris Kompozit (AMMK), Frezeleme

ABSTRACT

Master Thesis

GRAPHITE/Al₂O₃ REINFORCED ALUMINUM
FOR MILLING OF METAL MATRIX COMPOSITES
INSPECTION OF TOOL WEAR

Cebrail ÖLMEZ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

79 + X page

2020

Supervisor: Dr. Lecturer Erkan BAHÇE

Aluminum metal matrix composites (AMMC) are widely used in industry due to their resistance to corrosion and abrasion, specific gravity, ability to work at high temperatures, supply and production facilities. During the processing of composites, undesirable high temperatures occur due to the wear between the tool and the part. In order to eliminate this temperature, although traditional cutting fluids meet the need, they affect human health with the damage they cause to the environment. In order to eliminate this factor, solid lubricant materials have started to gain a place in the industry and become the subject of researchers.

Solid lubricants play a role in reducing wear and friction in the areas where they are added. It is actively used in the industry for forming parts resistant to corrosion and wear in bearings subjected to movements. Considering the usage patterns, its use as an additional material to the Minimum Quantity Lubrication (MQL) systems, adding it to the cutting area in pure form and coating the cutting tools has been included in the research topics.

The aim of this study is to produce AMMCs with self-lubricating properties and examine their processability in dry environment. Mix casting method was used in the production of AMMCs. Al7075 alloy was chosen as the matrix material, and solid lubricant graphite (5-10-15%) and Al₂O₃ ceramic (5%) materials were selected as reinforcement materials. XRD, SEM, EDX, DTA / TGA and DSC analyzes were performed for the characterization of AMMCs. In addition, tensile and micro hardness tests were carried out to determine the effect of reinforcement materials on mechanical properties. In order to examine the machinability of AMMCs, milling operations were performed at three different speed and feed parameters in dry environment. After the milling process, it was determined that the temperatures in the cutting zone decreased, tool wear decreased and surface roughness values improved with the increasing weight of graphite reinforcement.

Keywords: Solid lubricants, Graphite, Aluminum Metal Matrix Composite (AMMC), Milling

1.GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları mekanik özellikleri, hafiflikleri ve temin edilebilme gibi üstünlükleri sayesinde otomotiv, denizcilik, yapı, havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımı günümüzde yaygındır [1,2]. Kullanım alanına göre tornalama, frezeleme, delme gibi talaşlı işlemeye olan ihtiyaçta artmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının işlenmesinde takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklı meydana gelen yüksek sıcaklıklar takım aşınmalarına ve iş parçasının yüzey bütünlüğünün bozulmasına yol açarak işleme maliyetini ve süresini arttırmaktadır. Meydana gelen yüksek sıcaklıkların optimize edilebilmesi için uygun işleme parametrelerinin seçilmesinin yanı sıra geleneksel kesme sıvıları da endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kesme sıvılarının endüstri tarihinde yer alması 16. yüzyıla kadar dayanmaktadır. İnsanlar bu yıllarda taş, demir ve bakır gibi malzemeleri taşlama işleminde suyu işleme verimliliğini arttırmak amacıyla kullanmışlardır [3]. Bu dönemlerde kullanılan kesme sıvıları genel olarak su, zeytinyağı ve tereyağı gibi doğal ürünlerden oluşmaktadır. Sanayi devrimi ve devamında tornalama, frezeleme gibi imalat yöntemlerinin gelişmesi bu doğal ürünlerin işlemede ihtiyacı karşılamamasına ve günümüzde kullanılan geleneksel kesme sıvılarının temellerinin atılmasını sağlamıştır. Geleneksel kesme sıvılarının talaşlı imalatta kullanılması üzerine ilk bilimsel çalışma ise yine bu döneme ait 1868 yılında yapılmıştır [4]. 1800'lü yıllardan günümüze kadar teknolojinin gelişmesiyle birlikte kesme sıvılarının endüstride kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak araştırmacıların da çalışma konusu olmuştur. Bu çalışmalar genel olarak kesme sıvılarının yağlama/soğutma özelliğini arttırmak için sıvı bileşimleri, nozul tasarımı ve yerleştirilmesi gibi parametreler üzerine yapıldı [5,6]. Geleneksel kesme sıvılarının işlenebilirliğe olumlu yönde etki etmesine rağmen maliyetleri, geri dönüşüm zorlukları, çevreye ve işçi sağlığına verdiği zararlar gibi olumsuz özellikleri de bulunmaktadır [7]. En önemli dezavantajlarından biri olan insan sağlığına etkisine bakıldığında kesme sıvılarına maruz kalan işçilerde “dermatit, folliculitis, cilt kanseri ve solunum rahatsızlıkları” gibi hastalıklar görülebilmektedir [4]. Kesme sıvılarının maliyetleri dikkate alındığında ise istatistiksel verilere göre işleme maliyetlerinin %16'sını kesme sıvıları oluşturmaktadır [8,9]. Bunların yanı sıra 1996, 2004 ve 2015 yıllarında yayınlanmış ISO

14000 ve 14001 çevre yönetim sistemi standartlarında ‘‘imalat aşamasında çevreye zarar veren malzemelerin kullanımının kısıtlanması’’ ifadesi talaşlı imalatta kesme sıvılarının kullanımının kısıtlanarak sürdürülebilir, çevreci bir işlemenin hayata geçirilmesi gerektiğini bildirmektedir [10,11]. Bu kapsamda işleme maliyetlerini azaltmak ve sürdürülebilir imalatı sağlayabilmek için endüstride ve literatürde yeni soğutma/yağlama yöntemleri ve malzemeleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [12]. Günümüzde soğutma ve yağlama yöntemlerinin başında Minimum Miktar Yağlama (MMY) sistemleri, kriyojenik işleme, kuru işleme ve katı yağlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilen işleme yöntemleri gelmektedir.

Kriyojenik işleme ile kesme bölgesi düşük sıcaklıklara soğutulmuş talaş kaldırma işlemi yapılmaktadır. Kriyojenik işleme yönteminde sıvı azot (-195,8 °C), sıvı helyum (-269 °C), karbondioksit (-78,5 °C) ve hidrojen (-252,9 °C) gibi kriyojen gazlar bir sistem vasıtasıyla iş parçasına ya da kesici takıma nüfuz ettirilir [13]. Bu sayede yüksek sıcaklıkların oluşumu engellenmekte, sıcaklık kaynaklı takım aşınmaları ve yüzey bütünlüğünde iyileşmeler sağlanmaktadır. Ancak bu işlemin yüksek maliyetlere sebep olması, işlemede kullanılan kriyojen gazların tek kullanımlı ve çok düşük sıcaklıklarda iş parçası faz yapılarını etkilemesi bu işlemin kısıtlı kullanım alanlarına sahip olmasına neden olmaktadır [14]. Bu nedenle genel olarak araştırmacılar işlenmesi zor malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır [15]. Diğer bir kısıtlama ise kesici takım seçiminde yaşanacaktır. Çünkü kesici takımların çok düşük sıcaklıklara maruz kalmasıyla takımlarda kırılmaların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu kırılmalar ise işleme maliyetlerinde ve işlenmiş yüzeyin kalitesinde negatif sonuçlarla karşılaşılmasına neden olur.

Geleneksel olmayan yağlama yöntemlerinden biri olan MMY sistemlerinde ise yağlama malzemeleri basınçlandırılmış hava (5-8 bar) ile birlikte kesme bölgesine püskürtülerek sürtünmeleri azaltıp yüksek sıcaklıkların oluşmasını engellemektedir. Düşük sıcaklıklarda işleme için elverişli bir yöntem olmasına rağmen, yağlama sisteminin kurulması, işlenmesi zor malzemeler için uygun olmaması, derin delik delme ve taşlama gibi işlemlerde kullanımının verimli olmaması bu sistemlerin dezavantajlarından [16]. Bunun yanı sıra düşük miktarda da olsa geleneksel kesme sıvılarının kullanımı çevreye zarar vermektedir [17]. Diğer bir yöntem olan kuru işleme de kesme bölgesinde kesme sıvıları kullanılmadan sadece hava ile soğutma amaçlanmaktadır. Sürdürülebilir imalatı karşılayan en etkili yöntemdir. Ancak yüksek işleme parametrelerinde yüksek kesme kuvvetlerin ve yüksek sıcaklıkların oluşumu kuru kesme yönteminin kullanılmasını kısıtlamaktadır. Bu

kısıtlamayı ortadan kaldırıp kuru kesme işlemini destekleyici en önemli etki ise katı yağlayıcı malzemeler tarafından karşılanabilir.

Yağlama uygulamalarının zor olduğu yataklarda, fren disklerinde, uzay ve havacılık sanayisinde gün geçtikçe kullanımı artan katı yağlayıcılar talaşlı imalatta ise saf halde püskürtme yöntemiyle veya sıvı yağlar içine karıştırılarak MMY sistemlerinde kullanılmaktadır. Katı yağlayıcı malzemelerin lamelli ya da katmanlı yapıları malzemenin kendinden yağlama özelliğinin olmasını sağlar [18]. Katı yağlayıcılar temas halindeki yüzeyler arasında ince bir film oluşturup temas bölgesinin yağlanmasını kolaylaştırır. Katı yağlayıcıların üstün yağlama performansına sahip olmasına rağmen talaşlı imalatta harici yollarla kullanımı ek bir maliyet anlamına gelmektedir. Katı yağlayıcıların araştırma konularından bir diğeri ise kendinden yağlamalı Metal Matris Kompozit (MMK) üzerinedir. Araştırmacılar katı yağlayıcı malzemeleri, MMK'lere takviye ederek üretmiş oldukları kendinden yağlama özelliğine sahip iş parçalarının çalışma koşullarında tribolojik özelliklerini arttırmayı amaçlamışlardır [19-21].

Bu çalışma kapsamında ise kuru işlemenin verimliliğini arttırmak amacıyla, talaşlı imalatta MMY ya da ek sistemlerle kullanılan katı yağlayıcıları alüminyum alaşımına takviye ederek kendinden yağlama özelliğine sahip Alüminyum Metal Matris Kompozit (AMMK) üretimi gerçekleştirildi. Üretilen kendinden yağlamalı AMMK malzemelerinin işlenmesinde harici bir sisteme gerek duymadan, maliyeti düşük, çevre dostu ve sürdürülebilirliği sağlayan yağlama yöntemi geliştirilmeye çalışıldı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Talaşlı imalatta meydana gelen yüksek sıcaklıkların takım ömrü ve yüzey bütünlüğünün bozulması üzerine olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için geleneksel kesme sıvıları endüstride uzun yıllardır önemli bir yer tutmaktadır. 16. yüzyılda kullanıma başlayan geleneksel kesme sıvıları su ve zeytinyağı gibi doğal malzemeler ile sınırlıydı. 1900'lü yılların başında Taylor talaşlı işlemede kesme hızını arttırabilmek amacıyla çalışmasında yüksek miktarda su kullanarak kesme hızını %40 oranında arttırmayı başarmıştır [22]. Ancak endüstrinin gelişmesine bağlı olarak doğal ürünlerin kullanımı kısıtlandı ve günümüzde kullanılan geleneksel kesme sıvılarının temelleri atıldı. Genel olarak geleneksel kesme sıvılarıyla ilgili yapılan çalışmalara bakılırsa, Vieira vd. [23] çeliklerin yüzey frezelemesi sırasında kesme sıvılarının performansını deneysel bir çalışmada araştırmışlardır. Frezeleme işleminde mineral yağ, yarı sentetik ve sentetik kesme sıvılarını kullanmışlardır. Yüksek işleme hızlarında sıcaklıkların maksimum seviyelerde olduğunu, kesme sıvıları kullanıldığında kuru işlemede meydana gelen sıcaklıkları ise yaklaşık olarak %50 oranlarında azalttığını tespit etmişlerdir. İşleme esnasında sentetik ve yarı sentetik kesme sıvılarının tüketilen gücü iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Geleneksel kesme sıvılarının kullanılmasına rağmen yüzey kalitesinde en iyi sonuçları kuru işlemede aldıklarını belirtmişlerdir. Yüzey kalitesinde meydana gelen bu durumu işleme süresine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Avila v. Abrao'nun [24] sertleştirilmiş çeliğin işlenmesinde emülsiyon ve sentetik sıvıların tormalama performansına etkisini inceledikleri çalışmaya baktığımızda mineral yağ içermeyen emülsiyon bazlı kesme sıvısının üstün performansa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Kesme sıvılarının takım ömrü üzerindeki etkilerini kıyasladıklarında en uzun takım ömrünü mineral yağ içermeyen emülsiyon bazlı kesme sıvısında, en düşük takım ömrünü ise mineral yağ içeren emülsiyon kesme sıvısının kullanıldığı işlemlerde meydana geldiğini tespit ettiler. Oishi vd. [25] seramik kesici takımların talaşlı işlemede kırılmaları üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kesici takım kırılmalarına etki eden en önemli parametrelerin işleme esnasında meydana gelen sıcaklıklar olduğunu, kesme sıvılarının kullanılarak kırılmaların düşük seviyelere indirgeneceğini ifade etmişlerdir. Mendes vd. [26] alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme sıvılarının ve akış hızlarının (20 mL/sa ve 100 mL/sa) işleme performansına etkilerini tormalama ve delik delme işlemleri kapsamında incelemişlerdir. Al 1050 alaşımının delinmesinde yağ sisi, Al 6262 alaşımının tormalanmasında ise klor, kükürt, fosfor katkılı ve yarı sentetik kesme sıvılarını tercih

etmişlerdir. 100 mL/sa akış hızlarla kesme bölgesine iletilen kesme sıvılarının tornalama da düşük kuvvetlerinin oluştuğunu ölçmüşlerdir. Yüksek akış hızının, yüksek işleme parametrelerinde kullanılması gerekliliğini ifade etmişlerdir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ise işleme parametrelerinden etkilendiğini, kesme sıvısı akış hızının pürüzlülüğe etkisinin göz ardı edilebilecek seviyede olduğunu belirttiler. Khandekar vd. [27] geleneksel kesme sıvılarının performanslarını geliştirmeyi amaçladılar ve nano kesme sıvıları hazırladılar. Nano kesme sıvılarının hazırlanmasındaki amaçları kesme sıvılarının ıslanabilirlik özelliklerini artırarak işleme performanslarını iyileştirmektir. Bu nedenle geleneksel kesme sıvısına hacimce %1 oranında alümina karıştırılarak nano kesme sıvısını hazırlamışlardır. Kuru ve geleneksel kesme sıvılı ortamlardaki talaş kaldırma işlemleri ile karşılaştırdıklarında takımlarda meydana gelen krater ve serbest yüzey aşınmalarında düşüşlerin yaşandığını saptamışlardır. Bu azalmaları alüminanın kesme sıvısına kazandırdığı ıslanabilirlik etkisiyle açıklamışlardır. Nano kesme sıvısının kullanıldığı işlemede meydana gelen kuvvetlerin kuru ve geleneksel kesme sıvılı işlemede meydana gelen kuvvetlerle kıyasladıklarında %50 ve %30 oranlarında azalmalar olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüklerin de ise %54,5 ve %28,5 oranlarında iyileşmelerin olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalara da bakıldığında geleneksel kesme sıvıları işleme prosesinde ihtiyacı karşıladı ancak maliyetleri, çevre ve insan sağlığına verdiği zararlar nedeniyle kullanımının azaltılması ve sürdürülebilir imalatın sağlanması gerekliliği de ortaya çıktı. Bu nedenle yeni soğutma/yağlama sistemleri ve malzemeleri üzerine yapılan yeni çalışmalar mevcuttur. Bu yeni çalışmalar MMY ortamında işleme, kriyojenik işleme ve katı yağlayıcı malzemelerdir. Bu sistemler ve malzemeler üzerine literatürde karşımıza farklı metotlar çıkmaktadır. Özellikle katı yağlayıcıların yağlama sistemlerinin verimliliğini arttırmaya yönelik ve kendinden yağlamalı malzemeler oluşturularak aşınma özellikleri araştırılmıştır.

Sürdürülebilir imalatı sağlayabilmek için yeni yöntemlerden olan MMY sistemlerinin genel olarak literatürde ki çalışmalara bakıldığında, Dawim vd. [28] pirinç iş parçalarını (CuZn39Pb3) geleneksel kesme sıvılı (emülsiyon yağlı) ve MMY ortamlarında tornalama işlemine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda MMY ve geleneksel yağlama koşulları altında kesme gücünde fazla bir değişikliğin olmadığını ve talaş tiplerinin benzerlik gösterdiğini belirtmişlerdir. MMY ve geleneksel yağlama arasında yüzey pürüzlülüklerinde farklılıklarının olmadığını da tespit etmişlerdir. Daha çevreci ve tasarruflu bir yağlama yöntemi olan MMY sistemlerinin geleneksel yağlama sistemleri yerine kullanılabileceğini ve sürdürülebilir imalat çerçevesinde MMY sistemlerinin tercih edilmesi

gerektiğini vurgulamışlardır. Kaynak vd. [29] Ti-553 alaşımının geleneksel kesme sıvılı, MMY ve yüksek basınçlı soğutma sıvılı ortamlarda işlenmesine ve yüzey bütünlüğüne etkisini araştırmışlardır. Tornalama işleminde de yüksek basınçlı soğutma sıvısının beslenme basıncı 50 bar iken, geleneksel soğutma sıvısı 400L/h akış hızıyla kesme bölgesine iletmişlerdir. MMY sisteminde ise CC22 kesme yağı 21 ml/s akış hızında ve 5 bar basınçla kesme bölgesine ilave ettirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda yüksek basınçlı işleme sıvısının işleme performansı bakımından iyi sonuçlar verdiğini, MMY ve geleneksel sıvı kullanımının bu alaşımın işlenmesinde avantaj sağlamadıklarını belirtmişlerdir. Mane vd. [30] Ti6Al4V alaşımının tornalanmasının MMY ve kuru ortamlarının takım aşınmalarına ve yüzey bütünlüğüne etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda düşük kesme hızlarında MMY ortamında takım aşınmalarının %20 oranlarında azalmaların meydana geldiğini belirtmişlerdir. İş parçası sıcaklıklarında MMY ortamlarında %12-15 aralığında düşüşlerin olduğunu ve düşük kesme hızlarında ince yağ sisinin, yüksek kesme hızlarında ise kalın yağ sisinin sıcaklığın azalmasında etkili rol oynadığını ifade etmişlerdir. Özellikle MMY sistemleri içerisinde katı yağlayıcıların işlemeye etkisini araştıran Pasam vd. [31] yaptığı çalışmada, AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında farklı kesme hızlarında molibden disülfid (MoS_2) ve borik asit (H_3BO_3) malzemelerini MMY sistemlerinde kullanarak işleme performansına etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmanın sonuçlara göre yağlama sistemli işleminin kuru işlemeye oranla performansı iyileştirdiğini saptamışlardır. Nano sıvıların mikro sıvılara oranla yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerini, sıcaklığını, takım aşınmalarını ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Yağlama malzemelerini karşılaştırdıklarında MoS_2 'nin borik aside oranla daha iyi bir performans sağladığını belirtmişlerdir. Nano sıvıların kullanımının maliyeti arttırdığı, maliyet bakımından karşılaştırma yapıldığı takdirde nano sıvıların mikro sıvılara oranla daha kullanışlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Kriyojenik işleme çalışmalarına bakıldığında genel olarak mekanik özelliklere etkisi, MMY ve geleneksel kesme sıvılı işlemlerin karşılaştırılması üzerinedir. Duman ve Kaynak [32] 15-5 PH çeliğinin kuru, kesme sıvılı ve kriyojenik soğutma ortamlarının tornalama işlemi sonrası iş parçası yüzey bütünlüğüne etkisini incelemişlerdir. İşleme sonrası mikro sertlikler incelendiğinde kriyojenik soğutma kullanılarak yapılan işleme de 10 μm derinliklere kadar artışların olduğu, kuru ve kesme sıvılı işlemlerde sıcaklığın artışına bağlı olarak mikrosertliklerde azalmaların meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü dikkate alındığında kriyojenik işleme sonrası takım burun bölgesinde kırılmalar nedeniyle

pürüzlülükte artışların olduğunu ve bu artışların azaltılması için takım burun yarıçapının daha büyük bir takımın seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Uçak ve Çiçek [33] Inconel 718 süperalaşımının delinme işleminde kriyojenik soğutmanın işleme performansına etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma kuru, kriyojenik ve kesme sıvısının kullanıldığı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik ortamda yapılan deneylerde yüksek sıcaklıkların engellendiği, mikro sertlikte düşüşlerin yaşandığını ve yüzey altı bütünlüğünün ise korunduğunu ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra kriyojenik işleme beraber tork değerleri ve kuvvetlerde ki artış delik çıkışında ki çapakların artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Kesme sıvısının diğer ortamlarla karşılaştırdıklarında ise yüzey kalitesinde, çapak oluşumunda ve takım aşınmasında iyileşmelerin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Kriyojenik işleme yüzey kalitesinin istenilen seviyede olabileceğini ancak düşük sıcaklıkların işleme performansını olumsuz yönde etkileyeceğini ifade etmişlerdir. Dhananchezian [34] Nikel bazlı Hastelloy C-276 alaşımının tornalanmasında kriyojenik soğutmanın etkisini araştırmıştır. Kriyojenik soğutma yönteminin kullanılmasıyla kesme sıcaklıklarında %61-68 oranında bir azalmaların meydana geldiğini belirtmiştir. İşlenmiş parçanın yüzey pürüzlülüğünü dikkate aldığı kriyojenik yöntemin kuru kesmeye oranla %8-33 oranlarında azalmaların meydana geldiğini ifade etmektedir. Genel sonuç itibariyle çevre dostu olan kriyojenik soğutma yönteminin kuru kesme şartlarına oranla daha iyi bir işleme performansı gösterdiğini bildirmektedir. Bagherzadeh v. Budak [35] Ti6Al4V ve Inconel 718 alaşımlarının tornalanmasında kriyojenik soğutmanın işlenebilirlik üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada kriyojenik-CO₂, Minimum Miktar Yağlama-CO₂ kombinasyonlu ve sadece CO₂ 'in olduğu sistemler kullanılmıştır. Tornalama işlemi sonrasında CMMY sisteminin diğer sistemlere kıyasla takım aşınmalarında ve yüzey pürüzlülüğünde daha olumlu sonuçlar aldıklarını ifade etmişlerdir. Özellikle işlenmesi zor malzemelerin işlenmesi sırasında kriyojenik soğutma sistemlerinin başarılı şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. CMMY sistemi, CO₂ + MMY sistemine kıyasla takım aşınmalarında Ti6Al4V için %60, Inconel 718 alaşımında ise %30 oranında azalmaların olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışmalar göz önüne alındığında işleme de kullanılan iş parçalarının işlenmesi zor malzemeler olduğu görülmektedir. Bunun nedeni çok düşük sıcaklıklara iş parçalarının soğutulmasıdır.

Çevreye duyarlı işleme konusunun en önemli malzemelerinden olan katı yağlayıcılar üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, MMY sistemlerde yağlayıcı malzemeler ile karıştırılarak, saf halde ek bir sistemle kullanılarak ya da kesici takıma yerleştirilerek

işlemedeki verimliliğe etkisi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Katı yağlayıcıların farklı yağlama sistemleri ile birlikte kullanılabilme ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, Sterle vd. [36] Kuru, geleneksel kesme sıvılı, MMY ve kriyojenik ortamlarında ve katı yağlayıcı malzeme olan MoS₂ ile birlikte tornalamada ki aşınma etkisini araştırmışlardır. Deneysel araştırma sonunda kuru ortamda takım aşınmalarının yüksek olduğu MMY, kriyojenik ve katı yağlayıcı ortamlarında aşınmaların azaldığını ölçmüşlerdir. En iyi aşınma değerlerinin MoS₂ içeriğiyle sağlandığı ve her kesme hızında mükemmel yağlama gösterdiğini belirtmişlerdir. Gnanavelbabu vd. [37] Karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061 esaslı B₄C+ h-BN takviyeli MMK üretimi gerçekleştirilmiş ve su jeti işleme yapılmıştır. B₄C varlığı kompozitin dayanıklılığını arttırmıştır ve işlemeyi kolaylaştırmak için h-BN katı yağlayıcı malzemesi kullanılmıştır. h-BN'nin varlığı kesme esnasında yüzey bütünlüğünün bozulmamasına ve işleme kalitesinin yüksek seviyelerde olduğunu belirtmişlerdir. Sartori vd. [38] işlenmesi zor bir malzeme olan Ti6Al4V alaşımının farklı katı yağlama ve soğutma stratejilerinde işlenebilirlik üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. MMY ve MMS sistemleri PTFE ve grafit katkılı sulu çözeltiler halinde tornalama işleminde yağlama-soğutma etkisini incelemişlerdir. Yapılan tornalama sonucunda takım aşınmalarında burun ve krater aşınmalarının meydana geldiğini, bu aşınmaların en düşük seviyelerde görüldüğü yağlama sisteminin grafit katkılı MMS sistemlerde elde edildiği belirtilmiştir. Yüzey kalitesinde ise en ideal sonuçları grafit katkılı MMS sistemlerinden alındığını kuru, MMY ve geleneksel kesme sıvılı işlemlere kıyasla %44, %36 ve %29 oranlarında iyileşmelerin olduğunu ölçmüşlerdir. Makhesana ve Patel [39] CaF₂ katı yağlayıcı malzeme takviyeli MMY sistemlerinin, EN 31 çeliğinin tornalama işlemine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler kuru, kesme sıvılı ve MMY ortamlarında gerçekleşmiştir. MMY sistemlerine ağırlıkça %5-10-15-20-30-40 katı yağlayıcı malzeme karıştırılmıştır. Ağırlıkça %15 oranlarında ki MMY da takım aşınmalarında, yüzey pürüzlülüğünde ve takım-iş parçası arasındaki sıcaklıklarda azalmaların olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek katı yağlayıcı oranlarında sıvı karışımlarında termal iletkenliğin azalmalarından dolayı yüksek ısılarda meydana geldiğini ve takım aşınmalarında artışların olduğunu ifade edilmiştir. Krishna v. Rao [40] yaptıkları çalışmada EN8 çeliğinin tornalanmasında SAE40 yağlarına ağırlıkça %5-10-20-30-40 oranlarında grafit ve borik asit katılarak, katı yağlayıcılı karışımın işlemeye etkisi incelenmiştir. Bu etkinin farklı ortamlarla kıyasının yapılabilmesi için Tornalama işlemi kuru, sıvı ve katı yağlamalı gibi ortamlarda gerçekleştirilmiştir. %20 borik asit karışımı işleme performansı olarak diğer karışımlara oranla daha verimli sonucu verdiğini ifade etmişlerdir. Katı yağlayıcılı karışımlar kesme kenarında borik asit film yapısının

oluşması, takımın aşınmasını azalttığını ve tornalama sırasında işlemin daha temiz bir şekilde yapıldığını bildirmişlerdir. Reddy v. Rao [41] katı yağlayıcıların AISI 1040 çeliğinin frezelenmesinde yüzey kalitesine etkisini incelemişlerdir. Katı yağlayıcı olarak grafit ve MoS₂ malzemelerini tercih ederek tasarladıkları ek bir sistem ile kesme bölgesine işleme süresince sabit hızlarla nüfuz ettirmişlerdir. Yaptıkları frezeleme işlemi sonrasında, geleneksel kesme sıvısının kullanıldığı işleme oranla katı yağlayıcılı sistemin kullanıldığı işlemede kesme kuvvetlerinde, özgül enerjilerde, yüzey kalitelerinde ve talaş boyutlarında düşüşlerin meydana geldiği tespit etmişlerdir. İşlemede tüketilen spesifik enerjileri karşılaştırdıklarında, bütün işleme parametrelerinde grafitin varlığı %20, MoS₂'nin varlığı ise %28 oranlarında enerjiyi düşürmüştür. Rao v. Krishna'nın [42] katı yağlayıcı partikül boyutlarının tornalamada işlenebilirlik üzerine etkisini belirlemek amacıyla ek bir sistem vasıtasıyla farklı boyutlarda katı yağlayıcılarını çalışmalarında kullanmışlardır. 50, 100, 150 ve 200 µm partikül boyutlarına sahip grafit ve borik asit katı yağlayıcı malzemeleri, tasarlamış oldukları ek bir sistemde basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine yönlendirerek katı yağlayıcı ortamda EN8 çeliğinin tornalama işlemini gerçekleştirmişlerdir. Genel olarak yaptıkları çalışma sonucunda, katı yağlayıcılı ortamda yapılan işlemin kesme sıvılı ve kuru ortamda yapılan işleme göre yüzey kalitesinde ve takım aşınmalarında iyileşmeler olduğunu ifade etmişlerdir. Katı yağlayıcıların partikül boyutlarını karşılaştırdıklarında 50 µm partikül boyutlu katı yağlayıcıların işleme performansında olumlu sonuçlar vermede etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu, düşük partikül boyutlarının iş parçası yüzeyine daha kolay yapışması ile açıklamışlardır. Jianxin vd. [43] kuru kesim şartlarında kullanmak amacıyla kendinden yağlama özelliğine sahip kesici takım tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Kesici takımlara 200-250 µm çapında ve 250 µm derinliğinde delikler açarak bu deliklere MoS₂ katı yağlayıcı malzemesini yerleştirmişlerdir. Sertleştirilmiş çeliklerin kendinden yağlama özelliğine sahip takımlarla işlenmesinde diğer geleneksel takımlara kıyasla %20-30 oranlarında kesme kuvveti bileşenlerinde azalmaların meydana geldiğini dinamometre yardımıyla ölçmüşlerdir. MoS₂ destekli takımların yan yüzey aşınmalarında iyileşmelerin olduğunu belirtmişlerdir. Wenlong vd. [44] kendinden yağlamalı bir karbür kesici takım geliştirerek katı yağlayıcıların kuru işleme performansına etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmada sinterlenmiş karbür takımlarının tırmık ve yan yüzey bölgelerine 4 mikro delik açarak, deliklere katı yağlayıcı MoS₂ tozlarını yerleştirmişlerdir. Yüksek hızlarda katı yağlayıcılı kesici takımların kullanılmasının kesme kuvvetleri üzerinde büyük bir değişimin olmadığını tespit etmişler, bu durumu MoS₂'nin sıcaklığa duyarlılığı ile açıklamışlardır. Düşük hızlarda kendinden yağlamalı kesici takımların işleme performansını

arttırdığını ve geleneksel takımlara kıyasla çok daha düşük kesme kuvvetlerin meydana geldiğini ölçmüşlerdir. Yapılan bu çalışmalarda belirtildiği gibi katı yağlayıcıların işleme performansını arttırdığı görülmektedir. Ancak katı yağlayıcıların bu ek sistemlerde kullanılması talaşlı imalat prosesinde ilk yatırım ve devamında ise bakım/onarım maliyetlerine neden olacaktır.

Katı yağlayıcı malzemelerin literatürde ele alındığı diğer bir konu ise metallerin tribolojik özelliklerine etkisidir. Yapılan çalışmalara bakıldığında metallere kaplama yapılarak ya da MMK'lere takviye edilerek üretilen kendinden yağlama özelliğine sahip yeni malzemenin aşınma testlerine tabi tutulması üzerinedir. Bu tip çalışmalar aşağıda belirtildiği gibidir.

İnce vd. [45] MoS₂ ve Grafit malzemelerini sürme-sıvama metodu ile kapladıkları Al1008 alaşımları pim-disk aşınma testine tabi tutmuşlardır. Deneyler Kuru, yağlı ve yağ+%5 Molykote-A ortamlarında gerçekleştirmişlerdir. Aşınma testlerin sonrasında MoS₂ ve grafit kaplamaları sürtünmeyi sırasıyla %42-%51 oranında azalttığı belirtilmiştir. Kaplamalar yağlı ortamda ki sürtünme katsayıları kuru ortama göre sırasıyla yaklaşık 10-8 kat daha düşük ölçmüşlerdir. Satyanarayana vd. [46] karıştırma döküm yöntemiyle üretimini yaptıkları çalışmada, granit-grafit takviyeli AMMK'lere aşınma testleri uygulamışlardır. Ağırlıkça %2 granit ve %4 grafit takviyeli numunelerin testler sonrasında aşınma özelliklerinin iyileştiğini ve grafit içeriği sayesinde numunelerin sürtünme katsayısının düştüğünü belirtmişlerdir. Podgornik vd. [47] yaptıkları çalışma ile h-BN malzemesini %5-10-20 konsantrasyonlarında gres ile karıştırılıp grafit yerine kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Disk üzerinde aşındırıcı top ile yapılan çalışma sonucu h-BN'nin grafitte göre daha temiz ve aynı oranlarda yağlama özelliğine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Tribolojik özellikler ise h-BN'nin partikül boyutuna bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Seleman vd. [48] Al6061/grafit MMK'ların ekstrüzyon yöntemi ile üretilen mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada kuru kayma aşınma direnci 3N sabit yük altında, 2.68 km'lik bir kayma mesafesindeki test cihazında değerlendirdiler. Deney sonucunda MMK'ların aşınma direnci artan grafit içeriğiyle arttığını ve saf alaşıma göre grafitin %20 oranlarında 10 kat daha aşınmaya karşı direncin oluştuğunu belirlemişlerdir. Baradeswaran ve Perumal [49] yaptıkları çalışmada Al7075/Al₂O₃/ grafit kompozite aşınma testi uygulanmış ve grafitin kompozit üzerindeki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Kompozitleri sıvı metalürji yöntemini kullanarak imal etmişlerdir. Kompozitlerin aşınma testleri sonucunda artan grafit içeriğiyle aşınmanın yüksek oranda

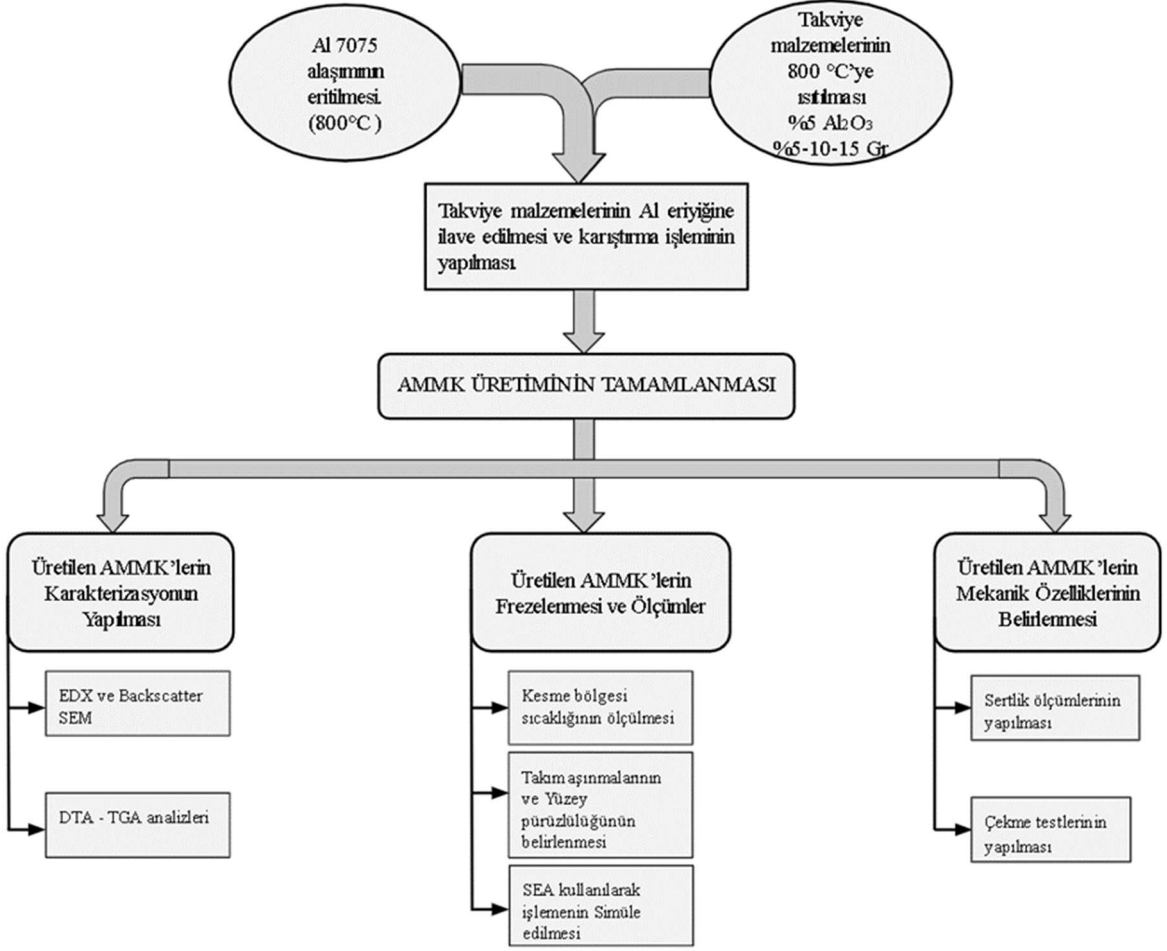
düştüğü ifade edilmiştir. Shanmughasundaram v. Subramanian [50] Al-Si alaşımlı grafit takviyeli MMK'lere kuru kayma şartlarında pim test cihazında aşınma davranışlarını ve kompozit mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda ağırlıkça artan grafit ile doğrusal olarak aşınma ve sürtünme katsayısında azalmaların olduğunu belirtmişlerdir. Saf matris malzemesinin aşınmasına oranla grafit içerikli kompozitlerde 2,2 kat daha yüksek kayma aşınma direnci olduğunu tespit etmişlerdir. Artan grafit içerikleriyle birlikte doğrusal olarak sertliklerde azalmaların meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ravindran vd. [51] Toz metalürjisi ile üretilmiş Al-%5SiC-% (5-10) grafit kompozitin kuru kayma şartlarında aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan aşınma testlerinde grafitsiz numuneler için kayma mesafesi aşınmayı etkileyen en önemli parametre olduğu ve kompozit içeriğinde ki grafit oranının artmasıyla sürtünme ve aşınma özelliklerinde artışların sağlandığını ifade etmişlerdir. Bunların yanı sıra yaptıkları çalışmada Al-%5SiC kompozitin aşınmış yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde şiddetli plastik deformasyondan kaynaklı oksidatif aşınmaların olduğunu belirtmişlerdir. Baradeswaran v. Perumal [52] yaptıkları diğer bir çalışmada Al7075/Grafit kompozitleri, kuru kayma koşulları altında Tribolojik ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Geleneksel döküm yöntemi ile ürettikleri kompozitlere aşınma ve sertlik testleri uygulamışlardır. Grafitin artan değerlerinde sertlikte düşüşlerin olduğunu ve yüzey kusurlarının meydana geldiğini belirtmişlerdir. Aşınma testlerini üç farklı kayma hızında (0,6-0,8-1,0 m/s) kayma hızında ve üç farklı yük (10-20-30 N) altında yapmışlardır. Testler sonucunda grafitin artan değerlerince aşınmanın azaldığı ve en iyi değerlerin %20 grafit oranlarındaki numunelerde meydana geldiğini belirtmişlerdir.

2.1. Tezin Literatürdeki Yeri ve Organizasyon Şeması

İmalat endüstrisinin gelişmesine bağlı olarak ham madde talebinin artması ve üretimde kullanılan metotlar nedeniyle çevresel sorunlarda artmaktadır. Özellikle imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan talaşlı işlemede soğutma ve yağlama etkisi sağlayan geleneksel kesme sıvıları ekolojik olmamaları, işçi sağlığına zararları ve yüksek maliyetleri bakımından büyük sorun teşkil etmektedir. Bu sorunları azaltmak ve ortadan kaldırabilmek için literatürde çevreye duyarlı işleme yöntemleri geliştirilerek çalışmalar hız kazanmıştır. Genel anlamda bakıldığında MMY sistemleri, kriyojenik işleme ve katı yağlayıcılar bu yeni yöntemlerdendir.

Endüstride yağlama uygulamalarının zor olduğu hareketli ve sürtünmeye maruz kalan iş parçalarının kendinden yağlama özellikleri sağlanarak kullanımının araştırılması

önem kazanmıştır. Bu tip kendinden yağlama özelliğine sahip malzemelerin temelinde hafif matris metalleri ve katı yağlayıcı takviyeleri bulunmaktadır. Bu bağlamda bakıldığında kendinden yağlamalı iş parçalarının üretimi sonrası kuru ortamda ek bir sistem olmadan talaşlı işlenmesi mümkündür. Böylelikle maliyeti düşük sürdürülebilir çevreci imalatlar gerçekleştirilebilir. Tez konusunun amacı çevre dostu katı yağlayıcıların MMK malzemelere ilave edilerek, kuru ortamda talaşlı işlemede geleneksel kesme sıvılarının kullanımını azaltmaktır. Bu çalışmada Al7075 matrisli, katı yağlayıcı grafit ve seramik Al₂O₃ takviyeli MMK'ler karıştırma döküm yöntemiyle üretildi. Kendinden yağlama özelliğine sahip kompozitin karakterizasyonunu inceleyebilmek için EDX, Sem, DTA, TGA ve DSC analizleri gerçekleştirildi. Takviye malzemelerinin kompozitin mekanik özelliklerine etkisini belirleyebilmek için çekme ve sertlik testleri yapıldı ve yorumlandı. Katı yağlayıcı takviyeli MMK'nin işlenebilirliğini belirleyebilmek amacıyla frezeleme işlemi yapıldı. Frezeleme işlemi kuru ortamda, üç farklı devir sayısı (900-1300-1700 dev/dak) ve üç farklı ilerleme (0.1-0.2-0.3 mm/dev) değerlerinde gerçekleştirildi. Frezeleme işleminde kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklıklar ölçüldü ve takviye malzemelerin etkisi tartışıldı. Frezeleme işlemi sonrasında ise takımlarda meydana gelen aşınmalar, ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve talaş tipleri tespit edilip yorumlandı. Sonlu Elemanlar Analiz (SEA) yöntemi kullanılarak frezeleme işlemi simüle edildi. Tez çalışmasının organizasyon şeması ise Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1. Çalışmanın organizasyon şeması.

3. GENEL BİLGİLER

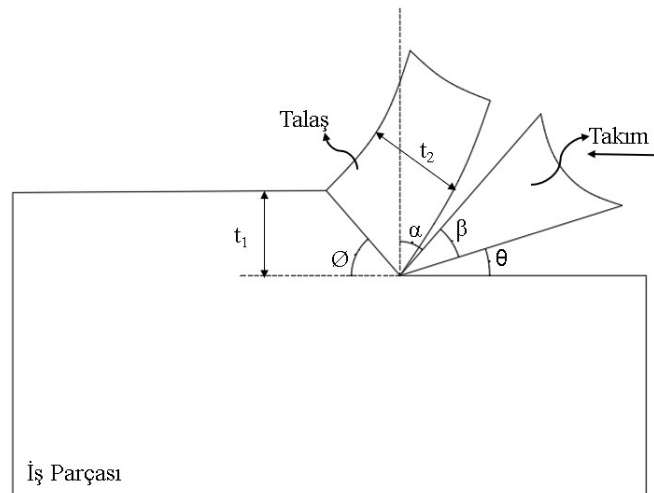
3.1. Talaş Kaldırma Mekanîği (Ortogonal Kesme)

Endüstride kullanım alanına göre tasarlanmış iş parçasının üretimini sağlayabilmek için kesici takım vasıtasıyla parçadan tabaka kaldırılarak şekillendirilmesine talaş kaldırma işlemi denir. Parçadan kaldırılan tabakalara ise talaş denir. Talaşlar iş parçasından ayrılması plastik ve elastik deformasyon sonucu ayrılır.

Talaşlı imalat işlemi iş parçası ve kesici takım arasında fiziksel etkileşim sonucu şekil değiştirme, sürtünme, ısı oluşumu, talaşın kırılması ve büzülmesi, takımın aşınması gibi birtakım olayları kapsayan fiziksel olaylardır. Talaşlı imalattan takım aracılığıyla işlenen malzemede talaş oluşumunu sağlayabilmek için bazı gereksinimler mevcuttur. Bunlar;

- Kesici takımın iş parçasına oranla sert ve aşınma direnci yüksek olmalı.
- Takımın iş parçasına dalmayı sağlayabilecek uygun bir geometriye sahip olmalı.
- Takımın, iş parçasının oluşturduğu direnci yenebilmek için gereken yeterli kuvveti kesme hızı ve nispi hareket ile sağlamalı.

Talaş kaldırma işlemi üç boyutlu ve karışık geometrilere sahip olmasına rağmen talaş kaldırma mekaniğinin açıklanabilmesi için teoride iki boyutlu ortogonal kesme şeklinde incelenmektedir. Ortogonal kesmede takımın kesme kenarı, iş parçası/kesici takım hareket yönüne ve işlenen parçasının yüzeyine diktir. Ortogonal kesme modeli Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Ortogonal kesme modeli.

Ortogonal kesme modele (Şekil 3.1) bakıldığında, işlenen yüzeye çizilen dik çizgi ile talaş yüzeyi arasında oluşan açı talaş açısı (α), takım ile iş parçası arasında ki açıya boşluk açısı (θ), takımın yüzeyi ile boşluk açısı yüzeyleri arasında ki açıya kama açısı (β) adı verilmektedir ve bu üç açının toplamı formül 3.1'deki gibidir. Talaşlı imalat sırasında talaş oluşumu için takım iş parçası üzerine kuvvetler uygulayarak hareket ettirilmesi gerekmektedir. Takım iş parçası üzerinde hareketi ile parça üzerinde tabakalar ayrılmaya başlar ve kopma sınırı aşılarak talaş akışı meydana gelir [53].

$$\theta + \alpha + \beta = 90^\circ \quad (3.1)$$

Talaş açıları dikkate alındığında negatif ve pozitif talaş açıları olmak üzere ikiye ayrılır. Negatif talaş açısında takım daha geniş kama açısına sahiptir. Bu sayede güçlü bir kesim sağlar ve yüksek gerilmeli malzemelerin kesiminde kullanılabilir. Ancak bu durum güç tüketiminin artmasına da neden olur.

Şekil 1.1'deki \emptyset kayma düzlemi açısı olarak ifade edilir ve bu açı formül 3.2'deki gibidir. Bunun yanı sıra γ ise kayma şekil değişimi olarak ve formül 3.3'deki gibi ifade edilir.

$$\tan \emptyset = r * \frac{\cos \alpha}{1 - r * \sin \alpha} \quad (3.2)$$

$$\gamma = \tan(\emptyset - \alpha) + \cot \emptyset \quad (3.3)$$

İşleme esnasında kaldırılacak talaşın kalınlığı (t_1) ile kesme sonucu oluşan talaş kalınlığı (t_2) oranına “talaş oranı (r)” denir ve formül 3.4'deki gibi ifade edilir.

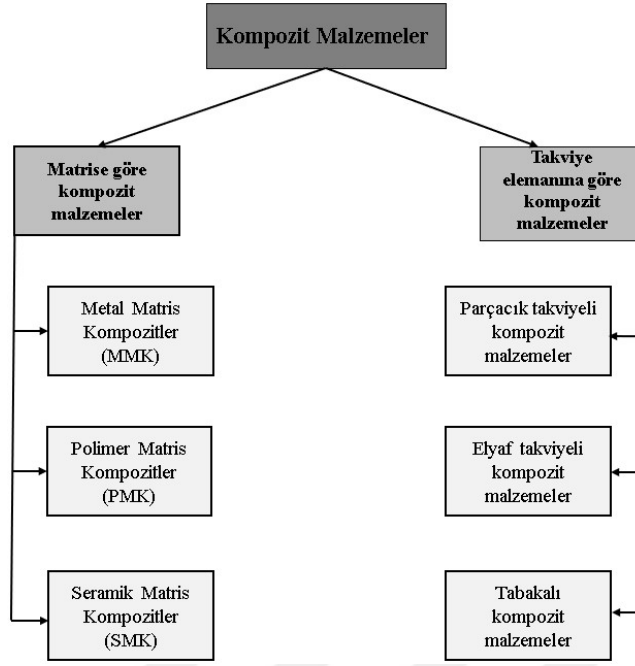
$$r = \frac{t_1}{t_2} \quad (3.4)$$

Kayma düzlemi açısının değerine bağlı olarak güç tüketimi ve kesme bölgesi sıcaklık oluşumu etkilenmektedir. Kayma düzlemi açısının artması ile kayma düzlemi azalmaktadır. Bu durum düşük kuvvetler ile işlenen parçanın kayma mukavemeti değerine ulaştırır. Talaşın kaldırılması için ihtiyaç duyulan bu kuvvetin azaltılması, enerji ve güç tüketimini düşürecek, kesme bölgesi sıcaklığın ise yüksek seviyelere çıkmasını sağlamaktadır.

3.2. Kompozit Malzemeler

Birbirinden farklı özelliklere sahip en az iki malzemenin bir araya getirilerek üretimi gerçekleştirilen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler temel olarak matris fazı, takviye/dolgu fazı ve ara yüz fazı olmak üzere üç fazdan oluşur. Matris fazı, sürekli ve ana faz olarak adlandırılmakta ve takviye fazını bir arada tutmaktadır. Takviye fazı kompozit içerisindeki ikincil fazdır ve matrisin dayanımını arttırmaktadır. Ara yüz fazı ise matris ve takviye fazından farklı yapı ve özelliklere sahip fazdır [54]. Kompozit malzemelerde aranan akma/kırılma dayanımı, rijitlik, kırılma tokluğu, malzeme yoğunluğu, yüksek sıcaklıklara dayanabilme gibi performans ve özellikler bu üç fazın birleşiminden doğrudan etkilenmektedir.

Kompozit malzemeler üretiminde kullanılan malzemelerin her birinin taşıdığı özelliklerden daha üstün özellikler taşımaktadır. Bu sayede endüstrinin ihtiyacına göre gelişen teknoloji ile birlikte havacılık, savunma ve uzay sanayisi, kara ve deniz taşımacılığı, enerji, yapı ve inşaat sektörü gibi farklı endüstri kollarında yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanlarına bağlı olarak farklı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler sınıflandırılmak istenirse Takviye elemanına göre tabakalı, elyaf ve parçacık takviyeli kompozitler, matris elemanına göre kompozitler ise Metal Matris Kompozitler (MMK), Polimer Matris Kompozitler (PMK) VE Seramik Matris Kompozitler (SMK) olarak sınıflandırılabilir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

3.3. Metal Matris Kompozit (MMK)

Kullanım alanına uygun özellikler elde edebilmek için matris malzemesi metal olan kompozit malzemelere Metal Matris Kompozit (MMK) denir. MMK'lar bileşiminde kullanılan malzemelere oranla yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme ve yüksek spesifik mukavemet özelliği sağlaması nedeniyle 1960'lı yılların başında geliştirilmiştir [55]. MMK'lar yerlerine kullandıkları malzemelere göre üstün özellikleri bulunmakta ve tercih edilme sebebi olarak bu özellikler gösterilebilir. Bu özellikler aşağıda ki gibi sıralanabilir [56].

- Düşük yoğunluklara sahip olmaları,
- Geri dönüşüme elverişli malzeme özelliklerine sahip olmaları,
- Yüksek mukavemete sahip olmaları,
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmaları,
- Yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmaları,
- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranlarına sahip olmaları,
- Yüksek esneklik modülü/yoğunluk oranlarına sahip olmaları,

Bu üstün özelliklerin elde edilmesinde Matris malzemesi veya alaşımı, takviye malzemesi, takviyenin hacim oranları ve kompozitin üretim yöntemi etkilidir.

3.3.1. Metal matris kompozitlerde matris malzemeleri

MMK'larda kullanılan matris elemanları genel olarak hafif, yüksek mekanik özelliklere sahip ve takviye elemanı ile uyum sağlayan metallerdir. Bu kavram etrafında bakıldığında yaygın olarak MMK üretiminde alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg), bakır (Cu), çinko (Zn) ve nikel (Ni) gibi metaller veya alaşımlar matris elemanı olarak kullanılmaktadır [57]. Matris elemanları içerisinde alüminyum ve alüminyum alaşımları kolay temin edilebilirliği, üretim kolaylığı, düşük yoğunluğu, korozyon direnci ve dayanım özellikleri sayesinde kullanımı en yaygın matris malzemesidir [58]. Kompozit malzemenin kullanım alanında yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirlik özellikleri arandığında Al ve alaşımları yerine Ti ve Ni matrisli kompozitlerin kullanımı yaygınlık göstermektedir. Matris malzemesi olarak kullanılan metallerin yoğunluk ve mukavemet değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. MMK üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan metallerin yoğunluk ve mukavemet değerleri. [55]

Metal	Akma Mukavemeti (MPa)	Spesifik Mukavemet (Nm/kg)	Yoğunluk (g/cm ³)
Alüminyum (Al)	30	11,1	2,70
Titanyum (Ti)	140	31,0	4,51
Magnezyum (Mg)	69	39,6	1,74
Berilyum (Be)	120	64,9	1,85
Nikel (Ni)	148	16,6	8,90
Bakır (Cu)	69	7,7	8,93
Tungsten (W)	550	28,6	19,25
Molibden (Mo)	345	33,8	10,22
Niyobyum (Nb)	105	12,3	8,57

3.3.2. Metal matris kompozitlerde takviye malzemeleri

Takviye malzemeleri, kullanım alanlarına bağlı olarak istenilen mekanik özellikleri kazandırabilmek için kompozitlerin oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. MMK'ler uygulama alanlarına bağlı olarak sürekli ve süreksiz takviyeler olmak üzere iki türden takviye edilmektedir. Takviyeler daha detaylı gruplandırmak istenirse sürekli fiberler,

süreksiz fiberler, lifcikler (whisker) ve partiküller olmak üzere 4 grupta sınıflandırılabilir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3. 2. Takviyelerin sınıflandırılması.

Takviyeler	Kategoriler
Sürekli fiberler	Sürekli Takviye
Süreksiz Fiberler	Süreksiz Takviye
Lifcikler (Whisker)	Süreksiz Takviye
Partiküller	Süreksiz Takviye

Genel anlamda sürekli ve süreksiz takviyelere bakıldığında, sürekli takviye malzemeleri monofilament veya multifilament olarak üretilen fiber elyaflara dayanır. Sürekli elyaflar da bor (B), karbon (C), alüminyum silikat (Al_2SiO_5) ve silikon karbür (SiC) elyafların kullanımı yaygındır [59]. Özellikle Silikon karbür elyaflar mekanik ve kullanılabilirlik özellikleri sayesinde havacılık endüstrisinde kullanımı yaygındır [60]. Ancak üretim maliyeti kullanımı sınırlandırmaktadır.

MMK'larda süreksiz takviyelerin kullanımı ise yoğunlukta azalma, aşınma direncinde, mukavemette ve sertlikte iyileştirmeler sağlaması nedeniyle kullanımı yaygındır. Ayrıca süreksiz takviye dövme, haddeleme gibi yaygın kullanılan şekillendirme işlemlerini MMK'larda kullanımına olanak sağlaması tercih edilme sebeplerindedir. Sürekli takviye malzemelerine oranla maliyeti düşük olması da artı bir avantajdır. MMK'ların üretiminde kullanılan üç tip süreksiz takviyeler parçacık, lifcikler (whisker) ve süreksiz fiberlerdir.

Partikül takviyeleri, MMK'lerde kullanıldığında düşük maliyetlerde önemli sertlik iyileştirmeleri sağlar. Partikül takviyeli MMK'ler döküm ve toz metalürjisi gibi geleneksel imalat yöntemleriyle kolay ve çeşitli geometrik şekillerde üretilebilmekte ve sürekli takviye malzemeleri ile üretilmiş MMK'lere oranla daha düşük maliyetlidir. Bu özellikler partikül takviye malzemelerinin kullanımını yaygınlaştırmaktadır [61]. Partikül takviye malzemeleri boyutsal, yapısal ve mekanik özellikleri, maliyetleri ve metal ile uyumluluğu gibi özellikleri nedeniyle tercih edilen çok çeşitli partikül malzemeleri mevcuttur. MMK'lerde yaygın olarak kullanılan partikül takviye malzemeleri silisyum karbür (SiC), bor karbür (B_4C), titanyum karbür (TiC) ve alüminyum oksittir (Al_2O_3). SiC partikülleri uyumlulukları ve kolay temin edilebilirlikleri sayesinde MMK üretiminde en yaygın kullanılan süreksiz takviye malzemesidir [62]. Al_2O_3 takviye malzemesi alüminyumlarla

uyumluluğu ve oksidasyon direncinin yüksek olması nedeniyle AMMK'lerde kullanımı en yaygın olan takviye malzemesidir [63]. AMMK'lerde yüksek mukavemet ihtiyacı duyuluyorsa Al_2O_3 , daha düşük mukavemet ihtiyacı duyuluyorsa SiC takviye malzemesi olarak tercih edilmektedir.

Lifcikler (whiskers) genel olarak 0.1-1 μm çaplı tek kristalli, kristal kusuru bulunmayan, yüksek gerilme mukavemetine sahip takviye malzemeleridir. SiC, silikon nitrür (Si_3N_4), grafit bazı tipik lifcik takviye malzemelerindedir. Bu takviye malzemeler içerisinde özellikle SiC lifcikler üstün spesifik mukavemetleri ve üretim maliyetlerindeki ucuzluk nedeniyle kullanımı tercih edilmektedir [62]. Lifciklerin kullanımı çok yüksek mukavemet sağlamasına rağmen partikül takviyelerine oranla daha maliyetli olması, lif parçacıklarının solunum yollarında tahrişe ve hastalıklara neden olması kullanımını kısıtlamaktadır.

Süreksiz elyaflar genellikle büyük çaplarda bulunan polikristalin elyaflardır. Sürekli elyaflara ve lifciklere oranla maliyetli ve daha düşük mukavemete sahiptirler. Bu nedenle otomobil motor parçalarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra şekillendirilmesi sırasında lifciklere oranla daha sağlıklı ve güvenli bir işleme seçeneği sunmaktadır.

3.4. Metal Matris Kompozitlerin İşlenmesi

MMK'ların çeşitli çalışma koşullarında istenilen özellikleri karşılayabilmesinden dolayı geleneksel metalik malzemelerin yerine kullanımı yaygındır. Kullanım alanına göre üretilmiş MMK'lar geleneksel metalik malzemelerde olduğu gibi tornalama, frezeleme, delme gibi talaşlı işleme tabi tutulmaktadır. Talaşlı işleme tabi tutulan MMK'lar talaşlı işlenmesinde aşırı takım aşınmaları, fiber kopmaları, partikül kırıkları ve delaminasyon gibi hasarlara neden olmaktadır.

Özellikle parçacık takviyeli MMK'lerin izotropik yapılı olması nedeniyle işlenmesi geleneksel metal malzemelere benzemektedir. Bu nedenle MMK'lerin işlenebilirliği üzerinde kesme hızları, ilerleme, kesme derinliği ve takviye malzemelerin etkisi olduğu söylenebilir.

MMK'lerin işlenmesi sırasında kesme hızlarının değişimi kesme kuvvetlerini önemli bir şekilde etkilemezken, takım aşınmalarının ve Built Up Edge (BUE) oluşumlarının artmasına etkisi olduğu literatürde yapılan çalışmalarca belirtilmiştir [64, 65]. Düşük kesme

hızlarının varlığı BUE oluşumunu arttırmaktadır [66]. BUE oluşumuna bağlı olarak takımlarda eğim açılarının artmasına ve kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca kesme hızlarının artması takımında meydana gelen sıcaklığı doğru orantılı bir şekilde etkilemektedir. Takımda meydana gelen bu sıcaklık artışı takımın yumuşamasına ve aşınmaların artmasına neden olmaktadır [67]. Kesme hızının yüzey kalitesindeki etkisine bakıldığında ise kesme hızının artmasıyla yüzey kalitesinde iyileşmeler olmaktadır. Ancak kesme hızının takviyeler ve ilerlemeye oranla yüzey kalitesine etkisinin az olması araştırmacılar tarafından göz ardı edilebilir bir parametre olarak değerlendirilmiştir [68, 69].

MMK'lerin işlenmesinde ilerlemenin etkisi metalik malzemelerin işlenmesinde olduğu gibi kesme kuvvetleri üzerinde etkiye sahiptir. İlerlemenin artmasına bağlı olarak talaş hacminde artışlar meydana gelmektedir ve yüksek kesme kuvvetlerinin oluşmasına sebep olmaktadır [70, 71]. İlerleme değerlerinin değişiminin yüzey kalitesine etkisine bakıldığında, ilerleme değerlerindeki artışlar işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğünü artırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [72]. Bunun yanı sıra yüzey pürüzlülüğünün teorik hesaplanmasına bakıldığında ilerlemenin yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı görülmektedir [73].

$$Ra = \frac{f^2}{32 \cdot r} \quad (3.5)$$

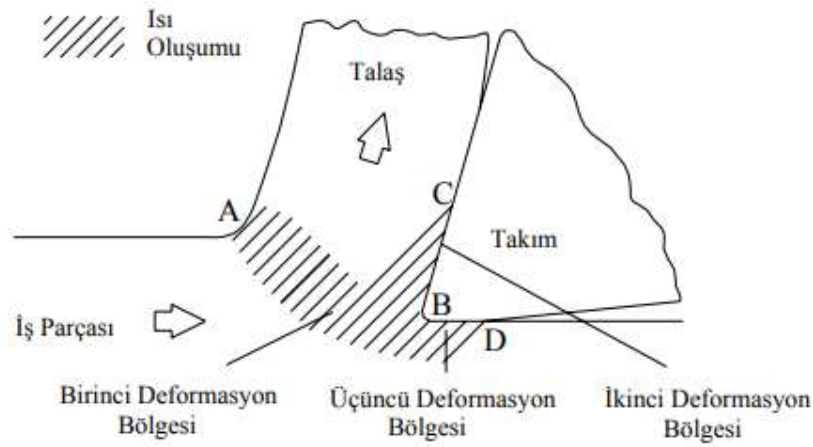
MMK'lerin işlenmesinde kesme derinliğinin artırılması yüzey kalitesini önemli ölçüde arttırırken takım aşınmasına etkisi göz ardı edilebilmektedir. Kaldırılan talaş hacminin artması ilerlemenin etkisinde olduğu gibi kuvvetlerin artışına neden olmaktadır. Bu artışlarla birlikte yüzey kalitesinde azalmalar meydana gelmektedir.

MMK'lerin işlenmesinde diğer bir etki ise takviye malzemelerdir. Geleneksel metalik malzemeler işlenmesiyle karşılaştırıldığında, MMK'lerin işlenmesine en önemli etkiyi takviye malzemesinin türü, boyutu ve hacim oranı belirlemektedir. Takviye malzemesi olarak sert ve aşındırıcı bir özelliğe sahip olan seramik malzemeler MMK'lerin işlenmesi sırasında takım aşınmalarının artmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalara bakıldığında takviye malzemesinin boyutun artmasıyla takım aşınmalarının arttığı ve yüzey kalitesinde düşüşlerin meydana geldiğini belirtmişlerdir [74, 75].

3.5. Talaşlı İmalatta Isı Oluşumu

Malzemelerin talaş kaldırılarak işlenmesi sırasında mekanik enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. İşleme sırasında kesme bölgesinde meydana gelen ısı ve sıcaklıklar işleme parametrelerine bağlı olarak da yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine neden olur. Bu sıcaklıklar takım ömürlerini ve yüzey kalitesini etkilemesinden dolayı talaş kaldırma prosesinde göz ardı edilemeyecek bir etkiye sahiptir.

Talaşlı işleme de ısı oluşumu birinci, ikinci ve üçüncü deformasyon bölgeleri olmak üzere 3 bölgede oluşmaktadır [76] (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Talaşlı imalatta ısı oluşumu [76].

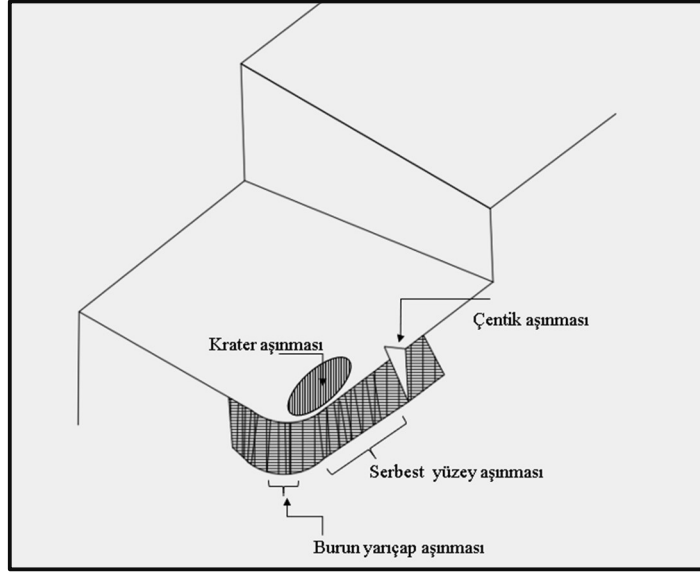
Birinci deformasyon bölgesinde meydana gelen ısı plastik deformasyon sonucu ve talaş ile kesme bölgesinden oluşmaktadır. Talaş kaldırma işleminde en yüksek ısının meydana geldiği ve plastik deformasyon ile oluşan temel ısı kaynağı bu bölgededir. Takım-talaş ara yüzeyi olarak da adlandırılan ikinci deformasyon bölgesinde ısı oluşumu plastik deformasyon ve talaş akışı sırasında meydana gelen sürtünmelerden dolayı oluşmaktadır. Bu bölgede meydana gelen ısının bir kısmı talaşla kesme bölgesinden uzaklaşırken diğer kısmı da kesici takım üzerinde birikir. Isının olduğu diğer bölge olan Üçüncü deformasyon bölgesi takım ile işlenmiş yüzey arasında ki serbest yüzeydir. Bu bölgede oluşan ısının bir kısmı talaş ile kesme bölgesinden uzaklaşırken oluşan diğer ısı şekillendirilmekte olan parça üzerine geçiş yapmaktadır [76].

3.6. Takım Aşınması

Talaşlı işleme sırasında kesici takım ile iş parçası arasındaki etkileşim nedeniyle basınç ve yüksek sıcaklıklardan kaynaklı takım aşınmaları meydana gelmektedir. Takım aşınması talaş kaldırma işleminin başlanması ve istenilen yüzey kalitesi sağlanması süresince kademeli olarak devam eder. Ancak kesici takım malzemesi, kenar geometrisinin ve işleme parametrelerinin yanlış seçilmesi takım aşınma boyutlarının daha erken sürede artmasına neden olacaktır. Bu durum takım ömrünü daha hızlı azaltarak yeni bir takımın kullanılmasına, yüzey kalitesinin bozulmasına neden olarak işleme maliyetlerinin artmasıyla sonuçlanır. Bu nedenle takım aşınmalarının kontrolünün sağlanması ve takım ömürlerinin arttırılması arzu edilir. Takım ömürlerini arttırmak ve aşınmaları minimum seviyelerde tutmak için işlenen iş parçasına uygun takım malzemeleri ve işleme parametreleri seçilmelidir [77].

Takım aşınmasının oluşumu karmaşık bir olaydır ve abraziv (aşındırıcılarla) aşınma, difüzyon ile aşınma, adeziv aşınma, yorulma ile aşınma, oksidasyon aşınması gibi çeşitli mekanizmalar tarafından meydana gelir. Kesici takım ve iş parçası etkileşiminde sert parçacıkların etkisiyle aşınmanın gerçekleştiği mekanizmaya *abraziv (aşındırıcılarla) aşınma* mekanizması denir. İşlenen parçada bulunan sert taneciklerin kesici takım yüzeyinde bulunan yumuşak parçacıkları koparması ile görülür. Abraziv aşınma mekanizması, takımlarda genel olarak krater aşınmasına neden olur. *Difüzyon aşınması* ise kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar nedeniyle kesici takım üzerine iş parçası malzemesinin yapışması ve ayrılmasıyla meydana gelen aşınma mekanizması olarak ifade edilir. *Adeziv aşınma* mekanizması ise kesici takım ve talaş ara yüzeyinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar nedeniyle oluşan aşınma mekanizmasıdır ve kesici takımlarda yığılma kenarın oluşmasına neden olur. Kesme esnasında sıcaklıkların ve kuvvetlerin değişimlerinden dolayı meydana gelen aşınma mekanizması ise *yorulma ile aşınma* mekanizmasıdır. Kesici takımın ısınması ve soğutulmasına bağlı olarak kesici kenarın çatlamasına ve kırılmasına neden olur. *Oksidasyon aşınması* ise kesici takım ile iş parçası arasında sıcaklık ve hava kaynaklı oksidasyon oluşması ile oluşan aşınma mekanizmasıdır. Oksidasyon aşınması ile kesici takım kenarlarında çentikler oluşmaktadır [78].

Aşınma mekanizmalarına bağlı olarak farklı aşınma tipleri görülmektedir (Şekil 3.4). Bazı takım aşınma tipleri ayrı alt başlıklarda verilmiştir.



Şekil 3.4. Takım aşınma tipleri.

3.6.1. Serbest yüzey aşınması

Kesici takımların işlenen iş parçası ile temas halinde bulunan yan kenarında sürtünmeden kaynaklı oluşan aşınma türüdür [53]. Talaşlı imalatta görülen en yaygın aşınma tipidir. Aşınma direncinin düşük, kesme hızının yüksek ve ilerleme değerlerinin düşük olduğu durumlarda meydana gelir. Serbest yüzey aşınmalarının yüksek olduğu durumlarda kesme işlemi düzgün bir şekilde gerçekleşmez ve titreşimlerde artışlar yaşanır. Bununla birlikte sürtünme artar ve sıcaklık oluşumu yükselir. Sıcaklıkların artışıyla kesici takım malzemesinin yumuşaması ve deformasyonun artması meydana gelir. Sonuç olarak işlenen parçanın yüzeyinde çapaklar oluşarak yüzey kalitesi düşer [78, 79].

3.6.2. Krater aşınması

Kesici takımın talaş ile temas ettiği bölgede oluşur. Takım ile iş parçası etkileşiminden kaynaklı kimyasal tepkimeye bağlıdır ve kesme hızının artışıyla artar [53]. Krater aşınma boyutunun artması ile kesici takımın kesme kenar bölgesinde kırılmalar meydana gelir. Krater aşınmasına en büyük etken kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklardır. Krater aşınma tipi takım ve talaş yüzeyi arasındaki etkileşimden kaynaklandığı için talaş oluşumunu kolaylaştırıcı pozitif talaş açısına sahip takımların kullanılması önemlidir [78, 79].

3.6.3. Çentik aşınması

Kesici takım kesme kenarı bölgesinde parçacıkların kırılması ile oluşan aşınma tipidir [53]. Mekanik ve ısıl gerilmeler, yapışma, iş parçası deformasyon sertleşmesi çentik aşınma tipinin görülme nedenleridir. Kesici takım ile işlenen yüzey arasındaki temas alanını arttırmak amacıyla yaklaşma açısının artırılması bu aşınma tipini önlemede etkilidir. Bunun yanı sıra ısıl sertlik ve deformasyon direnci yüksek takımlar seçilmelidir [78, 79].

3.6.4. Burun yarıçap aşınması

Kesici takımın kesici kenar yüzeyi ile yardımcı kesici kenar yüzeyinin birleştiği bölgede meydana gelir. Serbest yüzey aşınma tipi ile çentik aşınma tipinin birleşimi olarak ifade edilebilir. Abrasyon, korozyon ya da oksidasyon nedeniyle oluşur. Burun yarıçapının artırılması, ilerleme değerlerinin azaltılması ve daha sert takım kullanılması ile bu aşınma tipi engellenebilir [78].

3.6.5. Ağız birikimi oluşumu (BUE)

İşlenen malzemenin kesici takım kesme kenarına yapışması ve devamında birikmesiyle meydana gelen aşınma türüdür [80]. Sünek malzemelerin işlenmesinde sıkça karşılaşılır. BUE varlığı yüksek seviyelerde olduğu zaman kesici takımın iş parçasıyla olan etkileşimi düşer ve yüzey kalitesinin bozulması gibi sorunlarla karşılaşılır. Pozitif talaş açısına sahip takımlar kullanılarak, kesme bölgesinin soğutulması ve yağlanması sağlanarak bu aşınma tipinin önüne geçilebilir.

3.6.6. Isıl ve mekanik çatlaklar

Kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar ve takımın maruz kaldığı değişken yükler nedeniyle oluşan aşınma tipidir [80]. Bu çatlakların oluşması ile birlikte kesici takımın kısa sürede büyük hasarlara uğramasına neden olur. Bu hasarlar sonucunda takım kırılmaları yani takımın ömrü bitmiş olur.

3.7. Soğutma Sıvıları ve Yağlayıcılar

Talaşlı imalat sırasında meydana gelen ısılar işlenebilirliği etkileyen etkenlerden biridir. Yüksek sıcaklıkların varlığı takım ömürlerini ve işlenen yüzeyin kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırıp işlenebilirliği arttırabilmek için kesme sıvıları endüstride uzun yıllardır kullanılmaktadır. Kesme sıvıları takım ve iş parçası temas

bölgesini yağlandırarak sürtünmeden kaynaklı ısıyı azaltmakta ve ısı iletimi ile kesme bölgesindeki sıcaklıkları düşürmektedir [81]. Kesme sıvılarının işlenecek malzemeye ve işleme parametrelerine göre seçilmesi önemlidir. Örneğin işlenmesi zor malzemelerde ve düşük işleme parametrelerinde yüksek yağlama etkisi gösteren kesme sıvılarının kullanımı pozitif sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Kesme sıvıları farklı özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Özellikle suda karışabilme özellikleri bu sınıflandırmada belirleyici rol oynar. Kesme sıvıları su ile karışabilen kesme sıvıları, su ile karışamayan yani yağ bazlı kesme sıvıları ve gaz bazlı soğutucu yağlayıcılar olarak sınıflandırılabilir [82].

3.7.1. Su ile karıştırılabilen kesme sıvıları

Talaşlı imalat esnasında yüksek ısıların kesme bölgesinden uzaklaştırılabilmesi için kesme sıvısının yüksek termal iletkenliğine ve özgül ısıya sahip olması gerekmektedir [62]. Su bu özelliklere sahip en uygun sıvıdır. Ancak suyun takım tezgâhlarını aşındırma gibi olumsuz etkileri olması nedeniyle suya yağlama özelliği kazandıracak farklı katkı malzemeleri kullanılmaktadır [83, 84].

Su ile karışabilir kesme sıvıları çözünür yağ, sentetik ve yarı sentetik sıvıdır. Çözünür yağlar su içinde dağılan mineral yağlardır. Suya yağlama özelliği kazandırarak suyun aşındırıcı özelliğini engellemektedir [85]. Sentetik kesme sıvıları ise düşük yağlama özelliklerine sahip sıvılardır. Sentetik sıvılar su ile karışarak korozyon önleyici, yağlama ve yüzey gerilimini azaltma özelliklerini kazandırır. Sentetik kesme sıvılarının düşük yağlama özellikleri nedeniyle düşük kuvvetlerin ortaya çıkacağı işlemlerde kullanılır. Yarı sentetik sıvılar mineral yağlar ve kimyasal katkıların karışımından üretilmektedir. Çözünür yağlar ve sentetik kesme sıvılarının özelliklerine de sahiptir. Sentetik sıvılara göre daha üstün yağlama özelliğine sahiptir, çözünür yağlara kıyasla daha temiz ve korozyon önlemede daha etkilidir. Su ile karışabilen kesme sıvıları işlenebilirliği arttırmasına rağmen sıvıların kullanım ömrü kısadır ve çevreye karşı zararlı malzemelerdir.

3.7.2. Yağ bazlı kesme sıvıları

Talaşlı imalat işleminde takım ile iş parçasını yağlamak için kullanılan diğer bir alternatif kesme sıvısıdır. Kullanımında genel olarak basınç bileşikleri ve diğer tür yağlayıcılar gibi katkı maddeleri içeren mineral yağlardır [85]. Yağ bazlı sıvıların kesme esnasında kullanılması takım ömründe ve yüzey kalitesinde iyileşmeler sağlarken, hareketli

tezgâh parçalarını yağlayarak takım tezgâhlarında korozyonu önlemektedir. Katkısız yağ bazlı kesme sıvıları iyi yağlama ve korozyon önemesi sağlarken, yüksek sıcaklıklarda kesme sıvısında bozulmalar meydana gelir ve buğu oluşturamazlar. Bu nedenle, bu tip yağların kullanımı alüminyum, magnezyum, düşük karbonlu çelikler gibi işlenmesi kolay malzemelerin talaş kaldırılmasında kullanılır. Katkılı bileşik mineral yağlar yüksek sıcaklıklı ve basınçlı işlemlerde yüzey ile kimyasal reaksiyona girerek bu özellik onların düşük hızlı ağır işlemler için uygun kılar [82,86].

3.7.3. Gaz bazlı kesme sıvıları

Gaz bazlı soğutucu yağlayıcılar oda sıcaklığında gaz halinde bulunmaktadır ancak talaşlı işlemede gaz veya soğutulmuş basınçlı sıvılar şeklinde kullanılır. Gaz bazlı soğutucu yağlayıcılar hava, azot, argon, helyum ve karbondioksittir. Bu gazların termal iletkenliklerinin ve soğutma kapasitelerinin düşük olması, işleme esnasında farklı yöntemlere başvurmaya neden olmaktadır. Bu farklı yöntemler gazların sıvılaştırılması, sıkıştırılması ve soğutulmasıdır. Bunun yanı sıra gaz bazlı soğutucu yağlayıcıların düşük yağlama özellikleri bulunur. Gaz bazlı yağlayıcıların yağlama özelliklerini yükseltmek için geleneksel kesme sıvıları ile kullanımı endüstride yaygındır.

3.8. Çevreye Duyarlı İşleme

Talaşlı imalat prosesinde geleneksel kesme sıvıları, soğutucu ve yağlayıcılar, soğutma ve yağlama etkisini karşılama adına rağmen yüksek maliyetli olmaları, çevreye ve işçi sağlığına verdikleri zararlar nedeniyle kullanımı kısıtlamaya yönelik çalışmalar mevcuttur. Sürdürülebilir imalatın ana konularından olan çevreye duyarlı işleme yönelik endüstride ve literatürde yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Geleneksel kesme sıvılarının tüketilmiş ortadan kaldırmak veya azaltmak için bu yeni yöntemler kuru işleme, MMY ve kriyojenik işleme olarak sıralanabilir.

3.8.1. Kuru işleme

Kuru işleme, çevreye duyarlı işlemeyi sağlayan, kesme sıvılarının tamamen ortadan kaldırarak işleme maliyetlerini ve çevre sağlığı üzerinde iyileşmeleri sağlayacak en iyi işleme türü olarak kabul edilir [87].

Kuru işleme, ıslak işlemeye göre daha yüksek sıcaklıkların ortaya çıkmasına, takım ömürlerinde azalmaya ve yüzey kalitesinin bozulmasına neden olur. Kuru işlemede bu

olumsuz durumları ortadan kaldırmak için daha iyi takım malzemeleri, kaplamalar ve takım geometrilerindeki değişiklikler gibi takım özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda takım malzemeleri için daha yüksek sertlik, mukavemet, aşınma direnci, kırılma tokluğu ve daha az sürtünme davranışı gibi özellikler kesici takıma kazandırılmalıdır.

3.8.2. Minimum miktar yağlama (MMY)

Çevreye duyarlı işlemeyi sağlayabilecek yeni yöntemlerden biri de Minimum Miktar Yağlama (MMY) sistemleridir. Kuru işleme olanağı sağlamayan, işlenebilirliği ve yüksek yüzey kalitesini sağlayabilecek bir sistemdir [88]. MMY sistemleri işleme esnasında takım ve iş parçası arasında bir yağ sisi oluşturmak için basınçlı hava ile karıştırılmış çok az miktarda kesme sıvısının uygulanmasıdır [89]. MMY sistemleri ile yapılan işleme de takım ve iş parçası arasına nüfuz eden yağlar oluşan ısı ile kesme bölgesinden uzaklaşır. Bu sayede işleme de yağlama etkisi sağlanırken, buharlaşma ile kesme sıvısının bakımı ve uzaklaştırılması gereksinimi ortadan kalkar ve işleme maliyeti azaltılmış olur [90].

MMY sistemleri hava kompresörü, kesme sıvısı tankı, iletim boruları, akış kontrol sistemi ve nozullardan oluşmaktadır. Basınçlandırılmış hava ile karışan kesme sıvısı iletim boruları sayesinde nozullara taşınır ve kesme bölgesinin yağlanması sağlanır.

MMY sistemlerin kullanımı özellikle sünek malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Sünek malzemelerin kuru işlenmesi ile ortaya çıkan termal yumuşama ve BUE oluşumunun MMY ile önüne geçilmektedir. MMY sistemlerinin yağlama özelliğinin yüksek olmasına rağmen soğutma kapasiteleri oldukça düşüktür. Zayıf soğutma kapasiteleri titanyum gibi işlenmesi zor ve yüksek sıcaklıkların sorun teşkil ettiği işlemlerde MMY sistemlerinin kullanımını kısıtlamaktadır. Kuru işleme ile kıyaslandığında MMY sistemlerinde kesme sıvısının kullanımı çevre ve insan sağlığına zararlı olduğu ifade edilebilir.

3.8.3. Kriyojenik işleme

Kriyojenik işleme, yaklaşık -150 °C ve daha düşük sıcaklıklarda yapılan çevreye duyarlı işlemdir [91]. Bu yöntem ile sıvılaştırılmış gazlar kesme bölgesini soğutarak takım ömürleri ve işlenmiş yüzeyin kalitesi arttırılmaktadır. Kriyojenik işleme operasyonlarında yaygın olarak kriyojen sıvıları sıvı azot, sıvı karbondioksit, katı karbondioksit, sıvı helyum ve hava (-50 °C) kullanılmaktadır.

Kriyojenik işleme ile birlikte düşük sıcaklıkların varlığı iş parçası ve kesici takımın malzeme özelliklerinde değişikliklere neden olabilir. Çok düşük sıcaklıkların varlığı mukavemeti ve sertliği arttırmaktadır. Bu nedenle çok yumuşak malzemelerin işlenmesinde kullanımı yararlıdır [92]. Bu durumun yanı sıra kriyojen ortam kesici takımlarında sertliği artırarak aşınma dirençlerinde ve takım ömürlerinde iyileşmeler sağlamaktadır.

3.8. Katı Yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar, temas ettikleri yüzeyleri sürtünmesini ve aşınmasını azaltan, toz veya ince film olarak kullanılabilen malzemelerdir. Katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcıların yetersiz kaldığı talaşlı imalat işlemlerinde, uzay ve otomotiv sanayisinde kullanılmaktadır. Genel amaçları uygulandıkları yüzeylerde yumuşak veya sert bir yüzey oluşturarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmaktadır. Yüksek hızlı ortamlarda, yüksek vakumlu uygulamalarda, nükleer santrallerde ve kesme sıvılarının kirletici özelliklerinin azaltılması amacıyla talaşlı imalat endüstrisinde kullanımı bulunmaktadır.

Katı yağlayıcıların talaşlı imalatta kullanımına bakıldığında en yaygın kullanılan grafit ve MoS₂ malzemeleridir. Talaşlı imalatta katı yağlayıcılar, toz halinde kesme bölgesine teması sağlanarak kuru işleme olanağı sağlar. Bu olanak sayesinde çevreye ve insan sağlığına verilmeden talaşlı imalatta yağlama etkisini artırarak işlenebilirliği iyileştirir. Yüksek kesme sıcaklıkların meydana geldiği, kuru işleme olanağı bulunmayan işlemlerde geleneksel kesme sıvılarına ve MMY sistemlerine karıştırılarak kesme sıvısı tüketimi azaltarak çevreye daha az zararlı işleme olanağı sağlar.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

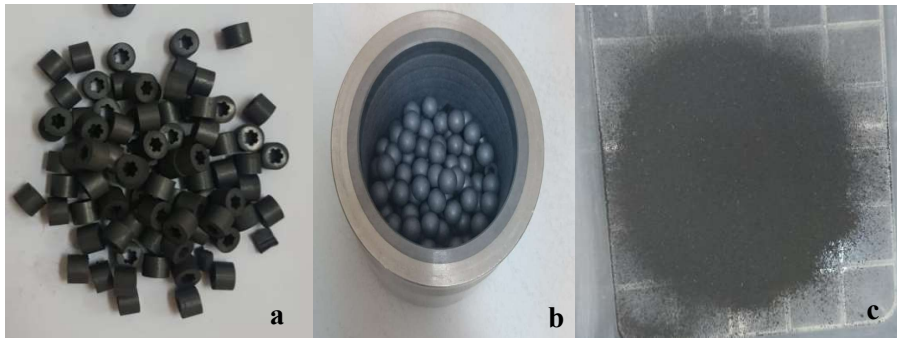
4.1. Takviye Malzeme ve Özellikleri

4.1.1. Grafit

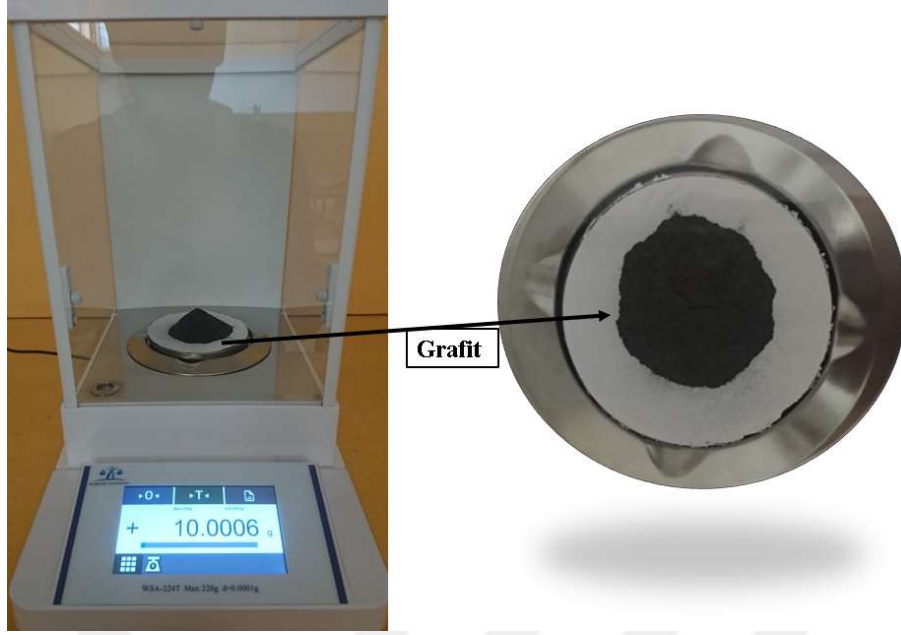
Bu çalışmada karbon esaslı yağlama özelliği yüksek bir malzeme olan grafit takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Altıgen kafes yapısına sahip olan grafitte karbon atomları üst üste geniş ve yassı levhalar şeklinde bağlıdır. Grafit içeriğindeki kovalent bağlar güçlü bir şekilde birbirine bağlanırken, katmanlar arasında bütünlüğü zayıf Van der Waals bağları tutar. Bu zayıf bağlar nedeniyle katmanlar birbiri üzerinde rahatça kaymaktadır [93]. Bu durum grafitin katı yağlayıcı bir malzeme olduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmalarda, metallerle temas eden grafitin yağlama tabakası oluşturduğu belirtilmiştir [94, 95]. Grafit, metal/metal temaslarında gerilmelerin, plastik deformasyonu ve aşınmaları azalttığı ifade edilmiştir [96]. Talaşlı imalatta ise kesme kuvvetleri altında kayan katı yağlayıcı malzeme tabakaları aşınmaları azaltmakta ve yağlama etkilerini sağlamaktadır. Bu sayede çevreye duyarlı işlemler için alternatif malzemeler arasındadır.

Ticari yollarla temin edilen grafit partikülleri Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bilyeli öğütücü de toz haline getirildi. Toz boyutlarının kontrolü sağlanabilmesi için 40-50 µm ölçeklerindeki eleklerde elendi. Grafitin, MMK’ların talaşlı şekillendirmesine ve mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için grafit tozları MMK’lere ağırlıkça%5-10-15-20 oranlarında eklendi. Bu oranların ölçülmesi için Weightlab WSA-224T marka analitik terazide tartımları gerçekleştirildi (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. a) Partikül halindeki grafit. b) Bilyeli öğütücü ile Grafitin toz haline getirilmesi. c) Grafitin 40 µm boyutundaki toz hali

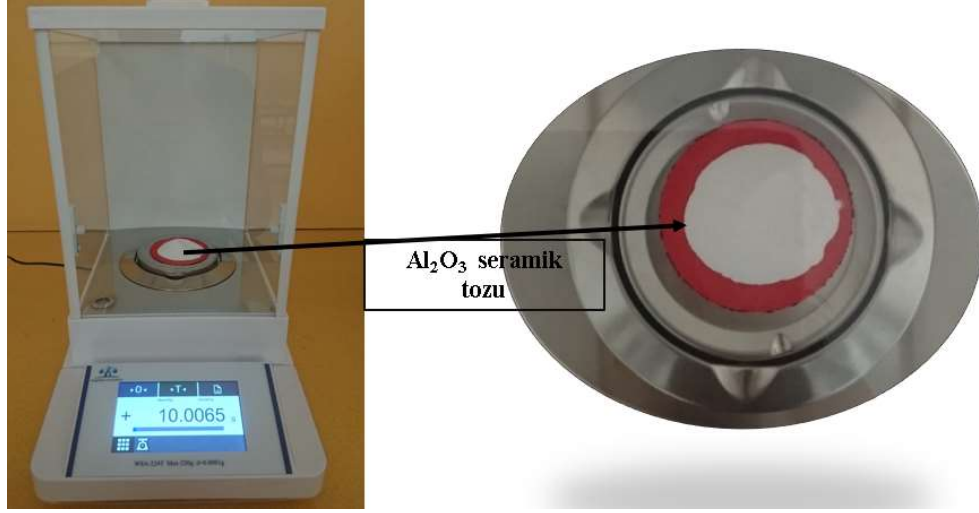


Şekil 4.2. Grafit tozlarının tartım işlemi.

4.1.2. Seramik: Alüminyum oksit (Al_2O_3)

AMMK'lerin özgül mukavemetleri, aşınma dirençleri, yüksek termal iletkenlik gibi özellikleri sayesinde kullanım alanı yaygındır. Bu özelliklerin AMMK'lere kazandırabilmek için farklı takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli AMMK'lerde takviye malzemesi olarak SiC ve Al_2O_3 seramiklerinin kullanımı yaygındır [97]. Özellikle Al_2O_3 seramik malzemelerinin Al ve alaşımlarıyla göstermiş olduğu iyi etkileşim tercih edilme sebepleridir.

Bu çalışma da takviye malzemesinin AMMK'lerde mekanik özelliklere ve işlenmesindeki etkisini belirleyebilmek için Al_2O_3 seramik tozları kullanıldı. Tozlar ticari yolla temin edilerek AMMK'lere ağırlıkça %5 oranlarında takviye edilebilmek için Weightlab WSA-224T marka analitik terazide tartımı gerçekleştirilerek üretim öncesi hazır hale getirildi (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Al₂O₃ seramik tozlarının tartım işlemi.

4.2. Alüminyum Metal Matris Kompozit Üretimi

Bu çalışmada matris malzemesi olarak Al 7075 alaşımı kullanıldı. Al 7075 alaşımı spesifik özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık endüstrilerinde ve yapısal iş parçaları üretiminde kullanımı yaygındır [98]. Al 7075 alaşımına ait kimyasal bileşimi ise Çizelge 4.1 'de verilmiştir [99].

Çizelge 4.1. Al7075 alaşımının kimyasal bileşimi [99]

Element	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	Cr	Zn	Al
Ağırlık (%)	1,84	0,23	0,24	1,45	0,26	0,25	4,78	Kalan

AMMK'ler karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiştir. Alüminyum alaşımları 800 °C sıcaklığında elektrikli eritme ocağında (Şekil 4.4), elektrikli ısıl işlem fırınında grafit ve seramik potalar kullanılarak eritilmesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5).



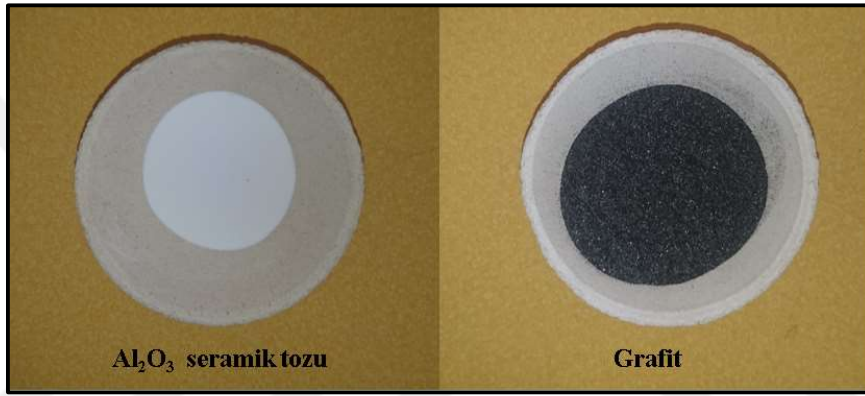
Şekil 4.4. Elektrikli eritme ocağı kullanılarak alüminyum alaşımlarının eritilmesi işlemi.



Şekil 4.5. Alüminyum alaşımlarının grafit ve seramik potalarda eritilmesi.

Döküm yöntemiyle kompozit üretimi gerçekleştirirken matris elemanı ile takviye elemanlarının birbiriyle karışması ve malzemeler arasında uyumun sağlanması önemli bir konudur. Matris elemanının sıvı halde, takviye elemanlarının ise katı halde olması bu malzemelerin birbiriyle karışımında sorunların oluşmasına sebep olur. Bu sorunlar ise üretilen kompozitin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu sorunu ortadan kaldırabilmek için ise matris ve takviye elemanları arasında ıslanabilirliğin iyi olması gerekmektedir. Islanabilirlik etkisi arttırabilmek için önceden hazırlanmış takviye elemanları (Al_2O_3 ve

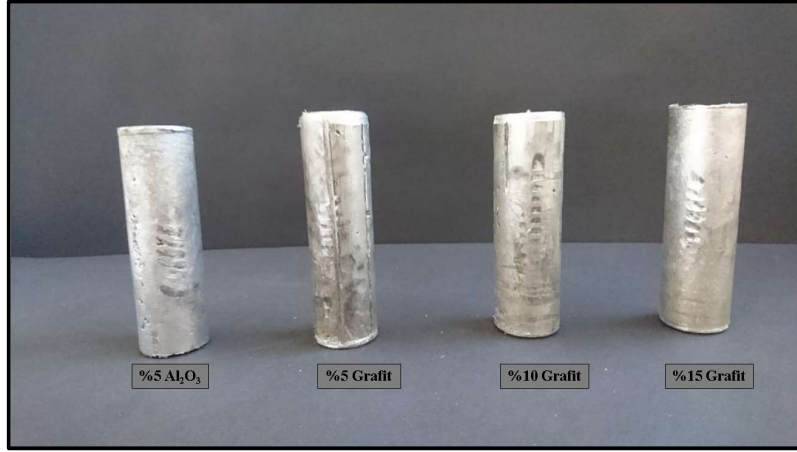
grafit) matris eriyiğe ilave edilmeden önce Skori anakları (Şekil 4.6) kullanılarak ısıl işlem fırınında 800  C'ye ısıtılmıŐtır [100]. Isıtılan takviye malzemeleri grafit potası içerisinde bulunan aluminyum eriyiğine ilave dildi. Toz halinde bulunan takviye elemanlarının homojen bir dağılımı sağlayabilmek için 5 dk aralıklarla eriyiğe karıştırma işlemi uygulanmıŐtır. Karıştırma işlemi sonrası önceden ısıtılan metal kalıplara döküm işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7). Döküm sonrası bütün kompozitler 4 saat boyunca ısıl işlem fırınında 400-450  C sıcaklıklarında homojenleŐtirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemler, seramik ve katı yağlayıcı takviyelerin kompozitin mekanik özelliklerine ve işlenebilirliğe etkisini görebilmek için Al7075 + %5 Al₂O₃ ve Al7075 + %5 Al₂O₃ + % 5-10-15-20 grafit içeriğine sahip numune için gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.6. Takviye malzemelerin Skori döküm çanaklarında ısıtılması.



Şekil 4.7. AMMK'lerin metal kalıplara döküm işlemi.



Şekil 4.8. Döküm yöntemiyle üretilmiş AMMK'ler.

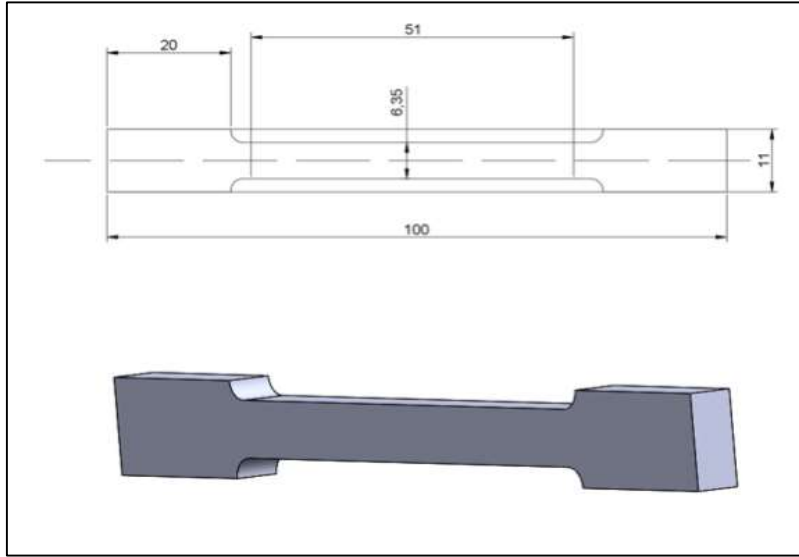
4.3. Alüminyum Metal Matris Kompozitin Karakterizasyonu

Karıştırma döküm yöntemi kullanılarak üretilen AMMK'lerde bulunan takviye elemanlarının dağılımını saptayabilmek için X-ışını (EDX) ve 2500x, 5000x ve 10000x büyütmelede Backscatter SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde kullanabilmek amacıyla üretilen kompozitler parlatma ve dağlama işlemleri uygulanarak analiz için hazırlanmıştır.

AMMK'in mikro yapısal değişimin belirleyebilmek ve yorumlamak için numuneler X-ışını kırınım analizine (XRD) tabi tutulmuştur. Bunun yanında sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen reaksiyonları ve ağırlık değişimlerini tespit edebilmek için Diferansiyel Termal (DTA) ve Termo Gravimetrik (TGA) analizler gerçekleştirilmiştir.

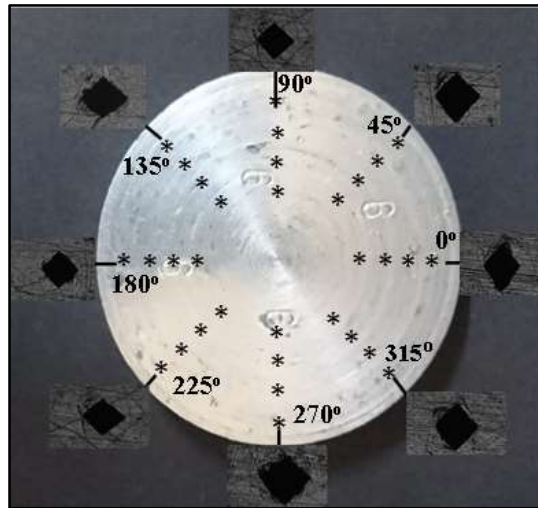
4.4. Alüminyum Metal Matris Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Karıştırmalı döküm yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin mekanik özelliklerin belirlenmesi önemlidir. Takviye elemanlarının karışımdaki oranları mekanik özellikler üzerinde en önemli etkiye sahiptir. Bu etkiyi belirleyebilmek ve yorumlayabilmek için üretilen kompozitler çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri universal çekme test cihazında ve ASTM E8 standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9) [101].



Şekil 4.9. ASTM E8 standartlarında çekme test numunesinin ölçüleri

Bunun yanı sıra takviye malzemelerinin artan oranlarıyla sertlik değerlerindeki değişimi belirleyebilmek ve yorumlayabilmek için AMMK'ler Shimadzu HVM-6 marka Vickers sertlik cihazında sertlik testleri gerçekleştirildi. Bu testler gerçekleştirilirken ASTM E92 standartları dikkate alındı. Kompozit yüzeyindeki girinti ve çıkıntıların sertlik testine etkisini azaltabilmek için numuneler üzerinde 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° ve 315° doğrultu yönünde dört farklı noktadan mikrosertlik ölçümü gerçekleştirildi (Şekil 4.10). Ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması mikro sertlik değerimiz olarak kabul edilmiştir.

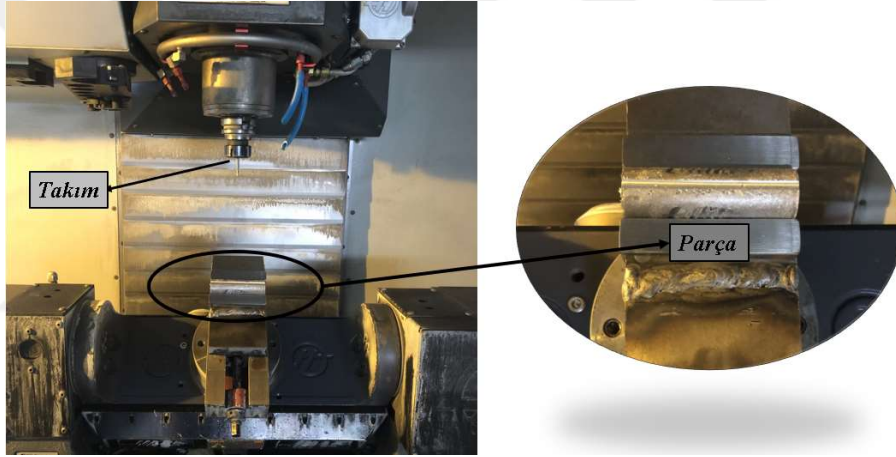


Şekil 4.10. Kompozitin sertlik değerinin ölçülmesi

4.5. Alüminyum Metal Matris Kompozitlerin İşlenmesi

Döküm yöntemiyle üretimi gerçekleştirilen iş parçalarında, imalat sonrası hataların meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu hataların başında döküm yollarının parça da kalması ve yüzey kalitesinin istenilen seviyelerde olmaması gelebilir. Bu hataların giderilebilmesi için iş parçaları tornalama ve frezeleme gibi yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat işlemlerine tabi tutulur.

Bu çalışmada katı yağlayıcı grafit ve Al_2O_3 seramik takviyeli AMMK'ler frezeleme işlemine tabi tutularak kompozitlerin işlenebilirliği tespit edilmeye çalışılmıştır. Frezeleme işlemi HAAS marka 5 eksenli CNC freze tezgahında, çizelge 4.2'de belirtilen işleme parametreleri kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 4.11). Frezeleme işleminde 5 mm dış çapa sahip HSS marka 4 ağızlı parmak freze kesici takımı kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Talaşlı işlemin gerçekleştirildiği HAAS marka 5 eksenli CNC freze tezgahı.



Şekil 4.12. İşlenmiş Al7075 alaşımı ve AMMK'ler.

Çizelge 4.2. AMMK'lerin frezelenmesinde kullanılan işleme parametreleri.

İş Parçası	İlerleme (mm/dev)	Devir Sayısı (dev/dak)
Al7075	0.1 – 0.2 – 0.3	9000 1300 1700
Al7075 + %5 Al₂O₃	0.1 – 0.2 – 0.3	900 1300 1700
Al7075 + %5 Al₂O₃ + %5 Grafit	0.1 – 0.2 – 0.3	900 1300 1700
Al7075 + %5 Al₂O₃ + %10 Grafit	0.1 – 0.2 – 0.3	900 1300 1700
Al7075 + %5 Al₂O₃ + %15 Grafit	0.1 – 0.2 – 0.3	900 1300 1700

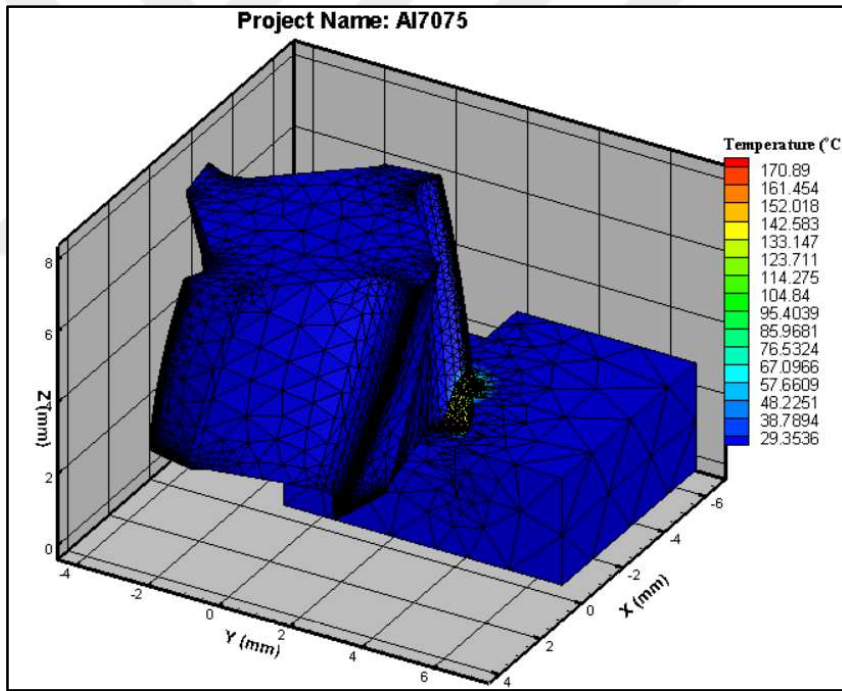
4.6. İşleme Sırasında Meydana Gelen Sıcaklıkların Ölçümü

İş parçası ile takım arasında meydana gelen sürtünmeler yüksek sıcaklıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sıcaklıklar iş parçası üzerinde işlenebilirliği etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle bu sıcaklıkların ölçümü işlenebilirliği yorumlayabilmek için gereklidir.

Bu çalışma da takviye malzeme oranlarının ve işleme parametrelerinin kompozitin işlenmesinde ortaya çıkan sıcaklıkların etkisini belirleyebilmek için Testo 875 marka infrared termal kamera kullanılmıştır (Şekil 4.13). Kullanım öncesinde katalogta belirtildiği üzere metallerin sıcaklık ölçümünün hatasız bir şekilde yapılabilmesi için bilinen sıcaklıklarda stabilizasyon işlemleri gerçekleştirildi. Bunun yanında çevresel şartlara bağlı olarak oluşabilecek hataları gözlemleyebilmek, deneysel olarak yapılan işleme ile karşılaştırmak ve özellikle işleme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisini yorumlayabilmek amacıyla Sonlu Elemanlar Analiz (SEA) metodu kullanılarak frezeleme işlemi yapılmıştır (Şekil 4.14). SEA metodunda Al7075 alaşımının gerçek deneyde kullanılan işleme parametreleri dikkate alınmıştır.



Şekil 4.13. Frezeleme işlemesi sırasında sıcaklık değerinin termal kamera ile ölçülmesi.



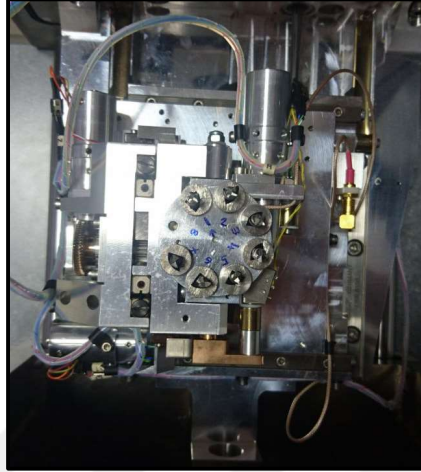
Şekil 4.14. SEA metodu ile gerçekleştirilen frezeleme işlemi.

4.7. İşleme Sonrası Yüzey Kalitesi ve Takım Aşınmalarının Belirlenmesi

Metal işleme yöntemlerinde talaş kaldırma esnasında takım ile iş parçası arasındaki etkileşim takımların aşınmalarına ve takım ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durumlar işleme maliyetlerin artmasına, işlenen yüzeyin kalitesinin ise azalmasına neden

olur. Yapılan bu deneysel çalışmada işleme parametrelerinin ve özellikle katı yağlayıcı takviyelerin, takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerine etkisi belirlendi.

Farklı grafit ve Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin işlenmesinde kullanılan takımların taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntüleri alınmıştır. Alınan bu görüntüler üzerinde takım aşınma tipleri ve boyutları tartışılmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Frezeleme işleminde kullanılan takımlarının görüntülerinin alınması (SEM).

Takım aşınmalarının, takviye ve işleme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisini belirleyebilmek için yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirildi. Yüzey pürüzlülük ölçümünde hassasiyeti $0.001 \mu m$ olan TIME TR-200 cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.15). Ölçümler, cut off mesafesi 0.8 mm , prob ilerleme hızı 0.5 mm/s alınarak R_a cinsinden belirlenmiştir. Ölçümde meydana gelebilecek hataları önleyebilmek için işlenmiş yüzey üzerinde 10 mm mesafe aralıklarında ölçümler yapıldı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri kabul edildi.



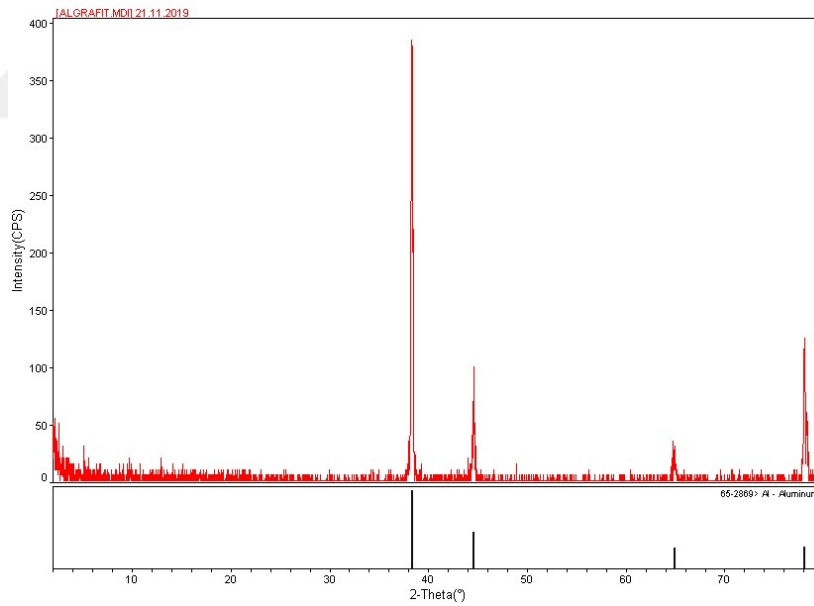
Şekil 4.15. İşlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan deneyler sonucunda katı yağlayıcı grafit ve Al_2O_3 seramik takviyelerin, AMMK'nin karakterizasyonunu, mekanik özelliklerini ve farklı işleme parametrelerinde işlenebilirliğini etkilediği belirlenmiştir. Bu etkilerin sonuçları ve yorumları ayrı başlıklar altında aşağıda ifade edildi.

5.1. Alüminyum Metal Matris Kompozitin Karakterizasyonu

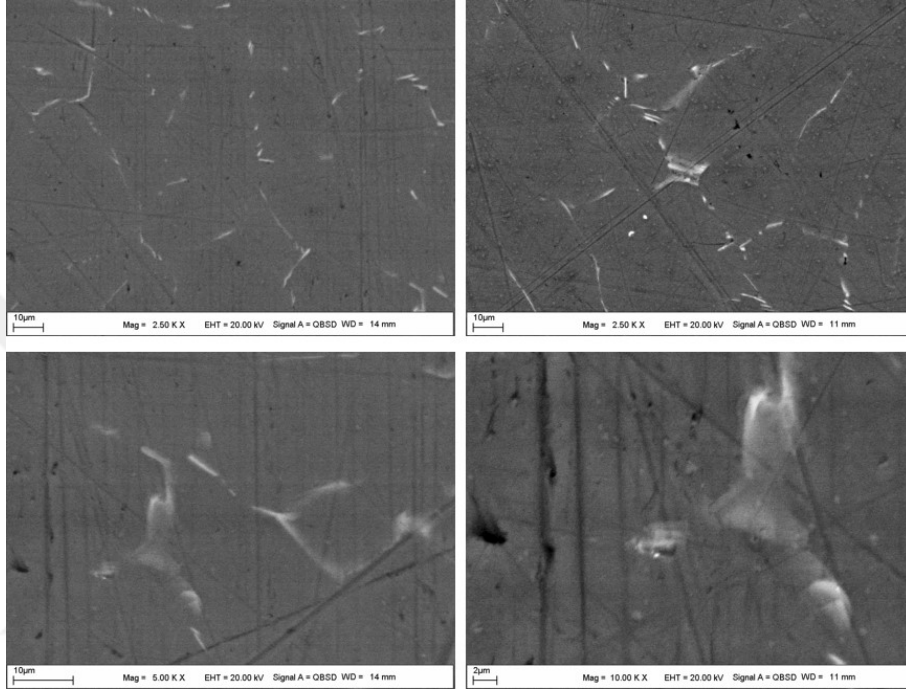
$Al7075 + \%5 Al_2O_3 + \%10$ grafit kompozitine ait XRD sonuçları Şekil 5.1'de verilmiştir. Grafik göz önüne alındığında saf ve keskin kristalin Al üzerinde olduğu belirlenir. Özellikle 38.35, 44, 58, 64.94 ve 78.11 2θ değerlerinde Al yapısına ait pikler görülmektedir. Genel X-Ray cihazı kütüphanesi verilerine göre %99,9 tutarlılıkla Al yapısına ait 2.34, 2.03, 1.43 ve 1.22 ankstro-d tabaka aralığında pikler yapıyı doğrulamaktadır. İlgili pik yapısına grafit gruplarının girmesiyle 10-20 θ aralığında amorf bir zemin kayması gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. $Al7075 + \%5 Al_2O_3 + \%10$ grafit kompozitine ait XRD sonucu

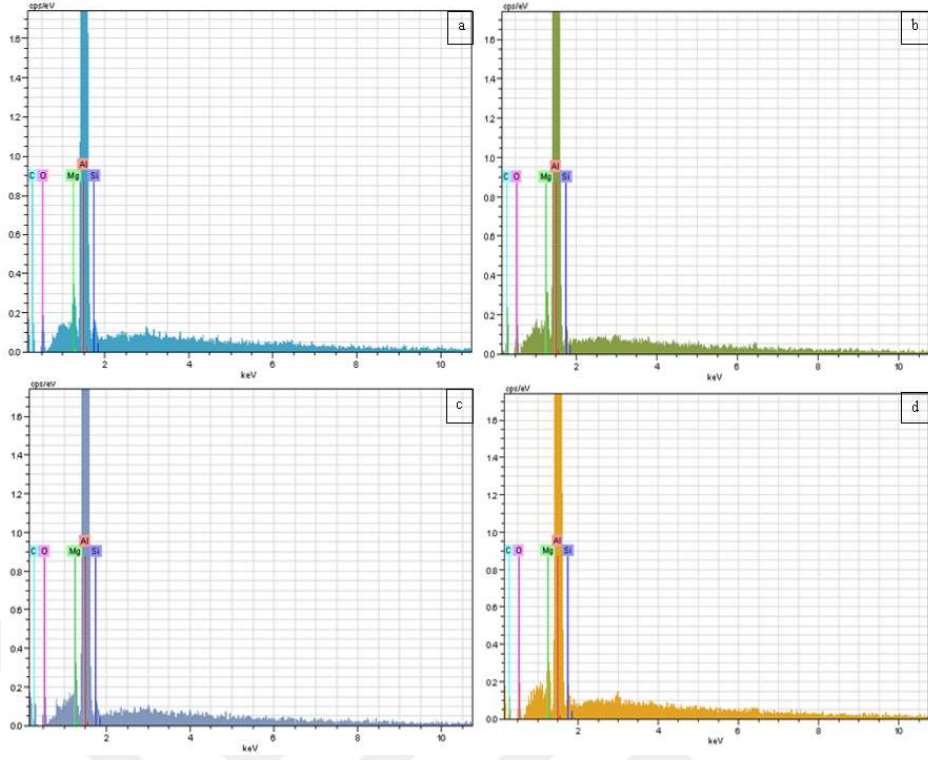
Grafit katkılı Al yapısına ait Backscatter SEM görüntüleri Şekil 5.2'da verilmiştir. Yapılan analizde kullanılan numunelerin yüzeyinden 2500x, 5000x ve 10000x büyütmelerde görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler incelendiğinde üç faz farkı görülmekte olup siyah görünen fazlar grafit katkısından kaynaklanmaktadır. Özellikle küçük büyütmelerde grafit yapısının alüminyum yapısının içerisine homojen dağıldığı net olarak görülmektedir. Şekil

üzerinde parlak ve beyaz renkte görülen fazlar büyük bir çekirdekten kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu bölgelerin Al alaşım yapısındaki Fe atomlarından kaynaklandığı ifade edilebilir. C fazları Fe fazlarına göre daha homojen dağılmış olarak görülmektedir. Şekil 5.2'deki gri bölgeler ise alüminyum ana faz yapısını göstermektedir. Bu fazların detaylı analizleri ve her bir fazın element yapısının net olarak belirlenmesi için EDX spektrumları da alınmıştır.



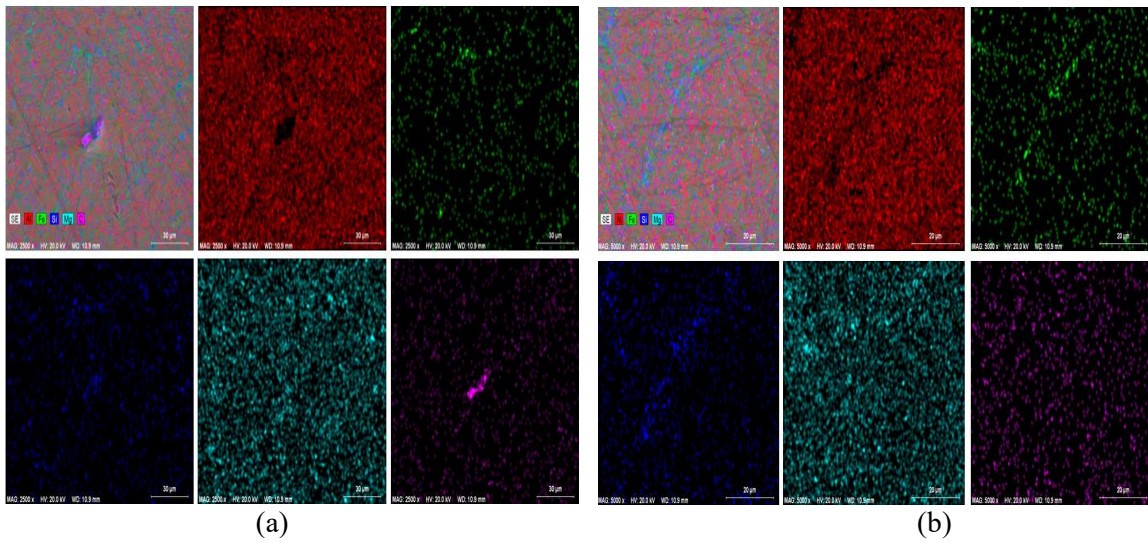
Şekil 5.2. Kompozite ait SEM-BS görüntüleri

Grafit gruplarının yapıya dahil olduğu EDX analizinde doğrulanmıştır (Şekil 5.3). EDX spektrumunda 4 farklı lokasyon alınmış spektral dotalar bulunmaktadır. Bu lokasyonlar üzerinde karbon (C), alüminyum (Al), magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) pikleri net bir şekilde görülmektedir. 4 farklı lokasyonda karbon yani grafit varlığı incelendiğinde I. lokasyonda yaklaşık olarak %4,87, II. lokasyonda %8,28, III. lokasyonda %4,97 ve IV. lokasyonda %5,65 karbonun varlığını göstermektedir. Özellikle II. lokasyon bölgesinde grafitin bazı bölgelerde gruplandığı da ifade edilebilir. Gerek karbona ait 0.227 keV α pikinde, gerekse X-Ray spektrumundaki amorf yapı kaymasında kompozit içeriğinde grafitin varlığı görülmektedir.



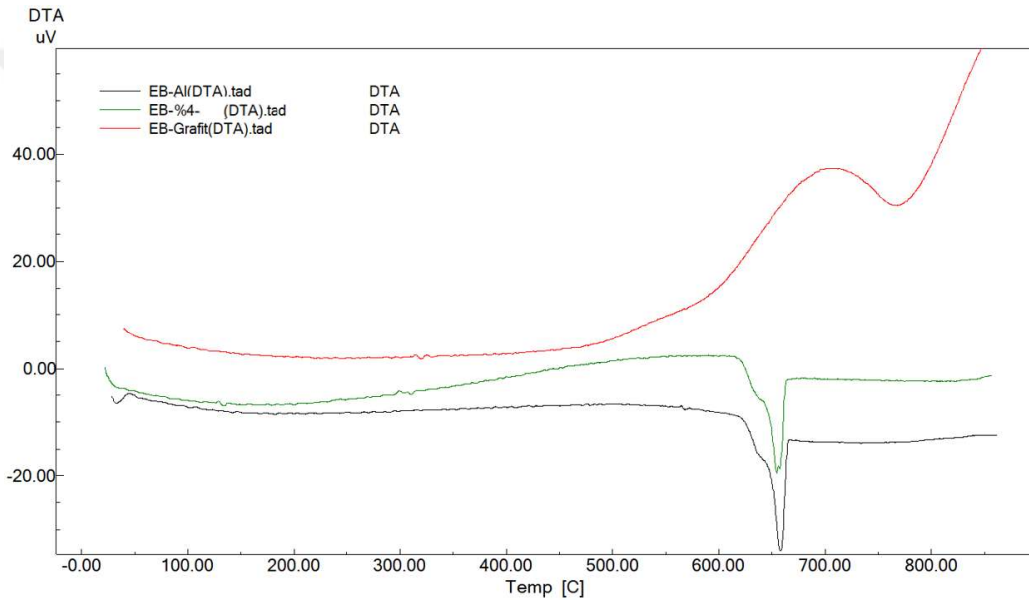
Şekil 5.3. a) I. lokasyon b) II. lokasyon c) III. lokasyon d) IV. lokasyona ait EDX sonuçları

Şekil 5.4'a ve b'de 2500x ve 5000x büyütmelerde malzeme yüzeyine ait element haritaları verilmiştir. Her iki şekilde de Al, Fe, Si, Mg ve C elementlerinin homojen dağıldığı ve kümelenmenin çok az olduğu ifade edilebilir. Özellikle C yani grafit varlığı net olarak tespit edilmiştir ve 5000 x büyütmede oldukça homojen bir C dağılımı görülmektedir. Bu sonuçlarla beraber değerlendirildiğinde istenilen yapının elde edildiği anlaşılmaktadır.



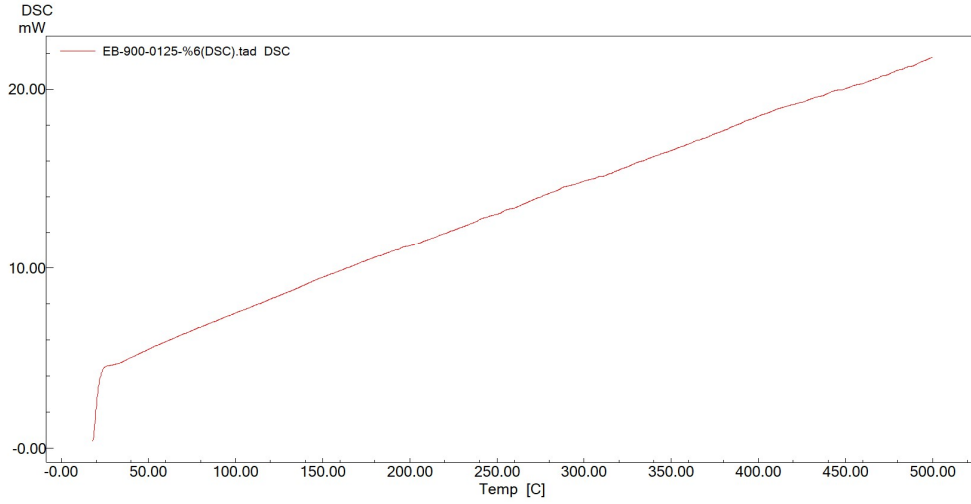
Şekil 5.4. a) 2500X büyütmede ki element haritası, b) 5000X büyütmede ki element haritası.

Saf grafit, Al7075 alaşımı ve grafit takviyeli AMMK'e ait DTA termogramları Şekil 5.5 de verilmiştir. Saf grafitte ait termogram üzerinde 450 °C de başlayıp, yaklaşık 750 °C'de sonlanan geniş bir egzoterm piki görülmektedir. Bu egzoterm karbon yapısının dekompozisyonundan dolayı meydana gelmektedir. Al7075 yapısına ait DTA termogramı incelendiğinde ise 660 °C sıcaklığında net bir erime piki görülmektedir. Grafit takviyeli AMMK'e ait termogram incelendiğinde ise 400 °C'de başlayarak 700 °C sıcaklıklarına kadar süren bir background yükselmesi görülmüştür. Bu yapıdaki karbon kütlelerinin dekompozisyonundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca grafit yapısı MMK yapısına dahil olduğu için erime pik başlangıç sıcaklığı da düşmektedir. Bu bulgular istenen yapının elde edildiğini göstermektedir.



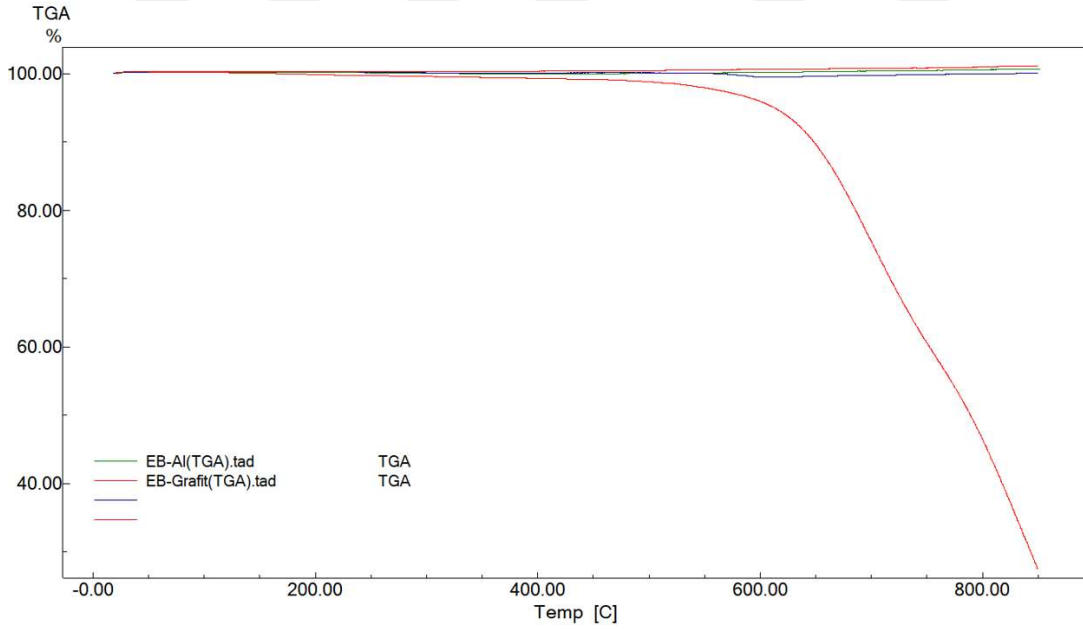
Şekil 5.5. Kompozite ait DTA analiz eğrisi

Şekil 5.6'da verilen DSC termogramına bakıldığında düzenli ısınan ve termal stabilitesini koruyan bir yapı görülmektedir. Yapıya dahil olmuş olan takviye malzemeleri erime sıcaklığını 500 °C'nin altına düşürmediği için Al alaşımının uygulama sıcaklığı korunmuştur.



Şekil 5.6. Kompozite ait DSC analiz eğrisi

Şekil 5.7’de saf grafit, Al7075 ve AMMK’e ait TGA termogramları verilmiştir. Termogram incelendiğinde Al7075 alaşımında kütle kaybının olmadığı görülmektedir. Saf grafit yapısına ait termogram incelendiğinde yaklaşık 400 °C’de başlayıp keskin bir kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Hazırlanan kompozit yapısına ait termogram incelendiğinde 550 °C’de başlayan ve 650 °C de son bulan %3,9’luk bir kütle düşüşü tespit edilmiştir. Bu düşüş grafit yapısının termal dekompozisyonundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.7. Kompozite ait TGA termogramı.

5.2. Alüminyum Metal Matris Kompozitin Mekanik Özellikleri

Kompozit üretiminde takviyelerin oranlarına bağlı olarak mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir [102]. Bu çalışmada, Katı yağlayıcı grafit ve seramik Al_2O_3 takviyelerinin ağırlıkça değişen oranlarına bağlı olarak AMMK'nin mekanik özelliklerine etkisini görebilmek için yapılan mekanik testlerin yorumlanması iki ayrı başlık altında ifade edilmiştir.

5.2.1. Çekme testi

Universal çekme test cihazında, ASTM E8 standartları dikkate alınarak yapılan çekme testleri sonucu Çizelge 5.1'de verilmiştir. Al7075 alaşımı ve Al7075 + %5 Al_2O_3 kompoziti göz önüne alındığında akma ve çekme dayanımı sırasıyla %5.55 ve %8.55 oranlarında artışlar meydana gelmiştir. Al7075 + %5 Al_2O_3 ve Al7075 + %5 Al_2O_3 + %5 Grafit kompozitlerinin dayanım değerleri sırasıyla %2,3 ve %1,95 değerlerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Al7075 + %5 Al_2O_3 + %5 Grafit ve Al7075 + %5 Al_2O_3 + %10 Grafit oranlarına sahip kompozitlerin akma ve çekme değerleri sırasıyla %1,88 ve %2.34 değerlerinde düşüşler yaşanmıştır. Bunun yanı sıra Al7075 + %5 Al_2O_3 + %10 Grafit ve Al7075 + %5 Al_2O_3 + %15 Grafit kompozitlerinin dayanım değerleri ise %4.121 ve %2.13 oranlarında azalmalar gerçekleşmiştir. Çizelge 1 ve değişim oranları göz önünde bulundurulduğunda Al_2O_3 seramik varlığı, AMMK'nin akma ve çekme dayanımını artmasını sağlamıştır. Grafitin değişen oranları ile AMMK'nin dayanım değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Genel olarak bakıldığında, seramik gibi dayanımı yüksek malzemeler AMMK içeriğinde güçlendirme amacıyla kullanılmaktadır [97]. Bu çalışmada kullandığımız Al_2O_3 seramik takviyesi AMMK içeriğinde deformasyonu engelleyici rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra sert takviyenin sünek matriste yer alması termal uyumsuzluğa bağlı olarak dislokasyon yoğunluğundaki artışa neden olmaktadır [103]. Bu yoğunluktaki artış ise mukavemetin artması ile sonuçlanır. Al alaşımları ile Al_2O_3 arasındaki güçlü ara yüzey bağı mekanik özellikler üzerinde iyileşmeler olmasını da sağlamaktadır. Diğer bir takviye malzemesi olan katı yağlayıcı grafit malzemesinin dayanımı azaltma yönündeki etkisi, grafitin yumuşak bir yapıya sahip olması ve matris malzemesi içerisinde bu yumuşak yapının yer alması ile açıklanabilir [104]. Takviye oranları ile birlikte uzama değerlerindeki değişimlere bakıldığında, artan takviye oranlarıyla birlikte uzama miktarlarında azalmalar olduğu görülmüştür. Al7075 alaşımı ve Al7075 + %5 Al_2O_3 kompoziti arasında uzama miktarlarında %6,3, Al7075 + %5 Al_2O_3 ve Al7075 + %5 Al_2O_3

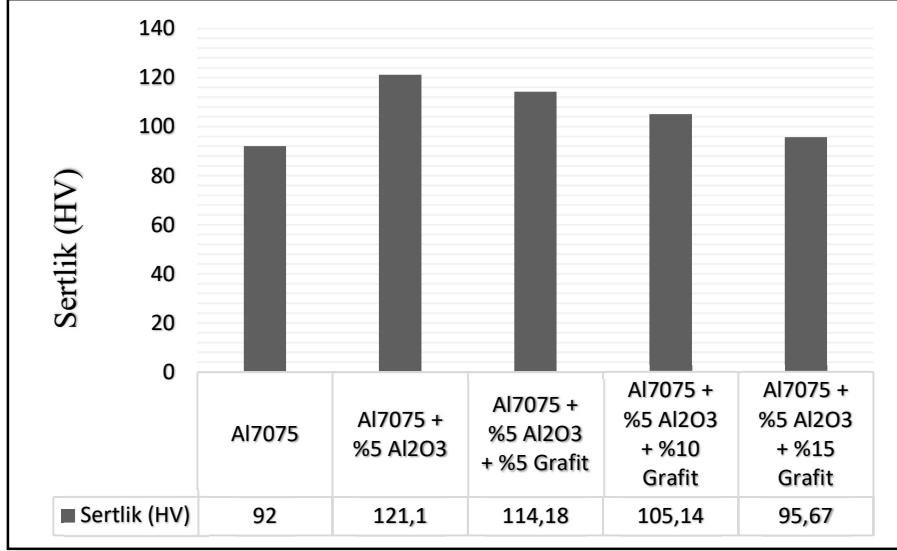
+ %5 Grafit kompozitler arasında %7,3, Al7075 + %5 Al₂O₃ + %5 Grafit ve Al7075 + %5 Al₂O₃ + %10 Grafit kompozitleri arasında %9,69, Al7075 + %5 Al₂O₃ + %10 Grafit ve Al7075 + %5 Al₂O₃ + %15 Grafit kompozitleri arasında %7.38 değerlerinde azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Al₂O₃ seramiğinin sert yapısı ve grafitin yumuşak bir malzeme olmasına rağmen doğada kırılabilirlik özellik göstermesi AMMK malzemesinin kırılabilir bir özellikte olmasına neden olmaktadır. Takviye oranlarının artması sünek matris malzeme varlığının azalmasına ve yüzde uzama miktarlarında düşüşlerin meydana gelmesine yol açmıştır [105].

Çizelge 5.1. AMMK'nin dayanım ve uzama değerleri.

İş parçası	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Al7075	108	221	19
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	114	239.9	17.8
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	111.3	235.2	16.5
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	109.2	229.7	14.9
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	104.7	224.8	13.8

5.2.2. Sertlik testi

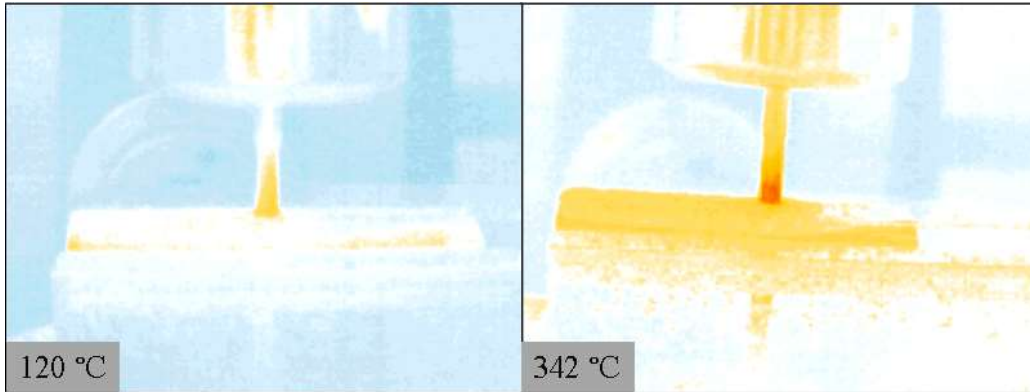
Takviye malzemelerinin AMMK malzemesindeki sertlik değerlerine etkisini belirleyebilmek için ASTM E92 standartlarında gerçekleştirilen Vickers sertlik testi değerlerinin ortalamasına ait grafik Şekil 5.8'de verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucu Al₂O₃ seramik takviyesi ile elde edilen AMMK (Al7075 + %5 Al₂O₃) malzemesinin sertlik değeri, Al7075 alaşımının sertlik değerine oranla %31,6 değerinde bir artış gerçekleşmiştir. Bu artış Al₂O₃ malzemesinin, Al7075 alaşım matrisine göre daha sert bir yapıya sahip olmasındandır. Takviye ile dislokasyon yoğunluğu daha da artarak sertliğin artmasına neden olur. Bunun yanı sıra Al alaşımları ile Al₂O₃ arasında yüksek uyumluluğun bulunması daha güçlü bir yapıya ve sertliğin artmasını sağlamaktadır [103]. Al7075 + %5 Al₂O₃ kompozit içeriğine ikincil takviye olarak eklenen grafitle birlikte sertlik değerlerinde düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu düşüşler artan grafit oranına bağlı olarak sırasıyla %5,71, %7,91 ve %8,99 oranlarındadır. Grafit miktarının ağırlıkça artmasıyla sertlik değerlerinde meydana gelen azalmalar, grafitin yumuşak bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır [106]. Bu sertlik değerlerindeki düşüşün sebebi, artan grafit miktarıyla kompozitin bazı bölgelerinde grafit toplanmalarının yaşanması ve homojenliğin azalmasından da kaynaklı olabilir.



Şekil 5.8. AMMK malzemesine ait sertlik değerleri.

5.3. Talaşlı İşleme Sırasında Meydana Gelen Sıcaklıklar

Yapılan deneysel çalışmada kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklıklar termal kamera yardımıyla ölçümü gerçekleştirildi ve ölçülen değerlerin ortalaması sıcaklık değeri olarak kabul edildi. Al7075 ve farklı oranlarda takviye edilerek üretilen AMMK malzemesinin farklı işleme parametrelerinde meydana gelen kesme bölgesi sıcaklıkları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge 5.2’ye bakıldığında işleme sırasında meydana gelen en yüksek sıcaklıklar, %5 Al₂O₃ seramik takviyeli AMMK malzemesinde 0.3 mm/dev ve 1700 dev/dak işleme parametrelerinde 342 °C olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama sıcaklık ise ağırlıkça %5 Al₂O₃ ve %15 grafit takviyeli AMMK malzemesinin 900 dev/dak ve 0.1 mm/dev işleme parametreleriyle işlenmesi sırasında 120 °C olduğu belirlenmiştir.



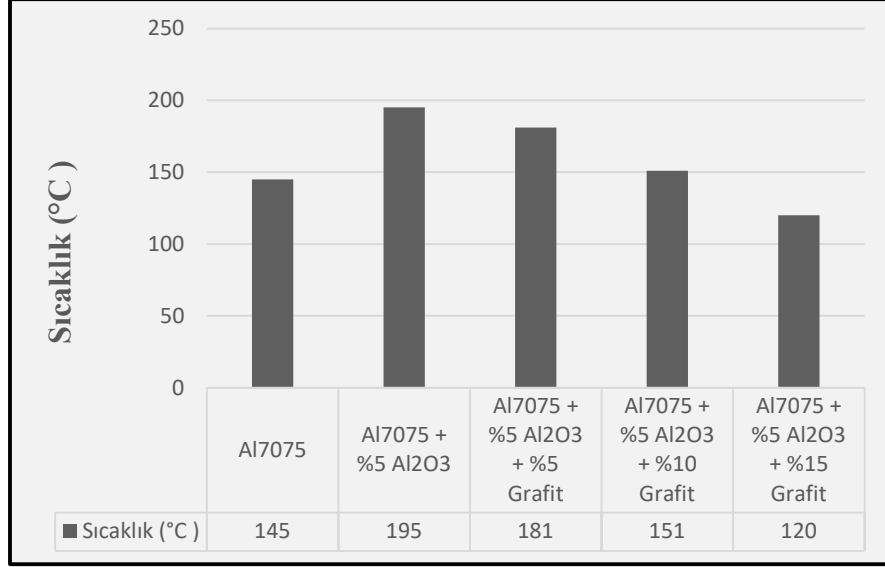
Şekil 5.9. Kesme bölgesinde ölçülen en yüksek ve en düşük sıcaklıklar.

Çizelge 5.2. İşleme sırasında meydana gelen sıcaklık değerleri.

İŞ PARÇASI	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme (mm/dev)	Sıcaklık (°C)
Al7075	900	0.1	145
Al7075	900	0.2	178
Al7075	900	0.3	227
Al7075	1300	0.1	149
Al7075	1300	0.2	195
Al7075	1300	0.3	228
Al7075	1700	0.1	170
Al7075	1700	0.2	221
Al7075	1700	0.3	258
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	900	0.1	195
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	900	0.2	229
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	900	0.3	271
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1300	0.1	221
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1300	0.2	257
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1300	0.3	298
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1700	0.1	248
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1700	0.2	289
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1700	0.3	342
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	900	0.1	181
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	900	0.2	208
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	900	0.3	247
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1300	0.1	203
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1300	0.2	236
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1300	0.3	272
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1700	0.1	231
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1700	0.2	264
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1700	0.3	316
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	900	0.1	151
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	900	0.2	189
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	900	0.3	214
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1300	0.1	184
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1300	0.2	207
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1300	0.3	231
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1700	0.1	217
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1700	0.2	238
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1700	0.3	269
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	900	0.1	120
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	900	0.2	152
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	900	0.3	186
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1300	0.1	146
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1300	0.2	171
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1300	0.3	198
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1700	0.1	182
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1700	0.2	197
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1700	0.3	235

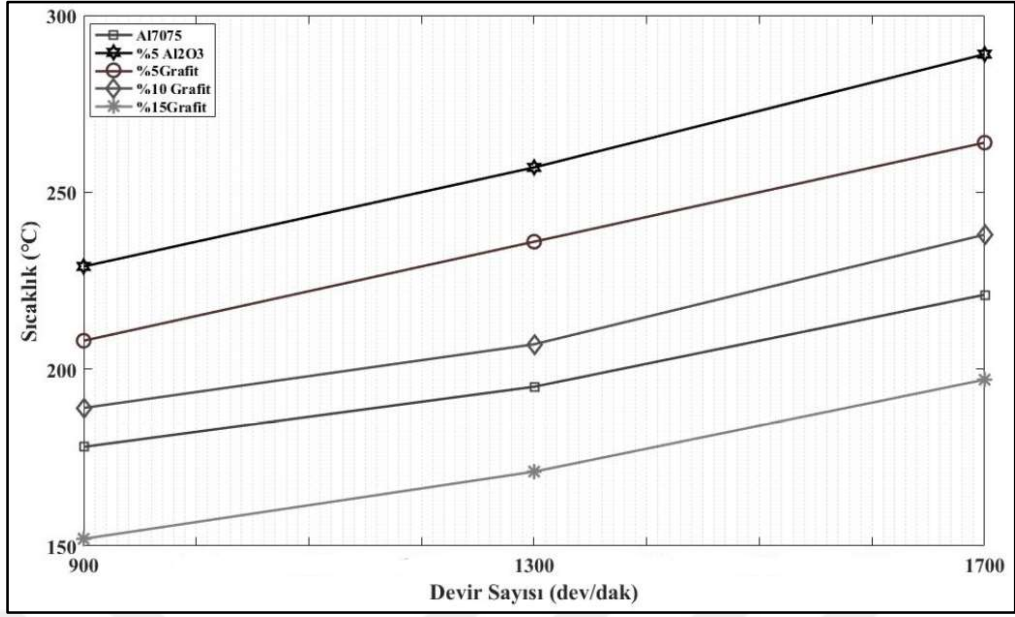
Takviye malzemelerinin ve ağırlıkça oranlarının işleme sırasında meydana gelen sıcaklıklara etkisini görebilmek ve yorumlayabilmek için Şekil 5.9 çizdirilmiştir. Şekildeki değerler aynı işleme parametrelerinde (900 dev/dak ve 0.1 mm/dev) meydana gelen sıcaklık değerleridir.

Şekil 5.9'a bakıldığında en yüksek sıcaklıklar ağırlıkça %5 Al₂O₃ takviyeli AMMK malzemesinin işlenmesinde 195 °C, en düşük sıcaklıklar ise %5 Al₂O₃ ve %15 Grafit takviyeli AMMK malzemesinin işlenmesinde 120 °C olarak ölçülmüştür. Genel olarak bakıldığında, Al₂O₃ seramik malzemesi işleme de meydana gelen sıcaklıkları arttırmaya yönelik bir etki göstermiştir. AMMK malzemesi içeriğinde bulunan sert seramik takviyesinin aşındırıcı özellikleri iş parçası ve takım arasında sürtünmeyi arttırarak, sıcaklık değerlerinde artışların meydana gelmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra Al₂O₃ seramik malzemenin AMMK malzemesi içeriğinde sert bir yapı oluşturarak plastik deformasyonu engelleyici rol oynaması ve güç tüketimini arttırması işleme sırasında meydana gelen sıcaklıkların artması yönünde etki etmektedir. Grafit takviyesinin AMMK'nin işlenmesinde meydana gelen sıcaklıklara etkisine bakıldığında, ağırlıkça artan grafit ile birlikte sıcaklıkların azaldığı ölçülmüştür. Grafitin AMMK malzemesine kazandırdığı yağlama özelliğiyle, takım/iş parçası ve takım/talaş arasında sürtünmenin azaldığı ve sürtünmeden kaynaklı sıcaklıklarda düşüşlerin meydana geldiği ifade edilebilir. Grafitin kompozit iş parçası içeriğinde bulunması, takımın talaş kaldırma süresince grafit varlığıyla etkileşim halinde olmasını sağlayacaktır. Bu etkileşim ve grafitin yağlayıcı özelliği sayesinde işleme esnasında ihtiyaç duyulan yağlanma sağlanmış olur. Bu yağlanma ile birlikte sürtünmelerin azalması, sıcaklıkları düşürme yönünde etki eder. Bu durum, literatürdeki katı yağlayıcıların sürtünme ve aşınma davranışları üzerine yapılan çalışmalar tarafından da desteklenmektedir [49]. Grafit takviyeli AMMK malzemelerin frezelenmesinde kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklıkların azalması, grafitin yapısı gereği ince kaygan bir film yapısı oluşturması ile de ilişkilendirilebilir. Oluşan ince kaygan film yapısı sayesinde kesme mukavemetinde düşüşler yaşanır [107]. Bu mukavemet düşüşleri kesme ve sürtünme kuvvetlerinde azalmalar sağlayarak kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklıkların düşmesine neden olur.



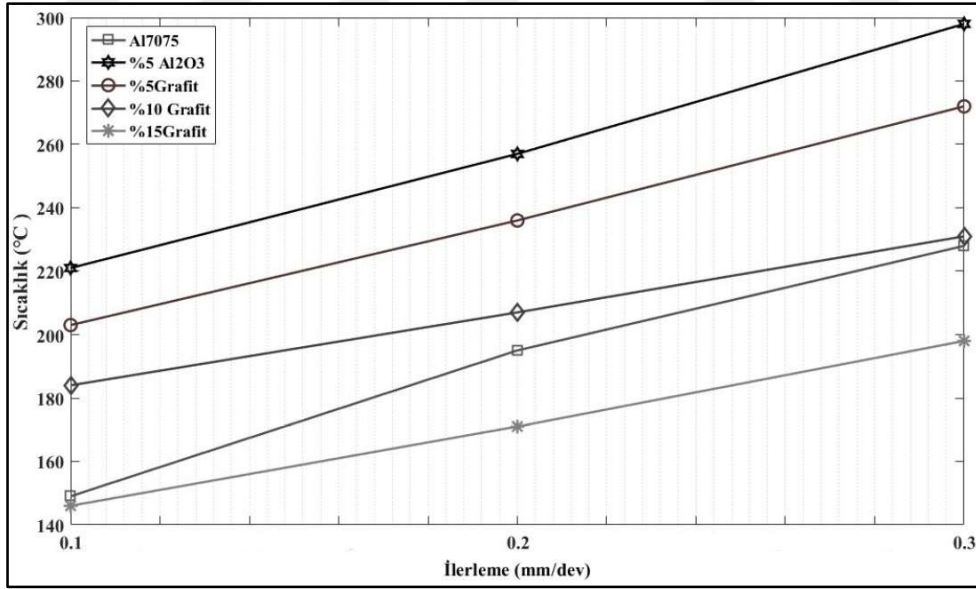
Şekil 5.10. Takviye malzemelerin ve ağırlıkça oranlarının sıcaklığa etkisi.

İşleme parametrelerinden devir sayısının işleme sırasında meydana gelen sıcaklıklara etkisini görebilmek ve yorumlayabilmek için Şekil 5.10 çizdirilmiştir. Şekildeki değerler değişen devir sayısı ve sabit ilerleme (0.2 mm/dev) parametrelerinde meydana gelen sıcaklık değerleridir. Şekil 5.10 incelendiğinde Al7075 alaşımının işlenmesinde devir sayısının 900 dev/dak dan 1300 dev/dak 'ya çıkması ile %9.55, %5Al₂O₃ takviyeli AMMK'nin işlenmesinde %12,22 oranlarında yükseldiği ölçülmüştür. Ağırlıkça %5, 10 ve 15 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde ise sıcaklıkların sırasıyla %13.46, %9.52 ve %12,55 oranlarında yükselmiştir. Genel olarak bakıldığında, devir sayısının artmasına bağlı olarak ölçülen ortalama sıcaklıklarda yükselişlerin meydana geldiği görülmektedir. Artan devir sayısı ile takım/iş parçası arasındaki plastik deformasyon hızının artmasına ve artacak sürtünmeyle ortalama sıcaklıkların yükselmesi ile açıklanabilir. Literatürde belirtildiği üzere devir sayısının artması ile plastik deformasyon hızı ve sisteme giren enerji artışı meydana gelmektedir, bu artışlar sıcaklığın yükselmesine sebep olur [108].



Şekil 5.11. Devir sayısının sıcaklık değerlerine etkisi (0.2 mm/dev).

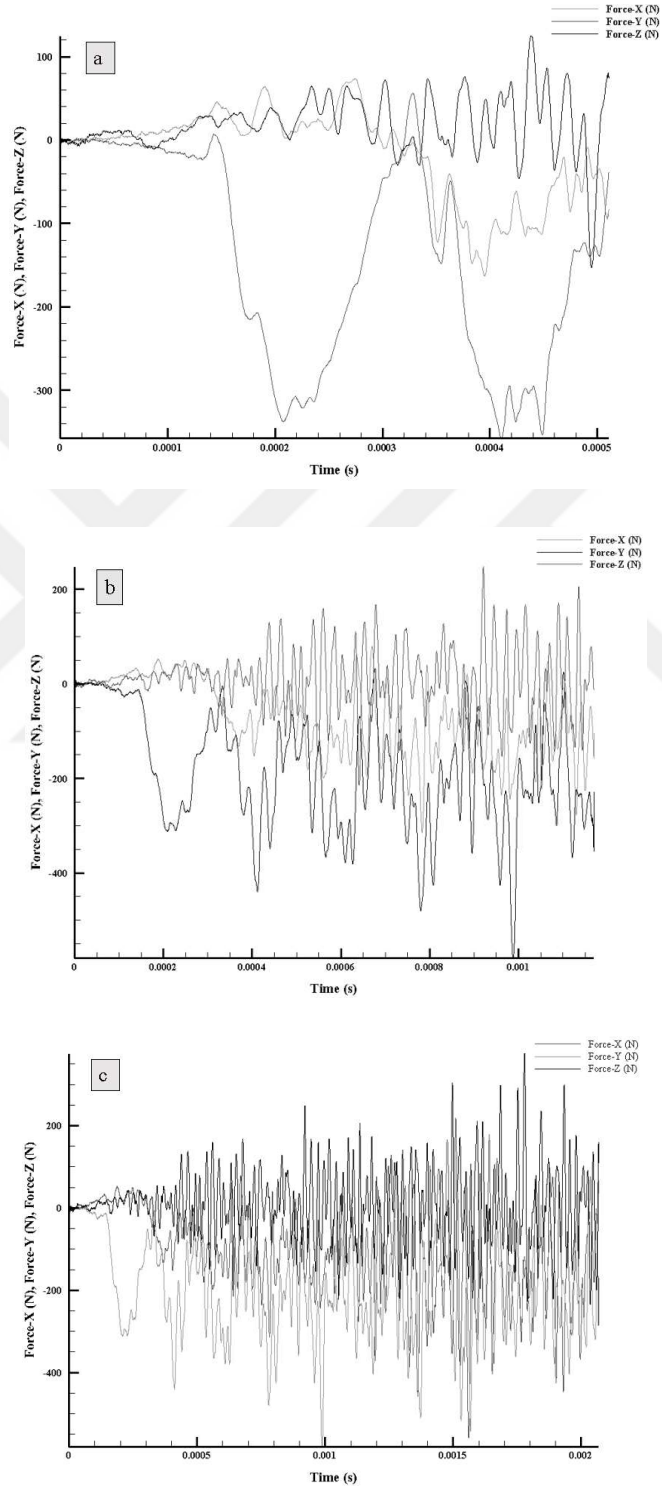
İşleme parametrelerinden ilerlemenin işleme sırasında meydana gelen sıcaklıklara etkisini görebilmek ve yorumlayabilmek için Şekil 5.11 çizdirilmiştir. Şekilde yer alan değerler değişen ilerleme ve sabit devir sayısı (1300 dev/dak) parametrelerinde meydana gelen sıcaklık değerleridir.



Şekil 5.12. İlerlemenin sıcaklık değerlerine etkisi (1300 dev/dak).

Şekil 5.11 incelendiğinde artan ilerleme değerleri ile birlikte ölçülen ortalama sıcaklıklarda artışların meydana geldiği görülmektedir. Artan ilerleme değerleri birim zamanda kaldırılan talaş miktarını arttırarak takım ve talaş arasında yığılmaların oluşmasına neden olur, buna bağlı olarak sıcaklıkların yükselmesi gerçekleşir. Bunun yanı sıra artan

ilerleme ile sürtünmenin ve kesme kuvvetlerinin artmasına sebep olmaktadır [109]. Bu artışlar doğrudan sıcaklığın artmasına da etki etmektedir [110]. SEA modellemede elde edilen verilere göre artan ilerleme ile birlikte kuvvetlerin 100-150 N değerlerinde arttığı belirlenmiştir (Şekil 5.12).

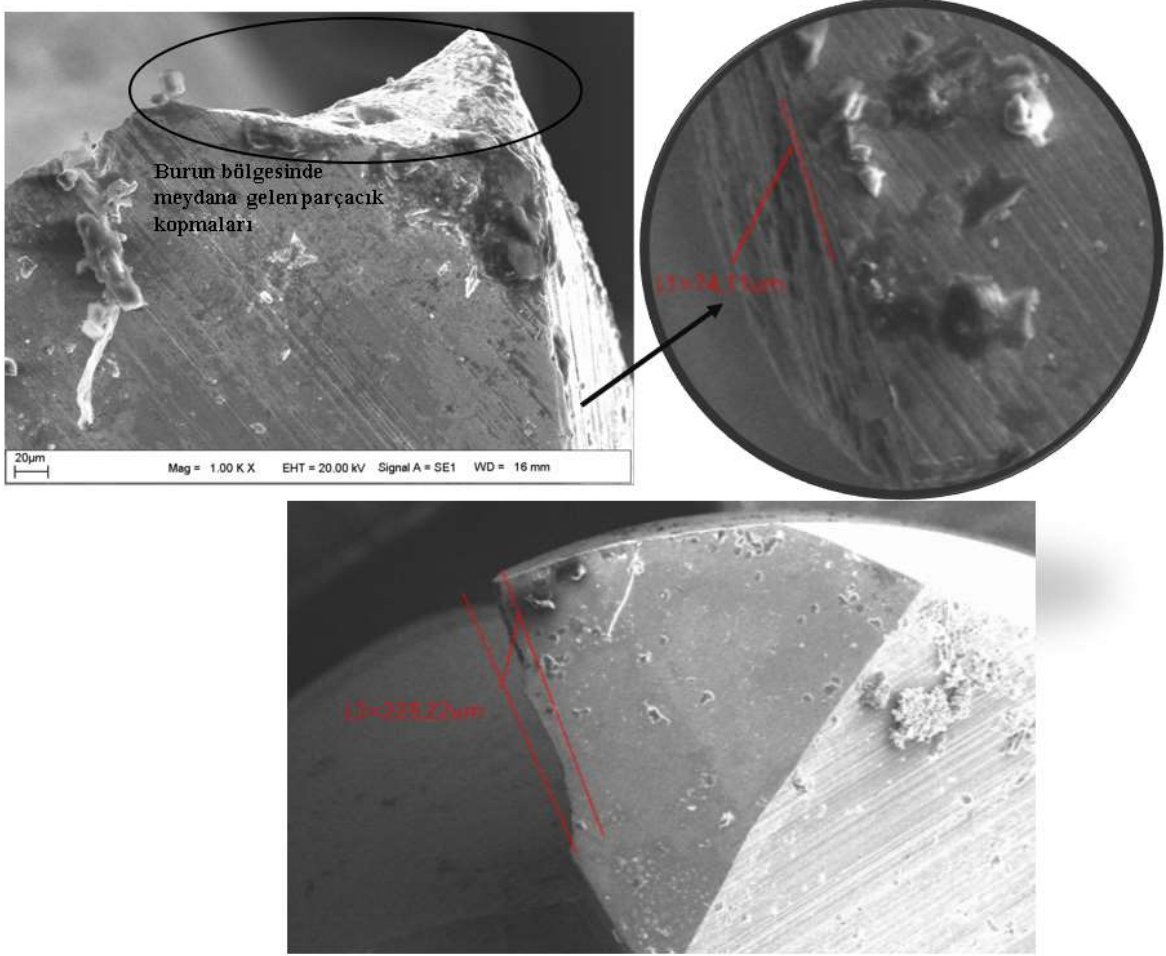


Şekil 5.13. İlerleme değerlerinin değişimine bağlı SEA kuvvet sonuçları. a) 0.1 mm/dev b) 0.2 mm/dev c) 0.3 mm/dev.

5.4. İşlemede Kullanılan Takımlarda Meydana Gelen Aşınmalar

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan takımlarda meydana gelen aşınmaların tespiti ve optimizasyonu işleme prosesinde önemli bir konudur. Takım aşınmalarının boyutu ve tipi yüzey kalitesini etkileyeceği gibi takım ömürlerinin de işleme maliyeti üzerinde etkisi bulunmaktadır. Yapılan bu deneysel çalışmada AMMK'lerin frezelenmesinde kullanılan takımların aşınmasına takviye malzemelerin ve işleme parametrelerinin etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda en yüksek aşınma miktarları 1700 dev/dak ve 0.3 mm/dev işleme parametrelerinde %5 Al₂O₃ takviyeli AMMK malzemesinin işlenmesinde 228,22µm olarak ölçülmüştür. En düşük takım aşınmalar ise 900 dev/dak ve 0.1 mm/dev işleme parametrelerinde %5 Al₂O₃ + %15 grafit takviyeli AMMK malzemesinin işlenmesinde 115,24µm olarak meydana gelmiştir.

%5 Al₂O₃ takviyeli AMMK'lerin işlenmesinde kullanılan takımların aşınmalarına bakıldığında serbest yüzey aşınmaların ve kesici ağız burun bölgesinde kopmaların meydana geldiği görülmektedir (Şekil 5.13). Seramik takviyeli AMMK'lerin işlenmesinde kullanılan takımlarda meydana gelen yüksek aşınmalar seramik takviyesinden kaynaklanmaktadır. Al₂O₃ seramik malzemesinin sert yapısı yüksek aşındırma özelliği göstermektedir [111]. Bu sert partiküllerin varlığı işleme esnasında sürtünmeden kaynaklı yüksek sıcaklıkların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Takımda biriken yüksek sıcaklıklar kesici takımın deforme oluşunu kolaylaştırmakta ve takım ağızında parçacık kopmalarına sebep olmaktadır. Bu durum serbest yüzey aşınmalarının da artışına neden olmaktadır. Şekil 5.13 incelendiğinde yığıntı talaş yani BUE oluşumlarına da rastlanmaktadır. Ancak BUE oluşumu Al7075 alaşımının işlenmesinde meydana gelen BUE oluşumlarından daha düşük seviyelerdedir. Bu durum seramik takviyenin AMMK malzemeye kazandırdığı sert yapısal özelliklerindedir. BUE oluşumları Al alaşımları ve Al matrisli kompozit malzemelerin işlenmesinde sık görülen temel bir problemdir. Sık görülmesinin sebebi ise Al malzemesinin sünek bir yapıya sahip olmasıdır [112].

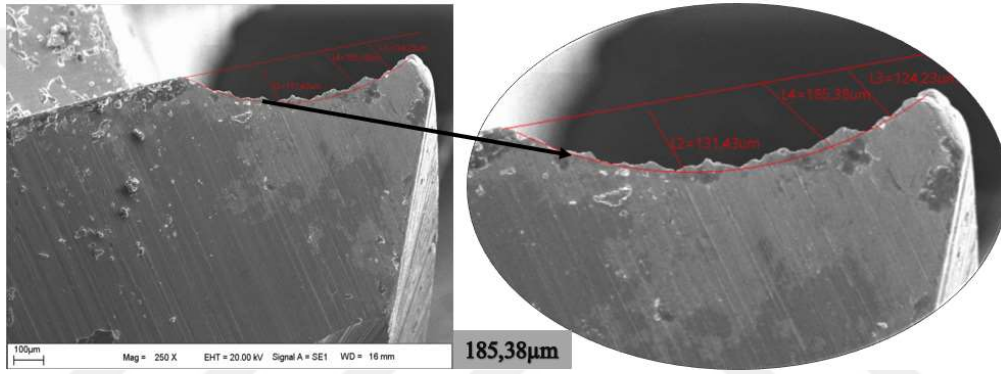


Şekil 5.14. %5 Al₂O₃ takviyeli AMMK'lerin işlenmesinde kullanılan takımlarda meydana gelen aşınmalar.

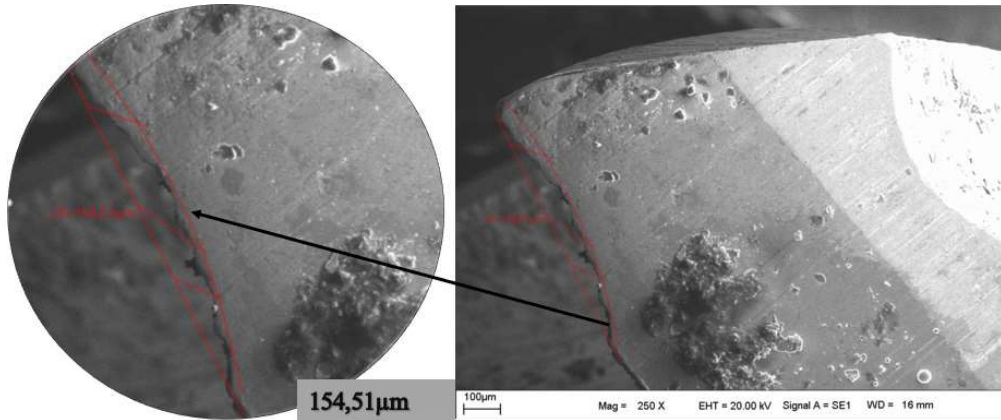
Katı yağlayıcı malzeme olan grafit takviyesinin AMMK'lerin işlenmesinde kullanılan takımların aşınmasına etkisinin belirlenmesi önemlidir. İşleme prosesinde önemli bir yer tutan yağlayıcılar, takım aşınmalarını azaltmada ve yüzey kalitesini iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada grafit takviyesinin takım aşınmasına etkisine bakıldığında, artan grafit içeriğinin takım aşınmalarını azalttığı tespit edildi. Takımların tamamında serbest yüzey aşınması mevcutken, BUE oluşumu ise işleme parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterdi. Grafit içeriğinin artırılmasıyla üretilen AMMK'lerin sertliklerinde düşüşler yaşanması BUE oluşumu için ortam hazırlamıştır.

Genel olarak grafit takviyesinin takım aşınmalarına etkisine bakıldığında, aynı işleme parametrelerinde (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev) sırasıyla ağırlıkça %5,10 ve 15 grafit takviyeli AMMK'lerin işlenmesinde kullanılan takım aşınmaları 185.38 µm, 154,5 µm ve 121,8 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 5.14). Artan grafit oranlarıyla aşınmalarda düşüşler meydana geldiği tespit edilmiştir. %10 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımların aşınmasında %5 grafit takviyeli AMMK'lere oranla %16,75 oranında bir azalma

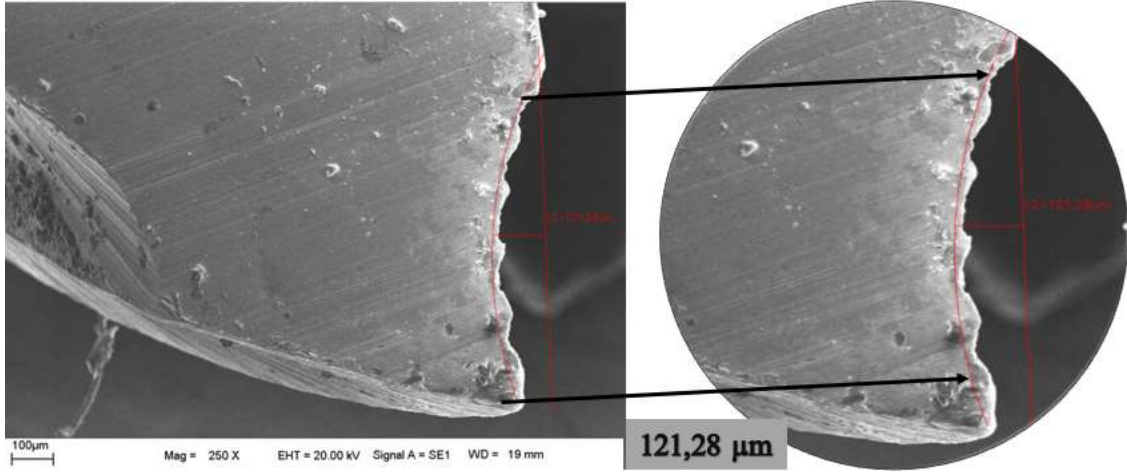
meydana gelmiştir (Şekil 5.15). %10 grafit takviyesi ile %15 grafit takviyesi karşılaştırıldığında, grafitin ağırlıkça artmasıyla %21,50 oranında takım aşınmalarında azalmaların meydana geldiği tespit edildi (Şekil 5.16). Grafit malzemesinin AMMK'lere takviye edilerek kompozitlere kendinden yağlama özelliği kazandırdığı ifade edilebilir. Grafitin varlığı frezeleme işleminde takım ve iş parçası arasındaki kesme yüzeyinde filimsi kaygan bir yapı oluşmasını sağlamaktadır [40]. Bu yapı, takımların aşınmalara karşı direnç oluşturmasını destekler. Özellikle %15 grafit takviyeli AMMK'in işlenmesinde gerekli olan yağlama etkilerinin karşılandığı belirtilebilir. Bu sonuçlar literatürde kendinden yağlamalı kompozitlerin aşınmaları üzerine yapılan çalışmalarla uyumluluk göstermektedir [50].



Şekil 5.15. %5 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımın aşınması (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev).

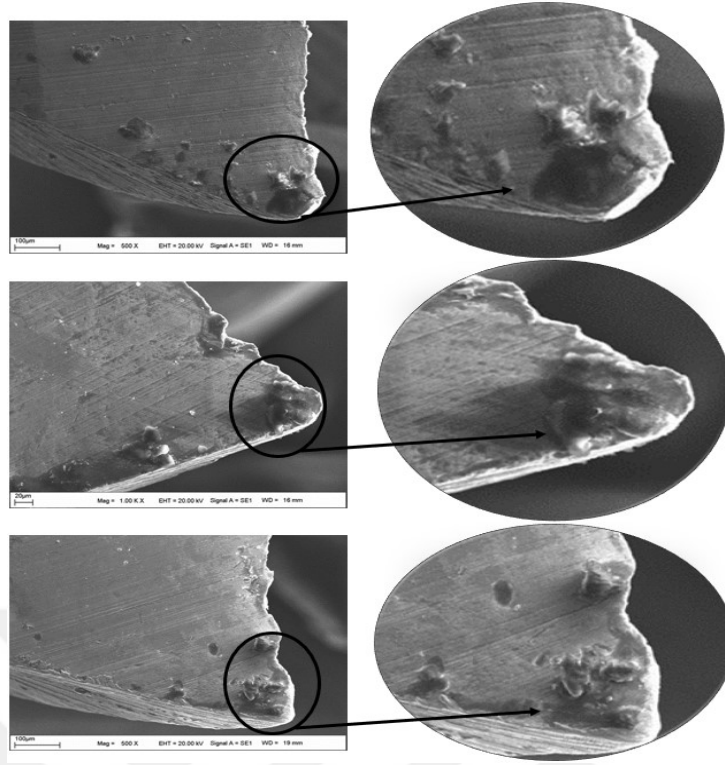


Şekil 5.16. %10 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımın aşınması (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev).

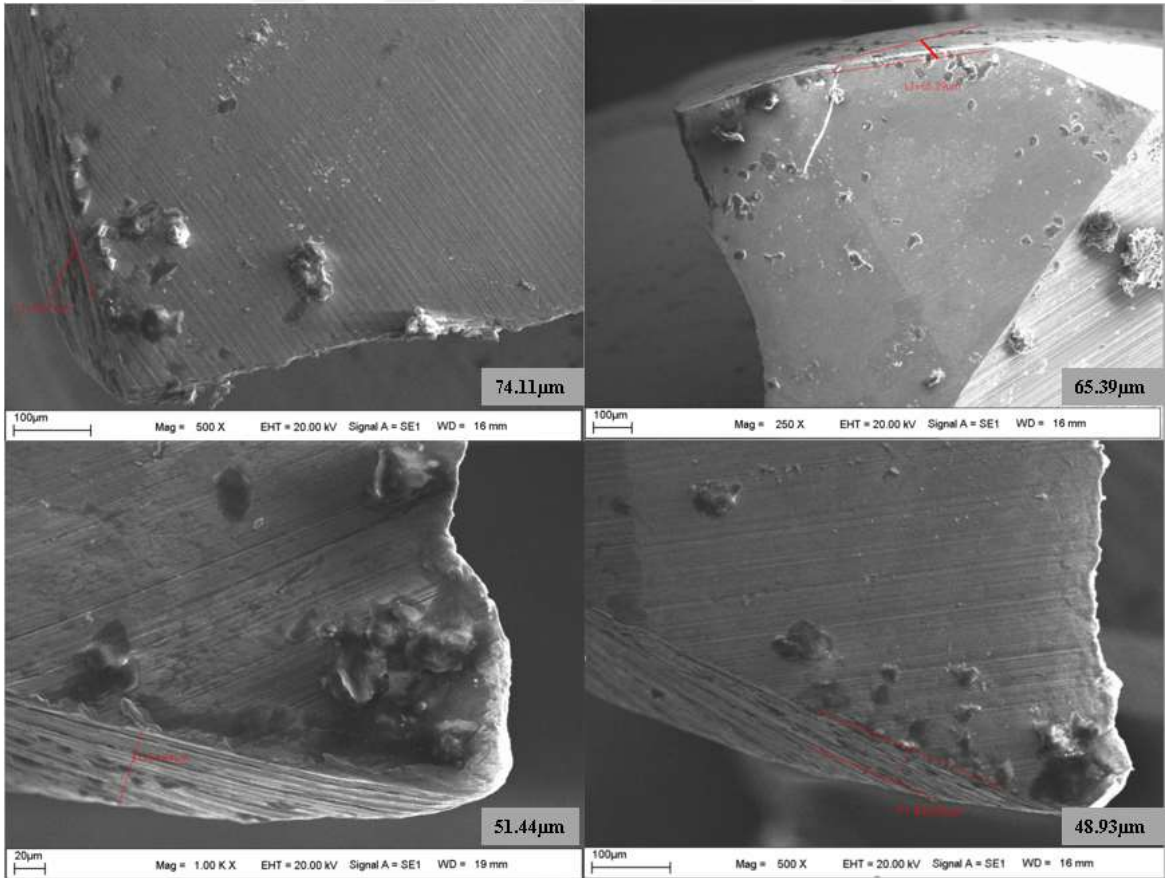


Şekil 5.17. %15 grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesinde kullanılan takımın aşınması (1300 dev/dak ve 0.2 mm/dev).

İşleme parametrelerinin takım aşınmalarına etkilerine bakıldığında, işleme parametrelerin artmasına bağlı olarak takım aşınmalarında artışlar yaşanmıştır. Takım aşınma mekanizmaları sürtünme aşınma, difüzyon, oksidasyon ve yapışmalardan kaynaklıdır [111]. Bu mekanizmalar kesme bölgesinde meydana gelen büyük ölçekli sıcaklıklar nedeniyle daha büyük oranlarda gerçekleşir. İlerleme ve devir sayısının artması kaldırılan talaş miktarını arttırmışından, kesme kuvvetlerini yükselmesinden ve sürtünmeden kaynaklı sıcaklıkları artırır. Bu sıcaklıklar da takım aşınmaların oluşumunu kolaylaştırmaktadır [113]. 1700 dev/dak ve 0.3 mm/dev işleme parametrelerinde işlenmiş AMMK'lerde kullanılan takımlara bakıldığında, kesici takım burun bölgelerinde kopmalarının ve aşınmaların olduğu görülmektedir (Şekil 5.17). Bunun yanı sıra serbest yüzey aşınması ise bütün takımlarda mevcuttur (Şekil 5.18).

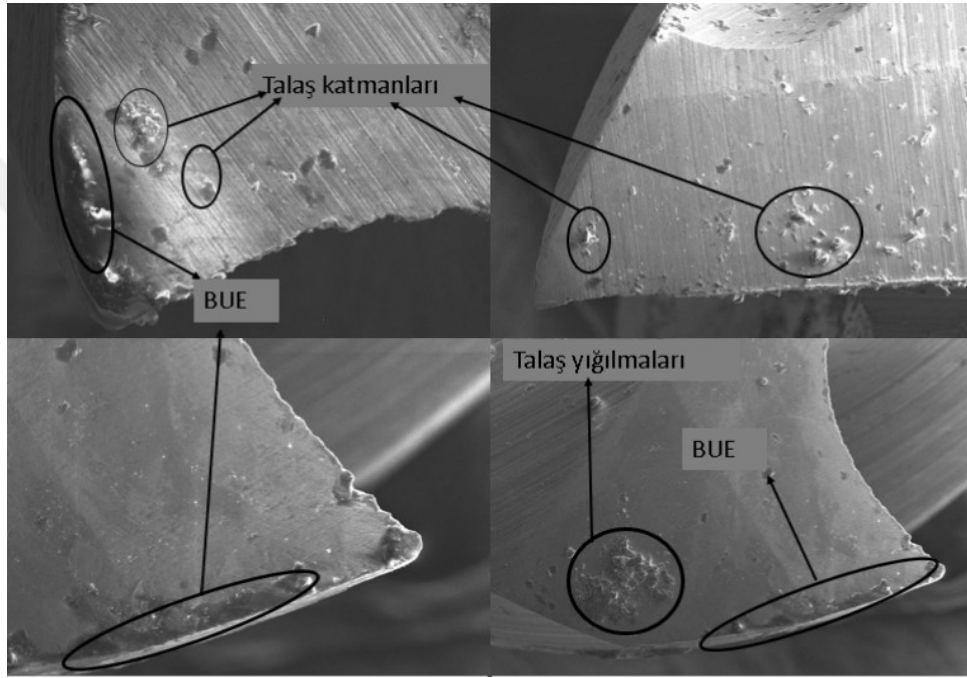


Şekil 5.18. İşlemede kullanılan takımların burun bölgelerinde meydana gelen aşınmalar (1700 dev/dak, 0.3 mm/dev)



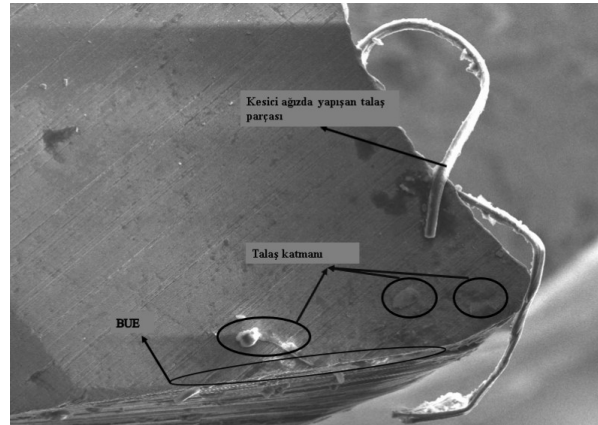
Şekil 5.19. İşlemede kullanılan takımlarda oluşan serbest yüzey aşınması.

Yığıma kenar ve yığıntı talaş oluşumuna bakıldığında, işlemede kullanılan takımlarda BUE oluşumu gözlemlendi. BUE oluşumunun varlığı Al matrisin sünek bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. İşleme parametrelerin etkisine bakıldığında, ilerlemenin yüksek ve devir sayısının düşük değerlerde olduğu işleme parametrelerinde BUE varlığı yaygın olarak görülmektedir [114]. Kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar iş parçasının sünekliğini arttırarak talaş yapışmalarının meydana gelmesine neden olmaktadır. Yapılan çalışmada takımlarda meydana gelen BUE oluşumları, talaş yapışmaları Şekil 5.19'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Takımlarda meydana gelen BUE ve talaş katmanları

Bunların yanı sıra yüksek sıcaklıklar nedeniyle sünekleşen talaş parçaların, takım burun bölgesine yapışması da meydana gelmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.21. Kesici ağızda yapışan talaş parçası, talaş katmanları ve BUE varlığı.

5.6. İşleme Sonrası AMMK'lerin Yüzey Pürüzlülüğü

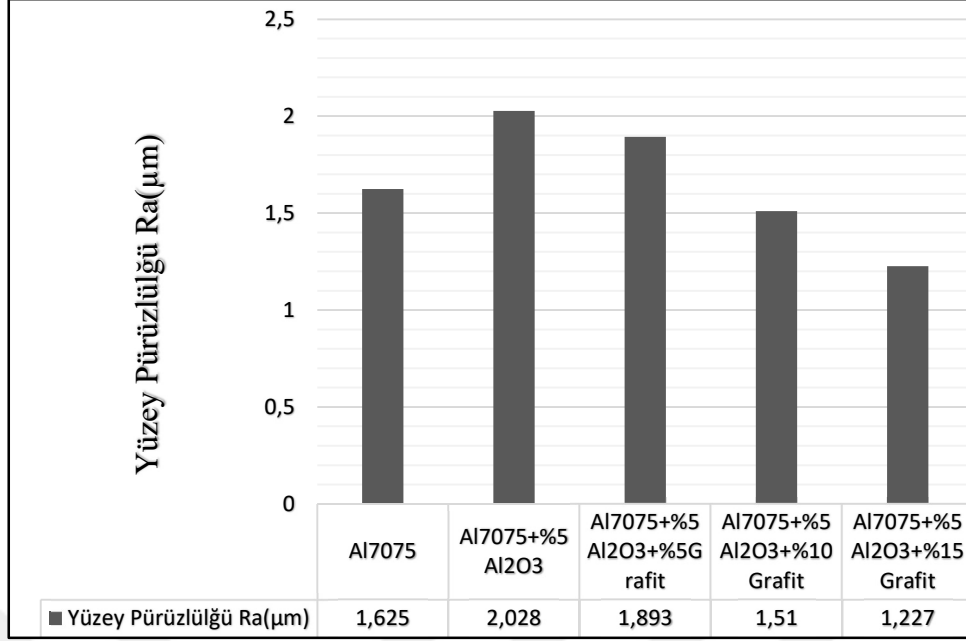
Katı yağlayıcı grafit ve seramik Al_2O_3 takviyeli AMMK'lerin işlenmesinde takviye malzemelerin ve işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelendi. Ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü çizelge 5.3' de verildi. Yapılan frezeleme işlemi sonrası en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerleri %5 Al_2O_3 takviyeli AMMK iş parçasının 900 dev/dak ve 0.3 mm/dev işleme parametrelerinde işlenmesinden sonra $R_a = 2.425 \mu m$ olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama pürüzlülük değeri ise %5 Al_2O_3 + %15 grafit takviyeli AMMK iş parçasının 1700 dev/dak ve 0.1 mm/dev işleme parametrelerinde $R_a = 0.913 \mu m$ 'dir.



Çizelge 5.3. İşleme orası yüzey pürüzlülük değerleri.

İŞ PARÇASI	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme (mm/dev)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)
Al7075	900	0.1	1.625
Al7075	900	0.2	1.832
Al7075	900	0.3	2.065
Al7075	1300	0.1	1.432
Al7075	1300	0.2	1.723
Al7075	1300	0.3	1.968
Al7075	1700	0.1	1.268
Al7075	1700	0.2	1.572
Al7075	1700	0.3	1.863
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	900	0.1	2.028
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	900	0.2	2.209
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	900	0.3	2.425
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1300	0.1	1.878
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1300	0.2	2.125
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1300	0.3	2.392
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1700	0.1	1.892
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1700	0.2	2.033
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃	1700	0.3	2.227
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	900	0.1	1.893
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	900	0.2	2.105
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	900	0.3	2.318
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1300	0.1	1.624
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1300	0.2	1.872
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1300	0.3	2.096
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1700	0.1	1.503
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1700	0.2	1.718
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %5 Grafit	1700	0.3	1.995
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	900	0.1	1.510
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	900	0.2	1.725
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	900	0.3	1.892
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1300	0.1	1.398
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1300	0.2	1.506
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1300	0.3	1.727
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1700	0.1	1.192
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1700	0.2	1.347
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %10 Grafit	1700	0.3	1.601
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	900	0.1	1.227
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	900	0.2	1.468
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	900	0.3	1.593
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1300	0.1	1.018
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1300	0.2	1.198
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1300	0.3	1.492
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1700	0.1	0.913
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1700	0.2	1.085
Al7075 + %5 Al ₂ O ₃ + %15 Grafit	1700	0.3	1.318

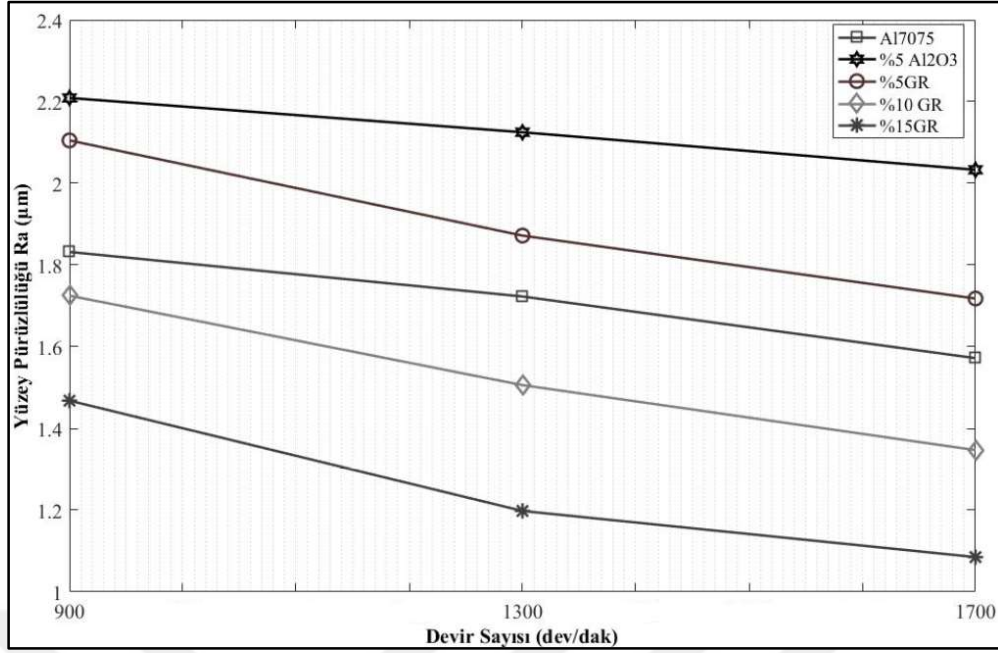
Takviye malzemelerinin yüzey pürüzlülük değerlerine etkisini görebilmek ve yorumlayabilmek için Şekil 5.21 çizdirilmiştir. Şekil 5.21'deki yüzey pürüzlülük değerleri eşit işleme parametrelerinde (900 dev/dak ve 0.1 mm/dev) işleme sonrası ölçülen değerler dikkate alınmıştır. Eşit işleme şartlarında (900 dev/dak ve 0.1 mm/dev) Al7075+%5 Al₂O₃ AMMK'nin işlenmesi sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değeri, Al7075 alaşımının işlenmesi sonrası ölçülen pürüzlülük değerine oranla %24,8 yükseldiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça %5,10 ve 15 oranlarında grafit takviyeli AMMK'nin işlenmesi sonrası ölçülen değerler ise Al7075+%5 Al₂O₃ AMMK'nin işlenmesi sonrası ölçülen değerlerine göre sırasıyla %6,65, %25,54 ve %39,49 oranlarında düşüşler meydana gelmiştir. Genel olarak bakıldığında Al₂O₃ seramik takviyesinin yüzey pürüzlülük değerlerini arttırmaya, grafit takviyesinin ise yüzey pürüzlülük değerlerini azaltmaya yönelik etki ettiği tespit edilmiştir. Al₂O₃ seramik malzemesinin aşındırıcı etkisi yüzey pürüzlülük değerlerini arttırmaktadır. Al₂O₃ malzemesinin AMMK malzemesine kazandırdığı sertlik yüzey kalitesinin bozulmasında da etkilidir [115]. Bunun yanı sıra Al₂O₃ takviyesinin varlığı kesme bölgesinde sürtünmeden kaynaklı yüksek sıcaklıklara ve yüksek takım aşınmalarına neden olmaktadır. Takımda meydana gelen aşınmalar yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Yüksek sıcaklıkların oluşması takım aşınmasını arttırmasının yanında Al matrisinin sünekleşmesinde de etkilidir. Bu sünekleşme ile birlikte işleme sırasında Al₂O₃ takviyesinin uzaklaştırmasını kolaylaştıracaktır. Bu uzaklaşma sonucunda işlenmiş yüzeyde boşluklar oluşur ve bu boşlukların oluşması pürüzlülüğü arttırmaktadır [66]. Grafit miktarının yüzey pürüzlülüğü azaltmasındaki en büyük etken grafitin kaygan bir yapıya sahip olmasıdır. Grafit, AMMK malzemesine kendinden yağlama özelliği kazandırmaktadır. Bu yağlama etkisi takım aşınmaların ve kesme bölgesi sıcaklıkların azalmasını sağlayarak yüzey kalitesini iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 5.22. Takviye malzemelerin ve ağırlıkça oranlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (900 dev/dak ve 0.1 mm/dev).

İşleme parametrelerinden devir sayısının yüzey pürüzlülük değerlerine etkisine bakılacak olursa devir sayısının artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinde düşüşlerin yaşandığı görülmektedir (Şekil 5.22).

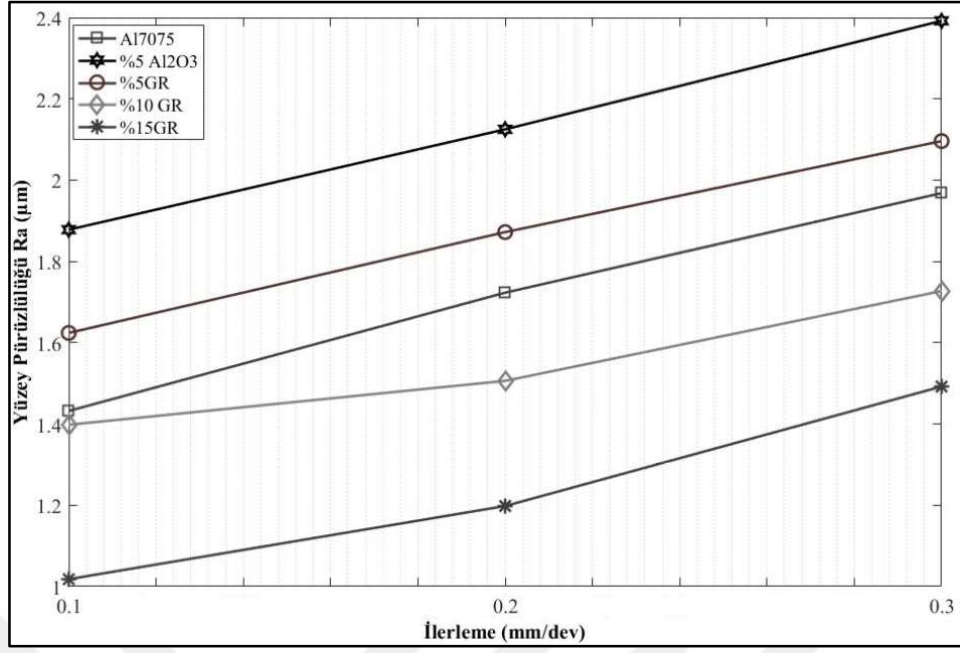
Şekil 5.22'ye bakıldığında, Al7075 alaşımının devir sayısı 900 dev/dak ile işlenmesi sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile 1300 dev/dak ile işlenmesi ile oluşan yüzey pürüzlülükleri arasında %5,95 oranında bir azalma olduğu ölçülmüştür. Al7075 + %5Al₂O₃, Al7075 + %5Al₂O₃+%5Gr, Al7075+ %5Al₂O₃ + %10Gr ve Al7075+%5 Al₂O₃ +%15Gr AMMK'lerin işlenmesinde devir sayısının 900 dev/dak değerinden 1300 dev/dak değerine yükseltilmesi ile ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüklerinde sırasıyla %3.803, %11,067, %12,696 ve %18,392 oranlarında azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Devir sayısı artışı ile talaşların kesme bölgesinden uzaklaştırılması hızlı bir şekilde gerçekleşir. Bu talaş akış hızının artması ile birlikte talaş birikintisi oluşması engellenir. Literatürde de belirtildiği gibi bu durum yüzey pürüzlülüğü değerlerini düşürmektedir [46]. Öte yandan yüksek devirlerde işlemede takım ile talaş ara yüzeyindeki etkileşimin azalmasıyla sürtünmelerde azalır. Bu durum yüzey kalitesinin artmasını sağlamaktadır [116].



Şekil 5.23. Devir sayısı değişiminin pürüzlülüğe etkisi (0.2 mm/dev).

İlerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisini yorumlayabilmek amacıyla, sabit devir sayısına (1300 dev/dak) ait ortalama pürüzlülük değerleri kullanılarak grafik çizdirilmiştir (Şekil 5.23).

Şekil 5.23 incelendiğinde, artan ilerleme ile birlikte ortalama pürüzlülük değerlerinde artışların olduğu görülmektedir. Bu duruma artan ilerleme değerleri ile birlikte kesme kuvvetlerinin artışı ve kaldırılan talaş hacminin artması neden olmaktadır [117]. Bunun yanı sıra yükselen ilerleme değerleri, talaş akışının hızlanmasına ve buna bağlı takım aşınmalarının artmasına sebep olmaktadır. Yüksek ilerleme ile birlikte kesme bölgesinde sıcaklıklarda da yaşanan artış ile aşınmış takımların meydana getirdiği birleşik etkiler yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler [113].

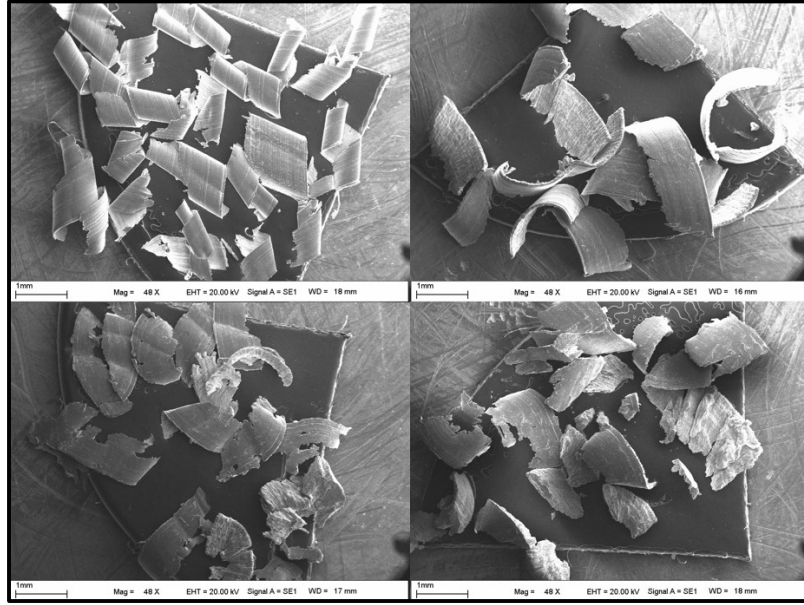


Şekil 5.24. İlerleme değerlerinin pürüzlülüğe etkisi (1300 dev/dak).

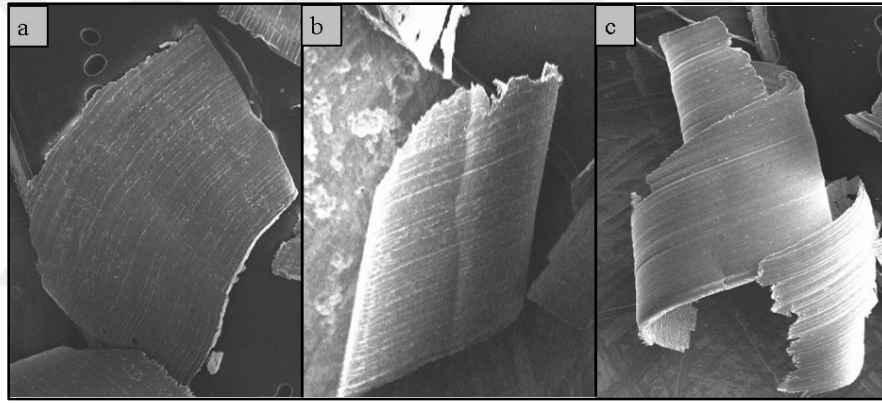
Ek olarak artan ilerleme ile birlikte itme kuvvetinin yükselmesi takım-iş parçası arasında titreşimleri artırarak yüzey kalitesini düşürmektedir [118]. Yüzey pürüzlülüğünün teorik hesaplanması formül 3.5'e bakıldığında, ilerlemenin artışıyla pürüzlülük değerlerinde artmaların meydana geldiği bilinmektedir [73].

5.7. Takviye Malzemelerin ve İşleme Parametrelerinin Oluşan Talaş Tiplerine Etkisi

Takviye malzemelerin ve işleme parametrelerin talaş tiplerine etkisini inceleyebilmek için oluşan talaşların SEM aracılığıyla görüntüleri alınmıştır (Şekil 5.24). Talaş tiplerine bakıldığında sürekli talaşların oluştuğu ve bazı talaşlarda çatlakların meydana geldiği görülmüştür. Al matrisin sünek yapısı nedeniyle sürekli talaş tipleri görülmektedir. Yüksek devir sayılarında ve düşük ilerleme değerlerinde sürekli talaş yapılarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Artan devir sayısına bağlı olarak talaş akış hızının artmasıyla bu durum açıklanabilir. Bunun yanı sıra yüksek ilerleme değerleri ile artan kesme kuvvetleri sıcaklık oluşumunu artırır bu durum sürekli talaş oluşumuna ve talaşların bükülmelerini artırır (Şekil 5.25).

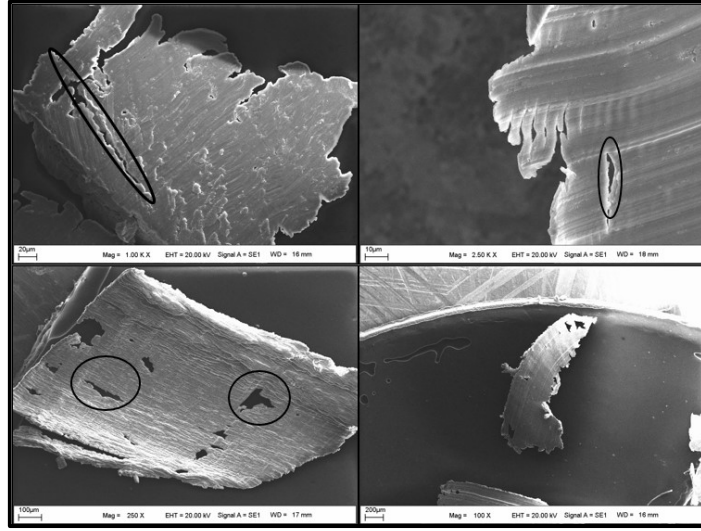


Şekil 5.25. AMMK'lerin işleme sonrası oluşan talaşlara ait SEM görüntüleri.



Şekil 5.26. İlerleme değerlerinin artmasıyla bükülmelerde meydana gelen artış. (a: 0.1 mm/dev, b: 0.2 mm/dev, c: 0.3 mm/dev)

Grafit oranlarının artması kompozit yapısı içerisinde hacimce daha fazla yer kaplayacağından dolayı gözenekli yapıların oluşumu olağandır. Bu gözenekli ya da boşluklu yapıların işlenmesi sırasında talaşlarda çatlakların ve kırılmaların meydana geldiği ifade edilebilir (Şekil 5.26). Bunun yanı sıra Al_2O_3 seramiğinin sert yapısı ve grafitin doğada kırılabilirlik özellik göstermesi bu çatlakların ve kırılmaların diğer bir nedenidir [104]. Bu kırılmalar talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırmasını sağlayarak talaşlı imalat işleminde avantaj sağlamaktadır. Geleneksel kesme sıvılarının önemli etkilerinden olan talaş kırılmalarını sağlayarak kesme bölgesinden talaşların uzaklaştırmasını kolaylaştırmaktadır. Yapılan bu çalışmada ek bir maliyete gerek kalmadan talaşların kesme bölgesinden uzaklaştırılması da sağlanmış olur.



Şekil 5.27. Al7075 + %5 Al₂O₃ + %15 Grafit AMMK'nin işlenmesi sonrası talaşlarda görülen çatlaklar ve kırılmalar.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, kendinden yağlama özelliğine sahip AMMK'lerin kuru ortamda frezelenmesinde işleme parametrelerinin ve takviye malzemelerinin işlenebilirliğe etkisi incelendi. Karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak Al7075 alaşımına ağırlıkça %5-10-15 oranlarında grafit ve %5 Al₂O₃ malzemeleri takviye edilerek üretildi. Üretilen AMMK'lerin karakterizasyonunu ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla XRD, SEM, EDX, DTA/TGA ve DSC analizleri ile birlikte çekme ve mikro sertlik testleri yapıldı. Frezeleme işlemi 4 ağızlı HSS kesici takımlar kullanılarak, üç farklı devir sayısı (900-1300-1700 dev/dak) ve üç farklı ilerleme (0.1-0.2-0.3 mm/dev) parametrelerinde gerçekleştirildi. İşleme sırasında kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklıklar termal kamera aracılığıyla ölçüldü. İşleme sonrası, kullanılan kesici takımlardan SEM görüntüleri alınarak takım aşınmalarının tipi ve boyutları belirlendi. İşleme parametrelerinin ve takviye malzemelerinin işleme sonrası yüzey kalitesine etkisini tespit etmek amacıyla yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirildi. Yapılan frezeleme işlemi sonrası genel sonuçlar maddeler halinde sıralandığı gibidir.

- Yapılan karakterizasyon analizleri sonucunda, genel olarak grafit takviyesinin homojen bir şekilde kompozit içeriğinde yer aldığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %5 Gr takviyeli AMMK malzemesine ait EDX spektrumlarında karbon yani grafit varlığının bazı bölgelerinde gruplandığı da belirlenmiştir.
- Çekme ve sertlik testlerinin sonuçlarına bakıldığında, Al₂O₃ seramik takviyesinin mukavemet değerlerini arttırırken, grafit takviyesinin AMMK malzemesinin dayanımını düşürdüğü ifade edilebilir. Bu durum Al₂O₃ seramiğinin dayanımı yüksek olmasından, grafitin ise yumuşak bir malzeme yapısına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.
- İşleme sırasında ölçülen sıcaklık değerlerine bakıldığında, meydana gelen en yüksek sıcaklıklar, %5 Al₂O₃ seramik takviyeli AMMK malzemesinde 0.3 mm/dev ve 1700 dev/dak işleme parametrelerinde 342 °C olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama sıcaklık ise ağırlıkça %5 Al₂O₃ ve %15 grafit takviyeli AMMK malzemesinin 900 dev/dak ve 0.1 mm/dev işleme parametreleriyle işlenmesi sırasında 120 °C olduğu belirlenmiştir. Genel olarak katı yağlayıcı Gr malzemesi işlemede sürtünmeyi azaltmaya yönelik etki ederek sıcaklıkların düşmesine neden olmuştur.

- Takım aşınmalarına bakıldığında, takım burun bölgelerinde parçacık kopmalarının, serbest yüzey aşınmalarının, BUE oluşumlarının, talaş katmanlarının ve talaş yığılmalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Grafit varlığının yüksek olduğu AMMK'lerin işlenmesinde takım aşınmalarında düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. İşleme parametrelerinin takım aşınmalarına etkilerine bakıldığında ise işleme parametrelerin artmasına bağlı olarak takım aşınmalarında artışlar yaşanmıştır. İlerleme ve devir sayısının artması kaldırılan talaş miktarını arttırmamasından, kesme kuvvetlerini yükselmesinden ve sürtünmeden kaynaklı sıcaklıkları artırır. Artan bu sıcaklıklar ise takım aşınmaların oluşumunu kolaylaştırmasına neden olur.
- İşleme sonrası yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında, en yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değerleri %5 Al₂O₃ takviyeli AMMK iş parçasının 900 dev/dak ve 0.3 mm/dev işleme parametrelerinde işlenmesinden sonra Ra= 2.425 µm olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama pürüzlülük değeri ise %5 Al₂O₃ + %15 grafit takviyeli AMMK iş parçasının 1700 dev/dak ve 0.1 mm/dev işleme parametrelerinde Ra= 0.913 µm'dir. Al₂O₃ seramik takviyesinin yüzey pürüzlülük değerlerini arttırmaya, grafit takviyesinin ise yüzey pürüzlülük değerlerini azaltmaya yönelik etki ettiği tespit edilmiştir. Bu durum Al₂O₃ malzemesinin aşındırıcı yapısından, grafitin ise katı yağlayıcı malzeme olmasından kaynaklıdır. İşleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisine bakıldığında ise artan devir sayısının yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği, ilerleme değerlerinin ise yüzey pürüzlülüğüne olumsuz etki ettiği tespit edilmiştir.
- İşleme sonrası meydana gelen talaşlar sürekli talaş tiplerindedir. Al matrisin sünek yapısı sürekli talaşların oluşmasına neden olmuştur. Yüksek ilerleme değerlerinin talaşların bükülmelerini arttırdığı tespit edildi. Bu durum artan ilerleme ile kesme kuvvetlerinin artmasına ve sıcaklıkların yükselmesiyle açıklanabilir. Takviye malzemelerin varlığı talaşlarda çatlaklar ve kırılmaların oluşmasına neden olmuştur. Bu durum Al₂O₃ seramiğinin sert yapısı ve grafitin doğada kırılgenlik özellik göstermesi ile açıklanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Ulas, M., Aydur, O., Gurgenc, T., & Ozel, C. (2020). Surface roughness prediction of machined aluminum alloy with wire electrical discharge machining by different machine learning algorithms. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12512-12524.
- [2] Soren, T. R., Kumar, R., Panigrahi, I., Sahoo, A. K., Panda, A., & Das, R. K. (2019). Machinability behavior of aluminium alloys: a brief study. *Materials Today: Proceedings*, 18, 5069-5075.
- [3] Kesme Sıvısı Uygulaması. Erişim 25.09.2020, <https://www.mcctcarbide.com/tr/3554-2/>
- [4] Yücel, E., Günay, M., Ayyıldız, M., Erkan, Ö., & Kara, F. Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkileri ve Sürdürülebilir Kullanımı. *6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elâzığ, Turkey
- [5] Bianchi, E. C., Aguiar, P. R., Canarim, R. C., & Diniz, A. E. (2013). Optimization of minimum quantity lubrication in grinding with CBN wheels. In *Machining and machine-tools* (pp. 113-133). Woodhead Publishing.
- [6] Brinksmeier, E., Heinzl, C., & Wittmann, M. (1999). Friction, cooling and lubrication in grinding. *Cirp Annals*, 48(2), 581-598.
- [7] Dhar, N. R., Ahmed, M. T., & Islam, S. (2007). An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5), 748-753.
- [8] Çakır, A., Yağmur, S., Kavak, N., Küçüktürk, G., & Şeker, U. (2016). The effect of minimum quantity lubrication under different parameters in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9-12), 2515-2521.
- [9] Park, K. H., Suhaimi, M. A., Yang, G. D., Lee, D. Y., Lee, S. W., & Kwon, P. (2017). Milling of titanium alloy with cryogenic cooling and minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(1), 5-14.
- [10] Sharma, V. S., Singh, G., & Sørby, K. (2015). A review on minimum quantity lubrication for machining processes. *Materials and manufacturing processes*, 30(8), 935-953.
- [11] Yongjiang, L., Ailing, W., Biao, W., & Zhaohua, L. (2009). Experimental study on the effects of oil/water emulsion on machining stainless steel.
- [12] Pereira, O., Rodríguez, A., Fernández-Abia, A. I., Barreiro, J., & de Lacalle, L. L. (2016). Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. *Journal of Cleaner Production*, 139, 440-449.
- [13] Uçak, N., & Çiçek, A. (2017, September). Talaşlı İmalat Süreçlerinde Kriyojenik Soğutma Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma. In *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan)*.
- [14] Lu, T., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2013). A thermal analysis framework for cryogenic machining and its contribution to product and process sustainability. *10.14279/depositonce-3753*.

- [15] Wang, Z. Y., & Rajurkar, K. P. (2000). Cryogenic machining of hard-to-cut materials. *Wear*, 239(2), 168-175.
- [16] **Benefits and Challenges of Minimum Quantity Lubrication.** Erişim 26.09.2020, <https://www.mmsonline.com/articles/benefits-and-challenges-of-minimum-quantity-lubrication>
- [17] Carou, D., Rubio, E. M., & Davim, J. P. (2015). A note on the use of the minimum quantity lubrication (MQL) system in turning. *Industrial Lubrication and Tribology*.
- [18] Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). Lubricants: properties and characteristics. *Biolubricants: science and technology*, 24-73.
- [19] Liu, X., Shi, X., Wu, C., Yang, K., Huang, Y., Deng, X., ... & Xue, B. (2017). Tribological behavior of M50-MoS₂ self-lubricating composites from 150 to 450 C. *Materials Chemistry and Physics*, 198, 145-153.
- [20] Omrani, E., Moghadam, A. D., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). New emerging self-lubricating metal matrix composites for tribological applications. In *Ecotribology* (pp. 63-103). Springer, Cham.
- [21] Prasad, S. V., & Asthana, R. (2004). Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations. *Tribology letters*, 17(3), 445-453.
- [22] Kuram, E., Ozcelik, B., Demirbas, E., Şik, E., & Tansel, I. N. (2011). Evaluation of new vegetable-based cutting fluids on thrust force and surface roughness in drilling of AISI 304 using Taguchi method. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(9), 1136-1146.
- [23] Vieira, J. M., Machado, A. R., & Ezugwu, E. O. (2001). Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2-3), 244-251.
- [24] Avila, R. F., & Abrao, A. M. (2001). The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1-3), 21-26.
- [25] Oishi, K., Nishida, T., & Ono, T. (1992). Study on the fracture characteristics of ceramic cutting tools (first report). *Wear*, 154(2), 361-370.
- [26] Mendes, O. C., Avila, R. F., Abrao, A. M., Reis, P., & Davim, J. P. (2006). The performance of cutting fluids when machining aluminium alloys. *Industrial Lubrication and Tribology*.
- [27] Khandekar, S., Sankar, M. R., Agnihotri, V., & Ramkumar, J. (2012). Nano-cutting fluid for enhancement of metal cutting performance. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(9), 963-967.
- [28] Davim, J. P., Sreejith, P. S., & Silva, J. (2007). Turning of brasses using minimum quantity of lubricant (MQL) and flooded lubricant conditions. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(1), 45-50.
- [29] Kaynak, Y., Gharibi, A., Yılmaz, U., Köklü, U., & Aslantaş, K. (2018). A comparison of flood cooling, minimum quantity lubrication and high pressure coolant on machining and surface integrity of titanium Ti-5553 alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 503-512.
- [30] Mane, S., Ramchandani, J., Marla, D., & Joshi, S. S. (2019). Experimental investigation of oil mist assisted cooling on orthogonal cutting of Ti6Al4V. *Procedia Manufacturing*, 34, 369-378.

- [31] **Pasam, V. K., Revuru, R. S., & Gugulothu, S.** (2018). Comparing the performance & viability of nano and microfluids in minimum quantity lubrication for machining AISI1040 steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8016-8024.
- [32] **DUMAN, E., & KAYNAK, Y.** (2017) 15-5 PH Çelik Malzemesinin Kriyojenik Talaşlı İmalat Sürecinde Yüzey Bütünlüğü Analizi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15(1), 19-26.
- [33] **Uçak, N, Çiçek, A.** (2019). Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kriyojenik soğutmanın delme performansı üzerine etkilerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (3), 1241-1252.
- [34] **Dhananchezian, M.** (2019). Study the machinability characteristics of Nicked based Hastelloy C-276 under cryogenic cooling. *Measurement*, 136, 694-702.
- [35] **Bagherzadeh, A., & Budak, E.** (2018). Investigation of machinability in turning of difficult-to-cut materials using a new cryogenic cooling approach. *Tribology International*, 119, 510-520.
- [36] **Sterle, L., Kalin, M., & Pušavec, F.** (2018). Performance evaluation of solid lubricants under machining-like conditions. *Procedia CIRP*, 77, 401-404.
- [37] **Gnanavelbabu, A., Rajkumar, K., & Saravanan, P.** (2018). Investigation on the cutting quality characteristics of abrasive water jet machining of AA6061-B4C-hBN hybrid metal matrix composites. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(12), 1313-1323.
- [38] **Sartori, S., Ghiotti, A., & Bruschi, S.** (2018). Solid lubricant-assisted minimum quantity lubrication and cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning. *Tribology International*, 118, 287-294.
- [39] **Makhesana, M. A., & Patel, K. M.** (2019). Performance assessment of CaF₂ solid lubricant assisted minimum quantity lubrication in turning. *Procedia Manufacturing*, 33, 43-50.
- [40] **Krishna, P. V., & Rao, D. N.** (2008). Performance evaluation of solid lubricants in terms of machining parameters in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(10), 1131-1137.
- [41] **Reddy, N. S. K., & Rao, P. V.** (2006). Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(2), 189-198.
- [42] **Rao, D. N., & Krishna, P. V.** (2008). The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(1), 107-111.
- [43] **Jianxin, D., Wenlong, S., & Hui, Z.** (2009). Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(1), 66-72.
- [44] **Wenlong, S., Jianxin, D., Hui, Z., Pei, Y., Jun, Z., & Xing, A.** (2011). Performance of a cemented carbide self-lubricating tool embedded with MoS₂ solid lubricants in dry machining. *Journal of Manufacturing processes*, 13(1), 8-15.
- [45] **İmece, Y., Erdem, O., & Tuç, B.** (2018). MOS₂ ve grafit kaplamaların farklı ortam şartlarında tribolojik özelliklerinin araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, (2018).

- [46] **Satyanarayana, T., Rao, P. S., & Krishna, M. G.** (2019). Influence of wear parameters on friction performance of A356 aluminum–graphite/granite particles reinforced metal matrix hybrid composites. *Heliyon*, 5(6), e01770.
- [47] **Podgornik, B., Kosec, T., Kocijan, A., & Donik, Č.** (2015). Tribological behaviour and lubrication performance of hexagonal boron nitride (h-BN) as a replacement for graphite in aluminium forming. *Tribology International*, 81, 267-275.
- [48] **Seleman, M. M. E. S., Ahmed, M. M., & Ataya, S.** (2018). Microstructure and mechanical properties of hot extruded 6016 aluminum alloy/graphite composites. *Journal of materials science & technology*, 34(9), 1580-1591.
- [49] **Baradeswaran, A., & Perumal, A. E.** (2014). Study on mechanical and wear properties of Al 7075/Al₂O₃/graphite hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 56, 464-471.
- [50] **Shanmughasundaram, P., & Subramanian, R.** (2013). Wear behaviour of eutectic Al-Si alloy-graphite composites fabricated by combined modified two-stage stir casting and squeeze casting methods. *Advances in materials science and engineering*, 2013.
- [51] **Ravindran, P., Manisekar, K., Narayanasamy, R., & Narayanasamy, P.** (2013). Tribological behaviour of powder metallurgy-processed aluminium hybrid composites with the addition of graphite solid lubricant. *Ceramics International*, 39(2), 1169-1182.
- [52] **Baradeswaran, A., & Perumal, A. E.** (2014). Wear and mechanical characteristics of Al 7075/graphite composites. *Composites Part B: Engineering*, 56, 472-476.
- [53] **Dursun, M.** (2007). Titanium ve Inconel 718 Malzemelerinin Frezelenmesinde Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması (Yüksek Lisans tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, GEBZE.
- [54] **İşmal, Ö. E., & Paul, R.** (2018). Composite textiles in high-performance apparel. In *High-Performance Apparel* (pp. 377-420). Woodhead Publishing.
- [55] **Kalemtaş, A.** (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech&Composites*, 22, 18-30.
- [56] **Akbulut, H.** (1994). *Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matrisli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı-özellik ilişkilerinin incelenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [57] **Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W.** (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of materials processing technology*, 106(1-3), 58-67.
- [58] **Şenel, M. C., Gürbüz, M., & Koç, E.** (2017). Grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(8).
- [59] **Degischer, H. P., Schulz, P. A., & Lacom, W.** (1997). Properties of continuous fibre reinforced Al-and Mg-matrix composites produced by gas pressure infiltration. In *Key Engineering Materials* (Vol. 127, pp. 99-110). Trans Tech Publications Ltd.
- [60] **Suresh, S. (Ed.).** (2013). *Fundamentals of metal-matrix composites*. Elsevier.
- [61] **Huda, M. D., Hashmi, M. S. J., & El-Baradie, M. A.** (1995). MMCs: materials, manufacturing and mechanical properties. In *Key Engineering Materials* (Vol. 104, pp. 37-64). Trans Tech Publications Ltd.

- [62] **O'Donnell, G.** (1999). *Process optimisation and numerical modelling of powder metallurgical Aluminium Matrix Composites* (Doctoral dissertation, Dublin City University).
- [63] **Kandpal, B. C., & Singh, H.** (2017). Fabrication and characterisation of Al₂O₃/aluminium alloy 6061 composites fabricated by Stir casting. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2783-2792.
- [64] **Manna, A., & Bhattacharayya, B.** (2003). A study on machinability of Al/SiC-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 711-716.
- [65] **Pramanik, A., Zhang, L. C., & Arsecularatne, J. A.** (2008). Machining of metal matrix composites: effect of ceramic particles on residual stress, surface roughness and chip formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(15), 1613-1625.
- [66] **Ozben, T., Kilickap, E., & Cakır, O.** (2008). Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. *Journal of materials processing technology*, 198(1-3), 220-225.
- [67] **Muthukrishnan, N., Murugan, M., & Rao, K. P.** (2008). Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(3-4), 211-218.
- [68] **Shin, Y. C., & Dandekar, C.** (2012). Mechanics and modeling of chip formation in machining of MMC. In *Machining of metal matrix composites* (pp. 1-49). Springer, London.
- [69] **Davim, J. P.** (2002). Diamond tool performance in machining metal–matrix composites. *Journal of materials processing technology*, 128(1-3), 100-105.
- [70] **Pramanik, A., Zhang, L. C., & Arsecularatne, J. A.** (2007). An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: tool–particle interaction during orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(10), 1497-1506.
- [71] **Bayraktar, Ş., Çamkerten, Ç., & Salihoglu, N.** (2020). Bakır ve Silisyum İlavelerinin Al-25Zn Alaşımının CVD Al₂O₃ Kaplamalı Takımlarla Tornalanmasında İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(1), 79-93.
- [72] **Davim, J. P.** (2003). Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays. *Journal of materials processing technology*, 132(1-3), 340-344.
- [73] **Knight, W. A., & Boothroyd, G.** (2005). *Fundamentals of metal machining and machine tools* (Vol. 198). CRC Press.
- [74] **Ciftci, I., Turker, M., & Seker, U.** (2004). Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced Al-2014 alloy matrix composites. *Materials & design*, 25(3), 251-255.
- [75] **Xavior, M. A., & Kumar, J. A.** (2017). Machinability of hybrid metal matrix composite-A review. *Procedia Engineering*, 174, 1110-1118.
- [76] **Gökkaya, H., & Nalbant, M.** (2006). Talaş Kaldırma Sırasında Isı Oluşumu Ve Dağılımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2, 33-43.
- [77] **Sheikh-Ahmad, J., & Davim, J. P.** (2012). Tool wear in machining processes for composites. In *Machining technology for composite materials* (pp. 116-153). Woodhead Publishing.

- [78] **YALDIZ, S.** Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi. *Takım Aşınma Mekanizmaları ve Aşınma Tipleri*. [PowerPoint slides] Retrieved from https://tf.selcuk.edu.tr/dosyalar/files/033003/4_takim_asinma_mekanizmaları_asinma_tipleri.pdf
- [79] **Camcı, H.** (2020). AISI D2 Çeliğinin Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi (MQL) Kullanılarak Frezelenmesinde İşlenebilirliğinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, BARTIN.
- [80] **Özdemir, U., & Erten, M.** (2003). TALASLI İMALAT SIRASINDA KESİCİ TAKIMDA MEYDANA GELEN HASAR MEKANİZMALARI VE TAKIM HASARINI AZALTMA YÖNTEMLERİ. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 1(1), 37-50.
- [81] **Aggarwal, A., Singh, H., Kumar, P., & Singh, M.** (2008). Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. *Journal of materials processing technology*, 205(1-3), 42-50.
- [82] **El Baradie, M. A.** (1996). Cutting fluids: Part I. characterisation. *Journal of materials processing technology*, 56(1-4), 786-797.
- [83] **Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T.** (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of machine Tools and manufacture*, 57, 83-101.
- [84] **E. Oberg, F.D. Jones, H.L. Horton, H.H. Ryffel.** (2004) Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook *Industrial Press* (1143–1146)
- [85] **Grzesik, W.** (2008). *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. Elsevier.
- [86] **V.P. Astakhov,** (2006). Tribology of Metal Cutting, Elsevier Science,
- [87] **Klocke, F. A. E. G., & Eisenblätter, G.** (1997). Dry cutting. *Cirp Annals*, 46(2), 519-526.
- [88] **Dhar, N. R., Islam, M. W., Islam, S., & Mithu, M. A. H.** (2006). The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. *Journal of materials processing technology*, 171(1), 93-99.
- [89] **Sharma, V. S., Dogra, M., & Suri, N. M.** (2009). Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6), 435-453.
- [90] **Sales, W., Becker, M., Barcellos, C. S., Landre, J., Bonney, J., & Ezugwu, E. O.** (2009). Tribological behaviour when face milling AISI 4140 steel with minimum quantity fluid application. *Industrial Lubrication and Tribology*.
- [91] **Timmerhaus, K. D., & Flynn, T. M.** (2013). *Cryogenic process engineering*. Springer Science & Business Media.
- [92] **Mishima, K., Kakinuma, Y., & Aoyama, T.** (2010). Pre-deformation-assisted cryogenic micromachining for fabrication of three-dimensional unique micro channels. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 4(5), 936-947.
- [93] **Scharf, T. W., & Prasad, S. V.** (2013). Solid lubricants: a review. *Journal of materials science*, 48(2), 511-531.

- [94] **Ames, W., & Alpas, A. T.** (1995). Wear mechanisms in hybrid composites of graphite-20 Pct SiC in A356 aluminum alloy (Al-7 Pct Si-0.3 Pct Mg). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26(1), 85-98.
- [95] **Kestursatya, M., Kim, J. K., & Rohatgi, P. K.** (2003). Wear performance of copper-graphite composite and a leaded copper alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 339(1-2), 150-158.
- [96] **Şimşek, İ.** (2019). Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda ZrO₂ takviyeli Al-2Gr matrisli kompozit malzemelerin aşınma performanslarının incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(3), 594-605.
- [97] **Hassan, A. M., Alrashdan, A., Hayajneh, M. T., & Mayyas, A. T.** (2009). Wear behavior of Al-Mg-Cu-based composites containing SiC particles. *Tribology International*, 42(8), 1230-1238.
- [98] **Ezatzpour, H. R., Parizi, M. T., Sajjadi, S. A., Ebrahimi, G. R., & Chaichi, A.** (2016). Microstructure, mechanical analysis and optimal selection of 7075 aluminum alloy based composite reinforced with alumina nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 178, 119-127.
- [99] **MATİK, U., & TANATTI, K.** (2017). Sıcak Ekstrüze Edilmiş AA7075-Sicp Kompozitlerin Tribolojik Karakteristiklerine Isıl İşlemin Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 20(4), 807-814.
- [100] **Baradeswaran, A., & Elayaperumal, A.** (2011). Wear Characteristics of Al 6061 Reinforced with Graphite under Different Loads and Speeds. *Advanced Materials Research*, 287-290, 998-1002.
- [101] **Çam, Y., Karıcı, A.** (2019). Silisyum Karbür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Tek Aşırı Yükler Altında Yorulma Davranışı. *Academic Perspective Procedia*, 2 (3), 994-1007.
- [102] **Shubhra, Q. T., Alam, A. K. M. M., & Quaiyyum, M. A.** (2013). Mechanical properties of polypropylene composites: A review. *Journal of thermoplastic composite materials*, 26(3), 362-391.
- [103] **Radhika, N., Balaji, T. V., & Palaniappan, S.** (2015). Studies on mechanical properties and tribological behaviour of LM25/SiC/Al₂O₃ composites. *Journal of engineering science and technology*, 10(2), 134-144.
- [104] **Rana, R. S., & Purohit, R.** (2020). Synthesis & analysis of mechanical and tribological behaviour of silicon carbide and graphite reinforced aluminium alloy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*.
- [105] **Pardeep Sharma, Satpal Sharma & Dinesh Khanduja** (2016) Effect of graphite reinforcement on physical and mechanical properties of aluminum metal matrix composites, *Particulate Science and Technology*, 34:1, 17-22,
- [106] **Guo, M., & Tsao, C.** (2000). Tribological behavior of self-lubricating aluminium/SiC/graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder-densification method. *Composites Science and Technology*, 60(1), 65-74.
- [107] **Vamsi Krishna, P., Srikant, R. R., & Nageswara Rao, D.** (2011). Solid lubricants in machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 225(4), 213-227.

- [108] **Ng, E. G., Aspinwall, D. K., Brazil, D., & Monaghan, J.** (1999). Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(6), 885-903.
- [109] **Wang, S. J., Chen, X., To, S., Ouyang, X. B., Liu, Q., Liu, J. W., & Lee, W. B.** (2015). Effect of cutting parameters on heat generation in ultra-precision milling of aluminum alloy 6061. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(5-8), 1265-1275.
- [110] **Korkut, I., & Donertas, M. A.** (2007). The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool–chip contact length during face milling. *Materials & design*, 28(1), 308-312.
- [111] **Sornakumar, T., & Kathiresan, M.** (2010). Machining studies of die cast aluminum alloy-silicon carbide composites. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 17(5), 648-653.
- [112] **Sekmen, M., Günay, M., & Şeker, U.** (2015). Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesme hızı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü, yığıntı talaş ve yığıntı katmanı oluşumu üzerine etkisi. *Politeknik dergisi*, 18(3), 141-148.
- [113] **Kannan, C., Chaitanya, C. V., Padala, D., Reddy, L., Ramanujam, R., & Balan, A. S. S.** (2020). Machinability studies on aluminium matrix nanocomposite under the influence of MQL. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1507-1516.
- [114] **Hekimoğlu, A. P., Bayraktar, Ş., & Turgut, Y.** (2018). Investigation of the effect of cutting speed and feed rate on machining of the Al–35Zn alloy. In *2nd international symposium on innovative approaches in scientific studies (ISAS 2018-Winter)*, 30th Nov–2th Dec, Samsun, Turkey.
- [115] **Prakash, K. S., Gopal, P. M., & Karthik, S.** (2020). Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis in turning of Rock dust reinforced Aluminum MMC. *Measurement*, 107664.
- [116] **Das, D., Mishra, P., Singh, S., Chaubey, A., & Routara, B.** (2018). Machining performance of aluminium matrix composite and use of WPCA based Taguchi technique for multiple response optimization. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(4), 551-564.
- [117] **Pawade, R. S., Joshi, S. S., Brahmanekar, P. K., & Rahman, M.** (2007). An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 192, 139-146.
- [118] **Kumar, A., Mahapatra, M. M., & Jha, P. K.** (2014). Effect of machining parameters on cutting force and surface roughness of in situ Al–4.5% Cu/TiC metal matrix composites. *Measurement*, 48, 325-332.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: CEBRAİL ÖLMEZ

Doğum Yeri ve Tarihi: MALATYA 01/01/1993

Adres: SAMANKÖY MAH. SAMANKÖY SOK. NO:28 YEŞİLYURT/MALATYA

E-Posta: olmezcebrail@hotmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü (2012-2016)

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2018-)

Yayın Listesi:

E. Emir, E. Bahçe, **C. Ölmez** “CoCrMo ASTM-F75 Alaşımının Sonlu Elemanlar Analizi ile Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Takım-İş Parçası Arasındaki Sıcaklık Oluşumuna ve Kuvvet Dağılımına Etkilerinin Araştırılması”, III. International Battalgazi Scientific Studies Congress, 617-625, ISBN: 978-605-7811-13-4, September 2019, Malatya / Turkey (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Bahçe, **C. Ölmez**, H. YILMAZ “CoCrMo Malzemesinden Yapılmış Femur Bileşeninin Frezelenmesinde İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkilerinin Araştırılması, III. International Eurasian Multidisciplinary Studies Congress, , ISBN-978-605-7875-60-0, April 2019, Gaziantep/ Turkey (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Bahçe, E. Emir, **C. Ölmez** “INVESTIGATION OF TOOL WEAR AND CHIP TYPES OF CoCrMo ALLOY TURNING”, ISPEC INTERNATIONAL CONGRESS OF ENGINEERING AND SCIENCE, 25-31, ISBN-978-605-7875-98-3, May 2019, Malatya / Turkey (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Bahçe, **C. Ölmez**, E. Emir “Grafit Takviyeli Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozitin Tornalanmasında Meydana Gelen Takım Aşınmalarının İncelenmesi”, III. International Battalgazi Scientific Studies Congress, 673-680, ISBN: 978-605-7811-13-4, September 2019, Malatya / Turkey (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Bahçe, **C. Ölmez**, C. Akbay “INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF BONE DRILLING WITH A HA COATING DRILL”, ISPEC INTERNATIONAL CONGRESS

OF ENGINEERING AND SCIENCE, 32-40, ISBN-978-605-7875-98-3, May 2019, Malatya / Turkey (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Bahçe, E. Emir, **C. Ölmez** “INVESTIGATION OF IN THE TURNING OF Ti6Al4V ALLOY TEMPERATURE DISTRIBUTION AND TOOL WEAR USING FINITE ELEMENT ANALYSIS”, 2nd INTERNATIONAL GAP MATHEMATICS-ENGINEERING-SCIENCE AND HEALTH SCIENCES CONGRESS, 399-404, ISBN-978-605-7875-97-6, JUNE 2019, Adıyaman / Turkey (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Emir, E. Bahçe, **C. Ölmez** “UHMWPE İNSERT BİLEŞENİNDE MEYDANA GELEN AŞINMALARIN SEA YAZILIMI KULLANILARAK ARCHAD AŞINMA YASASI İLE İNCELENMESİ”, 1. ULUSLARARASI MALATYA UYGULAMALI BİLİMLER KONGRESİ, 176-181, ISBN: 978-625-7954-05-1, ARALIK 2019, Malatya / TÜRKİYE (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

E. Emir, E. Bahçe, **C. Ölmez** “Ti6Al4V ALAŞIMININ TORNALANMASINDA MEYDANA GELEN TALAŞ TIPLERİNİN VE MORFOLOJİSİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZLER İLE İNCELENMESİ”, 1. ULUSLARARASI MALATYA UYGULAMALI BİLİMLER KONGRESİ, 182-186, ISBN: 978-625-7954-05-1, ARALIK 2019, Malatya / TÜRKİYE (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)