

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ELEKTROFOREZ DESTEKLİ MİKRO FREZELEME KULLANILARAK
NADİR TOPRAK ELEMENTİ NDFEB MİKNATISLARININ
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Eda ÇOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Aybars MAHMAT
TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTROFOREZ DESTEKLİ MİKRO FREZELEME KULLANILARAK
NADİR TOPRAK ELEMENTİ NDFEB MİKNATISLARININ
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

EDA ÇOLAK
(230070001)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Aybars MAHMAT

TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROFOREZ DESTEKLİ MİKRO FREZELEME KULLANILARAK NADİR
TOPRAK ELEMENTİ NDFEB MİKNATISLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Eda ÇOLAK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 04/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

Doç. Dr. Anıl İMAK
(Bingöl Üni.)

BAŞKAN

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Aybars
MAHMAT
(Munzur Üni.)

DANIŞMAN

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Salih AĞAR
(Munzur Üni.)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN

İmza ve Mühür

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir

04/09/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza

Eda ÇOLAK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Aybars MAHMAT

TEŐEKKÖR

Bu tez çalıőmasının hazırlanmasında bilimsel bilgi birikimi ve rehberliğiyle büyük katkı sağlayan danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi Aybars MAHMAT'a, akademik yönlendirmeleriyle ve laboratuvar sürecinde destekleri ile katkıda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Salih AĞAR'a teşekkür ederim.

Eda ÇOLAK
TUNCELİ - 2025



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VI
KISALTMALAR LİSTESİ	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ.....	1
1. 1. Çalışmanın Amacı.....	2
1. 2. Çalışmanın Hedefi	3
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1.Literatür Özetleri.....	4
2.2. Nadir Toprak Elementleri	6
2.3 Mikro İşleme	9
2.3 Elektroforez	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1 Materyal	20
3.1.1 Takım tezgahı	21
3.2 Yöntem.....	21
3.2.2 Kesme parametreleri	21
3.2.2 Kuvvet ölçümü	21
3.2.3 Takım aşınmasının ölçülmesi.....	22
3.2.4 İş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi	22
3.2.5 Deneysel çalışmalar.....	22
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	27
4.1 Kesme Kuvveti	27
4.1.1 Farklı işleme tekniklerinin kesme kuvvetine etkisi	27
4.1.2 Farklı kesme hızlarının kesme kuvvetine etkisi.....	29
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü	30
4.2.1 Farklı işleme tekniklerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi.....	30
4.2.1 Farklı kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi	32
4.3. Takım Aşınması	33

5. SONUÇ	39
6. KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ	



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. NdFeB mıknatısların üretim süreci	8
Şekil 2.2 . İşleme boyutları.....	10
Şekil 2.3. Elektroforez destekli frezeleme işlemi.....	19
Şekil 3.1. Deney sistemi	25
Şekil 3.2. İş parçası	26
Şekil 4.1. Elektroforez DC geriliminin kesme kuvvetine etkisi.....	28
Şekil 4.2. Kesme hızlarının kesme kuvvetine etkisi.....	30
Şekil 4.3. Elektroforez DC geriliminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	32
Şekil 4.4. . Farklı kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi	33
Şekil 4.5. . İşleme yöntemlerine göre meydana gelen aşınma türleri.....	35
Şekil 4.6. . Farklı kesme hızlarının takım aşınmasına etkisi	36
Şekil 4.7. . Farklı gerilimlerin takım aşınmasına etkisi.....	37
Şekil 4.8. . İşleme sonrası EDMF kesici takım yüzeyinin EDX spektrumu (a) KMF b) EDMF+ Al ₂ O ₃ c) EDMF+SiC)	38

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Kesici takım.	20
Tablo 3.2. Mekanik ve kimyasal özellikler	20
Tablo 3.3. Deneysel parametreler.....	21



KISALTMALAR LİSTESİ

NTE	Nadir toprak elementleri
EDMF	Elektroforez destekli mikro frezeleme
KMF	Konvansiyonel mikro frezeleme
REE	Rare earth elements
CMM	Conventional micro milling
EAMM	Electrophoresis-assisted micro milling
NdFeB	Neodimyum-demir-bor
EDM	Elektriksel deşarj işleme
MMY	Minimum miktarda yağlama
IUPAC	Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
HDDR	Rekombinasyon
EPD	Elektroforetik kaplama
HA	Nano-hidroksiapatit
PVA	Polivinil alkol
GO	Grafen oksit
Ser	Serotonin
PEEK	Polyetheretherketone
HI-EPD	Yüksek darbeli elektroforetik kaplama
ABiPPS	Asimetrik bipolar plazma güç kaynağı
BUE	Talaş sıvanması
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük
Ry	Maksimum yüzey pürüzlülük

ÖZET

Birçok endüstriyel sektörde kullanılan nadir toprak elementleri (NTE) hakkında araştırmaya yapılmakta olup, özellikle bazı NTE'ler üretim alanında stratejik öneme sahip çok değerli malzemeler olarak görülmektedir. NTE'lerin yüksek mekanik özelliklerinden dolayı işlenebilirliği zordur. NTE'lerin sahip olduğu sertlik, kırılganlık, atmosferde parlayıcı ve yanıcı özellikleri nedeniyle daha güvenilir ve daha hassas bir şekilde işleme tekniklerinin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada NTE'lerden biri olan NdFeB mıknatıslarının işlenebilirliğini artırmak için konvansiyonel mikro frezelemeye (KMF) alternatif bir yöntem olan elektroforez destekli mikro frezeleme (EDMF) yöntemi önerildi. Çalışmada 3 farklı kesme hızı ve farklı gerilim değerinin performans karakteristiklerine olan etkisi incelendi. Ayrıca EDMF yönteminde iki farklı nano partikülün etkisi de incelendi. Deneysel çalışmalar gerilimin ve kesme hızının artması kesme kuvvetini, yüzey pürüzlülüğünü azalttı. Kesme hızının artması takım aşınmasını artırırken gerilimin artması takım aşınmasını azalttı. Deneysel sonuçlar EDMF yönteminin işlenebilirliği artırdığı görüldü.

Anahtar Kelime: Nadir toprak elementleri, Mikro frezeleme, Elektroforez, İşlenebilirlik

ABSTRACT

Improving the Machinability of Rare Earth Element NdFeB Magnets Using Electrophoresis-Assisted Micro-Milling

Research is being conducted on rare earth elements (REE) used in many industrial sectors, and some REEs are especially seen as very valuable materials with strategic importance in the production area. Due to the high mechanical properties of REEs, their machinability is difficult. Due to the hardness, brittleness, flammability, and combustibility in the atmosphere, developing more reliable and precise machining techniques has become necessary. This study proposed an alternative method to conventional micro milling (CMM), electrophoresis-assisted micro milling (EAMM), to increase the machinability of NdFeB magnets, one of the REEs. The study examined the effects of 3 different cutting speeds and 3 different voltage values on the performance characteristics. In addition, the effects of two different nanoparticles in the EAMM method were also examined. Experimental studies showed that increasing the voltage and cutting speed reduced the cutting force and surface roughness. While increasing the cutting speed increased the tool wear, increasing the voltage decreased the tool wear. Experimental results showed that the EAMM method increased the machinability.

Keywords: Rare earth elements, micro-milling, electrophoresis, machinability

1. GİRİŞ

Mikro elektromekanik, nano elektromekanik ve mikro-tıbbi sistemler gibi hassas mikro bileşenlerin minyatürleştirilmesine yönelik eğilim, son yıllarda mikrofabrikasyon tekniklerinde ilerlemelere yol açmıştır. Yüksek en boy oranlarına sahip mikro boyutlu parçalara olan bu talep, biyomedikal, elektronik, otomotiv ve havacılık endüstrilerinin hem yeni hem de eski üretim süreçlerini mikro ölçekte benimsemesini ve uygulamasını gerektirmiştir. Mikrofabrikasyon teknikleri uzun yıllardır mevcut olmasına rağmen, form, boyut ve yüzey özelliklerinde son derece sıkı toleransların (Chavoshi ve ark., 2017), yüksek işleme verimliliğinin ve makine konumlandırma doğruluğunun katı gereksinimleri, hassas işleme süreçlerinde daha fazla gelişmeye yol açmıştır (Chern ve ark., 2007). Mikro frezeleme, artan gereksinimleri kolaylaştırmak için geliştirilen hassas bir mikro mekanik kesme işlemidir.

Mikro frezeleme, mikro ölçekte karmaşık üç boyutlu (3B) yüzeyler gibi mikro yapılara sahip bileşenlerin üretimi için etkili ve verimli bir hassas işleme sürecidir. Tipik olarak, mikro frezeleme, 1 μm ile 1 000 μm aralığında bulunan mikro frezeleme takımının kesici kenar çapının boyutu ile karakterize edilebilir (Câmara ve ark., 2012), oysa geleneksel frezeleme sürecinde kesici kenarın çapı 1 000 μm 'den büyüktür. Ancak, bu tanım yalnızca takıma odaklanır ve işleme sürecinin önemli yönlerini, yani hassasiyet, doğruluk ve altta yatan malzeme çıkarma mekanizmasını içermez. Bu nedenle, mikro frezeleme sürecini karakterize etmek için daha teknik bir yaklaşım şu şekilde olabilir: 1 000 μm 'den daha az geometrik olarak tanımlanmış kesici kenar takım çaplarına sahip hassas bir mekanik kesme işlemi, form ve boyut doğruluğunda 1 μm 'den daha az toleransla hassas malzeme talaşı çıkarma için (Uriarte ve ark., 2009).

Ancak, mikro frezeleme işlemi, makro ölçekte frezelemede mevcut olmayan, mikro ölçekte işleme sırasında içsel fiziksel işlem sorunlarıyla sınırlıdır. Bu tür kısıtlamalar, talaş oluşumu, boyut etkisi ve işlem kararlılığı gibi mikro alanda malzeme çıkarma mekanizmalarıyla ilgilidir. Bu nedenle, mikro frezelemede işlem verimliliğini ve hassasiyetini sınırlayan başlıca fiziksel işlemler ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu olumsuz fenomenlerin işleme süreci çıktıları üzerindeki etkileri ele alınırken, bu etkilerin ortadan kaldırılmasa bile en aza nasıl indirilebileceğine dair içgörüler sunulmaktadır.

Son zamanlarda, mikro frezeleme sürecine yönelik güçlü bir araştırma ilgisi oluşmuş olup, çok sayıda çalışma iş parçası malzemesi ve mikro yapı, takımların geometrisi ve malzemeleri, verimli takım yolu oluşturma ve kesme sıvısı gibi işlem girdilerine odaklanmıştır. Bu işlem girdilerinin işleme sırasında kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin en son çalışmaların incelenmesi, mevcut mikro frezeleme sürecinin net bir tasvirini sağlar. Bu nedenle bu inceleme, gelecekteki geliştirme için sürecin alanlarını belirlemek üzere en son yayınlanan teorik, analitik ve deneysel çalışmaları inceler.

Süreç geliştirme açısından, temel alanlardan biri mikro frezeleme sürecini diğer başarılı teknolojilerle desteklemek olacaktır. Bu incelemenin 4. Bölümü, ultrasonik destekli, lazerle indüklenen oksidasyon destekli ve plazma jet destekli mikro frezeleme süreçleri gibi gelişmiş süreçleri üretmek için ikincil sistemleri uygulayan son başarılı çalışmaları inceleyecektir. Bu tür destekli süreçlerin önemi, daha yüksek sertlik ve aşınmaya dayanıklı malzemelerin gelecekteki gelişmeleriyle daha da belirginleşecektir. Bu tür malzemeler, sert ve aşınmaya dayanıklı süper alaşımlar, refrakter metaller, yapısal seramikler, kompozitler, polimerler ve magnezyum alaşımlarını içeren "işlenmesi zor" malzemeler olarak sınıflandırılır (Shokrani ve ark., 2012). Dikkate alınması gereken husus, mikro frezeleme sürecinin fiziksel süreç kısıtlamaları, yani talaş oluşumu, boyut etkisi ve süreç kararlılığı açısından sınırlamalarının, gelecekte yalnızca mikro frezeleme ile üstesinden gelinememesi olabilir.

Mevcut çalışmada yüksek mekanik özelliklere sahip olan NdFeB mıknatısların karbür takım kullanılarak elektroforez destekli mikro frezeleme (EDMF) performansını incelemek için ayrıntılı bir araştırma yapıldı. Deneylerde yüzey kalitesi, kesme kuvveti, takım aşınması ve aşınma türlerini analiz etmek için değişen kesme hızı, gerilim değerleri ve aşındırıcı parçacıklar kullanıldı. NdFeB mıknatısların mikro frezeleme işlemi ile ilgili literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışma NdFeB mıknatısların işlenebilirliğinin artırılmasını hedeflemektedir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu araştırmanın temel hedefi, üstün mekanik özelliklere sahip NdFeB mıknatısların karbür takım kullanılarak EDMF performansını incelemek, ayrıca bu yöntemlerin işlem parametrelerinin, mikro frezeleme performansına olan olumlu ve

olumsuz etkilerini deneysel boyutta incelemektir. Çalışmada iş parçası yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ile kesme kuvvetleri gibi performans kriterleri deneysel uygulamalar ile belirlenecek ve değerlendirilecektir. Talaşlı imalatla görece yeni ve nadiren kullanılan EDMF yönteminin, diğer üretim tekniklerinin gelişimine de katkı sunması beklenmektedir. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha yenilikçi, verimli, kaliteli ve ekonomik sonuçlar ortaya koyan bu çalışma, ulusal sanayiye de katkı sağlayacaktır.

Talaşlı imalatla kullanımı yeni ve nadir olan elektroforez destekli işleme yöntemine ilişkin bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu durum, söz konusu çalışmanın özgün değerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kullanılacak NdFeB mıknatısların mikro işleme ile işlenebilirliğine dair herhangi bir çalışmaya literatürde yer verilmemiştir. Bu tez çalışmasıyla hem literatürdeki bu boşluk doldurulmuş hem de söz konusu yöntemlerin birlikte uygulanmasının talaşlı imalatla kritik öneme sahip yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, ve kesme kuvvetlerine olan etkileri kapsamlı biçimde ortaya konmuştur.

1.2. Çalışmanın Hedefi

Bu araştırmanın temel hedefi, üstün mekanik niteliklere sahip mühendislik malzemelerinin daha kaliteli ve daha ekonomik bir şekilde üretim gerçekleştirilmesi için, çalışma kapsamında kullanılacak olan elektroforez ve mikro frezeleme gibi iki farklı yöntemden oluşacak kombinasyonlarının ve proses parametrelerinin en iyisini belirlemektir. Bu çalışma ile geleneksel işleme yöntemlerine göre daha düşük kesme kuvvetleri, üstün yüzey kalitesi ile daha uzun takım ömrü hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda işleme yöntemlerinin çalışma prensiplerine ilişkin literatür taraması ve temel incelemeler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yöntemlerin birlikte uygulanmasıyla, farklı işlem parametreleri (devir sayısı, işleme tekniği, gerilim) dikkate alınarak NdFeB mıknatısların mikro frezelenmesine yönelik çeşitli deneysel analizler yürütülmüştür. Ayrıca elde edilen bulgular, klasik mikro frezeleme yöntemleri ile karşılaştırılarak yöntemin avantajları ve sınırlılıkları ortaya konmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2. 1. Literatür Özetleri

Gong ve ark. (2022) sinterlenmiş NdFeB mıknatısların elektriksel deşarj işleme (EDM) yöntemi ile frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü, malzeme çıkarma oranı ve yüzey morfolojisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda elektriksel deşarj işleme yönteminin yüzeyde büyük radyal boyutlu kraterler oluşturduğu ve yüzey kalitesini artırdığını gözlemlemişlerdir.

Bai ve ark. (2022) sinterlenmiş NdFeB mıknatıslarının EDM yöntemiyle frezelemesiyle takım aşınma oranı ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Düşük akım değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğunu, takım aşınma oranı değişimlerinin ise kontrol edilebilir olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chang ve ark. (2016) , lazer işleminin sinterlenmiş NdFeB mıknatısların manyetik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Yüksek sıcaklık koşulları altında, NdFeB mıknatısın mikro yapısının değiştiğini, bunun sonucunda yüzeyde eriyik havuzları ve ısıdan etkilenen bölgelerin oluştuğunu ve bunun da manyetik performansta bir düşüşe yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Peterson ve ark. (2012), lazer parametrelerinin NdFeB mıknatıslar üzerindeki etkisini sistematik olarak inceleyip ve işlem sırasında aşırı ısı oluşumunun manyetik performansı bozabileceğini gözlemlemişlerdir.

Emminghaus ve ark. (2020), deneysel araştırmalar yoluyla, lazer işlemi sırasında termal etkiler nedeniyle NdFeB mıknatısların yüzeyinde çatlaklar olduğunu gözlemlemişlerdir. Sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar için hammadde maliyeti yüksektir ve bu da artan üretim giderlerine neden olur.

Greer ve ark. (2014) sinterlenmiş neodimyum-demir-bor (NdFeB) nadir toprak mıknatıslarından üretilen ve işlenmeden önce mıknatıslanmış cihazların tel elektrik deşarjlı işlenmesini incelemişlerdir. İşleme sürecinde ısınma nedeniyle mıknatıs yüzeyinde kalıcı mıknatıslanma kaybını karakterize etmek için daha ileri analizler yapılmış ve test edilen en yüksek voltaj ve kapasitans değerleri kullanıldığında yaklaşık 35 µm derinliğindeki dış tabakanın manyetikliğini kaybettiği bulmuşlardır.

Mittal ve ark. (2017), kesilmesi zor malzemelerin (Ti6Al4V gibi) mikro işlenmesinde sınırlı sertliğin ana engellerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, bu özellik karakteristiği yüksek kesme hızları kullanılarak iyileştirilebilir çünkü kesme kuvvetleri, esas olarak talaş yükünün azalması nedeniyle daha yüksek hızlarda azalır. Yüksek kesme hızlarında, kesme kuvvetlerindeki dinamik değişiklikler işlemi kararsız hale getirebilir. Bu durumda, ısı üretimi de daha yüksek olabilir ve bu, iş parçası malzemesinin (örneğin polimerlerde) zayıf ısıl iletkenliği ile birleşerek kuvvetleri ve kararsız davranışı da etkiler.

Yang ve ark. (2020) 6061 alüminyum iş parçasının mikro frezeleme işleminde minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemiyle soğutma uygulamasının, yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetini ve takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığını rapor etmişlerdir.

Bruschi ve ark. (2016) ise Ti6Al4V titanyum alaşımının mikro frezelemesinde MMY yönteminin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini incelemiş ve MMY destekli mikro frezelemenin, kuru mikro frezeleme yöntemine kıyasla daha üstün sonuçlar sağladığını belirlemişlerdir.

Ni ve Zhu (2020) TC4 alaşımının MMY ile ultrasonik titreşim yöntemi kullanılarak mikro frezeleme işlemini gerçekleştirmiştir. Bu hibrit yöntem sayesinde daha yüksek yüzey kalitesi elde edilmiş ve kesme kuvvetlerinin azaltıldığı tespit etmişlerdir.

Vipidas ve Mathew (2019), TiAlN kaplamalı karbür mikro freze kullanılarak Ti-6Al-4V'nin mikro frezelemesinde flanş, yapışkan ve aşındırıcı aşınmanın meydana geldiğini keşfetmişlerdir.

Mikro frezelemede boyut küçültülmesi nedeniyle, kesme kuvvetlerinin büyüklüğü makro frezelemeye göre önemli ölçüde daha küçüktür (Balázs ve ark., 2021a). Mikro frezeleme durumunda, kesme kenarı yarıçapı talaş kaldırmada önemli bir rol oynar çünkü minimum talaş kalınlığını ve malzeme kaldırma mekanizmalarını etkiler.

Afazov ve ark. (2013), AISI 4340 çeliğini mikro frezelemişlerdir ve daha yüksek kesme kenarı yarıçapının daha yüksek kesme kuvvetlerine neden olduğunu kanıtlamışlardır.

Wu ve ark. (2016), OFHC bakırı işlediler ve kesme kuvveti ve sürtünme kuvvetinin ana kesme kuvvetine oranının sırasıyla %55 ve %45 olduğunu bulmuşlardır. Yarıçap arttıkça, burada gösterilen farkında arttığını gözlemlemişlerdir.

de Oliveira ve ark. (2015), makro ve mikro boyutlu frezeleme işlemlerinde dış başına ilerlemenin özgül kesme kuvveti üzerindeki etkisini incelemiştir. Mikro frezeleme durumunda, dış başına ilerleme iki katına çıkarılarak özgül kesme kuvveti ortalama %22 oranında azalırken, kesme derinliği iki katına çıkarılarak %13 oranında azaldığını bulmuşlardır. Bu değerler, makro boyutlarda sırasıyla yalnızca %18 ve %7 olduğunu gözlemlemişlerdir.

He ve ark. (2019a) tarafından yapılan araştırmada, AL6061 iş parçası üzerinde elektroforez destekli ultrasonik işlemin, yüzey pürüzlülüğünü hem geleneksel işleme yöntemlerine hem de yalnızca ultrasonik işlemeye kıyasla daha düşük seviyelere indirdiği tespit etmişlerdir.

2.2. Nadir Toprak Elementleri

Nadir toprak elementler (NTE) üstün mekanik, elektronik, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı birçok teknolojiye yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu elementler malzemelerin termal, korozyon, mekanik ve manyetik özelliklerini geliştirmeye yönelik malzemelerdir. NTE, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından benzer fizikokimyasal özelliklere sahip 17 elementten oluşan bir grup olarak tanımlanmıştır. Bu elementlerden 15'i, atom numaraları $Z = 57$ ile $Z = 71$ arasında olan lantanitler grubuna aittir: lantan (La), seryum (Ce), praseodim (Pr), neodim (Nd), prometyum (Pm), samaryum (Sm), europiyum (Eu), gadolinyum (Gd), terbiyum (Tb), disprozyum (Dy), holmiyum (Ho), erbiyum (Er), tülyum (Tm), iterbiyum (Yb) ve lutesyum (Lu) (Ramos ve ark., 2016). NTE genellikle iki ayrı gruba ayrılır: hafif (LREE) ve ağır (HREE). LREE'ler La, Ce, Pr, Nd, Pm ve Sm'dir. Çevrede daha yüksek miktarlarda bulunurlar, daha küçük atom kütlelerine ve daha yüksek çözünürlük ve alkaliniteye sahiptirler. Aşağıdaki elementler HREE grubunun bir parçasıdır: Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu ve Y. Bu elementler daha yüksek atom kütlelerine, daha düşük çözünürlüğe ve alkaliniteye sahiptir (Šmuc ve ark., 2012).

Bilgisayar, elektrikli araçlar, yenilebilir enerji, ziraat ve sağlık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Aslan ve Say, 2022). Metalurji, petrol endüstrisi , kimya endüstrisi ve diğer alanlarda az sayıda NTE kullanılarak çeşitli ürünlerin performansı büyük ölçüde iyileştirilebilir. Performanstaki bu artış, üretim verimliliğini etkili bir şekilde iyileştirebilir (Hao ve ark., 2019). NTE'ler kullanılarak elde edilen NdFeB mıknatıslar, yüksek manyetik güç ve koersivite nedeniyle birçok endüstride geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Sasaki ve ark., 2016). (Nd, Pr, Dy)-Fe-B ve diğer eser elementlere dayalı, %27-32 ağırlıkça NTE içeriği, %67-73 ağırlıkça Fe içeriği, yaklaşık %1 ağırlıkça B içeriği (Peiró ve ark., 2013) ve diğer küçük metallere sahip NdFeB mıknatısların fazı, NdFeB mıknatısların uygulamalarıyla belirlenir. NdFeB mıknatıs hurdasından geri kazanmanın iyi ekonomik faydaları vardır. Elektrikli motorlarda ve jeneratörlerde yaygın olarak kullanılırken, rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinde de kritik bir rol oynarlar (Ramlan ve ark., 2020). Özellikle otomotiv endüstrisinde performans motorları ve fırçasız DC motorlar gibi uygulamalarda da tercih edilmektedirler. NdFeB mıknatısların sunduğu yüksek enerji yoğunluğu ve dayanıklılık, onları modern teknolojinin vazgeçilmez bileşenleri haline getirmiştir (Jha, 2014).

NdFeB mıknatıslar mikro yapılarına göre nanokristalin ve mikrokristalin olarak ikiye ayrılırlar (Brown ve ark., 2002). Nanokristalin NdFeB mıknatıslar genellikle Nd₂Fe₁₄B'ye yakın bir bileşime sahip eriyik eğirme şeridi ile üretilir. Bu şerit daha sonra toz haline getirilir veya polimer bir mıknatısa bağlanır ya da sıcak bir şekilde deforme edilerek tamamen yoğun bir mıknatıs haline getirilir. Eriyik eğirmenin dışında, nanograin malzeme atomizasyon, hidrojen, orantısızlaştırma, desorpsiyon, rekombinasyon (HDDR) ve mekanik alaşımlama yoluyla da üretilebilir. Atomizasyon, yüksek üretim hızı ve düzgün küresel parçacık morfolojisi avantajlarını sunar, ancak söz konusu düşük söndürme hızının gerektirdiği bileşimsel değişikliklerle sınırlıdır. HDDR, manyetik olarak anizotropik toz üretme yeteneğine sahiptir, ancak tozun termal kararlılığıyla sınırlıdır. Mekanik alaşımlama, NdFeB nanokristalin ve nanokompozit toz üretmek için kullanılabilir, ancak bu tekniğin dezavantajları düşük verimler (%70 civarı) ve ince tozun reaktifliği.

Mikrokristalin mıknatıslar, geleneksel toz metalurjisi yöntemi kullanılarak tamamen yoğun bir şekle sinterlenme eğilimindedir. Sinterlenmiş mıknatıs üretme süreci, genellikle nispeten yüksek bir nadir toprak bileşeni (Nd, Dy~15 at%) içeren bir külçenin

dökülmesiyle başlar. Bu ilave nadir toprak bileşeni, α -Fe çökmesini sınırlar ve sonraki sıvı faz tane sınırı sinterleme işlemini kolaylaştırır. Sinterlenmiş mıknatıslar için NdFeB malzemesinin dökümünün ardından, kaba öğütme ile toz haline getirilir ve ardından jet değirmende öğütülür. Elde edilen tozun ortalama parçacık boyutu yaklaşık 5 μ m'dir ve daha sonra manyetik bir alanda (~ 10 – 20 kOe) hizalanabilir ve kısmen yoğun bir kompakt haline getirilebilir. Daha sonra sinterleme, birkaç saat boyunca yüksek sıcaklıklarda (1000 – 1100°C) gerçekleşir ve ardından tane sınırı dokusunu iyileştirmek ve iç gerilimleri azaltmak için sinterleme sonrası bir ısıtma işlemi ($\sim 600^\circ\text{C}$) uygulanır. Silindirik, yay ve dikdörtgen çubuklar, sinterlenmiş bileşenler için tipik şekillerdir. Bu şekiller, istenen boyutlara göre işlenmeyi ve nikel, çinko, alüminyum veya epoksi koruyucu bir tabaka ile kaplanmayı gerektirir (Brown ve ark., 2002). Şekil 2.1'de NdFeB mıknatısların üretim süreçleri verilmiştir.



Şekil 2.1. NdFeB mıknatısların üretim süreci

NdFeB mıknatıs üretimi arasında, sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar en büyük orana sahiptir ve en geniş uygulama yelpazesine sahiptir. Bununla birlikte, sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar, düşük plastisite ve tokluk ile zayıf mekanik özellikler sergiler ve bu da onları işleme sırasında çatlamaya ve kırılma arızasına eğilimli hale getirerek üretimde önemli zorluklar oluşturur (Gao ve ark., 2019). Yüksek sertlik ve kırılabilirlikleri nedeniyle NdFeB

mıknatıslarının geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesi zordur (L. Li ve ark., 2007). NdFeB mıknatısların kesilmesi ve taşlanması işlemleri sırasında yaklaşık %20-30 ağırlık oranında hurda oluşur ve bu hurdaların %95'i geri dönüştürülebilir (Mochizuki ve ark., 2013). NdFeB mıknatısların işlenebilirliğinin incelendiği az sayıda çalışma vardır. Günümüzde, NdFeB mıknatıslar için yaygın işleme yöntemleri arasında EDM, elmas tel kesme ve lazer kesim yer alır ve bunların hepsi işleme sırasında önemli miktarda ısı üretir (Bai ve ark., 2021; Yu ve ark., 2022). Bununla birlikte, NdFeB mıknatıslar nispeten düşük bir Curie sıcaklığına ve zayıf termal kararlılığa sahiptir ve bu da yüksek işleme sıcaklıklarının yüzey kalitesi ve performansı için zararlı olmasına neden olur (Zhan ve ark., 2023). Mıknatıs Curie sıcaklığının üzerine ısıtıldığında, mıknatıslanmasını kaybeder. EDM'de işlenen mıknatısın bir kısmı eritmek için Curie sıcaklığının üzerine ısıtılması gerektiğinden, mıknatısın bir kısmı da kalıcı mıknatıslanma kaybına uğramalıdır (Greer ve ark., 2014). Sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar için hammadde maliyeti yüksektir ve bu da artan üretim giderlerine neden olur. Bu nedenle, NdFeB mıknatısların işlenmesi sırasında termal hasarı azaltmak ve kesme yüzey kalitesini iyileştirmek kaçınılmaz konular haline gelmiştir (T. Yang ve ark., 2024). NdFeB mıknatıslarının günümüzde talaşlı imalatla işlenebilirliği konusunda çeşitli çalışmalar mevcut olup, en uygun işleme şartlarının belirlenmesi üzerine araştırmalara devam edilmektedir. Bu bakımdan bu malzemelerin işlenmesinde uygun işleme şartlarının araştırılması önemlidir.

2.3. Mikro İşleme

Mikro işleme, talaşlı imalat yöntemlerinden biri olup, yüksek hassasiyet ve mikro boyutlardaki karmaşık malzemeleri işleyebilme kabiliyeti sayesinde havacılık, otomotiv, uzay ve birçok üretim sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Y. Li ve ark., 2023). Minyatür boyuttaki malzemeler, geleneksel mikro işleme teknikleri kullanılarak işlenmekte olup, yüksek yüzey kalitesi ve hassas tolerans değerlerine sahip olmaları beklenmektedir (Yadav ve ark., 2022). mikro frezeleme, çoğu minyatür ürün için en önemli ve güvenilir mikro üretim çözümlerinden biridir (Aurich ve ark., 2017). Mikro frezeleme, 100-999 µm çapındaki mikro parmak frezeler kullanılarak gerçekleştirilen bir frezeleme yöntemidir (Şekil 2.2). Ancak, mikro boyutlu frezelerin kesici takımları üzerindeki yüksek gerilim ve stres nedeniyle çeşitli olumsuzluklar meydana

gelebilmektedir. Bu nedenle, uygun olmayan işleme parametreleri, işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Mikro frezeleme sürecinde, kesme derinliği veya dış başına düşen ilerleme miktarının, kesici takım kenar yarıçapına oranı genellikle büyük olmaktadır. Bu durum, kesme işlemi sırasında kararsızlıklara yol açarak kesme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır (Bandapalli ve ark., 2018). Artan kesme kuvveti, kesme sıcaklığını ve takım aşınmasını artırarak yüzey kalitesinin düşmesine ve üretim maliyetlerinin yükselmesine sebep olmaktadır (Alhadeff ve ark., 2019). Ayrıca, mikro boyutlu özelliklerde çapak gidermek son derece zordur (Kumar ve ark., 2017). Çapak boyutunun işlenmiş özelliklerin boyutuna oranı, geleneksel işleme operasyonlarında kullanılanlardan daha yüksektir, bu nedenle mikro çapak alma işlemlerinin maliyet ve zaman gereksinimleri, ürünlerin nihai maliyeti üzerinde daha fazla etkiye sahiptir (Y. Yang ve ark., 2020). Oliaei ve Karpas (2017), çapak oluşumu üzerinde biriken kenarın etkisini incelemiş ancak güçlü bir korelasyon bulamamışlardır; yine de, daha yüksek kuvvetlerin daha büyük bir çapakla sonuçlandığını bulmuşlardır. İş parçası malzemesi kesilmesi zor metal alaşımı olduğunda mikro işlemedeki zorluk çok daha fazla artar (Khaliq ve ark., 2020). Bu tür olumsuzlukları gidermek amacıyla, mikro frezeleme sürecine farklı soğutma yöntemleri ve işleme tekniklerinin entegre edildiği hibrit yöntemler geliştirilmiştir.



Şekil 2.2. İşleme boyutları (Balázs ve ark., 2021b).

Geleneksel boyutlu frezeleme işlemlerinde takım titreşiminin en aza indirilmesi başlıca zorluklardan biridir çünkü uygunsuz titreşim (titreme) sıklıkla hızlandırılmış takım aşınmasına veya düşük yüzey kalitesine neden olur (Kiss ve ark., 2018). Bu zorluklara ek olarak, titreme mikro frezelemede takımın kırılmasına neden olabilir (Ma

ve ark., 2020). Boyut küçülmesi nedeniyle, mikro frezeleme işlemi küçük çaplı takımlar (ince takımlar) gerektirir ve bu nedenle bunların sertliği genellikle geleneksel boyutlarda kullanılanlardan bir mertebe daha düşüktür. Bu sınırlı sertlik, sertleştirilmiş çelikler ve titanyum alaşımları gibi kesilmesi zor malzemeleri işlerken büyük bir engeldir.

Geleneksel bağımsız (tek işlevli) takım tezgahları, mikro bileşenleri/ürünleri üretmek için önemli bir araç olarak kullanılmasına rağmen, özellikle karmaşık yüzey formlarına/şekillerine sahip olanlar için mikro bileşenlerin/ürünlerin üretiminin öngörülebilirliği, üretilebilirliği ve üretkenliği açısından hala büyük bir sorun olmaya devam etmektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmak için hibrit işleme yöntemleri ortaya çıkmıştır. Bazı hibrit mikro işleme süreçleri, işlenmesi zor malzemelerin işlenebilirliğini, takım ömrünü, geometrik doğruluğu, yüzey bütünlüğünü ve işleme verimliliğini artırabilmek için onaylanmıştır. Hibrit mikro frezeleme teknolojileri, mekanik mikro frezelemenin ve diğer gelişmiş teknolojilerin avantajlarını birleştirerek, sürecin olumsuzluklarını azaltmaya çalışır (Chavoshi ve Luo, 2015). Ultrasonik titreşim destekli mikro işleme, mekanik mikro frezelemeye kıyasla kesme kuvvetini, çapak oluşumunu ve yüzey pürüzlülüğünü azaltabilen umut verici yeni bir teknolojidir (Chen ve ark., 2019). Lazer destekli mikro işleme teknolojilerinin uygulanmasıyla takım ömrü ve süreç verimliliği artırılabilir (Kim ve ark., 2020).

Avantajlarına rağmen, endüstriyel uygulamalar için işlemin sağlamlığını sağlamak için dikkate alınması gereken, makro kesmeye kıyasla mikro kesmede bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Mikro kesmede kesilmemiş talaş kalınlığı küçüktür ve kesilmemiş talaş kalınlığının kesme kenarı yarıçapına oranı makro kesmedekinden çok daha düşüktür. Aslında, talaş kalınlığının kenar yarıçapına göre boyutu, çıkarma mekanizmasını ve sürme işleminden kesme/kesmeye geçişi belirler. Talaşlı imalat süreçlerinde kullanılan alternatif işleme ve soğutma yöntemlerinin, özellikle sert ve işlenmesi zor malzemelerde çeşitli problemler ve olumsuzluklara yol açabileceği görülmektedir. Bu nedenle, mikro frezeleme sürecinde uygun işleme parametrelerinin ve destekleyici yöntemlerin belirlenmesi, verimliliğin ve yüzey kalitesinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

2.3 Elektroforez

Araştırmacılar yüksek mekanik özelliklere sahip iş parçalarının işlenmesindeki zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu araştırmacılar çalışmalarında geleneksel işleme ve soğutma yöntemleri işlenmesi zor olan malzemelerin işlenmesinde verimsiz kaldığını gördüler (Fanara ve ark., 2017). Ayrıca geleneksel soğutma yöntemleri çevre ve insan sağlığına olan zararları ve nihai ömrü tamamlanan kesme sıvılarının saklama ve imhasındaki güçlükler gibi olumsuzluklara sahiptir (Ağar ve Tosun, 2021). Soğutma sıvılarında aşındırıcı kullanılması durumunda, aşındırıcı parçacıkların işlemede önemli bir rol oynaması için işleme alanına daha fazla parçacık getirmek gerekir. Ancak kesici takımın yüksek hızlı dönmesi, aşındırıcı parçacıkların işleme alanından kolayca uzaklaşmasına neden olmakta ve aşındırıcı parçacıkların kullanım oranı düşmektedir (He ve ark., 2019a). Teknolojik gelişmeler ve geleneksel işlemenin verimliliğini artıran uygulamalar işlemede ekonomik ve kaliteli üretimlere ilgiyi artırmıştır. Geleneksel işleme ve soğutma yöntemlerinde görülen olumsuzlukları gidermek, işleme verimliliğini artırmak ve maliyeti düşürmek için uygulanacak olan elektroforez destekli işleme bu yöntemlerden biridir. Elektroforez yöntemi bir malzeme işleme prosesi olarak son zamanlarda yaygınlaşan genellikle sert veya kesilmesi zor metalleri kesmek için kullanılan elektrokimyasal yöntemdir (Mahmat, 2024).

Elektroforetik kaplama (EPD), biyoaktif polimer veya farklı elementlerin oksitleri ile katmanlarla kaplanması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel elektrokimyasal kaplamanın aksine çok daha hızlı sonuç vermektedir. Yürütülen bir çalışmada HA/chitosan parçacıkları Ti6Al7Nb üzerine başarı ile kaplanmış olup çalışmada, iki fazlı ($\alpha+\beta$) Ti6Al7Nb titanyum alaşımı üzerine EPD yöntemiyle nano-hidroksiapatit (HA) ve kitosan (chitosan) kompozit kaplamalar başarıyla üretilmiştir. Kaplama banyosu olarak, %1 asetik asit ve %50 etanol karışımında çözölmüş 0.5 g/L kitosan çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözeltiye 3 g/L, 4 g/L ve 5 g/L konsantrasyonlarda nano-HA (iğne şekilli, 50 nm boyutunda) eklenerek süspansiyonlar hazırlanmıştır. Süspansiyonların pH değerleri HA konsantrasyonuna bağlı olarak 3,35 (3 g/L HA), 4,15 (4 g/L HA) ve 5,25 (5 g/L HA) olarak ölçölmüştür. EPD işlemi sırasında 10 V gerilim ve 240 saniye süre en optimal parametreler olarak belirlenmiştir. Daha yüksek gerilimler (>10 V) hidrojen kabarcığı oluşumuna, düşük gerilimler (<10 V) ise düzensiz kaplamaya

neden olmuştur. Elektrotlar arası mesafe 15 mm sabit tutulmuştur. EPD süresi artışıyla kaplama kalınlığı doğrusal olarak artmıştır: 180 saniyede $\sim 0,5 \mu\text{m}$, 240 saniyede 770-800 nm ve 300 saniyede $\sim 1,1 \mu\text{m}$. Ancak 240 saniyelik süre, en homojen ve çatlak içermeyen kaplamaların elde edilmesini sağlamıştır. Özellikle 4 g/L ve 5 g/L HA içeren süspansiyonlardan üretilen kaplamalar, yüzeyde nano gözenekli bir yapı sergilemiş ve HA nanoparçacıklarının kitosan matris içinde homojen dağılımı gözlenmiştir (Moskalewicz ve ark., 2015). Yürütülen bir diğer çalışmada farklı bir çözelti ve farklı kaplama şartları kullanılarak HA kaplaması yapılmış olup kaplama işleminde etanol bazlı bir süspansiyon kullanılmış olup, bileşenler 1 g HA tozu, 1 g polivinil alkol (PVA) ve 100 mL etanol (%99,8 saflık) şeklinde hazırlanmıştır. Süspansiyonun pH değeri HNO_3 ve NaOH ile 4'e ayarlanmıştır. Kaplama süresi tüm deneylerde 1 dakika sabit tutularak 50 V, 100 V, 150 V, 200 V potansiyel farkları 10 mm mesafe ile yerleştirilmiş anot olarak kullanılan Ti6Al7Nb ve katot olarak görev yapan paslanmaz çelik üzerine uygulanarak kaplama sonrası numuneler 600°C 'de 1 saat $2^\circ\text{C}/\text{dakika}$ hızı ile sinterlenmiş olup yapılan incelemeler de kaplama kalınlığının voltaj artışıyla doğrusal ilişkisi gözlenmiş ve en düşük kalınlık 50 V'da $4,38 \mu\text{m}$, en yüksek kalınlık 200 V'da $9,42 \mu\text{m}$ ölçülmüştür. Çalışma sonunda yüksek voltaj (150-200 V) kalınlık ve yapışmayı artırsa da mikro çatlaklara ve Ca/P oranının idealden sapmasına yol açmıştır. 100 V, biyouyumluluk ile mekanik özellikler arasında en dengeli performansı sunduğu rapor edilmiştir (Aydın vd., 2019). Yürütülen bir diğer çalışmada Ti6Al7Nb ve TNTZ (β -type Ti-29Nb-13Ta4.6Zr) alaşımlarının yüzeylerine grafen oksit (GO) ve serotonin (Ser) kaplaması yapılmış olup kaplama çözeltisi için Hummers yöntemiyle elde edilen 2 mg GO, 20 ml saf suda vortex ve ultrasonik banyo ile 10 dakika çözölmüştür. Bu işlem iki kez tekrarlanmıştır. GO+Ser kaplama çözeltisi için ise, 2 μg serotonin GO çözeltisine eklenmiş ve yine vortex ve ultrasonik banyo ile 10 dakika karıştırılmıştır. Kaplama işlemi, iki elektrotlu bir sistemde DC güç kaynağı ile gerçekleştirilmiş olup katot olarak saf titanyum plaka, anot olarak ise kaplanacak numune kullanılmıştır. Elektrotlar, kaplama çözeltisine 10 mm aralıkla paralel olarak daldırılmıştır. Kaplama işlemi sabit 10 V gerilim altında, 3 dakika boyunca yapılmıştır. Kaplanan numuneler saf su ile durulanmış, vakumlu desikatörde kurutulmuş ve çatlama/oksidasyonu önlemek için UV sterilizasyonuna 20 dakika maruz bırakılmıştır, elde edilen kaplama kalınlığı konusunda net bilgi verilmemesine rağmen SEM görüntülerinden homojen kaplama yapılabildiği görülmektedir (Oktay ve ark., 2023). Yürütülen bir diğer çalışma da alümina paslanmaz çelik üzerine su içermeyen çözelti

içerisinde EPD ile kaplanmış olup kaplama banyosu için toz, 0,8–1,0 mikron boyutunda, yüzey alanı 3,5–5,0 m²/g olan, sinterlenmiş yoğunluğu 3,9 g/cm³ olan alumina kullanılmış. Süspansiyon hazırlığında manyetik karıştırıcı ile 5 dakika karıştırılmış, ardından 20 dakika ultrasonik işlem uygulanmış olup üç farklı organik çözücü (iso-butil metil keton, aseton, butan-1-ol) ve bunların karışımları kullanılmıştır ve iyi sonuçlar butan-1-ol ile elde edilmiştir (Besra ve ark., 2007). Yapılan bir diğer çalışmada PEEK (polyetheretherketone) ve nano boyutlu Al₂O₃ (alümina) içeren kompozit kaplamaların, 316L paslanmaz çelik yüzeyler üzerine elektroforetik kaplama (EPD) yöntemiyle elde edilmesi detaylı olarak incelenmiş olup kaplama banyosu olarak üç farklı süspansiyon %99,7-100 saflıkta etanol içinde; 3P-3A: %3 ağırlık PEEK ve %3 ağırlık nano Al₂O₃, 4P-2A: %4 ağırlık PEEK ve %2 ağırlık nano Al₂O₃, 5P-1A: %5 ağırlık PEEK ve %1 ağırlık nano Al₂O₃ olarak hazırlanarak bu karışımlar ultrasonik banyoda 30 dakika dağılma sağlanmıştır. Her kaplama öncesi 7 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır ve süspansiyonların zeta potansiyeli ve iletkenliği ölçülmüştür (Corni ve ark., 2009). Kaplama işlemi, iki paralel elektrot (20 mm aralıklı) arasında 20V, 30V ve 40V olmak üzere 1 dakika ara ile artırılarak uygulanmış sabit voltaj uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama kalınlığı ölçülmemiş ancak kaplama ağırlığı, uygulanan voltaj ve süreye bağlı olarak artmış, bu artış logaritmik bir eğilim göstermiştir. Bir diğer değişle kaplama başında hızlı bir artış, zamanla yavaşlayan bir birikim gözlenmiş olup kaplama ağırlığı Denklem 2.1 'de sunulan Hamaker denklemiyle (w : kaplama ağırlığı, μ : elektroforetik mobilite, E : elektrik alan, A : elektrot alanı, C : süspansiyon konsantrasyonu, t : süre) hesaplanmıştır.

$$w = \int_0^t \mu \cdot E \cdot A \cdot C \cdot dt \quad (2.1)$$

Kaplama sonrası, kaplamanın yüzeye daha iyi tutunması ve mikroyapının iyileşmesi için 343 °C'de 30 dakika, 10 °C/dakika ısıtma hızıyla ısıtma işlemi uygulanmıştır ve sonuç olarak EPD yöntemiyle, %20-70 arası PEEK içeren homojen kompozit kaplamalar elde edilmiştir. Yürütülen bir diğer çalışmada Ti-13Nb-13Zr alaşımı üzerine Al₂O₃/PEEK kompozit kaplamalar elektroforetik yöntemle (EPD) uygulanmıştır (Moskalewicz ve ark., 2018). Kullanılan Al₂O₃ tozu ağırlıklı olarak α fazında olup %5-10 oranında γ fazı PEEK ile birlikte kullanılmış olup kaplama için farklı kimyasal bileşimlerde süspansiyonlar 0,1, 0,2 ve 0,3 gram Al₂O₃ ile 1,5 gram PEEK in 50 ml etanol

içinde çözündüğü sistem olarak hazırlanmıştır. Süspansiyonlar, partiküllerin dağılması için 20 dakika ultrasonik banyoda karıştırılmış, ardından kaplama öncesi 5 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılmış olup pH değerleri sitrik asit ve sodyum hidroksit (NaOH) ile ayarlanmış ve ayrıca partiküllerin yüzey yüklerini belirlemek için Zeta potansiyeli ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak en homojen ve düzgün kaplama 50V ve 20s değeri için elde edilmiştir.

NTE içeren çalışmalar da ayrıca elektroforetik sistemler de literatür içinde farklı çalışmalar da ele alınmıştır. Yürütülen bir çalışma da AZ91 magnezyum alaşımı üzerine HA ve GO esaslı kompozit kaplamalar, nadir toprak metal oksitleri (La_2O_3 ve Y_2O_3) ile güçlendirilerek elektroforetik kaplama yöntemiyle uygulanmış olup kaplama işlemi için hazırlanan süspansiyonlar, 50 mL izopropanol içinde manyetik karıştırıcı ile karıştırılmış ve ardından 1 saat ultrasonik olarak dağılmıştır (Liang ve ark., 2021). EPD işlemi sırasında, paslanmaz çelik anot ve AZ91 Mg alaşımı katot olarak kullanılmış, elektrotlar arası mesafe 2 cm olarak ayarlanmış ve süspansiyon sürekli karıştırılırken, oda sıcaklığında 120 saniye boyunca 150 V sabit gerilim uygulanmış, kaplama sonrası numuneler 70°C 'de 3 saat boyunca kurutulmuştur. Çalışma incelendiğinde gerçekleştirilen SEM analizlerinde partikül boyutlarının ve kaplama yoğunluğunun NTE oksit katkısı ile azaldığı, partikül boyutunun 500 nm değerinin altına düştüğü ve kaplamanın daha kompakt hale geldiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, nadir toprak oksitleri ile güçlendirilmiş HA-GO kompozit kaplamalar, AZ91 Mg alaşımının korozyon direncini önemli ölçüde arttırmış olduğu tespit edilmiş ve Y_2O_3 katkısı ile elde edilen kaplama, en kompakt ve gözeneksiz yapı ve en iyi korozyon dayanımını göstermiştir (Liang ve ark., 2021). Yürütülen bir diğer çalışmada ticari olarak temin edilen BaTiO_3 (BT) ve nadir toprak (NT) oksit tozları kullanılarak kompozitler üretilmiştir. Kullanılan BT tozu saf Ba/Ti oranı 1 olarak seçilmiş olup EPD için hazırlanan süspansiyonun bileşimi %12,75 ağırlık oranında kloroasetik asit (stabilizatör), %72,25 izopropanol (çözücü) ve %15 seramik tozu şeklindedir. Bu karışımda seramik tozu, %1, %3 veya %5 oranında NT dopantı (CeO_2 , Eu_2O_3 , Tb_4O_7 , Dy_2O_3 veya Er_2O_3) ve geri kalanı BaTiO_3 olacak şekilde hazırlanmıştır (Drdlik ve ark., 2022). Süspansiyonlar, homojenlik sağlamak için 30 dakika ultrasonik banyoda karıştırılmıştır. EPD işlemi yatay düzende, $18,2 \text{ cm}^2$ yüzey alanına sahip iki paslanmaz çelik elektrot (AISI 316L) arasında, 26 mm mesafede ve sabit 5 mA akım uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Süspansiyonun çökmesini önlemek için her 5 dakikada bir karıştırılmıştır. Kaplama işlemi 1 saat sürmüş, ardından

numuneler oda sıcaklığında 24 saat kurutulmuştur. Kurutma sonrası, yaklaşık 2-2,6 mm kalınlığında beyaz renkli kaplamalar elektrottan çıkarılmış ve 800 °C’de 1 saat kalsine edilmiştir. Sonrasında numuneler 10 × 5 × 2 mm boyutlarında çubuklar haline getirilmiştir ve Kaplanan numuneler, 1500 °C’de 2 saat bekletilerek sinterlenmiştir (Drdlik ve ark., 2022). Nadir toprak elementlerinin oksitlerinden seryum oksit için yürütülen bir başka EPD çalışmasında elektroforetik kaplama yöntemiyle grafit yüzeylere kaplanması incelenmiştir. Kaplama işlemi için partiküller, pH ~4.5’te sentezlenmiş ve etanol ile seyreltilmiş, ardından ultrasonikasyon ile homojenize edilmiştir. EPD hücresi 3D printer ile hazırlanmış ve paslanmaz çelik elektrotlarla donatılmıştır. Negatif elektrota grafit folyo yerleştirilmiştir. Yaklaşık 1,5 mL’lik partikül süspansiyonu, şırınga pompası ile hücreden dakikada 1 mL hızla iki kez ileri-geri geçirilmiştir. Kaplama işlemi sırasında 200 V’luk bir potansiyel uygulanmıştır. Kaplama sonrası, EPD ile elde edilen “yeşil gövdeler” havada kurutulmuş ve ardından 500 °C’de 1,5 saat süreyle kalsine edilmiştir. Kullanılan kaplama banyosu esas olarak etanol bazlıdır ve partiküller pozitif yüzey yüküne sahip olduğu tespit edilmiş olup zeta potansiyeli 25–55 mV aralığında ölçülmüş ve süspansiyonların monodispers ve 60–200 nm aralığında hidrodinamik çapa sahip olduğu tespit edilmiştir. Süspansiyon hazırlama sırasında özellikle sitrik asit, zeta potansiyelini önemli ölçüde azaltarak süspansiyonu stabilize etmiştir. Sonuç olarak, çatlak içermeyen, homojen CeO₂ kaplamaların katkı maddeleriyle yüzey yükü ve stabilite ayarlanabilir şekilde elde edilebileceği gösterilmiştir (Hastings ve ark., 2024). Yürütülen bir diğer çalışmada nanoyapılı CeO₂ filmleri katodik elektrolitik çöktürme (ELD) ve elektroforetik çöktürme (EPD) yöntemleriyle hazırlanmış ve EPD için CeO₂ nanoparçacıklarının dispersiyonu ve yüklenmesi amacıyla benzoik asit kullanılarak kompozit (polimer olarak polivinilpiridin (PVP) filmleri) PVP-CeO₂ filmleri elde edilmiştir (L. Yang ve ark., 2011). Yine CeO₂ nadir toprak elementi oksit türüne odaklanılan bir çalışmada polilaktik asit/β-trikalsiyum fosfat (PLA/β-TCP) iskeletler üzerine seryum oksit nanoparçacıklarının (CeNPs) yüksek darbeli elektroforetik kaplama (HI-EPD) yöntemiyle kaplanması incelenmiş olup deneyler asidik pH koşullarında hazırlanmış sulu kolloidal çözeltilerde gerçekleştirilmiştir. Nano parçacıkların çözelti içinde homojen dağılması için iki farklı reaktör konfigürasyonu kullanılmış olup birinde iskeletler süspansiyon içinde serbest bırakılmış, diğerinde ise elektrota sabitlenmiştir (Rosa vd., 2023). Yürütülen çalışmada 0,1% (m/v) CeNP sulu çözeltileri, nano parçacıkların çözücüde dağılması için 30 dakika ultrasonik uç ile hazırlanmıştır. CeNP

süspansiyonlarının stabilizesini artırmak için düşük pH çözelti tercih edilmiş olup pH değerini yaklaşık 2,12'ye düşürülmek için 0,1 M HNO₃ eklenmiştir ve çözeltinin Zeta potansiyeli yaklaşık +45,1 mV olarak ölçülmüştür. Çalışmada uygulanan Klasik HI-EPD (high-impulse electrophoretic deposition) yöntemi borosilikat beherde, iki paslanmaz çelik elektrot 4 cm aralıkla yerleştirilmiştir. Elektrotlardan biri 10W direnç üzerinden toprağa bağlanmış olup homojeniteyi sağlamak için reaktör ultrasonik banyo içine yerleştirilmiştir. Güç kaynağı olarak Asimetrik Bipolar Plazma Güç Kaynağı (ABiPPS) kullanılmıştır ve 600 V'luk iki zıt kutuplu darbe, 2,5 µs genişliğinde ve 250 µs aralıklı olarak 10 dk süresince uygulanarak başarılı kaplamalar elde edilmiştir (Rosa ve ark., 2023).

Geleneksel ve ultrasonik işlemede, işlenecek malzeme cinsine bağlı olarak çapak oluşumu meydana gelmekte ve yüzey pürüzlülüğünde arzu edilen kaliteye ulaşılamaması nedeniyle bu yöntemler tek başına yetersiz kalmaktadır. Bilhassa soğutma sıvılarında aşındırıcı kullanılması durumunda, aşındırıcı parçacıkların işlemede önemli bir rol oynaması için işleme alanına daha fazla parçacık getirmek gerekir. Ancak kesici takımın yüksek hızlı dönmesi, aşındırıcı parçacıkların işleme alanından kolayca uzaklaşmasına neden olmakta ve aşındırıcı parçacıkların kullanım oranı düşmektedir (He ve ark., 2019a). Parçacıkların işleme alanından çıkmasını önlemek, aşındırıcı parçacık kullanımını iyileştirmek ve maliyeti düşürmek için elektroforez yöntemi kullanılarak bir elektrik alanı uygulanması, işleme alanında yüksek aşındırıcı konsantrasyonu sağlar. Bu nedenle talaşlı imalatla kullanılan yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda elektroforez yönteminin işleme dahil edilmesiyle bu olumsuzluklar giderilebilecektir. Elektroforez yöntemi bir malzeme işleme prosesi olarak son zamanlarda yaygınlaşan elektrokimyasal yöntemdir. Bu yöntem geleneksel bir işlemin uygulanmasının uygun olmadığı, genellikle sert veya kesilmesi zor metalleri kesmek için kullanılan geleneksel olmayan bir işlemdir. Elektroforez, bir süspansiyondaki yüklü parçacıkların elektriksel alan altındaki hareketlerini içerir. Elektroforez yönteminde iki elektrot arasına bir doğru akım (DC) kaynağı kullanılarak uygulanan gerilim (V) ve elektrotlar arasındaki mesafe (d), bir elektrik alanının ($E=V/d$) oluşmasına yol açar. Elektrik alanda yüklü parçacığa bir kuvvet uygulanır ve bu kuvvet Newton cinsinden şu formül ile hesaplanmaktadır.

$$F=E.q \quad (2.2)$$

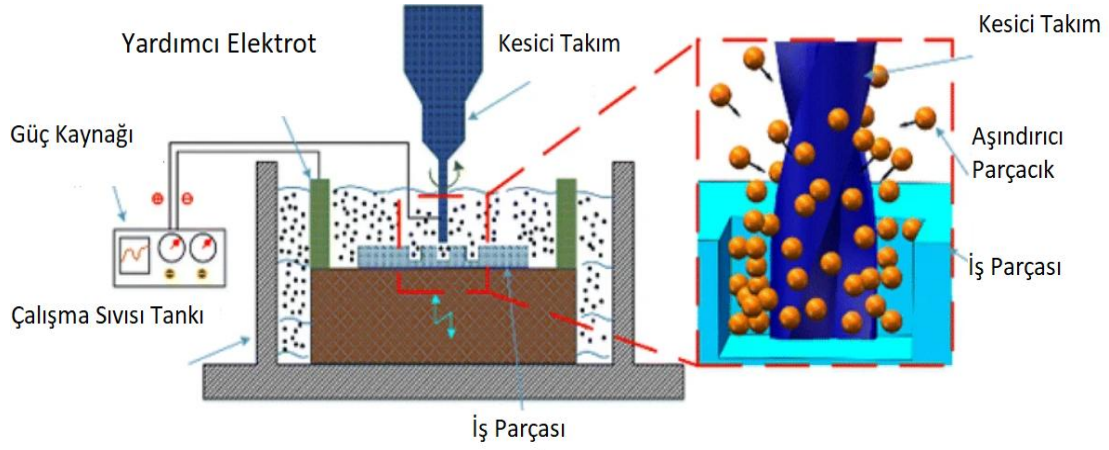
Elektrik alan içerisinde parçacıklar sürtünme kuvvetiyle karşılaşır. Sürtünme katsayısını da hesaba katıldığında, f frekans olmak üzere parçacık hızı $v=E.q/f$ formülüyle hesaplanmaktadır. Bir iyonun elektroforetik hareketi, M , parçacık hızının potansiyel gradiente bölünmesi ile aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$M=v/E \quad (2.3)$$

Ohm Kanunu'na göre $V = I.R$ 'dir. Bu durumda, gerilim (V) değerini arttırmak, akımı (I) ve dolayısıyla da elektroforetik hareketliliği arttırmak anlamına gelmektedir. Bu durumda, moleküller birbirlerinden daha hızlı bir şekilde ayrılacaktır. Sonuç olarak akım ve gerilimin değerinin artması parçacık hızını artıracaktır.

Elektroforez yöntemi, diğer işleme teknikleriyle kolayca ulaşılamayacak derecede sitokiyometrik yüksek saflıkta malzeme birikmesine olanak sağlaması önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Şekil 2.3'te elektroforez işleme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. İki elektrot arasında elektrik alanı oluşturmak için yüklü aşındırıcı partiküller, çalışma sıvısı tankı içerisinde süspansiyon haline getirilir ve karşıt yüklü elektrota doğru hareket eder. Elektrik kaynağı olarak doğru akım (DC) kullanılmaktadır. Elektrik alanı oluşturmak için kesici takım anoda bağlandığında ve iş parçasının içerisinde olduğu solüsyon içerisine yardımcı elektrot katot olarak yerleştirildiğinde, solüsyon içindeki parçacıklar negatif yüklü hale gelir. İşleme alanında, parçacıkların konsantrasyonu elektrik kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürükleme kuvveti, ultrasonik titreşim, viskoz direnç ve diğerlerinin kombine etkileri ile kontrol edilir. Yardımcı bir elektrik alanının etkisi altında, çözeltideki parçacıklar kesici takıma doğru ve diğer kuvvetlere karşı hareket eder. Bir başka çalışmada elektroforez sonucunda elde edilen elektrik alan sayesinde ince aşındırıcı parçacıklar oluşmuş ve bu parçacıklar merkezkaç kuvvetini ve istenmeyen titreşimleri engellemiş böylece aşındırıcı parçacık kullanım oranı, işleme kalitesi ve işleme verimliliğinin arttığı gözlenmiştir (Lian ve ark., 2016). He ve ark. (2019b) yapmış oldukları çalışmada AL6061 iş parçası üzerinde elektroforez destekli ultrasonik işleme sonucunda yüzey pürüzlülüğünün geleneksel işleme ve ultrasonik işlemeye göre daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Elektroforez destekli talaşlı imalat ile ilgili çalışmalar son yıllarda ortaya çıkmıştır. Bu yöntem ile işleme hassasiyeti ve işleme verimliliği artmaktadır. Elektroforez işleme yönteminin talaşlı imalata uygulanması çalışmanın en önemli özgün değeri olup, işleme performansı üzerinde olumlu etkileri

olacaktır. Elektroforez destekli talaşlı imalat ile ilgili çalışmalar son yıllarda ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.3 Elektroforez destekli frezeleme işlemi (He ve ark., 2019b)

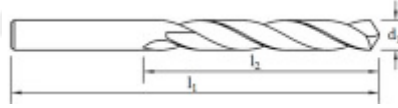
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Deneyisel çalışmalarda geleneksel ve elektroforez destekli mikro frezeleme işlemleri gerçekleştirildi. Kesici takım olarak 1 mm çapında 30° helis açılı 2 kanallı karbür kesici takımlar kullanıldı. Kesici takımın özellikleri Tablo 3.1’de görülmektedir. İş parçası olarak 40x25x5 mm boyutlarında sinterlenmiş NdFeB mıknatıslar kullanıldı. Kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verildi.

Tablo 3.1. Kesici takım

Parameter	Value
d_1	1
l_1	10
l_2	38
Z	2
Helix angle	30°



Tablo 3.2. Mekanik ve kimyasal özellikler

Chemical Composition (%)						
Element	Fe	Nd	Dy	Co	B	Pr
% Content	63.54	22.21	8.19	2.99	1	0.76
Mechanical and Physical Properties						
Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)		Young's Modulus (GPa)	Vickers Hardness(HV)	Density(g/cm ³)	
150-300	600-800		150-250	570	7.4-7.6	

3.1.1 Takım tezgâhı

Deneyler 1 kW gücünde, 60000 dev/dak devir sayısına sahip JETCO JMD-3 marka frezede su soğutmalı spindle kullanılarak CNC freze ile gerçekleştirildi.

3.2 Yöntem

3.2.1 Kesme parametreleri

Kesme deneylerinde kullanılan parametreler, literatür taramaları doğrultusunda ve takım tezgahlarının ile ekipmanların teknik özellikleri dikkate alınarak titizlikle belirlenmiştir. Talaş kaldırma işlemi sırasında, sabit talaş derinliği ve ilerleme hızına ek olarak, üç farklı devir sayısı, üç farklı gerilim, iki ayrı işleme yöntemi ve iki çeşit nano partikül gibi değişken parametreler uygulanmıştır. Deneyler, bu parametrelerin etkilerini daha iyi analiz edebilmek amacıyla tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı, tüm faktörlerin birbiriyle olan etkileşimlerinin sistematik bir şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. Deney sürecinde kullanılan tüm parametreler Tablo 3.3'te detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.3. Deneysel parametreler

Parametre	Değer
Gerilim	10-20-30 V
Kesme hızı	15-30-45 m/dak
Kesme derinliği	0,02 mm
İlerleme	0,01 mm/dev
Kesici takım çapı	1 mm
İşleme yöntemi	Geleneksel- Elektroforez
Partikül boyutu	0,6 μ m
Partikül türü	Al ₂ O ₃ , SiC
Sıvı	Saf su

3.2.2 Kuvvet ölçümü

Kesme kuvvetleri dinamometre yardımıyla ölçüldü. Çalışmada Marmatek marka KD0160 model, 3 eksenli, $\pm 0,5\%$ doğruluğa sahip, $0,2\%$ den küçük doğrusallık hata payı, max 50 kN, çalışma kuvveti 150 %Fs sahip ve 5 μ s'de örnekleme yapan dinamometre kullanıldı. Cihaz bireysel kalibrasyon ve çapraz duyarlılık faktörlerini içermektedir. Çapraz duyarlılık seviyesi hata kompanzasyon matrisi ile iyileştirilebilmektedir. Yapılan deneysel çalışma boyunca her bir kesici takımın kesme kuvveti açısından performansı test edildi. Kesme kuvvetleri ölçümleri data logger yardımıyla bilgisayara aktarıldı.

Dinamometre ile birlikte verilen programdaki gürültü filtreleme yöntemleri ile dinamometrenin dinamiğinin etkisi minimize edildi.

3.2.3 Takım aşınmasının ölçülmesi

Kesici takımlardaki aşınma, ISO 3685 standardına uygun olarak iş parçası üzerinden belli bir işleme süresi sonunda kesici takımların serbest yüzey aşınmaları Chfoic DROII-3M ölçme mikroskobuyla ölçülecektir. Eğer kesici takımda talaş sıvanması (BUE), krater aşınması, çentik aşınması gibi farklı aşınma türleri de meydana gelmesi durumunda uygun olanların da ölçümü gerçekleştirilecektir.

3.2.4 İş parçası yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi

Yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülüğü test cihazı yardımıyla ölçülecektir. Yüzey pürüzlülük için, ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) ve maksimum yüzey pürüzlülük (R_y) ölçümleri yapılacaktır. İş parçasının talaş kaldırılan yüzeyinden işleme yönüne dik olarak en az 5 farklı bölgeden pürüzlülük ölçümü yapılarak ortalama değerler kullanılacaktır.

3.2.5 Deneysel çalışmalar

Frezeleme işlemlerinde maksimum 500 mm/dak kesme hızı, 1000 watt motor gücü özelliklerine sahip dikey işleme merkezi (Jetco JMD-3 CNC- Chinese) kullanıldı. Frezeleme işlemi sırasında oluşan aksel kuvvetler , 3 eksenli bir dinamometre (ME-SYSTEME-K3D160; Germany), 1 kHz örnekleme hızına sahip amplifikatör (MARMATEK-VTA1704; Turkey) kullanılarak ölçülmüştür (Figure 1). Veri aktarımı, analog sinyallerin dijital sinyallere dönüşmesiyle sağlanır . Kesme kuvvetleri dinamometre yardımıyla ölçülen dijital sinyallerin maksimum noktası baz alınarak ölçüldü. Dinamometre dört çıkış kanalı sayesinde F_x , F_y ve F_z yönündeki kuvvetlerin ölçülmesini sağlamaktadır. Takım aşınması çalışmalarında aşınma miktarı optik mikroskopla (NIKON-ECLIPSE MA100; Japonya) ölçüldü. Ayrıca, işleme yöntemlerinin ve parametrelerinin aşınma üzerindeki etkileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilerek etkileri detaylı olarak incelendi. İş parçası üzerinde

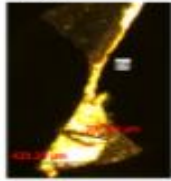
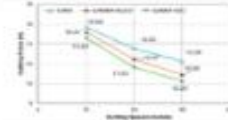
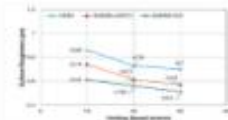
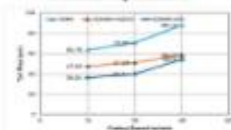
işleme sonrasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri profilometre (MITUTOYO-SJ-20, Japonya) kullanılarak ölçülmüştür.

Deneysel çalışmalarda üç farklı kesme hızı (15, 30, 45 m/min), üç farklı gerilim (10, 20, 30 V) ve iki farklı nano partikül (SiC, Al_2O_3) kullanıldı. Deneylerin modellenmesinde ve değerlendirilmesinde tam faktöriyel deney tasarımı göz önüne alındı. EDMF'nin geleneksel mikro frezelemeyle (KMF) kıyaslanması için KMF'de yapıldı. KMF'de üç farklı kesme hızı ile nano partikül ve gerilim uygulanmadan deneyler gerçekleştirildi.

Elektroforez yöntemi, diğer işleme teknikleriyle kolayca ulaşılamayacak derecede sitokiyometrik yüksek saflıkta malzeme birikmesine olanak sağlaması nedeniyle önemli bir avantaj oluşturmaktadır. İki elektrot arasında elektrik alanı oluşturmak için yüklü aşındırıcı partiküller, çalışma sıvısı tankı içerisinde süspansiyon haline getirilir ve karşıt yüklü elektrota doğru hareket eder. Elektroforez destekli deneylerde iki farklı partikül (SiC, Al_2O_3) ve üç farklı gerilim (20, 30, 40 V) kullanıldı. Yapılan ön deneylerde çok düşük gerilimlerin yavaş kaplamaya, yüksek gerilimin ise yüzey kalitesi sorunlarına sebep olduğu görüldü. Bu nedenle gerilim değerlerinin optimize edilmesi için ön deneyler gerçekleştirildi. Bu nedenle optimum gerilim seviyeleri belirlendi. Tablo 3'te deneylere ait parametreler verilmiştir. Kesici takımın işlenmesi sırasında kaplanması için 0,6 μm boyutlarında SiC ve Al_2O_3 nano partiküller kullanıldı. İşleme sırasında, çalışma çözeltisinde bir elektrik alanının etkin bir şekilde oluşturulması ve kesici takım yüzeyinin kaplanabilirliğinin sağlanması amacıyla, çözeltinin pH değeri belirli bir aralıkta optimize edilmiştir. Bu süreçte, pH değerinin uygun şekilde ayarlanması, çözelti içerisindeki yüklü partiküllerin hareketliliğini ve kesici takım yüzeyine homojen bir birikim sağlama potansiyelini doğrudan etkilemektedir. Çözeltinin pH seviyesinin kontrolü, iyonik parçacıkların dağılımını düzenlemek ve elektroforetik işlem sırasında istenmeyen çökme ya da yüzey düzensizliklerini önlemek adına kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, pH değerinin uygun bir aralıkta tutulması, elektrik alanı etkisiyle hareket eden partiküllerin stabilitesini artırarak hem kaplama kalitesini hem de yüzey pürüzsüzlüğünü olumlu yönde etkilemektedir. Bu kapsamda, deneysel çalışmalar sırasında kullanılan çözeltinin pH değeri, işlem verimliliğini ve hedeflenen yüzey modifikasyonu özelliklerini maksimize etmek için sistematik olarak optimize edilmiştir. Elektrik kaynağı olarak DC kullanılmaktadır. Kesme bölgesinde elektrik alanı oluşturmak için anot kesici takıma katot ise çalışma sıvısına uygulanır. Çalışma sıvısı olarak saf su kullanıldı. İş parçası

Çalışma sıvısı içerisinde bulunan numune tutucuya yerleştirildi. Oluşan elektrik alanı içerisinde elektrik kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürükleme kuvveti, ultrasonik titreşim gibi kuvvetler oluşur. Çözeltideki parçacıklar kesici takıma doğru ve elektrik alan içinde oluşan kuvvetlere (elektiriksel, merkezkaç, sürükleme, ultrasonik) karşı hareket eder. Bunun sonucunda aşındırıcı parçacık kullanım oranı artarak işleme kalitesi ve işleme verimliliği artar (Mahmat, 2024). Deneysel şema ve numune ayrıntıları şekil 3.1 ve şekil 3.2’de verildi.



DENEYSEL KURULUM	 Kesme Bölgesi  Dinamometre  Electroforetik Tank  DC Kaynağı
ÖLÇÜM	Kesme Kuvveti  Kuvvet Sinyalleri Yüzey Pürüzlülüğü  Profilometre Takım Aşınması   Mikroskop
SONUÇLAR	Kesme Kuvveti  Yüzey Pürüzlülüğü  Takım Aşınması  SEM Görüntüleri 

Şekil 3.1. Deney sistemi



KMF

EDMF+Al₂O₃

EDMF+ SiC

Şekil 3.2. İş parçası

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

4.1 Kesme Kuvveti

Kesme kuvveti kesici takımın iş parçasına etki etmesini sağlayarak talaş kaldırma işlemini gerçekleştirir. Elde edilen kuvvetin takım aşınmasına, yüzey kalitesine ve deformasyona etkisi vardır (Agarwal ve ark., 2022). Bu nedenle kesme kuvvetinin optimize edilmesi işleme kalitesi ve verimliliği açısından kritiktir (Mahdi ve ark., 2020; Namlu ve ark., 2021). Bu çalışmada kesme kuvvetlerinin optimizasyonu için farklı işleme teknikleri ve kesme parametreleri kullanılarak deneyler gerçekleştirildi. Kuvvet dengesine göre F_x , F_y ve F_z kuvvetlerinin bileşkesi olan R kuvvetinin büyüklüğü, aynı yönde ve zıt yönde R' kuvvetine eşit olmalıdır. Dinamometre yardımıyla frezeleme sırasında 1 kHz örnekleme frekansı ile üç kuvvet F_x , F_y ve F_z ölçüldü. Her bir deney için F_r kuvveti, 'X', 'Y' ve 'Z' eksenlerindeki ham kesme kuvveti verileri her deneyde daha yüksek değerler alınarak Denklem 1'deki gibi hesaplandı.

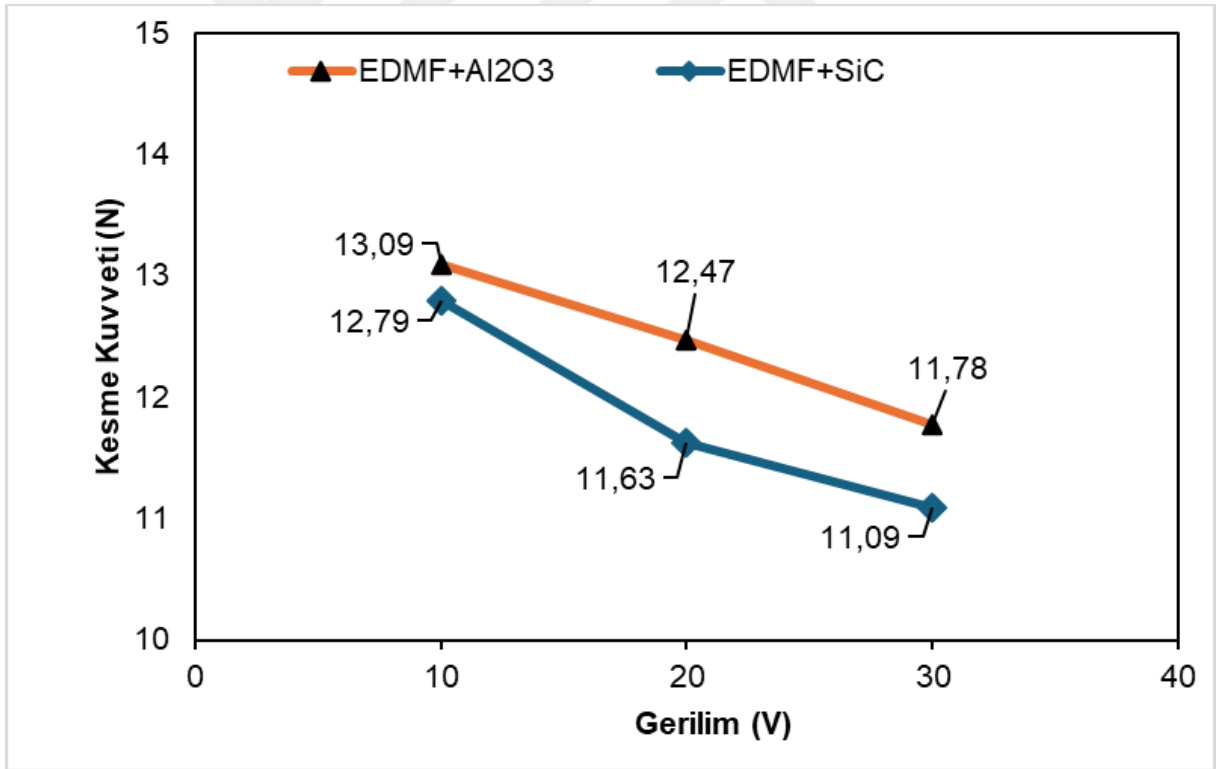
$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (4.1)$$

4.1.1 Farklı işleme tekniklerinin kesme kuvvetine etkisi

Şekil 4.1 farklı gerilimlerden elde edilen kesme kuvveti değerleri gösterilmektedir. Kesme kuvvetinin gerilim değerlerine göre değişimi incelenirken 30 m/dak kesme hızı ve 1.2 mm/dak ilerleme hızı seçilerek deneyler gerçekleştirildi. Deneysel sonuçlar incelendiğinde en yüksek kesme kuvveti değerleri KMF ile elde edildi. EDMF ile elde edilen kesme kuvvetleri ise gerilimin artmasıyla azaldığı görülmektedir. Voltajın artması elektroforetik kaplamanın homojenliğini artırır. Homojenliğin artması kaplama kalınlığının artmasına sebep olur (Bartmanski ve ark., 2018; Ervina ve ark., 2019). Bu durum nano partiküllerin yoğun bir şekilde yüzey üzerinde birikmesini sağlar (Nuswantoro ve ark., 2019). Böylece kesici takımın aşınan bölgelerine hareket eden nano partiküller aşınan bölgelerin kaplanması sağlayarak aşınmanın azalmasına sebep olur. Aşınmamış bir kesici takım talaşın düzgün bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaşmasına sebep olur. Talaş akışının düzgün olması kesici takımın talaş iş parçasından uzaklaştırmak için daha az kuvvet harcamasını sağlar. Ayrıca kesici takımın aşınmasının

azalması sürtünmeyi ve deformasyonu azaltarak kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltır. Bu ısının azalması malzemenin özelliklerinin korunmasını sağlayarak kesme kuvvetini azaltır. Bu nedenle voltajın artması kesme kuvvetini azaltır.

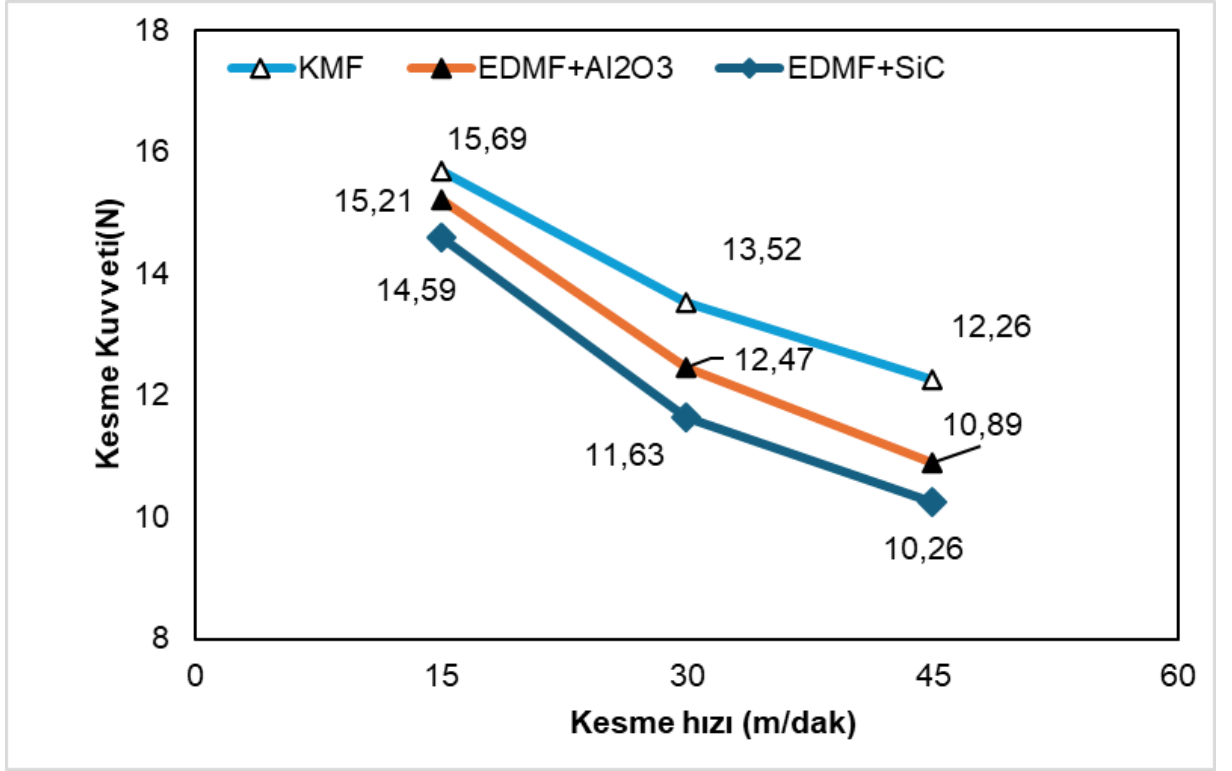
Deneylerde Al_2O_3 ile elde edilen kesme kuvvetleri SiC göre daha düşük elde edildi. 10 V gerilimin uygulandığı EDMF ile elde edilen kesme kuvvetlerinde çok fazla bir değişiklik görülmedi. Ancak 20 V ve 30 V ile elde edilen kesme kuvvetleri KMF ve 10 V 'a göre daha düşük elde edildi. Elektroforetik kaplamada optimum gerilim seviyesi önemlidir. Düşük gerilim yavaş kaplamaya sebep olduğu için 10 V ile elde edilen itme kuvveti değerleri KMF değerlerine yakın değerler elde edildi. Gerilim arttıkça kaplama hızında bir artış meydana geldi. Gerilimin artmasıyla elektrik alan içerisindeki elektriksel kuvvet artarak partiküller kesme bölgesine daha hızlı hareket etti. Bunun sonucunda kaplama işlemi daha hızlı gelişerek nano partiküller hedef yüzeye daha kısa sürede ulaştığı gözlemlendi.



Şekil 4.1. Elektroforez DC geriliminin kesme kuvvetine etkisi

4.1.2 Farklı kesme hızlarının kesme kuvvetine etkisi

Şekil 4.2’de farklı kesme hızlarının SiC ve Al₂O₃ nano partiküllerin kullanılmasıyla sabit ilerleme hızında kesme kuvvetlerine olan etkisi verilmiştir. KMF ve EDMF ile elde edilen kesme kuvvetleri kesme hızının artmasıyla azaldığı görüldü. Kesme hızının artması devir başına çıkarılan malzemenin azalmasına neden olur. Bu durumda kesme kuvvetinin azalmasına neden olur. Ayrıca yüksek kesme hızları, kesme bölgesindeki sıcaklığı artırarak iş parçası malzemesinin yumuşamasına neden olur. Bu durum pürüzsüz talaş akışı gerçekleştirerek takım aşınmasını ve sürtünmeyi azaltır. Böylece talaş kaldırmak için gerekli olan kesme kuvvetlerini azaltır. Bu sonuçlar Hassanpour ve ark.(2016), Gen Ye ve ark.(2011) ve Zhou ve ark. (2015) tarafından elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. Grafik incelendiğinde tüm kesme hızlarında geleneksel ve 20 V ‘luk EDMF ile kesme hızında elde edilen kesme kuvveti değerleri birbirine yakın elde edildi. Ancak 20 V ve 30 V EDMF ile elde edilen kesme kuvveti değerlerinin kesme hızının artmasıyla daha düşük kesme kuvveti değerleri elde edildi. 15 m’dak ilerleme hızından 45 m/dak kesme hızına artmasıyla kesme kuvveti KMF, EDMF+ Al₂O₃, EDMF+SiC sırasıyla %21,8, % 28,4 ve %29,6 oranında azaldığı görüldü.



Şekil 4.2 Kesme hızlarının kesme kuvvetine etkisi

4.2 Yüzey Pürüzlülüğü

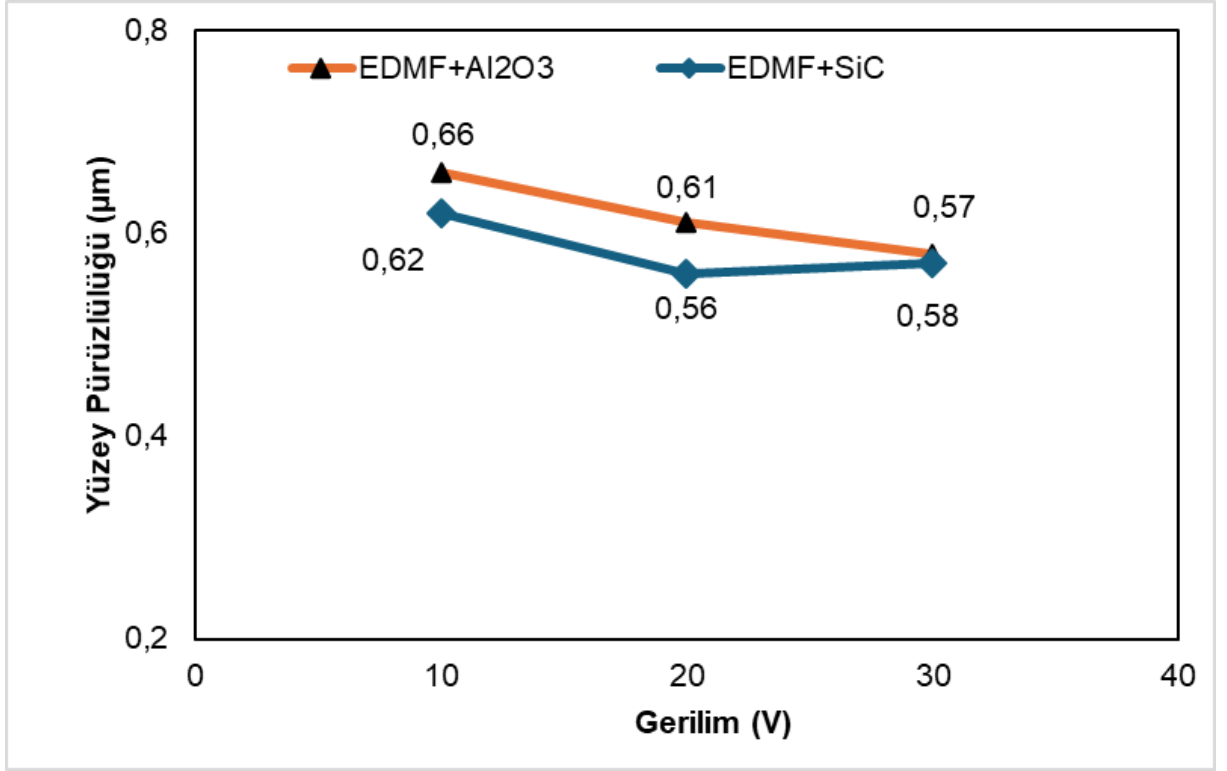
Yüzey kalitesi bir iş parçasının yüzey dokusunu belirlemeye yarayan bir kriterdir. Yüzey kalitesi iş parçasının performansını etkiler. Yüzey pürüzlülüğü fazlaysa aşınmaya ve aşınma sonucunda sürtünmeye sebep olur (Shilpa ve Yendapalli, 2022). Dolayısıyla, frezeleme işleminde pürüzlülüğü kontrol altında tutmak hem üretim maliyetlerini azaltmak hem de ürün kalitesini artırmak için vazgeçilmezdir. Deneysel çalışmalarda yüzey kalitesini artırmak amacıyla farklı işleme yöntemlerinin ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelendi. Olası yüzey pürüzlülük ölçüm hatalarını minimize etmek amacıyla her bir test numunesinin 5 farklı bölgesinden ölçüm alındı.

4.2.1 Farklı işleme tekniklerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi

Şekil 4.3'te farklı işleme yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini görülmektedir. İşleme yöntemlerinin yüzey kalitesine olan etkisini incelerken 30 m/dak kesme hızı ve 1,2 mm/dak ilerleme hızı seçilerek deneyler gerçekleştirildi. Grafik incelendiğinde EDMF ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri KMF'e göre düşük elde

edildi. Elektroforez tekniğine göre elektrik alanın etkisiyle nano partiküller kesici takımın ucuna doğru hareket eder. Kesici takım ucuna hareket eden nano partiküller takımında oluşan aşınmaları azaltarak yüzey kalitesini artırır. Ayrıca nano partiküller iş parçası üzerinde işleme yapılırken yüzeyi parlatabilmesi elektroforezin pürüzlülüğe katkısı olarak görüldü. Bu sonuçlar He ve ark. (2019b) ve Lian ve ark.(2016) tarafından elde edilen sonuçlarla tutarlıdır. EDMF ile yapılan deneylerde gerilimin etkisi incelendiğinde DC voltajının etkisiyle yüzey kalitesinin arttığı görüldü. Düşük gerilimlerde nano partiküller kesici takıma iyi nüfuz edemediğinden dolayı yüzey pürüzlülüğü çok fazla düşmediği görüldü. Ancak voltaj optimum değere ulaştığında çalışma sıvısında yer alan nano partiküller kesici takım ucuna hareketi artar ve kesici takımın aşınan bölgeleri kaplar. Böylece yüzey pürüzlülük değeri daha fazla azalmaya başlar. Voltaj değeri 60 V'a ulaştığında yüzey pürüzlülüğü 40 V'a göre ani bir düşüş göstermedi. Elektroforetik alanın gerilimini artırmak her zaman yüzey kalitesini artırıcı etkiye sahip olmadığı görüldü. Ayrıca bu durum artan gerilimin kesici takım üzerine etki eden nano partikülleri ayrılmasına engel olur ve yüzey üzerindeki parlatma özelliğini kaybeder.

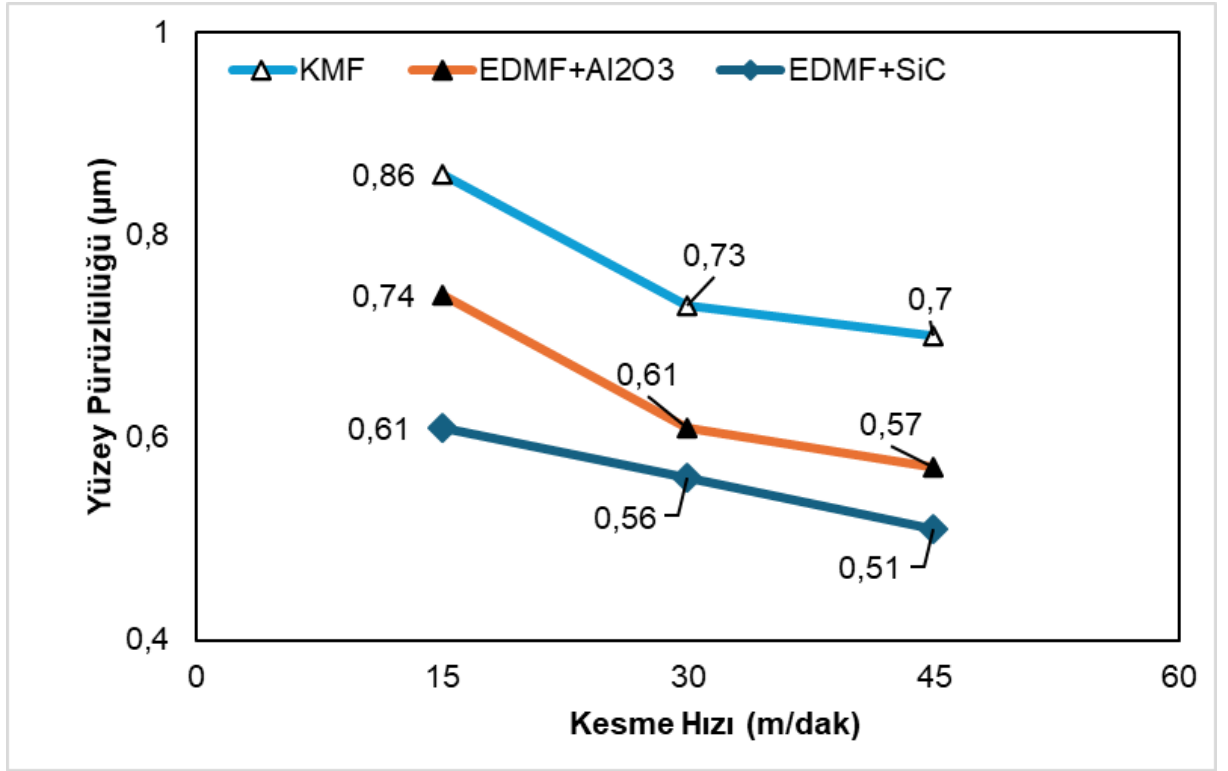
Şekil 4.3'te ayrıca SiC ve Al₂O₃ nano partiküllerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelendi. SiC nano partikül ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Al₂O₃'e göre daha düşük elde edildi. SiC yüksek sertliği sayesinde aşınmaya karşı direnç sağlar (Xu ve ark., 2022). Yüksek sıcaklıklara olan dayanıklılığı sayesinde işleme esnasında oluşan ısı kesici takımını etkilemez ve aşınma meydana gelmez (Kwon ve ark., 2020). Böylece SiC nano partiküllerle yapılan EDMF ile işleme sonunda elde edilen yüzey kalitesi daha yüksek elde edildi.



Şekil 4.3. Elektroforez DC geriliminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

4.2.1 Farklı kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 4.4'te farklı kesme hızlarının SiC ve Al₂O₃ nano partiküllerin kullanılmasıyla sabit ilerleme hızında yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi verilmiştir. Her iki delme yönteminde kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünü bazı hızlarda azaltırken bazı hızlarda ise artırdığı görüldü. Kesme hızının artması kesici takımın kesme bölgesine daha verimli bir şekilde etki etmesini sağlar. Bu durum yüzey kalitesini artırabilir. Ayrıca kesme hızının artması sıcaklığı artırarak termal yumuşamaya sebep olur (Dwivedi ve ark., 2012). Bu durum malzemenin daha kolay talaş kaldırılmasını sağlayarak pürüzlülüğü azaltır. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne olan etkisinin doğrusal olmadığı görüldü. Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün önce azaldığı ve daha sonra arttığı görüldü. Yüksek kesme hızlarında daha yüksek sürtünme oluşmasından dolayı takım aşınması artar. Aşınan takım yüzey kalitesine zarar vererek yüzey pürüzlülüğünü artırır. Ayrıca kesme hızının artması sonucunda oluşan talaşlar kesme bölgesinden uzaklaştırmakta zorlanıldı. Bu durum iş parçası yüzeyinde izler bırakmasına sebep oldu. Elde edilen bu sonuç Safari ve ark. (2015) ve Al-Tameemi ve ark.(2021) tarafından elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.



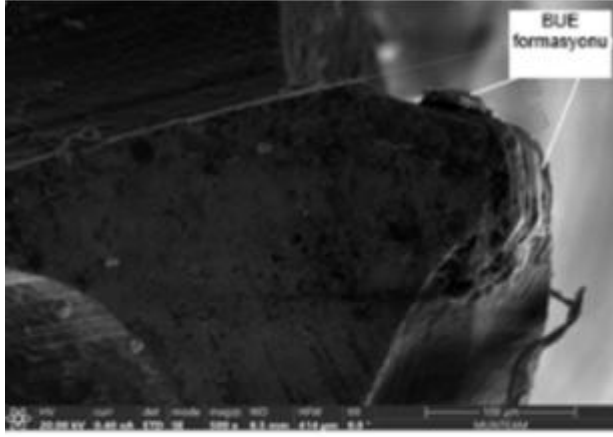
Şekil 4.4. Farklı kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi

4.3. Takım Aşınması

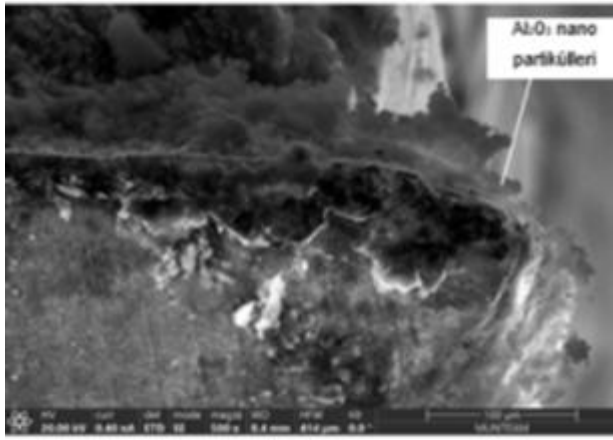
Mikro frezelemede kesici takımında meydana kesme kenarlarının aşınması ve dolayısı ile ilk geometrisinden sapması, mikro frezelemede küçük ölçek ve hassasiyet nedeniyle önemli bir problemdir. Bu nedenle mikro frezelemede aşınmasının kontrol altında tutulması büyük önem arz etmektedir (Varghese ve ark., 2022). Aşınmış takımlar, ölçü hassasiyetinde sapmalara, enerji tüketiminin artmasına ve işleme güvenliğinin azalmasına yol açar. Bu nedenle, takım aşınmasının izlenmesi ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi, sürdürülebilir ve kaliteli üretim için kritik öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda takım aşınmasını azaltmak amacıyla farklı işleme yöntemlerinin ve kesme parametrelerinin takım aşınmasına olan etkisi incelendi. Takım aşınması çalışmaları ISO 8688-2 standardına göre gerçekleştirilerek, 160 mm'lik kesme boyu sonrasında kesici takım çıkarılarak optik mikroskop ile aşınma miktarı ölçüldü. Ayrıca işleme metotları ve parametrelerinin takım aşınmasına olan etkisi SEM analizleri yapılarak etkileri detaylı bir şekilde incelendi. Şekil 4.5'te işleme yöntemlerine göre kesici takımında meydana gelen aşınma tipleri gösterildi. EDMF+ Al₂O₃ işlemede, kesici

takımın kesme kenarı boyunca düzenli bir şekilde biriktiğinden dolayı en kararlı kaplama seçeneği olduğu belirlendi. Kayda değer bir sonuç ise KMF prosesinde kesici takım aşınma bölgelerinde BUE formasyonu görülürken EDMF proseslerinde bu oluşum görülmedi. BUE formasyonu genellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında kesici takımın kesme bölgesinde oluşur. İş parçasından çıkarılan talaş mekanik sürtünme sonucunda aşırı deformasyona uğrayarak kesici takım üzerinde bağlanma tabakasının oluşumuna neden olur. EDMF proseslerinde talaş kaldırma olayı kaplama solüsyonu içerisinde gerçekleşmesi, sıcaklık artışını önemli şekilde engelleyerek BUE kararsız yapısı oluşumunun önüne geçer.

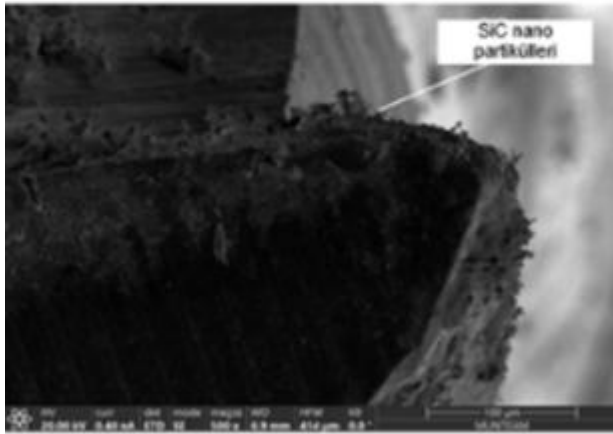




Geleneksel



EDMF+Al₂O₃

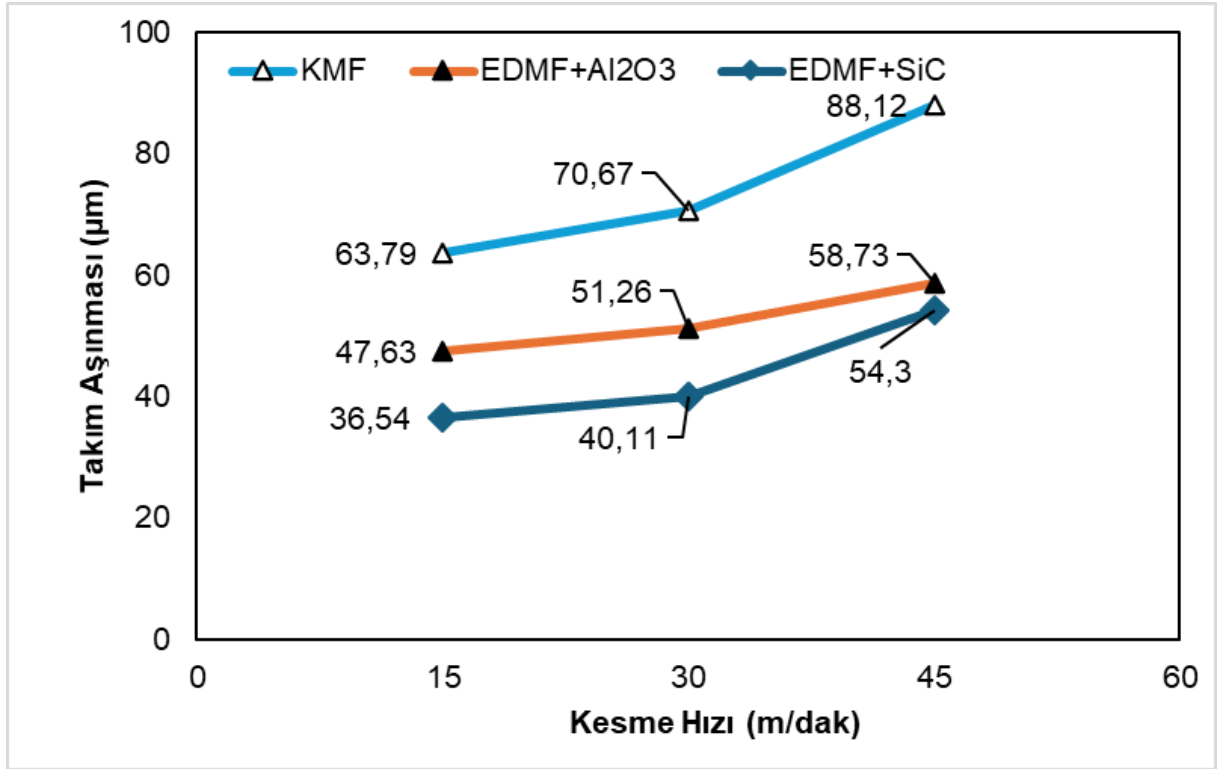


EDMF+SiC

Şekil 4.5. İşleme yöntemlerine göre meydana gelen aşınma türleri

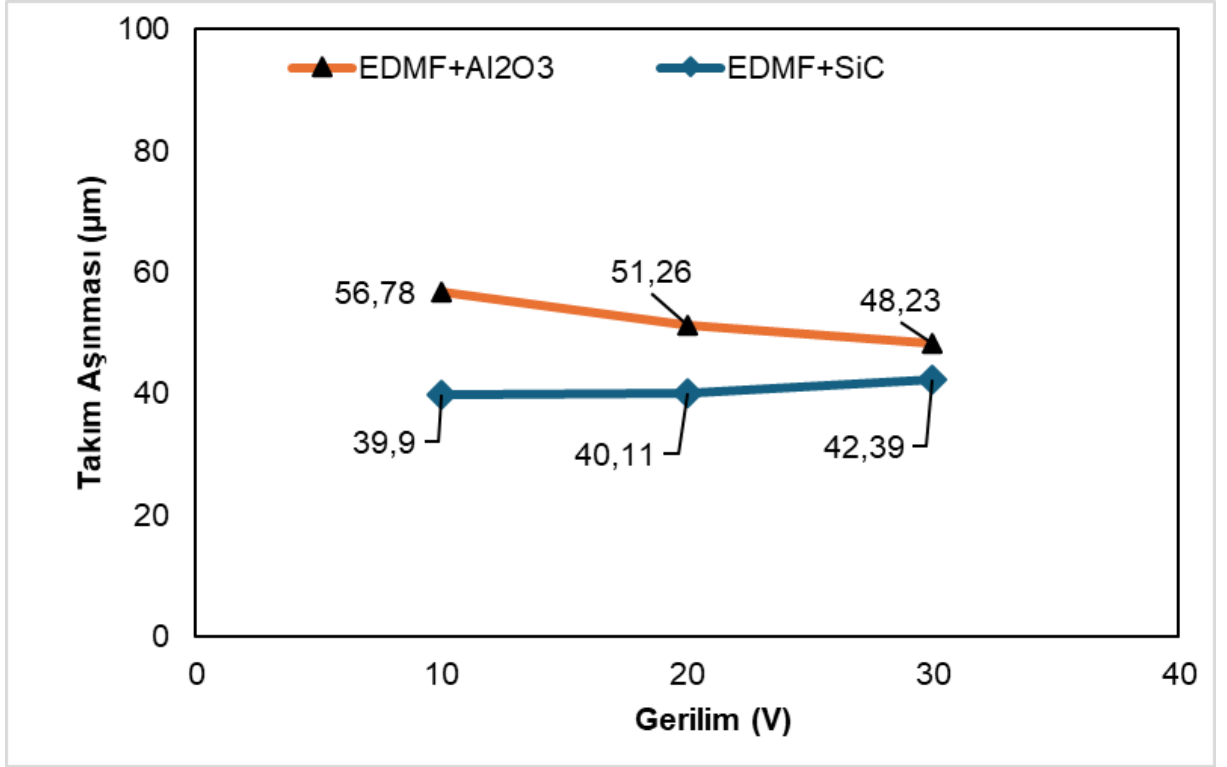
Şekil 4.6’da KMF, 20 Volt kaplama geriliminde yapılan EDMF+Al₂O₃ ve EAMM+SiC işlemleri sonucunda mikro takımda meydana gelen aşınma değerleri görülmektedir. KMF işleminde oluşan yüksek kesme sıcaklıkları kesici takımında aşınma hızını artırarak EDMF+ Al₂O₃ ve EDMF+SiC ile yapılan işlemlere göre daha yüksek

kesici takım aşınma miktarı ile sonuçlandı. EDMF prosesinde kullanılan nanopartikül balçığı hem kesme sıcaklığını azaltması hem de işleme esnasında takımın kaplanması sayesinde KMF prosesine göre oldukça azalan takım aşınma değerleri elde edildi. Ancak EDMF proseslerinde artan kesme hızı takımın kaplanmasını sınırladığı Şekil 4.6'dan anlaşılmaktadır.



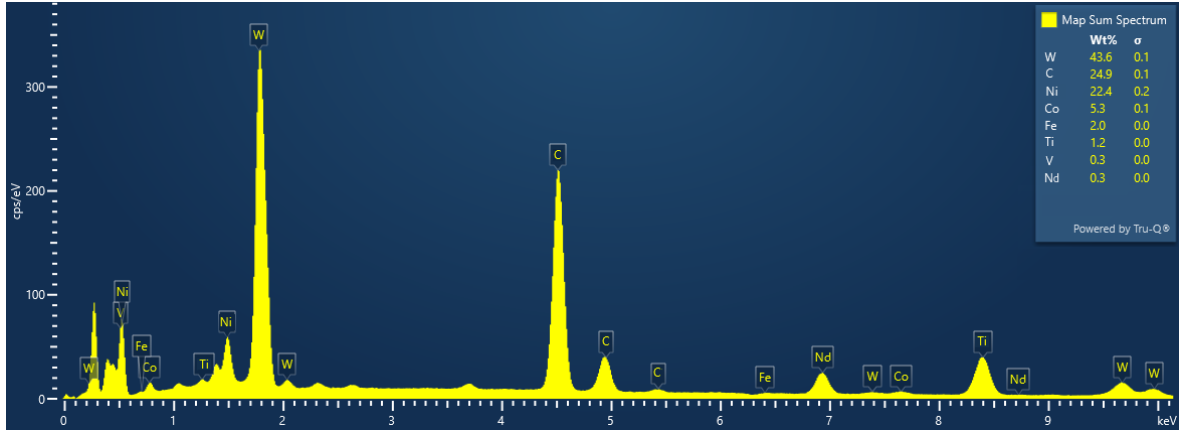
Şekil 4.6. Farklı kesme hızlarının takım aşınmasına etkisi

Şekil 4.7’de ise EDMF proseslerinde uygulanan kaplama voltajının kesici takım aşınmasına olan etkisi görülmektedir. EDMF+ Al₂O₃ ile yapılan çalışmalarda kaplama voltajı ile aşınmanın azaldığı, dolayısı ile kaplama yapılabilirliğinin arttığını ifade etmek mümkündür. Ancak EDMF+SiC ile yapılan proseste artan voltaj, kaplama performansını azaltarak aşınmanın artmasına neden olmuştur. EDMF+SiC ile yapılan işlemde SiC kaplama katmanlarının kararsız bir yapıya sahip olması katman üzeri birikmeyi engellediği Şekil 4.7’de SEM analizinden görülmektedir.

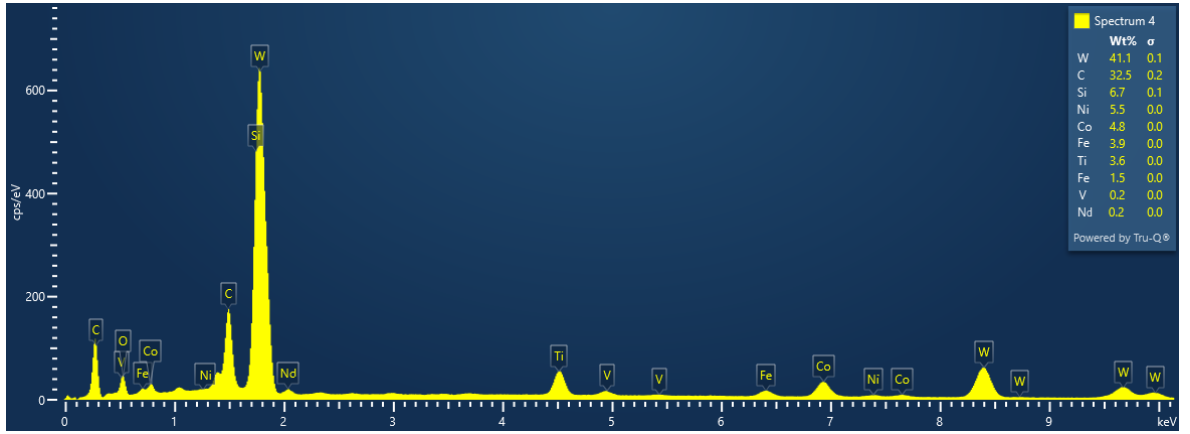


Şekil 4.7. Farklı gerilimlerin takım aşınmasına etkisi

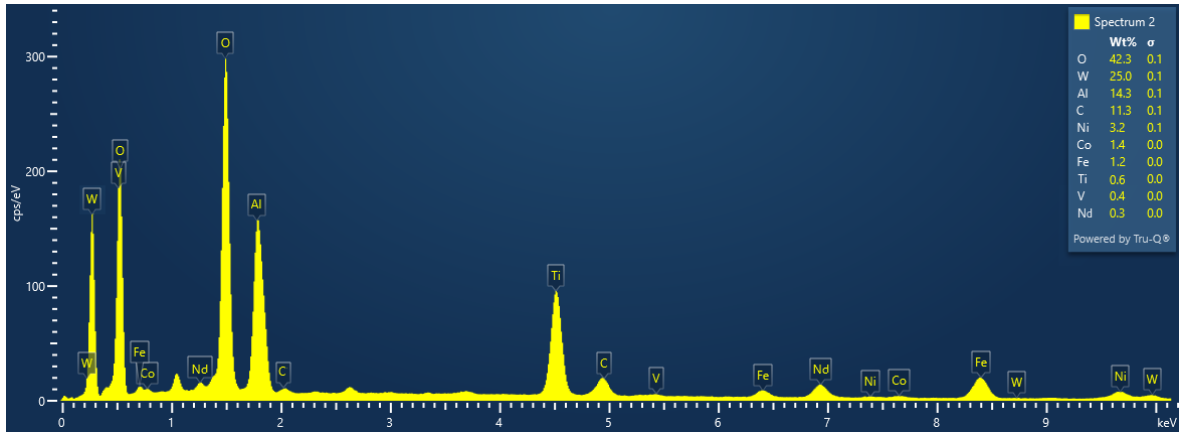
Al₂O₃ ve SiC nanopartikülleri içeren EDMF kesici takım yüzeyinin X-ışını (EDX) spektrumu Şekil 4.8’de gösterilmiştir. EDX analiz sonuçlarına göre, her bir işleme yönteminde kesici takım eleman dağılımında iş parçası elemanları (Fe, Nd ve Co) görülmüştür. Dolayısıyla tüm işleme yöntemlerinde BUE mevcuttur. Ancak EDMF işlemede KMF’ye göre iş parçası elemanlarında orantılı bir azalma olması nedeniyle EDMF işleminin BUE oluşumunu azalttığını söylemek mümkündür. EDMF yöntemlerinin KMF yöntemlerine göre hem takım aşınmasını hem de BUE oluşumunu azaltması, kesici takımın uzun işleme sürelerinde ilk formunu korumasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca EDMF yöntemlerinde kesme bölgesinde oluşturulan elektrik alanı nanopartikülleri bu bölgeye çekmektedir. Kesici takım etrafında toplanan parçacıklar aşınmayı azaltmaktadır. Bunun sonucunda işlenebilirlik artmaktadır.



a



b



c

Şekil 4.8. İşleme sonrası EDMF kesici takım yüzeyinin EDX spektrumu (a) KMF b) EDMF+ Al_2O_3 c) EDMF+SiC)

5. SONUÇ

Bu çalışmada mikro frezeleme için bir elektroforez destekli işleme tekniği önerildi ve yöntem, sert malzemeler için işlenebilirliği etkili bir şekilde iyileştirdiği görüldü. Yapılan mikro frezeleme deneylerinden elde edilen sonuçlara dayanarak aşağıdaki veriler elde edildi.

1. EDMF yöntemi tüm işleme şartlarında kesme kuvvetini azalttığı görüldü. EDMF yönteminde gerilim ve kesme hızının artması kesme kuvvetini azaltıcı etki gösterdi. 10V gerilim destekli EDMF ve KMF ile elde edilen kesme kuvveti değerleri çok fazla fark görülmedi. Bu nedenle optimum gerilimin işleme üzerinde etkisinin fazla olduğu sonucuna varıldı. SiC ile yapılan deneylerde Al_2O_3 'den daha düşük kesme kuvveti değerleri elde edildi.
2. EDMF ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri KMF'ye göre daha düşük elde edildi. EDMF yönteminde gerilimin etkisi incelendiğinde gerilimin artması yüzey kalitesini artırdığı görüldü. Ancak gerilim arttıkça yüzey pürüzlülüğünde ani düşüşler görülmedi. SiC nano partiküller aşınmaya karşı direncinin yüksek olması nedeniyle Al_2O_3 ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine göre daha düşük elde edildi. Ayrıca kesme hızının artması her iki işleme yönteminde yüzey kalitesini artırdığı görüldü.
3. Kesici takım aşınması incelendiğinde KMF yönteminde BUE formasyonu görüldü. EDMF yönteminde kaplama solüsyonu içerisinde gerçekleştiği için sıcaklık artışının engellenmiş olması BUE kararsız yapısının oluşmasını engelledi. Kesme hızının artması her iki işleme yönteminde takım aşınmasını artırdığı görüldü. EDMF yönteminde gerilimin artması kesici takım üzerindeki kaplamayı artırması nedeniyle aşınmayı azalttı. Ancak SiC ile yapılan deneylerde artan voltajın kaplama performansını azalttığını ve bu durum aşınmayı artırıcı etki gösterdi.

6. KAYNAKLAR

- Afazov, S. M., Zdebski, D., Ratchev, S. M., Segal, J., Liu, S. 2013.** Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5), 671-684.
- Agarwal, R., Singh, R. P., Gupta, V., Singh, J. 2022.** Influence of cutting force on temperature, microcracks and chip morphology during rotary ultrasonic bone drilling: An in-vitro study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(7), 301.
- Ağar, S., Tosun, N. 2021.** Ultrasonic assisted turning of AISI 52100 steel using nanoparticle-MQL method. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9(1), 015024.
- Alhadeff, L. L., Marshall, M. B., Curtis, D. T., Slatter, T. 2019.** Protocol for tool wear measurement in micro-milling. *Wear*, 420-421, 54-67.
- Al-Tameemi, H. A., Al-Dulaimi, T., Awe, M. O., Sharma, S., Pimenov, D. Y., Koklu, U., Giasin, K. 2021.** Evaluation of Cutting-Tool Coating on the Surface Roughness and Hole Dimensional Tolerances during Drilling of Al6061-T651 Alloy. *Materials*, 14(7), Article 7.
- Aslan, N., Say, Y. 2022.** NADİR TOPRAK ELEMENTLERİNİN UYGULAMA ALANLARI. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 8(1), Article 1.
- Aurich, J. C., Bohley, M., Reichenbach, I. G., Kirsch, B. 2017.** Surface quality in micro milling: Influences of spindle and cutting parameters. *CIRP Annals*, 66(1), 101-104.
- Aydın, İ., Bahçepınar, A. İ., Kirman, M., Çipiloğlu, M. A. 2019.** HA Coating on Ti6Al7Nb Alloy Using an Electrophoretic Deposition Method and Surface Properties Examination of the Resulting Coatings. *Coatings*, 9(6), Article 6.

- Bai, X., Gong, X.-P., Yang, T.-Y., Li, L.** 2022. Analysis on machining property and micro-structure of the sintered NdFeB by the electrical discharge machining milling using the deionized water. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(1), 837-855.
- Bai, X., Yang, T.-Y., Gong, X.-P., Li, L., Cui, J.-Z.** 2021. Researches on the EDM of magnetized sintered NdFeB permanent magnetic material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(9), 3317-3330.
- Balázs, B. Z., Geier, N., Takács, M., Davim, J. P.** 2021a. A review on micro-milling: Recent advances and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 655-684.
- Balázs, B. Z., Geier, N., Takács, M., Davim, J. P.** 2021b. A review on micro-milling: Recent advances and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 655-684.
- Bandapalli, C., Sutaria, B. M., Prasad Bhatt, D. V., Singh, K. K.** 2018. Tool Wear Analysis of Micro End Mills—Uncoated and PVD Coated TiAlN & AlTiN in High Speed Micro Milling of Titanium Alloy—Ti-0.3Mo-0.8Ni. *Procedia CIRP*, 77, 626-629.
- Bartmanski, M., Zielinski, A., Majkowska-Marzec, B., Strugala, G.** 2018. Effects of solution composition and electrophoretic deposition voltage on various properties of nanohydroxyapatite coatings on the Ti13Zr13Nb alloy. *Ceramics International*, 44(16), 19236-19246.
- Besra, L., Samantaray, P., Bhattacharjee, S., Singh, B. P.** 2007. Electrophoretic deposition of alumina on stainless steel from non-aqueous suspension. *Journal of Materials Science*, 42(14), 5714-5721.

- Brown, D., Ma, B.-M., Chen, Z.** 2002. Developments in the processing and properties of NdFeb-type permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 248(3), 432-440.
- Bruschi, S., Tristo, G., Rysava, Z., Bariani, P. F., Umbrello, D., De Chiffre, L.** 2016. Environmentally clean micromilling of electron beam melted Ti6Al4V. *Journal of Cleaner Production*, 133, 932-941.
- Câmara, M. A., Rubio, J. C. C., Abrão, A. M., Davim, J. P.** 2012. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(8), 673-685.
- Chang, B., Du, D., Yi, C., Xing, B., Li, Y.** 2016. Influences of Laser Spot Welding on Magnetic Property of a Sintered NdFeB Magnet. *Metals*, 6(9), 202.
- Chavoshi, S. Z., Goel, S., Morantz, P.** 2017. Current trends and future of sequential micro-machining processes on a single machine tool. *Materials & Design*, 127, 37-53.
- Chavoshi, S. Z., Luo, X.** 2015. Hybrid micro-machining processes: A review. *Precision Engineering*, 41, 1-23.
- Chen, W., Zheng, L., Xie, W., Yang, K., Huo, D.** 2019. Modelling and experimental investigation on textured surface generation in vibration-assisted micro-milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 339-350.
- Chern, G.-L., Wu, Y.-J. E., Cheng, J.-C., Yao, J.-C.** 2007. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM. *Precision Engineering*, 31(2), 122-129.
- Corni, I., Neumann, N., Novak, S., König, K., Veronesi, P., Chen, Q., Ryan, M. P., & Boccaccini, A. R.** (2009). Electrophoretic deposition of PEEK-nano alumina composite coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 203(10), 1349-1359.

- de Oliveira, F. B., Rodrigues, A. R., Coelho, R. T., de Souza, A. F.** 2015. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 39-54.
- Drdlik, D., Marak, V., Maca, K., Drdlikova, K.** 2022. Modification of barium titanate sintering via rare earth oxides addition: Dilatometric and microstructural study. *Ceramics International*, 48(17), 24599-24608.
- Dwivedi, S. P., Kumar, S., Kumar, A.** 2012. Effect of turning parameters on surface roughness of A356/5% SiC composite produced by electromagnetic stir casting. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(12), 3973-3979.
- Emminghaus, N., Hoff, C., Hermsdorf, J., Kaierle, S.** 2020. Laser Powder Bed Fusion of NdFeB and influence of heat treatment on microstructure and crack development. *Procedia CIRP*, 94, 211-216.
- Ervina, J., Ghaleb, Z. A., Hamdan, S., Mariatti, M.** 2019. Colloidal stability of water-based carbon nanotube suspensions in electrophoretic deposition process: Effect of applied voltage and deposition time. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117, 1-10.
- Fanara, S., Sengupta, P., Becker, H.-W., Rogalla, D., Chakraborty, S.** 2017. Diffusion across the glass transition in silicate melts: Systematic correlations, new experimental data for Sr and Ba in calcium-aluminosilicate glasses and general mechanisms of ionic transport. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 455, 6-16.
- Gao, S., Bao, X., Li, J., Gao, X.** 201. Improvement of bending strength via regenerated interstitial phase at the triple junction phase on sintered Nd-Fe-B alloy. *Intermetallics*, 114, 106585.

- Gong, X.-P., Yang, T.-Y., Bai, X., Li, L., Jiang, G.-F.** 2022. Experimental research on EDM-milling of sintered NdFeB. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(3), 2415-2425.
- Greer, J., Petruska, A. J., Mahoney, A. W., Nambi, M., Bamberg, E., Abbott, J. J.** 2014. Experimental Investigation of Wire Electrical Discharge Machining of NdFeB Permanent Magnets with an RC-Type Machine. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(4), 1392-1401.
- Hao, Y., Cui, Y., Peng, J., Zhao, N., Li, S., Zhai, M.** 2019. Preparation of graphene oxide/cellulose composites in ionic liquid for Ce (III) removal. *Carbohydrate Polymers*, 208, 269-275.
- Hassanpour, H., Sadeghi, M. H., Rezaei, H., Rasti, A.** 2016. Experimental Study of Cutting Force, Microhardness, Surface Roughness, and Burr Size on Micromilling of Ti6Al4V in Minimum Quantity Lubrication. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(13), 1654-1662.
- Hastings, A. M., Herrera, S., Harris, S., Parsons-Davis, T., Pascall, A. J., Shusterman, J. A.** 2024. Preparation of monodisperse cerium oxide particle suspensions from a tetravalent precursor. *Dalton Transactions*, 53(17), 7376-7383.
- He, J. F., Guo, Z. N., Lian, H. S., Liu, J. W., Yao, Z., Deng, Y.** 2019a. Experiments and simulations of micro-hole manufacturing by electrophoresis-assisted micro-ultrasonic machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 264, 10-20.
- He, J. F., Guo, Z. N., Lian, H. S., Liu, J. W., Yao, Z., Deng, Y.** 2019b. Experiments and simulations of micro-hole manufacturing by electrophoresis-assisted micro-ultrasonic machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 264, 10-20.
- Jha, A. R.** 2014. *Rare Earth Materials: Properties and Applications*. CRC Press.

- K, V., Mathew, J.** 2019. Wear behavior of TiAlN coated WC tool during micro end milling of Ti-6Al-4V and analysis of surface roughness. *Wear*, 424-425, 165-182.
- Khaliq, W., Zhang, C., Jamil, M., Khan, A. M.** 2020. Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti-6Al-4V under dry and MQL conditions. *Tribology International*, 151, 106408.
- Kim, T., Kwon, K.-K., Chu, C. N., Song, K. Y.** 2020. Experimental investigation on CO₂ laser-assisted micro-slot milling characteristics of borosilicate glass. *Precision Engineering*, 63, 137-147.
- Kiss, A. K., Hajdu, D., Bachrathy, D., Stepan, G.** 2018. Operational stability prediction in milling based on impact tests. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 103, 327-339.
- Kumar, P., Bajpai, V., Singh, R.** 2017. Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micro-milling by mathematical modeling. *Manufacturing Letters*, 11, 12-16. 1
- Kwon, H., Zhou, X., Yoon, D.-H.** 2020. Yüksek oranda dağılmış Ti₃SiC₂ tozunun elektroforezi ile SiC f /Ti₃SiC₂'nin üretimi. *Ceramics International*, 46(11, Part A), 18168-18174.
- Li, L., Niu, Z. W., Zhang, J. H.** 2007. Investigation of Material Removal Mechanism in EDM of Sintered NdFeB Permanent Magnet. *Key Engineering Materials*, 334-335, 937-940.
- Li, Y., Wan, M., Wen, D.-Y., Zhang, W.-H.** 2023. Deep learning-based method for characterizing the cutter runout phenomenon in micro milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 321, 118151.
- Lian, H. S., Guo, Z. N., Liu, J. W., Huang, Z. G., He, J. F.** 2016. Experimental study of electrophoretically assisted micro-ultrasonic machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9), 2115-2124.

- Liang, Q., Wang, W., Chen, Z., Lin, W.** 2021. Effects of Rare Earth Metal Oxide Doping on Micromorphology and Corrosion Behavior of Hydroxyapatite-Graphene Oxide Composite Coating Fabricated on AZ91 magnesium alloy. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(6), 210647.
- Ma, L., Howard, I., Pang, M., Wang, Z., Su, J.** 2020. Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove. *Micromachines*, 11(5), 494.
- Mahdi, A., Turki, Y., Habak, M., Salem, M., Bouaziz, Z.** 2020. Experimental study of thrust force and surface quality when drilling hybrid stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(9), 3981-3994.
- Mahmat, A.** 2024. Investigation of the effect of electrophoresis-assisted milling on machinability. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 59, 101875.
- Mittal, R. K., Kulkarni, S. S., Singh, R. K.** 2017. Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 413-421.
- Mochizuki, Y., Tsubouchi, N., Sugawara, K.** 2013. Selective Recovery of Rare Earth Elements from Dy containing NdFeB Magnets by Chlorination. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(6), 655-662.
- Moskalewicz, T., Kot, M., Seuss, S., Kędzierska, A., Czyrska-Filemonowicz, A., Boccaccini, A. R.** 2015. Electrophoretic deposition and characterization of HA/chitosan nanocomposite coatings on Ti6Al7Nb alloy. *Metals and Materials International*, 21(1), 96-103.
- Moskalewicz, T., Zimowski, S., Zych, A., Łukaszczyk, A., Reczyńska, K., Pamuła, E.** 2018. Electrophoretic Deposition, Microstructure and Selected Properties of

- Composite Alumina/Polyetheretherketone Coatings on the Ti-13Nb-13Zr Alloy. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(3), D116.
- Namlu, R. H., Sadigh, B. L., Kiliç, S. E.** 2021. An experimental investigation on the effects of combined application of ultrasonic assisted milling (UAM) and minimum quantity lubrication (MQL) on cutting forces and surface roughness of Ti-6AL-4V. *Machining Science and Technology*, 25(5), 738-775.
- Ni, C., Zhu, L.** 2020. Investigation on machining characteristics of TC4 alloy by simultaneous application of ultrasonic vibration assisted milling (UVAM) and economical-environmental MQL technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116518.
- Nuswantoro, N. F., Budiman, I., Septiawarman, A., Tjong, D. H., Manjas, M., Gunawarman.** 2019. Effect of Applied Voltage and Coating Time on Nano Hydroxyapatite Coating on Titanium Alloy Ti6Al4V Using Electrophoretic Deposition for Orthopaedic Implant Application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 547(1), 012004.
- Oktay, A., Yilmazer, H., Przekora, A., Yilmazer, Y., Wojcik, M., Dikici, B., Ustundag, C. B.** 2023. Corrosion response and biocompatibility of graphene oxide (GO)serotonin (Ser) coatings on Ti6Al7Nb and Ti29Nb13Ta4.6Zr (TNTZ) alloys fabricated by electrophoretic deposition (EPD). *Materials Today Communications*, 34, 105236.
- Oliaei, S. N. B., Karpas, Y.** 2017. Built-up edge effects on process outputs of titanium alloy micro milling. *Precision Engineering*, 49, 305-315.
- Peiró, L. T., Méndez, G. V., Ayres, R. U.** 2013. Material Flow Analysis of Scarce Metals: Sources, Functions, End-Uses and Aspects for Future Supply. *Environmental Science & Technology*, 47(6), 2939-2947.

- Peterson, B. A., Herrault, F., Oniku, O. D., Kaufman, Z. A., Arnold, D. P., Allen, M. G.** 2012. Assessment of Laser-Induced Damage in Laser-Micromachined Rare-Earth Permanent Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(11), 3606-3609.
- Ramlan, Setiabudidaya, D., Suprapedi, Bama, A. A., Muljadi.** 2020. Synthesis and Characterization of Nd₂Fe₁₄B Powder by using Mechanical Milling of Flakes NdFeB. *Journal of Physics: Conference Series*, 1428(1), 012014.
- Ramos, S. J., Dinali, G. S., Oliveira, C., Martins, G. C., Moreira, C. G., Siqueira, J. O., Guilherme, L. R. G.** 2016. Rare Earth Elements in the Soil Environment. *Current Pollution Reports*, 2(1), 28-50.
- Rosa, L. G. S., Recco, A. A. C., Backes, E. H., Harb, S. V., Sagás, J. C., Costa, L. C., Fontana, L. C., Pessan, L. A., Becker, D.** 2023. *Cerium Oxide Nanoparticles Deposition Through Bipolar High-Impulse Electrophoresis on Pla Scaffolds* (SSRN Scholarly Paper No. 4478331). Social Science Research Network.
- Safari, H., Sharif, S., Izman, S., Jafari, H.** 2015. Surface integrity characterization in high-speed dry end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1), 651-657.
- Sasaki, T. T., Ohkubo, T., Hono, K.** 2016. Structure and chemical compositions of the grain boundary phase in Nd-Fe-B sintered magnets. *Acta Materialia*, 115, 269-277.
- Shilpa, M. K., Yendapalli, V.** 2022. Surface roughness estimation techniques for drilled Surfaces: A review. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1082-1091.
- 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.

- Šmuc, N. R., Dolenec, T., Serafimovski, T., Dolenec, M., Vrhovnik, P.** 2012. Geochemical characteristics of rare earth elements (REEs) in the paddy soil and rice (*Oryza sativa* L.) system of Kočani Field, Republic of Macedonia. *Geoderma*, 183-184, 1-11.
- Uriarte, L., Eguía, J., Egaña, F.** 2009. Micromilling Machines., *Machine Tools for High Performance Machining* (ss. 369-397). Springer.
- Varghese, A., Kulkarni, V., Joshi, S. S.** 2022. Modeling cutting edge degradation by chipping in micro-milling. *Wear*, 488-489, 204141.
- Wu, X., Li, L., He, N., Yao, C., Zhao, M.** 2016. Influence of the cutting edge radius and the material grain size on the cutting force in micro cutting. *Precision Engineering*, 45, 359-364.
- Xu, B., Yang, H., Luo, R., Wang, L., Huang, J., Chen, D.** 2022. Fabrication and performance of mini SiC/SiC composites with an electrophoresis-deposited BN fiber/matrix interphase. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(5), 1904-1911.
- Yadav, R., Chakladar, N. D., Paul, S.** 2022. Micro-milling of Ti-6Al-4 V with controlled burr formation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 231, 107582.
- Yang, L., Pang, X., Fox-Rabinovich, G., Veldhuis, S., Zhitomirsky, I.** 2011. Electrodeposition of cerium oxide films and composites. *Surface and Coatings Technology*, 206(1), 1-7.
- Yang, T., Zhu, X., Zhao, W., Zhao, Q., Liu, G.** 2024. Low temperature machining advantages for sintered NdFeB magnets: A comparative experimental study of WAWJ with laser and WEDM. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 610, 172589.
- Yang, X., Cheng, X., Li, Y., Zheng, G., Xu, R.** 2020. Machinability investigation and sustainability analysis of minimum quantity lubrication–assisted micro-milling

- process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(11), 1388-1401.
- Yang, Y., Han, J., Hao, X., Li, L., He, N.** 2020. Investigation on micro-milling of micro-grooves with high aspect ratio and laser deburring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(5), 871-880.
- Ye, G. G., Xue, S. F., Tong, X. H., Dai, L. H.** 2011. Influence of Cutting Conditions on the Cutting Performance of TiAl6V4. *Advanced Materials Research*, 337, 387-391.
- Yu, K.-S., Cheng, C.-W., Lee, A.-C., Jhang Jian, W.-Y., Chang, W.-C., Chang, T.-W., Tsai, M.-C.** 2022) Additive manufacturing of NdFeB magnets by synchronized three-beam laser powder bed fusion. *Optics & Laser Technology*, 146, 107604.
- Zhan, Y.-J., Dai, Y., Tan, D.-Q., Yi, Z.-Q., Wu, J., Jiang, W.-W., Cao, Z.** 2023. Improving the thermal stability of sintered NdFeB magnets with nickel electroplating by high temperature treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 961, 170956.
- Zhou, L., Peng, F. Y., Yan, R., Yao, P. F., Yang, C. C., Li, B.** 2015. Analytical modeling and experimental validation of micro end-milling cutting forces considering edge radius and material strengthening effects. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 97, 29-41.

ÖZGEÇMİŞ

