



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MAGNEZYUM ALAŞIMIN**  
**MİKROFREZELENMESİNDE KESME**  
**ŞARTLARININ YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE**  
**ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

UMUT AYDIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Prof. Dr. Mustafa Ay

**EŞ-DANIŞMAN**

Dr. Ayhan ETYEMEZ

İSTANBUL, 2019



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MAGNEZYUM ALAŞIMIN**  
**MİKROFREZELENMESİNDE KESME**  
**ŞARTLARININ YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE**  
**ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

UMUT AYDIN  
(523216018)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Makine Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Prof. Dr. Mustafa Ay

**EŞ-DANIŞMAN**

Dr. Ayhan ETYEMEZ

İSTANBUL, 2019

**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Umut AYDIN'ın “**Magnezyum Alaşımın Mikro Frezelenmesinde Kesme Şartlarının Yüzey Bütünlüğüne Etkilerinin İncelenmesi**” başlıklı tez çalışması, 31/07/2019 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri**

Prof.Dr. Mustafa AY (Danışman) Marmara Üniversitesi .....



Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAKÖK (Üye) Marmara Üniversitesi .....



Dr. Öğr. Üyesi Gültekin BASMACI (Üye) Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi .....

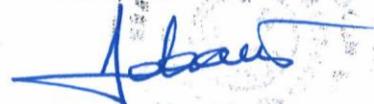


**ONAY**

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07.07/2019 tarih ve 2019/16-02 sayılı kararı ile Umut AYDIN'ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü**

**Prof. Dr.**



**Prof. Dr. Bülent EKİCİ**  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Bu çalışma akademik kariyerimin bir kilometre taşıdır. Bu çalışmada Magnezyum alaşımın mikro frezelemede kesme şartlarının yüzey bütünlüğüne etkisi incelenmiştir. Özellikle, bu çalışmanın mikro imalatta literatürümüze katılan bir yenilik olduğunu ve hitap ettiği sektörler itibariyle önemli bir konumda bulunduğunu düşünüyorum. Bu konunun seçilmesindeki temel nedenler; trend sektörlerin minyatürleşme ihtiyacına bir çözüm sunabilir ve yeni araştırma konularına yol açabilir olmasıdır.

Öncelikle, akademik kariyerim boyunca ufku genişleten, bilgi ve tecrübelerini paylaşan ve saymadığım birçok konuda destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Ay'a teşekkür ederim.

Ayrıca, deney düzeneğinin hazırlanmasında destek gördüğüm, tecrübelerini esirgemeyen eş danışmanım Dr. Ayhan Etyemez'e ve Murat Durukan Bey'e teşekkür ederim.

Son olarak, sevincimde ve üzüntümde, maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
SEMBOLLER.....	vi
KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Minyatürleşme.....	1
1.2. Mikro İşleme.....	3
1.3. Mikro Frezeleme.....	7
1.4. Literatür Araştırması.....	9
1.5. Araştırmanın Amacı.....	16
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
2.1. Deney Düzenegi.....	17
2.1.1. Mikro takımlar.....	17
2.1.2. Takım ön ayarlayıcı.....	17
2.1.3. CNC ve kontrol ünitesi.....	18
2.1.4. Yüksek devir sağlayıcı.....	19
2.1.5. Dinamometre.....	20
2.1.6. Amplifikatör.....	21
2.1.7. DAQ cihazı.....	21
2.1.8. Yazılımlar.....	22
2.1.8.1. Dynoware.....	22
2.1.8.2. Minitab.....	22
2.1.9. Yüzey pürüzlülük cihazı.....	23
2.2. Materyal.....	24
2.3. İşleme Geometrisi.....	26

2.4. Yöntem .....	27
2.5. Deney Tasarımı .....	28
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	29
3.1. Kesme Kuvveti Bulguları.....	29
3.2. Kesme Kuvveti Analizi .....	31
3.2.1. Ana etki grafiği.....	31
3.2.2. Etki grafikleri.....	33
3.2.3. Varyans analizi .....	36
3.2.4. Optimizasyon.....	37
3.2.5. Doğrulama deneyleri .....	37
3.2.6. Regresyon analizi .....	38
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Bulguları.....	39
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi .....	41
3.4.1. Ana etki grafiği.....	41
3.4.2. Etki grafikleri.....	43
3.4.3. Varyans analizi .....	46
3.4.4. Optimizasyon.....	47
3.4.5. Doğrulama deneyleri .....	47
3.4.6. Regresyon analizi .....	48
4. SONUÇLAR.....	49
KAYNAKLAR .....	52
EKLER.....	58

## ÖZET

# MAGNEZYUM ALAŞIMIN MİKROFREZELENMESİNDE KESME ŞARTLARININ YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mikro işleme, üç boyutlu ve karmaşık geometriye sahip mikro ölçekte bulunan ürünlerin, mühendislik malzemeleri kullanılarak, dar toleranslarla ve yüksek hassasiyetle üretilmesini sağlayan imalat yöntemidir.

Bu çalışmada, magnezyum alaşımı malzemenin mikro frezeleme kesici takımlarla frezelemesinde ilerleme, kesme hızı ve talaş derinliğinin kesme kuvvetlerine etkisi araştırılmıştır. Deney tasarımında Taguchi metodu kullanılmıştır. Bu metot ile deneylere harcanacak zaman ve maliyetten tasarruf edilmiş, deney sonuçlarında elde edilen veriler optimize edilerek iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki matematiksel olarak regresyon analiz yöntemiyle modelleneyecektir. Her parametrenin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisi varyans analizi (ANOVA) kullanılarak belirlenmiştir. Taguchi yönteminin uygulanacağı bu çalışmada kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü minimize edilerek, performans artırılmış ve elde edilen ürünün kalitesi iyileştirilmiştir. Bu çalışma ile magnezyum malzeme, mikro parmak freze ile optimal işlenebilirliği tayin edilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Magnezyum, Mikro Frezeleme, Taguchi, ANOVA, Regresyon Analizi, Yüzey Pürüzlülüğü

## **ABSTRACT**

# **THE EFFECTS OF CUTTING CONDITIONS ON SURFACE INTEGRITY IN MICRO MACHINING OF MAGNESIUM ALLOYS**

Micro-machining is a method of manufacturing products of micro-scale with three-dimensional and complex geometry, using engineering materials, with narrow tolerances and with high precision.

In this study, the effect of cutting, cutting speed and cutting depth on milling of magnesium alloy material by micro-milling cutting tools was investigated. Taguchi method was used for experiment design. With this method, the time and cost to be spent on the experiments were saved, and the data obtained in the experimental results were optimized, and improvement was carried out. The relationship between the dependent and independent variables will be modelled mathematically by regression analysis method. The effect of each parameter on the results was determined by using variance analysis (ANOVA). In this study where the Taguchi method is applied, the cutting force and surface roughness are minimized, the performance is increased, and the quality of the product is improved. In this study, it has been tried to determine the optimal workability of magnesium material with a micro endmill machining.

**Key Words:** Magnesium, Micro Milling, Taguchi, ANOVA, Regression Analysis, Surface Roughness



## SEMBOLLER

%	: Yüzde
'	: İnç (inch)
\$	: Dolar
°C	: Derece santigrad
d	: Kesme derinliği
f	: İlerleme
F	: İlerleme miktarı
F <sub>c</sub>	: Kesme kuvveti
F <sub>c</sub> (0,8)	: 0,8 mm takım için kesme kuvveti değeri
F <sub>c</sub> (1,0)	: 1,0 mm takım için kesme kuvveti değeri
F <sub>n</sub> (x)	: X eksenindeki doğal frekans
F <sub>n</sub> (y)	: Y eksenindeki doğal frekans
F <sub>n</sub> (z)	: Z eksenindeki doğal frekans
F <sub>x</sub>	: X eksenindeki kuvvet
F <sub>y</sub>	: Y eksenindeki kuvvet
F <sub>z</sub>	: Z eksenindeki kuvvet
M <sub>x</sub>	: X eksenindeki moment
M <sub>y</sub>	: Y eksenindeki moment
M <sub>z</sub>	: Z eksenindeki moment
n	: Devir sayısı
n	: Deney sayısı
r	: Radyüs
R <sub>a</sub>	: Yüzey pürüzlülük değeri
R <sub>a</sub> (0,8)	: 0,8 mm takım için yüzey pürüzlülük değeri
R <sub>a</sub> (1,0)	: 1,0 mm takım için yüzey pürüzlülük değeri
V	: Kesme hızı
X	: X eksen
Y	: Y eksen
Y <sub>i</sub>	: Gözlenen veriler
Σ	: Toplam sembolü sigma

## KISALTMALAR

$\mu\text{m}$	: Mikrometre
A/D	: Analog dijital
Ag	: Gümüş
AISI	: American iron and steel institute
Al	: Aluminyum
ANOVA	: Analysis of variance
Be	: Berilyum
Ca	: Kalsiyum
Cd	: Kadmiyum
Ce	: Seryum
CNC	: Computer numerical control
Cu	: Bakır
dak	: Dakika
DAQ	: Data acquisition
dB	: Desibel
dev	: Devir
dev/dak	: Dakikadaki devir
DLC	: Diamond like carbon
F/s	: Frame per second
Fe	: Demir
g	: Gram
Gpa	: Gigapascal
H	: Horizontal
HP	: Horse power
HRC	: Hardness of rockwell c
HSM	: High speed machining
IBM	: International business machines
IBM	: Ion beam machining
IIA	: Periyodik tablo 2A grubu
ISO	: International organization for standardization

kg	: Kilogram
kHz	: KiloHertz
kN	: Kilonewton
KO	: Kareler ortalaması
KT	: Kareler toplamı
La	: Lantan
LBM	: Laser beam machining
Lbs	: Libre's
LIGA	: Lithographie, galvanoförmung and abförmung
m	: Metre
max	: Maksimum
MEMS	: Mikro elektro mekanik sistem
Mg	: Magnezyum
Micro-EDM	: Electric discharge micromachining
min	: Minute
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mod.	: Modül
MPa	: Megapascal
Muk.	: Mukavemet
N	: Newton
N.m	: Newtonmetre
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
NiTi	: Nikel titanyum alaşımı
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
pC/N	: Piezoelectric coefficient piko coulmb
PMMA	: Polimetil metakrilat
RGB data	: Red green blue data
s	: Second
SD	: Serbestlik derecesi

Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
ŞHA	: Şekil hafızalı alaşım
USB	: Universal serial bus
USM	: Ultrasonic machining
WJM	: Water jet machining
VW	: Volkswagen
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum



## ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1.1 : Elektronik mikro parça örnekleri
- Şekil 1.2 : Mikro vida örnekleri
- Şekil 1.3 : 1956 yılı hard disk
- Şekil 1.4 : 2004 yılı hard disk
- Şekil 1.5 : Mikro imalat teknikleri
- Şekil 1.6 : Mikro işleme prosesleri
- Şekil 1.7 : Mikro mekanik işleme çalışma boyutları
- Şekil 1.8 : Mikro işlemede kullanılan malzemeler
- Şekil 1.9 : Mikro torna ve mikro freze
- Şekil 1.10 : Mikro ve makro kesici takım örneği
- Şekil 1.11 : Mikro frezeleme parametreleri ve etkileri
- Şekil 2.1 : Mikro takımlar
- Şekil 2.2 : Takım ön ayarlayıcı
- Şekil 2.3 : CNC makinesi ve kontrol ünitesi
- Şekil 2.4 : Hız kafası
- Şekil 2.5 : Deney düzeneği
- Şekil 2.6 : Ölçüm ekipmanları
- Şekil 2.7 : Amplifikatör
- Şekil 2.8 : DAQ cihazı
- Şekil 2.9 : Dynoware
- Şekil 2.10 : Minitab
- Şekil 2.11 : Dijital optik mikroskop
- Şekil 2.12 : Deney numunesi
- Şekil 2.13 : Numune montajı
- Şekil 2.14 : İşleme geometrisi
- Şekil 3.1 : Kesme kuvvetleri bulguları
- Şekil 3.2 : Kesme kuvvetleri karşılaştırması
- Şekil 3.3 : Ana etki grafiği – 1,0 mm
- Şekil 3.4 : Ana etki grafiği – 0,8 mm
- Şekil 3.5 : İlerlemenin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 1,0 mm

- Şekil 3.6** : Talaş derinliğinin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 1,0 mm
- Şekil 3.7** : Talaş derinliğinin ve ilerlemenin kesme kuvvetine etkileri – 1,0 mm
- Şekil 3.8** : İlerlemenin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 0,8 mm
- Şekil 3.9** : Talaş derinliğinin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 0,8 mm
- Şekil 3.10** : Talaş derinliğinin ve ilerlemenin kesme kuvvetine etkileri – 0,8 mm
- Şekil 3.11** : Yüzey pürüzlülük ölçümü
- Şekil 3.12** : Yüzey pürüzlülük bulguları
- Şekil 3.13** : Yüzey pürüzlülükleri karşılaştırması
- Şekil 3.14.** : Ana etki grafiği – 1,0 mm
- Şekil 3.15** : Ana etki grafiği – 0,8 mm
- Şekil 3.16** : İlerlemenin ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 1,0 mm
- Şekil 3.17** : Talaş derinliğinin ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 1,0 mm
- Şekil 3.18** : Talaş derinliğinin ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 1,0 mm
- Şekil 3.19** : İlerleme ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 0,8 mm
- Şekil 3.20** : Talaş derinliğinin ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 0,8 mm
- Şekil 3.21** : Talaş derinliğinin ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 0,8 mm

## TABLO LİSTESİ

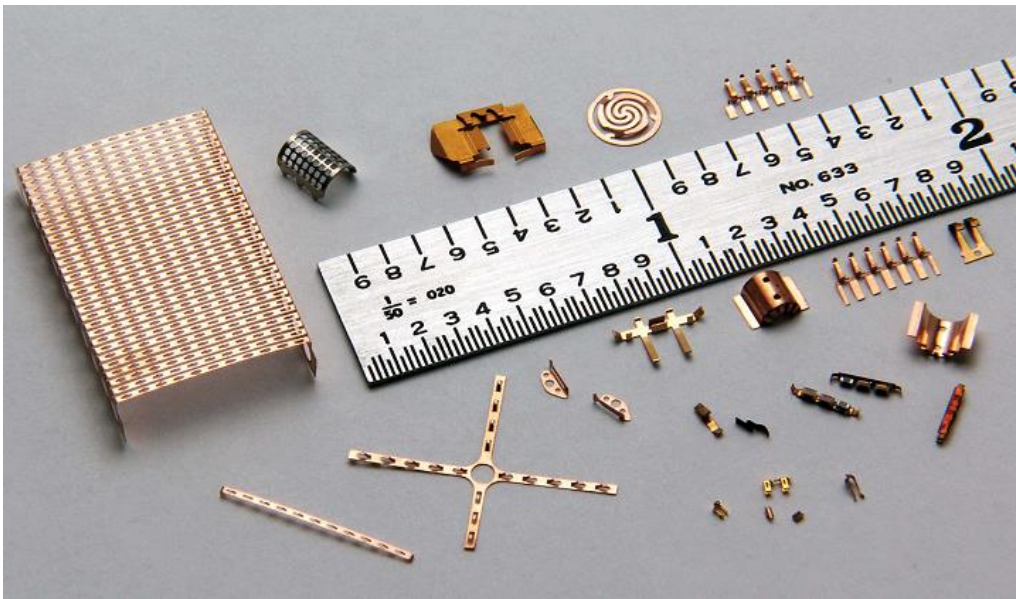
- Tablo 2.1** : CNC makinesinin teknik özellikleri
- Tablo 2.2** : Mini dinamometre teknik özellikleri
- Tablo 2.3** : Optik kamera özellikleri
- Tablo 2.4** : Magnezyum alaşımları ve kimyasal bileşimleri
- Tablo 2.5** : AZ91 kimyasal bileşimi
- Tablo 2.6** : AZ91 mekanik özellikleri
- Tablo 2.7** : İşleme programı
- Tablo 2.8** : Değişkenler ve seviyeler
- Tablo 2.9** : Deneysel tasarımı
- Tablo 3.1** : Kesme kuvveti ve S/N değerleri
- Tablo 3.2** : Kesme kuvveti değerlerinin S/N oranları – 1,0 mm
- Tablo 3.3** : Kesme kuvveti değerlerinin S/N oranları – 0,8 mm
- Tablo 3.4** : Kesme Kuvveti ANOVA sonuçları – 1,0 mm
- Tablo 3.5** : Kesme Kuvveti ANOVA sonuçları – 0,8 mm
- Tablo 3.6** : Kesme kuvveti optimum seviyeler
- Tablo 3.7.** : Doğrulama deneyleri
- Tablo 3.8** : Yüzey pürüzlülük ve S/N değerleri
- Tablo 3.9** : Yüzey pürüzlülük değerlerinin S/N oranları – 1,0 mm
- Tablo 3.10** : Yüzey pürüzlülük değerlerinin S/N oranları – 0,8 mm
- Tablo 3.11** : Yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları – 1,0 mm
- Tablo 3.12** : Yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları – 0,8 mm
- Tablo 3.13** : Yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler
- Tablo 3.14** : Doğrulama deneyleri

# 1. GİRİŞ

Ülkemizde otomotiv, havacılık, savunma, medikal ve elektronik sektörleri talaşlı imalatın sıkça kullanıldığı sektörlerdir. Bu sektörlerde üretilen ürünlerde yüksek boyutsal doğruluk, üstün yüzey kalitesi, hafiflik ve ekonomiklik önemli yer tutan kavramlardır. Teknolojinin gelişmesi ile bahsi geçen sektörlerde üretilen ürünlerde minyatürleşme de önem arz etmektedir. Mikro frezeleme, minyatürleşmeyi sağlayan bir mikro işleme yöntemidir. Bu bölümde sırasıyla; minyatürleşme, mikro işleme, mikro frezeleme kavramlarına yer verilmiş, sonrasında ise mikro frezeleme ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Son olarak, bu araştırmanın amacı belirtilmiştir.

## 1.1. Minyatürleşme

Bir sistemin ve sistemi oluşturan tüm parçaların küçülmesi minyatürleşme olarak tanımlanır. Minyatürleşmeyi, teknolojinin gelişmesine paralel olarak otomotiv, savuma, elektronik ve medikal gibi sektörlerin ürünlerinde görebiliriz. Ürünlerin küçültülebilir olması minyatürleşme eğilimini artırmıştır. Cep telefonları, bilgisayarlar, elektronik devreler, medikal ürünler, mikro vida ve diğer mikro bağlantı elemanları minyatürleşmeyi görebileceğimiz örneklerdir. Minyatürleşme, yeni teknolojik makine ve sistemler kullanılarak veya yeni teknolojinin eski makine ve ekipmanlara uyarlanması ile sağlanabilir [1]. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de minyatür parça örnekleri verilmiştir.



Şekil 1.1. Elektronik mikro parça örnekleri [2]





**Şekil 1.2.** Mikro vida örnekleri [3]

Minyatüre edilmiş ürünler ve sistemler, kolay taşınabilir ve kullanım kolaylıkları mevcuttur. Ayrıca bu sistemlerin, az malzeme ve güç tüketimi, yüksek ısı transferi, daha iyi sistem entegrasyonu gibi bazı avantajları vardır [4].

Şekil 1.3'te IBM tarafından 1956 yılında üretilen 60 inç boyunda depolama birimi gösterilmiştir. Şekil 1.4'de ise 2004 yılında Toshiba tarafından üretilen sadece 0,85 inç boyundaki harddisk gösterilmiştir.



**Şekil 1.3.** 1956 yılı hard disk [5]



**Şekil 1.4.** 2004 yılı hard disk [6]

Minyatürleşen proseslerde yüksek ürün kalitesi elde edebilmek için ekipmanların yüksek hassasiyette olması gerekmektedir. Kullanılacak olan makine ve teçhizatın yüksek hassasiyet ve doğrulukta çalışabilmesi için imalatın ve mekanik sistemin toleransları dikkat edilmesi gereken unsurlardır [7].

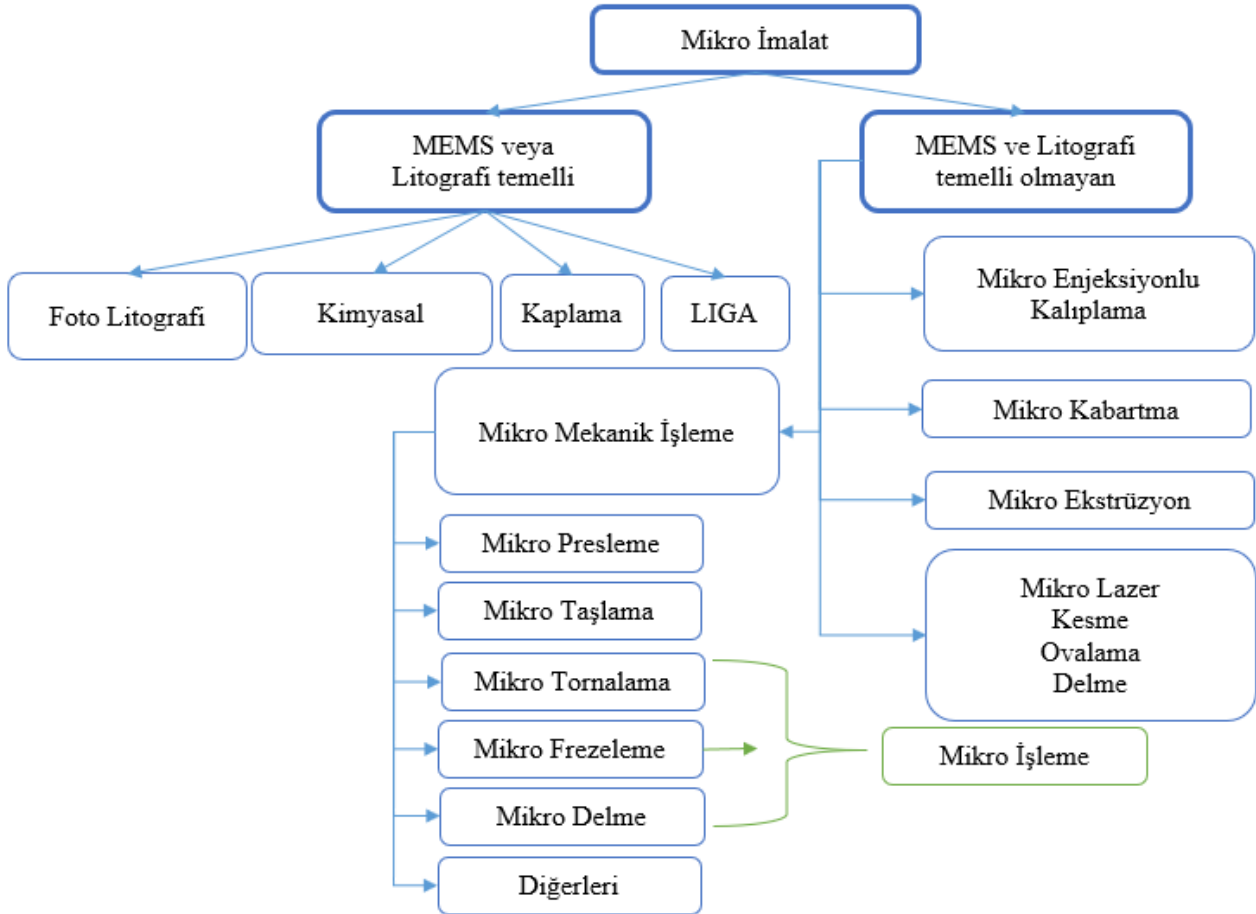
Minyatür parça imalatında prosesin verimliliği, parça ve takım boyutlarından etkilenmektedir. Mikro ölçekte takımların çap ölçülerinin küçük olması imalat esnasında beklenmedik kırılmalara sebep olabilmektedir. Bu durum, ürün kalitesini olumsuz etkilemekte ve zaman kayıplarına sebep olmaktadır. Bu duruma mahal vermemek için, tasarım yapılırken malzeme mekanik özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır [8].

## 1.2. Mikro İşleme

Mikro işleme, üç boyutlu ve kompleks geometriye sahip mikro ölçekte bulunan ürünlerin, yaygın mühendislik malzemeleri kullanılarak, kısıtlı toleranslarla ve yüksek hassasiyetle üretilmesini sağlayan imalat yöntemidir [9].

Lazer yöntemi, odaklanmış iyon ışını yöntemi ve elektrokimyasal proses geleneksel olmayan mikro imalat yöntemleridir. Bu yöntemlerin verimliliği düşük, maliyeti yüksektir. Ayrıca sınırlı mühendislik malzemesine uygulanabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, mikro mekanik işleme yöntemleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikro mekanik işlemler; mikro frezeleme, mikro tornalama, mikro delme ve mikro taşlama olarak belirtilebilir. Bu yöntemler ile pek çok mühendislik malzemesi işlenerek üç boyutlu mikro parçalar elde edilebilir [10] (Ek 1.1).

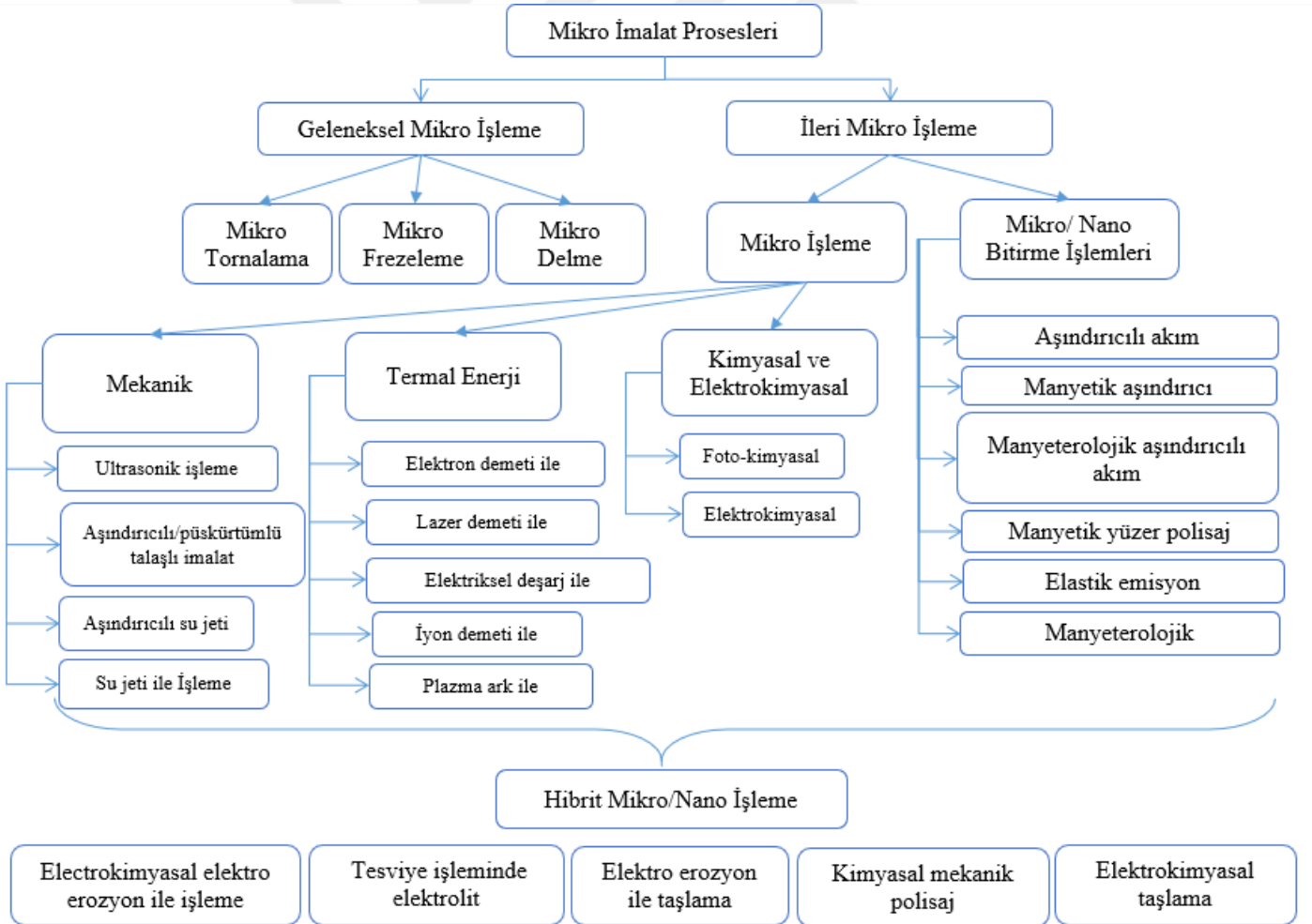
Mikro imalat, MEMS (mikro elektrik mekanik sistem) ve litografi temelli yöntemler ile mikro mekanik, lazer, ekstrüzyon gibi litografi temelli olmayan yöntemler olarak gruplandırılabilir. Şekil 1.5'te mikro imalatın sınıflandırılması gösterilmiştir [11].



Şekil 1.5. Mikro imalat teknikleri [11]

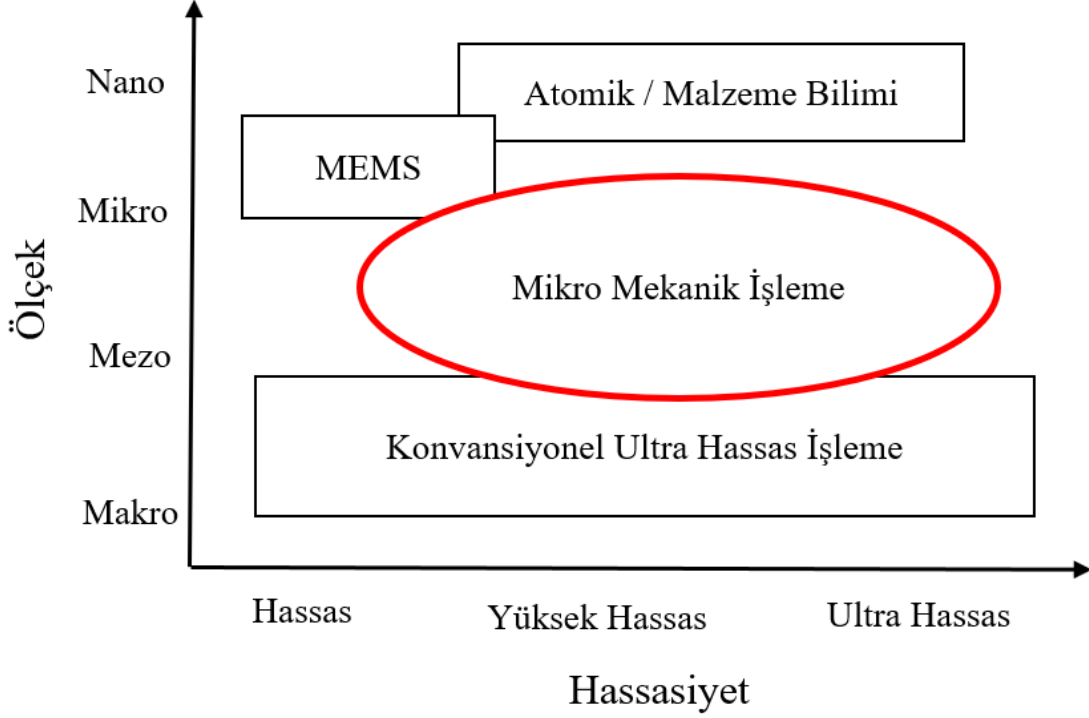
Mikro işleme, geleneksel prosesler ve ileri (geliştirilmiş) prosesler olmak üzere iki ana başlık altında gruplandırılabilir. Konvansiyonel mikro işleme teknikleri mikro frezeleme, mikro tornalama ve mikro delme gibi kesici takım temelli prosesleri içermektedir. İleri prosesler ise kullanılan enerji türüne göre mekanik, termal, kimyasal ve elektrokimyasal olmak üzere sınıflandırılabilir.

Ultrasonik işleme (USM, ultrasonic machining) ve su jeti işleme (WJM, water jet machining) mekanik enerji kullanan proseslere örnek olarak verilebilir. Elektrik deşarj mikro işleme, (Micro-EDM, electric discharge micromachining), iyon demeti ile işleme (IBM, ion beam machining) ve (LBM, laser beam machining) termal enerji kullanan proseslere örnek olarak verilebilir. Mikro elektro kimyasal işleme ise kimyasal enerjiyi kullanan bir prosestir. Diğer yandan, hibrit prosesleri ise birden fazla mikro işleme prosesinin avantajlarını kullanarak oluşturulan kombinasyonlardır. Şekil 1.6'da mikro işleme proseslerine ait bir sınıflandırma şematize edilmiştir [12].



Şekil 1.6. Mikro işleme prosesleri [12]

Mikro mekanik işleme ile 10 µm ile birkaç milimetre aralığında minyatür ürünler imal edilir [13]. Mikro mekanik işleme sektörünün dünya genelinde yaklaşık olarak 60 milyar dolar işlem hacmi vardır. Mikro mekanik işleme ile mikro (0,1 µm- 100 µm) ve mezo (100 µm-10 mm) ölçekte parçalar imal edilerek makro boyuttaki sistemler ile bağlantı sağlamak istenmiştir. Şekil 1.7’de mikro mekanik işlemenin ölçek ve hassasiyeti gösterilmiştir [4].



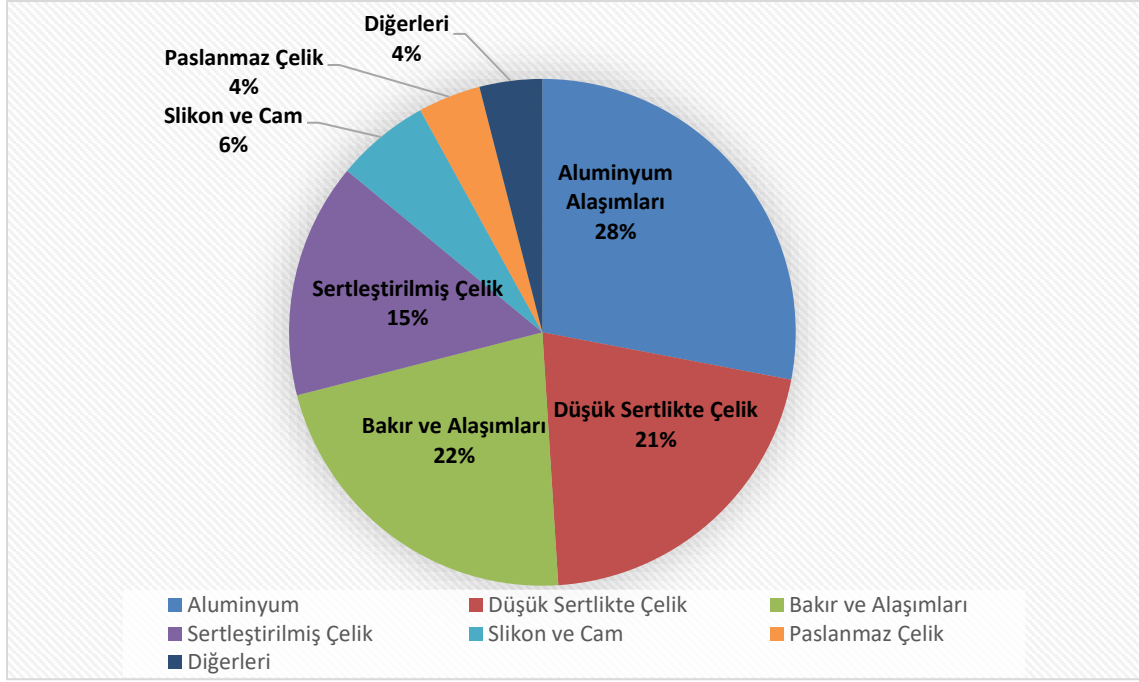
Şekil 1.7. Mikro mekanik işleme çalışma boyutları [14]

Mikro işlemede metaller, polimerler, kompozitler ve seramikler kullanılabilir. Eğik yüzeylerin işlenmesi ve işleme derinliği mikro imalatta karşılaşılan bazı zorluklardır. Entegre çözümler ile bu zorluklar üzerine çalışmalar yapılmaktadır [15].

Mikro mekanik imalat teknik açıdan makro imalata benzerdir. Belirgin fark mikro imalatta kullanılan takımların çaplarının küçük olmasıdır. Bu durum takım ömrünün tahmin edilememesine sebep olmaktadır. Özellikle işlenmesi zor olan malzemelerde, takım ömrünün belirlenememesi ve takımlarda meydana gelen beklenmedik hasarlar karşılaşılan başlıca problemlerdir [16].

Mikro ölçekte ürünlerin imal edilmesinde geometrik toleranslar ve yüzey pürüzlülüğü önemli unsurlardır. Bu unsurları etkileyen parametrelerden biri kesme kuvvetleridir. Dolayısıyla, kesme kuvvetlerinin ölçümü ve optimizasyonu verimli bir imalat süreci için gereklidir [9].

Yapılan araştırmalarda, mikro işlemede kullanılan iş parçası malzemeleri kolay işlenebilir çelikler (düşük sertlikte çelikler, karbon çelikleri, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı sertleştirilmemiş çelikler), alüminyum ve bakır alaşımlarıdır. Sertleştirilmiş elikler, ısıya dayanımlı alaşımlar, seramikler ve kesilmesi zor malzemeler üzerinde daha az araştırma yapılmıştır [11]. Şekil 1.8’de iş parçası malzeme çeşitlerinin bir Őeması verilmiştir.



Şekil 1.8. Mikro işlemede kullanılan malzemeler [11]

Şekil 1.9’da mikro ölçekte ürün imal edebilmek için geliştirilmiş mikro torna ve mikro freze makine örnekleri verilmiştir. Mikro tornanın 35×400 mm ölçüleri bulunmaktadır. Ayrıca bu makinelere gerekli ekipmanlar uyarlanarak CNC özelliği kazandırılabilir.



Şekil 1.9. Mikro torna ve mikro freze [17]

### 1.3. Mikro Frezeleme

Mikro parmak frezeleme artan bir önemi olan, mikro mekanik imalat yöntemlerinden biridir [4]. Diğer mikro imalat yöntemleri ile kıyaslandığında, verimliliği ve proses esnekliği açısından daha üstündür [18]. Ayrıca, üretim hızı ve maliyet açısından daha elverişli tarafları da bulunmaktadır. Diğer yandan, proses mikro ölçekte olduğu için birtakım problemler ile karşılaşmaktadır. Malzeme özelliği, deformasyon mekanizmaları, boyut etkileri, takım koşulları, proses modelleme, analiz, optimizasyon ve şekillendirme sınırları araştırılması gereken konu başlıklarıdır. [19].

Bu yöntemde, 100-999  $\mu\text{m}$  çapında mikro parmak frezeler kullanılmaktadır [10]. Son yıllarda 50  $\mu\text{m}$ 'den küçük takımlar ticari olarak imal edilmiştir [20]. Şekil 1.10'da 0,5 mm, 1,0 mm imal edilmiş bir takım ve 10 mm çapında bir konvansiyonel takım gösterilmiştir.



Şekil 1.10. Mikro ve makro kesici takım örneği

Mikro frezelerin şaftları üzerine gelen gerilmelerin değişimleri takımların ömrünü kısaltabilir ya da önlem alınmazsa kırılmasına sebebiyet verebilir. Takım ömrünün kısa olması yüzey kalitesi ve prosesin verimliliği açısından istenmeyen durumdur. Bir mikro frezeleme sürecinde, işlem sonuna kadar aynı takımın kullanılması istenir. Bu sebeple işleme ve kesme şartlarının doğru tayin edilmesi önem arz etmektedir [10-21].

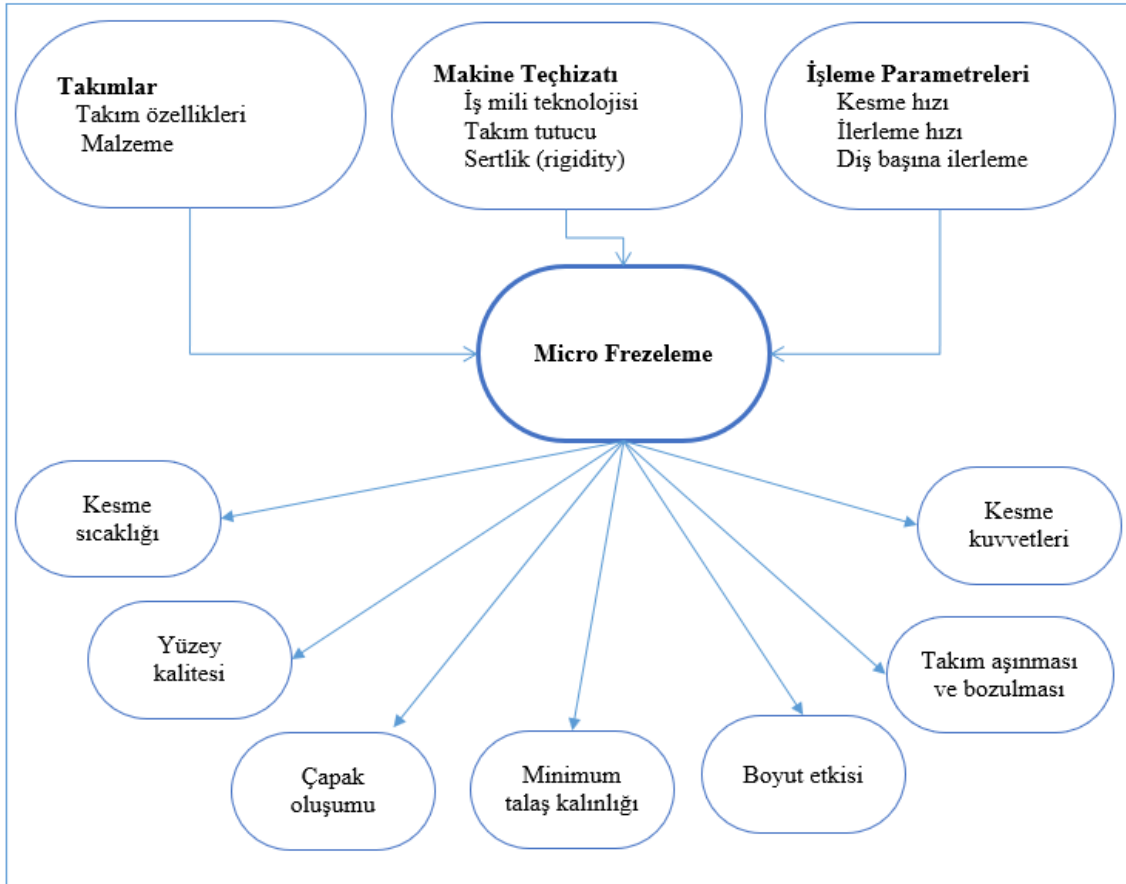
Makro imalat sürecinde dikkate alınmayan kazıma/sürtünme (plowing/rubbing) mekanizması mikro frezeleme işleminde kuvvetlerin artışına sebep olmaktadır. Kuvvetlerin tahmin edilebilmesi, ürün kalitesinin artırılması için önem arz etmektedir. Mikro frezeleme başlığı altında güncel bir araştırma konusu haline gelmiştir [22].



Konvansiyonel frezelemeden mikro frezelemeye geçerken boyut etkisi, mikro talaş oluşumu, takım aşınması, ani takım kırılması gibi bazı problemler ile karşılaşmaktadır. Mikro frezelerin uzunluk/çap oranı düşük olduğu için kesme kuvvetlerinin artması takım sapmasına ve son üründe yüzey hatalarına sebebiyet verebilir. Hatta kesme kuvvetleri minimize edilmez ise, takım kırılabilir. Kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesi zorunlu hale gelmiştir [23].

Mikro frezeleme prosesinde kullanılan takımların çaplarının küçük olması, kesici takımda meydana gelen elastik deformasyonun sebebidir. İlerleme hızı ve talaş derinliği ise elastik deformasyonu en fazla etkileyen parametrelerdir. Yüksek ilerleme ve talaş derinliği kesme kuvvetlerini ve buna bağlı olarak elastik deformasyonu artırmaktadır [16].

Mikro frezelemede kullanılan girdiler takım, işleme ve makine parametreleri olmak üzere gruplandırılabilir. Mikro frezeleme etkileri ise boyut, deformasyon, yüzey kalitesi, kuvvet, talaş ve sıcaklık olarak belirtilebilir. Şekil 1.11’de mikro frezeleme girdileri ve etkileri gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Mikro frezeleme parametreleri ve etkileri [24]

#### 1.4. Literatür Araştırması

Yücel ve Çiçek (2011), imalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme tekniklerini incelemişlerdir. Mikro işleme tekniklerini genel anlamda iki kategoride sınıflandırmışlardır; mikro mekanik işleme ve mikro aşındırıcı işleme. Araştırmada, AISI H13 sertleştirilmiş (45 HRC) sıcak iş takım çeliği mikro frezeleme ile incelenmiştir. Mikro frezeleme işleminde, devir sayısı, eksenel derinlik ve uygun takım kaplamalarının kullanımı gibi parametrelerin optimizasyonu ile daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü elde edilebileceği belirtilmiştir [4].

Karpat, Kanlı ve Oliaei (2018), takım eksen sapmasının dahil edildiği ortalama kuvvet modeline dayalı bir mekanistik model geliştirmişlerdir. Araştırmada, kesme kuvvetlerinin makro ölçekte frezelemeye göre doğrusal bir karakterde olmadığı belirtilmiştir. Ti6Al4V alaşımı üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, ortaya koyulan modelden elde edilen kuvvet değerleri ile ölçülen değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür [25].

Aslantaş, Çiçek ve Çelik (2018), Inconel 718 alaşımının mikro frezelemesinde takım aşınmasının kanal geometrisi, yüzey kalitesi ve çapak oluşumu üzerinde etkisini araştırmışlardır. Deneyler, sabit kesme parametreleri ile ve kuru kesme şartlarında yapılmıştır. Araştırmada, mikro işleme ile elde edilen kanaldaki boyutsal değişiklik, çapak oluşumu ve kesme kuvvetleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, kesici takımın eksenel ve çevresel olmak üzere aşındığı gözlemlenmiştir. Çevresel aşınma takım çapının azalmasına neden olmaktadır. Takımlarda meydana gelen aşınma ile kenar radyüsünde değişiklikler meydana gelmektedir. Takımın kesme kabiliyeti düşmektedir. Eksenel ve radyal boşluk açıları azalmakta ve bunun sonucunda kenar radyüsünde artma meydana gelmektedir. Bu durum kesici takımın iş parçasına dalmasını zorlaştırmaktadır. Bu zorlaşma, kazıma bölgesi ve çapak genişliğinin artmasının sebebidir. Takım çapındaki küçülme ve kenar radyüsündeki büyüme kanal geometrisini etkilemektedir. Eksenel aşınma, kanal derinliğinin geometrisini etkilemektedir [26].

Lu, Jia ve arkadaşları (2019), Inconel 718 malzemesinin mikro frezelemesinde, kesme parametrelerinin mikro sertlik üzerindeki etkisini ve vickers sertliğinin tepki yüzeyleri metodolojisine dayalı olarak tahmin edilmesini incelemişlerdir. Araştırmada, iş mili hızı, ilerleme oranı ve eksenel derinlik parametrelerini kullanmışlardır. Araştırma sonucunda iş mili hızı vickers sertliğini en fazla etkilemiştir. Eksenel derinlik ise ilerleme miktarına



göre daha fazla etkilemiştir. İş mili hızının artması ile mikro sertlik azalmakta, eksenel derinliğin artması ile mikro sertlik artmaktadır [27].

Özel, Liu ve Dhanorker (2009), Al 2024-T6 alüminyum alaşımı ve AISI 4340 çeliği üzerinde mikro frezeleme işlemini modellemiş ve simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada kullanılan takımın çapı 0,635 mm'dir. İş mili (spindle) hızı max 80000 dev/dak'dır. İş mili hızı ve ilerleme oranının kuvvetler üzerinde etkisi araştırılmıştır. Proses dinamikleri ve sürekli kayma sebebi ile kesme kuvvetlerinde büyük bir dalgalanma gözlemlenmiştir. Minimum talaş kalınlığının kenar yarıçap oranı (edge radius ratio) Al 2024-T6 alüminyum alaşımı için %42-45 aralığında AISI 4340 çeliği için ise %30-35 aralığında olduğu bulunmuştur [28].

Pratap, Patra ve Dyakonov (2015), Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde ABAQUS programını kullanarak sonlu elemanlar analizi ile kesme kuvvetlerini modellemişlerdir. Araştırmada, takım kenar yarıçapı (tool edge radius), kesilmemiş talaş kalınlığı (uncut chip thickness), kesme hızı ve ilerleme oranı parametreleri kullanılarak gerilme dağılımı, sıcaklık dağılımı ve kuvvetler simule edilmiştir. Maksimum Von-Mises gerilmesi ve kesme sıcaklığı Ti-6Al-4V alaşımının makro frezelemesine göre daha fazladır. Bunun sebebi ise takım kenar yarıçapı ve düşük ilerleme değerleridir. Simule edilen kesme kuvvetleri deneyler sonucunda ispatlanmıştır [23].

Aslantaş ve Kaynak (2019), şekil hafızalı NiTi alaşımını mikro freze ile incelemişlerdir. Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) biyomedikal alanda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar arasında en çok kullanılan NiTi alaşımıdır. Kesilmeye zorlanan NiTi alaşımı kristal kafes yapısını değiştirebilir ve faz dönüşümü gerçekleştirebilir. Araştırmada diş başına düşen ilerleme ve talaş derinliği parametreleri kullanılmıştır. Kritik talaş kalınlığı bulunmaya çalışılmıştır. Çapak genişliği, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü araştırmanın çıktılarıdır. Araştırma sonucunda kritik talaş kalınlığı 0,5 µm olarak elde edilmiştir. Kritik talaş kalınlığı kesici kenar radyüsünün %33'üdür. Kesme hızının artması ile kesme kuvveti ve çapak genişlikleri de artmaktadır [29].

Oliaei ve Karpat (2014), Stavax paslanmaz çeliği üzerinde mikro frezeleme çalışması yapmışlardır. Deneylerde, kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme miktarı, radyal dalma yüzdesi (radial immersion percentage) ve dalma yöntemi (plunging method) parametreleri araştırılmıştır. Takım aşınması, işleme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü

incelenmiştir. Deneyler sonucunda, dalma yöntemi, takım aşınmasını anlamlı ölçüde etkilememektedir. Buna bağlı olarak yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri de etkilenmektedir. Radyal dalma ve ilerleme miktarı arasındaki ilişkinin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından önemli olduğu gösterilmiştir [30].

Mamedov ve Lazoğlu'nun (2012) mikro frezeleme için sundukları mekanistik kuvvet modeli, konvansiyonel kuvvet modeline göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Araştırmada deneyler Al 7050 malzemesi üzerinde yapılmıştır. Araştırma sonucunda, kesme kuvvetlerinin doğru tayin edilmesinin takım aşınması, ürün hassasiyeti ve yüzey kalitesi açısından önemli olduğu belirtilmiştir [22].

Günaydın (2014), mikro kanal frezeleme prosesinde maksimum verim elde edilebilmesi için takım yolu geometrisi, işleme stratejisi geliştirmiş ve kesme parametrelerini optimize etmiştir. Araştırmada, kesme kuvvetlerinin, yüzey pürüzlülüğünün ve takım aşınmasının değerleri analitik hesaplama ile değil, deney dizayn tablosu kullanarak matematiksel modeller ile oluşturulmuştur. 2738 plastik kalıp çeliği kullanılmıştır. İmalat maliyetinin minimum olması amaç edinilerek, kesme parametrelerinin bu amaç etrafında optimizasyonu yapılmıştır. Kesici ilerlemesi, kesme hızı, yana kaçma mesafesi ve kesici çapı / kanal genişliği oranı kullanılan parametrelerdir. Kontrol ünitesinin kesme şartlarına verdiği tepkiyi barındıran, takım yolu geometrisine bağlı modeller geliştirilmiştir [31].

Kuram (2017), Inconel 718 süper alaşımının mikro frezelemesinde, kesici takım bağlama uzunluğunun takım aşınması, kuvvetler ve çapak boyutu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Takım aşınmasının belirlenmesinde, kesicideki çap azalması değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda takım aşınmasının, ölçülen  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvetlerinin ve çapak genişliği değerlerinin bağlama uzunluğu ile orantılı olduğu, bağlama uzunluğunun artışı ile arttığı tespit edilmiştir. Kesici takım bağlama uzunluğunun 10 mm olduğu anda en düşük çapak genişliği ölçülmüştür [10].

Afazov, Ratchev ve Segal (2010), AISI 4340 çeliğinin mikro tornalama işleminde, kesme kuvvetlerini sonlu elemanlar metodu ile modellemiş ve simülasyon gerçekleştirmiştir. Takım yolu ve talaş kalınlığı belirlenerek kesme kuvvetleri tahmin edilmiştir. Salgı etkisi (run out effect) dikkate alınmıştır. Araştırma sonucunda, kesme hızı ve talaş kalınlığı hakkında lineer olmayan bir denklem sunulmuştur. Tahmin edilen ile ölçülen kuvvetler arasında yakın ilişki vardır [32].

Ziberov, Silva, Jackson ve Hung (2016), Ti-6Al-4V titanyum alaşımının mikro tornalamasında kesme sıvısının etkilerini incelemişlerdir. Yığma kenarın (built up edge) olmaması durumunda, kesme sıvısı kullanmanın işlenmiş yzeyin kalitesini artıracasını ispatlamışlardır. Takım omrünün kuru işlemede daha uzun olacağını belirtmişlerdir [33]. Nahata, Onler, Korkmaz ve Özdoğanlar (2018), mikro işleme prosesinde radyal salınımın matematiksel modelini oluşturmuşlar ve sonrasında bağımsız deneyler ile radyal salınımı inceleyerek matematiksel model ile kıyaslamışlardır [34].

Mamedov ve Lazoğlu (2013), yaptığı bir araştırmada kesme kuvvetini, takım elastik deformasyonunu ve dnen takımın hızını olęme tekniklerini incelemişlerdir. Kuvvet sinyalinin gürültülü çıkması ve dinamometrenin küçük bant aralığı, kesme kuvvetlerini olęerken karşılaşılan sorunlar olarak belirtmişlerdir. Takımın dönme hızını hesaplamak için, lazer ışını iki ağızlı takıma gönderilmesini ve deplasman sinyalinin periyodundan hareketle takımın dönme hızının hesaplanabileceğini belirtmişlerdir [9].

Lauro, Brandao, Panzera ve Davim (2015), konvansiyonel imalatta yzey bütünlüğünü belirtmişlerdir. Balık kılçığı diyagramı ile, takım ve iş parçası özelliklerinin, işleme parametrelerinin ve kesme Şartlarının yzey pürüzlülüğünü etkilediğini göstermişlerdir. Son olarak, mikro imalatın yzey bütünlüğü açısından avantajlarını sunmuşlardır [35].

Bayraktar ve Turgut (2016), Al 5083 alaşımının frezelemede kesme kuvvetlerini, yzey pürüzlülüğünü ve ęapak yüksekliğini incelemişler ve optimizasyon geręekleřtirmiřlerdir. Araştırmada, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri kullanılmıştır. Deneyler Taguchi L<sub>9</sub> metodu ile tasarlanmıştır. Araştırma sonucunda, kesme kuvveti ve yzey pürüzlülüğünün kesme hızının artması ile azaldığını, ilerlemenin artması ile arttığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, varyans analizi (ANOVA, analysis of variance) ile sırasıyla ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesme derinliğinin yzey pürüzlülüğü ve ęapak yüksekliği üzerinde etkili olduğunu bulunmuştur [36].

Günay (2013), AISI 316L ęelięinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin optimizasyonunu geręekleřtirmiřtir. Araştırmada, Taguchi L<sub>9</sub> metodu ile deneyler tasarlanmış ve sonrasında varyans analizi yapılmıştır. Araştırma sonucunda, kesme kuvveti ve yzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin ilerleme miktarı olduğu bulunmuştur [37].

Şirin, Turgut ve arkadaşları (2015), AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelemesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi metodu ile optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Araştırmada, malzeme sertlik değeri, ilerleme ve kesme hızı kontrol parametreleri olarak belirlenmiştir. Varyans analizi sonucunda, yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrenin kesme ve ilerleme hızı olduğunu tespit edilmiştir. Son olarak doğrulama deneyleri yapılmıştır [38].

Yu, Wang ve Rong (2015), mikro işleme prosesinde mikro yapının yüzey bütünlüğü ve talaş formu üzerine etkisini incelemiştir. Araştırmada, iki farklı tane büyüklüğüne sahip bakır malzemesi ve tek elmaslı (diamond) kesici takım kullanılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, tane büyüklüğünün azaltılması, mikro kesme işleminde mikro yapının yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini azaltacağını göstermektedir. Ayrıca, araştırmaya konu olan tavlanmış ve saf bakır için ilerleme miktarının azalması ile çıkan talaş şeklinin süreklilik kaybederek kesintili olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlem aynı kesme derinliği (depth of cut) için yapılmıştır [39].

Meral, Sarıkaya ve Dilipak (2011), delik delme işleminde TiAlN kaplamalı ve HSS kaplamasız takımların ilerleme miktarı, matkap çapı ve kesme hızı parametrelerine göre performanslarını incelemiş ve optimizasyon gerçekleştirmiştir. Araştırmada, AISI 1050 imalat çeliği üzerinde deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak, ilerleme ve matkap çapı kesme hızına göre kesme kuvvetini daha çok etkilemiştir. Her iki matkap türünde de yüzey pürüzlülüğü en fazla matkap çapından etkilenmiştir [40].

Aslantaş, Ekici ve Çiçek (2018), Ti-6Al-4V alaşımının üzerinde yaptıkları çalışmada mikro frezelemede yüzey kalitesi ve çapak genişliğini incelemiştir. Minimum çapak genişliği ve yüzey pürüzlülüğü hedefinde Taguchi metodu ile kesme parametreleri optimizasyon yapılmıştır. Araştırmada, iş mili hızı (spindle speed), ilerleme ve kesme derinliği parametre olarak kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, en iyi yüzey kalitesi için ilerleme 0,25µm/adım olarak ölçülmüştür. Daha düşük ilerleme oranında ise, kazıma (ploughing) meydana geldiği görülmüştür. Düşük ilerleme ve yüksek kesme derinliği çapak genişliğini artırır. Ayrıca, iş mili hızı artması, hızlı takım aşınmasına sebep olduğu için çapak genişliğinin artmasına sebep olmaktadır [41].

Khorasani, Gibson ve arkadaşları (2016), pirinç (C3600) ve Al 5083 alaşımlarında kesme sıvı basıncının yüzey kalitesine etkisini incelemiştir. Taguchi 32 dizinini

kullanmışlardır. Yüzey kalitesinin kesme hızı ile arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilerleme miktarının 0,41-0,45 m/dak ve kesme sıvı basıncının 2 -3,5 bar arasında yüzey kalitesi geliştirilmiştir [42].

Korkmaz, Önler ve Özdoğanlar (2017), tek kristal baklava kesici takım kullanarak PMMA'nın (Polimetil metakrilat) mikro frezelemesini incelemişlerdir. İş mili hızı, ilerleme ve aksel derinlik parametreleri kullanılarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve şekil kalıcılığı (shape retention) incelenmiştir. Araştırma sonucunda, kullanılan mikro kesici takım ile PMMA üzerinde daha düşük düzeyde yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu ve kuvvet gözlemlenmiştir [43].

Sun ve arkadaşları (2017), sonlu elemanlar analizi ile alüminyum Al 7075-T6 malzemesi üzerinde mikro frezelemeyi modellemişlerdir. Araştırmada, ilerleme miktarının değişmesi ile kesme kuvvetleri ve talaş oluşumu incelenmiştir. Radyal kesme derinliği arttıkça kesme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir [44].

Günay, Kaçal ve Turgut (2011), Ti-6Al-4V alaşımının frezelemesinde kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişler ve optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Araştırma, karbür kesici takımlar ile kuru şartlarda yapılmıştır. Deneysel tasarım için Taguchi L<sub>9</sub> yöntemi tercih edilmiştir. Araştırma sonucunda, optimum kesme hızı 180 m/dak, ilerleme miktarı ise 250 mm/dak olarak elde edilmiştir [45].

Kuram ve Özçelik (2015), Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemeleri üzerinde Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak, iş mili hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ölçülmüş ve sonrasında sinyal/gürültü oranına göre optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, Ti6Al4V titanyum alaşımında optimum yüzey pürüzlülüğü için iş mili hızı 12000 dev/dak, kesme derinliği 75 µm olarak belirlenmiştir. Inconel 718 Nikel alaşımı için ise, iş mili hızı 10000 dev/dak, kesme derinliği 75 µm olarak belirlenmiştir. Her iki malzeme için ilerleme oranı ise 50mm/dak olarak belirlenmiştir. Takım aşınmasını etkileyen en önemli parametre, Ti6Al4V için kesme derinliği, Inconel 718 için iş mili hızı olarak belirlenmiştir [46].

Yılmaz ve arkadaşları (2014), AISI 1050 malzemesi üzerinde frezeleme işlemlerinde titreşimi ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, ilerleme, kesme hızı, uç sayısı ve kesme derinliği

parametreleri ve Taguchi  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^3$ ) orthogonal dizini kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün ve titreşim ivme seviyesinin daha fazla ilerleme miktarından etkilendiği görülmüştür [47].

Kaçar ve Öztürk (2006), magnezyum periyodik tablonun IIA grubunda yer alan toprak alkali bir metaldir. Magnezyumun atom numarası 12, atom ağırlığı 24,3 g/mol ve ergime noktası  $651^\circ\text{C}$ 'dir. Magnezyum, en çok bulunan altıncı metal ve sekizinci element olma özelliğine sahiptir ve yoğunluğunun sadece  $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Hafifliği sebebiyle, kullanım alanları oldukça fazladır [48] (Ek 1.2).

Gözüaçık (2012), magnezyum gümüş renkli ve parlak bir metaldir. Hava ile temasında oksit tabakası kaplanır. Refrakter ve kolay şekillendirilebilir bir malzemedir. Alüminyumdan %36 ve çelikten %78 oranında daha hafiftir. Fakat dayanımının geliştirilmesi gerekmektedir. Alaşım elementleri katılarak dayanımı artırılmış ürünler elde edilebilir. Elektrokimyasal olarak aktif olduğu için korozyona karşı dirençleri zayıftır. Bu sebeple koruma uygulamalarında kullanımı sınırlıdır [49].

Atalay (2006), otomotiv sektörü çevre dostu araç üretebilmek ve enerji sarfiyatını minimize etmek için ağırlığı azaltmaya çalışmıştır. Hafif bir araç ile yakıt tasarrufu sağlanmış ve hava kirliliği önlenmiş olur. Magnezyumun hafif olması tercih sebebidir. Türkiye'deki adıyla WV kaplumbağa aracının transmisyon gövdesi ve karterlerinde kullanılan magnezyum alaşımlı parçaların ağırlığı, dökme demirden yapılan muadillerine göre yaklaşık olarak üçte bir oranındadır. Diğer yandan, maliyeti alüminyuma göre fazladır. Maliyetlerin düşmesi ile sektörde yerini almaya başlamıştır [50].

Güler (2003), magnezyumun önemli bir kullanım alanı uçak yapımıdır. Havacılık sektöründe magnezyum alaşımları, uçaklarda, iskelet, motor, dişli kutusu, tekerlekler, iniş takımları, iç mobilya, yük aksesuar ürünleri, havalandırma ve basınçlandırma sistemleri gibi yerlerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Uçakların 45 kg daha hafif yapılması ile uçuş süresine bağlı olarak kayda değer tasarruf yapılır [51].

Öztürk ve Kaçar (2012), Savunma sektöründe, alevlendirme amaçlı olarak büyük tahrip etkisi bulunan mühimmatlarda, çıkardığı beyaz ışık ve yoğun ısı sayesinde tehlike, konum, koruma işareti olarak ve aydınlatma amaçlı olarak kullanılmaktadır [52]. Aghion, Bronfin ve Eliezer (2001), magnezyum alaşımları, motor bloğu uygulamalarında, dökme demire göre %40, alüminyum alaşımlarına göre %19 ağırlık kazancı sağlamaktadır. Dişli

kutusu ve kavrama muhafazası uygulamalarında, klasik uygulamaya göre %30 ağırlık kazancı sağlamaktadır. Tüm araçta magnezyum alaşımlarının tercih edilmesi durumunda 100 km'de 0,25 litre yakıt tasarrufu sağlanır [52,53].

### **1.5. Araştırmanın Amacı**

Talaşlı imalat havacılık, savunma, elektronik, medikal ve otomotiv sektörlerinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda, bu sektörlerin ürünlerinde minyatürleşme sıklıkla gözlemlenmektedir. Buna bağlı olarak talaşlı imalat da mikro ölçekte kullanılmaya başlanmıştır. Minyatürleşme ile hafiflik, ekonomiklik, üstün yüzey kalitesi ve hassasiyet istenen özelliklerdir. Mikro işleme, minyatürleşmeyi sağlayan prosese verilen isimdir. Mikro frezeleme; 1 mm veya daha küçük takımlar ile karmaşık şekilli parçaların sınırlı toleranslarda ve yüksek yüzey bütünlüğü elde edilerek imal edilmesidir. Titanyum ve alüminyum hafiflik ve dayanım açısından tercih edilen mühendislik malzemeleridir. Literatürde var olan tezler incelendiğinde, titanyum, nikel ve alüminyum alaşımları üzerine mikro işleme araştırmaları yapıldığı görülmektedir. Diğer yandan Magnezyum alaşımları havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan diğer bir metaldir. Bu araştırmada, Magnezyum alaşımının (AZ91) mikro freze ile işlenmesinde, kesme şartlarının yüzey bütünlüğüne etkisi incelenmiştir. Bu araştırmada magnezyum alaşımının yüzey bütünlüğünün mikro freze ile incelenmesi, literatüre katılan yenilik olarak tanımlanabilir. Ülkemizde otomotiv ve havacılık gibi minyatürleşmenin trend olduğu sektörler için, mikro frezeleme ile ilgili bir çalışma yapılması, bu araştırmanın önemini belirtmektedir. Diğer yandan, bu sektörlerde kullanıma ve yaygınlaşma potansiyeli yüksek olan magnezyum alaşımının incelenmesi; önemli diğer bir noktadır. Araştırmada, mikro takım, takım ön ayarlayıcı, yüksek devir sağlayıcı, CNC freze, dinamometre, bilgisayar, dynoware yazılımı, minitab yazılımı, amplifikatör, DAQ cihazı ve deney numunesinin, takımın montajı için bazı el aletleri kullanılmıştır (Ek 1.3). Bu araştırma için mikro takım çapı, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği parametreleri kullanılmıştır. Bu değişkenler iki farklı takım çapı için Taguchi L<sub>9</sub> deneysel tasarım yöntemi ile üç farklı seviyede incelenmiştir. En küçük en iyi amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Deneyler sonucunda kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildikten sonra varyans analizi yapılmıştır. Son olarak, çıkarılan tespitler aktarılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Deney Düzenegi

Mikro frezeleme prosesi geleneksel frezeleme prosesi ile benzerlik göstermektedir. Kullanılan ekipmanların ve üretilen parçaların mikro ölçekte olması belirgin farklılıktır. Mikro frezeleme prosesinde mikro ölçekli takımlara ve yüksek devir sağlayabilen hassas işleme merkezlerine ihtiyaç vardır.

#### 2.1.1. Mikro takımlar

Araştırma için yapılan deneylerde 0,8 mm ve 1,0 mm çapında takımlar ile magnezyum alaşımı üzerinde işleme yapılmıştır. Deneyde kullanılan takımların bir görseli Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Mikro takımlar



Şekil 2.2. Takım ön ayarlayıcı

#### 2.1.2. Takım ön ayarlayıcı

Hız kafasına bağlanacak olan takımın yüksekliğinin, değiştirilen her takımda aynı kalmasını sağlamak amacıyla takım ön ayarlayıcı (tool presetter) kullanılmıştır. Cihazda okunabilen minimum artış 0,001'dir. Takımın yüksekliğini yirmi kata kadar büyütür ve iki boyutlu olarak koordinat sistemine yansıtmaktadır. Yapılan işlemin bir görseli Şekil 2.2'de verilmiştir (Ek 2.1).



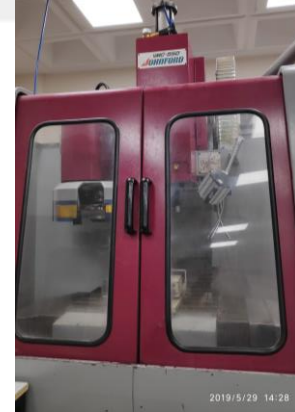
### 2.1.3. CNC ve kontrol ünitesi

Deneylerde kullanılan Johnford VMC 850 / 550 üç eksenli CNC işleme merkezinin bazı teknik özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

**Tablo 2.1.** CNC makinesinin teknik özellikleri [54]

Model No	VMC – 850 / 550+APC
Tabla çalışma yüzeyi	40~ x 20~ (1000 x 500 mm)
X hareket sınırı	31.5" (800 mm)
Y hareket sınırı	20.0" (500 mm)
Z hareket sınırı	17.7" (450 mm)
İş mili motor gücü	10HP (30 min.) / 7.4 HP
Tabla yükleme kapasitesi	1980 Lbs (900kg)
Tezgâh zemin alanı	92.5~ x 98.4~ (2350 x 2500 mm)
Makine ağırlığı	12100 Lbs (5500 kg)

Fanuc O-M serisi kontrol ünitesi ile kullanılan CNC tezgâhı; metrik ve inç birimlerinde ISO format programlamayla üç eksen lineer ve dairesel enterpolasyon yapabilen bir yapıdadır [54].



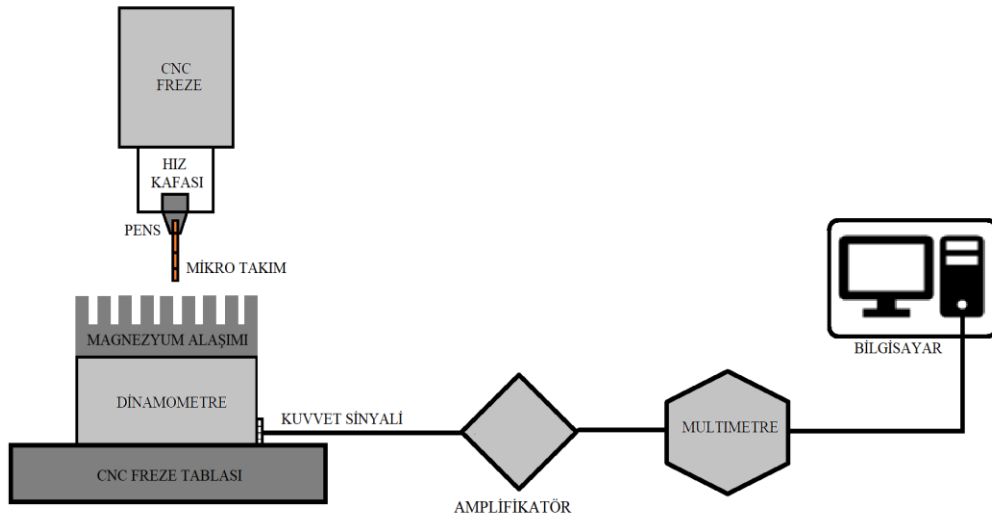
**Şekil 2.3.** CNC makinesi ve kontrol ünitesi

#### 2.1.4. Yüksek devir sağlayıcı

Yüksek devir sağlayıcı olarak Nikken marka hız kafası CNC işleme merkezine adapte edilmiştir. 1:5 oranında devir artışı sağlamaktadır. Şekil 2.3'te hız kafasına ait görseller verilmiştir (Ek 2.2).



Şekil 2.4. Hız kafası




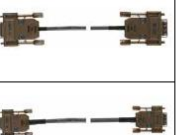

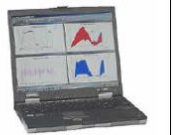


Şekil 2.5. Deney düzeneği

Adaptasyon sonucunda maksimum 15000 devir elde edilmiştir. Kullanılan hız kafasının iç koniği SK10 normundadır. Dolayısıyla, mikro takımların kullanılabilmesi için SK10 normunda pens kullanılmıştır. Ekipmanların adaptasyonu Şekil 2.5'te verilmiştir.

### 2.1.5. Dinamometre

Kesme kuvvetlerini ölçebilmek için dinamometre, kablo, amplifikatör DAQ (data acquisition system) cihazı ve dynoware programı bulunan bir bilgisayara ihtiyaç vardır. Şekil 2.6’da ise kullanılan ölçüm düzeneği daha detaylı olarak belirtilmiştir.

					
Dinamometre	Bağlantı Kablosu	Amplifikatör	Bağlantı Kablosu	DAQ Sistem	Bilgisayar
Tip 9119AA1	Tip 16xx	Tip 5080A	Tip 1700A111A2 Tip 1200A27	Tip 5697A1	Dynoware Yazılımı

**Şekil 2.6.** Ölçüm ekipmanları [55]

Magnezyum alaşımının mikro frezelemesinde kesme kuvveti ölçümü için Şekil 2.6’nın ilk sütununda verilen Kistler 9119AA1 mini dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrenin teknik bazı özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir (Ek 2.3).

**Tablo 2.2.** Mini dinamometre teknik özellikleri [55]

Özellikler	Sembol	Birim	Değerler
	Fx, Fy, Fz	kN	-4 ... 4
Ölçme Aralığı	Mx, My	N.m	-125 ... 125
	Mz	N.m	-250 ... 250
Aşırı Yük	Fx, Fy, Fz	kN	-4,5/4,5
Eşik değeri (Threshold)		N	<0,002
Hassasiyet (Sensitivity)	Fx, Fz	pC/N	≈-26
	Fy	pC/N	≈-13
Doğal Frekans (Natural Frequency)	Fn(x)	kHz	≈6,0
	Fn(y)	kHz	≈6,4
	Fn(z)	kHz	≈6,3
Çalışma Sıcaklığı		°C	-20 ... 70
Ağırlık Dinometre		kg	0.93
Ağırlık plaka		kg	0.30
Montaj alanı ölçüleri		mm	39x80

### 2.1.6. Amplifikatör

Deneylerde Şekil 2.7’de belirtilen çok kanallı, modüler Kistler 5080A tipi yük amplifikatörü kullanılmıştır. Bu cihaz dinamometreden gelen sinyalleri her eksen için ayrı değerlendirmektedir. Sekiz kanallı ve mikroişlemci kontrollü olan bu amplifikatör, dinamometreden gelen sinyalleri yükselterek volt olarak çıkış vermektedir. Bu datalar RS232 C ve USB 2.0 ara yüz çıkışları ile kontrol edilebilir (Ek 2.4).



Şekil 2.7. Amplifikatör

### 2.1.7. DAQ cihazı

DAQ cihazı 16 bit A/D dönüştürücü ile analog datayı dijital dataya dönüştürmektedir. Amplifikatörün kontrolü ve sinyalin şartlandırılması için RS-232C kablosu ile, bilgisayara ise USB 2.0 portu ile bağlanabilir. DynoWare programı ile bilgisayara bağlanmaktadır (Ek 2.5).

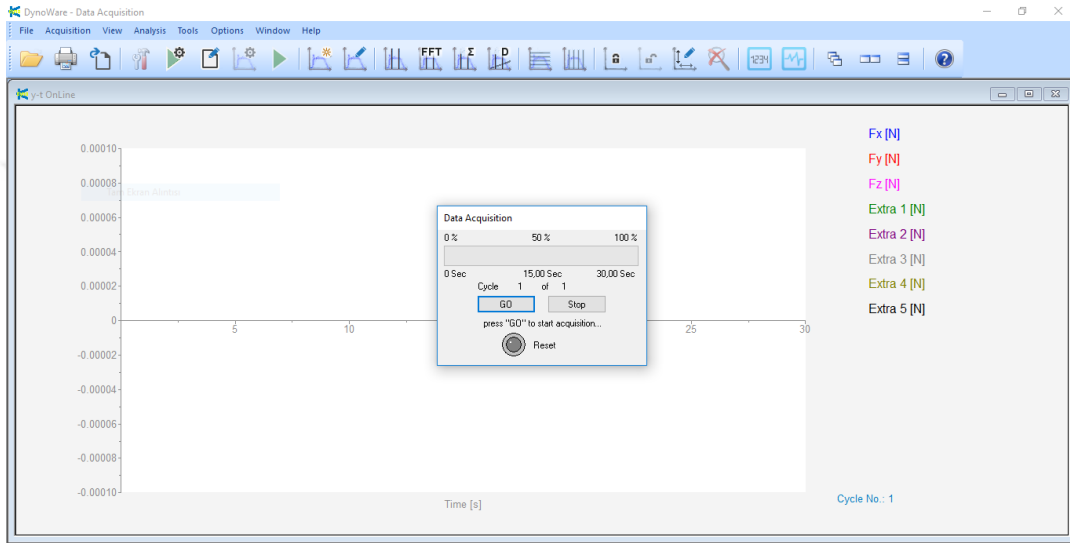


Şekil 2.8. DAQ cihazı [55]

## 2.1.8. Yazılımlar

### 2.1.8.1. Dynoware

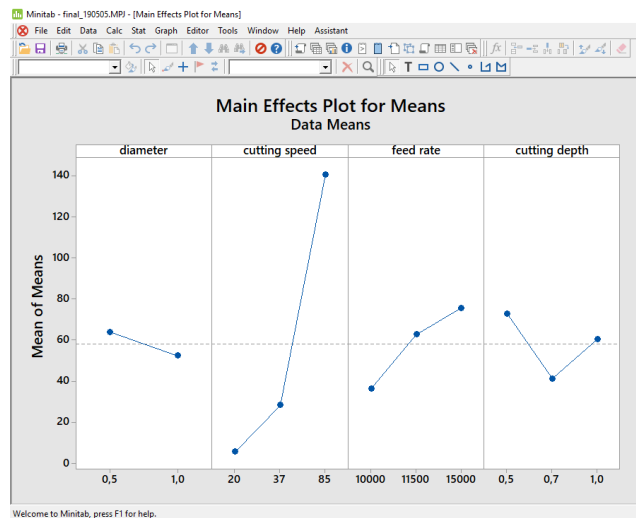
DynoWare, ölçüm sisteminin arka planında bulunan bir yazılımdır. Bu yazılım sensörlerden ve dinamometreden gelen değerleri okunabilir çıkış olarak vermektedir. Bu cihaz ile Kistler 5080A amplifikatörden alınan datalar değerlendirilmiş ve iş parçasına etki eden kuvvetler grafiksel olarak ifade edilmiştir. Sonrasında data excel formatına dönüştürülerek alınmıştır.



Şekil 2.9. Dynoware

### 2.1.8.2. Minitab

Ölçüm sonrasında elde edilen değerler sonuçları bir bilgisayar ve Minitab 18 yazılımı ile görüntülenmiştir. Sonrasında, bulgular işlenerek sonuçlar aktarılmıştır.



Şekil 2.10. Minitab



### 2.1.9. Yüzey pürüzlülük cihazı

Mikro frezeleme sonrasında yüzey pürüzlülük değerleri Keyence VHX-6000 3-D Dijital optik mikroskop ile bulunmuştur. Şekil 2.11’de dijital optik mikroskopun bir görüntüsü Tablo 2.3’te ise dijital optik mikroskopa ait kamera özellikleri verilmiştir (Ek 2.6). Üç boyutlu tarama yöntemi ile işleme geometrisi bilgisayara aktarılıp 2,5 mm örnek uzunluk ile beş farklı yerden örneklenmiştir. Sonunda pürüzlülük ortalamaları hesaplanmıştır.



Şekil 2.11. Dijital optik mikroskop [56]

Tablo 2.3. Optik kamera özellikleri [56]

Görüntü sensörü	1/1,8-inç CMOS görüntü sensörü Sanal piksel 1600 (H) × 1200 (V)
Tarama sistemi	Aşamalı
Çerçeve hızı	50 F/s (max.)
Yüksek dinamik aralık	Her bir piksel RGB veri üzerinden 16 bit yoğunluk aralığı
İlerleme	Otomatik, Manuel, Ön ayarlı.
Elektronik örtücü ayna	Otomatik, Manuel, 1/60, 1/120, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/5000, 1/9000, 1/19000
Süper şarj perdesi	0,02 to 4 saniye
Beyaz ayarı	İtme ile, Otomatik, Manuel, Ön ayarlı, (2700K, 3200K, 5600K, 9000K)
Arka odak ayarlaması	Gerekli değil

## 2.2. Materyal

AM50, AM60 ve AZ91 en çok kullanılan magnezyum alaşımlarıdır. AZ91 yüksek dayanım ve iyi dökülebilme özelliğine sahiptir [57]. Araştırmada kullanılan malzeme magnezyum alaşımı olan AZ91 serisidir. Bazı magnezyum alaşımlarına ait kimyasal bileşenler Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.1.** Magnezyum alaşımları ve kimyasal bileşimleri [49]

Alaşım Elementi	Al	Zn	Mn	Si (max)	Fe (max)	Cu	Ni (max)	Be	Diğer	Mg
AM50	4,5-5,3	0,2	0,28-	0,05	0,004	0,008	0,001	-	0,01	Kalan
AM60	5,6-6,4	0,2	0,26-	0,05	0,004	0,008	0,001	-	0,01	Kalan
AS21	1,9-2,5	0,15-	0,2	0,70-	0,004	0,008	0,001	-	0,01	Kalan
AS41	3,7-4,8	0,1	0,35-	0,60-	0,0035	0,015	0,001	-	0,01	Kalan
AZ31	2,5-3,5	0,7-1,3	0,2	0,05	0,005	0,05	0,005	-	-	Kalan
AZ80	7,8-9,2	0,2-0,8	0,15-	0,1	0,05	0,05	0,005	0,002	-	Kalan
<b>AZ91</b>	<b>8,5-9,5</b>	<b>0,45-</b>	<b>0,17-</b>	<b>0,05</b>	<b>0,004</b>	<b>0,025</b>	<b>0,001</b>	-	<b>0,01</b>	<b>Kalan</b>

Deneyde kullanılan numunenin temin edildiği firma tarafından hazırlanan spektrometre sonucu AZ91 alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 2.2’de verilmiştir (Ek 2.7).

**Tablo 2.2.** AZ91 kimyasal bileşimi [58]

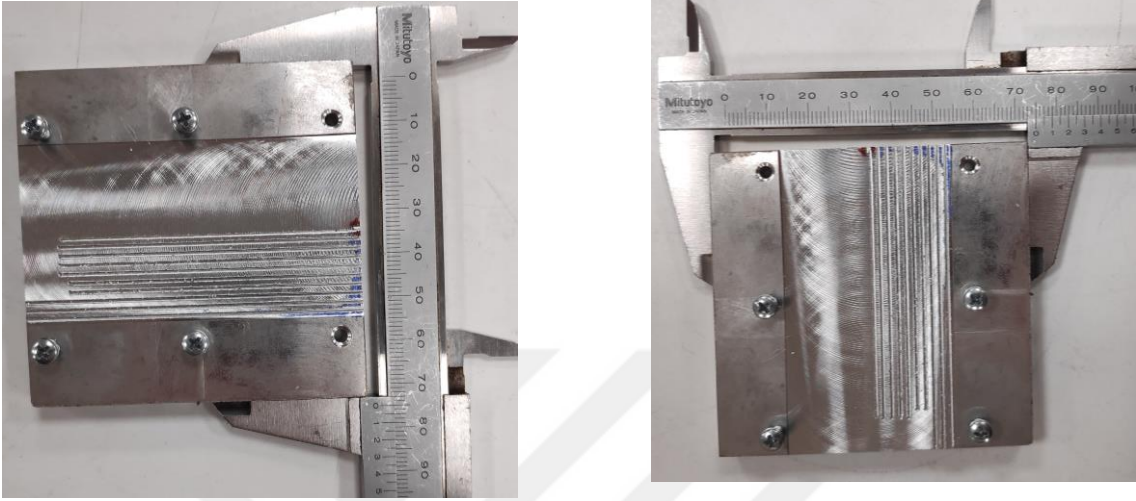
Element	Yüzde (%)	Element	Yüzde (%)	Element	Yüzde (%)	Element	Yüzde (%)
Ag	<0.00040	Ce	<0.0040	La	<0.0015	Pb	0.0129
Al	8.890	Cu	<0.00040	Mn	0.198	Si	0.0229
Be	0.00065	Fe	0.0017	Na	0.0023	Sn	<0.00050
Ca	0.00095	Zn	0.603	Ni	<0.0010	Zr	<0.0015
Cd	<0.00010	Mg	90.3	P	0.0033		

AZ91’in bazı mekanik özellikleri Tablo 2.3’te belirtilmiştir.

**Tablo 2.3.** AZ91 mekanik özellikleri [51]

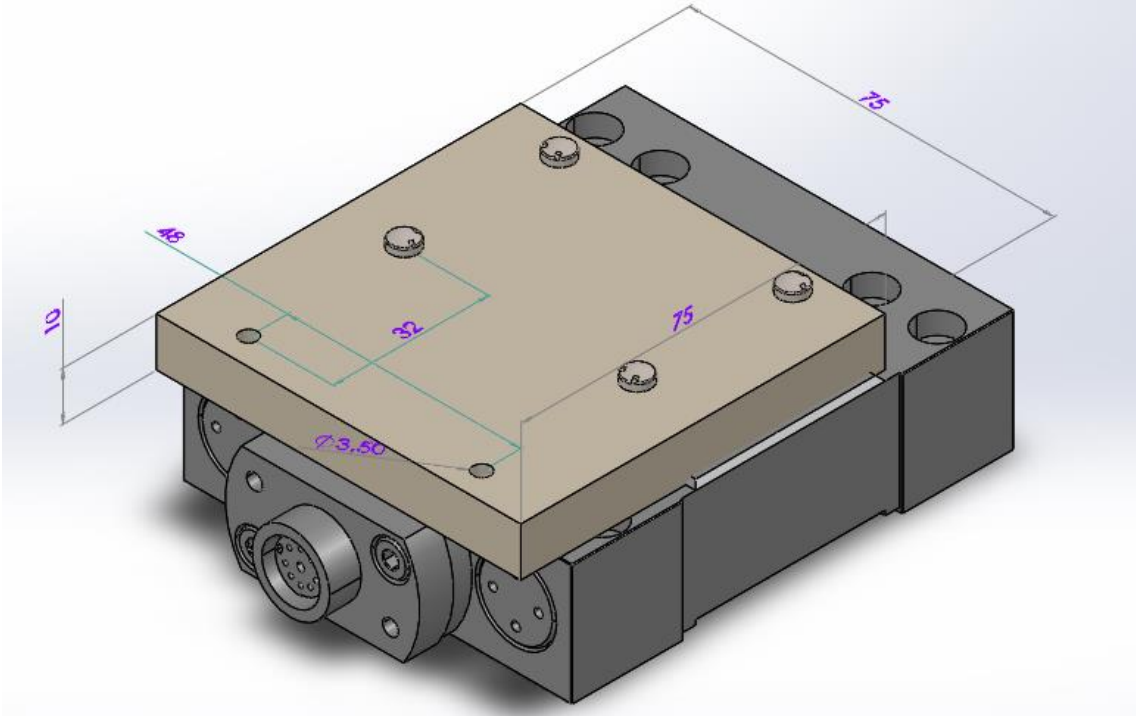
	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)	Elastiklik Mod. (Gpa)
AZ91	168	311	21	49

Temin edilen numunenin mini dinamometre ile kullanılabilmesi için dinamometrenin çevre ölçüleri göz önünde bulundurularak 75×75×10 mm ölçülerinde kesilmiştir. Sonrasında, talaş kaldırma işlemi yapılabilmesi için dinamometreye montajı yapılmıştır. Şekil 2.12’de deney numunesinin görseli verilmiştir.



**Şekil 2.12.** Deney numunesi

Deney numunesi uygun ölçülere getirildikten sonra mini dinamometreye uygun şekilde montajlanmıştır. Burada, mini dinamometreye iki farklı bağlama şekli göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 2.13’te belirtilen montaj görüntüsü magnezyum alaşımının dinamometreye montajını göstermektedir.



**Şekil 2.13.** Numune montajı



### 2.3. İşleme Geometrisi

AZ91 numunesi dinamometreye bağlandıktan sonra, CNC ile parçada farklı derinliklerde talaş kaldırma yapılmıştır. Standart geometrilerde talaş kaldırabilmek için ve işlem kolaylığı açısından kontrol ünitesinde yazılan kısa bir program Tablo 2.4'te verilmiştir.

**Tablo 2.4.** İşleme programı

(MDI)	Program	
	X	70000;
G01	F	170;
	M	003;
	S	2000

Her bir deney için program yeniden yazılmaktadır. X ekseninde gidilen 70 mm; parça boyunca işleme yapıldığını, kanal oluşturulduğunu belirtmektedir. 'Y' değeri 2 mm azaltılmakta dolayısıyla her takımın işleme yüzeyi a arasında 2 mm fark bulunmaktadır. Şekil 2.14'te parça yüzeyine açılan kanallar gösterilmektedir.



**Şekil 2.14.** İşleme geometrisi

'F' ile gösterilen sembol, ilerleme olup 170, 200 ve 230 değerlerini almaktadır. 'G01' kodu doğrusal kesme hareketini belirtmektedir. 'M03' kodu ise, takımın saat yönünde dönme hareketini sağlar. 'S' ile gösterilen sembol, devir sayısını göstermektedir. 2000, 2100 ve 2200 değerlerini almaktadır. Kontrol sistemine girilen 2000 devir; hız kafası kullanıldığı için 10000 devire tekabül etmektedir.

## 2.4. Yöntem

Malzeme özellikleri, devir sayısı, takım çapı, talaş derinliği, kesme hızı, ilerleme miktarı, takım ilerleme stratejisi, soğutma türü ve soğutucu akışkan basıncı gibi parametreler kesme şartlarını oluşturmaktadır.

Taguchi metodu, optimum kesme şartlarının tespitinde kolay, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunar. Deney sayısını azaltarak, test ve üretim maliyetlerinin azalmasını sağlamaktadır [38]. Geleneksel deney tasarımlarında kontrol edilemeyen parametrelerin değişkenliklerini de kontrol edebilmektedir. Kontrol değişkenlerinin kontrol edilemeyen parametrelere karşı seviyelerinin belirlenmesinde amaç fonksiyonu ile bulunan değerler S/N (sinyal/gürültü) oranına dönüştürülmektedir [36].

Taguchi yönteminde; önce problem tanımlanmakta, kontrol parametreleri belirlenmekte ve uygun matris seçilmektedir. Sonrasında ise deneyler yapılmakta, elde edilen veriler analiz edilmekte, optimum seviyeler belirlenmektedir. Son olarak, elde edilen optimum seviye onaylanmaktadır.

Taguchi tasarımı ile elde edilen sonuçlar sinyal/ gürültü (S/N) oranlarına dönüştürülmekte ve desibel (dB) olarak ifade edilmektedir. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil etmektedir [59].

Taguchi yöntemi ile tasarlanan deneylerde öncelikle, kontrol faktörü ve seviyeler belirlenmiştir. Sonrasında matris seçimi yapılarak, seviyeler matrise aktarılmıştır. Kullanılan L<sub>9</sub> dizine göre bağımsız değişkenlerin üç farklı seviyesi bulunmaktadır. Deneyler 1,0 mm ve 0,8 mm takımlar için tekrar edilmiştir. Böylece, toplam 18 farklı deney yapılmıştır.

Taguchi metodunda ‘*En büyük en iyi*’, ‘*nominal en iyi*’ ve ‘*en küçük en iyi*’ amaç fonksiyonlarıdır. Yüzey pürüzlülük değerinin en küçük olması gerekmektedir. Bu sebeple amaç fonksiyonu ‘*en küçük en iyi*’ olarak seçilmiştir. Aşağıda verilen eşitlik en küçük en iyi amaç fonksiyonu için kullanılan sinyalin gürültüye oranını belirtmektedir.

$$S/N = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad \text{En küçük en iyi amaç fonksiyonu} \quad (2.1)$$

(S/N: sinyalin gürültüye oranı, n: deney sayısı, Y: gözlenen veriler)

## 2.5. Deney Tasarımı

Bu araştırmada, kesme derinliği (d), ilerleme miktarı (f) ve devir sayısı (n) bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Her bir değişkenin üç farklı seviyesi bulunmaktadır. Deneyler, Minitab yazılımı kullanılarak Taguchi L<sub>9</sub> matrisi ile tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Tablo 2.4'te değişkenler, semboller ve seviyeler gsterilmiştir.

**Tablo 2.4.** Değişkenler ve seviyeler

Değişkenler	Sembol	Birim	Kod	Seviyeler		
				1	2	3
Devir	n	dev/dak	A	10000	11000	12000
İlerleme	f	mm/dak	B	170	200	230
Kesme derinliği	d	mm	C	0,1	0,2	0,3

Tablo 2.5'te Taguchi yöntemine göre tasarlanan deneylerin matrisi belirtilmiştir. Takım apı belirtilen değişkenlerden farklı olarak gözlemlenmiştir. Takım apı için iki farklı seviye mevcuttur. 0,8 mm ve 1,0 mm ölçüde kesici takım için deneyler tekrarlanmıştır. Toplamda yapılan deney sayısı 18 olmuştur.

**Tablo 2.5.** Deney tasarımı

Deney No	Değişkenler	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)
1	A1B1C1	1	1	1
2	A1B2C2	1	2	2
3	A1B3C3	1	3	3
4	A2B1C2	2	1	2
5	A2B2C3	2	2	3
6	A2B3C1	2	3	1
7	A3B1C3	3	1	3
8	A3B2C1	3	2	1
9	A3B3C2	3	3	2

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneyler ile kesme kuvvetleri ( $F_c$ ) ve yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri bulunmuştur. Bulgular, iki farklı takım için önce kesme kuvvetleri, sonra yüzey pürüzlülükleri açısından incelenmiştir. Böylece, toplamda dört inceleme yapılmıştır. Kistler dinamometre kullanılarak gerçekleştirilen kesme kuvveti ölçümleri ile elde edilen sonuçlar, kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisinin anlaşılması açısından belirleyici olmuştur. Deneysel çalışmada elde edilen kesme kuvveti neticelerinden maksimum kesme kuvvetleri dikkate alınmıştır. Kesme kuvvetlerinin iyi tayin edilmesi hem iş parçası hem de kesici takım açısından önemlidir. Çünkü kesme kuvvetleri hem iş parçasını hem de kesici takımı etkilemektedir. Talaş kaldırma işlemi tamamlandıktan sonra işlem görmüş olan iş parçasının istenen ölçü ve tolerans değerleri içerisinde olması beklenir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ifadesi yüzeyin genel kalitesini belirtmek için kullanılır. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri düştükçe yüzey kalitesi iyileşmektedir [60]. Keyence dijital mikroskop ile yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve sonuçlar incelenmiştir.

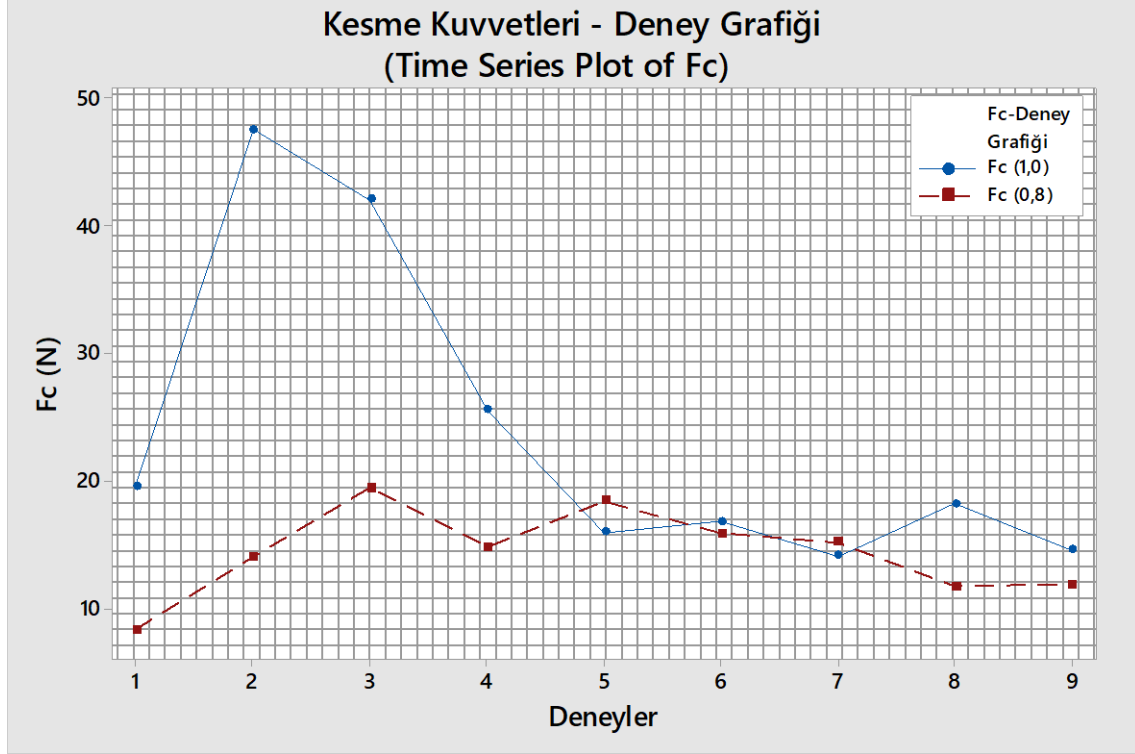
#### 3.1. Kesme Kuvveti Bulguları

Magnezyum AZ91 alaşımının üzerinde  $L_9$  dizinine göre yapılan frezeleme işlemi sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ve Taguchi en küçük en iyi yaklaşımı ile hesaplanan S/N değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

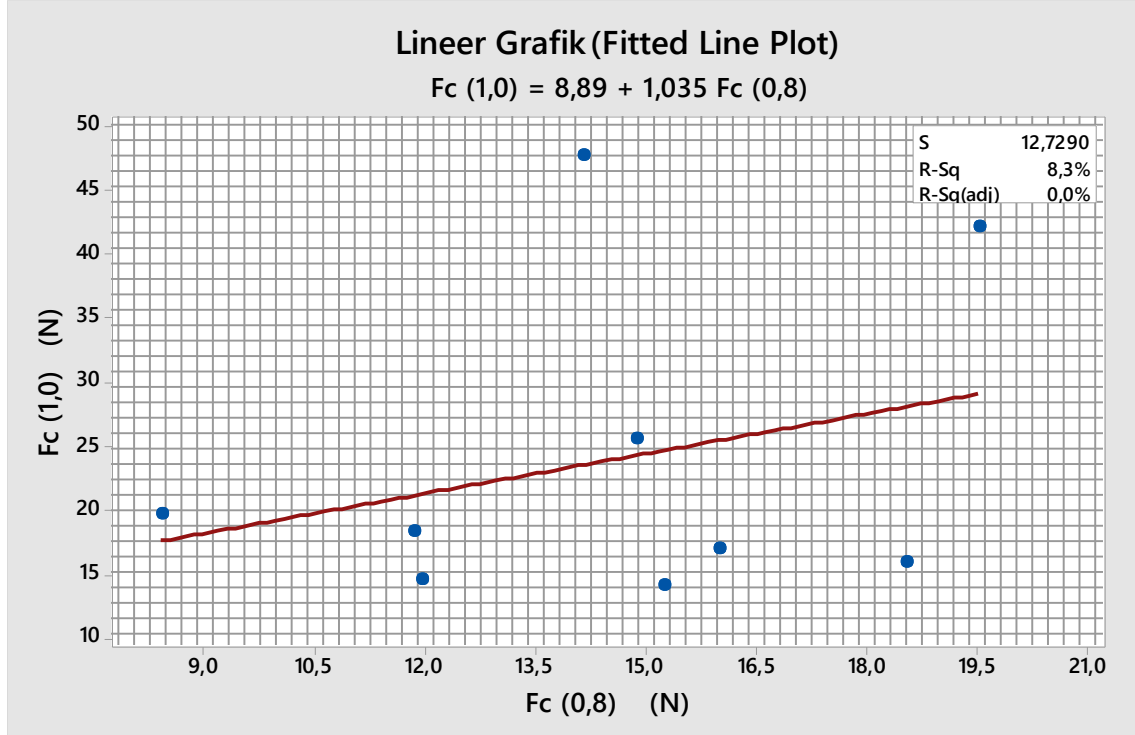
**Tablo 3.1.** Kesme kuvveti ve S/N değerleri

Deney No	Seviyeler	1,0 mm Takım		0,8 mm Takım	
		$F_c$ (N)	S/N (dB)	$F_c$ (N)	S/N (dB)
1	A1B1C1	19,680	-25,8805	8,423	-18,5093
2	A1B2C2	47,610	-33,5540	14,160	-23,0212
3	A1B3C3	42,110	-32,4877	19,530	-25,8140
4	A2B1C2	25,630	-28,1750	14,890	-23,4578
5	A2B2C3	16,020	-24,0933	18,550	-25,3668
6	A2B3C1	16,940	-24,5783	15,990	-24,0769
7	A3B1C3	14,190	-23,0396	15,260	-23,6710
8	A3B2C1	18,310	-25,2538	11,840	-21,4670
9	A3B3C2	14,650	-23,3168	11,960	-21,5546

Şekil 3.1’de 0,8 ve 1,0 mm takım ile yapılan deneylerin kesme kuvvetleri açısından karşılaştırılması (time series plot of Fc) verilmiştir. 5,6 ve 7. sıradaki deneylerin kesme kuvveti sonuçlarında bir yakınlık gözlemlenmektedir. Şekil 3.2’de ise kesme kuvvetleri arasında lineer olarak bir denklem (fitted line plot) elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Kesme kuvvetleri bulguları



Şekil 3.2. Kesme kuvvetleri karşılaştırması

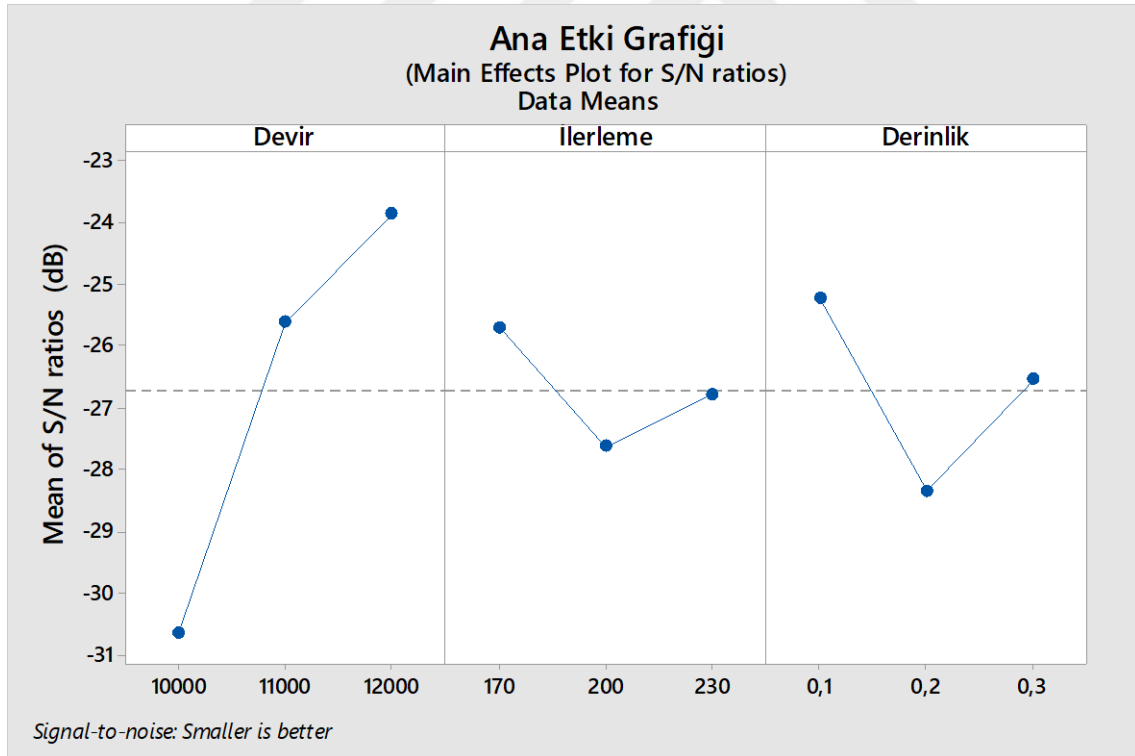
### 3.2. Kesme Kuvveti Analizi

#### 3.2.1. Ana etki grafiği

1,0 mm takım ile yapılan deneyler incelendiğinde, elde edilen kesme kuvveti değerleri, 14,95-47,61 N arasında olmuştur. Kesme kuvveti değerinin işleme parametrelerine gore S/N oranları Tablo 3.2 ve Şekil 3.3'te sunulmuştur.

**Tablo 3.2.** Kesme kuvveti değerlerinin S/N oranları – 1,0 mm

Seviye	A Devir (n) (dev/dak)	B İlerleme (f) (mm/dak)	C Kesme derinliği (d) (mm)
1	-30,64	-25,7	-25,24
2	-25,62	-27,63	-28,35
3	-23,87	-26,79	-26,54
Fark	6,77	1,94	3,11
Rank	1	3	2

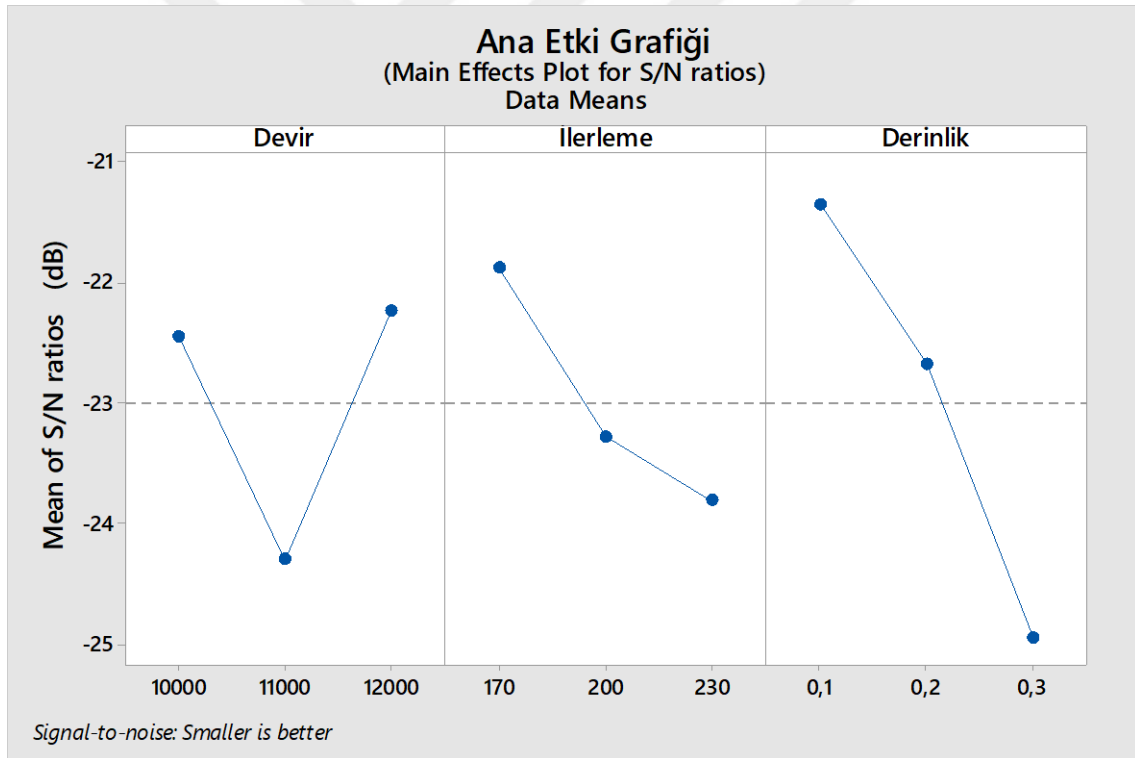


**Şekil 3.3.** Ana etki grafiği – 1,0 mm

0,8 mm takım ile yapılan deneyler incelendiğinde, elde edilen kesme kuvveti değerleri 8,42-19,53 N arasında olmuştur. Kesme kuvveti değerinin işleme parametrelerine göre S/N oranları Tablo 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

**Tablo 3.3.** Kesme kuvveti değerlerinin S/N oranları – 0,8 mm

Seviye	A Devir (n) (dev/dak)	B İlerleme (f) (mm/dak)	C Kesme derinliği (d) (mm)
1	-22,45	-21,88	-21,35
2	-24,30	-23,29	-22,68
3	-22,23	-23,82	-24,95
Fark	2,07	1,94	3,60
Rank	2	3	1

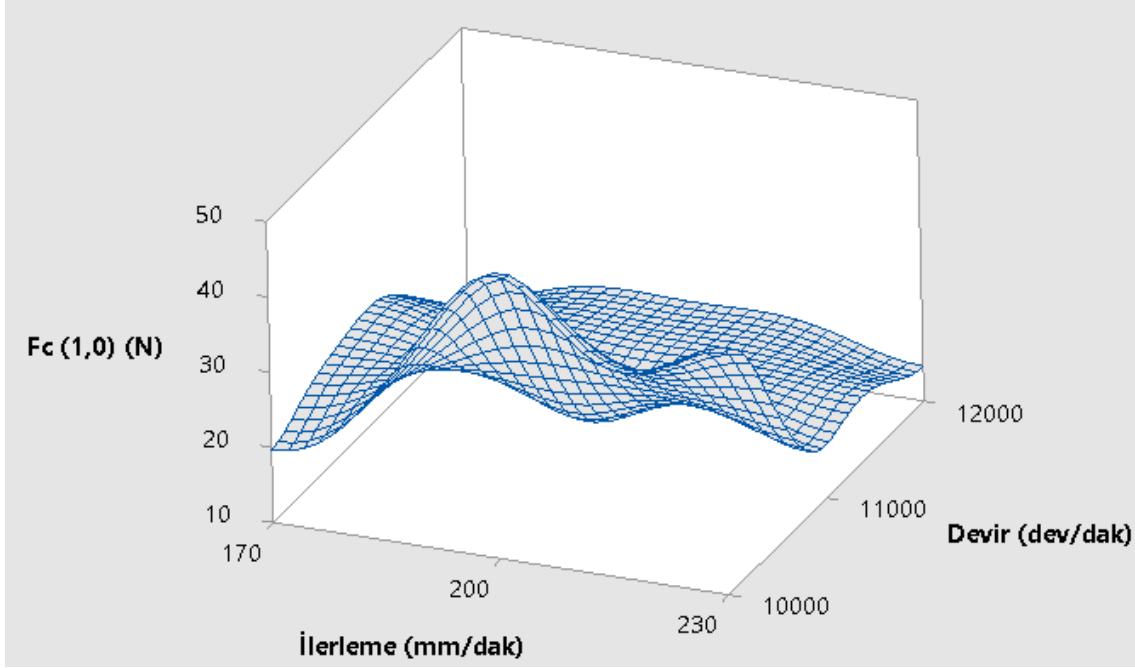


**Şekil 3.4.** Ana etki grafiği – 0,8 mm

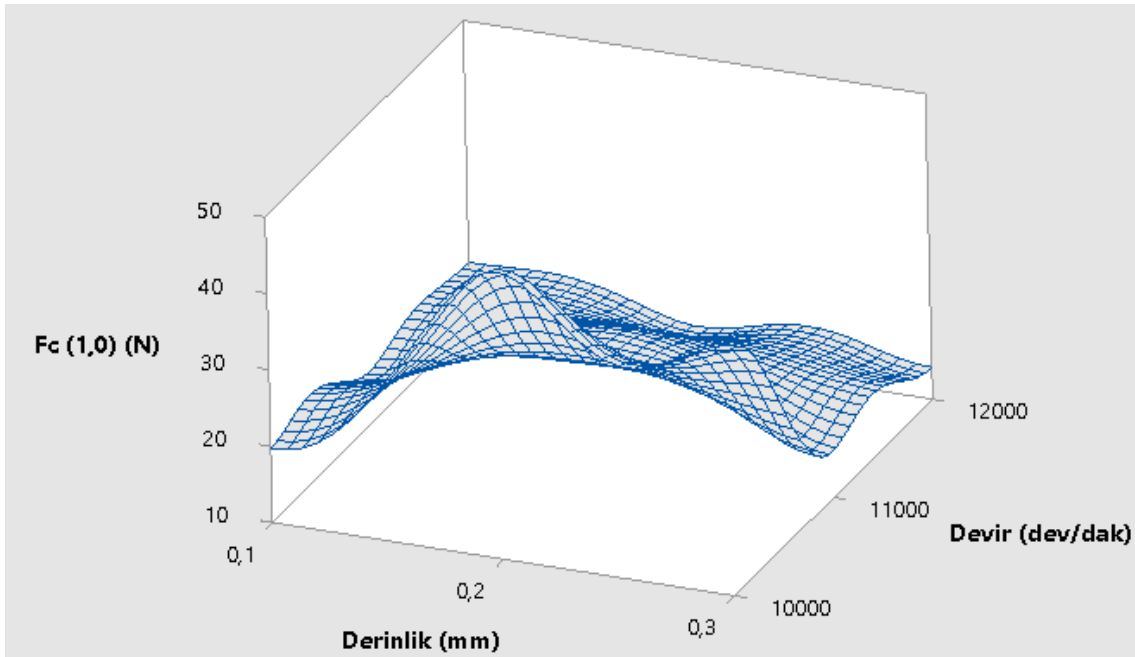
Her iki takım için, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te görüldüğü üzere, yapılan dokuz deneyde elde edilen S/N oranına göre işleme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkileri incelendiğinde; ilerlemenin 170 mm/dak, devirin 12000 dev/dak ve talaş derinliğinin de 0,1 mm (A3B1C1) olduğunda en düşük kesme kuvvetinin elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun için doğrulama deneyleri yapılmıştır.

### 3.2.2. Etki grafikleri

1,0 mm takım ile yapılan deneylerde, Tablo 3.2’de de görüldüğü üzere devir parametresinin kesme kuvveti üzerinde etkisi en fazladır. Sonrasında kesme derinliği ve ilerleme öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerin kesme kuvvetlerine etkileri Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’da verilmiştir.

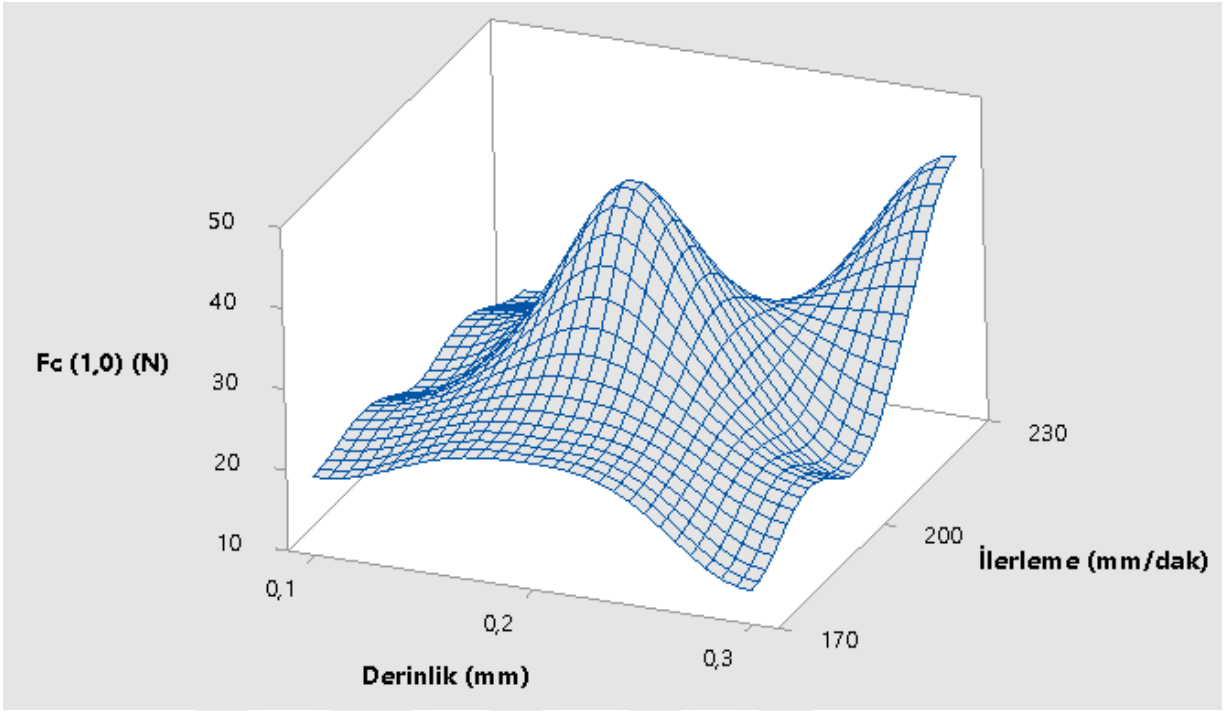


Şekil 3.5. İlerlemenin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 1,0 mm



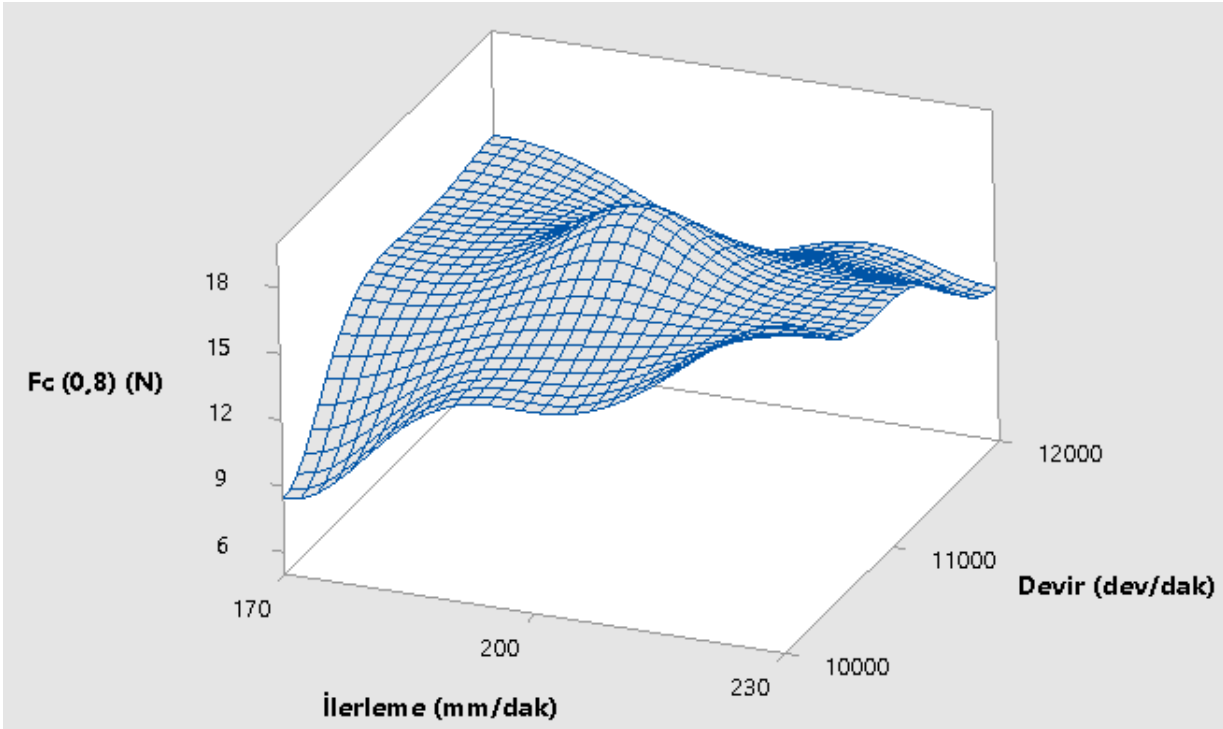
Şekil 3.6. Talaş derinliğinin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 1,0 mm



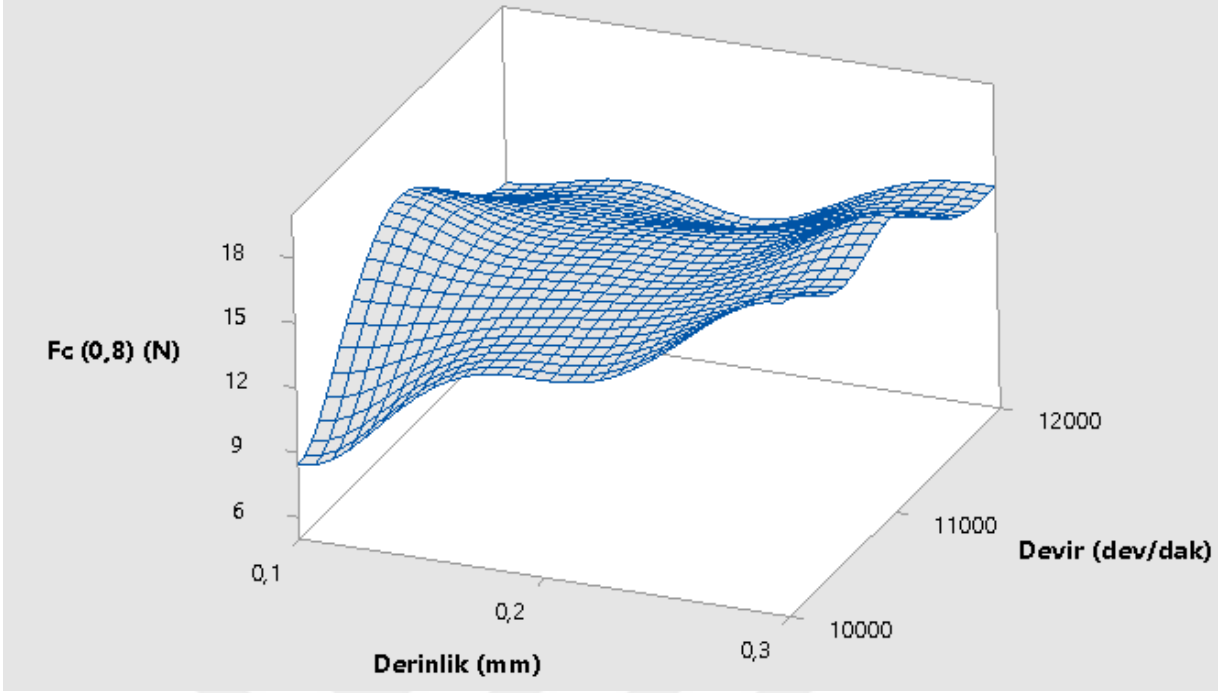


**Şekil 3.7.** Talaş derinliğinin ve ilerlemenin kesme kuvvetine etkileri – 1,0 mm

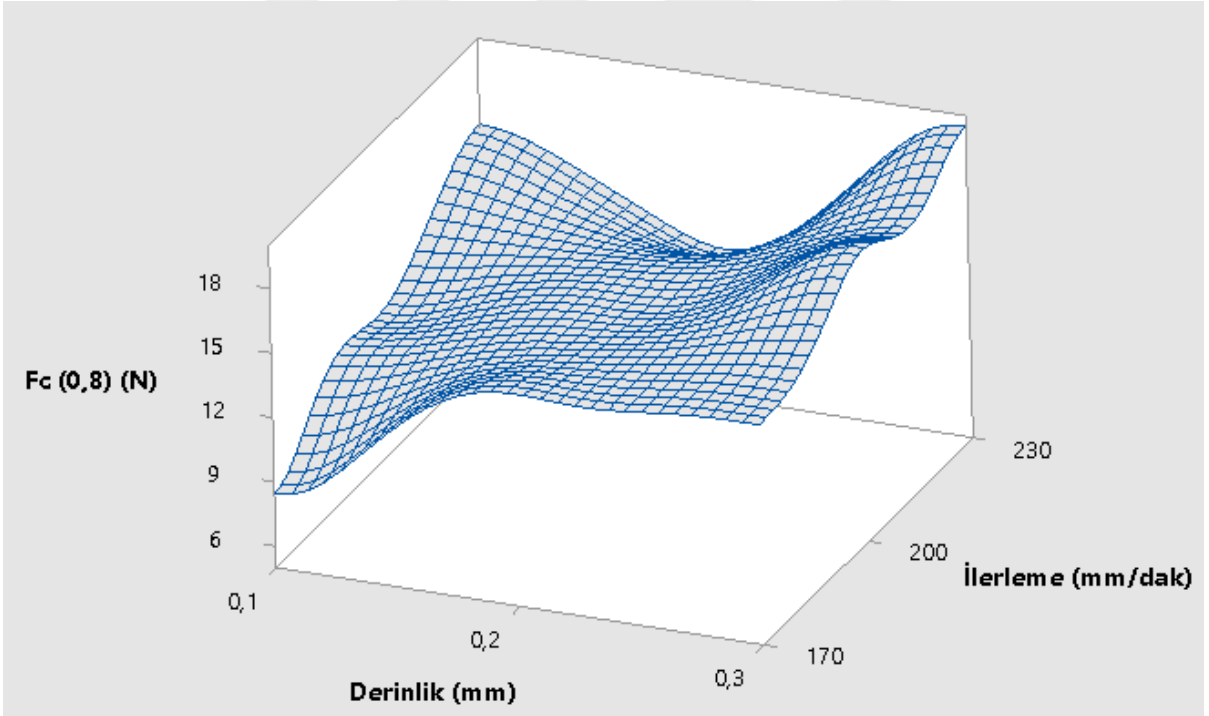
0,8 mm takım ile yapılan deneylerde, Tablo 3.3'te de görüldüğü üzere kesme derinliği parametresinin kesme kuvveti üzerinde etkisi en fazladır. Sonrasında devir ve ilerleme parametreleri öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerin kesme kuvvetlerine etkileri Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



**Şekil 3.8.** İlerleme ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 0,8 mm



Şekil 3.9. Talaş derinliğinin ve devrin kesme kuvvetine etkileri – 0,8 mm



Şekil 3.10. Talaş derinliğinin ve ilerlemenin kesme kuvvetine etkileri – 0,8 mm

### 3.2.3. Varyans analizi

Magnezyum alaşım malzemesinin mikro frezelemede iki değişik takım, üç değişik faktör, üç değişik seviyede kullanılarak on sekiz deney yapılmış ve bu deneylerin her birinden farklı kesme kuvveti yanıt değerleri ölçülmüştür. Bu farklılıkların tam olarak rastgele mi yoksa faktörlerinden mi oluştuğunu ve her faktörün bu cevaba etki durumunu netleştirmek için varyans analizi kullanılmıştır [61].

1,0 mm takımla yapılan deneylerde kesme kuvveti değerlerinin varyans analizi neticeleri Tablo 3.4'te gösterilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere AZ91 magnezyum alaşım malzemesinin DLC (diamond like carbon) kaplamalı kesici takımlarla işlenmesi sonucu işlenen yüzeydeki pürüzlülüğün oluşumunda en etkili faktör %73,39 ile devirdir. Devir parametresinin kesme kuvveti üzerinde etkili olduğu sonucu literatür ile uyumaktadır.

**Tablo 3.4.** Kesme Kuvveti ANOVA sonuçları – 1,0 mm

Parametre	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	Yüzde (%)
Devir (n)	2	731,95	365,98	3,09	73,3967
İlerleme (f)	2	85,90	42,95	0,36	8,55107
Derinlik (d)	2	181,24	90,62	0,76	18,0523
Hata	2	237,10	118,55		
Toplam	8	1236,20		4,21	

0,8 mm takımla yapılan deneylerde kesme kuvveti değerlerinin varyans analizi neticeleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere 1,0 mm ile işlenmiş deney sonuçlarından farklı olarak en etkili faktör %61,34 ile kesme derinliğidir. Kesme derinliğinin daha küçük çaplarda daha fazla önem teşkil etmesi beklenen bir durumdur.

**Tablo 3.5.** Kesme Kuvveti ANOVA sonuçları – 0,8 mm

Parametre	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Yüzde (%)
Devir (n)	2	18,93	9,466	1,77	22,4335
İlerleme (f)	2	13,74	6,869	1,28	16,2231
Derinlik (d)	2	51,85	25,924	4,84	61,3435
Hata	2	10,71	5,353		
Toplam	8	95,22		7,89	

### 3.2.4. Optimizasyon

Minitab 18 paket programı kullanılarak yapılan Taguchi deney tasarımında optimizasyon yapmak ve doğrulama deneylerini uygulamak için optimum seviyelerin belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 3.6'da kesme kuvvetinin optimum seviyeleri verilmiştir. Bu seviyeler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'ten elde edilmiştir. A3B1C1 seviyesi her iki takım için optimum seviyedir. Optimum seviye, en küçük kesme kuvvetinin elde edilebileceği seviyedir. Optimum seviyeden de anlaşılacağı üzere, kesme kuvveti devrin en yüksek, ilerleme ve derinlik parametrelerinin en düşük olması ile minimize edilmiş olur.

**Tablo 3.6.** Kesme kuvveti optimum seviyeler

Parametreler	Sembol	Birim	Kod	Optimum Seviye	Optimum Değer
Devir	n	dev/dak	A	3	12000
İlerleme	f	mm/dak	B	1	170
Derinlik	d	mm	C	1	0,1

### 3.2.5. Doğrulama deneyleri

Deney tasarımında A3B1C1 seviyesi bulunmadığı için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Bu durum, kesme kuvvetindeki değişimin ilerleme, devir ve talaş derinliğinin artışından etkilendiği anlaşılmaktadır. Yapılan deneylerden sonra, optimum seviye olan A3B1C1 seviyesinde kesme kuvveti için minitab lineer regresyon tahmini yapılmıştır. 1,0 mm takım için kesme kuvveti 6,0511 N ve 0,8 mm takım için kesme kuvveti 8,9391 N olarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen bu değeri doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Doğrulama deneyleri sonucunda 1,0 mm takım için 6,6572 N ve 0,8 mm takım için 9,022 N olarak kesme kuvvetleri bulunmuştur. Sonuçlar, Tablo 3.7'ye aktarılmıştır.

**Tablo 3.7.** Doğrulama deneyleri

A3B1C1 seviyesi	1,0 mm takım için		0,8 mm takım için	
	Fc (N)	S/N (dB)	Fc (N)	S/N (dB)
Hesaplanan Değer	6,0511	-21,3884	8,9391	-19,4750
Doğrulama Deney Sonuçları	6,6572	-16,4658	9,0220	-19,1061
Farklar	0,6061	-4,9230	0,0829	-0,3689

1,0 mm takım için yapılan tahminler sonucunda doğrulama deneyine göre %9,1 değerinde bir hata vardır. Bu değer 0,8 mm takım için %9,2'dir.

### 3.2.6. Regresyon analizi

Regrasyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasında ilişkiyi belirler. Bu değişkenler arasında sebep sonuç ilişkisi ya da girdi çıktı ilişkisi bulunabilir. Regrasyon analizinin amacı ise tahminler yapmaktır.

Minitab paket programı ile yapılan lineer regresyon analizi sonucunda kesme kuvvetine ait elde edilen eşitlikler aşağıda belirtilmiştir. 3.1 ve 3.3'te belirtilen eşitlikler devir ilerleme ve derinlik parametreleri ile üç bilinmeyenli olarak elde edilmiştir. 3.2 ve 3.4'te belirtilen eşitlikler ise ikinci dereceden bir denkleme ifade eder ve parametrelerin birbirleri ile ilişkisini de içermektedir.

1,0 mm takım ile yapılan deneyler için:

$$F_c = 116,5 - 0,01037.n + 0,079.f + 29,0.d \quad (3.1)$$

$$F_c = -352,90 - 0,04738.n + 6,552.f + 368,6.d + 0,000005.n^2 - 0,005681.f^2 - 1404.d^2 - 0,000397.n.f + 0,8122.f.d \quad (3.2)$$

0,8 mm takım ile yapılan deneyler için:

$$F_c = 4,5 - 0,00051.n + 0,0495.f + 28,5.d \quad (3.3)$$

$$F_c = -563,80 + 0,8388.n + 1,152.f - 4,262.d - 0,000003.n^2 - 0,000564.f^2 + 4,100.d^2 - 0,000081.n.f + 0,09444.f.d \quad (3.4)$$

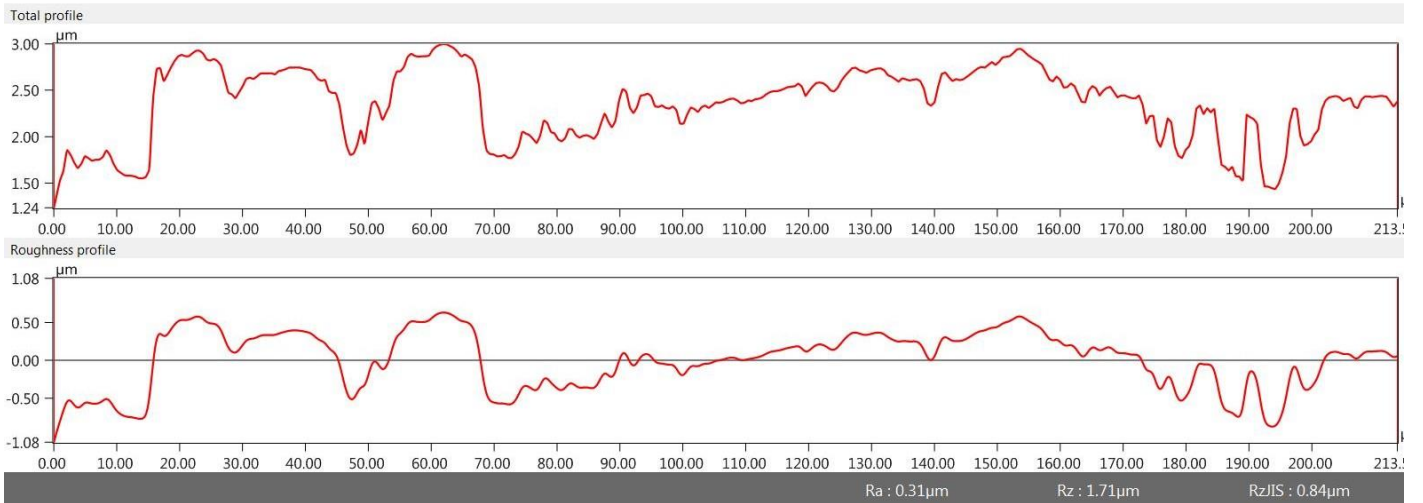
### 3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Bulguları

Magnezyum AZ91 alaşımının üzerinde L<sub>9</sub> dizinine göre yapılan frezeleme işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve Taguchi en küçük en iyi yaklaşımı ile hesaplanan S/N değerleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

**Tablo 3.8.** Yüzey pürüzlülük ve S/N değerleri

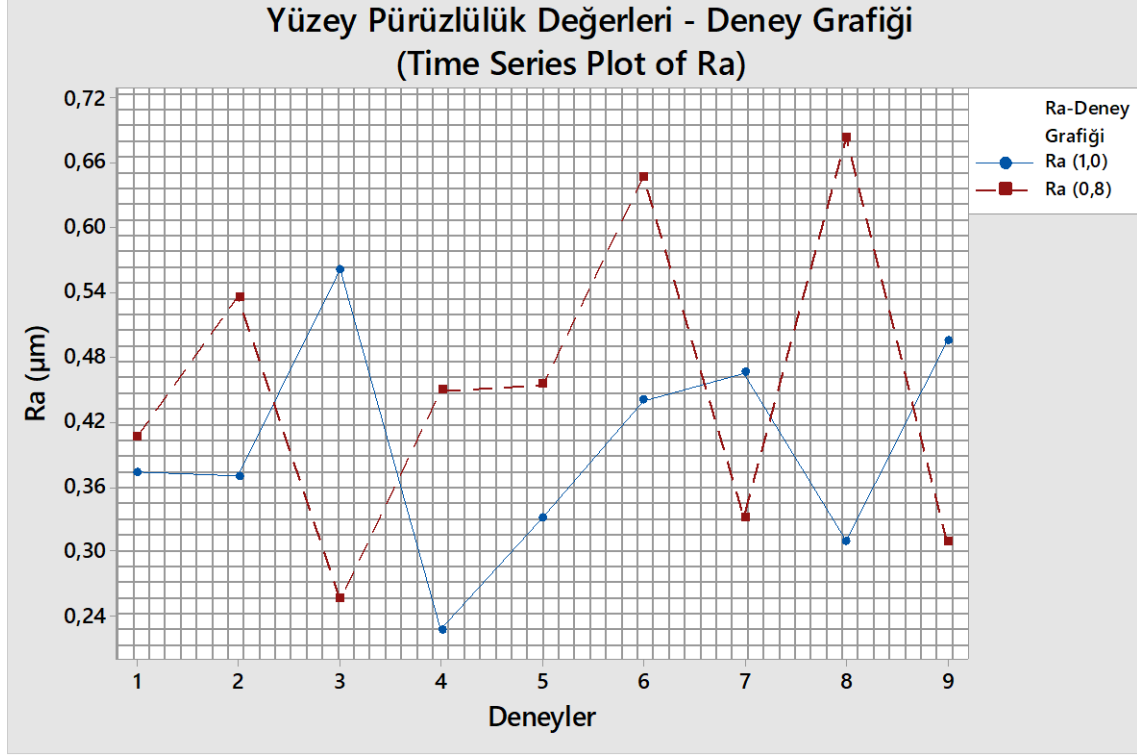
Deney No	Seviyeler	1,0 mm Takım		0,8 mm Takım	
		Ra (µm)	S/N (dB)	Ra (µm)	S/N (dB)
1	A1B1C1	0,374	8,5426	0,407	7,8152
2	A1B2C2	0,370	8,6360	0,536	5,4167
3	A1B3C3	0,562	5,0053	0,256	11,8352
4	A2B1C2	0,227	12,8604	0,450	6,9357
5	A2B2C3	0,332	9,5772	0,455	6,8398
6	A2B3C1	0,440	7,1309	0,648	3,7752
7	A3B1C3	0,466	6,6323	0,332	9,5772
8	A3B2C1	0,310	10,1728	0,684	3,2989
9	A3B3C2	0,495	6,1079	0,310	10,1728

Keyence cihazı ile yapılan ölçümlerde her bir deney için beşer adet örnek alınmıştır. Alınan bu örneklerin ortalaması hesaplanarak sonuçlar aktarılmıştır. Yapılan örnekleme bir görseli Şekil 3.11’de verilmiştir.

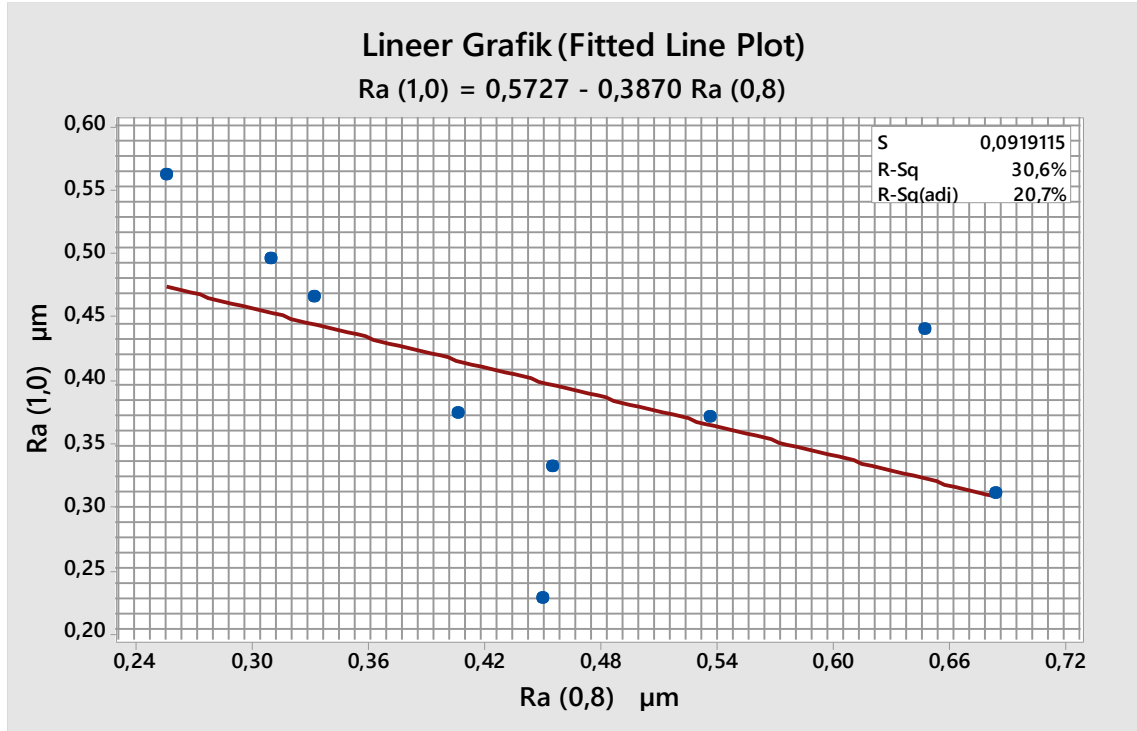


**Şekil 3.11.** Yüzey pürüzlülük ölçümü

Şekil 3.12’de 0,8 ve 1,0 mm takım ile yapılan deneylerin yüzey pürüzlülükleri açısından karşılaştırılması (time series plot of Ra) verilmiştir. 1,5 ve 7. Sıradaki deneylerin yüzey pürüzlülük değerleri arasında bir yakınlık gözlemlenmektedir. Şekil 3.13’te ise yüzey pürüzlülük değerleri arasında lineer olarak bir denklem (fitted line plot) elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Yüzey pürüzlülük bulguları



Şekil 3.13. Yüzey pürüzlülükleri karşılaştırması

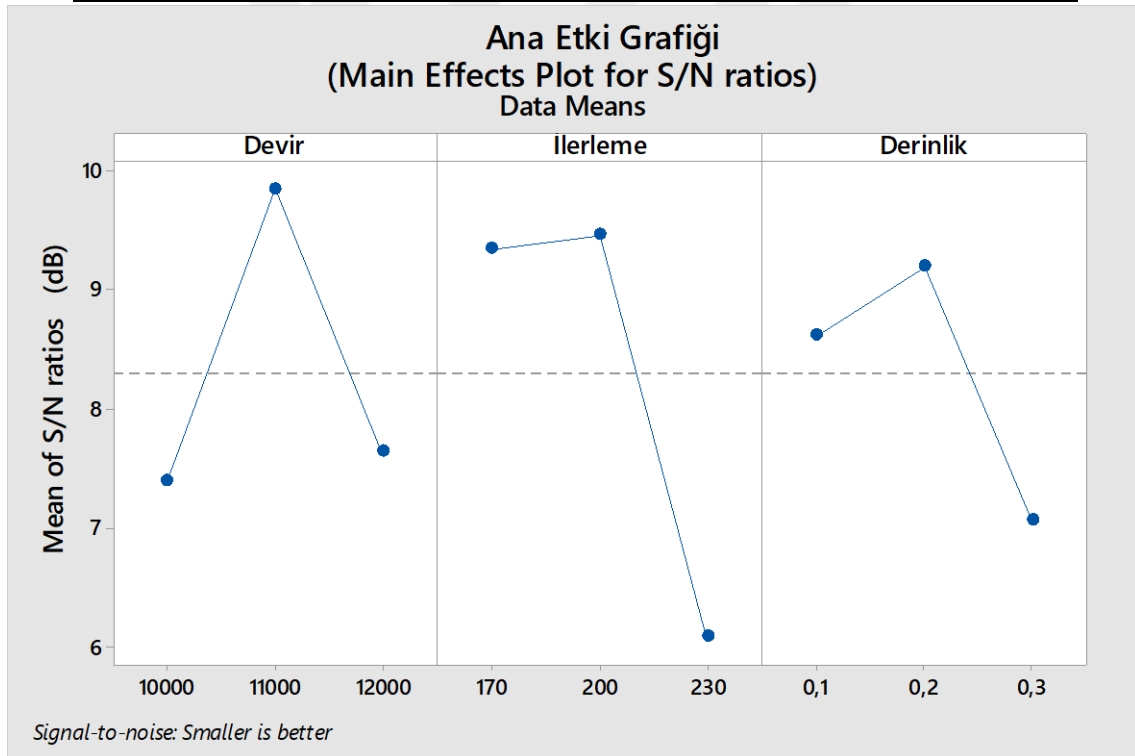
### 3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

#### 3.4.1. Ana etki grafiği

1,0 mm takım ile yapılan deneyler incelendiğinde, elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamaları 0,22-0,56  $\mu\text{m}$  arasında olmuştur. Yüzey pürüzlülük değerlerinin işleme parametrelerine göre S/N oranları Tablo 3.9 ve Şekil 3.14'te sunulmuştur.

**Tablo 3.9.** Yüzey pürüzlülük değerlerinin S/N oranları – 1,0 mm

Seviye	A Devir (n) (dev/dak)	B İlerleme (f) (mm/dak)	C Kesme derinliği (d) (mm)
1	7,395	9,345	8,615
2	9,856	9,462	9,201
3	7,638	6,081	7,072
Fark	2,462	3,381	2,13
Rank	2	1	3



**Şekil 3.14.** Ana etki grafiği – 1,0 mm

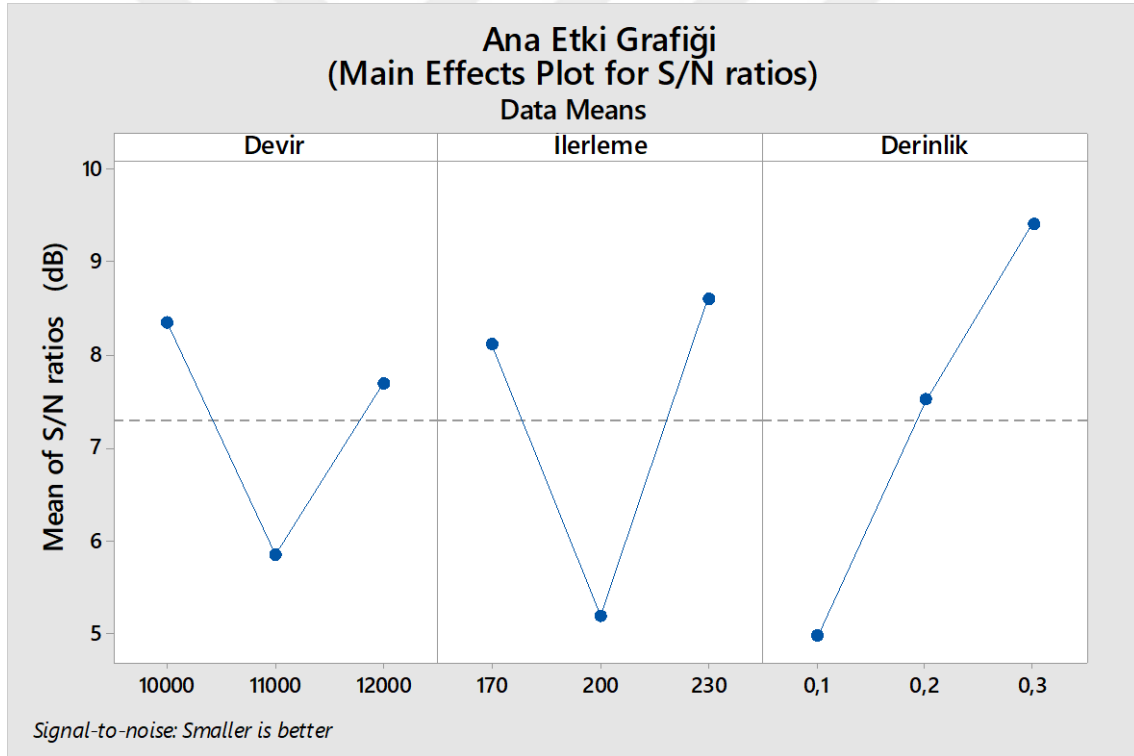
Tablo 3.9'da görüldüğü üzere, elde edilen S/N oranına göre işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelendiğinde; ilerlemenin 200 mm/dak, devirin 11000 dev/dak ve talaş derinliğinin de 0,2 mm (A2B2C2) olduğunda en düşük yüzey pürüzlülük değerinin elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun için doğrulama deneyleri yapılmıştır.



0,8 mm takım ile yapılan deneyler incelendiğinde, elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamaları 0,25-0,69  $\mu\text{m}$  arasında olmuştur. Yüzey pürüzlülük değerlerinin işleme parametrelerine göre S/N oranları Tablo 3.10 ve Şekil 3.14’te verilmiştir.

**Tablo 3.10.** Yüzey pürüzlülük değerlerinin S/N oranları – 0,8 mm

Seviye	A Devir (n) (dev/dak)	B İlerleme (f) (mm/dak)	C Kesme derinliği (d) (mm)
1	8,356	8,109	4,963
2	5,85	5,185	7,508
3	7,683	8,594	9,417
Fark	2,505	3,409	4,454
Rank	3	2	1

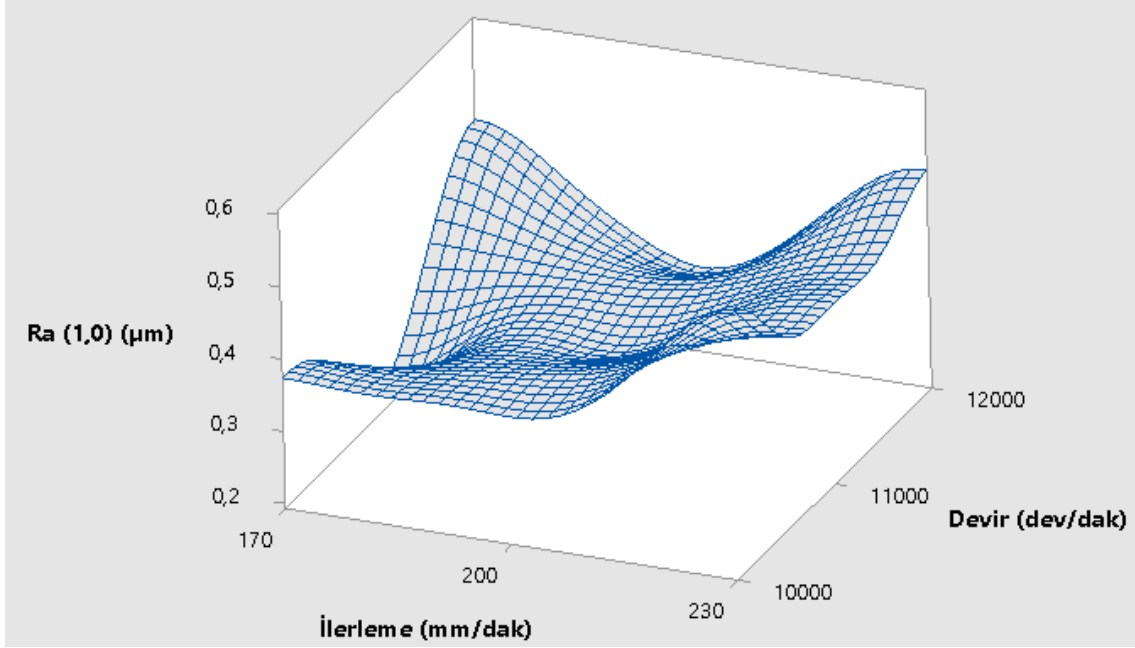


**Şekil 3.15.** Ana etki grafiği – 0,8 mm

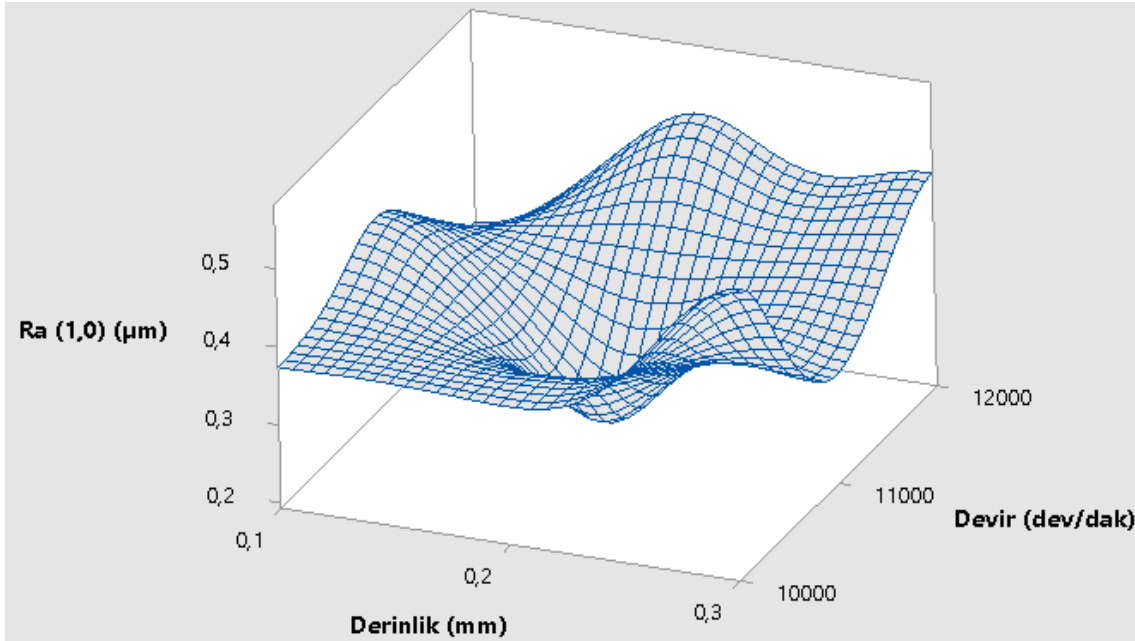
0,8 mm takım ile yapılan deneylerde, Tablo 3.10’da görüldüğü üzere, yapılan dokuz deneyde elde edilen S/N oranına göre işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelendiğinde; ilerlemenin 170 mm/dak, devirin 10000 dev/dak ve talaş derinliğinin de 0,3 mm (A1B1C3) olduğunda en düşük yüzey pürüzlülük değerinin elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun için doğrulama deneyleri yapılmıştır.

### 3.4.2. Etki grafikleri

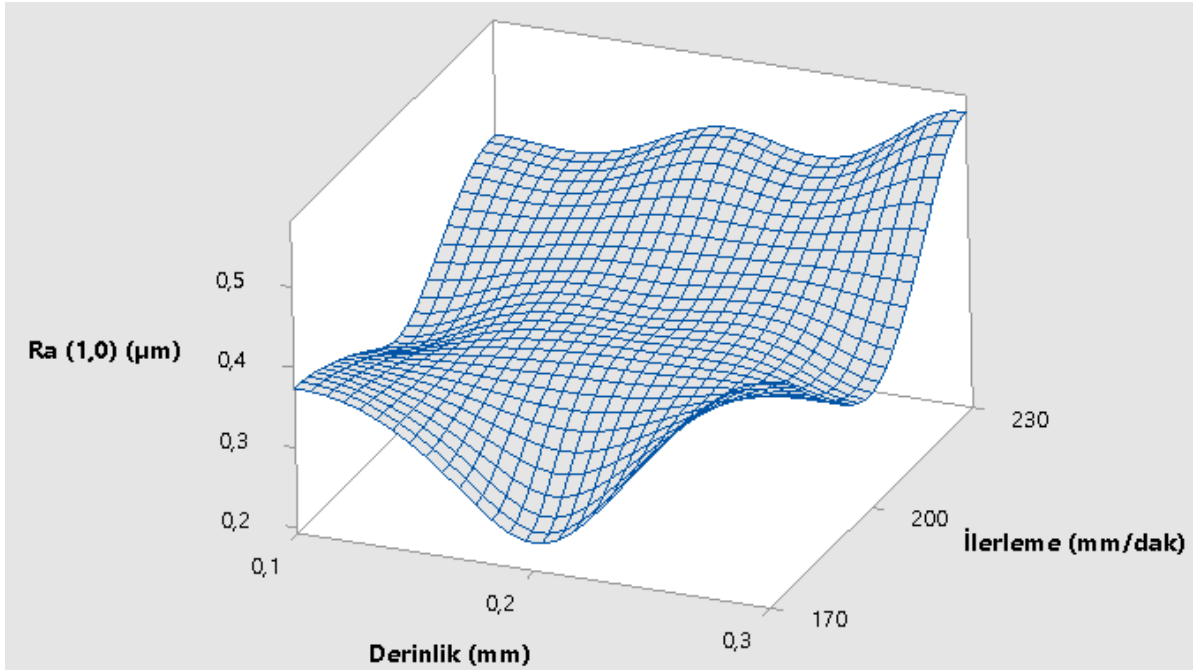
1,0 mm takım ile yapılan deneylerde, Tablo 3.9'da görüldüğü üzere ilerleme parametresinin kesme kuvveti üzerinde etkisi en fazladır. Sonrasında devir ve kesme derinliği öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerin kesme kuvvetlerine etkileri Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilmiştir.



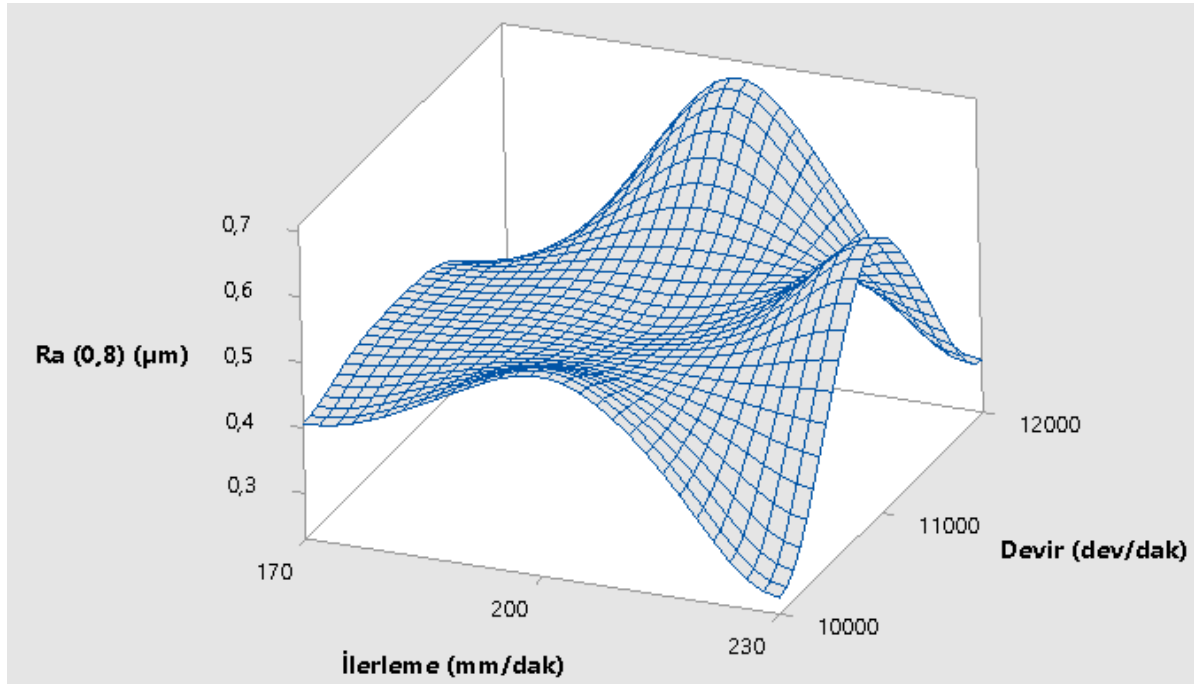
Şekil 3.16. İlerlemenin ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 1,0 mm



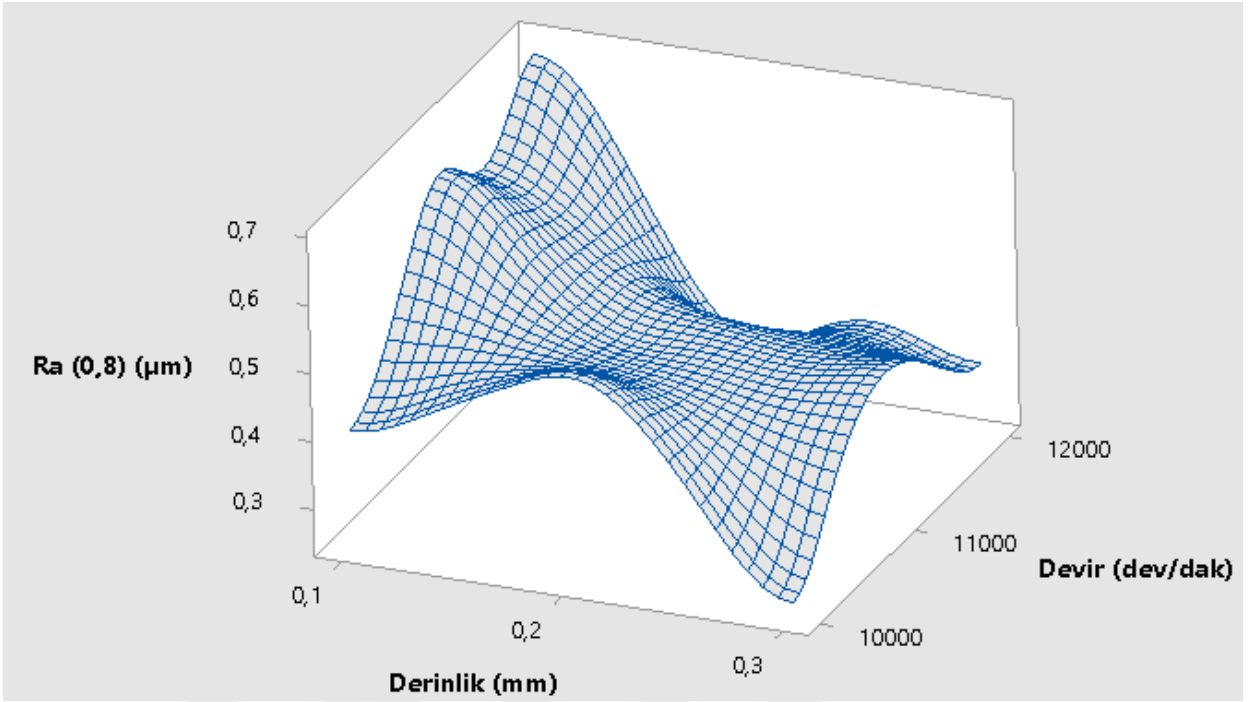
Şekil 3.17. Talaş derinliğinin ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 1,0 mm



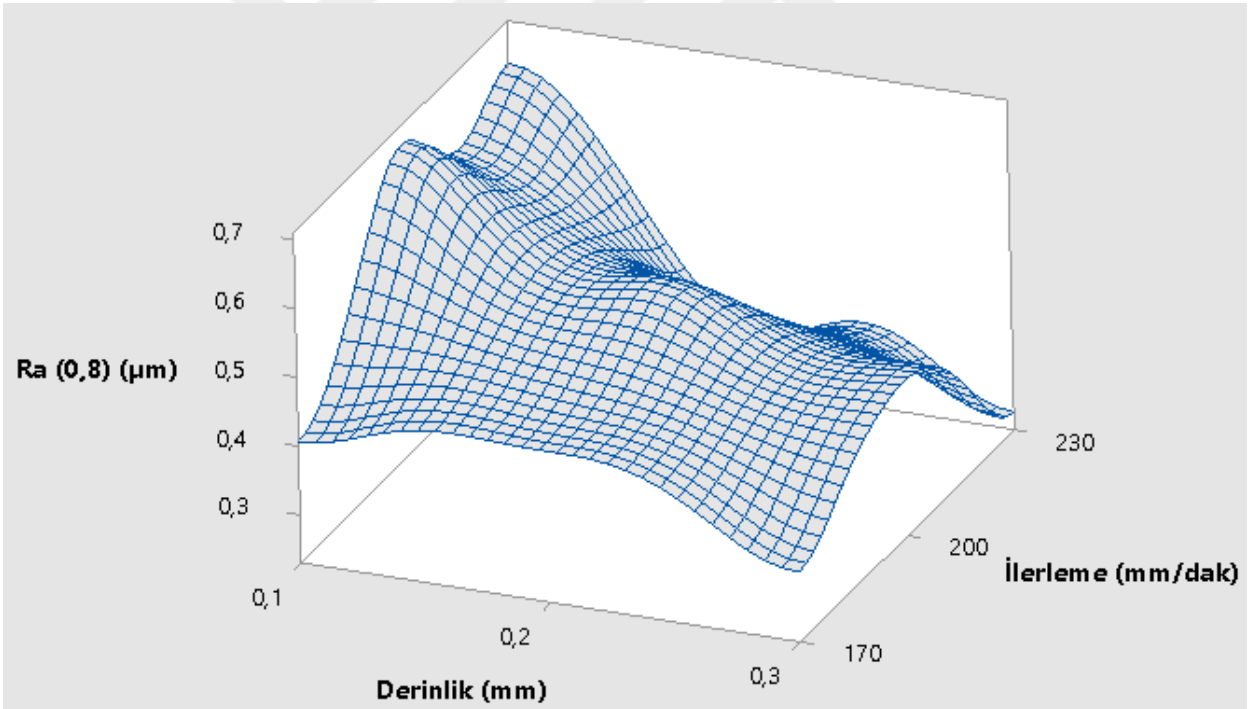
**Şekil 3.18.** Talaş derinliğinin ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 1,0 mm 0,8 mm takım ile yapılan deneylerde, Tablo 3.10’da görüldüğü üzere kesme derinliği parametresinin kesme kuvveti üzerinde etkisi en fazladır. Sonrasında ilerleme ve devir öneme sahiptir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerin kesme kuvvetlerine etkileri Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



**Şekil 3.19.** İlerleme ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 0,8 mm



Şekil 3.20. Talaş derinliğinin ve devrin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 0,8 mm



Şekil 3.21. Talaş derinliğinin ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkileri – 0,8 mm

### 3.4.3. Varyans analizi

1,0 mm takım ile yapılan deneylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi neticeleri Tablo 3.11’de gösterilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere AZ91 magnezyum alaşım malzemesinin DLC kaplamalı kesici takımlarla işlenmesi sonucu işlenen yüzeydeki pürüzlülüğün oluşumunda en etkili faktör %58,73 ile ilerlemedir.

**Tablo 3.11.** Yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları – 1,0 mm

Parametre	Serbestlik	Kareler	Kareler	F	Yüzde
	Derecesi	Toplamı	Ortalaması	Değeri	(%)
Devir (n)	2	0,018764	0,009382	3,59	23,48
İlerleme (f)	2	0,046975	0,023488	8,98	58,73
Derinlik (d)	2	0,014249	0,007125	2,72	17,79
Hata	2	0,005231	0,002616		
Toplam	8	0,08522			

0,8 mm takım ile yapılan deneylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değerlerinin varyans analizi neticeleri Tablo 3.12’de gösterilmiştir. Tablodan da anlaşılacağı üzere 1,0 mm ile işlenmiş deney sonuçlarından farklı olarak en etkili faktör %53,60 ile kesme derinliğidir.

**Tablo 3.12.** Yüzey pürüzlülüğü ANOVA sonuçları – 0,8 mm

Parametre	Serbestlik	Kareler	Kareler	F	Yüzde
	Derecesi	Toplamı	Ortalaması	Değeri	(%)
Devir (n)	2	0,02141	0,01071	1,06	13,90
İlerleme (f)	2	0,05001	0,02501	2,48	32,50
Derinlik (d)	2	0,08253	0,04127	4,09	53,60
Hata	2	0,02018	0,01009		
Toplam	8	0,17414			

Yapılan deneyler sonucunda, ilerleme yüzey pürüzlülüğünü etkileyen bir parametredir. 0,8 mm takım için kesme kuvveti açısından önemli olan kesme derinliğinin, yüzey pürüzlülüğünü etkilediği gözlemlenmektedir.

### 3.4.4. Optimizasyon

1,0 mm takım ve 0,8 mm takım için Tablo 3.13'te, yüzey pürüzlülüğünün optimum seviyeleri verilmiştir. Bu seviyeler Tablo 3.9 ve Tablo 3.10'dan elde edilmiştir. 1,0 mm takım için A2B2C2 optimum seviyedir. 0,8 mm takım için ise A1B1C3 optimum seviyedir.

**Tablo 3.13.** Yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler

Parametreler	Sembol	Birim	Kod	1,0 mm takım için		0,8 mm takım için	
				Optimum Seviye	Optimum Değer	Optimum Seviye	Optimum Değer
Devir	n	dev/dak	A	2	11000	1	10000
İlerleme	f	mm/dak	B	2	200	1	170
Derinlik	d	mm	C	2	0,2	3	0,3

### 3.4.5. Doğrulama deneyleri

Optimum koşullarda pürüzlülük değeri minitab lineer regresyon ile tahmin edilen bu değer doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1,0 mm takım için A2B2C2 seviyesinde regrasyon tahmini sonucunda 0,240  $\mu\text{m}$ , 0,8 mm takım için A1B1C3 seviyesinde 0,237  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Doğrulama deneyleri sonucunda ise 1,0 mm takım için 0,256  $\mu\text{m}$  ve 0,8 mm takım için 0,262  $\mu\text{m}$  olarak yüzey pürüzlülük değerleri bulunmuştur. Sonuçlar, Tablo 3.14'e aktarılmıştır.

**Tablo 3.14.** Doğrulama deneyleri

A3B1C1 seviyesi	1,0 mm takım için		0,8 mm takım için	
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	S/N (dB)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	S/N (dB)
Hesaplanan Değer	0,240	11,927	0,237	11,290
Doğrulama Deney Sonuçları	0,256	11,836	0,262	11,634
Farklar	0,016	0,091	0,025	0,344

1,0 mm takım için yapılan tahminler sonucunda doğrulama deneyine göre %6,70 değerinde bir hata vardır. Bu değer 0,8 mm takım için %9,5'tir.

### 3.4.6. Regresyon analizi

Lineer regresyon analizi sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerine ait elde edilen eşitlikler aşağıda belirtilmiştir. 3.1 ve 3.3'te belirtilen eşitlikler devir ilerleme ve derinlik parametreleri ile üç bilinmeyenli olarak elde edilmiştir. 3.2 ve 3.4'te belirtilen eşitlikler ise ikinci dereceden bir denklemi ifade eder ve parametrelerin birbirleri ile ilişkisini de içermektedir.

1,0 mm takım ile yapılan deneyler için:

$$R_a = -0,094 - 0,000006 \cdot n + 0,00239 \cdot f + 0,393 \cdot d \quad (3.5)$$

$$R_a = 21,19 - 0,003027 \cdot n - 0,04613 \cdot f + 1,815 \cdot d + 0,000100 \cdot f^2 + 6,675 \cdot d^2 + 0,000001 \cdot n \cdot f - 0,01961 \cdot f \cdot d \quad (3.6)$$

0,8 mm takım ile yapılan deneyler için:

$$R_a = 0,424 + 0,000021 \cdot n + 0,00014 \cdot f + - 1,159 \cdot d \quad (3.7)$$

$$R_a = -21,22 + 0,002153 \cdot n + 0,09982 \cdot f + + 1,461 \cdot d - 0,000176 \cdot f^2 + - 0,4861 \cdot d^2 - 0,000002 \cdot n \cdot f - 0,01394 \cdot f \cdot d \quad (3.8)$$

#### 4. SONUÇLAR

Minyatürleşme, otomotiv, havacılık, savunma, medikal, elektronik alanlarında görülmektedir. Mikro frezeleme, bir mikro işleme türü olup, minyatürleşmeyi sağlar. Mikro frezeleme ile karmaşık geometriye sahip parçalar, üstün yüzey kalitesi ve yüksek boyutsal doğruluk ile üretilebilir. AZ91 magnezyum alaşımının hafifliği ve üstün özellikleri sayesinde havacılık, savunma ve otomotiv sektörlerinde sıkça kullanılmaktadır. Hafiflik, dayanım ve iyi dökülebilme özellikleri sayesinde kullanılma potansiyeli yüksek olan bir alaşımdır. Bu araştırmada, minyatürleşmeyi sağlayan mikro frezeleme işleminin uygulanması ve endüstride yüksek potansiyele sahip AZ91 alaşımının kullanılması, araştırmanın önemini belirtmektedir.

Yapılan bu araştırma için, mikro takımlar, takım ön ayarlayıcı, CNC, kontrol ünitesi, yüksek devir sağlayıcı, dijital optik mikroskop, dinamometre, amplifikatör ve DAQ cihazı kullanılmıştır. Dynoware yazılımı ile data toplanmış, toplanan data, excel ve minitab yazılımları sayesinde analiz edilmiştir. Araştırmada, devir sayısı, ilerleme ve kesme derinliği parametrelerinin üç farklı seviyesi için Taguchi ( $L_9$ ) deneysel tasarım yapılmıştır. İki farklı takım için üç farklı seviyede toplam 18 deney yapılmıştır. Kesme kuvvetinin ve yüzey pürüzlülük değerinin minimum olması istendiği için en küçük en iyi amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Araştırma sonucunda, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Her iki takım için bulgular ayrı ayrı incelenmiş ve analiz edilmiştir. Kesme kuvvetlerinin doğru tahmin edilmesi gerekmektedir. Kesme kuvvetleri, kesici takımı ve iş parçasının yüzey bütünlüğünü doğrudan etkilemektedir.

1,0 mm takım ile yapılan deneylerin kesme kuvveti bulguları incelendiğinde, maksimum 47,61 N'luk bir kuvvet yapılan ikinci deneyde, minimum 14,19 N'luk bir kuvvet yedinci deneyde elde edilmiştir. Yapılan deneylerde kesme kuvveti ortalaması ise 23,90 N'dur.

0,8 mm takım ile yapılan deneylerin kesme kuvveti bulguları incelendiğinde ise, maksimum 19,53 N'luk bir kuvvet yapılan üçüncü deneyde elde edilmiştir. Minimum 8,423 N'luk bir kuvvet birinci deneyde elde edilmiştir. Yapılan deneylerde kesme kuvveti ortalaması ise 14,51 N'dur.

Ortalama kuvvetler kıyaslandığında 0,8 mm takım ile yapılan deneylerde daha küçük kesme kuvvetleri elde edildiği görülmüştür. Kesme kuvvetleri açısından



karşılaştırıldığında, 5,6 ve 7. sıradaki deneylerin bir yakınlık gözlemlenmektedir. Kesme kuvvetleri arasında lineer olarak 4.1’de belirtilen eşitlik elde edilmiştir.

$$F_c(1,0) = 8,89 + 1,35.F_c(0,8) \quad (4.1)$$

1,0 mm takım ile yapılan deneylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde, üçüncü deneyde maksimum 0,56  $\mu\text{m}$ , dördüncü deneyde minimum 0,22  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük ortalaması ise 0,40  $\mu\text{m}$ ’dir.

0,8 mm takım ile yapılan deneylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde, sekizinci deneyde maksimum 0,68  $\mu\text{m}$ , üçüncü deneyde minimum 0,25  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük ortalaması ise 0,45  $\mu\text{m}$ ’dir.

Yüzey pürüzlülük ortalamaları kıyaslandığında, 0,8 mm takım ile yapılan deneylerde daha küçük kesme kuvvetleri elde edilirken, daha yüksek pürüzlülük değerleri görülmüştür. Bunun bir sebebi olarak, artan devir parametresinin yol açtığı, işleme esnasında oluşan titreşim olabilir.

1,5 ve 7. sıradaki deneylerin yüzey pürüzlülük değerleri arasında bir yakınlık gözlemlenmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri arasında lineer olarak 4.2’de belirtilen eşitlik elde edilmiştir.

$$R_a(1,0) = 0,5727 - 0,387.R_a(0,8) \quad (4.2)$$

Araştırma kesme kuvvetleri açısından değerlendirildiğinde, 1,0 mm takım için en etkili faktör %73,39 ile devirdir. Sonrasında, kesme derinliği ve ilerleme öneme sahiptir. 0,8 mm takım için en etkili faktör ise, %61,34 ile kesme derinliğidir. Sonrasında ise devir ve ilerleme öneme sahiptir.

Her iki takım için, ilerlemenin 170 mm/dak, devirin 12000 dev/dak ve talaş derinliğinin de 0,1 mm (A3B1C1) olduğunda en düşük kesme kuvvetinin elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Devir parametresinin kesme kuvvetini etkileyen en etkin parametre olması literatüre uygundur. Devir parametresinin ve talaş kesitinin artması ile sıcaklık artar, sonucunda ise magnezyum alaşımı tutuşabilir [62]. Diğer yandan kesme derinliğinin küçük tutulması da kesme kuvvetini minimize etmektedir.

Araştırma yüzey pürüzlülükleri açısından değerlendirildiğinde, 1,0 mm takım için en etkili faktör %58,73 ile ilerlemedir. İlerlemenin, yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi beklenen ve literatürde var olan bir durumdur [62]. Sonrasında devir ve derinlik öneme

sahiptir. 0,8 mm takım için en etkili faktör ise, %53,60 ile kesme derinliği olup, bunu ilerleme ve devir takip etmektedir. Anlaşılacağı üzere, derinlik parametresinin 0,8 mm takım üzerinde hem kesme kuvveti hem yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi büyüktür. Kesme derinliğinin kesme kuvvetine etkisinin önemli olması kazıma sürtünme mekanizmaları olabilir. Kazıma ve sürtünme mekanizmaları mikro takımında yapışmaya sebep olmuş ve dolayısıyla yüksek kuvvetlere çıkmıştır.

1,0 mm takım kullanılarak yapılan deneylerde, (A2B2C2) 11000 devir/dak, 200 mm/dak ilerleme ve 0,2 mm kesme derinliği ile minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilebileceği görülmüştür. 0,8 mm takım kullanılarak yapılan deneylerde ise (A1B1C3) 10000 devir/dak, 170 mm/dak ilerleme ve 0,3 mm kesme derinliği ile minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilebileceği anlaşılmıştır. Literatürden farklı olarak, düşük kesme derinliklerinde kazıma ve sürtünme sebebi ile yüzey pürüzlük değerlerinde yükselme gözlemlenmiştir.

Taguchi optimizasyon tekniği, AZ91 magnezyum alaşım malzemesinin işlenebilirliği deney tasarımında ve parametrelerin optimizasyonu ile yanıt değerlerin istenilen oranlarda seyretmesinde etkili bir teknik olduğu yapılan çalışma ile görülmüştür [61].

Araştırmayı ileri bir seviyeye götürebilmek için titreşimi az, daha stabil tezgahlar ile, daha yüksek devirlerde ve daha küçük çapta takımlar ile bir çalışma gerçekleştirilebilir. Özellikle, kazıma/sürtünme mekanizmalarının sebep olabilecekleri etki incelenebilir ve kesme derinliği hakkında yorum yapılabilir. Böylece daha küçük çapta takımlar için kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri hakkında fikir edinilmiş olur.

İleride, AZ91 alaşımı mikro tornalama ile işlenebilir, soğutma sıvısının veya işleme geometrisinin yüzey bütünlüğüne etkisi incelenebilir. Kesme sıcaklığı, talaş oluşumu, takım deformasyonu ve takım salınımı da incelenebilecek araştırma başlıklarıdır.

Endüstride sıkça kullanılan AZ31 alaşımı üzerinde ve alüminyum alaşımları üzerinde bir çalışma gerçekleştirilebilir. Savunma, havacılık ve otomotiv sanayisinde kullanılma potansiyeli yüksek alüminyum temelli bir magnezyum geliştirilebilir.

Belirtilen konu başlıklarında çalışmalar tamamlandıktan sonra, son on yıl süresince mikro işleme üzerine yapılan çalışmaları içeren bir derleme yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Perçin, M., Aslantaş, K., Ucun, İ., Çiçek, A. (2015) Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Koşullarının Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi. Sekizinci Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, 14-15 Mayıs 2015 Çankaya Üniversitesi, Ankara.
- [2] Interference Technology, <https://interferencetechnology.com/etched-formed-micro-metal-parts-announced/>, 21 Mayıs 2019.
- [3] Usmicroscrew, <https://www.usmicroscrew.com/>, 21 Mayıs 2019.
- [4] Yücel, E., Çiçek, A. (2011) İmalat Alanında Yaygın Olarak Kullanılan Mikro İşleme Teknikleri. Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Dergisi, 15(1), 46-59.
- [5] IBM, [https://www.ibm.com/ibm/history/exhibits/storage/storage\\_350.html](https://www.ibm.com/ibm/history/exhibits/storage/storage_350.html), 21 Mayıs 2019.
- [6] Çağala, C., <https://www.tech-worm.com/dunyanin-en-kucuk-harddiski/>, 21 Mayıs 2019.
- [7] Kunt, E. D., Khalil, I. S. M., Naskali, A. T., Fidan, K. C., Sabanovic, A. (2010) Yüksek Hassasiyetli Montaj İşlemleri İçin Minyatür Delta Robot Tasarımı, En İyilemesi ve Denetimi. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 252-257.
- [8] Vollertsen, F., Hu, Z., Niehoff, H. S., Theiler, C. (2004) State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing. Journal of Materials Processing Technology, 151(1), 70-79.
- [9] Mamedov A., Lazoğlu İ. (2013) CNC ile Talaşlı İşlemede Kuvvet ve Titreşim Ölçümü. VIII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, 26-28 Eylül 2013, Gebze/Kocaeli.
- [10] Kuram, E. (2017) Kesici Takım Bağlama Uzunluğunun Mikro Frezelemede Takım Aşınması, Kuvvetler ve Çapak Boyutu Üzerindeki Etkileri. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 19(55), 229-237.
- [11] Piljek, P., Keran, Z., Math, M. (2014) Micromachining – Review of Literature from 1980 to 2010. Interdisciplinary Description of Complex Systems, 12(1), 1-27.
- [12] Kumar, S., Jerald, J., Kumanan, S., Prabakaran, R. (2014) A Review on Current Research Aspects in Tool-Based Micromachining Processes. Materials and Manufacturing Processes, 29, 1291–1337.
- [13] Robinson, G. M., Jackson, M. J. (2005) A review of micro and nanomachining from a materials perspective. Journal of Materials Processing Technology, 167, 316–337.

- [14] Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T. (2006) Investigation of microcutting operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 313-332.
- [15] Asad, A.B.M.A., Masaki, T., Rahman, M., Lim H. S., Wong Y. S. (2007) Tool based micro machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 204–211.
- [16] Ucu, İ., Aslantaş, K., Bedir, F. (2011) Kesici Takım Kaplama Malzemesinin Mikro Frezeleme İşleminde Takım Elastik Deformasyonu Üzerindeki Etkisi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elâzığ, Turkey.
- [17] Proxxon, <https://www.proxxon.com/en/micromot/24400.php>, 12 Mayıs 2019.
- [18] Chae, J., Park, S. S., Freiheit, T. (2006) Investigation of Micro-Cutting Operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(3-4), 313–332.
- [19] Imran, M., Mativenga, P. T., Gholinia, A., Withers, P. J. (2014) Comparison of tool wear mechanisms and surface integrity for dry and wet micro-drilling of nickelbase superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 76, 49-60.
- [20] Kang, I.S., Kim, J.S., Kim, J.H., Kang, M.C., Seo, Y.W. (2007) A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 250–255.
- [21] Kuram, E. (2015) Yumuşak ve Sert Malzemelerin Mikro Frezelenmesinde İşleme Şartlarının Optimizasyonu. Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü. Kocaeli, Türkiye, 229-237.
- [22] Mamedov A., Lazoğlu İ. (2012) Mikro Frezeleme İçin Mekanistik Kuvvet Modeli. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 29-30 Kasım 2012, Balıkesir, Türkiye.
- [23] Pratap, T., Patraa, K., Aleksandr, D. (2015) Modeling Cutting Force in Micro-Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. *Procedia Engineering*, 129 (2015), 134-139.
- [24] Asilturk, İ., İnce, M. A. (2016) Micromachining. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 4(2), 23-25.
- [25] Karpat, Y., Kanlı, M., Oliaer, S. N. B. (2018) Mikro frezeleme işleminin takım eksen sapması göz önüne alınarak mekanistik modellemesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 771-781.
- [26] Aslantaş, K., Çiçek, A., Çelik, S. G. (2018) Mikro İşlemede Takım Aşınması-Kanal Geometrisi İlişkisi Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(4), 1285-1298.

- [27] Lu, A., Jia, Z., Wanga, H., Feng, Y., Liang, S. Y. (2019) The effect of cutting parameters on micro-hardness and the prediction of Vickers hardness based on a response surface methodology for micro-milling Inconel 718. *Measurement*, 140 (2019), 56-62.
- [28] Özel, T., Liu, X., Dhanorker, A. (2009) Modelling and Simulation of Micro-Milling Process. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(12).
- [29] Aslantaş, K., Kaynak, Y. (2019) Şekil hafızalı NiTi alaşımının mikro frezelenmesi ve kritik talaş kalınlığının belirlenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1201-1211.
- [30] Oliaeia, S. N. B., Karpat, Y. (2014) Experimental Investigations on Micro Milling of Stavax Stainless Steel. *Procedia CIRP*, 14(2014), 377-382.
- [31] Günaydın, E. (2014) Mikro Frezeleme Uygulamalarında En Uygun Takım Yolunun ve Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, Türkiye.
- [32] Afazov, S.M., Ratchev, S.M., Segal, J. (2010) Modelling and simulation of micro-milling cutting forces. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2010), 2154-2162.
- [33] Ziberov M., Silva M.B., Jackson M. Wayne N.P.H. (2016) Effect of Cutting Fluid on Micromilling of Ti-6Al-4V. 44th Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME, 5, 332-347.
- [34] Nahata S., Onler R., Korkmaz E., Ozdoganlar O.B. (2018) Radial Throw at the Cutting Edges of Micro tools When Using Ultra High Speed Micro machining spindles. 46th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 46, Texas USA.
- [35] Lauro, C.H., Brandao, L.C., Panzera, T.H., Davim, J.P. (2015) Surface Integrity In The Micromachining; A Review. *Reviews on Advanced Materials Science* 40(3), 227-234.
- [36] Bayraktar, Ş., Turgut, R. (2016) Al 5083 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Kuvveti, Yüzey Pürüzlülüğü ve Çapak Yüksekliğinin Optimizasyonu. 7th International Symposium On Machining, November 3-5, 2016, Marmara University, Istanbul
- [37] Günay, M. (2013) AISI 316l Çeliğinin İşlenmesinde Takım Radyüsüne Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3), 437-444.

- [38] Şirin, E., Şirin, Ş., Turgut, Y., Korkut, İ. (2015) AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Metodu ile Optimizasyonu. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3(2015), 132-144.
- [39] Yu, J., Wang, G., Rong, Y. (2015) Experimental Study on the Surface Integrity and Chip Formation in the Micro Cutting Process. 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME, 1(2015), 655-662.
- [40] Meral, G., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2011) Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(4), 332-338.
- [41] Aslantaş, K., Ekici, E., Çiçek, A. (2018) Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis. Measurement, 128(2018), 419-427.
- [42] Khorasani, A.M., Gibson, I., Goldberg, M., Doeven, E.H., Littlefair, G. (2016) Investigation on the effect of cutting fluid pressure on surface quality measurement in high speed thread milling of brass alloy (C3600) and aluminium alloy (5083). Measurement, 82, 55-63.
- [43] Korkmaz E., Onler, R., Ozdoganlar, O.B. (2017) Micromilling of Poly(methyl methacrylate, PMMA) using Single- Crystal Diamond Tools. 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45, LA, USA.
- [44] Sun, Q., Cheng, X., Liu, Y., Yang, X., Li, Y. (2017) Modeling and Simulation for Micromilling Mechanisms. Procedia Engineering, 174, 760-766.
- [45] Günay, M., Kaçal, A., Turgut, Y. (2011) Optimization Of Machining Parameters in Milling Of Ti-6al-4v Alloy Using Taguchi Method. E-Journal of New World Sciences Academy, 6(1), 428-440.
- [46] Kuram, E., Ozçelik, B. (2015) Optimization of machining parameters during micro-milling of Ti6Al4V titanium alloy and Inconel 718 materials using Taguchi method. Journal of Engineering Manufacture, 1-15.
- [47] Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C. Y., Meral, G. (2014) Frezeleme İşlemlerinde Titreşimi ve Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Parametrelerin Optimizasyonu. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 4(1), 37-44.
- [48] Kaçar, İ., Öztürk, F. (2006) Magnezyum Alaşımlarının Şekillendirilmesindeki Son Gelişmeler, TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, 354-361.

- [49] Gözüaçık, N. K. (2012) AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyonunda Elektrolit Bileşiminin Etkileri. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [50] Atalay, O. (2006) Magnezyum ve Alaşımlarının Konstrüksiyon Malzemesi Olarak Otomotivde Kullanımı. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye.
- [51] Güler, K. A. (2003) Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi. Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalürji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
- [52] Öztürk, F., İlyas, K. (2012) Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 12-20.
- [53] Aghion E., Boronfin B., Eliezer D. (2001) The Role of the Magnesium Industry in Protecting the Environment, J. Mat. Proc. Tech., 117, 381-385.
- [54] Bakır, B. (2005) Cnc Freze Tezgahlarında Kullanılan Karbür Parmak Freze Takımı Geometrisinin İşlenebilirliğe Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye.
- [55] Kistler, <https://www.kistler.com/?type=669&fid=78699&model=document>, 13 Mayıs 2019
- [56] Keyence, <https://www.keyence.com/products/microscope/digital-microscope/vhx-6000/models/vhx-6000/index.jsp>, 01 Haziran 2019.
- [57] Mert, F. (2012) Magnezyum Alaşımlarının İşlenmesi, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 282-288, Ankara, Türkiye.
- [58] Dursun, D. (2018) Kişisel görüşme AZ-91 alaşımı spektrometre raporu. Vig Metal Sanayi Ticaret A.Ş.
- [59] Ay, M., Ay, İ. (2016) The Prediction and Optimization of the Effects of Abrasive Waterjet Cutting Parameters On Kerf. 5th International Science Congress & Exhibition APMAS2015, Lykia, Oludeniz, April 16–19, 2015, 129(4), 762-766.
- [60] Özcan, A. E. (2019) Minimum Miktarda Yağlama Sistemine Katılan Aşındırıcı Toz Miktarının Kesme İşlemine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye.

[61] Aydın, U. Ay, M. Etyemez, A. (2019) Magnezyum Alaşımın Mikro Kesici Takımlarla Frezelenmesi. 2nd Engineering and Architecture Congress, 59, 22-24 April 2019, Marmaris, Türkiye.

[62] Akgün, M., Özger, G., Ulaş, H. B. (2014) Döküm yöntemiyle üretilmiş AZ91 Magnezyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Değerlendirilmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 30(5), 323-328.



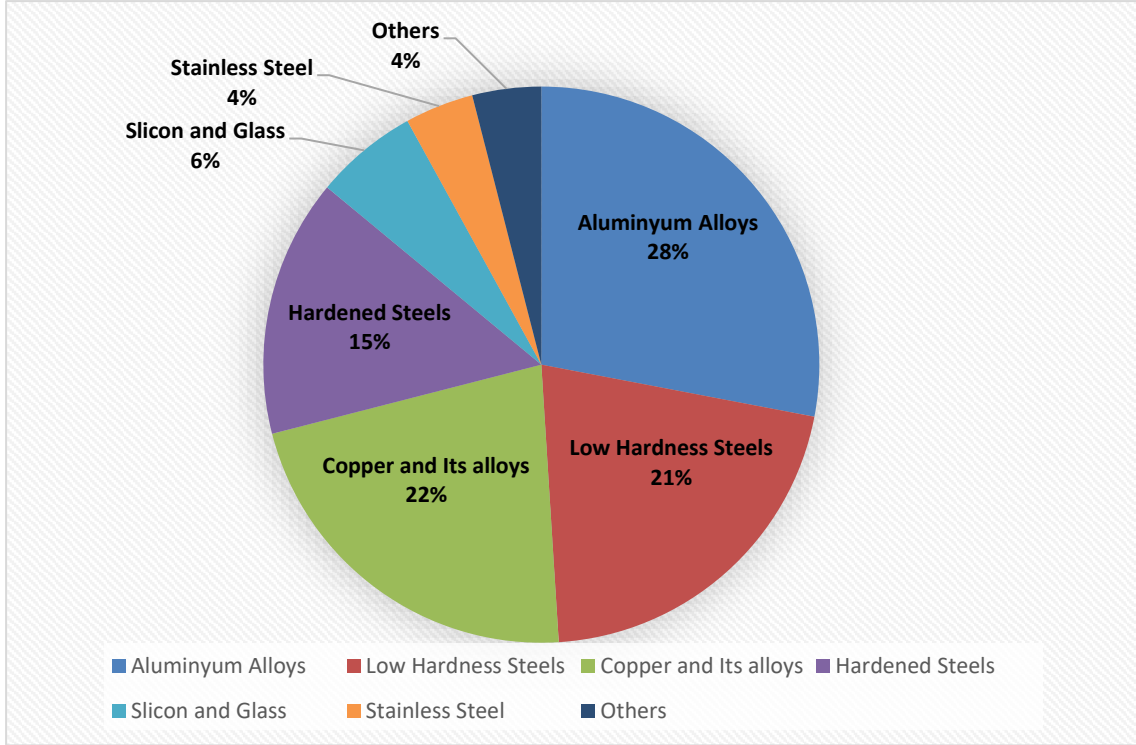


## **EKLER**

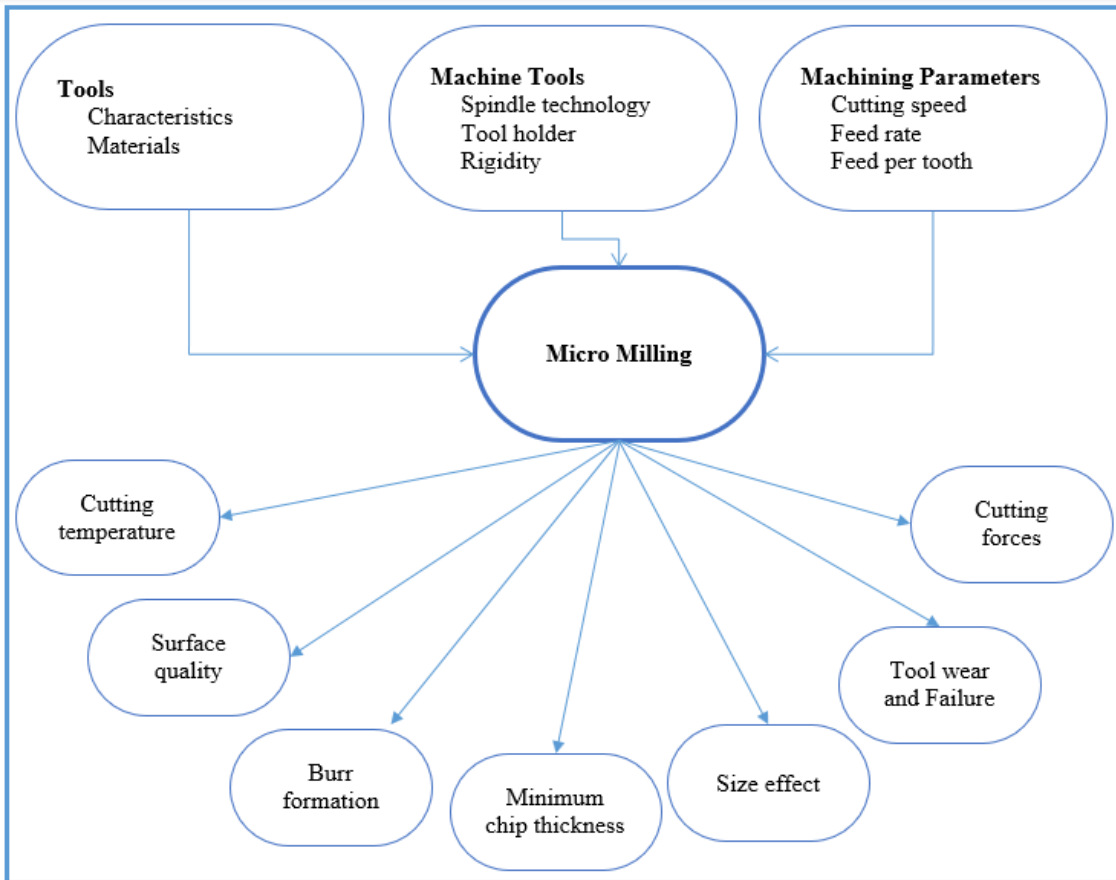
- Ek 1.1 : İngilizce literatür  
Ek 1.2 : Periyodik tablo  
Ek 1.3 : Deney düzeneği  
Ek 2.1 : Takım ön ayarlayıcı  
Ek 2.2 : Hız kafası  
Ek 2.3 : Dinamometre  
Ek 2.4 : Amplifikatör  
Ek 2.5 : DAQ cihazı  
Ek 2.6 : Dijital mikroskop  
Ek 2.7 : AZ-91 Kimyasal bileşim



## Mikro işlemede kullanılan malzemeler



## Mikro frezeleme parametreleri ve etkileri



# Periodic Table of Elements

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 <b>H</b> Hydrogen 1.00794	2 <b>He</b> Helium 4.002602	3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012182	5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.0107	7 <b>N</b> Nitrogen 14.0067	8 <b>O</b> Oxygen 15.9994	9 <b>F</b> Fluorine 18.9984032	10 <b>Ne</b> Neon 20.1797	11 <b>Na</b> Sodium 22.98976928	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.3050	13 <b>Al</b> Aluminum 26.9815386	14 <b>Si</b> Silicon 28.0855	15 <b>P</b> Phosphorus 30.973762	16 <b>S</b> Sulfur 32.065	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.453	18 <b>Ar</b> Argon 39.948
19 <b>K</b> Potassium 39.0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.955912	22 <b>Ti</b> Titanium 47.887	23 <b>V</b> Vanadium 50.9415	24 <b>Cr</b> Chromium 51.9961	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938045	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933195	28 <b>Ni</b> Nickel 58.6934	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.64	33 <b>As</b> Arsenic 74.9216	34 <b>Se</b> Selenium 78.96	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.90585	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.90638	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.94	43 <b>Tc</b> Technetium (97.9072)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.90550	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.90447	54 <b>Xe</b> Xenon 131.293
55 <b>Cs</b> Cesium 132.9054519	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	57-71 <b>Lanthanides</b>	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.94788	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.227	78 <b>Pt</b> Platinum 195.084	79 <b>Au</b> Gold 196.966569	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.3833	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98040	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astatine (209)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89-103 <b>Actinides</b>	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 <b>Db</b> Dubnium (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (266)	107 <b>Bh</b> Bohrium (264)	108 <b>Hs</b> Hassium (277)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (288)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (271)	111 <b>Rg</b> Roentgenium (272)	112 <b>Uub</b> Ununbium (285)	113 <b>Uut</b> Ununtrium (284)	114 <b>Uuq</b> Ununquadium (289)	115 <b>Uup</b> Ununpentium (288)	116 <b>Uuh</b> Ununhexium (282)	117 <b>Uus</b> Ununseptium (286)	118 <b>Uuo</b> Ununoctium (284)

**Metals**

- Alkali metals
- Alkaline earth metals
- Lanthanoids
- Actinoids
- Transition metals
- Poor metals

**Nonmetals**

- Other nonmetals
- Noble gases

**States of Matter**

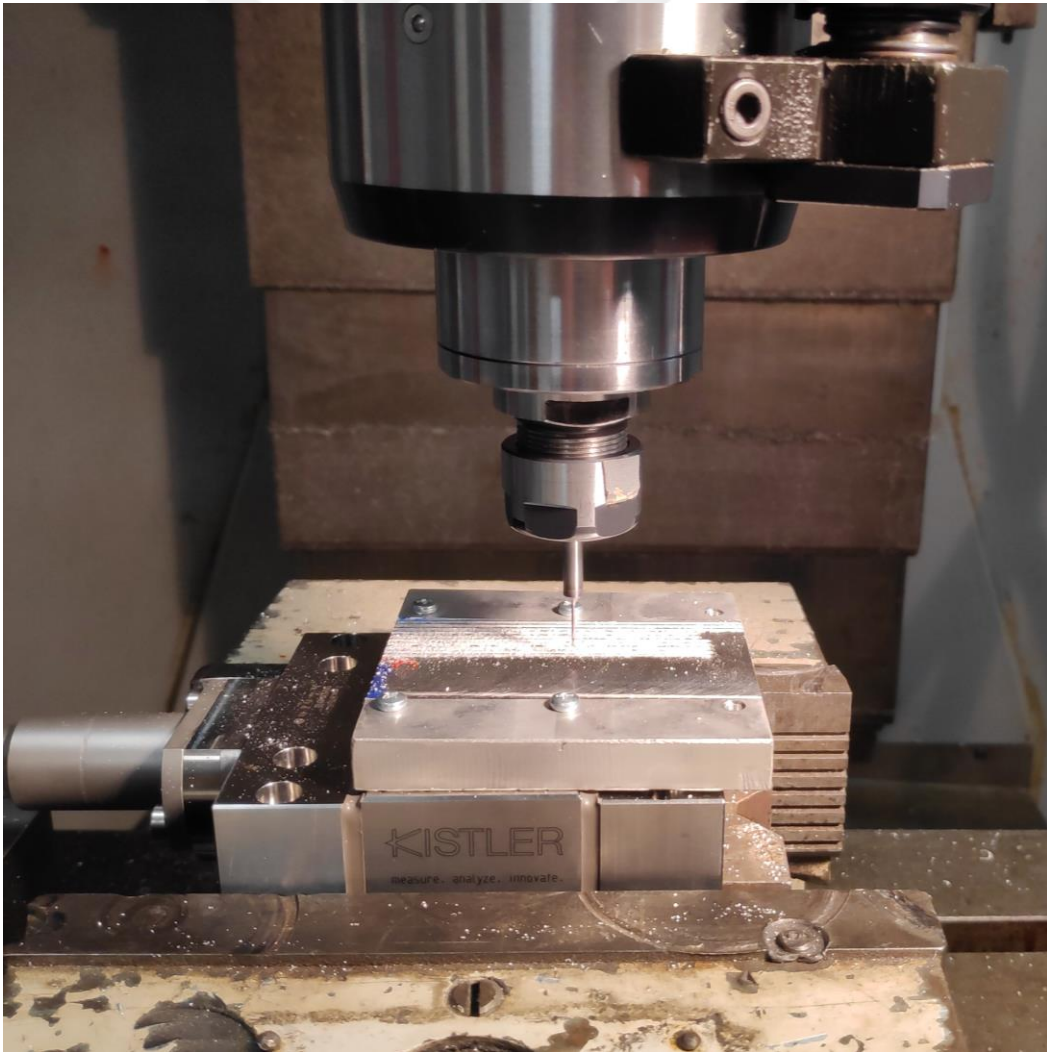
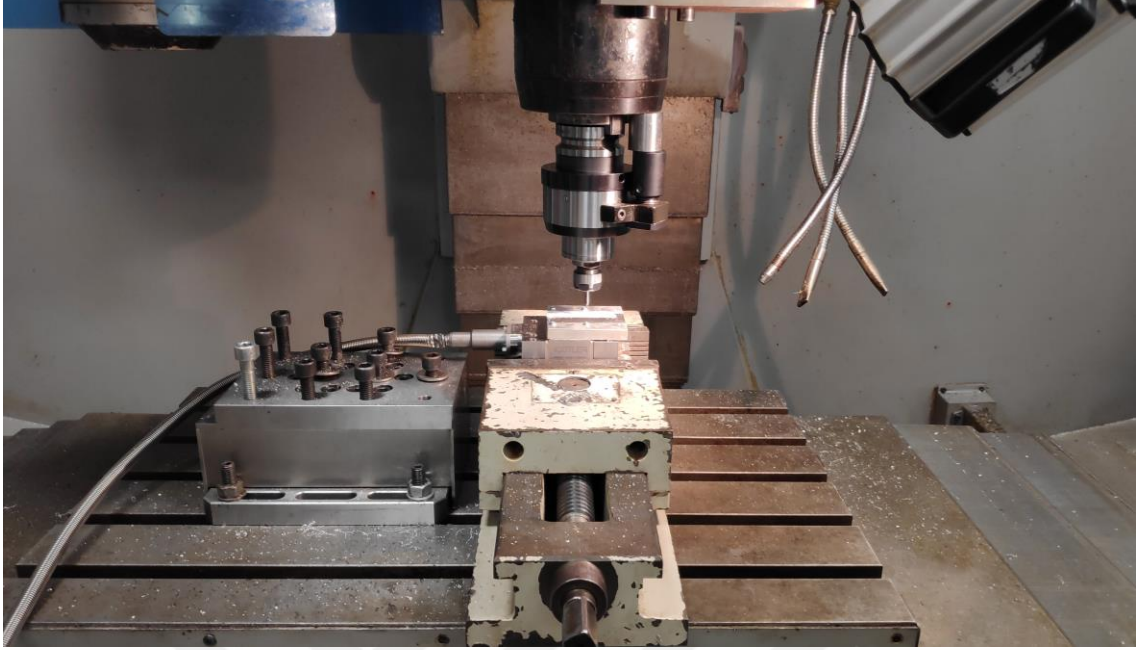
- C** Solid
- Hg** Liquid
- H** Gas
- Rf** Unknown

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah ([michael@dayah.com](mailto:michael@dayah.com)). <http://www.ptable.com/>



**Ek 1.3. Deneý dzenegi**





## Ek 2.1. Takım ön ayarlayıcı (Nikken, 2019)

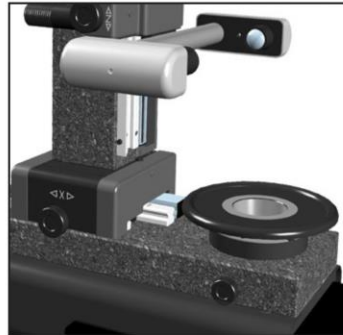
### E236N - OVERVIEW

Our new E236N Tool Presetting machine has been developed as the entry level option for our new generation of advanced tool presetting machines.

Designed to be bench mounted the E236N features a ground granite base and column, stainless steel construction and ergonomic design combined with a 5.7" TFT LCD Touch Screen. This system provides full operator control and selection of options and functions via an intuitive icon system allowing operational and functional simplicity that is second to none.

The precision spindle system is fully interchangeable and utilises a one piece cartridge - eliminating the need for adaptors and the errors associated with their use.

Also included with our E236N model is our DPP software package. Working via your DNC system DPP converts measured tool data into CNC code for direct loading into the machine controller and associated tool offset pages (1st twenty uses free - Dongle option).



Exclusive operating software designed to be easy and straight forward to use straight out of the box!

- Simple and intuitive icon driven menu system
- Automatic measurement (Automatic scanning of the tool edge with focus indicators)
- Display of reference circles for quick checking of Nose Radius
- Multiple machine origins - 9 total
- Multiple tool sets - 9 total (99 tools for each)
- Tool data stored; T, Lx, Lz and R
- Optional print mode (in conjunction with 'S'Print' compact label printer) allows printing of labels for specific individual tools
- DPP capability. Installed on Windows PC via USB connection. This allows for the backup of machine & tool data; post processing of tools stored on presetter; updating of the presetter operating BIO
- Free for the life of the machine!

E236N QUICK FACTS	
Bench model	
Natural granite base & column	
Stainless steel mechanical elements	
MEASURING RANGE	
X Axis: Diameter of tool $\varnothing$ 0 - $\varnothing$ 260mm	
Z Axis: Length of tool 0 - 360mm	
TOOL MEASURE	
9 x origins	
9 x toolsets	
SPINDLES	
Fixed or interchangeable spindle	
Spindles: ISO / BT / IT / HSK / Capto / VDI	
MIN. READING INCREMENT	
X Axis: 0.001mm (radius / diameter)	
Y Axis: 0.001mm	
OPERATING SYSTEM	
RISC 32Bit Processor	
Integrated vision system. C-MOS Sensor	
1 x RS232 printer port	
1 x USB PC link port	
POWER	
24V	
VISION SYSTEM	
5.7" TFT LED Touchscreen Matrix Display	
90mm x 120mm image size	
20 x magnification	
Auto measure X & Z focus control bars	

## Ek 2.2. Hız kafası (Nikken, 2019)



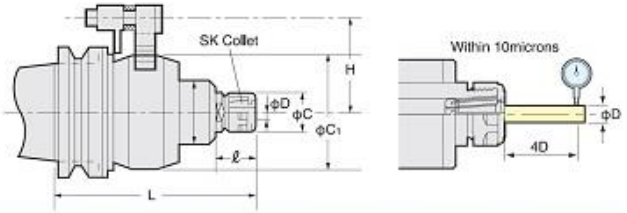
**NX**

Explanation of the Code No.  
**BT40-NX 5 160**  
 • Length  
 • Ratio  
 •NX : 4times, 5 times  
 PX : 6times, 10 times  
 •Shank



### 10,000~40,000min<sup>-1</sup>

- NIKKEN NX increases the spindle speed by 4 or 5 times, so economically convert your standard M/C to high speed M/C.
- Inside gears are mirror-finish ground by NIKKEN original Fluid-Dynamic Grinding Process.
- Run-out accuracy is more stable due to TiN Bearing Nut (standard accessory).



TAPER	Code No.	D	L	C	C <sub>1</sub>	ℓ	H	Ratio	MAX. min <sup>-1</sup>	Weight (kg)	Collet
No.30	BT30-NX 5-153	1.75~10	153	27.5	85	32	55	5	20,000	2.9	SK10A
	BT40-NX 5-153		153								
No.40	(IT40)-PX 6-150GX	0.5~8.0	149	22	76	14.5	60	6	30,000	4.1	ETS14
	-PX10-160GX		162.5					98			
No.50	BT50-NX 4-192	1.75~16	192	40	118	46	82	4	10,000	11.0	SK16A
	(IT50)-NX 5-151	1.75~10	151	27.5	85			5	20,000	7.0	SK10A
	-PX 6-140GX	0.5~8.0	142	22	76	6		30,000	6.8	ETS14	
	-PX10-155GX		155.5		98	14.5		10	40,000		7.2

#### NX type

- ★ For End Mill, please use SK A type collet. For Drill, please use SK-P class collet. (P.39)
- ★ Wrench, Collet Extractor and A type SK Collets are supplied as standard.
- NX5: SK10-6A, 8A, 10A NX4: SK16-8A, 10A, 12A, 16A
- ★ Stopper block is available as an option. When ordering, please inform your M/C maker and Model as well as your M/C spindle flange dimension.
- ★ Air Cylinder for Cooling (NXE-COOL) is highly recommended to use for the stable milling.



#### Air Cylinder for Cooling with ON/OFF Magnet NXE-COOL

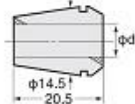
The best cooling is to cool the speeder body directly.



#### PX type

- ★ Grease lubrication is standard.
- ★ Please add "MX" instead of "GX" at the end of Code No. for the oil mist lubrication, e.g. BT40-PX6-130MX
- ★ ETS collet is supplied as an option.

#### ETS Collet



#### Explanation of the Code No.

**ETS 14 0.5**  
 • MAX, Chucking Dia.  
 • Style No.  
 • Symbol of ETS Collet

- ★ φd=0.5~1.0: Each 0.1mm (Gripping range : 0.1mm)  
 e.g. ETS14-0.5 : 0.4~0.5mm
- ★ φd=1.25~2.5: Each 0.25mm (Gripping range : 0.25mm)
- ★ φd=3.0~8.0: Each 0.5mm (Gripping range : 0.5mm)

## Ek 2.3. Dinamometre (Kistler, 2019)

### Force

**KISTLER**

measure. analyze. innovate.

## MiniDyn

Typ 9119AA1

### Multicomponent Dynamometer up to 4 000 N, cover plate 39x80 mm

Multicomponent dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. Its very low threshold and the high sensitivity allow measuring extremely small forces.

- Small design
- High sensitivity and natural frequency
- Small temperature error
- Top plate made of Titanium
- For cutting force measurements in ultra precise machining
- For general multicomponent force measurement

#### Description

The dynamometer consists of four 3-component force sensors mounted under high preload between the cover plate and the two lateral base plates.

A low temperature error is obtained by this special mounting of the sensors. Each force sensor contains three crystal rings, of which one is sensitive to pressure in the y-direction and the two others to shear in the x- and z-directions. The forces are measured practically without displacement.

The outputs of the four mounted force sensors are fed to the 9-pole flanged socket. There are also multicomponent force-moment measurements possible.

The four sensors are fitted so that they are ground-isolated. This largely eliminates ground loop problems.

The dynamometer is corrosion-resistant and protected against penetration by splashing water or cutting fluid. The dynamometer including connecting cable Type 1687B5 or Type 1677A5 meets the degree of protection IP67.

#### Application examples

- Multicomponent force measurement of small forces
- Cutting force measurement in
  - precision machining
  - micromachining
  - Ultra-high precision machining of brittle materials



#### Technical data

Measuring range (central) single component	$F_x, F_y, F_z$	kN	-4 ... 4	
	$M_x, M_y$	N·m	-125 ... 125	
	$M_z$	N·m	-250 ... 250	
Measuring range when components act simultaneously (central), $M_x, M_y, M_z = 0$	$F_x, F_y, F_z$	kN	-2,0 ... 2,0	
Calibrated measuring range	100 %	$F_x, F_y, F_z$	N	0 ... 4 000
	10 %	$F_x, F_y, F_z$	N	0 ... 400
	1 %	$F_x, F_y, F_z$	N	0 ... 40
Overload (central)	$F_x, F_y, F_z$	kN	-4,5/4,5	
Threshold		N	<0,002	
Sensitivity	$F_x, F_z$	pC/N	≈-26	
	$F_y$	pC/N	≈-13	
Linearity	Meas. range 10% ... 100%		%/FSO	≤±0,3
	Meas. range 0% ... <10%		%/FSO	≤±0,5
Hysteresis	Meas. range 10% ... 100%		%/FSO	≤±0,3
	Meas. range 0% ... <10%		%/FSO	≤±0,5
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%		≤±2
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%		≤±2
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%		≤±2
Natural frequency (without additional mass)	$f_n(x)$	kHz		≈6,0
	$f_n(y)$	kHz		≈6,4
	$f_n(z)$	kHz		≈6,3
Operating temperature range		°C		-20 ... 70
Capacitance	$F_x, F_y, F_z$	pF		≈230
Insulation resistance (20 °C)		Ω		>10 <sup>13</sup>
Ground isolation		Ω		>10 <sup>8</sup>
Degree of protection EN60529		–		IP67 <sup>1)</sup>
Weight	Dynamometer	kg		0,93
	Cover plate	kg		0,30
	Mounting surface	mm		39x80

<sup>1)</sup> with connection cables Type 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

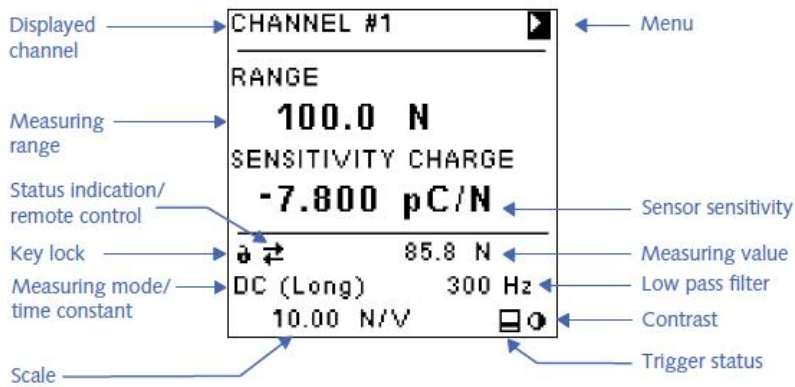




## Ek 2.4. Amplifikatör (Kistler, 2019)



### Operation



### Technical Data

#### Charge Input

Connector Type		BNC neg.
Measuring range FS	pC	$\pm 2 \dots 2\,200\,000$
Measurement uncertainty (0 ... 50 °C)		
FS $\geq 2 \dots < 10$ pC	%	$< \pm 2$
FS $\geq 10 \dots < 100$ pC	%	$< \pm 0,6$
FS $\geq 100 \dots < 2\,200\,000$ pC	%	$< \pm 0,3$
Drift, measuring mode DC (Long)		
at 25 °C, max. relative Humidity RH of 60 % (non-condensing)	pC/s	$< \pm 0,03$
at 25 °C, max. relative Humidity RH of 70 % (non-condensing)	pC/s	typ. $< \pm 0,05$
at 50 °C, max. relative Humidity RH of 50 % (non-condensing)	pC/s	$< \pm 0,3$
Overload	%FS	$\approx \pm 110$

## Ek 2.5. DAQ cihazı (Kistler, 2019)



### Technical Data

#### General Data

Dimensions	mm	208x70x249
Weight	kg	2,15
Operating temperature range	°C	0 ... 50
Min./max. temperature	°C	-10/60

## Ek 2.6. Dijital mikroskop özellikleri-İngilizce (Keyence, 2019)

	VHX-6000
Image sensor	1/1.8-inch CMOS image sensor Virtual pixels: 1600 (H) × 1200 (V)
Scanning system	Progressive
Frame rate	50 F/s (max.)
High Dynamic Range	16-bit intensity range through RGB data from each pixel
Gain	Auto, Manual, Preset
Electronic shutter	Auto, Manual, 1/60, 1/120, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/5000, 1/9000, 1/19000
Supercharge shutter	0.02 to 4 s
White balance	Push set, Auto, Manual, Preset (2700K, 3200K, 5600K, 9000K)
Back-focus adjustment	Not required

## Ek 2.7. AZ-91 Kimyasal bileşim

SPECTRO		28/03/2019 07:56:30							
Method:	Mg-20-F								28/03/2019 07:56:24
Comment:	Mg - Mg/Al/Mn/Zn - alloys	Element concentration							
Sample Name:	KALITE:								
	Ag	Al	Be	Ca	Cd	Ce	Cu	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
< x > (3)	< 0.00040	8.89	0.00065	0.00095	< 0.00010	< 0.0040	< 0.00040	0.0017	
	La	Mn	Na	Ni	P	Pb	Si	Sn	
	%	%	%	%	%	%	%	%	
< x > (3)	< 0.0015	0.198	< 0.0020	< 0.0010	0.0033	0.0129	0.0229	< 0.00050	
	Zn	Zr	Mg						
	%	%	%						
< x > (3)	0.603	< 0.0015	90.3						

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Umut Aydın  
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.09.1991 Pendik / İstanbul  
E-mail : [umutaydin.tr@hotmail.com](mailto:umutaydin.tr@hotmail.com)  
: [umutaydin.tr@yahoo.com](mailto:umutaydin.tr@yahoo.com)  
Yabancı Dil : İngilizce



Eğitim Derecesi	Okul / Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2015
Lise	Pendik Rauf Denktaş Lisesi / Fen Bilimleri	2009

## Yayınlar

Aydın, U., Ay, M., Etyemez, A. (2019) Milling of Magnesium Alloy with Micro Cutting Tools. 2nd International Congress on Engineering and Architecture 22-24 April 2019, Marmaris / Turkey.