



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**INCONEL 718 SÜPERALAŞIMIN MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA
(MQL) YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE FARKLI
NANO AKIŞKANLARIN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

TUNCAY DİKİCİ

DANIŞMAN
DOÇ. DR. BİLAL KURŞUNCU

BARTIN-2024



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İNCONEL 718 SÜPERALAŞIMIN MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL)
YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE FARKLI NANO
AKIŞKANLARIN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuncay DİKİCİ

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU

Üye : Prof. Dr. M. Sabri GÖK

Üye : Prof. Dr. Okan ÜNAL

BARTIN-2024

KABUL VE ONAY

Tuncay DİKİCİ tarafından hazırlanan “INCONEL 718 SÜPERALAŞIMIN MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL) YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE FARKLI NANO AKIŞKANLARIN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 26.11.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU

Üye : Prof. Dr. M. Sabri GÖK

Üye : Prof. Dr. Okan ÜNAL

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU danışmanlığında hazırlamış olduğum “INCONEL 718 SÜPERALAŞIMIN MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL) YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE FARKLI NANO AKIŞKANLARIN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

26.11.2024

Tuncay DİKİCİ

ÖN SÖZ

Bu tezin hazırlanmasında değerli ve önemli katkılarıyla beni yönlendiren ve tecrübelerini aktaran değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU'ya teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmayı destekleyerek maddi imkân sağlayan Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine, tez yazımında önerileriyle beni destekleyen çalışma arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Ayrıca bu tezi sonuçlandırmada motivasyon kaynağım olan eşime, çocuklarıma ve dualarıyla destek olan annem, babam ve kardeşlerime de teşekkür ederim.

Tuncay DİKİCİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

INCONEL 718 SÜPERALAŞIMIN MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL) YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE FARKLI NANO AKIŞKANLARIN İŞLENEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tuncay DİKİCİ

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU

Bartın-2024, sayfa: 74

Süperalaşımalar günümüz yüksek teknoloji ürünlerinin üretiminde talep edilen farklı ihtiyaçlara cevap verebilen malzemelerdir. Süperalaşımaların çok kullanılan nikel bazlı Inconel ailesi, yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu yüksek çekme dayanımı, sürünme direnci ve korozyona dayanıklılık özellikleriyle öne çıkmaktadır. Yapısında bulunan alaşım elementlerinin vermiş olduğu avantajlara karşılık işlenebilmesine yapmış olduğu negatif katkılar araştırmacılar tarafından dengelenmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle üretim süreçlerinde çok çeşitli yöntemler denenerek işlenebilirliği geliştirme çabası, çalışmaların odak noktası olmuştur.

Bu yöntemlerden minimum miktarda yağlama yöntemi soğutma ihtiyacına verdiği cevap ile çevrenin korunmasına ve insan sağlığına duyarlılık arasında denge kurmuş önemli bir metottur. Burada kullanılan soğutma sıvısına nano partikül ilavesi ile oluşturulan nano akışkanlar olayın seyrini değiştirebilecek derecede dikkate değer katkılar sunmaktadır. Çeşitli nano akışkanların değişik imalat yöntemlerinde denenerek prosese etkileri ölçülmektedir. Burada çalışmalar çeşitli ve sayıca çok olsa da henüz araştırılmamış oldukça fazla varyasyon bulunmaktadır.

Bu araştırma kapsamında nano akışkanların oldukça sınırlı çalışıldığı yüzey frezelemede, daha önce çalışılmamış nano akışkanlar minimum miktarda yağlama yöntemi ile denenmiştir. Bunlar çinko oksit (ZnO), magnezyum oksit (MgO) ve molibden disülfür (MoS₂) olarak belirlenmiştir. Üç farklı nano akışkan ve ilaveten karşılaştırma yapabilmek için baz akışkanla beraber 4 farklı akışkan, 4 farklı kesme hızı, 4 farklı ilerleme miktarı ve 4 farklı kesme derinliğinde denemesi yapılmıştır.

Kesme parametrelerinin etkilerini sağlıklı ölçebilmek için her kesme sonunda yüzeyde 3 farklı noktadan yüzey pürüzlülük ölçümü alınmıştır. Tezgâha bağlı dinamometre ile kesme kuvvetleri ölçülerek bilgisayara aktarılmış ve bilgisayar programında işlenmiştir. Sonuçlar farklı yöntemlerle analiz edilmiştir. Her işlem sonrasında takım ucu yerinden sökülerek mikroskop altında aşınma miktarına bakılmış ve ölçümler alınarak bilgisayara kaydedilmiştir.

Yapılan deneyler sonucu nano akışkanların değişen oranlarda kesme parametrelerini iyileştirdiği görülmüştür. Nano akışkanlar kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne 3. derece etkili olurken en iyi etkiyi takım ömrüne katkıda sunmuşlardır. En düşük kesme kuvveti değeri 35 m/dk ilerleme hızı ve 0,10 mm derinliği ile yapılan deneyde ölçülmüştür. Nano akışkanlar içerisinde en düşük pürüzlülük değeri %1'lik MoS₂ nano akışkanla yapılan deneyde görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: MgO, MoS₂, MQL, nano akışkan, ZnO.

Bilim Alanı Kodu: 91421, 91425.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT NANO FLUIDS ON MACHINABILITY IN MILLING OF INCONEL 718 SUPERALLOY USING MINIMUM QUANTITY OF LUBRICATION METHOD (MQL)

Tuncay DİKİCİ

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bilal KURŞUNCU

Bartın-2024, pp: 74

Superalloys are materials that can meet the different needs demanded in the production of today's high-tech products. Nickel-based Inconel family of superalloys, which is widely used, stands out with its high tensile strength, creep resistance and corrosion resistance properties at high temperatures. In spite of the advantages given by the alloying elements in its structure, the negative contributions to its machinability are tried to be balanced by the researchers. For this reason, the effort to improve machinability by trying various methods in production processes has been the focus of the studies.

Among these methods, the minimum amount of lubrication method is an important method that balances the response to the need for cooling with sensitivity to environmental protection and human health. The nanofluids created by adding nanoparticles to the cooling fluid used here offer remarkable contributions that can change the course of the event. Various nanofluids are tested in different manufacturing methods and their effects on the process are measured. Although the studies here are diverse and numerous, there are quite a few variations that have not yet been explored.

Within the scope of this research, nanofluids that have not been studied before were tested

with a minimum quantity of lubrication method in surface milling, where nanofluids have been studied very limitedly. These are designated as zinc oxide (ZnO), magnesium oxide (MgO) and molybdenum disulfide (MoS₂). Three different nano fluids and additionally 4 different fluids with base fluid, 4 different cutting speeds, 4 different feed rates and 4 different depths of cut were tested for comparison.

In order to measure the effects of cutting parameters, surface roughness measurements were taken from 3 different points on the surface at the end of each cut. Cutting forces were measured with a dynamometer connected to the bench, transferred to the computer and processed in the computer programme. The results were analysed by different methods. After each operation, the tool tip was removed and the amount of wear was examined under a microscope and the measurements were taken and recorded on the computer.

As a result of the experiments, it was observed that nano fluids improved cutting parameters at varying rates. While nano fluids were effective on cutting force and surface roughness in the 3rd degree, they contributed the best effect on tool life. The lowest cutting force value was measured in the experiment with 35 m/min feed rate and 0.10 mm depth. The lowest roughness value among the nano fluids was observed in the experiment with 1% MoS₂ nano fluid.

Keywords: MgO, MoS₂, MQL, nanofluid, ZnO.

Scientific Field Code: 91421, 91425.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖN SÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Süperalaşım lar.....	2
1.1.1 Demir Esaslı Süperalaşım lar.....	3
1.1.2 Kobalt Esaslı Süperalaşım lar.....	4
1.1.3 Nikel Bazlı Süperalaşım lar.....	4
1.2 Soğutma/Yağlama Yöntemleri.....	8
1.2.1 Taşkın Soğutma/Yağlama.....	8
1.2.2 Katı Yağlayıcılar/Soğutucular.....	8
1.2.3 Yüksek Basınçlı Soğutma.....	9
1.2.4 Sıkıştırılmış Havayla/Gazla Soğutma.....	9
1.2.5 Kriyojenik Soğutma.....	10
1.2.6 Minimum Miktarda Yağlama.....	10
1.3 Nano Akışkanlar.....	10
1.3.1 Molibden Disülfür.....	11

1.3.2 Çinko Oksit	11
1.3.3 Magnezyum Oksit.....	12
1.4 Deney Tasarım Yöntemleri.....	12
1.4.1 Taguchi Yöntemi	13
1.4.2 Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM).....	13
1.4.3 Merkezi Birleşik Tasarım Yöntemi (CCD)	14
1.4.4 Box-Behnken Tasarım Yöntemi (BBD).....	15
1.5 ANOVA Analiz Yöntemi.....	16
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1 Kesme Kuvveti Sonuçları.....	35
4.1.1 Taguchi Analizi Sonuçları	37
4.1.2 ANOVA Analizi Sonuçları.....	39
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları	40
4.3 Deney Parametrelerinin Grafikleri.....	44
4.4 Takım Ömrü Sonuçları	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Süperalaşım sınıflandırması (Groover, 1980)	3
1.2: $k=2$ ve $k=3$ için merkezi birleşik tasarım	15
1.3: Üç faktör için Box-Behnken tasarımı	16
3.1: Frezelemede kullanılan kesici takımlar	27
3.2: CNC freze tezgâhı	28
3.3: Minimum miktarda yağlama ünitesi	29
3.4: Kuvvet amplifikatörü	30
3.5: Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	31
3.6: Vision SX45 stereo mikroskop	31
3.7: Çinko oksit (a), magnezyum oksit (b) ve molibden disülfür (c) nano tozlar	32
3.8: Analitik tartı (a) ve ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (b)	33
4.1: Kesme kuvveti sinyal/gürültü oranı grafiği	38
4.2: Yüzey pürüzlülüğü sinyal/gürültü oranı grafiği	43
4.3: Kesme hızı ve kesme derinliğinin kesme kuvvetine etki grafiği	44
4.4: Kesme hızı ve nano akışkanın kesme kuvvetine etki grafiği	45
4.5: Kesme hızı ve ilerleme oranının kesme kuvvetine etki grafiği	46
4.6: İlerleme oranı ve kesme derinliğinin kesme kuvvetine etki grafiği	47
4.7: İlerleme oranı ve nano akışkanın kesme kuvvetine etki grafiği	48
4.8: Kesme derinliği ve nano akışkanın kesme kuvvetine etki grafiği	50
4.9: Gerçekleşen ve tahmini kesme kuvveti grafiği	51
4.10: Kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme kuvveti 3B grafiği	52
4.11: Kesme hızı, kesme derinliği ve kesme kuvveti 3B grafiği	53
4.12: Kesme hızı, nano akışkan ve kesme kuvveti 3B grafiği	54
4.13: İlerleme oranı, kesme derinliği ve kesme kuvveti 3B grafiği	55
4.14: İlerleme oranı, nano akışkan ve kesme kuvveti 3B grafiği	56
4.15: Kesme derinliği, nano akışkan ve kesme kuvveti 3B grafiği	57
4.16: Nano akışkan-takım ömrü grafiği	59
4.17: Baz akışkan aşınma görüntüleri	60
4.18: Baz akışkan + %1'lik ZnO aşınma görüntüleri	61
4.19: Baz akışkan + %1'lik MgO aşınma görüntüleri	61
4.20: Baz Akışkan + %1'lik MoS ₂ aşınma görüntüleri	63

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Ticari Nikel Bazlı Süperalaşımın İçeriği (% ağırlıkça) (Akca ve Gürsel, 2015).....	6
2.1: Inconel 718'in fiziksel ve mekanik özellikleri	19
3.1: Mitutoyo SJ 310 pürüzlülük ölçüm cihazının bazı özellikleri	30
3.2: Nano malzemelerin termofiziksel özellikleri(Chaudhari vd., 2024; Ram vd., 2024; Senthilkumar & Deepak, 2024).....	32
3.3: Deney parametreleri seviyeleri.....	33
3.4: Deney parametreleri için Taguchi L16 ortogonal dizi	34
4.1: Deney çalışmasında elde edilen kesme kuvveti sonuçları	36
4.2: Taguchi kesme kuvveti analizi	37
4.3: Kesme kuvveti ANOVA analizi.....	39
4.4: Deney çalışmasında elde edilen pürüzlülük değerleri ortalamaları	41
4.5: Taguchi yüzey pürüzlülüğü analizi	42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
a _p	: Kesme derinliği
B	: Bor
BX	: Boraks
C	: Karbon
Co	: Kobalt
CO ₂	: Karbon dioksit
Cr	: Krom
CuO	: Bakır oksit
dk	: Dakika
Fe	: Demir
Fr	: İlerleme miktarı (Feed rate)
f _z	: Ağız başına ilerleme miktarı
γ	: Gama
GPa	: Giga Paskal
hBN	: Hekzagonal bor nitür
kN	: Kilo Newton
L	: Litre
l/dk	: Litre/dakika
m/dk	: Metre/dakika
ml/sa	: Mililitre/saat
ml/dk	: Mililitre/dakika
MgO	: Magnezyum oksit
mm	: Milimetre
mm/ağız	: Milimetre/ağız
mm/dev	: Milimetre/devir
Mo	: Molibden
MoS ₂	: Molibden disülfür
MPa	: Mega Paskal
N	: Newton

N ₂	: Nitrojen
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
nm	: Nanometre
POE	: Poliester
PTFE	: Politetrafloroetilen
R _a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Re	: Renyum
SiC	: Silisyum karbür
Ta	: Tantal
Ti	: Titanyum
TiAlN	: Titanyum alüminyum nitrür
V _c	: Kesme hızı
W	: Tungsten
ZnO	: Çinko oksit
Zr	: Zirkonyum
µm	: Mikrometre
°C	: Derece Celsius (selsiyus)

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans analizi (Analysis of variance)
CCCD	: Sınırlandırılmış merkezi birleşik tasarım (Circumscribed central composite design)
CCD	: Merkezi birleşik tasarım (Central composite design)
CNC	: Bilgisayar destekli nümerik kontrol (Computer numerical control)
CPU	: Merkezi işlem birimi (Central Proses Unit)
FCCD	: Yüzey merkezli merkezi birleşik tasarım (Face-centred composite design)
FDA	: Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi
GRA	: Gri ilişki analizi (Grey Relational Analysis)
HRC	: C tipi uçlu Rockwell sertliği (Rockwell Hardness C)
MQL	: Minimum miktarda yağlama (Minimum quantity lubrication)
MQSL	: Minimum miktarda katı yağlama (Minimum quantity solid lubrication)
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nano tüp (Multi-walled carbon nanotube)
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapor Deposition)
RPD	: Sağlam parametre tasarımı (Robust parameter design)
RSM	: Yanıt yüzeyi yöntemi (Response surface methodology)
SDS	: Sodyum dodesil sülfat (Sodium Dodecyl Sulfate)
S/N	: Sinyal/Gürültü oranı
UV	: Ultraviyole

1. GİRİŞ

Bu bölümde tezin literatüre yapması beklenen katkı hakkında bilgi verilmiştir ve tezin kapsamına giren temel bilgiler özetlenmiştir. Özellikle bu çalışmanın üzerine bina edildiği konu başlıkları daha detaylı işlenerek sonraki bölümlerde bahsedilecek konuların anlaşılmasına katkı sağlanması hedeflenmiştir.

1.1 Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasında Inconel 718 farklı nano tozlarla hazırlanmış nano akışkanlarla minimum miktarda yağlama (Minimum Quantity Lubrication-MQL) yöntemi kullanılarak talaşlı işleme tabi tutularak yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, takım aşınma miktarı ve takım ömrü üzerine etkilerine bakılmıştır. İşleme yöntemi olarak yüzey frezeleme kullanılmıştır. Kullanılan nano tozlar molibden disülfür (MoS_2), çinko oksit (ZnO) ve magnezyum oksit (MgO) olarak seçilmiştir. Optimum kesme parametrelerini tespit edebilmek için dört farklı kesme hızı (30, 35, 40 ve 45 m/dk), dört farklı ilerleme miktarı (0,05, 0,07, 0,09 ve 0,11 mm/ağız) ve dört farklı kesme derinliği (0,10, 0,15, 0,20 ve 0,25 mm) kullanılarak deneyler tasarlanmıştır.

Inconel 718 ileri bölümlerde bahsedileceği gibi yüksek teknoloji sanayisinde en çok kullanılan süperalaşımdır. Süperalaşımlar gösterdikleri üstün mekanik dayanıma karşın işlenmesi/kesilmesi zor malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Bu nedenle üzerine sayısız çalışmalar yapılarak işleme maliyetleri ile işlenmesinin çevreye etkilerini dengeleyecek yöntemler ve malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bir malzemenin işlenebilirliğini iyileştirme hem maliyet açısından hem de üretimin çevreye verdiği hasarı azaltma açısından önemlidir. Bu çalışmada kullanılan minimum miktarda yağlama ve nano akışkan kullanma ikilisi bu faydayı daha da üst düzeye çıkaracağı tezi üzerinden yola çıkılmıştır.

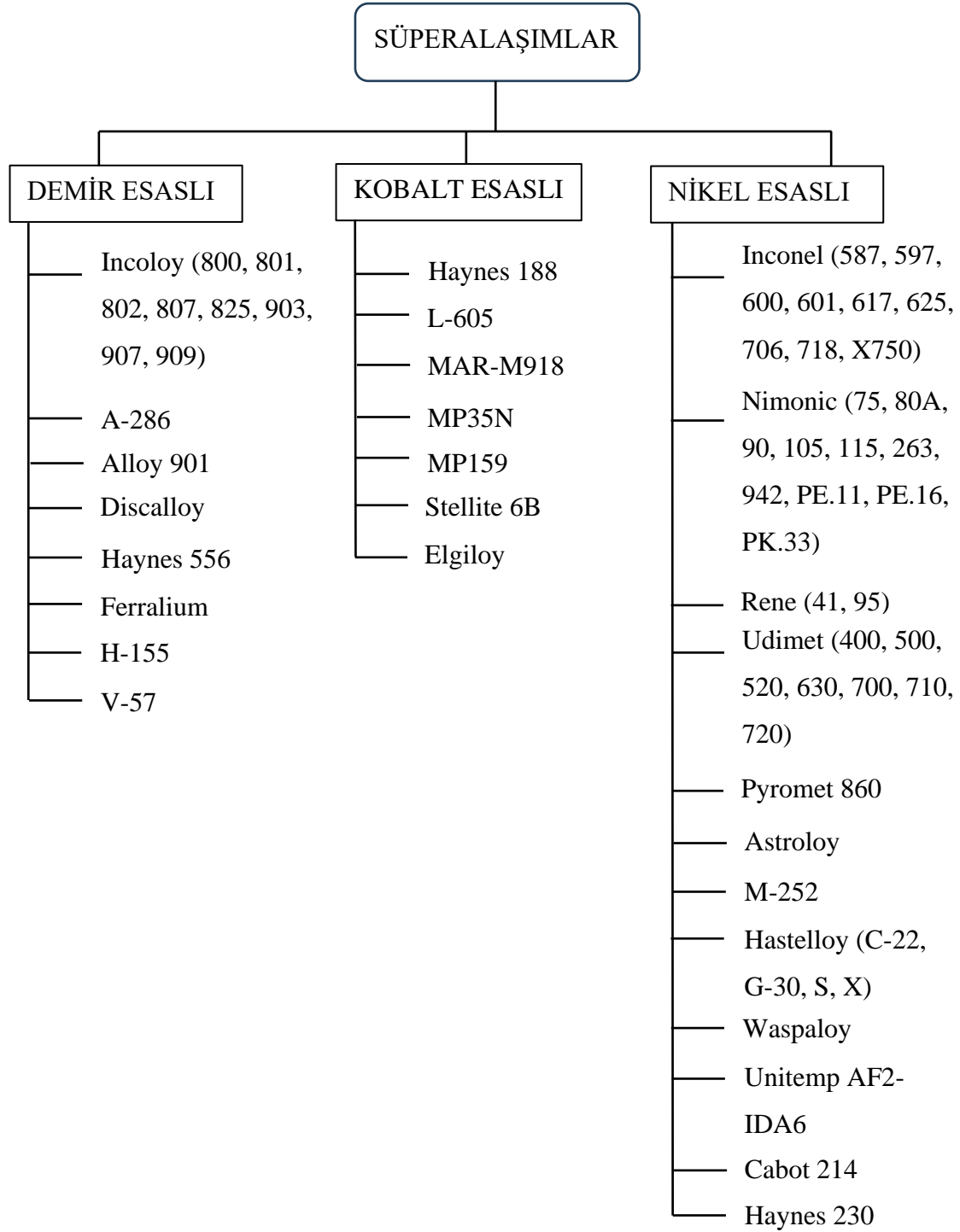
Bu tezin çalışmaları Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine sunulan projenin desteklenmesiyle Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında yürütülmüştür.

Tezin bu bölümünde tezde kullanılan malzeme ve yöntemler hakkında teorik bilgilere yer verilmiştir.

1.2 Süperalaşımalar

Süperalaşımalar üst düzey performans taleplerini karşılayabilen ve ileri teknoloji üretimlerindeki yüksek sıcaklıklarda mukavemet, çeşitli korozyonlara karşı dayanım ve sürünme direnci vb. güçlü özellikleri bir arada içeren malzemelerdir (Batuk, 2019). Günümüz teknolojisi üst düzey mekanik özellikleri kullanmak hususunda oldukça talepkârdır. Çünkü teknolojik rekabette öne geçme çabası, üstün dayanıklılık gerektiren makinelerin tasarlanması ve komplike görevleri aynı anda yapmayı gerektiren alanların ortaya çıkması malzemedeki talep edilen özellikleri de farklılaştırmıştır.

Süperalaşım kategorisi demirli metaller ve demir dışı metaller arasında duran bir sınıftır. Demir esaslı olanları olduğu gibi nikel veya kobalt bazlı olanları da vardır. Şekil 1.1’de süperalaşımaların sınıflandırılmasına yer verilmektedir. Ayrıca baz elementin yanında değişen oranlarda olmakla birlikte malzeme özelliklerine ciddi etki eden birkaç farklı elementleri de içermektedir (Groover, 1980). Bunlardan Inconel ailesi nikel (Ni) bazlı ve içinde önemli oranda krom (Cr) ve kobalt (Co) içeren bir gruptur. Uçak ve roket motoru, türbin kanatları, uzay araçları, nükleer reaktörler gibi yüksek sıcaklıktaki uygulama alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır (Qadri vd., 2019).



Şekil 1.1: Süperalaşım sınıflandırması (Groover, 1980)

1.1.1 Demir Esaslı Süperalaşım

Yapısında diğer süperalaşımlara göre daha fazla demir (Fe) kullanılmasından dolayı daha uygun maliyeti ile öne çıkar. Paslanmaz çeliklere göre ise daha fazla miktarda nikel (Ni) ve krom (Cr) içerirler. Tokluk dayanımları iyi düzeydedir. Yüksek sıcaklıklarda sertliğini ve

esnekliğini koruyabilen yapısıyla türbin diskleri ve dövme rotorlarda kullanılır (Sager, 2018).

1.1.2 Kobalt Esaslı Süperalaşımalar

Ağırlıklı olarak kobalt elementinden oluşan kobalt bazlı süperalaşımalar önemli miktarda nikel, krom ve tungsten (W) de içerir. Korozyon, aşınma, sürünme ve yüksek sıcaklık dirençlerinden dolayı tercih edilmektedir. Nikel bazlı süperalaşımlara göre daha iyi termal iletkenliğe ve daha düşük termal genleşme katsayısına sahiptir (Nohutçu ve Kaçar, 2024).

1.1.3 Nikel Bazlı Süperalaşımalar

Bu grup, süperalaşımalar içinde en yaygın olarak kullanılan kategoriyi oluşturmaktadır. Yüksek dayanımına karşılık düşük ağırlık oranıyla roket motorları, nükleer reaktörler, denizcilik ekipmanları, petrokimya endüstrisi ve gıda sanayisinde kullanılmaktadır. Bu kadar farklı ve zorlu alanlarda kullanılmasının temel sebebi olarak yüksek sıcaklıklarda korozyona, mekanik ve termal yorgunluğa, sürünmeye ve erozyona karşı direncini koruması gösterilebilir (Ezugwu vd., 2003).

Bazı ticari nikel bazlı alaşımların kullanım yerlerine örnek verecek olursak:

- a) Inconel 600 alaşımı (76Ni-15Cr-8Fe), nükleer reaktörler için neredeyse standart bir malzemedir. Ayrıca kimya endüstrisindeki ısıtıcılarda, damıtma ünitelerinde, buharlaştırıcı tüplerinde ve kondansatörlerde kullanılır.
- b) Nimonic 75 alaşımı (Titanyum ve karbon ilaveli 80/20 nikel-krom) gaz türbinlerinde, fırın bileşenlerinde ve ısıtım ekipmanlarında tercih edilir.
- c) Inconel 601 alaşımı alüminyum ve silikon ilaveli düşük nikel (%61) içeriği ile iyileştirilmiş oksidasyon ve nitrürleme direnci sayesinde kimyasal işleme tesislerinde, kirlilik kontrolünde, hava araçlarında ve güç santrallerinde kullanım sahası bulur.
- d) Alüminyum ve titanyum ilavesi ile yaşlandırma sertleştirilmesi yapılan Inconel X750 alaşımı, gaz türbinlerinde, roket motorlarında, nükleer reaktörlerde, basınçlı kaplarda, takımlarda ve uçak yapısında kullanılmaktadır.

- e) Inconel 718 (55Ni-21Cr-5Nb-3Mo) alaşımı niyobyum ilavesi ile kaynak sırasında çatlama sorunun üstesinden gelebilir. Bu sayede uçak ve sanayi tipi gaz trbın motorlarında ve kriyojenik tankların yapımında yararlanılmaktadır.
- f) Hastelloy X (48Ni-22Cr-18Fe-9Mo+W) havacılık uygulamaları için yüksek sıcaklıkta düz haddelenmiş ürün olarak kullanılır.
- g) Waspaloy (60Ni-19Cr-4Mo-3Ti-1.3Al) alaşımı jet motoru uygulamaları için tescilli alaşımdır.
- h) ATI 718Plus, Inconel 718 alaşımının çalışma sıcaklığına göre 55 C'yi aşan bir sıcaklıkta daha iyi performans göstermesiyle motor üreticilerinin yakıt verimliliğini arttırmasına olanak tanıyan daha düşük maliyetli bir alaşımdır.
- i) Nimonic 90 (Ni %54, Cr %18-21, Co %15-21, Ti %2-3, Al %1-2) alaşımı trbın kanatları, diskler, dövmeler, halka bölümleri ve sıcak işleme takımları için kullanılır.
- j) Ren N6 (4Cr-12Co-1Mo-W6 -Ta7- Al5.8 - Hf 0.2 -Re5-Ni) jet motorlarında kullanılan 3. nesil tek kristal alaşımıdır.
- k) TMS 162 (3Cr- 6Co-4Mo-6W-6Ta-6Al-5Re-6Ru-Ni) trbın kanat malzemesi olarak kullanılan 5. nesil tek kristal alaşımdır.

Diğer bazı nikel bazlı süperalaşımların içeriği Tablo 1.1'de gösterilmiştir (Akca ve Grsel, 2015).

Tablo 1.1: Ticari Nikel Bazlı Süperalaşımın İçeriği (% ağırlıkça) (Akca ve Gürsel, 2015)

Alaşım	Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Nb	Al	Ti	Hf	C	B	γ	Zr	Diğerleri
Geleneksel Döküm Alaşımları															
Mar-M246	8.3	10.0	0.7	10.0	3.0			5.5	1.0	1.50	0.14	0.02		0.05	
René 80	14.0	9.5	4.0	4.0				3.0	5.0		0.17	0.02		0.03	
IN-713LC	12.0		4.5				2.0	5.9	0.6		0.05	0.01		0.10	
C1023	15.5	10.0	8.5					4.2	3.6		0.16	0.01			
Yönlendirilmiş Katılaşmış Alaşımlar															
IN792	12.6	9.0	1.9	4.3	4.3			3.4	4.0	1.00	0.09	0.02		0.06	
GTD111	14.0	9.5	1.5	3.8	2.8			3.0	4.9		0.10	0.0			
1. Nesil Tek Kristal Alaşımları															
PWA 1480	10.0	5.0		4.0	12.0			5.0	1.5						
René N4	9.8	7.5	1.5	6.0	4.8		0.5	4.2	3.5	0.15	0.05	0.00			
CMSX-3	8.0	5.0	0.6	8.0	6.0			5.6	1.0	0.10					
2. Nesil Tek Kristal Alaşımları															
PWA 1484	5.0	10.0	2.0	6.0	9.0	3.0		5.6		0.10					
René N5	7.0	7.5	1.5	5.0	6.5	3.0		6.2		0.15	0.05	0.00	0.01		
CMSX-4	6.5	9.0	0.6	6.0	6.5	3.0		5.6	1.0	0.10					
3. Nesil Tek Kristal Alaşımları															
René N6	4.2	12.5	1.4	6.0	7.2	5.4		5.8		0.15	0.05	0.00	0.01		
CMSX-10	2.0	3.0	0.4	5.0	8.0	6.0	0.1	5.7	0.2	0.03					

Tablo 1.1: Ticari Nikel Bazlı Süperalaşımın İçeriği (devam ediyor)

Alaşım	Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Nb	Al	Ti	Hf	C	B	γ	Zr	Diğerleri
Dövülebilir Alaşımalar															
IN 718	19.0		3.0				5.1	0.5	0.9			0.02			18.5Fe
René 41	19.0	11.0	10.0					1.5	3.1		0.09	0.005			
Nimonic 80A	19.5							1.4	2.4		0.06	0.003		0.06	
Waspaloy	19.5	13.5	4.3					1.3	3.0		0.08	0.006			
Udimet 720	17.9	14.7	3.0	1.3				2.5	5.0		0.03	0.03		0.03	
Toz Olarak İşlenmiş Süperalaşımalar															
René 95	13.0	8.0	3.5	3.5			3.5	3.5	2.5		0.065	0.013		0.05	
René 88DT	16.0	13.0	4.0	4.0			0.7	2.1	3.7		0.03	0.015			
N18	11.2	15.6	6.5					4.4	4.4	0.5	0.02	0.015		0.03	
IN100	12.4	18.4	3.2					4.9	4.3		0.07	0.02		0.07	

1.2 Soğutma/Yağlama Yöntemleri

Taylor tarafından ortaya konulduğu 1907'den beri su kullanımıyla başlayan soğutma yöntemleri talaşlı imalatın önemli unsurlarından ve temel belirleyici faktörlerinden biri haline almıştır. Su, uygun maliyetli bir girdi olmasına karşın yanında getirmiş olduğu korozyon problemleri nedeniyle tek başına kullanılabilir bir malzeme değildir. Dolayısıyla kesme bölgesinden ısıyı uzaklaştırarak takım ömrünü uzatan, yağlayıcı özelliğiyle sürtünmeyi azaltarak yüzey kalitesini arttıran ve bir film tabakası oluşturarak korozyonun önlenmesine katkı sağlayan kesme sıvılarının önemi artmaya devam etmiştir. Buna paralel olarak farklı yöntemler ve kombinasyonlar geliştirilmiştir. Kesme sıvıları, imalat sürecinin yaklaşık olarak %7-17'si arasında bir maliyeti oluşturmaktadır.

Soğutma/yağlama sağlayabilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Taşkın Soğutma
- b) Katı Yağlayıcılar/Soğutucular
- c) Yüksek Basıncılı Soğutma
- d) Basıncılı Hava ile/Gazla Soğutma
- e) Kriyojenik Soğutma
- f) Minimum Miktarda Yağlama (Sharma vd., 2009).

1.2.1 Taşkın Soğutma/Yağlama

Taşkın soğutma 2-31 l/dk seviyelerinde soğutucu akışkanın kesme bölgesine gönderildiği geleneksel bir yöntemdir. Büyük miktarlar da kullanılan soğutucu akışkan maliyet artışına sebep olmakla birlikte bu yöntem kesme bölgesinin yağlanması ve işleme sıcaklıklarının kontrol altında tutulması bakımından son derece iyi iş çıkarmaktadır. Bitmiş yüzey kalitesi de buna paralel olarak son derece iyi düzeydedir (Lopes vd., 2023).

1.2.2 Katı Yağlayıcılar/Soğutucular

Grafit gibi yağlayıcı özelliği iyi bilinen malzemeler bilim insanlarına katı yağlayıcıları araştırmak için geçerli bir neden oluşturdu. Grafit ve MoS₂ gibi çokça kullanılan katı

yağlayıcıların kuru toz formu, lameller yapıları nedeniyle etkili yağlayıcı malzemelerdir. Lameller, hareket yönünde yüzeye paralel olarak yönelir. Büyük kuvvetler altında bile lameller yapı teması önler ve birbiri üstünde kayarak düşük sürtünmeye sebep olur. Katı yağlayıcılar yüksek veya düşük sıcaklık ve yüksek vakum gibi zorlu koşullarda düşük sürtünmeli yüzeyler sağlayarak tribolojide önemli bir ihtiyaca cevap verirler. Yaygın olarak kullanılan katı yağlayıcılar, grafit, molibden disülfür, polimer bir malzeme olan politetrafloroetilen (PTFE), bor nitrür, talk, kalsiyum florür, sezyum florür ve tungsten disülfür bulunur (Ojolo vd., 2011).

1.2.3 Yüksek Basıncılı Soğutma

1950'lerin başlarında Pigott ve Colwell tarafından araştırılmaya başlanan bu yöntem çok sayıda deneyin konusu olmuştur. Genellikle 80 bar üzerindeki basınçlı kesme sıvısı nozul ile kesme bölgesinin çeşitli kısımlarına yönlendirilir. Yüksek basınçlı soğutma işlenmesi zor malzemelerde kullanılır ve yüksek basınç nedeniyle talaş kırıcı etki oluşturur. Araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre kesme kenarı boyunca yüksek sıcaklık gradyanı sebebiyle klasik soğutmaya göre yanak aşınmasından daha çok çentik aşınması meydana gelmektedir. Yine bu yöntemde kesme kuvveti ve kesici takım ile iş parçası malzemesi arasındaki temas uzunluğunda azalmalar gözlemlenmiş ve kesme sıvısının takım-talaş arayüzüne nüfuz etmesinin verimli soğutma ve yağlama sağladığı ileri sürülmüştür (Uhlmann vd., 2024).

1.2.4 Sıkıştırılmış Havayla/Gazla Soğutma

Bu yöntemin esasında vorteks tüpü denilen basit, hafif ve sessiz bir cihaz yer almaktadır. Vorteks tüpüne gelen sıkıştırılmış gaz akımı, biri giriş akımından daha sıcak diğeri giriş akımından daha soğuk iki kısma ayrılır. Ranque tarafından icat edilen bu cihazın Hilsch tarafından sistematik deneysel sonuçları ortaya konmuştur. Birçok bilim insanı tarafından çeşitli alanlarda kullanım çalışmaları yapılmıştır. Vorteks tüpü tarafından üretilen soğuk gaz işleme sırasında kesme bölgesini soğutmak için de kullanılır. Yapılan çalışmalarda takım ömrünü on kata kadar arttırdığı, yanak aşınmasını ve krater aşınmayı azalttığı ve yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü görüldü (Yüksel & Onat, 2015).

1.2.5 Kriyojenik Soğutma

Çoğunlukla sıvı nitrojen (N_2 , $-196^\circ C$) veya sıvı karbondioksit (CO_2 , $-78^\circ C$) gibi ekstrem soğuklukta materyaller kullanılarak yapılan soğutma işlemine denir. İmalat yöntemi ve iş parçasının durumuna göre belirlenmiş amaca yönelik olacak şekilde

- a) İş parçasını soğutma
- b) Takım-iş parçası veya takım-talaş arayüzeylerine sıvı gönderme
- c) Takımı soğuma
- d) Talaşı soğutma

yöntemlerinden biri tercih edilir. Bu çok düşük sıcaklık ortamı uzun takım ömrü, iyi yüzey bütünlüğü, azalan kesme kuvvetleri, ciddi oranda düşen kesme bölgesi sıcaklığı ve iyileşen yüzey pürüzlülüğü olarak etkisini göstermektedir (Hong vd., 1999; Li vd., 2024).

1.2.6 Minimum Miktarda Yağlama

Kesme sıvılarının getirmiş olduğu maliyetle birlikte çevre koruma kanunlarının getirdiği kısıtlamalar ve maliyetler, yine kesme sıvılarının yoğun kullanılmasıyla oluşan sağlık sorunları araştırmacıları yeni yollar bulmaya teşvik etti. Bu yollardan biri de kesme sıvısını bir püskürtme mekanizmasıyla kesme bölgesine doğrudan göndermek oldu. Minimum miktarda yağlama (Minimum Quantity Lubrication-MQL) yönteminde 50 ila 500 ml/sa yağlayıcı, hava ile basınç altında bir veya daha fazla nozulla pulverize bir şekilde yollanır. Böylece taşkın yağlamaya göre 3-4 kat daha az yağlayıcı kullanılır. Bu da iş parçasını ve takımını temizleme zamanından tasarruf, termal şokta azalma ve iş parçası yüzey bütünlüğünde iyileşme getirir (Boubekri vd., 2010).

1.3 Nano Akışkanlar

Nano akışkanlar bir baz soğutma sıvısı içerisine eklenen nano partiküller sayesinde iyileştirilmiş ısı transfer yeteneğine sahip soğutma ve yağlama görevlerini üstlenen akışkanlardır. Nanometre boyutlarında üretilmiş parçacıklar baz sıvının termal iletkenlik, termal difüzyon, viskozite, ısı transfer katsayısı gibi termofiziksel özelliklerini değiştirir. Nano parçacıklar çoğunlukla metallere, oksitlere, karbürlerden ve karbon nanotüplerden oluşur. Bir veya daha fazlası temel sıvıyla karıştırılarak koloidal bir yapı sentezlenir. Arttırılmış ısı transfer özelliğiyle birçok endüstri alanında örneğin ısı

değiştiricilerde, solar termal dönüştürücülerde, solar buhar üreticilerinde, türbülatorlerde, CPU soğutucularında ve benzeri yerlerde kullanılmaktadır (Amin vd., 2022).

1.3.1 Molibden Disülfür

19. yüzyılın başlarından itibaren kimya endüstrisinde üretime giren molibden, önemli kimyasal ve fiziksel özellikleriyle otomotiv, petrol ve mekanik endüstrisinde kendine kullanım alanı bulmuştur. Molibden disülfürün tabakalı yapısı tabakalar arasında kaymaya izin verdiği için grafit gibi iyi bir yağlayıcıdır. Kuru hava veya vakum ortamında MoS₂ filmi ile 0,01 gibi çok düşük sürtünme katsayısı bulunmuştur. Buzun buza sürtünme katsayısının 0,025 olduğu düşünüldüğünde bunun değeri daha rahat anlaşılacaktır. Termal kararlılığı oldukça iyi olan MoS₂ 400°C'de oksitlenmeye başlasa da 525°C'ye kadar yağlayıcı özelliğini kaybetmez. Sıcak ya da soğuk suda çözünmeyen MoS₂'ün gres yağı, etanol ve eterde de kimyasal kararlılığı yüksektir. Yağlayıcılığına katkı sağlayan en önemli özelliği ise metal yüzeye yüksek bağlanma kuvveti ile bağlanıp sürtünme esnasında zarar görmeden büyük yükler altında çalışabilmesidir. Anti-radyasyon özelliği ile yağlama sırasında zarar görmez ve bu sayede savunma sanayisinde, uzay araçlarında ve atomik reaktörlerde kullanılır (Uysal, 2016).

1.3.2 Çinko Oksit

Çok farklı alanlarda kullanımı olduğu için üzerine oldukça fazla çalışma yapılan bir malzeme olan çinko oksitin bunu hak etmesini sağlayan farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri vardır. Demirden sonra doğada en çok bulunan ikinci metal oksit olması ve birçok farklı yolla sentezlenebilmesi nedeniyle ucuz, kolay bulunabilir ve güvenli bir malzemedir. Çinko oksit nano parçacıkları, farklı öncüller ve farklı sentezleme yolları ile morfolojisi değiştirilerek farklı fiziksel ve kimyasal davranış göstermesi sağlanabilir. Suda çözünmeyen bir yarı iletken olan çinko oksit optik ve fotokatalitik özelliğinin de etkisiyle güneş panelleri, kimyasal sensörler ve fotokatalizörlerde kullanım alanı bulur. UV ışınlarını yüksek oranda tutabilmesi ve düşük toksik özelliğiyle de arıtma tesislerinde ve biyomedikal alanda fazlaca kullanılır. Mikroplara karşı güçlü direnç göstermesi ve asidik ortamda çözünebilmesi göz önüne alınarak Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından güvenli olarak onaylanması da onu gıda kimyasında, biyolojik ajanlık ve nano tıp uygulamalarında güçlü bir aday haline getirmiştir (Lakshmipriya & Gopinath, 2020).

Çinko oksit nano partikülleri sıfır, bir, iki ve üç boyutlu olarak üretilebilmektedir. Nano-küresel yapı sıfır boyutlu yapıya; nano-çubuk, nano-halka, nano-tüp ve nano-tel bir boyutlu yapıya; nano-pelet, nano-levha iki boyutlu yapıya; nano-çiçek ve nano-kar tanesi üç boyutlu yapıya örnek verilebilir. Farklı sentezleme yöntemleri bulunmaktadır. Kimyasal sentezlemede sıvı formunda (örneğin çökeltme, sol-jel, hidrotermal ve solvotermal yöntemleri) veya buhar fazında (örneğin piroliz ve inert gaz yoğunlaştırma) gerçekleştirilebilir. Fiziksel sentez olarak yüksek enerjili bilyalı öğütme ve lazer ablasyonu örnek verilebilir. Yeşil sentez olarak da bitkisel kaynaklardan elde edilmesi gösterilebilir ancak literatürde yeşil sentez daha az araştırılmıştır (Mendes vd., 2024).

1.3.3 Magnezyum Oksit

MgO birden çok alanda kullanılan önemli bir malzeme olmasıyla araştırmalara konu edilmektedir. Onu bu derece önemli kılan özellikleri; korozyon direnci, yüksek termal iletkenliğine karşın düşük elektrik iletkenliği, doğrudan aleve maruziyette direnç göstermesi, mekanik ve fiziksel dayanımı ve mükemmel optik aktarımı sayılabilir. Üretiminde temel kaynak tuz göllerinin suyudur. MgO nano partiküllerinin üretimi için sol-jel, kimyasal çökeltme, hidrotermal, lazer-ablasyon, tutuşturma prosesi ve piroliz gibi yöntemler kullanılır (Nasiri vd., 2022).

1.4 Deney Tasarım Yöntemleri

Optimizasyon farklı anlamlar ve alanlarda da kullanılan geniş bir kavramdır. Bu çalışmada daha çok deney desenlerinin optimizasyonu için kullanılan yöntemler ele alınacaktır. Optimizasyon için bir fonksiyonu icra eden değişken değerlerin sonuçlarından üretilmiş bir aralıktan minimum veya maksimumu bulma işlemi denilebilir. İteratif bir yöntem olan optimizasyon belirli bir sonlandırma ölçütüne göre sonlandırılır (Esad YİĞİT, 2014).

Deney optimizasyonu denildiğinde denenecek istenen parametrelerden en iyi sonucu almak anlaşılır. Eğer verimde bir iyileşme isteniyorsa maksimum bölge eğer ürün boyutundaki değişkenliğe bakılıyorsa minimum bölgeyi bulmak hedeflenir. Deney desenlerinin optimizasyonunda çokça kullanılan yöntemler ve içeriğini şöyle sıralayabiliriz.

1.4.1 Taguchi Yöntemi

Genichi Taguchi tarafından 1980'de geliştirilen yöntem tasarlanmış deneylere olan ilginin artmasında önemli pay sahibidir. Taguchi'nin savunduğu 3 temel amaç vardır.

- a) Süreçleri çevresel faktörlere veya kontrol edilmesi zor diğer faktörlere duyarsız hale getirmek,
- b) Ürünleri bileşenlerden iletilen varyasyona duyarsız hale getirmek,
- c) Ortalamayı istenen değere zorlayan ve aynı anda bu değer etrafındaki değişkenliği azaltan süreç değişkenlerinin seviyelerini bulmak.

Başlangıçtaki tarımsal kökeninin çok ötesine geçerek tasarlanmış deneyler, otomotiv, havacılık, elektronik gibi mühendislik dallarının yanı sıra hizmet sektörü, finansal hizmetler, hükümet operasyonları ve kâr amacı gütmeyen birçok iş kolu da dahil olmak üzere nerdeyse kullanılmadığı alan yok gibidir.

Sağlam parametre tasarımı (Robust Parameter Design-RPD), hedefe ulaşmak için bir süreç veya ürünlerdeki kontrol edilebilir faktörlerin (veya parametrelerin) seviyelerini seçmeye odaklanan ürün gerçekleştirme faaliyetlerine yönelik bir yaklaşımdır. Temelde iki önemli adımı vardır. Biri çıktı yanıtının ortalamasının istenen bir seviyede veya hedefte olmasını sağlamak ve diğeri bu hedef değer etrafındaki değişkenliğin mümkün olduğunca küçük olmasını sağlamaktır. Bir süreç üzerinde bir RPD çalışması yapıldığında, buna genellikle süreç sağlamlığı çalışması denir. İşte Taguchi yöntemi bu RPD çalışmalarına yönelik ihtiyaca bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır (Montgomery, 2017)

1.4.2 Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM)

1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilen yöntemde iki temel gözlemden yola çıkılmıştır. Birincisi yanıt değişkeni genellikle hemen gözlemlenebilir ve ikincisi deneyi yapan bir sonraki deneyi planlamak için kullanılacak küçük bir grup çalışmasından önemli bilgileri hızlı bir şekilde öğrenebilir. Bu ikisi kısaca anındalık ve ardışıklık olarak adlandırılmaktadır.

RSM, ilgilenilen bir yanıtın çeşitli değişkenlerden etkilendiği ve amacın bu yanıtı optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için yararlı olan matematiksel ve

istatistiksel tekniklerin bir koleksiyonudur. Örneğin sürecin verimini (y) maksimize etmek için sıcaklık (x_1) ve basıncın (x_2) fonksiyonu hesaplanmak istendiğinde

$$y = f(x_1 + x_2) + \varepsilon \quad (1)$$

formülü kullanılır. Burada ε , y yanıtında gürültü veya hatayı temsil eder. Beklenen yanıtı

$$E(y) = f(x_1 + x_2) = \eta \quad (2)$$

ile gösterirsek,

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (3)$$

ile temsil edilen yüzeye yanıt yüzeyi denir (Montgomery, 2017).

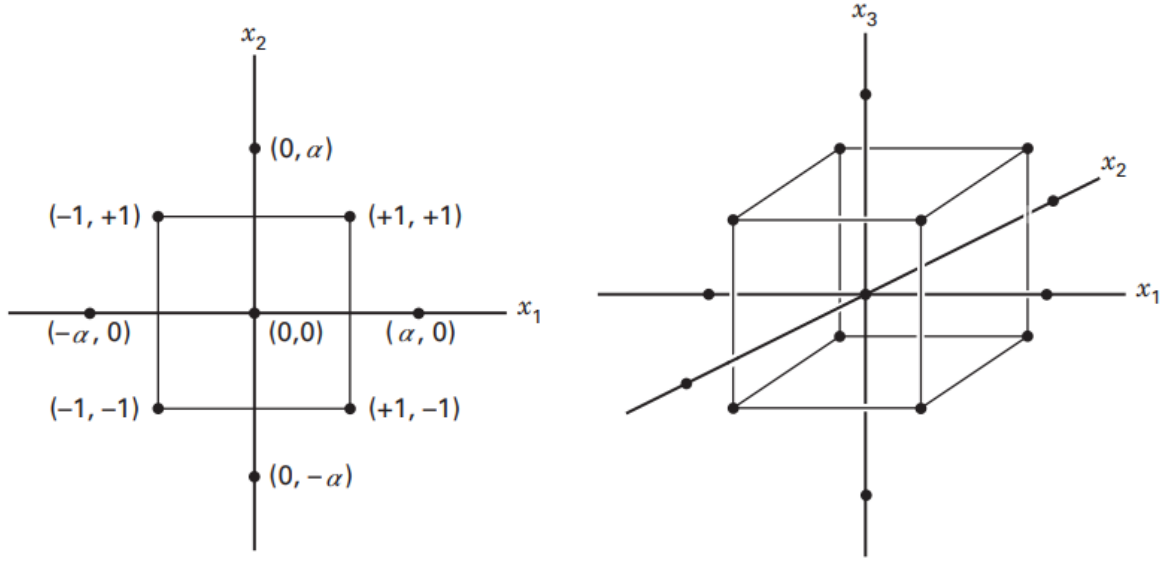
1.4.3 Merkezi Birleşik Tasarım Yöntemi (CCD)

Box ve Wilson tarafından 1951'de geliştirilen merkezi birleşik tasarım (Central composite design) iki seviyeli tam veya kesirli faktöriyel tasarım (+1 ve -1), ek aksenal noktalar veya yıldız noktaları (0, $-\alpha$ ve $+\alpha$) ve en az bir merkezi noktanın birleştirilmesiyle oluşturulur. Alfa (α) değerine göre merkezi birleşik tasarım iki şekilde olabilir: $\alpha=1$ yüzey merkezli merkezi birleşik tasarım (FCCD) ki bu tasarım 3 seviyede gerçekleştirilir. İkincisi ise $\alpha>1$ olan deney matrisi 5 seviyeden oluşan sınırlandırılmış merkezi birleşik tasarım (CCCD) olarak geçmektedir. CCCD matrisinde α sayısı faktör sayısına göre değişir ve

$$\alpha = (2^f)^{1/4} \quad (4)$$

formülüyle hesaplanır (de Menezes vd., 2024).

İkinci dereceden bir modeli uydurmak için kullanılan en popüler tasarım olan CCD genel olarak 2^k faktöriyel (veya kesirli faktöriyel) tasarımı ve ek olarak merkez noktaları veya yıldız noktaları içerir. Şekil 1.2'de $k=2$ ve $k=3$ için CCD gösterilmektedir.



Şekil 1.2:k=2 ve k=3 için merkezi birleşik tasarım

CCD pratikte sıralı deneyler şeklinde kullanılır. Yani birinci dereceden 2^k bir model uygulanıp uyum eksikliği gösterdiğinde ikinci dereceden terimlerin modele dahil edilmesi için aksenal noktalar eklenmiştir. Bu da CCD'nin ikinci dereceden model uydurmak için elverişli bir tasarım yöntemi olduğunu gösterir. Aksenal hatların tasarım merkezinden uzaklığı ve merkez noktalarının sayısı tasarımda belirtilmesi gereken iki parametredir (Montgomery, 2017).

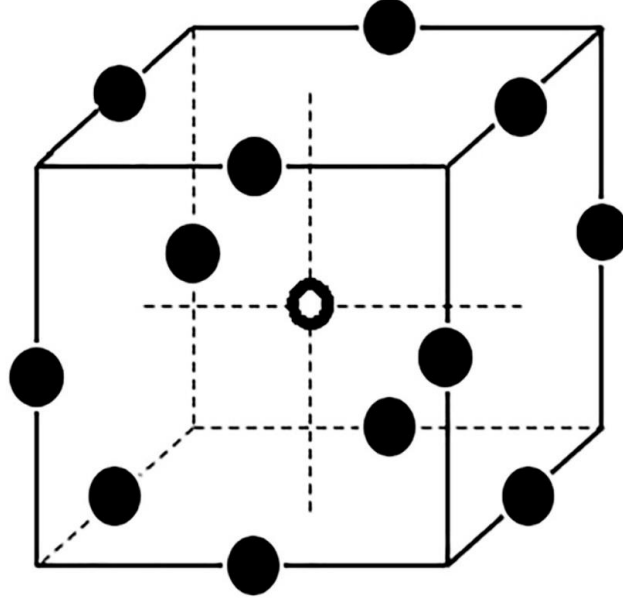
1.4.4 Box-Behnken Tasarım Yöntemi (BBD)

1960 yılında George E. P. Box ve Donald Behnken tarafından geliştirilen yöntem RSM tasarımıdır. Deneylerdeki faktörler ve yanıtlar arasında neden-sonuç ilişkileri kurmak için üç seviyeli tamamlanmamış faktöriyel tasarımlara dayanan ve döndürülebilir veya neredeyse döndürülebilir ikinci dereceden tasarımlardan oluşur. BBD yönteminde yanıt yüzeyini oluşturmak için 3 seviyeye (-1, 0 ve +1) ihtiyaç vardır ve 3 ila 21 arasındaki faktörler için kullanılabilir. Merkez noktaları "0" ile işaretlenmiş ikinci dereceden model terimleri oluşturmak ve faktörler arasındaki ikinci dereceden etkileşim etkisini analiz etmek için kullanılır. BBD'nin geliştirilmesi için gereken deney sayısı (N), Formül (5) ile hesaplanır.

$$N = 2k \times (k - 1) + C_0 \quad (5)$$

Formül de k faktör sayısını ve C_0 merkez nokta sayısını ifade eder.

BBD'nin avantajlarından biri, tüm faktörlerin aynı anda en yüksek veya en düşük seviyelerde olduğu kombinasyonları içermemesidir. Böylece aşırı durumlarda (küpün köşeleri) ölçüm yapmak gerekli değildir. Üç faktör için BBD modeli Şekil 1.3'de gösterilmektedir (Szpisják-Gulyás vd., 2023).



Şekil 1.3: Üç faktör için Box-Behnken tasarımı

1.5 ANOVA Analiz Yöntemi

Varyans analizi (ANOVA), elde edilmiş verilerin bilimsel analizi için kullanılan parametrik bir yöntemdir. İlk kullanımlarında gruplar arasındaki farkları test etmek ve böylece grup ortalamaları arasında karşılaştırma yapma işi için tasarlanmıştır. ANOVA'nın birçok farklı varyasyonu vardır ve her biri belirli bir deneysel bağlamda geçerli olduğundan seçiminde incelik gerektiren bir karmaşıklığa sahiptir. Uygulanacak ANOVA türünün yanlış seçimi verilerden yanlış sonuçlar çıkarılmasına sebep olacaktır.

Bir ANOVA türünü seçerken yöntemin altında yatan mantık ve verilere uygulanması için gerekli varsayımlar bilinmelidir. Grup ortalamaları çiftleri arasındaki karşılaştırmalar da (bunlar 'post hoc' testleri olarak da bilinir) dikkate alınmalıdır. ANOVA türlerine bakılacak olursa;

- a) Tek yönlü ANOVA (rastgele etkiler modeli)
- b) İki yönlü ANOVA (rastgele bloklarda ANOVA)
- c) Üç yönlü ANOVA
- d) Faktöriyel ANOVA
- e) Faktöriyel ANOVA (ayrılmış parseller tasarımı)
- f) Faktöriyel ANOVA (tekrarlanan ölçümler tasarımı)

olarak sıralanabilir. Her durumda deneysel tasarım türü açıklanmalı, istatistik modele uygun ANOVA'nın avantajları ve sınırlamaları göz önüne alınmalıdır. Ayrıca istatistik modele uyumsuzluk sorunları ve tekrar sayısı belirlenmelidir.

Temel olarak bir istatistik analizde 'i' alt simgesi ile grup veya sınıf belirtilir ve 'i' 1'den a'ya kadar değer alır. 'j' alt simgesi ile sınıfın üyeleri belirtilir ve 1'den n'ye kadar değerler alır. Dolayısıyla 'a' grupları ve grup başına 'n' tekrar ile oluşan veri seti, x_{ij} gözlemleri s^2 varyanslı bir ortalama μ etrafında dağıldığı varsayılır. Bu lineer model

$$x_{ij} = \mu + a_i + e_{ij} \quad (1)$$

formüle edilebilir (Eşitlik 1). Burada gözlemlenen x_{ij} değeri, gözlemlerin ortalaması (μ), bir sınıf sapması (a) ve normal dağılımlı bir popülasyondan çekilen rastgele bir eleman (e)'den oluşur. Rastgele unsur, tekrarlar ve ölçüm hataları arasındaki doğal varyasyonun birleşik etkilerini yansıtır. Diğer tüm kompleks ANOVA türleri bu basit modelden türetilir (Armstrong vd., 2002).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Inconel ailesinin en yaygın kullanılan üyesi Inconel 718, yıllık nikel alaşımları üretiminin %35'ini oluşturur. Tablo 2.1'de de görüldüğü üzere çekme dayanım derecesinin yüksekliği, çok iyi sürünme direnci ve korozyon direncinin olmasının yanı sıra bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da devam ettirmesi onu türbin kanatları, roket ve havacılık sanayisi ve özellikle jet motorlarında çokça talep edilen bir malzeme olmasına yol açmıştır (Shokrani ve Newman, 2018). Ancak tüm bu iyi özelliklerine karşın düşük ısı iletimi, yüksek sıcaklıklarda sertleşme, kesici takımlara karşı kimyasal ilgi ve mikro yapısındaki karbür partikülleri nedeniyle işlenmesi oldukça zor bir malzemedir (Darshan vd., 2019).

Tablo 2.1: Inconel 718'in fiziksel ve mekanik özellikleri

Element	Fe	Ni	Cr	Mo	Diğerleri			
					Karbon(C), Niyobyum (Nb), Titanyum (Ti), Tungsten (W), Mangan (Mn) ve Silikon (Si)			
% Yaklaşık Ağırlık	18	53	19	3	6			
Oda Sıcaklığında	Çekme Mukavemeti			Akma Mukavemeti	Young Modülü	Sertlik		
	MPa			MPa	GPa	HRC		
	1240			1036	206	36		

1950'lerin başında üreilmeye başlanmasıyla uzay ve havacılık endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmuştur. Çünkü bu alaşımın mükemmel korozyon direnci, geleneksel malzemelere göre çok daha iyi olan 800-900°C'nin üzerindeki yorulma direnci ve 650°C üzerinde çekme mukavemetinin sadece %20'sini kaybetmesi onu bu derece kıymetli yapmıştır. Ancak AISI 1018 düşük karbonlu çeliğin işlenebilirliğinin 100 kabul edildiği endekste Inconel 718, 12 gibi çok düşük değeriyle işlenmesi/kesilmesi zor malzeme unvanını hak etmektedir. Bu nedenle literatürde üzerine bu kadar çok çalışma yapılmıştır (Mahesh vd., 2021).

Geleneksel talaşlı üretim metotlarında kesme sıvıları makine işleminde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu sıvılar 8-10 l/dk gibi yüksek miktarlarda kesme bölgesine gönderilmektedir. Özellikle işlenmesi zor metallerde kesme bölgesindeki ısıyı düşürmek, sürtünmeyi azaltmak ve böylece kesme parametrelerini iyileştirmek için kesme sıvıları vazgeçilmezdir. Ancak insan sağlığı ve çevreye olan zararları ve işleme maliyetini arttırması gibi olumsuz etkileri sınırlandırılmalıdır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda, optimum noktayı sağlayacak teknolojiler geliştirilmeye çabalanmaktadır. Bunlardan biri olan minimum miktarda yağlama (Minimum Quantity Lubrication-MQL) metodu kendine geniş bir çalışma alanı bulmuştur (G. Singh vd., 2020).

Bitkisel yağları MQL metoduyla kullanmış onlarca çalışmayı inceleyen (Vasudevan vd., 2024) yağların viskozite, kayganlık, termal kararlılık ve kimyasal olarak hazırlanışının sonuçlara etkili olduğunu görmüşlerdir. Araştırmalar takım aşınması, yüzey tamlığı, kesme kuvvetleri, kesme bölgesi sıcaklığı ve ekolojiye etkisi gibi parametreler üzerinde durmuştur. Geleneksel ve kuru işlemeyle karşılaştırarak sanayide ekonomik olarak uygulanabilirliği tartışılmıştır. Takım aşınmasına en olumlu katkıyı sırasıyla soya yağı, kanola yağı, hindistan cevizi yağı ve palm yağı vermiştir. Genel olarak yağlar takım aşınmasına iyi katkı sağlamışlardır. Ancak kararlılıklarını uzun süre koruyamayarak bozunmaları, viskozite yüksekliğinin pülverize olmayı ve kesme bölgesine penetrasyonunu azaltması öte yandan düşük viskozitenin yeterli yağlamayı sağlayamaması gibi sorunlar kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Bu yüzden farklı karışımlarda kullanılması ve/veya zenginleştirilmesinin düşünülmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

(Leksycki & Kaczmarek-Pawelska, 2024) AISI 6030 paslanmaz çeliği tornalarken MQL metodunu kuru işleme ve taşkın soğutma yöntemiyle karşılaştırmıştır. AISI 6030 paslanmaz çeliği ile yapılan çalışmada yüzey topografisi çıkarılmış ve sonuçlar değişik yüzey

pürüzlülüğü parametreleri (Aritmetik ortalama yükseklik-Sa, doku yüzeyinin maksimum yüksekliği-Sz, karekök ortalama yüksekliği-Sq, maksimum tepe yüksekliği-Sp, maksimum vadi yüksekliği-Sv, Ssk-çarpıklık, Sku-basıklık) yönünden incelenmiştir. Sonuçlarda MQL metodu yüksek ilerleme hızlarında elde edilen maksimum yüzey pürüzlülüğü için, kuru tornalamaya kıyasla, Sa ve Sq parametrelerinde taşkın işleme altında %7'lik ve MQL yöntemi kullanılarak %17'lik bir düşüş elde edilmiştir. Öte yandan, Sz parametresinde taşkın işleme altında %10'luk ve MQL yöntemi kullanılarak %29'luk bir artış elde edilmiştir. Kuru ve taşkın işleme ile karşılaştırıldığında, MQL yöntemi kullanılarak tornalanmış yüzeyde Sp tepe ve Sv vadi değerlerinde bir artış gözlenmiştir. Ancak çalışmanın hedefi olan korozyon direnci açısından değerlendirildiğinde pürüzlülüğün mikro yapıları nedeniyle taşkın soğutmanın korozyon direncine katkısı daha iyi bulunmuştur.

(Binali, 2024) Inconel 718'i frezeleme ile işlerken MQL metodunu kuru işleme yöntemiyle kıyaslamış ve deneysel sonuçları makine öğrenmesi yoluyla elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırmıştır. Kuru kesme ve MQL yöntemi karşılaştırma analizi sonuçları, MQL'in daha iyi yüzey topografisi ve talaş morfolojisi ürettiğini, daha uzun takım ömrünün yanı sıra yüzey pürüzlülüğü (%23,7'ye kadar) ve kesme sıcaklıklarında (%27,4'e kadar) iyileşme sağladığını göstermiştir.

Diğer yandan nano malzeme katkılı nano akışkan kesme sıvıları sağladıkları ekstra katkılarıyla MQL yönteminin ilerlemesine olanak sağlamıştır. Bu alanda birçok farklı nano materyal denenmeye devam edilmektedir. Fayda sağlayacağı umulan çeşitli tür, tip ve boyutlardaki nano malzemeler bir baz sıvı içerisinde homojen dağılımı sağlanarak MQL mekanizmasıyla kesme bölgesine gönderilir. Çok az miktarda gönderilen soğutma sıvısı bile fevkalade iyi sonuçlar verdiği birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir (Hwang vd., 2006). Çalışmalar göstermiştir ki nano-partikülle zenginleştirilmiş soğutma sıvılarının termal iletkenliği oldukça iyileşmiştir. Bu iyileşmeye etki eden nano-partikül boyutu, miktarı, şekli, sürfaktan kullanımı gibi farklı birçok faktör bulunmaktadır (Hemmat Esfe vd., 2015).

Yapılan bir çalışmada 60Si₂Mn yüksek sertlikteki çelik (50-52 HRC) iş parçası üzerine uygulanan sert frezeleme işlemi, alüminyum oksit (Al₂O₃) nano parçacıkla zenginleştirilmiş soya yağı ve MQL yağlama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TiAlN kaplamalı kesici kullanılan bu çalışmadan önceki karbür kaplı kesici kullanılan çalışmalarda da

gösterilmiştir ki zenginleştirilmiş nano akışkanla gerçekleştirilen MQL deneyleri baz akışkana göre kesme kuvvetlerinde ve yüzey pürüzlülüğünde daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada ise farklı nano parçacık konsantrasyonları, farklı kesme hızları ve ilerleme miktarları denenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetine en büyük etki nano parçacık konsantrasyonundan sonra sırasıyla kesme hızı ve ilerleme miktarından gelmiştir. Ancak nano parçacık konsantrasyonu %1,2'den %1,5'a çıkartıldığında kesme kuvveti artışı yaşanmıştır. Neden olarak nano parçacıkların kesme bölgesinde birikmesi ve sıkışmasıyla kesintili yağlama meydana gelmesi olarak belirtilmiştir (Duc vd., 2024).

Zenginleştirilmiş nano akışkanla yürütülen MQL yöntemini diğer soğutma ve işleme yöntemleriyle karşılaştıran diğer bir çalışmada; AISI 5140 çeliği iki farklı kesme hızı, iki farklı ilerleme miktarı ve kuru işleme, taşkın soğutma, MQL ve %5 Mo katkılı nano akışkanla yağlama gibi 4 farklı soğutma yöntemiyle frezelemeye tabi tutulmuştur. Ölçümü yapılan 4 farklı parametreye (yüzey pürüzlülüğü, yanak aşınması, kesme sıcaklığı, güç tüketimi) göre yüzey pürüzlülüğü için en iyi etki nano akışkan sağlamış ve yine en düşük yanak aşınmasına da nano akışkan ortamında ulaşılmıştır. Taşkın soğutmada en düşük kesme sıcaklığını vermiş fakat güç tüketimine en etkili parametre nano akışkan olmuştur (Zerooğlu vd., 2024).

(Çelik vd., 2024) tarafından yapılan bir araştırmada işlenmesi zor malzemelerden Ti6Al4V alaşımı hekzagonal bor nitrür (hBN) katkılı ayçiçeği yağı ile MQL tekniği kullanılarak tormalanmıştır. Yüzey katkısı olarak sodyum dodesil sülfat (SDS) eklenerek nano akışkanın kararlılığı artırılmış ve 15 ay süresince bu kararlılığı gözlemlenmiştir. 4 farklı kesme hızı, 4 farklı ilerleme miktarının yanı sıra kuru kesme, saf baz akışkanla MQL, %0,5'lik nano akışkanla MQL ve %1'lik nano akışkanla MQL olmak üzere 4 farklı soğutma ortamında gerçekleştirilen deneylerin performans kriteri olarak yüzey pürüzlülüğü, kesme bölgesi sıcaklığı ve takım yanak aşınması ölçülmüştür. ANOVA ve S/N analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü en çok ilerleme hızından (%95), kesme bölgesi sıcaklığı en çok soğutma koşulundan (%70) ve yanak aşınması en çok kesme hızından (%45) etkilendiğini görülmüştür. Ayrıca nano katkının viskozitenin ve termal iletkenliğin artışına katkı yaptığı da ölçümlerle ortaya çıkmıştır.

Molibden disülfür (MoS₂) nano-partikül katkısıyla zenginleştirilmiş nano akışkanlı MQL soğutma sistemi ile yapılmış çalışmalarda MoS₂ katkısının yüzey pürüzlülüğü, kesme

kuvveti ve talaş yapışması gibi parametrelerde iyileşmeye sebep olduğu görülmüştür (Rahmati vd., 2014; Yücel vd., 2021). MoS₂ nano partikül katkılı akışkanla MQL metoduyla yapılmış delme deneyi hem baz sıvıyla yapılmış MQL deneyine hem de klasik soğutma sıvılı deneye göre daha iyi sonuçlar vermiştir (Shen vd., 2008).

90CrSi çeliğinin karbür takımla ve MoS₂ katkılı nano akışkanla zenginleştirilmiş MQL metoduyla işlendiği bir çalışmada değerlendirme parametresi olarak F_x, F_y ve F_z kuvvetleri ölçülmüş toplam kesme kuvveti hesaplanmıştır. Deney değişkenleri olarak MoS₂ (%1, %2, %3), kesme hızı (80-100-120 m/dk) ve ilerleme miktarı (0,1-0,15-0,2 mm/dev) seçilmiştir. Nano akışkan konsantrasyonu %2'ye kadar kesme kuvveti azalırken %2'den sonra tekrar artışa geçmiştir. Bunun sebebi başka çalışmalarda da izah edildiği gibi nano parçacıkların kümelenmeye başlaması ile sıkışmaya sebep olması ve kesmeye engel teşkil etmesi olarak gösterilmiştir. Kesme hızı arttıkça kesme kuvveti de artış göstermiştir. İlerleme miktarı 0,1 mm/dev'den 0,16 mm/dev'e kadar kesme kuvvetinde artışa sebep olurken bunun üstünde kesme kuvveti düşmeye başlamıştır (Ngo, 2024).

(Makhesana vd., 2022) yaptığı çalışmada bitkisel yağ bazlı yağlayıcıya nano MoS₂ katkısıyla elde edilmiş nano soğutma sıvısının MQL yöntemiyle Inconel 690'nın işlenmesine katkısı araştırılmıştır. Nano soğutma sıvılı MQL yöntemi, kuru işleme, taşkın soğutma ve sade MQL yöntemleriyle kıyaslanmıştır. Bulgular kuru işleme, taşkın soğutma ve sade MQL yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüğünde sırasıyla %54, %29 ve %13 azalmayı göstermiştir. Enerji tüketiminde de benzer şekilde %56, %39 ve %12 azalma bulunmuştur. Bu parametrelerin bir sonucu da uzayan takım ömrü olarak ortaya konmuştur.

Çinko oksit (ZnO) nano-partiküllerin ısı transfer katsayısını iyileştirdiği hatta çalışmada kullanılan manyetit (Fe₃O₄), zirkonya (ZrO₂), titanyum dioksit (TiO₂) nano-partikül katkılı akışkanlardan daha iyi bir ısı iletim sağladığı ölçülmüştür (Bayram, 2016). Çinko oksit nano-partikül katkılı bitkisel yağla karışımının tribolojik özellikleri araştırıldığında sürtünme katsayında ve aşınmada azalma ve yüzey kalitesinde iyileşme görülmüştür. ZnO'in yağ içerisinde iyi dağılım göstermesi ve yüksek yüzey enerjisi ile iyi bir katkı elemanı olduğu değerlendirilmiştir (Y. Singh vd., 2021).

Yüksek sertlikteki çeliklerden olan AISI D3 (47 ±1 HRC) çeliğinin ZnO nano katkısıyla zenginleştirilmiş akışkanlı MQL yöntemi kullanılarak işlendiği bir çalışmada kesme kuvveti,

yüzey pürüzlülüğü, yanak aşınması ve kesme bölgesi sıcaklığı ölçülmüştür. Baz akışkan olarak kullanılan pirinç kepeği yağına %0,1 oranında ZnO eklenerek zenginleştirilmiş nano akışkanla yapılan deneylerde 4 farklı düzeyde kesme hızı (80-100-120-140 m/dk), 4 farklı ilerleme miktarı (0,05-0,1-0,15-0,2 mm/dev) ve 4 farklı kesme derinliği (0,1-0,2-0,3-0,4 mm) uygulanmıştır. Sonuç olarak zenginleştirilmiş nano akışkan baz akışkana göre kesme kuvvetinin şiddetini %10,68-18,48 oranında, takım aşınmasını %9,33-51,9 oranında ve işenmiş yüzey pürüzlülüğünü de %3,86-12,84 oranında azalttığı görülmüştür (İbrahim vd., 2022).

Yapılan bir çalışmada 4 farklı kompozisyonda oluşturulmuş nano akışkanla AISI 4340 çeliğinin sert tornalanmış ve kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, artık stres, mikro sertleşme ve yüzey morfolojisi değerlendirilmiştir. Deiyonize suyun içerisine hacimce %0,1 oranında ZnO, bakır oksit (CuO), demir 3 oksit (Fe₂O₃) ve Al₂O₃ katılarak meydana getirilen nano akışkanlar MQL yöntemiyle kullanılmıştır. CuO nano akışkanın diğerlerine kıyasla daha iyi termal iletkenliğe ve daha düşük viskoziteye sahip olduğu ölçüm sonuçlarında ortaya çıkmıştır. Bu özellikler kendisini deneylerde daha düşük kesme kuvveti, daha iyi yüzey kalitesi, daha düşük takım aşınması, minimum miktarda mikro sertlik ve artık stres olarak göstermiştir. Düşük viskozitesi ile CuO nano akışkanı iş parçası ile takım arasına daha iyi sızmış ve yastıklama etkisi ile titreşimi azaltmıştır. İnce ve laminer yapısı ise ısı taşıma kapasitesini arttıran ve bu da daha düşük kesme bölgesi sıcaklığına ve daha düşük kesme kuvvetine sebep olan bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır (Das vd., 2019).

Magnezyum oksitle (MgO) yapılan bir çalışmada poliestere (POE) yağı ile karıştırıldığında baz sıvıya göre viskozitenin arttığı, sürtünme katsayısının %25 azaldığı, ısı iletim katsayısını %38 arttırdığı görülmüştür (Ahamed vd., 2020). Bir başka çalışmada MgO-su karışımından oluşan nano akışkanda sıcaklık, katı hacim oranı ve nano partikül boyutunun parametre analizi yapılmıştır. Nanoakışkan termal iletkenlik katsayısının en büyük değeri, en yüksek sıcaklık ve nanoparçacık hacim oranı ve en düşük nanoparçacık boyutu seviyesinde meydana gelmiştir (Hemmat Esfe vd., 2017). (Gamal vd., 2023)'in yaptığı deneysel çalışmada %1'lik MgO bağıl viskozitesi %31-%42,7 ve termal iletkenliği %33,1 oranında artış göstermiştir.

Baz akışkanın etilen glikol olduğu bir çalışmada 20 nm ortalama boyuttaki MgO nano parçacıklarıyla nano akışkan oluşturulmuştur. %5'lik aralıklarla ağırlıkça 0'dan %20'ye kadar oluşturulan nano akışkanların viskoziteleri ve termal iletkenlikleri ölçülmüştür.

Süspansiyondaki nano partikül oranı arttıkça viskozitenin artmasıyla Newton yasalarına uygun davrandığı gözlenmiştir. Literatürle uyumlu olarak ısı transferinde artış sağladığı da görülmüştür. En iyi ısı transferi 0,052 hacim oranında bulunmuştur (Zyła, 2017).

Çevre ve insan sağlığı açısından zararsız ve ekonomik olarak çok uygun olan su bazlı yağlayıcılar üzerine yapılan bir araştırmada nano katkı malzemesi olarak MgO ve silisyum karbür (SiC) kullanılmıştır. Yüzey aktif madde olarak polivinilprolidon (PVP) kullanılmıştır. Viskozite arttırmak ve yağlayıcının yük taşıma kapasitesini geliştirmek için de gliserol eklenmiştir. Yük altında silindirik bloğa uygulanan aşınma deneyinin sonucunda en küçük aşınma izi MgO katkılı nano akışkana ait çıkmıştır. Baz akışkan suya göre %76,69'luk bir iyileşme görülmüştür. Oluşturulan nano akışkanların her ikisi de deiyonize suya göre daha iyi sürtünme, aşınma ve termal özellikler sergilemişse de MgO ile oluşturulan nano akışkan en iyi tribolojik performansı göstermiştir. SiC bazlı nano akışkan, esas olarak parlatma etkisine atfedilen aşınma önleyici özellikler gösterdiği düşünülmektedir. MgO bazlı nano akışkanın olağanüstü tribolojik performansı, deforme olabilirliğine ve yataklama etkisine bağlanabilir (Ming Rui vd., 2023).

Inconel 718'i hem çevresel şartlara uygun olarak hem de maliyetler açısından uygulanabilir bir metotla işleyebilmek için yapılan çalışmalar MQL etrafında yoğunlaşmaktadır. (T. Singh, 2024) yaptığı araştırmasında takım yanak aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünün Ra değerini RSM kullanarak optimize etmeye çalışmıştır. Zeytinyağına çok duvarlı karbon nanotüp (Multi-walled carbon nanotubes-MWCNT) ekleyerek hazırlanmış olduğu nano akışkanla MQL yöntemi destekli tornada Inconel 718'i işlemiştir. Ağırlıkça %1'lik MWCNT nano akışkanı ile diğer konsantrasyonlara göre en az yanak aşınmasını (130 µm) ve en düşük yüzey pürüzlülüğünü (Ra=0.51 µm) bulmuştur. İlerleme hızı ve kesme hızı sırasıyla %12,06 ve %43,69 ile en çok etkileyen faktörlerdir. Aynı şekilde kesme hızı ve ilerleme hızı Ra değerine sırasıyla %38,25 ve %18,03'lük bir yüzdelik ile etki etmişlerdir.

Bir başka çalışmada Inconel 718 üzerinde yapılan yüzey frezeleme işleminde nano boyutta boraks (BX) ilavesi ile oluşturulan soğutma sıvısı MQL yöntemiyle kesme bölgesine yollanmıştır. Kesme sıvısına BX ilavesi arttıkça kesme kuvveti değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu etkiyle ağırlıkça %3'lük çözeltide takım ömrü %20 artmıştır. Yine BX ilavesinin iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışmasını önlenmiş ve daha düşük kesme

kuvvetleri ölçülmüştür. BX ilavesi sayesinde daha iyi pürüzlülük değerleri de elde edilmiştir (Kurşuncu, 2024).

(de Oliveira vd., 2023) yapmış oldukları kapsamlı bir derleme çalışmasında, literatürde parmak frezeleme ile çelik işlenmesinde kullanılan deney tasarım ve optimizasyon yöntemlerini araştırmıştır. Bu çalışmalarda süreci etkileyen ana faktörler olarak kesme derinliği, kesme hızı, tabla hızı ve ilerleme hızının kullanıldığını en çok değerlendirilen yanıtların ise yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri ve takım aşınması olduğunu tespit etmiştir. Örnekleme alınan çalışmalarda ana yanıtlar (bağımlı değişkenler) %70,45’inde yüzey pürüzlülüğü, %18,18’inde kesme kuvveti ve %13,64’ünde takım ömrüdür. Deneysel tasarımlarda %40,9 ile en çok merkezi birleşik tasarım (CCD) kullanılmış, bunu Box-Behnken ve Taguchi tasarımı izlemiştir. Araştırılan makalelerin 26’sı bir tür süreç optimizasyonu gerçekleştirirken, 18’i ise sadece modelleme yöntemlerini kullanmıştır. Kullanılan başlıca optimizasyon yöntemleri arzu edilebilirlik, genetik algoritma ve RSM optimizasyonudur.

CNC frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için Taguchi deney tasarımının kullanıldığı bir çalışmada işleme sınırlarının iyileştirilmesi yeni bir metodoloji araştırılmıştır. Denemeler kaplamasız karbür kesici ile Ti6Al4V iş parçası için üç seviyeli devir sayısı (800, 1000, 1200 dev/dk) ilerleme miktarı (7, 9, 11 mm/dk), kesme derinliği (2, 3, 4 mm) ve takım çapı (8, 10, 12 mm) şeklinde tasarlanmıştır. Deney deseni için Taguchi L9 deney tasarımı kullanılmış ve bu teknik sayesinde 9 deneme deseni ortaya çıkmıştır. Sonuçlar ANOVA ile analiz edilmiştir. S/N oranı yüzey pürüzlülüğü araştırıldığı için “en küçük en iyi” anahtar koşulu ile bakılmış ve optimum sonuç tespit edilmiştir. Sonuç olarak Taguchi’nin sınır konfigürasyonunun, işleme sınırlarının ilerletilmesi için basit, metodik, güvenilir ve daha üretken bir yöntem olduğu bulunmuştur (Yadav vd., 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Frezeleme işlemlerinde kullanılmak üzere fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle TiAlN kaplamalı R390-11 T3 08M-PM S30T kodlu freze uçları (Şekil 3.1) SANDVIK COROMANT firmasından temin edilmiştir. 150 mm x 100 mm x 80 mm boyutlarında ve yüzey temizliği yapılmış olan Inconel 718 iş parçası freze tezgâhına rijit bir şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1: Frezelemede kullanılan kesici takımlar

Falco VMC 855-B CNC 3 eksenli (x eksen: 800 mm, y eksen: 500 mm, z eksen: 450 mm) dikey freze işleme tezgâhında deneyler gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.2) Fener mili 70 mm çapındadır ve 10.000 dev/dk dönme hızına çıkabilmektedir. Mitsubishi kontrol ünitesi bulunan tezgâh 7,5 kW güce sahiptir. İş parçası uzunluğu boyunca iki ağızlı takım tutucuya yerleştirilmiş freze ucuyla alın frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. İki ağız olmasına karşın ölçümde doğru sonuçlar almak için tek ağız bağlanmıştır.



Şekil 3.2: CNC freze tezgâhı.

Takım tezgâhına monte edilmiş Werte Mikro STN 25 marka minimum miktarda yağlama (MQL) ünitesi sayesinde 50 ml/dk aralığında soğutucu akışkan doğrudan takım ucu ile parça arasına 4-6 bar basınçla pülverize bir şekilde püskürtülmüştür. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3: Minimum miktarda yağlama ünitesi

Kesme sırasında oluşan kuvvetleri ölçmek için 10 kN'a kadar ölçüm yapabilen Kistler marka 9257B model dinamometre kullanıldı. Yine gelen verilerin bilgisayara işlenebilmesi için Kistler 5070 amplifikatör ve Kistler DynoWare programından faydalanıldı (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Kuvvet amplifikatörü

Mitutoyo SJ 310 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile her paso sonrası işlenmiş yüzeyin rastgele 3 ayrı noktasından Ra, Rq ve Rz değerleri ölçülmüştür. Cihazın bazı özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. (Şekil 3.5).

Tablo 3.1: Mitutoyo SJ 310 pürüzlülük ölçüm cihazının bazı özellikleri

Ölçü sistemi	Metrik
Dedektör ölçüm kuvveti	0,75 mN
Kayıt iğnesi cinsi	Elmas tip
Kayıt iğnesi açısı	60°
Kayıt iğnesi yarıçapı	2 µm
Ölçüm yöntemi	Diferansiyel indüksiyon
Kızak yarıçapı	40 mm
Kızak kuvveti	400 mN
Gösterge aralığı	Ra ve Rq için 0,01-100 µm Ry, Rz, Rt, Rv için 0,02-350 µm
Ölçüm standartları	EN ISO, VDA, ANSI, JIS

Ölçülen pürüzlülük değerleri istatistiksel çalışma için Microsoft Excel programına kaydedilmiştir.



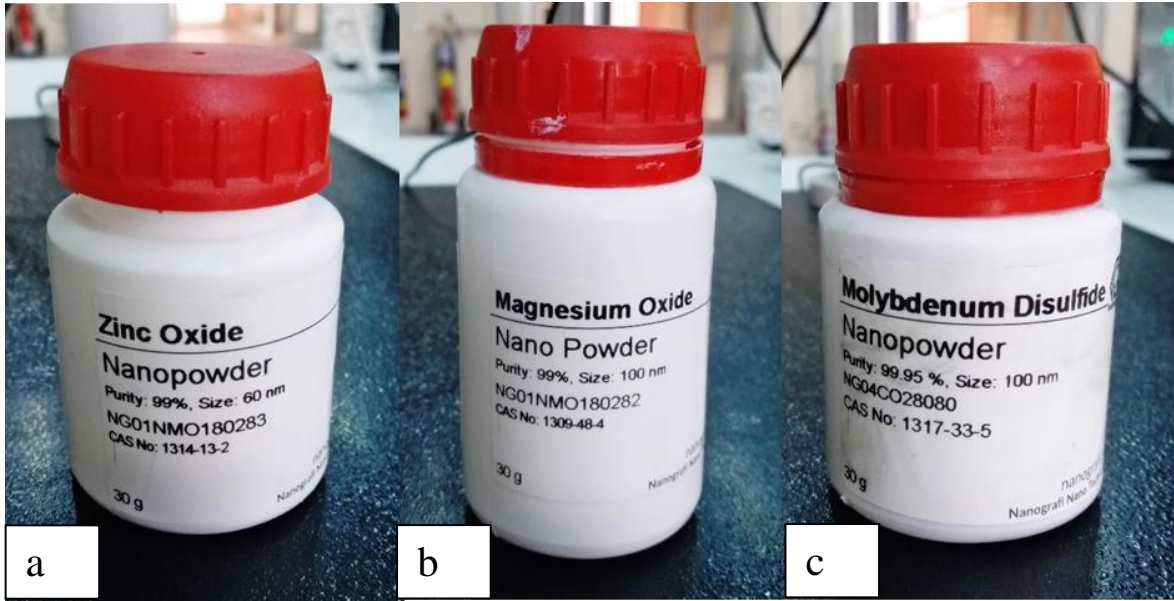
Şekil 3.5: Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

Her bir işlem pasosu sonrasında kesici takım tutucusu yerinden sökülerek bilgisayara bağlı bulunan Vision SX45 marka stereo mikroskop marifetiyle takım ucunun fotoğrafı çekilmiş ve aşınma miktarı görüntü üzerinden ölçülmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Vision SX45 stereo mikroskop

Literatür taramasından elde edilen sonuçlar ışığında yüzey frezeleme etkisi daha önce araştırılmamış 3 farklı nano tozdan nano akışkan oluşturulmasına karar verilmiştir. Bunlar çinko oksit (ZnO), magnezyum oksit (MgO) ve molibden disülfür (MoS₂) olarak belirlenmiştir. Nano tozlar Nanografi firmasından temin edilmiştir. Nanografi Nano Teknoloji, ODTÜ Teknokent bünyesinde 2011 yılında kurulmuş ve ülkemiz için yerli ve milli nano teknoloji ürünleri geliştiren bir firmadır (Şekil 3.7). Tablo 3.2’de nano tozların termofiziksel özellikleri de verilmiştir.

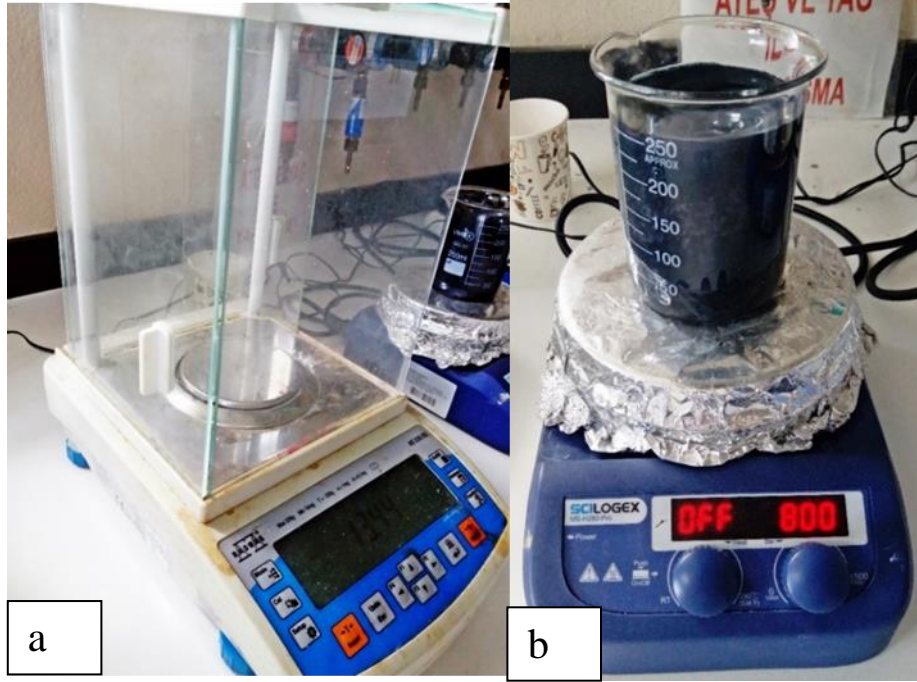


Şekil 3.7: Çinko oksit (a), magnezyum oksit (b) ve molibden disülfür (c) nano tozlar

Tablo 3.2: Nano malzemelerin termofiziksel özellikleri(Chaudhari vd., 2024; Ram vd., 2024; Senthilkumar & Deepak, 2024)

Malzeme	Boyut nm	Safılık %	Renk	Yoğunluk g/cm ³	Morfoloji	Termal iletkenlik W/mK
MgO	100	99	Beyaz	3,6	Çok yüzlü	45
MoS ₂	100	99,95	Gümüşü siyah	5	Hegzagonal	904,4
ZnO	60	99	Beyaz	5,5	Küresele yakın	19

Yerel bir firmadan temin edilen etilen glikol baz sıvısı içerisinde ağırlıkça %1'lik nano toz eklemek için Radwag As 220 R2 Analitik Terazi ile tozlar tartılmış ve Scilogex MS-H280-Pro ısıtıcılı karıştırıcı ile homojen bir karışım elde edinceye kadar karıştırılmıştır (Şekil 3.8 a ve b).



Şekil 3.8: Analitik tartı (a) ve ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (b)

Seçilen bu üç farklı nano malzemeyle oluşturulan üç akışkan ve karşılaştırma yapabilmek için kontrol olarak eklenen baz akışkanla beraber 4 farklı akışkan, 4 farklı kesme hızı (30, 35, 40 ve 45 m/dk), 4 farklı ilerleme miktarı (0,05, 0,07, 0,09 ve 0,11 mm/ağız) ve 4 farklı kesme derinliğinde (0,10, 0,15, 0,20 ve 0,25 mm) denemesi planlanmıştır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3: Deney parametreleri seviyeleri

Seviye	V_c m/dk	Nano akışkan	f_z mm/ağız	a_p mm
1	30	Baz	0,05	0,10
2	35	Baz + %1 MoS ₂	0,07	0,15
3	40	Baz + %1 MgO	0,09	0,20
4	45	Baz + %1 ZnO	0,11	0,25

Bu kadar parametrenin tüm kombinasyonlarının denenmesi hem zaman hem de maliyet açısından karşılanması olanaksızdır. Bu nedenle Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi metoduyla daha az deney sayısı ile optimum parametrelerin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemle deney deseni belirlenmiştir. Dört farklı akışkanın, dört kesme derinliği (a_p), dört farklı ilerleme miktarı (f_z) ve dört kesme hızı (V_c) değerinde parametrelerin optimizasyonları için Taguchi L16 ortogonal dizi uygulanmıştır (Tablo 3.4).

Tablo 3.4: Deney parametreleri için Taguchi L16 ortogonal dizi

	V_c m/dk	Nano akışkan	f_z mm/ağız	a_p mm
1	30	Baz	0,05	0,10
2	30	Baz + %1 MoS ₂	0,07	0,15
3	30	Baz + %1 MgO	0,09	0,20
4	30	Baz + %1 ZnO	0,11	0,25
5	35	Baz + %1 MgO	0,05	0,15
6	35	Baz + %1 ZnO	0,07	0,10
7	35	Baz	0,09	0,25
8	35	Baz + %1 MoS ₂	0,11	0,20
9	40	Baz + %1 ZnO	0,05	0,20
10	40	Baz + %1 MgO	0,07	0,25
11	40	Baz + %1 MoS ₂	0,09	0,10
12	40	Baz	0,11	0,15
13	45	Baz + %1 MoS ₂	0,05	0,25
14	45	Baz	0,07	0,20
15	45	Baz + %1 ZnO	0,09	0,15
16	45	Baz + %1 MgO	0,11	0,10

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kesme Kuvveti Sonuçları

Kesme kuvveti talaşlı işlemede harcanan gücü gösteren önemli parametrelerdendir. Inconel 718 süperalaşımı belirlenen şartlarda frezede işlenirken materyal metot bölümünde anlatıldığı gibi tüm kesme kuvvetleri (x ekseni, y ekseni ve z ekseni) anlık kaydedilmiştir. Bilgisayara bağlı dinamometre ile kaydedilen verilerden parçaya ilk giriş ve çıkış zamanlarında kaydedilen değerler kesme olayını tam temsil edemediğinden dolayı kesici ağız iş parçası üzerinde 30 mm ilerledikten sonraki değerler hesaplama katılmıştır. Kaydedilen bu değerler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Deney çalışmasında elde edilen kesme kuvveti sonuçları

	V_c	Nano akışkan	f_z	a_p	V_f	Ortalama F_x	Ortalama F_y	Ortalama F_z	Ortalama F_r
	m/dk		mm/ağız	mm	mm/dk	N	N	N	N
1	30	Baz	0,05	0,10	19,11	58,394	61,642	62,607	105,907
2	30	Baz + %1 MoS ₂	0,07	0,15	26,75	56,703	77,052	74,111	121,053
3	30	Baz + %1 MgO	0,09	0,20	34,39	65,066	101,433	88,449	149,512
4	30	Baz + %1 ZnO	0,11	0,25	42,04	69,762	120,345	94,925	168,449
5	35	Baz + %1 MgO	0,05	0,15	22,29	53,967	64,571	66,508	107,385
6	35	Baz + %1 ZnO	0,07	0,10	31,21	50,723	59,538	61,227	99,541
7	35	Baz	0,09	0,25	40,13	76,079	105,904	92,530	160,013
8	35	Baz + %1 MoS ₂	0,11	0,20	49,04	65,651	101,070	83,784	146,838
9	40	Baz + %1 ZnO	0,05	0,20	25,48	60,321	76,647	73,895	123,001
10	40	Baz + %1 MgO	0,07	0,25	35,67	69,184	100,392	91,385	152,373
11	40	Baz + %1 MoS ₂	0,09	0,10	45,86	54,301	72,435	70,487	114,894
12	40	Baz	0,11	0,15	56,05	54,428	85,812	74,173	125,924
13	45	Baz + %1 MoS ₂	0,05	0,25	28,66	59,973	85,343	81,442	132,353
14	45	Baz	0,07	0,20	40,13	55,070	80,944	80,884	127,020
15	45	Baz + %1 ZnO	0,09	0,15	51,59	48,280851	73,937347	73,643147	114,98298
16	45	Baz + %1 MgO	0,11	0,10	63,06	48,674	65,126	62,299	102,550

4.1.1 Taguchi Analizi Sonuçları

Mühendislik hesaplamalarında Taguchi kayıp fonksiyonu veya diğer adıyla Sinyal/Gürültü oranı (S/N) farklı amaçlar için farklı 3 şekilde kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlar “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” amaçlanarak kullanılır. Bu çalışma için “en küçük en iyi” amaçlanarak fonksiyon hesaplaması yapılmıştır.

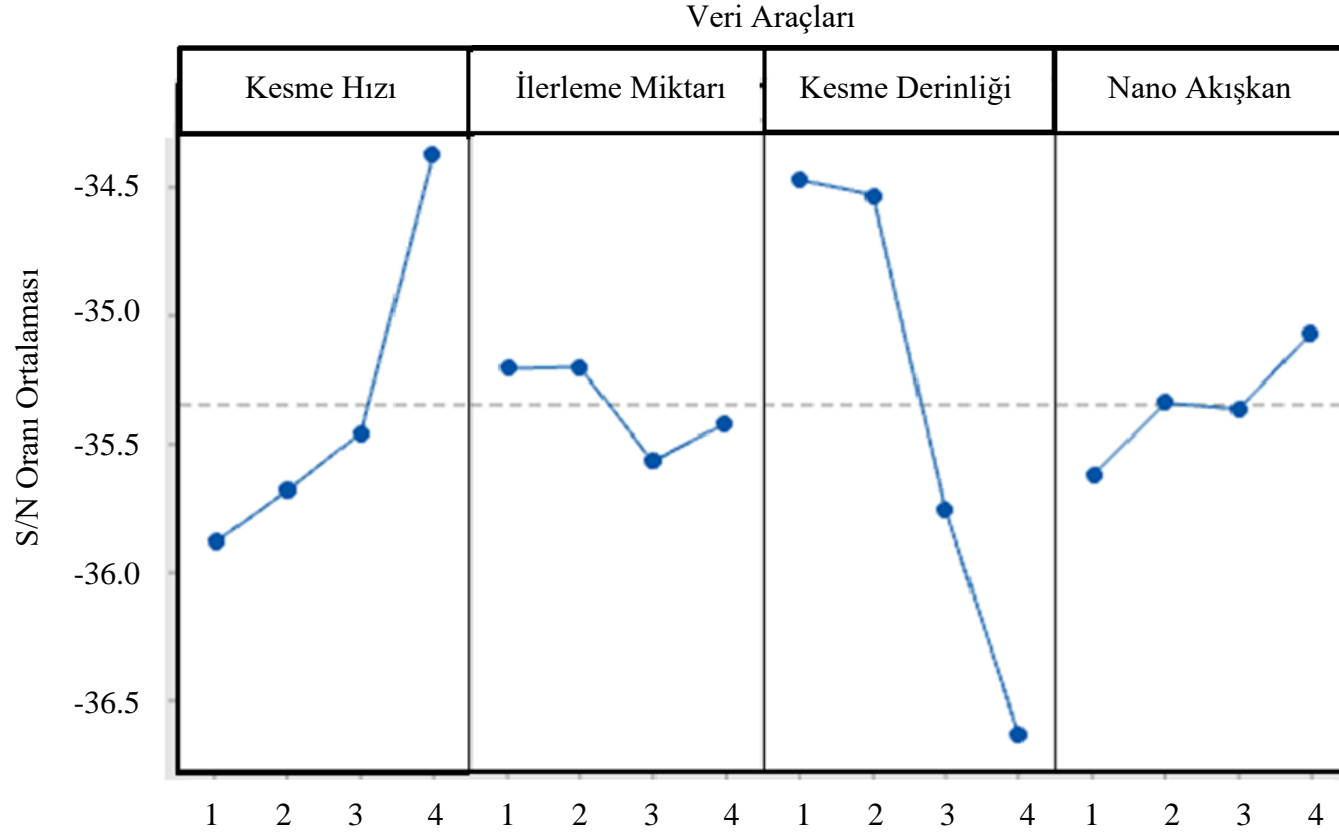
Tablo 4.1’deki verilerin optimizasyonu için ortalamaları alınmış ve Taguchi metodu ile analizi yapılmıştır. Tablo 4.2’de Taguchi metoduna göre hesaplanmış kesme kuvvetlerinin S/N oranları gösterilmiştir. Bu analizde en küçüğün en iyiyi gösterdiği fonksiyon hesaplanarak grafiğe işlenmiştir. Bu oranların optimum seviyeleri koyulaştırılarak belirtilmiştir.

Tablo 4.2: Taguchi kesme kuvveti analizi

Düzyey	Kesme hızı m/dk	İlerleme mm/ağız	Kesme Derinliği mm	Nano Akışkan
1	-35.88	-35.21	-34.47	-35.62
2	-35.68	-35.20	-34.53	-35.34
3	-35.46	-35.57	-35.76	-35.36
4	-34.37	-35.42	-36.64	-35.07
Delta	1.51	0.37	2.17	0.56
Rank	2	4	1	3

Kesme kuvveti analizinde Taguchi metoduna göre en küçük en iyi olarak hesaplandığında S/N oranının en büyük değeri optimum sonucu göstermektedir. Tabloda bu sonuçlar koyulaştırılarak belli edilmiştir.

S/N Oranları Ana Etki Grafiği



Sinyal-Gürültü oranı: En Küçük En İyi

şekil 4.1: Kesme kuvveti sinyal/gürültü oranı grafiği

Şekil 4.1’de Sinyal/Gürültü oranına göre çizilmiş kesme kuvveti grafiği görülmektedir. Buna göre kesme kuvvetine göre bakıldığında en iyi katkı 4. seviye olan 45 m/dk’lık kesme hızı optimum sonucu vermektedir. Kesme hızı azaldıkça kesme kuvvetine katkısı kötüleşmektedir. İlerleme miktarının kesme kuvvetine etkileri birbirine yakın olmakla beraber en iyi seviye olan 2. ve 1. Seviye yani 0,07 ve 0,05 mm/ağız’lık ilerleme miktarları kesme kuvvetine benzer şekilde eki etmektedir. 0,09 mm/ağız olan seviye en düşük olmakla beraber 0,11 mm/ağız olan ilerleme miktarı ile ciddi bir fark olduğu söylenemez. Kesme derinliği parametresinin etkisi incelendiğinde en iyi seviye olan 0,1 mm kesme derinliği kesme kuvvetine optimum katkıyı sağlamıştır. Bu sonuçtan beklendiği üzere kesme derinliği arttıkça kesme kuvvetini büyütme etkisi grafikten de görülmektedir. Nano akışkanların etkisi ise daha önceki grafiklere benzer şekilde analizde de yakın çıkmıştır. Kesme kuvvetine en iyi katkıyı sunan %1’lik ZnO nano akışkanı sırasıyla %1’lik MoS₂ ve %1’lik MgO izlemektedir. Baz akışkan soğutma sıvısı ise en düşük etkiyi vermiştir.

4.1.2 ANOVA Analizi Sonuçları

Tablo 4.1’de kaydedilen kesme kuvveti sonuçları istatistiki bir değerlendirme yöntemi olan ANOVA analizine göre hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: Kesme kuvveti ANOVA analizi

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri	
Model	6851.98	13	527.08	36.14	0.0272	significant
A-Kesme Hızı	88.24	1	88.24	6.05	0.1331	
B-İlerleme Oranı	164.39	1	164.39	11.27	0.0784	
C-Kesme Derinliği	1135.07	1	1135.07	77.84	0.0126	
D-Nano Akışkan	32.08	1	32.08	2.20	0.2762	
AB	11.60	1	11.60	0.7955	0.4666	
AC	6.20	1	6.20	0.4254	0.5812	
AD	12.38	1	12.38	0.8491	0.4541	
BC	0.2816	1	0.2816	0.0193	0.9022	
BD	1.30	1	1.30	0.0893	0.7932	

Tablo 4.3: Kesme Kuvveti ANOVA analizi (devam ediyor)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F-değeri	p- değeri
CD	84.34	1	84.34	5.78	0.1380
A ²	6.44	1	6.44	0.4418	0.5747
B ²	104.58	1	104.58	7.17	0.1157
C ²	3.47	1	3.47	0.2382	0.6738
D ²	0.0000	0			
Residual	29.16	2	14.58		
Cor Total	6881.14	15			

Tablo 4.3’de Model F değerinin 36,14 olması modelin anlamlı olduğunu gösterir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir F değerinin oluşma olasılığı %2,72’dir. 0.0500’den küçük P değerleri, model terimlerinin önemli olduğunu gösterir. Bu durumda C anlamlı bir model terimidir. 0.1000’den büyük değerler, model terimlerinin anlamlı olmadığını gösterir. Çok sayıda önemsiz model terimi varsa (hiyerarşiyi desteklemek için gerekli olanlar hariç), model azaltma yoluna gidilerek iyileştirilebilir.

Bu tablo incelendiğinde p değeri 0,05’den küçük olan anlamlı değerlerden en yüksek F değeri kesme derinliği parametresine aittir. Bu parametre kesme kuvvetini en çok etkileyen değerdir. İkinci en yüksek F değeri kesme hızına aittir.

4.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Yüzey pürüzlülüğü tanımı gereği makine parçalarının üretiminde hassasiyetin ve işleme kalitesinin en önemli göstergelerinden biridir. Bu çalışmada her işleme sonrası işlenmiş yüzeyden rastgele 3 noktanın pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Tablo 4.4’te ölçülen Ra, Rq ve Rz değerlerinin ortalamaları gösterilmektedir.

Tablo 4.4: Deneý çalıřmasında elde edilen pürüzlülük deęerleri ortalamaları

	V_c	Nano akışkan	f_z	a_p	V_f	Ortalama Ra	Ortalama Rq	Ortalama Rz
	m/dk		mm/ağız	mm	m/dk	μm	μm	μm
1	30	Baz	0,05	0,10	19,11	0,095	0,117	0,592
2	30	Baz + %1 MoS ₂	0,07	0,15	26,75	0,130	0,156	0,736
3	30	Baz + %1 MgO	0,09	0,20	34,39	0,134	0,162	0,754
4	30	Baz + %1 ZnO	0,11	0,25	42,04	0,174	0,214	1,076
5	35	Baz + %1 MgO	0,05	0,15	22,29	0,103	0,127	0,633
6	35	Baz + %1 ZnO	0,07	0,10	31,21	0,147	0,177	0,828
7	35	Baz	0,09	0,25	40,13	0,137	0,166	0,781
8	35	Baz + %1 MoS ₂	0,11	0,20	49,04	0,126	0,156	0,774
9	40	Baz + %1 ZnO	0,05	0,20	25,48	0,132	0,163	0,821
10	40	Baz + %1 MgO	0,07	0,25	35,67	0,129	0,159	0,778
11	40	Baz + %1 MoS ₂	0,09	0,10	45,86	0,145	0,179	0,858
12	40	Baz	0,11	0,15	56,05	0,210	0,254	1,157
13	45	Baz + %1 MoS ₂	0,05	0,25	28,66	0,163	0,199	0,940
14	45	Baz	0,07	0,20	40,13	0,124	0,154	0,781
15	45	Baz + %1 ZnO	0,09	0,15	51,59	0,155	0,190	0,930
16	45	Baz + %1 MgO	0,11	0,10	63,06	0,154	0,190	0,924

Tablo 4.5'te L16 deney tasarımına göre yapılmış çalışmalar sonucu ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamasının yüzey pürüzlülüğüne etkisi S/N oranları şeklinde verilmiştir. Kontrol faktörlerinin etkisinin anlaşıldığı bu tabloda en büyük S/N değeri o faktörün optimum seviyesini göstermektedir. Bu seviyeler tabloda koyulaştırılarak belli edilmiştir.

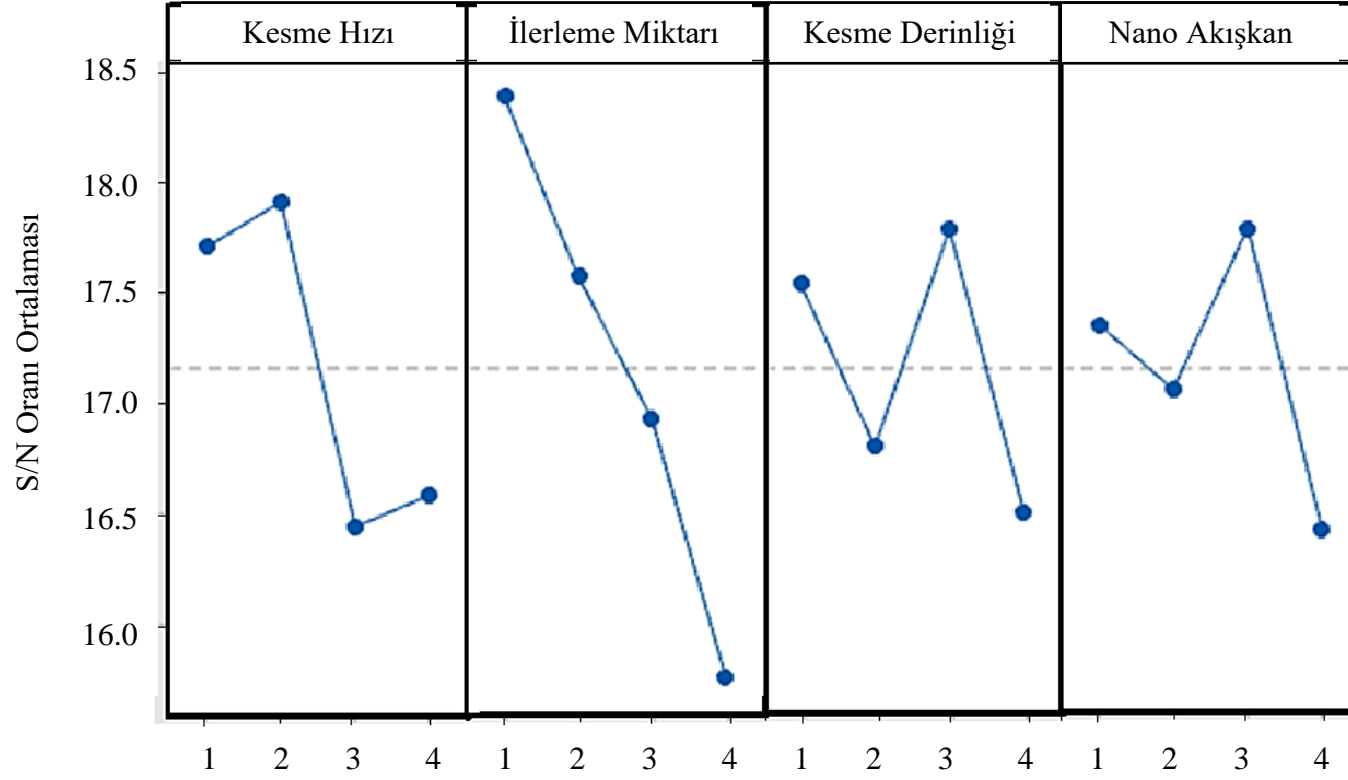
Tablo 4.5: Taguchi yüzey pürüzlülüğü analizi

Level	Kesme hızı m/dk	İlerleme miktarı mm/ağız	Kesme Derinliği mm	Nano Akışkan
1	17.71	18.39	17.54	17.36
2	17.91	17.58	16.80	17.06
3	16.44	16.92	17.79	17.80
4	16.59	15.76	16.51	16.43
Delta	1.47	2.64	1.28	1.37
Rank	2	1	4	3

Şekil 4.2'de yüzey pürüzlülüğü için çizilmiş S/N oranı grafiği görülmektedir. Bu grafikte kesme hızına göre en iyi pürüzlülük oranını seviye 2 yani 35 m/dk'lık kesme hızı vermiştir. 40 ve 45 m/dk'lık hızlar kesme hızına göre pürüzlülükte daha kötü sonuçlar göstermiştir. İlerleme miktarına göre pürüzlülükte en iyi sonuç 0,05 mm/ağız değerine aittir. 0,09 ve 0,11 mm/ağız ilerleme değerleri bu parametrede performansı diğer ilerleme miktarlarından kötüdür. Kesme derinliğine göre değerlendirildiğinde en iyi sonuç 3. seviye olan 0,20 mm'lik değerde görülmüştür. Bu parametreye göre 0,25 mm ve 0,15 mm diğerlerinden daha düşük performans göstermiştir. Nano akışkanlara göre pürüzlülük performanslarına bakıldığında en yüksek yani en iyi değer %1'lik MoS₂ nano akışkanında ölçülmüştür. %1'lik ZnO ve %1'lik MgO nano akışkanı pürüzlülüğün iyileşmesine daha az katkı sunmuşlardır.

S/N Oranları Ana Etki Grafiği

Veri Araçları

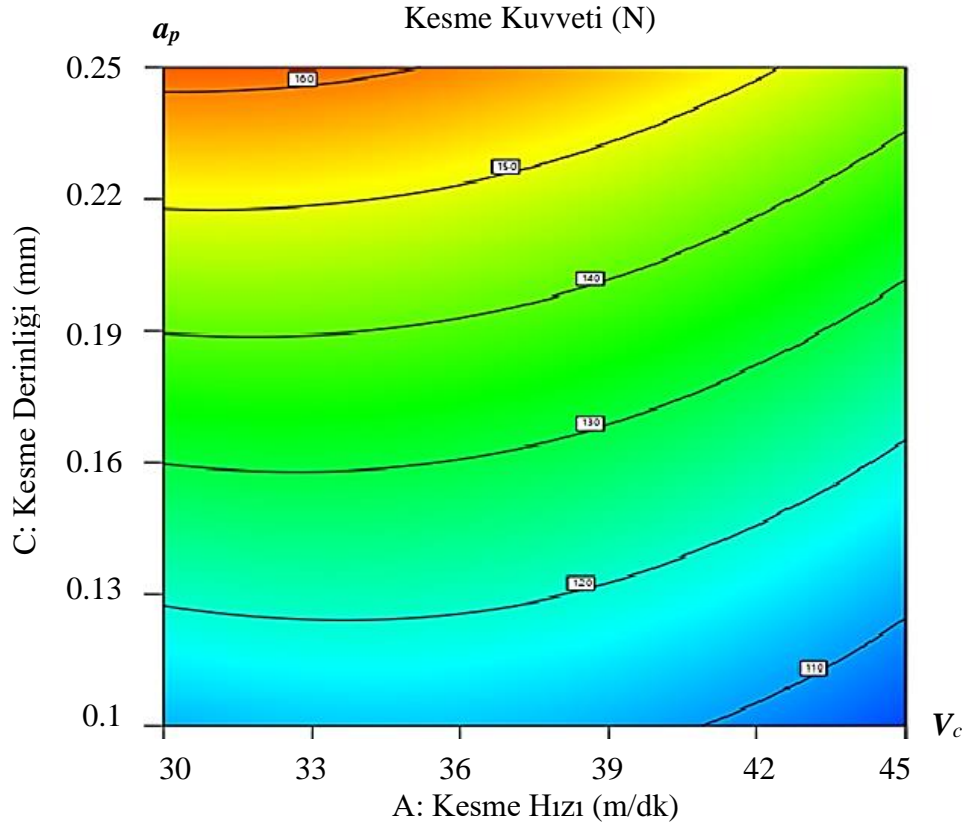


Sinyal-Gürültü oranı: En Küçük En İyi

Şekil 4.2: Yüzey pürüzlülüğü sinyal/gürültü oranı grafiği

4.3 Deney Parametrelerinin Grafikleri

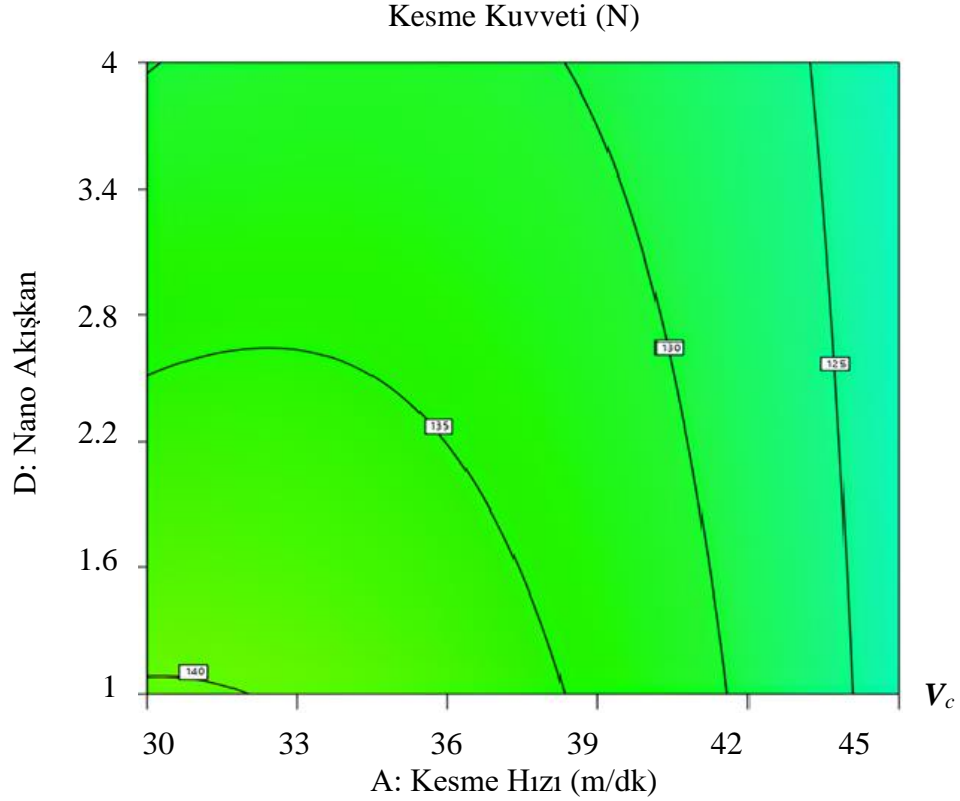
Deney tasarımında kullanılan parametrelerin çıktılarını görselleştirmek için 2 boyutlu kontur grafiklerden ve 3 boyutlu grafiklerden faydalanılmıştır. Bu grafikler için veriler Design Expert programına girilmiş ve grafik olarak çıktılar alınmıştır.



Şekil 4.3: Kesme hızı ve kesme derinliğinin kesme kuvvetine etki grafiği

Şekil 4.3'te kesme hızı ve kesme derinliğinin kesme kuvvetine etkisini gösteren kontur grafik görülmektedir. Bu grafikte x ekseninde kesme hızı y ekseninde kesme derinliği verilmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler ilerleme oranı ve nano akışkan sabitlenmiştir. İlerleme oranı 0,08 mm/ağız ve nano akışkan 2,5 olarak belirlenmiştir. Buna göre artan kesme hızlarında kesme kuvveti değerleri kesme derinliğinde daha düşük olduğu görülmüştür. En düşük kesme kuvveti 45 m/dk kesme hızında ölçülmüştür. Kesme derinliği artışı kesme kuvvetinde belirgin bir artışa sebep olmaktadır. Artan kesme derinliğinde iş parçası üzerinden kaldırılan talaş hacminin artması dolayısı ile kesme kuvveti değerinde artış görülmüştür. 0,25 mm kesme derinliğinde en yüksek kesme kuvvetine ulaşılmıştır.

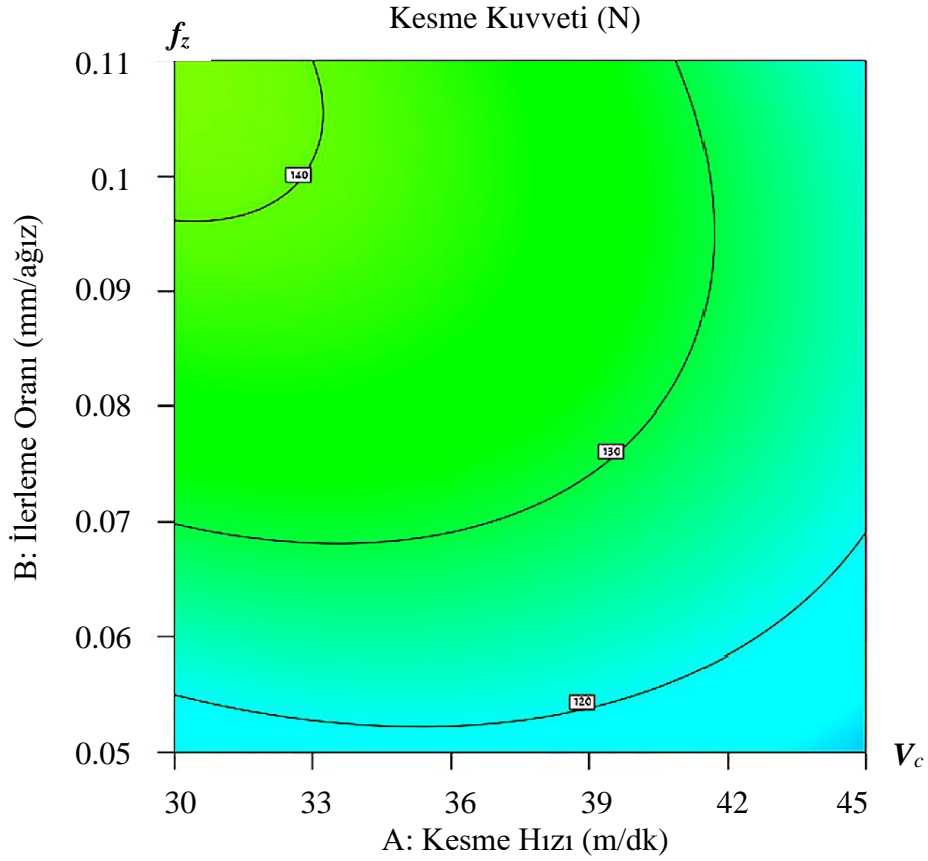
Sonuç olarak, yüzey frezeleme işleminde hem kesme hızının hem de kesme derinliğinin kesme kuvveti üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu görülmektedir. Yüksek kesme derinliği kesme kuvvetini artırırken, yüksek kesme hızları kuvveti düşürebilmektedir.



Şekil 4.4: Kesme hızı ve nano akışkanın kesme kuvvetine etki grafiği

Şekil 4.4'te kesme hızı ve nano akışkanın kesme kuvvetine etkisini gösteren kontur grafik çizilmiştir. Bu grafikte x ekseninde kesme hızı ve y ekseninde nano akışkan türü verilmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler ilerleme oranı ve kesme derinliği sabitlenmiştir. İlerleme oranı 0,08 mm/ağız ve kesme derinliği 0,175 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre daha yüksek kesme hızlarında kesme kuvveti değerleri düşük çıkmaktadır. En düşük kesme kuvveti değerleri 45 m/dk kesme hızlarında ölçülmüştür. Kesme kuvvetine göre nano akışkan türlerinin farkı çok az çıkmaktadır. Nano akışkan türü 1-4 arasında anlamlı bir fark ölçülemez. Bu da bize nano akışkan çeşitlerinin kesme kuvvetine katkısının daha az olduğunu gösterir.

Sonuç olarak, bu grafik, kesme hızının kesme kuvvetini belirgin şekilde azalttığını, ancak nano akışkan türünün kesme kuvveti üzerinde sınırlı bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Nano akışkan kullanımı kesme işlemlerinde yüzey kalitesini artırma potansiyeline sahip olsa da kesme kuvvetleri açısından optimal sonuçlar, kesme hızı gibi diğer faktörlerle daha fazla ilişkilidir.

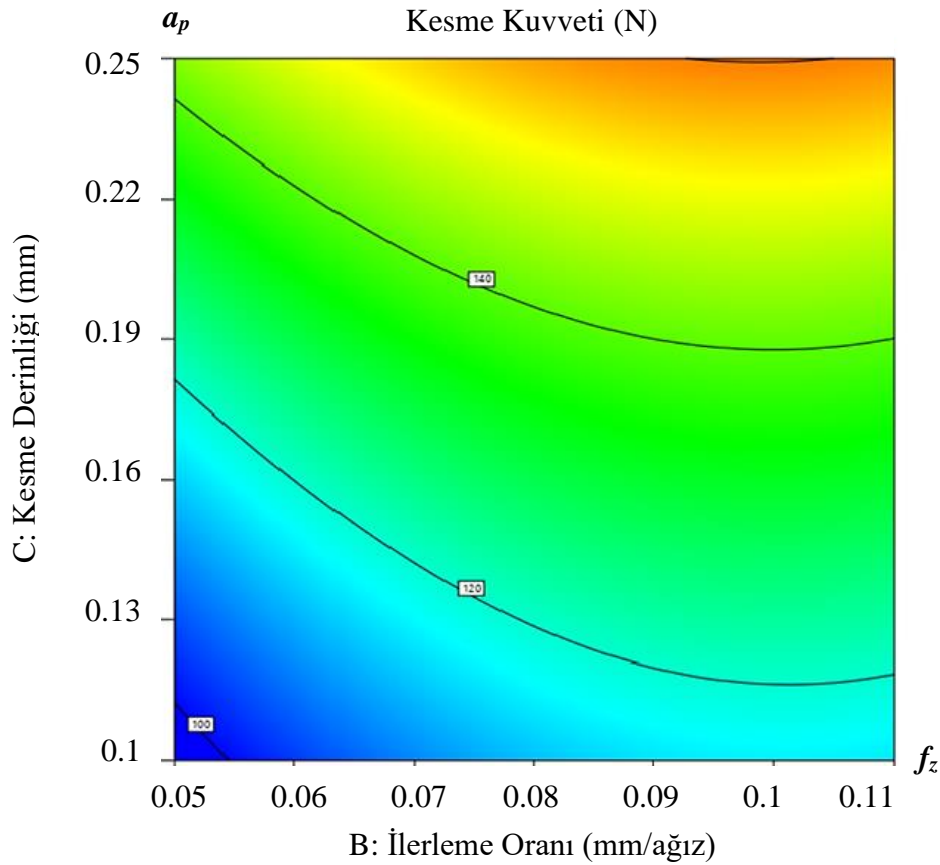


Şekil 4.5: Kesme hızı ve ilerleme oranının kesme kuvvetine etki grafiği

Şekil 4.5’de kesme hızı ve ilerleme oranının kesme kuvvetine etkisini gösteren kontur grafik görülmektedir. Bu grafikte x ekseninde kesme hızı ve y ekseninde ilerleme oranı verilmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme derinliği ve nano akışkan türü sabitlenmiştir. Kesme derinliği 0,175 mm olarak ve nano akışkan türü 2,5 olarak belirlenmiştir. Grafik incelendiğinde ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvveti değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Bu aynı kesme hızında daha fazla malzeme işlenmesine bağlı olarak kesme kuvvetinde artışa sebep olduğunu gösterir. Aynı ilerleme miktarında kesme hızı artışı belli bir yere kadar kesme kuvvetinde çok az değişime sebep olurken belli değerden sonra aynı ilerleme oranında kesme kuvveti düşmektedir. Örneğin 0,07 mm/ağız

ilerleme miktarında kesme hızı 39 m/dk'ya kadar kesme kuvveti çok az değişmesine karşın 45 m/dk'ya gelindiğinde kesme kuvveti düşmüştür. Deney seti değerlerinde en yüksek kesme kuvveti 0,11 mm/ağız ilerleme oranı ve 30 m/dk kesme hızında kaydedilmiştir. Kesme hızı arttıkça sürtünmeyle kesme bölgesi sıcaklığı artmakta ve bu da iş parçasını yumuşamasına dolayısıyla kesme kuvvetinin azalmasına sebep olmaktadır.

Sonuç olarak, bu grafik, kesme hızının kesme kuvvetini belirgin şekilde azalttığını, ilerleme oranının ise kesme kuvvetini artırdığını göstermektedir. İlerleme oranının düşük olduğu durumlarda kesme hızı daha büyük bir etkiye sahipken, ilerleme oranı arttıkça kesme kuvveti üzerindeki etkisi daha sınırlı kalmaktadır.

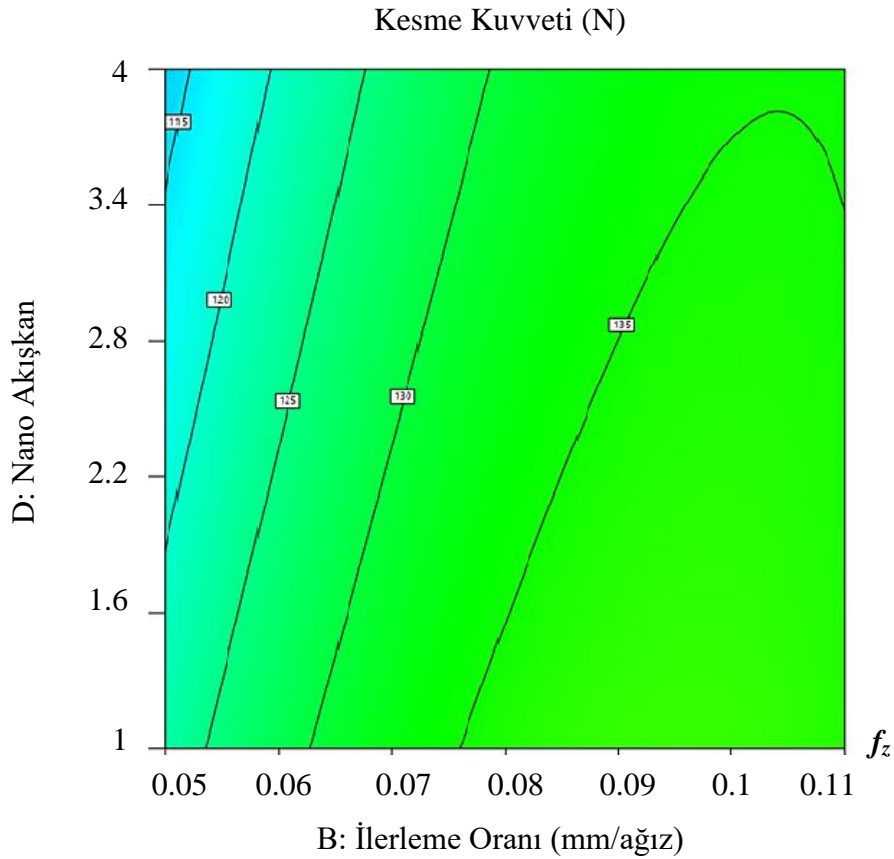


Şekil 4.6: İlerleme oranı ve kesme derinliğinin kesme kuvvetine etki grafiği

Şekil 4.6'da ilerleme oranı ve kesme derinliğinin kesme kuvvetine etkisini gösteren kontur grafik çizilmiştir. Bu grafikte x ekseninde ilerleme oranı ve y ekseninde kesme derinliği verilmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme hızı ve nano akışkan türü sabitlenmiştir. Kesme hızı 37,5 m/dk olarak ve nano akışkan türü 2,5 olarak belirlenmiştir.

İlerleme oranı arttıkça kesme kuvvetinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Özellikle ilerleme oranı 0.11 mm/ağız seviyesine çıktığında kesme kuvveti maksimum değerlere ulaşmaktadır. Kesme derinliği arttıkça da kesme kuvveti artmaktadır. Ancak kesme derinliğinin etkisi, ilerleme oranına kıyasla daha az belirgindir. En yüksek kesme kuvveti 0,11 mm/ağız ve 0,25 mm kesme derinliğinde ölçülmüştür. Kesme derinliği arttıkça kaldırılan talaş hacmi büyüdüğünden kesme kuvveti artmaktadır. İlerleme oranı arttıkça birim zamanda kaldırılması gereken talaş arttığı için kesme kuvvetinde artış şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu grafik hem ilerleme oranının hem de kesme derinliğinin kesme kuvvetini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. İlerleme oranı, kesme kuvveti üzerinde daha büyük bir etkiye sahipken, kesme derinliği de kuvveti artırıcı bir rol oynamaktadır.

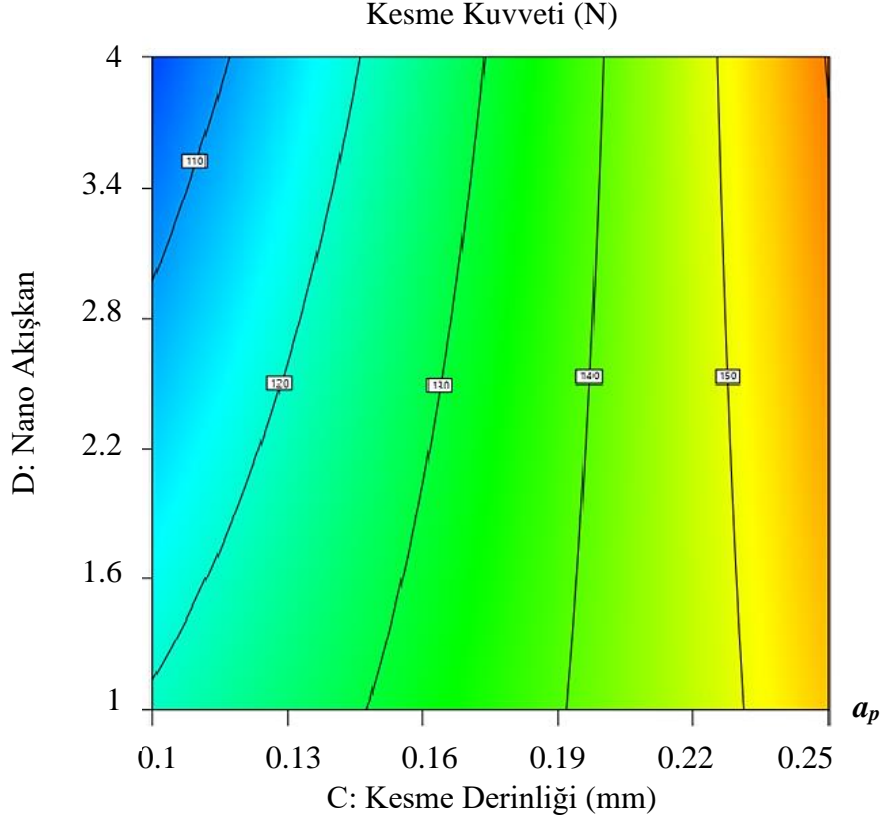


Şekil 4.7: İlerleme oranı ve nano akışkanın kesme kuvvetine etki grafiği

Şekil 4.7’de ilerleme oranı ve nano akışkanın kesme kuvvetine etkisini gösteren kontur grafik gösterilmiştir. Bu grafikte x ekseninde ilerleme oranı ve y ekseninde nano akışkan

türü verilmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme hızı ve kesme derinliği sabitlenmiştir. Kesme hızı 37,5 m/dk olarak ve kesme derinliği 0,175 mm olarak belirlenmiştir. İlerleme miktarı arttıkça kesme kuvveti genel olarak artmaktadır. İlerleme oranı 0.11 mm/ağız seviyesine ulaştığında kesme kuvveti 135 N seviyesine kadar çıkmaktadır. Nano akışkan cinsine göre en yüksek kesme kuvveti baz akışkanda meydana gelmiştir. Deney setinde en yüksek kesme kuvveti baz akışkanda 0,09 mm/ağız ilerleme miktarı ve 0,25 mm kesme derinliğinde 35 m/dk ilerleme hızında $F_r=160.013$ N ölçülmüştür. En düşük kesme kuvveti %1'lik ZnO nano akışkanda 0,07 mm/ağız ilerleme miktarı ve 0,10 mm kesme derinliğinde 35 m/dk ilerleme hızında $F_r=99.541$ N ölçülmüştür. İlerleme miktarındaki artış birim zamandaki kesilen talaş miktarını arttırdığı için kesme kuvvetini artırırken nano akışkanlar yağlama etkisi ile kesme kuvvetine bir miktar düşüş olarak etki etmiştir.

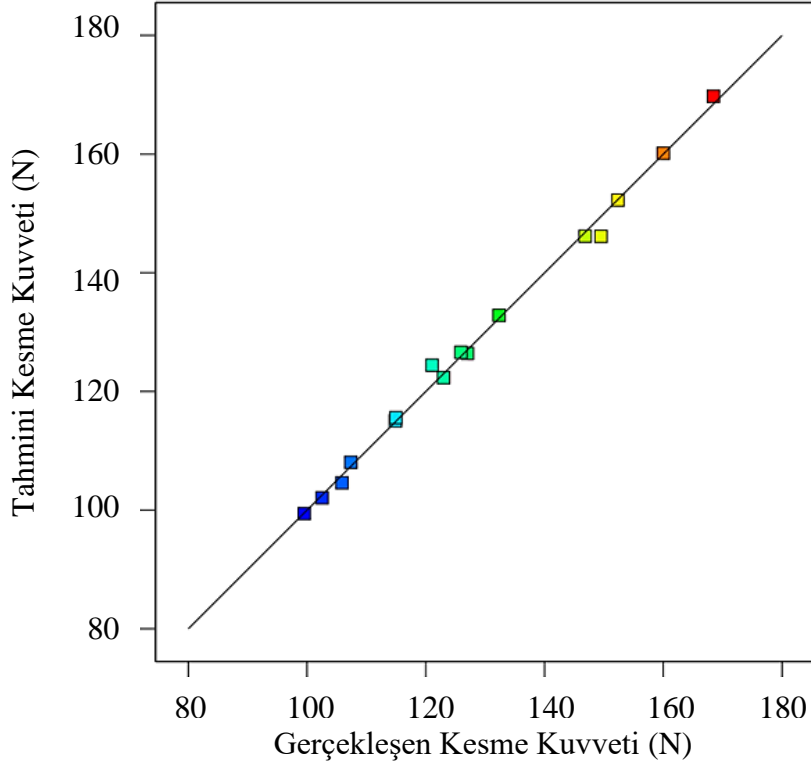
Bu grafik, ilerleme oranının kesme kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak, nano akışkan türü, kesme kuvvetlerini düşürücü ve stabil hale gelmesini sağlayıcı bir etki oluşturmaktadır. Nano akışkan, yüksek ilerleme oranlarında bile kesme kuvvetlerinin kabul edilebilir seviyelerde kalmasına katkı yaparak işlem verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 4.8: Kesme derinliği ve nano akışkanın kesme kuvvetine etki grafiği

Şekil 4.8’de kesme derinliği ve nano akışkanın kesme kuvveti üzerine olan etkisi kontur grafiğinde çizilmiştir. Bu grafikte x ekseninde kesme derinliği ve y ekseninde nano akışkan türü verilmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme hızı ve ilerleme oranı sabitlenmiştir. Kesme hızı 37,5 m/dk olarak ve ilerleme miktarı 0,08 mm/ağız olarak belirlenmiştir. Kesme derinliği arttıkça bütün akışkan türlerinde kesme kuvveti artışı gözlenmiştir. Kesme derinliğindeki artış kaldırılan talaş hacmini büyüttüğünden kesme kuvvetini arttırıcı yönde etki eder. 0,25 mm kesme derinliğinde tüm nano akışkan türlerinde daha yüksek kesme kuvvetleri ölçülse de 4 numaralı nano akışkan kesme derinliğindeki artışa karşılık en yüksek kesme kuvveti artışı göstermiştir.

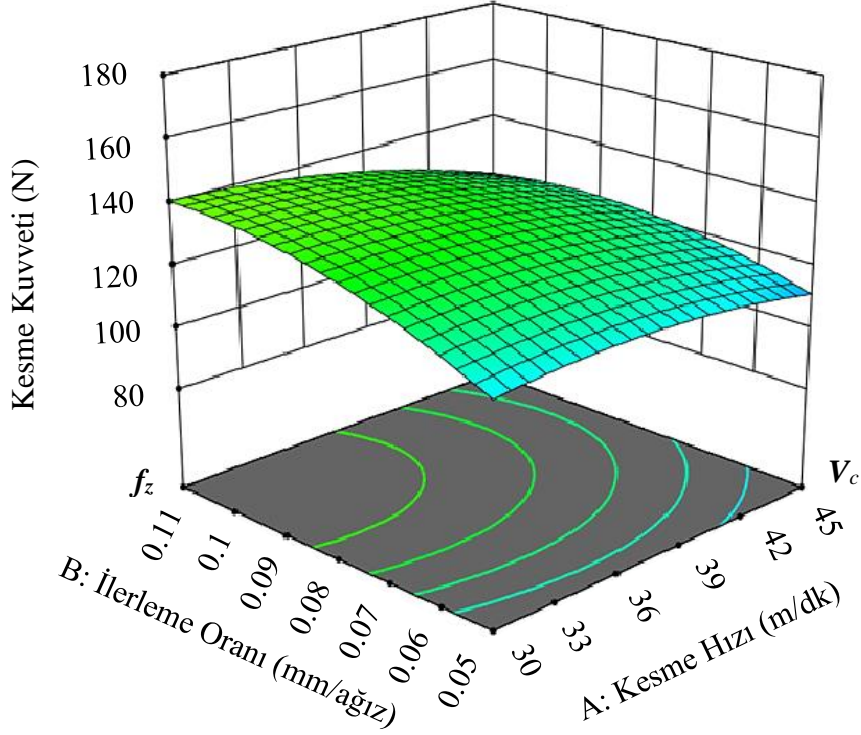
Grafik kesme derinliğinin kesme kuvvetine etkisinin yüksek olduğunu gösterirken nano akışkanların yağlama ve soğutma etkisiyle düşüş yönünde katkı sunduğunu anlatmaktadır. Böylece nano akışkanların türlerine göre değişen miktarlarda olmak üzere işleme verimine katkı sağladıkları anlaşılmaktadır.



Şekil 4.9: Gerçekleşen ve tahmini kesme kuvveti grafiği

Şekil 4.9'daki grafikte deneyler sırasında ölçülen kesme kuvveti ile model üzerinden hesaplanan kesme kuvvetlerini göstermektedir. X ekseninde gerçekleşen kesme kuvveti değerleri y ekseninde modelin tahmin ettiği değerler bulunmaktadır. Bu grafikte modelin doğruluğu ve tahmin gücü görselleştirilmektedir. Grafik çizgisinin 45° eğimli olması modelin doğru tahminler yaptığının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda verilerin bu çizgi boyunca dağılım göstermesi modelin tahmin ettiği değerlerin deneysel verilerle güçlü bir uyum içinde olduğunu ifade eder. Ayrıca grafikte verilen renk skalası kuvvetlerin farkının ortaya çıkmasına görsel katkı sağlamaktadır. Düşük kesme kuvvetleri mavi tonlarda yüksek kuvvetler kırmızı tonlarla ifade edilmiştir. Renk dağılımındaki denge de modelin gücüne işaret eder. Sonuç olarak modelin yüksek doğrulukta tahminler yapması, frezeleme işleminde kesme kuvvetlerini optimize etmek hususunda güvenilir bir araç olduğunu ortaya koyar.

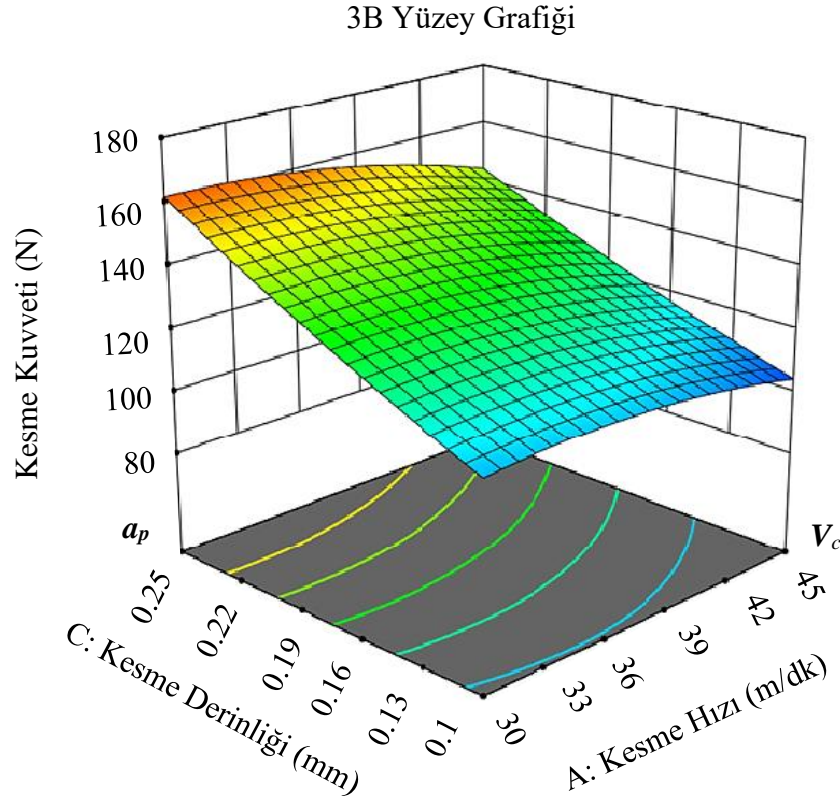
3B Yüzey Grafiği



Şekil 4.10: Kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme kuvveti 3B grafiği

Şekil 4.10'da görülen grafik kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi 3 boyutlu grafik şeklinde vermektedir. Grafikte x eksenini kesme hızını, y eksenini ilerleme oranını ve z eksenini kesme kuvvetini ifade etmektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme derinliği ve nano akışkan sabitlenmiştir. Kesme derinliği 0,175 mm ve nano akışkan 2,5 olarak belirlenmiştir. Genel olarak kesme hızı artarken kesme kuvvetinin azaldığı bir trend gözlemlenmektedir. Burada kesme hızının artmasıyla malzemede kesmeye karşı direncin azaldığının bir ifadesidir. Kesme hızı arttığında sürtünmeyle oluşan ısı artmaktadır. Isınan kesme bölgesinde malzeme yumuşamakta ve kesme kuvveti düşmektedir. Kesme hızının 30 m/dk ilerleme miktarının 0,11 mm/ağız olduğu durumda en yüksek kesme kuvveti ölçülmüştür. Kesme hızı artışında kesme kuvveti düşerken ilerleme oranı artışında kesme kuvveti büyümektedir. İlerleme oranı artışı ile kesme kuvvetindeki artış miktarı kesme hızı ile meydana gelen kesme kuvvetindeki değişime göre daha düşük seviyededir. İlerleme oranı artışıyla daha kısa sürede kesilen talaş miktarı arttığı için kesme kuvvetinde de artış görülmektedir. Grafikteki yüzey eğrisi, kesme hızındaki artışın, ilerleme oranına kıyasla kesme kuvveti üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Eğri düz bir

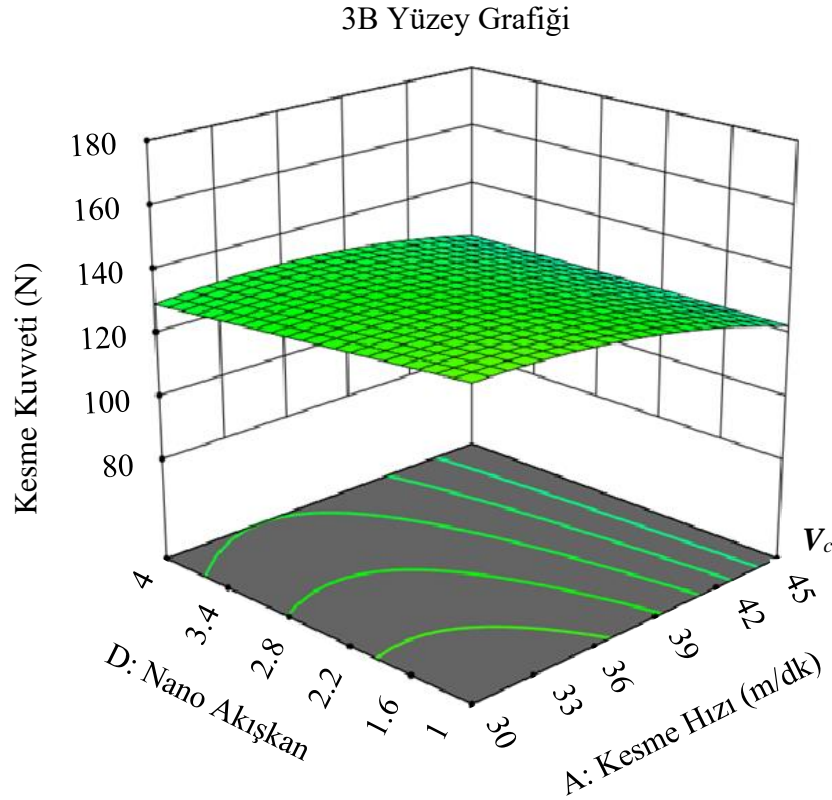
hat yerine hafif eğimli bir yapı sergileyerek, kesme hızının kesme kuvveti üzerindeki etkisinin ilerleme oranından daha fazla olduğunu belirtir.



Şekil 4.11: Kesme hızı, kesme derinliği ve kesme kuvveti 3B grafiği

Şekil 4.11’de kesme hızı, kesme derinliği ve kesme kuvveti arasındaki ilişki 3 boyutlu grafik şeklinde ifade edilmiştir. Grafikte x eksenini kesme hızını, y eksenini kesme derinliğini ve z eksenini kesme kuvvetini göstermektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler ilerleme oranı ve nano akışkan sabitlenmiştir. İlerleme oranı 0,08 mm/ağız ve nano akışkan 2,5 olarak belirlenmiştir. Bu grafikte kesme hızı ile kesme derinliğinin kesme kuvveti üzerindeki etkisini gösterilmiştir. Kesme hızı arttıkça (x eksenini boyunca sağa doğru gidildikçe) kesme kuvvetinin (z eksenini) genel olarak düştüğü görülmektedir. Kesme hızı artışı ile sürtünme etkisi ile oluşan ısının parçayı yumuşatması kesme kuvvetinde azalmayı meydana getirmektedir. Grafikte derinliğin artmasıyla birlikte kesme kuvvetinin hızla yükseldiği ve yüzeyin daha dik bir eğim aldığı görülmektedir. Bu, talaş kaldırma derinliğinin artmasıyla kesme kuvvetinin önemli ölçüde arttığını ve bu nedenle daha fazla güç gereksinimi olduğunu işaret eder. Kesme derinliği artışı ile iş parçasından kaldırılan miktar büyüdüğünden doğrudan kesme kuvvetinde artışa sebep olmaktadır. Grafikteki yüzey eğrisi, kesme hızının

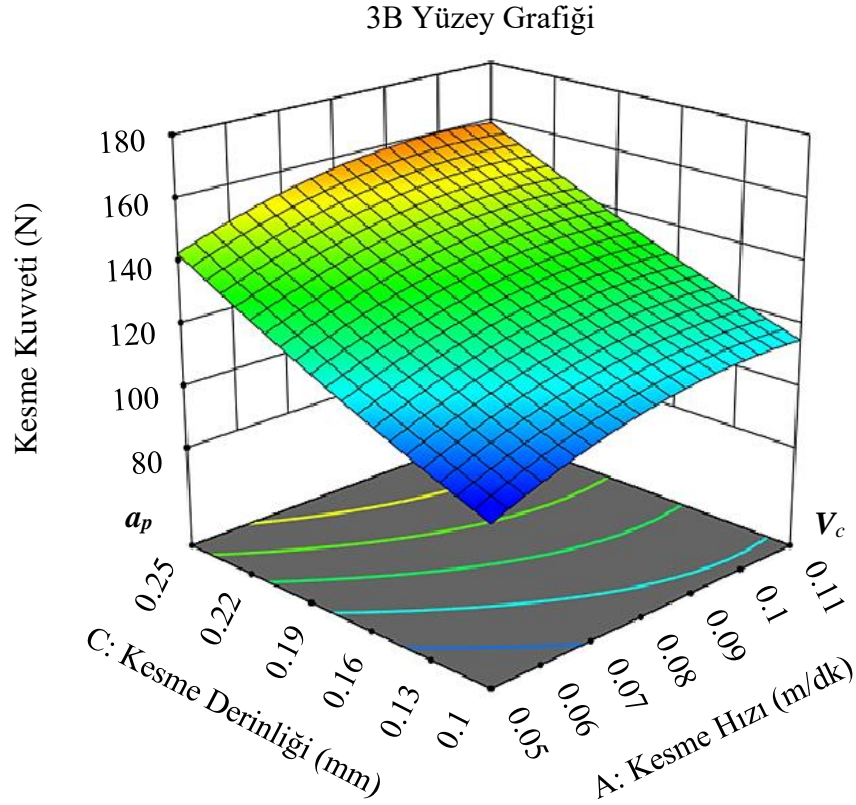
artışının kesme kuvveti üzerindeki etkisinin daha baskın olduğunu göstermektedir. Kesme hızı yüksek değerlere çıktıkça kesme kuvvetinde belirgin bir düşüş yaşanırken, kesme derinliği arttıkça kesme kuvveti hızlı bir şekilde artmaktadır. Kesme derinliği artışının kesme kuvveti üzerine daha etkili ve kritik olduğu grafikten okunmaktadır.



Şekil 4.12: Kesme hızı, nano akışkan ve kesme kuvveti 3B grafiği

Şekil 4.12’de kesme hızı, nano akışkan türü ve kesme kuvveti arasındaki ilişki 3 boyutlu grafik şeklinde çizilmiştir. Grafikte x eksenini kesme hızını, y eksenini nano akışkanı ve z eksenini kesme kuvvetini göstermektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler ilerleme oranı ve kesme derinliği sabitlenmiştir. İlerleme oranı 0,08 mm/ağız ve kesme derinliği 0,175 mm olarak belirlenmiştir. Kesme hızının artması kesme kuvvetini bir miktar düşürürken nano akışkan türünün kesme kuvveti üzerine dramatik bir etkisi görülmemektedir. Kesme hızı artışı ile birlikte kesme bölgesinde görülen sıcaklık artışı malzemedeki yumuşamaya ve kesme kuvvetinde düşmeye sebep olmaktadır. Diğer taraftan literatürle uyumlu olarak nano akışkanlar kesme kuvvetini yağlama etkisi ile bir miktar azaltsa da bu etki diğer parametrelere göre daha zayıf kalmaktadır. Nano akışkanın kesme kuvveti üzerindeki etkisi

kesme hızının etkisi ile kıyaslandığında grafikteki yüzey eğimine de yansıdığı gibi oldukça sınırlıdır.

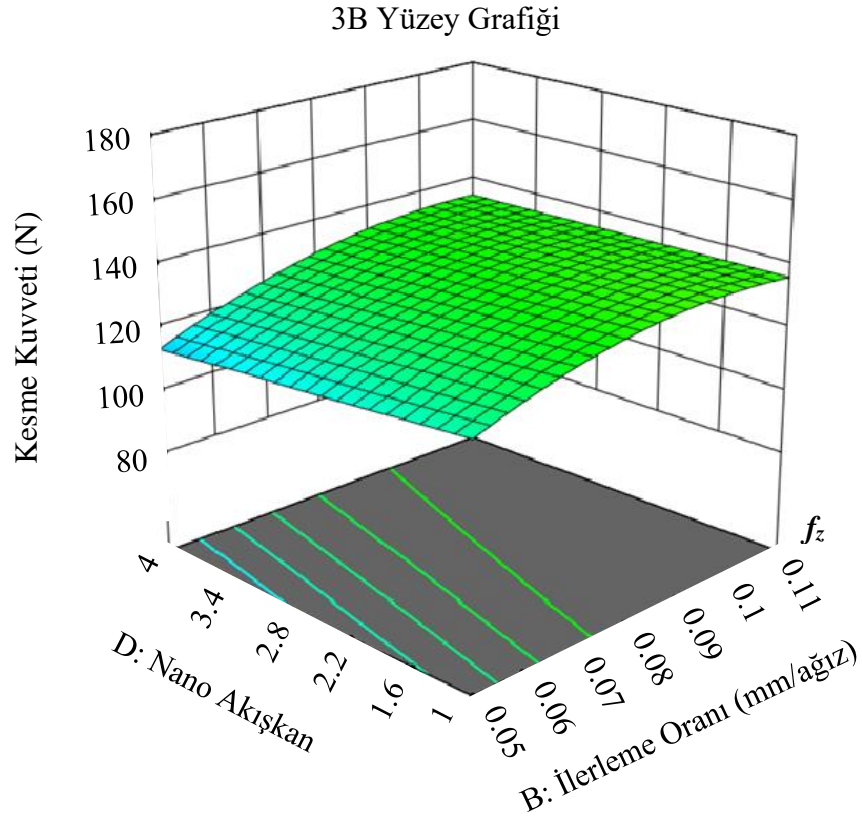


Şekil 4.13: İlerleme oranı, kesme derinliği ve kesme kuvveti 3B grafiği

Şekil 4.13'te ilerleme oranı, kesme derinliği ve kesme kuvveti arasındaki ilişki 3 boyutlu grafik şeklinde gösterilmiştir. Grafikte x eksenini ilerleme oranını, y eksenini kesme derinliğini ve z eksenini kesme kuvvetini göstermektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme hızı ve nano akışkan türü sabitlenmiştir. Kesme hızı 37,5 m/dk ve nano akışkan türü 2,5 olarak belirlenmiştir. İlerleme miktarı arttıkça (x ekseninde sağa doğru) kesme kuvvetinde artış görülmektedir. Birim zamanda kaldırılan malzeme miktarı artışından kaynaklı olarak kesme kuvvetindeki büyüme grafikte eğim olarak kendini göstermektedir. Benzer şekilde kesme derinliği artışı da kesme kuvvetine artış yönünde etki etmektedir. Yine kaldırılan malzeme tabakasındaki fazlalaşma dirence bağlı kesme kuvveti artışına sebep olmaktadır. Grafikte ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin düşük olduğu bölgede kesme kuvveti mavi renklerle temsil edilirken ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin birlikte artışı hatırı sayılır oranda kesme kuvvetini büyütmede ve renk skalası turuncu ve kırmızıya doğru dönmektedir. Her iki parametre de kaldırılan talaş miktarını hem hacim hem de birim

zamandaki miktar olarak etkilediğinden ikisinin artışı kesme kuvvetini oldukça büyötmektedir.

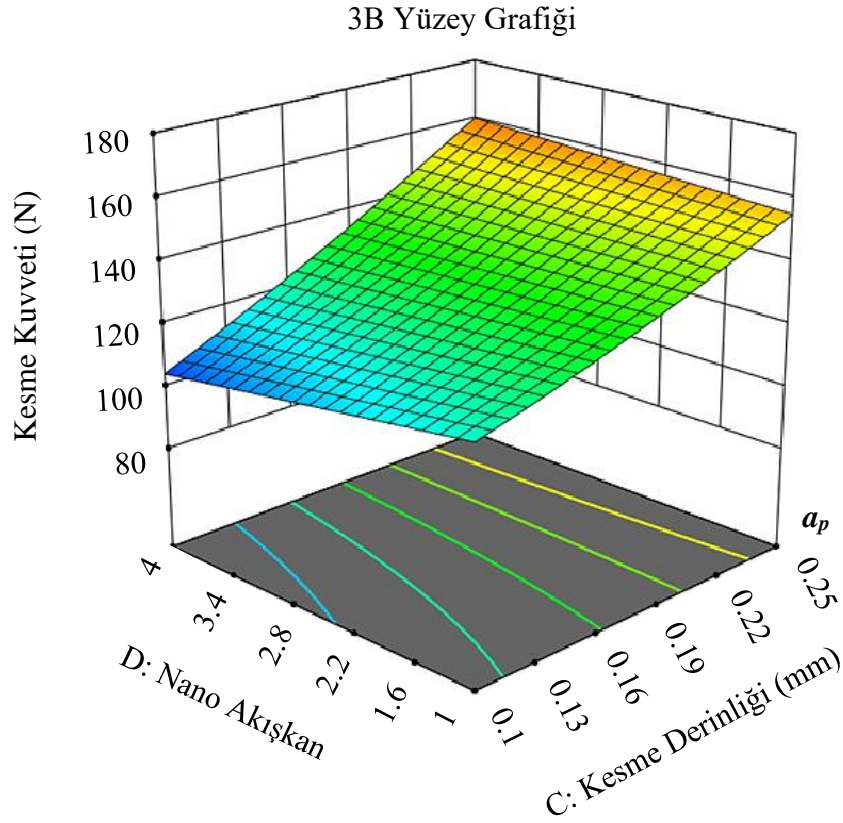
Sonuç olarak bu grafik, ilerleme oranı ve kesme derinliğı arttıkça kesme kuvvetinin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle yüksek kesme kuvveti, takım aşınmasını ve enerji tüketimini artırdığından bu parametrelerin optimum seviyede tutulması önemlidir.



Şekil 4.14: İlerleme oranı, nano akışkan ve kesme kuvveti 3B grafiğı

Şekil 4.14'te ilerleme oranı, nano akışkan ve kesme kuvveti arasındaki ilişki 3 boyutlu grafik şeklinde çizilmiştir. Grafikte x ekseni ilerleme oranını, y ekseni nano akışkan türünü ve z ekseni kesme kuvvetini göstermektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme hızı ve kesme derinliğı sabitlenmiştir. Kesme hızı 37,5 m/dk ve kesme derinliğı 0,175 mm olarak belirlenmiştir. İlerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetinin arttığı görölmüştür. Bu artış kaldırılan malzeme miktarı artışına karşılık kesme kuvvetindeki büyüme ile uyumludur. İlerleme oranı artışı, nano akışkan türleri arasında kesme kuvvetlerinde değışim olarak çok büyük fark oluşturmamıştır. Ancak yine de baz akışkanla diğere nano akışkanlar arasında kesme kuvvetinde küçük bir düşme söz konusudur.

Grafik bütün olarak değerlendirildiğinde ilerleme miktarı kesme kuvvetini, birim zamanda kesilecek malzeme miktarı nedeniyle arttırmış ve nano akışkanların yağlayıcılık etkisi bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Ancak nano akışkan etkisi ilerleme oranına göre daha az etkiye sahiptir.



Şekil 4.15: Kesme derinliği, nano akışkan ve kesme kuvveti 3B grafiği

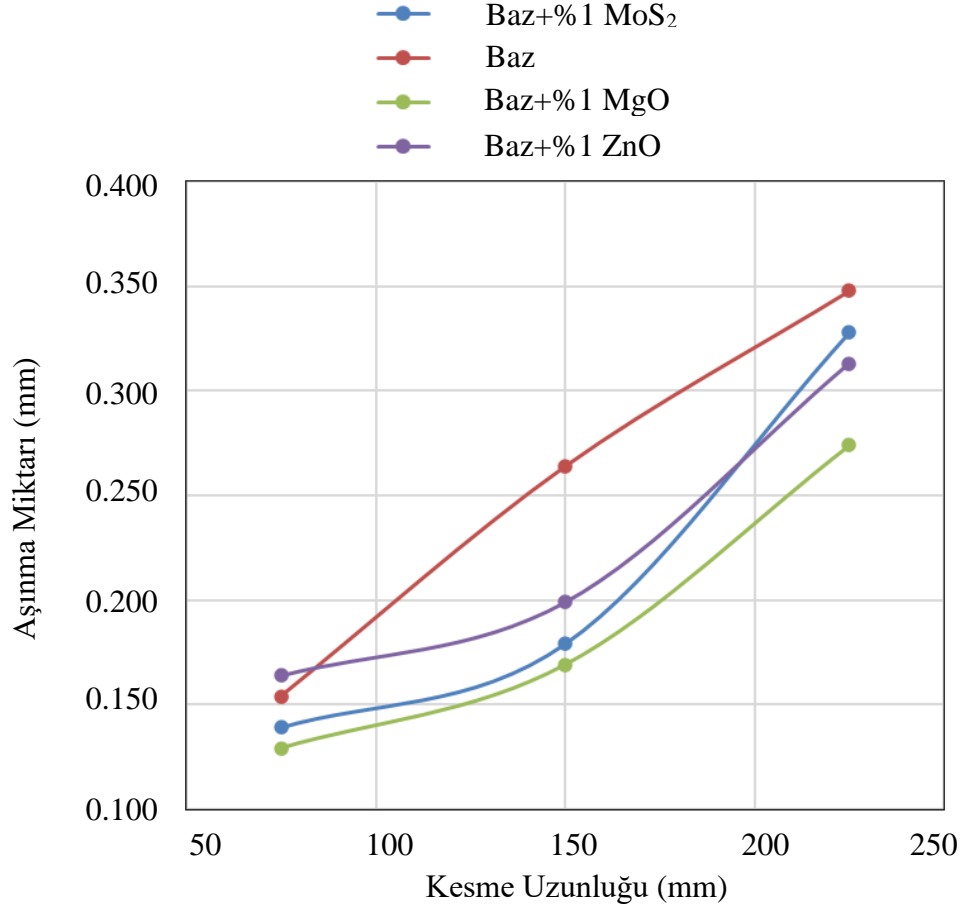
Şekil 4.15’de kesme derinliği, nano akışkan ve kesme kuvveti 3 boyutlu grafik şeklinde gösterilmiştir. Grafikte x eksenini kesme derinliğini, y eksenini nano akışkan türünü ve z eksenini kesme kuvvetini göstermektedir. Aynı zamanda mevcut faktörler kesme hızı ve ilerleme oranı sabitlenmiştir. Kesme hızı 37,5 m/dk ve ilerleme oranı 0,08 mm/ağız olarak belirlenmiştir. Kesme derinliği arttıkça düzenli bir şekilde kesme kuvvetinin arttığı gözlenmektedir. Bu artış takımın daha fazla malzeme tabakasını kaldırmaya çalışırken karşılaştığı direncin bir sonucudur. Kesme derinliği artışı her nano akışkan türü için kesme kuvvetinde belirgin artışa sebep olmuştur. Bu artış oran olarak 1 numaralı akışkanda daha az iken 4 numaralı nano akışkanda kesme derinliği artışına karşılık oluşan kesme kuvveti tepkisi daha belirgindir. Kesme derinliği kaldırılan malzeme hacmi itibarıyla kesme

kuvvetini büyütürken nano akışkan soğutma ve yağlama etkisi ile bunu bir miktar düşürmektedir.

Sonuç olarak, bu grafikte, kesme derinliğinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi nano akışkan türüne göre daha büyük ve belirgindir. Nano akışkan türüne göre kesme kuvveti değişmekle birlikte bu değişim sınırlı kalmaktadır. Özellikle yüksek kesme derinliklerinde nano akışkan türlerine karşılık gelen kesme kuvvetindeki değişim miktarı daha az belirgin hale gelmektedir.

4.4 Takım Ömrü Sonuçları

Literatürde bulunan çalışmalarda MQL yönteminin takım ömrüne olumlu katkılarından birçok kez bahsedilmiştir. Nano akışkanların farklı işleme türlerinde bu pozitif katkının ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmanın yapılmasındaki temel amaçlardan biri yüzey frezeleme işleminde nano akışkanların takım ömrüne katkı sunup sunmadığı ve olabilecek bu katkının miktarını ölçmektir. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar genel olarak gösterdi ki nano akışkanlar takım ömrünü anlamlı şekilde olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 4.16: Nano akışkan-takım ömrü grafiği

Şekil 4.16’da nano akışkan türlerinin takım ömrüne olan etkileri grafikte görülmektedir. Baz akışkanla yapılan deneylerde aşınma miktarı her kesme uzunluğu için en yüksek çıkmıştır. %1’lik MgO akışkanla yapılan deneylerde 150 mm’ye kadar kesme uzunluğunda daha düşük seyreden aşınma miktarı bu değerden sonra artış göstermiştir. Ancak tüm kesme uzunluklarında en düşük aşınma değerlerine sahiptir. 150 mm’deki aşınma miktarı 0,169 mm’dir. %1’lik MoS₂ nano akışkanı 200 mm’ye kadar kesme uzunluğunda makul bir aşınma miktarı sergilerken bu değerden sonra hızlı bir artış kaydederek %1’lik ZnO’ten daha fazla aşınma değeri göstermiştir. 150 mm’deki aşınma miktarı 0,179 mm’dir. %1’lik ZnO nano akışkan 150 mm’ye kadar kesme uzunluğunda diğer akışkanlara göre daha fazla ancak paralel bir aşınma göstermiştir. 150 mm’deki aşınma miktarı 0,200 mm’dir.

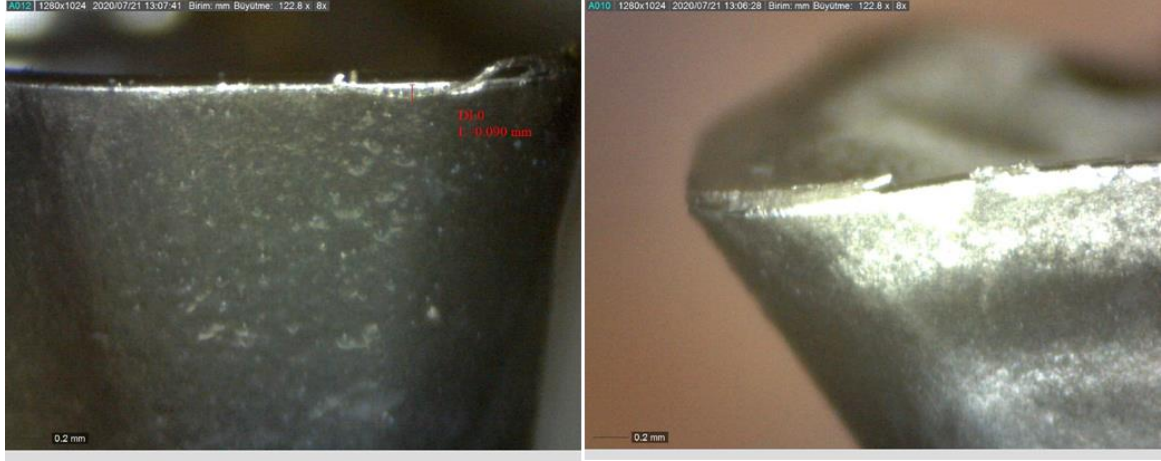
Baz akışkanla yapılan deneylerde takım aşınmasının yüksekliği takımın ömrünü önemli derece de düşmesine sebep olmuştur. Inconel 718 işlenmesi zor malzemelerden biridir ve işleme maliyetlerinin fazla olmasının sebeplerinden biri takım ömrünün kısa olmasıdır.

Dünyanın değişik yerlerindeki 20’den fazla laboratuvarında yayınlanan verilerde, etilen glikol baz akışkanının termal iletkenliği nano akışkanlardan daha kötü çıkmıştır. Baz akışkan ile yapılan deneyde takım aşınması bunu doğrularak daha fazla aşınmıştır. Yapılan çalışmalarda MgO yüksek ısı transfer katsayısıyla ısı transferi karakteristiğini iyileştirmiştir (Ali vd., 2019; Hemmat Esfe vd., 2015; Roohani & Toghraie, 2022). %1’lik MgO nano akışkanla yapılan deneylerde bu etkiyi doğrularak en düşük aşınma değerleri ile en iyi takım ömrünü ortaya koymuştur. MoS₂ yağlayıcı etkisi ile sürtünmeyi azaltıcı yönde etki etmektedir ve daha düşük sürtünme takım ömründe uzamaya sebep olmaktadır (Makhesana vd., 2023; Saravanan vd., 2023). ZnO iyi düzeyde termal iletkenliği ile soğutma görevini yerine getirmekte ve takım ömrüne olumlu yönde etki etmektedir (Edelbi vd., 2023; Sengwa ve Saraswat, 2023). Çalışmanın sonuçlarına göre sırasıyla %1’lik MoS₂ ve %1’lik ZnO nano akışkanları da takım aşınması azaltarak takım ömrünün iyileşmesine katkı sunmuşlardır.



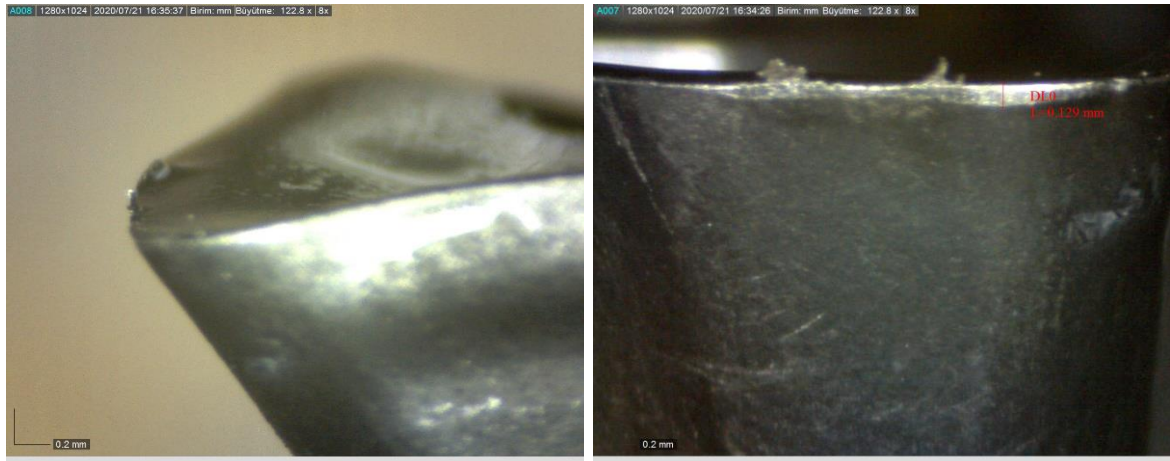
Şekil 4.17: Baz akışkan aşınma görüntüleri

Şekil 4.17’de baz akışkanla yapılan deneyler sonucu takım meydana gelen aşınmanın görüntüsü mevcuttur. Literatürde benzer aşınma mekanizması üzerine yapılmış detaylı çalışmalarda şekilde görülen parlak noktalar için kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklığın etkileri olduğu belirtilmiştir (Kursuncu vd., 2018). Inconel 718 yapısı gereği zor işlenen bir malzeme olduğu için kesme bölgesinde artan sıcaklıkla çıkan talaşlar takıma yapışmakta ve bu talaşlar koparken takım aşınmasına sebep olmaktadır. Şekilde görülen parlak noktalar talaş yapışan noktaları göstermektedir.



Şekil 4.18: Baz akışkan + %1'lik ZnO aşınma görüntüleri

Şekil 4.18'de %1'lik ZnO nano akışkanla yapılan deney sonucu farklı açılardan takım aşınma görüntüleri görülmektedir. Sol taraftaki görüntüde nispeten daha düzgün bir kesici ağız görülmektedir. Deformasyon izleri ve talaş yapışması görülmekle birlikte bunların sınırlı kalması nano akışkanın yağlama etkisiyle aşınmayı bir miktar önlediğini ifade etmektedir. Sağ taraftaki görüntüde ise kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkla talaşların takıma yapışıp ayrılması sonucu oluşan parlak noktalar daha net görülmektedir. Nano akışkan bu tip aşınma ve talaş yapışmasını önlemeye yardımcı olsa da tam koruma sağlayamadığını göstermektedir. Bu görüntü ZnO katkılı nano akışkanın yağlamada eksik kaldığı yerlerde takımın oluştuğu aşınmaları ortaya çıkarmaktadır. Baz akışkana göre aşınma daha az olmakla beraber ZnO nano parçacığının Inconel 718 gibi kesilmesi zor malzemelerin frezelemesinde uzun süreli ve yüksek sıcaklıkta tam koruma sağlayamayabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 4.19: Baz akışkan + %1'lik MgO aşınma görüntüleri

Şekil 4.19'da %1'lik MgO nano akışkanla yapılan frezeleme deneyi sonucu takımında oluşan aşınmanın görüntüleri görülmektedir. Her iki görüntü takımın farklı açıdan çekilmiş fotoğrafını içermektedir.

Sol taraftaki görüntüde, kesici kenarın üzerinde yer alan bazı mikroskobik deformasyonlar ve kenar bozulmaları dikkati çekmektedir. Yüzeyde oluşan küçük çatlaklar veya talaş yapışması belirtileri, işleme sırasında kesici ucun yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kaldığını göstermektedir. MgO nano akışkanının yağlayıcı etkisi bu tür deformasyonları azaltmış olabilir, ancak tamamen önleyememiştir. Kesici kenar boyunca gözlemlenen bu mikroskobik aşınma izleri, nano akışkanın sınırlı bir koruma sağladığı durumlarda oluşabilecek tipik aşınma izleridir.

Sağ taraftaki görüntüde ise, kesici yüzeyde çok belirgin olmayan bir aşınma ve malzeme kaybı göze çarpmaktadır. Bu bölgede kesici takımın ön kenarındaki malzeme kaybı, işlem sırasında meydana gelen termal ve mekanik yüklerin doğrudan bir sonucudur. Yaklaşık 0.129 mm olarak belirtilen aşınma boyutu diğer nano akışkanlara göre küçüktür. Bu da MgO katkılı nano akışkanın etkili bir yağlama ile koruma sağladığını göstermekle beraber uzun süreli veya yüksek ilerleme hızı gibi zorlayıcı işleme koşullarında takım aşınmasının kaçınılmaz olduğu da bir gerçektir.

Genel olarak, bu iki görüntüden %1'lik MgO nano akışkanının kesici uç üzerindeki koruyucu etkisinin var olduğu, ancak işleme parametrelerine bağlı olarak tamamen aşınmayı önleyemediği sonucu çıkarılabilir. MgO nano boyuttaki katkısı, kesici uca kayda değer bir yağlama ve soğutma etkisi sağlamış ancak zorlu işleme koşullarında oluşan mikro aşınmaların meydana gelmesini tamamen engelleyememiştir.



Şekil 4.20: Baz Akışkan + %1'lik MoS₂ aşınma görüntüleri

Şekil 4.20'de %1'lik MoS₂ nano akışkanla yapılan deneye ait kesme ucu aşınma görüntüsü görülmektedir. Kesici takımın farklı açılardan çekilmiş iki fotoğrafı yan yana verilmiştir.

Sol taraftaki fotoğrafta aşınmaya bağlı malzeme kaybı belirgin bir şekilde görüntülenmektedir. 0,139 mm olarak ölçülen değer baz akışkanla yapılan aşınma testinden sonraki en yüksek değerdir. Bu MoS₂'ün iyi bir yağlayıcı olmasına karşın yüksek sıcaklık ve kesme kuvveti altındaki işlemlerde aşınmayı önlemede yeterli olmadığını ortaya koymaktadır.

Sağ tarafta görülen fotoğraf ise talaşlı işleme sırasında yüksek sıcaklıklara çıktığında meydana gelen talaş yapışıp ayrılması sonucu oluşan parlak yüzeyi net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu görüntüden %1'lik MoS₂ nano akışkanın soğutma etkisinin Inconel 718 süperalaşımı gibi zor işlenen malzemelerin talaşlı işlemlerinde yeterli soğutmayı sağlayamadığı sonucunu çıkarabiliriz.

Sonuç olarak MoS₂ nano parçacığı baz akışkanın yağlayıcı etkisini arttırmakla beraber yüksek işleme taleplerinde yeterli korumayı sağlayamadığı anlaşılmaktadır. Talaşlı işleme parametrelerinin optimum seviyede ayarlanabilmesi için nano akışkan-takım ömrü grafiğindeki veriler dikkate alınarak MoS₂ katkılı nano akışkanın aşınmada etkili olduğu bölgelere göre seçim yapılması daha etkili olacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı nano tozlarla hazırlanan nano akışkanlarla Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi (MQL) kullanılarak Inconel 718 iş parçasını yüzey frezelemesi ile işlemede parametrelere olan etkisi araştırılmıştır. Nano akışkanların işleme parametrelerine etkisinin ölçülebilmesi için baz akışkanda da aynı parametrelerle işlemler tekrarlanmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar istatistiksel analize sokulmuştur. Bu analiz çalışmasından elde edilen sonuçların bir kısmı şu şekildedir.

Nano akışkanlar içerisinde en düşük pürüzlülük değeri %1'lik MoS₂ nano akışkanla yapılan deneyde görülmüştür. (Velmurugan & Manimaran, 2023) yaptığı çalışmada hegzagonal yapıdaki katı MoS₂ ile soğutmayla kuru kesme ortamında, ortalama pürüzlülükte %59-67, minimum miktarda katı yağlamayla (Minimum quantity solid lubrication-MQSL) %29-42 oranında iyileşme sağlamıştır. Molibdenin lamelli kristal yapısının kayma direncinin düşük olması bu etkinin başlıca sebeplerinden olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada MoS₂ ile elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla da uyum göstermiştir (Saravanan vd., 2023), (Rahmati vd., 2014), (Makhesana vd., 2022).

Yüzey pürüzlülüğüne en etkili parametre ilerleme miktarı olurken kesme derinliğinin pürüzlülüğe etkisi düşüktür. TiAlN ile kaplanmış karbür yuvarlak kesici takım kullanılarak kuru kesme koşullarında yürütülen bir çalışmada (Mhamdi vd., 2012) ilerleme miktarı (F_r) 0,06 mm'den 0,28 mm'ye çıkarken Ra'nın 3,0 µm'den 4,50 µm'ye yükselmesiyle sonuçlandığı gözlemlenmiştir. AISI D2 çeliğini kuru şartlarda parmak frezeleme ile işleyen (Ehsan vd., 2024) F_r değerini 300 ila 900 mm/dk arasında denemiş ve Ra değerine en çok etkiyi gösterdiğini bulmuştur. Şöyle ki; daha düşük hızlarda kesici takım iş parçasına daha yavaş temas ederek kademeli talaş oluşumuna ve daha düzgün malzeme kaldırmaya sebep olur. Takım ile iş parçası arasındaki daha yavaş ve daha az derin arayüz ince bir yüzey kalitesi verir. İlerleme hızı arttırıldığında daha agresif bir kesme ve artan talaş kalınlığı yüzey bütünlüğünde daha çok bozulmaya yol açar. Bu da bitmiş yüzey kalitesini düşürür. Ayrıca bu hızlı işlem esnasında ısı dağılımı için gerekli zaman da azalarak sıcaklık kaynaklı yüzey bozulmasına bağlı yüzey pürüzlülüğüne negatif katkı sağlar.

Kesme kuvveti üzerinde en etkili parametre kesme derinliği olurken en az etkisi olan ilerleme miktarıdır. Yapılan bir çalışmada AISI 4340 çeliği alüminyum oksit (Al_2O_3) ve CuO nano parçacıklarıyla zenginleştirilmiş ayçiçeği yağı, yerfıstığı yağı ve jatropa yağı MQL yöntemiyle soğutulmuş frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Taguchi ortogonal dizisiyle optimize edilen deneyler GRA (Grey Relational Analysis) kullanılarak istatistiksel analize tabi tutulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği değişkenlerinden kesme kuvveti üzerindeki en önemli parametrenin kesme derinliği olduğu ortaya konulmuştur (Bhedasgaonkar & Dabade, 2024).

Nano akışkanlar kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne 3. derece etkili olurken en iyi etkiyi takım ömrüne katkıda sunmuşlardır. (Yıldırım vd., 2019) yaptıkları çalışmada Inconel 625 alaşımını tornalarken kuru işleme, sade MQL ve hegzagonal bor nitrür (hBN) katkılı nano akışkanlı MQL yöntemlerini kullanmışlardır. Takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım talaş arayüzü sıcaklığı parametrelerini analiz edilmiştir. Hazırlanan nano akışkanın takım ömrüne yapmış olduğu katkının, nano partiküllerin yağ damlalarını tutarak kesme bölgesinden hızlıca uzaklaşmasını önlemesi ve bunun da daha iyi yağlama sağlamasına bağlamışlardır. Ayrıca termal iletkenlikteki artış da kesme bölgesi sıcaklığında düşüşe ve takım aşınmasının azalmasına yol açmaktadır. Bu da uzayan takım ömrü olarak netice vermiştir.

Deney seti değerlerinde en yüksek kesme kuvveti 0,25 mm kesme derinliği ve 30 m/dk kesme hızında kaydedilmiştir. En düşük değer ise 35 m/dk ilerleme hızı ve 0,10 mm derinliği ile yapılan deneyde ölçülmüştür.

Bu sonuçlar ışığında aynı nano akışkanların farklı iş parçalarında denenmesi karşılaştırmalı analizler yapılabilmesi açısından olumlu olacaktır. Yine bu nano partiküllerin farklı baz akışkanlara katılmasıyla oluşturulacak yeni nano akışkanların Inconel 718 üzerinde çalışılması literatüre katkı sağlayacaktır. Ayrıca farklı nano tozların belli oranlarla baz akışkana karıştırıldığı hibrit nano akışkan çalışmaları artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan nano tozlardan oluşturulacak hibrit nano akışkan çalışmaları da ileri bir çalışma konusudur.

KAYNAKLAR

- Ahamed, M. M., Basha, S. M. J., & Prasad, B. D. (2020). Comparison of Thermo-Physical and Tribological Characteristics of Nanolubricant. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9931-3_16
- Akca, E., & Gürsel, A. (2015). A Review on superalloys and IN718 Nickel-Based Inconel superalloy. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 3(1). <https://doi.org/10.21533/pen.v3i1.43>
- Ali, A. Y. M., El-Shazly, A. H., El-Kady, M. F., Elqady, H. I., & El-Marghany, M. R. (2019). Effect of using MgO-oil nanofluid on the performance of a counter-flow double pipe heat exchanger. *Key Engineering Materials, 801 KEM*, 193-198. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.801.193>
- Amin, A. R., Ali, A., & Ali, H. M. (2022). Application of Nanofluids for Machining Processes: A Comprehensive Review. *Nanomaterials*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/nano12234214>
- Armstrong, R. A., Eperjesi, F., & Gilmartin, B. (2002). The application of analysis of variance (ANOVA) to different experimental designs in optometry. *Ophthalmic and Physiological Optics* (C. 22, Sayı 3, ss. 248-256). <https://doi.org/10.1046/j.1475-1313.2002.00020.x>
- Batuk, A. U. (2019). *Inconel 718 süper alaşımının alın frezeleme sonrası yüzey pürüzlülüğü ve sertliğinin incelenerek optimum parametrelerin belirlenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bayram, T. (2016). *Nano akışkanlı bir dizel motor radyatörünün performansı*. Fırat Üniversitesi.
- Bhedaşgaonkar, R., & Dabade, U. (2024). Optimization of process parameters by Taguchi based grey relational analysis in machining of AISI 4340 using hybrid nanofluids MQL. *AIP Conference Proceedings*, 3122(1), 100023. <https://doi.org/10.1063/5.0216009>
- Binali, R. (2024). Experimental and machine learning comparison for measurement the machinability of nickel based alloy in pursuit of sustainability. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115142>

- Boubekri, N., Shaikh, V., & Foster, P. R. (2010). A technology enabler for green machining: Minimum quantity lubrication (MQL). *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(5), 556-566. <https://doi.org/10.1108/17410381011046968>
- Chaudhari, S. S., Pundkar, A. H., Giri, J., Sathish, T., Daryapurkar, A. S., Chadge, R., & Parthiban, A. (2024). Optimizing air conditioning efficiency: Utilizing nano-oxides ZnO, CuO, and TiO₂ with traditional and alternative refrigerants in medium temperature range cooling systems. *Interactions*, 245(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-024-01931-z>
- Çelik, M., Çakır Şencan, A., Şirin, Ş., Erdoğan, B., & Şencan, C. (2024). Effect of hBN and SDS added vegetable based cutting fluid application on the performance of turning Ti6Al4V alloys: A Comparative analysis with Taguchi and ANN approaches. *Materials Chemistry and Physics*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129552>
- Darshan, C., Jain, S., Dogra, M., Gupta, M. K., Mia, M., & Haque, R. (2019). Influence of dry and solid lubricant-assisted MQL cooling conditions on the machinability of Inconel 718 alloy with textured tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5-6), 1851. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04544-x>
- Das, A., Pradhan, O., Patel, S. K., Das, S. R., & Biswal, B. B. (2019). Performance appraisal of various nanofluids during hard machining of AISI 4340 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 46, 248-270. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.023>
- de Menezes, L. H. S., Oliveira, P. C., do Espírito Santo, E. L., Gonçalves, M. S., Bilal, M., Ruiz, H. A., da Silva, E. G. P., Salay, L. C., de Oliveira, J. R., & Franco, M. (2024). Solid-State Fermentation as a Green Technology for Biomass Valorization: Optimization Techniques for Bioprocess—An Overview. *Bioenergy Research* (C. 17, Sayı 1, ss. 42-58). Springer. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10670-y>
- de Oliveira, N. B., Peruchi, R. S., Rotella Junior, P., & de Brito, T. G. (2023). Modeling and optimization of steel end milling process: a review on empirical studies. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (C. 45, Sayı 11). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04503-4>
- Duc, T. M., Tuan, N. M., & Long, T. T. (2024). Optimization of Al₂O₃ nanoparticle concentration and cutting parameters in hard milling under nanofluid MQL environment. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(6). <https://doi.org/10.1177/16878132241257114>

- Edelbi, A., Kumar, R., Sahoo, A. K., & Pandey, A. (2023). Comparative machining performance investigation of dual-nozzle MQL-Assisted ZnO and Al₂O₃ nanofluids in face milling of Ti-3Al-2.5V alloys. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(3), 2969-2993. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07072-1>
- Ehsan, S., Ali, M. A., Khan, S. A., Sana, M., Yasir, M., Anwar, S., & Farooq, M. U. (2024). Understanding the effects of cutting conditions on vibrations, surface integrity, machining temperature and tool wear mechanisms in end milling of AISI D2 Steel. *Tribology International*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109894>
- Esad YİĞİT, M. (2014). *Konformal Anten Dizilerinin Sentezi İçin Optimizasyon Yaklaşımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ezugwu, E. O., Bonney, J., & Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
- Gamal, M., Radwan, M. S., Elgizawy, I. G., & Shedid, M. H. (2023). Thermophysical characterization on water and ethylene glycol/water-based MgO and ZnO nanofluids at elevated temperatures: An experimental investigation. *Journal of Molecular Liquids*, 369. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120867>
- Groover, Mikell. P. . (1980). *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Willey & Sons, Inc. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9506-8_6
- Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A. A., Rezaie, M., Yan, W. M., & Karimipour, A. (2015). Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 66, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.06.003>
- Hemmat Esfe, M., Rostamian, H., Shabani-samghabadi, A., & Abbasian Arani, A. A. (2017). Application of three-level general factorial design approach for thermal conductivity of MgO/water nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1194-1199. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.211>
- Hong, S. Y., Zhao, Z., Hong, S. Y., & Zhao, Z. (1999). Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining. *Clean Products and Processes* (C. 1). Springer-Verlag.
- Hwang, Y., Park, H. S., Lee, J. K., & Jung, W. H. (2006). Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. *Current Applied Physics* (C. 6, Sayı SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/j.cap.2006.01.014>
- Ibrahim, A. M. M., Omer, M. A. E., Das, S. R., Li, W., Alsoufi, M. S., & Elsheikh, A. (2022). Evaluating the effect of minimum quantity lubrication during hard turning of AISI D3

- steel using vegetable oil enriched with nano-additives. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 10925-10938. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.04.029>
- Kursuncu, B., Caliskan, H., Guven, S. Y., & Panjan, P. (2018). Improvement of cutting performance of carbide cutting tools in milling of the Inconel 718 superalloy using multilayer nanocomposite hard coating and cryogenic heat treatment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 467-479. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1931-z>
- Kurşuncu, B. (2024). Optimization of cutting parameters using response surface methodology (RSM) in milling Inconel 718 superalloy using Borax-added nanofluid in (MQL) system. *Industrial Lubrication and Tribology*, 76(7). <https://doi.org/10.1108/ILT-05-2024-0191/Keywords>
- Lakshmipriya, T., & Gopinath, S. C. B. (2020). Introduction to nanoparticles and analytical devices. *Nanoparticles in Analytical and Medical Devices*, 1-29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821163-2.00001-7>
- Leksycki, K., & Kaczmarek-Pawelska, A. (2024). Surface topography and corrosion resistance of AISI 630 stainless steel after finish turning under different cooling methods. *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 1249-1258. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.026>
- Li, J., Wang, Y., Jiang, S., Cheng, Y., Zuo, Y., Liu, H., & Wang, Y. (2024). Correction of the constitutive model and analysis of chip formation in cryogenic machining of TA15 titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 113, 16-33. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.058>
- Lopes, J. C., Talon, A. G., Rodrigues, M. de S., Moretti, G. B., Machado, F. de C., Souza, G. G. de, Ribeiro, F. S. F., Sanchez, L. E. de A., & Bianchi, E. C. (2023). An experimental evaluation between pure and diluted MQL versus flood lubri-cooling focused on cost and environmental impact. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(5-6), 2691-2705. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12399-6>
- Mahesh, K., Philip, J. T., Joshi, S. N., & Kuriachen, B. (2021). Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures. *Materials and Manufacturing Processes* (C. 36, Sayı 7, ss. 753-791). Bellwether Publishing, Ltd. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1843671>

- Makhesana, M. A., Patel, K. M., & Khanna, N. (2022). Analysis of vegetable oil-based nano-lubricant technique for improving machinability of Inconel 690. *Journal of Manufacturing Processes*, 77, 708-721. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.060>
- Makhesana, M. A., Patel, K. M., Krolczyk, G. M., Danish, M., Singla, A. K., & Khanna, N. (2023). Influence of MoS₂ and graphite-reinforced nanofluid-MQL on surface roughness, tool wear, cutting temperature and microhardness in machining of Inconel 625. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 225-238. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.12.015>
- Mendes, A. R., Teixeira, P., & Poças, F. (2024). Use of Zinc Oxide Nanoparticles Incorporated in Polybutylene Adipate Terephthalate for Food Packaging. A Focus on the Impact in Functional and Physic-Mechanical Properties and on Migration Thereof. *Packaging Technology and Science* (C. 37, Sayı 8, ss. 721-734). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/pts.2816>
- Mhamdi, M.-B., Boujelbene, M., Bayraktar, E., & Zghal, A. (2012). Surface Integrity of Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Ball end Milling. *Physics Procedia*, 25, 355-362. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.096>
- Ming Rui, L., Hafis Sulaiman, M., Ashman Hakimi Azizan Ashman, M., Shuhaimi Ibrahim, M., & Ridzuan Mohd Jamir, M. (2023). Enhancing physical, mechanical, tribological and contact characteristics of water-based lubrication using ceramic nanomaterials MgO and SiC for metal-to-metal sliding interfaces. *Jurnal Tribology* (C. 39).
- Montgomery, D. C. . (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc.
- Nasiri, P., Saviz, S., Dorrnian, D., & Sari, A. H. (2022). Magnesium oxide nanofabrication from magnesium chloride salt by thermal plasma method: effects of quenching and concentration. *Journal of Nanoparticle Research*, 24(7). <https://doi.org/10.1007/s11051-022-05533-0>
- Ngo, M. T. (2024). Effects of Machining Parameters on Total Cutting Force in Hard Turning Process of Hardened 90CrSi Steel Using Carbide Insert with MoS₂ Nanofluid MQL. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 13(1), 169-174. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.13.1.169-174>
- Nohuçtu, S., & Kaçar, R. (2024). Dynamic strain aging behavior of Cobalt-Based Haynes188 Superalloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(5), 2219-2230. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08146-3>
- Ojolo, S. J., Damisa, O., & Iyekolo, O. (2011). Investigation into the effects of solid lubricant on the surface characteristics of some metals during orthogonal machining. *Journal of*

- Engineering, Design and Technology*, 9(2), 130-142.
<https://doi.org/10.1108/17260531111151023>
- Qadri, S. I. A., Harmain, G. A., & Wani, M. F. (2019). An experimental study on investigation of machining of nickel based super alloy 718. *Materials Today: Proceedings*, 19, 541-545. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.730>
- Rahmati, B., Sarhan, A. A. D., & Sayuti, M. (2014). Investigating the optimum molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication parameters in CNC milling of AL6061-T6 alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1143-1155. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5334-x>
- Ram, K. V., Lawrance, A., & Harish, R. (2024). Impact of nanoparticle shape on the thermal performance of eco-friendly soybean-based nanofluids in cooling titanium alloys. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105309>
- Roohani, E., & Toghraie, D. (2022). Heat transfer improvement of antifreeze by changing it to hybrid nanofluid: effects of hybrid magnesium oxide–graphene oxide nanopowders. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(12), 6777-6791. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10973-2>
- Sager, A. M. M. (2018). *Experimental Investigation of Machining of Nickel Based Superalloy Inconel 625* [Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Saravanan, R., Malladi, A., Gopalakrishnan, T., Manikandan, R., Jagadeeswaran, P., Anbuechziyan, G., & Veeranjanyulu, K. (2023). Investigating concentration of nanoparticles influence in Molybdenum disulfide waste cooking oil nanofluid for machining of SAE 1144 in surface finish enhancement. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.441>
- Sengwa, R. J., & Saraswat, M. (2023). Effect of nanodispersed zinc oxide concentrations on the structural, optical, dielectric, viscous, and acoustic properties of ethylene glycol–glycerol mixture based nanofluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 673. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131812>
- Senthilkumar, G., & Deepak, J. R. (2024). A novel approach for thermal conductivity improvement of metal oxide nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(15), 8281-8288. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13278-2>
- Sharma, V. S., Dogra, M., & Suri, N. M. (2009). Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (C. 49, Sayı 6, ss. 435-453). <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.12.010>

- Shen, B., Kalita, P., Malshe, A. P., & Shih, A. J. (2008). Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 36(November), 357-364.
- Shokrani, A., & Newman, S. T. (2018). Hybrid cooling and lubricating technology for CNC milling of Inconel 718 nickel alloy. *Procedia CIRP*, 77(Hpc), 215-218. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.291>
- Singh, G., Aggarwal, V., & Singh, S. (2020). Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122185. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122185>
- Singh, T. (2024). Parametric optimization to establish eco-friendly nanofluid minimum quantity lubrication (NMQL) practice for turning superalloy Inconel 718. *Industrial Lubrication and Tribology*, 76(2), 285-298. <https://doi.org/10.1108/ILT-10-2023-0317/Keywords>
- Singh, Y., Kumar Singh, N., Sharma, A., Singla, A., Singh, D., & Abd Rahim, E. (2021). Effect of ZnO nanoparticles concentration as additives to the epoxidized Euphorbia Lathyris oil and their tribological characterization. *Fuel*, 285(July 2020), 119148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119148>
- Szpisják-Gulyás, N., Al-Tayawi, A. N., Horváth, Z. H., László, Z., Kertész, S., & Hodúr, C. (2023). Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria* (C. 52, Sayı 4, ss. 521-537). Akadémiai Kiadó ZRt. <https://doi.org/10.1556/066.2023.00235>
- Uhlmann, E., Barth, E., Bock-Marbach, B., & Kuhnert, J. (2024). Numerical chip formation analysis during high-pressure cooling in metal machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 53, 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.07.003>
- Uysal, M. (2016). *Mekanik Alaşımlama Süreçleriyle MoS₂-Grafit Katı Yağlayıcı Katkılı Fe-C Esaslı Kompresör Parçalarının Geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Vasudevan, B., Nagarajan, L., Nachippan, N. M., & Mahadevan, S. (2024). Vegetable oils in minimum quantity lubrication: a comparative analysis of properties and performance. *Interactions*, 245(1). <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02070-1>

- Velmurugan, V., & Manimaran, G. (2023). H-MoS₂ Solid Lubricant Performance on Inconel 718 in Drilling Operations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(9), 12015-12028. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07640-z>
- Yadav, D. K., Dixit, N. K., Agarwal, D., & Khare, S. K. (2022). Optimization of surface roughness by design of experiment techniques during CNC milling machining. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1919-1923. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.565>
- Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Kıvık, T., & Şirin, Ş. (2019). The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625. *Tribology International*, 134, 443-456. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.027>
- Yücel, A., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Şirin, Ş., Kıvık, T., Gupta, M. K., & Tomaz, Í. V. (2021). Influence of MoS₂ based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.007>
- Yüksel, S., & Onat, A. (2015). Investigation of CNC turning parameters by using a vortex tube cooling system. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 881-885. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.881>
- Zerooğlu, T., Değirmenci, Ü., & Şap, S. (2024). A Study on the Machinability and Environmental Effects of Milling AISI 5140 Steel in Sustainable Cutting Environments. *Machines*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/machines12070436>
- Żyła, G. (2017). Viscosity and thermal conductivity of MgO–EG nanofluids: Experimental results and theoretical models predictions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(1), 171-180. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6130-x>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel Faaliyet/Yayımlar :

Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :

Projeler ve Kurs Belgeleri :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih :