

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARDOX 450 ÇELİK MALZEMENİN FREZELEME YÖNTEMİ
İLE İMALATINDA KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ZEKAİ TURAN

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARDOX 450 ÇELİK MALZEMENİN FREZELEME YÖNTEMİ
İLE İMALATINDA KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ZEKAİ TURAN

Prof. Dr. Satılmış ÜRGÜN

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Mustafa Özgür BORA

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İskender ÖZSOY

Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih:

30.01.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgilertarafındanno'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Zekai TURAN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Zekai TURAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İnsanoğlunun öğrenmeye ve keşfetmeye merakı tarih boyunca katlanarak devam etmiştir. Uzak ve Havacılık Teknolojisi de bu alanların başında gelmektedir. Ülkelerin ileriye dönük vizyonları da M. Kemal ATATÜRK'ün “İstikbal Göklerdedir” veciz sözünü işaret etmektedir. Son dönemde havacılık ve uzay çalışmalarında ülkemizde bu alanda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Sektör olarak havacılık ve uzay sanayiinde yeni malzemeler oluşturulmakta ve denenmektedir. Bu da aynı şekilde bu malzemelerin imalatında yeni problemleri beraberinde getirmektedir. Bu alanda ne kadar çok araştırma ve inceleme yapılırsa insanoğlunun uzayın bilinmezliklerine yolculuğunu bir adım daha yakınlaştırmayı sağlayacaktır. Bu düşünce ile birlikte yaptığım bu çalışmada havacılık ve uzay çalışmalarında yeni malzemelerin imalatına cevap bulabilmeyi hedefledim. Bu çalışmada bana danışmanlık yapan başta Prof. Dr. Satılmış ÜRGÜN'e, katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Sinan FİDAN ve Prof. Dr. Mustafa Özgür BORA hocalarıma, yine görev yaptığım Millî Eğitim Bakanlığına bağlı Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Müdür, Müdür Yardımcısı ve Öğretmen arkadaşlarıma ayrıca bu yolda bana manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Kadriye TURAN ve oğlum Ertuğrul TURAN'a teşekkür ederim.

Ocak – 2025

Zekai TURAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Literatür Araştırması.....	4
2.1.1. Çelik Malzemelerin Genel Özellikleri.....	6
2.1.1.1. Mekanik Özellikler.....	6
2.1.1.2. Termal Özellikler	7
2.1.1.3. Kimyasal Özellikler.....	7
2.1.1.4. Fiziksel Özellikler	8
2.1.1.5. İşlenebilirlik ve Üretim Kolaylığı	8
2.1.1.6. Çevresel ve Ekonomik Özellikler	8
2.1.1.7. Çelik Malzemelerin Uygulama Alanları	8
2.1.2. Çelik Malzemelerin Yapısı ve Sınıflandırılması	9
2.1.2.1. Çeliklerin Yapısı	10
2.1.2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması.....	10
2.1.3. Hardox 450 Çelik Malzemeler.....	12
2.1.3.1. Hardox 450 Çelik Malzemelerin Genel Özellikleri	12
2.1.3.2. Hardox 450'nin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri.....	12
2.1.3.3. Hardox 450'nin Kimyasal Özellikleri.....	12
2.1.3.4. Hardox 450'nin İşlenebilirlik Özellikleri.....	13
2.1.4. Talaşlı İmalat Frezeleme Yöntemi.....	13
2.1.4.1. Frezeleme Türleri	14
2.1.4.2. Frezeleme Yönteminin Kullanım Alanları.....	15
2.1.4.3. Frezeleme Kesme Parametreleri.....	15
2.1.4.4. Kesme Parametrelerinin Seçilmesi.....	17
2.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	20
2.1.5.1. Yüzey Pürüzlülüğünü Belirleyen Parametreler.....	21
2.1.6. Taguchi Optimizasyon Metodu	21
2.1.6.1. Taguchi Metodunun Temel İlkeleri.....	22
2.1.6.2. Taguchi Metodunun Uygulama Aşamaları	23
2.1.7. ANOVA Analiz Metodu.....	24
2.1.7.1. ANOVA'nın Uygulama Süreci	25
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	26
3.1. Malzeme Seçimi ve İşleme Operasyonlarının Ayarlanması.....	26
3.2. Yanıt Parametrelerinin Ölçülmesi	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Deney Süreci Aşamaları	33

4.1.1. Parametrelerin Seçimi.....	33
4.1.2. Ortogonal Dizi Seçimi	33
4.1.3. Varyans Analizi (ANOVA)	39
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	41
5.1. Varyans ANOVA Tablosu Değerlendirmesi.....	41
5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlendirmesi.....	44
5.3. Sonuçlar Üzerine Öneriler ve Tartışmalar.....	47
KAYNAKLAR.....	49
EKLER	53
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	73



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1.	Frezeleme Yöntemi	14
Şekil 2. 2.	Frezeleme Yöntemi Çeşitleri.....	15
Şekil 2. 3.	Frezelemede Kesme Parametreleri.....	16
Şekil 2. 4.	Frezeleme işleminde iş parçası deformasyonunu etkileyen faktörler.....	18
Şekil 2. 5.	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	20
Şekil 2. 6.	Taguchi Yönteminin Akış Şeması.....	23
Şekil 3. 1.	CNC İşleme Merkezi.....	26
Şekil 3. 2.	Takım Tutucu	27
Şekil 3. 3.	CAD Numune Parça Tasarımı.....	27
Şekil 3. 4.	Deneysel Çalışmada Kullanılan Hardox 450 Çelik Numuneleri.....	28
Şekil 3. 5.	İş Bağlama Kalıbı CAD Model Tasarımı.....	28
Şekil 3. 6.	İş Bağlama Kalıbı (Fixture).....	29
Şekil 3. 7.	İş Parçası Bağlama Mekanizması.....	29
Şekil 3. 8.	Numune Paça için CAM Takım Yolu Simülasyonu	30
Şekil 3. 9.	Tezgâh üzerinde işlenmiş numune	31
Şekil 3. 10.	Deney sonucu elde edilen 9 adet işlenmiş numune.....	31
Şekil 3. 11.	Paketlenmiş Numuneler	32
Şekil 3. 12.	Deney Süreci Aşamaları.....	32
Şekil 4. 1.	Ölçüm İçin Kullanılan NANOVEA Marka Profilometre.....	34
Şekil 4. 2.	Birinci numuneye ait 3D profilometre ile alınan yüzey görüntüsü.....	35
Şekil 4. 3.	Birinci numuneye ait profilometre 1. ölçüm raporu.....	35
Şekil 4. 4.	Birinci numuneye ait profilometre 2. ölçüm raporu.....	36
Şekil 4. 5.	Birinci Numuneye ait Profilometre 3. Ölçüm Raporu	36
Şekil 4. 6.	Birinci Numuneye ait Profilometre 4. Ölçüm Raporu	37
Şekil 4. 7.	Birinci Numuneye ait Profilometre 5. Ölçüm Raporu	37
Şekil 4. 8.	Birinci Numuneye ait Profilometre 6. Ölçüm Raporu	38
Şekil 5. 1.	Basıklık Analizi için Ana Etki Grafiği	44
Şekil 5. 2.	Pürüzlülük (Ra) Analizi için Ana Etki Grafiği.....	45
Şekil 5. 3.	Ortalama Pürüzlülük Derinliği (Rz) Analizi için Ana Etki Grafiği.....	45

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3. 1.	Hardox 450'nin Kimyasal Bileşimleri.....	26
Tablo 4. 1.	Deney Parametreleri.....	33
Tablo 4. 2.	Taguchi Yönteminin Ortogonal Dizisi.....	34
Tablo 4. 3.	Deney Sonucunda Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri.....	38
Tablo 5. 1.	Sinyal-Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu.....	42
Tablo 5. 2.	Varyans Analizi Tablosu.....	43



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ra	: Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
Rz	: Maksimum Pürüzlülük Derinliği
Rq	: Kuadratik Ortalama Pürüzlülük
Sa	: Aritmetik Ortalama Yükseklik
Sq	: Kök Ortalama Kare Yüksekliği
Sku	: Yüzey pürüzlülüğünde tepe bölgeler (keskinlik)

Kısaltmalar

CAD	: Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	: Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli İmalat)
CNC	: Computer Aided Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
C _s	: Kesme Hızı
D _c	: Kesme derinliği
F _R	: İlerleme hızı
R _I	: Radyal daldırma

HARDOX 450 ÇELİK MALZEMENİN FREZELEME YÖNTEMİ İLE İMALATINDA KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Hardox çeliğinin frezeleme işlemi, endüstriyel uygulamalarda kullanılan ve yüksek mukavemet gerektiren parçaların üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu işlem sırasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü Ra, Rz ve Sku gibi parametrelerle değerlendirilir. Ra (ortalama pürüzlülük) değeri, işlenen yüzeyin ortalama yükseklik farkını ölçer. Daha düşük bir Ra değeri, daha düzgün bir yüzey sağlar, bu da parçanın yüzey kalitesini artırır ve işlevselliğini iyileştirir. Frezeleme işlemlerinde, Ra değerinin düşük olması istenilen yüzey kalitesini elde etmenin önemli bir göstergesidir. Rz (maksimum yükseklik farkı) değeri, işlenen yüzeydeki en yüksek ve en düşük noktalar arasındaki ortalama farkı ölçer. Düşük Rz değerleri, yüzeyin düzgünlüğünü artırır ve parçanın aşınma direncini ve performansını artırır. Sku (küçük dalgalanma miktarı) değeri, işlenen yüzeydeki küçük dalgalanmaların miktarını ölçer. Düşük Sku değerleri, yüzeyin daha düzgün ve homojen olmasını sağlar, bu da parçanın estetik görünümünü ve performansını artırır. Bu parametrelerin kontrolü, Hardox çeliğinin frezeleme yöntemi ile imalatında önemlidir çünkü doğru işleme parametreleri ve kesici takım seçimi ile istenilen yüzey kalitesi ve performans elde edilebilir. Bu da parçaların dayanımını artırır, işleme sonrası yüzey işlemlerin azaltılmasına yardımcı olur ve üretim süreçlerini optimize eder. Bu çalışmada, Hardox 450 çelik malzemenin frezeleme işlemi üzerine yapılan araştırmanın sonuçlarına değinilmektedir. Araştırma, farklı kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve radyal dalma) Hardox 450 çelik malzeme üzerindeki etkisini incelemiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, kesme hızının ve radyal dalmanın yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kesme hızının kurtosis üzerindeki etkisi incelenmiş ve en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, en düşük pürüzlülük değerlerini elde etmek için belirli kesme parametrelerinin (örneğin, kesme hızı için 60 m/dak, ilerleme hızı için 0,06 mm/dakika, kesme derinliği için 0,2 mm ve radyal dalma için 20 mm) seçilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Deney Dizaynı, Frezeleme İşleme Parametreleri, Hardox 450 Çeliği, Yüzey Pürüzlülüğü.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN THE MANUFACTURING OF HARDOX 450 STEEL MATERIAL BY MILLING METHOD

ABSTRACT

The milling process of Hardox steel plays a crucial role in manufacturing parts for industrial applications that demand exceptional strength. The surface roughness achieved in this method is assessed using parameters such as Ra, Rz, and Sku. The Ra (average roughness) number is used to measure the average height difference of the machined surface. A lower Ra value results in a smoother surface, enhancing the surface quality of the part and optimizing its functionality. A low Ra value is a crucial indicator in milling operations for achieving the appropriate surface quality. The Rz value measures the average difference between the highest and lowest locations on the machined surface. Low Rz values enhance the smoothness of the surface, hence improving the wear resistance and performance of the item. The Sku value is used to measure the quantity of minor undulations on the machined surface. Low Sku values enhance the smoothness and uniformity of the surface, hence improving the visual appeal and performance of the item. Controlling these factors is crucial in the milling process of creating Hardox steel. By using the appropriate machining settings and the right cutting tools, one may obtain the desired surface quality and performance. This improves the strength of the components, reduces the surface finish after machining, and optimizes production operations. This study presents the findings of the research conducted on the milling process of Hardox 450 steel material. The research investigated the impact of several cutting parameters, including cutting speed, feed rate, depth of cut, and radial plunge, on the Hardox 450 steel material. The trials conducted using the Taguchi approach revealed that cutting speed and radial plunge had a substantial impact on surface roughness. Furthermore, cutting speed was identified as the most influential feature when analyzing its impact on kurtosis. Therefore, it is advisable to choose specific cutting parameters (such as a cutting speed of 60 m/min, a feed rate of 0.06 mm/min, a depth of cut of 0.2 mm, and a radial plunge of 20 mm) in order to achieve the lowest roughness values.

Keywords: Design of Experiment, Milling Processing Parameters, Hardox 450, Surface Roughness.

1. GİRİŞ

Havacılık ve uzay sanayii, teknolojik gelişmelerin en yoğun şekilde yaşandığı sektörlerden biri olarak, yenilikçi malzeme çözümlerine olan talebin sürekli arttığı bir alandır. Bu sektörde kullanılan malzemelerin, zorlu koşullara dayanıklı, yüksek mukavemetli, düşük ağırlıklı ve aşınma direncine sahip olması gerekmektedir. Bu gereksinimler, malzeme mühendisliğini yeni çözümler üretmeye yönlendirirken, aynı zamanda imalat süreçlerinde karşılaşılan teknik problemlerin çözümü için araştırma ve geliştirme faaliyetlerini de beraberinde getirmiştir.

Çelik, yüksek dayanıklılığı, esnekliği ve işlenebilirliği sayesinde mühendislik uygulamalarında uzun yıllardır tercih edilen bir malzeme olmuştur. Havacılık ve uzay sektöründe kullanılan çelikler, üstün mekanik özellikleri ve maliyet etkinliğiyle diğer malzemelere karşı önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak bu sektör, sürekli gelişen teknolojiler nedeniyle daha ileri özelliklere sahip çelik türlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, yeni alaşımlar geliştirilmekte ve çeliklerin performansı artırılarak sektöre özgü gereksinimlere uygun hale getirilmektedir.

Hardox çelik malzemeler, havacılık ve uzay sanayii için kritik öneme sahip uygulamalarda kullanılan yüksek performanslı çelikler arasında yer almaktadır. Bu çeliklerin en dikkat çekici özelliği, aşınmaya karşı gösterdikleri üstün dirençtir. Yüksek aşınma direnci, özellikle zorlu çalışma koşullarına maruz kalan ekipman ve parçaların dayanıklılığını artırarak, onların daha uzun süre güvenle kullanılmasını sağlamaktadır.

Havacılık ve uzay sanayii, daha hafif, dayanıklı ve sürdürülebilir malzemelerle donatılmış yeni nesil ürünlere yönelmektedir. Hardox çelik gibi yüksek performanslı malzemeler, bu gereksinimleri karşılamada öncü bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda, malzeme bilimi alanındaki gelişmeler, nanoteknoloji ve ileri mühendislik uygulamalarını bir araya getirerek daha inovatif çözümler sunmaktadır.

Hardox çeliklerin sunduğu üstün aşınma direnci, bu malzemeyi yalnızca dayanıklılık sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda operasyonel verimliliği artıran bir seçenek haline getirmektedir. Gelecekte bu tür yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesi ve

kullanımı, havacılık ve uzay sanayiinin sürdürülebilirliğine ve teknolojik ilerlemelerine önemli katkılar sunacaktır.

Havacılık sektörü, tasarım ve üretimde yüksek dayanıklılık, hafiflik ve güvenilirlik gerektiren özel bir mühendislik alanıdır. Bu doğrultuda, malzeme seçimi, uçuş güvenliği ve performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Çelik malzemeler, havacılık endüstrisinde geleneksel olarak yüksek mukavemet, ısı dayanımı ve yorulma direnci gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle iniş takımları, motor bileşenleri ve yüksek basınca maruz kalan yapısal parçalar gibi kritik uygulamalarda çelik malzemeler önemli bir rol oynar.

Hardox çelik malzeme, havacılık sektöründe potansiyel kullanım alanları sunan, yüksek aşınma direncine ve dayanıklılığa sahip bir çelik türüdür. Sertliği ve mukavemeti, aşırı yük ve aşınma koşullarına dayanması gereken bileşenlerde önemli avantajlar sağlar. Havacılık ekipmanlarında sıkça karşılaşılan titreşim, darbe ve uzun süreli yorulma etkileri, hardox çelik malzemenin üstün mekanik özellikleri sayesinde minimize edilebilir. Ayrıca, bu malzeme, yüksek hassasiyet gerektiren talaşlı imalat süreçlerinde işlenebilirliği ile dikkat çeker.

Modern havacılık, yalnızca dayanıklılığı değil, aynı zamanda ağırlık optimizasyonunu da hedeflemektedir. Hardox çelik malzemenin, geleneksel çelik malzemelere göre daha ince kesitlerde dahi aynı dayanıklılığı sağlayabilmesi, ağırlık azaltma çalışmalarında önemli bir avantaj sunar. Bu özellik, uçakların yakıt verimliliğini artırarak karbon ayak izini azaltmada da kritik bir rol oynar.

Havacılık sanayisinde Hardox çelik malzemenin kullanımı, özellikle zorlu çevre koşullarına maruz kalan yer ekipmanları, taşıma platformları ve aşınmaya duyarlı diğer bileşenlerde giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tür yenilikçi çelik malzemeler, sektörün güvenlik ve sürdürülebilirlik hedeflerini destekleyen önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, çelik malzemelerin sağlamlığı ile havacılık teknolojisinin gereksinimlerini birleştiren Hardox 450, ileri mühendislik çözümleri için ideal bir seçim olarak öne

ıkmaktadır. Bu tür malzemelerin kullanımının artması, havacılık sektörünün performans ve sürdürülebilirlik standartlarını bir st seviyeye taşımasına yardımcı olacaktır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Literatür Araştırması

Teknolojik ve bilimsel gelişmelere bağlı olarak endüstride kullanım alanlarına göre farklı malzeme türleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Hardox 450 çelik malzemeler de bu malzemelerden biridir. Hardox 450 çelik malzeme, aşınma yapısı ve 1250 MPa akma noktasına karşılık gelen 450 HB nominal sertliği nedeniyle endüstriyel uygulamalar için caziptir (ssab, 2023). Endüstriyel sektörde bileşenlerin kullanım ömrünü uzatmak için aşınma direnci yüksek malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertliği ve bunun sonucunda ortaya çıkan üstün aşınma direnci nedeniyle bu malzeme madencilik ve tarım alanlarında sıklıkla uygulama alanı bulmaktadır. Temperlenmiş martensitin mikro yapısı, olağanüstü sertlik ve aşınma direncinin yanı sıra hem yüksek mukavemet hem de süneklik sunar. Bu özellikler, geleneksel karbon çelikleriyle karşılaştırıldığında Hardox 450'nin işlenebilirliğini azaltır. Daha yüksek spesifik kesme basıncı, daha yüksek sertlik ve sertleşme oranının bir sonucudur; bu da kesme kuvvetini ve gücünü artıran bir faktördür (Passari ve diğ., 2022). Hardox 400 çelik malzemenin frezelenmesi esnasında farklı ortamlarda(kuru, taşkın ve MQL) takım aşınma seviyesindeki en önemli parametrenin kesme sıvısı olduğu vurgulanmıştır (Aslan, 2024). Krolczyk ve diğerleri (2016) yaptığı çalışmada Hardox 400 çelik malzemeyi kullanarak kesme parametrelerinin farklı yüzey pürüzlülük parametreleri üzerindeki değişimini incelemiştir. Kuntoğlu (2022), yaptığı çalışmada Hardox 600 çelik malzemenin frezelenmesi sırasında kesme parametrelerinin, farklı soğutma koşulları altında kesici takımlarda neden olduğu takım aşınmasını detaylı bir şekilde incelemiştir.

Frezeleme yöntemi talaşlı imalatta sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde girdi işlemleri birden fazla kesme parametresinin belirlenmesi olup, çıktı ise nihai ürün yüzey kalitesi olarak değerlendirilir. Ortaya çıkan yüzey kalitesi işletmeler arasında rekabet ortamı yaratır. Bu yöntemde firmalar optimum parametreyi seçebilmek için bazen deneme yanılma gibi hem maliyetleri artıran hem de zaman kaybı gibi rekabetten uzaklaştıran yöntemlere başvuruyorlar. Bu nedenle frezeleme işlemleri sırasında kesme parametresi değişkenlerinin kombinasyonunu belirlemek ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için bu alanda önemli araştırmalar yapılmıştır (Moayyedian ve diğ., 2020). Yüzey

kalitesinin öngörülmesi için çeşitli modeller oluşturulmuştur (Zeng ve Pi, 2023; Pimenov ve diğ., 2023; Shucai ve diğ., 2019).

Saf bakır malzemenin frezeleme işlemi sırasında yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmek için bir dizi kesme parametresi kullanıldı. Bu parametreler kesme hızını, ilerleme hızını ve eksenel kesme derinliğini içeriyordu. İlerleme hızı ve eksenel kesme derinliği parametreleri karşılaştırıldığında, elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kesme hızı parametresinin en büyük etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Lai ve diğ., 2023). Aynı malzemeyi içeren ayrı bir araştırmada yüzey pürüzlülüğünün yalnızca dış başına beslemeden etkilendiği belirlendi (Sorgato ve diğ., 2020). Araştırma kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin profilin en yüksek ve en alçak bölgeleri arasındaki dikey mesafe olan yüzey pürüzlülüğü (R_a , R_t) üzerindeki etkisine odaklandı. Araştırma, sertleştirilmiş çelik üzerinde kanal frezeleme işlemleri kullanılarak gerçekleştirildi. Çalışmaya göre dış başına ilerleme ve radyal kesme derinliği R_a ve R_t değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olup R_a ve R_t artmaktadır (Markopoulos ve diğ., 2020). Al 7075 alaşımı üzerine bor karbür (B4C) ve silisyum karbür (SiC) takviyesinden yapılan kompozit malzemenin frezeleme işlemi sırasında kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. Bulgular, kesme hızı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu ortaya çıkardı. etki yarattığı keşfedildi. Bir değerlendirme, kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün ters bir ilişki sergilediğini, ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermiştir (Rasagopal ve diğ., 2020). Ayrıca araştırmacı, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kontrolsüz bir değişken olarak nitelendirdiği titreşim parametresinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmıştır (Sorgato ve diğ., 2020).

Deneyisel parametrelerin belirli bir kombinasyonda seçilmesi ve tasarlanması için farklı yöntemler kullanılır. Bilimsel çalışmalarda en çok kullanılan yöntemlerden biri Taguchi yöntemi olmuştur. Taguchi yöntemi, tasarım süreçlerini optimize ederek ve bu süreçler sırasındaki maliyeti en aza indirerek yüksek kaliteli hassas ürünler elde etmeyi amaçlayan deneyisel bir süreç tasarım yöntemidir (Aman ve diğ., 2023). Bu yöntemde istatistiksel veriler ortogonal dizilerle kontrol edilir. Amaç, en az deneyisel çalışma yaparak en iyi sonucu bulmaktır. Bu özelliği ile hem maliyetleri düşürür hem de zamandan tasarruf

sağlar. Deneyden olumlu sonuçlar elde etmek için istatistiksel deney tasarımında ortogonal dizileri kullanan bir yöntem kullanır. Bu yöntem deney için gereken maliyeti azaltır ve zamandan tasarruf sağlar (Anggoro ve diğ., 2022).

Bu çalışma, Hardox 450 malzemesinin frezeleme prosesi üzerine literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışmanın literatüre getirdiği yenilikler arasında belirli kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve optimizasyon için yeni yaklaşımlar önerilmesi yer almaktadır. Bu analiz, çalışmanın alandaki boşlukları nasıl doldurduğunu ve mevcut bilgilere nasıl katkıda bulunduğunu göstermektedir.

2.1.1. Çelik Malzemelerin Genel Özellikleri

Çelik, modern endüstrinin temel taşlarından biri olarak, dayanıklılığı, işlenebilirliği ve geniş kullanım alanlarıyla dikkat çeken bir mühendislik malzemesidir. Demir ve karbonun bir alaşımı olan çelik, çeşitli alaşım elementleriyle özellikleri geliştirilerek farklı sektörlerin ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir. Gelişen teknolojiyle birlikte çelik malzemelerin önemi artmakta ve mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir rol oynamaktadır (britannica, 2024).

Çeliğin özellikleri hem kimyasal bileşiminden hem de üretim yönteminden, ayrıca üretim sırasında uygulanan işlemlerden kaynaklanır. Çelikteki karbon, manganez, kükürt, fosfor ve diğer alaşım elementlerinin miktarı, malzemenin sertlik, dayanıklılık ve süneklik gibi mekanik özelliklerini belirler. Üretim sürecindeki sıcaklık kontrolü, haddeleme ve ısıtım işlemleri, çeliğin iç yapısını ve homojenliğini etkileyerek mukavemetini artırabilir veya istenen özelliklere göre şekillendirilebilir. Aynı zamanda, kaynak, şekillendirme ve yüzey işlemleri gibi ek süreçler, yapısal çeliğin performansını ve kullanım ömrünü doğrudan etkileyen faktörler arasında yer alır. Bu nedenle, çeliğin nihai özellikleri, tüm bu faktörlerin dengeli bir şekilde yönetilmesiyle sağlanır (steelconstruction, 2024).

2.1.1.1. Mekanik Özellikler

Çeliklerin mekanik özellikleri, üretim sürecinde uygulanan fizikokimyasal proseslerin oluşturduğu mikroyapı ve kimyasal yapının bir fonksiyonu olarak şekillenir. Çelikteki tane boyutu, faz dağılımı ve iç gerilmeler gibi mikroyapısal özellikler, mukavemet,

süneklik, tokluk ve sertlik gibi mekanik özelliklere doğrudan etki eder. Bu özelliklerin kontrolü ve iyileştirilmesi için uygun kimyasal bileşim seçimi kadar, belirli ısıtım işlem (örneğin, tavlama, menevişleme veya sertleştirme) ve şekil verme yöntemleri de kritik öneme sahiptir. Yarı mamul malzemelerin üretiminde, belirlenen boyut ve özelliklere ulaşmak amacıyla sıcak ve soğuk haddeleme, dövme veya çekme gibi süreçler uygulanır. Bu süreçler, çeliğin nihai kullanım alanına uygun performansı sergilemesini sağlayacak şekilde optimize edilir (Grum ve diğ., 2001).

Yüksek Mukavemet: Çelik, yüksek çekme ve basma dayanımına sahiptir. Bu özellik, çeliğin ağır yükler altında güvenle kullanılmasını sağlar.

Esneklik ve Süneklik: Çelik, şekil değiştirme kapasitesine sahiptir ve kırılmadan önce deformasyona uğrayabilir. Bu özellik, deprem gibi ani yüklemelerde yapısal güvenliği artırır.

Sertlik: Özellikle karbon oranı yüksek çelikler, aşınmaya ve darbelere karşı yüksek direnç gösterir.

2.1.1.2. Termal Özellikler

Isıl Dayanım: Çelik, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır ve özelliklerini büyük ölçüde korur. Bu nedenle enerji santralleri, fırınlar ve havacılık gibi yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

Isıl İletkenlik: Çelik, ısı iletkenliği sayesinde ısıyı hızlı bir şekilde dağıtarak termal gerilmeleri azaltabilir.

2.1.1.3. Kimyasal Özellikler

Korozyon Direnci: Alaşım elementleri (örneğin krom ve nikel) eklendiğinde, çelik paslanmaz hale gelir ve zorlu çevresel koşullarda bile uzun ömürlü olur.

Kimyasal Stabilité: Çelik, birçok kimyasal maddeye karşı dirençlidir. Bu özellik, kimya endüstrisinde reaktörler, borular ve tanklar gibi ekipmanlarda kullanımı mümkün kılar.

2.1.1.4. Fiziksel Özellikler

Yoğunluk: Çeliğin yoğunluğu, dayanıklılık ile hafiflik arasında dengeli bir yapı sunar. Özellikle havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde bu denge önemlidir.

Manyetik Özellikler: Çelik, manyetik alan oluşturabilme yeteneğiyle elektromanyetik cihazlarda kullanılabilir.

2.1.1.5. İşlenebilirlik ve Üretim Kolaylığı

Kaynaklanabilirlik: Çelik, kolay kaynaklanabilir bir malzeme olması sayesinde karmaşık yapısal elemanların üretiminde avantaj sağlar.

Şekillendirilebilirlik: Çelik, dövme, haddeleme ve presleme gibi yöntemlerle kolayca şekillendirilebilir. Bu özellik, tasarım özgürlüğü sunar.

2.1.1.6. Çevresel ve Ekonomik Özellikler

Çelik, %100 geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Bu özelliği, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantaj sağlar.

Maliyet Etkinliği: Çelik, dayanıklılığı ve uzun ömrü sayesinde ekonomik bir çözüm sunar. Özellikle inşaat, enerji ve ulaşım sektörlerinde maliyet verimliliği sağlar.

2.1.1.7. Çelik Malzemelerin Uygulama Alanları

Çelik, geniş özellik yelpazesi sayesinde inşaat, otomotiv, havacılık, denizcilik, enerji ve savunma gibi birçok sektörde kullanılır. İnşaat sektöründe taşıyıcı elemanlar ve çatı sistemlerinden, otomotivde şasi ve motor parçalarına kadar uzanan çok çeşitli kullanım alanları vardır. Benzersiz özellikleri sayesinde çelik, çok çeşitli endüstrilerde vazgeçilmez bir malzeme olarak kullanılmaktadır. İç ve dış dekorasyondan tıbbi cihazlara, denizcilikten elektronik endüstrisine, mücevher yapımından ulaşım ve otomobil üretimine kadar pek çok alanda çeliğin üstün dayanıklılığı, mukavemeti ve şekillendirilebilirliği ön plana çıkar. Ayrıca, mutfak ve ev aletleri, gıda işleme, elektrik üretimi, tarım, endüstriyel ekipman, mobilya üretimi, petrol ve gaz, madencilik ve inşaat sektörleri, çeliğin yaygın kullanım alanlarından sadece birkaçıdır. Çelik, geniş kullanım

alanı ve farklı alaşımlarla uyarlanabilen yapısı sayesinde hemen her sektörde kritik bir rol oynar. Bununla birlikte, çelik uygulamaları genellikle tüketim miktarına göre yedi temel bölüme ayrılarak sınıflandırılır ve bu, çeliğin endüstriyel önemini daha da belirgin hale getirir (araxchemi, 2024).

Dünya Çelik Birliği'nin (WSA) raporuna göre, her sektöre tahsis edilen çelik yüzdesi aşağıdaki gibidir:

Binalar ve altyapı %51

Mekanik ekipman %15

Otomobil %12

Metal ve tıbbi ürünler %11

Kargo %5

Ev aletleri %3

Elektrikli ekipmanlar %3

Çelik malzemelerin genel özellikleri, onun neden mühendislik ve endüstrinin temel malzemesi olduğunu açıklamaktadır. Dayanıklılığı, işlenebilirliği, çevresel uyumu ve ekonomik avantajlarıyla çelik, modern teknolojinin ve altyapının temel taşı olmaya devam edecektir. Gelişen malzeme bilimiyle birlikte çelik, daha hafif, dayanıklı ve çevre dostu hale gelerek geleceğin mühendislik çözümlerinde de öncü rol oynayacaktır.

2.1.2. Çelik Malzemelerin Yapısı ve Sınıflandırılması

Çelik, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Dayanıklılığı, işlenebilirliği ve farklı ihtiyaçlara göre özelleştirilebilir yapısıyla, modern teknolojinin vazgeçilmez bir unsuru olmuştur. Çeliklerin yapısını anlamak ve doğru sınıflandırmasını yapmak, bu malzemenin hangi koşullarda ve uygulamalarda kullanılacağını belirlemek açısından büyük önem taşır.

2.1.2.1. Çeliklerin Yapısı

Çelik, temel olarak demir (Fe) ve karbon (C) alaşımıdır. Karbon miktarı, çeliğin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Karbon oranı arttıkça çeliğin sertliği artarken sünekliği azalır. Bunun yanında, mangan (Mn), krom (Cr), nikel (Ni), molibden (Mo) gibi alaşım elementleri de çeliğin mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için kullanılır (matweb,2024).

Çeliklerin mikro yapısı, üretim süreçleri ve ısıtma işlemlere bağlı olarak değişir. Temel yapısal bileşenleri şunlardır:

Ferrit: Yumuşak ve sünek bir yapıdadır.

Perlit: Orta sertlikte ve dayanıklıdır. Ferrit ve sementit karışımıdır.

Sementit (Fe_3C): Sert ve kırılgan bir yapıdadır.

Martenzit: Sertlik ve dayanımı yüksek, ancak sünekliği düşük bir fazdır.

Bu fazların oranları ve dağılımları, çeliğin nihai özelliklerini belirler.

2.1.2.2. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler, karbon miktarı, alaşım elementleri, üretim yöntemleri ve kullanım amaçlarına göre farklı gruplara ayrılır.

Karbon Çelikleri: Karbon oranına göre sınıflandırılır:

Düşük Karbonlu Çelikler (%0,05-0,25 C): Kolay şekillendirilebilir ve kaynaklanabilir. İnşaat sektöründe yaygın kullanılır.

Orta Karbonlu Çelikler (%0,25-0,60 C): Mukavemeti ve sertliği daha yüksektir. Şaftlar, dişliler gibi mekanik parçalarda kullanılır.

Yüksek Karbonlu Çelikler (%0,60-1,00 C): Aşınmaya dayanıklıdır. Kesici aletler, yaylar ve el aletlerinde tercih edilir.

Alaşımlı Çelikler: Özel alaşım elementleri eklenerek çeliğin özellikleri geliştirilir.

Paslanmaz Çelikler: %10,5 veya daha fazla krom içerir. Yüksek korozyon direnci ile kimya, tıp ve gıda sektörlerinde kullanılır.

Düşük Alaşımli Yüksek Mukavemetli Çelikler (HSLA): Hafif ve dayanıklı yapısıyla otomotiv ve inşaat sektöründe öne çıkar.

Aşınmaya Dayanıklı Çelikler: Hardox gibi çelikler, zorlu koşullarda üstün performans sunar.

Takım Çelikleri: Kesici, şekillendirici ve kalıp uygulamaları için geliştirilmiştir. Yüksek sertlik, aşınma direnci ve sıcaklık dayanımı sağlar.

Özel Amaçlı Çelikler: Belirli uygulamalara uygun olarak geliştirilir. Örneğin:

Düşük sıcaklıklara dayanıklı çelikler (kriyojenik uygulamalar için).

Yüksek sıcaklıklara dayanıklı çelikler (enerji santralleri ve türbinlerde).

Yapısal Çelikler: İnşaat sektöründe taşıyıcı elemanlar için kullanılır. Kaynaklanabilirliği ve dayanımıyla öne çıkar.

Döküm Çelikler: Karmaşık şekilli ve büyük parçaların üretiminde tercih edilir.

Çelik teknolojisi, sürdürülebilirlik ve verimlilik hedefleri doğrultusunda sürekli gelişmektedir. Yeni üretim yöntemleri, hafif ancak dayanıklı çeliklerin geliştirilmesini mümkün kılarken, yeşil üretim teknolojileri çevresel etkileri azaltmaktadır. Nano yapıları çelikler ve ileri alaşımlar, gelecekte daha hafif ve güçlü malzemeler sunarak yeni mühendislik ufuklarına kapı açmaktadır.

Çelik malzemelerin yapısını ve sınıflandırılmasını anlamak, bu güçlü malzemeyi doğru yer ve koşullarda kullanmanın anahtarıdır. Bu bilgi, modern mühendislik uygulamalarında güvenlik, dayanıklılık ve maliyet etkinliği sağlamanın temelini oluşturur.

2.1.3. Hardox 450 Çelik Malzemeler

2.1.3.1. Hardox 450 Çelik Malzemelerin Genel Özellikleri

Hardox 450, yüksek aşınma direnci ve üstün dayanıklılığıyla tanınan bir aşınma plakası çelik malzemedir. İsveç merkezli SSAB firması tarafından üretilen bu çelik, ağır hizmet koşullarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Mukavemet, tokluk ve işlenebilirlik arasındaki benzersiz dengesi sayesinde inşaat, madencilik, tarım ve geri dönüşüm gibi birçok sektörde yaygın bir şekilde tercih edilir (ssab.com,2024).

2.1.3.2. Hardox 450'nin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Yüksek Aşınma Direnci: Hardox 450'nin en belirgin özelliği, yüzey aşınmalarına karşı gösterdiği yüksek dirençtir. 450 HBW (Brinell Sertlik) değerine sahip olan bu çelik, ağır yükler altında uzun süre dayanım sağlar. Bu özellik, özellikle aşındırıcı malzemelerle çalışan makinelerde önemlidir.

Yüksek Mukavemet: Çelik, 1250 MPa'ya kadar çekme dayanımına sahiptir. Bu, Hardox 450'nin darbelere ve zorlayıcı mekanik kuvvetlere karşı üstün direnç göstermesini sağlar.

Tokluk: Sertliğine rağmen kırılgan değildir. Zorlu koşullarda bile darbelere karşı dayanıklılığını korur. -40°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda dahi etkili performans gösterir, bu da onu soğuk iklimlerde ideal bir seçenek haline getirir.

Hafiflik ve Mukavemet Dengesi: Hardox 450, diğer aşınma plakalarına kıyasla daha hafif tasarımlar sunar. Bu, daha az malzeme kullanılarak daha yüksek dayanım elde edilmesine olanak tanır, böylece ağırlık azaltımı ve yakıt tasarrufu sağlar.

2.1.3.3. Hardox 450'nin Kimyasal Özellikleri

Hardox 450, kimyasal bileşimi sayesinde dayanıklılığı ve işlenebilirliği arasında mükemmel bir denge sunar. İçeriğindeki karbon, mangan, krom ve nikel gibi alaşım elementleri, malzemenin sertlik ve aşınma direncini artırırken kaynaklanabilirliğini de korur.

Karbon (C): Sertlik ve mukavemet sağlar.

Mangan (Mn): Mukavemeti artırır ve sertleştirme sürecini destekler.

Krom (Cr): Korozyon ve oksidasyon direncini artırır.

Nikel (Ni): Tokluk ve düşük sıcaklık dayanımı sağlar.

2.1.3.4. Hardox 450'nin İşlenebilirlik Özellikleri

Hardox 450'nin sertliği, işlenebilirliği zor gibi görünse de uygun ekipman ve yöntemlerle kolayca kesilebilir, delinebilir ve kaynak yapılabilir.

Kesim: Oksi-yakıt, plazma veya lazer kesim yöntemleriyle kolayca şekillendirilebilir.

Kaynaklama: Özel kaynak prosedürleri gerektirse de kaynaklanabilirliği oldukça yüksektir. Kaynaklama işlemi sırasında düşük hidrojenli elektrotlar kullanılması önerilir.

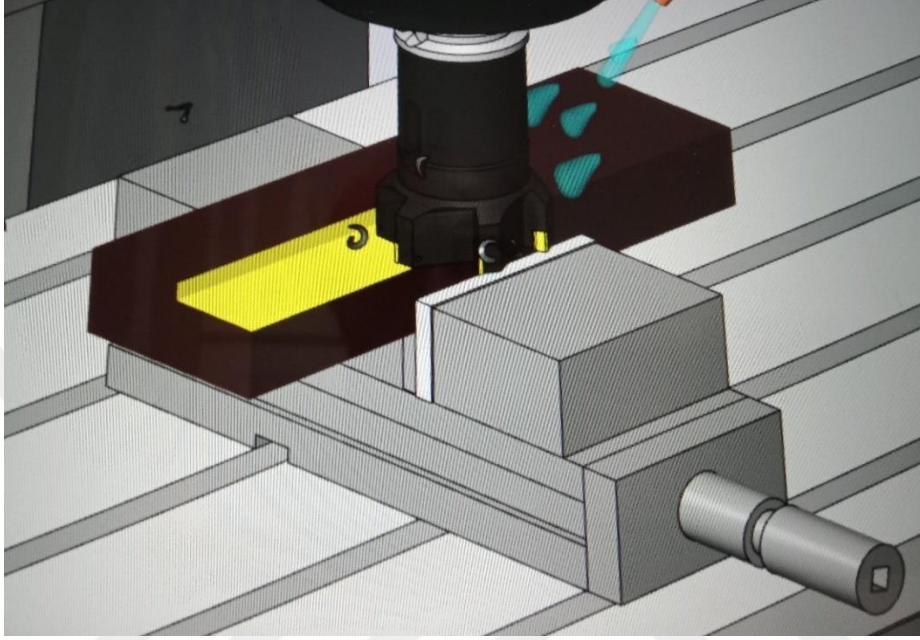
Şekillendirme: Yüksek mukavemeti nedeniyle belirli şekillendirme limitleri olsa da soğuk şekillendirme işlemleriyle işlenebilir.

Talaşlı İmalat: Talaşlı imalat süreçlerinde, sert yapısı ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle işlem sırasında takım aşınmasını artırıcı etkiler gösterebilir. Ancak, uygun kesme parametreleri, dayanıklı kesici takımlar ve etkili soğutma yöntemleri ile bu zorluklar minimize edilebilir. Hardox 450'nin doğru işleme teknikleriyle kullanılması, yüksek yüzey kalitesi ve uzun takım ömrü sağlayarak üretim süreçlerinde verimlilik artışı sunar.

2.1.4. Talaşlı İmalat Frezeleme Yöntemi

Frezeleme işleminde, kesici takım dönerek malzeme yüzeyine temas eder ve talaş kaldırır. Bu işlem sırasında iş parçası, tezgâh tablasına (Şekil 2.1.) sabitlenerek kesici takımın altında veya yanında hareket ettirilir. Kesme işlemi, hem kesici takımın dönme hareketi hem de iş parçasının ilerleme hareketi ile gerçekleştirilir. Frezeleme, düz yüzeylerden karmaşık geometrilere kadar geniş bir yelpazedeki iş parçalarını hassas ve verimli bir şekilde işleyebilen, modern üretim süreçlerinde sıklıkla tercih edilen yüksek performanslı bir yöntemdir. Döner kesici takımlarla malzeme kaldırma prensibine dayanan bu yöntem, üretimdeki çok yönlülüğü ve hızlı işlem kapasitesiyle dikkat çeker.

Hem seri üretimde hem de özel parça imalatında kullanılabilirliği, frezelemeyi endüstrinin vazgeçilmez tekniklerinden biri haline getirmiştir (Li ve diğ., 2015).



Şekil 2. 1. Frezeleme Yöntemi

2.1.4.1. Frezeleme Türleri

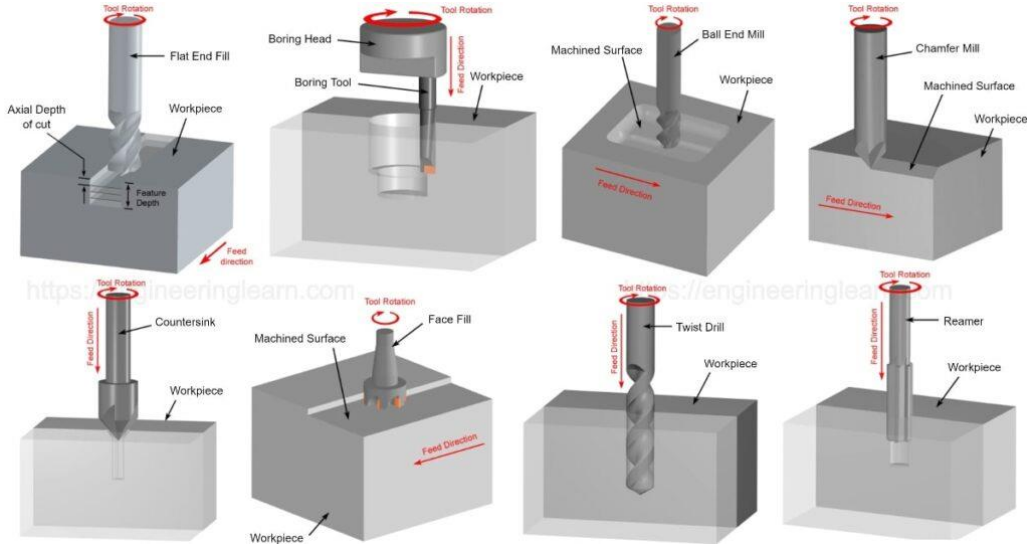
Yüzey Frezeleme: Kesici takımın ucu iş parçası yüzeyiyle temas eder. Düz yüzeylerin oluşturulması için idealdir (Şekil 2.2.).

Çevresel Frezeleme: Kesici takımın kenarları talaş kaldırma işlemi gerçekleştirir. Derin kesikler ve oluk açma işlemlerinde tercih edilir.

Alın Frezeleme: Hem kesici takımın kenarları hem de ucu talaş kaldırır. Cep açma ve karmaşık geometrilerin oluşturulmasında kullanılır.

Açılı Frezeleme: Kesici takım, iş parçasına belirli bir açıyla yerleştirilir. Eğik yüzeylerin ve pahların işlenmesinde tercih edilir.

Form Frezeleme: Özel şekilli kesiciler kullanılarak belirli bir profil oluşturulur. Dişli, vida ve özel kesitlerin üretiminde yaygındır.



Şekil 2. 2. Frezeleme Yöntemi Çeşitleri

2.1.4.2. Frezeleme Yönteminin Kullanım Alanları

Makine Parçaları: Özel tasarımı makine parçalarının hassas şekilde üretilmesi.

Otomotiv Endüstrisi: Motor blokları, dişli kutuları ve şasi bileşenlerinin işlenmesi.

Havacılık Sanayii: Hafif ve dayanıklı malzemelerden üretilen uçak parçalarının şekillendirilmesi.

Medikal Endüstri: Cerrahi ekipmanlar ve protezlerin hassas işlenmesi.

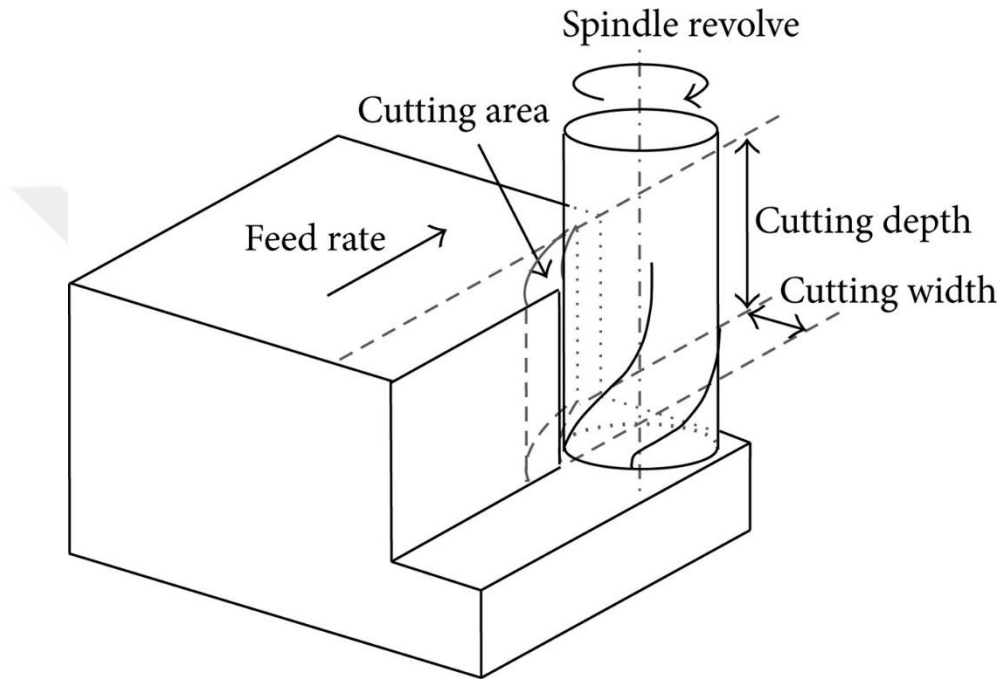
Kalıp ve Kalıplama: Enjeksiyon kalıpları ve döküm modellerinin üretimi.

2.1.4.3. Frezeleme Kesme Parametreleri

Frezeleme işlemi, talaşlı imalat yöntemleri arasında yer alan ve özellikle karmaşık yüzeylerin işlenmesinde kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu işlem sırasında doğru kesme parametrelerinin seçimi, yüzey kalitesi, işleme süresi ve takım ömrü gibi faktörler üzerinde doğrudan etkili olduğundan büyük bir öneme sahiptir (Kumar ve diğ., 2020).

Frezeleme işlemi sırasında, kesici takımın kesici kenarları iş parçasının işlenmiş yüzeyleriyle sürekli temas halindedir ve bu durum, zamanla takım aşınmasında belirgin bir artışa yol açar. Kesme kuvvetindeki değişiklikler, iş parçasında ve takımda elastik

sapmalara neden olarak geometrik doğrulukta sapmalar, titreşimler ve düzlükten uzaklaşma gibi olumsuz etkiler yaratabilir. Bu tür sapmalar, işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğünü artırarak, istenen hassasiyetin ve yüzey kalitesinin elde edilmesini zorlaştırır. Bu nedenle, kesme kuvvetlerinin kontrolü ve uygun takım seçimi, işlem verimliliğini ve doğruluğunu artırmada kritik öneme sahiptir (Pimenov ve diğ., 2022).



Şekil 2. 3. Frezelemede Kesme Parametreleri

Frezeleme yönteminde kullanılan temel kesme parametreleri Şekil 2.3.'de şekliyle yürütülmektedir. Bu parametreler:

Kesme Hızı (V_c): Kesici takımın iş parçasına göre dönme hızını ifade eder ve genellikle metre/dakika (m/dk) birimiyle ifade edilir. Kesme hızının seçimi, takım malzemesi, işlenecek malzemenin türü ve işleme şartlarına bağlıdır.

Yüksek Kesme Hızı: Daha kısa işleme süresi sağlar ancak takım ömrünü kısaltabilir.

Düşük Kesme Hızı: Daha uzun takım ömrü sağlar ancak işleme süresi uzar.

Devir Sayısı (n): Kesici takımın dakikadaki dönüş sayısını ifade eder ve dakikadaki devir (rpm) olarak belirtilir.

Devir sayısı, Denklem 2.1 ile hesaplanır:

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

Burada D , kesici takımın çapıdır.

Talaş Derinliği (ap): İş parçasından kaldırılan malzeme kalınlığını ifade eder. İşleme hızı ve talaş kaldırma kapasitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Büyük talaş derinliği daha fazla malzeme kaldırır ancak kesme kuvvetini artırır.

İlerleme Hızı (f): Kesici takımın bir devirde iş parçasında ilerlediği mesafeyi ifade eder. İlerleme hızının kontrolü, yüzey kalitesi ve takım ömrü için kritik öneme sahiptir. Genellikle milimetre/dakika (mm/dk) birimiyle belirtilir.

İlerleme Oranı (fz): Her bir kesici uç için iş parçasında ilerlenen mesafeyi ifade eder. Denklem 2.2 ile hesaplanır:

$$fz = \frac{f}{nz} \quad (2.2)$$

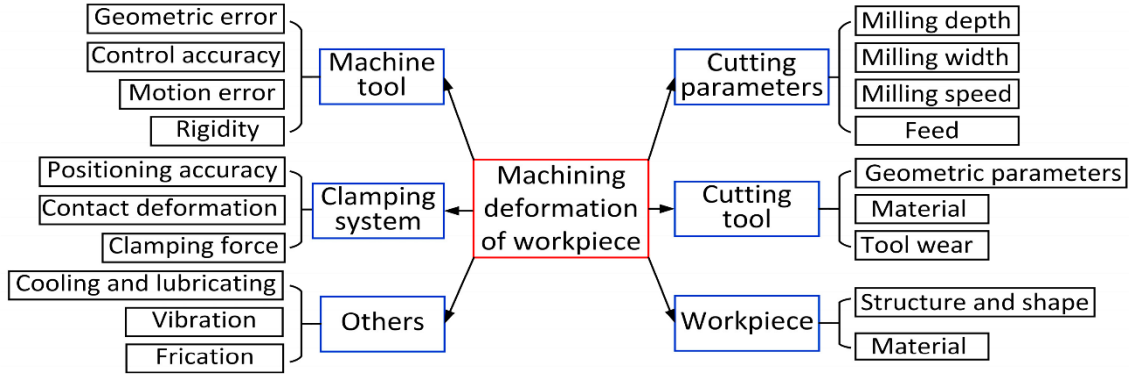
Burada z, takım üzerindeki kesici uç sayısıdır.

Talaş Kaldırma Hızı (Q): Birim zamanda kaldırılan talaş hacmini ifade eder ve milimetreküp/dakika (mm³/dk) birimiyle ölçülür. Talaş kaldırma hızı, üretim hızını belirleyen önemli bir parametredir.

2.1.4.4. Kesme Parametrelerinin Seçilmesi

Deng ve diğerleri (2023) yaptıkları araştırmada, frezeleme işlemi sırasında iş parçası üzerinde meydana gelen deformasyonların birden fazla sebebi olduğunu belirtmiş ve bu nedenleri Şekil 2.4'de özetlemişlerdir. Çalışma, iş parçası deformasyonlarının hem içsel faktörlerden (malzeme özellikleri, geometrik hassasiyet) hem de dışsal faktörlerden (kesme kuvvetleri, sıkıştırma sisteminin etkileri) kaynaklanabileceğini vurgulamaktadır. Ayrıca, frezeleme parametrelerinin ve kullanılan takımın özelliklerinin de iş parçası

üzerindeki deformasyon düzeyini önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir. Bu kapsamda, deformasyonların nedenlerinin belirlenmesi ve kontrol altına alınması, işleme kalitesinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Aşağıda seçim sürecinde dikkate alınması gereken temel faktörler sıralanmıştır:



Şekil 2. 4. Frezeleme işleminde iş parçası deformasyonunu etkileyen faktörler

Malzeme Özellikleri

İş Parçası Malzemesi: Malzemenin sertliği, tokluğu ve işlenebilirliği, kesme hızı, ilerleme oranı ve takım seçimlerini etkiler. Örneğin, sert malzemeler daha düşük hızlar ve özel kesici takımlar gerektirebilir.

Takım Malzemesi: Yüksek hızlı çelik (HSS), karbür veya seramik takımlar, iş parçası malzemesine ve gerekli kesme koşullarına göre seçilmelidir.

Kesme Hızı ve İlerleme Oranı: Kesme hızı, takımın dönüş hızını belirler ve ısı oluşumu ile takım aşınmasını doğrudan etkiler.

İlerleme Oranı: Malzeme kaldırma oranını ve yüzey kalitesini kontrol eder. Yüksek ilerleme oranları üretkenliği artırırken yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Kesme Derinliği: Bu, bir geçişte ne kadar malzeme kaldırılacağını belirler. Takım aşırı yüklenmeden maksimum malzeme kaldırma verimliliğini sağlamak için bir denge kurulmalıdır.

Takım Geometrisi ve Boyutu: Uygun takım seçimi, oluk sayısı, takım çapı ve kaplama gibi özellikleri içerir. Örneğin, kaplamalı takımlar sürtünmeyi azaltabilir ve takım ömrünü uzatabilir.

Tezgâh Kapasitesi: Freze tezgahının rijitliği, mil hızı ve gücü, seçilen kesme parametrelerinin uygulanabilirliğini sınırlar. Tezgahın titreşim veya sapma olmadan seçilen ayarları kaldırabildiğinden emin olunmalıdır.

Soğutma ve Yağlama: Soğutma yöntemleri (kuru, taşkın veya MQL), takım ömrü ve yüzey kalitesini etkiler. Seçim, malzemeye ve çevresel önceliklere göre yapılmalıdır.

Yüzey Kalitesi Gereksinimleri: Yüksek hassasiyet veya pürüzsüz yüzeylerin gerektiği uygulamalar için daha yavaş kesme hızları ve daha ince ilerleme oranları tercih edilir.

Takım Ömrü ve Maliyet Verimliliği: Üretkenlik ile takım ömrü arasında bir denge sağlanması önemlidir. Aşırı agresif parametreler, takım ömrünü kısaltabilir ve genel maliyetleri artırabilir.

Talaş Kaldırma: Etkili talaş kaldırma, takımın tıkanmasını önler ve takım kırılma riskini azaltır. Doğru soğutucu uygulaması ve takım geometrisi, talaş kaldırmayı kolaylaştırır.

Titreşim ve Stabilité: Yüksek mil hızları ve büyük kesme derinlikleri titreşim oluşturabilir. Uygun sıkıştırma ve sönümleme teknikleri ile stabilite sağlanabilir.

Frezeleme İşlem Türü

Yüzey Frezeleme: Yüzey kalitesine odaklanır; daha iyi bir yüzey için büyük çaplı ve daha az oluklu takımlar kullanılabilir.

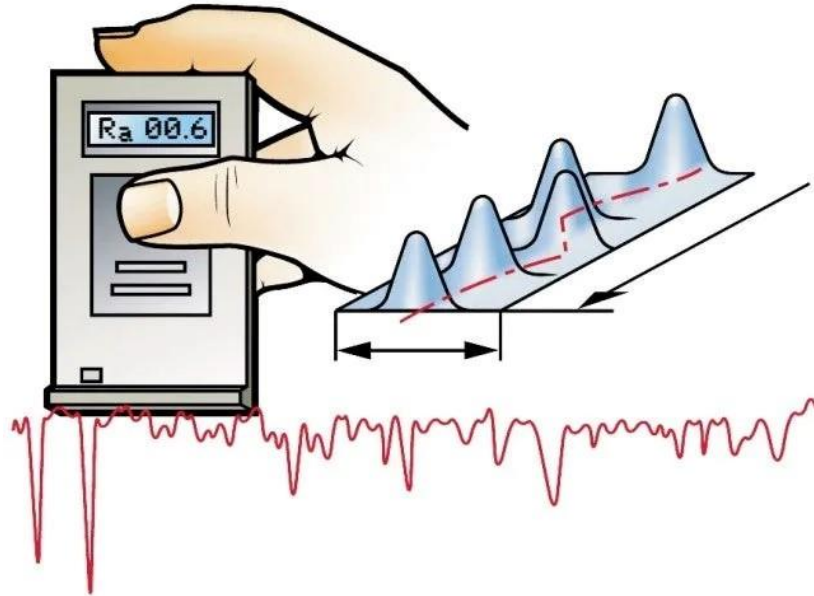
Uç Frezeleme: Daha karmaşık şekiller ve derin kesimler için yüksek rijitlikte ve daha fazla oluklu takımlar gereklidir.

Çevresel ve Ekonomik Faktörler: Enerji tüketimi, soğutucu kullanımı ve takım malzemesi geri dönüşümü dikkate alınarak süreç, sürdürülebilir ve maliyet açısından verimli hale getirilmelidir.

2.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

İmalat süreçlerinde, özellikle talaşlı ve talaşsız şekillendirme yöntemleriyle üretilen yüzeylerde, belirli bir düzeyde pürüzler oluşması kaçınılmazdır. Bu pürüzler, kullanılan işleme tekniğine ve parametrelere bağlı olarak farklı boyutlarda olabilir. Bazen bu pürüzler gözle görülebilir ya da elle hissedilebilirken, daha ince yüzeyler için ancak yüksek hassasiyetli ölçüm cihazlarıyla tespit edilebilir. İmalat sırasında meydana gelen bu mikro düzeydeki düzensizlikler, malzemenin işlevselliğini etkileyebilir ve genellikle yüzey kalitesini artırmak amacıyla ilave işlemler gerektirir. Bu sebeple, yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmek ve optimize etmek, üretim süreçlerinin verimliliğini ve ürün kalitesini iyileştiren önemli bir faktördür (Persson, 2023).

Yüzey pürüzlülüğü, bir malzeme yüzeyinin mikro ölçekteki düzgünlüğünü veya düzensizliğini tanımlayan önemli bir parametredir. Bu özellik, yüzeyin işlevselliğini, estetik değerini ve performansını doğrudan etkiler. Pürüzlülük ölçümü, birçok endüstride kalite kontrol süreçlerinde kritik bir rol oynar ve üretim sürecinde elde edilen yüzey kalitesinin değerlendirilmesine olanak tanır (Şekil 2.5.).



Şekil 2. 5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü, özellikle makine parçalarının çalışma performansı ve ömrü üzerinde önemli etkiler yaratır.

2.1.5.1.Yüzey Pürüzlülüğünü Belirleyen Parametreler

Yüzey pürüzlülüğünü tanımlamak ve ölçmek için birçok farklı parametre kullanılmaktadır ve bu parametreler, yüzeyin özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılar (Gadelmawla ve diğ.,2002). Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde ISO 4287 çeşitli parametreler kullanılır (digitalsurf, 2024).

Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde kullanılan bazı parametreler şunlardır:

Ra (Ortalama Pürüzlülük): Yüzey profilinin orta çizgiden olan sapmalarının ortalamasını ifade eder. En yaygın kullanılan pürüzlülük parametresidir.

Rz (Tepe Vadisi Yüksekliği): Yüzey profilindeki en yüksek tepe ile en düşük vadi arasındaki mesafeyi ölçer.

Rq (Kök Ortalama Kare): Sapmaların karelerinin ortalamasının karekökü olarak hesaplanır ve Ra'ya benzer bir ölçü sağlar.

Rt (Toplam Yükseklik): Yüzey profilindeki en yüksek tepe ile en derin vadi arasındaki toplam mesafeyi ölçer.

Sku (Kurtosis): Sku veya yüzey profili "kurtosis" değeri, bir yüzeyin pürüzlülük profilinin yükseklik dağılımının sivriliğini veya düzlüğünü ifade eden istatistiksel bir parametredir. Bu parametre, yüzey topografyasını anlamada önemli bir rol oynar ve yüzey profilinin normal dağılıma ne kadar yakın olduğunu gösterir.

2.1.6. Taguchi Optimizasyon Metodu

Taguchi optimizasyon metodu, deney tasarımı yaklaşımıyla süreç ve ürün performansını iyileştirmeyi hedefleyen bir yöntemdir. Bu yöntem, Japon mühendis ve istatistikçi Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş olup, hem üretim süreçlerinde hem de ürün geliştirme aşamalarında kaliteyi artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Taguchi metodu, geleneksel deney tasarımı yöntemlerinden farklı olarak, hem kontrol edilebilir faktörlerin hem de çevresel değişkenlerin sistem üzerindeki etkilerini değerlendirir. Böylece ürün veya süreçlerin istikrarını ve dayanıklılığını artırmayı amaçlar. Bu yöntemlerle, işlem parametrelerinin etkisi üzerinde ayrıntılı bir değerlendirme yapılabilir ve üretim süreçleri optimize edilebilir. Taguchi ve ANOVA'nın birlikte kullanılması, hem maliyetleri düşürmek hem de kaliteyi artırmak için etkili bir yol sunar (Bhirud ve diğ., 2024).

Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen frezeleme deneyleri, ilerleme oranı, kesme hızı ve kesme derinliği gibi işlem parametrelerinin kobalt bazlı alaşımların optimum yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini analiz etmek için güçlü bir araçtır. Bu yöntem, işlem parametrelerinin sistematik bir şekilde incelenmesini ve yüzey pürüzlülüğünü en aza indirecek optimum koşulların belirlenmesini sağlar (Bağcı ve Aykut, 2005).

Yüzey pürüzlülüğünü işleme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade etmek için sayısal ve deneysel sonuçlardan elde edilen verileri birleştiren birleşik bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model, hem teorik hem de pratik açıdan önemli bir yaklaşımı temsil eder. Sayısal model, kesme işlemi sırasında kesici takımın potansiyel temas basıncını, gerilimini ve deformasyonunu tahmin etmek için kullanılır. Bu parametreler, işleme sırasında kesici takım ile iş parçası arasındaki etkileşimi detaylı bir şekilde anlamamıza olanak tanır ve dolayısıyla yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini ortaya koyar (Tlhabadira ve diğ., 2019).

2.1.6.1. Taguchi Metodunun Temel İlkeleri

Robust Tasarım (Sağlam Tasarım): Ürün veya süreçlerin, çevresel faktörlerden (gürültü faktörleri) etkilenmeden performans göstermesi sağlanır.

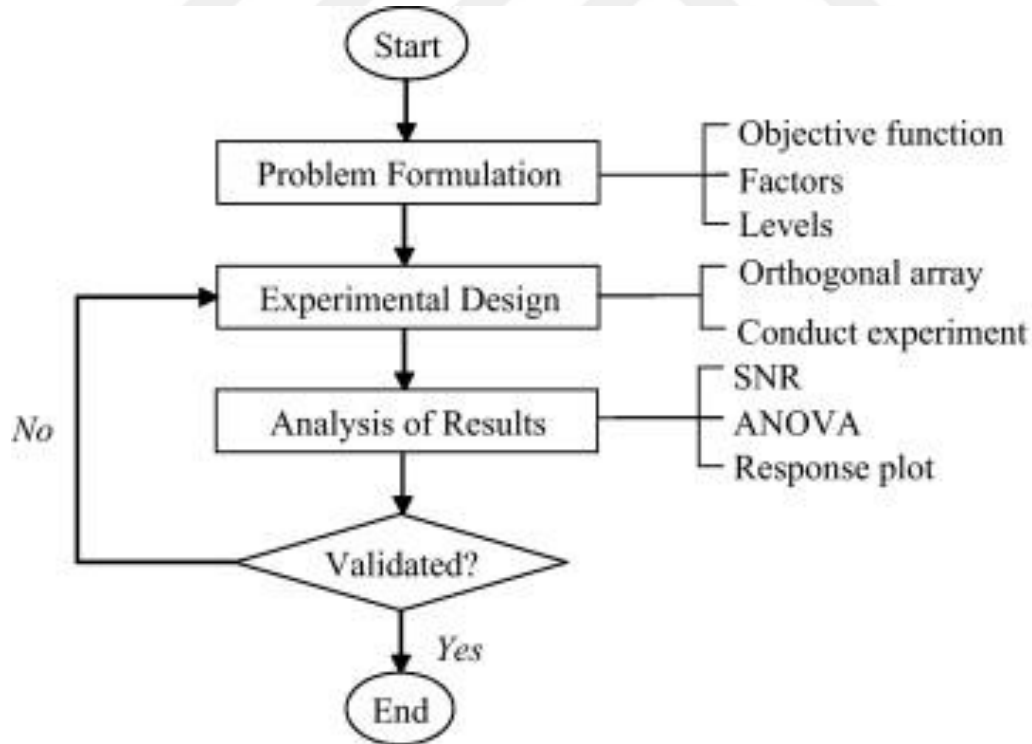
Faktörlerin ve Seviyelerin Belirlenmesi: Kritik faktörler ve bu faktörlerin değişim aralıkları belirlenir.

L-Ortogonal Diziler: Deneylerin minimum sayıda yapılmasını sağlayan özel matris yapıları kullanılır. Bu, zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.

Sinyal/Gürültü Oranı (S/N Oranı): Sistem performansını optimize etmek için çıktı değişkeninin kararlılığını değerlendirir. Daha yüksek bir S/N oranı, daha az değişkenlikle daha iyi bir performansı ifade eder.

2.1.6.2. Taguchi Metodunun Uygulama Aşamaları

Yusoff ve diğerleri (2011), yaptıkları çalışmada Taguchi yönteminin akış aşamalarını detaylı bir şekilde incelemiş ve bu aşamaları Şekil 2.6'de özetlemiştir. Araştırmada, deney tasarımı ve optimizasyon süreçlerinde kullanılan Taguchi yönteminin, sistematik bir yaklaşımla süreç parametrelerini analiz ettiği belirtilmiştir. Yöntem, kontrol faktörlerini tanımlama, deney matrisini oluşturma, veri toplama ve analiz etme gibi temel adımları içermektedir. Şekil 2.6, bu adımları görselleştirerek, yöntemin uygulama sürecini daha anlaşılır hale getirmiştir. Çalışma, Taguchi yönteminin, karmaşık süreçlerin optimizasyonunda etkili bir araç olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 2. 6. Taguchi Yönteminin Akış Şeması

Problemin Tanımlanması: Optimizasyon yapılacak süreç veya ürün belirlenir.

Faktör ve Seviyelerin Seçimi: Süreci etkileyen faktörler ve bunların deneme aralıkları belirlenir.

Deney Tasarımının Oluşturulması: L-ortogonal diziye göre deneyler planlanır.

Deneylerin Uygulanması ve Verilerin Toplanması: Her bir deney koşulunda sistemin çıktıları kaydedilir.

S/N Oranlarının Hesaplanması: Performans kriterine göre S/N oranları hesaplanır:

Daha İyi Daha İyidir (Larger is Better)

Daha Küçük Daha İyidir (Smaller is Better)

Hedef En İyidir (Nominal is Best)

Optimum Faktör Kombinasyonunun Belirlenmesi: En iyi performansı sağlayan faktör kombinasyonu seçilir.

Sonuçların Doğrulanması: Optimum koşullarda deneyler tekrar edilerek sonuçlar doğrulanır.

2.1.7. ANOVA Analiz Metodu

ANOVA (Analysis of Variance), yani Varyans Analizi, birden fazla grup arasındaki ortalamaların karşılaştırılması ve bu gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığının belirlenmesi için kullanılan güçlü bir istatistiksel yöntemdir (Rouder ve diğ., 2023).

ANOVA'nın temel amacı, birden fazla grubun ortalamaları arasında fark olup olmadığını belirlerken, bu farkların rastlantısal mı yoksa sistematik bir etkiden mi kaynaklandığını ortaya koymaktır. ANOVA, özellikle iki veya daha fazla bağımsız grup üzerinde yapılan analizlerde tercih edilir ve değişkenlerin etkilerini incelemek için idealdir.

ANOVA, geniş bir uygulama yelpazesine sahip, güçlü ve etkili bir istatistiksel analiz yöntemidir. Doğru koşullarda kullanıldığında, karmaşık veri gruplarından anlamlı sonuçlar çıkarılmasını sağlayarak karar verme süreçlerini destekler.

2.1.7.1. ANOVA'nın Uygulama Süreci

Hipotezlerin Belirlenmesi:

H_0 (Null Hipotezi): Gruplar arasında anlamlı bir fark yoktur.

H_1 (Alternatif Hipotez): Gruplar arasında anlamlı bir fark vardır.

Veri Toplama ve Gruplama: Bağımsız ve bağımlı değişkenler belirlenir. Gruplar oluşturulur ve veri toplanır.

Varyans Hesaplama: Gruplar arası ve gruplar içi varyans değerleri hesaplanır.

F-Oranının Hesaplanması: Gruplar arası varyansın, gruplar içi varyansa oranı bulunur.

Anlamlılık Düzeyinin Belirlenmesi: Hesaplanan F-değeri, kritik F-tablosu ile karşılaştırılır veya p-değeri kullanılır.

Sonuçların Yorumlanması: Elde edilen sonuçlara göre, gruplar arasında anlamlı bir fark olup olmadığı belirlenir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Malzeme Seçimi ve İşleme Operasyonlarının Ayarlanması

Bu deneyde kullanılan iş parçası malzemesi Hardox 450 çeliğidir. Hardox 450, 425-475 HBW sertliğe, 1250 MPa akma dayanımına ve 1390-1360 MPa çekme dayanımına kadar su verilmiş ve temperlenmiş, aşınmaya dirençli bir çelik levhadır. Tablo 3.1. Hardox 450 çeliğinin kimyasal bileşimini göstermektedir.

Tablo 3. 1. Hardox 450'nin Kimyasal Bileşimleri (ssab.com)

Elements (Wt%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox 450 Steels	0,26	0,70	1,60	0,025	0,01	1,4	1,5	0,6	0,005



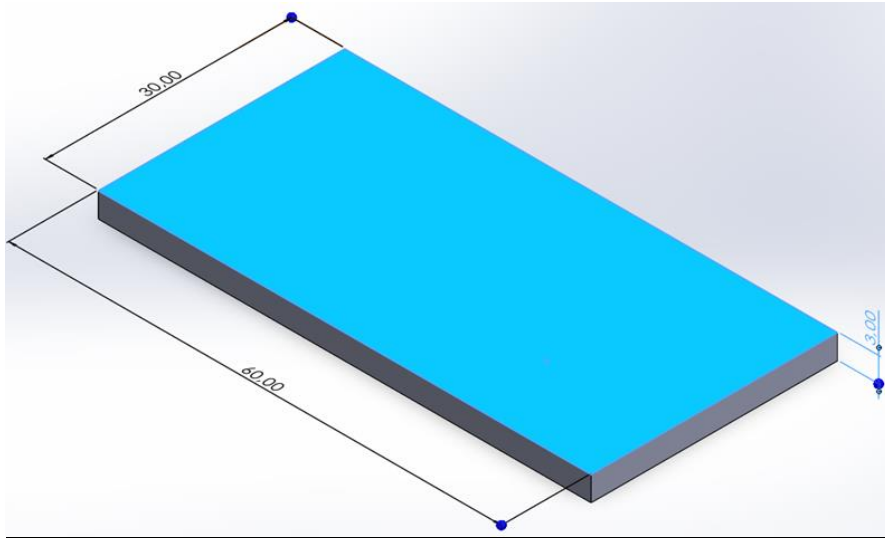
Şekil 3. 1. CNC İşleme Merkezi

Deneysel çalışmada kullanılan Leadwell V20 marka CNC freze tezgahının özellikleri, maksimum iş mili hızı 8000 rpm ve güçlü 11 kW tahrik motoruna sahip geleneksel 3 eksenli işleme merkezidir (Şekil 3.1.).



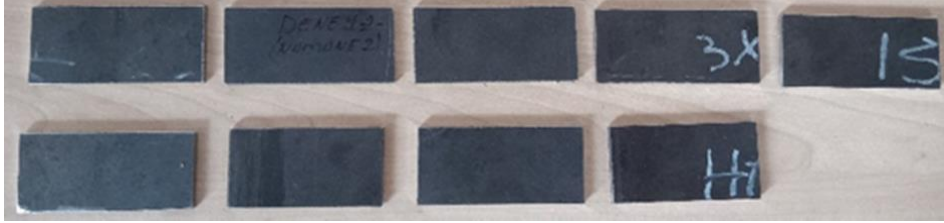
Şekil 3. 2. Takım Tutucu

Bu araştırma için seçilen kesici takım (CDBP) APKT1604PDSR marka kesici uçtur. Kesici takım şirketi kesme parametrelerini V_c (m/dak) 60–220, F_z (mm/t) 0,06-0,25 ve A_p (mm) 0,5–3,0 olarak önermektedir. Kesici takım adaptörü olarak 30 mm çapında üç adet kesici uç üzerine monte edilen takım tutucu kullanıldı (Şekil 3.2.). Çalışmada malzeme iş parçası olarak Hardox 450 çelik malzemeler 60x30x3 mm boyutunda kesildi (Şekil 3.4.).



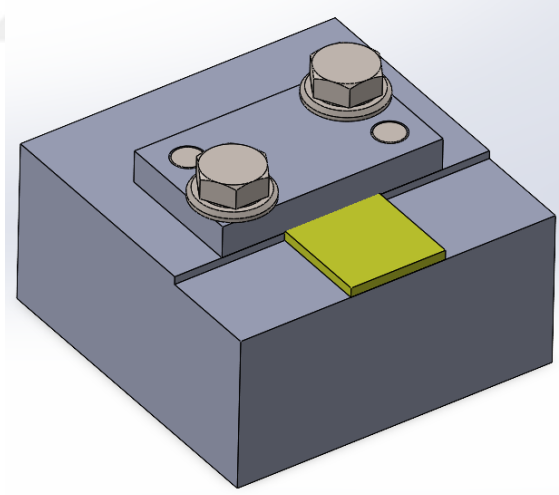
Şekil 3. 3. CAD Numune Parça Tasarımı

Denen için kullanılacak numuneler bilgisayar destekli tasarım (CAD) model resmi tasarlanarak gerekli imalat resmi oluşturuldu (Şekil 3.3.). Şerit testere tezgahında belirlenen imalat ölçüleri doğrultusunda 9 numune halinde kesildi (Şekil 3.4).



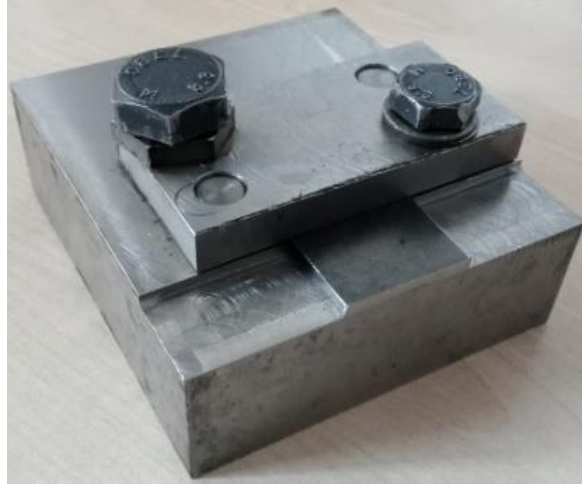
Şekil 3. 4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Hardox 450 Çelik Numuneleri

Bu numunelerin freze makinesine sabitlenmesi, frezeleme sürecini etkileyen titreşimler gibi dış faktörlerin etkisini azaltmayı amaçlayan zorlu bir adım teşkil etmiştir (Stavropoulos ve diğ., 2023). Bu amaçla Şekil 3.5.'te gösterilen imalata uygun bir iş kalıbı tasarlandı.



Şekil 3. 5. İş bağlama Kalıbı CAD Model Tasarımı

Bilgisayar Destekli Tasarım CAD programı kullanılarak numune parçanın CNC tezgahına bağlamak ve mümkün olan en güvenilir kesme parametrelerini kontrolünü sağlayabilmek amacıyla tasarımı yapılan iş bağlama kalıbı imalatı yapılarak montajlandı (Şekil 3. 6.).



Şekil 3. 6. İş Bağlama Kalıbı (Fixture)

İşlenecek numuneler bir çalışma iş kalıbı ile sabitlendi. İş bağlama aparatı freze tezgâhında tablaya takılarak bir mengene mekanizması oluşturuldu (Şekil 3.7.). Deneyler kontrollü laboratuvar ortamlarında gerçekleştirildi. Ortam sıcaklığı $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutuldu ve nem oranı $\%50\pm 5$ oldu. Kesici takımların aşınma durumunu izlemek için her 10 deneyden sonra mikroskopik incelemeler yapıldı ve aşınma belirli bir eşiği aştığında takımlar değiştirildi. Bu ek bilgi, deneylerin tekrarlanabilirliğini ve sonuçların güvenilirliğini arttırmayı amaçladı.

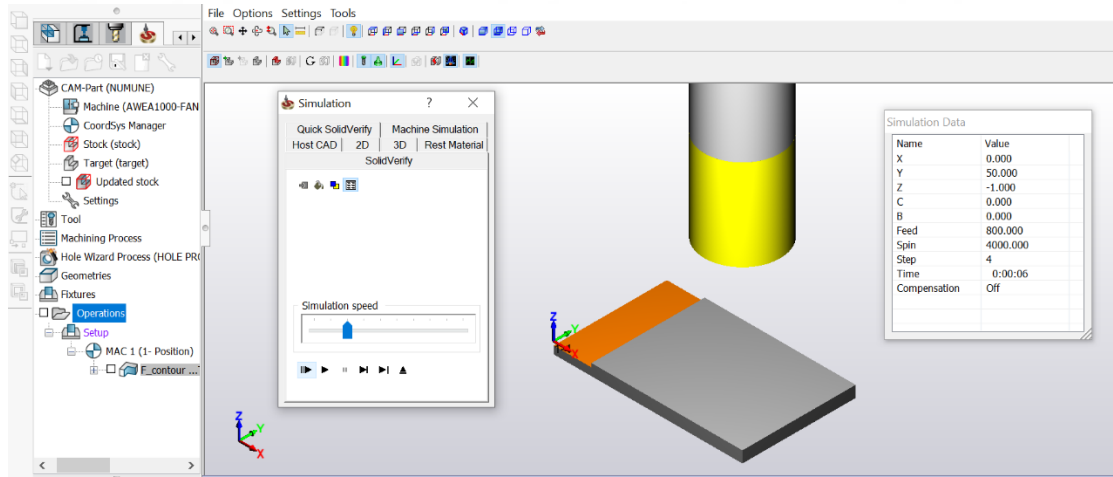


Şekil 3. 7. İş Parçası Bağlama Mekanizması

Şekil 3.7. ‘te CNC Tezgâhı mengene mekanizmasına güvenli bir şekilde bağlanan numune gerekli deney numunelerinin imalatı için işleme CAM programında gerekli imalat prosesleri oluşturularak takım yolu oluşturuldu (Şekil 3.8.).

Cam programında gerekli takım yolu oluşturulan parçanın simülasyonu oluşturularak simülasyon analizi gerçekleştirildi.

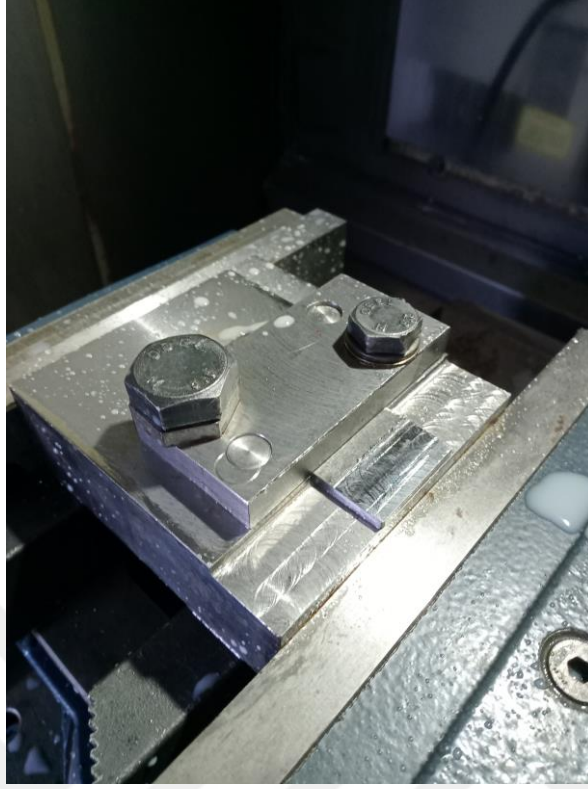
İmalat için gerekli G kodları oluşturulmuştur. Oluşturulan G kodları her numunede kullanılacak kontrol parametreleri için değiştirilerek deneyler gerçekleştirildi.



Şekil 3. 8. Numune Paça için CAM Takım Yolu Simülasyonu

Deneyde kullanılacak numuneleri Fanuc kontrol üniteli CNC tezgahında frezeleme operasyonu için gerekli G kodları oluşturuldu. Bu frezeleme operasyonunda her deney için kontrol parametreleri CNC programında değiştirilerek deneyler gerçekleştirildi (Ek-A– I).

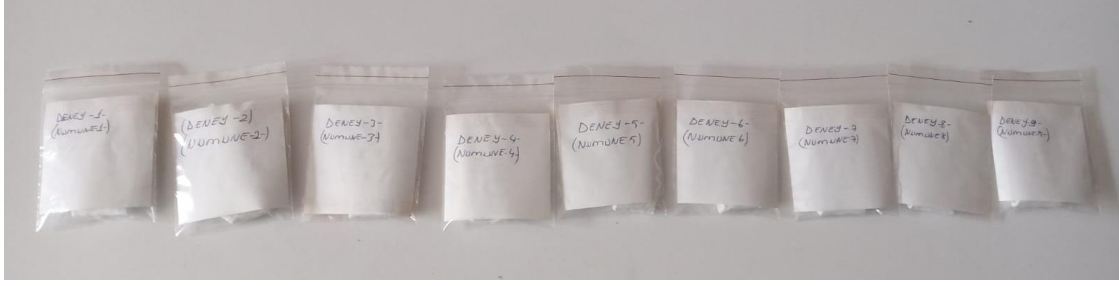
Deney sonrası numuneler frezeleme operasyonundan sonra tezgâh üzerinden iş bağlama kalıbı üzerinden işlenen yüzeyler zarar görmeden söküldü (Şekil 3. 9.). Deneyler sonunda frezeleme operasyonu sonucu elde edilen 9 adet numune (Şekil 3. 10.) parça uygun paketleme işlemi gerçekleştirilerek yüzey pürüzlülüğü ölçümü için Kocaeli Üniversitesi Havacılık Bilimi ve Teknolojileri ölçme laboratuvarına gönderildi (Şekil 3.11.).



Şekil 3. 9. Tezgâh üzerinde işlenmiş numune



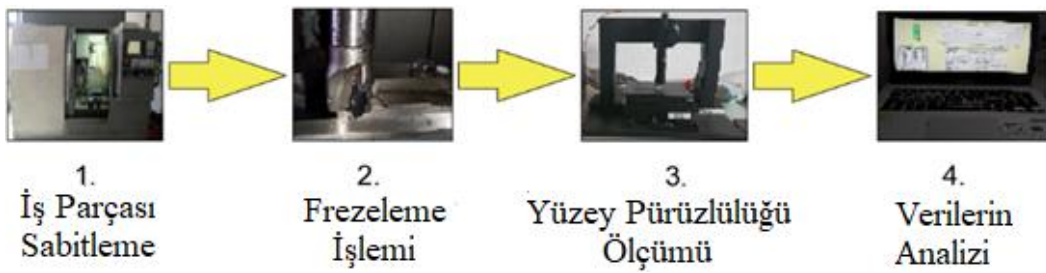
Şekil 3. 10. Deney sonucu elde edilen 9 adet işlenmiş numune



Şekil 3. 11. Paketlenmiş Numuneler

3.2. Yanıt Parametrelerinin Ölçülmesi

Deney tasarım sürecini uygulamaya yönelik kurulum Şekil 3.12.'de gösterilmektedir. İlk adım, Hardox 450 çelik iş parçasını CNC makinesine bağlayıp sabitlemektir. İkinci aşamada, Taguchi yöntemi izlenerek seçilen parametrelerin değişen seviyeleri kullanılarak dokuz deney gerçekleştirildi. Prosesin üçüncü aşaması frezeleme ile işlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesidir. Bu amaçla NANOVEA marka profilometre cihazı kullanıldı. Doğru ve hassas ölçümlerin elde edilmesini sağlamak amacıyla, işlenmiş her bileşen yüzeyinin farklı konumlarında üç ayrı ölçüm gerçekleştirildi. Son işleme aşamasında, işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğüne ilişkin verileri incelemek ve bunların optimum değerlerine ulaşmaya yönelik katkı düzeylerini belirlemek için sinyal-gürültü oranı ve varyans analizi (ANOVA) kullanıldı.



Şekil 3. 12. Deney Süreci Aşamaları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Deney Süreci Aşamaları

4.1.1. Parametrelerin Seçimi

Frezeleme operasyonlarında yüzey kalitesini etkileyen çeşitli değişkenler vardır. Seçilen malzemeye (Hardox 450 çeliği) bağlı olarak frezeleme işleminde doğru işlem parametrelerinin bilinmesi gerekir. Seçilen işlem değişkenleri, kullanılan kesici takım katalog bilgileri ve literatür taraması dikkate alınarak seçildi. Seçilen bu parametreler Tablo 4.1.'de gösterildiği gibidir: A = kesme hızı (m/dak), B = diş başına ilerleme hızı (mm/dak), C = kesme derinliği (mm) ve D = radyal daldırma (%) mm. Çalışmada ıslak frezeleme işlemi kullanılmış olup, kesme sıvısı kullanımının yüzey pürüzlülüğüne etkisi ihmal edildi.

Tablo 4. 1. Deney Parametreleri

Parametreler	(A) Kesme Hızı (m/min)	(B) Diş başına ilerleme hızı (mm/min)	(C) Kesme Derinliği (mm)	(D) Radyal Dalma (%) mm
Seviye 1	60	0,060	0,2	10
Seviye 2	90	0,155	0,4	20
Seviye 3	120	0,250	0,6	30

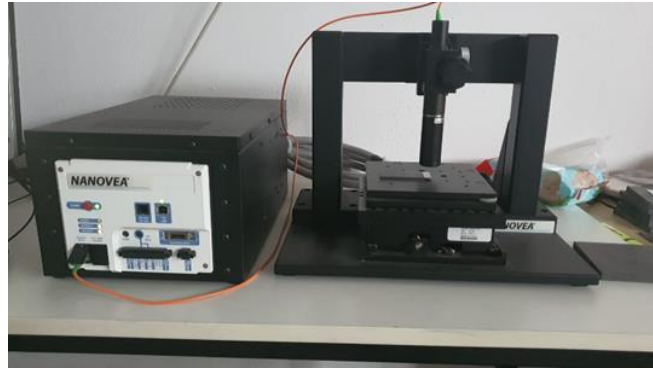
4.1.2. Ortogonal Dizi Seçimi

Seçilen parametrelerin sayısına ve seviyelerine bağlı olarak Taguchi'nin ortogonal dizisi Tablo 4.2.'te verildiği gibi L₉ olarak seçilmiştir. Her parametre için 4 seviyenin yanı sıra toplamda 9 indeksin seçildiği yöntemin ortogonal dizisi, Hardox 450 çeliğinin yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek için toplam dokuz adet test geliştirildi. Her deneyde, seçilen tüm değişkenlerin düzeyi, yüzey pürüzlülük değerini ölçecek şekilde ayarlandı. Tablo 4.1.'de verilen deneysel parametreler, Tablo 4.2.'de verilen Taguchi L₉ ortogonal dizisine uygulandı. Cihazın çıkış parametreleri olarak kabul edilen Ra (pürüzlülük), Rz

(ortalama pürüzlülük) ve Sku (basıklık) yüzey pürüzlülük değerleri bulgular NANOVEA marka profilometre cihazında Şekil 4.1.'de ölçüldü ve Tablo 4.3.'te sunuldu.

Tablo 4. 2. Taguchi Yönteminin Ortogonal Dizisi

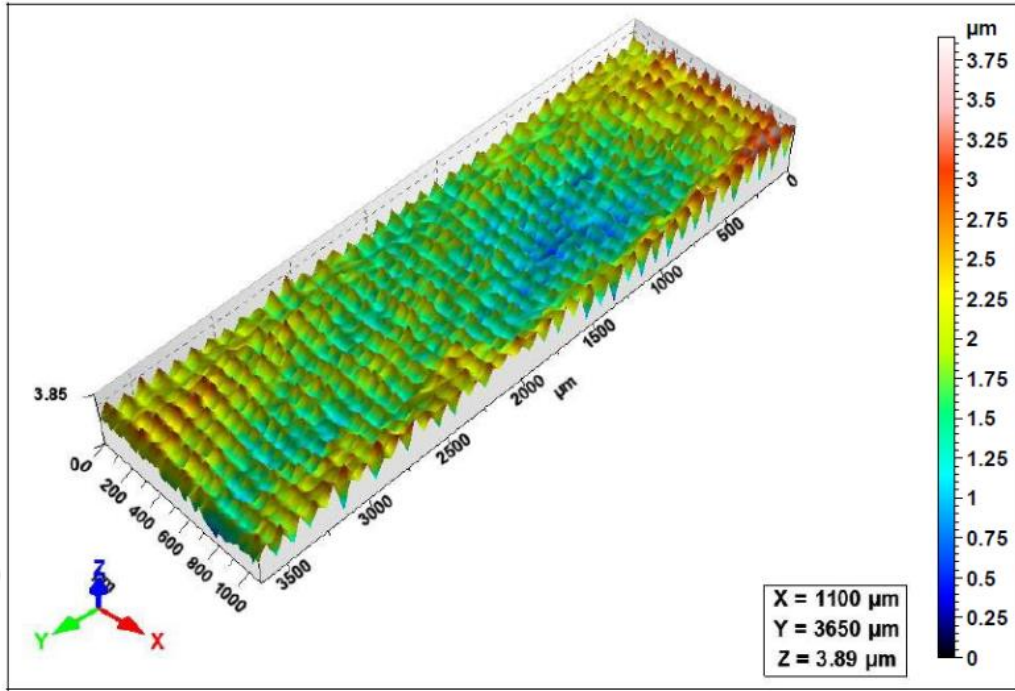
Deney No	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1



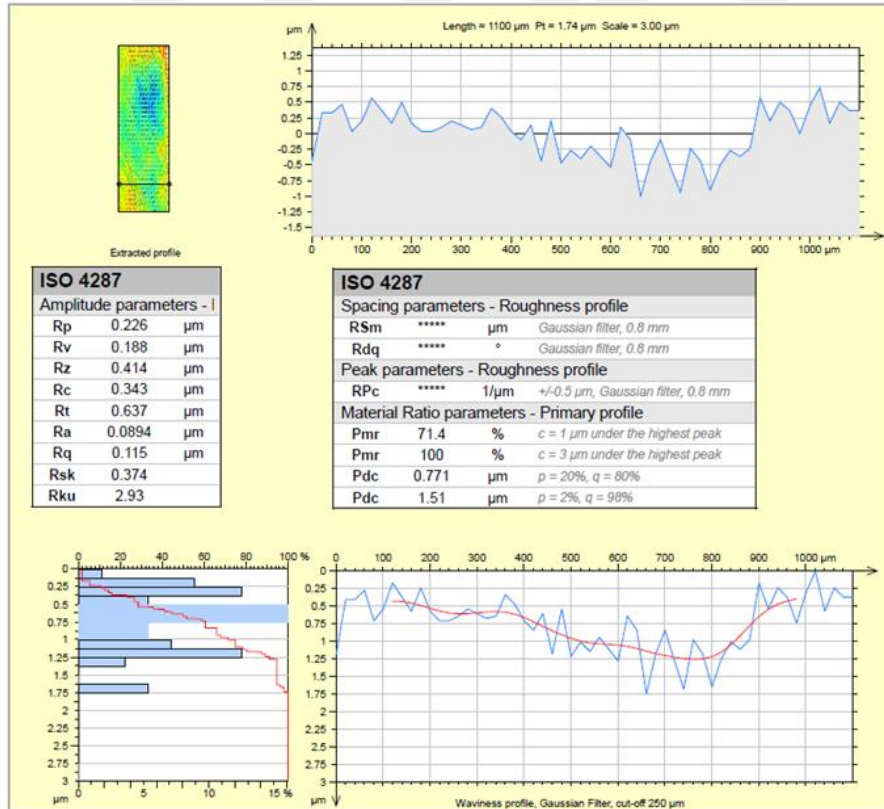
Şekil 4. 1. Ölçüm İçin Kullanılan NANOVEA Marka Profilometre

Elde edilen veriler bilgisayar yazılımı kullanılarak işlendi ve Şekil 4.2.'da gösterildiği gibi üç boyutlu görüntülerle desteklendi.

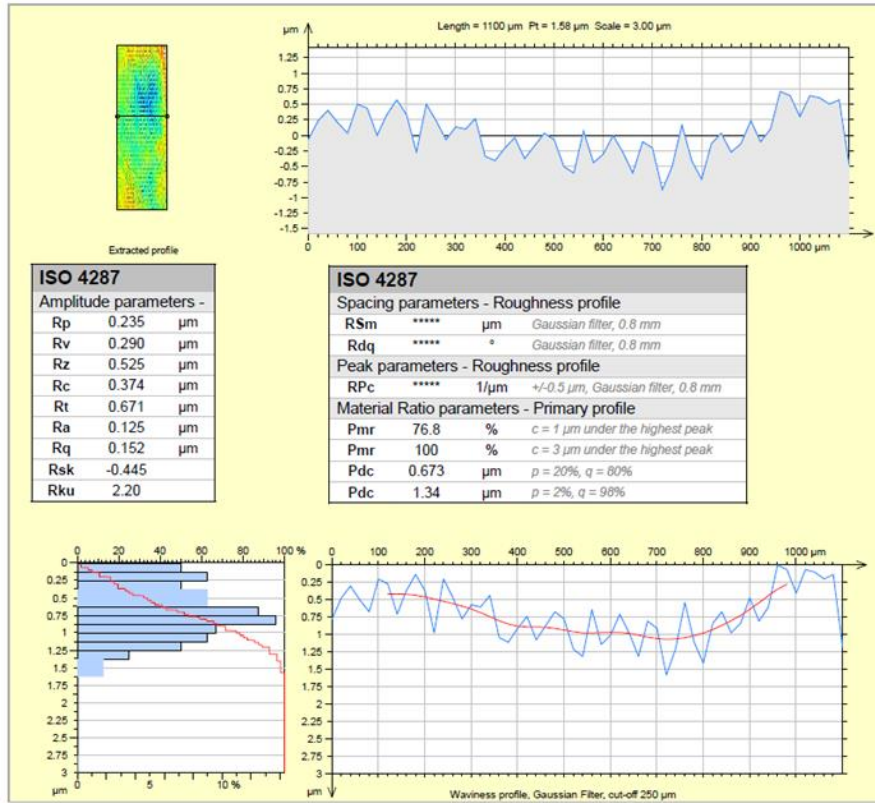
Birinci numuneye ait profilometre ölçüm raporları Şekil 4.3., Şekil 4.4., Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.8. olarak aşağıda verilmiştir. Çalışma sonucunda işlenen parçaların yüzeylerinde yapılan 6 farklı ölçümün ortalaması alınarak elde edilen sonuçlar Tablo 4'te Ra, Rz ve Sku olarak sunulmaktadır.



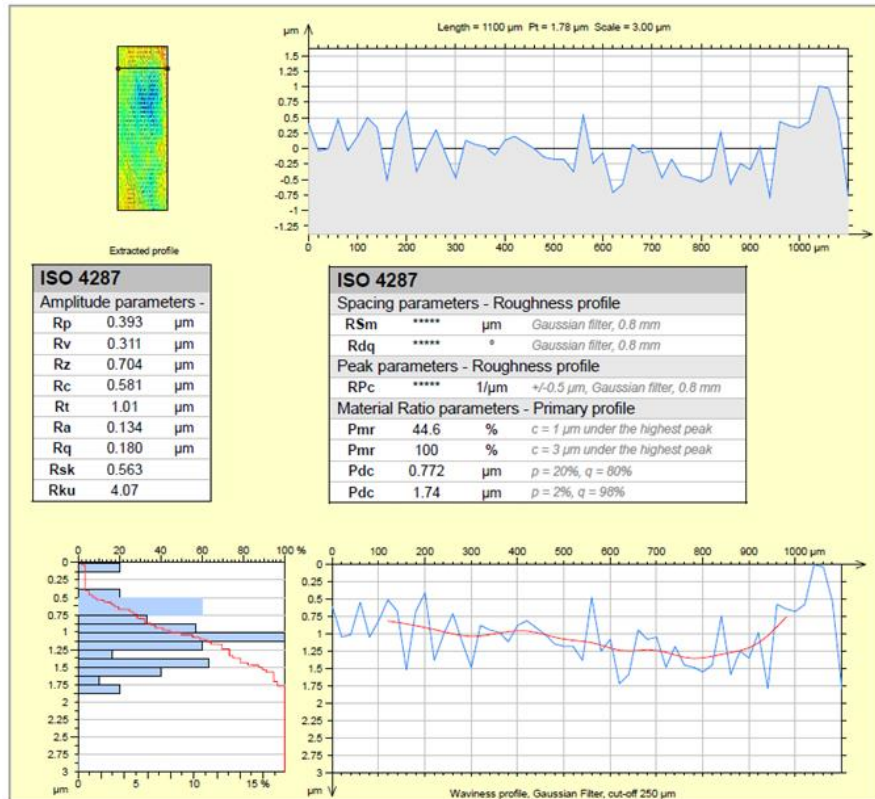
Şekil 4. 2. Birinci numuneye ait 3D profilometre ile alınan yüzey görüntüsü



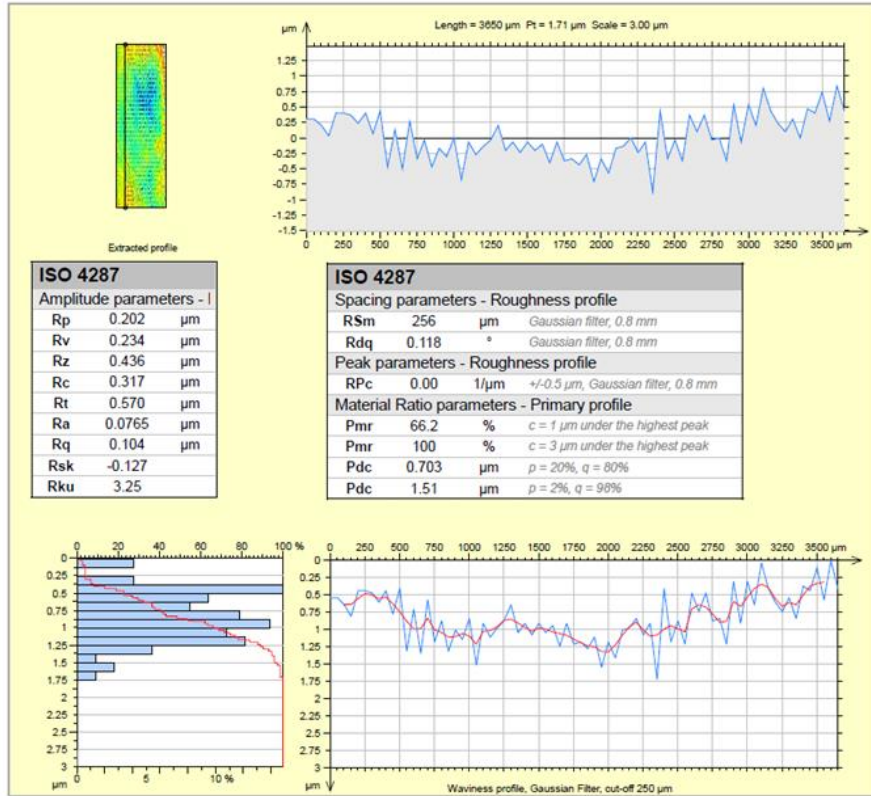
Şekil 4. 3. Birinci numuneye ait profilometre 1. ölçüm raporu



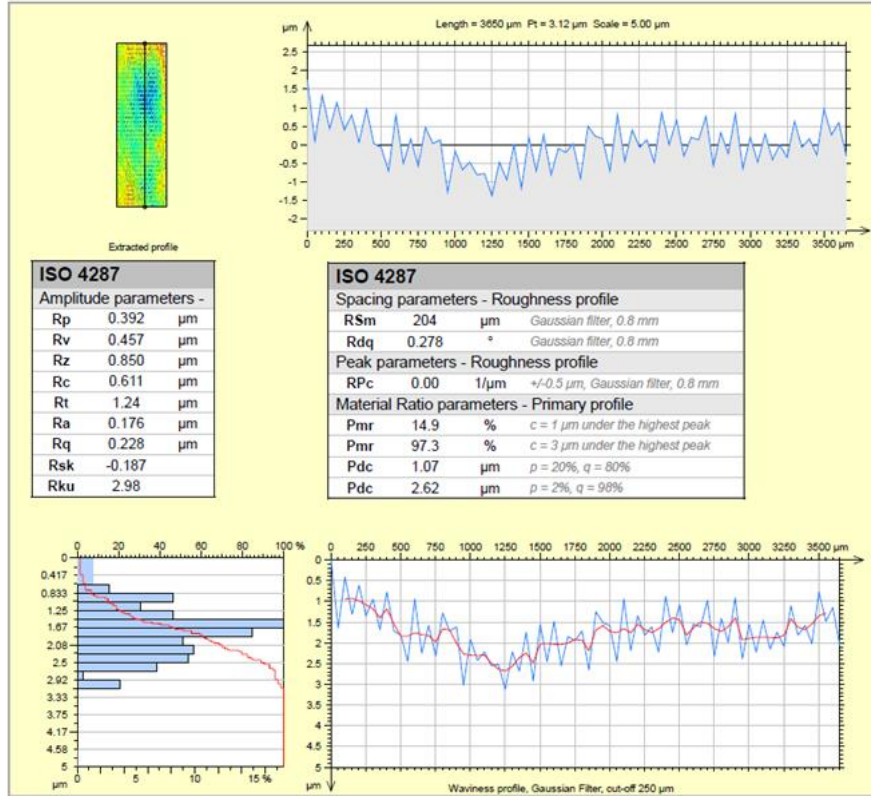
Şekil 4. 4. Birinci numuneye ait profilometre 2. ölçüm raporu



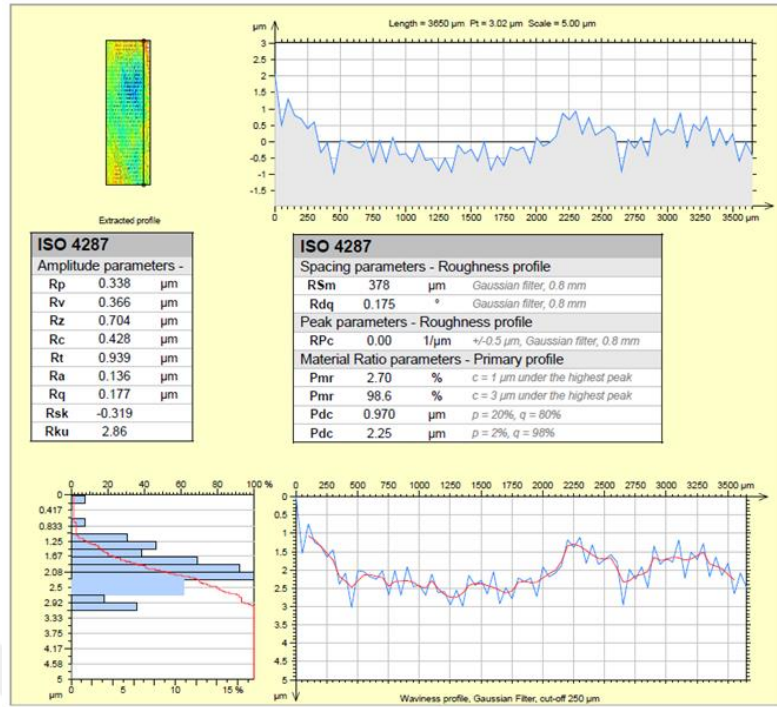
Şekil 4. 5. Birinci Numuneye ait Profilometre 3. Ölçüm Raporu



Şekil 4. 6. Birinci Numuneye ait Profilometre 4. Ölçüm Raporu



Şekil 4. 7. Birinci Numuneye ait Profilometre 5. Ölçüm Raporu



Şekil 4. 8. Birinci Numuneye ait Profilometre 6. Ölçüm Raporu

Tablo 4. 3. Deney Sonucunda Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Deney no.	Kesme Hızı (meter/min.) (Vc)	Dış başına ilerleme hızı (mm/min.) (fz)	Kesme Derinliği (mm)	Radyal dalma(%) (mm)	(Ra) ort.	(Rz) ort.	(Sku) ort.
1	60	0.060	0.2	10	0,130	0,663	3,030
2	60	0.155	0.4	20	0,162	0,768	3,237
3	60	0.250	0.6	30	0,422	1,763	2,693
4	90	0.060	0.4	30	0,221	0,974	2,390
5	90	0.155	0.6	10	0,645	3,259	2,927
6	90	0.250	0.2	20	0,220	1,036	2,557
7	120	0.060	0.6	20	0,181	0,961	3,610
8	120	0.155	0.2	30	0,217	1,026	2,860
9	120	0.250	0.4	10	0,731	3,507	3,003

4.1.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve radyal dalma frezeleme işlemi parametrelerinin önemini değerlendirmek ve bunların tepkiler üzerindeki etkileşim etkilerini araştırmak için MINITAB yazılımı kullanılarak ANOVA analizi yapıldı.

Sinyal-gürültü oranı (S/N), ANOVA analizinde çeşitli kalite kriterlerine göre gürültünün azaltılmasını ifade eden bir kavramdır. S/N hesaplaması için üç farklı kalite kriteri vardır: daha büyük olan daha iyidir, nominal daha iyidir ve daha küçük olan daha iyidir.

Bu çalışmanın amacı yüzey pürüzlülük değerini en aza indirmek olduğundan "küçük olan iyidir" kalite kriteri kullanılmış ve buna karşılık gelen matematiksel ifadeler Denklem 4.1 ve 4.2'de verilmiştir (Moayyedian ve diğ., 2020).

$$S/N = -10 \log (MSD) \quad (4.1)$$

"Daha küçük olan daha iyidir" kalite kriterinin ortalama kareler bölümü (MSD), aşağıdaki denklemle ifade edilebilir,

$$MSD = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.2)$$

Denklemdaki N değişkeni, her deneme için toplam veri noktası sayısını temsil eder. (y^i) değişkeni ayrı testlerden toplanan yüzey pürüzlülük değerlerini temsil eder. Bu çalışmadaki her deney üç kez tekrarlandı ve her veri noktası için üç ölçüm elde edildi. Bu strateji, bireysel incelemelerin doğruluğunu ve güvenilirliğini garanti etmek için uygulandı.

Yüzey pürüzlülük değerini etkileyen ana faktörlerin belirlenmesi ve ideal seviyelerin bulunmasının ardından bir sonraki adım, ANOVA kullanılarak katkı yüzdelerinin belirlenmesidir. Denklem 4.3-4.5, her giriş parametresinin yüzde katkısını hesaplamak için kullanılır. Sonuç olarak kareler toplamı, net kareler toplamı ve hatalara ilişkin ifadeler şu şekilde hesaplanabilir:

$$SS_{P_i} = \sum_{i=1}^{K_A} x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N} \quad (4.3)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_1}} \right) - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N} \quad (4.4)$$

$$SS_E = SS_T - \sum_{i=1}^{K_A} SS_{P_i} \quad (4.5)$$

Burada $[[SS]]_{(P_i)}$ karelerin toplamı, $[[SS]]_T$ toplam karelerin toplamı ve $[[SS]]_E$ hata değeri olarak ifade edilmektedir. A_i her seviyedeki ortalama yüzey pürüzlülüğü, $n_{(A_i)}$ parametre seviyesi sayısı, x_i her denemedeki yüzey pürüzlülüğü değeri ve N seçilen ortogonal diziye dayalı deney sayısıdır. $[[P]]_{(P_i)}$ her parametrenin yüzde katkısıdır. Denklem 4.6 kullanılarak her parametrenin katkı yüzdesi hesaplanabilir. Ayrıca kareler toplamının hata değeri Denklem 4.7 kullanılarak hesaplanır.

$$P_{P_i} = \frac{SS_{P_i}}{SS_T} \quad (4.6)$$

$$SS_e = S_T - S_{P_1} - S_{P_2} - S_{P_3} \quad (4.7)$$

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Varyans ANOVA Tablosu Değerlendirmesi

Taguchi ve ANOVA analizlerinin ötesinde, kesme faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin anlaşılmasını geliştirmek için bu çalışmaya diğer istatistiksel yöntemler de dahil edilmiştir. Parametre etkileşimlerini ve muhtemelen önemli faktörleri tespit etmek için regresyon analizi ve makine öğrenme modelleri kullanılmıştır. Bu analizler optimizasyon sürecini daha kapsamlı ele alarak daha doğru sonuçlara ulaşmaya çalışır.

ANOVA ve sinyal-gürültü oranı, deneysel bulgulardan elde edilen verileri değerlendirmek için kullanıldı. Elde edilen verilere dayanarak R_a , R_z ve S_{ku} çıkış parametrelerinin sinyal-gürültü oranı için bir yanıt tablosu oluşturuldu (Tablo 5.1.).

Tablo 5.1.'de sunulan yanıt tablosunu oluşturmak için sinyal-gürültü oranı hesaplamasında en küçük en iyisidir yaklaşımı kullanılmıştır. Sıra değeri, her faktör düzeyinin deneysel sonuçlar üzerindeki etkisini belirlemek için kullanıldı. Düşük bir değer, yüksek düzeyde parametre etkinliği anlamına gelir. Basıklık açısından yapılan çalışma incelendiğinde kesme hızının en etkili parametre olduğu ortaya çıkıyor. Radyal daldırma parametresi, ilerleme hızı ve kesme derinliğinden sonra ikinci en etkili faktördür. Bu araştırmaya daha yakından bakıldığında, ilerleme hızının verimlilik üzerinde en büyük etkiye sahip olduğu, radyal daldırmanın ikinci sırada geldiği açıkça görülmektedir. Daha önce basıklık üzerinde en yüksek etkiye sahip olan kesme hızı artık en düşük etkiye sahiptir.

R_z değeri, işlenmiş yüzey üzerinde en yüksek tepe noktası ile en derin çukur noktası arasındaki ortalama mesafeyi ölçer. Sonuç olarak R_z değerindeki artış yüzey pürüzlülüğündeki artışa karşılık gelmektedir. Taguchi analizini R_z değerine göre değerlendirirken, özellikle R_a ile ilişkili olarak ilerleme hızı parametresinin en etkili olduğu açıktır. Olayların sırası şu şekilde ilerler: radyal dalış, kesme derinliği ve kesme hızı.

Tablo 5. 1. Sinyal-Gürültü Oranları için Yanıt Tablosu

Response parameter	Level	Cutting Speed (meter/min.)	Feed rate per tooth (mm/min.)	Depth of cut (mm)	Radial immersion (% mm)
Sku	1	-9,479	-9,449	-8,970	-9,503
	2	-8,350	-9,552	-9,107	-9,835
	3	-9,943	-8,770	-9,694	-8,434
	Delta	1,594	0,782	0,725	1,402
	Rank	1	3	4	2
Ra	1	13,682	15,228	14,730	8,095
	2	10,021	10,963	10,536	14,591
	3	10,277	7,790	8,715	11,295
	Delta	3,661	7,438	6,015	6,496
	Rank	4	1	3	2
Rz	1	0,3105	1,3819	1,0117	-5,8644
	2	-3,4454	-2,7303	-2,7911	0,7780
	3	-3,5908	-5,3773	-4,9463	-1,6393
	Delta	3,9012	6,7592	5,9581	6,6425
	Rank	4	1	3	2

Tablo 5.2.'da ANOVA analizinin sonuçları sunulmaktadır. Sıralı SS terminali, modeldeki diğer özellikler ve hata terminalleri dikkate alınarak, her bir ögenin genel değişkenlik üzerindeki uzunluk ölçüsü dikkate alınır. Bu yapının büyüklüğünün ilgili elemanının genel etki üzerindeki değişimi temsil etmektedir. Genel olarak daha büyük unsurun daha önemli bir etkiye sahip olduğu kabul edilir. Katkı sütunu bu etkinin yüzdesini sağlar. ANOVA çalışmalarına dayanarak kesme hızı basıklık için en etkili özellik olarak sınıflandırılır. Radyal dalma ikinci en etkili faktördür. İlerleme hızı ve kesme derinliği takip eden konulardır. Ra'yı optimize etmek için temel faktörleri radyal dalma, ilerleme

hızı, kesme derinliği ve kesme hızıdır. Rz için en etkili faktörlerin önem sırasına göre sıralanan radyal dalma, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme hızıdır.

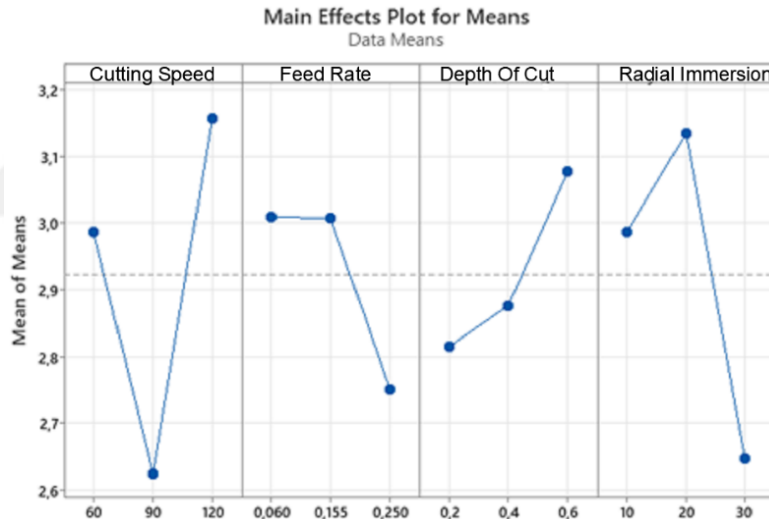
Tablo 5. 2. Varyans Analizi Tablosu

	Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Sku	Cutting Speed	2	0,4449	41,85%	0,4449	0,22246
	Feed rate	2	0,1329	12,50%	0,1329	0,06645
	Depth of cut	2	0,1119	10,53%	0,1119	0,05596
	Radial immersion	2	0,3735	35,13%	0,3735	0,18676
	Total	8	1,0633	100,00%		
Ra	Cutting Speed	2	0,03484	8,81%	0,03484	0,01742
	Feed rate	2	0,11896	30,08%	0,11896	0,05948
	Depth of cut	2	0,08703	22,01%	0,08703	0,04351
	Radial immersion	2	0,15464	39,10%	0,15464	0,07732
	Total	8	0,39547	100,00%		
Rz	Cutting Speed	2	1,071	11,38%	1,071	0,5353
	Feed rate	2	2,372	25,21%	2,372	1,1861
	Depth of cut	2	1,946	20,68%	1,946	0,9731
	Radial immersion	2	4,021	42,73%	4,021	2,0104
	Total	8	9,410	100,00%		

Taguchi Analizi için Ana Etkiler Grafiği Şekil 5. 1. 'de gösterilmektedir. Genel olarak bu grafik, deneysel koşulların yanıtları ilgili seviyelerine göre nasıl etkilendiğinin görsel bir temsilini sağlar. Bu grafik, deneyde kullanılan girdi faktörlerinin çeşitli düzeylerinde yapılan testlerin sonuçlarından elde edilen, her öge için çeşitli düzeylerde elde edilen

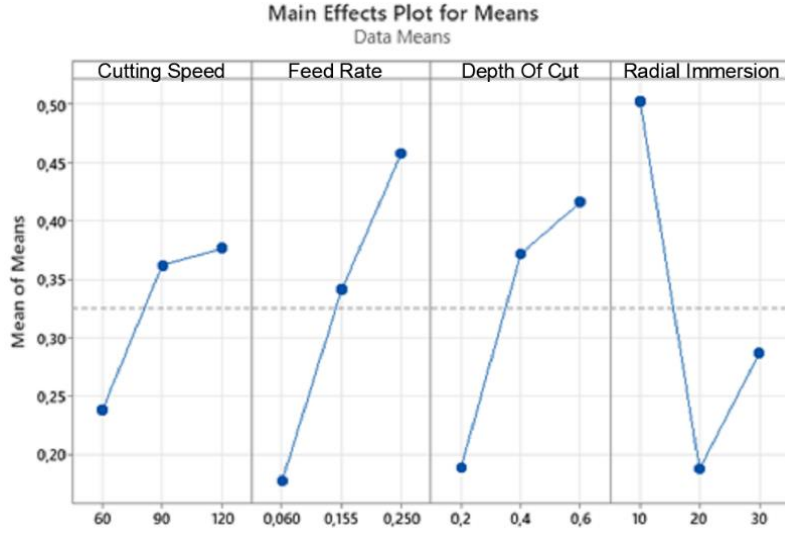
ortalama yanıt değerlerini gösterir. Grafiklerin yatay hizalanması, bileşenin etkisinin farklı düzeylerde sabit olduğunu göstermektedir. Dikey çizgiler faktörün önemli bir etkisini ifade eder. Kesme hızı, hem Taguchi analizinde hem de ANOVA analizinde basıklık için en uygun parametre olarak tanımlandı. Burada, grafiklerin dikey eksenindeki önemli farklılıklar, yüksek düzeyde bir etkiyi akla getiriyor. Grafikten toplanabilecek bir diğer bilgi de amaçlanan etkinin elde edileceği eşiktir. Çalışmada yapılan optimizasyonun amacı minimum basıklık değerini belirlemektir. Dolayısıyla kesme hızı için en uygun parametre dakikada 90 metredir. İlerleme hızı ve kesme derinliği ek yatay grafikler içerir. Bu, etkinin minimum düzeyde olduğu anlamına gelir. Minimum değer için seçenekler 0,25 mm/dakika ve 0,2 mm'dir. Radyal dalma için seçilen değer 30 mm olmalıdır. Bu parametrelerin seçilmesiyle istatistiksel olarak en az basıklık değeri elde edilebilir.

5.2. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlendirmesi



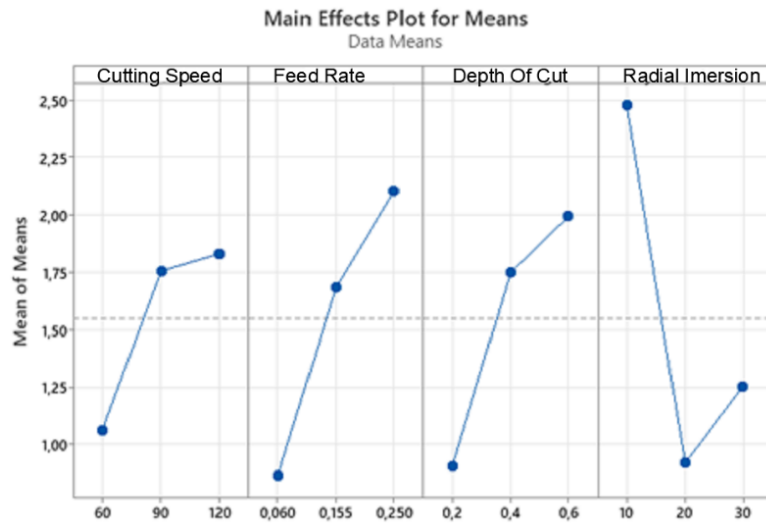
Şekil 5. 1. Basıklık Analizi için Ana Etki Grafiği

Şekil 5.1.'te en yüksek dalgalanma derecesine sahip radyal dalma değerinin pürüzlülüğün değerlendirilmesinde en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Kesme hızı parametresi en az verimli olanıdır. Pürüzlülük için en uygun değerler minimum değerlerdir. Önceki açıklamalara göre, en az pürüzlülük, 60 m/dak'lık bir kesme hızı, 0,06 mm/dak'lık bir ilerleme hızı, 0,2 mm'lik bir kesme derinliği ve 20 mm'lik bir radyal dalma seçilerek elde edilebilir.



Şekil 5. 2. Pürüzlülük (Ra) Analizi için Ana Etki Grafiği

Şekil 5. 2.'da en büyük varyasyona sahip radyal daldırma değerinin, ortalama pürüzlülük derinliğini analiz etmede en etkili parametre olduğunu göstermektedir. Etkinliği en düşük olan parametre ise kesme hızıdır. Ortalama pürüzlülük derinliği için en uygun değerler minimum değerlerdir (Şekil 5.3.). Bu nedenle, en düşük ortalama pürüzlülük derinliğini (Rz) elde etmek için 60 m/dak kesme hızı, 0,06 mm/dak ilerleme hızı, 0,2 mm kesme derinliği ve %20 radyal daldırma seçilmesi önerilir.



Şekil 5. 3. Ortalama Pürüzlülük Derinliği (Rz) Analizi için Ana Etki Grafiği

Aşağıdaki denklemler regresyon analizinden türetilmiştir.

$$\begin{aligned}
\text{Sku}(\text{mean}) &= 2,923 \\
&+ 0,06370 \text{ C}_{\text{S}_60} \\
&- 0,2985 \text{ C}_{\text{S}_90} \\
&+ 0,2348 \text{ C}_{\text{S}_120} \\
&+ 0,08704 \text{ F}_{\text{R}_0,060} \\
&+ 0,08481 \text{ F}_{\text{R}_0,155} \\
&- 0,1719 \text{ F}_{\text{R}_0,250} \\
&- 0,1074 \text{ D}_{\text{C}_0,2} \\
&- 0,04630 \text{ D}_{\text{C}_0,4} \\
&+ 0,1537 \text{ D}_{\text{C}_0,6} \\
&+ 0,06370 \text{ R}_{\text{I}_10} \\
&+ 0,2115 \text{ R}_{\text{I}_20} \\
&- 0,2752 \text{ R}_{\text{I}_30}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Ra}(\text{mean}) &= 0,3254 - 0,08759 \text{ C}_{\text{S}_60} \\
&+ 0,03657 \text{ C}_{\text{S}_90} \\
&+ 0,05102 \text{ C}_{\text{S}_120} \\
&- 0,1480 \text{ F}_{\text{R}_0,060} \\
&+ 0,01580 \text{ F}_{\text{R}_0,155} \\
&+ 0,1322 \text{ F}_{\text{R}_0,250} \\
&- 0,1367 \text{ D}_{\text{C}_0,2} \\
&+ 0,04624 \text{ D}_{\text{C}_0,4} \\
&+ 0,09046 \text{ D}_{\text{C}_0,6} \\
&+ 0,1764 \text{ R}_{\text{I}_10} \\
&- 0,1375 \text{ R}_{\text{I}_20} \\
&- 0,03887 \text{ R}_{\text{I}_30}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Rz}(\text{mean}) &= 1,551 - 0,4858 \text{ C}_{\text{S}_60} \\
&+ 0,2054 \text{ C}_{\text{S}_90} \\
&+ 0,2804 \text{ C}_{\text{S}_120} \\
&- 0,6848 \text{ F}_{\text{R}_0,060}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 0,1335 F_R _0,155 \\
& + 0,5513 F_R _0,250 \\
& - 0,6423 D_C _0,2 \\
& + 0,1987 D_C _0,4 \\
& + 0,4435 D_C _0,6 \\
& + 0,9255 R_I _10 \\
& - 0,6291 R_I _20 \\
& - 0,2964 R_I _30
\end{aligned}$$

Burada C_S kesme hızı, F_R ilerleme hızı, D_C kesme derinliği ve R_I radyal daldırma olarak ifade edilir.

5.3. Sonuçlar Üzerine Öneriler ve Tartışmalar

Bu çalışma, malzeme işleme prosedürlerini ve ürünlerin kalitesini iyileştirmeyi amaçladığı için sektörde çok önemlidir. Araştırma bulguları, uygun kesme ayarlarının seçilmesine yardımcı olabilir ve Hardox 450 çelik malzemenin frezelenmesi sırasında yüzey pürüzlülüğünü artırabilir.

Araştırma bulguları kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve radyal dalma gibi özelliklerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Spesifik olarak, malzemenin kesilme hızının ve aletin malzemeye nüfuz ettiği derinliğin yüzeyin pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediği keşfedilmiştir.

Çalışma ve bulgulara dayanarak (R_a) pürüzlülük değerlerinin analizi, 60 m/dak kesme hızı, 0,06 mm/dak ilerleme, 0,2 kesme derinliği seçilerek en düşük pürüzlülük değerine ulaşılabileceğini belirledi. mm ve radyal dalma 20 mm'dir.

Ortalama pürüzlülük derinliği (R_z) analizine dayanarak, minimum ortalama pürüzlülük derinliğine (R_z) ulaşmak için en uygun parametreler, 60 m/dak'lık bir kesme hızı, 0,06 mm/dak'lık bir ilerleme hızı, 0,2'lik bir kesme derinliğidir. mm ve radyal dalma 20 mm'dir.

Analiz sonuçlarına göre basıklık değerleri için en uygun kesme parametresi 90 m/dk'dır. İlerleme hızı ve kesme derinliği için en uygun parametreler 0,25 mm/dak ve 0,2 mm'dir.

Minimum basıklık dikkate alınarak radyal dalma için seçilen optimum değer 30 mm'dir. İstatistiksel olarak belirlenen parametreler kullanıldığında en düşük basıklık değerine ulaşılabilir.

ANOVA çalışmasına göre kesme hızının basıklık için en etkili faktör olduğu belirlendi. Radyal daldırma ikinci en etkili faktördür. Bu faktörler daha sonra beslemenin iletilme hızını ve malzemenin kıyılacağı derinliği belirler. Ra için ideal parametreler, belirli bir sıraya göre radyal dalma, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme hızından oluşur. Rz için ideal parametreler sırasıyla radyal dalma, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme hızı olarak belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

- Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P. (2023). Selection of Cutting Tool for Desired Surface Finish in Milling Machine Using Taguchi Optimization Methodology. *Materials Today: Proceedings*, 78, 444-448. doi:/ 10.1016/J.Matpr.2022.10.253
- Anggoro, P., Purharyono, Y., Anthony, A., Tauviqirrahman, M., Bayuseno, A., J. (2022). Optimisation Of Cutting Parameters of New Material Orthotic Insole Using a Taguchi and Response Surface Methodology Approach. *Alexandria Engineering Journal*, 61(5) 3613-3632. doi:/ 10.1016/J.Aej.2021.08.083
- Aslan, A. (2024). Machine Learning Models and Machinability Analysis for Comparison of Various Cooling and Lubricating Mediums During Milling of Hardox 400 Steel. *Tribology International*, 198, October 2024. doi:/10.1016/J.Triboint.2024.109860.
- Bagci, E., Aykut, S. (2005) A Study of Taguchi Optimization Method for Identifying Optimum Surface Roughness in CNC Face Milling of Cobalt-Based Alloy (Stellite 6). *Int J Adv Manuf Technol*, 29, 940–947.
- Bhirud, N.L., Dube, A.S., Patil, A.S. (2024). Modelling and Multi-Objective Optimization of Cutting Parameters Using Response Surface Method for Milling of Medium Carbon Steel (EN8). *Int J Interact Des Manuf*, 18, 7059–7084. doi:/10.1007/S12008-023-01267-Y.
- Deng, C., Tang, J., Chen, X., And Zhai, H. (2023). Analysis and Optimization of Milling Deformations of TC4 Alloy Thin-Walled Parts Based on Finite Element Simulations. *Machines*, 11(6), 628. doi:/10.3390/Machines11060628.
- Gadelmawla, ES., Koura, MM., Maksoud, TMA., Elewa., IM, Soliman., HH. (2002). Roughness Parameters. *Journal Of Materials Processing Technology*, 123, 133-145. doi:/10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
- Grum J., Slavko B., Martin Z. (2001). Influence of Quenching Process Parameters on Residual Stresses in Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 114, 57-70.
- Hou, Y., Zhang, D., Luo, M., Wu, B.A. (2015). Cutting Parameters Selection Method in Milling Aero-Engine Parts Based on Process Condition Matching. *Advances In Mechanical Engineering*, 5,157343-157343. doi:/10.1155/2013/157343.
- Krolczyk, G.M., Krolczyk, J.B, Maruda, R.W., Legutko, S., Tomaszewski M. (2016). Metrological Changes in Surface Morphology of High-Strength Steels in Manufacturing Processes. *Measurement*, 88, Pages 176-185. Doi:/10.1016/J.Measurement.2016.03.055.
- Kumar S., Saravanan I., Patnaik L. (2020). Optimization of Surface Roughness and Material Removal Rate in Milling of AISI 1005 Carbon Steel Using Taguchi

Approach. *Materials Today: Proceedings*, 22, 654-658. doi:/10.1016/J.Matpr.2019.09.039.

- Kuntoglu, M. (2022) Machining Induced Tribological Investigations in Sustainable Milling of Hardox 500 Steel: A New Approach of Measurement Science. *Measurement*, 201, 111715. doi: 10.1016/j.measurement.2022.111715
- Lai, F., Hu, A., Mao, K., Wu, Z., Lin, Y. (2023). Effect of Milling Processing Parameters on The Surface Roughness and Tool Cutting Forces of T2 Pure Copper. *Micromachines*, 14, 224. doi:/10.3390/Mi14010224.
- Li, S., Wang, X., Xie, L. (2015). The Milling–Milling Machining Method and Its Realization. *Int J Adv Manuf Technol*, 76, 1151–1161. doi:/10.1007/S00170-014-6345-Y.
- Markopoulos, A., Karkalos, N., Mia, M., Pimenov, D., Gupta, M., Hegab, H., Khanna, N., Balogun, V., Shubham, Sharma. (2020). Sustainability Assessment, Investigations and Modelling of Slot Milling Characteristics in Eco-Benign Machining of Hardened Steel. *Metals*, 10(12), 1650. doi:/10.3390/Met10121650.
- Moayyedean, M., Mohajer, A., Kazemian, M., Mamedov A., Derakhshandeh, J. (2020). Surface Roughness Analysis in Milling Machining Using Design of Experiment. *SN Applied Sciences* 2(10). doi:/10.1007/S42452-020-03485-5
- Passari, É., Amorim, H., Souza, A. (2022). Multi-Objective Optimization of Cutting Parameters for Finishing End Milling Hardox® 450. *Itegam-Jetia*, 8(34), 20-28. doi:/10.5935/Jetia.V8i34.805.
- Persson, B. (2023). On The Use of Surface Roughness Parameters. *Tribology Letters* 71(2). doi:/10.1007/S11249-023-01700-Z.
- Pimenov, D.Y., Hassui, A., Wojciechowski, S. Mia, M. Magri, A. Suyama, D. Bustillo, A. Krolczyk, G. Gupta, M. (2019). Effect of The Relative Position of The Face Milling Tool Towards the Workpiece on Machined Surface Roughness and Milling Dynamics. *Applied Sciences (Switzerland)* 9(5). Doi:/10.3390/App9050842.
- Pimenov, D.Y., K.M., Gupta., Silva, L.R.R., Kiran, M., Khanna, N., Krolczyk, G. M. (2022). Application of Measurement Systems in Tool Condition Monitoring of Milling. *Measurement*. 199, 111503. doi:/10.1016/J.Measurement.2022.111503.
- Rasagopal, P., Senthilkumar, P., Nallakumarasamy, G., Magibalan, S. (2020). A Study Surface Integrity of Aluminium Hybrid Composites During Milling Operation. *Journal of Materials Research and Technology* 9(3) 4884-4893. doi:/10.1016/J.Jmrt.2020.03.008.

- Rouder, J., Schnuerch, M., Haaf, J., Morey, R. (2023). Principles of Model Specification in ANOVA Designs. *Computational Brain and Behaviour* 6(1) 50-63. doi:/10.1007/S42113-022-00132-7.
- Shuca, Y., Chunsheng, H., Minli, Z. (2019). A Prediction Model for Titanium Alloy Surface Roughness When Milling with Micro-Textured Ball-End Cutters at Different Workpiece Inclination Angles. *Int J Adv Manuf Technol* 100, 2115–2122. doi:/10.1007/S00170-018-2852-6.
- Sorgato, M., Bertolini, R., Bruschi, S. (2020). On The Correlation Between Surface Quality and Tool Wear in Micro-Milling of Pure Copper. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 547-560. doi:/10.1016/J.Jmapro.2020.01.015.
- Stavropoulos, P. Souflas, T., Papaioannou, C., Bikas, H., Mourtzis, D. (2023). An Adaptive, Artificial Intelligence-Based Chatter Detection Method for Milling Operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 124(7-8) 2037-2058. doi:/10.1007/S00170-022-09920-8.
- Tlhabadira, I., Daniyan, IA., Machaka, R., Machio, C., Masu, L., Vanstaden, LR. (2019) Modelling and Optimization of Surface Roughness During AISI P20 Milling Process Using Taguchi Method. *Int J Adv Manuf Technol* 102:3707–3718.
- Yusoff, N., M. Ramasamy, Yusup, S. (2011). Taguchi's Parametric Design Approach for The Selection of Optimization Variables in a Refrigerated Gas Plant. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 6, 665-675. doi:/10.1016/J.Cherd.2010.09.021.
- Zeng, S., Pi, D. (2023). Milling Surface Roughness Prediction Based on Physics-Informed Machine Learning. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China, *Sensors*, 23(10), 4969. doi:/10.3390/S23104969.
- URL-1: <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-450>, (Ziyaret Tarihi: 06 Haziran 2024).
- URL-2: <https://www.britannica.com/technology/steel>, (Ziyaret Tarihi: 21 Eylül 2024).
- URL-3: <https://www.sandvik.coromant.com/trtr/knowledge/materials/workpiece-surface-measurement>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2024).
- URL-4: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=MS0001>, (Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2024).
- URL-5: https://www.steelconstruction.info/Steel_material_properties, (Ziyaret Tarihi: 21 Ekim 2024).
- URL-6 : <https://araxchemi.com/en/application-of-steel-in-industries/>, (Ziyaret Tarihi: 02 Kasım 2024).

URL-7: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=034970339dd14349a8297d2c83134649>, (Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2024).

URL-8: <https://engineeringlearn.com/operation-of-milling-machine/>, (Ziyaret Tarihi: 12 Kasım 2024).

URL-9: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-iso-4287-parameters.html>, (Ziyaret Tarihi :15 Kasım 2024)





Ek-A (1. Deney CNC Programı)

O1000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S637 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F115

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-B (2. Deney CNC Programı)

O2000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S637 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F296

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-C (3. Deney CNC Programı)

O3000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S637 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F478

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-D (4. Deney CNC Programı)

O4000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S955 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F172

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-E (5. Deney CNC Programı)

O5000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S955 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F444

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-F (6. Deney CNC Programı)

O6000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S955 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F716

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-G (7. Deney CNC Programı)

O6000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S1273 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F229

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-H (8. Deney CNC Programı)

O6000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S1273 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F592

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



Ek-I (9. Deney CNC Programı)

O6000

N10 G21

N20 G17 G40 G49 G80 G90

N30 G91 G28 Z0 M05

N40 M09

N50 G49

N60 T1 M6

N70 G90 G00 G54 S1273 M3

N80 G0 X-9. Y-20.

N90 G43 H1 Z120. M8

N100 G0 X-9. Y-20. Z120.

N110 X-9. Y-20. Z25.

N120 Z2.

N130 G1 Z-0.2 F955

N140 X0. F800

N150 Y50.

N160 X-9.

N170 G0 Z25.

N180 M01

N190 M05

N200 M09

N210 G91 G28 Z0

N220 G91 G28 Y0

N230 M30

%



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Turan, Z., Ürgün, S., Fidan, S., Bora, M.Ö. (2024). Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in The Manufacturing of Hardox 450 Material by Milling Method. *3.Uluslararası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi*, İstanbul, 10-11 Mayıs 2024.



ÖZGEÇMİŞ

Mesleki eğitime, 1999 yılında Eskişehir Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Makine Bölümünden mezun olarak başladı. Lisans eğitimini 1999-2003 yılında Ankara Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümünde tamamladı. Eskişehir organize sanayii bölgesinde Arıkan Kriko Kalıp ve Teknosistem Mühendislik firmalarında arge bölümlerinde proje sorumlusu olarak görev aldı. 2021 yılında Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü tamamladı. 2023 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim dalında lisansüstü eğitime başladı. Halen Millî Eğitim Bakanlığına bağlı Mesleki ve Teknik Anadolu Liselerinde Teknik Öğretmen, CAD Laboratuvarı Şefliği ve CNC Atölye Şefliği görevlerini yürütmektedir.

