



TREN TEKERLEĞİNİN (ER7) İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Kerem Yavuz ÇAMLI

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Nafiz YAŞAR**

**TREN TEKERLEĞİNİN (ER7) İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Kerem Yavuz ÇAMLI

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Nafiz YAŞAR

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü EĞitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Olarak HazırlanmıŐtır

KARABÜK

Haziran 2023

Kerem Yavuz ÇAMLI tarafından hazırlanan “TREN TEKERLEĞİNİN (ER7) İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ“ başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Nafiz YAŞAR

İmzası

Tez Danışmanı: Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 09/06/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rüstem BİNALİ (SÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Nafiz YAŞAR (DPÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Kerem Yavuz ÇAMLI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TREN TEKERLEĞİNİN (ER7) İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Kerem Yavuz ÇAMLI

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Nafiz YAŞAR

Haziran 2023, 56 sayfa

Demiryolu endüstrisinde, monoblok tekerlekler için kullanılan ER6, ER7, ER8 ve ER9 olmak üzere dört tip çelik kalitesi vardır. ER7 çeliği EN13262 standardına uygun olarak üretilmekte ve Avrupa demiryolu hatlarında kullanılmaktadır. Bu tren tekerlekleri, pres ve haddeleme ile şekillendirildikten sonra tornalama yöntemi kullanılarak nihai ölçülerine getirilir. Bununla birlikte, hızlı takım aşınmasını ve termal çatlamayı kolaylaştırabilen yüksek mekanik özellikleri nedeniyle ER7 çeliklerinin işlenmesi zor olabilir. Bu nedenle, soğutma sıvılarının kullanımı işlenebilirliklerini geliştirmek için kritik öneme sahipken, geleneksel soğutma sıvılarının kullanılması ekstra işletme maliyetleri, enerji ve atık sarfiyatına neden olur. Bir alternatif olarak, kesme bölgesine hava ile karıştırılmış küçük miktarlarda soğutma sıvısı uygulayarak neredeyse kuru işlenmiş bir yüzey bırakan minimum miktarda yağlama (MQL) soğutma teknolojisi kullanılmaktadır. Mevcut çalışmada, ER7 çeliğinin işlenmesi için en uygun kesme parametrelerini belirlemek üzere kuru koşullar altında ve kaplamalı karbür uçlar kullanılarak ön performans deneyleri

yapılmıştır. Kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve enerji tüketimi üzerindeki etkisi araştırılmış ve uygun kesme parametrelerini belirlemek için bir kıyaslama olarak kullanılmıştır. Daha sonrasında veya işlenen ER7 çeliğinin üzerindeki etkileri belirlenebilmesi için MQL ve Nano-MQL soğutma teknolojileri kullanılarak ek işleme testleri gerçekleştirildi. Kullanılan kesme parametreleri arasında kesme hızının 300 m/dak, ilerleme miktarının ise 0,15 mm/dev olduğu değerlerde minimum yüzey pürüzlülüğü değerine ulaşılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde MQL ve Nano-MQL soğutma teknolojileri kuru kesme koşuluna göre sırasıyla %24 ve %34 oranında düşüş eğilimi sağlamıştır. Takım aşınması üzerinde gerçekleşen düşüş ise sırasıyla %34,1 ve %37,6 oranında gerçekleşmiştir. Bu çalışmanın genel sonuçları, ray tekerleği uygulamalarına yönelik çelik parçalar için sürdürülebilir bir işleme alternatifi olarak MQL ve Nano-MQL soğutma sıvılarının kullanılmasının uygulanabilirliğini göstermiştir. Ek olarak, mevcut çalışma, nano katkı maddelerinin eklenmesiyle MQL soğutma teknolojisinin geliştirilmiş performansını vurgulamaktadır.

Anahtar Sözcükler : ER7 Çeliği, Takım Aşınması, Nano-MQL

Bilim Kodu :91438XXXXX

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF THE TRAIN WHEEL (ER7)

Kerem Yavuz ÇAMLI

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Nafiz YAŞAR

June 2023, 56 Pages

In the railway sector, monoblock wheels are typically made from one of four types of steel grades: ER6, ER7, ER8, and ER9. ER7 steel is produced following the EN13262 standard and is commonly used in European rail networks. After these train wheels are shaped by pressing and rolling, they are brought to their final dimensions using the turning method. However, machining ER7 steels can be a challenging task due to their high mechanical properties, which can cause rapid tool wear and thermal cracking. Therefore, the use of coolants is critical to improve their workability, while the use of conventional coolants incurs extra operating costs, energy and waste consumption. A possible alternative is to use minimum quantity lubrication (MQL) cooling technology, which employs small quantity of coolant mixed with air to the cutting zone, producing a near-dry machined surface. In the present study, preliminary performance tests were carried out under dry conditions and using coated carbide inserts to determine the most suitable cutting parameters for

machining ER7 steel. The study investigated the impact of cutting speed and feed rate on surface roughness (Ra), energy consumption, and cutting temperature. These outputs were used as a reference point for identifying the best cutting parameters. Further machining tests were conducted using MQL and nano-MQL cooling technologies to evaluate their effects on the machining outputs mentioned above. Among the cutting parameters used, the minimum surface roughness value was reached with the cutting speed of 300 m/min and the feed rate of 0.15 mm/rev. As a result, by using these optimum cutting parameters with MQL and Nano-MQL cooling technologies, the surface roughness decreased by 24% and 34%, respectively, compared to dry conditions. In addition, the decrease in tool wear was 34.1% and 37.6%, respectively. The study demonstrated that MQL coolants are a viable and sustainable alternative for machining steel parts in rail wheel applications. Furthermore, the study highlights the superior performance of MQL cooling technology when nano additives are included.

Keywords : ER7 Çeliği, Takım Aşınması, Nano-MQL

Science Code :91438XXXXX

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını; planlanmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım saygı değer hocam sayın Doç. Dr. Nafiz YAŞAR'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Deney çalıŐmalarında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ, Sayın Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ ve Doç. Dr. Mehmet BOY'a, ER7 eliği malzemesinin temininde Kardemir A.Ő. ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalıŐmamda desteklerini esirgemeyen Kok Fabrikaları Müdürü Sayın Ömer ÖZDEMİR ve Kok Fabrikaları Yan Ürünler BaŐmühendisi Sayın İlhan ATTAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca, her zaman desteğini hissettiren eŐim Hilal ÇAMLI'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
ER7 ÇELİĞİ	2
BÖLÜM 3	4
TALAŞLI İMALAT.....	4
3.1. TALAŞ KALDIRMA.....	4
3.1.1. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler	4
3.1.1.1. Kesici Takım Geometrisi	5
3.1.1.2. Takım Ömrü.....	7
3.1.1.3. Kesme Parametreleri	8
3.1.2. Talaş Oluşum Türleri.....	8
3.1.2.1. Sürekli Talaş	9
3.1.2.2. Kesintili Talaş	9
3.1.2.3. Yığma Talaş (BUE)	10
3.2. TORNALAMA	11
3.2.1. Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetleri	12

3.3. YÜZEY PÜRÜZLÜĞÜ	13
3.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri.....	13
3.3.1.1. Aritmetik Ortalama Sapmalarının Karekökü (Rq).....	14
3.3.1.2 Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	14
3.3.1.3. Maksimum Yüzey Pürüzlülük Derinliği (Rt)	15
3.3.1.4. Ortalama Pürüzlülük Derinliği (Rz).....	15
3.3.2. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler	16
3.4. KESME SICAKLIĞI	16
BÖLÜM 4	20
TAGUCHI METODU.....	20
4.1. ÇEVİRİM İÇİ KALİTE KONTROL	20
4.2. ÇEVİRİM DIŞI KALİTE KONTROL.....	20
4.2.1. Sistem Tasarımı	21
4.2.2. Parametre Tasarımı	21
4.2.3. Tolerans Tasarımı	21
4.3. SİNYAL GÜRÜLTÜ ORANI.....	22
4.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)	22
4.4.1. Kareler Toplamı.....	23
4.4.2. Serbestlik Derecesi	24
4.4.3. Kareler Ortalaması.....	24
4.4.4. F Değeri	24
4.4.5. Önem Kontrolü	25
4.4.6. Gruplar Arası Varyansın Genel Varyanstaki Payı.....	25
BÖLÜM 5	26
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	26
BÖLÜM 6	29
MALZEME VE YÖNTEM	29
6.1. MALZEME	29
6.2. TAKIM TEZGÂHI VE DENEY DÜZENEGİ	32

	<u>Sayfa</u>
6.3. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCU	33
6.4. DENEY PARAMETRELERİ	33
6.5. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ	33
6.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ.....	34
6.7. TAGUCHİ OPTİMİZASYONU	35
6.8. MQL VE NANO-MQL	36
BÖLÜM 7	37
BULGULAR.....	37
7.1 ÖN DENEYLER	37
7.2. AŞINMA DENEYLERİ.....	41
BÖLÜM 8	49
SONUÇLAR	49
ÖNERİLER.....	50
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. (A) Pozitif talaş açısı ve (B) Negatif talaş açısı	6
Şekil 3.2. Takım açıları	6
Şekil 3.3. Kesme hızı ve takım ömrü lineer ilişkisi	7
Şekil 3.4 Sürekli talaş	9
Şekil 3.5. Kesintili talaş türü	10
Şekil 3.6. Yığma talaş türü	10
Şekil 3.7. Torna tezgâhı ve tornalama işlemi	11
Şekil 3.8. Tornalama işleminde oluşan kesme kuvvetleri	12
Şekil 3.9. M sistemine göre yüzey pürüzlülük profili	14
Şekil 3.10. Dik (ortogonal) kesmede ısı oluşumu	17
Şekil 3.11. Metal işlemede ısının dağılımı	18
Şekil 3.12. Kesme hızı-sıcaklık ve ilerleme-sıcaklık ilişkisi	18
Şekil 3.13. Kesme sırasında talaş ve iş parçası arasındaki sıcaklık dağılımı	19
Şekil 6.1. Deneysel kurulum	31
Şekil 6.2. TTC-550 CNC torna tezgâhı.....	32
Şekil 6.3. Fluke Tİ400 kızılötesi kamera	34
Şekil 6.4. Mahr M300	35
Şekil 7.1. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve toplam güç tüketimi üzerindeki etkisi.....	37
Şekil 7.2. $V_c = 300\text{m / dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm / dev}$ 'de kanat aşınması değişkeni.....	42
Şekil 7.3. Kesici takım, farklı kesme koşullarında görüntüleri	44
Şekil 7.4. $V_c = 300\text{m/dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm/dev}$ cinsinden yüzey pürüzlülüğü değişkeni	45
Şekil 7.5. $V_c = 300\text{m / dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm / dev}$ cinsinden yüzey pürüzlülüğü.....	46
Şekil 7.6. Değişken güç tüketimi $V_c = 300\text{ m/dak}$ ve $f = 0.15\text{mm/dev}$	47
Şekil 7.7. $V_c = 300\text{m/dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm/dev}$ cinsinden kesme sıcaklığı değişkeni	48
Şekil 7.8. Talaş morfolojisinin $V_c = 300\text{m/dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm/dev}$ cinsinden değişimi	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Vagon tekerlek takımlarının sınıflandırılması	1
Çizelge 2.1. ER7 çeliğinin kimyasal bileşimi	2
Çizelge 2.2. Tren Tekerinin üretiminde kullanılan çelikler [2].	3
Çizelge 6.1. Tren tekerinin üretimi için çelik kaliteleri [2].....	30
Çizelge 6.2. TTC-550 CNC torna tezgahının teknik özellikleri	33
Çizelge 6.3. Deney parametreleri.....	33
Çizelge 6.4. OPTRIS PI456 termal kamera teknik özellikleri	34
Çizelge 6.5. Yüzey pürüzlülük cihazının özellikleri.....	35
Çizelge 6.6. MQL soğutucuların özellikleri.....	36
Çizelge 7.1. Kesici takıma göre elde edilen deneysel ve tahmini sonuçların tablosu	40
Çizelge 7. 2. Ön testlerde yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi için ANOVA sonuçları.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C	: Karbon
Mn	: Manganez
Si	: Silisyum
S	: Kükürt
P	: Fosfor
Ni	: Nikel
Cu	: Bakır
V	: Vanadyum
H	: Hidrojen
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Mo	: Molibden
Ra	: Yüzey pürüzlülük değeri, (μm)
T	: Kesme sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
μm	: Mikrometre

KISALTMALAR

S/N	: Sinyal Gürültü Oranı
CNC	: Computer Numeric Control (Bilgisayar Sayısal Kontrol)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda demiryolu taşımacılığı toplu ve ticari ulaşım sektöründe önemli bir gelişim göstermektedir. Farklı ebat ve kimyasal bileşime sahip demir rayları, demiryolunun en önemli elemanıdır. Tren kullanımının son yıllarda artmasıyla tren raylarına, akslara ve tekerleklerle çalışma süreleri ve kapasitelerinin dikkate alınması sonucunda bu elemanlar üzerine düşen yükünde arttığı söylenebilir. Tren tekerleği, demiryolunda kullanılmak üzere özel olarak üretilir. Tekerlek bir aks üzerine itilir. Demiryolu vagonuna monte edilerek de işlev görür.

Demiryolu taşımacılığı toplu ve ticari ulaşım sektöründe son yıllarda hızla büyüyen ve gelişen sektörlerden biridir.

Çizelge 1.1. Vagon tekerlek takımlarının sınıflandırılması

Sınıflandırma	Belirleme
Parça göstergesi	- Normal ölçü çark seti
	- Geniş çaplı tekerlek seti
	- Dar hat tekerlek seti
Tekerlek sırtı çapı	- Normal çaplı tekerlekler
	- Küçük çaplı tekerlekler
	- Çok küçük çaplı tekerlekler
Bağlantı tasarımı	- Tekerlekler aks üzerinde kalıcı olarak monte edilir.
Aks ve tekerlekler arasında	- Tekerlekler aks üzerinde kaydırılabilir

Tekerlek setleri, demiryolu araçlarının önemli teknik bileşendir. Gerçekleştirdikleri işlevlere göre iki tip tekerlek takımı ayırt edilir ve bunlar: sürüş tekerlek setleri ve haddeleme tekerlek setleridir. Bir tekerlek setine sahip şaft iki tekerleğe sabit olarak monte edilmiş bir akstır.

Tekerlek setleri farklı genişlik tiplerine bağlı olarak üç farklı gösterge setleri kullanılmaktadır. Bu setler 1435 mm'lik raylarda normal gösterge setleri, geniş göstergelerde daha büyük tekerlek gösterge setleri ve 1435 mm'den küçük göstergelerde dar gösterge setleri kullanılır [1].

Bu tez çalışmasında, demiryolu rayında kullanılan ER7 çeliğinin işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri için ilerleme miktarı, kesme hızı ve işleme şartlarının farklı parametreleri seçilmiştir. İşleme parametrelerine bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, güç tüketimi ve takım aşınması gibi işlenebilirlik çıktı parametreleri değerlendirilmiş ve farklı soğutma sıvıları kullanılmıştır. Değerlendirme işlemleri ANOVA gibi analizler kullanılarak yapılmıştır.

BÖLÜM 2

ER7 ÇELİĞİ

ER7 malzemesi sürekli döküm yöntemiyle yarı mamul olarak üretilen ve daha sonrasında sertleştirme işleminin kullanılarak üretim bandına alınan çeliktir. Sertleştirme işlemi 830 ° C ye kadar ısıtıldıktan sonra yaklaşık olarak 200 ile 230 ° C'ye kadar soğutulmasıyla yapılmaktadır. Sertleştirilen malzeme fırın ortamında 1-2 saat bekletildikten sonra 3 saat boyunca yüzeyden 25 mm içeride minimum 235 brinel sertlik elde edilinceye kadar 530 ° C'ye kadar temperlenir. ER7 çeliği işlendikten sonra demiryolu tekerlekleri olarak kullanılır. Çizelge 2.1'de ER7 çeliğinin kimyasal bileşimi ve maksimum oranları verilmiştir.

Çizelge 2.1. ER7 çeliğinin kimyasal bileşimi

Element	Yüzde ağırlık (%)
C	0,52
Mn	0,80
Si	0,40
S	0,015
P	0,020
Cr	0,30
Ni	0,30
Cu	0,30
Mo	0,080
V	0,060
Cr+Ni+Mo	0,50
H,ppm	2,0

ER7 çeliğinin yanı sıra tren tekerleğinin yapımında farklı özelliklere ve kalitelere sahip malzemelerde kullanılmaktadır. Bu malzemeler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Tren Tekerinin üretiminde kullanılan çelikler [2].

Tren Tekerü Üretimi İçin elik Kaliteleri																			
Kardemir Kalite Kodu	İlgili Standart		Renk Kodu	Üretilen Ürün	Döküm Şekli	Kimyasal Analiz, % (POTA)													
	Standart	Kalite Kodu				%C	%Mn	%Si	%Max S	%Max P	Max Nppm	% Cu Max	% Caq	%Ni+Mo+Cr Max	%Cr	%Ni	%Mo Max	%V Max	Hppm Max
KAR ER7_00	EN 13262	ER7_00	Mavi Blue	Kalın yuvarlak	Kapalı	0,48-0,52	0,65-0,75	0,25-0,35	0,015	0,020	-	0,30	-	0,50	Max 0,30	Max 0,30	0,08	0,06	2
KAR ER7_01	EN 13262	ER7_01	Kırmızı	Kalın yuvarlak	Kapalı	0,49-0,51	0,65-0,80	0,25-0,40	0,015	0,020	-	0,30	-	0,50	0,15-0,20	0,20-0,30	0,08	0,06	2
KAR ER8_00	EN 13262	ER8_00	Sarı	Kalın yuvarlak	Kapalı	0,52-0,56	0,65-0,75	0,25-0,35	0,015	0,020	-	0,30	-	0,50	Max 0,30	Max 0,30	0,08	0,06	2
KAR ER8_01	EN 13262	ER8_01	Beyaz 8	Kalın yuvarlak	Kapalı	0,53-0,55	0,65-0,80	0,25-0,40	0,015	0,020	-	0,30	-	0,50	0,15-0,20	0,20-0,30	0,08	0,06	2
KAR ER9_00	EN 13262	ER9_00	Beyaz 9	Kalın yuvarlak	Kapalı	0,56-0,60	0,65-0,75	0,25-0,35	0,015	0,020	-	0,30	-	0,50	Max 0,30	Max 0,30	0,08	0,06	2
KAR ER9_01	EN 13262	ER9_01	Beyaz 16	Kalın yuvarlak	Kapalı	0,56-0,60	0,65-0,80	0,25-0,40	0,015	0,020	-	0,30	-	0,50	0,15-0,20	0,20-0,30	0,08	0,06	2

BÖLÜM 3

TALAŞLI İMALAT

Ham maddeden ürün elde etmek için çeşitli prosesler, ekipmanlar, operasyonlar ve iş gücü kullanımıyla gerçekleştirilen faaliyetlere “imalat” denir. İmalat sistemi ise, bir ürüne değer katmak için ham maddenin geometrik şeklinden farklı bir geometrik şekle sokulduğu sistemdir [3]. Günümüzde imalat, talaşlı ve talaşsız olarak ikiye ayrılmaktadır. Talaşlı imalat, metal, ahşap veya taş gibi malzemelerin bir veya birkaç takım kullanılarak takım tezgâhlarında önceden belirlenmiş şekil ve ölçülerde talaş kaldırarak işlenmesidir [4]. Tornalama, frezeleme, planyalama gibi yöntemlerle talaşlı imalatta hammadde-ürün dönüşümü gerçekleştirilir. Ayrıca dövme, döküm ve kaynak gibi talaşsız imalat yöntemleri ile hammadde üzerinden talaş kaldırmadan bu dönüşüm sağlanır [5].

3.1. TALAŞ KALDIRMA

Şekil vermek, yüzey temizliği veya boyut ayarlanması yapabilmek amacıyla bir iş parçası üzerinde belirli bir kesici takım kullanılarak yapılan tabaka kaldırma işlemlerine literatürde talaş kaldırma işlemi adı verilmiştir. Talaş olarak adlandırılan bu kalkan tabaka ise içerisinde elastik ve plastik şekilde değiştirme gibi kaotik fiziksel değişiklikler barındırmaktadır. Bu proses boyunca çeşitli fiziksel olaylar meydana gelmektedir. Bunlara örnek olarak sürtünme dolayısıyla aşınma ve ısı oluşumu, parça yüzeyinde sertleşmeler ve mukavemet değişiklikleri, kesici uçtaki aşınmalar ortaya çıkmaktadır [6].

3.1.1. Talaş Kaldırmayı Etkileyen Faktörler

Talaşlı imalatta herhangi bir talaş kaldırma işlemi gerçekleştirildiğinde, istenilen yüzey kalitesinin elde edilebilmesinde bir dizi kesme parametrelerinin uygun bir

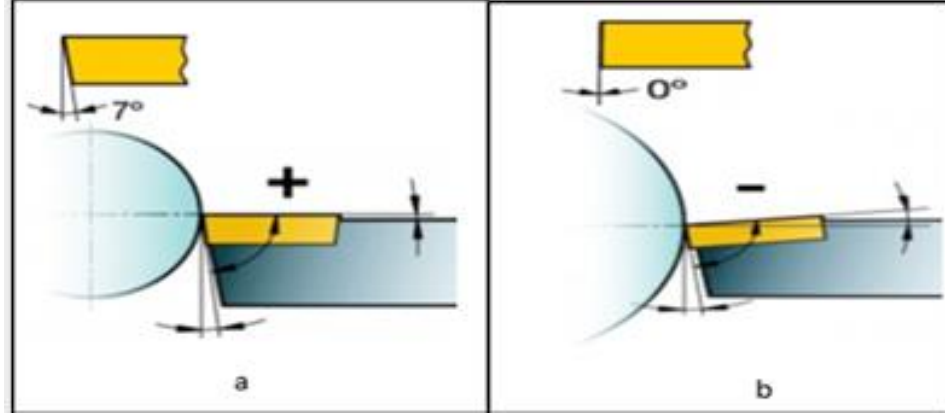
şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu kesme parametreleri, işleme operasyonu yapılacak malzemenin ve hedeflenen geometrinin özelliklerine göre belirlenir. Kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği, kesici takımın talaş açısı, kullanılan kesici takımın türü, malzemesi ve geometrisi gibi faktörler işleme maliyeti ve kesme kuvvetleri gibi diğer etkileri de dikkate alarak belirlenir [7].

3.1.1.1. Kesici Takım Geometrisi

Kesici takım üzerinde bulunan açılar, talaş kaldırma işlemi sırasında birçok faktör dikkate alınarak tanımlanmaktadır. Bu açıların kesme işlemi esnasında önemli olduğu bilinmektedir [4]. Genellikle talaş açısının artması, kesme kuvvetlerinin azalmasına ve daha iyi bir yüzey işlemesine yol açar. Talaşların akış yönü, doğru talaş açısı verilerek kontrol edilir. Talaş açısı genellikle pozitif olarak verilmektedir. Seramik ile kesmelerde bazen negatif olabilir. Pozitif talaş açısının aşırı değerlerde olması takımın kesici ucunu zayıflatabileceği söz konusudur. Takım üzerinde bulunan talaş açıları belirli bir amaca sahip olup, kullanılan tip, iş parçasının malzeme özelliklerine ve gerçekleştirilen kesme işlemine göre değişebilmektedir. Pozitif talaş açısına sahip takımlar kullanmak verimli talaş kaldırma operasyonları için daha uygundur. Pozitif talaş açısı, kesme bölgesinde kayma açısının büyümesine ve bu da takım-talaş ara yüzünde serbest akışı sağlamaktadır. Yanlış şartların seçilmesi, takım yüzeyinden talaşların kaymasına neden olarak krater aşınmasına neden olabilmektedir. Bu durum, talaş açısının doğal olarak krater oluşturma eğilimi göstermesi anlamına gelir. Demir ve aşındırıcı parçacıklar içermeyen sünek malzemelerin yanı sıra düşük çekme dayanımlı malzemeler, küçük çaplı uzun miller ve işlenirken sertleşen malzemelerde talaş kaldırırken pozitif talaş açısına sahip takımlar kullanılmaktadır [7].

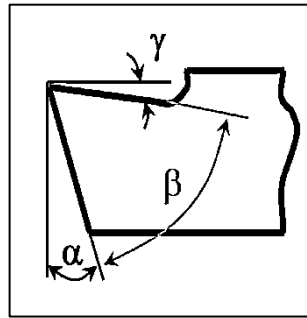
Yüksek çekme dayanımına sahip ve aşındırıcı içeriğe sahip malzemelerde, kesme işlemi kesikli yapıldığında ve ilerleme değeri büyük olduğunda, negatif talaş açısı kullanılmaktadır. Negatif talaş açısına sahip takımlar, kayma bölgesi boyunca daha küçük bir kayma açısına neden olmakta ve bu durum daha fazla sürtünme ile ısı oluşmasına sebep olmaktadır. Isı artışı dezavantaj olarak görülse de tok malzemelerin karbürlü takımlarla işlenmesinde kullanılabilir. Negatif talaş açılı kesici takımlar

genellikle dökme demirler takım çelikleri vb. gibi birçok malzemelerin karbürlü takımlarla işlenmesinde tercih edilirler [8].



Şekil 3.1. (A) Pozitif talaş açısı ve (B) Negatif talaş açısı [9].

Taban açısı (α), iş parçası ile takım arasındaki sürtünmeyi azaltır. Takımın kama açısı (β) ve talaş açısı (γ), kesiciliği artırır ve birbirlerine bağlıdır, yani biri artarken diğeri azalır. Kama açısı çok küçük olduğunda, kesme ucunun dayanımı azalır ve takım ağzı çabuk körlenir. Takımın kama açısı çok büyük ise kesme ağzı küt olur ve kesme işleminde fazla direnç gösterir, aşırı ısınır. Takım ve iş parçası arasındaki sürtünmeyi önlemek için yanaşma açısı yeterli olmalıdır [4]. Şekil 3.2'de takım açıları gösterilmiştir.



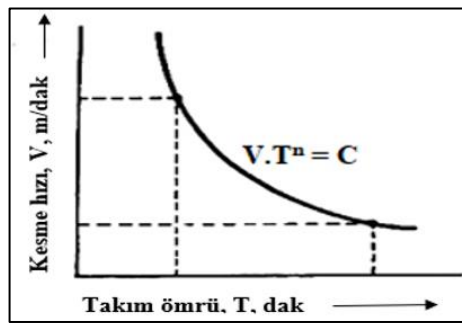
Şekil 3.2. Takım açıları [10].

3.1.1.2. Takım Ömrü

Takım ömrü, takımda belirlenen sınır aşınma değerine ulaşıncaya kadar geçen süreyi ifade eder [11]. Talaş kaldırma işlemi, sürekli temiz ve yeni bir yüzeyin oluşması ve bunun yüksek basınç ve sıcaklık altında takımın malzeme üzerinde kaydırılması ile gerçekleşir. Bu süreçte talaş, yüksek basınçta takım üzerine basar ve akarken takım yüzeylerinde sürtünme oluşur. Sürtünme ve malzeme şekil değiştirme nedeniyle yüksek ısı meydana gelir. Bu etkilerin bir sonucu olarak, takımın aşınma, ağız kısmında kırılmalar ve kimyasal reaksiyonlar gibi bozulmalar meydana gelir [12]. Takımın kullanışlı ömrü, kesici kenarın ömründen önce geçen süreye bağlı olarak ölçülür. Pratik talaş kaldırma işlemlerinde, takımın esas kesme yüzeyi ve talaş yüzeyindeki aşınma, aktif kesici kenar boyunca aynı tarzda değildir, bu nedenle takım için tekrar bileme operasyonu yapmadan önce, öngörülen aşınma miktarının belirlenmesi için aşınma yerinin ve miktarının tanımlanması gerekmektedir [11].

$$V \times T^n = C \quad (\text{sbt}) \quad (3.1)$$

Üst paragrafta Denklem 3.1'de takım ömrünün belirlenmesi için formül verilmiştir. V kesme hızını T takım ömrünü n ve C ise sabit değerdir. Şekil 3.3'de kesme hızı ve takım ömrü lineer ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kesme hızı ve takım ömrü lineer ilişkisi [13].

3.1.1.3. Kesme Parametreleri

Kesme hızı, tornalama işlemi sırasında iş parçasının çevresel hızıyla doğrudan ilgilidir. Bu hız, kalemin dakikada aldığı yol veya kestiği talaş uzunluğu olarak ifade edilir ve tornalama işlemlerinde en önemli parametrelerden biridir. Eğer iş parçası bir devirde dönerse, kalem μd mm kadar kesme yapar. İş parçasının n (devir/dakika) defa dönmesi durumunda, alınan yol $\pi d n$ mm/dk olarak hesaplanır. Kesme hızı, birimi m/dk olmakla birlikte, verilen ölçülerin mm olduğu göz önünde bulundurularak $v = \pi \times D \times n / 1000$ mm/dk şeklinde ifade edilir [14].

Tornalama işlemi sırasında ilerleme miktarı, iş parçasının bir devir dönmesinde kesici takımın iş eksenine paralel veya dik olacak şekilde aldığı doğrusal yoldur ve birimi mm/dev'dir. Bazen bu birim mm/dk olarak ifade edilir. Talaş kesiti arttıkça kesme kuvveti benzer eğilim sergiler ve bu da kesme performansının düşmesine neden olur. Bu nedenle, tornalama işleminde mümkün olan en yüksek ilerleme değerleri seçilmelidir, çünkü ilerleme miktarındaki artış, kesme hızının artışına göre kesici takımın daha az aşınmasına sebep olur. Son talaşta ise ilerleme oranı, elde edilecek yüzey kalitesini belirler. Düşük ilerleme miktarlarında yüzey kalitesi o kadar iyi olur [14].

Kesme derinliği, kesici takımın kesme kenarının iş parçasına dikey olarak aldığı mesafedir, kesme ve ilerleme yönlerinde oluşur. Talaş derinliği, kesici takımın aşınmasında önemli bir faktör değildir. Bazı durumlarda maksimum kesme derinliği, malzemenin rezilyansı ve bağlama şartları tarafından sınırlandırılır. Kesme derinliği, kaba talaş kaldırmada işlemlerinde 2-4 mm, ince talaş kaldırmada ise 0.5-2 mm ve çok ince talaş kaldırma işlemlerinde 0,1-0,4 mm arasında değişir [14].

3.1.2. Talaş Oluşum Türleri

Talaş türleri, malzeme özelliği, kesici takım geometrisi, kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği) gibi faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. Talaşın türü, yüzey kalitesi ve kesme koşulları hakkında bilgi sağlayan bir

faktördür. Talaş oluşumuna bağlı olarak üç tür talaş meydana gelir: sürekli, kesintili ve yığılma kenarlı (Built-Up Edge) sürekli talaş [15].

3.1.2.1. Sürekli Talaş

Şekil 3.4’de sürekli talaş şekli gösterilmiştir. Sabit koşullarda, genel olarak sünek malzemelerin işlenmesinde yüksek kesme hızlarında makro düzeyde çatlaksız bir şekilde gerçekleşir. Sürekli talaş oluşumu yüksek deformasyon nedeniyle sertleşebilmekte ve buna bağlı olarak yüksek sertlik değerlerine geldiğinde takım aşınmasını artırmaktadır [16].



Şekil 3.4. Sürekli talaş [17].

Sürekli talaş bant şeklinde, spiral veya farklı helisel biçimlerde oluşabilir. Ancak uzun talaş kesme işlemini ve operatörü olumsuz yönde etkileyebilir [16].

3.1.2.2. Kesintili Talaş

Şekil 3.5’de kesintili talaş türü gösterilmektedir. Gevrek malzemeler işleme esnasında şiddetli gerilmeye maruz kaldığında talaşlar parçalar halinde oluşmaktadır. Böyle oluşan parçalı talaşlar kesintili talaş olarak bilinmektedir [4].



Şekil 3.5. Kesintili talaş türü [17].

Kesintili talaş oluşumu sünek malzemelerin (dökme demir ve bronz) düşük kesme hızlarıyla işlenmesinde de meydana gelmektedir. Gevrek malzemelerin işlenmesinde düşük kesme kuvveti ve yüksek yüzey kalitesi ve takım ömrü ortaya çıkmaktadır. Yumuşak malzemelerin işlenmesinde ise daha düşük yüzey kalitesi ve takım ömrü olduğunu söylemek mümkündür [4].

3.1.2.3. Yığılma Talaş (BUE)

Şekil 3.6'da yığılmalı talaş türü gösterilmektedir. Kesme hızı düşük olduğunda, takım iş parçası ara yüzeyinde kesme düzlemine dik bir açıda düzlem boyunca talaştan kopmalar oluşabilmektedir. Bu kopan talaş parçacıkları genellikle takım yüzeyine yapışır ve kesici takıma sinterlenerek birikir. Bu birikinti kesici takıma yapışan talaş olarak adlandırılır [16].

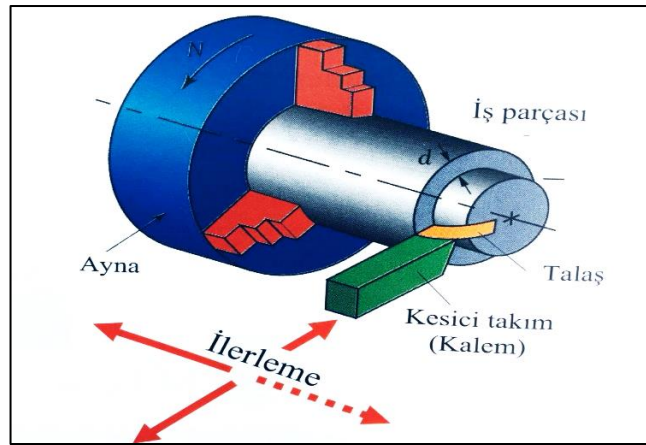


Şekil 3.6. Yığılma talaş türü [17].

Yığılma Talaş, kritik bir boyuta ulaştığında talaş ile ayrılır. Artan kesme hızı takım-iş parçası ara yüzündeki sıcaklığın artması neden olmakla birlikte yapışan talaşın boyutunu küçültmektedir. Ara yüzeye iletilecek ısının, akma gerilmesinde azalmaya neden olacak ısıl yumuşamayı sağladığı anda yapışma kaybolur [15]. Eğer kesici takıma yapışan talaş kalıcı olursa, kesici kenarın aşınmaya karşı korunması sağlanırken aşırı sertleşmiş talaştan kopan parçalar, talaşla birlikte sürtünerek aşınmaya neden olur [18].

3.2. TORNALAMA

Talaşlı imalatta kullanılan operasyonlardan biri olan tornalama en yaygın talaşlı imalat yönteminden birisidir [4]. Yaygın bir talaşlı imalat operasyonu olan tornalama yöntemi genellikle silindirik iş parçalarının şekillendirilmesinde kullanılır. Tornalama işlemi, dairesel kesitli parçalar elde etmek amacıyla, doğrusal hareket eden bir kesici takımın dönen iş parçası üzerinden geçerek talaş kaldırma işlemini gerçekleştirdiği bir yöntemdir. Rijit bir şekilde takım tutucu üzerine bağlanan kesici takım bir ekseninde ilerletilerek iş parçası üzerinden katman kaldırılarak profiller oluşturur [19]. Şekil 3.7’de torna tezgâhı ve tornalama işlemi gösterilmiştir.



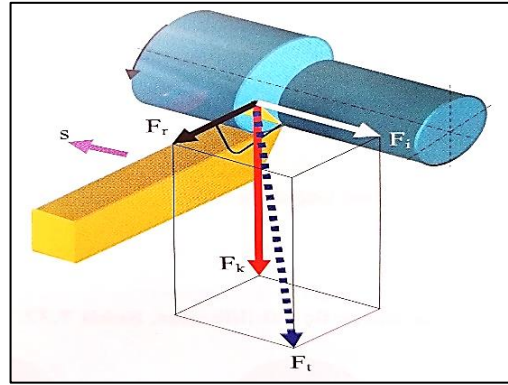
Şekil 3.7. Torna tezgâhı ve tornalama işlemi [20].

Torna tezgahında silindirik, konik, profil ve alın tornalama işlemlerinin yanı sıra delik delme ve büyütme, raybalama, vida, pafta ve kılavuz çekme gibi işlemler gerçekleştirilmektedir [21].

3.2.1. Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetleri

Talaş kaldırma operasyonunda, kesme kuvvetleri takım-talaş arasındaki temas uzunluğu ile ilişkilidir. İki fazlı ve kesikli talaş oluşan malzemelerin işlenmesinde, kesici takım ve talaş arasında daha az temas uzunluğu olduğundan, çok daha küçük kuvvetler oluşmaktadır. Artan kesme hızı, kayma açısını arttırarak daha ince talaş oluşturur ve buna bağlı olarak temas uzunluğu azalır. Bu nedenle kesme kuvvetlerinde azalma görülmektedir. Kesme kuvvetleri üzerinde kesici takım geometrisinin de etkileri görülmektedir. Faktörlere göre değişiklik gösteren talaş açısının optimum değeri aşılması durumunda kesici takım dayanımını azalır ve aşınma değerinde artış meydana gelmektedir. Ek olarak, boşluk yüzeyi temas alanını artırarak takım kesme kuvvetlerini artırır [8].

Talaş kaldırma işlemi sırasında, dirençleri aşmak için gerekli talaş kaldırma kuvveti üç bileşen içerir; kesme kuvveti F_c , ilerleme kuvveti F_f ve radyal kuvvet F_r . Kesme kuvvetleri hem takım hem de iş parçası üzerinde şekil değişikliklerine neden olarak takım-iş parçası konumunu değiştirir ve yüzey kalitesini etkiler [22]. Tornada oluşan kesme kuvvetleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Tornalama işleminde oluşan kesme kuvvetleri [23].

Tornalama operasyonlarında dik talaş kaldırma işlemi için takım üzerine etki eden kuvvet bileşenleri Şekil 3.8’de verilmiştir. Bunlar arasında, kesme ucuyla dik V yönündeki kuvvet bileşeni, takım-talaş yüzeyine etki eden esas kesme kuvveti (F_c) olarak isimlendirilir. Kesme hızı doğrultusunda etkili olan esas kesme kuvveti F_c olup tüm kuvvetler içerisinde en büyüğüdür. Ayrıca kesme işlemi için gereken gücün

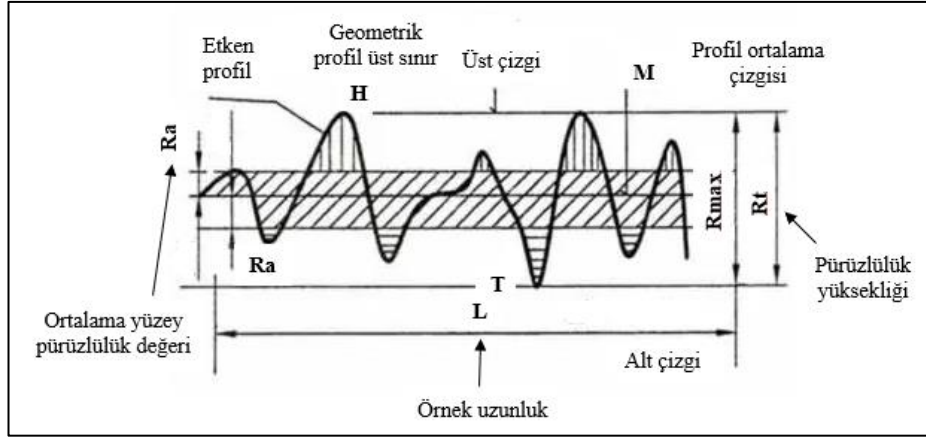
yaklaşık %99'unu oluşturur. İlerleme doğrultusunda takım üzerinde etkili olan kuvvet bileşeni ilerleme kuvveti (F_f) olarak adlandırılır ve genellikle F_c değerinin yaklaşık %55'ini oluşturur. Pasif kuvvet (F_p), takımı işlenmiş yüzeyden uzaklaştırmaya çalışan ve işlenmiş yüzeye dik olarak etki eden üçüncü kuvvet bileşenidir. F_p , ilerleme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır ve güç gereksinimine çok az katkıda bulunur, çünkü pasif doğrultudaki hız ihmal edilebilir kadar küçüktür. Bu kuvvet, dik kesme işlemlerinde kuvvetlerin en küçüğüdür ve basit tornalamada kesme kuvvetlerinin analizi sırasında göz ardı edilebilir [24].

3.3. YÜZEY PÜRÜZLÜĞÜ

İşleme metodunda kesicilerin türü ve işlenen malzemelere göre, işleme esnasında fiziksel, kimyasal ve ısıl faktörlerin etkileriyle birlikte, kesicilerin ve işlenen malzemelerin arasındaki mekanik hareketlerin de etki etmesiyle işlenen yüzeylerde, genellikle istenilmemesine rağmen bazı izler oluşmaktadır. Nominal yüzey çizgisinin alt ve üst çizgilerinde düzensiz sapmaların oluşmasına yüzey pürüzlülüğü denilmektedir [25].

3.3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri

Yüzey pürüzlülük kalitesini tanımlamak için çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Aritmetik Ortalama Sapmalarının Karekökü (R_q), Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) en önemli olanlardır. Ancak iki farklı yüzey aynı pürüzlük değerine sahip olacağı için pürüzlük kalitesini sadece R_a ve R_q ile tanımlamanın yeterli olmadığı ifade edilmektedir [26]. Bu durumda Maksimum Yüzey Pürüzlülük Derinliği (R_t) ve Ortalama Pürüzlülük Derinliği (R_z) gibi parametreleri de dikkate almak gerekir [27]. Şekil 3.9'da M sistemine göre yüzey pürüzlülük profili gösterilmiştir.



Şekil 3.9 M sistemine göre yüzey pürüzlülük profili [23].

3.3.1.1. Aritmetik Ortalama Sapmalarının Karekökü (Rq)

Bu kriter, yüzeydeki rastgele girinti ve çıkıntıları ortalama pürüzlüğe göre daha hassas bir şekilde tanımlar. Rq; örnekleme boyu içinde yüzey kısmında var olan düzgün olmayan kısımların ortalama çizgiden ölçülen yüksekliklerinin geometrik ortalaması olarak ifade edilmektedir (Denklem 3.2). Yüzeyin standart sapmasının tahmin edilmesini ve dolayısıyla yükseklik dağılımını iyi bir biçimde tanımlayan Rq teriminin yerine bazen Karekök Ortalama (Root Mean Square) terimi de kullanıldığı görülmektedir [26].

$$R_q = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2}{n}} \quad (3.2)$$

Formülü ile hesaplanmaktadır.

3.3.1.2 Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)

Örnekleme düzleminde yüzey düzgünlüklerinin ortalama çizgiye (eksen çizgisi-CL) göre ölçülen ortalama yükseklikler olarak tanımlanmaktadır. Endüstride yaygın olarak kullanılan ve dolayısıyla kalite kontrolde kabul veya ret kararlarının kolaylaştırılmasını sağlayan bu parametre matematiksel olarak aşağıdaki gibi formüle edilmektedir (Denklem 3.3) [26]:

$$R_a = \int_0^L |y - CL| dx \quad (3.3)$$

Ra: Merkez veya ortalama çizgiden olan aritmetik ortalama sapma

CL: Merkez veya ortalama çizgi

L: Örneklem boyu

yi: Profil eğrisinin ordinate

Eğer yüzey profili N nokta ile örneklemiş ise Ra değeri yukarıdaki denklemin basitleştirilmiş şekli kullanılarak aşağıdaki gibi çözülmektedir.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n (y_i) \quad (3.4)$$

N: Ölçülen sapma adedi

yi: Cebirsel işareti dikkate alınmaksızın profil üzerindeki noktaların ortalama çizgiye olan mesafesidir.

3.3.1.3. Maksimum Yüzey Pürüzlülük Derinliği (Rt)

Profilin en üst noktasını T ve en alt noktasını V ile belirleyen çizgiler arasındaki mesafe, maksimum yüzey pürüzlülük derinliğini ifade etmektedir. Bu derinlik, $R_t = f_2/8r$ formülü ile hesaplanmaktadır [27].

3.3.1.4. Ortalama Pürüzlülük Derinliği (Rz)

Örnek boyu içindeki profilde seçilen en yüksek beş çıkıntı (Y_{pi}) ile en derin beş girinti (Y_{vi}) arasındaki ortalama uzaklık olarak tanımlanır. Aşağıdaki gibi formüle edilmektedir [27]:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{i=5} Y_{pi} - \sum_{i=1}^{i=5} Y_{vi} \right) \quad (3.5)$$

Bütün bunlara rağmen bazı durumlarda bu kriterler yeterli olmayabilir. Zira pürüzlükleri aynı olan iki yüzeyde pürüz dağılımı farklı olabilmektedir. Bu nedenle

yüzey karakteristiğini daha geniş ve kapsamlı olarak tanımlamak için korelasyon fonksiyonu, korelasyon uzunluğu, ortalama dalgalanma, ortalama eğim, eğimlerin standart sapması ve oto korelasyon fonksiyonu gibi teknikleri kullanmak mümkün olabilmektedir [28].

3.3.2. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler

İşleme yöntemi yüzeylerin kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kaliteli bir işlenmiş yüzey, yorulma dayanımı, korozyon direnci ve sürtünme üzerinde olumlu rol oynamaktadır. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü, temas, aşınma, ışık yansımaları, ısı iletimi, yağ filmi tutma ve dağıtma yeteneği, kaplama veya direnç ömrü gibi parçaların çeşitli işlevsel özelliklerine de etki eder. İstenilen yüzey pürüzlülüğü belirlendikten sonra istenilen kaliteye ulaşmak için gerekli olan işlemler seçilir [29]. Yüzey pürüzlülüğü, genellikle aşağıdaki faktörlerin etkisi altındadır [30]:

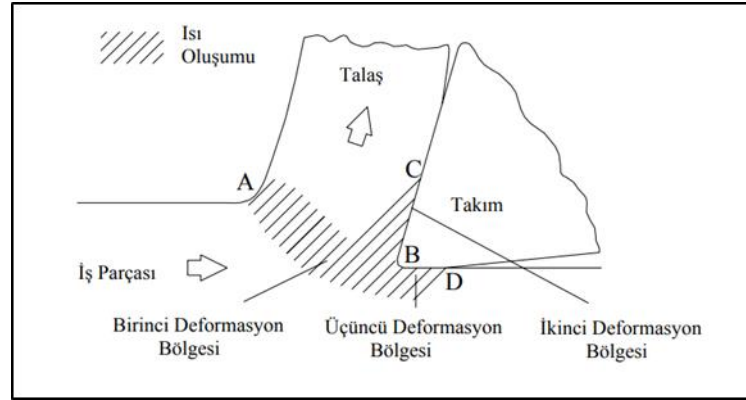
- Takım tezgahının yetersiz rijitliği,
- Tezgâhın kinematik yapısı,
- Yataklama sistemi ile ilgili tezgâh hataları,
- Takım ucu ve takım tutucusundaki üretim hataları nedeniyle oluşan rijitsizlik,
- Takımın yanlış konumlandırılması ve bağlanması,
- Takımın aşınması sonucu oluşan hatalar,
- Çevresel faktörlerin neden olduğu hatalar şeklinde sayabiliriz.

Tırlama veya takım tezgâhı titreşimleri, iş malzemesinin yapısal hasarları, takımın aşınması veya talaş oluşumundaki düzensizlikler gibi sebepler, işleme sırasında yüzeyin bozulmasına neden olabilir. Yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesi ve işleme parametrelerinin uyumu gibi faktörler, ürün kalitesini artırabilir ve istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesine yardımcı olabilir [31].

3.4. KESME SICAKLIĞI

Kesme kuvvetleri için gereken mekanik enerjinin hemen hemen tamamı ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle talaş kaldırmada, kesme kuvvetleri ve gücü, takım aşınması ve ömrü gibi faktörlerin yanı sıra diğer önemli bir faktör ısı oluşumu ve

kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklıktır. Isı ve sıcaklık, kesici takım performansını ve ürün kalitesini önemli şekilde etkilemektedir. Yüksek sıcaklık, takım ömrü ve kesme hızını sınırlayan faktörlerin en önemlilerinden biridir. Oluşan ısının büyük bir kısmı, talaş yüzeyi, kesme bölgesi ve kesme ağıza yakın serbest yüzeyde oluşmaktadır. Bu çerçevede ısının yaklaşık %80' i talaşın oluşması için mekanik şekil değiştirmelerden, %18'i talaşın takım yüzeyinde kaymasından ve %2'si takım ucunda meydana gelen olaylardan oluştuğu belirtilmektedir [12]. Talaş kaldırma işleminde ısı oluşumu üç bölgede oluşmaktadır [8]. Şekil 3.10'da dik kesme işleminde ısı oluşumu verilmiştir.

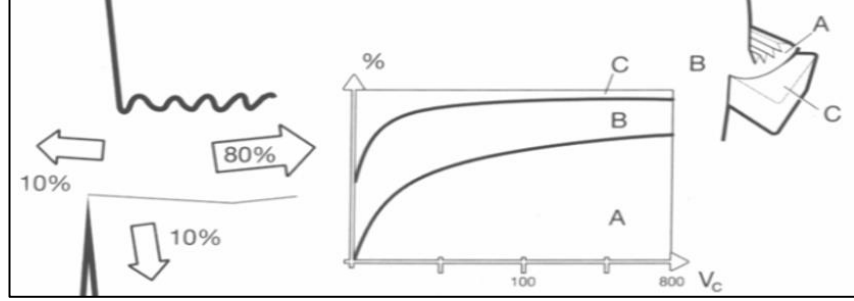


Şekil 3.10. Dik (ortogonal) kesmede ısı oluşumu [32].

Isı üç farklı bölgede oluşurken, dik kesmede plastik deformasyonla oluşan temel ısı kaynağı ilk deformasyon bölgesi (AB)'dir. Burada oluşan ısının çoğu talaş üzerinde kalır ve kesme bölgesinden talaşla birlikte uzaklaştırılır. İkinci deformasyon bölgesi takım-talaş arayüzüdür (BC), burada sürtünme nedeniyle meydana gelen ısı, talaşla birlikte kısmen atılırken, bir miktar ısı da kesici takım gövdesine iletilerek kesme bölgesinden uzaklaştırılır. Üçüncü ısı kaynağı, işlenmiş yüzey ve takım arasındaki serbest kenarda (BD) oluşur ve burada oluşan ısının bir kısmı talaş, diğer kısmı ise iş parçası üzerinden ortamdan uzaklaştırılır. Ancak, kesici takımın ön boşluk açısı kullanıldığında bu bölgede oluşan ısı azalmaktadır [33].

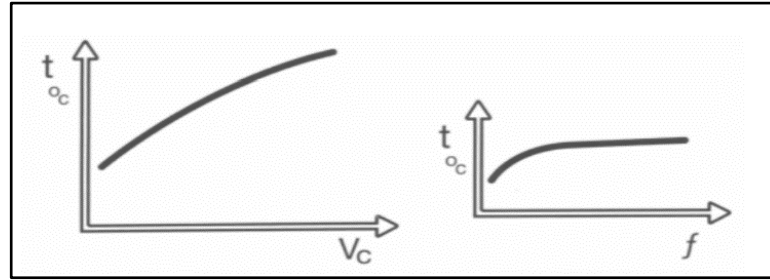
Isının talaş üzerinde oluşan kısmı, talaşla birlikte kesici takımın temasta olduğu temas yüzeyi boyunca takım üzerinde etkili olmaktadır. Metaller üzerinden talaş

kaldırırken, talaş ve iş parçası üzerinde oluşan ısı dağılımı Şekil 3.11’de gösterilmiştir [33]:



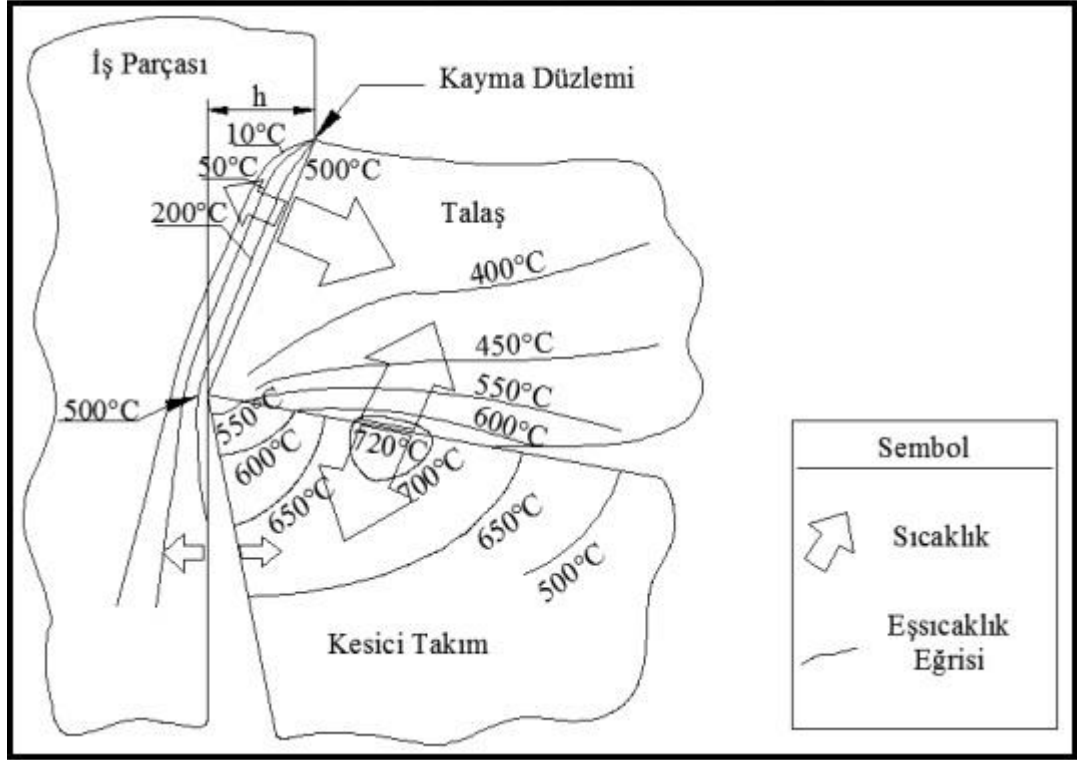
Şekil 3.11. Metal işlemede ısının dağılımı [33].

Kesme işleminde, takım-talaş temas ara yüzeyinde meydana gelen sıcaklıkların ölçülmesinde kullanılan yöntemlerden en sık bilinen “takım-iş parçası ısıl çift” yöntemidir. Temas bölgesinde oluşan bu sıcaklıkların ölçümünde kullanılan, takım-iş parçası ısıl çift yöntemi, kesme parametrelerinin (kesme hızı ve ilerleme miktarı) etkisini göstermek için kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir [34]. Bu parametrelerin sıcaklık ile etkileşimi Şekil 3.12’de gösterilmiştir [33]:



Şekil 3.12. Kesme hızı-sıcaklık ve ilerleme-sıcaklık ilişkisi [33].

Talaşlı imalat esnasında oluşan ısının büyük miktarı, talaş ile kesme bölgesinden uzaklaştırılır. Dik kesme esnasında iki bileşimde (talaş ve iş parçası) oluşan ve deneysel olarak da ifade edilen sıcaklık dağılımları Şekil 3.13’te verilmiştir [16]:



Şekil 3.13. Kesme sırasında talaş ve iş parçası arasındaki sıcaklık dağılımı [35].

Kesici takıma ilerleyen malzemede X noktası, ilk deformasyon bölgesine yaklaşır ve geçer. X noktası, gösterilen bölgeden ayrılana kadar ısıtılmış olup ortaya çıkan ısı talaş içinde hareket eder. Y noktası deformasyona uğrayan her iki bölgelerden geçer ve ikinci deformasyon bölgesinden ısıtılarak ayrılır. Bu nokta, talaş gövdesindeki ısı iletimi yoluyla soğutulur ve talaşta homojen bir termal dağılım meydana getirilir. Bunun sonucunda, kesilen kenardan belirli bir mesafede, en yüksek sıcaklık takım yüzeyi boyunca meydana gelir. İş parçasının içinde yer alan Z noktası, ısıtma birinci deformasyon bölgesi boyunca gerçekleşir [16].

BÖLÜM 4

TAGUCHI METODU

4.1. ÇEVİRİM İÇİ KALİTE KONTROL

Çevrim içi Kalite Kontrol, ürünün üretim sırasındaki ve üretimden sonraki kalite faaliyetlerini kapsayan bir sistemdir. Bu sistem, ürünün tasarımında doğru yöntemlerin kullanılmasıyla ilgilenir [36]. Çevrim içi Kalite Kontrol, üretim ve müşteri ilişkileri olmak üzere ikiye ayrılır. İmalat aşamasında, süreç belirli periyotlar halinde kontrol edilir, değişken parametreler düzenli olarak ölçülür ve hedefe ulaşamıyorsa ayarlamalar yapılır. Arızalı ürünler ya yeniden işlenir ya da atılır. Müşteri ilişkileri aşamasında, müşteri ürünü alıp daha sonra karşılaşacağı sorunlarla ilgili ürün ya onarılır veya müşteriye yeni ürün verilir. Bu durumda ürünü alan kişinin maliyet kaybı karşılanır. Bu aşamada gürültü faktörü etkisizdir [37].

4.2. ÇEVİRİM DIŞI KALİTE KONTROL

Çevrim dışı Kalite Kontrol, müşteri memnuniyetini göz önünde bulundurarak ürün ve proses tasarımının yapıldığı bir sistemdir. Ürün tasarımında, mühendislik bakış açısı ve teknikleri kullanılarak müşteri taleplerini karşılayacak bir ürün prototipi oluşturulur veya mevcut ürünlerde iyileştirmeler yapılır. Proses tasarımında ise, ürünün imalatına uygun proses seçilir. Genichi Taguchi, çevrim dışı kalite kontrolünün hedeflenen kaliteye ulaşmak için üç adımdan oluşması gerektiğini söyleyerek, bu adımların sistem, parametre ve tolerans tasarımını içermesi gerektiğini belirtmiştir [36].

4.2.1. Sistem Tasarımı

Taguchi yönteminin ilk adımı sistem tasarımıdır. Hali hazırda tüm malzemeler değerlendirilir ve sistemde kullanılabilme adına teknolojik yenilikler araştırılır. Bu adımda amaçlanan maksimum müşteri memnuniyeti ve minimum maliyetle yüksek kaliteli ürün tasarımıdır.

4.2.2. Parametre Tasarımı

Parametre tasarımı, üretilmesi veya geliştirilmesi planlanan bir ürünün iyileştirilmesindeki en önemli adımdır. Bu adımda, en uygun parametreler seçilerek, üretim kalitesini olumsuz etkileyebilecek kontrolü sağlanamayan parametreler belirlenir. Burada amaç, kontrolü sağlanamayan parametrelerin etkisini minimumda tutarak, ürünün performansını azaltabilecek değişkenlerin seviyelerini belirlemektir. Bu sayede, ürünün imalatı ve bakımı sırasında ortaya çıkabilecek maliyetler de azaltılmış olur. Ayrıca, ürünün gürültü faktörlerine karşı duyarlılığı da azaltılarak, üretim ve kullanım sırasında daha güvenli bir şekilde kullanılabilir hale getirilir.

Gürültü Faktörü: Kendisinden veya sistemden kaynaklanabilecek farklılıkları en aza indirmek için bu farklılıkların nedenlerini belirlemek için optimum değerler belirlenmelidir. Bunlara gürültü faktörleri denir. İç, dış ve üniteler arası gürültü olmak üzere üç tip gürültü faktörü vardır.

İç gürültü: Kullanım koşullarına göre üretimi tamamlanmış ürünün veya kullanılan üründe herhangi noktasında meydana gelebilecek aşınmadır.

Dış gürültü: Dış etkenlerin neden olduğu değişkenliktir.

Üniteler arası gürültü: Aynı üretim koşullarına rağmen üretimde oluşabilecek farklılıklardır [36].

4.2.3. Tolerans Tasarımı

Üretim maliyetini düşürerek parametre tasarımında hedef tolerans değerini belirlemeye tolerans tasarımı denir [37]. Parametre tasarımında belirtilen hedefe ulaşamadığı durumlarda sapma tespiti, bu saptamalardan kaynaklanan kayıpların belirlenmesi ve saptmaların minimize edilmesidir.

4.3. SİNYAL GÜRÜLTÜ ORANI

Sinyal-gürültü oranı, matematiksel kurallar kullanılarak geliştirilir ve deney tasarımında en iyi değeri belirlemek amacıyla kullanılır. Taguchi yöntemi, hedef faktörün problemin türüne göre üçe ayrıldığını belirtir: en küçük-en iyi, en büyük-en iyi ve hedef değer-en iyi. Her hedef faktörü için ayrı bir sinyal-gürültü oranı tanımlanmıştır. Bu denklemlerde, “Y” kalite değişkenini ifade eder [37].

En Küçük – En İyi

$$Y = 0$$

$$S/N Oranı = -10 \cdot \log \left(\sum \frac{Y^2}{n} \right) \quad (4.1)$$

En Büyük – En İyi

$$Y = \infty \quad (4.2)$$

$$S/N Oranı = -10 \cdot \log \left[\sum \left(\frac{1}{Y} \right)^2 / n \right] \quad (4.2)$$

Hedef Değer – En İyi

$$Y = \text{Hedef değer} \quad (4.3)$$

$$S/N Oranı = 10 \cdot \log \left(\frac{Y^2}{s^2} \right) \quad (4.3)$$

4.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Varyans analizi ikiden fazla değişkenin karşılaştırmasını sağlamak için geliştirilen testlerden biridir. Varyans analizi ANOVA olarak da bilinmektedir. ANOVA testinin ön koşullarından biri her bir değişkenin normal dağılım sergileyen bir ana bileşenden rastgele seçilmiş olmasıdır. Diğer bir ön koşul ise her değişkenin eşit varyansa sahip olmasıdır. ANOVA testi ile sadece karşılaştırma yapılan değişkenler arasında

herhangi bir farklılığın olup olmadığı anlaşılır ama hangi değişkenin diğerinden daha farklı olduğuna cevap vermez [38]. Varyans analizinde değişken sayısına göre; Tek Yönlü ANOVA, Tek Yönlü MANOVA, Çift Yönlü ANOVA ve Çift Yönlü MANOVA dört farklı yöntem kullanılmaktadır [39].

Bağımsız K grup denemesinden elde edilen ve gruplara göre normal dağılan Y verilerinin analizi için yararlanılan varyans analizi yöntemidir. Bu modelde Y verileri K tane bağımsız gruptan elde edilir. Eğer Y ile birlikte değişen ve analize alınacak ortak değişkenler varsa varyans analizine Tek Yönlü ANOVA adı verilmektedir [38]. Birbirinden bağımsız iki değişkenden bir bağımlı değişken üzerindeki etkisini araştırırken, bağımsız değişken ile bağımlı değişkenin üzerine etkilerini ayrı ayrı araştırmak yerine, her ikisinin de etkileşimlerinin ortak etkilerini araştırmak için Çift Yönlü ANOVA kullanılır [40].

Birden fazla bağımlı değişkene tek bir bağımsız değişkenin etki ettiği durumlarda kullanılan analize Tek Yönlü ANOVA analizi denir. Tek Yönlü MANOVA ile ANOVA'nın temel varsayımları birbiri ile aynıdır ve ek olarak ikisi arasında birden fazla bağımlı değişken olmasından kaynaklı kovaryans eşitliği şartı da aranmaktadır [41].

Çift Yönlü MANOVA, Çift Yönlü ANOVA ve Tek Yönlü MANOVA'nın bir karması gibidir. İki bağımsız değişkenin, birden fazla değişken üzerindeki etkisi araştırılır [39].

4.4.1. Kareler Toplamı

Kareler toplamı, genel olarak üç farklı denklemlerle ifade edilebilir. Bu denklemler; genel kareler toplamı (GnKT), gruplar arası kareler toplamı (GAKT) ve grup içi kareler toplamıdır (GİKT). Her bir kareler toplamı için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir [42]:

[n: varyant sayısı m: o gruptaki n sayısı]

$$G_nKT = \sum x - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (4.5)$$

$$GAKT = \left[\frac{(\sum x_1)^2}{m_1} + \frac{(\sum x_2)^2}{m_2} + \dots + \frac{(\sum x_n)^2}{m_n} \right] - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (4.6)$$

$$G\dot{I}KT = G_nKT - GAKT \quad (4.7)$$

4.4.2. Serbestlik Derecesi

ANOVA ve diğer tüm istatistiksel testlerde serbestlik derecesi olarak bilinen değer hesaplanmaktadır. Bu değer, aynı zamanda bir istatistiksel değer hesaplanmasında hangi büyüklükte bir örneklem kullandığını gösterir. Genelde toplam değişken olarak ifade edilen bir çıkartılarak elde edilir. İki grup karşılaştırıldığında ise toplam değişken sayısından iki çıkartılarak bulunmaktadır [43].

4.4.3. Kareler Ortalaması

Kareler toplamı, kendi serbestlik derecesine bölüldüğünde kareler ortalaması bulunur. Kareler toplamının her biri için ayrı ayrı kareler ortalaması hesaplanabilir. Toplamların her biri için eşitlikler aşağıdaki gibi yazılabilir [44]:

$$G_nKO = \frac{G_nKT}{G_nSD} \quad (4.8)$$

$$GAKO = \frac{GAKT}{GASD} \quad (4.9)$$

$$G\dot{I}KO = \frac{G\dot{I}KT}{G\dot{I}SD} \quad (4.10)$$

4.4.4. F Değeri

Varyans analizinde kullanılan test istatistiğinden biri F dağılımıdır. F dağılımı, genellikle sağa çarpık olan bir olasılık dağılımıdır [45]. F-istatistiği, grup ortalamaları arasındaki varyansın, grupların kendi içindeki varyansla karşılaştırılmasıyla bulunur. F-istatistiği ortalamaların kıyaslamasını şu şekilde yapmaktadır [46]:

$$F = \text{grup ortalamaları arasındaki varyans/grupların kendi içindeki varyans}$$

F değerinin artması gruplar arasındaki farkın gruplar içerisindeki farka kıyasla daha büyük bir değer aldığını gösterir. Eğer F değeri 1'e eşit ya da daha küçükse "gruplar arasında fark yoktur" sonucuna ulaşılır. Eğer büyükse "gruplar arasında fark vardır" kararı verilir [46].

4.4.5. Önem Kontrolü

F değeri için hesaplanan anlamlılık düzeyi (p) 0,05 veya 0,05'in altında olduğunda grupların arasında anlamlı bir fark olduğu ortaya çıkar. Ancak ANOVA'da gruplar arası fark görülemez. Gruplar arasında ikili karşılaştırmalar sonucunda bu fark görülebilir. Eğer F değeri için hesaplanan anlamlılık düzeyi 0,05'in üzerinde bir değer çıkarsa gruplar arasında anlamlı bir fark çıkmamış demektir. Anlamlı farkın çıkmadığı durumlarda ikili karşılaştırma ile gruplar arasında farkları incelenmesi gerekmemektedir [43].

4.4.6. Gruplar Arası Varyansın Genel Varyanstaki Payı

İki veya daha fazla örneklemden elde edilen veriler için üç farklı varyans hesaplanır: genel varyans (G_nV), gruplar arası varyans (GAV) ve grup içi varyans ($GİV$). Her biri için hesaplanan varyans eşitlikleri aşağıda belirtilmiştir:

$$G_nV = GAV + GİV \quad (4.11)$$

$$GAV = \frac{GAKO - GİKO}{m} \quad (4.12)$$

m : gruplardaki ortalama varyans sayısı.

$$GİV = GİKO \quad (4.13)$$

Bu durumda, genel varyans 100 kabul edilerek GAV ve $GİV$ değerleri genel varyansa oranla yüzde olarak hesaplanır. $GİV$ 'nin grup varyansı içindeki payının küçük olması, gruplar arası farklılığın önemini artırır [44].

BÖLÜM 5

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hu ve arkadaşları [46] farklı ferrit içerikli üç tip demiryolu tekerlek malzemesinin (ER7, CL60 ve C sınıfı) mikroyapı evrimleri LSCM, SEM, EBSD, TEM ve XRD üzerinden sistematik olarak çalışmışlardır. Mikroyapı evrimi ile aşınma ve RCF davranışları arasındaki korelasyon araştırmışlardır. Mikroyapı evrimleri ile aşınma ve RCF davranışları arasındaki korelasyona ilişkin anlayış, birinci sınıf demiryolu tekerlek malzemelerinin geliştirilmesi için teorik destek sağlayabilmektedir. Kanıtlar, plastik deformasyon sırasında düşük ferrit içeriğine ve yüksek tane arıtma yeteneğine sahip inci çark çeliğinin mükemmel aşınma ve hasar dirençlerine sahip olabileceğini göstermişlerdir.

Angelo ve arkadaşları [47] sırt frenlemenin ER7 çeliğindeki demiryolu tekerleklerinin hasarı üzerindeki etkisi, dökme demir fren bloğu örnekleriyle kuru temasa, ray çelik örnekleriyle kuru temasa ve ray çelik örnekleriyle ıslak temasa maruz kalan numuneler üzerinde çift diskli testler ile simüle etmişlerdir. Malzeme durumu evrimi tahribatsız analizler (ağırlık kaybı, yüzey sıcaklığı, sürtünme katsayısı) ve yıkıcı analizler (yüzey altı sertlik profili ve mikroyapısal analiz) ile değerlendirmişlerdir. Dökme demir numunelerinden aşınma, cırcır, yüzey çatlaması ve malzeme transferi, tekerlek freni temas aşamasında tekerlek çeliği örneklerinde gözlenen başlıca olaylardı. Ray numunesi ile daha sonraki kuru temasta tekrar aşınma ve artan cırcır ve yüzey çatlaması gözlemlenmişlerdir; önceki aşamada sıkışan dökme demir neredeyse tamamen çıkarmışlardır. Yine sıvı tahrikli yüzey çatlağı yayılımı nedeniyle aşınma ve kabuklanma, ray numunesi ile son ıslak temasta gözlemlenmişlerdir. Çatlakların içine kapanmış sıvının basınçlanması nedeniyle ıslak temasta çatlak yayılımı gibi en ciddi hasar mekanizması, geçen bir temas eden vücudun yüküne maruz kalan, sıkıştırılamaz sıvı ile doldurulan bir yüzey çatlağı olan bir vücudun sonlu eleman modeli ile değerlendirmişlerdir. Eşdeğer stres yoğunluğu

faktörünün aralığı elde etmişler ve deneysel yayılma eşiği ile karşılaştırıldığında, bombardımanın beklenmesi gereken kritik çatlak derinliğini belirlemişler. Bu hasar değerlendirme metodolojisi, hasara dayanıklı tasarım konseptine göre, ciddi bombardımanı önlemek ve dolayısıyla tekerlek bakımını planlamak için izin verilen maksimum çatlak derinliğini belirlemek için tam ölçekli tekerleklere genişletilebilir olması kanaatine varmışlardır.

Giğtko ve K. Ciechacki [48] Autodesk Inventor sisteminin uygulanması ile sunulan simülasyon, araştırma sürecine başlamak için bir ön araç olarak görmüşlerdir. Gerçek yük değerleri ve maddi davranışlar yalnızca bir test veya gerçek nesne üzerinde ölçülebilir. Bilgisayar modeli için elde edilen tekerlek parametresi değerleri bir deneme ile doğrulanmalıdır. Autodesk Inventor modelleme ortamı, hesaplamalarında tüm maddi davranış olasılıklarını hesaba katmayan klasik yük durumu modellerine dayanan bir araçtır. Analitik ortam, raylı araç tekerleklerinin sömürülmesi sırasında meydana gelen faktörlerin karmaşık durumunu hesaba katmadığı gibi, üretim sürecindeki tüm teknolojik faktörleri de dikkate almaz. Bu tür simülasyon, üretim sürecine başlamadan önce endüstriyel koşullarda vazgeçilmezdir. Demiryolu araçlarının tekerlek bileşenleri için kâğıtta önerilen malzeme, literatür taraması ve elde edilen simülasyon sonuçları ışığında belirtilen kriterleri yerine getirmektedir. Sunulan varyantlar arasındaki monoblok tekerleğin kütle farkının analizine dayanarak, bu farkın aşırı varyantta ADI (temperlenmiş dökme demirin) avantajına göre %20,7 olduğu belirlenmiştir.

Okagata [49] tarafından belirtildiği üzere, demiryolu araçlarının güvenli çalışmasını destekleyen en önemli parçalardan biri aks ile bir demiryolu tekerleğidir. Tekerlekler, otomobillerin tüm ağırlığını taşırlar ancak ciddi bir arıza durumunda, diğer parçaların yedek sisteminin uygulanabileceği bir arıza emniyetli yapısı tasarlanamaz. Bu nedenle, tekerleklerin tasarımında kesinlikle yüksek bir güvenilirlik düzeyi gereklidir. Bu nedenle, tekerleklerin tasarımında en önemli ve temel özellik, güçtür. Bununla birlikte, tekerleklerin kırılmaz olması önemli bir özelliktir ve bu nedenle, performans açısından avantajlı olmak için aşınma direnci, termal çatlak direnci ve gürültü / titreşim gibi mukavemet dışındaki özellikler de dikkate alınır.

Özellikle, tekerlekler harcanabilir parçalardır ve ömürleri bakım maliyetinden tasarruf etmede önemli bir rol oynar.

Binali ve arkadaşları [50] kesme parametrelerinin ve yağlamanın Nimax kalıp çeliğinin işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Bu çalışmada kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve yağlama parametreleri değiştirilerek tam faktöriyel tasarıma göre frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme sıcaklığı, farklı değerler ve işlem parametreleri türleri ile küçük değişiklikler göstermiştir. Kesme hızı ve ilerleme hızı, kesme sıcaklığını en önemli şekilde etkilemiştir. MQL ortamını işleme ortamına dahil etmek, sıcaklığı önemli ölçüde azaltmış ve MRR'yi arttırmıştır. Artan MRR değerlerinde MQL ortamının önemi artmış, bu da kuru ortamın etkisi ile MQL ortamı arasındaki farktan da olduğunu göstermişlerdir.

Asiltürk ve arkadaşları [51] çalışmada AISI 4140 çeliği CNC tezgahında tornalamıştır. Tornalama deneyleri sonrasında yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve akustik emisyon değerleri ölçmüştür. Matlab programı ile kural tabanlı bir bulanık mantık modeli oluşturulmuşlardır. Deneysel sonuçlar ve bulanık model sonuçları karşılaştırılmıştır. Kural tabanlı bulanık mantık modellemenin tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve akustik emisyon için bir karar alternatifi olduğu sonucuna varmışlardır. Tahmin modellerinde hata payı her zaman dikkate almışlar ve amaç bu hataları minimum seviyelerde tutmak ve bundan sonraki çalışmalara ışık tutmak istemeleridir. Deneysel sonuçlar ile bulanık modelleme ile yapılan tahmin sonuçları karşılaştırıldığında kural tabanlı bulanık mantık modelinin başarılı olduğu görmüşlerdir.

Literatürde yapılan araştırmaların sınırlı olduğu göz önüne alındığında, bu konuda çok az sayıda çalışmanın bulunduğu görülmektedir.

BÖLÜM 6

MALZEME VE YÖNTEM

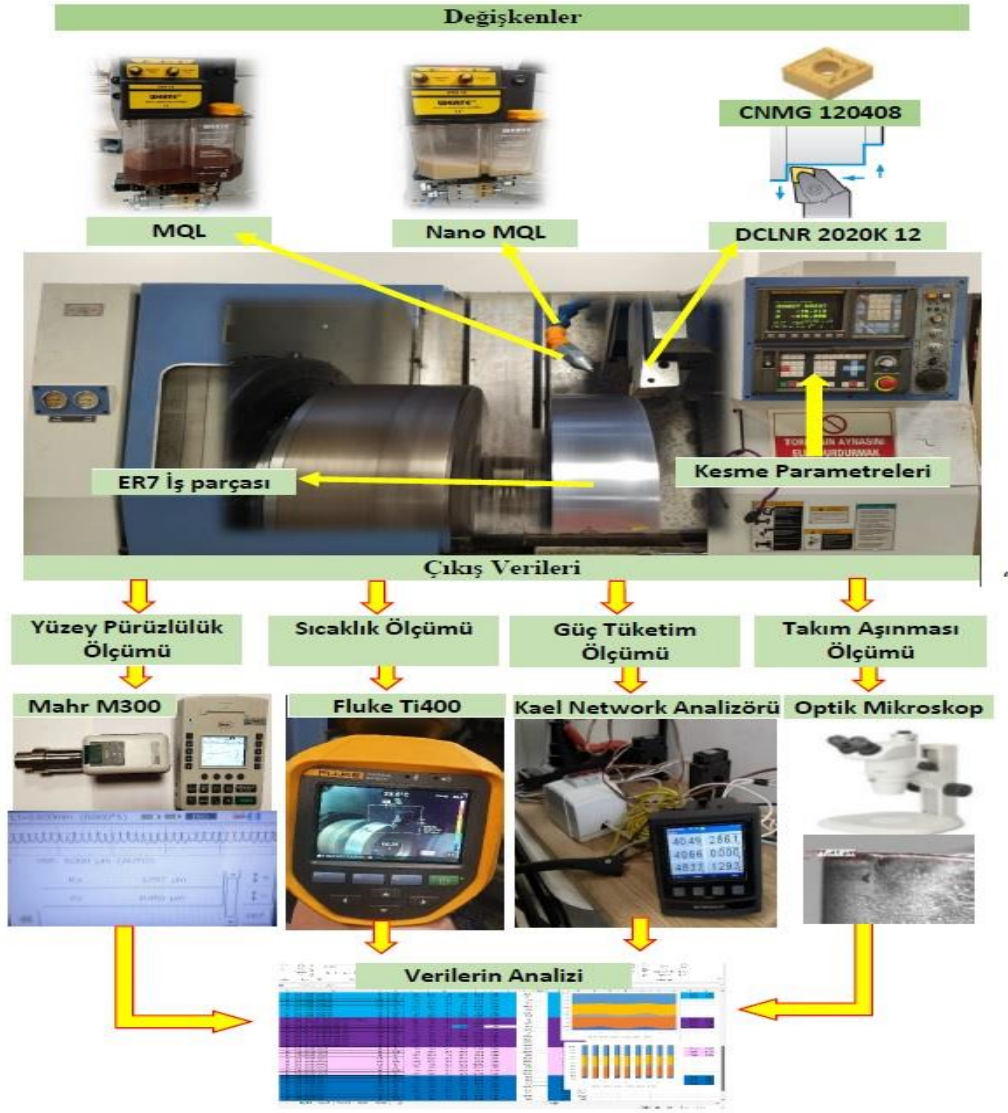
6.1. MALZEME

Avrupa demiryolu ağlarında kullanılan tren tekerleklerinin özelliklerini belirlemek için EN 13262 standardı kullanılmaktadır. Bu standartta tren tekerleklerinde kullanılmak üzere ER6, ER7, ER8 ve ER9 olmak üzere dört farklı çelik sınıfı tanımlanmıştır. Bu kaliteler düşük karbon içeriğine (%0,55 C), perlitik ve ferritik yapılara sahiptir. ER6 ve ER7 çelik kaliteleri genellikle vagon tekerleği malzemesi olarak kullanılır. Tren tekerlekleri dövme işlemi ile üretildikten sonra geometrik şekli, ebadı ve ağırlığı nedeniyle özel dikey Computer numerical control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol) yani CNC tornalarda işlenir. Üniversite laboratuvarlarında ticari olarak üretilen tren tekerleklerinin işlenmesi için yeterli boyutta torna olmadığından, test iş parçası olarak kullanılmak üzere tekerlek göbeğinden 170×50 mm boyutlarında ER7 kalitesinde malzeme alınmıştır. Tornalama deneylerinde kullanılan ER7 kalitesinde çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’ de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ER7 çelik örnekleri Kardemir A.Ş’den alınmıştır. Kardemir A.Ş tren tekerlekleri üreten ve ticari olarak satan firmadır.

Çizelge 6.1. Tren tekerinin üretimi için çelik kaliteleri [2].

Element	Yüzde ağırlık % (max./maks)
C	0,52
Mn	0,80
Si	0,40
S	0,015
P	0,020
Cr	0,30
Ni	0,30
Cu	0,30
Mo	0,080
V	0,060
Cr+Ni+Mo	0,50
H,ppm	2,0

Ön çalışmalarda kesici takım üreticilerine ve sektör tavsiyelerine göre 1 mm'lik sabit kesim derinliği, üç farklı kesme hızı (200, 250, 300 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0,15, 0,20, 0,30 mm/dev) birlikte kullanılmıştır. Kesme derinliği, tornalama sırasındaki MRR (veya kesme uzunluğunun) ile doğru orantılıdır. MRR'nin (veya kesme uzunluğunun) sabit tutulması nedeniyle, kesme derinliği 1 mm'de sabit tutulur. Tornalama sırasında kesici takım ve iş parçası üzerindeki sıcaklıklar Fluke Tİ400 kızılötesi kamera ile ölçülmüştür. Kızılötesi kamera otomatik odaklamaya, 0 ° C ila 1200 ° C sıcaklık ölçüm aralığına ve ± 2 °C ölçüm doğruluğuna sahiptir. Tornalama sırasında CNC torna tezgahının güç tüketimini hassas bir şekilde ölçmek için üç adet 60 / 5A akım transformatörlü KAEL ağ analizörü kullanıldı. Her işleme parametresinden sonra Mahr M300 pürüzlülük cihazı ile iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Her ölçüm için iş parçası yaklaşık 72° döndürüldü, beş farklı bölgeden ölçüldü ve ortalama değer alınarak değerlendirildi. Deney düzeni Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel kurulum

Ön tornalama testlerinden optimum parametreler belirlendikten sonra optimum koşulları belirlemek için kuru MQL ve nano-MQL kullanıldı. SBH Şirketi (İstanbul, Türkiye) tarafından tedarik edilen ve Werte tarafından kullanılan bir MQL (Minimum Miktarlı Yağlama) sistemi kullanılmıştır. Kesme sıvısı, üretici tarafından temin edilen ek bir hava pompası ile iki boyutta dağıtılmıştır. MQL sistemi, Wertemist adlı uçucu ve tescilli bir yağlayıcıyı kullanmıştır. Daha sonra, 40 ila 50 nm boyutlu nano-HBN (Born Nitride) partikülleri, ticari bir bitkisel kesme sıvısıyla %1 ağırlık oranında karıştırılmıştır. Elde edilen sıvı, nanoparçacık kümelenmesini azaltmak amacıyla Hydra ultrasonik karıştırıcı ile bir saat boyunca çalkalanmıştır. Ayrıca, nanometalik partiküllerin kesme sıvısıyla homojenliğini artırmak için MTops

MS300HS tarafından geliştirilen manyetik bir karıştırıcı da kullanılmıştır. Kullanılan hava basıncının 5 bar'da tutulmasını sağlamak için bir manometre kullanılmıştır. Tüm soğutma ayarlarında akış hızı 100 mL / saat olarak ayarlanmıştır. Deneysel bir tasarımda yüzey pürüzlülük (Ra), güç tüketimi (W) ve sıcaklık ($^{\circ}$ C) gibi kalite özellikleri kullanılmıştır. Kesme hızı (V) ve ilerleme miktarı (f) ana düzenleyici unsurlar olarak bulunmuştur. Minitab 17 yazılımı kullanılarak girdi parametrelerinin ve bunların ölçülen çıktılar üzerindeki etkileşimlerinin etkisini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır.

6.2. TAKIM TEZGÂHI VE DENEY DÜZENEĞİ

Testler için Karabük Üniversitesi'nin TTC-550 CNC torna tezgâhı kullanıldı. TTC-550 CNC torna tezgâhının teknik özellikleri çizelge 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2 tezgâhın resmi verilmiştir.



Şekil 6.2. TTC-550 CNC torna tezgâhı

Çizelge 6.2. TTC-550 CNC torna tezgahının teknik özellikleri

Tezgâh gücü	7,3 kW
Max devir sayısı	5000 dev/dak
Kesici bağlama hane sayısı	12
Ölçü hassasiyeti	0,01mm

6.3. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCU

Deneylerde Korloy firmasının ISO standartlarına göre CNMG 120408 P20 kalitesinde takımlar ve uygun takım tutucular kullanılmıştır.

Kesme derinliği, tornalama sırasındaki MRR ile doğru orantılıdır. MRR'nin (veya kesme uzunluğunun) sabit tutulması nedeniyle, kesme derinliği 1 mm'de sabit tutulur.

6.4. DENEY PARAMETRELERİ

Tornalama işlemi için deneylerde kullanılan kesme parametreleri verilmiştir. Ön deneylerde kesici takım üreticilerine ve sektör tavsiyelerine göre 1 mm'lik sabit kesim derinliği, üç farklı kesme hızı (200, 250, 300 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (0,15, 0,20, 0,30 mm/dev) birlikte kullanılmıştır. Belirlenen parametreler sonucunda ER7 Çeliği işlenmiştir, Çizelge 6.3'te parametreler verilmiştir.

Çizelge 6.3. Deney parametreleri

Kontrol faktörleri	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesici takım	A	CNMG	CNMG	CNMG
Kesme hızı (m/dak)	B	200	250	300
İlerleme miktarı	C	0,15	0,20	0,30

6.5. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ

Talaşlı imalat yapılırken takım ve iş parçası arasında sürtünme nedeniyle ısı oluşur. Bu ısı, yapılan işlemin önemli ipuçlarını verir ve işlemin kalitesi hakkında bilgi sağlar. Sert malzemelerde talaş kaldırma esnasında yüksek sıcaklıklara ulaşmasından

kaynaklı takımda erken aşınmalara neden olabilir, bu nedenle sıcaklık talaşlı imalatta önemli bir parametredir.

Bu çalışmada tornalama esnasında sıcaklık ölçümleri Fluke Tİ400 kızılötesi kamera ile yapılmıştır. Fluke Tİ400 kızılötesi cihaz görseli Şekil 6.3’da teknik bilgiler de Çizelge 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Fluke Tİ400 kızılötesi kamera

Çizelge 6.4. OPTRIS PI456 termal kamera teknik özellikleri

Sıcaklık ölçüm aralığı (min./maks.)	-20°C ila +1200°C
Kızılötesi Spektral Bant	7,5 µm- 14 µm (uzun dalga)
Termal hassasiyet (NETD)	30°C hedef sıcaklığında ≤ 0,05°C (50 mK)
Detektör tipi	320 x 240 piksel
Çerçeve Hızı	60 Hz
Boyut	27,7 cm x 12,2 cm x 16,7 cm

6.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Yüzey pürüzlülüğü Mahr M300 pürüzsüzlük cihazı ile her işleme parametresinden sonra ölçüm yapılmıştır. Belirlenen kesme uzunluklarında iş parçası yaklaşık 72° döndürülerek beş farklı bölgeden ölçüm yapılmıştır ve ölçülen beş değer ortalaması alınmıştır. Deneyde yüzey pürüzlülüğünün ölçümü için kullanılan cihaz Şekil 6.4’ de görsel olarak eklenmiştir ve Çizelge 6.5’da cihaz özellikleri verilmiştir.



Şekil 6.4. Mahr M300

Çizelge 6.5. Yüzey pürüzlülük cihazının özellikleri

Ölçme Yöntemi	Tarama ucu yöntemi
Ölçme aralığı μm	350-180-90 μm
Temas hızı	0,5 mm/s
Tarama ucu	2 μm
Ölçüm kuvveti	0,7 mN
Kalibrasyon İşlevi	Dinamik
İşletim Sıcaklık Aralığı	+5 °C± 40 °C
Depolama için Sıcaklık Aralığı	-15 °C± 55 °C
Mm cinsinden Tahrik ünitesi için (U x G x Y) boyutları.	139 x 26 mm
Ölçüm aleti için mm cinsinden (U x G x Y) boyutları.	190 x 140 x 75 mm
Ağırlık Tahrik ünitesi	Yaklaşık 300 g

6.7. TAGUCHİ OPTİMİZASYONU

Taguchi optimizasyonu, üretim sürecinde parametrelerin ve faktörlerin optimize edilmesiyle maliyetleri düşürmeyi, kaliteyi artırmayı ve müşteri memnuniyetini sağlamayı hedefler. Yöntem, eksikliği azaltmak, varyansı minimize etmek ve süreç performansını iyileştirmek için istatistiksel teknikler, deney tasarımı ve analizleri kullanır.

Taguchi optimizasyonunda, eksiklik azaltma (robustluk) ve parametre optimizasyonu için tasarım parametreleri ve faktörlerin etkilerini anlamak için özel bir deney tasarımı kullanılır. Genellikle Taguchi L-düzeyli tasarım kullanılır. Bu tasarım, minimum deney sayısı ile maksimum bilgi sağlayacak şekilde seviyelerin ve kombinasyonların seçilmesini sağlar. Deney tasarımında en iyi değer belirlenmesi için farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Bu çalışmada, S/N oranının En Büyük – En İyi

değeri seçilmiştir. Aşağıdaki denklemde bulunan Y, kalitenin değişkenliğini ifade etmektedir ve en büyük-en iyi S/N oranı için seçilmiştir.

En Büyük – En İyi

$$Y = \infty$$

$$S/N \text{ Oranı} = -10 \cdot \log \left[\sum \left(\frac{1}{Y} \right)^2 / n \right] \quad (6.1)$$

Bu çalışmada, Taguchi (L_{27}) deney tasarımı kullanılarak, kesici takım kalitesinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesme sıcaklıkları (T) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde, kontrol faktörleri ve seviyeleri belirtilmiştir.

6.8. MQL VE NANO-MQL

Ön tornalama deneyleri yapıldıktan sonra belirlenen optimum parametreler ile optimum koşulları belirlemek için kuru kesme, MQL ve nano-MQL de kullanılmıştır. Kullanılan MQL ve nano-MQL özellikleri çizelge 6.6'de verilmiştir.

Çizelge 6.6. MQL soğutucuların özellikleri

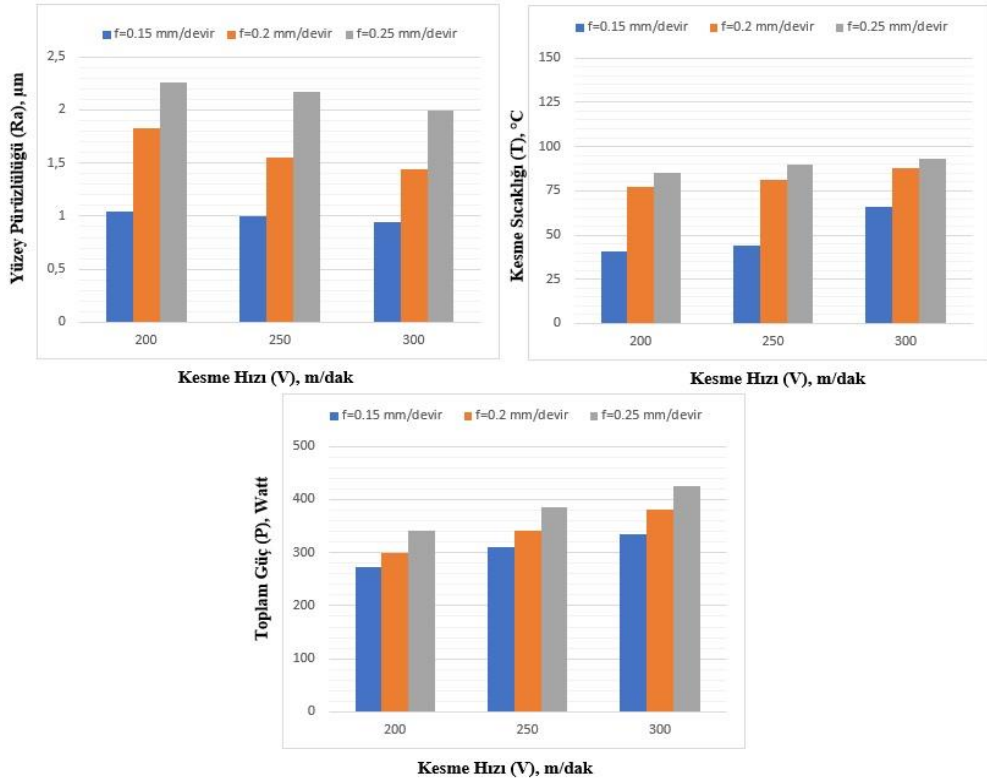
Property	MQL	Nano-MQL
Yoğunluk (kg/m ³)	0.9	0.92
Kinematik viskozite (mm ³ /s) @ 40 °C	5.3	2.7
Nanoadditive parçacıklar	-	hBN
Nano hacim konsantrasyonu	-	1%
Püskürtme Basıncı (bar)	5.0	5.0

BÖLÜM 7

BULGULAR

7.1 ÖN DENEYLER

Ön deneylerde üç farklı kesme hızı ve ilerleme miktarı kullanılmıştır. Bu parametrelere göre işleme çıktıları (yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi) Şekil 7.1’ de verilmiştir.



Şekil 7.1. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve toplam güç tüketimi üzerindeki etkisi

Şekil 7.1’e göre, maksimum yüzey pürüzlülüğü 200 m/dak ve 0.25 mm/dev hızında elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü ise 300 m/dak ve 0.15 mm/dev hızında elde edilmiştir. İlerleme miktarı 0.15 mm/dev’den 0.20 mm/dev’e veya 0.15 mm/dev’den 0.25 mm/dev’e arttırıldığında, yüzey pürüzlülüğü sırasıyla %52.11 ve

%111 artmıştır. Bu durum artan ilerleme miktarına bağlı olarak birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasıyla açıklanabilir. 0.20 mm/dev ilerleme miktarında yüzey pürüzlülüğü değeri kesme hızının 200, 250 ve 300 m/dak olduğu durumlarda sırasıyla 1.828, 1.554 ve 1.439 μm 'dir. Kesme hızı 200'den 250 m/dak'a veya 200'den 300 m/dk'ya arttırıldığında, yüzey pürüzlülüğü sırasıyla %14.99 ve %21.28 azalmıştır.

Şekil 7.1'e göre, en yüksek kesme sıcaklığı 300 m/dak ve 0,25 mm/dev hızlarında gerçekleşirken, en düşük kesme sıcaklığı 200 m/dak ve 0,15 mm/dev hızlarında kaydedilmiştir. Kesme hızı arttıkça, takım ile iş parçası arasındaki sürtünme arttığından kesme sıcaklıklarında bir artış meydana gelir. Kesme işlemi sırasında sıcaklıkların yükselmesi, takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Ölçülen değerlere göre, 300 m/dak ve 0,15 mm/dev hızlarında kaydedilen kesme sıcaklığı 66°C , 0,20 mm/dak hızında 88°C ve 0,25 mm/dev hızında 93°C olarak ölçülmüştür. İlerleme miktarı 0,15 mm/dev'den 0,20 mm/dev'e çıkarıldığında kesme sıcaklığı %33,3 artmış, 0,15 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e çıkarıldığında ise kesme sıcaklığı %40,9 artmıştır. 0,25 mm/dev ilerleme miktarıyla 200 m/dak hızında 85°C , 250 m/dak hızında 90°C ve 300 m/dak hızında 93°C kesme sıcaklığı değerleri elde edilmiştir. Kesme hızının 200 m/dak'dan 250 m/dak'a veya 200 m/dak'dan 300 m/dak'a çıkarılmasıyla sırasıyla sıcaklık %5,88 ve %9,41 oranında artmıştır. Sıcaklık için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, etkin parametrenin kesme hızından (%10,597) yaklaşık yedi kat daha yüksek (%74,929) ilerleme miktarı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, daha düşük işleme sıcaklıkları elde etmek için önerilen kesme hızı 200 m/dak ve ilerleme miktarı 0,15 mm/dev'dir. Hata değerleri, bu çalışmada dikkate alınmayan diğer değişkenlerin (tezgah titreşimleri, zemin titreşimleri, malzemenin mikro yapısı gibi) varlığıyla açıklanabilir. Hata değerleri %1,648 olarak hesaplanmıştır.

Çeşitli kesme hızları ve ilerleme miktarlarıyla birlikte toplam güç çıkışı belirlenmiştir. Kesme hızı için yüksek ve ilerleme miktarları için ise düşük güç tüketimini sağlamıştır. En düşük güç tüketimi, 200 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında gözlenmiştir. 300 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında, Şekil 7.1'deki grafik 335,3 W güç tüketimini göstermektedir.

0,20 mm/dev ilerleme miktarında güç tüketimi 380,3 W'a yükselmiştir. 300 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/dev ilerleme miktarında ise 425,3 W ölçülmüştür. İlerleme miktarı değeri 0,15 mm/dev'den 0,20 mm/dev'e yükseltildiğinde %13,42 ve 0,15 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e yükseltildiğinde ise %26,84 oranında güç tüketiminde artışlar meydana gelmiştir. CNMG kesici takımında, 0,25 mm/dev ilerleme miktarında, 200 m/dak kesme hızında 340,3 W, 250 m/dak kesme hızında 385,3 W ve 300 m/dak kesme hızında 425,3 W güç elde edilmiştir. Kesme hızları 200 m/dak'tan 250 m/dak'a çıkarıldığında %13,22, 200 m/dak'tan 300 m/dak'a çıkarıldığında ise %24,98 oranında güç tüketimi artışı gözlenmiştir. Güç tüketimi için ANOVA sonuçları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Değerler incelendiğinde etkin parametrenin ilerleme miktarı olduğu görülmektedir. İlerleme miktarının PCR'si, kesme hızı parametresinin PCR'sinden yaklaşık %2 daha yüksektir. İlerleme miktarının etkili oranı %50,46 olarak belirlenirken, kesme hızının etkisi %48,311 olarak tespit edilmiştir. Hem kesme hızı hem de ilerleme miktarı değerleri istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu bağlamda, daha düşük bir enerji tüketimi için 200 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarı kombinasyonu önerilmektedir. Ön deney sonuçlarına dayanarak, MQL ve nano-MQL testleri için en uygun (en düşük) yüzey pürüzlülüğünü sağlayan bir dizi kesme parametresi (koyu renkle vurgulanmıştır) seçilmiştir. Bu tercihin nedeni, tren tekeri üreticileri tarafından servis sırasında tren tekerleğinin performansı için yüzey pürüzlülüğünün en önemli faktör olarak kabul edilmesidir.

Çizelge 7.1. Kesici takıma göre elde edilen deneysel ve tahmini sonuçların tablosu

Deney No.	Kesme Hızı (V) [m/dak]	İlerleme Miktarı (f) [mm/dev]	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) [µm]	Regresyon Sonuçları Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) [µm]	Toplam Güç [W]	Regresyon Sonuçları Toplam Güç [W]	Sıcaklık [° C]	Regresyon Sonuçları Sıcaklık [° C]
1	200	0,15	1,040	1,081	273,3	273,272	41	39,861
2	200	0,2	1,828	1,736	300,3	301,522	77	75,778
3	200	0,25	2,264	2,315	340,3	339,106	85	87,361
4	250	0,15	0,999	0,987	310,3	308,189	44	48,111
5	250	0,2	1,554	1,599	340,3	342,189	81	79,778
6	250	0,25	2,168	2,134	385,3	385,522	90	87,111
7	300	0,15	0,946	0,917	335,3	337,439	66	63,028
8	300	0,2	1,439	1,486	380,3	377,189	88	90,444
9	300	0,25	1,996	1,978	425,3	426,272	93	93,528

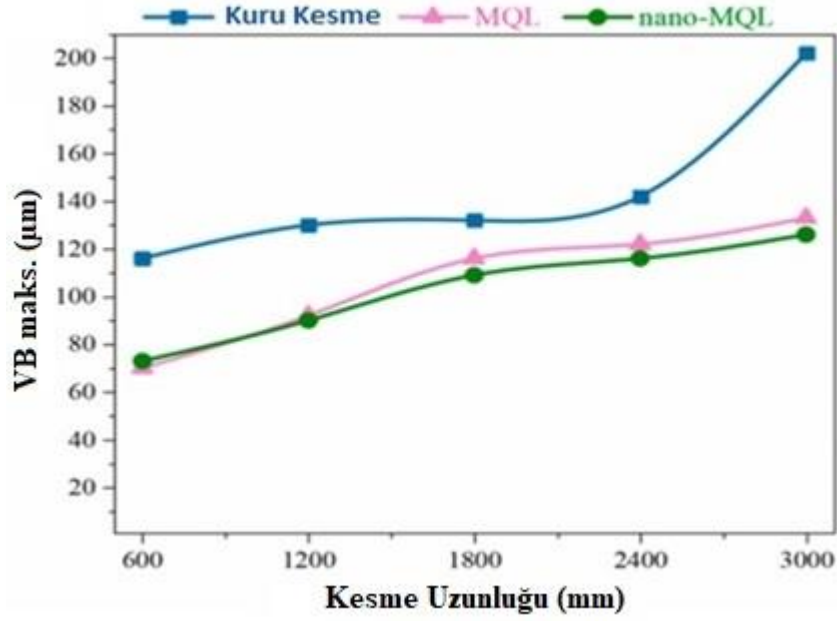
Çizelge 7.2’de, analiz edilen çıktıkların ANOVA tablolarından elde edilen p değeri ve yüzde katkısı (PCR) sonuçların gösterilmektedir. Önemli parametreler ve etkileşimleri koyu renkle vurgulanmıştır (p-değeri <0.05'e göre) [45,46]. Tablodan, %94,087 ile yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli kesme parametresinin ilerleme miktarı olduğu, ardından %4,485 ile kesme hızı olduğu görülmektedir. Tablodaki çıkan sonuçlara göre kesme hızı ve ilerleme miktarı arasındaki doğrusal etkileşimler önemsizdi. Bu nedenle, en düşük yüzey pürüzlülüğünü sağlayan kesme parametrelerinin 300 m/dak ve 0,15 mm/dev olduğu dikkate alınarak -ANOVA sonuçlarına göre- çalışmanın ana bölümünde MQL testleri için işleme çıktıkları üzerinde ilerleme miktarının önemli bir etkisi olması beklenmektedir.

Çizelge 7. 2. Ön testlerde yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi için ANOVA sonuçları

	Yüzey Pürüzlülüğü		Kesme Sıcaklığı		Güç Tüketimi	
	p- değeri	PCR(%)	p- değeri	PCR(%)	p- değeri	PCR(%)
Kesme Hızı- V(m/dak)	0.0310	4.485	0.022	10.597	0.00007	48.311
İlerleme Hızı-f (mm/dev)	0.0004	94.087	0.001	74.929	0.00007	50.463
V x V	0.8440	0.014	0.333	0.730	0.26813	0.091
F x f	0.5500	0.138	0.025	9.723	0.11164	0.245
V x f	0.3560	0.362	0.129	2.373	0.03008	0.744
Hata		0.915		1.648		0.147
Toplam		100		100		100

7.2. AŞINMA DENEYLERİ

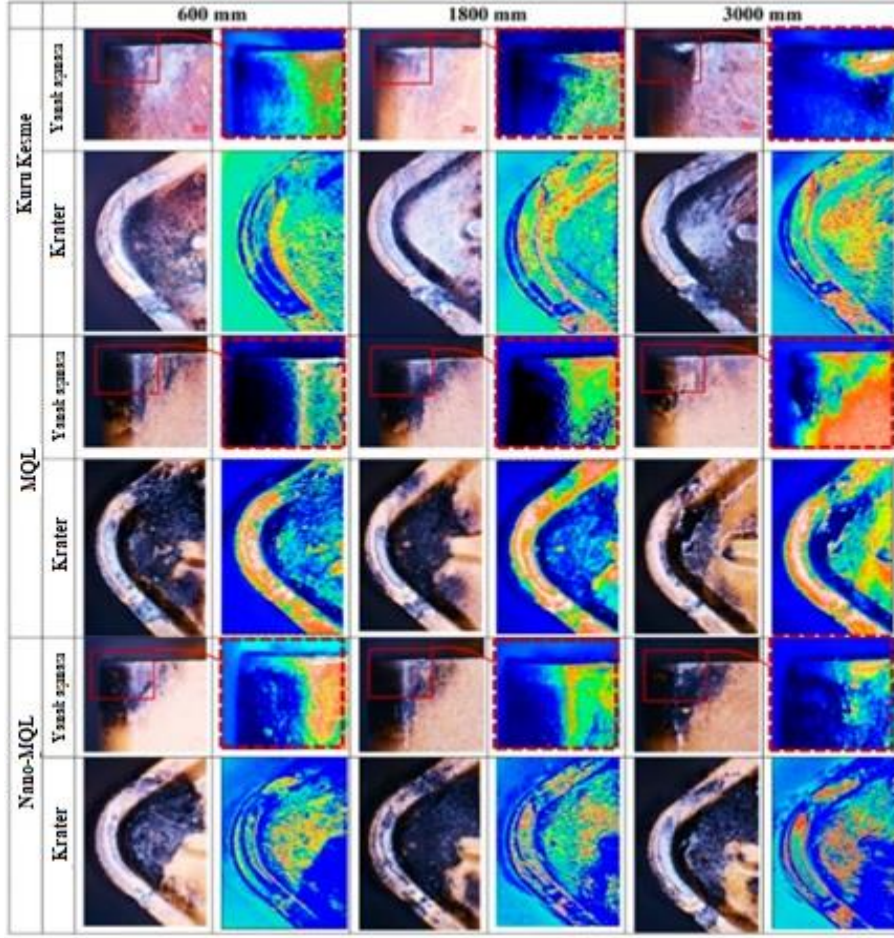
Bu çalışmada, kuru kesme koşullarında kullanılan kesme parametrelerinin optimum değerleri dikkate alınarak farklı işleme koşullarında tornalama deneyleri yapılmıştır. Serbest yüzey aşınması maksimum 0,2 mm'ye ulaştığı zaman takım performansı değerlendirilmiştir [52]. Şekil 7.2’de, işleme koşullarına ve kesme uzunluğuna bağlı olarak takım aşınmasının değişimini göstermektedir.



Şekil 7.2. $V_c = 300\text{m / dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm / dev}$ 'de kanat aşınması değişkeni

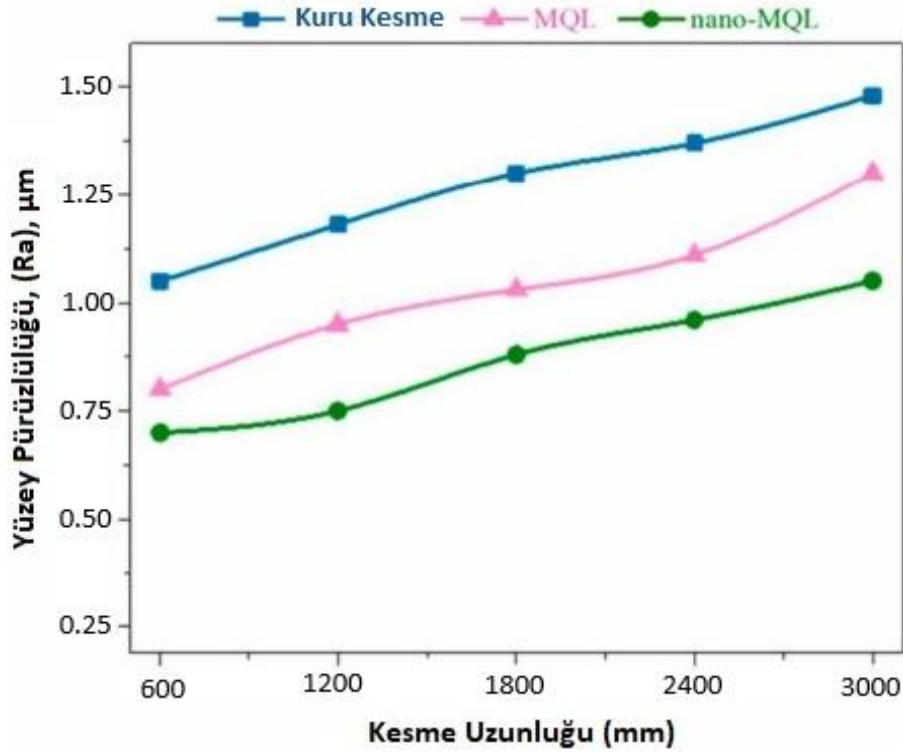
Şekil 7.2'den, kesme uzunluğuna bağlı olarak farklı işleme koşullarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda oluşan takım aşınmasını göstermektedir. Artan kesme uzunluğuna bağlı olarak tüm değişkenlerde serbest yüzey aşınmasının (VB) arttığı görülmekte ve bu durum beklenen bir davranış olarak bilinmektedir. Beş farklı kesme uzunluğunda ölçülen aşınma mekanizmasında $116\ \mu\text{m}$ ile en yüksek miktar kuru kesme koşullarında elde edilmiştir. MQL ve nano-MQL ile yapılan deneylerde ise aşınma miktarı sırasıyla 70 ve $73\ \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. MQL ve nano-MQL ile yapılan deneylerde aşınma miktarındaki değişim oranı dördüncü aşama ölçümlerine göre daha yüksek olmasına rağmen, beşinci aşamada kuru kesim koşullarında yapılan testte takım ömründe hızlı bir bozulma ve aşınma miktarı ($0,2\text{ mm}$) gözlenmiştir. Kuru işleme koşullarında yüksek sıcaklık değerine ulaşılması bu durumu açıklamaktadır. Son aşama dikkate alındığında en yüksek takım performansının nano-MQL'de, en düşük takım performansının ise kuru kesme koşullarında elde edildiğini söylemek mümkündür. Bu durumu orantılı olarak ifade etmek gerekirse, kesme uzunluğuna bağlı olarak uygulanan MQL ve nano-MQL uygulamalarının kuru kesme koşullarına göre son aşama ölçümlerinde VB değerinde sırasıyla yaklaşık %34,1 ve %37,6 oranında daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Soğutma sıvılarının, işleme proseslerinde kesici takım-iş parçası temasında sürtünmeyi azaltan ince bir film tabakası oluşturduğu bilinmektedir. Ek

olarak, kesme bölgesindeki sıcaklıklardaki düşüşün takım aşınmasını geciktirdiği söylenebilir [53]. Bu koşullar, MQL ile gerçekleştirilen işleme koşullarının kuru işlemeye göre daha iyi sonuçlar vermesiyle açıklanabilir. Nano parçacıklar eklenerek elde edilen nano-MQL işleminin diğer işleme koşullarına göre daha verimli olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bu, nano katkı maddelerinin kesme bölgesinde daha iyi yağlamaya ve dolayısıyla daha düşük kesme sıcaklıklarına neden olmasıyla açıklanabilir [54]. Talaşlı imalat işlemlerinde maliyetler açısından kesici takım maliyetlerinin önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir ve nano-MQL ve MQL ile talaşlı imalat işleminin verimlilik açısından kuru talaşlı imalattan daha uygun olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca çevre dostu kesme yağları ile MQL yöntemi kullanıldığında çalışan sağlığı ve çevre açısından oldukça güvenlidir [55]. Bu yağlar, ilave bir işleme gerek kalmadan kesici takım ile iş parçası arasında oluşan ısı ile buharlaşarak tüketilir. Deneyler sonucunda kesici takım üzerinde oluşan yüzey pürüzlülüğü ve krater aşınma görüntüleri Şekil 7.3'te verilmiştir.





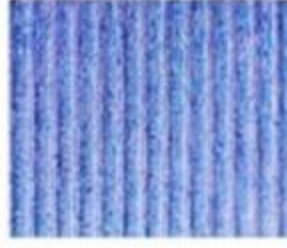



Şekil 7.3. Kesici takım, farklı kesme koşullarında görüntüleri

İşleme çıktısı olan yüzey pürüzlülüğü birçok parametreye bağlı olarak değişir. Şekil 7.4'te, farklı işleme uzunluklarındaki işleme koşullarına göre Ra değerlerinin değişimini göstermektedir. Kuru işleme koşullarına kıyasla, yağlama yöntemlerinin yüzey kalitesi açısından önemli bir etkiye sahip olduğu (Şekil 7.4).



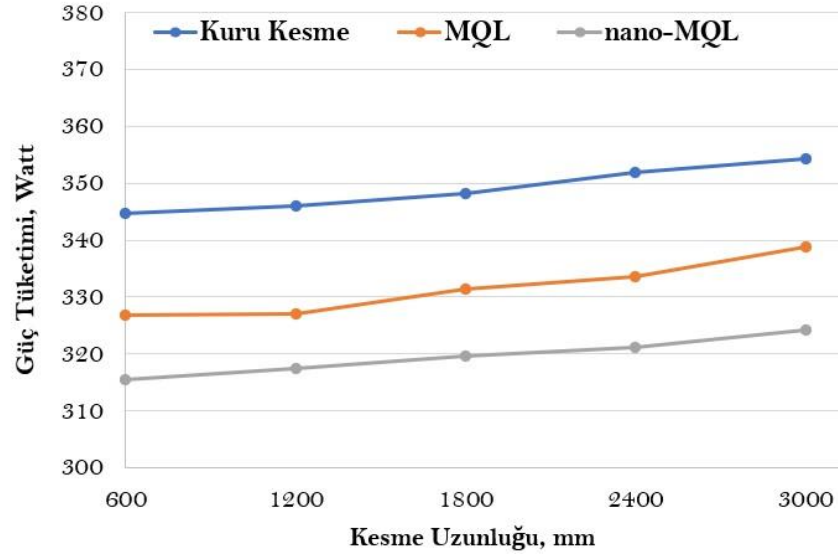
Şekil 7.4. $V_c = 300\text{m/dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm/dev}$ cinsinden yüzey pürüzlülüğü değişkeni

Ölçümlerin ilk aşamasında kuru işleme koşullarında en yüksek Ra değeri $1,05\ \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Aynı koşullar ile karşılaştırıldığında MQL ile elde edilen sonucun yaklaşık %24, nano-MQL ile elde edilen sonucun ise yaklaşık %34 daha düşük olduğu görülmektedir. MQL uygulaması, takım–iş parçası çifti arasındaki teması ve sürtünmeyi azalttığı için daha iyi yüzey kalitesi sağlar. Kesme bölgesinde iyi yağlamaya ek olarak, nanopartiküller iyi ısı iletkenliğine sahiptir ve ısıyı kesme bölgesinden verimli bir şekilde çıkarabilir, bu nedenle yüzey kalitesini iyileştirir [56]. Son aşama ölçümlerine kadar her işlem koşulu için benzer bir yükseliş eğilimi gözlenir. Bu bekleniyordu ve Şekil 7.2'den görüldüğü gibi artan aşınma miktarı ile açıklanabilir [57]. Kesici takımın burun yarıçapı da yüzey pürüzlülüğünü etkileyen bir kesme parametresi olduğundan artan aşınma miktarı Ra'yı doğrudan etkiler. Nano-MQL uygulaması, aşınma mekanizması da dahil olmak üzere yüzey kalitesine dayalı en verimli sonuçların elde edilmesinde etkili görünmektedir [58]. Yüzey kalitesini daha iyi anlamak için Optik ve 3D yüzey görüntüleri Şekil 7.5'te verilmiştir.

Orjinal			
3-D yüzey topografisi			
	Kuru Kesme	MQL	Nano-MQL

Şekil 7.5. $V_c = 300\text{m / dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm / dev}$ cinsinden yüzey pürüzlülüğü

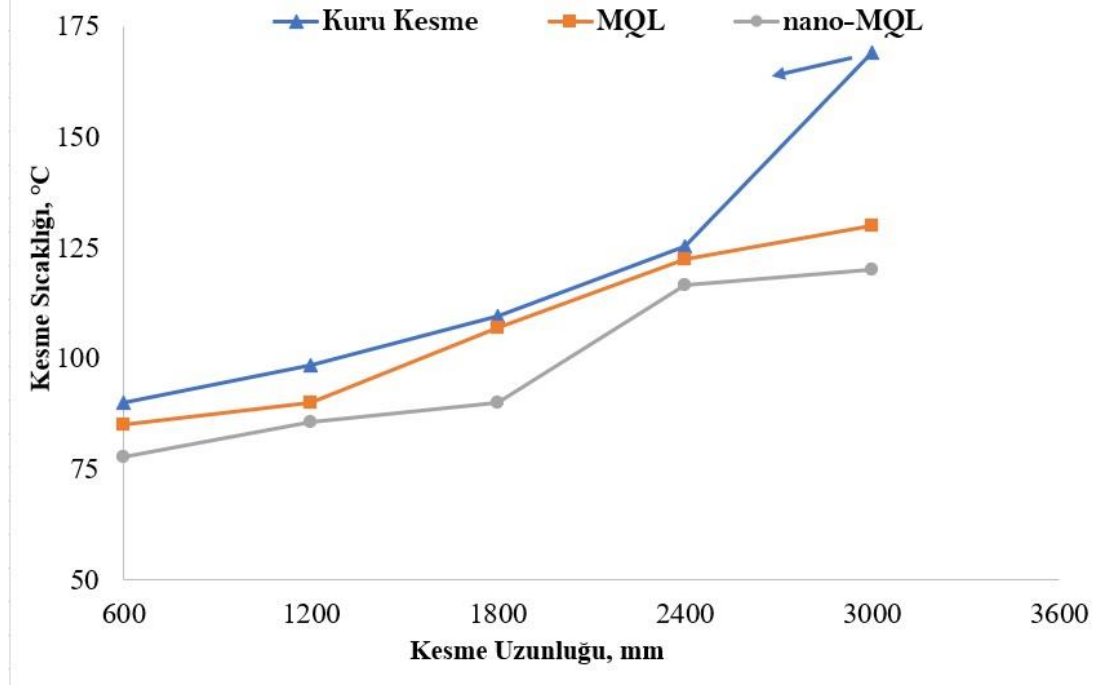
Şekil 7.6, farklı işleme koşullarına göre farklı işleme uzunluklarındaki güç tüketimi değerlerini göstermektedir. Güç tüketimi sonuçları, R_a ve V_B sonuçlarıyla benzer bir eğilim göstermektedir. En yüksek güç tüketimi kuru işleme koşullarında meydana geldi. İlk aşamada yaklaşık 345 W ve son aşamada takım aşınması nedeniyle yaklaşık 355 W idi. İlk aşama değerleri göz önüne alındığında, MQL uygulamasının güç tüketimi yaklaşık %5,5 daha azdır. Nano-MQL sistemine kıyasla bu düşüş yaklaşık olarak %7,7 oranında elde edilmiştir. Ayrıca her aşamada elde edilen güçlerin toplamı dikkate alındığından MQL ve nano-MQL ile yapılan deneylerde sırasıyla yaklaşık %5,3 ve %10,2 daha düşük güç tüketimi olduğu hesaplanmıştır. Bu, MQL ve nano-MQL sistemlerinin, oluşan katmana bağlı olarak takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltabilmesi ve buna bağlı olarak Gupta ve ark.'nın gösterdiği gibi güç tüketiminin azalmasıyla açıklanabilir. Kumar vd. [58] ve Korkmaz vd. [59]. Bu sonuçlar ışığında MQL ve nano-MQL sistemlerinin enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından etkili olduğu söylenebilir.



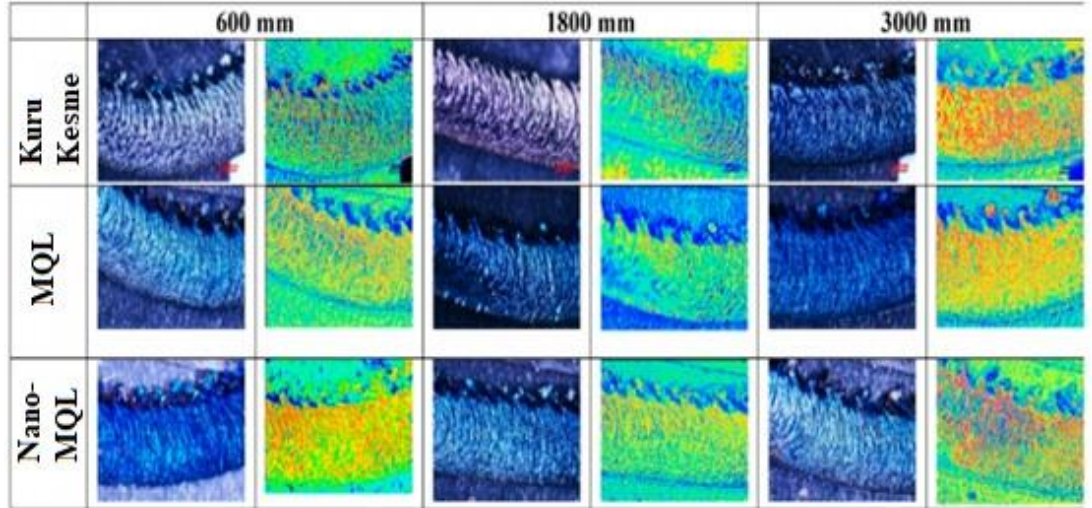
Şekil 7.6. Değişken güç tüketimi $V_c = 300$ m/dak ve $f = 0.15$ mm/dev

Talaş kaldırma için gereken enerji, kesme bölgesinde ısıya dönüştürülür ve bu göz ardı edilemez. Sıcaklık çoğunlukla kesici takım-talaş arayüzünde oluşurken, bir kısmı parçaya iletilir. Bu, işlenmiş yüzeyin yüzey bütünlüğünü ve kesici takım ömrünü etkiler [60]. Deneyler sonucunda ölçülen sıcaklık değerleri Şekil 7.7’de verilmiştir. Diğer işleme çıktılarında olduğu gibi kesme sıcaklığında da benzer eğilimler ve sonuçlar elde edildi. En yüksek sıcaklıklar beklendiği gibi kuru kesme koşullarında ölçüldü. İlk aşama ölçümlerine göre kuru kesme koşullarında en yüksek sıcaklık yaklaşık olarak 90° C olarak elde edilmiştir. MQL için aynı adımda alınan ölçüm %5 daha düşük bir değerde elde edildi. Nano-MQL için bu oran yaklaşık %14 daha azdı. MQL ve nano-MQL için bu azalan oran her aşamada artmaya devam ediyor. Son aşamaya gelince kuru kesim koşullarında elde edilen sıcaklık 170° C’ye ulaştı. Aynı koşullar altında MQL ve nano-MQL’deki düşüş sırasıyla yaklaşık olarak %23,6 ve %29,5 oranında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, yukarıda belirtildiği gibi yüzey bütünlüğünü ve kesici takım aşınması miktarını etkiler ve benzer bir eğilim gösterir. Sonuç olarak, daha önce Krolczyk ve arkadaşları [54] tarafından belirtildiği gibi, MQL ve nano-MQL sistemlerinin sıcaklık üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir [55]. MQL sistemlerinin kesim bölgesinde oluşturduğu ince tabaka ve yağlama, kesim sıcaklığının düşürülmesinde en önemli faktördür. Bu sisteme ilave edilen nanopartiküllerin iyi ısı iletkenliğine sahip olması ve ısıyı kesme bölgesinden

daha hızlı tahliye etmesi Nano-MQL’de en iyi sonuçların alınmasının sebebidir. Şekil 7.8’de ise kesme koşullarında talaş morfolojisini göstermektedir.



Şekil 7.7. $V_c = 300\text{m/dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm/dev}$ cinsinden kesme sıcaklığı değişkeni



Şekil 7.8. Talaş morfolojisinin $V_c = 300\text{m/dak}$ ve $f = 0,15\text{ mm/dev}$ cinsinden değişimi

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Bu çalışma, ER7 çeliğinin kuru, MQL ve nano-MQL yağlama koşullarında işlenebilirliği değerlendirilmiştir. Ön deney ve aşınma deneyleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilen deneylerden elde edilen çıktılar referans alındığında aşağıda verilen sonuçlara ulaşılabilir:

- Kuru kesme şartlarında gerçekleştirilen ön deneylerde, en iyi yüzey pürüzlülük değeri 300m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiş olup farklı kesme koşulları için gerçekleştirilecek aşınma deneylerinde sabit parametreler olarak kullanılmıştır. Hata değeri %0,915 olarak elde edilmiştir.
-
- Kesme hızı değerlerinin artışı yüzey kalitesi üzerinde olumlu bir etki göstererek yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalmaya, ancak kesme sıcaklığı ve güç tüketimi üzerinde artışlara sebep olmuştur. Diğer bir değişken olan ilerleme miktarının artan değerinde ise işleme çıktılarının (yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve güç tüketimi) tümünde artış eğilimi görülmektedir.
-
- Her işleme koşulu için beş farklı aşamada ölçümü gerçekleştirilen aşınma miktarı (VB) kuru kesme koşullarında en yüksek değere ulaşmıştır. Bu koşulda elde edilen VB değeri diğer uygulamalarda gerçekleştirilen deneyler ile karşılaştırıldığında daha yüksek değere ulaşmıştır. Son aşama (3000mm) dikkate alındığında MQL ve nano-MQL uygulamaları kuru işleme şartlarına göre sırasıyla yaklaşık %34,1 ve %37,6 daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçlar MQL ve nano-MQL yöntemlerinin aşınma üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

- MQL ve nano-MQL uygulaması kuru işleme koşullarıyla kıyaslandığında yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha olumlu etkiye sahiptir. İlk aşamada (600 mm) yapılan ölçümlerde kuru işleme koşullarında en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 1,05 μm olarak elde edilmiştir. Aynı koşullara göre MQL ile elde edilen değer yaklaşık %24, nano-MQL ile elde edilen değer ise yaklaşık %34 daha düşük elde edilmiştir.
- En yüksek güç tüketimi her bir ölçüm aşaması dikkate alındığında kuru işleme şartlarında elde edilmiştir. MQL ve nano-MQL ile yapılan deneylerde güç tüketimi sırasıyla yaklaşık %5,3 ve %10,2 daha düşük olduğu görülmüştür. Maliyetler üzerinde enerji tüketiminin etkisi düşünüldüğünde MQL ve nano-MQL yöntemlerin kullanımının olumlu katkıları olacağı görülmektedir.
- En yüksek kesme sıcaklığı değerleri beklenen bir durum olan kuru kesme şartlarında elde edilmiştir. Kuru kesme şartlarında; İlk ölçüm aşaması (600 mm) dikkate alındığında en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık 90 °C olarak ölçülmüştür. Yine aynı ölçüm aşaması baz alındığında, MQL için elde edilen ölçüm değeri yaklaşık %5, nano-MQL için ise bu oran yaklaşık %14 daha düşüktür.

ÖNERİLER

Bu çalışmadan farklı olarak gerçekleştirilebilecek çalışmalara öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- MQL yöntemi için yağ tipi, debi ve nozul pozisyonlarının farklı seviyeleri kullanılabilir.
- Farklı kesici takım ve kesme parametreleri kullanılarak işleme çıktıları üzerinde kıyaslama yapılabilir.
- Nano partikül parçacıkları ve konsantrasyon oranları değiştirilerek etkileri karşılaştırılabilir.
- Literatür incelemesi sonucunda yetersiz bilgiye sahip olduğu görülen ER7 malzemesinin farklı talaşlı imalat yöntemleri sonucu davranışları incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Marczewski, R., Podemski, J. "Technology for Mechanics Wagon," Publisher Transport and Communication, Warszawa (1990)
2. İnternet: www.kardemir.com (2020).
3. Scallan, P. İmalat Sektöründe Proses Planlama," Çev.: Ç. Özşar, H. Alpar, A. Bodur, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 2,3 (2008).
4. Anık, S., Dikicioğlu, A. ve Vural, M. "İmal Usulleri," Birsen Yayınevi, İstanbul, 250,251,253 (2006).
5. Özdemir, U. ve Erten, M. "Talaşlı İmalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanizmaları ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri," Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 1(1), 37-38, (2003).
6. Akkurt, M., "Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları", Birsen Yayınevi, İstanbul, 1-3, 23-25 (2004).
7. Günay, M. "Talaş Kaldırma İşlemlerinde Kesici Takım Talaş Açısının Kesme Kuvvetlerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3,23 (2003).
8. Şahin, Y. "Kesici Takım Geometrisi ve Seçimi," Talaş Kaldırma Prensipleri, Nobel Yayınevi, Ankara, (2000).
9. İnternet: www.sandvik.coromant.com, 2020.
10. Yıldız, S., "Takım Aşınma Mekanizmaları ve Aşınma Tipleri – Ders Notları", Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Konya, (2020).
11. Küçük, H. "Torna Tezgahında Talaş Kaldırma İşlemine Etki Eden Faktörlerin Bilgisayar Destekli Optimizasyonu," Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 66 (2001).
12. Gamsız, E. "CNC Takım Tezgahlarında Hızlı Talaş Kaldırma Prosesinin Teorik ve Deneysel İncelemesi," Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 24,31 (2000).
13. Şahin, Y., "Talaş Kaldırma Prensipleri 1", Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 14-16, 300-330 (2000).
14. Aydın, M., Gavas, M., Yaşar, M. ve Altunpak, Y. "Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri," Seçkin Yayıncılık, Ankara, 322, (2012).

15. Shaw, M.C. "Metal Cutting Principles," Oxford University Press, Newyork, (1991).
16. Özçatalbaş, Y. "1050, 4140 ve 8620 Çeliklerinin Isıl İşleme Değişen Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Bağlı İşlenebilirlikleri," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16,25, (1996).
17. İnternet: Gülmez, T., "Talaş Kaldırmanın Teorisi," (2011). <http://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMAL%20USULLERI/ch21Talas%20Kaldirmanin%20Teorisi.pdf>, [Erişim tarihi: 05.06.2023].
18. Mills, B. ve Redford, A. H. "Machinability of Engineering Materials," Applied Science Publishers Ltd, Newyork, (1993).
19. Özçatalbaş, Y., Ercan, F. ve Türker, M. "Ç1050 Çeliğinde Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerin Talaş Morfolojisi İle İşleme Özelliklerine Etkisi" 9. Uluslar Arası Metalürji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, 319-324, (1997).
20. Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M. Ve Altunpak, Y., "Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri", Seçkin Yayıncılık, Ankara, 259, 263-264, 270, 280-283 (2015).
21. Karayel, B. "Ç 4140 Malzemesinin Tornalanmasında İlerleme, Kesme Hızı ve Kesici Takımın Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Ömrü ve Aşınmaya Etkileri," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23, (2015).
22. Demirayak, İ. "Kesme Parametreleri ve Kaplama Tabakasının Talaş Kaldırma İşlemine Etkileri," Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 71 (2006).
23. Mutlu, B. "CoCrMo Alaşımının İşlenebilirliğinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, (2020).
24. Gürbüz, H. "Tornalamada Talaş Kırıcı Geometrisinin Takım Gerilmelerine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15 (2006).
25. Güllü, A., "Silindirik Taşlamada İstenen Yüzey Pürüzlüğünü Elde Etmek İçin Taslama Parametrelerinin Bilgisayar Yardımıyla Optimizasyonu," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1, 30, (1995).
26. Kalpakijan, S. "Manufacturing Process for Engineering Meterials," Addison-Wesley Pulishing Company, Massachusetts, (1991).
27. Lavoie, R. S. "Understanding The Limirs of Ra," Manufacturing Engineering, 6, (1991).
28. Runola, J. P. "The Effect of Tool Wear on A Turned Surface Profile," M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Michigan Techology University, USA, 6-16, (1993).

- 29.Boothroyd, G. ve Knight, W.A. “Fundamentals of Machining and Machine Tools”. Second Edition, Marcel Dekker Inc., New York, (1989).
- 30.Kwon, Y. “Robust Control of Surface Roughness in a Turning Operation”, Bell and Howell Information and Learning Company, The University of Iowa, (2000).
- 31.Huynh, V.M. ve Fan, Y. “Surface-Texture Measurement and Characterization With Applications To Machine-Tool Monitoring,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 7, 2-10, (1992).
- 32.Sandvik Coromant (Firm), “Modern Metal Cutting : A Practical Handbook”, Sandvik Coromant, (1994).
- 33.Nalbant, M. ve Özçatalbaş, Y., “Takım-Talaş Ara Yüzey Sıcaklığının Takım-İş Parçası Isıl Çift Yöntemiyle Ölçümü İçin Geliştirilen Sistemin Uygulanabilirliği,” Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (3), 409-413, (2006).
- 34.Takmaz, A., “Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin İşlenebilirliğe Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 41-42, 45-46 (2018).
- 35.Binali, R., Ulaş, H. B., Demir, H., “TOOLOX 44 malzemesinde talaş kaldırma miktarının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin incelenmesi,” Technological Applied Sciences (NWSATAS), 13 (1), 19-28, (2018).
- 36.Anagün, A. S., “Kalite Kontrolünde İleri Teknikleri Ders Notları”, Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, (1997).
- 37.Şirvancı, M., “Kalite İçin Deney Tasarımı Taguchi Yaklaşımı”, Literatür Yayıncılık, (1997).
- 38.Yazıcıoğlu, Y. ve Erdoğan, S. “SPSS Uygulamalı Bilimsel Araştırma Yöntemleri,” Detay Yayıncılık, Ankara, 186, (2004).
- 39.Ersöz, F. ve Ersöz, T. “IBM SPSS İle İstatistiksel Veri Analizi,” Copyright, Ankara, 283 (2017).
- 40.Özdamar, K. “SPSS İle Biyoistatistik,” Nisan Kitabevi, Eskişehir, 283 (2017).
- 41.Kalaycı, Ş. “SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri,” Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti, Ankara, 155,164 (2010).
- 42.Şahin, Y., “Talaş Kaldırma Prensipleri 2”, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 450-455 (2001).
- 43.Chiristensen, L. B., Johnson, R. B. ve Turner, L. A. “Research Methods, Design, and Analysis, Global Ediction, England, 455, (2015).

44. Akbulut, Y. "Veri Çözümleme Teknikleri," Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri, Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir, 162-195, (2012).
45. Padem, H., Göksu, A. ve Konaklı, Z. "Araştırma Yöntemleri: SPSS Uygulamalı," International Burch University Press, Sarajevo, 164,165 (2012).
46. Hu, Y., Zhou, L., Ding, H. H., Lewis, R., Liu, Q. Y., Guo, J., Wang, W. J. "Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading," Tribology International 154, (2021).
47. Mazzù, A., Ghidini, A., Provezza, L., Petrogalli, C., Faccoli, M. "Study of the damage induced by thermomechanical load in ER7 tread braked by thermomechanical," Procedia Structural Integrity, 18, 170-182, (2019).
48. Giğtko, T. & Ciechacki, K. "Modeling of railway wheels made of austempered ductile iron," Archives Metallurgy and Materials, 61, 1833-1838, (2016).
49. Okagata, Y. "Design technologies for railway wheels and future prospects," Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, 26-33, (2013).
50. Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., Sağlam, H., "Machinability investigations based on tool wear, surface roughness, cutting temperature, chip morphology and material removal rate during Dry and MQL-Assisted Milling of nimax mold steel," Lubricants, 11 (3), (2023).
51. Asiltürk, İ., Binali, R., Kuntoğlu, M., Akkuş, H., Salur, E., "A Comprehensive Analysis of Surface Roughness, Vibration, and Acoustic Emissions Based on Machine Learning during Hard Turning of AISI 4140 Steel", Metals, 13(2), 437.
52. Dyl, T. "The designation degree of tool wear after machining of the surface layer of duplex stainless steel," Materials, 14, 6425, (2021).
53. Mohana R. G., Dilkush, S., Sudhakar, I., Anil B. P., "Effect of cutting parameters with dry and MQL nano fluids in turning of EN-36 steel. Materials Today: Proceedings, 41, 1182-1187, (2021).
54. Krolczyk, G. M., Maruda, R. W., Krolczyk, J. B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., Budzik, G. "Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production: A review," J. Clean. Prod. 218, 601–615, (2019).
55. Sharma, V. S., Dogra, M., Suri, N. M., "Cooling techniques for improved productivity in turning," International Journal of Machine Tools Manufacture, 49, 435-453, (2009).
56. Yıldırım, Ç. V. "Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL," Tribology International, 144, 106-127, (2020).

57. Cetin, M. H., Kabave-Kilincarslan, S. "Effects of cutting fluids with nano-silver and borax additives on milling performance of aluminium alloys," *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 170-182, (2020).
58. Kumar G. M., Boy, M., Erdi-Korkmaz, M., Ya, Sar, N., Günay, M., Krolczyk, G. M. "Measurement and analysis of machining induced tribological characteristics in dual jet minimum quantity lubrication assisted turning of duplex stainless steel," *Measurement*, 187, 110353, (2022).
59. Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Boy, M., Ya Sar, N., Krolczyk, G. M., Günay, M. "Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 112-124, (2021).
60. Binali, R., Patenge, A. D., Kuntoğlu, M., Mikolajczyk, T., Salur, E., "Energy saving by parametric optimization and advanced lubri-cooling techniques in the machining of composites and superalloys: A systematic review," *Energies*, 15 (21), (2022).

ÖZGEÇMİŞ

Kerem Yavuz ÇAMLI, 2013 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenimine başlayıp 2020 yılında mezun oldu. 2020 yılında çalışmaya başladığı Karabük Kardemir Demir Çelik Firmasında mühendis olarak çalışmaya devam etmektedir. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.