



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMININ İŞLENMESİNDE İŞLEME
PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAHMUT CİNGÖZ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. MUHAMMED ELİTAŞ

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. ALİ KALYON

BİLECİK, 2026

10832668

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMININ İŞLENMESİNDE İŞLEME
PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAHMUT CİNGÖZ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. MUHAMMED ELİTAŞ

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. ALİ KALYON

BİLECİK, 2026

10832668

BEYAN

“Alüminyum 5083 Alaşımının İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi ” başlıklı program türü seçiniz. hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, [Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine](#) uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Mahmut CİNGÖZ

../../2026

İmza:

	YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN ÖĞRENCİ BEYAN FORMU	BŞEÜ-KAYSİS Belge	DFR-516
		İlk Yayın Tarihi/Sayısı	30.04.2026/16
		Revizyon Tarihi	00
		Revizyon No.su	00
		Toplam Sayfa	1

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu
☒ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan faýdalandım .
☐ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan faýdalanmadım .
Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları
<i>Literatür taraması, cümle bağlantıları, yabancı veri analiz programlarından elde edilen grafiklerin türkçeye çevrilmesi</i>
Tezinizde/projenizde kullandığınız <u>yapay zekâ araçlarını</u> ve <u>sürümünü</u> listeleyiniz: Comet perplexity, Chatgpt, Gemini
Yapay zekâ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):
☒ Cümle oluşturma
☒ Literatür tarama
☒ Çeviri
☐ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☒ Görüntü üretme
☒ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz):.....
Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Mahmut CİNGÖZ

.../.../2026
imza:

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen, yol gösterici katkılarıyla sürece yön veren yüksek lisans tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ali KALYON, Doç. Dr. Muhammed ELİTAŞ' a, Eşim Ayşe Nur'a ve Keramika ailesine teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmam boyunca desteklerini hissettiren Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi ailesine, özellikle Mühendislik Fakültesi'nde görev yapan Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Ahmet Fevzi SAVAŞ ve değerli öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Tez savunma sürecinde yapıcı geri bildirimleri ve katkılarıyla çalışmanın geliştirilmesine önemli katkılarda bulunan sayın jüri üyelerine saygı ve teşekkürlerimi arz ederim.

Akademik gelişimime katkıda bulunan, bilgi ve deneyimleriyle bu süreci anlamlı kılan tüm hocalarıma, ayrıca desteğini her zaman yanımda hissettiğim aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Veri temini ve teknik konularda katkı sağlayan tüm kurum ve kişilere teşekkür eder, bu çalışmanın ilgili alanında araştırmacılar ve uygulayıcılar için yararlı bir kaynak olmasını temenni ederim.

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı; otomotiv, havacılık, gemi inşası ve savunma sanayi gibi birçok kritik endüstriyel sektörde hafifliği, yüksek mukavemeti ve üstün korozyon direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılan Al 5083 alüminyum alaşımının tornalama işlemi sırasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektir. Ayrıca elde edilen verilerin Taguchi deney tasarımı ve sinyal-gürültü (S/N) oranı analizleri kullanılarak optimize edilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında kesme hızı (V_c), ilerleme miktarı (f) ve talaş derinliği (a_p) olmak üzere üç temel işleme parametresi belirlenmiş ve bu parametreler üç farklı seviyede değerlendirilerek Taguchi L27 ortogonal dizisine göre toplam 27 deney gerçekleştirilmiştir. Deneyler CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiş, her deney için yeni bir kesici takım ucu kullanılarak takım aşınmasının sonuçlar üzerindeki etkisi en aza indirilmeye çalışılmıştır. İşlenen numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri hassas profilometre cihazı yardımıyla ölçülmüş ve elde edilen veriler istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir. İlerleme miktarındaki artışın yüzey pürüzlülüğü değerlerini önemli ölçüde artırdığı, buna karşılık düşük ilerleme değerlerinde daha kaliteli yüzeylerin elde edildiği görülmüştür. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin daha sınırlı olduğu, ancak kesme hızının artırılmasıyla birlikte yığıntı talaş oluşumunun azaldığı ve yüzey kalitesinin iyileştiği tespit edilmiştir. Kesme derinliğinin artması ise kesme kuvvetlerini ve işleme sırasında oluşan titreşimleri artırarak yüzey pürüzlülüğünün yükselmesine neden olmuştur.

Taguchi S/N oranı analizleri sonucunda, Al 5083 alaşımının tornalanmasında en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük ilerleme miktarı (0,2 mm/dev), yüksek kesme hızı (220 m/dk) ve düşük talaş derinliği (0,75 mm) kombinasyonunda elde edildiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüzey kalitesinin iyileştirilmesinde ilerleme miktarının kritik bir parametre olduğunu göstermiş ve Taguchi metodunun optimum işleme koşullarının belirlenmesinde etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçlarının Al 5083 alaşımının talaşlı imalat süreçlerinde üretim verimliliğinin artırılmasına ve uygun işleme parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: 5000 Serisi Alüminyum, Yüzey Pürüzlülüğü, Kesici Takım Parametreleri, Taguchi Metodu, Çap Tornalama, Optimizasyon, İşlenebilirlik

ABSTRACT

The primary objective of this study is to experimentally investigate the effects of machining parameters on surface roughness during the turning process of Al 5083 aluminum alloy, which is widely used in critical industrial sectors such as automotive, aerospace, shipbuilding, and defense industries due to its low density, high strength, and excellent corrosion resistance. In addition, the study aims to optimize the obtained experimental data using the Taguchi design of experiments and Signal-to-Noise (S/N) ratio analysis.

Within the scope of the study, three fundamental machining parameters, namely cutting speed (V_c), feed rate (f), and depth of cut (a_p), were selected and evaluated at three different levels. A total of 27 experiments were conducted according to the Taguchi L27 orthogonal array. The machining tests were carried out on a CNC lathe, and a new cutting insert was used for each experiment to minimize the influence of tool wear on the results. The surface roughness values of the machined specimens were measured using a high-precision profilometer, and the obtained data were analyzed through statistical methods.

The analysis results revealed that feed rate was the most influential parameter affecting surface roughness. It was observed that increasing the feed rate significantly increased the surface roughness values, whereas lower feed rates produced smoother surfaces. The effect of cutting speed on surface roughness was found to be relatively less significant; however, increasing the cutting speed reduced the formation of built-up edge (BUE), resulting in improved surface quality. Furthermore, increasing the depth of cut led to higher cutting forces and machining vibrations, which consequently caused an increase in surface roughness.

According to the Taguchi S/N ratio analysis, the lowest surface roughness values for Al 5083 alloy were obtained under the combination of low feed rate, low cutting speed, and low depth of cut. The findings indicate that feed rate is the most critical parameter in improving surface quality and demonstrate that the Taguchi method is an effective approach for determining optimum machining conditions. The results of this study are expected to contribute to the improvement of machining efficiency and the determination of suitable cutting parameters for the machining of Al 5083 aluminum alloy.

Keywords: 5000 Series Aluminum, Surface Roughness, Cutting Tool Parameters, Taguchi Method, Diameter Turning, Optimization, Machinability

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT.	iii
İÇİNDEKİLER.	iv
TABLolar LİSTESİ.	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.	vii
GRAFİKLER LİSTESİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. TALAŞLI İMALAT VE TORNALAMA TEORİSİ.....	5
2.1. Talaşlı İmalat Yöntemleri	5
2.2. Tornalama İşlemi.....	6
2.3. Tornalamada Kesme Mekanikliği	7
2.4. Kesme Kuvvetleri ve Isı Oluşumu	8
2.5. Takım Aşınması ve Takım Ömrü	9
3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE ETKİLEYEN PARAMETRELER	12
3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Tanımı	12
3.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yöntemleri.....	13
3.3. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler.....	13
3.3.1. İlerleme miktarı (f)	14
3.3.2. Kesme hızı (Vc)	15
3.3.3. Talaş derinliği (Ap)	15
3.3.4. Kesici takım geometrisi.....	16
3.3.5. İş parçası malzemesi	16
4. ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMI	17
4.1. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları	17
4.2. Al 5083 Alaşımının Kimyasal Özellikleri.....	18
4.3. Mekanik Özellikleri	19
4.4. İşlenebilirlik Özellikleri.....	20
4.5. Endüstriyel Kullanım Alanları	21
5. TAGUCHI METODU VE OPTİMİZASYON	22

5.1. Deney Tasarımı Kavramı.....	22
5.2. Taguchi Metodu	23
5.3. Ortogonal Diziler	24
5.4. Sinyal-Gürültü (S/N) Oranı	25
5.5. Taguchi ile Optimizasyon.....	26
6. MATERYAL VE YÖNTEM	28
6.1. Kullanılan Malzeme (Al 5083)	28
6.2. Numune Hazırlama.....	30
6.3. CNC Torna Tezgâhı.....	31
6.4. Kesici Takım Özellikleri.....	33
6.5. Deney Parametreleri.....	34
6.6. Deney Tasarımı (Taguchi L27)	35
6.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri (Profilometre)	36
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
7.1. Deney Sonuçları	38
7.2. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi	42
7.3. S/N Oranı Analizi.....	44
7.4. Parametrelerin Etki Analizi.....	45
7.5. Optimum Parametrelerin Belirlenmesi.....	46
7.6. Grafik ve İstatistiksel Değerlendirme	47
SONUÇLAR.....	50
KAYNAKÇA.....	52

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.2. Al 5083 alaşıımının tipik kimyasal bileşimi	19
Tablo 4.3. Al 5083 Alaşıımının Mekanik Özellikleri	21
Tablo 6.1.1 Al 5083 alaşıımının tipik kimyasal bileşimi.....	30
Tablo 6.1.2. Al 5083 Alaşıımının Mekanik Özellikleri	30
Tablo 6.5. Deney Parametreleri	35
Tablo 6.6. Deney Tasarım Tablosu.....	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.2. Tornalama metodları	7
Şekil 2.4. Isı Oluşumu	9
Şekil 6.1. Deney Numuneleri	29
Şekil 6.2. Tornalama İşlemi Hazırlığı	31
Şekil 6.3. Doosan GT2600 CNC Torna Tezgahı.....	32
Şekil 6.4. Tungaloy VCGT 332 Al Finish Kesici Uçları	34
Şekil 6.7. Profilometre Ölçümü.....	37
Şekil 7.1.1. L27 Modelinin SN Özeti	38
Şekil 7.1.2. ANOVA Sonuçları	38
Şekil 7.1.3. Tornalanmış Al 5083 Numuneleri.....	41

GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa

Grafik 7.2.1. $f - R_a$ Değişim Grafiği.....	42
Grafik 7.2.2. $V_c - R_a$ Değişim Grafiği	42
Grafik 7.2.3. $a_p - R_a$ Değişim Grafiği	43
Grafik 7.3. SN Kontrol Grafiği.....	44
Grafik 7.5.1. V_c Parametresinin Etki Grafiği.....	47
Grafik 7.5.2. f Parametresinin Etki Grafiği	48
Grafik 7.5.3. a_p Parametresinin Etki Grafiği.....	49

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

Al: Alüminyum

Al 5083: 5083 Alüminyum Alaşımı

ANOVA: Varyans Analizi (Analysis of Variance)

CNC: Bilgisayar Kontrollü Tezgah (Computer Numerical Control)

ISO: Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)

ANSI: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (American National Standards Institute)

PVD: Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)

HRC: Rockwell C Sertlik Ölçeği

BUE: Yığıntı Talaş (Built-Up Edge)

S/N: Sinyal/Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)

Ra: Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

Vc: Kesme Hızı

F: İlerleme Miktarı

Ap: Talaş Derinliği / Kesme Derinliği

L27: Taguchi L27 Ortogonal Dizisi

DOE: Deney Tasarımı (Design of Experiments)

µm: Mikrometre

mm: Milimetre

mm/dev: Milimetre/devir

1.GİRİŞ

Günümüz modern imalat endüstrisinde, hafifletme çalışmalarının ve enerji verimliliğinin giderek daha fazla önem kazanmasıyla birlikte alüminyum alaşımları vazgeçilmez bir mühendislik malzemesi konumuna gelmiştir. Özellikle kalıp üretimi, otomotiv ve taşıt sanayisi, denizcilik, havacılık ve çeşitli zorlu endüstriyel tesisler gibi çok geniş bir yelpazede sıklıkla tercih edilen 5XXX serisi alüminyum alaşımları; sahip oldukları üstün korozyon dayanımı, yüksek tokluk, mükemmel kaynaklanabilme özellikleri ve nispeten yüksek mekanik mukavemetleri ile mühendislik uygulamalarında öne çıkmaktadır (Kechagias, 2024; Zhang ve Zhou, 2024:3286). Isıl işlemle sertleştirilemeyen bu alaşım grubunun karakteristik özellikleri, kimyasal kompozisyonlarındaki elementlerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle elde edilmektedir.

Bu serinin ana alaşım elementi olan magnezyum (Mg), alüminyum matrisi içerisinde çözünerek "katı eriyik sertleşmesi" (solid solution strengthening) mekanizmasını tetikler. Magnezyum atomlarının alüminyum kristal kafes yapısına yerleşmesiyle oluşan bölgesel gerilme alanları, dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak malzemenin mukavemetini artırır. Bu mekanizma, 5XXX alaşımlarının ısıtılma işlemi gerektirmeksizin, diğer birçok alüminyum serisine kıyasla çok daha üstün bir dayanım ve yapısal kararlılık sergilemesini sağlar. Özellikle savunma sanayii ve gemi inşası gibi zorlu çevresel koşullara maruz kalan sektörlerde, malzemenin hem hafif hem de mekanik yorulmalara karşı bu denli dirençli olması ona stratejik bir önem kazandırmaktadır (Song vd, 2024: 3255)

Ancak bir malzemenin sadece üstün mekanik özelliklere sahip olması, onun endüstriyel olarak verimli bir şekilde üretilebileceği anlamına gelmemektedir. Genel anlamda bir mühendislik malzemesinin talaşlı imalata uygunluğunu belirten "işlenebilirlik" kavramı; optimum takım aşınması, minimum kesme kuvvetleri, kontrol edilebilir talaş oluşumu, düşük enerji tüketimi ve yüksek yüzey kalitesi gibi çeşitli dinamiklere bağlı olan çok boyutlu bir parametredir. Alüminyum alaşımlarının talaşlı imalatı genellikle kolay kabul edilse de, malzemeye özgü yüksek süneklik sebebiyle kesici takım ucunda "yığıntı talaş" (BUE - Built-Up Edge) oluşumu gibi operasyonel problemler sıkça gözlemlenebilmektedir. Bu durum, kesme mekanizmasını bozarak takım ömrünü kısaltmakta ve parça kalitesini düşürmektedir. Dolayısıyla, işlenebilirlik kriterlerinin ve kesme parametrelerinin doğru analiz edilmesi, imalat

sürecinin verimliliği açısından hayati bir öneme sahiptir (Mahmood vd., 2024)

Üretim sürecinde, spesifik olarak yüzey pürüzlülüğü, nihai ürün kalitesine doğrudan etki etmesi ve işlemedeki boyutsal hassasiyeti yansıtması bakımından oldukça kritik bir ölçüttür. Yüzey pürüzlülüğü yalnızca estetik bir parametre olmayıp; üretilen parçanın yorulma ömrü, korozyon direnci, aşınma dayanımı, sürtünme katsayısı ve yağ tutma kapasitesi gibi tribolojik ve mekanik özelliklerini doğrudan belirler. Özellikle kalıp imalatı gibi mikro metrik hassasiyetlerin konuşulduğu sektörlerde, kalıp yüzeyindeki en ufak bir pürüzlülük hatası, o kalıptan üretilecek binlerce nihai ürünün yüzeyine yansyarak devasa kalite kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle yüzey bütünlüğünün korunması ve istenilen toleranslar içerisinde tutulması elzemdir (Grzesik, 2016: 4440)

Bu bağlamda, modern endüstrinin rekabetçi koşulları altında zaman ve maliyet unsurları her zamankinden daha fazla önem taşımaktadır. İmalat aşamasında doğru kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği) seçilmemesi, üretim sürelerinin uzamasına, takım maliyetlerinin artmasına ve ıskarta oranlarının yükselmesine neden olmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı; kalıp sektörü, savunma sanayii, havacılık ve otomotiv gibi yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerdeki AL 5XXX serisi parça imalatlarında, en iyi yüzey kalitesine en doğru ve bilimsel yaklaşımlarla ulaşılarak nitelikli ürünler ortaya koymaktır. Gerçekleştirilecek deneysel ve istatistiksel optimizasyon çalışmaları sayesinde, işletmelerin üretim süreçlerinde optimum düzeyde fiyat-performans dengesi yakalaması, optimum maliyetle en iyi yüzey kalitesine ulaşmak ve işleme maliyetlerinin minimize edilmesidir. Böylelikle küresel pazarda güçlü bir rekabet ortamı ve sürdürülebilirlik sağlanması hedeflenmektedir (Kechagias, 2024: 1). Deney sayısını azaltarak optimum değeri bulmak için çalışmalarda genellikle Taguchi yöntemi kullanılmış ve gereksiz deneylerden kaçınılmıştır (Akkuş ve Yaka, 2018: 5). Palaniappan ve arkadaşları Taguchi yöntemi ile alüminyum 6082 alaşımını tornalamışlar ve kesme parametrelerinin optimizasyonunu yapmışlardır. Deneylerinde malzeme kaldırma oranlarını ve yüzey pürüzlülüğünü ölçmüşlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için en etkin parametre ilerleme olurken malzeme kaldırma oranında en etkin parametre kesme hızı çıkmıştır (Palaniappan ve ark., 2020: 1013-1021). Soenoko ve arkadaşları çalışmalarında alüminyum 6061-T6 malzemesini farklı uç yarıçaplarında karbür kesici uç ile tornalamışlar ve yüzey pürüzlülüğünü Taguchi yöntemi ile optimize etmişlerdir. Çalışmalarının sonunda yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin uç yarıçapı olduğunu bulmuşlardır (Soenoko ve ark., 2017: 17). Serbest formlu ince cidarlı AA 5083-H111 alaşımının

kuru işleme koşullarında frezelenmesini incelemişlerdir. Çalışmada kaplamasız karbür parmak freze kullanılmış ve cidar kalınlığı, kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney tasarımı Taguchi L32 ortogonal dizisine göre hazırlanmış, elde edilen sonuçlar Taguchi yöntemi, ANOVA ve regresyon analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Araştırmacılar yüzey pürüzlülüğünü en düşük seviyeye indirmek için 5 mm cidar kalınlığı, 0,05 mm/diş ilerleme miktarı ve 200 m/dak kesme hızından oluşan optimum parametre kombinasyonunu belirlemişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin %57,14 katkı oranıyla ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, Al 5083-H111 alaşımının işlenmesinde ilerleme miktarının yüzey kalitesi açısından önemli bir işlem parametresi olduğunu göstermektedir (Özlü vd., 2023: 512-522).

Al 5083 alaşımı dışındaki alüminyum alaşımlarında gerçekleştirilen çalışmalar da kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin anlaşılması açısından önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. (Pul ve Özerkan, 2022: 189-198), Al 6061 alaşımının tornalanmasında kesme derinliği ve kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü ile takım aşınmasına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada 0,4; 0,8; 1,6 ve 2,4 mm olmak üzere farklı kesme derinlikleri ile farklı geometrilere sahip kesici takımlar kullanılmış, kesme hızı 125 ve 250 m/dak, ilerleme miktarı ise 0,2 mm/dev olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğu, genel olarak kesme derinliğinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte kesme hızının artırılması her takım geometrisinde aynı şekilde yüzey pürüzlülüğünü azaltmamış ve takım geometrisi ile işleme parametreleri arasındaki etkileşimin önemini ortaya koymuştur (Pul ve Özerkan, 2022: 189-198).

AA 6061 alüminyum alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini ve optimum işlem koşullarını araştırmıştır. Benzer şekilde (Özlü; Demir, 2019: 151-158) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da AA 6061 alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ve optimum işleme koşulları araştırılmıştır. Bu çalışmalar, alüminyum alaşımlarının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey kalitesinin belirlenmesindeki önemini ortaya koymakta ve deneysel tasarım ile optimizasyon yöntemlerinin bu tür problemlerde kullanılabileceğini göstermektedir (Ulaş, 2019; Özlü, 2019: 48-56). Bu çalışmaların künyeleri ve ilgili yayın bilgileri Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi'nde yayımlanan çalışmanın kaynakçasında da yer almaktadır.

Al 2024, Al 6061 ve Al 7075 alaşımlarının tornalanmasında alaşım türünün kesici takım davranışı, talaş oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada farklı alaşımların işlenmesi sırasında kesici takımlarda yığıntı talaş oluştuğu ve kesme hızının artırılmasıyla yığıntı talaş miktarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca kesme hızının artmasıyla incelenen alaşımlarda genel olarak yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Araştırmacılar, yığıntı talaş

oluşumu ile yüzey pürüzlülüğü arasında ilişki bulunduğunu ve malzemenin kimyasal bileşiminin işlenebilirlik davranışını etkilediğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlar, farklı alüminyum alaşımlarında aynı kesme parametrelerinin farklı yüzey kalitesi sonuçları oluşturabileceğini göstermektedir (Pul ve Bican, 2021: 9-17).

Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, alüminyum alaşımlarının talaşlı imalatında yüzey pürüzlülüğünün kesme parametrelerinden önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Malzemenin temper durumuna, kesici takım geometrisine, soğutma koşullarına ve deneysel parametre aralıklarına bağlı olarak değişebilmektedir. Al 5083, Al 6061, Al 7075 ve Al 2024 gibi farklı alüminyum alaşımları üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir bölümünde Taguchi yöntemi ve ANOVA kullanılarak optimum işleme koşulları araştırılmıştır. Al 5083 alaşımının tornalama işleminde kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin aynı deney tasarımı içerisinde sistematik olarak incelenmesi, mevcut literatürün tamamlayıcı bir devamı niteliğindedir.

Bu tez çalışmasında, Al 5083 alüminyum alaşımının CNC tornalama işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği deneysel değişkenler olarak belirlenmiş ve bu değişkenlerin farklı seviyeleri kullanılarak Taguchi L27 ortogonal dizisine göre deney planı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen işlenmiş yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri profilometre kullanılarak ölçülmüş ve her deney koşulunda gerçekleştirilen ölçümlerin ortalama değerleri değerlendirmeye alınmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar Taguchi yönteminde kullanılan sinyal/gürültü oranı yaklaşımı ile analiz edilerek yüzey pürüzlülüğü açısından optimum kesme parametreleri belirlenmiştir. Bunun yanında varyans analizi (ANOVA) uygulanarak kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatistiksel etkileri ve katkı oranları ortaya konulmuştur. Çalışmanın literatürdeki benzer araştırmalardan temel farklılığı, Al 5083 alaşımının tornalanmasında özellikle kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin Taguchi L27 deney tasarımı kullanılarak birlikte değerlendirilmesi ve optimum işlem koşullarının belirlenmesidir. Böylece çalışma sonucunda elde edilen deneysel verilerin, Al 5083 alaşımının özellikle yüzey kalitesinin önemli olduğu kalıp imalatı ve benzeri hassas talaşlı imalat uygulamalarında uygun kesme parametrelerinin seçilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. TALAŞLI İMALAT VE TORNALAMA TEORİSİ

2.1. Talaşlı İmalat Yöntemleri

Talaşlı imalat yöntemleri, iş parçası üzerinden talaş kaldırılarak istenilen geometrinin elde edilmesini sağlayan üretim yöntemleridir. Bu yöntemler yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi sağlamaları nedeniyle modern üretim teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Groover, 2012: 15). Tornalama, frezeleme, delme ve taşlama gibi işlemler talaşlı imalat yöntemleri arasında yer almaktadır. Talaş kaldırma işlemi sırasında kesici takım ile iş parçası arasında plastik deformasyon meydana gelmekte ve talaş oluşmaktadır.

Talaşlı imalat, iş parçası üzerinden belirli miktarda malzemenin kesici takımlar yardımıyla kaldırılması esasına dayanan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem sayesinde yüksek ölçü hassasiyeti, düşük yüzey pürüzlülüğü ve istenilen geometrik şekiller elde edilebilmektedir. Talaşlı imalat yöntemleri, özellikle makine imalat sanayi, otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve kalıpcılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Talaşlı imalat işlemlerinde temel amaç, iş parçasına istenilen boyut, şekil ve yüzey kalitesini kazandırmaktır. Bu işlemler sırasında kesici takım ile iş parçası arasında oluşan bağıl hareket sonucunda talaş kaldırma işlemi gerçekleşmektedir. Kesme işlemi sırasında uygulanan parametreler, üretim kalitesi ve işlem maliyetleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Talaşlı imalat yöntemleri genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

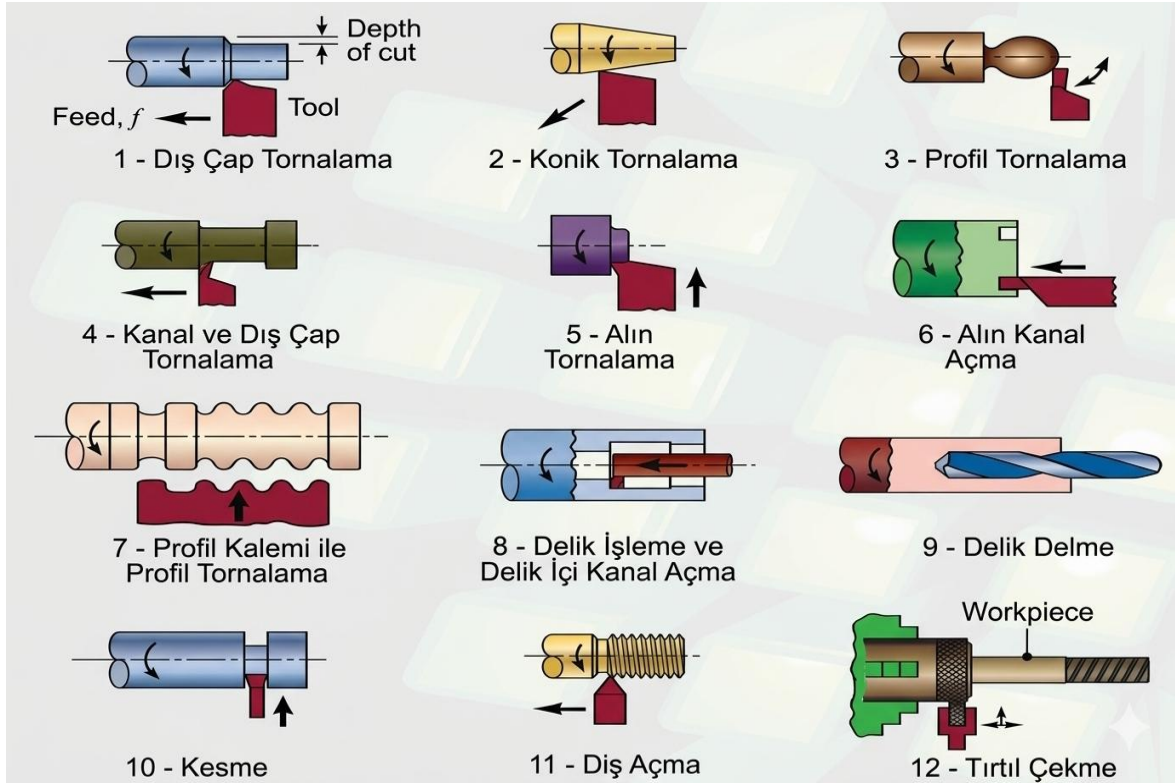
- Tornalama
- Frezeleme
- Delme
- Taşlama
- Broşlama
- Raybalama

Bu yöntemler arasında tornalama işlemi, silindirik parçaların işlenmesinde en yaygın kullanılan talaş kaldırma yöntemlerinden biridir. Tornalama işlemlerinde iş parçası dönme hareketi yaparken kesici takım ilerleme hareketi gerçekleştirerek talaş kaldırmaktadır.

Talaşlı imalat yöntemlerinin tercih edilmesinin temel nedenleri arasında yüksek hassasiyet, iyi yüzey kalitesi, karmaşık geometrilerin üretilebilmesi ve seri üretime uygunluk bulunmaktadır. Bununla birlikte kesici takım maliyetleri, takım aşınması ve enerji tüketimi gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Astakhov, 1998: 42).

2.2. Tornalama İşlemi

Tornalama işlemi, dönme hareketi yapan iş parçası üzerinden tek ağızlı kesici takım yardımıyla talaş kaldırılması esasına dayanan talaşlı imalat yöntemlerinden biridir (Merchant, 1945, 168). Özellikle silindirik parçaların işlenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Tornalama işlemi sırasında kesme parametreleri olarak kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği önemli rol oynamaktadır. Bu parametreler yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve işleme verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Tornalama işlemi sırasında iş parçası ana mil yardımıyla dönme hareketi yaparken, kesici takım ilerleme hareketi gerçekleştirerek iş parçası üzerinden talaş kaldırmaktadır. Kesme hareketi iş parçası tarafından sağlanırken, ilerleme hareketi kesici takım tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.2. Tornalama metodları

Kaynak: Hamit ARSLAN

Tornalama işlemleri temel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Dış çap tornalama
- İç çap tornalama
- Alın tornalama
- Kanal açma
- Vida açma
- Profil tornalama
- Konik tornalama

Tornalama işlemlerinde kullanılan takım tezgâhları geleneksel torna tezgâhları ve CNC torna tezgâhları olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Geleneksel torna tezgâhlarında operatör kontrolü ön plandayken, CNC torna tezgâhlarında işlemler bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmektedir (Behandish vd., 2019: 4).

2.3. Tornalamada Kesme Mekanîği

Kesme mekanîği, talaş oluşumu sırasında meydana gelen deformasyonları, sürtünme etkilerini ve kesme kuvvetlerini inceleyen temel talaşlı imalat teorilerinden biridir (Merchant, 1945, 267). Tornalama işleminde kesici takım, iş parçası yüzeyine belirli bir kuvvet uygulayarak malzemenin plastik deformasyona uğramasını ve talaş şeklinde ayrılmasını sağlamaktadır. Kesme işlemi sırasında iş parçası malzemesi üç farklı deformasyon bölgesine maruz kalmaktadır. Birinci deformasyon bölgesinde malzeme kesici takım etkisiyle plastik deformasyona uğrayarak talaşa dönüşmektedir. İkinci deformasyon bölgesinde talaş ile takım yüzeyi arasında sürtünme meydana gelmektedir. Üçüncü deformasyon bölgesinde ise takımın işlenmiş yüzey ile temasından kaynaklı deformasyon oluşmaktadır.

Tornalama işleminde kesici takımın iş parçasına temas etmesiyle birlikte plastik deformasyon meydana gelmekte ve talaş oluşmaktadır. Talaş oluşumu sırasında kesme bölgesinde yüksek sıcaklık ve gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Bu durum takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadır. Tornalama işleminde oluşan talaş tipi, kesme performansı açısından önemli bir parametredir. Talaşlar genel olarak sürekli talaş, kırıklı talaş ve parçalı talaş olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

Sürekli talaş oluşumu genellikle sünek malzemelerin yüksek kesme hızlarında işlenmesi sırasında meydana gelmektedir. Bu talaş tipi daha iyi yüzey kalitesi sağlamakla

birlikte uzun talaş oluşumu nedeniyle takım ve iş parçası üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir.

Kırıklı talaş oluşumu ise gevrek malzemelerde veya düşük kesme hızlarında görülmektedir. Bu talaş tipi takım aşınmasını azaltabilmekte ancak yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Kesme mekanizmasında kesme açısı, talaş açısı ve serbest açısı gibi takım geometrileri büyük önem taşımaktadır. Takım geometrisinin uygun seçilmesi kesme kuvvetlerini azaltmakta, yüzey kalitesini iyileştirmekte ve takım ömrünü artırmaktadır. Bu sayede kesme işlemi sırasında takım ile talaş arasında oluşan sürtünme, enerji tüketimini ve sıcaklık oluşumunu artırmaktadır ve durum takım aşınmasını hızlandırmakta ve işleme performansını olumsuz etkilemektedir (Astakhov ve Outeiro, 2008: 55).

2.4. Kesme Kuvvetleri ve Isı Oluşumu

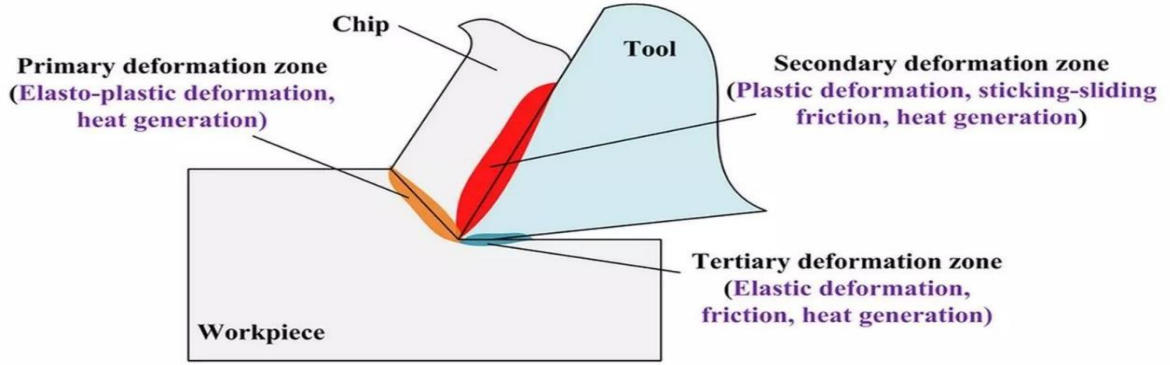
Talaş kaldırma işlemleri sırasında oluşan kesme kuvvetleri, işleme performansını doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir. Kesme kuvvetlerinin artması takım aşınmasını hızlandırmakta ve yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Soori ve Asmael, 2020, 21). Kesme kuvveti, talaş kaldırma işlemini gerçekleştiren temel kuvvettir ve en büyük kuvvet bileşeni olarak kabul edilmektedir. İlerleme kuvveti takımın ilerleme yönünde oluşurken, radyal kuvvet iş parçasına dik yönde meydana gelmektedir.

Kesme kuvvetleri aşağıdaki faktörlerden etkilenmektedir:

- Kesme hızı
- İlerleme miktarı
- Talaş derinliği
- Takım geometrisi
- İş parçası malzemesi
- Kesici takım malzemesi

Talaş kaldırma işlemi sırasında uygulanan mekanik enerjinin büyük bir bölümü ısı enerjisine dönüşmektedir. Oluşan ısıнын temel kaynakları aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Birincil deformasyon bölgesi
- Takım-talaş ara yüzeyi
- Takım-iş parçası temas yüzeyi



Şekil 2.4. Isı Oluşumu

Kaynak: Osama Mohammed Suleiman Khayal

Kesme işlemi sırasında oluşan sürtünme ve plastik deformasyon nedeniyle yüksek sıcaklık meydana gelmektedir. Kesme bölgesindeki sıcaklık artışı takım sertliğinin azalmasına ve takım ömrünün düşmesine neden olabilmektedir. Kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklık takım sertliğinin azalmasına ve takım aşınmasının hızlanmasına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık iş parçasında boyutsal değişimlere ve yüzey bozukluklarına yol açabilmektedir. Kesme sıcaklığının kontrol altına alınabilmesi için kesme sıvıları kullanılmaktadır. Kesme sıvıları sürtünmeyi azaltmakta, soğutma sağlamakta ve takım ömrünü artırmaktadır. Bununla birlikte bazı modern işleme yöntemlerinde kuru kesme uygulamaları da tercih edilmektedir. (Stone vd., 2005:7).

2.5. Takım Aşınması ve Takım Ömrü

Takım aşınması, talaşlı imalat işlemlerinde kesici takımın zamanla özelliklerini kaybetmesi olarak tanımlanmaktadır. Takım aşınması yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve üretim maliyetleri üzerinde önemli etkilere sahiptir (Astakhov, 1998: 233)

Takım aşınmasının temel nedenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Sürtünme
- Yüksek sıcaklık
- Mekanik gerilmeler
- Difüzyon
- Oksidasyon
- Yapışma etkisi

Tornalama işlemlerinde en yaygın takım aşınması türleri serbest yüzey aşınması, krater aşınması ve uç kırılmasıdır. Serbest yüzey aşınması, takımın işlenmiş yüzey ile temas eden kısmında meydana gelmektedir. Bu aşınma türü genellikle takım ömrünün belirlenmesinde temel kriter olarak kullanılmaktadır. Takım ömrü, kesici takımın kabul edilebilir performans sınırları içerisinde çalışabildiği süre olarak tanımlanmaktadır. Takım ömrünü etkileyen en önemli faktörler kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliğidir.

Kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi parametreler takım aşınmasını doğrudan etkilemektedir. Özellikle yüksek kesme sıcaklıkları takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır (Astakhov ve Outeiro, 2008: 91). Takım malzemesi de takım ömrü üzerinde önemli etkiye sahiptir. Günümüzde yüksek hız çelikleri, sementit karbürler, seramik takımlar ve kaplamalı takımlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.6. Tornalamada İşleme Parametreleri

Tornalama işlemlerinde yüzey kalitesi, takım ömrü, talaş kaldırma oranı ve işleme verimliliği üzerinde etkili olan en önemli faktörler işleme parametreleridir. Kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi parametrelerin uygun şekilde seçilmesi, hem üretim kalitesinin artırılması hem de takım aşınmasının azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle CNC torna tezgâhlarında gerçekleştirilen hassas işleme uygulamalarında parametre optimizasyonu, yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilmesinde kritik rol oynamaktadır (Kalpakjian ve Schmid, 2014: 621). Tornalama işlemlerinde temel işleme parametreleri aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır;

- Kesme hızı (V_c)
- İlerleme miktarı (f)
- Talaş derinliği (A_p)

Kesme hızı, iş parçasının çevresel hızını ifade etmektedir ve genellikle m/dk birimi ile gösterilmektedir. Kesme hızının artması üretim süresini azaltmakta ancak takım aşınmasını artırabilmektedir. İlerleme miktarı, kesici takımın iş parçası boyunca bir devirde aldığı mesafeyi ifade etmektedir ve mm/dev birimi ile gösterilmektedir. İlerleme miktarının artması yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Talaş derinliği ise kesici takımın iş parçasına nüfuz ettiği derinliği ifade etmektedir. Talaş derinliğinin artması kesme kuvvetlerini ve enerji tüketimini artırmaktadır.

Kesme hızı, kesici takımın iş parçası yüzeyine göre bağlı hareket hızını ifade etmektedir. Kesme hızının artırılması genellikle yüzey kalitesini iyileştirmekte ve yığıntı talaş oluşumunu azaltmaktadır. Ancak çok yüksek kesme hızlarında takım sıcaklığının artması nedeniyle takım aşınması hızlanabilmektedir. Bu nedenle kesme hızının optimum seviyede seçilmesi gerekmektedir (Davim, 2008: 87). Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde yüksek kesme hızları daha kararlı talaş oluşumu sağlayarak yüzey kalitesinin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır.

İlerleme miktarı, kesici takımın iş parçası üzerinde bir devirde aldığı ilerleme mesafesini ifade etmektedir. Tornalama işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrelerden biri ilerleme miktarıdır. İlerleme miktarının artmasıyla birlikte yüzey üzerinde oluşan takım izleri büyümekte ve yüzey pürüzlülüğü değerleri artmaktadır. Düşük ilerleme değerlerinde ise daha kaliteli yüzeyler elde edilmekle birlikte işleme süresi uzayabilmektedir. Bu nedenle üretim verimliliği ile yüzey kalitesi arasında uygun bir denge kurulması gerekmektedir (Che Haron vd.:2010).

Talaş derinliği ise kesici takımın iş parçasına nüfuz ettiği derinliği ifade etmektedir. Talaş derinliğinin artması kesme kuvvetlerini yükseltmekte ve işleme sırasında titreşim oluşumuna neden olabilmektedir. Özellikle düşük rijitliğe sahip sistemlerde yüksek talaş derinlikleri yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca talaş derinliğinin artması takım üzerindeki mekanik yükleri artırarak takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle talaş derinliği seçimi iş parçası malzemesi, takım geometrisi ve tezgâh kapasitesi dikkate alınarak belirlenmelidir (Stephenson ve Agapiou, 2016: 412).

3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE ETKİLEYEN PARAMETRELER

3.1. Yüzey Pürüzlülüğü Tanımı

Yüzey pürüzlülüğü, talaşlı imalat işlemleri sonrasında iş parçası yüzeyinde meydana gelen mikro geometrik düzensizliklerin ortalama sapmasını ifade eden önemli bir kalite kriteridir.

Üretilen parçaların yüzey özellikleri; sürtünme, aşınma, yorulma dayanımı, sızdırmazlık ve estetik görünüm gibi birçok mühendislik özelliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü, talaşlı imalat süreçlerinde kontrol edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilmektedir (Thomas, 1999: 12).

Yüzey pürüzlülüğü genellikle R_a , R_z ve R_t gibi parametreler yardımıyla değerlendirilmektedir. Bu parametreler yüzey profilindeki düzensizliklerin matematiksel olarak ifade edilmesini sağlamaktadır. Özellikle R_a değeri talaşlı imalat çalışmalarında en yaygın kullanılan yüzey pürüzlülüğü parametresidir ve yüzey profilindeki ortalama sapmayı temsil etmektedir (Whitehouse, 2010: 45). R_a değeri, yüzey profilindeki ortalama sapmayı ifade etmektedir ve en yaygın kullanılan yüzey pürüzlülüğü parametresidir. R_z değeri, profil üzerindeki en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki ortalama mesafeyi göstermektedir. R_t değeri ise ölçüm uzunluğu içerisindeki toplam maksimum profil yüksekliğini ifade etmektedir.

Talaşlı imalat işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü; kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği, takım geometrisi ve iş parçası malzemesi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Uygun işleme parametrelerinin seçilmesi sayesinde daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilebilmekte ve ürün kalitesi artırılabilir (Davim, 2008: 104).

Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması birçok endüstriyel uygulamada avantaj sağlamaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, savunma sanayi ve kalıpcılık sektörlerinde yüksek yüzey kalitesine sahip parçalar tercih edilmektedir. Tornalama işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü, işleme performansının değerlendirilmesinde temel kriterlerden biri olarak kabul edilmektedir. Kesme parametrelerinin uygun seçimi ile daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilebilmekte ve üretim kalitesi artırılabilir.

3.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Yöntemleri

Yüzey pürüzlülüğünün doğru şekilde ölçülmesi, talaşlı imalat işlemlerinde kalite kontrol açısından büyük önem taşımaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sayesinde işlenmiş yüzeylerin standartlara uygunluğu değerlendirilebilmekte ve üretim kalitesi kontrol altında tutulabilmektedir. Günümüzde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri temaslı ve temassız yöntemler olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir (Leach, 2013: 77).

Temaslı ölçüm yöntemlerinde profilometre cihazları kullanılmaktadır. Profilometre cihazlarında elmas uçlu prob yüzey üzerinde hareket ederek mikro geometrik düzensizlikleri ölçmektedir. Bu yöntem yüksek hassasiyet sağlaması nedeniyle talaşlı imalat çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle Ra değeri ölçümlerinde profilometre cihazları güvenilir sonuçlar vermektedir (Whitehouse, 2010: 121).

Temassız ölçüm yöntemlerinde ise lazer, optik sensör ve görüntü işleme teknolojileri kullanılmaktadır. Temassız yöntemler hassas yüzeylerin zarar görmeden ölçülmesini sağlamaktadır. Ayrıca yüksek hızlı ölçüm avantajı sayesinde endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım alanına sahiptir. Ancak maliyetlerinin yüksek olması bazı uygulamalarda dezavantaj oluşturabilmektedir (Jain, 1990: 66).

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin doğruluğu; ölçüm uzunluğu, prob hassasiyeti, ölçüm ortamı ve yüzey temizliği gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu nedenle ölçüm işlemlerinin standart koşullarda gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Leach, 2013: 85).

3.3. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler

Yüzey pürüzlülüğü talaşlı imalat işlemlerinde birçok parametreden etkilenmektedir. İşleme sırasında oluşan kesme kuvvetleri, takım titreşimleri, talaş oluşumu ve sıcaklık değişimleri yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle yüzey pürüzlülüğünün kontrol altına alınabilmesi için işleme parametrelerinin doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2014: 733).

Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerin optimize edilmesi sayesinde daha kaliteli yüzeyler elde edilmekte ve üretim verimliliği artırılmaktadır. Günümüzde Taguchi yöntemi, varyans analizi ve yapay zekâ tabanlı optimizasyon yöntemleri yüzey pürüzlülüğü analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Davim, 2008: 118).

Tornalama işlemlerinde ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliği en önemli işleme parametreleri arasında yer almaktadır. Bunun yanında kesici takım geometrisi ve iş parçası malzemesi de yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle takım ucunun keskinliği ve iş parçasının mekanik özellikleri yüzey oluşum mekanizmasında belirleyici rol oynamaktadır (Stephenson ve Agapiou, 2016: 521).

3.3.1. İlerleme miktarı (f)

İlerleme miktarı, kesici takımın iş parçası üzerinde bir devirde aldığı ilerleme mesafesi olarak tanımlanmaktadır. Tornalama işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrelerden biri ilerleme miktarıdır. İlerleme miktarının artmasıyla birlikte takımın yüzey üzerinde bıraktığı izler büyümekte ve yüzey pürüzlülüğü değerleri artmaktadır (Boothroyd ve Knight, 2006,:241). Düşük ilerleme miktarlarında daha düzgün yüzeyler elde edilirken, yüksek ilerleme miktarlarında yüzey kalitesi bozulabilmektedir. Bununla birlikte çok düşük ilerleme değerleri üretim süresini uzatmakta ve ekonomik açıdan dezavantaj oluşturmaktadır.

Düşük ilerleme miktarlarında daha düzgün yüzeyler elde edilmesine rağmen işleme süresi uzamaktadır. Yüksek ilerleme miktarlarında ise talaş kaldırma oranı artmakta ancak yüzey kalitesi olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle üretim verimliliği ile yüzey kalitesi arasında uygun denge kurulması gerekmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2014: 741). İlerleme miktarının artması aşağıdaki sonuçlara neden olabilmektedir:

- Yüzey pürüzlülüğünün artması
- Kesme kuvvetlerinin yükselmesi
- Takım aşınmasının hızlanması
- Enerji tüketiminin artması

Literatürde gerçekleştirilen birçok çalışmada ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olduğu belirtilmektedir.

Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde ilerleme miktarının artırılması yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin etkilere neden olmaktadır. Özellikle düşük ilerleme değerlerinde daha düşük Ra değerleri elde edilmektedir. Literatürde yapılan birçok çalışmada ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olduğu belirtilmiştir (Davim, 2008: 126).Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde düşük ilerleme değerleri daha kaliteli yüzeyler

sağlayabilmektedir. Ancak çok düşük ilerleme miktarları takım ile iş parçası arasında sürtünmeyi artırarak yığıntı talaş oluşumuna neden olabilmektedir.

3.3.2. Kesme hızı (V_c)

Kesme hızı, kesici takım ile iş parçası arasındaki bağıl kesme hareketinin hızını ifade etmektedir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi iş parçası malzemesi ve takım özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Genel olarak kesme hızının artırılması yüzey kalitesini iyileştirmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2016: 488).

Kesme hızının artması aşağıdaki etkileri oluşturabilmektedir:

- Yüzey pürüzlülüğünün azalması
- Talaş akışının iyileşmesi
- Yığıntı talaş oluşumunun azalması
- Üretim süresinin kısılması

Düşük kesme hızlarında yığıntı talaş oluşumu daha fazla meydana gelmekte ve bu durum yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Yüksek kesme hızlarında ise kesme işlemi daha stabil gerçekleşmekte ve daha düzgün yüzeyler elde edilmektedir (Boothroyd ve Knight, 2006: 257).

Ancak çok yüksek kesme hızlarında kesme bölgesindeki sıcaklığın artması takım aşınmasını hızlandırabilmektedir. Bu nedenle optimum kesme hızının belirlenmesi takım ömrü ve yüzey kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır (Davim, 2008: 131).

3.3.3. Talaş derinliği (A_p)

Talaş derinliği, kesici takımın iş parçasına nüfuz ettiği mesafeyi ifade etmektedir. Talaş derinliği kesme kuvvetleri, titreşim oluşumu ve takım yükleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Talaş derinliğinin artmasıyla birlikte kesme kuvvetleri yükselmekte ve yüzey kalitesi olumsuz etkilenebilmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2014: 744).

Düşük talaş derinliklerinde daha stabil kesme şartları oluşmakta ve titreşim miktarı azalmaktadır. Bu durum yüzey kalitesinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle ince işleme operasyonlarında düşük talaş derinlikleri tercih edilmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2016: 503).

Yüksek talaş derinlikleri talaş kaldırma oranını artırmasına rağmen takım üzerindeki mekanik yükleri yükseltmekte ve takım aşınmasını hızlandırabilmektedir. Bu nedenle talaş derinliği seçimi tezgâh kapasitesi ve takım dayanımı dikkate alınarak yapılmalıdır (Davim, 2008: 136).

3.3.4. Kesici takım geometrisi

Kesici takım geometrisi, talaş oluşumu ve yüzey kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Takım talaş açısı, serbest aç, uç yarıçapı ve kesici kenar geometrisi yüzey oluşum mekanizmasını doğrudan etkilemektedir (Boothroyd ve Knight, 2006: 198).

Keskin kesici kenarlara sahip takımlar daha düşük kesme kuvvetleri oluşturarak daha kaliteli yüzeyler elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle alüminyum alaşımlarının işlenmesinde yüksek pozitif talaş açısına sahip kesici takımlar tercih edilmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2016: 476).

Takım uç yarıçapının artırılması yüzey pürüzlülüğünü azaltabilmektedir. Ancak büyük uç yarıçapları titreşim oluşum riskini artırabilmektedir. Bu nedenle takım geometrisinin işleme şartlarına uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir (Davim, 2008: 142).

3.3.5. İş parçası malzemesi

İş parçası malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkiye sahiptir. Sertlik, süneklik, termal iletkenlik ve mikro yapı özellikleri talaş oluşumu sırasında yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2014: 752).

Sünek malzemelerde yığıntı talaş oluşumu daha fazla meydana gelmekte ve bu durum yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Alüminyum alaşımları yüksek sünekliğe sahip olmaları nedeniyle işleme sırasında takım ucuna yapışma eğilimi gösterebilmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2016: 534).

Malzemenin sertliğinin artması kesme kuvvetlerini yükseltmekte ve takım aşınmasını hızlandırabilmektedir. Bunun yanında homojen mikro yapıya sahip malzemelerde daha stabil kesme şartları oluşmakta ve daha kaliteli yüzeyler elde edilmektedir (Davim, 2008: 149).

4. ALÜMİNYUM 5083 ALAŞIMI

4.1. 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

5XXX serisi alüminyum alaşımları, temel alaşım elementi olarak magnezyum (Mg) içeren alüminyum alaşımları grubunda yer almaktadır. Bu alaşımlar yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk, iyi kaynaklanabilirlik ve yüksek mekanik dayanım özellikleri nedeniyle özellikle denizcilik, otomotiv ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Davis, 1993: 214).

5XXX Serisi Yaygın Alaşımlar;

- Al 5005
- Al 5052
- Al 5083
- Al 5086
- Al 5754

5XXX serisi alaşımlar ısıl işlemle sertleştirilemeyen alaşımlar grubunda yer almakta olup dayanımlarını büyük oranda soğuk şekillendirme işlemleri ile kazanmaktadır. Magnezyum elementi alaşımın mukavemetini artırırken aynı zamanda korozyon direncinin gelişmesine de katkı sağlamaktadır (Polmear, 2006: 97). Bu alaşım grubunun en önemli avantajlarından biri deniz suyuna karşı yüksek dayanım göstermesidir. Bu nedenle gemi gövdeleri, tankerler ve deniz platformları gibi uygulamalarda yaygın şekilde tercih edilmektedir (Totten ve MacKenzie, 2003: 188). 5XXX serisi alaşımlar ayrıca iyi işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Talaşlı imalat işlemlerinde uygun kesme parametreleri kullanıldığında yüksek yüzey kalitesi elde edilebilmektedir (ASM Handbook, 1990: 412). 5XXX serisi alüminyum alaşımlarının temel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Yüksek korozyon direnci
- İyi kaynaklanabilirlik
- Düşük yoğunluk
- Yüksek süneklik
- İyi şekillendirilebilirlik
- Orta seviyede mekanik dayanım

4.2. Al 5083 Alaşımının Kimyasal Özellikleri

Al 5083 alaşımı, yüksek magnezyum içeriğine sahip 5XXX serisi alüminyum alaşımlarından biridir. Alaşımın temel özelliklerini belirleyen ana element magnezyumdur. Bunun yanında mangan ve krom elementleri de mekanik dayanım ile korozyon direncinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Davis, 1993: 229).

Al 5083 alaşımı özellikle deniz suyuna karşı yüksek dayanım göstermesi nedeniyle denizcilik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşımın düşük yoğunluğa sahip olması hafif yapı gerektiren uygulamalarda önemli avantaj sağlamaktadır (Polmear, 2006: 115).

Kimyasal bileşimde yer alan magnezyum elementi mukavemeti artırırken, krom elementi tane yapısının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Düşük bakır oranı ise korozyon direncinin korunmasına yardımcı olmaktadır (ASM Handbook, 1990: 419).

Tablo 4.2. Al 5083 alaşımının tipik kimyasal bileşimi (Bluescope Distribution, 2026)

Element	Oran (%)
Magnezyum (Mg)	4.0 – 4.9
Mangan (Mn)	0.4 – 1.0
Krom (Cr)	0.05 – 0.25
Silisyum (Si)	Maks. 0.4
Demir (Fe)	Maks. 0.4
Bakır (Cu)	Maks. 0.1
Çinko (Zn)	Maks. 0.25
Titanyum (Ti)	Maks. 0.15
Alüminyum (Al)	Kalan
Element	Oran (%)
Magnezyum (Mg)	4.0 – 4.9

Al 5083 alaşımının yüksek magnezyum oranı mekanik dayanımın artmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte sünek yapısı nedeniyle talaşlı imalat işlemlerinde yığıntı talaş

oluşumu görülebilmektedir. Bu nedenle uygun kesme parametrelerinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Totten ve MacKenzie, 2003: 204).

Al 5083 Alaşımının Kimyasal Avantajları

- Yüksek korozyon direnci
- Düşük yoğunluk
- İyi kaynak kabiliyeti
- Deniz suyuna dayanım
- Yüksek oksidasyon direnci

Magnezyum elementi alaşımın mekanik dayanımını artırırken aynı zamanda korozyon direncine olumlu katkı sağlamaktadır. Mangan elementi tane yapısını iyileştirerek mukavemet artışı sağlamaktadır. Krom elementi ise tane büyümesini kontrol ederek malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir.

Al 5083 alaşımının düşük bakır içeriği, deniz suyuna karşı yüksek korozyon dayanımı sağlamaktadır. Bakır oranının düşük olması galvanik korozyon riskini azaltmaktadır. Bu alaşım özellikle tuzlu su ortamlarında üstün performans göstermektedir. Bu nedenle gemi yapıları ve denizcilik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Al 5083 alaşımı oksidasyon direnci açısından da avantajlı bir malzemedir. Yüzeyinde oluşan doğal oksit tabakası malzemeyi dış ortam etkilerine karşı korumaktadır. Kimyasal bileşim, malzemenin işlenebilirlik özellikleri üzerinde de etkili olmaktadır. Yüksek magnezyum içeriği işleme sırasında yapışma eğilimini artırabilmektedir. Bu nedenle talaşlı imalat işlemlerinde uygun kesme parametrelerinin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. (Radetić vd., 2012)

4.3. Mekanik Özellikleri

Al 5083 alaşımı yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk kombinasyonu sayesinde mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle hafif yapı gerektiren uygulamalarda çelik malzemelere alternatif olarak kullanılabilir (Davis, 1993: 236).

Alaşımın yüksek süneklik özelliği şekillendirilebilirliği artırmaktadır. Bununla birlikte yüksek darbe dayanımı sayesinde dinamik yüklemelere karşı direnç gösterebilmektedir (Polmear, 2006: 121).

Al 5083 alaşımının mekanik özellikleri üretim yöntemi, soğuk şekillendirme miktarı ve işlem koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle H serisi temper uygulamaları mukavemet değerlerini artırmaktadır (ASM Handbook, 1990: 425).

Tablo 4.3. Al 5083 Alaşımının Mekanik zellikleri (AltekMetal, 2026)

Özellik	Değer
Yoğunluk	2.66 g/cm ³
Çekme Dayanımı	270 – 350 MPa
Akma Dayanımı	125 – 275 MPa
Elastisite Modülü	72 GPa
Sertlik	Yaklaşık 75 HB
Uzama	%12 – %20

Al 5083 alaşımı düşük yoğunluğu sayesinde hafiflik avantajı sağlarken yüksek mekanik dayanımı sayesinde yapısal uygulamalarda güvenilir performans göstermektedir. Ayrıca yüksek süneklik özelliği talaşlı imalat işlemleri sırasında kesme davranışını etkileyen önemli faktörlerden biridir (Totten ve MacKenzie, 2003: 211).

Al 5083 Alaşımının Mekanik Avantajları

- Yüksek mukavemet
- Düşük yoğunluk
- İyi süneklik
- Yüksek darbe dayanımı
- İyi şekillendirilebilirlik

4.4. İşlenebilirlik zellikleri

Al 5083 alaşımı talaşlı imalat işlemlerinde iyi işlenebilirlik özelliklerine sahip alüminyum alaşımlarından biridir. Düşük yoğunluğu ve yüksek termal iletkenliği sayesinde kesme işlemleri sırasında oluşan sıcaklık daha hızlı dağılmakta ve takım üzerindeki termal yükler azalmaktadır (Davim, 2008, 173). Bununla birlikte alaşımın yüksek sneklige sahip olması talaş kaldırma işlemleri sırasında yığıntı talaş oluşumuna neden olabilmektedir.

Özellikle düşük kesme hızlarında takım ucunda malzeme yapışması meydana gelmekte ve bu durum yüzey kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Stephenson ve Agapiou, 2016: 566).

Al 5083 alaşımının işlenmesinde kesici takım geometrisi ve kesme parametreleri büyük önem taşımaktadır. Pozitif talaş açısına sahip keskin takımlar kullanılması kesme kuvvetlerini azaltarak daha kaliteli yüzeyler elde edilmesini sağlamaktadır (Kalpakjian ve Schmid, 2014, 781). Yüksek kesme hızları ve düşük ilerleme miktarları kullanıldığında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin iyileştiği literatürde belirtilmektedir. Ayrıca uygun soğutma koşullarının kullanılması takım ömrünü artırmakta ve takım aşınmasını azaltmaktadır (Davim, 2008: 178).

Al 5083 Alaşımının İşlenebilirlik Özellikleri

- Yüksek termal iletkenlik
- Düşük kesme kuvvetleri
- Yığıntı talaş oluşma eğilimi
- İyi talaş kaldırma performansı
- Yüksek yüzey kalitesi elde edebilme

4.5. Endüstriyel Kullanım Alanları

Al 5083 alaşımı sahip olduğu yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk ve yüksek mekanik dayanım özellikleri sayesinde birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle deniz suyuna karşı yüksek dayanım göstermesi nedeniyle gemi ve denizcilik sektöründe önemli kullanım alanına sahiptir (Davis, 1993: 244).

Gemi gövdeleri, tankerler, deniz platformları ve yat üretiminde Al 5083 alaşımı yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun yanında hafif yapı gerektiren otomotiv ve savunma sanayi uygulamalarında da kullanılmaktadır (Totten ve MacKenzie, 2003: 226).

Savunma sanayinde zırhlı araç parçaları, askeri taşıyıcı sistemler ve çeşitli yapısal bileşenlerin üretiminde Al 5083 alaşımı kullanılmaktadır. Yüksek darbe dayanımı ve hafiflik avantajı bu uygulamalarda önemli avantaj sağlamaktadır (Polmear, 2006, 132). Ayrıca kaynak kabiliyetinin yüksek olması nedeniyle basınçlı kaplar, yakıt tankları ve kimyasal depolama sistemlerinde de kullanım alanı bulmaktadır. Havacılık sektöründe ise belirli yapısal parçalarda hafiflik avantajı nedeniyle tercih edilmektedir (ASM Handbook, 1990: 437).

5. TAGUCHI METODU VE OPTİMİZASYON

5.1. Deney Tasarımı Kavramı

Deney tasarımı, bir sistem veya üretim süreci üzerinde etkili olan parametrelerin kontrollü şekilde incelenmesini sağlayan istatistiksel bir yöntemdir. Deney tasarımı yöntemleri sayesinde çok sayıda değişkenin performans üzerindeki etkileri daha az deney ile analiz edilebilmektedir. Özellikle mühendislik uygulamalarında maliyetin azaltılması, zaman tasarrufu sağlanması ve optimum parametrelerin belirlenmesi açısından deney tasarımı yöntemleri büyük önem taşımaktadır (Montgomery, 2017: 3).

Klasik deney yöntemlerinde parametrelerin tüm kombinasyonlarının ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Parametre ve seviye sayısının artması deney sayısını önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu durum hem maliyet hem de zaman açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Deney tasarımı yöntemleri ise minimum deney sayısı ile maksimum bilgi elde edilmesini sağlamaktadır (Ross, 1996: 21).

Talaşlı imalat çalışmalarında deney tasarımı yöntemleri; yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü, kesme kuvvetleri ve enerji tüketimi gibi performans kriterlerinin optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle Taguchi yöntemi, varyans analizi ve yanıt yüzey yöntemi modern imalat araştırmalarında sıkça tercih edilmektedir (Phadke, 1989: 44).

Deney tasarımı yöntemleri sayesinde parametrelerin bireysel ve ortak etkileri sistematik şekilde analiz edilebilmektedir.

Deney tasarımının temel amacı aşağıdaki şekilde özetlenebilmektedir:

- Deney sayısını azaltmak
- Zaman tasarrufu sağlamak
- Maliyetleri düşürmek
- Parametre etkilerini belirlemek
- Optimum koşulları tespit etmek

Klasik deney yöntemlerinde her parametre kombinasyonu için ayrı deney yapılması gerekmektedir. Parametre ve seviye sayısının artması deney sayısını önemli ölçüde artırmaktadır.

Örneğin üç parametre ve üç seviyeden oluşan bir sistemde tam faktöriyel deney tasarımı 27 farklı deney yapılması gerekmektedir. Daha fazla parametre kullanılması durumunda deney sayısı çok daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu nedenle mühendislik çalışmalarında Taguchi yöntemi gibi optimize edilmiş deney tasarımı teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

5.2. Taguchi Metodu

Taguchi metodu, Japon mühendis Genichi Taguchi tarafından geliştirilen ve kalite iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan istatistiksel optimizasyon yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, deney sayısını azaltarak sistem performansını etkileyen parametrelerin optimum seviyelerini belirlemeyi amaçlamaktadır (Taguchi vd., 2005: 8).

Taguchi yönteminin temel amacı, sistemin dış etkilerden minimum düzeyde etkilenmesini sağlayarak daha kararlı üretim süreçleri oluşturmaktır. Bu yaklaşım sayesinde kalite kayıpları azaltılmakta ve üretim verimliliği artırılmaktadır. Özellikle üretim mühendisliği uygulamalarında maliyet azaltma açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Ross, 1996: 34).

Taguchi yöntemi talaşlı imalat uygulamalarında yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvvetlerinin optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem sayesinde daha az deney ile güvenilir sonuçlar elde edilmekte ve optimum işleme parametreleri belirlenebilmektedir (Phadke, 1989: 77).

Taguchi yönteminde kalite karakteristikleri genellikle “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmak üzere üç temel grupta değerlendirilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü çalışmalarında genellikle “en küçük en iyi” yaklaşımı tercih edilmektedir (Taguchi vd., 2005: 18).

Taguchi yönteminde parametreler belirli seviyelerde seçilmekte ve ortogonal diziler yardımıyla deney planı oluşturulmaktadır. Yöntemin temel bileşenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Kontrol faktörleri
- Gürültü faktörleri
- Ortogonal diziler

- Sinyal/gürültü oranı
- Varyans analizi

Kontrol faktörleri sistem performansını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Tornalama işlemlerinde kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği kontrol faktörleri olarak değerlendirilmektedir. Gürültü faktörleri ise sistem performansını olumsuz etkileyen ve kontrol edilmesi zor olan değişkenlerdir. Taguchi yönteminde kalite kaybının azaltılması temel hedeflerden biridir. Taguchi kalite kaybını ekonomik açıdan değerlendirmiş ve hedef değerden sapmanın maliyet oluşturduğunu belirtmiştir.

Taguchi yönteminde üç temel kalite karakteristiği kullanılmaktadır:

- En küçük en iyi
- En büyük en iyi
- Nominal en iyi

Yüzey pürüzlülüğü çalışmalarında genellikle “en küçük en iyi” kalite karakteristiği tercih edilmektedir. Çünkü yüzey pürüzlülüğünün minimum olması hedeflenmektedir. (Yaka, 2021).

5.3. Ortogonal Diziler

Ortogonal diziler, Taguchi yönteminin temel bileşenlerinden biri olup deneylerin sistematik şekilde planlanmasını sağlayan matris yapılarıdır. Ortogonal diziler sayesinde çok sayıda parametre ve seviyenin etkileri daha az deney ile analiz edilebilmektedir. Bu yöntem deney sayısını azaltırken istatistiksel güvenilirliğin korunmasını sağlamaktadır (Ross, 1996: 52).

Taguchi yönteminde kullanılan ortogonal diziler parametrelerin birbirinden bağımsız şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum parametre etkilerinin daha doğru şekilde analiz edilmesine katkıda bulunmaktadır. L4, L8, L9, L16 ve L27 gibi farklı ortogonal diziler parametre sayısı ve seviye durumuna göre seçilmektedir (Phadke, 1989: 91).

Talaşlı imalat çalışmalarında özellikle L27 ortogonal dizisi üç parametre ve üç seviyeden oluşan deney tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde tam faktöriyel deney tasarımına göre çok daha düşük deney sayısı ile güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir (Montgomery, 2017: 488).

Ortogonal diziler sayesinde parametrelerin bireysel etkileri ile birlikte proses performansı üzerindeki genel etkileri de değerlendirilebilmektedir. Bu durum üretim süreçlerinin optimize edilmesi açısından önemli avantaj sağlamaktadır (Taguchi vd.: 2005, 37).

5.4. Sinyal-Gürültü (S/N) Oranı

Taguchi yönteminde performans değerlendirmesi amacıyla kullanılan temel analiz yöntemlerinden biri sinyal/gürültü (S/N) oranıdır. S/N oranı, sistem performansının dış etkiler karşısındaki kararlılığını ifade etmektedir. Burada sinyal istenilen performansı, gürültü ise performansı olumsuz etkileyen değişkenleri temsil etmektedir (Taguchi vd., 2005: 112).

S/N oranı analizi sayesinde parametrelerin kalite üzerindeki etkileri daha net şekilde değerlendirilebilmektedir. Taguchi yönteminde “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmak üzere üç temel S/N yaklaşımı kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü çalışmalarında genellikle minimum yüzey pürüzlülüğü hedeflendiğinden “en küçük en iyi” yaklaşımı tercih edilmektedir (Ross, 1996: 84).

S/N oranı analizleri sayesinde proses kararlılığı artırılmakta ve optimum parametre seviyeleri belirlenebilmektedir. Özellikle talaşlı imalat çalışmalarında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması analizlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Phadke, 1989: 134).

S/N oranının yüksek olması sistem performansının daha kararlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle optimum parametre seviyeleri belirlenirken en yüksek S/N oranına sahip kombinasyonlar dikkate alınmaktadır (Montgomery, 2017: 503).

Taguchi yönteminde üç temel S/N oranı yaklaşımı kullanılmaktadır:

- En küçük en iyi
- En büyük en iyi
- Nominal en iyi

Yüzey pürüzlülüğü çalışmalarında “en küçük en iyi” yaklaşımı tercih edilmektedir. Çünkü amaç yüzey pürüzlülüğü değerlerini minimum seviyeye indirmektir. (Yaka, 2021).

En küçük en iyi yaklaşımında kullanılan S/N oranı eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$S/N = -10 \log [(1/n) \Sigma(y^2)]$$

Burada;

- n : Gözlem tekrar sayısı
- y : Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri

S/N oranı değeri büyüdükçe sistem performansının daha iyi olduğu kabul edilmektedir. Taguchi metodunda sinyal/gürültü (S/N) oranı, normal şartlarda her bir parametre kombinasyonundaki tekrarlı deneylerin ($n>1$) ortalamasını ve varyansını bir arada değerlendirerek sistemin gürültü faktörlerine karşı kararlılığını (robustluğunu) ölçmektedir. Ancak bu çalışmada her parametre koşulu için yalnızca bir işleme numunesi kullanıldığından ($n=1$), numune içi standart sapma hesaplanamaz ve 'en küçük en iyi' karakteristiği için formül doğrudan $S/N = -10 \log(y^2)$ şekline indirgenir. Bu kurguda ($n=1$) S/N oranının "robustluk" yorumu; ölçümlerin kendi içindeki istatistiksel saçılmasından ziyade, ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerinin logaritmik olarak cezalandırılması üzerinden yapılmalıdır. Yani, tek tekrarlı L27 ortogonal dizisinde yüksek S/N oranı (sıfıra en yakın değer), o parametre kombinasyonunun kontrol edilemeyen çevresel gürültülere ve tezgâh titreşimlerine karşı malzemenin işlenebilirlik karakteristiğini en kararlı seviyede tuttuğunu; dolayısıyla sapmaları minimuma indiren en robust (gülbüz) koşulu sağladığını ifade etmektedir. S/N oranı analizi sayesinde hangi parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha etkili olduğu belirlenebilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünü minimize eden parametre seviyeleri en yüksek S/N oranına sahip seviyeler olarak değerlendirilmektedir.

S/N oranı analizinin temel avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Parametre etkilerinin belirlenmesi
- Proses kararlılığının değerlendirilmesi
- Gürültü faktörlerinin etkisinin azaltılması
- Optimum parametre seviyelerinin belirlenmesi

Taguchi yönteminde elde edilen deney sonuçları genellikle ortalama değer analizi ve S/N oranı analizi ile birlikte değerlendirilmektedir. S/N oranı özellikle talaşlı imalat çalışmalarında yüzey kalitesinin optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde S/N oranı önemli avantajlar sağlamaktadır (Montgomery, 2017: 503).

5.5. Taguchi ile Optimizasyon

Optimizasyon, bir sistemin performansını en iyi seviyeye ulaştıracak parametre kombinasyonlarının belirlenmesi işlemidir. Talaşlı imalat işlemlerinde optimizasyon çalışmaları; yüzey pürüzlülüğünü azaltmak, takım ömrünü artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Taguchi yöntemi bu amaçla en yaygın kullanılan optimizasyon yöntemlerinden biridir (Phadke, 1989: 167).

Taguchi optimizasyon yöntemi sayesinde çok sayıda parametre daha az deney ile analiz edilmekte ve optimum işleme koşulları belirlenebilmektedir. Bu yöntem özellikle CNC işleme uygulamalarında yüzey kalitesinin iyileştirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Ross, 1996: 113).

Taguchi optimizasyon süreci genel olarak parametrelerin belirlenmesi, ortogonal dizilerin oluşturulması, deneylerin gerçekleştirilmesi, S/N oranı analizlerinin yapılması ve optimum parametrelerin seçilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Elde edilen optimum parametreler doğrulama deneyleri ile test edilmektedir (Montgomery, 2017: 521).

Talaşlı imalat çalışmalarında Taguchi yöntemi kullanılarak kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri başarılı şekilde optimize edilebilmektedir. Bu yöntem sayesinde hem yüzey kalitesi artırılmakta hem de üretim verimliliği geliştirilmektedir (Taguchi vd., 2005: 144).

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Kullanılan Malzeme (Al 5083)

Bu çalışmada iş parçası malzemesi olarak 5XXX serisi alüminyum alaşımları grubunda yer alan Al 5083 alaşımı kullanılmıştır. Al 5083 alaşımı, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk, iyi kaynaklanabilirlik ve yüksek mekanik dayanım özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilen mühendislik malzemelerinden biridir.

Özellikle gemi sanayi, savunma sanayi, otomotiv ve kalıp sektöründe yaygın kullanım alanına sahip olan Al 5083 alaşımı, yüksek işlenebilirlik özellikleri sayesinde talaşlı imalat uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadır.

Çalışmada kullanılan Al 5083 malzemesi silindirik çubuk formunda temin edilmiştir. Deney numuneleri kaba olarak Ø20 mm çapında ve 70 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Toplam 27 adet numune kullanılmıştır. Her deney için farklı bir numune ve farklı bir kesici takım ucu kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Deney Numuneleri

Al 5083 alaşımının tercih edilmesinin temel nedenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Yüksek korozyon direnci
- Düşük yoğunluk
- İyi mekanik dayanım
- Yüksek işlenebilirlik
- Endüstride yaygın kullanım
- Yüksek kaynak kabiliyeti

Çalışmada kullanılan Al 5083 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1.1 Al 5083 alaşımının tipik kimyasal bileşimi (Bluesscope Distrubition, 2026)

Element	Oran (%)
Mg	4.0 – 4.9
Mn	0.4 – 1.0
Cr	0.05 – 0.25
Si	Maks. 0.4
Fe	Maks. 0.4
Cu	Maks. 0.1
Zn	Maks. 0.25
Ti	Maks. 0.15
Al	Kalan

Malzemenin yüksek magnezyum içeriğı mukavemet ve korozyon direnci açasından avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte sünek yapısı nedeniyle talaşlı imalat sırasında yapışma eğilimi gösterebilmektedir. Al 5083 alaşımının mekanik özellikleri talaşlı imalat performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Özellikle sertlik, süneklik ve elastisite modülü kesme kuvvetleri ile yüzey kalitesini etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır.

Tablo 6.1.2. Al 5083 Alaşımının Mekanik Özellikleri (AltekMetal, 2026)

Özellik	Değer
Yoğunluk	2.66 g/cm ³
Çekme Dayanımı	270 – 350 MPa
Akma Dayanımı	125 – 275 MPa
Elastisite Modülü	72 GPa
Sertlik	Yaklaşık 75 HB
Uzama	%12 – %20

6.2. Numune Hazırlama

Deneyel çalışmalarda güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için numunelerin uygun ölçülerde ve standartlara uygun şekilde hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada kullanılan deney numuneleri silindirik geometriye sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Kaba numuneler Ø20 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda kesilmiştir.



Şekil 6.2. Tornalama İşlemi Hazırlığı

Toplam 27 adet deney numunesi hazırlanmış ve her deney için ayrı numune kullanılmıştır. Her numunede yalnızca bir işlem gerçekleştirilerek takım aşınmasının deney sonuçları üzerindeki etkisi minimum seviyeye indirilmeye çalışılmıştır.

Numune hazırlama süreci aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

1. Al 5083 çubuk malzemenin temin edilmesi
2. İstenilen boyutlarda kesilmesi
3. Yüzey temizliğinin yapılması
4. Tezgâha bağlanacak yüzeylerin hazırlanması
5. Deney numaralarının belirlenmesi

Numunelerin başlangıç yüzeylerinde oluşabilecek düzensizliklerin deney sonuçlarını etkilememesi amacıyla ön yüzey düzeltme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlama işlemleri sırasında ölçü hassasiyetine dikkat edilmiş ve tüm numunelerin aynı geometriye sahip olması sağlanmıştır. Her numune üzerine deney numarası verilerek ölçüm ve analiz süreçlerinde karışıklık oluşması engellenmiştir. Numunelerin uygun şekilde hazırlanması, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır.

Deneyler sırasında numunelerin CNC torna tezgâhına rijit şekilde bağlanmasına dikkat edilmiştir. Bağlama hatalarından kaynaklanabilecek titreşimlerin yüzey kalitesini etkilememesi amaçlanmıştır. Numune hazırlama işlemlerinin standart şekilde gerçekleştirilmesi sayesinde deney sonuçlarının güvenilirliği artırılmıştır.

6.3. CNC Torna Tezgâhı

Deneyisel çalışmalar DOOSAN GT2600 CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. CNC torna tezgâhları yüksek hassasiyet, yüksek tekrarlanabilirlik ve otomatik kontrol özellikleri nedeniyle modern talaşlı imalat uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. DOOSAN GT2600 CNC torna tezgâhı yüksek rijitlik ve hassas işleme özelliklerine sahip bir takım tezgâhıdır.



Şekil 6.3. Doosan GT2600 CNC Torna Tezgahı

Kaynak: Doosan Corporation

Tezgâhın temel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Yüksek işleme hassasiyeti
- Bilgisayar kontrollü çalışma sistemi
- Yüksek devir kapasitesi
- Düşük titreşim seviyesi
- Seri üretime uygun yapı

Deneyler sırasında tüm işleme parametreleri CNC kontrol paneli üzerinden ayarlanmıştır. Kesme işlemleri sırasında iş parçası aynaya bağlanarak dönme hareketi sağlanmış, kesici takım ise ilerleme hareketi gerçekleştirilerek talaş kaldırma işlemini yapmıştır. CNC torna tezgâhının tercih edilmesinin temel nedenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir;

- Hassas ölçü kontrolü
- Sabit kesme parametreleri
- Tekrarlanabilir deney koşulları
- Düşük operatör hatası
- Yüksek yüzey kalitesi elde edebilme

Deneyler sırasında titreşim oluşumunu minimum seviyeye indirebilmek amacıyla uygun bağlama şartları sağlanmıştır ve CNC torna tezgâhı kullanılması sayesinde tüm deneylerde aynı işleme koşulları korunmuş ve deneysel sonuçların güvenilirliği artırılmıştır. Ayrıca deney sürecinde kesme parametreleri deney tasarımına uygun şekilde değiştirilmiştir.

6.4. Kesici Takım Özellikleri

Bu çalışmada kesici takım olarak VCGT 332 AL TUNGALOY marka karbür kesici uçlar kullanılmıştır. Toplam 27 adet kesici takım ucu kullanılmış ve her deney için farklı bir takım tercih edilmiştir. Her deneyde yeni takım kullanılması sayesinde takım aşınmasının deney sonuçları üzerindeki etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. VCGT tipi kesici takımlar özellikle alüminyum alaşımlarının işlenmesi için uygun geometrilere sahiptir.



Şekil 6.4. Tungaloy VCGT 332 Al Finish Kesici Uçları

Kaynak: Keramika Seramik Fabrikası

Kesici takımın temel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir:

- Karbür takım yapısı
- Keskin kesici kenarlar
- Düşük sürtünme özelliği
- Alüminyum işleme geometrisi
- Yüksek aşınma direnci

Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde kesici takım geometrisi yüzey kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. VCGT takım geometrisi düşük kesme kuvvetleri sağlayarak yüzey kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Kesici takımların uç geometrileri talaş tahliyesini kolaylaştırmakta ve yığıntı talaş oluşumunu azaltmaktadır.

Kesici takım seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- İş parçası malzemesi
- Yüzey kalitesi beklentisi
- Takım dayanımı
- Talaş kontrolü
- Kesme parametreleri

Takım tutucu sistemi CNC torna tezgâhına uygun şekilde bağlanmış ve takım rijitliği sağlanmıştır.

6.5. Deney Parametreleri

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünü etkileyen temel işleme parametreleri olarak kesme hızı (V_c), ilerleme miktarı (f) ve talaş derinliği (A_p) seçilmiştir. Parametre seviyeleri kesici takım üreticisinin önerileri ve literatür çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan parametreler aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

- İlerleme miktarı (f): 0,2 – 0,35 – 0,5 mm/dev
- Kesme hızı (V_c): 120– 170 – 220 m/dk
- Talaş derinliği (A_p): 0,75 – 1.5 – 2 mm

Bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Düşük ilerleme miktarlarının daha iyi yüzey kalitesi sağlaması beklenirken, yüksek ilerleme miktarlarının yüzey pürüzlülüğünü artırabileceği öngörülmüştür. Kesme hızının artırılması ile yüzey kalitesinin iyileşmesi beklenmektedir. Ancak çok yüksek hızlarda takım sıcaklığının artması takım ömrünü olumsuz etkileyebilmektedir. Talaş derinliğinin artması kesme kuvvetlerini yükselterek titreşim oluşumuna neden olabilmektedir. Deney parametrelerini gösteren Tablo 6.5’ de değerler gösterilmiştir.

Tablo 6.5. Deney Parametreleri

Deney Parametresi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
İlerleme Miktarı (f) mm/dev	0,2	0,35	0,5
Kesme Hızı (Vc) m/dk	120	170	220
Talaş Derinliği (Ap) mm	0,75	1.5	2

6.6. Deney Tasarımı (Taguchi L27)

Bu çalışmada deney tasarımı yöntemi olarak Taguchi L27 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde üç parametre ve üç seviyeden oluşan deney sistemi için L27 ortogonal dizisi uygun görülmüştür. Taguchi yöntemi sayesinde parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri sistematik şekilde analiz edilmiştir.

L27 deney tasarımı toplam 27 deneyden oluşmaktadır ve deney tasarımında kullanılan parametreler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- İlerleme miktarı (f)
- Kesme hızı (Vc)
- Talaş derinliği (Ap)

Her parametre üç farklı seviyede değerlendirilmiştir. Deney tasarımında kullanılan parametre kombinasyonları Tablo 6.6’te verilmiştir.

Tablo 6.6. Deney Tasarım Tablosu

Deney No	f (mm/dev)	Vc (m/dk)	Ap (mm)
1	0,2	120	0,75
2	0,2	170	0,75
3	0,2	220	0,75
4	0,2	120	1,5
5	0,2	170	1,5
6	0,2	220	1,5
7	0,2	120	2
8	0,2	170	2
9	0,2	220	2
10	0,35	120	0,75
11	0,35	170	0,75
12	0,35	220	0,75
13	0,35	120	1,5
14	0,35	170	1,5
15	0,35	220	1,5
16	0,35	120	2
17	0,35	170	2
18	0,35	220	2
19	0,5	120	0,75
20	0,5	170	0,75
21	0,5	220	0,75
22	0,5	120	1,5
23	0,5	170	1,5
24	0,5	220	1,5
25	0,5	120	2
26	0,5	170	2
27	0,5	220	2

Deneyler sırasında her kombinasyon için ayrı numune ve ayrı kesici takım kullanılmıştır. Böylece Taguchi yöntemi sayesinde yüzey pürüzlülüğünü minimize eden optimum parametre kombinasyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Taguchi metodunda deney sonuçları daha sonra S/N oranı analizi ile değerlendirilmiştir ve L27 ortogonal dizisinin kullanılması deney süresinin azaltılması açısından önemli avantaj sağlamıştır.

6.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri (Profilometre)

Tornalama işlemleri tamamlandıktan sonra işlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Profilometre cihazı yüzey üzerindeki mikro geometrik düzensizlikleri hassas şekilde ölçebilen temaslı ölçüm cihazıdır. Time Tr-200 marka profilometre kullanılmıştır. Cihaz cut off uzunluğu 0,8mm, ölçüm uzunluğu 5mm, TS100 Elmas, radius:5µm ve RC filtre kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Profilometre Ölçümü

Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü parametresi olarak Ra değeri dikkate alınmıştır. Ra değeri yüzey profilindeki ortalama sapmayı ifade etmekte olup talaşlı imalat çalışmalarında en yaygın kullanılan yüzey pürüzlülüğü parametresidir. Ölçüm işlemleri sırasında her numune belirli ölçüm uzunluğu boyunca taranmış ve birden fazla ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Ölçüm sürecinde aşağıdaki kriterlere dikkat edilmiştir;

- Ölçüm yüzeyinin temiz olması
- Probun doğru konumlandırılması
- Sabit ölçüm uzunluğu kullanılması
- Ölçüm tekrarlarının yapılması

Profilometre ölçümleri sayesinde farklı işleme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçlarının güvenilirliği açısından her deney sonrası ölçüm işlemleri aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Deney Sonuçları

Bu çalışmada Al 5083 alaşımının tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme parametrelerinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında toplam 27 farklı parametre kombinasyonu uygulanmış ve her deney için farklı numune ile farklı kesici takım kullanılmıştır.

Uygunluk Özeti	
R Kare	0,902957
Düzeltilmiş R Kare	0,873844
Kök Ortalama Kare Hatası	2,135179
Yanıtın Ortalama Değeri	-10,1953
(Ağırlıklı) Gözlem Sayısı	27

Şekil 7.1.1. L27 Modelinin SN Özeti

Şekil 7.1.1. incelendiğinde kurulan model için elde edilen R^2 değeri 0,903 olarak bulun muştur. Bu sonuç, modelin deneysel verileri yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranındaki değişimin yaklaşık %90,3'ü kesme parametreleri (V_c , f ve a_p) tarafından açıklanmaktadır.

Etki Testleri					
Kaynak	Parametre Sayısı	SD	Kareler Toplamı	F Değeri	Olasılık > F
Kesme Hızı V_c (m/dk)	2	2	1,69651	0,1861	0,8316
İlerleme Miktarı f (mm/dev)	2	2	630,68349	69,1692	<,0001*
Kesme Derinliği a_p (mm)	2	2	216,02100	23,6918	<,0001*

Şekil 7.1.2. ANOVA Sonuçları

Şekil 7.1.2 incelendiğinde ANOVA sonuçlarına baktığımızda ise;

Kesme Hızı (Vc)

$$P = 0,8316 > 0,05$$

Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamıştır.

İlerleme Miktarı (f)

$$P < 0,0001$$

İlerleme miktarı yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahiptir.

Kesme Derinliği (ap)

$$P < 0,0001$$

Kesme derinliği yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahiptir.

Deneylerde ilerleme miktarı (f), kesme hızı (Vc) ve talaş derinliği (Ap) parametreleri üç farklı seviyede değerlendirilmiştir. Tornalama işlemleri sonrasında elde edilen yüzeyler profilometre cihazı ile ölçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametre seviyeleri kesici takım üretici firması tarafından belirlenen değerler aralığında aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- İlerleme miktarı (f): 0,2 – 0,35 – 0,5 mm/dev
- Kesme hızı (Vc): 120 – 170 – 220 m/dk
- Talaş derinliği (Ap): 0,75 – 1.5 – 2 mm

Etki Testleri					
Kaynak	Parametre Sayısı	SD	Kareler Toplamı	F Değeri	Olasılık > F
Kesme Hızı Vc (m/dk)	2	2	1,69651	0,1861	0,8316
İlerleme Miktarı f (mm/dev)	2	2	630,68349	69,1692	<,0001*
Kesme Derinliği ap (mm)	2	2	216,02100	23,6918	<,0001*

Şekil 7.1.2. ANOVA Sonuçları

Effect Tests tablosundaki Sum of Squares değerleri:

$$V_c = 1,69651$$

$$f = 630,68349$$

$$a_p = 216,02100$$

Toplam:

$$848,401$$

$$\text{Hata(Residual)} = 939,5807/848,40100 = 91,1797$$

Katkı:

$$f_{\text{katkı}} : (630,68349/939,5807) \times 100 = \% 67,12$$

$$a_{p\text{katkı}} : (216,02100/939,5807) \times 100 = \%22,99$$

$$V_{c\text{katkı}} : (1,69651/939,5807) \times 100 = \%0,18$$

$$\text{Hata} : (91,1797/939,5807) \times 100 = \%9,71$$

ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en yüksek katkı oranına sahip parametre ilerleme miktarı (%67,12) olmuştur. Bunu %22,99 katkı oranı ile kesme derinliği takip etmiştir. Kesme hızının katkı oranı ise %0,18 olarak ve parametreler dışı etkenlerin oranı ise %9,71 olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu gözlemlenmiştir. İlerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinde belirgin artış meydana gelmiştir.

Düşük ilerleme miktarında takım izleri daha az oluştuğundan yüzey kalitesinin iyileştiği görülmüştür. Özellikle 0,2 mm/dev ilerleme değerinde daha düzgün yüzeyler elde edilmiştir.

Kesme hızının artırılmasıyla birlikte yüzey kalitesinde kısmi iyileşme gözlemlenmiştir. Fakat yüksek kesme hızlarında kesme bölgesindeki deformasyonların azalması ve yığıntı talaş oluşumunun düşmesi anlamlı olmayan bir eğilim göstermiştir.

Talaş derinliği parametresi incelendiğinde düşük talaş derinliği değerlerinde daha stabil kesme şartlarının oluştuğu görülmüştür. Talaş derinliği arttıkça kesme kuvvetlerinin yükselmesi nedeniyle titreşim oluşumu artmış ve yüzey kalitesi olumsuz etkilenmiştir.

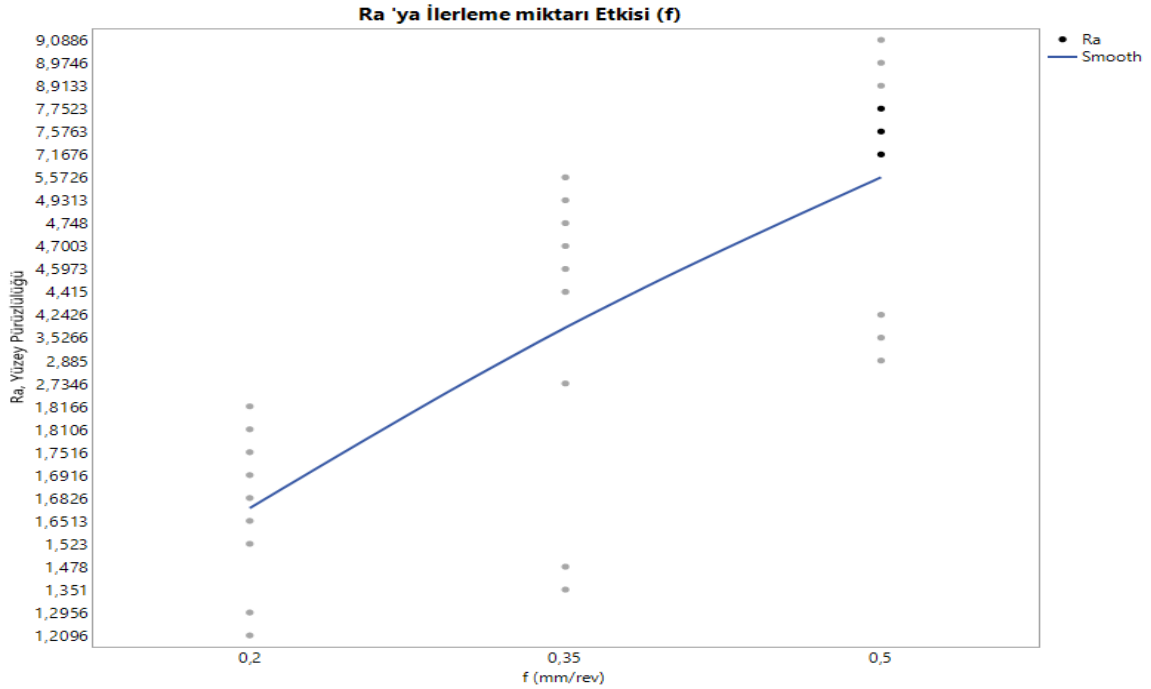


Şekil 7.1. 3 Tornalanmış Al 5083 Numuneleri

DeneySEL sonuçlar değerlendirildiğinde Şekil 7.1’de gözle yapılan gözlem yoluyla bile en iyi yüzey kalitesinin düşük ilerleme miktarı, düşük talaş derinliği ve yüksek kesme hızı kombinasyonunda elde edildiği belirlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen bulgular, Al 5083 alaşımının işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

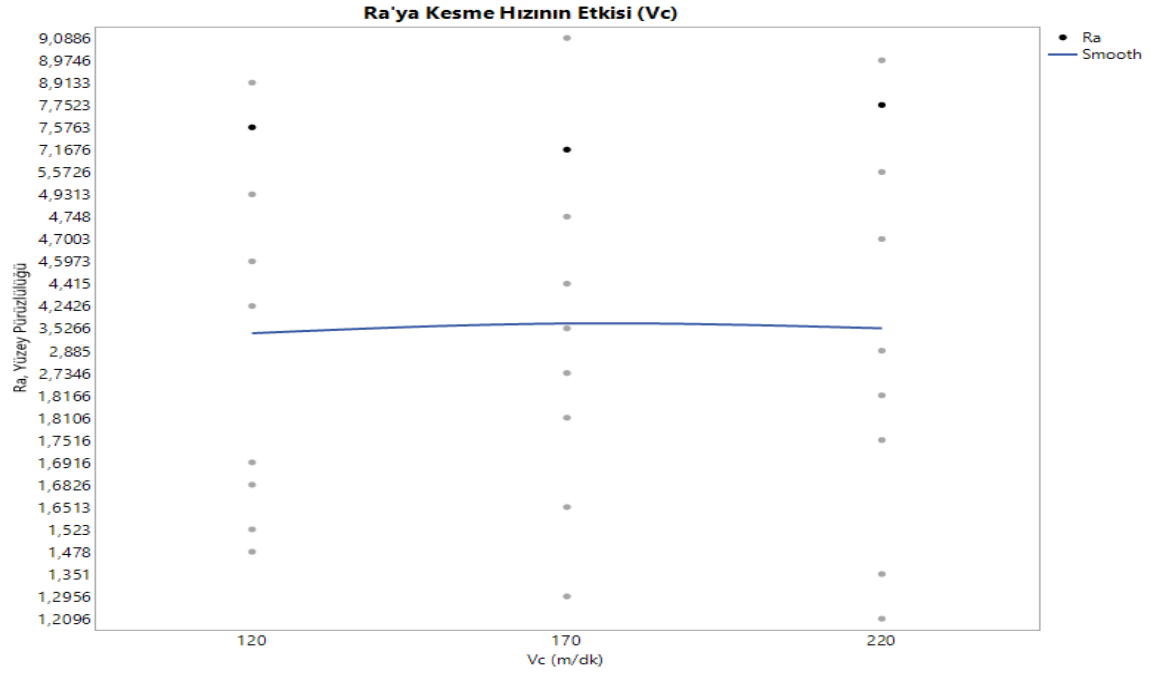
7.2. Yüzey Pürüzlülüğü Analizi

Yüzey pürüzlülüğü, talaşlı imalat işlemlerinde ürün kalitesini doğrudan etkileyen en önemli performans kriterlerinden biridir. Özellikle hassas üretim gerektiren sektörlerde düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü parametresi olarak Ra değeri kullanılmıştır. Profilometre cihazı ile gerçekleştirilen ölçümler sonucunda farklı kesme parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. DeneySEL bulgular incelendiğinde ilerleme miktarının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü değerlerinde önemli artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum ilerleme miktarının yüzey kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.



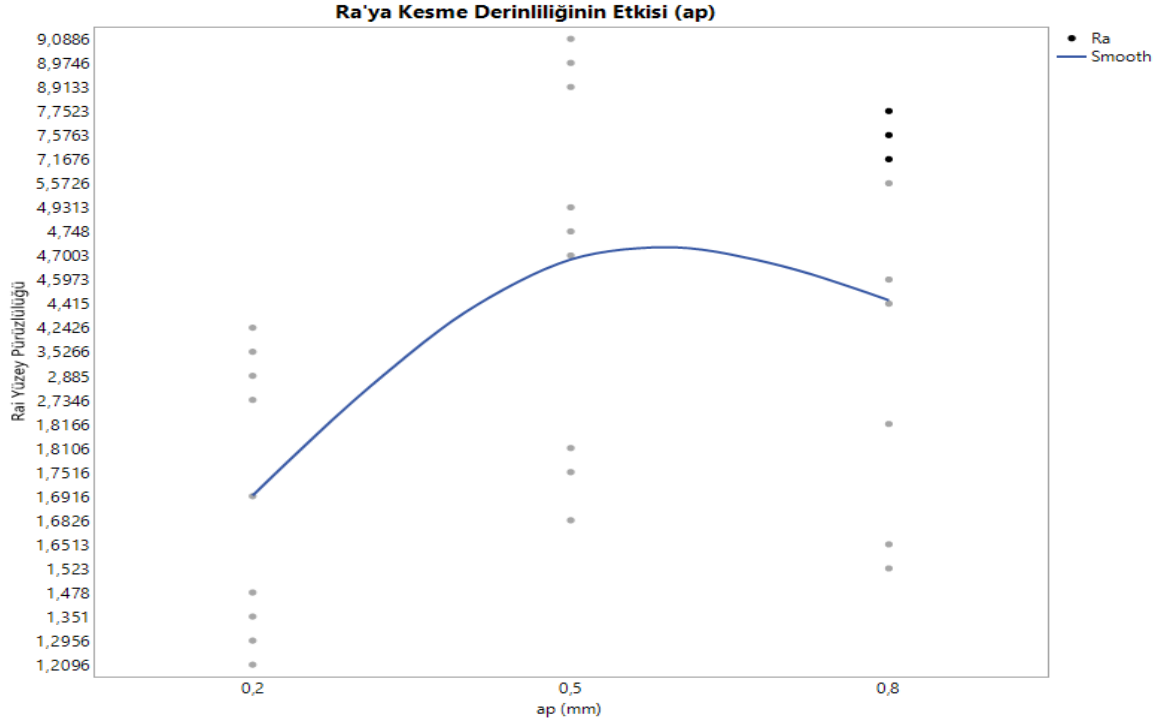
Grafik 1 7.2.1. f – Ra Değişim Grafiği

Şekil 7.2.1’ de görüldüğü gibi Düşük ilerleme miktarlarında kesici takımın iş parçası üzerinde bıraktığı izler daha küçük olmakta ve daha düzgün yüzeyler elde edilmektedir. Bunun yanı sıra yüksek ilerleme miktarlarında ise takım izleri belirgin hale gelmekte ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.



Grafik 7.2.2. Vc – Ra Değişim Grafiği

Şekil 7.2.2' de görüldüğü gibi Kesme hızının yüzey kalitesi üzerindeki etkisi incelendiğinde 3 farklı değerde yapılan deneyler Vc parametresinin etkisinin oldukça sınırlı kaldığını göstermektedir.



Grafik 7.2.3. ap – Ra Değişim Grafiği

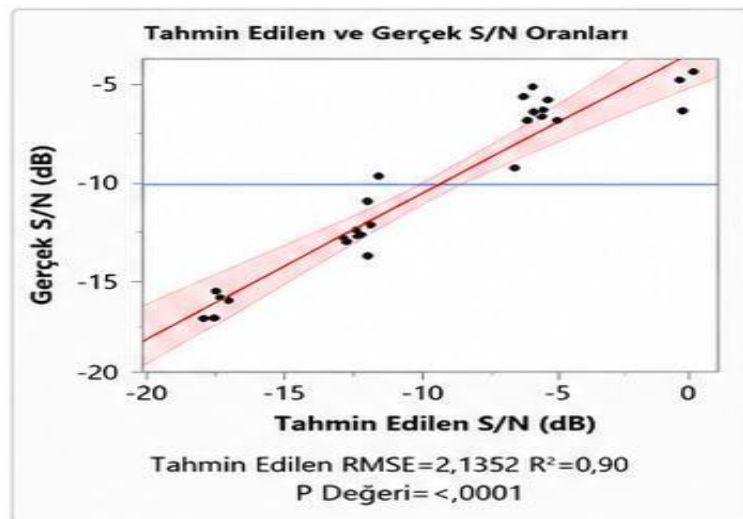
Şekil 7.2.3’de görüldüğü gibi talaş derinliği parametresi incelendiğinde düşük talaş derinliklerinde daha düşük kesme kuvvetleri oluştuğu görülmüştür. Bu durum, ilerleme miktarının yüzey geometrisi üzerindeki etkisiyle açıklanabilir. Ayrıca literatürde ilerleme miktarındaki artışın kesme bölgesindeki yükleri ve takım–iş parçası etkileşimini değiştirebildiği bildirilmektedir. Ancak bu çalışmada kesme kuvveti ve titreşim ölçümü yapılmadığından, söz konusu etkiler deneysel olarak doğrulanmamış olup olası mekanizmalar kapsamında değerlendirilmiştir. Yüksek talaş derinliklerinde ise kesme kuvvetlerinin artması nedeniyle takım titreşimleri oluşmuş ve yüzey pürüzlülüğü değerleri dalgalı bir şekilde yükselmiştir.

Deneysel sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde optimum yüzey kalitesinin aşağıdaki parametrelerde elde edildiği belirlenmiştir:

- Düşük ilerleme miktarı
- Yüksek kesme hızı
- Düşük talaş derinliği

7.3. S/N Oranı Analizi

Taguchi yönteminde performans değerlendirmesi amacıyla sinyal/gürültü (S/N) oranı analizi kullanılmaktadır. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünün minimum olması hedeflendiği için “en küçük en iyi” yaklaşımı tercih edilmiştir. S/N oranı analizi sayesinde deney sonuçlarının kararlılığı değerlendirilmiş ve optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir.



Grafik 7.3. SN Kontrol Grafiği

Yüzey pürüzlülüğüne ait S/N kontrol grafiğindeki R^2 oranındaki değişimin yaklaşık %90,3'ü kesme parametreleri (V_c , f ve a_p) tarafından açıklanmaktadır. Kurulan model için elde edilen R^2 değeri 0,903 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, modelin deneysel verileri yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

S/N oranı analizine göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir.

İlerleme miktarının düşük seviyelerinde daha yüksek S/N oranı değerleri elde edilmiştir. Bu durum düşük ilerleme miktarının yüzey kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir.

Kesme hızının artırılması ile birlikte S/N oranı değerlerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Yüksek kesme hızlarının yüzey kalitesine etkisi anlamlı olmayan bir eğilim göstermiştir.

Talaş derinliği açısından değerlendirildiğinde düşük talaş derinliği seviyelerinde daha yüksek S/N oranları elde edilmiştir.

Taguchi yöntemi sayesinde daha az deney ile optimum parametre kombinasyonlarının belirlenmesi mümkün olmuştur. S/N oranı analizleri, deneysel sonuçların güvenilir şekilde değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

7.4. Parametrelerin Etki Analizi

Deneysel çalışmalar sonucunda yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan parametreler ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en dominant parametrenin ilerleme miktarı olduğu belirlenmiştir. İlerleme miktarındaki artış yüzey pürüzlülüğünü doğrudan artırmıştır. Bunun temel nedeni takımın iş parçası üzerinde bıraktığı izlerin büyümesidir. İlerleme miktarının yüzey kalitesi üzerindeki etkisi diğer parametrelere göre daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi daha sınırlı kalmıştır. Ancak yüksek kesme hızlarında yüzey kalitesinde belirli seviyede iyileşme gözlemlenmiştir. Bunun sebebide yüksek kesme hızlarında kesme işlemi daha stabil hale gelmiş ve yığıntı talaş oluşumu azalmıştır. Talaş derinliği parametresi incelendiğinde düşük talaş derinliklerinde daha kaliteli yüzeylerin elde edildiği görülmüştür. Talaş derinliğinin artması kesme kuvvetlerini yükselterek titreşim oluşumuna neden olmuştur. Bu durum yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir.

Parametrelerin etki sıralaması aşağıdaki şekilde belirlenmiştir:

1. İlerleme miktarı
2. Talaş derinliği
3. Kesme hızı

Bu sonuçlar Al 5083 alaşımının işlenmesinde ilerleme miktarının kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

7.5. Optimum Parametrelerin Belirlenmesi

Taguchi deney tasarımı ve S/N oranı analizleri sonucunda yüzey pürüzlülüğü açısından optimum kesme parametreleri belirlenmiştir ve deneysel bulgular doğrultusunda en iyi yüzey kalitesi aşağıdaki parametre kombinasyonunda elde edilmiştir:

- İlerleme miktarı (f): 0,2 mm/dev
- Kesme hızı (Vc): 220 m/dk
- Talaş derinliği (Ap): 0,75 mm

Bu parametre kombinasyonunda daha düşük kesme kuvvetleri oluşmuş ve kesme işlemi daha kararlı gerçekleşmiştir.

Düşük ilerleme miktarı sayesinde takım izleri azaltılmış ve yüzey kalitesi iyileştirilmiştir.

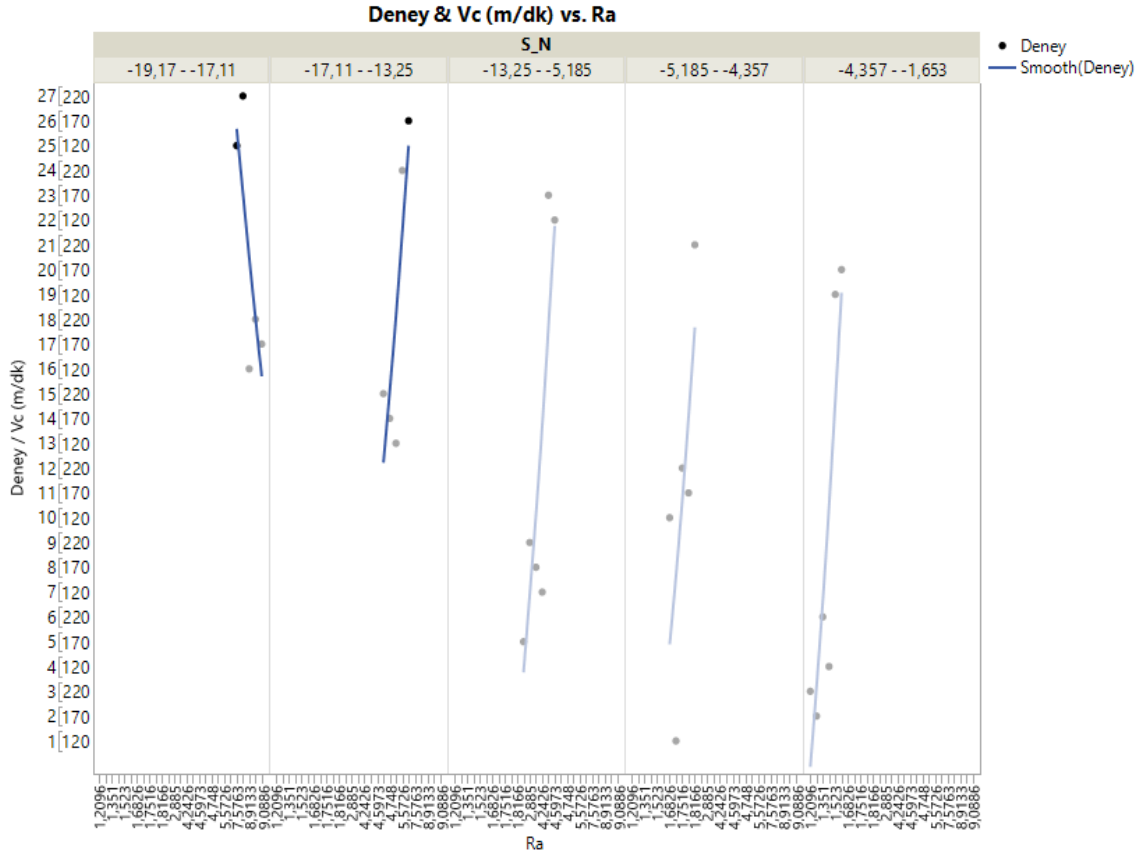
Yüksek kesme hızı yığıntı talaş oluşumunu azaltarak yüzey kalitesine olumlu katkı sağlamıştır.

Düşük talaş derinliği ise titreşim oluşumunu azaltarak daha düzgün yüzeyler elde edilmesini sağlamıştır.

Optimum parametrelerin belirlenmesi sayesinde Al 5083 alaşımının işlenebilirlik performansı artırılmıştır. Elde edilen optimum parametreler endüstriyel uygulamalarda yüksek yüzey kalitesi elde edilmesi açısından önemli avantajlar sağlayabilmektedir.

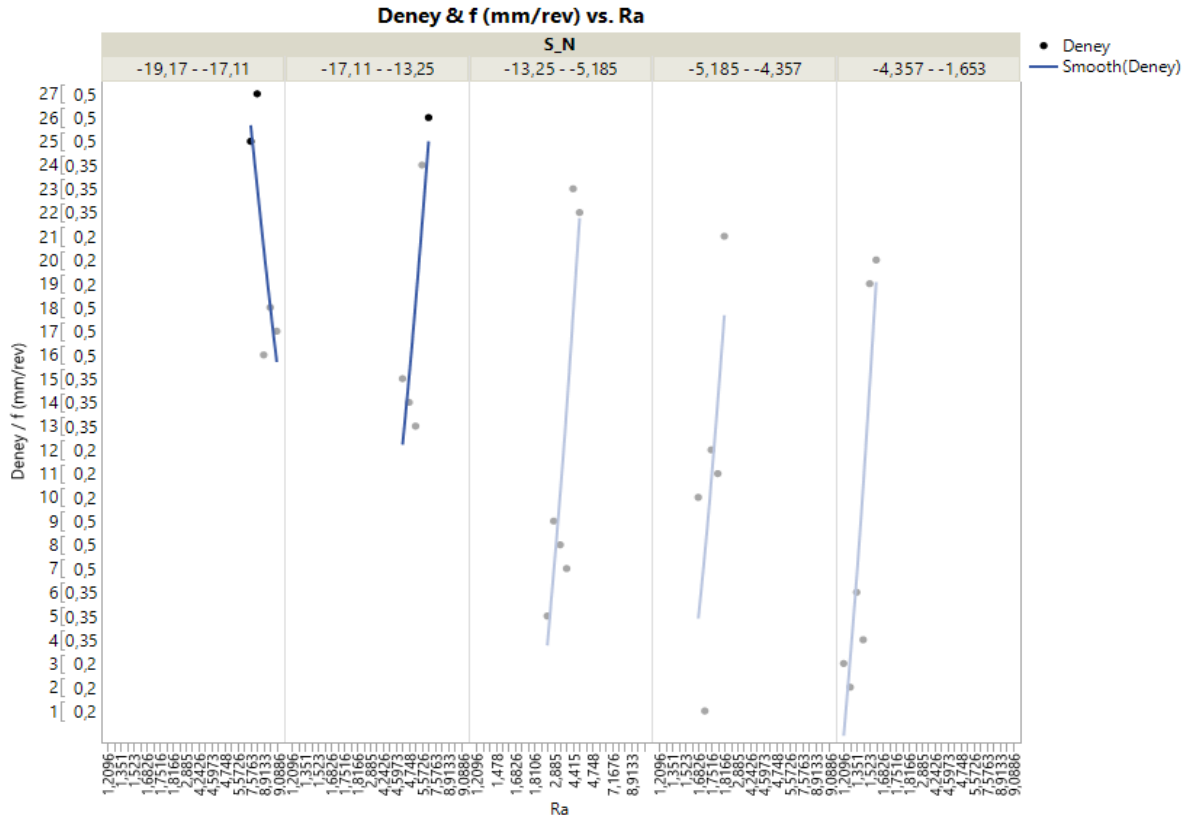
7.6. Grafik ve İstatistiksel Değerlendirme

Deney sonuçlarının daha anlaşılır şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla grafiksel analizler gerçekleştirilmiştir. **Taguchi S/N (Signal-to-Noise) oranının** her parametreye göre nasıl değiştiğini gösteriyor. Yapmış olduğum model çalışmasında **S/N oranı ne kadar küçükse (daha negatifse) → yüzey pürüzlülüğü o kadar yüksektir.** Buna Göre Grafik 7.5.1, 7.5.2, 7.5.3' de kesme hızı arttıkça S/N oranında belirgin bir değişim meydana gelmemiştir. Bu durum kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. ANOVA analizinde elde edilen $P=0.8316$ değeri de bu sonucu desteklemektedir. Ayrıca Şekil 7.5.1.'e baktığımızda En yüksek S/N oranı 220 m/dk kesme hızında elde edilmiştir.



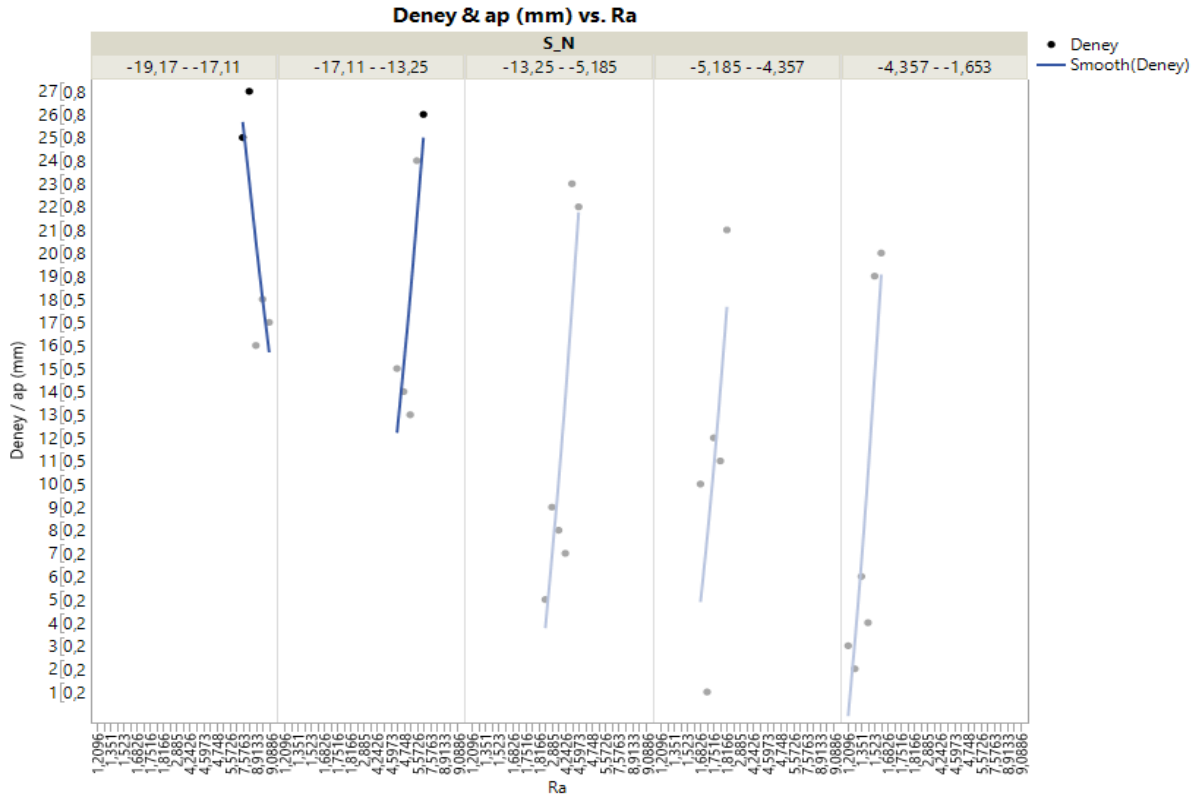
Grafik 7.5.1. Vc Parametresinin Etki Grafiği

Şekil 7.5.2'ye baktığımızda İlerleme miktarının artmasıyla birlikte S/N oranı önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum ilerleme miktarının artmasının yüzey pürüzlülüğünü artırdığını göstermektedir. Bu çalışmada ise En yüksek yüzey kalitesi 0.20 mm/dev ilerleme değerinde elde edilmiştir.



Grafik 7.5.2. f Parametresinin Etki Grafiği

Şekil 7.5.3'e baktığımızda ise talaş derinliğinin artması genel olarak S/N oranını düşürmüş ve yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. En iyi yüzey kalitesi 0.75 mm talaş derinliğinde elde edilmiştir.



Grafik 7.5.3. ap Parametresinin Etki Grafiği

İstatistiksel analiz sonuçları Taguchi yönteminin güvenilir sonuçlar verdiğini %90,3' lük R^2 oranı ile göstermektedir. Deneysel veriler incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu açık şekilde görülmektedir. Elde edilen bulgular, Al 5083 alaşımının tornalama işleminde optimum kesme parametrelerinin seçilmesinin yüzey kalitesi açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, özellikle gemi inşası, otomotiv ve savunma sanayiinde yaygın bir kullanım alanına sahip olan Al 5083 serisi alüminyum alaşımının kalıp imalat sektöründe optimum şekilde üretilmesi için gerekli tezgah tornalanmasında, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. İşleme deneyleri farklı ilerleme hızları (f), kesme hızları (V_c) ve kesme derinlikleri (a_p) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı aşamasında zaman ve maliyet optimizasyonu sağlamak, aynı zamanda parametrelerin ana etkilerini güvenilir bir şekilde analiz edebilmek amacıyla Taguchi metodu kullanılmıştır. İşlenen numunelerin yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri, hassas bir profilometre cihazı yardımıyla standartlara uygun olarak ölçülmüş ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve istatistiksel analizler neticesinde aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

Optimum İşleme Şartlarının Belirlenmesi:

Taguchi metodolojisi kapsamında, yüzey pürüzlülüğü için "daha küçük daha iyi" (smaller-is-better) kalite karakteristiği baz alınarak Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarda olduğu gibi Al 5083 alaşımı için en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin; düşük ilerleme hızı, yüksek kesme hızı ve düşük kesme derinliği kombinasyonunun kullanıldığı şartlarda (Deney 3 parametrelerinde) elde edildiği görülmüştür. Bu durum, malzemenin işlenebilirlik karakteristiğinin düşük talaş kaldırma hacimlerinde daha stabil bir yüzey topografyası sunduğunu kanıtlamaktadır.

1- İlerleme Miktarının (f) Dominant Etkisi:

- Elde edilen profilometre ölçümleri ve Taguchi ana etki grafikleri (ve ANOVA sonuçları) incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en dominant etkiye sahip olan kesme parametresinin ilerleme miktarı (f) olduğu tespit edilmiştir.
- İlerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki katkı oranı %67,12 olarak bulunmuştur. Teorik olarak da bilindiği üzere, ilerleme miktarının artması takımın iş parçası üzerinde bıraktığı kinematik izlerin (ilerleme izleri) mesafesini artırmakta ve tepeden vadiye olan pürüzlülük profilini doğrudan bozmaktadır.
- Deney sonuçlarımız, artan ilerleme değerleriyle birlikte yüzey kalitesinin belirgin şekilde kötüleştiğini göstererek literatürdeki teorik yaklaşımları doğrulamıştır.

2- Kesme Hızının (Vc) Yüzey Kalitesine Etkisi:

- Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, ilerleme miktarı ve kesme derinliğine kıyasla istatistiksel daha zayıf olarak kalmıştır.
- Elde edilen verilerin eğilimi incelendiğinde, kesme hızının artırılmasının yüzey kalitesinde kısmi bir iyileşme yarattığı gözlemlenmiştir.
- Kesme hızının artmasıyla birlikte kesme bölgesindeki sıcaklığın yükselmesi ve literatüre dayalı olarak Al 5083 gibi sünek malzemelerde işlenmiş yüzeyi bozan "Yığıntı Talaş" (Built-Up Edge - BUE) oluşum riskinin azalmasıdır.
- Yüksek hızlarda takım-talaş arayüzündeki sürtünme koşullarının iyileşmesi, daha pürüzsüz bir yüzey eldesine olanak tanımıştır.

3- Kesme Derinliğinin (Ap) ve Kesme Dinamiklerinin Etkisi:

- Deneysel bulgular, kesme derinliğinin artmasıyla yüzey kalitesinin düştüğünü net bir şekilde ortaya koymuştur. [En düşük değer örn: 0,75 mm / 1,5 mm] gibi düşük kesme derinliklerinde takım ile iş parçası arasında oldukça stabil bir kesme süreci gerçekleşmiş ve titreşim minimum seviyede kalmıştır.
- Kesme derinliğinin [En yüksek değer örn: 1,5mm / 2 mm] seviyelerine çıkarılması, işleme bölgesindeki özgül kesme enerjisini ve takıma etki eden radyal/teğetsel kesme kuvvetlerini dramatik şekilde artırmıştır.
- Artan kesme kuvvetleri, takım-iş parçası sisteminde mikro titreşimlere (chatter) neden olmuş ve bu mekanik kararsızlık, profilometre ölçümlerinde yüksek pürüzlülük tepeleri (peak) olarak literatüre dayalı mekanizmalarda da kendini göstermiştir.

KAYNAKÇA

- Akkuş H, Yaka H. (2018). Optimization of Turning Process By Using Taguchi Method. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(5): 1444-1448.
- ASM Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International, 1990: 412-425
- Astakhov, Viktor P. – Outeiro, José C, (2008). *Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling*. Springer, 1-27
- Astakhov, Viktor P, (1998). *Metal Cutting Mechanics*. Boca Raton: CRC Press, 42
- Behandish, Mohammad vd. (2019). Automated Process Planning for Turning: A Feature-Free Approach, 7(1): 415-432
- Boothroyd, Geoffrey – Knight, Winston A. (2006). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. 3. Baskı. CRC Press, 198-241
- Che Haron, C. H. vd. (2010). The Effect of Minimal Quantity Lubrication (MQL) on the Surface Roughness of Titanium Alloy Ti-6Al-4V ELI in Turning Process.” *Advanced Materials Research* 146–147, 1750–1753.
- Davim, J. Paulo. (2008). *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. London: Springer, 87-178
- Davis, Joseph R. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 437
- Groover, Mikell P. (2012). *Introduction to Manufacturing Processes*. Wiley, 15
- Grzesik, W. (2016). Prediction of the Functional Performance of Machined Components Based on Surface Topography: State of the Art. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 4460-4468
- Jain, Vijay K. (1990). *Introduction to Micromachining*. Narosa Publishing, 66
- Kalpakjian, Serop – Schmid, Steven R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*. 7. Baskı. Pearson, 621-781
- Kechagias, J. (2024). Multiparameter signal-to-noise ratio optimization for end milling cutting conditions of aluminium alloy 5083. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 4979–4988.
- Leach, Richard. (2013). *Characterisation of Areal Surface Texture*. Berlin: Springer, 77-85
- Mahmood, Nashwan Q. vd. (2024). Experimental Investigation of the Surface Roughness for Aluminum Alloy AA6061 in Milling Operation by Taguchi Method with the ANOVA Technique. *Journal of Engineering*, 30/3, 1-14.
- Merchant, M. Eugene. (1945). Mechanics of the Metal Cutting Process”. *Journal of Applied Physics* 16/5, 267-275.
- Montgomery, Douglas C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. 9. Baskı. Wiley, 3, 488-521
- Özlü, B., Çelik, U., & Demir, H. (2023). Serbest Formlu İnce Cıdarlı AA 5083-H111 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerinin Deneysel ve İstatistiksel Değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 512–522.
- Palaniappan SP, Muthukumar K, Sabariraj RV, Kumar SD, Sathish T, (2020). CNC turning process parameters optimization on Aluminium 6082 alloy by using Taguchi and ANOVA. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1013-1021.
- Palaniappan, S. P., Muthukumar, K., Sabariraj, R. V., Dinesh Kumar, S., & Sathish, T. (2020).

- CNC turning process parameters optimization on Aluminium 6082 alloy by using Taguchi and ANOVA. *Materials Today: Proceedings*, 21(1), 1013–1021.
- Phadke, Madhav S. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall, 44-71, 91-134.
- Polmear, Ian J. (2006). *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*. 4. Baskı. Oxford: Butterworth-Heinemann, 97, 115-132.
- Pul, M., & Bican, O. (2021). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Alaşım Cinsinin Kesici Takım Davranışı, Talaş Biçimi ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 9–17.
- Pul, M., & Özerkan, H. B. (2022). Al 6061 alaşımının işlenmesinde kesme derinliği ve kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne ve takım aşınma davranışına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(4), 2013–2024.
- Radetić, T., Popović, M., & Romhanji, E. (2012). Microstructure evolution of a modified AA5083 aluminum alloy during a multistage homogenization treatment, 65, 16-27
- Ross, Phillip J. Taguchi (1996). *Techniques for Quality Engineering*. 2. Baskı. McGraw-Hill, 21-52, 84-113.
- Soenoko R, Suprpto A, Chiron MA, (2017). Surface roughness and roundness optimization on turning process of aluminium alloy with Taguchi method. *Journal of Mechanical Engineering*, 14(1): 87-96.
- Song, C.-R., Dong, B.-X., Zhang, S.-Y. vd. (2024). Recent progress of Al–Mg alloys: Forming and preparation process, microstructure manipulation and application. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 3255–3286.
- Soori, Mohsen – Asmael, Mohammed, (2020). Mechanical Behavior of Materials in Metal Cutting Operations: A Review. *Journal of New Technology and Materials* 10/2, 21-29.
- Stephenson, David A. – Agapiou, John S. (2016). *Metal Cutting Theory and Practice*. 3. Baskı. Boca Raton: CRC Press, 488-576.
- Stone, Emily vd. (2005). *Investigations of Process Damping Forces in Metal Cutting*, 7.
- Sudjatmiko, D., Soenoko, R., Suprpto, A., & Chiron, M. A. (2017). Surface roughness and roundness optimization on turning process of Aluminium Alloy with Taguchi Method. *Journal of Mechanical Engineering*, 17.
- Taguchi, Genichi – Chowdhury, Subir – Wu, Yui. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Wiley, 8.
- Thomas, Thomas R. (1999). *Rough Surfaces*. 2. Baskı. London: Imperial College Press, 12.
- Totten, George E. – MacKenzie, D. Scott. (2003). *Handbook of Aluminum*. Marcel Dekker, 188-226.
- Ulaş, H. B. (2019). AA 6061 Alüminyum Alaşımının Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Analizi ve Optimizasyonu. *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 14(2), 48–56.
- Whitehouse, David J. (2010). *Handbook of Surface and Nanometrology*. 2. Baskı. Boca Raton: CRC Press, 45-121.
- Yaka, H. (2021). Tornalama sonrası çıkan talaşlardan elde edilen Alüminyum 5000 alaşımının yüzey pürüzlülüğünün Taguchi yöntemi ile analizi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 464–473. haracterization, 65, 16–27.
- Zhang, Guozheng – Zhou, Yuanzhi. (2024). “Prediction of Surface Roughness and Optimization of Process Parameters for Efficient Cutting of Aluminum Alloy”. *Advances in Mechanical Engineering*