



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Ti6Al4V ALAŞIMINDAN EKLEMELİ İMALAT
YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN PARÇANIN
TORNALAMA İŞLEMİNDE İLERLEME
HIZININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

Dilara Gizem MEYDAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Dilara Gizem MEYDAN tarafından hazırlanan “Ti6Al4V Alaşımından Eklemeli İmalat Yöntemiyle Elde Edilen Parçanın Tornalama İşleminde İlerleme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi” adlı tez çalışması 24/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 241010028 no’lu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Dilara Gizem MEYDAN

24.10.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ti6Al4V ALAŞIMINDAN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN PARÇANIN TORNALAMA İŞLEMİNDE İLERLEME HIZININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

Dilara Gizem MEYDAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ
2025, 67**

**Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ
Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK**

Eklemeli imalat, 3 boyutlu katı model verilerinin kullanılmasıyla, bilgisayar kontrolünde ve otomasyon destekli olarak, geleneksel üretim yöntemlerine ihtiyaç duyulmadan fiziksel parçaların üretildiği çağdaş bir üretim tekniğidir. Bu süreçte, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verileri STL formatına dönüştürülerek katmanlara ayrılır. Elde edilen kesit bilgileriyle, en alt katmandan başlanarak üst katmanlara doğru malzeme eklemesi gerçekleştirilir. Bu sayede, karmaşık yapıya sahip tasarımlar da kolaylıkla üretilebilir. Günümüzde eklemeli imalat, birçok endüstride yaygın olarak kullanılmakta ve sürekli gelişim gösteren önemli bir araştırma ve uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu tezde eklemeli imalat ile elde edilen Ti6Al4V malzemesiyle silindirik geometride bir parçanın üretilmesi ve tornalama işlemi ile silindirik parçanın en düşük yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için belirlenen en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Parça SLM toz yatağı yöntemiyle üretilmiştir. Kesme parametreleri; kesme hızı 90 m/dk, 120 m/dk, 150 m/dk, ilerleme miktarı 0,10 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,20 mm/dev ve talaş derinliği 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm olarak Taguchi dizininde deney listesi oluşturulmuştur. Deneylerin sonunda iş parçasının ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) ölçülmüştür. Deney analizleri için Minitab programı kullanılmıştır. Minitab programı ile Anderson-Darling testi ile normallik analizi yapılmıştır. Normallik testi sonucunda p değeri 0,227 çıkarak değerlerin normal dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Taguchi tasarımı ile sinyal/gürültü (S/N) oranları bulunmuştur. Elde edilen S/N grafiğine göre ilerleme miktarı 0,10 mm/dev, kesme hızı 90 m/dk, talaş derinliği 0,3 mm olduğunda minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Anova analiziyle ilerleme hızının Ra değerinde güven düzeyi belirlenmiştir. Anova analizine göre ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki yüzde etkisi 94,949 bulunmuş olup, kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki yüzde etkisi 0,589 ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki yüzde etkisi 3,004 olarak hesaplanmıştır. Deneylerin sonuçlarına göre üç parametre arasında ortalama yüzey pürüzlülüğü için en önemli etkinin ilerleme miktarı olduğu tespit edilmiştir. Anova ile elde edilen % 94,18 oranındaki R Sq(adj) değeri, giriş parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü açıklama yeteneğinin (>% 70) güçlü olduğunu gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda Anova analiziyle ilerleme hızının Ra değerinde güven düzeyi belirlenmiştir. Bulunan optimum değerler ve tahmini değerlerle yapılan hesaplamalarda deneyin % 91'lik doğruluk oranı hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, SLM, Tornalama, Ti6Al4V

ABSTRACT

MS THESIS

Examining the Effect of Feed Speed on the Surface Roughness in the Turning Process of the Part Obtained from Ti6Al4V Alloy by Additive Manufacturing Method

Dilara Gizem MEYDAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Yusuf YILMAZ

2025, 67

Jury

Asst. Prof. Yusuf YILMAZ

Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK

Additive manufacturing is a contemporary production technique in which physical parts are produced using 3D solid model data, under computer control and automation support, without the need for traditional production methods. In this process, computer-aided design (CAD) data is converted into STL format and separated into layers. With the cross-sectional information obtained, material is added to the upper layers, starting from the bottom layer. In this way, designs with complex structures can be produced easily. Today, additive manufacturing is widely used in many industries and stands out as an important research and application field that is constantly evolving. In this thesis, it is aimed to produce a part in cylindrical geometry with the Ti6Al4V material obtained by additive manufacturing and to determine the most appropriate cutting parameters to obtain the lowest surface roughness of the cylindrical part by turning process. The part was produced using the SLM powder bed method. Cutting parameters; The speed is listed in the Taguchi guide as 90 m/min, 120 m/min, 150 m/min, feed rate as 0.10 mm/rev, 0.15 mm/rev, 0.20 mm/rev and depth of cut as 0.3 mm, 0.4 mm and 0.5 mm. At the end of the experiments, the average surface roughness values (Ra) of the workpiece were measured. Minitab program was used for experimental analysis. Normality analysis was performed with the Anderson-Darling test using the Minitab program. As a result of the normality test, it was determined that the values with a p value of 0.227 had a normal distribution. With the Taguchi design, signal-to-noise (S/N) ratios are limited. According to the obtained S/N graph, minimum surface roughness was obtained when the feed rate was 0.10 mm/rev, the cutting speed was 90 m/min, and the depth of cut was 0.3 mm. The confidence level in the Ra value of the feed rate was determined by ANOVA analysis. According to ANOVA analysis, the percentage effect of feed amount on surface roughness was 94.949, the percentage effect of cutting speed on surface roughness was calculated as 0.589, and the percentage effect of depth of cut on surface roughness was calculated as 3.004. According to the temperature of the experiments, the feed amount was determined to be the most important effect on the average surface roughness among the three parameters. The R Sq(adj) value of 94.18% obtained by ANOVA proves that the input owner has a strong ability to explain the surface roughness (>70%). At the same time, the confidence level in the Ra value of the feed rate was determined by ANOVA analysis. An error accuracy rate of 91% was calculated in the programming made with the optimum values and estimated values found.

Keywords: Additive manufacturing, SLM, Ti6Al4V, Turning

ÖNSÖZ

Tez konumun yönlendirilmesinde ve tez çalışmalarım süresince her türlü desteği veren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam esnasında; fikirlerini ve desteklerini eksik etmeyen Konya Teknik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Mehmet BAĞCI'ya ve Necmettin Erbakan Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. İlhan ASİLTÜRK'e teşekkürü bir borç bilirim. Tezimde eklemeli imalat ile parça üretiminde destek olan Addpark İleri Mühendislik Teknolojileri firmasında çalışan Sayın Murat YETİM'e, parçanın tornalamasında ve ölçümünde yardımcı olan Sera Medikal sahibi Süleyman KİRAÇ'a destekleri için teşekkür ederim. Son olarak da bu tez çalışması sırasında maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Dilara Gizem MEYDAN
KONYA-2025

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% : Yüzde

°C : Santigrat derece

S/N: Sinyal gürültü oranı

R_a : Yüzey pürüzlülüğü (μm)

V_c : Kesme hızı (dev/dk)

F: İlerleme miktarı (mm/dev)

a: Talaş derinliği (mm)

n: Devir sayısı (dev/dk)

D: İş parçası büyük çapı (m)

d: İş parçası küçük çapı (m)

Al: Alüminyum

Ti: Titanyum

V: Vanadyum

Fe: Demir

O: Oksijen

C: Karbon

N: Azot

H: Hidrojen

$\emptyset$: Çap

Kısaltmalar

DIN : (Deutsches Institut für Normung) Alman Endüstri Normu

3B: Üç Boyutlu

ASTM : (American Society for Testing and Materials) Amerikan Test ve Malzeme Derneği

AISI : (American Iron and Steel Institute) Amerikan Demir ve Çelik Endüstrisi

LMB : (Laser Metal Deposition) Lazer Metal Biriktirme

EBM : (Electron Beam Melting) Elektron Işın Ergitme

SLM : (Selective Laser Melting) Seçici Lazer Ergitme

SLS : (Selective Laser Sintering) Seçici Lazer Sinterleme

PJM: Polyjet Modelleme

SLA: Stereolitografi

LOM : (Laminated Object Manufacturing) Tabakalı Yapıştırma Tekniği

FDM : (Fused Deposition Modeling) Ergiyik Yığılma ile Modelleme Tekniği

ANOVA : (Analysis of Variance) Varyans Analizi

STL : (Standart Triangle Language) Standart Üçgen Dili

ISO : (International Organization for Standardization) Uluslararası Standartlar Organizasyonu

CNC : (Computer Numerical Control) Bilgisayar Sayısal Kontrol

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
3. TEORİK ESASLAR	9
3.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri	9
3.2. Eklemeli İmalat ve Geleneksel İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	9
3.3. Eklemeli İmalatın Tarihçesi	10
3.4. Eklemeli İmalatın İşlem Adımları.....	11
3.5. Eklemeli İmalatın Yöntemleri	11
3.5.1. Ergiyik yığma ile modelleme tekniği (FDM).....	11
3.5.2. 3 boyutlu yazıcı (3B).....	12
3.5.3. Tabakalı yapıştırma tekniği (LOM)	13
3.5.4. Stereolitografi (SLA).....	13
3.5.5. PolyJet	14
3.5.6. Seçici lazer sinterleme (SLS)	15
3.5.7. Seçici lazer ergitme (SLM)	15
3.5.8. Elektron ışın ergitme (EBM).....	16
3.5.9. Lazer metal biriktirme (LMB).....	17
3.6. Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Uygulama Alanları	17
3.7. Titanyum	19
3.7.1. Ti6Al4V alaşımı.....	21
3.8. Talaşlı İmalat ve İşlenebilirlik.....	21
3.8.1. Tornalama.....	22
3.9. Yüzey Pürüzlülüğü	24
3.10. Taguchi Yöntemi.....	25
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
4.1. Deneyde Kullanılan Gereçler	26
4.1.1. CNC torna tezgâhı	26
4.1.2. Takım tutucu	27
4.1.3. Kesici takım.....	28
4.1.4. Kesme parametreleri.....	29
4.1.5. Malzeme	29
4.1.6. Materialise Magics programı	30
4.1.7. SLM makinesi	32
4.1.8. Yüzey pürüzlülük cihazı.....	34
4.1.9. Minitab programı.....	35

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	37
5.1. Normallik Analizi.....	37
5.2. S/N analizi.....	37
5.2. Anova (Varyans) analizi.....	39
5.3. İlerleme – kesme hızı ve ilerleme – talaş derinliği parametrelerinin etkileşimli olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	43
5.4. Tartışma.....	45
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
6.1. Sonuçlar.....	48
6.2. Öneriler.....	49
7. KAYNAKLAR.....	50



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1. Eklemeli imalat ve talaşlı imalat (Özer,2020).....	10
Şekil 3. 2. Eklemeli imalat işlem adımları	11
Şekil 3. 3. FDM tekniği (Meral, 2024).....	12
Şekil 3. 4. Erimiş malzeme şekillendirme (3 Boyutlu Yazıcı).....	12
Şekil 3. 5. LOM yöntemi (Aydın, 2022)	13
Şekil 3. 6. İlk tasarlanan SLA cihazının patentte geçen çizimi (Çevik, 2018).....	14
Şekil 3. 7. PJM yöntemi (Yermurat, 2024)	14
Şekil 3. 8. SLS çalışma prensibi (Sürmen, 2019).....	15
Şekil 3. 9. SLM yöntemi (Özer, 2020).....	16
Şekil 3. 10. Elektron ışın ergitme yöntemi (Çevik, 2018).....	16
Şekil 3. 11. LMB yöntemi (Özer, 2020)	17
Şekil 3. 12. Eklemeli imalat ile üretilen kafatası (https://www.nbcnews.com/science/science-news/medical-first-3-d-printed-skull-successfully-implanted-woman-n65576).....	18
Şekil 3. 13. THOR uçağının ilk test uçuşu (Saraçyakupoğlu, 2020)	18
Şekil 3. 14. Eklemeli imalat teknolojilerinin uygulama alanları (https://etim.org.tr/gelecegin-teknolojisi-eklemeli-imalat/)	18
Şekil 3. 15. Titanyum (https://kdmfab.com/tr/titanyum-alasimi-nedir/).....	19
Şekil 3. 16. Titanyum diş implantı (Çandırılı,2024) ve titanyum gemi (tr.metal-ti.org/news/application-of-titanium-in-the-naval-field-61667116.html)	20
Şekil 3. 17. CNC torna tezgâhı (https://www.istanbulmakina.com.tr/cnc-torna-tezgahi-nedir/)	22
Şekil 3. 18. Tornalama işlemi için kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği (Akkuş, 2010).....	22
Şekil 3. 19. Yüzey pürüzlülüğünün üç boyutlu gösterimi.....	24
Şekil 4. 1. GOODWAY GA-2600 makinesi	26
Şekil 4. 2. Üretilen Ti6Al4V malzemesinin torna makinesine bağlanmış hali	27
Şekil 4. 3. Takım tutucu	27
Şekil 4. 4. Takım tutucu teknik resmi	28

Şekil 4. 5. Kesici uç katalog	28
Şekil 4. 6. Deneyde kullanılan kesici uç	29
Şekil 4. 7. Malzeme	30
Şekil 4. 8. Materialise Magics programıyla parçanın tasarımı	30
Şekil 4. 9. Parça katmanları (a, b, c)	31
Şekil 4. 10. SLM makinesi	32
Şekil 4. 11. Tabla	32
Şekil 4. 12. OL-Sintering ve Chamber Oxygen	33
Şekil 4. 13. SLM cihazı; a) tabla, b) tozyatağı, c) rikotır	34
Şekil 4. 14. MİTUTOYO SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı	35
Şekil 5. 1. Normallik analizi grafiği	37
Şekil 5. 2. S/N grafiği	39
Şekil 5. 3. 9'lu deney grafikleri	41
Şekil 5. 4. Ti6Al4V malzemesi için deneysel R_a değeri ile ilerleme miktarı ve kesme hızı ilişkisini gösteren yüzey grafiği	44
Şekil 5. 5. Ti6Al4V malzemesi için deneysel R_a değeri ile ilerleme miktarı ve talaş derinliği ilişkisini gösteren yüzey grafiği	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3. 1. Titanyum alaşımlarının genel özellikleri	20
Çizelge 3. 2. Ti6Al4V alaşımının kütlece yüzde element analizi	21
Çizelge 4. 1. CNC torna tezgâhı teknik özellikleri	26
Çizelge 4. 2. Kesme parametreleri	29
Çizelge 4. 3. Kesme parametreleri ve seviye değerleri	35
Çizelge 4. 4. Taguchi L ₉ Ortogonal dizilimi	36
Çizelge 4. 5. Yüzey pürüzlülük oranları	36
Çizelge 5. 1. L ₉ Ortogonal diziliminde <i>Ra</i> için S/N oranları	38
Çizelge 5. 2. Yüzey pürüzlülüğü faktörü <i>Ra</i> için S/N cevap tablosu	38
Çizelge 5. 3. Anova sonuçları	39
Çizelge 5. 4. Tahmini ve deneysel değerler	42
Çizelge 5. 5. Güvenilirlik deneyleri	43

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak malzemenin katman katman dizilmesiyle oluşan bir yöntemdir. Geleneksel imalat yöntemlerine göre bazı avantajları vardır. Üretimi zor ve karmaşık yapıları kişiye özel malzemeler, daha hafif parçalar üretilmektedir. Geleneksel imalat yöntemlerine göre daha kısa sürede parça üretilmesini sağlar. Eklemeli imalat ile üretiminde Ti6Al4V malzemesi önemli bir yere sahiptir. Titanyum alaşımı mükemmel korozyon dayanımı, yüksek mukavemeti, kolayca şekillendirilmesi ve lehimlenmesi gibi özelliklere sahip olması sebebiyle birçok alanda kullanılan oldukça önemli bir malzemedir. Eklemeli imalat ile Ti64 alaşımından üretilen parçalar, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen parçalara göre daha karmaşık, hafif, hızlı ve verimlidir. Eklemeli imalat ile Ti64 alaşımının üretiminde kullanılan yöntemler arasında Stereolitografi (SLA), Ergiterek Yığılma ile Modelleme (FDM), Üç Boyutlu Yazıcı (3B), Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS), Seçmeli Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işınli Ergitme (EBM) yer almaktadır. Bu çalışmada Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak eklemeli imalat ile Ti6Al4V malzemesi üretilmiştir.

Eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V malzemesi tornalama işlemine tabii tutulmuştur. Tornalama işlemi talaşlı imalat ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Tornalama, parçaların torna tezgâhının bağlama aparatı olan aynaya bağlanarak bir kesici takım yardımıyla parçadan talaş kaldırma işlemidir. Tornalama için üç farklı değerde ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliği kullanılarak 9 farklı deney ile yüzey pürüzlülüğü oranlarına bakılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğine doğrudan bağlıdır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde parçanın ilk kısmından, ortasından ve sonundan ölçümlerine bakılmış ve bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Tornalama esnasında soğutma sıvısı olarak bor yağı kullanılmıştır. Soğutma sıvısının kullanılması takım ömrünü uzatmayı ve yüzey kalitesini arttırmayı sağlar. Bu çalışmada farklı ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliği için Ti6Al4V malzemesinin yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğine ve bu parametrelerin birbiri üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Ti6Al4V malzemesinin özellikleri incelenmiş ve tornalamada parametrelerin yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğine bakılmıştır.

Deneylerin analizinde Minitab programı kullanılmıştır. Bu çalışmada, tornalama işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini araştırmak için Taguchi L₉ Ortogonal dizinimi kullanılarak kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en etkin parametreler ve optimum seviyeler belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Şan, 2024 yılında yaptığı çalışmada “210Cr13Ni7Mo Çeliği için Taguchi Yöntemine Dayalı Tornalama İşlemleri için Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu” incelemiştir. Çalışmada L_{18} Taguchi metodunu kullanmıştır. Yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkinin kesme hızı olduğu sonrasında ilerleme miktarı, soğutma ve talaş derinliği olduğunu tespit etmiştir. Anova ve regresyon analizlerine göre deneyin % 80 üzerinde uyumlu olduğunu tespit etmiştir.

Aykut, 2022 yılında yaptığı çalışmasında “Tornalama İşleminde Kesici Takım Tutucuları için Dinamik Titreşim Sönümleyici Tasarımı” incelemiştir. Bu çalışmada, derin delik içi tornalama işlemlerinde ortaya çıkan titreşim problemleri incelenmiş ve bir deneysel analiz gerçekleştirilmiştir. Deneyde, farklı kesme parametreleriyle tornalama işlemleri yapılmış, süreç sırasında titreşim gözlemlenmiş ve operasyon esnasında alınan ses kaydına FFT analizi uygulanarak, takımın maruz kaldığı frekansın 667,5 Hz olduğu belirlenmiştir. Ardından, doğal frekansı 665 Hz olan bir dinamik titreşim sönümleyici tasarlanmış, bu cihaz kesici takım tutucusuna entegre edilmiştir. Titreşim sönümleyici, kütle-yay sistemi olarak tasarlanmış ve sistemin titreşim azaltıcı etkisi, kütle-yay ilavesi yapılan ve yapılmayan durumlarda dört farklı kesme koşulunda gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda, tasarlanan titreşim sönümleyicinin tornalama işlemi sırasında titreşimi azaltmada etkili olduğu saptanmıştır.

Toan ve arkadaşları, 2023 yılında “Prediction of Surface Roughness of Ti6Al4V and Optimization of Cutting Parameters Based on Experimental Design” adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımının tornalama işlemi sırasında yüzey pürüzlülüğünü etkileyen kesme parametrelerini incelenmiş ve optimum parametreler belirlenmiştir. Parametre olarak ilerleme miktarı 0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,2 mm/dev, kesme hızı 100 m/dk, 150 m/dk, 200 m/dk ve talaş derinliği 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm kullanılmıştır. RSM modeli kullanılmış ve yüzey pürüzlülüklerine bakılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen faktör olarak ilerleme miktarı bulunmuştur. Optimum parametreler ilerleme miktarı 0,1 mm/dev, kesme hızı 200 m/dk, talaş derinliği 0,1 mm olarak bulunmuştur.

Aydın ve arkadaşları 2022 yılında yaptıkları “Ti6Al4V Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Taguchi Metodu Kullanılarak Proses Parametrelerinin Optimizasyonu” adlı çalışmada Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımının 4 farklı parametre ve seviyelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. 75 μ m, 80 μ m, 85 μ m, 90 μ m değerlerinde lazer odak çapı, tarama mesafesi değerleri olarak 60 μ m, 90 μ m, 120 μ m, 150 μ m, tarama hızı olarak 150 mm/s, 300 mm/s, 450 mm/s, 600 mm/s, lazer gücü olarak 190

W, 210 W, 230 W, 250 W kullanılmıştır. Deney tasarımı Taguchi dizini L_{16} kullanılmış ve Anova analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 150 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü olarak 7,773 μm yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre olarak % 74,10 değeriyle tarama mesafesi olmuştur.

İnan, 2024 yılında yaptığı çalışmada “Tornalama İşleminde Oluşan Sesin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Analizi” incelemiştir. Yapılan deneylere göre, ilerleme hızının artırılması, yüzey pürüzlülük değerlerinde ve ses şiddetinde bir artışa yol açmıştır. Ses şiddetinin ilerleme hızı ve talaş derinliği arttıkça yükseldiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kesme hızındaki artışın, ses şiddetini artıran en belirgin faktör olduğu; ardından ise talaş derinliği ve ilerleme hızının etkisinin sırasıyla geldiği tespit edilmiştir.

Atılkan, 2022 yılında yaptığı çalışmada “Inconel 718 Nikel Esaslı Süper Alaşımın Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemi ve Gri İlişkisel Analiz ile Optimizasyonu” incelemiştir. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşımının delme işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü incelenmiş ve en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Optimum parametrelerin tespitinde Taguchi ve Gri İlişkisel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Taguchi analizi sonuçlarına göre kesme hızı yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen faktör olmuştur. Anova analizi de kesme hızının % 77.29'luk bir etki oranıyla en önemli parametre olduğunu ortaya koymuştur.

Kavak ve arkadaşları, 2012 yılında yaptıkları “Tornalama İşleminde Kesici Uç Tutturma Yönteminin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi” adlı çalışmada deneylerinde AISI 1050 çeliği kullanmışlardır. Yapıştırma-yumuşak lehimli takımlar mekanik sıkı malı kesici uçlu takımlarla tornalama yapılmıştır. Kesme hızı olarak 150 m/dk, 187 m/dk, 210 m/dk, ilerleme değeri olarak 0,15 mm/dev, 0,2 mm/dev, 0,25 mm/dev, kesme derinliği olarak da 1,5 mm sabit şekilde kullanarak talaş kaldırma işlemleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak yapıştırma yumuşak lehimli takımların mekanik sıkı malı takımlardan daha iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri verdiği görülmüştür. Deneylerde en küçük yüzey pürüzlülüğü 150 m/dk kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme yapıştırma yumuşak lehimli takımlarda, 187 m/dk kesme hızında ve 0,15 mm/dev ilerleme mekanik sıkı malı takımlarda görülmüştür. İlerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna varılmıştır.

Işık, 2025 yılında yaptığı “Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen AA6082 ve AA7075 Alüminyum Alaşımlarının Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi” adlı çalışmada elektrik direnç nokta kaynak yöntemiyle birleştirilen alüminyum alaşımlarının

Taguchi yöntemiyle modellenmesini incelemiştir. Çalışmada Taguchi L_{24} modellemesi ve Minitab istatistik yazılımı kullanılmıştır. Optimizasyon aşamasında Taguchi yöntemiyle incelenme yapılmıştır. AA7075 malzemesinin mikro sertlik değeri AA6082 malzemesinin mikrosertlik değerinden yüksek çıkmıştır. Yapılan çalışmanın kaynaklı birleştirme çalışmaları için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Saha ve arkadaşları, 2023 yılında “Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Turning of Hardened Steel Using the Taguchi Method” adlı çalışmayı yapmışlardır. AISI 404 Paslanmaz Çelik kullanmışlardır. CNC tornalama işlemi kesme hızı 80 m/dk, 100 m/dk, 120 m/dk, ilerleme miktarı 0,10 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,20 mm/dev, talaş derinliği 0,004 mm, 0,006 mm, 0,008 mm olarak yapılmıştır. Taguchi metodu ile S/N analizi, Anova analizleri yapılmıştır. Taguchi yöntemi ile optimum kesme parametreleri kesme hızı 120 m/dk, ilerleme miktarı 0,20 mm/dev, talaş derinliği 0,008 mm bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en baskın parametre olarak ilerleme miktarı tespit edilmiştir.

Altan, 2024 yılında yaptığı “Talaşlı İmalat Uygulamalarında İdeal İşleme Parametrelerinin Belirlenebilmesi İçin Özel Bir Ölçüm Düzenineğin Geliştirilmesi ve CuAl14Fe4Mn2, XCrNiMoTi17 ve AlZn5.5MgCu Malzemeleri Özelinde Taguchi Yöntemi ile Değerlendirilmesi” adlı çalışmayı incelemiştir. Bu çalışmada Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Deneylere göre yük hücreleri boyutları artışının kapasite ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarla ölçülen kesme kuvvetleri dikkate alındığında sistemin daha küçük kapasiteli ve boyutlu yük hücreleri ile yeniden düzenlenebileceği görülmüştür.

Yiğit, 2025 yılında yaptığı “SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) Çeliklerinde Karbon İçeriğinin Aşınma ve Korozyon Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Taguchi ile İncelenmesi” adlı çalışmada farklı çeliklerde karbon içeriğinin aşınma ve korozyon davranışı üzerindeki etkileri Taguchi ile incelemiştir. Çalışmada farklı karbon içeriğine sahip çeliklerin mikroyapı özellikleri incelenmiş ve sertlik, aşınma ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Taguchi L_{18} modellemesi kullanılmıştır. Anova sonuçlarına göre, uygulanan yük faktörü aşınma oranı üzerinde en güçlü etkiye sahip faktördür. Çeliklerdeki karbon oranı ise ikinci önemli faktör olup, aşınma oranını istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilemektedir.

İncedal, 2023 yılında yaptığı “Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen Karbon Fiber Katkılı PLA Plakaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi” adlı çalışmada PLA plakaların birleştirilmesinde en etkili faktörün % 51,21 ile ilerleme hızı olduğu görülmektedir.

Akkuş, 2010 yılında yaptığı çalışmada “Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel ve Yapay Zekâ Yöntemleriyle Tahmin Edilmesi” incelemiştir. Bu çalışma ile AISI 4140 ıslah çeliği 51 HRC sertlikte sert tornalama işlemine tabi tutulmuştur. CNC tornalama kullanılmıştır. Giriş parametreleri olarak 90 m/dk, 120 m/dk, 150 m/dk değerlerinde kesme hızı, 0,18 mm/dev, 0,27 mm/dev, 0,36 mm/dev değerlerinde ilerleme ve 0,20 mm, 0,4 mm, 0,6 mm değerlerinde talaş derinliği kullanılmıştır. Deney sonuçlarında kesme hızıyla yüzey pürüzlülüğünün ters orantılı olduğu, ilerleme ile yüzey pürüzlülüğünün doğru orantılı olduğu görülmüştür. Talaş derinliğinin de yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olduğu görülmüştür.

Yıldız, 2015 yılında yaptığı çalışmada “Ti6Al4V Tornalama Yöntemiyle İşlenebilirliğinin Araştırılması” incelemiştir. Deneylerinde Ti6Al4V malzemesini kullanmıştır. Kesme hızı olarak 75 m/dk, 100 m/dk, 125 m/dk, 140 m/dk, ilerleme miktarı olarak 0,15 mm/dev, 0,2 mm/dev, 0,25 mm/dev, kesici uç kavisi olarak 0,8 mm, 1,2 mm, 1,6 mm değerleri kullanılmıştır. Kesme deneyleri kapsamında, ana kesme kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüş ve kesici takımın oluşan hasarları görselleştirilmiştir. Ti6Al4V kaplamalı seramik kesici takımlar kullanılarak yapılan işlemler sonucu, ilerleme miktarının, kesici takım uç radyüsünün ve kaplama tipinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkileri belirlenmiştir. İlerleme miktarının artışıyla birlikte tüm kuvvet bileşenlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, ilerleme miktarının artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülüğünde bir artış yaşanırken, kesici takım uç radyüsünün büyümesiyle bu değerlerin azaldığı saptanmıştır.

Aktürk ve Korkmaz, 2021 yılında “Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme” adlı çalışmayı incelemişlerdir. Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinde sıklıkla tercih edilen alüminyum alaşımlarının dinamik özelliklerini tahmin etmek ve geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen uygulamaları ve malzeme yapısal parametrelerine dair yapılan araştırmaları derlemektedir.

Jayant ve Kumar, 2008 yılında yaptıkları çalışmada “Prediction of Surface Roughness in CNC Turning Operation Using Taguchi Design of Experiments” incelemişlerdir. AISI 4140 çeliğini karbür kesici uç ile işlemişler ve Taguchi yöntemini kullanmışlardır.

Çelik ve Özkan, 2017 yılında “Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları” ile ilgili çalışma yapmışlardır. Farklı ürün gereksinimleri için farklı malzemeler ön plana çıkmaktadır. Polimerler, genellikle prototip üretiminde kullanılırken, titanyum alaşımları havacılık ve uzay endüstrisi için ön plandadır.

Özsolak, 2019 yılında yaptığı çalışmada “Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler” incelemiştir. Bu çalışmaya göre eklemeli imalat teknolojileri uzay, savunma,

otomotiv gibi birçok alanda kullanılmakta olduğu görülmüştür. Bu imalatla kullanılan malzemelerin özelliklerinin parçanın son halini de etkilediği görülmektedir. Eklemeli imalatla çelik, titanyum, alüminyum alaşımlarının kullanıldığı görülmektedir.

Felho ve arkadaşları, 2025 yılında “Taguchi’s L_{18} Design of Experiments for Investigating the Effects of Cutting Parameters on Surface Integrity in X5CrNi18-10 Turning” adlı çalışmayı yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada X5CrNi18-10 malzemesi kullanılmıştır. Malzemenin tornalanmasında, kesme hızı 150, 200, 300 m/dk, ilerleme 0,08 mm/dev, 0,16 mm/dev, 0,20 mm/dev ve kesme derinliği 0,5 mm ve 0,20 mm olarak kullanılmıştır. Parametrelerin etkileri incelenmiş ve yüzey topografyalarına bakılmıştır. Taguchi L_{18} ortogonal dizinimi kullanılmıştır. İlerleme, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Kesme hızı arttıkça pürüzlülük azalmış, fakat etkisi ilerleme kadar belirgin olmadığı tespit edilmiştir. İlerleme 0,08 mm/dev, kesme hızı 300 m/dk, kesme derinliği 0,5 mm olduğunda optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Rıdvanoğulları, 2018 yılında yaptığı “Tren Tekerleğinin İşlenebilirlik Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Araştırılması” adlı çalışmayı incelemiştir. Deneylerde 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm kesme derinliği, ilerleme miktarı 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev, 0,3 mm/dev ve 250 dev/dk, 350 dev/dk, 450 dev/dk değerlerinde kesme hızı uygulamıştır. Deneyde Taguchi L_9 yöntemini kullanmıştır ve ortalama yüzey pürüzlülükleri belirlenmiştir. İşaret/ gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi de kullanılmıştır. İlerleme miktarının artmasıyla yüzey kalitesinin bozulduğu ve tespit etmiştir. Kesme derinliği ve kesme hızı Anova analizleri sonucunda düşük etkili parametreler olarak tespit etmiştir. Fakat ilerleme faktörüyle birlikte kesme hızı ve kesme derinliği parametreleri değerlendirildiğinde ilerleme miktarı arttıkça kesme hızının etkisi daha net bir şekilde gözlemlenmiştir.

Güvercin, 2018 yılında yaptığı “Optimum Yüzey İşleme Parametrelerinin ANP ve Taguchi Yöntemleri ile Belirlenmesi” adlı çalışmayı incelemiştir. Bu çalışmada AISI 1040 çeliğin belirli parametrelere göre yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve Taguchi metodu ile analizi yapılmıştır. Deneyler ilerleme olarak 0,2 mm/dk, 0,3 mm/dk, 0,4 mm/dk, kesme hızı olarak 300 m/dk, 350 m/dk, 400 m/dk, talaş derinliği olarak 1 mm, 2 mm, 3 mm değerleriyle yapmıştır. Optimum yüzey pürüzlülüğü değerlerini 300 m/dk kesme hızı, 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 1 mm talaş derinliği ile bulmuştur. İlerleme en anlamlı parametre olarak bulunmuştur.

Sürmen, 2019 yılında yaptığı çalışmada “Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar” incelemiştir. Bu çalışmaya göre karmaşık geometrili, zor yapıların üretilmesi eklemeli imalatla sağlanmaktadır. Eklemeli imalatın birçok alanda giderek yaygınlaştığı

görülmektedir. İlerleyen yıllarda eklemeli imalatın yaygınlaşmasıyla 3B baskı maliyetinin daha da azalacağı ve bu teknolojilerin birçok alanda daha kritik öneme sahip olacağı öngörülmüştür.

Vipul ve arkadaşları, 2023 yılında, “ Experimental and Optimization of CNC Lathe Machine by Using Taguchi Method” adlı çalışmayı yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada yumuşak çelik kullanılmıştır. Tornalama işlem yapılarak Minitab programı üzerinden analizler yapılmış ve L_9 ortogonal dizini kullanılmıştır. Kesme hızı olarak 600 dev/dk, 1100 dev/dk, 1600 dev/dk, ilerleme miktarı olarak 0,11 mm/dev, 0,16 mm/dev, 0,21 mm/dev ve kesme derinliği olarak 0,4 mm, 0,6 mm, 0,9 mm alınmıştır. Deneylerin sonucunda 600 dev/dk kesme hızı, ilerleme oranının 0,16 mm/dev, kesme derinliğinin 0,6 mm olduğunda optimum sonuçlar elde edilmiştir. İlerleme miktarının en önemli parametre olduğu belirlenmiştir.

Aswal ve arkadaşları, 2019 yılında “CNC Turning Parameter Optimization for Surface Roughness of Aluminium-2014 Alloy Using Taguchi Methodology” yaptıkları çalışmada Alüminyum 2014 alaşımını kullanmışlardır. Kesme hızı 1200 rpm, 1500 rpm, 1700 rpm, ilerleme miktarı 15 mm/dk, 25 mm/dk, 35 mm /dk ve talaş derinliği 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm olarak tornalama yapılmıştır. Taguchi L_9 tasarımı kullanılmıştır. Minitab programı ile S/N analizi yapılmış ve “smaller is better” kriteri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü maksimum etkileyen parametre % 67,38 olarak kesme hızı bulunmuştur.

Cagan ve Buldum, 2018 yılında “Investigation of the Effect of Different Working Mediums on Turning Al7075-T6 Alloy” adlı çalışmayı yapmışlardır. Deneylerde iki farklı ortam olarak kuru ve bor yağı kullanılmıştır. Kesme hızı olarak 400 m/dk, 800 m/dk ve 1600 m/dk ve ilerleme hızı olarak 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev ve 0,4 mm/dev parametreleri kullanılmıştır. S/N analizi yapılarak optimum parametreler bor yağı ortamı, kesme hızı 400 m/dk, ilerleme hızı 0,1 mm/dev olduğunda bulunmuştur. Varyans analizi yapılarak ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde % 84,8 oranında katkı payı olduğu tespit edilmiştir. Deneylerde bor yağının yüzey kalitesi için etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

Muzamil ve arkadaşları, 2025 yılında “Impact of Machining Parameters on Wire Arc Additively Manufactured Mild Steel Specimens of E6013 and E7018 Using an Electric Arc Heat Source” adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada eklemeli imalatla üretilen E6013 ve E7018 dolgu çubukları kullanılmış ve talaşlı imalatla yüzey pürüzlülükleri incelenmiştir. Deneyde 310 rpm, 480 rpm kesme hızı, 0,25 mm ve 0,5 mm kesme derinliği kullanılmış ilerleme sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü düşmüştür. En iyi yüzey pürüzlülüğünün 480 rpm kesme hızı ve 0,5 mm kesme derinliğine olduğunu tespit etmişlerdir.

Alzyod ve arkadaşları, 2025 yılında “Maximizing Material Removal Rate and Surface Smoothness in MEX Parts Through Turning Process Optimization Using BBD” adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada eklemeli imalatla malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen parçaların tornalama da kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Bu faktörlerin önemini değerlendirmek için bir Box-Behnken Tasarımı kullanılmış ve etkilerini ölçmek için Anova analizi yapılmıştır. Sonuçlar da ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en baskın parametre olduğu çıkarılmıştır.

He ve arkadaşları, 2024 yılında “Micro-Milling of Additively Manufactured Al-Si-Mg Aluminum Alloys” adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada eklemeli imalatla yapılmış SLM ile üretilen AlSi7Mg ve AlSi10Mg alaşımları mikro-frezleme ile işlenmiştir. AlSi10Mg’nin ortalama yüzey pürüzlülüğü, AlSi7Mg’ye göre yaklaşık %26,9 daha yüksek bulmuşlardır. Bu farkın sebebi AlSi10Mg içindeki Si miktarının daha yüksek olması olarak belirlenmiştir. Si fazlarının mikro işlem sırasında olumsuz etki yaptığı belirlenmiştir. Düşük ilerleme hızında daha iyi bir yüzey elde edildiği tespit edilmiştir.

Alzyod ve arkadaşları, 2025 yılında “Integrating Additive and Subtractive Manufacturing to Optimize Surface Quality of MEX Parts” adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada eklemeli imalatla malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen silindir parçanın tornalama da kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. İlerleme miktarı 0,1 mm/dev, 0,2 mm/dev, 0,3 mm/dev, 0,4 mm/dev, kesme hızı 50 m/dk, 83 m/dk, 116 m/dk, 150 m/dk, kesme derinliği 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm olarak alınmıştır. Anova analizleri ve Taguchi yöntemi kullanılmıştır. İlerleme miktarı parametresinin kesme hızı ve kesme derinliği parametrelerine göre daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Optimum parametreler olarak 0,1 mm/dev ilerleme miktarı, 83 m/dk kesme hızı ve 0,5 mm kesme derinliği olarak bulmuşlardır.

Kathavarayan ve arkadaşları, 2024 yılında “Multi-objective Optimization on Turning of Additively Manufactured Inconel 625 Alloy Using Grey Relational Analysis” adlı çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada eklemeli imalatla SLM yöntemiyle Inconel 625 alaşımı üretilip tornalama yapılarak kesme parametreleri incelenmiştir. Anova analizi yapılmış ve Taguchi yöntemi kullanılmıştır. İlerleme miktarı 0,2 mm/dev, 0,26 mm/dev, 0,33 mm/dev, kesme hızı 14 m/dk, 17 m/dk, 20 m/dk, kesme derinliği 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm olarak alınmıştır. Optimum parametreler olarak 0,3 mm/dev ilerleme miktarı, 14 m/dk kesme hızı ve 0,33 mm kesme derinliği olarak bulmuşlardır. %77,38 oranla en etkili parametre ilerleme miktarı olarak bulunmuştur.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli üretim yöntemi, geleneksel talaşlı üretim yöntemlerinden farklı olarak, katmanların birbiri üzerine dizilmesiyle istenilen şeklin üretilmesi yöntemidir. Bu nedenle aynı zamanda katmanlı üretim olarak da adlandırılır. Ayrıca üç boyutlu baskı, hızlı prototipleme gibi farklı isimlerle de bilinir. International Organization for Standardization (ISO) ve American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından yayımlanan 52900:2015 standardına göre, eklemeli imalat teknolojileri yedi ana kategori altında sınıflandırılmaktadır (Başcı ve Yamanoglu, 2021).

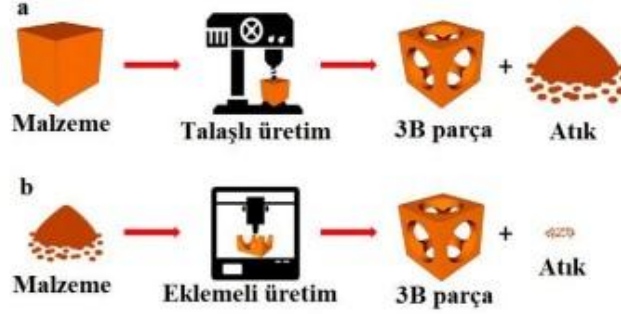
- Bağlayıcı Püskürtme
- Direk Enerji Biriktirme
- Malzeme Ekstrüzyonu
- Malzeme Püskürtme
- Toz Yatağında Ergitme
- Plaka Tabakalaştırma
- Havuz Fotopolimerizasyonu

Eklemeli İmalatta yaygın olarak plastikler ve termoplastikler (PLA, ABS gibi filamentler), metal tozları (titanyum, alüminyum, paslanmaz çelik gibi malzemeler), seramikler kullanılan malzemelerdir. Günümüzde eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılabilen malzeme yelpazesi hızla genişlemekte olup, bu gelişme söz konusu teknolojinin endüstriyel ve akademik uygulama alanlarını da paralel şekilde çeşitlendirerek yaygınlaştırmaktadır.

3.2. Eklemeli İmalat ve Geleneksel İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Eklemeli imalat yöntemleri, geleneksel üretim tekniklerine kıyasla sunduğu çeşitli üstünlükler nedeniyle havacılık ve uzay sanayi gibi sektörlerde giderek daha fazla tercih edilmektedir (Bahçe ve diğ., 2022). Eklemeli imalat ile üretimde geleneksel imalat yöntemlerindeki gibi kesilip atılan madde olmadığından atık madde oluşmamaktadır (Şekil 3.1). Depo maliyetleri ve lojistik azalmaktadır. Eklemeli imalatta geleneksel imalat yöntemlerine göre daha karmaşık yapılar üretilebilmektedir. Eklemeli imalat ile üretim de

kişiyeye özel üretimler yapılabilmektedir. Eklemeli imalat daha kısa süreli üretime, geleneksel imalat yöntemleri daha uzun süreli üretimlere uygundur (Güngör, 2020).



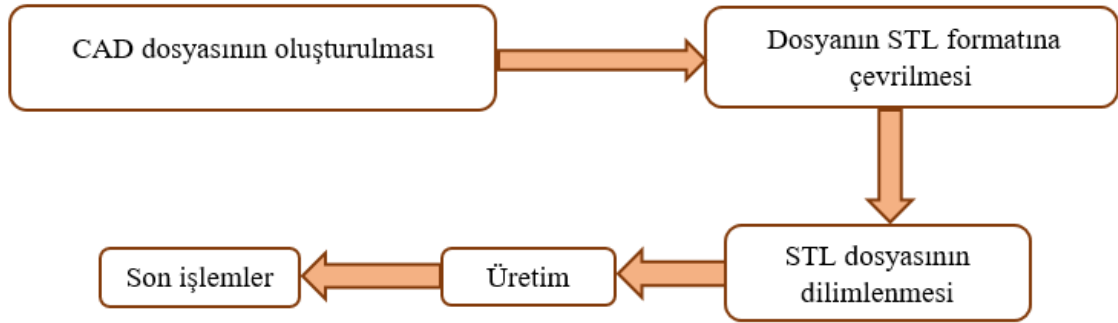
Şekil 3. 1. Eklemeli imalat ve talaşlı imalat (Özer,2020)

3.3. Eklemeli İmalatın Tarihçesi

Eklemeli üretim fikri temelde eski dönemlere dayansa da bu alandaki ilk ticari sistemin 1987 yılında stereolitografi yöntemiyle yani plastik malzemelerin katmanlı işlenmesine dayalı olarak geliştirilip piyasaya sunulduğu bilinmektedir (Hull, 1986). Bu sistem, dünya genelinde ticarileştirilen ilk eklemeli imalat teknolojisi olma özelliğini taşımaktadır. Eklemeli imalat alanında 1990'lı yıllar önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilir. 1991 yılında, kaynaştırıcı biriktirme modelleme (FDM), katı zemin kürlenme (SGC) ve katmanlı nesne üretimi (LOM) gibi çeşitli yöntemler ticarileştirilmiştir (Gibson ve diğ., 2015). Bu gelişmeleri takiben, seçici lazer sinterleme (SLS) teknolojisi geliştirilmiş ve kısa sürede yaygınlaşmıştır. 1994 yılında Alman menşeli EOS firması, doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) teknolojisine dayalı M160 modelini tanıtmış; bir yıl sonra, 1995'te ise M250 modelini piyasaya sürmüştür (Bahçe ve Yamanoglu, 2021).

Son yirmi yıl içerisinde eklemeli imalat teknolojilerindeki ilerleme büyük bir ivme kazanmıştır. Var olan sistemler sürekli olarak geliştirilirken, doğrudan metal lazer ergitme (DMLM) gibi yenilikçi teknolojiler de ortaya konmuş ve ticarileştirilmiştir. 2002 yılında, doğrudan metal biriktirme (DMD) sistemlerinin ticari satışına başlanmıştır. 2016 yılının başlarından itibaren ise neredeyse her hafta yeni bir teknoloji, malzeme, ürün veya uygulama alanı duyurulmuş; böylece sistemler hem daha güvenilir hem de daha verimli hale gelmiş, aynı zamanda kullanılabilir malzeme çeşitliliği de önemli ölçüde artmıştır (Özer, 2020).

3.4. Eklemeli İmalatın İşlem Adımları



Şekil 3. 2. Eklemeli imalat işlem adımları

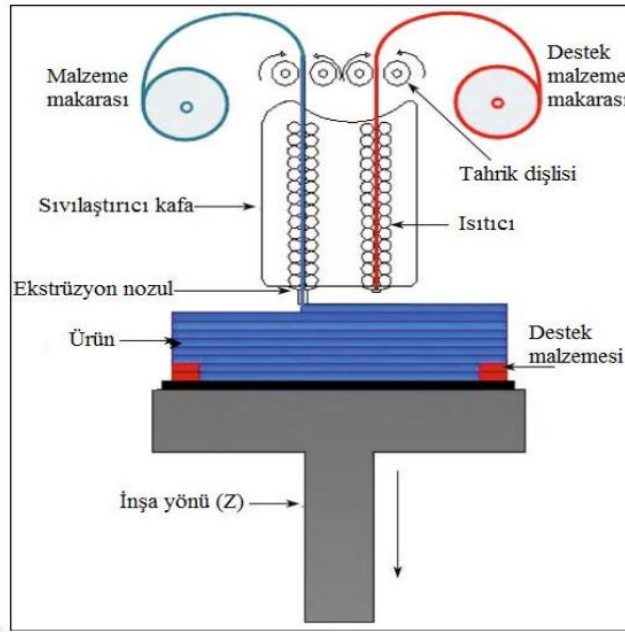
Bilgisayar destekli tasarım programları aracılığıyla oluşturulan üç boyutlu modeller, STL formatına çevrildikten sonra uygun yazılımlar kullanılarak katmanlara ayrılmakta ve 3B yazıcılar yardımıyla tabandan itibaren katman katman üretim gerçekleştirilerek fiziksel modele dönüştürülür (Dursun, 2019). Şekil 3.2’de eklemeli imalat işlem adımları verilmiştir.

3.5. Eklemeli İmalatın Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri olarak en sık kullanılan Stereolitografi (SLA), Ergiterek Yığılma ile Modelleme (FDM), Üç Boyutlu Yazıcı (3B), Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS), Seçmeli Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işınli Ergitme (EBM) yöntemleridir.

3.5.1. Ergiyik yığılma ile modelleme tekniği (FDM)

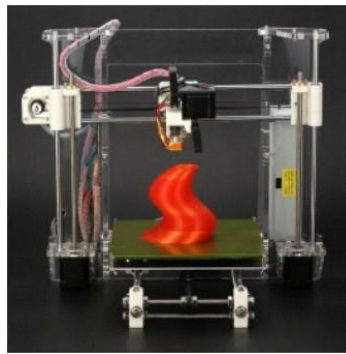
Katmanlı imalat teknolojilerinden biri olan FDM yöntemi, metal tozlarının yüksek atmosfer basıncı ve sıcaklık altında, yüksek enerjili bir elektron ışını aracılığıyla eritilerek ardışık katmanlar hâlinde biçimlendirilmesini esas alır (Şekil 3.3). Üretim süreci, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine dayalı olarak, her katmanın ilgili geometriye uygun şekilde ergitilmesiyle gerçekleştirilir. İşlem, vakum ortamında yürütülür; bu sayede elektron ışınının gaz molekülleriyle etkileşimi önlenerek enerji kayıpları azaltılır. FDM tekniği, metalik ve seramik esaslı malzemelerle uyumlu çalışabilmekte olup, özellikle yüksek mekanik dayanım gerektiren parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Sürecin ardından elde edilen ürünler çoğu durumda ilave işleme gerek kalmaksızın kullanılabilir niteliktedir (Aydın, 2022).



Şekil 3. 3. FDM tekniği (Meral, 2024)

3.5.2. 3 boyutlu yazıcı (3B)

Bu yöntemde, serilen gevşek tozun üzerine bağlayıcı püskürtülerek tozların birbirine bağlanması sağlanır. İşlem parça oluşturulana kadar katman katman devam eder. Bu yöntem sayesinde çok renkli parçaların üretimi mümkün hale gelmektedir (Şekil 3.4). Üretim sürecinde genellikle kompozit toz malzemeler tercih edilmektedir. Seramik tozların kullanılması durumunda yaş presleme benzeri yapılar elde edilebilmektedir. Bu tür yapılar, sürecin sonraki aşamalarında sinterleme işlemine tabi tutularak nihai mukavemetlerine kavuşturulabilir. Ayrıca, üretim mekanizmasının doğası gereği, destek yapılarına ihtiyaç duyulmadan imalat gerçekleştirilebilmektedir (Özer, 2020).

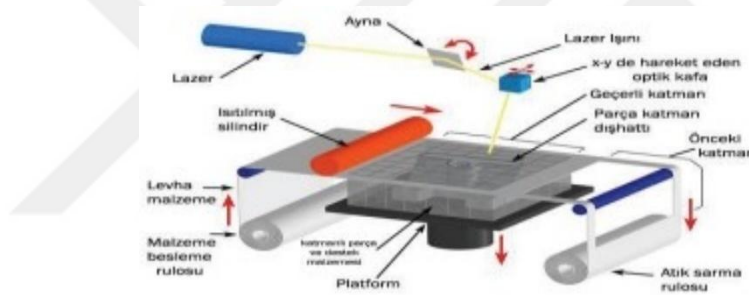


Şekil 3. 4. Erimiş malzeme şekillendirme (3 Boyutlu Yazıcı)

(https://www.stm.com.tr/uploads/docs/Raporlar/1599579912_1.katmanliimalatteknolojileriraporu2016-08-03-14-11-28.pdf)

3.5.3. Tabakalı yapıştırma tekniği (LOM)

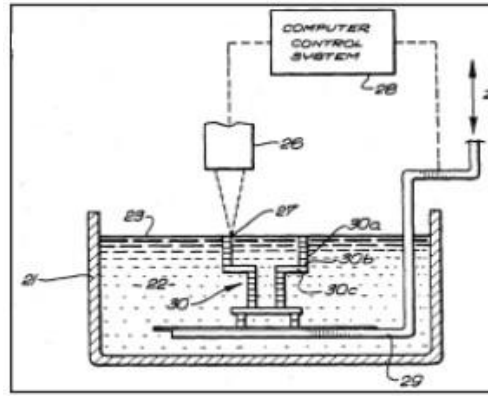
Bu yöntemde, tabaka formundaki malzemelerin kesilerek üst üste yapıştırılması yoluyla üç boyutlu parçalar üretilmektedir. Besleme merdanesi aracılığıyla sisteme iletilen malzeme, ısıtılmış bir silindir yardımıyla önceki katman üzerine yapıştırılır. Her bir tabakada, lazer teknolojisi kullanılarak parçanın dış geometrisi kesilir. Kesim işlemi tamamlandıktan sonra fazla malzeme ortamdaki uzaklaştırılır ve yeni bir katman ilave edilerek süreç tekrarlanır (Şekil 3.5). Kullanılan malzemenin türüne göre yapıştırma işlemi uygun yapıştırıcılar veya ısı yardımıyla gerçekleştirilir. Bu işlem, üç boyutlu model tamamen oluşturulana kadar ardışık olarak sürdürülür. Yöntem, polimer kompozitlerden seramiklere, metal kaplı bantlardan kâğıt bazlı malzemelere kadar çok çeşitli malzemelerle uyumludur. Ayrıca, büyük ebatlı parçaların üretimine olanak tanınması ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir üretim yöntemi olması gibi avantajlar sunmaktadır (Özer, 2020).



Şekil 3. 5. LOM yöntemi (Aydın, 2022)

3.5.4. Stereolitografi (SLA)

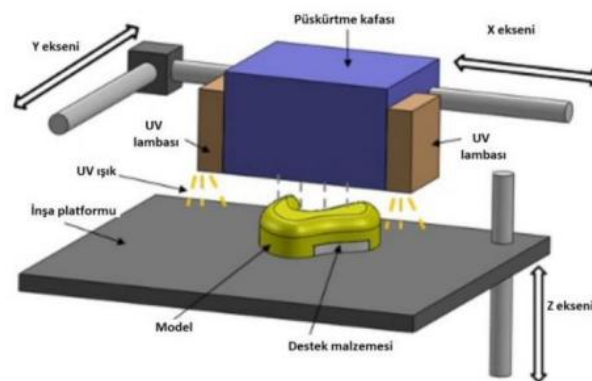
1980’li yıllarda, ultraviyole (UV) ışığa duyarlı polimerlerin lazer ışınlarıyla katman katman k r lenmesi esasına dayanan stereolitografi (SLA) yöntemi geliştirilmiş ve bu teknoloji, hızlı prototipleme endüstrisinin başlangıç noktası olmuştur (Hull, 1986). SLA, diğ r eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha yüksek üretim hızları sunmakta ve bu sayede fonksiyonel parçalar daha kısa sürede  retilabilmektedir (Gibson ve diğ.,2015). Üretim sürecinin doğası gereği karmaşık geometrilere ve yüksek yüzey kalitesine sahip parçalar hassas bir şekilde  retilabilmektedir. Ayrıca, çeşitli malzemelerle üretime olanak tanıması yöntemin esnekliğini artırmaktadır (şekil 3.6). Ancak, kullanılan fotopolimer reçineler ile cihaz donanımının maliyetleri diğ r yöntemlere göre daha yüksektir ( zer, 2020).



Şekil 3. 6. İlk tasarlanan SLA cihazının patentte geçen çizimi (Çevik, 2018)

3.5.5. PolyJet

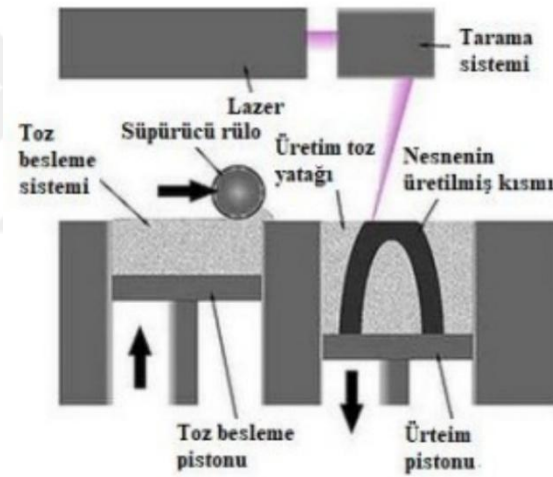
Bu yöntem, akrilik esaslı fotopolimerlerin kullanıldığı ve çoklu nozul yapılarına sahip baskı kafaları aracılığıyla yüksek hacimli malzeme püskürtülmesine dayalı bir eklemeli imalat teknolojisidir (Şekil 3.7). Püskürtme (jetting) sistemleri, hem bireysel kullanıcılar için geliştirilen kompakt ve ekonomik modellerden hem de endüstriyel ölçekte, yüksek maliyetli profesyonel cihazlara kadar uzanan geniş bir ürün yelpazesinde yer almaktadır. PolyJet teknolojisi, yüksek çözünürlükte ve yüzey kalitesi açısından üstün nitelikte parçalar üretebilme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Bu yöntem; yumuşak elastomerlerden sert termoplastiklere, saydam malzemelerden opak ve biyouyumlu malzemelere kadar çok çeşitli malzeme türlerinin işlenmesine olanak tanımaktadır. Farklı üretim ölçeklerine ve ürün boyutlarına kolayca uyarlanabilmesi sayesinde, geniş uygulama alanı bulunan verimli bir üretim süreci sunmaktadır (Özer,2020).



Şekil 3. 7. PJM yöntemi (Yermurat, 2024)

3.5.6. Seçici lazer sinterleme (SLS)

SLS, ince toz malzemelerin ardışık katmanlar hâlinde yayılarak lazer enerjisi ile sinterlenmesi esasına dayanan bir katmanlı imalat teknolojisidir (Şekil 3.8). Üretim sürecinde, inşa platformunun yüzeyine eşit kalınlıkta toz malzeme, düzleştirici bir silindir yardımıyla homojen biçimde serilir. Ardından, yüksek enerjili ve odaklanmış bir lazer ışını, toz yüzeyine yönlendirilerek parçanın ilgili kesiti boyunca tarama işlemi gerçekleştirilir. Her katman oluşturulduktan sonra, yeni bir toz tabakası yüzeye serilir ve süreç, parça tamamen oluşana dek tekrarlanır. Toz partikülleri arasında bağ oluşumunu sağlayan mekanizmalar; katı hâl sinterleme, kimyasal bağlanma, sıvı faz sinterleme ve kısmi ergime olmak üzere dört temel kategori altında sınıflandırılmaktadır. SLS yöntemi, özellikle plastikler ve çeşitli metal tozları ile uyumlu çalışabilmekte olup, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Özer, 2020).

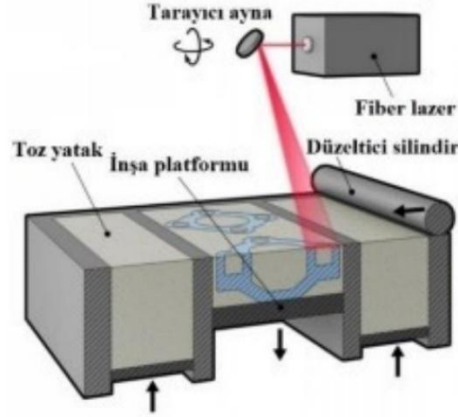


Şekil 3. 8. SLS çalışma prensibi (Sürmen, 2019)

3.5.7. Seçici lazer ergitme (SLM)

SLM, SLS yöntemine benzer şekilde toz tabakalarının lazerle katman katman işlenmesine dayanır; ancak temel fark, tozların tamamen ergitilmesidir (Şekil 3.9). Bu teknoloji sayesinde yüksek hassasiyet ve karmaşıklığa sahip metal parçalar, birkaç saat içinde üretilebilir. Kobalt-krom, titanyum ve paslanmaz çelik gibi malzemelerle işlevsel ürünler elde etmek mümkündür. Üretim süreci hızlı olup genellikle 1–2 gün içinde tamamlanır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip makine bileşenleri, tıbbi implantlar ve sanatsal objeler için uygundur. Ancak, yüksek adetli ve değişmeyen tasarımlar için maliyet etkin değildir. Ayrıca, cihazların

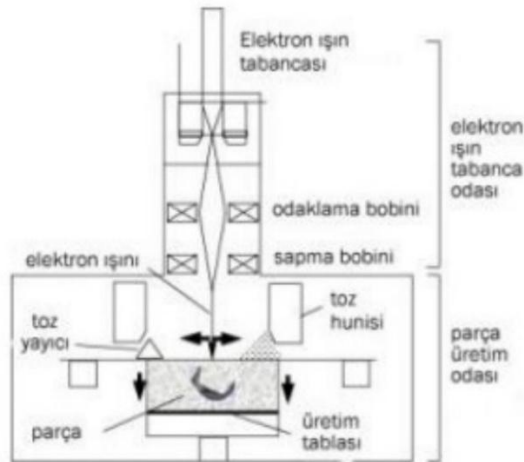
sınırlı üretim hacmi nedeniyle çok büyük parçaların üretimi bu yöntemle mümkün olmayabilir. SLM sistemleri, tozların tamamen ergimesini sağladığından, elde edilen parçalar daha yüksek yoğunluğa sahiptir ve özellikle uzay, savunma ve endüstriyel üretim alanlarında kullanılmaktadır (Çevik, 2018).



Şekil 3. 9. SLM yöntemi (Özer, 2020)

3.5.8. Elektron ışın ertitme (EBM)

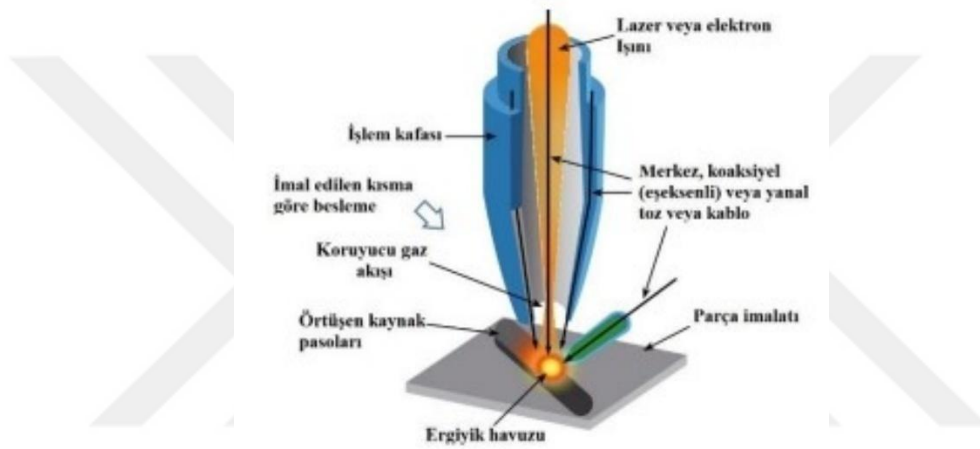
Elektron Işınlı Ergitme (EBM) yöntemi, dövme, döküm gibi geleneksel yöntemlere kıyasla üstün malzeme özellikleriyle parça üretimi sağlar. Yüksek vakum altında 1000 °C'ye kadar ısıtılan metal tozları, bilgisayar kontrollü elektron ışınları ile eritilir (Şekil 3.10). Toz yatağı temelli bu teknoloji, özellikle otomotiv, havacılık ve tıbbi uygulamalarda kullanılmakta olup, SLM'ye göre optik ve mekanik parça gerektirmediğinden daha hızlı çalışır (Çevik, 2018).



Şekil 3. 10. Elektron ışın ertitme yöntemi (Çevik, 2018)

3.5.9. Lazer metal biriktirme (LMB)

LMB, lazer ışını kullanarak metal tozlarının katmanlı bir şekilde birleştirildiği bir eklemeli üretim teknolojisidir (Şekil 3.11). Üretilen parçaların performansı, kaplama geçişlerinin genişliği ve tabaka yüksekliği gibi parametrelere bağlıdır. LMB ile elde edilen ürünler, homojen kimyasal bileşim ve iyi mekanik özellikler sunar; bu da yöntemi, geleneksel üretim süreçlerindeki homojensizlik sorunlarına karşı avantajlı kılar. Kalıp parçaları, valfler ve vidalar gibi metal bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olup, gazaltı ark kaynağı ve termal püskürtme gibi klasik yöntemlerin yerini almaya başlamıştır (Özer, 2020).



Şekil 3. 11. LMB yöntemi (Özer, 2020)

3.6. Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Uygulama Alanları

Eklemeli imalat teknolojisinin; otomotiv, uzay, havacılık, kalıpcılık, sağlık, savunma sanayi, mimarlık, kişisel ürün tasarımı, heykeltçilik gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Şekil 3.14). Özellikle kişiselleştirilmiş üretim imkânı sayesinde, bu teknoloji geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilmesi zor veya maliyetli olan çözümleri mümkün kılmaktadır.

Eklemeli imalatın kullanım alanlarına örnek olarak Hollanda'da bir hatanın kafatası eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş olan sentetik bir implant ile değiştirilmiş ve olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 3.12).

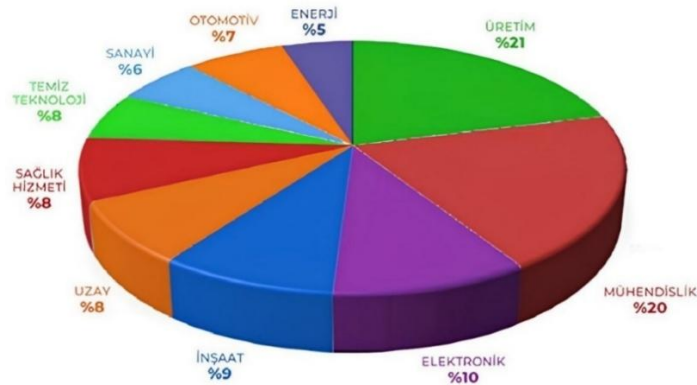


Şekil 3. 12. Eklemeli imalat ile üretilen kafatası (<https://www.nbcnews.com/science/science-news/medical-first-3-d-printed-skull-successfully-implanted-woman-n65576>)

Farklı bir örnek olarak eklemeli imalat yöntemiyle Airbus tarafından ağırlığı 20 kg, uzunluğu 4m olan Thor adında bir uçak üretilmiştir. Bu uçak üretilerek eklemeli imalat ile üretilen parçaların uçaklarda kullanılması amaçlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3. 13. THOR uçağının ilk test uçuşu (Saraçyakupoğlu, 2020)



Şekil 3. 14. Eklemeli imalat teknolojilerinin uygulama alanları (<https://etim.org.tr/gelecegin-teknolojisi-eklemeli-imalat/>)

3.7. Titanyum

Titanyum iyi tokluk, iyi ısı iletkenliği, düşük yoğunluğa sahiptir (Şekil 3.15). Manyetik değildir. Titanyum işlenmesi zor malzeme grubunda yer almaktadır. Bu yüzden kesme parametreleri ve çalışma şartları önemlidir. Titanyum reaktif bir malzeme olduğu için oksijen ile tepkimeye girerek yüzeyinde hızlı bir şekilde oksit tabakası oluşturur. Bu oksit tabakasından dolayı titanyum mükemmel korozyon direncine sahiptir (Yaşar, 2023).



Şekil 3. 15. Titanyum (<https://kdmfab.com/tr/titanyum-alasimi-nedir/>)

Titanyum yüksek dayanım, düşük yoğunluklu olması, ısıl direncinin yüksek olması gibi özelliklere sahip olduğu için uzay- havacılık, otomotiv, biyomedikal, denizcilik gibi birçok çeşitli sektörde kullanılmaktadır.

Titanyum alaşımları; “alfa titanyum alaşımları, alfa-beta titanyum alaşımları ve beta titanyum alaşımları” olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. α -titanyum alaşımları, mükemmel kaynak özelliklerinin yanı sıra yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. Sıcaklığın yüksek olduğu veya çok düşük olduğu ortamlarda tercih edilmektedir. Alfa-beta titanyum alaşımları bileşimlerinde fazların kararlılığını arttıran bir ya da daha fazla alaşım elementleri bulundurmaktadır. Bu tip alaşımlar, tavlama sonrasa bile yüksek tokluk, homojenlik ve mukavemet özelliklerini koruyabilmektedir. En yaygın kullanılan $\alpha + \beta$ alaşımı Ti6Al4V’dir. β -titanyum alaşımları yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler (Aydın, 2022). Çizelge 3.1’de Titanyum alaşımlarının genel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Titanyum alaşımlarının genel özellikleri (Aydın, 2022)

	α	β	$\alpha + \beta$
Yoğunluk	Düşük	Düşük	Yüksek
Mukavemet	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süneklik	Düşük /Yüksek	Yüksek	Düşük /Yüksek
Kırılma Tokluğu	Yüksek	Düşük /Yüksek	Düşük /Yüksek
Sürünme Dayanımı	Yüksek	Düşük /Yüksek	Düşük
Korozyon Dayanımı	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük /Yüksek
Oksidasyon Davranışı	Çok Yüksek	Düşük /Yüksek	Düşük
Soğuk Şekillendirilebilirlik	Çok Düşük	Düşük	Düşük /Yüksek
Kaynaklanabilirlik	Yüksek	Düşük /Yüksek	Düşük

Titanyum alaşımı ilk başlarda havacılık endüstrisinde kullanılırken daha sonraları mükemmel korozyon dayanımı, yüksek mukavemet, kolayca şekillendirilmesi ve lehimlenmesi gibi özelliklere sahip olması sebebiyle tıp ve sağlık sektörü, uzay ve gemcilik, denizcilik, otomotiv sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Oyar, 2015). Şekil 3.16’da gösterildiği gibi sağlık ve gemcilik sektörlerinde de kullanılmaktadır.



Şekil 3. 16. Titanyum diş implantı (Çandırlı,2024) ve titanyum gemi (tr.metal-ti.org/news/application-of-titanium-in-the-naval-field-61667116.html)

3.7.1. Ti6Al4V alaşımı

Ti6Al4V alaşımı endüstride Ti64 olarak da anılmaktadır (Yaşar, 2023). Ti6Al4V yapısı, ağırlıkça % 6 Al ve % 4 V içeren $\alpha+\beta$ alaşımıdır. Titanyum alaşımlarından endüstride en fazla talep Ti6Al4V alaşımı görmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, hafiflik ve mekanik mukavemete sahip Ti6Al4V alaşımı, havacılık ve nükleer endüstrilerde kullanılır; yüksek biyouyumluluğu ve yüksek korozyon direnci özellikleriyle birçok uygulamalarda kullanılmaktadır. Çizelge 3.2’de Ti6Al4V alaşımının kütlece yüzde element analizi verilmiştir.

Çizelge 3. 2. Ti6Al4V alaşımının kütlece yüzde element analizi (Kaya,2021)

Element	%
Ti	88,5-90,5
Al	5,5-6,5
V	3,5-4,5
Fe	0,25
O	0,13
C	0,08
N	0,05
H	0,0125

3.8. Talaşlı İmalat ve İşlenebilirlik

İmalat işlemleri işleme yöntemleri ve montaj olarak temel iki işlemten oluşur. İşleme yöntemlerinde amaç hammadde halinde olan malzemeyi çeşitli üretim yöntemleriyle istenen geometrideki ürüne dönüştürmektir (Yıldız, 2015). DIN 8589 standardına göre talaşlı imalat, bir iş parçasının iş takımları yardımıyla işlenerek talaş kaldırılması yoluyla şeklinin değiştirilmesi veya yüzeyinin mekanik olarak iş parçasından ayrılması işlemidir (Güldibi, 2020). şekil verme işlemi yapılırken malzemenin kütlelerinin azaldığı işlemlerdir. Tornalama, vargelleme, taşlama, frezeleme, borlama bu işlemlere örnektir.

3.8.1. Tornalama

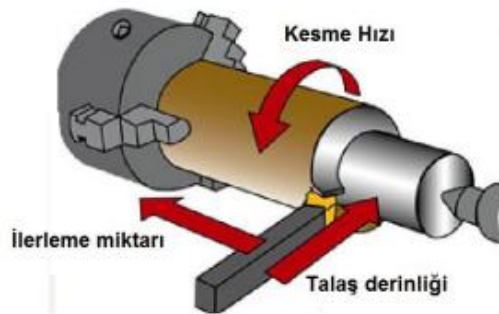
Tornalama, talaşlı imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanılan ve en temel işlemlerden biridir. Bu işlemde iş parçası, tezgâhın ana mili tarafından döndürüldükten sonra, sabitlenmiş bir kesici takım ile istenilen şekil veya yüzey elde edilir. Tornalama işlemi genellikle silindirik, konik, düz, dişli gibi çeşitli yüzeylerin işlenmesinde kullanılır (Ensarioğlu, 2007). Tornalama işlemi, üniversal torna, revolver torna, nümerik kontrollü (NC) torna veya bilgisayar destekli sayısal kontrollü (CNC) torna tezgâhlarında gerçekleştirilir (Şekil 3.17).



Şekil 3. 17. CNC torna tezgâhı (<https://www.istanbulmakina.com.tr/cnc-torna-tezgahi-nedir/>)

3.8.1.1. Tornada kesme parametreleri

Tornada kesme hızı, talaş derinliği, ilerleme miktarı önemli parametrelerdir (Şekil 3.18).



Şekil 3. 18. Tornalama işlemi için kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği (Akkuş, 2010)

a) Kesme hızı

Kesme hızı, sabit konumdaki bir kesici takım dikkate alındığında, iş parçasının dönme hareketi sonucunda takımın parça yüzeyi üzerinde belirli bir noktadan dakikada aldığı mesafe olarak tanımlanır. Kesme hızı V_c ile gösterilir. Birimi metre/dakika (m/dk) olarak belirtilir (Gündüz, 2006). Örneğin, bir metal için kesme hızının 30 m/dk olarak seçilmesi, takımın iş parçası çevresinde bir dakikalık sürede toplam 30 metre yol kat ettiği anlamına gelir (Akkuş, 2010).

Parça çapı D (m) ve devir sayısı n (dev/dk) olarak belirtilirse;

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir (Özdemir, 2006).

b) İlerleme miktarı

İlerleme miktarı, kesici takımın iş parçası eksenine boyunca birim zamanda gerçekleştirdiği yer değiştirme mesafesi ya da her bir paso boyunca uzaklaştırılan malzeme miktarı olarak ifade edilir (Akkuş, 2010). İlerleme miktarı f ile gösterilir. Birimi mm/dev olarak belirtilir (Gündüz, 2006).

c) Talaş derinliği

Tornada uygulanan talaş kaldırma işleminde talaş derinliği, kesici takımın iş parçasına dik ekseninde daldığı mesafeyi göstermektedir. Genellikle ilk çap ile son çap arasındaki farkın yarısına eşit alınır. Talaş derinliği a ile gösterilir. Birimi milimetre (mm) olarak gösterilir (Gündüz, 2006).

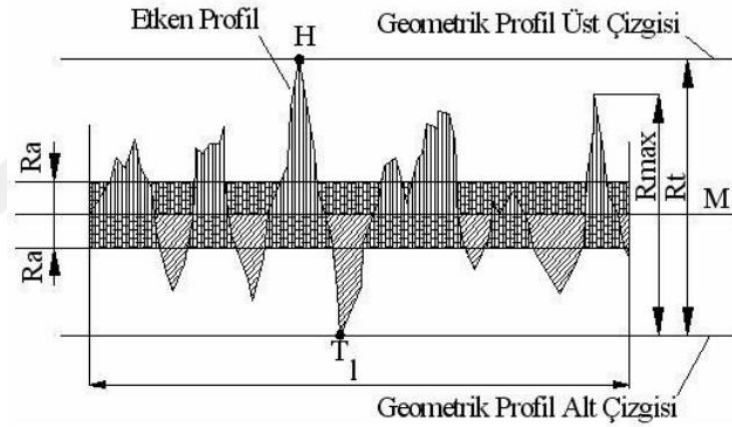
İlk çap D ve son çap d olarak gösterilirse;

$$a = \frac{D - d}{2} \quad (3.2)$$

olarak gösterilir (Özdemir, 2006).

3.9. Yüzey Pürüzlülüğü

İş parçasının yüzey pürüzlülüğü, işleme sırasında kullanılan parametreler, kesici takımın özellikleri, iş parçası malzemesi ve takım tezgâhı gibi farklı faktörlerin etkisiyle yüzeyde meydana gelen düzensizlikleri tanımlar (Bozkurt, 2019). Bir iş parçasının yüzeyi gözle kusursuz görünse bile, mikroskop altında detaylı incelendiğinde çeşitli mikro düzensizlikler ortaya çıkar (Şekil 3.19). Kesme sıvıları, malzeme, ilerleme miktarı, talaş derinliği, kesme hızı gibi parametreler yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir.



Şekil 3. 19. Yüzey pürüzlülüğünün üç boyutlu gösterimi

R_a : Ortalama pürüzlülük değeri (μm)

R_{max} : En büyük pürüzlülük derinliği (μm)

R_t : Pürüzlülük yüksekliği (μm)

L : Örnek uzunluk (mm)

Yüzey pürüzlülüğü matematiksel gösterimi aşağıda verilmiştir (Karabuğa,2022). Bu formülde; y yüzeyden dikey sapma miktarı, m ve L_m dikey sapmaların ölçüldüğü aralıktır (Demirer, 2022).

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \quad (3.3)$$

3.10. Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi minimum deney sayısı gerçekleştirilerek maliyetleri en az seviyeye düşürmeyi amaçlayan bir istatistiksel deney tasarımıdır (Küçük ve Uran, 2022).

Taguchi metodu, geleneksel tasarım tekniklerinde karşılaşılan yüksek deney sayısını önemli ölçüde azaltarak aynı sonuçlara ulaşmayı sağlayan pratik bir deney tasarım yöntemidir. Parametre optimizasyonunda sıkça kullanılan bu yaklaşım, az sayıda deney ile tüm süreç parametrelerinin incelenmesine olanak tanıyan ortogonal dizi düzenine dayanmaktadır. Klasik deney tasarımı yöntemlerine göre üstünlükleri bulunan bu teknik, performans değişkenlerindeki dalgalanmaları azaltarak en uygun işlem koşullarının tespit edilmesinde etkin bir yol sunar. Böylece optimum koşulların belirlenmesi ve verimliliğin artırılması açısından en uygun ve ekonomik yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (İncedal, 2023).

Taguchi tarafından kısmi faktöriyelle gerçekleştirilen deneylerin tam analizi için iki yöntem tavsiye edilmektedir:

1. Anova analizi yöntemiyle sonuçların güvenilirliği hesaplanır. Analiz kontrol edilebilen faktörlerin ve gürültü faktörlerinin varyansının belirlenmesini ve birbirleri arasındaki etkileşimlerin belirlenmesini sağlar.
2. Gürültü/sinyal oranı (S/N) çıktı kalite karakteristiğinin gürültü faktörlerine olan hassasiyetini gösterir” (Ceylan ve diğ., 2021).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Deneyde Kullanılan Gereçler

4.1.1. CNC torna tezgâhı

Deneyde tezgâh olarak CNC tornalama tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 4.1). CNC torna tezgâhları bilgisayar kontrollü olarak çalışır. X eksenini çapta ilerlemeyi Z eksenini ise boyda ilerlemeyi gösterir. Tornalama yapılırken ilerleme miktarı (mm/dev), kesme hızı (m/dk), talaş derinliği (mm) gibi parametreler kullanılmıştır. Kullanılan CNC tezgâhı GOODWAY markasına ait GA-2600 modelidir (Şekil 4.2).



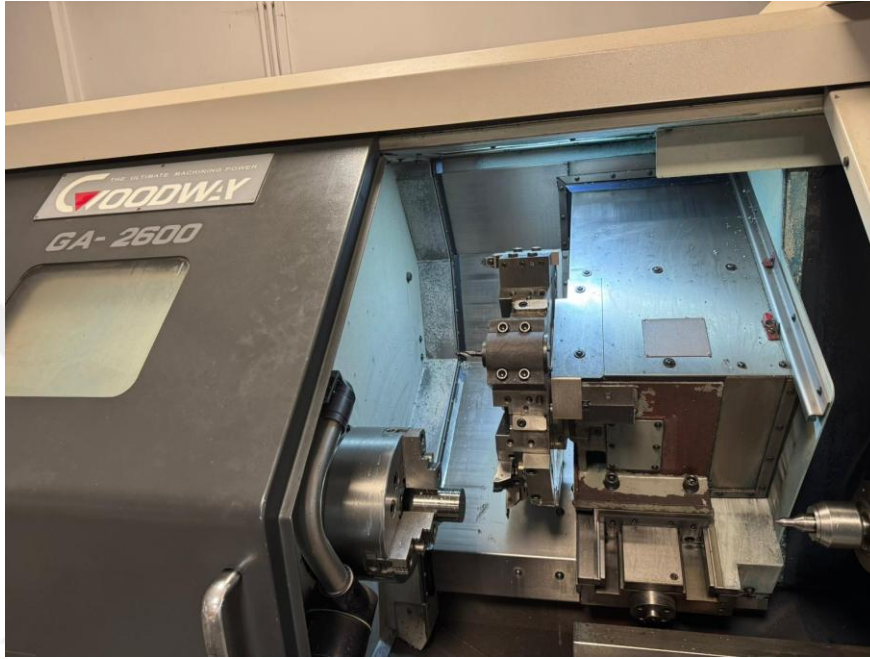
Şekil 4. 1. GOODWAY GA-2600 makinesi

GOODWAY GA-2600 torna tezgâhı teknik verileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. CNC torna tezgâhı teknik özellikleri

Max Çevirme Çapı	Ø 580 mm
Max Tornalama Boyu	600 mm
Max Tornalama Çapı	Ø 350 mm
X eksenini hareketi	205 mm

Kontrol Ünitesi	Fanuc 0i -TC
Y eksen hareketi	630 mm
Standart Ayna Ebadı	10 INC
Takım İstasyon Adedi	10
Makine Ağırlığı	4.000 kg



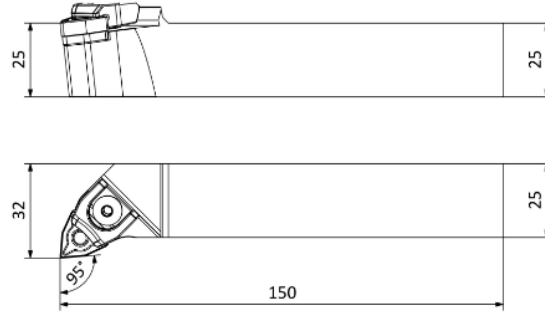
Şekil 4. 2. Üretilen Ti6Al4V malzemesinin torna makinesine bağlanmış hali

4.1.2. Takım tutucu

Seçilen kesici uç, geometrik yapısına uygun MWLNR 2525M08 takım tutucu ile birlikte kullanılmıştır. Takım tutucunun görseli ve teknik resmi Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Takım tutucu



Şekil 4. 4. Takım tutucu teknik resmi

4.1.3. Kesici takım

Kesici uç seçiminde, çift taraflı ve pozitif talaş açısına sahip olan WNMG 080408-OMM form yapısına sahip PVD kaplamalı kesici uç tercih edilmiştir (Şekil 4.6). Her deney sonrasında uç değişimi yapılmıştır. Kesici uca ait katalog Şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4. 5. Kesici uç katalog

Bu kesici uç, orta kaba talaş kaldırmaya uygun başta karbon çelikleri olmak üzere paslanmaz çelikler içinde kullanılan çok amaçlı bir kesicidir.



Şekil 4. 6. Deneyde kullanılan kesici uç

4.1.4. Kesme parametreleri

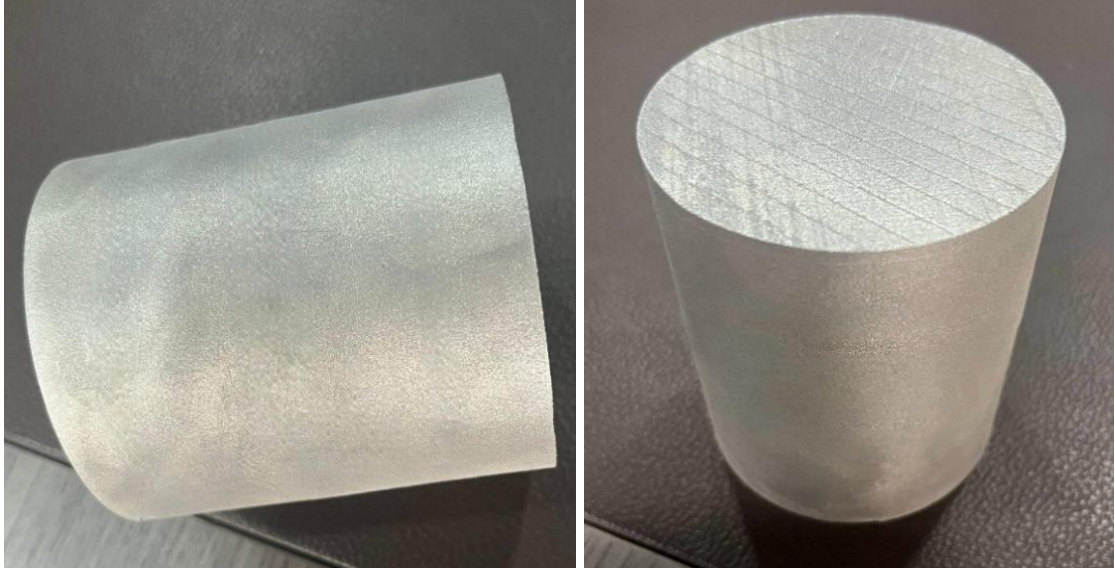
İşlenebilirlik deneylerinin tümü, soğutucu yağ kullanılarak üç farklı talaş derinliği, ilerleme miktarı ve kesme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen kesme parametreleri aşağıda Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4. 2. Kesme parametreleri

Kesici Takım	İlerleme Miktarı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dk)	Talaş Derinliği (mm)
WNMG 080408- OMM	0,10	90	0,3
	0,15	120	0,4
	0,20	150	0,5

4.1.5. Malzeme

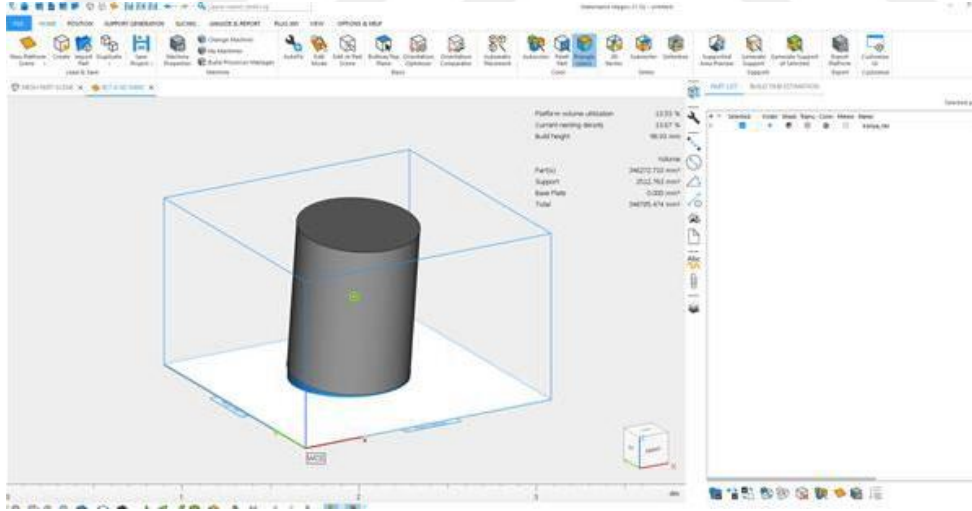
Tornalamada eklemeli imalatla Ti6Al4V malzemesinden üretilen silindirik parça işlenmiştir. CNC torna tezgâhları için silindirik parçaların işlenmesi daha uygundur. Eklemeli imalatla üretilen silindir parçanın uzunluğu 10 cm ve çapı 5 cm olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4. 7. Malzeme

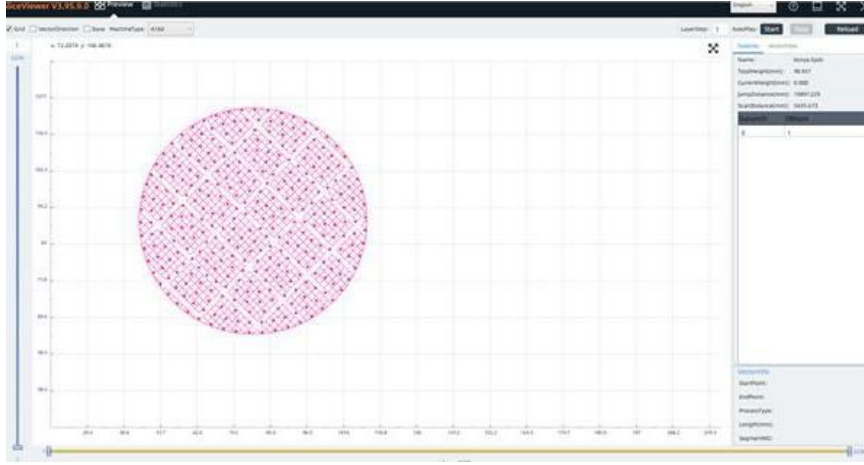
4.1.6. Materialise Magics programı

Tasarım için ilk olarak parçanın 3D modeli oluşturularak başlanmıştır. Parçanın tasarımı Materialise Magics programıyla yapılmıştır (Şekil 4.8).

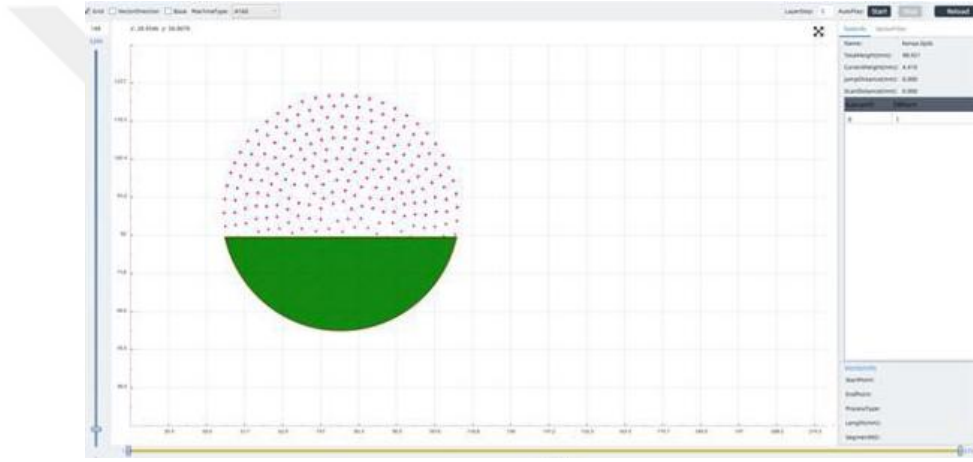


Şekil 4. 8. Materialise Magics programıyla parçanın tasarımı

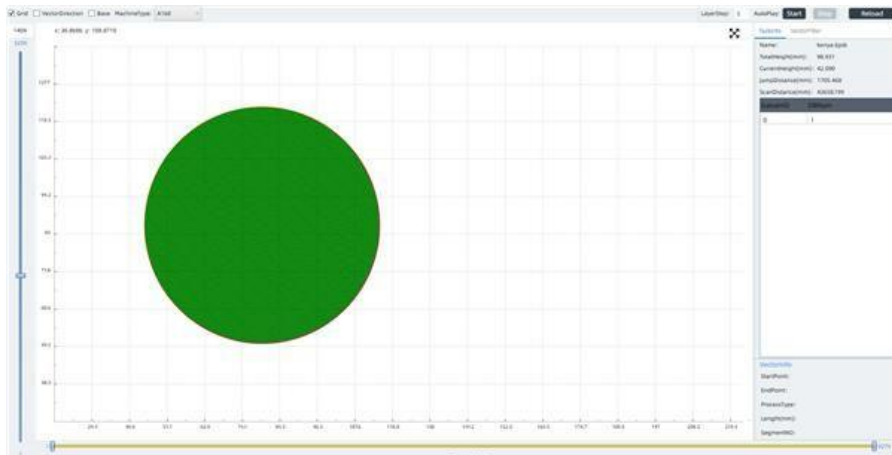
Materialise Magics, dosyaları STL'ye dönüştürmeyi, hataları onarmayı, tasarımı düzenlemeyi, hazırlamayı sağlayan eklemeli imalat için bir veri hazırlama ve STL düzenleme yazılımıdır. Modellenen parça aynı programda katmanlara dilimlenmiştir. Parça toplam 3299 katmandan oluşmaktadır. Parçanın üretilmesi toplamda 2 gün sürmüştür. Şekil 4.9'da parça katmanları verilmiştir.



a) Parçanın katmanına uygulanan taramanın görünümü



b) Parça katmanının alt kısmının dolu görünümü



c) Parçanın tamamen dolu modelinin görünümü

Şekil 4. 9. Parça katmanları (a, b, c)

4.1.7. SLM makinesi

Seçici Lazer Ergitme (SLM) teknolojisi sıklıkla tercih edilen bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalatla parçanın üretilmesi BLT A160 makinesiyle yapılmıştır. Makinenin tarama gücü 250-400 W arası değişmektedir. Tarama hızı 800-1400 mm/s, katman kalınlığı 30 mikrondur (Şekil 4.10).



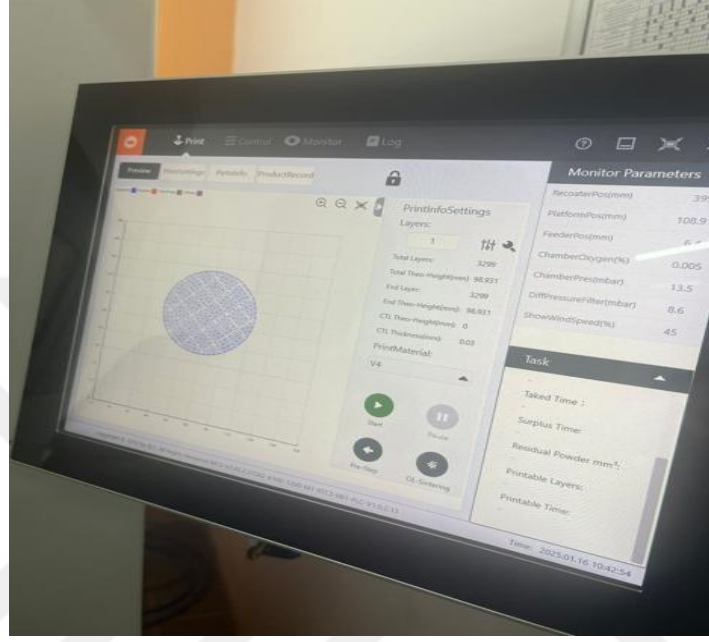
Şekil 4. 10. SLM makinesi

4.1.7.1. Üretim aşamaları



Şekil 4. 11. Tabla

İlk olarak üretim tablası üzerine bir katman toz malzeme serilerek hazırlanır (Şekil 4.11). Lazer, parçanın ilk katmanını oluşturmak için toza “Seçici Lazer Ergitme” işlemi yapar. Sonrasında yeni bir metal tozu tabakası eşit olarak serilir. Lazer söz konusu katmandaki geometriyi oluşturmak ve bu katmanı bir alttaki katmanla birleştirmek amacıyla ergitme işlemine devam eder.



Şekil 4. 12. OL-Sintering ve Chamber Oxygen

Üretim yapılırken Şekil 4.12’de ekranda görülen OL-Sintering parçanın tablaya daha iyi yapışmasını sağlamaktadır ve Chamber Oxygen oranının 0,005’e düşmesi beklenmiştir. Bunun sebepleri;

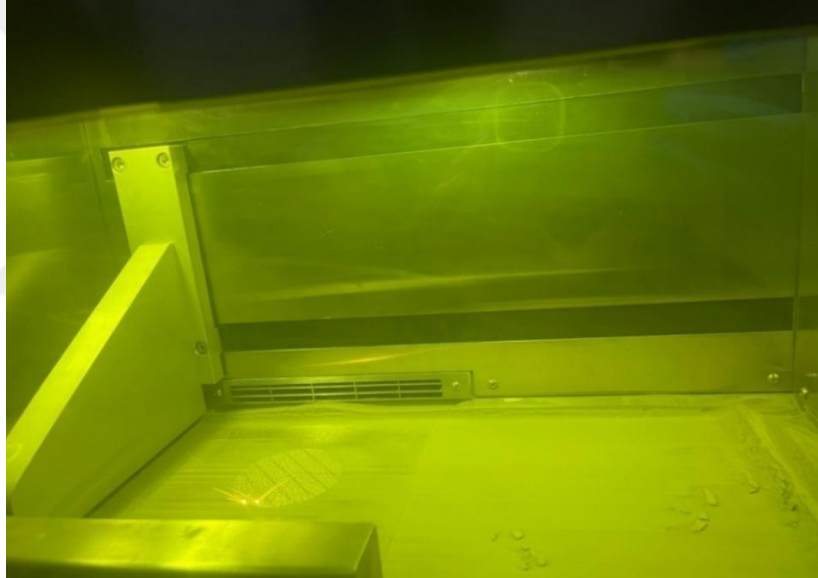
- Oksidasyonu önlemek: Titanyum, alüminyum, magnezyum, nikel ve reaktif metaller oksijenle temas ettiğinde oksitlenir. Bu oksit tabakası parçanın mekanik dayanımını düşürür ve malzeme özelliklerini olumsuz etkiler. % 5’in altındaki oksijen seviyesi bu metallerin oksitlenme riskini ortadan kaldırır ve parçanın yüzey kalitesini artırır.
- Gözenekliliği azaltmak: Yüksek oksijen seviyesi, malzeme içinde gaz kabarcıkları oluşturabilir. Bu da gözeneklilik ve mikro çatlaklara yol açar, parçanın mukavemetini düşürür. Düşük oksijen seviyesi, gözenekliliği en aza indirir ve parçanın yoğunluğunu artırır.
- Yüksek mekanik performans: Kontrollü oksijen seviyesi, malzemenin nihai mekanik özelliklerini (çekme mukavemeti, yorulma direnci) artırır ve parçanın daha uzun ömürlü olmasını sağlar.

- Güvenlik: Metal tozları, özellikle alüminyum ve titanyum, oksijenle belirli oranlarda karıştığında yanıcı ve patlayıcı hale gelir. % 5'in altındaki oksijen seviyesi bu patlama riskini büyük ölçüde ortadan kaldırır.

4.1.7.2. Cihaz bileşenleri

SLM cihazlarında tabla, toz yatağı ve rikotır önemli temel bileşenlerdir (Şekil 4.13).

- a) Tabla: Baskının gerçekleştiği yüzeydir.
- b) Tozyatağı: Metal tozunun ince katmanlar halinde serildiği bölgedir.
- c) Rikotır: Toz yatağına metal tozunu eşit şekilde yayan mekanizmadır.

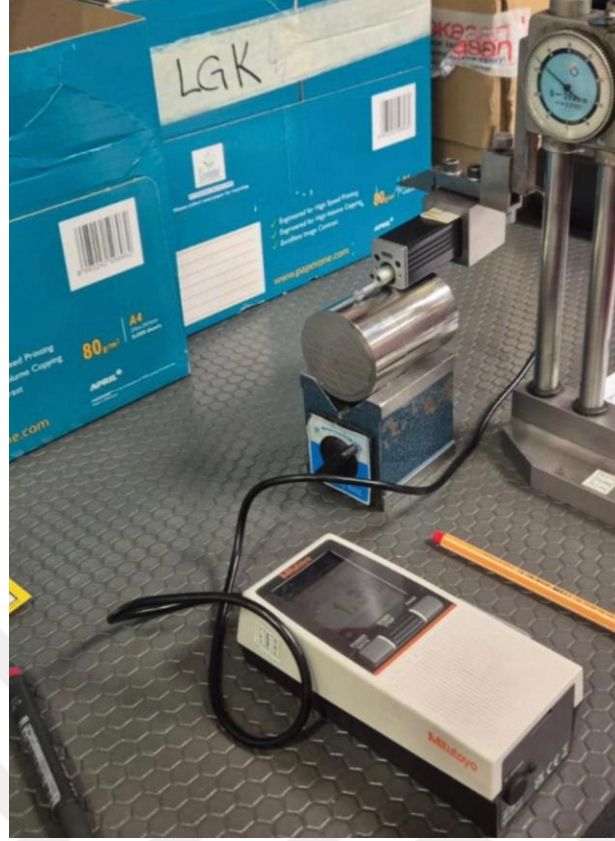


Şekil 4. 13. SLM cihazı; a) tabla, b) tozyatağı, c) rikotır

Üretim tamamlandıktan sonra parça temizlenmiş ve destek yapıları çıkarılmıştır.

4.1.8. Yüzey pürüzlülük cihazı

Yüzey pürüzlülük cihazı bir yüzeyin pürüzlülüğünü, yüzeydeki düzensizlikleri ölçmeye yarayan cihazdır. Deneyde yüzey pürüzlülüğü R_a olarak gösterilmiştir. Deneyde ilerleme miktarı, kesme hızı, talaş derinliği oranlarına göre yüzey pürüzlülüğü oranları bulunarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu deneyde MİTUTOYO SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı ile her bir deney için yüzey pürüzlülük oranları ölçülmüştür (Şekil 4.14).



Şekil 4. 14. MİTUTOYO SJ-210 yüzey pürüzlülük cihazı

4.1.9. Minitab programı

Deney analizleri için Minitab programı kullanılmıştır. Kesme parametreleri; kesme hızı 90 m/dk, 120 m/dk, 150 m/dk, ilerleme miktarı 0,10 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,20 mm/dev ve talaş derinliği 0,3mm, 0,4 mm 0,5 mm kullanılmıştır. Çizelge 4.3'te kesme parametreleri ve seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 4. 3. Kesme parametreleri ve seviye değerleri

Sembol	Kesme Parametreleri	Seviye		
		1	2	3
A	İlerleme Miktarı (mm/dev)	0,10	0,15	0,20
B	Kesme Hızı (m/dk)	90	120	150
C	Talaş Derinliği (mm)	0,3	0,4	0,5

Taguchi L₉ ortogonal dizininde deney listesi oluşturulmuştur. Çizelge 4.4'te Taguchi L₉ Ortogonal dizilimi verilmiştir.

Çizelge 4. 4. Taguchi L₉ Ortogonal dizilimi

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

Belirtilen parametrelere göre iş parçasının ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümünde parçanın ilk kısmından, ortasından ve sonundan ölçümlerine bakılmış ve bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Çizelge 4.5'te bulunan yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.

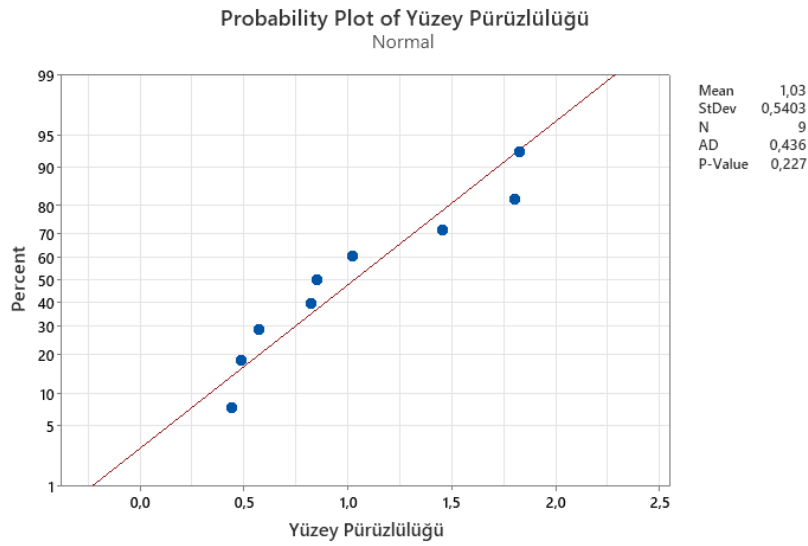
Çizelge 4. 5.Yüzey pürüzlülük oranları

Deney No	İlerleme Miktarı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dk)	Talaş Derinliği (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) (μ_m)			
				1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	Ortalama
1	0,10	90	0,3	0,422	0,470	0,432	0,441
2	0,10	120	0,4	0,472	0,475	0,515	0,487
3	0,10	150	0,5	0,502	0,473	0,731	0,568
4	0,15	90	0,4	0,825	0,801	0,844	0,823
5	0,15	120	0,5	0,922	1,077	1,066	1,021
6	0,15	150	0,3	0,849	0,835	0,871	0,851
7	0,20	90	0,5	1,803	1,830	1,768	1,800
8	0,20	120	0,3	1,348	1,482	1,529	1,453
9	0,20	150	0,4	1,738	1,873	1,867	1,826

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Normallik Analizi

Veri analizine geçilmeden önce, veri setlerinin normal dağılıma uygunluğu test edilmelidir. Bunun için Minitab programından Anderson-Darling normallik testi ile normallik analizi yapılmıştır. (Atıkan,2022) Normallik testi sonuçları Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5. 1. Normallik analizi grafiği

Normallik testi sonucunda $p > 0,05$ olmalıdır (Asiltürk ve Akkuş, 2011). P değerleri 0,227 olarak elde edilmiştir. Test sonucunda değerlerin normal dağılıma sahip olduğu görülmüştür.

5.2. S/N analizi

Taguchi deney tasarım metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt S/N oranıdır. Sinyal (S), sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değerdir. Gürültü (N) ise ölçülen değer içerisindeki kontrol edilemeyen, istenmeyen faktörlerin payını gösterir. Taguchi tasarımı ile sinyal/gürültü (S/N) oranları bulunmuştur. Taguchi deneyi ‘smaller is better’ olarak yapılmıştır. S/N grafiği aşağıdaki gibi bulunmuştur. 3 tip S/N oranı vardır:

- ✓ Tip N: Hedef değer en iyi, hedef nominal bir değere ulaşmak.

- ✓ Tip S: En küçük en iyi, hedef en düşük değere ulaşmak.
- ✓ Tip B: En büyük en iyi, hedef en yüksek değere ulaşmak.

Bu üç durumda da amaç S/N oranını maksimize etmektir. Bu oranların maksimize edilmesi, sinyali arttırırken, varyansı azaltmaktadır (Rıdvanoğulları, 2018). Bu çalışmada en küçük en iyi tipindeki S/N oranı kullanılmıştır.

Minitab programında en küçük en iyi denklemi kullanılarak S/N oranları, seviye değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen S/N oranları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5. 1. L₉ Ortogonal diziliminde R_a için S/N oranları

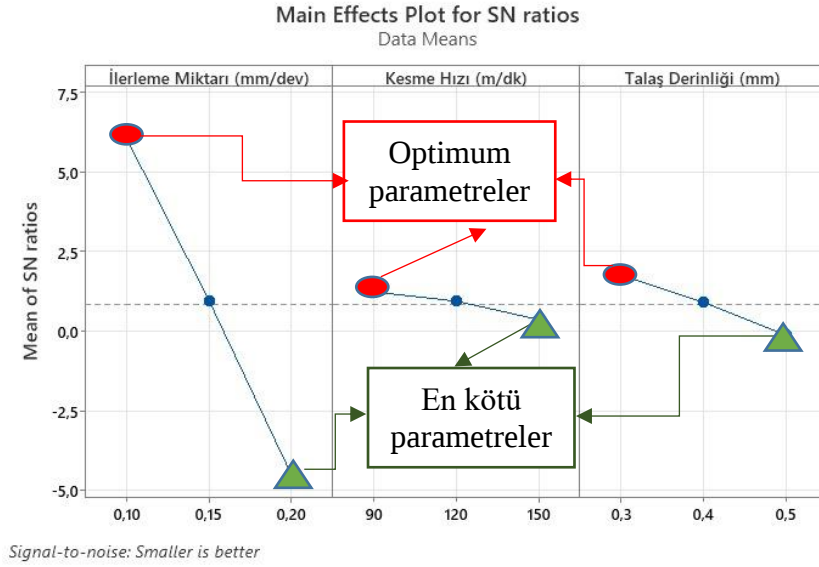
Deney No	A	B	C	R_a	S/N
1	1	1	1	0,441	7,111
2	1	2	2	0,487	6,249
3	1	3	3	0,568	4,913
4	2	1	2	0,823	1,692
5	2	2	3	1,021	-0,180
6	2	3	1	0,851	1,401
7	3	1	3	1,800	-5,105
8	3	2	1	1,453	-3,245
9	3	3	2	1,826	-5,230

Taguchi L₉’a göre elde edilen S/n tablosu Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 2. Yüzey pürüzlülüğü faktörü R_a için S/N cevap tablosu

Seviyeler	A İlerleme Miktarı (mm/dev)	B Kesme Hızı (m/dk)	C Talaş Derinliği (mm)
1	6,0912	1,2326	1,7558
2	0,9710	0,9412	0,9038
3	-4,5269	0,3615	-0,1243
Delta	10,6182	1,8711	1,8801
Doğrulama değerleri	1	3	2

DeneySEL çalışmalarından elde edilen S/N grafiği Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5. 2. S/N grafiği

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.2'den optimum kesme şartları bulunmuştur. Buna göre; A faktörünün 1.seviyesinin, B faktörünün 1.seviyesinin ve C faktörünün 1.seviyesinin yüksek olduğu görülmüştür. Dolayısıyla İlerleme miktarı 0,10 mm/dev, kesme hızı 90 m/dk, talaş derinliği 0,3 mm olursa minimum yüzey pürüzlülüğü elde ederiz. Grafiğe bakıldığında ilerleme miktarının arttıkça yüzey pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığını, talaş derinliğinin arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve kesme hızının arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

5.2. Anova (Varyans) analizi

Çizelge 5. 3. Anova sonuçları

Parametreler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Kareler Ortalaması (MS)	F Oranı	P Değeri	Etki Oranı (%)
İlerleme Miktarı (mm/dev)	2	2,21766	1,10883	65,21	0,015	94,949
Kesme Hızı (m/dk)	2	0,01378	0,00689	0,41	0,712	0,589
Talaş Derinliği (mm)	2	0,07018	0,03509	2,06	0,326	3,004
Hata	2	0,03401	0,01700			1,456
Toplam	8	2,33563				100
Anlamlılık	R-Sq= % 98,54			R-Sq(adj)= % 94,18		

Anova sonuçlarına göre;

İlerleme miktarının (mm/dev) yüzey pürüzlülüğü (μm) üzerinde yüzde etkisine bakarsak;

$$\frac{\text{ilk değer}}{\text{toplam değer}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\frac{2,21766}{2,33563} \times 100 = \% 94,949$$

Kesme hızının (m/dk) yüzey pürüzlülüğü (μm) üzerinde yüzde etkisine bakarsak;

$$\frac{\text{ilk değer}}{\text{toplam değer}} \times 100$$

$$\frac{0,01378}{2,33563} \times 100 = \% 0,589$$

Talaş derinliğinin (mm) yüzey pürüzlülüğü (μm) üzerinde yüzde etkisine bakarsak;

$$\frac{\text{ilk değer}}{\text{toplam değer}} \times 100$$

$$\frac{0,07018}{2,33563} \times 100 = \% 3,004$$

Hata payının yüzey pürüzlülüğü (μm) üzerinde yüzde etkisine bakarsak;

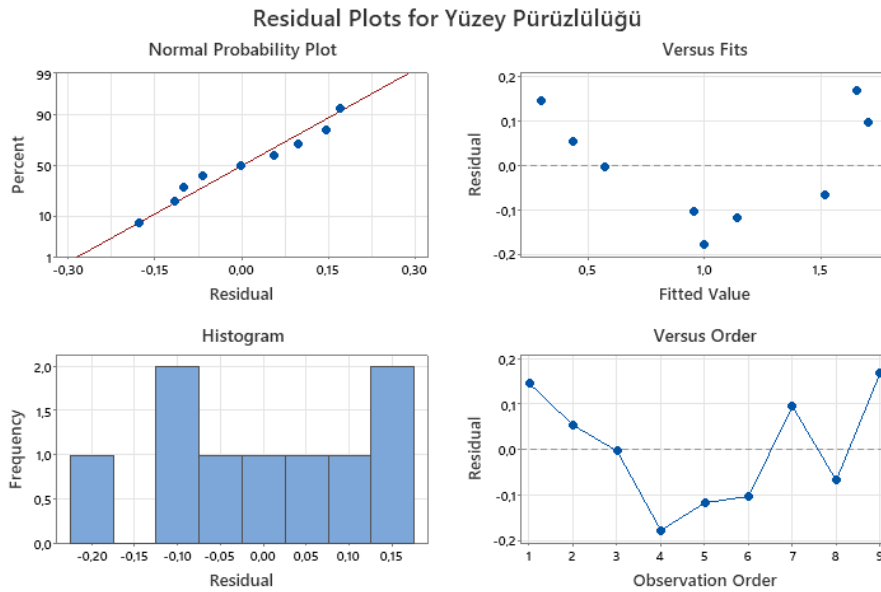
$$\frac{\text{ilk değer}}{\text{toplam değer}} \times 100$$

$$\frac{0,03401}{2,33563} \times 100 = \% 1,456$$

olarak bulunur.

İlerleme miktarı (mm/dev), kesme hızı (m/dk) ve talaş derinliği (mm) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Anova yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçlar Çizelge 5.3'te verilmiştir. Anova ile elde edilen % 94,18 oranındaki R Sq(adj) değeri, giriş parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü açıklama yeteneğinin (>% 70) güçlü olduğunu göstermektedir. Çizelge 5.3'e göre ilerleme miktarı parametresinin (% 94,949) yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Kesme hızı ve talaş derinliği oranı parametreleri yüzey pürüzlülüğünü sırasıyla % 0,589 ve % 3,004 oranında etkilemektedir.

P değeri 0,05'in altında olan parametreler istatistiksel olarak anlamlı parametrelerdir. İlerleme miktarı $0,015 < 0,05$ olduğu için yüzey pürüzlülüğünü etkilemede istatistiksel olarak anlamlı parametredir. Kesme hızı $0,712 > 0,05$ olduğu için yüzey pürüzlülüğü açısından istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Talaş derinliği de $0,326 > 0,05$ olduğu için R_a üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Elde edilen sonuç, yüzey pürüzlülüğü parametresinin ilerleme miktarına bağlı olarak incelenmesinin yeterli olacağını göstermektedir.



Şekil 5. 3. 9'lu deney grafikleri

Şekil 5.3'te ki sol üst köşede ki kalıntıların normal olasılığını gösteren grafikte kırmızı çizgi kalıntı değerlerini, üzerindeki noktalar ise deneyler sonucunda elde edilen gerçek değerleri ifade eder. Noktalar çizgiye ne kadar yakınsa deney o kadar doğrudur. Noktaların büyük bir kısmı şekilde de görüldüğü gibi doğrusal çizgi yakınında dağılmıştır. Bu durum deney sonuçlarının doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Sağ üst köşede ki artıklara karşı uygunluk grafiğinde noktalar rastgele dağılmıştır. Bu da modelin uygun olduğunu göstermektedir. Sol alt köşedeki grafik artıkların dağılımını göstermektedir. Veri sayısı az olduğu için histogram çok net değildir. Sağ alt köşede ki artıklara karşı sipariş grafiğinde şekil üzerindeki kalıntılar merkez çizgisi üzerinde rassal şekilde olmalıdır.

Taguchi analiziyle Çizelge 5.4'te ki optimum değerler ve rastgele değerlerle tahmini analizler yapılmıştır;

Çizelge 5. 4. Tahmini ve deneysel değerler

A	B	C	Deney Sonucu R _a	Taguchi Tahmini R _a	% Mutlak Hata
1	1	1	0,441	0,375	14,9
3	3	2	1,826	1,760	3,614

İlerleme miktarı 0,10 mm/dev, kesme hızı 90 m/dk, talaş derinliği 0,3 mm olarak programdan tahmini analiz yapılırsa R_a değeri 0,375 olarak bulunur. Bu değerlerle yaptığımız deneyde yüzey pürüzlülüğü 0,441 bulunmuştur. Buna göre;

$$\frac{\text{Hesaplanmış Değer} - \text{Tahmini Değer}}{\text{Hesaplanmış Değer}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\frac{0,441 - 0,375}{0,441} \times 100 = 14,9$$

bulunur. Yani %14'lük bir hata oranı bulunmuştur.

İlerleme miktarı 0,20 mm/dev, kesme hızı 150 m/dk, talaş derinliği 0,4 mm olarak programdan tahmini analiz yapılırsa R_a değeri 1,760 olarak bulunur. Bu değerlerle yaptığımız deneyde yüzey pürüzlülüğü 1,826 bulunmuştur. Buna göre;

$$\frac{\text{Hesaplanmış Değer} - \text{Tahmini Değer}}{\text{Hesaplanmış Değer}} \times 100$$

$$\frac{1,826 - 1,760}{1,826} \times 100 = 3,614$$

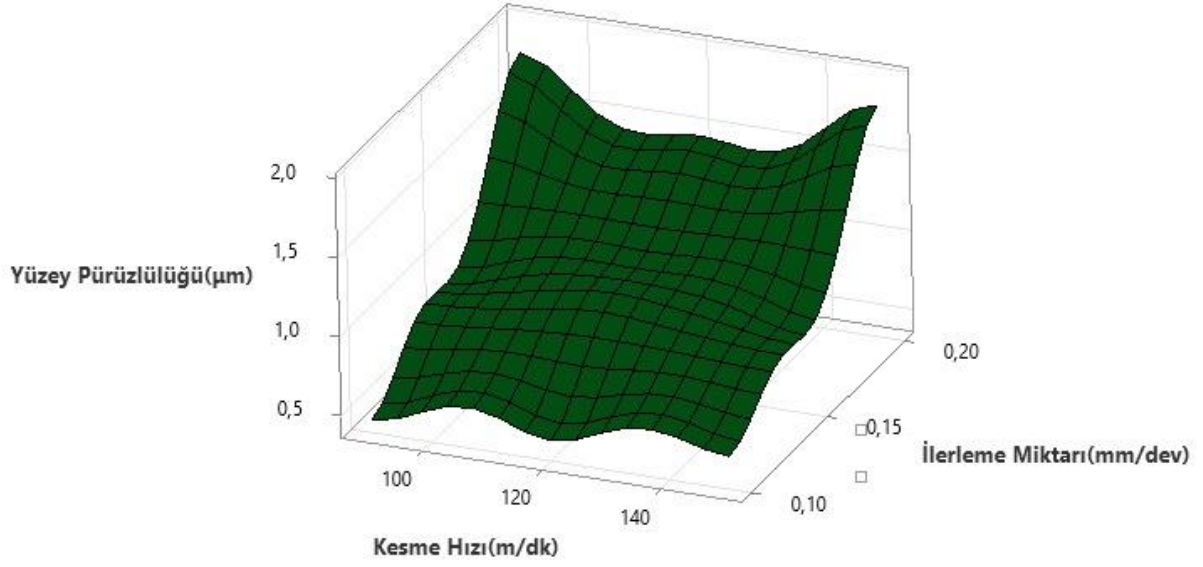
bulunur. Yani % 3'lük hata bulunmuştur.

Bu yapılan tahminleme deneylerinin ortalaması alınırsa yaklaşık % 9'luk hata bulunur. Sonuç olarak deneyin % 91'lik doğruluk oranı hesaplanmıştır. Çizelge 5.5'te güvenilirlik deneyleri sonuçları ve hata oranı yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 5. 5. Güvenilirlik deneyleri

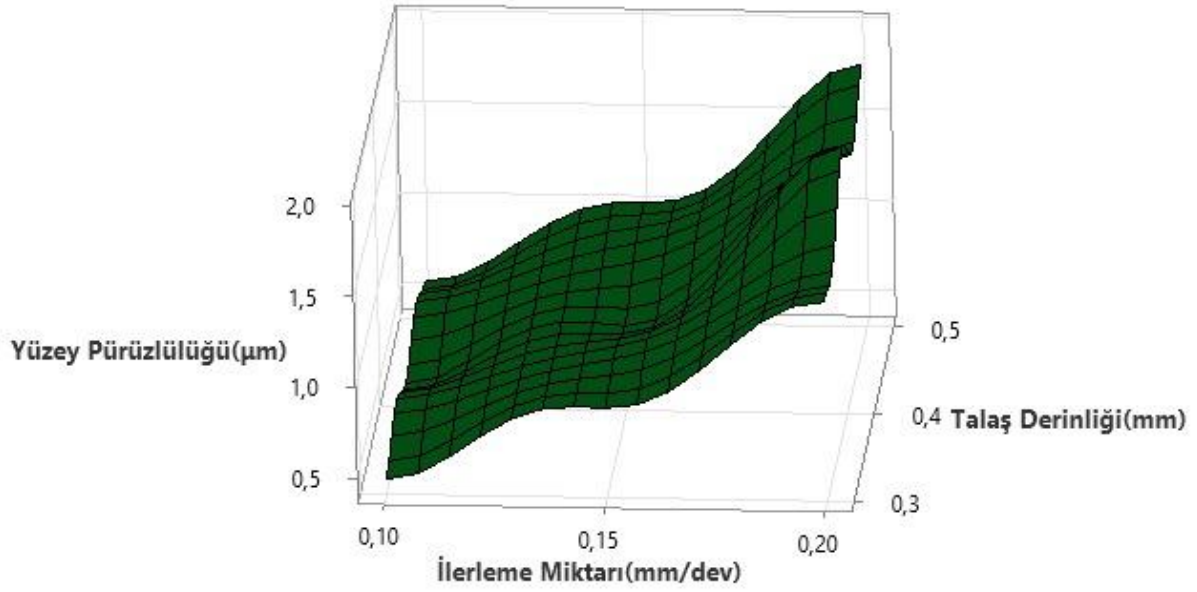
Nokta		Taguchi Metodu		
		Yüzey Pürüzlülüğü (μ_m)		
		DeneySEL	Hesaplanmış	Hata
Optimum	0,10 mm/dev 90 m/dk 0,3 mm	0,441	0,375	% 14,9
Rastgele	0,20 mm/dev 150 m/dk 0,4 mm	1,826	1,760	% 3,614
Ortalama	Hata oranı yaklaşık % 9			

5.3. İlerleme – kesme hızı ve ilerleme – talaş derinliği parametrelerinin etkileşimli olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisi



Şekil 5. 4. Ti6Al4V malzemesi için deneysel R_a değeri ile ilerleme miktarı ve kesme hızı ilişkisini gösteren yüzey grafiği

Deneysel R_a üzerinde ilerleme miktarı ve kesme hızı parametrelerinin etkisi Şekil 5.4'te görülmektedir. Grafiğe göre, ilerleme miktarı parametresinin, yüzey pürüzlülüğü değeri üzerinde kesme hızı parametresine göre daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle ilerleme miktarındaki artış, R_a değerinde hızlı ve istikrarlı bir yükselmeye neden olurken, kesme hızındaki değişimin etkisi daha sınırlı ve dalgalı bir seyir izlemektedir. Bu bağlamda, yüzey kalitesinin optimize edilmesi için düşük ilerleme miktarlarının tercih edilmesi gerektiği, kesme hızının ise belirli bir aralıkta yüzey kalitesini iyileştirme potansiyeli sunduğu görülmektedir.



Şekil 5. 5. Ti6Al4V malzemesi için deneysel R_a değeri ile ilerleme miktarı ve talaş derinliği ilişkisini gösteren yüzey grafiği

Deneysel R_a üzerinde ilerleme miktarı ve talaş derinliği parametrelerinin etkisi Şekil 5.5'te görülmektedir. Grafiğe göre ilerleme miktarı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum, ilerleme miktarının yüzey kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir işlem parametresi olduğunu ortaya koymaktadır. Talaş derinliği değişiminin ise R_a üzerindeki etkisi, ilerleme miktarına kıyasla daha sınırlı ve daha az belirgindir. Talaş derinliği arttığında yüzey pürüzlülüğünde hafif bir artış gözlenmekle birlikte, bu artışın istatistiksel ve pratik önemi ilerleme miktarının etkisi kadar güçlü değildir. Yüzey pürüzlülüğündeki değişimin, ilerleme miktarı ekseninde daha belirgin bir eğime sahip olması, bu parametrenin yüzey kalitesi üzerindeki baskın etkisini desteklemektedir.

5.4. Tartışma

Titanyum alaşımlarının yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık, biyomedikal ve savunma sanayinde kullanımı hızla artmaktadır. Literatürde Ti6Al4V'nin işlenebilirliği üzerine çalışmalar bulunsada, özellikle eklemeli imalatla üretilmiş numunelerin tornalanmasında ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisini sistematik olarak inceleyen çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle, söz konusu çalışmanın yapılması hem literatürdeki boşluğu dolduracak hem de endüstriyel uygulamalarda optimum ilerleme değerlerinin belirlenmesine katkı sağlayarak üretim verimliliğini artıracaktır.

Bu çalışmada deneysel tasarım yöntemi olarak Taguchi metodu tercih edilmiştir. Bunun temel nedeni, tornalama işlemlerinde kullanılan kesme parametrelerinin çok sayıda kombinasyona sahip olması ve tüm bu kombinasyonların ayrı ayrı incelenmesinin hem maliyet hem de zaman açısından uygulanabilir olmamasıdır. Taguchi metodu, ortogonal dizi yaklaşımı sayesinde çok daha az deney yapılarak parametrelerin etkilerinin güvenilir bir şekilde belirlenmesine imkân tanımaktadır. Bu yöntem, sadece optimum parametre kombinasyonunun tespit edilmesini sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda her bir kontrol faktörünün (örneğin ilerleme miktarı, kesme hızı, talaş derinliği gibi) işlenmiş yüzey pürüzlülüğü üzerindeki göreceli etkisini istatistiksel olarak ortaya koymaktadır.

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımları, düşük ısı iletkenlik ve yüksek kimyasal reaktivite gibi özelliklerinden dolayı talaşlı imalat sürecinde işlenmesi güç malzemeler arasında yer almaktadır. Bu durum, özellikle yüzey kalitesi ve takım ömrü açısından parametrelerin hassas şekilde seçilmesini gerekli kılmaktadır. Taguchi metodu, süreci yalnızca optimum değerlere ulaştırmayı değil, aynı zamanda kontrol edilemeyen gürültü faktörlerine karşı da daha kararlı bir yapı kazandırmayı amaçlamaktadır. Böylelikle, laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların endüstriyel üretim koşullarında da geçerli olabilmesi sağlanmaktadır.

Taguchi yönteminin kullanılması bu çalışmada deneysel tasarımın sistematik, ekonomik ve güvenilir şekilde yürütülmesi açısından önemli bir tercih olmuştur. Bu yöntem sayesinde, ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi daha az deney ile istatistiksel olarak anlamlı biçimde analiz edilmiş, literatürde sınırlı sayıda ele alınmış olan eklemeli imalat kökenli Ti6Al4V malzemeler için bulgular ortaya konulmuştur.

Yapılan literatür araştırmalarında çoğu çalışmayla yaptığım çalışmanın örtüştüğü ve bazı çalışmalarla koşulların farklılığından dolayı değişiklikler görülmüştür. Örneğin, Alzyod ve ark. (2025) tarafından malzeme Ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen parçaların tornalanmasında Box-Behnken tasarımı ve Anova analizi uygulanmıştır. Çalışma sonuçları, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en baskın parametrenin ilerleme miktarı olduğunu ve ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğünün belirgin biçimde arttığını göstermiştir. Benzer şekilde, Alzyod ve ark. (2025) tarafından gerçekleştirilen bir diğer araştırmada eklemeli imalat ile talaşlı imalatın entegrasyonu incelenmiş ve Taguchi ile Anova analizleri sonucunda da ilerlemenin yüzey pürüzlülüğünü belirleyen en etkili faktör olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmalar, eklemeli imalat ile parçaların tornalanmasında elde edilen bulgularla doğrudan paralellik göstermektedir. Kathavarayan ve ark. (2024) tarafından SLM yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 alaşımının tornalanmasında yapılan çalışmada, Anova analizine göre yüzey pürüzlülüğünün %77,38

oranında ilerlemeden etkilendiği saptanmıştır. Ayrıca, ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu bulgular yapılan çalışmamın sonuçlarını desteklemektedir. Eklemeli imalat ile üretim içermeyen fakat tornalama literatürü açısından da paralel sonuçlar veren çalışmalar mevcuttur. Saha ve ark. (2023) tarafından sert çeliklerin tornalanmasında yapılan Taguchi analizi, ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en baskın faktör olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde Güvercin (2018) ve Kavak ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmalarda da ilerlemenin yüzey pürüzlülüğünü artıran birincil parametre olduğu saptanmıştır. Akkuş (2010) ve Cagan ve Buldum (2018) tarafından yapılan çalışmalarda ise ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğünün yükseldiği ve düşük ilerleme değerlerinde optimum yüzey kalitesinin elde edildiği belirlenmiştir. Çalışmama zıt sonuçlar veren çalışmalar da incelenmiştir. Şan (2024) ve İnan (2024) tarafından gerçekleştirilen tornalama çalışmalarında, yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen parametrenin kesme hızı olduğu, ilerlemenin ikinci sırada geldiği rapor edilmiştir. Atılkan (2022) ve Aswal ve ark. (2019) çalışmalarında da yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızının baskın etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bu farklılıklar, malzeme türü, kesici takımlar ve proses koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Genel olarak literatür değerlendirildiğinde, ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğünü belirleyen ana parametre olduğu, ilerlemenin artmasıyla pürüzlülüğün yükseldiği ve Taguchi ile Anova analizlerinin bu etkileri anlamak için etkin bir yöntem olduğu görülmektedir (Alzyod ve ark., 2025; Kathavarayan ve ark., 2024; Saha ve ark., 2023; Güvercin, 2018; Akkuş, 2010). Genel olarak literatür araştırmalarının çalışmamla örtüştüğü gözlemlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalar değerlendirilerek optimal değere Taguchi yöntemi kullanılarak daha kısa zamanda ulaşip, zamandan ve malzeme maliyetlerinden tasarruf elde etmek amaçlanmıştır. Taguchi L_9 ortogonal deney tasarımı ile 27 deney yerine 9 deney yapılarak kısa sürede deney sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımından eklemeli imalat yöntemiyle elde edilen parçanın tornalama işleminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen verilere göre sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. İlerleme miktarı 0,10 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,20 mm/dev, kesme hızı 90 m/dk, 120 m/dk, 150 m/dk ve talaş derinliği 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerine bakılıp Taguchi analizi yapıldığında ilerleme miktarı 90 mm/dev olduğunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Sonuç olarak yüzey kalitesinin iyileştirilmesi açısından düşük ilerleme hızlarının tercih edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Talaş derinliği ve kesme hızı parametrelerinin etkisinin ilerleme miktarına göre daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir.

2. S/N grafiğine göre ilerleme miktarı 0,10 mm/dev, kesme hızı 90 m/dk, talaş derinliği 0,3 mm olduğunda minimum yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir.

3. Anova analizine göre ilerleme miktarının etki oranının % 94,949 olarak, kesme hızının etki oranının 0,589 ve talaş derinliğinin etki oranının 3,004 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre ilerleme miktarının yüzde etki oranının en etkili parametre olduğu görülmüştür.

4. Anova ile elde edilen % 94,18 oranındaki $R Sq(adj)$ değeri, giriş parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü açıklama yeteneğinin ($> \% 70$) güçlü olduğunu göstermektedir

5. İlerleme miktarının P değeri $0,015 < 0,05$ olduğu için yüzey pürüzlülüğünü etkilemede istatistiksel olarak anlamlı parametredir. Kesme hızı $0,712 > 0,05$ olduğu için yüzey pürüzlülüğü açısından istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Talaş derinliği de $0,326 > 0,05$ olduğu için R_a üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir.

6. Anova'ya göre yapılan bu model % 91 güven düzeyinde çıkmıştır.

6.2. Öneriler

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımından eklemeli imalat yöntemiyle elde edilen parçanın tornalama işleminde ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen verilere göre ileri çalışmalar için düşünülen öneriler aşağıda belirtilmiştir.

1. Gelecek çalışmalarda yüzey topografyalarına bakılması çalışmayı daha etkili hale getirebilir.
2. Farklı malzeme türleri (örneğin PLA, metal katkılı filamentler) kullanılarak yapılacak çalışmalarla malzeme özelliklerinin yüzey kalitesine etkisini daha kapsamlı ortaya konabilir.
3. İleri seviye yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda, düşük ilerleme hızlarının tercih edilmesi tavsiye edilir. Bu sayede, yüzeyde oluşabilecek katman hataları ve pürüzler minimize edilebilir.

7. KAYNAKLAR

- Akkuş, H., 2010, Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel ve Yapay Zekâ Yöntemleriyle Tahmin Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 28-30.
- Aktürk, M., Korkmaz, M, E., 2021, Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, Cilt: 2, No: 1.
- Altan, İ., 2024, Talaşlı İmalat Uygulamalarında İdeal İşleme Parametrelerinin Belirlenebilmesi İçin Özel Bir Ölçüm Düzeneginin Geliştirilmesi ve CuAl14Fe4Mn2, XCrNiMoTi17 ve AlZn5,5MgCu Malzemeleri Özelinde Taguchi Yöntemi ile Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ.
- Alzyod, H., Konya, G. and Ficzer, P., 2025, Maximizing material removal rate and surface smoothness in MEX parts through turning process optimization using BBD, *Progress in Additive Manufacturing* 10:10295–10309.
- Alzyod, H., Konya, G. and Ficzer, P., 2025, Integrating additive and subtractive manufacturing to optimize surface quality of MEX parts, *Results in Engineering*.
- Asiltürk, I., Akkuş, H., 2011, Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method, 44(9), 1697-1704.
- Aswal, A., Jha, A., Tiwari, A., Modi, Y, K., 2019, CNC Turning Parameter Optimization for Surface Roughness of Aluminium-2014 Alloy Using Taguchi Methodology, *Journal Européen des Systèmes Automatisés Vol. 52*, No. 4, 387-390.
- Ateş, G., 2018, Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İç Yapısı ve Yüzey Özellikleri Üzerine Termokimyasal İşlem Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Atılkan, R., 2022, INCONEL 718 Nikel Esaslı Süper Alaşımın Delik Delme İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Yöntemi ve Gri İlişkisel Analiz ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Amasya Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Amasya, 34-35.
- Aydın, D, S., 2022, Ti6Al4V Alaşımının Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Üretilmesinde Belirli Üretim Parametrelerinin Malzeme Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 7-9.
- Aydın, D, S., Özsoy, A.L., Yıldırım, Ç, V., 2022, Ti6Al4V Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Taguchi Metodu Kullanılarak Proses Parametrelerinin Optimizasyonu, Erciyes Üniversitesi, *Institute of Science and Technology*, Kayseri.
- Aydın, D. S., 2022, Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme, Erciyes Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 66-69.

- Aykut, S., 2022, Tornalama İşleminde Kesici Takım Tutucuları İçin Dinamik Titreşim Sönümleyici Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Bahçe, E., Erener, G., Gezer, İ., 2022, Eklemeli İmalat ve Geleneksel İmalat Yöntemi ile Üretilen CoCr Alaşımı Yüzeylerde Hidroksiapatit (HAp) Kaplamanın Karşılaştırılması, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 27, Sayı 1.
- Başcı, Ü. G., Yamanoğlu, R., 2021, Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: FDM ile Eklemeli İmalat, *Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi*, 5(2), 340-341.
- Bozkurt, S., 2019, AA7075 T651 Alüminyum Alaşımının Tornada İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Geometrik Toleranslara ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, *Fen Bilimleri*, Karabük, 39-40.
- C. W. Hull, 1986. Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography, U.S. Patent 4,575,330.
- Cagan, S. C., and Buldum, B. B., 2018, Investigation of the Effect of Different Working Mediums on Turning Al7075-T6 Alloy., *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, 1-7.
- Ceylan, Y. G., Gündüz, T., Ulusu, H. A., 2021, Taguchi Yöntemi ile Polimer Hammadde Karışım Optimizasyonu, Bursa Uludağ Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans Programı, Bursa, 166-167.
- Çandırılı, C., 2024, 9 Adımda Titanium Yüz İmplantlarının Avantajları, İstanbul, İnternet: <https://celalcandirli.com/titanyum-yuz-implantlarinin-avantajlari> [Ziyaret Tarihi: 2 Ekim 2024].
- Çelik, K., Özkan, A., 2017, Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*.
- Çevik, D., 2018, Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisinin Seri ve Kesikli Üretim Sistemleri Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, *İşletme Enstitüsü*, Sakarya, 60-69.
- Demirer, E., 2020, AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Tornalamasında Kesici Takım Yükseklik Ayarının Geometrik Toleranslara, Yüzey Pürüzlülüğüne ve Kesme Kuvvetlerine Etkisi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 29-30.
- Dursun, M. A., 2019, Değişken Gözenekli Hücresel Yapıların Metal Eklemeli İmalat İçin Tasarımı ve Üretilen Yapıların Tasarım ile Uyumluluğunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-16.
- Ensarioğlu, C., 2007, Talaşlı İmalat İşlemlerinde Kesme Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Bir Uzman Sistem Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 9-10.

- Felho, C., Namboodri, T., Sisodia, R, P, S., 2025, Taguchi's L18 Design of Experiments for Investigating the Effects of Cutting Parameters on Surface Integrity in X5CrNi18-10 Turning.
- Gibson, I., Rosen, D, W., and Stucker, B., 2015, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, New York, 5–280.
- Güldibi, A, S., 2020, Talaşlı İmalat İşlemlerinin Mekanistik Modellenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 20.
- Gündüz, A., 2006, Tornalama İşleminde Oluşan Kesme Kuvvetlerinin Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağlarıyla Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-4.
- Güngör, A., 2020, Türkiye’de Katmanlı İmalat ve Gemi İnşaatı Üzerine Etkileri, *GMO Journal of Ship and Marine Technology Journal* ,42-43.
- Güvercin, S., 2018, Optimum Yüzey İşleme Parametrelerinin ANP ve Taguchi Yöntemleri ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Amasya Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Amasya.
- He, Q., Kang, X. and Wu, X., 2024, Micro-Milling of Additively Manufactured Al-Si-Mg Aluminum Alloys, *Materials*.
- Işık, Ş., 2025, Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen AA6082 ve AA7075 Alüminyum Alaşımlarının Taguchi Yöntemiyle Modellenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya.
- İnan, C., Tornalama İşleminde Oluşan Sesin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- İncedal, İ., 2023, Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen Karbon Fiber Katkılı PLA Plakaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Taguchi Yöntemi Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 15-16.
- Jayant A., Kumar V., (2008), Prediction of Surface Roughness in CNC Turning Operation Using Taguchi Design of Experiments, *Journal of the Institution of Engineers, Production Engineering Division*.
- Karabuğa, Ü., 2022, Alüminyum 7075-T6 Malzemenin Isı Desteği ile İşlenmesi Ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 33-34.
- Kathavarayan, M., Kulandaivel, A. and Arjunan, V., 2024, Multi-objective optimization on turning of additively manufactured Inconel 625 alloy using grey relational analysis, *Revista Materia*.
- Kavak, N., Şeker, U, Altan, E., 2012, Tornalama İşleminde Kesici Uç Tutturma Yönteminin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara.

- Kaya, M, Ş., 2021, Helikopter İçin Eklemeli İmalat ile Ti6Al4V Dişli Üretimi ve Ardıl İşlemlerin Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-7.
- Küçük, Ö., Uran, Y., 2022, Taguchi Yöntemi Kullanılarak Hafif Genleşmiş Kil Üretiminin Optimizasyonu, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı 33, 1-9.
- Meral, T., 2024, Titanyum Alaşımı Gözenekli Biyomedikal Parçanın Eklemeli İmalat için Tasarımı ve Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 26-28.
- Muzamil, M., Siddiqui, N, A., Kumar,K., Hussain, G., Alkahtani, M. and Sattar, M., 2025, Impact of Machining Parameters on Wire Arc Additively Manufactured Mild Steel Specimens of E6013 and E7018 Using an Electric Arc Heat Source, *Crystals*.
- Oyar, P., 205, Titanyum ve Özellikleri, Atatürk Üniversitesi, *Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 151-154.
- Özdemir, H., 2006, Tornalama İşleminde Kesme Kuvveti Ölçümünde Kullanılacak Dinamometre Tasarımı ve Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 11-13.
- Özer, G., 2020, Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 606-614.
- Özsolak, O., 2019, Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler, *International Journal of Innovative Engineering Applications*.
- Rıdvanoğulları, A., 2018, Tren Tekerleğinin İşlenebilirlik Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- Saha, R, K., Ray, N, C., Hossain, G., 2023, Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Dry Turning of Hardened Steel Using the Taguchi Method, *Proceedings of the 6th Industrial Engineering and Operations Management Bangladesh Conference*.
- Saraçyakupoğlu, T., 2020, Havacılık Endüstrisinde 3 Boyutlu Üretim Uygulamalarının Uçuşa Elverişlilik Kural ve Düzenlemelerine Göre Değerlendirilmesi, 4(1), 62-63.
- Sürmen, H, K., 2019, eklemeli imalat (3b baskı): teknolojiler ve uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 2,381-382.
- Şan, H, D., 2024, 210cr13ni7mo Çeliği İçin Taguchi Yöntemine Dayalı Tornalama İşlemleri İçin Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ.
- Toan, N, V., Van, N, T, H., Hung, N, K., Khoa, D, T., 2023, Prediction of surface roughness of Ti6Al4V and optimization of cutting parameters based on experimental design, *Journal of Military Science and Technology*.

- URL-1: <https://kdmfab.com/tr/titanyum-alasimi-nedir/> [Ziyaret Tarihi: 13 Ekim 2024].
- URL-2: <tr.metal-ti.org/news/application-of-titanium-in-the-naval-field-61667116.html> [Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2024].
- URL-3: <https://www.istanbulmakina.com.tr/cnc-torna-tezgahi-nedir/> [Ziyaret Tarihi: 4 Kasım 2024].
- URL-4: <https://etim.org.tr/gelecegin-teknolojisi-eklemeli-imalat/> [Ziyaret Tarihi: 10 Eylül 2024].
- URL-5: https://www.stm.com.tr/uploads/docs/Raporlar/1599579912_1.katmanliimalatteknolojileriraporu2016-08-03-14-11-28.pdf [Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2024].
- URL-6: <https://www.nbcnews.com/science/science-news/medical-first-3-d-printed-skull-successfully-implanted-woman-n65576> [Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2024].
- Vipul, H and Thakkar, A, S., 2023, Experimental and Optimization of CNC Lathe Machine by Using Taguchi Method, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- Yaşar, S., 2023, Ti6Al4V Alaşımının Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretiminde İşlem Parametreler Değişiminin Tribolojik Özelliklere Etkisi, Uludağ Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 5-7.
- Yermurat, B., 2024, Karbon Elyaf Takviyeli Poliamid 66 Filament Kullanılarak FDM Tipi %Yazıcılarda Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, 10.
- Yıldız, T., 2015, Ti6Al4V Alaşımının Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 20-22.
- Yiğit, A., 2025, SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) Çeliklerinde Karbon İçeriğinin Aşınma ve Korozyon Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Taguchi ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak.