SLM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN INCONEL 718 NUMUNELERİNİN TALAŞLI İMALAT VE ISIL İŞLEM SONRASI YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ

Can YÜCETEPE

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SLM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN INCONEL 718 NUMUNELERİNİN TALAŞLI İMALAT VE ISIL İŞLEM SONRASI YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ

Can YÜCETEPE
0009-0006-7441-5083

Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
EKLEMELİ İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans

SLM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN INCONEL 718 NUMUNELERİNİN TALAŞLI İMALAT VE ISIL İŞLEM SONRASI YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE MİKROYAPISININ İNCELENMESİ

Can YÜCETEPE

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Eklemeli İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Bu tez çalışmasında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen Inconel 718 Nikel süper alaşımının, farklı talaşlı imalat parametreleri ve ısıl işlem uygulamaları sonrasında yüzey özellikleri ve mikroyapısal davranışları detaylı olarak incelenmiştir. Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen metal malzemeler arasında yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve mekanik özellikleriyle dikkat çeken Inconel 718 alaşımı bu çalışma için numune malzemesi olarak seçilmiştir. Bu bağlamda, SLM yöntemi ile üretilmiş üç adet Inconel 718 numune hazırlanmıştır. Bu numunelerden biri, üretim sonrası homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Diğer iki numune ise işlem görmemiş, bu sayede ısıl işlemin etkileri doğrudan karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Tüm numunelere, farklı kesme hızları ve kesme derinlikleri içeren talaşlı imalat işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan bu işlemler sonucunda yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüş ve işlenmiş yüzeylerin mikroyapıları, optik mikroskop ile detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, sertlik testleri gerçekleştirilerek hem ısıl işlemin hem de talaşlı imalat parametrelerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, SLM yöntemiyle üretilen Inconel 718 parçaların son işlem süreçlerinin optimize edilmesinde dikkate alınması gereken kritik faktörleri ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Inconel 718, Isıl İşlem, CNC Tornalama, homojenizasyon
2025, xv + 64 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INSPECTION OF SURFACE PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF INCONEL 718 SAMPLES PRODUCED BY SLM METHOD AFTER MACHINING AND HEAT TREATMENT

Can YÜCETEPE

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Additive Manufacturing

Supervisor: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

In this thesis study, the surface properties and microstructural behavior of Inconel 718 nickel superalloy produced by Selective Laser Melting (SLM) were examined in detail after different machining parameters and heat treatment applications. The Inconel 718 alloy, which stands out among metal materials produced using additive manufacturing technologies for its high-temperature resistance, corrosion resistance, and mechanical properties, was selected as the sample material for this study. In this context, three Inconel 718 samples were prepared using the SLM method. One of these samples was subjected to homogenization heat treatment after production. The other two samples were untreated, enabling a direct comparison of the effects of heat treatment. All samples were subjected to machining processes involving different cutting speeds and depths. As a result of these processes, surface roughness values were measured and the microstructures of the processed surfaces were analyzed in detail using an optical microscope. In addition, hardness tests were performed to evaluate the effects of both heat treatment and machining parameters on the mechanical properties of the material. The data obtained highlights the critical factors that must be considered when optimizing the post-processing steps for Inconel 718 parts produced using the SLM method.

Key words: Additive Manufacturing, Inconel 718, Heat Treatment, CNC Turning, homogenization
2025, xv + 64 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve yüksek lisans eğitimim süresince, fikirlerime ve gerçekleştirmeye çalıştığım çalışmalara eşlik edip destek olan, süreç boyunca desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. M. Cemal Çakır'a,

Tez çalışmam sırasında ihtiyaç duyduğum numunelerin temini için yardımcı olan Sentes-BİR firmasına Cem Ateş Bey ve Çağrı Gürbüz Bey başta olmak üzere tüm Sentes-BİR ailesine,

Numunelerin en iyi şekilde işlenmesi için bana kesici uç ve kater sağlayan OTECHTOOLS firmasından Onur Emre Arpacı Bey'e,

Parçalarımı işleyebilmem için bana firmasının kapılarını açan Can Kalibro firmasına ve Başak Gurbetçi Hanım'a,

Parçalarımın ölçümü için laboratuvarlarının kapılarını açan Martur Fompak firmasına, ayrıca çalışmama sağladıkları destek için başta Sn. Elif Haraççıoğlu olmak üzere, Engin Aydın, Onur Girgin, Hamdi Yıldızbakan, Osman Karadere ve yardımlarını esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma,

Numunelerin yüzey pürüzlülük testlerinin ölçümün de yardımcı olan Bursa Uludağ Üniversitesi araştırma görevlisi Dr Cihat Ensarioğlu'na ve çalışmalarımda bana desteğini esirgemeyen Bursa Uludağ Üniversitesi doktora öğrencisi Burak Kişin'e,

Son olarak bugünlere gelmemde bana maddi ve manevi büyük destekleri olan, benim için fedakarlıklar yapan ve her zaman en büyük destekçim olmuş olan sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Can YÜCETEPE
12/06/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xii
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....3
3. GENEL BİLGİLER....6
3.1 Eklemeli İmalat Hakkında....6
3.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri....7
3.2.1 Fotopolimerizasyon (Photopolymerization)....8
3.2.2 Malzeme ekstrüzyonu (Material extrusion)....9
3.2.3 Bağlayıcı püskürtme (Binder jetting)....11
3.2.4 Malzeme püskürtme (Material jetting)....12
3.2.5 Toz yatağı füzyonu (Powder bed fusion)....13
3.2.6 Yönlendirilmiş enerji birikimi (Directed energy deposition)....18
3.2.7 Sac laminasyonu (Laminated object manufacturing)....19
3.3 Talaşlı İmalat....20
3.3.1 Talaşlı imalatın eklemeli imalattan farkı....21
3.4 Eklemeli İmalatta Metal Tozları....22
3.4.1 Nikel bazlı süper alaşımlar....25
3.5 Inconel 718....25
4. MATERYAL ve YÖNTEM....28
4.1 Yapılacak Deneysel Çalışmanın Tanımlanması....28
4.2 Inconel 718 Deney Numunelerinin Üretimi....30
4.3 Kesici Takımım Belirlenmesi....31
4.4 Isıl İşlem Süreci....33
4.5 Talaşlı İmalat Süreci....34
4.6 Yüzey Pürüzlülüğü Testi....40
4.7 Mikroyapı Testi....42
4.8 Sertlik Testi....44
5. BULGULAR....47
5.1 Yüzey Pürüzlülüğü Testi Verileri....47
5.2 Mikroyapı Testi Verileri....48
5.3 Sertlik Testi Verileri....55
6. SONUÇ ve TARTIŞMA....57
KAYNAKLAR....61
INTERNET KAYNAKLARI....63
ÖZGEÇMİŞ....64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
Ar	Argon
N	Azot
CO_2	Karbondioksit
FCC	Yüzey Merkezli Kübik
γ'	Gamma Prime
γ''	Gamma Double Prime
δ	Laves

Kısaltmalar	**Açıklama**
3D	3 Boyut
mm	Milimetre
F	Kuvvet
HV	Vickers Sertlik Birimi
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
Eİ	Eklemeli İmalat
RP	Hızlı Prototipleme
VP	Vat Fotopolimerizasyonu
MJ	Malzeme Püskürtme
BJ	Bağlayıcı Püskürtme
DLP	Dijital Işık İşleme
ME	Malzeme Ekstrüzyonu
PBF	Toz Yatağı Füzyonu
DED	Depolanmış Enerji Birikimi
SL	Sac Laminasyonu
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SLM	Seçici Lazer Ergitme
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
STL	Standart Üçgenleme Formatı
AMF	Eklemeli İmalat Dosyası
3MF	3B Üretim Formatı
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 3.1.	ASTM F42'ye göre eklemeli imalat yöntemleri (URL 1)……	7
Şekil 3.2.	Vat Fotopolimerizasyonu çeşitleri (URL 2)……	9
Şekil 3.3.	FDM metodu çalışma prensibi (URL 3)…….	10
Şekil 3.4.	Bağlayıcı püskürtme yöntemi çalışma prensibi (URL 4)…..	11
Şekil 3.5.	Polyjet yöntemi şematik gösterimi (Özer, 2020)……	12
Şekil 3.6.	SLS ve SLM yöntemi proses akışı (URL 5)……..	16
Şekil 3.7.	MJF yöntemi (Cader & Kinski, 2020'den değiştirilerek alınmıştır.)……..	17
Şekil 3.8.	DED yöntemlerinin çalışma prensip şablonu (Sing et al., 2019'dan değiştirilerek alınmıştır.)……	18
Şekil 3.9.	Sac laminasyonu yöntemi (URL 6)……	19
Şekil 3.10.	Gaz Atomizasyonu yöntemi (URL 7)……	23
Şekil 3.11.	Su Atomizasyonu yöntemi (URL 7)……..	24
Şekil 3.12.	a) Döküm yöntemiyle elde edilmiş IN718 mikroyapı görüntüsü b) DLMS - 3D yöntemiyle elde edilmiş IN718 mikroyapı görüntüsü (Dharmalingam et al., 2022)…….	26
Şekil 3.13.	IN718 metal tozunun SEM morfolojisi (Dharmalingam et al., 2022)……..	27
Şekil 4.1.	Numune Planlaması (ölçüler mm cinsinden verilmiştir.)……	28
Şekil 4.2.	a) İlk numunenin çap değeri b) İlk numunenin uzunluk değeri……	30
Şekil 4.3.	a) İkinci numunenin çap değeri b) İkinci numunenin uzunluk değeri……	30
Şekil 4.4.	a) Üçüncü numunenin çap değeri b) üçüncü numunenin uzunluk değeri……..	31
Şekil 4.5.	25 x 25 Dış Çap Tornalama Kateri (URL 8)……	32
Şekil 4.6.	CNMG 120408 Elmas Uç (URL 9)…….	32
Şekil 4.7.	Homojenizasyon işlemi sıcaklık-zaman grafiği……...	34
Şekil 4.8.	Vturn CNC Torna Makinesi (URL 10)……	35
Şekil 4.9.	Kesici ucun taretteki yeri…….	35
Şekil 4.10.	CNC kontrolcüsünün arayüz görünümü……..	36
Şekil 4.11.	a) Isıl işlemsiz numune işleme esnasında b) Isıl işlemli numune işleme esnasında…….……	37
Şekil 4.12.	Proses içi çap uzunluğu kontrolü…….……	37
Şekil 4.13.	Talaşlı imalat sonrası numuneler…….	39
Şekil 4.14.	Proses sonrası kater ve ucun görüntüsü……	39
Şekil 4.15.	Ra değerinin gösterimi (URL 11)…….	40
Şekil 4.16.	TIME TR200 Profilometre cihazı (URL 12)……	41
Şekil 4.17.	Cihaz ölçüm yüksekliği ayarı……...	41
Şekil 4.18.	Nikon Eclipse MA100……..	43
Şekil 4.19.	Mikroyapı testinden örnek görüntü……..	44
Şekil 4.20.	Vickers sertlik testi ölçüm metodu (URL 13)……..	45
Şekil 4.21.	Emco-Test DuraScan sertlik ölçüm cihazı……..……	46
Şekil 4.22.	a) Isıl işlemsiz numunenin sertlik ölçümü b) Homojenizasyon tavlaması uygulanan ısıl işlemli numunenin	46

	sertlik ölçümü…….…….....	
Şekil 5.1.	Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm grafiği……	48
Şekil 5.2.	A1 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü……	49
Şekil 5.3.	A2 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü……...	50
Şekil 5.4.	B1 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü……...	51
Şekil 5.5.	B2 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü……...	52
Şekil 5.6.	C1 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü……...	53
Şekil 5.7.	C2 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü……...	54
Şekil 5.8.	Isıl işlemli C numunesinin sertlik ölçümünde cihaz görünümü…….	55
Şekil 5.9.	Isıl işlemsiz sertlik ölçümünde cihaz görünümü……..	56
Şekil 5.10.	Isıl işlemli ve ısıl işlemsiz numunelerin karşılaştırma grafiği..	56
Şekil 6.1.	A1, A2 ve B1 numunelerinin karşılaştırmalı yüzey pürüzlülük ölçümleri..……..	57
Şekil 6.2.	A2-B1 ve C1-C2 numune çiftlerinin karşılaştırmalı yüzey pürüzlülük ölçümleri…..…….....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	Metal toz yataklı füzyon yöntemleri karşılaştırma …….……...	15
Çizelge 3.2.	Talaşlı imalat ve eklemeli imalat yöntemleri fark tablosu…….... ..……....	21
Çizelge 4.1.	Deney numunelerinin talaşlı imalat parametreleri……...	29
Çizelge 4.2.	Inconel718 alaşımının baskı parametreleri (Hu et al., 2025b)……...…….….	31
Çizelge 4.3.	Inconel718 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Hu et al., 2025b)……..	31
Çizelge 5.1.	Yüzey pürüzlülük testi ölçüm verileri ……..…….….	47

1. GİRİŞ

İmalat sanayisinde yüksek sıcaklık, korozyon direnci ve mekanik mukavemet gerektiren uygulamalar için kullanılan süper alaşımlar, modern mühendislik uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır. Bu süper alaşımlar arasında yer alan Inconel 718, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon ve korozyon direnci ile dikkat çeken nikel esaslı bir süper alaşımdır. Inconel 718, %50'den fazla nikel içeriği ile yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özellikler sergileyen bir süper alaşımdır. İçeriğinde ayrıca krom, molibden, niyobyum, demir ve az miktarda titanyum gibi elementler bulunmaktadır. Bu elementlerin dengeli bileşimi sayesinde, malzeme yüksek mukavemet ve aşınma direnci gösterirken, aynı zamanda mükemmel termal stabiliteye sahiptir.

Inconel 718'in yüksek sıcaklık dayanımı ve mekanik özellikleri, iç yapısında bulunan γ' (gamma prime) ve γ'' (gamma double prime) fazları tarafından sağlanmaktadır. Gamma prime fazı ($Ni_3(Al,Ti)$) malzemenin yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanımını artırırken, gamma double prime fazı (Ni_3Nb) malzemenin sünekliğini artırarak çatlamaya karşı direncini yükseltmektedir. Bunun yanı sıra, Laves fazı (Fe_2Nb, $(Ni,Cr)_2$, (Nb,Mo,Ti)) malzemenin içerisinde bulunabilen istenmeyen bir faz olup, mukavemetin düşmesine ve işlenebilirliğin zorlaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, gerilme giderme tavlaması gibi ısıl işlemler, Laves fazını çözerek veya dağıtarak malzemenin homojenliğini artırabilir ve böylece işlenebilirliği iyileştirebilir.

IN718 özellikle havacılık ve uzay sanayisinde, motor bileşenleri, türbin kanatları, egzoz sistemleri ve iniş takımları gibi kritik parçalarda kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, enerji üretimi sektöründe gaz türbinleri ve nükleer reaktör bileşenleri gibi aşırı sıcaklık ve basınca maruz kalan parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Otomotiv sektöründe ise yüksek performanslı motor bileşenleri ve egzoz sistemlerinde, savunma sanayiinde ise zırh sistemleri, roket motorları ve denizaltı bileşenleri gibi yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu geniş kullanım alanı, Inconel 718'in üstün özellikleri sayesinde sağlanmaktadır. Ancak, yüksek sertliği ve işlenebilirliğinin zorlu olması nedeniyle, talaşlı imalat işlemleri sırasında özel kesme parametreleri ve uygun ön işlemler gerektirmektedir. Standart kesici takımlarla işlenmesi güç olan bu malzeme, takım

aşınmasını hızlandırarak üretim maliyetlerini artırabilir. Bu nedenle, Inconel 718'in işlenebilirliğini artırmaya yönelik ısıl işlemler ve kesme parametrelerinin belirlenmesi başlı başına bir araştırma konusudur.

Torna işlemleri sırasında malzemenin mekanik özellikleri, mikroyapısı ve işlenebilirliği, uygulanan ön işlemlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, homojenizasyon tavlaması gibi ısıl işlemler, malzemenin iç yapısını değiştirerek işlenebilirliğini artırabilir veya istenen mekanik özellikleri optimize edebilir. Homojenizasyon tavlaması, malzemedeki bileşenlerin daha eşit dağılmasını sağlayarak süneklik ve tokluğu artırırken, işlenebilirliği de belirli oranlarda iyileştirebilir. Bunun yanı sıra, homojenizasyon tavlaması sürecinde Laves fazı çözünerek malzemenin daha homojen bir mikroyapıya kavuşmasını sağlarken, gamma prime ve gamma double prime fazlarının miktarı ve dağılımı değişebilir. Bu değişimler, malzemenin talaşlı imalat sırasındaki kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey kalitesi gibi önemli parametreler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Homojenizasyon tavlaması uygulanmış ve uygulanmamış Inconel 718'in torna işlemlerinde gösterdiği farklılıklar, üretim verimliliği ve takım ömrü açısından da büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, Inconel 718 alaşımına uygulanan homojenizasyon tavlamasının mikroyapı ve yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenecektir. Farklı kesme hızları, ilerleme hızı ve paso derinlikleri gibi torna parametreleri altında yapılan deneyler sonucunda, malzemenin iç yapısındaki değişimler ve yüzey kalitesi üzerindeki etkiler değerlendirilecektir. Böylece, Inconel 718'in işlenebilirliğini artırmaya yönelik optimizasyon çalışmaları için önemli veriler sağlanacaktır. Bu analizler sonucunda, endüstriyel uygulamalar için en uygun işleme stratejileri ortaya konulacaktır. Aynı zamanda, talaş oluşum mekanizmalarının anlaşılması, takım ömrünün uzatılması ve işleme süreçlerinde enerji verimliliğinin artırılması gibi önemli mühendislik sorunlarına da katkı sağlanması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, yapılan çalışma hem akademik hem de endüstriyel açıdan değerli bilgiler sunarak, Inconel 718'in imalat süreçlerinde ekipmanın daha verimli şekilde kullanılması ve elde edilen son ürünün yapısına yönelik önemli bulgular elde edilmesini sağlayacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bangguo Hu ve ekibi bu bilimsel çalışmada, *(Hu et al., 2025)* farklı ısıl işlem protokollerinin, seçici lazer eritme (SLM) yoluyla üretilen Inconel 718 alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelenmektedir. Araştırmada, Isıl işlem sırasında uzun zincir benzeri Laves fazının ve bal peteği benzeri ağ yapısının çözünme dönüşüm dinamikleri açıklanarak, öncelikle çökelme boyutunu ve çözelti tavlaması (SAT) + Homojenizasyon tavlaması işlemini (HAT) uygulanan numunelerdeki δ, γ′ ve γ″ fazlarının artışının mikroskobik oluşum mekanizmasını netleştirmeyi amaçlamaktadır.

Jian-Yuan Lee, Jia An ve Chee Kai Chua bu yayınlarında *(Lee et al., 2017)* 3D baskı, çok çeşitli yeni uygulamalar için olanak sağlayan bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Temel bir bakış açısından, mevcut malzemeler, üretim hızı ve 3D baskı işlemlerinin çözünürlüğü her bir özel uygulama için dikkate alınmalıdır. Bu derleme, 3D baskı süreçlerinin temelleri ve akıllı malzemeler, seramik malzemeler, elektronik malzemeler, biyomalzemeler ve kompozitler gibi yeni 3D baskı malzemelerinin son zamanlardaki gelişimi hakkında temel bir anlayış sağlar.

Gökhan Özer Bu derleme çalışmasında *(Özer, 2020)*, eklemeli üretime ait genel bilgi verilip ve günümüzde en fazla ticari olarak kullanılan eklemeli üretim yöntemleri anlatmıştır. Çalışmada ayrıca, eklemeli üretimin kullanım alanlarından bahsedilerek, gelecekteki potansiyeli değerlendirmiştir.

Zongxian Song ve ekibi bu çalışmada *(Song et al., 2021)*, 650°C'lik yüksek sıcaklıkta seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle üretilen Inconel 718 alaşımının çok yüksek çevrimli yorulma (VHCF) davranışı incelenmiş ve sonuçlar dövme alaşımınkilerle karşılaştırılmıştır. SLM alaşımı, tane iç kısmında hücresel bir yapıya sahip büyük sütunlu taneler ve tane sınırları boyunca Laves(δ) fazı çökeltileri sergilerken, işlenmiş alaşım ince eş eksenli taneler sergilemiştir.

Ahmad Mostafa ve ekibi yaptıkları çalışmada *(Mostafa et al., 2017)*, basılmış ve ısıl işlem görmüş IN718 süper alaşımının yapısını, dokusunu ve faz evrimini araştırmaya odaklanmaktadır. Toz yatağı katkılı üretim tekniği kullanılarak üretilen silindirik numunelere iki son işlem uygulanmıştır: 1100°C'de 1 saat homojenizasyon ve ardından fırın soğutması ve 1160°C'de 100 MPa 'da 4 saat sıcak izostatik presleme (HIP) ve ardından fırın soğutması. Seçici lazer eritme (SLM) baskılı mikroyapı, negatif z yönüne doğru ısı akışı nedeniyle yapı yönü ile hizalanmış sütunlu bir mimari sergilerken, lazer ışını çakışmasının neden olduğu değişen soğutma hızları nedeniyle x-y düzleminde farklı bir yapısal morfoloji gözlenmiştir.

Amaia Calleja ve araştırmacı ekibi yayınladıkları makalede *(Calleja et al., 2018)* eklemeli imalatın son yıllarda giderek artan bir şekilde sektöre yerleşmesine ve lazer kaplama teknolojisinin, gerekli toleransları ve yüzey kalitesini elde etmek için en önde gelen teknolojilerden biri olduğuna değinip, teknolojinin genellikle hibrit süreçlerde işleme ile birleştirilmesine değinmiştir. Sonuç olarak, eklenen malzemenin işleme tabi tutulması ve yüksek kaliteli işleme operasyonları sağlamak için özelliklerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, tornalama ve frezeleme gibi nihai işleme operasyonları gerektiren parçaları oluşturmak için lazer kaplamayı içeren hibrit süreçlere odaklanarak lazerle biriktirilen Inconel718 süper alaşımının işlenebilirlik özelliklerini değerlendirmektedir.

Tom Sanviemvongsak ve ekibi bu çalışmada *(Sanviemvongsak et al., 2018)*, Lazer ışını ergitme ve elektron ışını ile ergitme (EBM) ile üretilen IN 718 alaşımlarının oksidasyon davranışı, laboratuvar havasında 850°C'de dövülmüş alaşımınki ile karşılaştırılmışlardır. Tüm alaşımların oksit ölçekleri, eklemeli üretim parçalarının yüzeyinde sinterlenen toz partiküllerinden kaynaklanan küçük farklılıklarla birlikte, doğal ve morfolojik olarak benzerdi. Bununla birlikte, yüzey topografisinde yüzey alanı tahminlerini ve dolayısıyla kütle kazancı tahminlerini etkileyebilecek büyük farklılıklar fark edilmiştir.

Thomas G. Gallmeyer ve ekibi, bu bilimsel çalışmasında *(Gallmeyer et al., 2020)* lazer toz yatağı füzyonu (LPBF) ile üretilen, standart ve doğrudan yaşlandırma uygulanan ve modifiye edilmiş çok adımlı ısıl işlemlere tabi tutulan Inconel 718'in (IN718) mikro

yapılarında dislokasyon yapıları, kimyasal ayrışma, γ′, γ″, δ çökeltileri ve Laves fazı ölçülmüştür. Ek olarak, standart bir ısıl işlem için yapı plakalarına hala bağlı olan ve çıkarılan ısıl işlem görmüş numuneler de belgelenmiştir.

Runbo Jianga ve araştırmacılar, bu araştırmada *(Jiang et al., 2019)* Lazer toz yatağında katkılı olarak üretilen Inconel 718 süper alaşımının mikroyapısı, faz oluşumu, yeniden kristalleşme davranışı ve mekanik özellikleri üzerinde üretimi sonrası ısıl işlemlerin etkileri araştırılmıştır. Simüle edilmiş sıcak izostatik presleme (HIP) ve standart çift yaşlandırma işleminin çeşitli ıslatma süreleri ve su verme prosedürleri ile varyasyonları dahil olmak üzere çeşitli ısıl işlem programları kullanılmıştır. Bunların çökelme, tane morfolojisi, tane boyutu, doku keskinliği ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Kore Mahesh ve araştırmacılar, bu bilimsel yayında *(Mahesh et al., 2021)* Inconel 718'in (kuru koşullarda) yüksek hızda işlenmesi, yüksek kesme sıcaklıklarına ulaşılmasına yol açabilir, böylece yerleşik kenar (BUE) gelişimi ve difüzyon mekanizmalarını etkinleştirerek takımın aşınma oranının artmasına neden olabilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar bütünlüğü değiştirebilir, artık gerilmeleri aşılayabilir ve işlenen yüzeyde çatlak oluşumunu/yayılmasını teşvik edebilir. Bu nedenle, bu makale Inconel 718'in işlenmesi sırasında ısı üretimi ve bunun çeşitli işleme tepkileri üzerindeki etkisi hakkında ayrıntılı bir anlayışa katkıda bulunmaktadır.

3. GENEL BİLGİLER

3.1 Eklemeli İmalat Hakkında

Eklemeli imalat, 3 boyutlu (3D) model verilerini kullanarak katman katman malzeme ekleme yoluyla nesneler üretme işlemidir. Bu yöntem, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak, hammaddeden atık çıkarmak yerine, nesneyi oluşturmak için gereken malzemeyi hassasiyetle ekler. Eklemeli üretimde, 3 boyutlu olan CAD modelleri, başka tür bir model olan üçgensel kafesli bir modele (STL) (STL günümüzde 3B baskı uygulamaları için en yaygın format olmasına rağmen AMF veya 3MF gibi formatlar da kullanılmaktadır) dönüştürülür. Model, özel yazılımlarla katmanlara ayrıştırıldıktan sonra üç boyutlu yazıcıya aktarılarak katmanların birikmesiyle bir parçaya dönüştürülmektedir.

Modern eklemeli imalat teknolojisi 20 yüzyılın ortalarında modern stereolithography tekniğinin babası sayılan Otto John Munz'un 1951 yılında aldığı patent ile başlar; bu teknikte havuzda bulunan reçine, lazer ile katman katman katılaştırılarak ürün haline dönüştürülür. 1986 yılına kadar ticarileşen eklemeli imalat yöntemi olmadı. 1990'lı yıllarda prototipleme amaçlı üretim yapan tezgahlar üretilmeye başlandı ve kalıplamaya ihtiyaç yoktu. Bu yıllarda yapılan üretimlerin adı Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping, RP) olarak isimlendiriliyordu. Günümüzde Eklemeli İmalat ismi ASTM standardı (F2792) olarak tanımlanmış ve "Additive Manufacturing" olarak isimlendirilmiştir. Genel olarak süreçler şu şekilde ilerler;

- Bir CAD data elde edilir, bu tasarlanarak da olabilir veya olan bir nesnenin tarama vb. yöntemlerle elde edilmesi ile de olabilir.
- Bu elde edilen CAD data istenen yönteme uygun yazılımla G-code denen eklemeli imalat cihazının üretim emirlerine dönüştürülür.
- Bu G-Code cihaza aktarılır ve üretim başlar.
- Model elde edildikten sonra gerekiyorsa ardıl işleme tabi tutulur. Gerekmiyorsa kullanıma hazırdır.

Eklemeli imalatın başlıca kullanıldığı sektörler şunlardır;

- Havacılık ve Uzay
- Otomotiv
- İnşaat ve Mimari
- Tıp
- Diş
- Mücevherat
- Biyomedikal

3.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Alternatif olarak 3D Print (üç boyutlu baskı) ismi de kullanılmaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerinde birçok imalat tekniği olduğu için tek bir ana grup altında toplanması mümkün değildir. Standart eklemeli imalat teknolojileri (ASTM F42) genel olarak 7 alt gruba ayrılmaktadır. (Şekil 3.1)



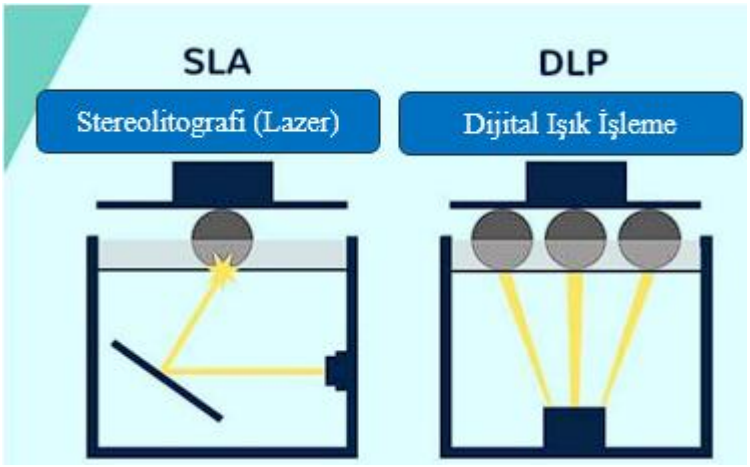
Şekil 3.1. ASTM F42'ye göre eklemeli imalat yöntemleri (URL 1)

3.2.1 Fotopolimerizasyon (Photopolymerization)

Fotopolimerizasyon işlemlerinde birincil malzeme olarak sıvı, radyasyonla iyileştirilebilir reçineler veya Fotopolimerler kullanır. Çoğu fotopolimer, ultraviyole (UV) dalga boyu aralığında radyasyona tepki verir, ancak bazı görünür ışık sistemleri de kullanılır. Işınlama gerçekleşince, bu malzemeler de katılaşmak için kimyasal reaksiyona girer. Bu reaksiyona fotopolimerizasyon denir ve tipik olarak karmaşıktır ve birçok kimyasal katılımcıyı içerir. Fotopolimerler 1960'ların sonlarında geliştirildi ve kısa süre sonra başta kaplama ve baskı endüstrisi olmak üzere çeşitli ticari alanlarda yaygın olarak uygulanmaya başlandı.

Yöntemin işleyişinden bahsetmek gerekirse, Fotoinitatör olarak bilinen belirli moleküllerin ışık enerjisini emmesiyle bu işlem başlar. Fotoinitatörler, ışık kaynağından enerjiyi aldıktan sonra aktif hale gelir ve serbest radikaller veya katyonlar üreterek polimerizasyon sürecini başlatır. Reçinedeki monomer veya oligomerlerle reaksiyona giren bu aktif parçacıklar, polimer zincirlerini oluşturur. Zincir reaksiyonu devam ettikçe sıvı haldeki malzeme katılaşmaya başlar ve sertleşir. Işık kaynağı kapatılana veya tüm reaktif bileşenler tüketilene kadar bu işlem tamamlanır. Polimerizasyon tamamlandığında, malzeme tamamen sertleşir ve mekanik özelliklerini kazanır. Fotopolimerizasyon, yüksek hassasiyet ve hızlı kürlenme süresi nedeniyle eklemeli imalat, diş hekimliği ve koruyucu kaplamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır. Bu Fotopolimerizasyon çeşitleri arasında;

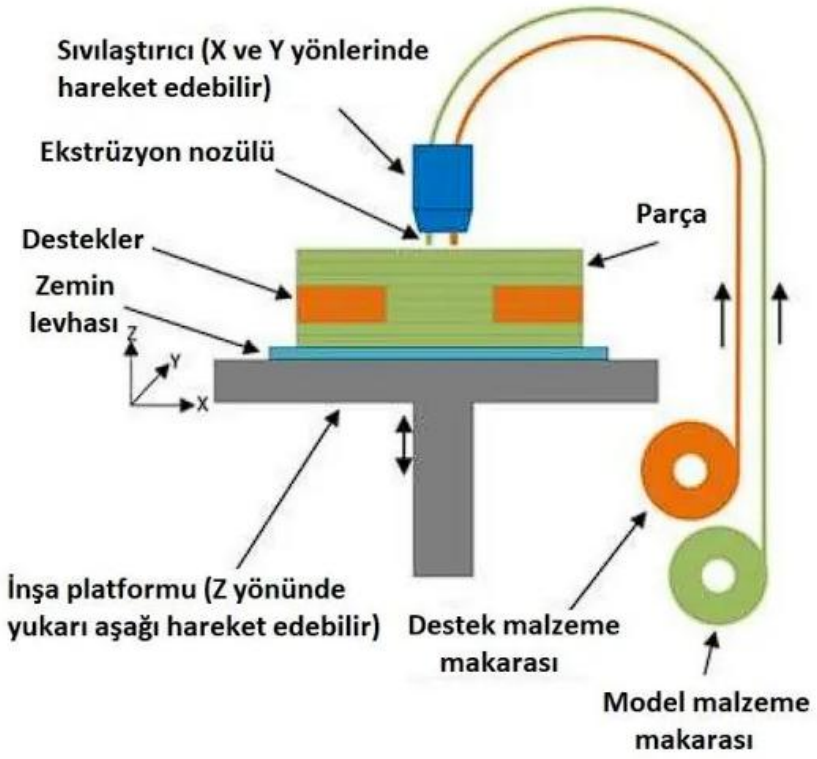
- Dijital Işık İşleme (DLP – Digital Light Processing)
- Sürekli Dijital Işık İşleme (CDLP – Continious Digital Light Processing)
- Sterolitografi (SLA- Stereolithography) gösterilebilir.



Şekil 3.2. Vat Fotopolimerizasyonu çeşitleri (URL 2)

3.2.2 Malzeme ekstrüzyonu (Material extrusion)

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan malzeme ekstrüzyonu, eritilmiş veya yarı erimiş malzemenin bir nozuldan dışarı itilmesi yoluyla katmanlarca birleştirilmesini içerir. Bu yöntem, genellikle termoplastik filamentler, granüller veya macun şeklinde malzemeler kullanarak kullanılır. Malzeme ısıtıcı bir sistemde eritildikten sonra, hareketli bir baskı kafası veya platform kullanılarak belirli bir şekilde biriktirilir. Soğuyan ve katılaşan malzeme, bir sonraki katmana sağlam bir yüzey oluşturur. (Şekil 3.2) Düşük maliyetli ve basit uygulanabilirliği nedeniyle, bu yöntem prototipleme ve küçük ölçekli üretim için yaygın olarak tercih edilir.



Şekil 3.3. FDM metodu çalışma prensibi (URL 3)

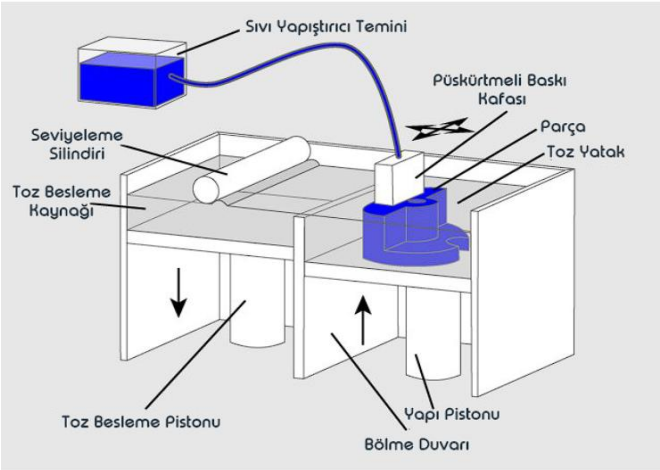
Malzemelerin ekstrüzyonu; mühendislikten havacılığa ve otomotivden tıpa kadar çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir katmanlı imalat yöntemidir. Bu metot genellikle prototip üretimi ve düşük hacimli üretim için tercih edilirken özellikle mühendisler ve tasarımcılar tarafından hızlı ve maliyet-etkin prototiplerin geliştirilmesinde kullanılıyor. Tıbbın alanında ise biyouyumlu malzemelerle yapılan modeller cerrahi planlama ve eğitim amacıyla kullanılıyor. Eğitim kurumlarında ise öğrencilere 3 boyutlu tasarım ve üretim süreçleri öğrenmek için sıklıkla başvurulan bir yöntem haline gelmiştir. Tüketici elektroniği ve hobi amaçları için sıkça tercih edilen bir diğer kullanım alanı da özel olarak üretilmiş parçalar ve küçük ölçekli üretimlerdir. Malzeme ekstrüzyonunun en büyük avantajlarından biri, geniş bir malzeme yelpazesi ile çalışabilmesi ve uygun maliyetli olmasıdır. Bu yöntem hem profesyoneller hem de amatör kullanıcılar için idealdir çünkü kolayca erişilebilir ve kullanıcı dostu yazıcılarla kullanılabilir. Üretim sürecinin basit olması, karmaşık geometrilerin ucuza üretilmesini sağlar. Ayrıca geri dönüştürülebilir malzemelerden yapıldığından, üretim süreci daha çevre dostudur. Bununla birlikte,

malzeme ekstrüzyonu, düşük enerji tüketimi ve taşınabilir yazıcılarla çalışabilmesi nedeniyle diğer yöntemlere nazaran daha yaygın bir üretim yöntemidir. Malzeme ekstrüzyon teknolojisinin örnekleri arasında;

- Eriyik Filaman Üretimi (FFF – Fused Filament Fabrication)
- Eriyik Biriktime Modelleme (FDM – Fused Deposition Modelling)
- Robocasting (RC) / Direct Ink Writing (DIW) gösterilebilir.

3.2.3 Bağlayıcı püskürtme (Binder jetting)

Bağlayıcı Püskürtme, toz halindeki malzemelerin sıvı bir bağlayıcı ile katmanların birleştirilmesiyle 3D nesneler üreten bir eklemeli imalat yöntemidir. Süreç, ilk olarak bir toz tabakasının baskı platformuna yayılmasıyla başlar. Ardından, yazıcı kafası bağlayıcıyı yalnızca belirli alanlara püskürtür, bu sayede bağlayıcının uygulandığı bölgelerde toz partikülleri birbirine yapışır ve bağlayıcı olmayan bölgelerde boşluklar kalır. (Şekil 3.3) Bu işlem, her katmanda tekrar edilerek modelin tamamı inşa edilir. Baskı tamamlandığında fazla toz temizlenir ve parça, metal malzeme için sinterleme veya infiltrasyon işlemleriyle güçlendirilir, seramik ve kum parçalar ise direkt olarak kullanılabilir. Kullanılabilen malzemeler arasında metal tozları (örneğin, paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum), seramikler, kum, kompozitler ve hatta renkli malzemeler yer alır.

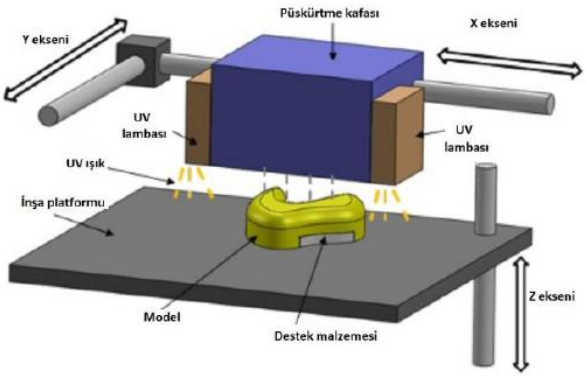


Şekil 3.4. Bağlayıcı püskürtme yöntemi çalışma prensibi (URL 4)

Bağlayıcı Püskürtme, düşük maliyetli, hızlı ve verimli bir üretim yöntemi sunar. Bu yöntemin büyük avantajlarından biri, karmaşık geometrilerin hızlı bir şekilde üretilebilmesidir. Ayrıca, destek yapısına ihtiyaç duymaması, baskı sonrası işleme süreçlerini basitleştirir ve daha verimli hale getirir. Metal, seramik, kum gibi farklı malzemelerle çalışabilmesi ve renkli prototiplerin üretilmesine olanak tanıması, bu teknolojiyi çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir kılar. Prototip üretimi, kalıp yapımı ve küçük seri üretim gibi uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bağlayıcı püskürtme yönteminin dezavantajları ise bağlayıcı malzeme kullanımı nedeniyle yapısal açıdan uygun olmayabilen ürünlerin üretilmesi yer almaktadır ayrıca yöntemin bir diğer dezavantajı da ardıl işlemlerin ek süre gerektirmesidir.

3.2.4 Malzeme püskürtme (Material jetting)

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan malzeme püskürtme, sıvı haldeki malzemenin bir yüzeye damlacıklar halinde püskürtülmesi yoluyla bir katman oluşturur. Bu süreç, tipik olarak ultraviyole (UV) ışığı veya ısı ile katılaşır. Mürekkep püskürtmeli yazıcılara benzeyen bu yöntemde, malzeme belirli bölgelerde sertleşirken aynı anda destek yapıları oluşturularak daha karmaşık geometriler oluşturulabilir. (Şekil 3.5) Fotopolimer reçineler genellikle balmumu ve metal veya seramik süspansiyonları kullanılarak yapılır.



Şekil 3.5. Polyjet yöntemi şematik gösterimi (Özer, 2020)

Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri, çok yüksek çözünürlük ve yüzey kalitesi sunmasıdır. Katman kalınlıkları oldukça ince olduğundan pürüzsüz yüzeyler elde edilebilir ve detay seviyesi yüksektir. Ayrıca, birden fazla malzeme veya renk kullanabilme özelliği sayesinde, karmaşık yapılar ve görsel olarak zengin prototipler üretmek mümkündür. Özellikle diş hekimliği, takı tasarımı, medikal modeller ve hassas mühendislik parçalarının üretiminde yaygın olarak tercih edilir. Ancak, malzeme püskürtme yönteminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle, kullanılan malzemeler genellikle özel olarak formüle edilmiş fotopolimer reçineler olduğu için malzeme seçeneği diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha sınırlıdır. Üretilen parçalar mekanik dayanım açısından güçlü olmayabilir ve genellikle kırılgan olabilir. Ayrıca, destek yapıları gerektiğinden baskı sonrası temizleme işlemleri ve desteklerin çıkarılması gibi ek işlemler gerekebilir.

Bu yöntemde üretilen parçalara uygulanabilecek ardıl işlemlere örnek vermek gerekirse, Üretilen MJ parçaları tipik olarak gri renktedir ve görünür katmanlar ve toz dokusu olmayan pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. MJ parçaları, sıcak bir renk banyosuna batırılarak siyah renkte boyanabilir. Renkler yaklaşık 0,5 mm derinliğe kadar ulaşır ve tüm yüzeyleri kaplar. Ayrıca parçalar kumlama yöntemiyle yüzeylerdeki pürüzlülük minimuma indirilebilir. Malzeme ekstrüzyonu yöntemlerine örnek vermek gerekirse;

- PolyJet
- MultiJet Printing (MJP)
- NanoParticle Jetting (NPJ) gösterilebilir.

3.2.5 Toz yatağı füzyonu (Powder bed fusion)

Toz yatağı füzyonu, malzemeyi eritmek ve kaynatmak için lazer, termal enerji veya elektron ışını kullanan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem, metal malzemelerin yanı sıra plastik parçaların kullanılmasını da içerebilir. Malzeme türüne göre ikiye ve yöntem olarak beşe ayrılır.

1. Metal bazlı toz yatak füzyonu yöntemi

1.1 Seçici lazer ergitme / Selective laser melting (SLM)

Lazer ışını toz halindeki metal malzeme üzerine yönlendirilir ve malzeme yerel olarak eriyerek birbirine bağlanır. Bu süreç, her katman tamamlandığında, bir sonraki katman için yeni toz serilir ve işlem tekrarlanır. (Şekil 3.6) Yöntemde kullanılabilen örnek malzemeler; Paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum, kobalt-krom, nikel süper alaşımları. Yöntemin avantajları; %100 yoğunluklu metal parçalar üretilebilir. Mekanik özellikleri döküm veya talaşlı imalatla üretilen parçalara yakındır. Hafif ve dayanıklı parçalar üretmek için idealdir. Dezavantajları ise; yüksek enerji tüketimi ve uzun üretim süreleri gerektirmesi ve büyük parçalar için ekonomik olmaması gösterilebilir.

1.2 Doğrudan metal lazer sinterleme / Direct metal laser sintering (DMLS)

SLM'ye benzer, ancak toz tamamen eritilmez, yalnızca sinterlenir (toz partikülleri birbirine bağlanır). Yöntemde kullanılabilen örnek malzemeler; Paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum, kobalt-krom alaşımları. Yöntemin avantajları; SLM'ye kıyasla daha az enerji tüketir. Yüksek dayanımlı parçalar üretilebilir. Dezavantajları ise Parçaların yoğunluğu SLM'ye göre daha düşük olması ve sonradan ısıl işlem uygulanması gerektirmesi sayılabilir.

1.3 Elektron ışınıyla ergitme / Electron beam melting (EBM)

Elektron Işınıyla Ergitme (EBM), metal bazlı toz yatağı füzyon yöntemlerinden biri olup vakum ortamında çalışır. Bu yöntemde, yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılarak metal tozları ısıtılır ve bu sayede tozlar yerel olarak erir. Elektron ışını, toz katmanları üzerine yönlendirilerek çok yüksek sıcaklıklar oluşturur, ancak bu sıcaklık yalnızca belirli bir bölgeyi ısıtarak tozların birbirine kaynaşmasını sağlar. EBM süreci, katmanlarca devam eder; her katman tamamlandığında bir sonraki katman için yeni toz serilir. Yöntemde kullanılabilen örnek malzemeler; Titanyum, nikel bazlı süper alaşımlar. Yöntemin avantajları; Vakum ortamında çalıştığı için oksidasyonu önler, bu da reaktif

metaller için idealdir ayrıca, SLM'ye göre daha hızlı üretim yapabilir. EBM, işlemi vakumda yaptığı için oksitlenmeye yatkın titanyum ve nikel bazlı süper alaşımlar için daha uygundur.

Çizelge 3.1. Metal toz yataklı füzyon yöntemleri karşılaştırması

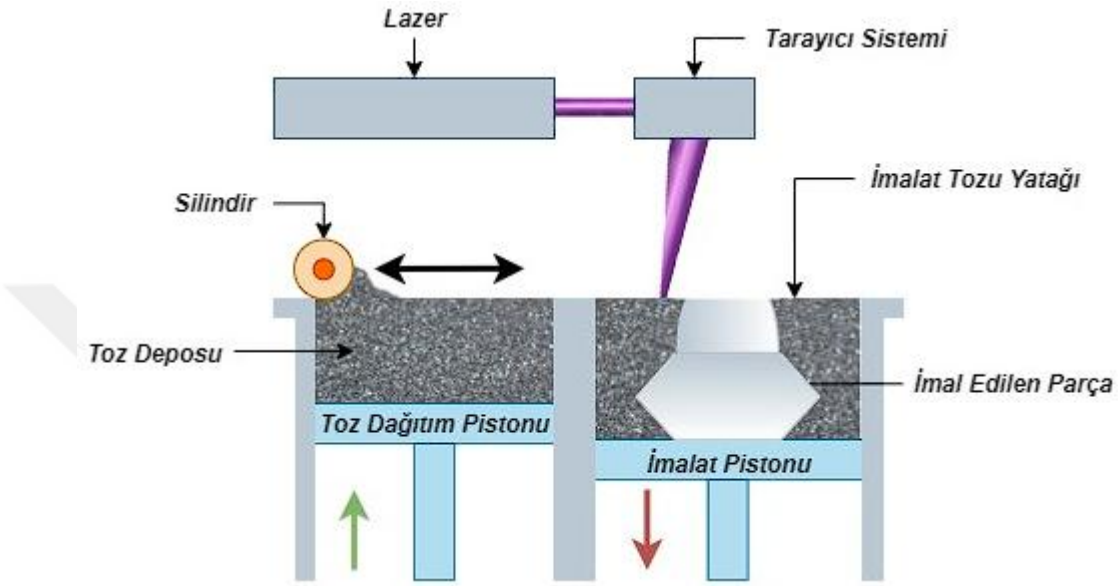
Parametreler	EBM	SLM	DLMS
Enerji Kaynağı	Elektron ışını (yüksek enerjili elektron demeti)	Lazer ışını (yüksek güçlü fiber lazer)	Lazer ışını (genellikle düşük güçlü)
İşlem Ortamı	Vakum ortamında çalışır (oksidasyonu önler)	Koruyucu gaz (Ar veya N) ortamı gerektirir	Koruyucu gaz ortamı gerektirir
Malzeme Ergitme	Tam ergitme (lazerden daha güçlüdür)	Tam ergitme (yüksek yoğunluklu parçalar üretir)	Kısmi sinterleme (tamamen ergimez, parçacıklar birleşir)
Üretim Hızı	Daha hızlı (aynı anda birden fazla alan ergitilebilir)	Orta hızda	Daha yavaş
Yüzey Kalitesi	Pürüzlü yüzey, ek finisaj gerekir	Daha düzgün yüzey, daha az işleme ihtiyaç duyar	Genellikle pürüzlü, ısıl işlem gerekebilir

2. Polimer bazlı toz yatak füzyonu yöntemleri

2.1 Seçici lazer sintering / Selective laser sintering (SLS)

Lazer ışını, polimer tozlarını sinterleyerek (ısı ile birbirine bağlayarak) katmanlarca parçalar oluşturur. (Şekil 3.6) Yöntemde kullanılabilen örnek malzemeler; PA12 (naylon), PA11, TPU, polipropilen (PP), cam ve karbon fiber dolgulu polimerler.

Yöntemin avantajları; Destek yapısına ihtiyaç duymaz, çünkü toz yatağı destek görevi görür. Mekanik olarak güçlü parçalar üretilebilir. Hafif ama dayanıklı prototipler ve fonksiyonel parçalar üretmek için uygundur. Dezavantajları ise Malzeme seçeneği sınırı ve yüzey pürüzlü olması sebebiyle, ekstra ardıl işlem gerektirmesi gösterilebilir.

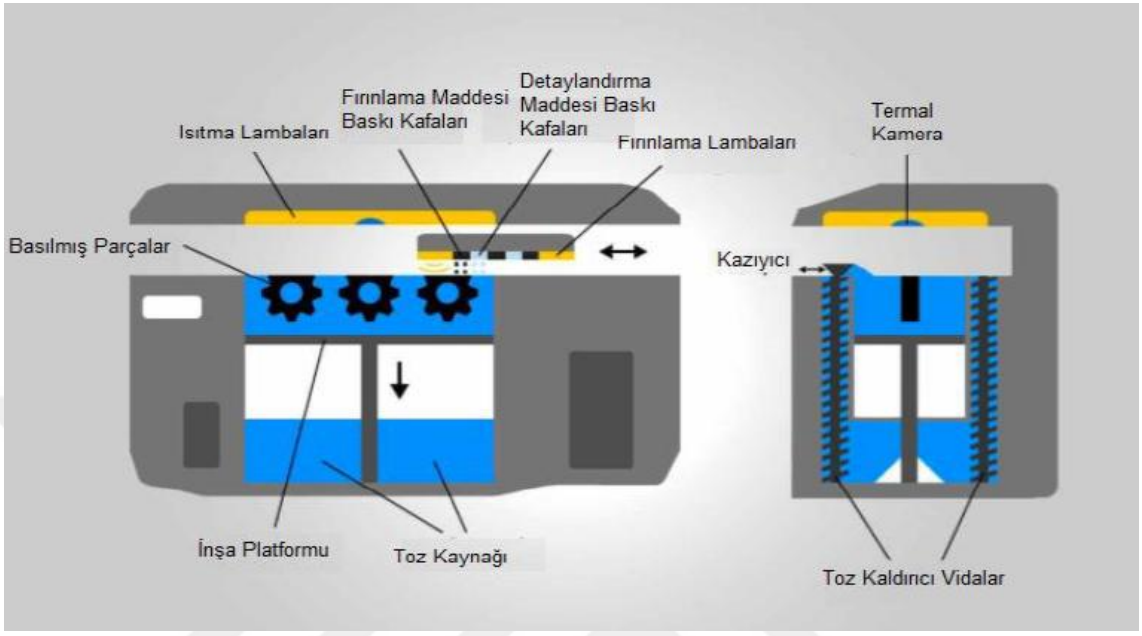


Şekil 3.6. SLS ve SLM yöntemi proses akışı (URL 5)

2.2 Çoklu jet füzyonu / Multi-jet fusion (MJF)

MJF'in çalışma prensibi, seçici lazer sinterleme (SLS) ve inkjet baskı teknolojilerinin birleşiminden oluşur. İşlem, toz katmanlarını sinterlemek için lazer yerine ısıyı aktive eden bağlayıcı sıvılar kullanır. İlk olarak, ince toz katmanı yatak üzerine serilir. Bu toz, genellikle poliamid (PA12) veya benzeri polimer malzemelerden yapılır. Toz serildikten sonra, bir inkjet yazıcı mekanizması ile özel bir bağlayıcı sıvı, yalnızca şekillendirilecek alanlara püskürtülür. Bağlayıcı sıvı ile işaretlenen bölgeler daha sonra ısıtılır. Bu sıvı, toz parçacıklarını bir arada tutarak kimyasal bağlar oluşturur. Her katman tamamlandığında, yeni bir toz katmanı serilir ve aynı işlem tekrar edilir. Bu şekilde, katmanlar arasında bağlayıcı sıvı ile sağlam bir yapı oluşturularak parça tamamlanır. MJF, hızlı üretim süreçleri ve yüksek çözünürlükle karmaşık geometrilerin üretilebilmesi gibi avantajlar

sağlar. Yöntemde kullanılabilen örnek malzemeler; PA12, PA11, TPU gibi polimer bazlı malzemelerdir.



Şekil 3.7. MJF yöntemi (Cader & Kinski, 2020'den değiştirilerek alınmıştır.)

2.3 Seçici ısı sinterleme / Selective heat sintering (SHS)

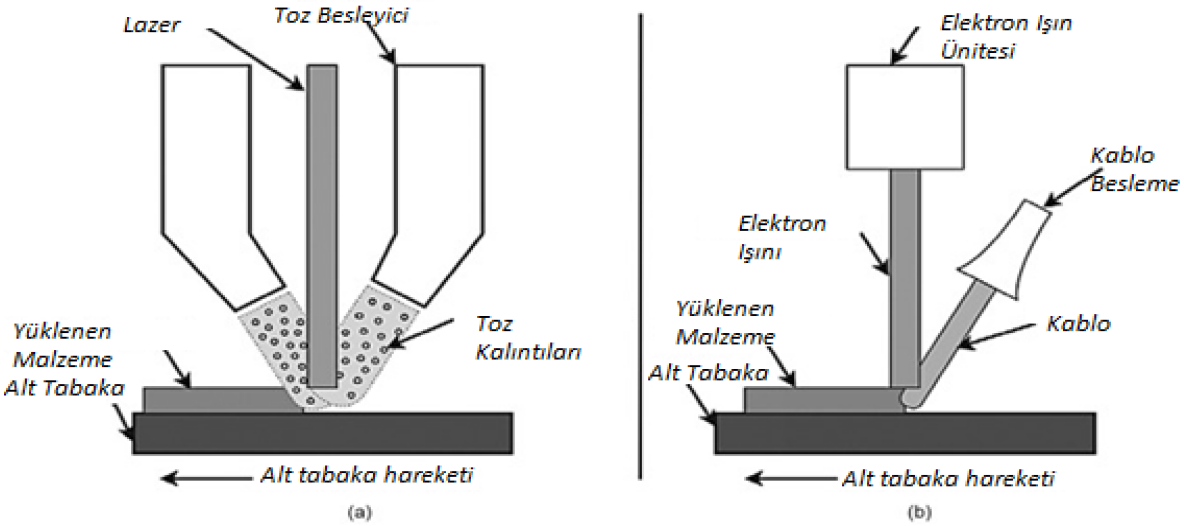
Seçici Isı Sinterleme (SHS), polimer malzemelerle çalışan ve lazer yerine termal baskı kafası kullanan bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem, Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ile benzer bir prensibe sahiptir ancak enerji kaynağı olarak lazer ışını yerine ısıtmalı bir baskı kafası kullanır. SHS süreci, ince bir termoplastik toz katmanının yapı platformuna serilmesiyle başlar. Genellikle kullanılan malzemeler arasında naylon (PA) ve polipropilen (PP) gibi termoplastik polimerler bulunur. Lazer yerine baskı kafasındaki rezistanslar belirlenen bölgelere kontrollü bir şekilde ısı uygular ve böylece toz partikülleri sinterlenerek birleştirilir. Bir katman tamamlandığında, yapı platformu aşağı iner ve üzerine yeni bir toz katmanı serilir. İşlem, parça tamamen oluşana kadar katmanlarca devam eder. Üretim tamamlandıktan sonra yapı platformu oda sıcaklığına kadar soğutulur ve çevredeki fazla toz temizlenerek nihai parça ortaya çıkar.

3.2.6 Yönlendirilmiş enerji birikimi (Directed energy deposition)

Yönlendirilmiş Enerji Birikimi yönteminde, malzemenin elektron ışını veya plazma arkı kullanılarak eritilmesi ve katmanlı üretimi gerçekleştirilir. Bir robotik kod enerjiyi güç kaynağına yönlendirir. Günümüzde, yönlendirilmiş enerji birikimi yöntemi genellikle hibrit üretim yöntemlerinde kullanılmaktadır. Bu yöntem, sıfırdan parça yapmak yerine daha çok türbin kanadı gibi mevcut parçaları yenilemek veya onarmak için kullanılmaktadır. Yönlendirilmiş Enerji Birikimi yöntemi genellikle metaller için kullanır, ancak polimer ve seramik malzemeleri için de kullanılabilir. Aşağıdakiler, çeşitli enerji kaynakları kullanılarak bu yöntemi farklı gruplara ayırmıştır.

- Lazer tabanlı yönlendirilmiş birikim sistemi
- Elektron ışınına dayalı yönlendirilmiş birikim sistemi
- Plazma veya elektrik ark bazlı yönlendirilmiş birikim sistemi

Yukarıda belirtilen yöntemler, temel işleyiş anlamında birbirine çok benzer olup, yöntemin işleyişi açıklanmıştır. (Şekil 3.8)



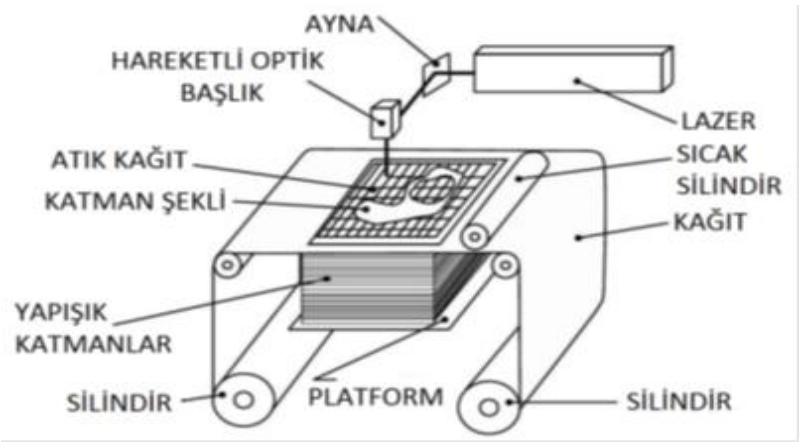
Şekil 3.8. DED yöntemlerinin çalışma prensip şablonu (Sing et al., 2019'dan değiştirilerek alınmıştır.)

Yöntemin kullanıldığı malzemelere örnek vermek gerekirse; Ti-6Al-4V, 316L paslanmaz çelik, AlSi10Mg, Inconel 625, Inconel 718 metal malzeme grubuna örnek verilebilirken, Zirkonya (ZrO_2) ve Alümina (Al_2O_3) seramik grubuna örnek verilebilir. Yöntemin

avantajları, Yüksek yapım hızları, yoğun ve güçlü parçalar oluşturulması, yüksek üretim doğruluğuna sahip olması ve düşük malzeme tüketimi olarak belirlenirken; yüksek sermaye maliyeti, zayıf yüzey kalitesi ve destek yapısının kullanılamaması dolayısıyla çıkıntılı parça üretiminin imkansızlığı yöntemin dezavantajlarıdır.

3.2.7 Sac laminasyonu (Laminated object manufacturing)

Sac laminasyonu (Laminated Object Manufacturing- LOM), ince tabaka malzemelerin üst üste birleştirilerek üç boyutlu nesnelerin üretildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu süreçte, kâğıt, plastik, kompozit veya metal levhalar kullanılarak katmanlı bir yapı oluşturulur. Üretim aşamaları malzeme hazırlığı, kesim, bağlama, atık malzemenin çıkarılması ve son işlemler olmak üzere birkaç temel adımdan oluşur. Öncelikle ince levhalar, oluşturulacak modelin katmanlarına uygun şekilde istiflenir. Daha sonra her bir katman, belirlenen şekle göre lazer, mekanik bıçak veya su jeti gibi tekniklerle kesilir. Kesilen tabakalar üst üste eklenerek yapıştırıcılar, ısı ile aktive olan bağlayıcılar veya kaynak teknikleriyle birleştirilir. Üretim sırasında fazlalık malzemeler çıkarılır ve nihai ürün belirgin hale getirilir. Son aşamada, yüzey iyileştirme, boyama veya kaplama gibi işlemler uygulanarak ürün tamamlanır.



Şekil 3.9. Sac laminasyonu yöntemi (URL 6)

LOM yöntemi, düşük maliyetli ve hızlı üretim avantajı sağladığı için özellikle büyük ölçekli parçaların üretiminde tercih edilir. Malzeme çeşitliliği sunması sayesinde kağıt,

polimer, kompozit ve metal gibi farklı malzemelerle uygulanabilir. Ancak, katmanların yapıştırılarak birleştirilmesi nedeniyle parçaların mekanik dayanımı, diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha düşüktür. Ayrıca, destek yapıları kullanılmadığından karmaşık iç geometrilerin üretimi sınırlıdır ve yüzey kalitesi kullanılan kesme tekniğine bağlı olarak değişebilir. Buna rağmen, LOM yöntemi konsept modelleri, büyük ölçekli prototipler ve düşük maliyetli kalıplar üretmek için ideal bir çözümdür. Özellikle havacılık, otomotiv, mimari modelleme ve endüstriyel tasarım gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır.

3.3 Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat yöntemi, metal, plastik ve ahşap gibi malzemelerden istenilen şekil ve boyutta parçalar yapmak için kullanılır. Bu yöntemde şekil verme işlemi, iş parçası üzerinden belirli bir miktarda malzeme kaldırılarak gerçekleştirilir. Malzeme çıkarıldıktan sonra ortaya çıkan küçük parçalara "talaş" denir ve bu üretim tekniği "talaşlı imalat" olarak adlandırılır. Özellikle yüksek hassasiyet gerektiren bileşenler için talaşlı imalat yaygın olarak kullanılır.

Torna, freze, matkap, planya ve taşlama gibi takım tezgâhları genellikle bu işlemi gerçekleştirmek için kullanılır. Şekillendirme işlemi, her bir tezgâh tarafından iş parçasına farklı bir kesme hareketi uygulanarak gerçekleştirilir. Torna tezgâhlarında iş parçası dönerken kesici takım sabit kalır, ancak freze tezgâhlarında iş parçası dönerken kesici takım sabit kalır. Bu makinelerde kullanılan kesici takımların seçimi, işlenecek malzeme türüne ve istenen yüzey kalitesine bağlıdır.

Talaşlı imalat, yüksek hassasiyet ve yüzey kalitesi elde etmenin bir yoludur. Bu nedenle, havacılık, otomotiv, savunma ve makine imalatı gibi sektörlerde hassas bileşenler üretmek için tercih edilmektedir. Talaşlı imalat, kısa sürede ölçüye uygun ürün elde edebileceği için prototip üretiminde de sıklıkla kullanılır. Ancak yöntemin bazı sınırlamalarından biri, üretim sürecinde oluşan talaşların atık olması ve bazı işlemlerin uzun sürmesidir.

Sonuç olarak, talaşlı imalat, detaylı, hassas ve karmaşık bileşenlerin üretiminde önemli bir rol oynayan geleneksel bir üretim yöntemidir ve hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler nedeniyle CNC (bilgisayarlı sayısal kontrol) makinelerinin yaygınlaşması, bu yöntemin tekrar edilebilirliğini, verimliliğini ve hızını artırmıştır.

3.3.1 Talaşlı imalatın eklemeli imalattan farkı

Talaşlı imalat ve eklemeli imalat yöntemleri, üretim teknolojileri arasında temel farklılıklar barındıran iki önemli yaklaşımı temsil etmektedir. Çizelge 3.2'de bu iki yöntemin temel özelliklerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Veriler incelendiğinde, talaşlı imalatın malzeme işleme esasına dayandığı ve yüksek yüzey kalitesi ile mekanik dayanım sunduğu görülmektedir. Buna karşılık, eklemeli imalat yöntemi, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesinde esneklik sağlaması ve malzeme israfını minimize etmesiyle öne çıkmaktadır.

Çizelge 3.2. Talaşlı imalat ve eklemeli imalat yöntemleri fark tablosu

Karşılaştırma Kriterleri	Talaşlı İmalat	Eklemeli İmalat
İmalat Yöntemi	Malzeme çıkarılarak şekillendirme	Malzemeyi katman katman eklenerek şekillendirme
Temel Prensip	Kesme / talaş kaldırma	Katmanlı üretim (3D yazıcılar gibi)
Malzeme Kullanımı	Yüksek israf (talaş oluşur)	Düşük israf (yalnızca gerekli malzeme kullanılır)
Geometri Esnekliği	Sınırlı (karmaşık şekiller zor olabilir)	Yüksek (karmaşık yapılar kolayca üretilebilir)
Yüzey Kalitesi	Yüksek	Genellikle düşük (sonradan işlem gerekebilir)

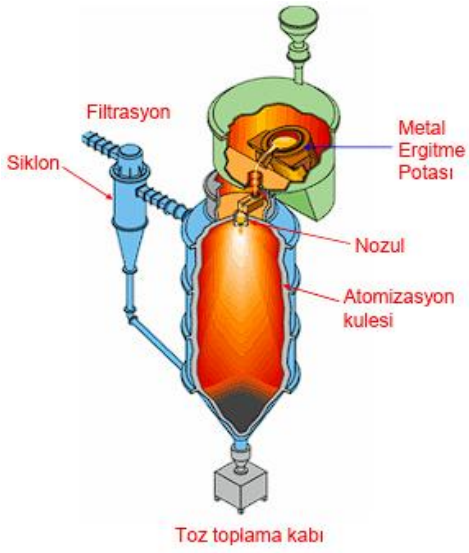
Dayanıklılık / Mekanik Özellikler	Genellikle yüksek	Malzemeye göre değişir, bazen düşüktür
Uygulama Alanları	Otomotiv, havacılık, makine sanayi vb.	Prototip üretimi, medikal, uzay, tasarım vb.
Ekipman / Maliyet	Geleneksel tezgâhlar, CNC makineleri	3D yazıcılar, toz besleme sistemleri vb.

Üretim amacı, parça geometrisi, istenen mekanik özellikler ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak her iki yöntem de farklı avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle, söz konusu üretim teknikleri, mühendislik uygulamalarında birbirini tamamlayıcı roller üstlenebilmektedir.

3.4 Eklemeli İmalatta Metal Tozları

Metal tozları, eklemeli imalatın hassasiyetini, mukavemetini ve üretim verimliliğini doğrudan etkileyen kritik malzemelerdir. Bu nedenle, metal tozlarının üretim yöntemleri, kullanılan alaşımlar ve eklemeli imalat süreçlerindeki rolleri büyük önem taşır.

Metal tozları, bir dizi farklı üretim yöntemi kullanılarak elde edilir. Gaz atomizasyonu (Şekil 3.10) en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntem, yüksek basınçlı gaz akımı kullanılarak eritilmiş metali küçük damlacıklara ayırarak hızla katılaştırır ve küresel şekilli tozlar üretir. Küresel tozlar, yüksek hassasiyetli eklemeli imalat teknikleri olan Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Elektron Işınıyla Ergitme (EBM) işlemlerinde yüksek akışkanlık ve yoğunluk sağladıkları için tercih edilir. Su atomizasyonu (Şekil 3.11) yöntemi ise daha düzensiz şekilli tozlar üretir ve genellikle maliyet dikkate alındığında kullanılır. Bunun yanı sıra, belirli metal türleri ve belirli uygulamalar için mekanik öğütme, elektroliz ve plazma atomizasyonu gibi teknikler kullanılır.



Şekil 3.10. Gaz Atomizasyonu yöntemi (URL 7)

Malzemenin mekanik özelliklerine, korozyon direncine ve kullanım alanına göre, eklemeli imalat için kullanılan metal tozları seçilir. Paslanmaz çelik alaşımları (316L, 17-4PH), korozyona karşı dayanıklılığı ve yüksek korozyon direnci nedeniyle otomotiv, havacılık ve tıbbi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Ti-6Al-4V alaşımları, hafif olmaları ve biyouyumlu olmaları nedeniyle özellikle havacılık ve medikal implantlarda tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımları (AlSi10Mg, Al7075) düşük yoğunlukları ve iyi termal iletkenlikleri nedeniyle otomobil ve elektronik sektörlerinde kullanılırken, nikel süperalaşımları (Inconel 625, Inconel 718) yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle enerji ve havacılık sektörlerinde kullanılır. Kobalt-krom alaşımları (CoCrMo, CoCrW), aşınma direnci ve biyouyumluluğu nedeniyle dişçilik ve medikal implant üretiminde kullanılır. Aynı zamanda, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip bakır alaşımları (Cu, CuCrZr) elektrik bileşenleri ve soğutma sistemlerinde tercih edilir. Ek olarak, tungsten ve refrakter metaller (W, Mo, Ta, Nb) yüksek erime noktaları nedeniyle uzay ve nükleer uygulamalarda çok önemlidir.



Şekil 3.11. Su Atomizasyonu yöntemi (URL 7)

Kullanılan metal tozunun türü, eklemeli imalat tekniklerini belirler. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ve Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemlerinin her ikisi de genellikle gaz atomizasyonu ile üretilmiş küresel tozlar gerektirir. Elektron Işınıyla Ergitme (EBM), yüksek sıcaklıklara dayanıklı metaller için kullanılır. Elektrik iletkenliği yüksek olan metal tozları, bu yöntemde kullanılabilir. Hem metal tozları hem de metal teller, doğrudan enerji biriktirme (DED) tekniği ile büyük ölçekli parçaların üretiminde kullanılabilir. Üretim süreçlerinde daha ucuz olan bağlayıcı püskürtme (Binder Jetting) yöntemi, bakır, Inconel, paslanmaz çelik gibi metallerde kullanılır.

Bu nedenle, eklemeli imalat sırasında, üretim yöntemi, nihai ürünün kullanım alanı ve istenen mekanik özelliklere bağlı olarak metal tozları dikkatle seçilir. Havacılık ve medikal sektörlerde yüksek performans gerektiren titanyum, Inconel ve kobalt-krom gibi alaşımlar tercih edilirken, maliyet ve üretim kolaylığı ön planda olduğunda çelik ve alüminyum alaşımları tercih edilmektedir.

3.4.1 Nikel bazlı süper alaşımlar

Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon ve korozyon direnciyle öne çıkan metal alaşımlarıdır. Özellikle havacılık, enerji, uzay ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bu malzemeler, zorlu ortam koşullarında bile mekanik özelliklerini koruyabilme yeteneğine sahiptir.

Bu alaşımlar, temel olarak yüksek oranda nikel içerir ayrıca krom, kobalt, molibden, titanyum, alüminyum, niyobyum gibi elementlerle güçlendirilir. İç yapılarında çökelme sertleşmesi ve dislokasyon hareketlerini engelleyen fazlar bulunur. Bu sayede süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda sürünme (creep) direncine ve yorulma dayanımına sahip olur.

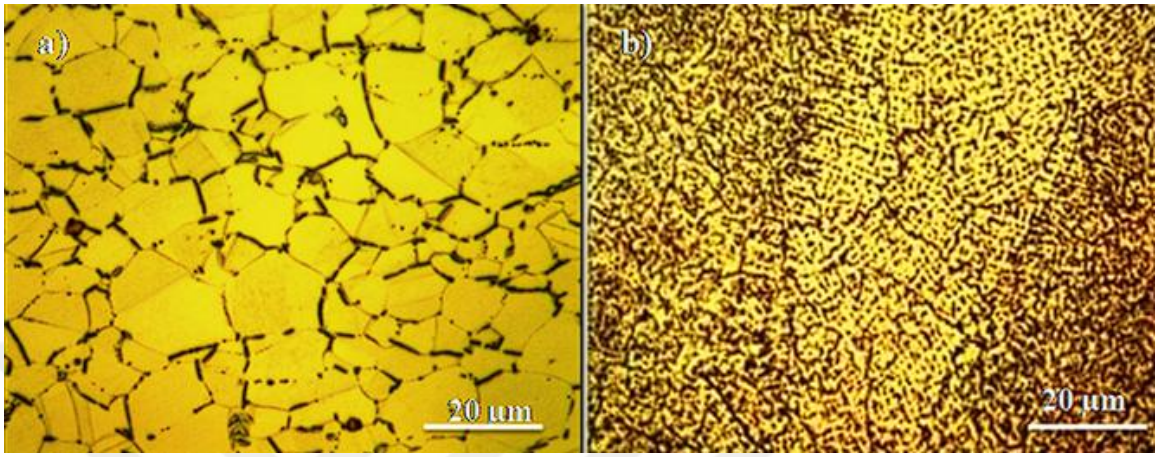
Üretim süreçleri açısından, geleneksel döküm ve talaşlı imalatın yanı sıra, eklemeli imalat (SLM, DED, EBM) ve toz metalurjisi gibi ileri üretim yöntemleriyle de işlenebilirler. Özellikle karmaşık geometrili ve hafif yapılı parçalar üretme imkânı sunduğu için eklemeli imalat, süper alaşımların kullanım alanlarını genişletmektedir.

Nikel bazlı süper alaşımlar, özellikle jet motorları, gaz türbinleri, roket motor bileşenleri, nükleer reaktör parçaları ve kimyasal proses ekipmanları gibi yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamların bulunduğu uygulamalarda kullanılır. Bunların en bilinen örnekleri Inconel, Hastelloy, Haynes ve René serisi alaşımlardır.

3.5 Inconel 718

Inconel 718 (IN718), Ni-Cr-Fe bazlı bir östenitik (FCC- Yüzey Merkezli Kübik) kristal yapıya sahip süper alaşımdır. Bu malzeme, yüksek sıcaklık mukavemeti ve korozyon direnciyle bilinen çökelme sertleşmeli (precipitation-hardened) bir nikel bazlı süper alaşımdır. Özellikle havacılık, uzay, enerji ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılan bu alaşım, zorlu çalışma koşullarında mekanik özelliklerini uzun süre koruyabilir. 700°C'ye kadar yüksek mukavemet sağlayabilmesi, onu jet motorları, türbin kanatları ve nükleer reaktör bileşenleri gibi kritik uygulamalar için ideal hale getirir. Son

yıllarda eklemeli imalat teknolojileriyle de işlenebilen Inconel 718, özellikle Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) gibi yöntemlerle üretilebilmektedir. (Şekil 3.12)

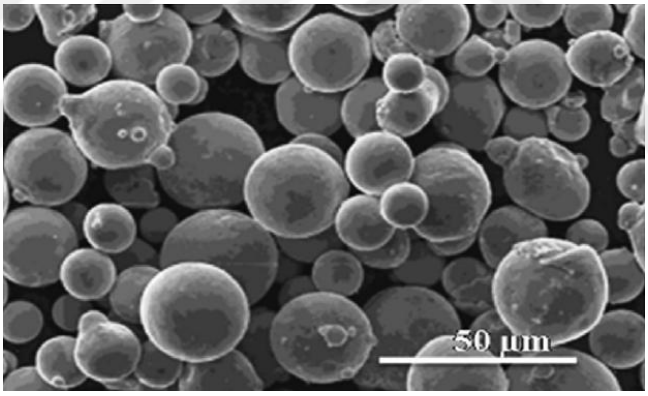


Şekil 3.12. a) Döküm yöntemiyle elde edilmiş IN718 mikroyapı görüntüsü b) DLMS - 3D yöntemiyle elde edilmiş IN718 mikroyapı görüntüsü (Dharmalingam et al., 2022)

IN718'in bileşiminin büyük bir kısmı nikel (%50-55) içerir. Krom (%17-21) alaşıma oksidasyon ve korozyon direnci kazandırırken, demir (%17-19) genel mukavemeti artırır. IN718'in oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda östenitik fazda (FCC) bulunur, bu da sünekliğini ve darbe dayanımını artırır.

IN718'e de uygulanan çökelme sertleşmesini açıklamak gerekirse, alaşıma belirli elementlerin (ör. niyobyum, alüminyum ve titanyum) eklenmesi ve uygun ısıl işlemler uygulanmasıyla matris içinde sert ve ince fazların çökeltilmesi sürecidir. Bu ince çökeltiler, dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemenin yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetini ve sürünme direncini artırır. Inconel 718'de özellikle γ″ (tetragonal gamma double prime fazı), alaşımın yüksek sıcaklık dayanımında kritik bir rol oynar. Bunun yanında, γ′ (gamma prime fazı) da mukavemetin artmasına katkıda bulunur. Bu çökeltiler sayesinde Inconel 718, uzun süreli yüksek sıcaklık uygulamalarında bile mükemmel mekanik özelliklerini koruyabilir.

IN718 gibi süper alaşımlar için bir tehlike, Laves fazıdır. Laves fazı, niyobyum açısından zengin, genellikle $(Ni,Fe,Cr)_2Nb$ formunda bulunan ve hexagonal kristal yapıya sahip bir intermetalik bileşiktir. Bu faz, alaşımın yüksek sıcaklıklarda katılaşması sırasında niyobyumun belirli bölgelerde birikmesiyle oluşur ve mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir. Laves fazı, malzemenin sünekliğini ve tokluğunu azaltarak gevrek bir yapı oluşturur. Ayrıca, tane sınırlarında biriktiği için yorulma direncini düşürebilir ve sürünme dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir. Özellikle döküm veya kaynak işlemleri sonrasında Laves fazının fazla miktarda oluşması, Inconel 718'in performansını zayıflatabilir. Bu fazın kontrol altına alınabilmesi için belirli yöntemler uygulanır. Çözündürme tavlaması (980-1050°C) ile Laves fazı parçalanarak, daha kararlı ve mukavemet artırıcı bir faz olan γ″ (Ni_3Nb) fazına dönüşmesi sağlanabilir. Ayrıca, kimyasal bileşimin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi ve katılaşma sürecinin daha kontrollü bir şekilde yürütülmesi, Laves fazının oluşumunu en aza indirebilir.

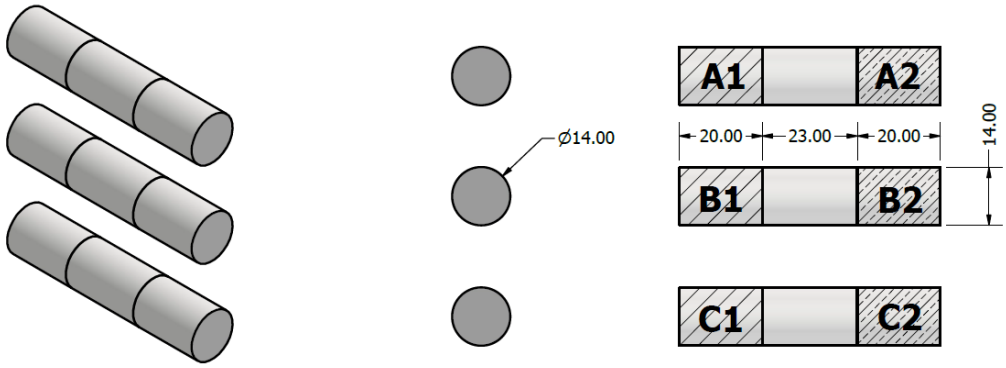


Şekil 3.13. IN718 metal tozunun SEM morfolojisi (Dharmalingam et al., 2022)

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 Yapılacak Deneysel Çalışmanın Tanımlanması

Planlanan çalışmada SLM metodu ile optimum koşullarda üretilen IN718 numunelerinden birine ısıl işlemde uygulanacak ve hepsi farklı torna parametreleri kullanarak talaşlı işleme yapılmış olup, bu işleme sonucunda oluşan yüzeyin özelliklerinin ve iç yapısının incelenmesi üzerinden ilerlenmiştir. Yapılan çalışmanın numune planlama şemasında (Şekil 4.1) belirtildiği şekilde, istenen geometriler oluşturulduktan sonra sırasıyla; numunelerin eldesi, talaşlı imalat işleminin, ısıl işlemin hazırlığının ve uygulanmasının ardından belirlenen ölçümlerin yapılması adımları takip edilerek sonuçlandırılması planlanmıştır.



Şekil 4.1. Numune Planlaması (ölçüler mm cinsinden verilmiştir.)

Numunelere işleme parametrelerini kontrol altında tutacak şekilde CNC torna makinesinde dış çap tornalama işlemi yapılmıştır. Yapılan tornalama işlemi ile 14 mm olan mevcut çapların 10 mm ye indirilmesi ve bunun 20 mm'lik bir uzunluk için yapılması planlanmıştır. Numuneler daha fazla ölçüm yapılabilmesi adına çift taraflı işlemeye uygun düşünülmüştür. Numunelerin torna parametreleri Çizelge 4.1'deki gibidir. Çizelgede de görüldüğü üzere numuneler ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz olarak

gruplanmış olup bir numuneye homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Numunelerdeki torna işlemindeki kesme derinliği etkisi, devir sayısı etkisi ve ısıl işlem etkisi yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı yönünden incelenecektir. Ayrıca ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz numunelere sertlik testi uygulanıp, bu testlerin ve incelemelerin ardından numuneler arası farkların açıklanıp, tartışılması amaçlanmaktadır.

Çizelge 4.1. Deney numunelerinin talaşlı imalat parametreleri

Numuneler	Kesme Hızı (Vc) – m/dk	İlerleme Hızı (f) – mm/dk	Kesme Derinliği (ap) – mm	Devir Sayısı (rpm)	Isıl İşlem
A1	40	0,1	0,2	1274	X
A2	60	0,1	0,2	1910	X
B1	60	0,1	0,4	1910	X
B2	70	0,1	0,2	2228	X
C1	70	0,1	0,2	2228	√
C2	70	0,1	0,4	2228	√

Yapılan hesaplamalardaki kesme hızı ve devir sayısının arasındaki ilişkiye değinmek gerekirse,

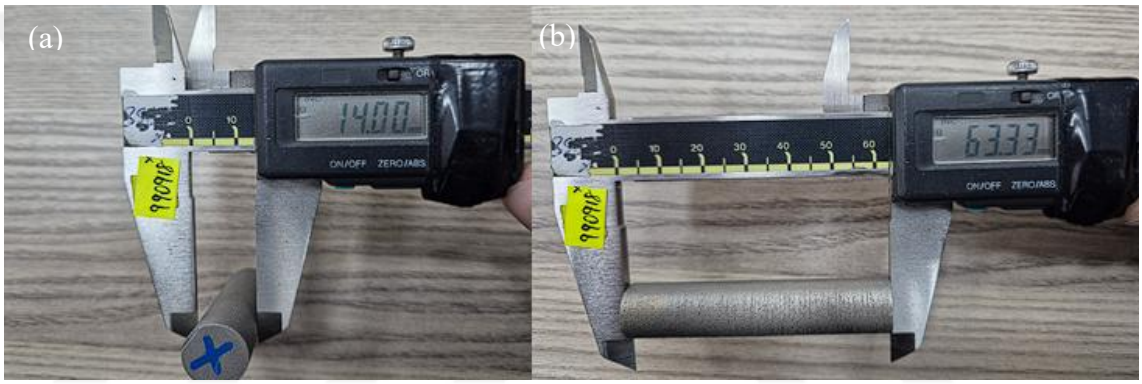
$$n = (1000 \times Vc) / (\pi \times D) \tag{3.1}$$

(3.1) formülündeki gibi hesaplanır. Formülde, n = iş mili devir sayısı (rpm), Vc = kesme hızı (m/dk), D = iş parçası çapı (mm) ve $\pi \approx 3,14$ kavramlarını ifade eder. Bu hesapla

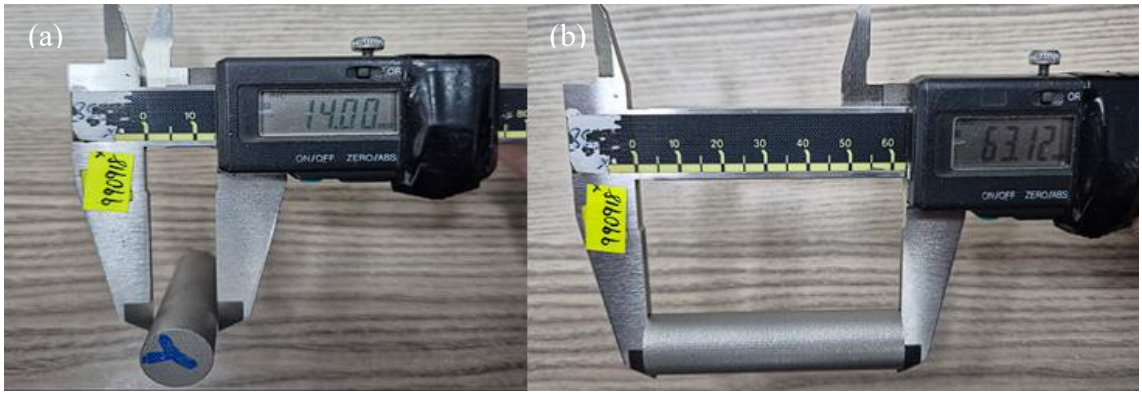
örneğin A1 numunesinin devir sayısını hesaplamak istediğimizde $A1_n = 1000*40/\pi*10$ formülünden $A1_n \approx 1274$ gelecektir.

4.2 Inconel 718 Deney Numunelerinin Üretimi

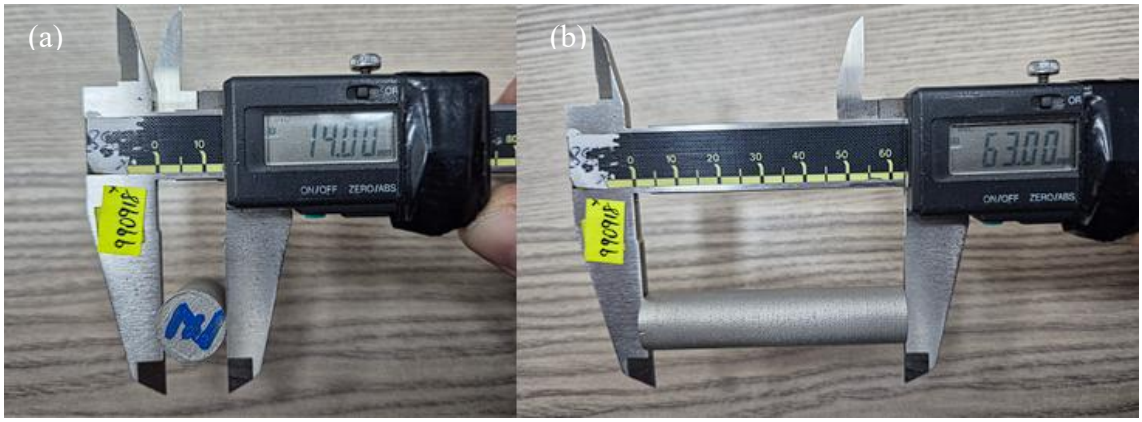
Planlanan çalışmada SLM metodu ile optimum koşullarda üretimi gerçekleştirilen 3 adet silindirik Inconel 718 parçalarının 2 tanesi ısıl işlemsiz kullanılmış olup (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3) buna karşın 1 tanesi ısıl işlemli işlenmiştir. (Şekil 4.4) Bu ısıl işleme tabi tutulan numuneye homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. a) İlk numunenin çap değeri b) İlk numunenin uzunluk değeri



Şekil 4.3. a) İkinci numunenin çap değeri b) İkinci numunenin uzunluk değeri



Şekil 4.4. a) Üçüncü numunenin çap değeri b) üçüncü numunenin uzunluk değeri

IN718 numunelerinin gaz atomizasyonu yöntemiyle tozlarının elde edildiği ve SLM cihazının tavsiye ettiği parametrelerle üretildiği kabul edilmektedir. Bahsedilen parametreler Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Ayrıca üretilen süper alaşım tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Inconel718 alaşımının baskı parametreleri (Hu et al., 2025b)

Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (µm)	Katman Kalınlığı (µm)	Lazer nokta Boyutu (µm)
200	1200	60	30	70

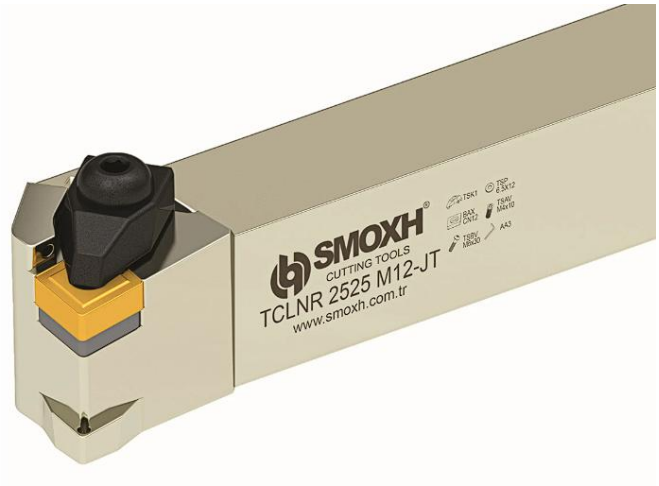
Çizelge 4.3. Inconel718 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Hu et al., 2025b)

Element	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al	Cu	C	B
%	53,44	19.2	17.32	5.16	3.17	1.0	0.54	0.13	0.03	0.005

4.3 Kesici Takımım Belirlenmesi

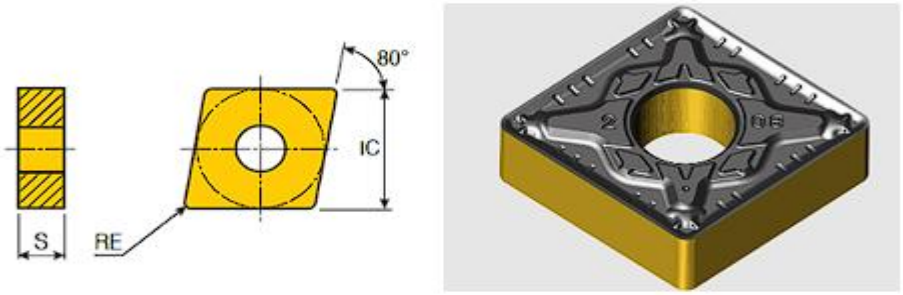
Bu işlem için C25xC25 ölçülerinde bir kater kullanılmasına karar verilmiştir. (Şekil 4.5) 25x25 mm boyutlarındaki kesit, çalışmada istediğimiz yüksek rijitliğe sahiptir. Bu rijitlik, dış çap tornalama sırasında meydana gelebilecek titreşimleri azaltarak kesme sürecini

daha kararlı hale getirir. Katerin sağlamlığı, özellikle Inconel gibi işlenmesi zor malzemelerde, iş parçasının yüzey kalitesini doğrudan etkiler.



Şekil 4.5. 25 x 25 Dış Çap Tornalama Kateri (URL 8)

Bu çalışmada kesici uç olarak CNMG uç kullanılmasına karar verilmiştir. Bu uçlar (Şekil 4.6), 80° köşe açısına sahip olup, bu açı uca yüksek dayanıklılık kazandırır. Bu uçlar aynı zamanda çift taraflı kullanıma uygun olup ekonomik avantaj sağlar. CNMG'nin 0° negatif açıya sahip olması, kesme kuvvetlerinin büyük kısmını uca yönlendirir. Bu, kesici ucun dayanımını artırır, ancak talaş kaldırma biraz daha güç olabilir. Fakat bu, Inconel gibi malzemelerde pozitif açılı uçların çabuk kırılmasına kıyasla daha güvenli bir çözümdür. CNMG uçların talaş kırıcı kanallara sahip olan türleri ise talaş tahliyesini kolaylaştırarak işleme verimliliğini artırır.

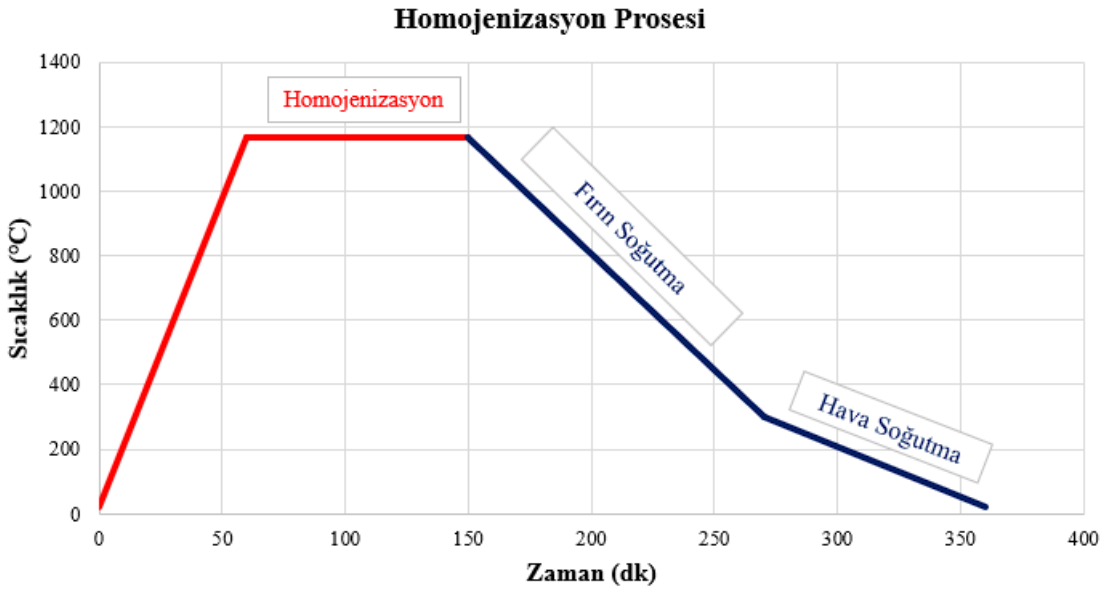


Şekil 4.6. CNMG 120408 Elmas Uç (URL 9)

4.4 Isıl İşlem Süreci

Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting, SLM), yönteminde ince metal tozları lazer ışını kullanılarak eritilip, üst üste katmanlar oluşturularak parça şekillendirildiği için, bu hızlı erime ve katılaşma süreci, parçanın içinde bazı mikroyapısal sorunlara yol açabilir. Örneğin, yüksek ısı farklarından dolayı parça içinde kalıntı gerilmeler (artık gerilmeler) oluşabilir. Ayrıca, malzemenin iç yapısında düzensizlikler, belirli elementlerin bir bölgede yoğunlaşması gibi mikrosegragasyonlar meydana gelebilir. Bu durumlar, parçanın dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü olumsuz etkileyebilir. Bu nedenlerle, parçaların kalitesini artırmak ve performanslarını iyileştirmek için üretim sonrasında ısıl işlemler uygulanır. Bu işlemlerden biri de Homojenizasyon Tavlaması'dır. Homojenizasyon tavlaması, parçanın yüksek bir sıcaklığa çıkarılarak belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulması ve ardından yavaşça soğutulması işlemidir. Bu işlem sayesinde, parçadaki kimyasal elementler daha dengeli bir şekilde dağılır ve malzemedeki kalıntı gerilmeler azalır. Böylece, parça daha dayanıklı ve stabil hale gelir.

Bu çalışmada da SLM yöntemiyle üretilmiş numuneye Bursa Uludağ Üniversitesi'nin ısıl işlem fırınında kontrollü bir şekilde homojenizasyon tavlaması uygulanmıştır. Numuneler önce oda sıcaklığından başlayarak 1 saat içinde 1165 °C'ye kadar 19,41 °C/dk hızla ısıtılmıştır. Ardından, bu sıcaklıkta 1,5 saat bekletilerek malzemenin iç yapısının homojenleşmesi sağlanmıştır. Daha sonra numuneler fırın içinde 2 saat boyunca 300 °C'ye kadar 2,5 °C/dk hızla fırın içinde soğutulmuş ve fırından çıkarılarak oda sıcaklığına kadar hava ortamında soğuması sağlanmıştır. Böylece toplam işlem süresi yaklaşık 6 saat sürmüştür. Sıcaklık ve zamanın işlem boyunca nasıl değiştiği, Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Homojenizasyon işlemi sıcaklık-zaman grafiği

Bu ısıl işlem sayesinde, parçanın mikroyapısal kusurlarının büyük ölçüde azaltılması, mekanik özellikleri ve dayanımının önemli ölçüde geliştirilmesi ve yapılan çalışma için kıyaslanacak parametre oluşturulması amaçlanmıştır.

4.5 Talaşlı İmalat Süreci

Bu çalışmada tercih edilen makine Fanuc kontrollü Vturn CNC torna tezgâhı (Şekil 4.8), 2 eksenli (X ve Z) bir makinedir. X ekseni çap yönlü, Z ekseni boyuna hareketi sağlar. Bu yapı sayesinde dış çap tornalama, iç çap işleme ve yüzey tornalama gibi temel işlemler yapılabilir. Makine, Fanuc kontrol ünitesi ile çalışır ve G kodlarıyla programlanır. G00, G01 gibi komutlar takım hareketlerini belirler. Üzerinde genellikle 8 veya 12 takımlı taret bulunur, bu da farklı kesici takımların otomatik olarak kullanılmasını sağlar. İş parçası ana mil ile döndürülür ve devir hızı panelden ayarlanabilir. Soğutma sistemi, kesme sırasında oluşan ısıyı azaltarak yüzey kalitesini artırır ve takım ömrünü uzatır. Makine manuel ve otomatik modda çalışabilir. Otomatik modda CNC programı çalıştırılırken, manuel modda takım konumlandırma yapılabilir. Çalışma öncesi referans noktası (home)

alınarak eksenler sıfırlanır. Çalışmadaki kullanım için cihaz aranan kriterleri karşılamaktadır.

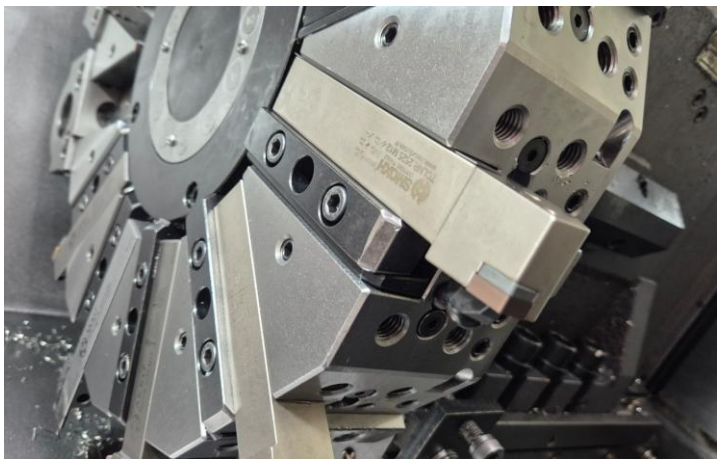


Şekil 4.8. Vturn CNC Torna Makinesi (URL 10)

Planlanan çalışmadaki aşamaları maddeler halinde açıklamak gerekirse;

- **Katerin CNC'ye yerleştirilmesi**

Sıfır kater ve kesici ucun (CNMG 120408) makinenin taretine takılması.



Şekil 4.9. Kesici ucun taretteki yeri

- **CNC yazılımına yapılacak işlem için G-Code'ların tanımlanması**

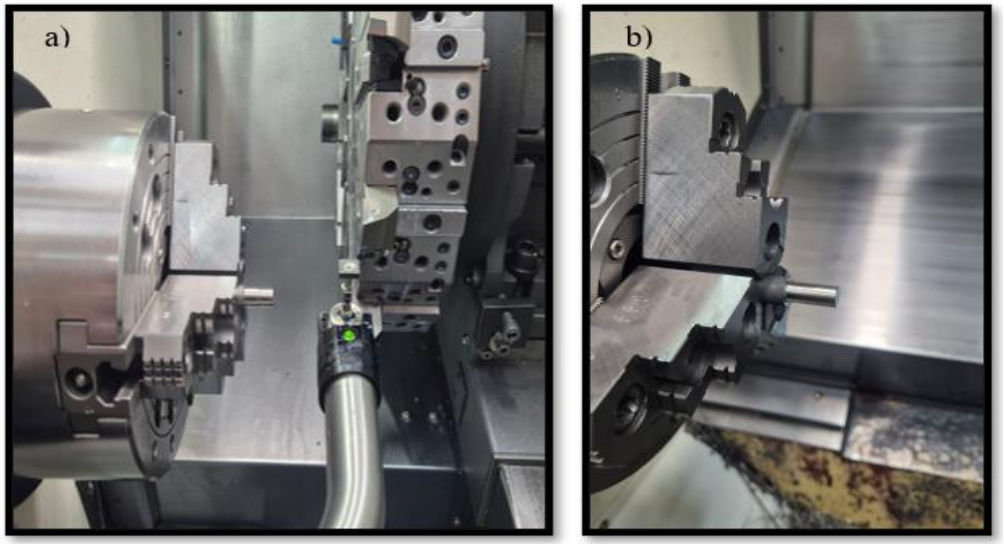
Önceden belirlenmiş olan işleme parametreleri (devir sayısı, ilerleme hızı, paso …) cihaz ayarlarına G-Code formatında işlenir.



Şekil 4.10. CNC kontrolcüsünün arayüz görünümü

- **Tornalama işleminin yapılması**

Belirlenen parametrelerde (Çizelge 4.1) tornalama başlatıldıktan sonra (Şekil 4.11) öncelikle A grubu numunelerin işlemesi yapılmıştır. Numuneler 14 mm'lik çaptan 10 mm'lik çapa indirileceği için, dış çaptan 0,4 mm kesme derinliği ile işlenmesi için bu tornalama işlemi 10 kere tekrarlanmıştır. Yapılan çap tornalama işleminin belirlenen kesme derinliğinde yapıldığına emin olmak amaçlı, işlem aralarında geometrik kontroller yapmakta fayda vardır. Bu çalışmada parça kumpas yardımıyla çapı ölçülerek kontrol sağlanmıştır. (Şekil 4.12) Ayrıca işleme esnasında parçanın çapı küçültülen tarafı işlenirken, çift yönlü işlemek adına diğer tarafı aynaya tutturularak sabitlenmiştir. Bu işlem yapılırken aynanın numuneyi ezmemesine özen gösterildi. Tüm tornalama süreçlerinde işleme esnasında soğutma amaçlı hava tutulmuştur.



Şekil 4.11. a) Isıl işlemsiz numune işleme esnasında b) Isıl işlemli numune işleme esnasında



Şekil 4.12. Proses içi çap uzunluğu kontrolü

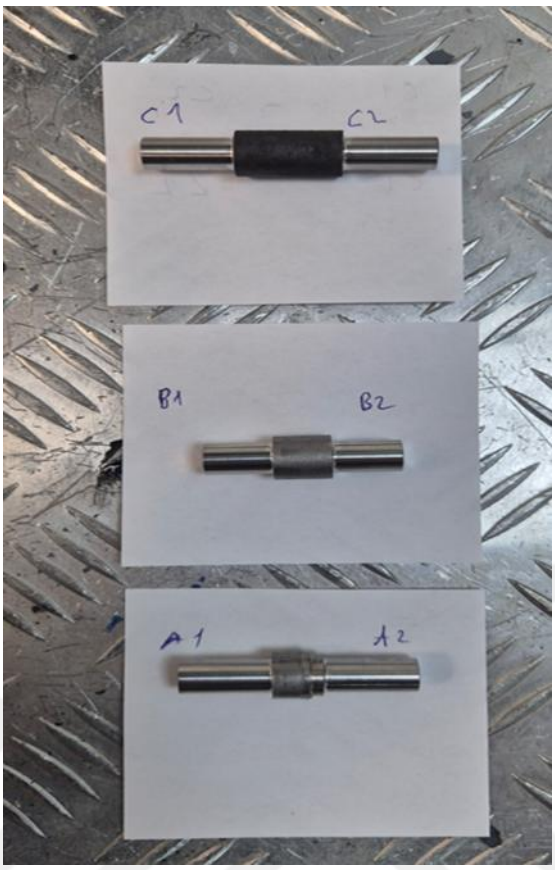
İkinci olarak aynı işlem ısıl işlemsiz B grubu numune için tekrarlanmıştır. Bu numunede önceden yapılan bir talaşlı işleme hatası kaynaklı sapma oluşmuştur. Deneye etki etmemesi için parça uzunluğunda bir 10 mm'lik bir kısım kısaltma yapılmıştır. Talaşsız numunelerin işlemesi tamamlandıktan sonra son olarak üçünü numune olan C grubu

numunesi daha yüksek devirle (70 m/dk) ancak farklı 2 kesme derinliği (0,4 mm ve 0,2 mm) ile işlenmiştir.

Süreç sonu değerlendirmek için, talaşlı imalat sürecinde ısıl işlem faktörü, 3 farklı torna devri ve 2 farklı kesme derinliği parametreleri belirlenmiştir. Bu şablonda incelemek üzere 3 farklı alt kategori oluşturur, bunlardan ilki sabit ilerleme hızı ve kesme derinliğinde devir sayısının etkisini gözlemektir. Devir sayısı etkisini karşılaştırmalı incelemek için A1, A2 ve B2 numuneleri kullanılabilirken, kesme derinliği incelemek için A2 ve B1 ısıl işlemsiz numuneleri incelemede kıyas kabul edilirken, ısıl işlemli kesme derinliği yorumlanması için C1 ve C2 numune çifti kullanılır. Son olarak Isıl işlemin talaşlı imalattaki yüzey profili ve iç yapıya etkisini incelemek için C1 ve B2 numuneleri değerlendirilmiştir. Bu numuneler aynı parametrelere sahip olup tek farkları ısıl işleme tabi tutulmaktır.

- **Tornalama prosesi sonrası**

Numunelerin yapılan işlem sonrası birbiriyle ayrışmayacak şekilde muhafaza edilmesine özen gösterilmiştir. (Şekil 4.13) Tornalama sonrası kater ve ucun son hali Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Talaşlı imalat sonrası numuneler

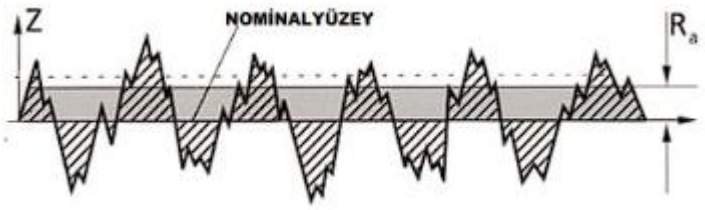


Şekil 4.14. Proses sonrası kater ve ucun görüntüsü

4.6 Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Yüzey pürüzlülüğü testi, bir malzemenin ya da işlenmiş bir parçanın yüzeyinin ne kadar düzgün ya da pürüzlü olduğunu ölçmek için kullanılır. Üretim süreçlerinde parça kalitesini kontrol eder ve fonksiyonel performansı değerlendirir. İşleme yöntemine bağlı olarak yüzeylerde mikroskobik seviyede girinti ve çıkıntıların meydana gelmesi söz konusudur. Bu küçük düzensizlikler, yüzeyin sürtünme, aşınma, yağ tutma kapasitesi veya sızdırmazlık gibi özelliklerini değiştirebilir.

Yüzey pürüzlülüğü, genellikle profilometre adı verilen cihazlarla ölçülür. Bu cihaz, yüzey üzerinde ilerleyerek yüksekliği değişen noktaları kaydeder ve sonuçları sayısal değerlere dönüştürür. En yaygın kullanılan ölçüm parametresi Ra (ortalama pürüzlülük) değeridir. Bu değer, yüzey profilinin ortalama sapmasını ifade eder. (Şekil 4.15)



Şekil 4.15. Ra değerinin gösterimi (URL 11)

Yapacağımız Test için Time marka TR200 model (Şekil 4.16) bir profilometrenin kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük testinde en önemli noktalardan biri cihazın kalibrasyon numunesiyle birlikte test öncesinde cihazın test edilmesidir. Bu işlem cihazın doğru ölçüm alması adına yapılan ön doğrulamalardan biridir. Sonraki aşamada parça ve profilometrenin temas yüksekliğinin kalibre edilmelidir. (Şekil 4.17) Yapılan ölçümlerde bu ön ayarlar yapıldıktan sonra ölçüme başlanmıştır. Ölçümün aynı numunenin 3 farklı yüzeyden aralarında 120 derecelik döndürmeler ile olacak şekilde yapılması

planlanmıştır, bu durum ölçümlerin değerleri arasında yakınlık varsa kararlı yoksa kararsız olarak değerlendirilmiştir. 3 farklı yüzeyden ölçüm yapılması kararlılık halinin de belirlenmesi açısından veri sağlamıştır. Sonuçlar 3 ölçümün ortalaması alınarak numunelerin sonuçları yorumlanacaktır.



Şekil 4.16. TIME TR200 Profilometre cihazı (URL 12)



Şekil 4.17. Cihaz ölçüm yüksekliği ayarı

4.7 Mikroyapı Testi

Mikroyapı testi, bir malzemenin iç yapısının mikroskop altında incelenerek tanımlanması amacıyla yapılan bir malzeme testidir. Bu test, malzemenin tane yapısı, faz dağılımı, segregasyonlar, gözenekler, çatlaklar ve diğer mikroskobik düzeydeki yapısal özelliklerini ortaya koyar. Mikroyapı, malzemenin mekanik özelliklerini, ısıl iletimini, korozyon direncini ve işlenebilirliğini doğrudan etkilediğinden, bu test üretim kalitesinin değerlendirilmesinde ve malzeme seçimi süreçlerinde kritik rol oynar.

Mikroyapı testi, özellikle ısıl işlem görmüş ya da özel üretim teknikleriyle (örneğin döküm, dövme, eklemeli imalat) elde edilmiş parçaların değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılır. Bu sayede, istenilen yapısal özelliklerin elde edilip edilmediği anlaşılır ve gerektiğinde üretim parametrelerinde iyileştirmelere gidilebilir.

Bu çalışma için, Nikon'un Eclipse MA100 model metalürjik mikroskobu tercih edilmiştir. (Şekil 4.18) Cihaz, yüksek çözünürlüklü optik yapısı sayesinde, farklı büyütme seviyelerinde net ve detaylı görüntüler sunarak malzeme iç yapısının hassas şekilde incelenmesini sağlamıştır. Reflektif (yansıtmalı) ışık kaynağı ile çalışan bu cihaz, özellikle metal yüzeylerdeki faz dağılımı, tane sınırları, gözenekler ve diğer mikro yapısal detayların belirlenmesinde oldukça etkilidir.



Şekil 4.18. Nikon Eclipse MA100

Mikroyapı testlerinde Eclipse MA100, sunduğu optik kalite ve çeşitli objektif seçenekleri ile geniş büyütme aralıklarında analiz yapabilme olanağı çalışma için aranan kriteri sağlamıştır. Yapılan ölçümlerde cihazın sırasıyla; 50x, 200x, 500x ve 1000x'lik mercekleri kullanılarak veriler toplanmıştır. (Şekil 4.19)



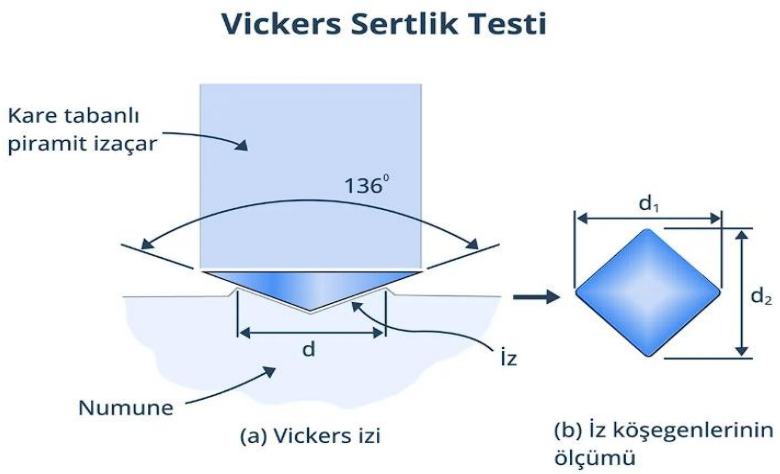
Şekil 4.19. Mikroyapı testinden örnek görüntü

4.8 Sertlik Testi

Sertlik testi, bir malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvet karşısında deformasyona gösterdiği direncin ölçülmesi esasına dayanır. Bu test sayesinde, malzemenin aşınmaya, darbeye ve sürekli yüke karşı dayanımı hakkında çıkarım yapılabilir. Sertlik testlerinden Vickers sertlik testi, özellikle laboratuvar ortamlarında ve hassas ölçümler gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, piramit şeklindeki elmas uç, belirli bir kuvvetle malzeme yüzeyine bastırılır. Oluşan iz çaprazlarının uzunluğu optik mikroskop yardımıyla ölçülür. Kuvvetin büyüklüğü ve iz boyutları göz önünde bulundurularak yapılan bu hesaplama, oldukça hassas sonuçlar verir ve ölçümler üzerinden Vickers sertlik değeri (HV) hesaplanır.

Vickers yöntemi hem sert hem yumuşak malzemelerde uygulanabilir olmasıyla avantajlı bir yöntemdir, ayrıca çok küçük parçaların ya da belirli mikroyapı bölgelerinin

sertliklerinin ölçülmesinde oldukça kullanışlıdır. Bu nedenle, mikroyapı testleriyle birlikte kullanıldığında malzemenin farklı bölgelerindeki özellik değişimleri detaylı bir şekilde analiz edilebilir.



Şekil 4.20. Vickers sertlik testi ölçüm metodu (URL 13)

Vickers yöntemi prensip olarak numunenin yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında daldırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesinden ibarettir. (Şekil 4.20)

$$HV = (0{,}1854) \times (F \times d\text{^}2) \tag{3.2}$$

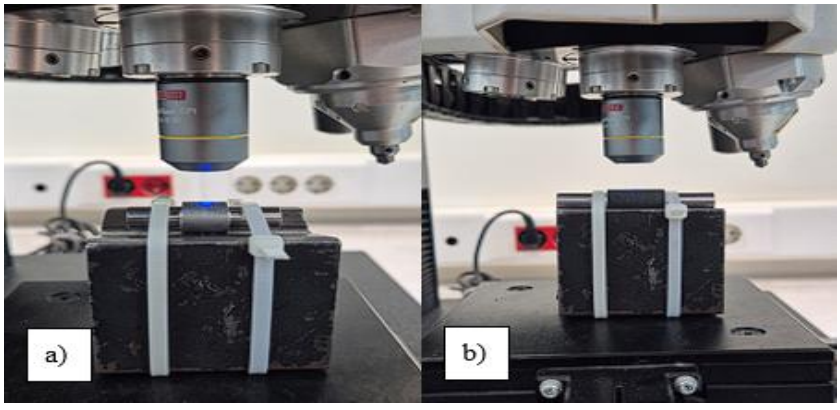
(3.2)'de belirtilen formülde, F numuneye uygulanan kuvveti (kgf), d ise köşegenlerin ortalaması değerini (mm) ifade eder. HV değerinin birimi "kgf/mm^2" 'dir.

Çalışmada kullanılan test cihazı Emco-Test firmasının DuraScan Modelidir. (Şekil 4.21) Bu model kullanılarak ısıl işlem faktörünün sertlik üzerindeki etkisini gözlemlemek için, ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz numunelere sertlik testi uygulanmıştır.



Şekil 4.21. Emco-Test DuraScan sertlik ölçüm cihazı

Numuneler silindirik olduğu için öncesinde ölçülecek yüzeye taşlama ile düzleştirme yapılmıştır. Ölçümlerin numunelerin sabitlenerek yapılması amacıyla V yatak ve plastik malzeme kullanılmıştır, numunelerin sabitliğinden emin olunduktan sonra ölçüm yapılmıştır. (Şekil 4.22) Isıl işlemsiz numune olarak işlenmeyen yüzeyinin ölçüm için gereken alana sahip olması sebebiyle B numunesinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.22. a) Isıl işlemsiz numunenin sertlik ölçümü b) Homojenizasyon tavlaması uygulanan ısıl işlemli numunenin sertlik ölçümü

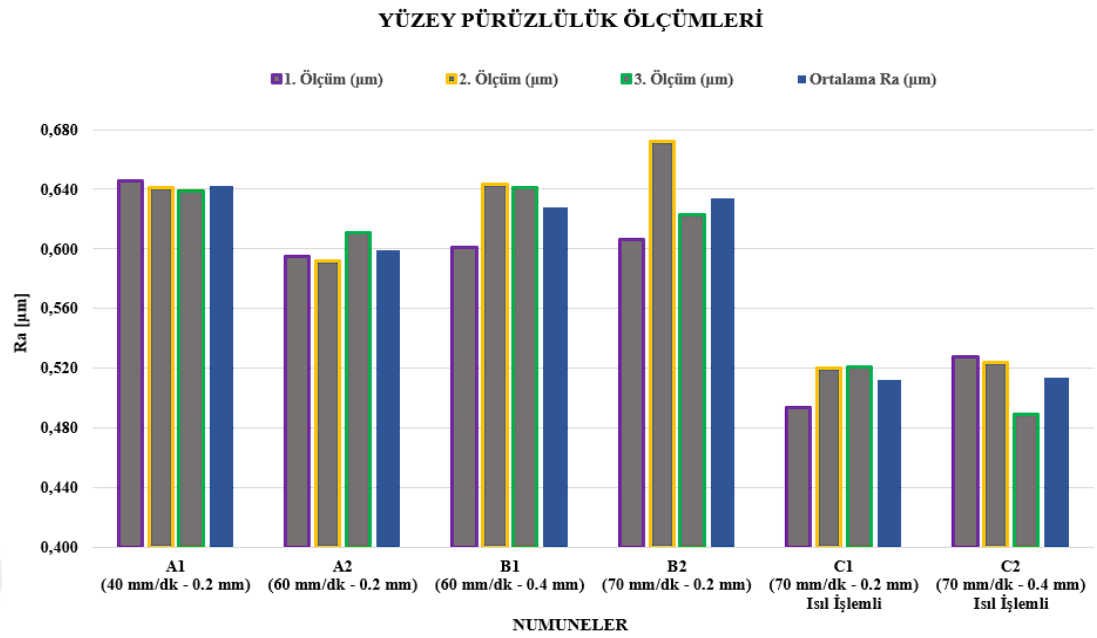
5. BULGULAR

5.1 Yüzey Pürüzlülüğü Testi Verileri

TIME TR200 Profilometre cihazı kullanılarak, farklı talaşlı imalat parametrelerine ve ısıl işlem adımına tabi tutulan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve elde edilen veriler tablo halinde sunulmuştur. (Çizelge 5.1) Ölçümler, her numune üzerinden farklı noktalardan alınan ölçüm değerleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm değerlerinin karşılaştırmalı grafik hali Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülük testi ölçüm verileri

Numuneler	1. Ölçüm (µm)	2. Ölçüm (µm)	3. Ölçüm (µm)	Ortalama Ra (µm)
A1	0,646	0,641	0,639	0,642
A2	0,595	0,592	0,611	0,599
B1	0,601	0,643	0,641	0,628
B2	0,606	0,672	0,623	0,634
C1	0,494	0,520	0,521	0,512
C2	0,528	0,524	0,489	0,514

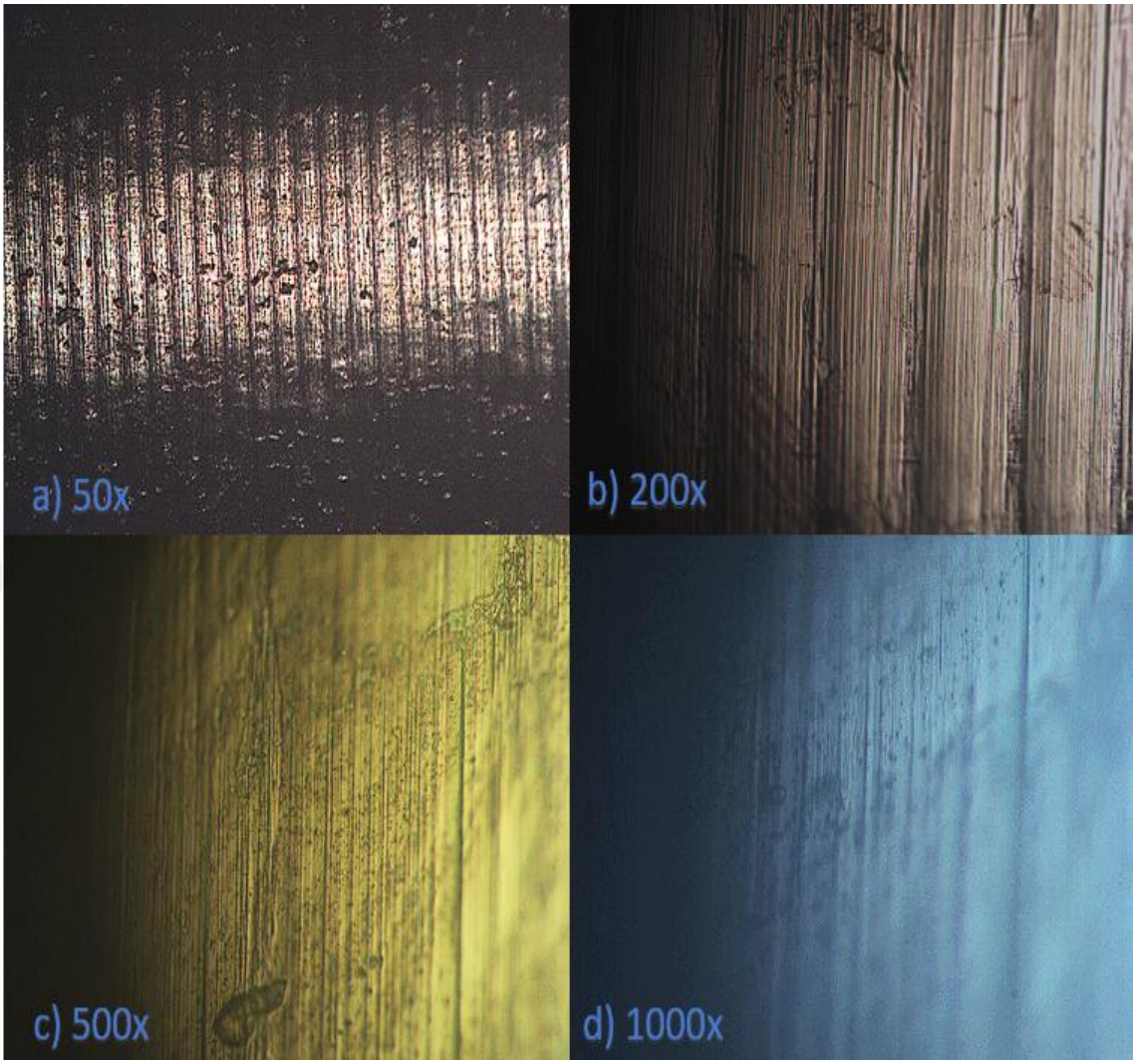


Şekil 5.1. Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçüm grafiği

Ölçülen numunelerden 40 m/dk kesme hızı ve 0,2 mm kesme derinliği ile işlenen A1 numunesi birbirine en yakın ölçüm sonuçlarını veren numune olmuştur. A2 numunesi A1'den farklı olarak daha yüksek kesme hızı 60 m/dk ile işlenmiş olup, B2 ise en yüksek kesme hızı olan 70 m/dk hızla işlenmiştir. Numuneler sonuçlar kısmında karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Yine 70 m/dk hızla işlenen ısıl işlemli C1 ve C2 numunelerinde ise 0,2 mm ve 0,4 mm'lik kesme derinliklerinde işleme yapılmıştır. (Çizelge 4.1)

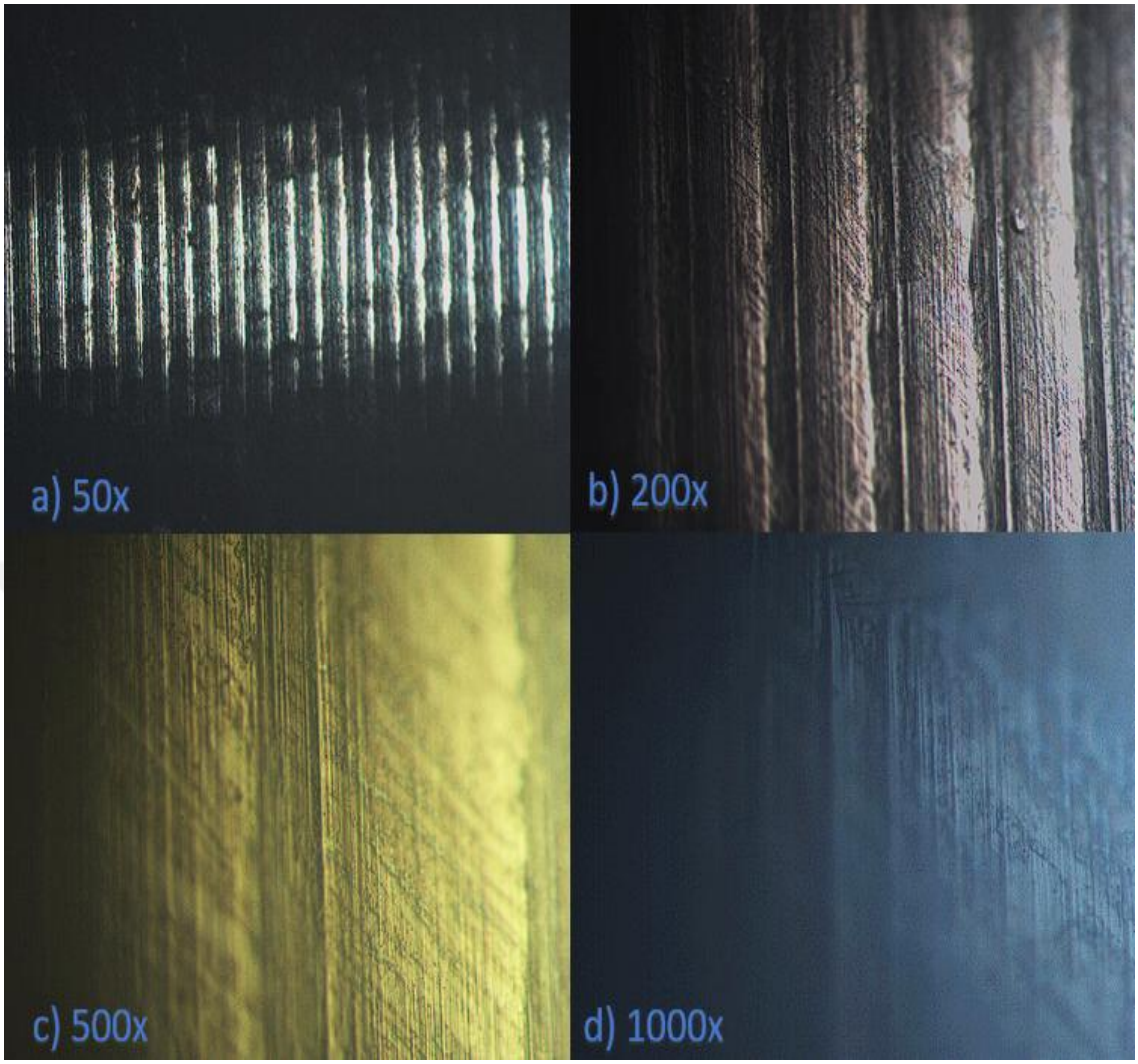
5.2 Mikroyapı Testi Verileri

Nikon'un Eclipse MA100 mikroskobundan görüntülenen iç yapılarda numunelere sırasıyla; 50x, 200x, 500x ve 1000x zoom özelliğine sahip mercekler ile görüntüleme yapılmıştır. A numunesine ait, A1 ve A2 numuneleri Şekil 5.2 ve 5.3'de, B numunesine ait B1 ve B2 numuneleri Şekil 5.4 ve 5.5'de ve homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulan C numunesine ait, C1 ve C2 numuneleri Şekil 5.6 ve 5.7'de gösterilmiştir.



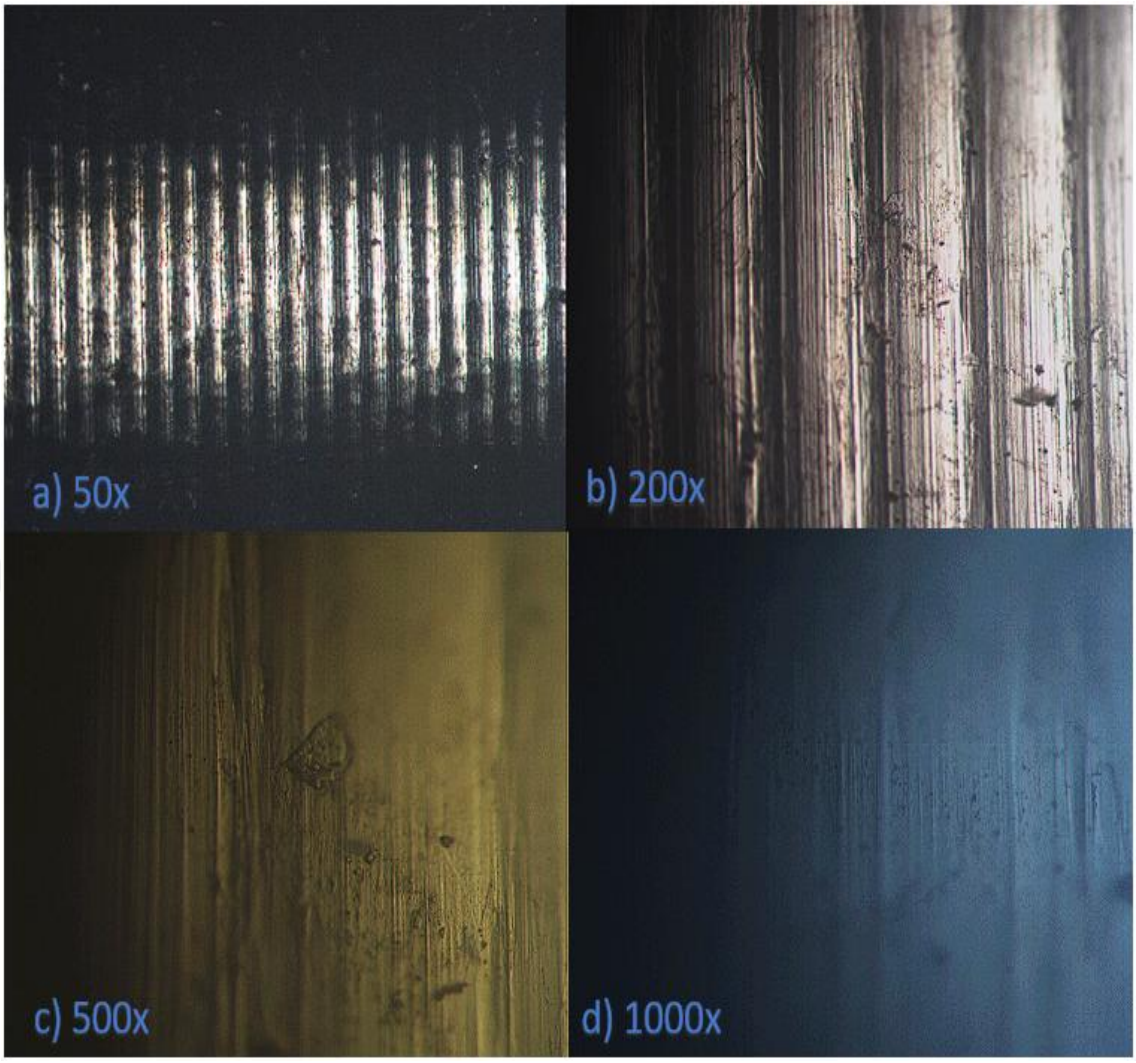
Şekil 5.2. A1 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü

A parçasına ait, A1 numunesinin iç yapı görünümü Şekil 5.2'deki gibidir. A1 numunesinin talaşlı imalat parametreleri; 40 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dk ilerleme hızı ve 0,2 mm kesme derinliği şeklindedir. Numune ısıl işleme tabi tutulmayıp SLM tezgahından üretildiği hali ile işlenmiştir. Mikroyapısı incelendiğinde düşük devirli talaşlı işlemeye bağlı işleme izlerinin daha seyrek olduğu gözlenmiştir.



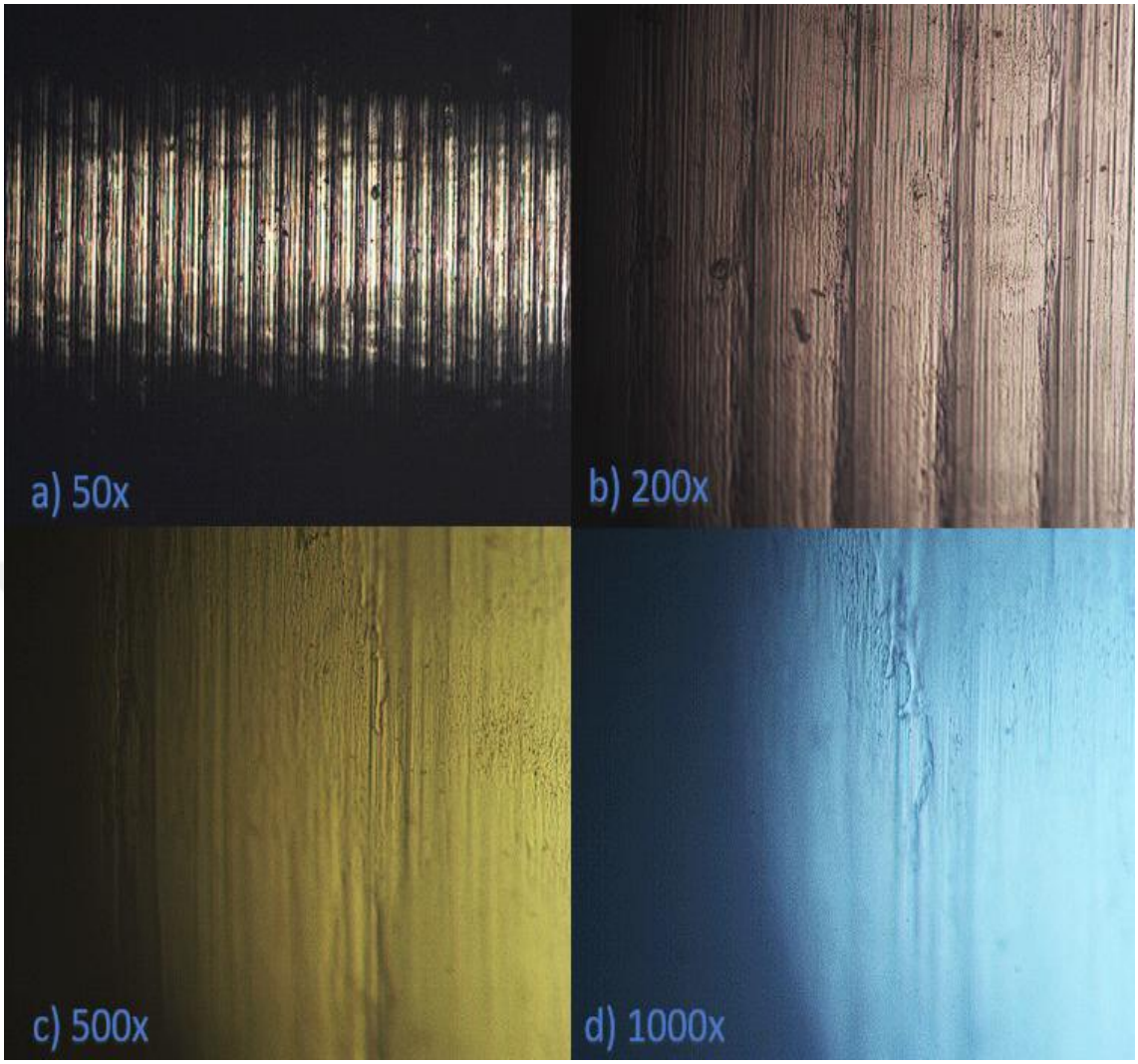
Şekil 5.3. A2 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü

A parçasına ait, A2 numunesinin iç yapı görünümü Şekil 5.3'deki gibidir. A2 numunesinin talaşlı imalat parametreleri; 60 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dk ilerleme hızı ve 0,2 mm kesme derinliği şeklindedir. Numune ısıl işleme tabi tutulmayıp SLM tezgahından üretildiği hali ile işlenmiştir. Yapılan işlemenin diğer numunelere kıyasla daha düşük kalitede olduğu belirlenmiştir.



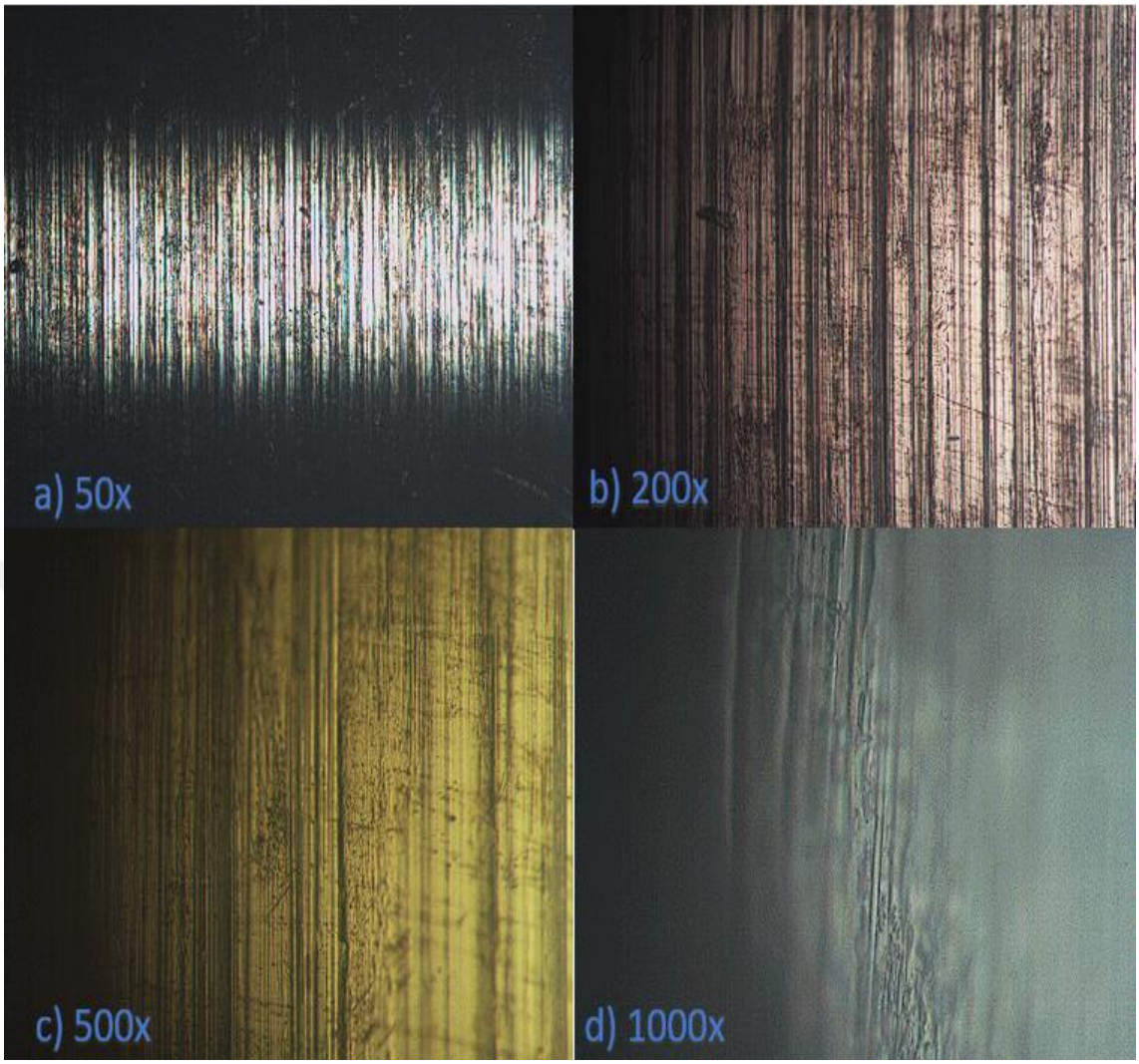
Şekil 5.4. B1 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü

B parçasına ait, B1 numunesinin iç yapı görünümü Şekil 5.4'deki gibidir. B1 numunesinin talaşlı imalat parametreleri; 60 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dk ilerleme hızı ve 0,4 mm kesme derinliği şeklindedir. Numune ısıl işleme tabi tutulmayıp SLM tezgahından üretildiği hali ile işlenmiştir. Yüzeydeki işleme izlerinin sıklığı aynı parametrelere sahip farklı kesme derinliğindeki numuneyle kıyaslandığında daha fazla olduğu gözlenmiştir.



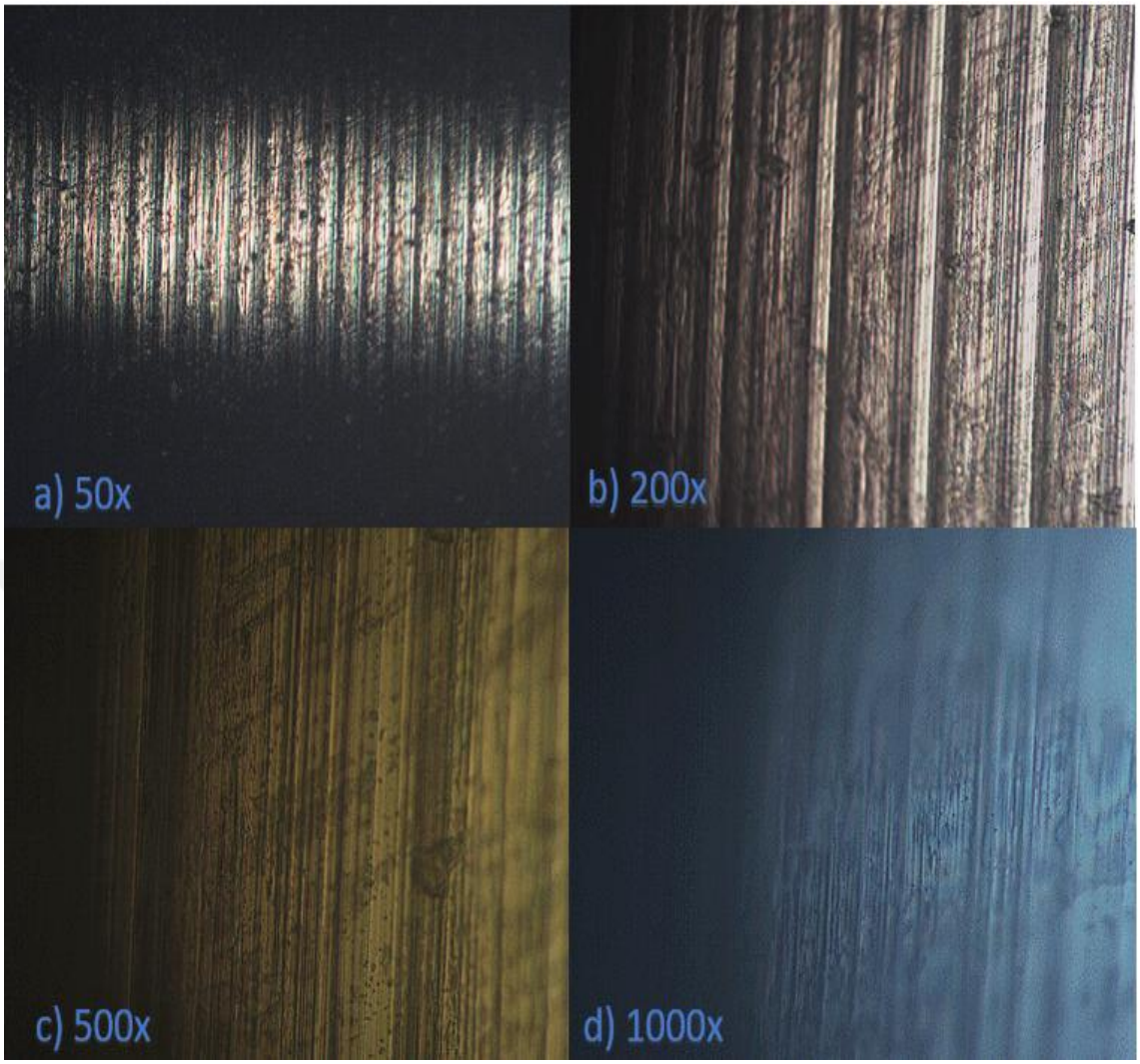
Şekil 5.5. B2 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü

B parçasına ait, B2 numunesinin iç yapı görünümü Şekil 5.4'deki gibidir. B2 numunesinin talaşlı imalat parametreleri; 70 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dk ilerleme hızı ve 0,2 mm kesme derinliği şeklindedir. Numune ısıl işleme tabi tutulmayıp SLM tezgahından üretildiği hali ile işlenmiştir. Oluşan görüntülerde yüzeydeki işleme izlerinin az belirgin olması tornalama işlemi ile oluşan dağlamanın daha dengeli olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.6. C1 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü

C parçasına ait, C1 numunesinin iç yapı görünümü Şekil 5.4'deki gibidir. C1 numunesinin talaşlı imalat parametreleri; 70 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dk ilerleme hızı ve 0,2 mm kesme derinliği şeklindedir. Numune homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Farklı ölçeklerdeki görünümünde yüzeydeki işleme izlerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir.



Şekil 5.7. C2 numunesinin; a) 50x yakınlaştırılmış görüntüsü, b) 200x yakınlaştırılmış görüntüsü, c) 500x yakınlaştırılmış görüntüsü ve d) 1000x yakınlaştırılmış görüntüsü

C parçasına ait, C2 numunesinin iç yapı görünümü Şekil 5.4'deki gibidir. C2 numunesinin talaşlı imalat parametreleri; 70 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dk ilerleme hızı ve 0,4 mm kesme derinliği şeklindedir. Numune homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Numunedeki mikroyapı incelemelerinde yüzeyinin daha yoğun bir görünüme sahip olup kesici takım ile etkileşiminin daha derinlemesine olduğu fark edilmiştir. Özellikle 1000x görünümünde yüzeydeki işleme izlerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir.

5.3 Sertlik Testi Verileri

Isıl işlemli yüksek devirle işlenmiş C numunesinin sertlik ölçümü 401 HV olarak hesaplanmıştır. Elmas ucun numune yüzeyinde bıraktığı iz ve cihaz üzerindeki gösterimi Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



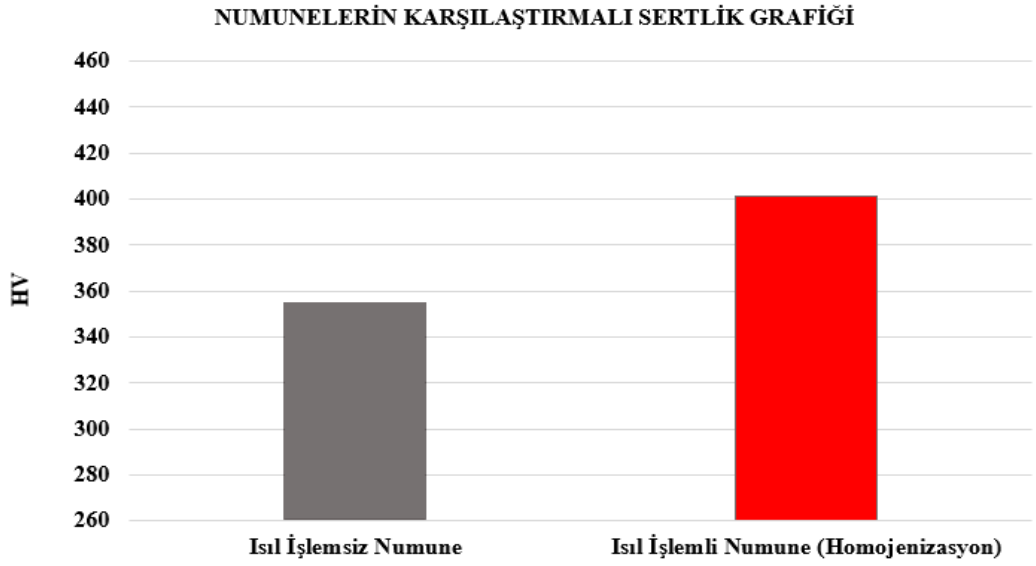
Şekil 5.8. Isıl işlemli C numunesinin sertlik ölçümünde cihaz görünümü

B Numunesine uygulanan yük sonucu sertlik değeri 355 HV olarak hesaplanmıştır. Yükün numune üzerindeki bıraktığı iz ve ölçüm ekranı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Isıl işlemsiz sertlik ölçümünde cihaz görünümü

Ölçümler sonucu ısıl işlemli numunenin, ısıl işlemsiz numuneye oranla %12,9 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yapılan ölçümün kıyaslamalı grafik gösterimi Şekil 5.10'da yer almaktadır.



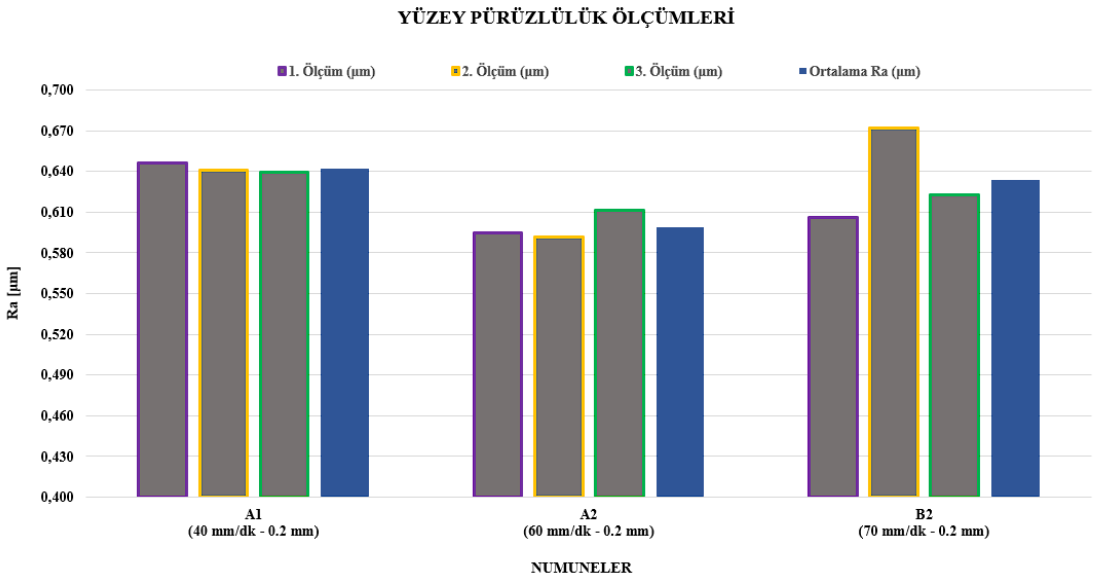
Şekil 5.10. Isıl işlemli ve ısıl işlemsiz numunelerin karşılaştırma grafiği

6. SONUÇ ve TARTIŞMA

Çalışma üretilen 3 numune içinde planlandığı çizgide ilerlemiş ve tamamlanmıştır. Bu bölümünde, materyal ve yöntem bölümünde belirtildiği üzere 3 farklı faktörün yapılan testler üzerindeki etkisi bulgular bölümündeki veriler ile incelenecektir.

- **Kesme hızı parametresinin etkisi**

Üretim ve sonrası parametrelerin sabit tutulup farklı devir sayısı ile işlenen numunelerde bu etkinin karşılaştırmalı incelemek için A1, A2 ve B2 numuneleri kullanılmıştır. Bu numunelerin tümü ısıl işlemsiz olup, değerlendirme yüzey pürüzlülük ve mikroyapı test sonuçları üzerinden yapılmıştır. Öncelikle yüzey pürüzlülük ölçümlerinde (Şekil 6.1), A1'in 40 kesme hızına sahip numunenin sonuçları daha kararlı (yapılan ölçümler sayısal olarak birbirine daha yakındır.) olup, A2'nin yani 60 m/dk kesme hızına sahip numunenin ölçümleri de kararlı sayılabilecek düzeyde olup veri olarak en düşük değere sahip olduğu için en pürüzsüz yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.1. A1, A2 ve B1 numunelerinin karşılaştırmalı yüzey pürüzlülük ölçümleri

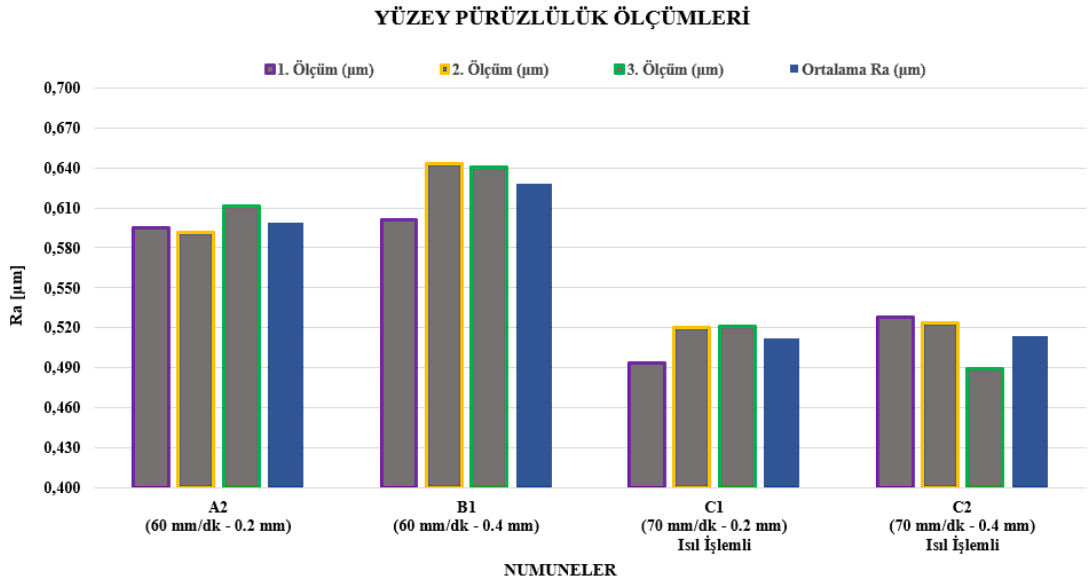
B2 numunesi yani en yüksek devir hızına (2228 rpm) sahip numune de ise ölçüm sonuçları daha düşük kararlılıktadır. Bu da yüzey pürüzlülüğü açısından her yüzeyinde aynı olmadığı anlamına gelmektedir. A1 numunesi de ölçüm ortalaması olarak B2'ye yakın çıkmıştır fakat A1'in ölçümleri daha kararlı bir seviyede olduğu için daha tutarlıdır. Numunelerinin mikroyapı görüntüleri üzerinden yorumlama yapmak gerekirse; 50x optik yakınlıkta ilk göze çarpan numuneler arasındaki kesme çizgilerinin sıklığındaki değişimdir. Düşük devirli A1 numunesinde daha seyrek çizgiler varken A2 ve B2 numunesinde bu sıklık daha da artıyor. Diğer optik merceklerde fark edilen durum ise B2 numunesi diğer numunelere kıyasla daha az dağlamaya ve deformasyona maruz kalmış bir görünüm sergilemiştir. Kıyaslanan numunelerde işleme 0,2 mm kesme derinliği parametresiyle yapılmıştır.

- **Kesme derinliği parametresinin etkisi**

Kesme derinliği incelemek için A2 ve B1 ısıl işlemsiz numuneleri incelemede kıyas kabul edilirken, ısıl işlemli kesme derinliği yorumlanması için C1 ve C2 numune çifti kullanılır. A2 ve B1 numunelerinin ikisi de 60 m/dk kesme hızıyla işlenirken 0,1 mm/dk ilerleme hızıyla işlenirken, A2 numunesi 0,2 mm kesme derinliğine sahiptir. B1 numunesi ise 0,4 mm kesme derinliği ile işlenmiştir. C1 ve C2 numunelerinde ise aynı kesme derinliği değerleri kıyasları 70 m/dk hızla işlenirken ilaveten de homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuşlardır. C1, 0,2 mm kesme derinliği ile işlenmişken C2 ise 0,4 mm kesme derinliği ile işlenmiştir.

Yüzey pürüzlülük değerleri açısından A2 ve B1 numuneleri kıyaslandığında, iki numune de kararlı sayılabilecek bir ölçüm tekrarı sergilerken ortalama değerlere bakıldığında A2'nin ortalama Ra değeri 0,599 µm iken B1 ise 0,628 µm olarak ölçülmüştür. İki numune arasında kesme derinliği daha düşük olan A2 numunesi daha pürüzsüzdür. C1 ve C2 numunelerinin yüzey pürüzlülük kıyaslamasında ölçümler kararlılık yönünden kararlı sayılabilecek bir yakınlıkta iken ortalama Ra değerleri arasındaki fark yok denecek kadar azdır. C1 numunesinin ortalama Ra değeri 0,512 µm iken C2 ise 0,514 µm olarak ölçülmüştür. Isıl işlemli numunelerde 0,2 mm ve 0,4 mm'lik kesme derinlikleri arasında

belirgin bir fark gözlenmemişken değerlerin ısıl işlemsiz numunelerden yaklaşık %21,9 daha düşük pürüzsüzlük değerine sahiptir.



Şekil 6.2. A2-B1 ve C1-C2 numune çiftlerinin karşılaştırmalı yüzey pürüzlülük ölçümleri

Mikroyapı ölçümleri karşılaştırıldığında, A2 ve B1 numunelerinden 500x'lik mercekten üzerinden alınan görüntülerde B1 numunesindeki yüzey dağlanmasının daha fazla olduğu görülmüştür. C1 ve C2 numunelerinin verileri dağlanmış ve özellikle B2 numunesine kıyasla dağlanmış ve lekeli bir görünümü vardır. Bu etkinin oluşmasında yüksek kesme hızının etkisi araştırılmalıdır. Bu durum haricinde ölçümlerde tespit edilen majör bir farklılık gözlenmemiştir.

- **Isıl işlem parametresinin etkisi**

Isıl işlem parametresini incelemek için B2 ve C1 numuneleri kıyaslanmıştır. Talaşlı imalat parametreleri olarak en yüksek kesme hızına (70 m/dk) sahip numunelerdir. Bu numuneler 0,2 mm'lik kesme derinliği ile işlenmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri kıyaslandığında C1 numunesinin ortalama Ra değeri 0,512 µm iken, B2

numunesinin ortalama Ra değeri 0,634 μm olarak hesaplanmıştır. Bu fark karşılaştırılırken B2'nin kararlı bir ölçüme sahip olmadığı ve ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ile en düşük arasında 0,066 μm'lik bir fark oluştuğu göz önünde bulundurulmalıdır. Ortalama değerler incelendiğinde C1 numunesi net olarak B2 numunesinden daha pürüzsüzdür. Ancak, mikroyapı ölçümlerinde B2'de gözlenen yapı C1'den daha muntazam ve işleme sonrası deformasyona daha az uğramış bir görünüme sahiptir. (Çizelge 5.1)

Mevcut testlere ilaveten ısıl işlem etkisini gözlemlemek için uygulanan ve talaşlı imalata uğramayan yüzeylerinden ölçülen sertlik testlerinde homojenizasyon tavlaması uygulanmış C numunesi, ısıl işlemsiz B numunesinden 46 HV'lik bir farkla daha sert olduğu ölçülmüştür. (Şekil 5.10) Tüm numuneler arasındaki ortalama Ra yüzey pürüzlülük değerlerinde de C numuneleri (C1 ve C2) diğer ısıl işlemsiz numunelerden daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Bu verileri karşın C numuneleri mikroyapı görüntülemelerinde diğer numunelere göre daha fazla dağlanmış ve deformasyona uğramış bir görünüm sergilemektedir. Sonuç olarak SLM yöntemi ile üretilen özdeş 3 numune arasında homojenizasyon tavlaması ile sertlik kazanımı elde edilirken özdeş üretim parametrelerindeki numunelere kıyasla daha pürüzsüz yüzey elde edilmiştir.

Gelecekteki çalışmaların, daha çok ölçüm verisi alınarak yapılması, daha fazla parametre ve daha fazla numune ile tekrarlanması hali hazırdaki verilerin değerlerini, gözlemlerini doğrulamak ve literatüre fayda sağlamak açısından önemlidir. Eklemeli imalatın giderek artan kullanımına ilaveten talaşlı imalat ile birlikte hibrit bir üretim modellerinin tercih edilmesi bu alanda yapılacak olan parametre çalışmalarının önemini arttırmaktadır.

KAYNAKLAR

Amaya-Rivas, J. L., Perero, B. S., Helguero, C. G., Hurel, J. L., Peralta, J. M., Flores, F. A., & Alvarado, J. D. (2024). *Future trends of additive manufacturing in medical applications: An overview. In Heliyon (Vol. 10, Issue 5).* Elsevier Ltd.

Cader, M., & Kińskı, W. (2020). *Effect of Changing the Parameters of the Multi Jet Fusion (MJF) Process on the Spatial Objects Produced. Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering,* 11(4), 61–72.

Calleja, A., Urbikain, G., González, H., Cerrillo, I., Polvorosa, R., & Lamikiz, A. (2018). *Inconel®718 superalloy machinability evaluation after laser cladding additive manufacturing process. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 97(5–8), 2873–2885.

Dharmalingam, G., Baskar, R., Arun Prasad, M., & Salunkhe, S. (2022). *Development of microstructure - processing correlations of Inconel718 through additive manufacturing. Materials Today: Proceedings*, 68, 1891–1897.

Gallmeyer, T. G., Moorthy, S., Kappes, B. B., Mills, M. J., Amin-Ahmadi, B., & Stebner, A. P. (2020). *Knowledge of process-structure-property relationships to engineer better heat treatments for laser powder bed fusion additive manufactured Inconel 718. Additive Manufacturing,* 31.

Hu, B., Yang, S., & Shao, C. (2025a). *Investigation of post-heat treatment on precipitation kinetics and mechanical properties Inconel 718 superalloy additively manufactured by selective laser melting. Materials* Today Communications, 44.

Jiang, R., Mostafaei, A., Pauza, J., Kantzos, C., & Rollett, A. D. (2019). *Varied heat treatments and properties of laser powder bed printed Inconel 718. Materials Science and Engineering:* A, 755, 170–180.

Lee, J. Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. In Applied Materials Today* (Vol. 7, pp. 120–133). Elsevier Ltd.

Mahesh, K., Philip, J. T., Joshi, S. N., & Kuriachen, B. (2021). *Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures. In Materials and Manufacturing Processes* (Vol. 36, Issue 7, pp. 753–791). Bellwether Publishing, Ltd.

Mostafa, A., Rubio, I. P., Brailovski, V., Jahazi, M., & Medraj, M. (2017). *Structure, texture and phases in 3D printed IN718 alloy subjected to homogenization and HIP treatments.* Metals, 7(6).

Özer, G. (2020). *Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme*. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.

Sanviemvongsak, T., Monceau, D., & Macquaire, B. (2018). *High temperature oxidation of IN 718 manufactured by laser beam melting and electron beam melting: Effect of surface topography.* Corrosion Science, 141, 127–145.

Sing, S. L., Tey, C. F., Tan, J. H. K., Huang, S., & Yeong, W. Y. (2019). *3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing. In Rapid Prototyping of Biomaterials: Techniques in Additive Manufacturing* (pp. 17–40). Elsevier.

Song, Z., Gao, W., Wang, D., Wu, Z., Yan, M., Huang, L., & Zhang, X. (2021). *Very-high-cycle fatigue behavior of inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting at elevated temperature.* Materials, 14(4), 1–16.

Sürmen, H. K. (2019). *Eklemeli imalat (3b baskı): teknolojiler ve uygulamalar.* Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, 24(2), 373–392.

Karagöz, İ., Bekdemir, A. D., & Tuna, Ö. (2021, Aug). *3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme.* Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(4), 1186-1213.

INTERNET KAYNAKLARI

URL 1: From Pixels to Prototypes The Engineer's Exploration of Additive Manufacturing Article Erişim Adresi https://www.researchgate.net/publicationPrototypes_The_Engineers_Exploration_of_Additive_Manufacturing

URL 2: What are SLA, DLP, and LCD resin 3d printers? Erişim Adresi https://www.creality3dofficial.com/blogs/news/what-are-sla-dlp-and-lcd-resin-3d-printers-what-are-their-molding-principles-and-differences

URL 3: Ergiyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modelling -FDM) Erişim Adresi https://medium.com/@gamzeeren/ergiyik-biriktirme-modelleme-fused-deposition-modelling-fdm-b81aab9f0b25

URL 4: 3D Baskı Nedir- 3D Baskı Teknolojileri Nelerdir? Erişim Adresi https://3dedi.com/blog/3d-baski-nedir.html

URL 5: SLM 3 boyutlu baskı teknolojisi Erişim Adresi https://tr.wikipedia.org/wiki/SLM_3_Boyutlu_Bask%C4%B1_Teknolojisi

URL 6: 3D yazıcılarda üretim yöntemleri Erişim Adresi https://hitit3d.blogspot.com/2016/12/3d-yazicilarda-uretim-yontemleri.html

URL 7: Atomizasyon yöntemleri Erişim Adresi https://rahmiunal.net/dersler/toz/3atomisation.pdf

URL 8: CNMG Dış çap tornalama Kateri Bilgileri Erişim Adresi https://www.cnctakimlar.com/

URL 9: CNMG 120408 elmas uç bilgileri Erişim Adresi https://www.imc-companies.com/taegutec/ttkCatalog/Family

URL 10: Vturn CNC makine bilgileri Erişim Adresi https://www.ltsmaskin.no/en/products/vturn-cnc-lathe-victor

URL 11: Yüzey pürüzlülük Ra değeri hesaplama bilgileri Erişim Adresi https://www.muhendislikbilgileri.com/

URL 12: Time TR200 ölçüm cihazı bilgileri Erişim Adresi https://kummetal.com.tr/urunler/puruzluluk-olcum-cihazi-time-200/

URL 13: Vickers sertlik testi ölçüm metodu Erişim Adresi https://xometry.pro/tr/makaleler/metallerde-sertlik-testleri/