

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA PLATFORMLARI ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ELEKTRON IŞIN ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN INCONEL
718 SÜPERALAŞIMLARDA ISIL İŞLEM VE SICAK İZOSTATİK
PRESLEMENİN MİKRO YAPIYA VE MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİLERİ**

HAZIRLAYAN

MEHMET SEMİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2022

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA PLATFORMLARI ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**ELEKTRON IŞIN ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN INCONEL
718 SÜPERALAŞIMLARDA ISIL İŞLEM VE SICAK İZOSTATİK
PRESLEMENİN MİKRO YAPIYA VE MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİLERİ**

HAZIRLAYAN

MEHMET SEMİZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ.DR. EBRU SARALOĞLU GÜLER

ANKARA - 2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Platformları Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı Çerçevesinde Mehmet SEMİZ tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 27/07/2022

Tez Adı: Elektron Işın Ergitmeli Eklemeli İmalat (EBM – Electron Beam Melting) Yöntemi İle Üretilen Inconel 718 Süperalaşımlarında Isıl İşlem ve Sıcak İzostatik Preslemenin Mikro Yapıya ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı-Soyadı, Kurumu)

İmza

Doç.Dr. Elmas SALAMCI / GAZİ ÜNİVERSİTESİ

.....

Doç.Dr. Ebru Saraloğlu Güler / BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

.....

Dr.Öğr.Üyesi Andaç Töre ŞAMİLOĞLU / BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

Tarih:../08/2022

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 24/08/2022

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mehmet SEMİZ

Öğrenci Numarası: 21820358

Anabilim Dalı: Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Ana Bilim Dalı

Programı: Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doç.Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

Tez Başlığı: Elektron Işın Ergitme Yöntemi ile Üretilen Inconel 718 Süperalaşımlarında Isıl İşlem ve Sıcak İzostatik Preslemenin Mikroyapıya ve Mekanik Özelliklere Etkileri

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 66 sayfalık kısmına ilişkin,24/08/2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından “Turnitin” adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 5’dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih:/08/2022

Öğrenci Danışmanı

Doç.Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER

TEŞEKKÜR

Hayatımızı birleştığımız andan itibaren emeği, sevgisi ve sabrıyla bana her türlü desteği veren kıymetli eşim Tuba'ya, birbirinden güzel sevgi pötürcüğü kızlarım Melike İnci ve Zahide Reyhan'a, beni büyütüp bu günlere gelmeme vesile olan saygıdeğer babam ve anneme, azim ve kararlılık telkinleriyle beni şevklendiren abime ve kız kardeşime, ufuk ve hedef tayin eden kıymetli hocam Sn. Prof.Dr. Metin YEREBAKAN'a, çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sn. Doç.Dr. Ebru SARALOĞLU GÜLER'e, çalışma arkadaşlarım Orkun Umur ÖNEM, Erkan Buğra TÜREYEN'e ve Uğur KÖROĞLU'na, eğitim hayatım boyunca bana vakıf insanı olma bilincini aşıl原因 kıymetli hocalarıma ve büyüklerime...

Ağustos 2022

Mehmet SEMİZ

(İnşaat Mühendisi)

ÖZET

Üç boyutlu (3B) baskı ve hızlı prototipleme olarak da bilinen eklemeli imalat (**Additive Manufacturing/AM**), bilgisayar destekli tasarıma (CAD) dayalı olarak katman katman malzeme ekleyerek katı nesneler yapma teknolojisidir. AM teknolojilerinden biri olan *Elektron Işını Ergitme* (EBM) teknolojisi, yüksek basınç atmosferi ve vakum ortamında metal tozların yüksek enerji ve sıcaklık sağlayan odaklanmış bir elektron ışını tarafından eritilmesi prensibine dayanarak alt alta veya üst üste birleştirilmesiyle yapılan tekrarlı kaynaklama tekniği ile katman oluşturulmasına dayanır.

Inconel 718, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklıklara kadar iyi oksidasyon korozyon direnci nedeniyle en yaygın kullanılan nikel bazlı süper alaşımdır. Başlıca kullanım alanları diskler, miller, kasalar, statorlar, kanatlar, contalar, destekler, protezler, borular ve bağlantı elemanlarıdır.

Inconel 718'in mekanik ve fiziksel özelliklerini ölçmek üzere uygulanacak deneylerle ortaya koyarak sıcak izostatik presleme ve ısıtıl işlemin etkilerinin araştırılması bu tez çalışmasının ana konusunu oluşturmaktadır. Bu kapsamda; eklemeli imalat, eklemeli imalat + ısıtıl işlem, eklemeli imalat + sıcak izostatik pres + ısıtıl işlemle üretilen Inconel 718 numunelerinin çekme testi ve yoğunluk değerleri kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Inconel 718, İkincil işlemler, Mekanik özellikler

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM), also known as three-dimensional (3D) printing and rapid prototyping, is a technology of making solid objects by adding material layer by layer based on computer-aided design (CAD). Electron Beam Melting (EBM) technology, which is one of the AM technologies, is based on the principle of melting metal powders by a focused electron beam that provides high energy and temperature in a high pressure atmosphere and vacuum environment, and it is based on the formation of layers by the repeated welding technique, which is made by joining one on top of the other.

Inconel 718 is the most widely used nickel-based superalloy due to its excellent high temperature strength and good oxidation corrosion resistance up to high temperatures. Its main areas of use are discs, shafts, cases, stators, blades, gaskets, supports, prostheses, pipes and fasteners.

The main subject of this thesis study is to investigate the effects of hot isostatic pressing and heat treatment by revealing the mechanical and physical properties of Inconel 718 with experiments to be applied. In this context; Tensile test and density values of Inconel 718 samples produced by additive manufacturing, additive manufacturing + heat treatment, additive manufacturing + hot isostatic press + heat treatment were compared.

Keywords: Additive manufacturing, Inconel 718, Post-processes, Mechanical properties

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Tez Konusu, Amaç ve Hedefler.....	1
1.3. Konunun Önemi ve Gereklilikler	3
2. İMALAT İÇİN KAVRAMSAL ÇERÇEVE.....	5
2.1. Eklemeli İmalat	5
2.1.1. Eklemeli imalat yöntemleri	5
2.1.2. Elektron ışın ile ergitme	9
2.2. Süper Alaşımlar.....	12
2.3. Inconel 718	16
2.3.1. Inconel 718 malzemelerin üretim yöntemleri.....	19
2.3.2. Inconel 718 için eklemeli (katmanlı) imalat.....	27
2.3.3. Inconel 718 ergitme yöntemleri ve sınırlılıkları	31
2.3.4. Inconel 718 malzemelerin kullanım alanları	32
3. LİTERATÜR ÖZETİ	33
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	38
4.1. Üretim ve Numune Hazırlama	38

4.1.1 Proses parametreleri.....	38
4.1.2 Elektron ısı ile ergitme yöntemiyle üretim	38
4.2 Isıl İşlem	43
4.3 Sıcak İzostatik Presleme (HIP)	43
4.4 Çekme testi	44
4.5 Yoğunluk testleri	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
5.1 Eklemeli İmalat + Isıl İşlem	46
5.2 Eklemeli İmalat +HIP+ Isıl İşlem.....	56
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
6.1. Sonuç	65
6.2. Öneriler	66
KAYNAKLAR.....	67

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.	Inconel 718'in kimyasal bileşimi.....	17
Tablo 2.	Inconel 718'in oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda fiziksel özellikler (Uzunonat, 2017).	17
Tablo 3.	Inconel 718'in oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemeti ve akma mukavemeti	17
Tablo 4.	Inconel 718 alaşımında hatalar (William vd. 1987)	19
Tablo 5.	Demir Nikel bazlı süperalaşımlar için ergitme üretim işlemleri (Thompson vd. 1991).....	20
Tablo 6.	Demir nikel bazlı bazı süperalaşımların dövme sıcaklığı ve dövülebilirlikleri (Loria, 1988).	22
Tablo 7.	Sonradan Yapılan İşlemlerde Inconel 718'in Davranışı (Goel, 2019)	34
Tablo 8.	Üretim detayları ve numune kodları	39
Tablo 9.	Eİ ve Eİ+Isıl İşlem Sonrası Çekme Testi Sonuçları	53
Tablo 10.	Eklemeli İmalat +HIP+ Isıl İşlem Sonrası Çekme Testi Sonuçları	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Eİ ile İmal Edilen Ürünlerin Sektörlere Göre Yüzdelik Dağılımları (Beyer, 2014).	6
Şekil 2.	EBM Teknolojisinin Şematik Gösterimi (Bezuidenhout vd. 2015).	11
Şekil 3.	Uçak türbin motorları için süper alaşımların yıllara göre çalışma sıcaklığındaki değişim (Mouritz, 2012).	13
Şekil 4.	SLS Şeması (Johnson, 2020).	25
Şekil 5.	Bağlayıcı Püskürtme Şeması (Binderjetting, 2021).	26
Şekil 6.	SLM Inconel 718'in mikro yapısı (Hosseini ve Papavich, 2019).	29
Şekil 7.	SLM Inconel 718 için Gözlemlenen Farklı Gözeneklilik Türü (Hosseini ve Papavich, 2019)	30
Şekil 8.	Yapı yüksekliği sayesinde SLM Inconel 718'in mikro yapısının değişimi (Hosseini ve Papavich, 2019)	30
Şekil 9.	Bu çalışmada incelenen EBM yapısının CAD modeli. Ok yapım yönünü gösterir. Yapılmış durumda incelenen çubuklar ve işlem sonrası işlemden geçenler etiketlenir (Goel ve arkadaşları, 2019).	33
Şekil 10.	HIP ve HIP + HT Grafiği (Goel, 2019).	34
Şekil 11.	Ok yönü imalat yönünü göstermektedir. (a) yapılı malzeme, (b) HIP uygulaması (Goel ve ark. , 2019).	35
Şekil 12.	a.Arcam A2X Ekipmanı ve b. Sodick Tel Erozyon İle Kesim Tezgâhı	40
Şekil 13.	Magics Üretim Hazırlama Programında Tabla Üzerine Yerleştirilmiş Numuneler	40
Şekil 14.	Yapım yönü ile yön arasındaki oryantasyon ilişkisini gösteren şematik boyuna ve enine malzeme yönelimleri	41
Şekil 15.	a.EBM Kontrol Parametre Değiştirme ve b.Ekipman Kullanım Ara Yüzü, Üretim Sırasından Ve Sonrasından Görseller.	41
Şekil 16.	Üretim Sonrası Toz Temizleme (PRS İşlemi) Öncesinde Alınan Görseller	42
Şekil 17.	Üretim sonrası çekme kuponları.	42
Şekil 18.	Protherm Isıl İşlem Fırını.	43

Şekil 19	Quintus Marka HIP ekipmanı haznesi içerisindeki test kuponlarının görseli.	44
Şekil 20	Freze Tezgâhında İşlenen Çekme Kuponu	44
Şekil 21.	Yoğunluk Testi Ölçüm Cihazı.	45
Şekil 22	P1-1 Kuponu Çekme Test Sonuçları	47
Şekil 23	P1-2 Kuponu Çekme Test Sonuçları	47
Şekil 24	P1-3 Kuponu Çekme Test Sonuçları	48
Şekil 25	P1-1-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları	48
Şekil 26	P1-2-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları	49
Şekil 27	P1-3-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları	49
Şekil 28	P2-1 Kuponu Çekme Test Sonuçları	50
Şekil 29	P2-2 Kuponu Çekme Test Sonuçları	50
Şekil 30	P2-3 Kuponu Çekme Test Sonuçları	51
Şekil 31	P2-1-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları	51
Şekil 32	P2-2-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları	52
Şekil 33	P2-3-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları	52
Şekil 34	Isıl işlem sonrası çekme testinde kopan bazı numunelerin görüntüleri.....	55
Şekil 35	P1 ve P2 Eİ numunelerinin çekme testinde kopan bazı görüntüleri.....	55
Şekil 36	P1-1-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	56
Şekil 37	P1-2-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	56
Şekil 38	P1-3-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	57
Şekil 39	P1-4-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	57
Şekil 40	P2-1-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	58
Şekil 41	P2-2-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	58
Şekil 42	P2-3-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	59
Şekil 43	P2-4-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları	59
Şekil 44	HIP Sonrası P1 ve P2 numunelerine ait çekme testi sonucu kopan görüntüleri.....	61

Şekil 45	P1 Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey	62
Şekil 46	P2 Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey	62
Şekil 47	P1-2-Eİ Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey	63
Şekil 48	P2-2-Eİ Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey	63
Şekil 49	P1 HIP Numunesine Ait Mikroyapı a Üst Yüzey, P2 HIP Numunesine Ait Mikroyapı b Üst Yüzey	64
Şekil 50	P1 HIP Numunesine Ait Mikroyapı a Yan Yüzey, P2 HIP Numunesine Ait Mikroyapı b Yan Yüzey	64



KISALTMALAR

AM	Ekllemeli İmalat (Additive Manufacturing)
BJ	Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting)
DLD	Doğrudan Lazer Biriktirme
DMD	Doğrudan Metal Biriktirme (Direct metal Deposition)
DMLM	Direkt Metal Lazer Ergitme (Direct Metal Lazer Melting)
EBM	Elektron Işın İle Ergitme (Electron Beam Melting)
EIE	Elektron Işınıyla Ergitme
Eİ	Ekllemeli İmalat
FDM	Erimiş Malzeme Şekillendirme (Fused Deposition Method)
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
HT	Isıl İşlem
LM	Lazer Eritme (Laser Melting)
LOM	Katmanlı Malzeme Üretimi (Laminated Object Manufacturing)
ML	Malzeme Jeti (Material Jetting)
SL	Stereolitografi Lamination
SLA	Stereolithography
SLE	Toz Yatağı Füzyonu (Seçmeli Lazer Sinterleme)
SLS	Seçici Lazer Eritme (Laser Sintering)
PRS	Toz Geri Dönüşüm Sistemi (Powder Recovery System)
TM	Toz Metalürjisi

SEMBOLLER

A	Amper
C	Santigrat
cm	Santimetre
İn	Inch
kV	Kilo Volt
m	Metre
mA	miliAmper
mm	Milimetre
mPa	Mili Pascal
MPA	Mega Pascal
sn	Saniye
W	Watt

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan, uzun süreli yüksek yük ve korozyon çevre koşullarına dayanıklı nikel tabanlı süper alaşımlar havacılık, savunma ve enerji sektörlerinde kullanılmaktadırlar. Bunlardan en yaygın olanları Inconel Alloy 600 (IN600), Udimet Alloy 720 (UD720) ve Inconel Alloy 718 (IN718) olarak bilinmektedir. Bu çalışma, Inconel 718 üretimi için imalat yöntemlerinin tanıtılarak, Elektron Işın Ergitmeli Eklemeli İmalat (EBM) yönteminin kullanımı ile numune üretme ve deney aşamaları için Inconel 718 süper alaşımının imalat sonrası aşamalarının numune üzerine uygulanarak karşılaştırılmasından oluşmaktadır. Inconel 718 süper alaşımı: Nikel tabanlı ve %18 ile %20 oranlarında demir içeren alaşıma kimi kobalt, krom vb. elementlerin eklenmesinin söz konusu olduğu yüksek mukavemetli, ısıya dayanıklı alaşımları ifade etmektedir.

Elektron ışın ergitmeli eklemeli imalat (EBM); lazerli sinterleme ile seçici lazerle yani uygun toz malzemelerin 3B yazıcı kartuşlarına yüklendiği ve katman katman üretimin sağlanabildiği kompleks bir eklemeli imalat (Additive Manufacturing-AM) yöntemidir. Eklemeli İmalat (AM) ayrıca katmanlı imalat olarak da bilinmektedir.

1.2. Tez Konusu, Amaç ve Hedefler

Eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılmasıyla üst teknolojinin ileri malzemelerinin üretilmesi sağlanabilmektedir. Bu da hem zaman hem de mali avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte imalat sonrası yöntemlerden, sıcak izostatik presleme, çözeltiye alma işlemi ve yaşlandırma işlemleri gibi ısı işlemleri ile Inconel 718'in istenen özelliklerinin artırılması, istenmeyen özelliklerin ise azaltılması mümkündür. Bu sebeple tezin diğer bölümlerinde ayrıntılı olarak açıklamasına yer verilen yöntemlerle üretilen numuneler, Inconel 718'in mekanik ve fiziksel özelliklerini ölçmek üzere uygulanacak deneylerle ortaya koyarak sıcak izostatik presleme ve ısı işlemin etkilerinin araştırılması bu tez çalışmasının ana konusunu oluşturmaktadır.

EBM ile üretilen Inconel 718 hem havacılık hem de enerji uygulamaları için önemli bir malzemedir. Üretim maliyeti açısından döküm, dövme ve ısıtım işlem operasyonlarının azaltılması açısından son derece önemlidir. Bu da maliyet düşüşünü sağlamaktadır. Ayrıca, toz yataklı elektron ışın ergitmeli eklemeli imalat yöntemi sayesinde döküm, sinterleme veya talaşlı imalatlarla elde edilmesi mümkün olmayan geometrilerde yapısal parçaların üretimleri gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde yine savunma sanayi ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla eklemeli imalat teknolojilerini kullanan ekipmanlar yardımı ile hızlı güvenilir ve istenilen ölçü ve boyutlarda 3B çizim altyapılarını kullanarak yüksek mukavemetli parçaların üretilmesi sağlanabilmektedir. Bu yararların yanı sıra en iyi mekanik özelliklere sahip üretim sonrası işlemleri (post treatment) belirlemek üretim faaliyetleri açısından önemli kabul edilmektedir. Bu önemlilik gereği ile bu tezin amacı üretim sonrası işlemlerin akışını belirlemektir.

Üretim sonrası işlemler, mekanik özelliklere etki ederek, ticari Inconel 718'in daha güçlü muadillerinin yaratılmasını sağlayabilmektedir. Bu motivasyon doğrultusunda üretim sonrası faaliyetlerle ticari Inconel 718'in özelliklerini geliştirmek için sırası ile çözeltiye alma işlemi, üretim sonrası sıcak izostatik presleme ve yaşlandırma işlemlerini içermektedir. Aynı zamanda İzostatik Presleme + çözeltiye alma + yaşlandırma işlemlerinin sırasıyla uygulandığı bir numune daha üretilecek olup, son olarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri birbirleriyle ve ticari Inconel 718 ile kıyaslanması sağlanacaktır.

Bu çalışma ile Inconel 718 malzemesi özelinde EBM yöntemi ile elde edilen optimum mekanik özelliklerin belirlenmesi sağlanacak olup, Inconel ticari ürünün güçlendirmesi ile üretilecek numune sonuçlarının değerlerinin pratik kullanımda sağlayacağı kazanımların listelenmesi gerçekleştirilerek, imalat, savunma sistemleri ve hatta havacılık işletmelerinin maliyetlerinin azaltılması için uygulanan işlemler dizininin ek maliyet olmadan malzeme tedariki açısından iyileştirilebilir olup olmadığı sergilenecektir. Tüm bu geliştirme ve sunumlarla elde edilen deneysel numuneler ve ticari inconel karşılaştırma sonuçlarının netlikle gözlemlenmesi literatüre katkı sağlamasının yanı sıra deneyin sonuçları açısından da imalat yöntemlerine katkı sağlamak mümkün olacaktır.

1.3. Konunun Önemi ve Gereklilikler

Son yıllarda, eklemeli imalat, geleneksel işleme yollarına kıyasla karmaşık şekilli bileşenleri nispeten kolaylıkla üretme kabiliyeti nedeniyle endüstriden ve küresel olarak araştırmacılardan ilgi görmüştür. EBM, AM'nin toz yatağı füzyonu tabanlı teknolojilerinden biridir ve metalik tozu katmanlar halinde eritmek ve nihai bileşeni üretmek için bir elektron ışını kaynağından yararlanır (Gong and Anderson, [1]). EBM, kontrollü bir vakum (işleme sırasında oksit oluşumu riskini en aza indirerek) ve yüksek işleme sıcaklığı (yaklaşık 1000 °C) kullanarak yapı ortamını kontrol etme yeteneği gibi diğer toz yataklı füzyon teknolojisi olan seçici lazer eritme (SLM) üzerinde bazı avantajlar sunmaktadır (Sochalski-Kolbus L. et al., [2]). SLM ve EBM tarafından üretilen Ti bazlı alaşımların mekanik özelliklerini karşılaştırmış ve EBM tarafından üretilen alaşımların üstün mekanik özellikler (daha yüksek süneklik ve daha düşük kırılma hızı oluşumu) sergilediğini göstermiştir (Mur et al., [3]). Ayrıca, EBM tarafından üretilen Ti esaslı alaşımların kırılma yüzeyinin, oldukça arzu edilen dövme alaşımlara benzediğini bildirmiştir (Antonysamy et al., [4]). Bu nedenle, EBM, yüksek performanslı mühendislik bileşenlerinin üretimi için umut verici bir işleme rotasıdır.

Inconel 718 olarak da anılan Alaşım 718, yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri ve korozyon direncini koruma özelliği nedeniyle diskler, kanatlar ve benzeri gibi gaz türbini motor bileşenlerinde uygulama bulan Ni-Fe bazlı bir süper alaşımdır. (650°C). Ek olarak, mükemmel şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirliğe sahiptir. Alaşım 718'in faz bileşimi ağırlıklı olarak γ' , γ'' , δ çökeltileri ile birlikte γ matrisinden ve ayrıca EBM tarafından üretilen Alaşım 718'de de bulunan bazı karbürlerden (MC'ler olarak da anılır) oluşur (Deng et al., [5]). Bu çökeltiler, özellikle γ'' , Alaşım 718'e istenen mekanik özellikleri sağlar.

Diğer yandan eklemeli imalat, günümüzde 3B boyutlu baskı yöntemi olarak bilinen ve son zamanlarda teknoloji okullarının devreye girmesiyle günlük hayatta adını sıklıkla duyduğumuz 3B yazıcılar tarafından kullanılan üretim teknikleridir. Bu yalın tanımlama aslında bir teknoloji diziliminin kompleks bir parçasının tariflemesinden uzak görülmektedir. Esasen 3B yazıcılarla geometrik açıdan karmaşık şekilli malzemelerin katman katman eklenerek meydana getiren bu üretim tekniği, 3B CAD-CAM ile referans modelin tasarlanması, model tasarımının püskürtücü kartuş seçimiyle mikro püskürtme yaparak katman katman yukarıdan aşağıya doğru basması olarak basit bir şekilde

açıklanabilmektedir (Avcı, [6]). Bu yazıcı kartuşlarında mikro ölçekli püskürtücülerle baskı yaptığı için malzeme seçimleri önem arz etmektedir (Nakano et al., [7]).

Katma değerli ürünlerin basit tasarımlarla, ancak maliyetleri de göz önünde bulundurularak elde edilmiş malzemelerden üretilmeleri ülke ekonomisinin yanı sıra, teknolojik anlamda üretim kapasitesini de artıracaktır. Bu amaç doğrultusunda, eylemselliğe geçilmesi ise, 3B püskürtücülerin uyumlu olabileceği tanecik eldesiyle mümkün görülmektedir (Hornick, [8]).

Bilindiği üzere alaşımların oluşturulması birden fazla malzemenin birlikte işlenmesini ve homojen dağılımını gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte çalışma prensipleri doğrultusunda önemli olan, katma değerli ürünlerin maliyet açısından uygun ancak, kullanılabilirlik açısından yüksek kabiliyete sahip ürünlerin elde edilmesini sağlamak, bu çalışmanın ruhunu oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında süper alaşımlardan nikel tabanlı Inconel 718'i Elektronik Işın Ergitmeli Eklemeli İmalat (EBM) yöntemi ile üretmek amaçlanmaktadır.

2. İMALAT İÇİN KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde çalışmanın arka planına katkı sunularak kavramların tanımlanması amaçlanmaktadır. Söz konusu bir üretim yönteminin incelenmesi olduğunda imalat yöntemleri çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilikler arasından malzemenin üretilmesi ve/veya sonraki adımların uygulanması ile malzemelere istenilen özelliklerin eklenmesi için birbirinden oldukça farklı yöntemler izlenmektedir. Bu bölümde bu yöntemlerden biri olan Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Elektron Işın İle yeniden biçimlendirme yöntemlerinin incelenmesi sağlanacak olup, imalat sonrası Inconel 718 için numune üretimlerinin sağlanmasında atılacak adımlar ve tezin içerdiği kavramlara bu bölümde yer verilmektedir.

2.1. Eklemeli İmalat

2.1.1. Eklemeli imalat yöntemleri

Hızlı prototipleme olarak da bilinen eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) bilgisayar destekli tasarım (CAD) model verilerinden nesneler yapmak için malzemeleri birleştirme işlemidir. Geleneksel üretim teknikleri ile üretilemeyen daha düşük enerji maliyetleri ve daha kısa üretim süresi ile daha karmaşık fonksiyonel bileşenlerin üretilmesi büyüyen yeni bir endüstri sektörüdür. 1986'da, ilk eklemeli imalat tekniği Texas Üniversitesi'ndeki araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Bu günlerin başlangıcından bu yana, 2009 yılında oluşturulan ASTM F42 Komitesine göre havacılık, savunma, otomotiv, sağlık ve endüstriyel ürünler dahil olmak üzere birçok alanda birçok yeni Eİ(AM) süreci geliştirilmiş ve başarıyla uygulanmıştır (Zhang et al., [9]).

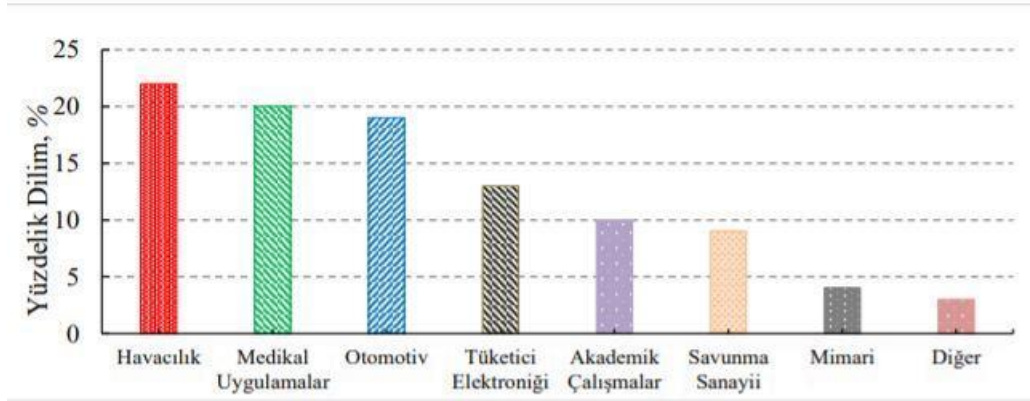
Bu teknolojiye bileşenler, işleme operasyonuna veya son kuruluma gerek kalmadan katman katman biçiminde üretilir. Bu süreç aşağıdaki adımlardan oluşur (Gibson et al., [10]);

- Üretilecek parçanın CAD programı ile tasarımı,
- Taranan modelin yüzeyini üçgenlenmiş yüzey segmentlerinden oluşan bir ağ ile değiştiren bir dosya olan STL (STereoLithography) formatına dönüştürülerek çizimin 3B yazıcıya aktarılması,

- İmalata en uygun prototipleme yönteminin belirlenmesi.

Eklemeli imalat, 1980'lerden günümüze kullanılmakta her geçen gün daha da gelişmektedir. İlk defa prototip üretimine kullanıldığı için "hızlı prototipleme" şeklinde de isimlendirilebilmektedir. Eİ yöntemi ile kompleks bileşen ve malzemeler herhangi büyük işleme aracı, döküm yöntemi kullanımı ya da kalıplar olmadan direkt olarak CAD ile üretilmektedir. Eİ ile parçalar uygun bir enerji kaynağı ile metal tozlarının katmanlar şeklinde ergitilmesi ve katı hale gelmesi sonucunda elde edilmektedir. Bu teknolojiye metal tozları ile üretim yapıldığı için kompleks geometrisi olan ve diğer üretim metotlarıyla üretilmesi mümkün olmayan ya da zor üretilen parçalar bilgisayar ortamında kolay bir şekilde dizayn edilerek insan eli değmeden tam otomasyon ile ve hızlı şekilde üretilmektedir (Hull, [11]).

Teknolojinin geçirdiği değişim ve gelişmelerle birlikte Eİ teknolojisi günümüzde oldukça gelişmiştir ve otomotiv, biyomedikal, uzay ve havacılık gibi birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Guo and Leu, [12]). Eİ teknolojisinin kullanım alanlarının sektörlere göre imal edilen ürün yüzdelik dağılımlarına dair durum aşağıda Şekil 1'deki gibidir (Beyer, [13]).



Şekil 1. Eİ ile İmal Edilen Ürünlerin Sektörlere Göre Yüzdelik Dağılımları [13].

Şekil 1'deki yüzdelik dağılımlara bakıldığında yeni nesil materyallerin kullanıldığı otomotiv, medikal ve havacılık sektörlerinin bu teknolojiye en çok faydalanan sektörler olduğu görülmektedir. Bunlarda Eİ yönteminin kullanılmasıyla Eİ teknolojisinin pazar payı da ciddi şekilde artmıştır ve 2023'de 21 milyar dolara çıkacağı düşünülmektedir. Yöntemin ön plana çıktığı diğer bir endüstri de yedek parça endüstrisidir. Yedek parçaya gereksinim duyan sektörler, parçaları gereksinimlere göre Eİ teknolojisi kullanılarak imal

edebilmektedir. Böylece hem nakliye masrafları hem de işçilik maliyetleri ciddi oranda düşebilmektedir (Yalçın ve Ergene, [14]).

Eİ teknolojisinin bu denli sektörde kullanılması teknolojinin gelişmesine bağlıdır. Teknolojinin son dönemlerde ciddi oranda gelişmesiyle birlikte ASTM eklemeli imalat teknolojileri araştırma grubu oluşturulmuş ve ASTM F42 kapsamında Eİ yöntemleri sınıflandırılmıştır. Buna göre Eİ yöntemleri şu şekilde sınıflandırılmaktadır (Yalçın ve Ergene, [14]):

- Yapılan işleme göre; yapıştırırmalı, sinterlemeli, ergitmeli vs.
- Kullanılan ışın tipine göre; elektron, ışın vs.
- Besleme malzemesine göre; kompozit, seramik, plastik, metal vs.
- Besleme malzemesinin formuna göre; sac, tel, toz vs.

Eİ yöntemleri arasında en bilinenler Yönlendirilmiş Biriktirme Prosesi ve Toz Yatak Prosesi şeklindedir. Bunların dışında gelişen teknolojiyle birlikte birçok üretim yöntemi ortaya çıkmıştır. Bir metal eklemeli imalat yönteminde lazer işlemleri net şekillendirme, direkt metal yazdırma, lazer metal biriktirme gibi yönlendirilmiş biriktirme prosesleri ve Elektron ışınli ergitme, seçici lazer sinterleme ve seçici lazer ergitme gibi toz yatağı prosesleri mevcuttur (Uçan, Yalçın ve Ergene, [15]).

Eİ'nin en önemli faydası, son derece karmaşık geometrik şekillerin tek bir üretim aşamasında üretilmesidir; bu, montaj işlemlerinin sayısının ortadan kalktığı anlamına gelir. Ek olarak, günümüzün Eİ teknolojisinin kullanılması, üreticilerin somunlar ve vidalar dahil olmak üzere tüm bileşenleri son derece hassas toleranslarla üretmesine olanak tanır. Bu nedenle, Eİ teknolojisi, ürün kalitesini iyileştirir ve bileşen kusurlarının sayısını azaltarak bileşen ömrünü uzatır. Aksine, geleneksel üretim yöntemleri, karmaşık bileşenleri üretmek için birden fazla adım gerektirir. Eİ sürecinin bir diğer önemli avantajı da tasarım özgürlüğü fırsatıdır. CAD yazılımı kullanmak, üreticilerin değişiklikleri önemli ölçüde daha hızlı yapmasını sağlar. Üretim ekipmanını değiştirmek yerine yalnızca bir dosya tasarlamak için değişikliğe ihtiyaç duyar. Eİ proseslerinin diğer avantajları da şu şekilde özetlenebilir (Attaran, [16]).

- Konvansiyonel imalatla oluşan malzeme israfını talaşlı imalata göre 25 kata kadar daha az azaltması,
- Talaşlı imalat, birleştirme, enjeksiyon kalıplama gibi zaman alan bazı işlemlerin ortadan kaldırılması,
- Kafes yapının imalatına olanak sağlayan veya gözenekli ve katı malzemeleri tek bileşende birleştiren hafif yapıların imalatı,
- Prototiplemeyi hızlandırarak maliyeti ve zamanı azaltan gerekli takım veya kalıp parçalarının ortadan kaldırılması,
- Daha az malzeme kullanarak ve üretim sürecindeki adımları ortadan kaldırarak enerji tüketimini azaltması,
- Toz malzeme karışımlarıyla değişik nitelikte malzemeler üretilebilmesi,
- CAD ile doğrudan üretim nedeniyle bakım, işgücü, montaj ve envanter giderleri olmadığı için üretim maliyetlerini ciddi oranda düşürmesi.

Eİ yöntemi yukarıda ifade edildiği gibi çok sayıda avantaja sahip olsa da özellikle fonksiyonel parçaların daha geniş kullanımına izin vermeyen bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar şu şekildedir (Karabulut, [17]);

- Eİ yöntemleri genellikle oldukça komplekstir ve belirli bir dizaynı olan ürünlerin imalatında kullanılır. Seri üretime diğer imalat yöntemleri kadar uygun değildir.
- Parçaların katmanlar halinde imal edilebilmesi ve üretim tablasından çıkarılabilmesi için destek elemanları gerekmektedir. Üretim işlemi sonrasında belli işlemlerde destek elemanları parçadan çıkarılmaktadır. Bu da fazladan enerji ve malzeme harcanmasına sebep olmaktadır.
- Eİ makinelerinin üretim hacmi belirlidir. Bu da üretilecek parçanın ebatları konusunda bazı kısıtlılıkları doğurmaktadır.

Ayrıca dezavantajlar üretim bittikten sonra üretilen parçalarda meydana gelen kusurları da kapsamaktadır. Bu kusurlar şu şekildedir (Karabulut, [17]);

- Parçalarda iç gerilim meydana gelebilmekte ve ürünün mekanik nitelikleri olumsuz etkilenebilmektedir.
- İmal edilen parçaların bazı tribolojik ve mekanik özellikleri istenen düzeyde olmamaktadır.
- Parçaların iç kısmında üretim sürecinden kaynaklı delik ve boşluklar oluşabilmektedir.
- Üretim metal tozlarının birden soğutulması ve ısıtılması ile gerçekleştiği için parçalarda çarpılmalar oluşabilmektedir.
- Ayrıca Eİ yönteminde üretilen parçanın yüzey özellikleri en önemli dezavantajı oluşturmaktadır. Çünkü parçaların yüzey pürüzlülüğü ve bütünlüğü oldukça zayıf olmaktadır.

2.1.2. Elektron Işın İle Ergitme

Röntgen 1895'te X-ışını keşfettiğinden beri, radyasyon nükleer fizik, nükleer mühendislik, kimya ve izotop gibi çeşitli alanlarda kullanılmıştır. Prof. Charlesby'nin 1952'de polietilende radyasyon çapraz bağlama fenomenini bulmasından sonra, radyasyon kimyası çeşitli endüstriyel alanlarda popüler hale gelmiştir. Günümüzde, malzeme özelliklerini iyileştirmek için çok önemli bir süreç veya araçtır. Tipik örnekler, elektrikli aletlere takılan ısıya dayanıklı elektrik telleri ve otomotiv lastiklerinde kullanılan kauçuk malzemedir. Radyasyon aynı zamanda ısıyla daralan makaronların ve filmlerin, köpüklü malzemelerin, pil ayırıcıların ve benzerlerinin imalatında da yaygın bir işlemdir. Radyasyon kimyası işleminde hem elektron ışını hem de gama ışını kullanılır, ancak elektron yaygın olarak kullanılır çünkü taşıma ve çalıştırma daha kolaydır. NHV Corporation, dünya çapında bunları sağlamak için güçlü elektron ışını sistemleri geliştirmektedir (Kashiwagi ve Hoshi, [18]).

1952, elektron ışını teknolojisinin şafağı olarak görülmektedir. Fizikçi Dr. H.C. Karl-Heinz Steigerwald ilk elektron ışını işleme makinesini yapmıştır. Elektron ışını

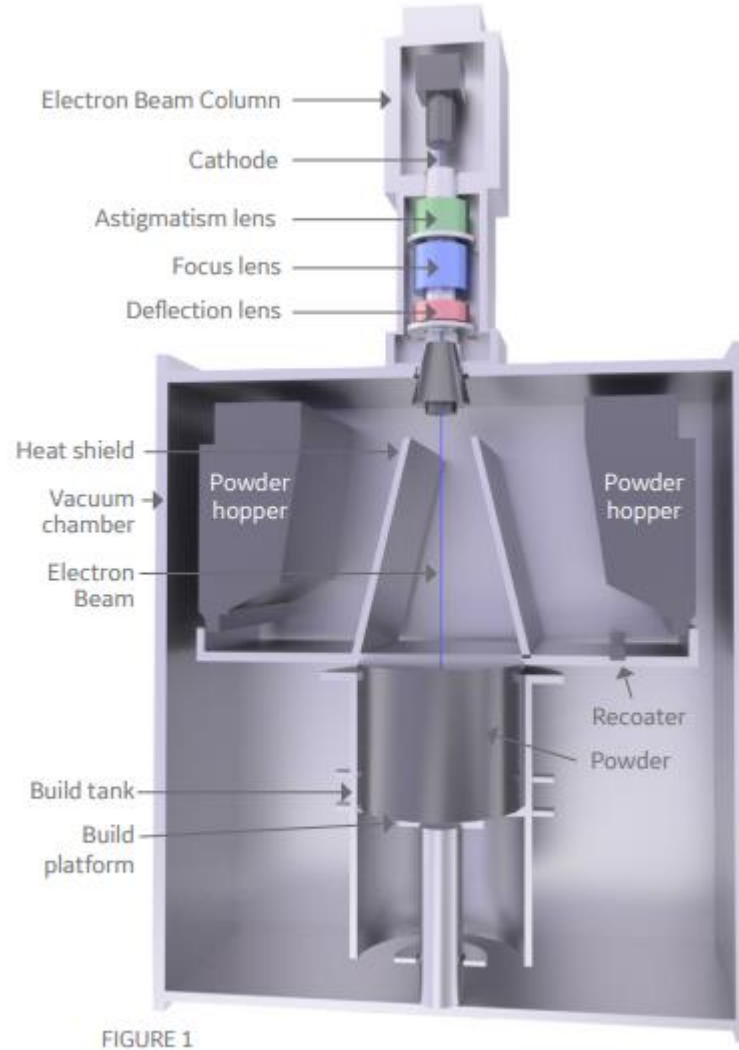
teknolojisinin tarihi, fizikçiler Hittorf ve Crookes'un deneyleriyle başlamıştır. Önce gazlarda katot ışınları üretmeye ve metalleri eritmeye çalışmışlardır. Bu katot ışınları ilginç bir fiziksel fenomendir ve “hızlı hareket eden elektronlar” olarak tanımlanan Roentgen (1895), Thompson (1897) ve Millikan (1905) tarafından belirli bir ışın türünün keşfine yol açmıştır. Bu deneyler sırasında elektronların çarpmasıyla oluşan ısının daha çok zarar verici bir etkisi olduğu düşünülmüş ve soğutma yoluyla bunun önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu etkiyi ilk kullanan fizikçi Marcello von Pirani olmuştur. Elektron ışınları kullanarak tantal tozu ve diğer metalleri eritmek için bir parça aparat yapmıştır. Sonraki zamanlarda, giderek daha fazla bilim insanı elektron ışını teknolojisiyle deneyler yapmış ve bu da osilografların, mikroskopların ve metallerin delinmesine yol açmıştır. O anda ana engel, yeterince güçlü vakum pompalarının olmamasıdır. 1948'de fizikçi Dr. H.C. Karl-Heinz Steigerwald ile malzeme işlemede yeni bir dönem başlamıştır. O sırada, elektron mikroskoplarının yapımı için daha yüksek güçlere sahip elektron demeti kaynaklarının daha da geliştirilmesi üzerinde çalışmıştır. Elektron ışını ile saat taşlarını delmek ve vakumda lehimlemek, eritmek ve kaynak yapmak için bir termal araç olarak yaptığı deneyler çok umut verici olmuş ve o andan itibaren geliştirme daha hızlı ilerlemiştir.

- 1952'de ilk elektron ışını işleme makinesini yapmıştır.
- 1958'de 5 mm kalınlığındaki Zirkaloy'u birbirine alın kaynağı yapmış ve böylece "derin kaynak efektini" keşfetmiştir.

Dr. Steigerwald'ın Zeiss'teki temel çalışmasına dayanarak, diğer ülkelerdeki şirketler elektron ışını teknolojisi geliştirmeye ve EBM makineleri inşa etmeye başlamışlardır. Geliştirilen tekniklerden günümüzde kullanılanlardan birisi de elektron ışın ile ergitmedir.

Elektron ışın ile ergitme yöntemi (Şekil 2), esas olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniğinden geliştirilmiş ve 2001 yılında Larson tarafından İsveç'te Arcam AB tarafından patenti alınmıştır. Bu yöntem, bir katman oluşturmak üzere tozu eritmek için yüksek güçlü bir elektron ışını kullanır ve aynı anda bir toz yatağında önceden katılaştırılmış katmanlarla birleşir. SLM işleminden farklı olarak, üretim aşamaları boyunca bu işlemi özellikle yüksek reaktif malzemelerin, örneğin titanyumun imalatı için uygun hale getiren yüksek bir vakum kullanılır. Ek olarak, taban platformu, ilk toz tabakası uygulanmadan önce, çalışma sıcaklığının (> 870 K) biraz üzerinde ön ısıtmaya tabi tutulur.

EBM yönteminin proses parametrelerinin kontrolü SLM yöntemine göre daha zordur. Bu teknik, lazer gücü, ışın çapı, tarama stratejisi ve hızı, ön ısıtma sıcaklığı vb. dahil olmak üzere daha fazla değişken içerir (Gokuldoss vd., [19]).



Şekil 2. EBM Teknolojisinin Şematik Gösterimi [20]

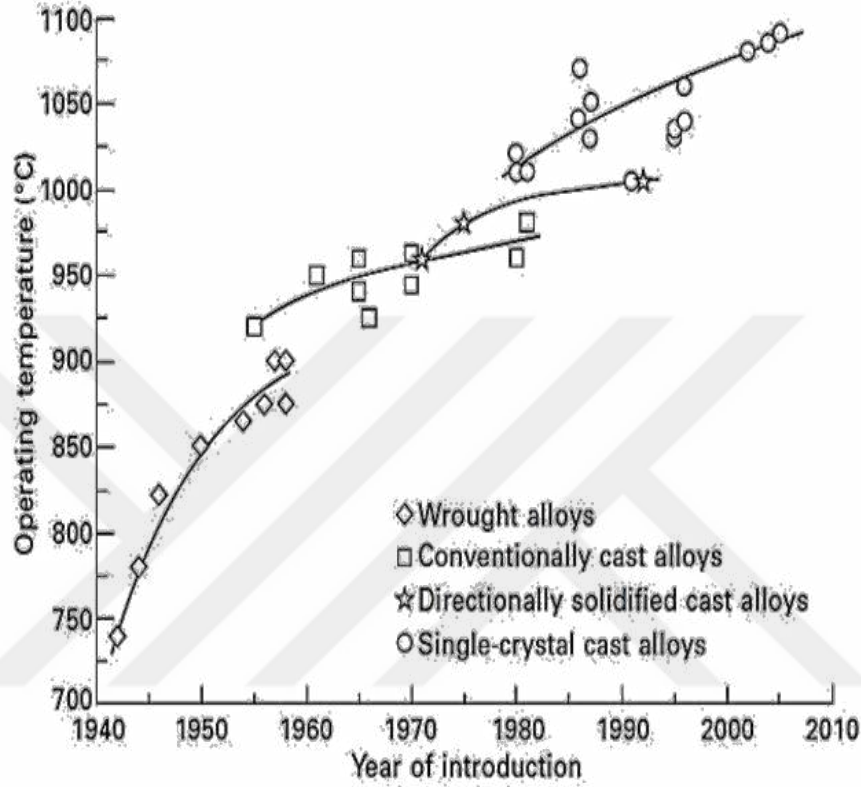
2.2. SüperAlaşımlar

Alaşımlar, en az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla elementin karıştırılmasıyla oluşan homojen bir maddedir. Süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda bozulma olmadan uzun süreli maruz kalma altında yüksek performans özellikleri gerektiren gaz türbinli motor (GTE'ler) teknolojisinde kullanılmak üzere geliştirilmiş alaşımlar olarak tanımlanmıştır. Ek olarak, kimya ve petrol tesisleri, nükleer reaktörler, enerji üretimi, uzay araçları vb. dahil olmak üzere diğer mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılmıştır (Ahmed, [21]). Bu alaşımlar malzemeler, çok sayıda alaşım elementinin eklenmesiyle Grup VIII B elementlerine dayanmaktadır (Bullock, [22]). Genellikle Ni, Fe ve Cr'nin daha az miktarda Co, Mo, Ti, Al, Ta, Nb, W ve Hf gibi bazı elementlerle çeşitli kombinasyonlarından oluşurlar (Lee, [23]).

1940'lardan günümüze süper alaşımların gelişimi, mikro yapının ve üretim süreçlerinin optimizasyonu ile karakterize edilebilir. İlk olarak, kimyasal bileşimi kontrol ederek ve bazı uçucu izlerini kaldırarak alaşım performansını artırmak için 1950'lerde hem vakum indüksiyonlu eritme (VIM) hem de hassas döküm tanıtılmıştır. Süper alaşımlara çok daha yüksek seviyelerde alüminyum ve titanyum eklenmesine izin vererek güçlendirme fazlarının oluşumu sağlanmıştır (Geddes et al., [24]). Daha sonra, yönlü-katılaştırılmış ve tek kristalli alaşımların üretimi, 1960'larda önemli gelişmelerin yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu teknikler, yük yönünde hizalanan tane sınırlarını en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için belirli motor bileşenlerini üretmek için özel olarak kullanılmıştır. Günümüzde gaz türbinli motor parçalarında, özellikle yorulma ve sürünme özelliklerinin önemli olduğu yerlerde, tek kristalli süper alaşımlar artan miktarlarda kullanılmaktadır (Wahl and Harris, [25]).

Süperalaşımlar, bu tür aşırı çalışma koşulları altında hem kimyasal hem de mekanik bozunmaya maruz kalmış ve mekanik özelliklerin kaybına neden olduğu ortaya koyulmuştur. Süper alaşımlara mekanik özelliklerini değiştirmek için bazı bileşimsel modifikasyonlar uygulanmıştır. Ancak bu değişiklikler, süper alaşımların oksidasyon/korozyon direnci veya termal genleşme özellikleri gibi diğer özelliklerinde azalmaya neden olmuştur. Bu nedenle, 1960'larda süper alaşımları çevresel saldırılardan korumak için yüksek sıcaklık koruyucu kaplamalar da geliştirilmiştir. Koruyucu kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda kaplama yüzeyinde yoğun bir metalik oksit tabakasının

oluşması için alaşım yüzeylerinin metalik elementlerle (yani Al, Cr, Si vb.) zenginleştirilmesiyle elde edilmiştir (Basuki et al., [26]). Üretim teknolojisindeki ilerlemeler ve koruyucu kaplamaların geliştirilmesi, maksimum çalışma sıcaklığını 800'den 1300 °C'ye yükselterek motor performansında bir artış sağlar (Şekil 3) (Tamarin, [27]).



Şekil 3. Uçak türbin motorları için süper alaşımların yıllara göre çalışma sıcaklığındaki değişim [28].

Süperalaşımlar, genellikle 540°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılan nikel, demir nikel ve kobalt bazlı alaşımlardır. Uygun bileşimlere sahip süper alaşımlar, istenen özellikleri elde etmek için dövülebilir, haddelenebilir veya dökülebilir. Süper alaşımların özellikleri, bitmiş ürünlerde mükemmel yüksek sıcaklık özellikleri elde etmek için bileşimde ayarlamalar yapılarak ve ısıtılma işlemi gibi işlemlerle kontrol edilebilir.

Süper alaşımlar önemli miktarda nikel, alüminyum, krom ve alüminyum gibi elementler içerirler ve erime noktalarına yakın sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal bozunmaya karşı mükemmel direnç gösterirler. 1950'lerde ilk piyasaya sürüldüklerinden beri birçok endüstride büyük bir etkiye sahip olmuşlardır (Donachie, [29]).

Özelliklerine bağı olarak ağır yüklere maruz kalan türbinlerin en sıcak bölümlerinde kullanılırlar. Süper alaşımlar, üç ana özelliğinden dolayı yüksek sıcaklık malzemeleri olarak adlandırılır.

İlk özellik, erime noktasına yakın bir çalışma sıcaklığında yüklere dayanma kabiliyetine sahip olmalarıdır. İkinci özellik, uzun süreler boyunca mekanik bozulmaya karşı önemli bir dirence sahip olmalarıdır. Son olarak, sıcak gazların neden olduğu korozyon koşulları gibi zararlı çalışma ortamlarına toleranslılardır (Donachie, [29]).

Farklı şirketler tarafından geliştirilen birçok süper alaşım vardır ve uygulama alanları genellikle uçak endüstrisi, nükleer santraller, güç türbinleri ve kimya tesisleridir. Süper alaşımların çoğu genellikle en az 10 element içerir, ana alaşım elementlerine bağı olarak nikel bazlı, demir nikel esaslı ve kobalt bazlı olmak üzere 3 farklı tipte sınıflandırılırlar (Moiz, [30]).

Nikel-demir (Ni-Fe) bazlı süper alaşımlar, önemli miktarlarda Ni ve Fe (%25-60 Ni, %15-60 Fe) içeren çöktürme ile güçlendirilmiş alaşımlardır ve en yaygın olarak kullanılan bazı süper alaşımları temsil ederler ve kendi süper alaşımlarını oluştururlar. Alaşımlar, yüksek toklukları ve süneklikleri ile karakterize edilir ve çoğunlukla türbin diskleri veya dövme rotorlar gibi bu özelliklerin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılır. Sonuç olarak, nikel demir alaşımları yalnızca dövme durumunda kullanılır, çünkü bu üretim yöntemi, tane boyutunu ve morfolojisini kontrol etmek için çok çeşitli mekanizmalar sunar. Yüksek tokluklarına ek olarak, nikel-demir esaslı süper alaşımların bir diğer avantajı, eklenen önemli miktarda demir nedeniyle daha düşük maliyetleridir (Bose S., [31]).

Fe-Ni alaşımlarının genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Birincisi, hepsi hem Fe hem de Ni bazlı FCC (γ) östenitik matristir.
- İkinci olarak, katı çözelti güçlendirmesi, γ 'ye bölünen alaşım elementleri aracılığıyla.
- Üçüncüsü, alaşımlar ayrıca intermetalikler, boridler veya karbürler yoluyla çöktürmeyle sertleştirilir ve son olarak alaşımlar ayrıca tane sınırlarını değiştirerek çökelme ile güçlendirilir (Weaver A., [32]).

Süper alaşımların en yaygın çökeltisi γ' -Ni₃(Al,Ti) olup, bazı önemli örnekler şu şekildedir: A-286, V- 57 veya, Incoloy 901, Incoloy 800H, -Ni₃Nb çökeltisine neden olan bazı alaşımlar.

Inconel 718, daha önce demir-nikel bazlı olarak sınıflandırılmaktaydı, ancak şimdi nikel bazlı olarak kabul edilmektedir.

Demir-nikel bazlı süper alaşımlar güçlendiriciler, metaller arası bileşik çökeltmedir ve bir FCC matrisindedir (Geddes vd., [33]).

Kobalt bazlı alaşımlar, gaz türbinlerinde (hem endüstriyel tipte hem de uçak motorlarında) kanatçıklar veya yanma odaları gibi çeşitli bileşenlerin üretiminde onlarca yıldır kullanılmaktadır. Dövme veya hassas döküm parçalar olarak uygulanabilirler (Coutsouradis vd., [34]).

Karbürler ve katı çözelti sertleştiricilerin bir kombinasyonu ile güçlendirilmiş kobalt bazlı süper alaşımlardır. Tüm süper alaşımlar gibi, kobalt bazlı süper alaşımların mikro yapıları, bir dizi güçlendirme aşamasına sahip bir FCC γ matrisinden oluşur. Bununla birlikte, kobalt bazlı süper alaşımlarda çökelme sertleşmesi, nikel-demir veya nikel bazlı süper alaşımlarda gözlemlendiği gibi γ' veya γ' kadar etkili değildir. Bu, kobalt bazlı süper alaşımları, karbür oluşumuyla güçlendirmeye ve katı çözelti güçlendirmesine büyük ölçüde bağımlı hale getirmiştir (Schilke, [35]).

Süper alaşımlar, yüksek Cr içerikleri nedeniyle kirli gaz türbini atmosferlerinde daha iyi sıcak korozyon direncine sahiptir. Ayrıca Ni-bazlı alaşımlardan daha iyi kaynaklanabilirlik ve termal yorulma direncine sahiptir. Bazı önemli Co bazlı süper alaşımlar arasında FSX-414, Stellite 21 ve 31, Haynes-188 yer almaktadır (Weaver A., [32]).

Süper alaşımlarda, γ -Ni₃Al, γ'' -Ni₃Nb, kimyasal ve koherens gerinim sertleştirilmesiyle temel güçlendirme aşamaları ve birinci fazıdır. Hem ikili Ni-Al hem de Ni-Cr-Al sistemlerinde, sıralı γ -Ni₃Al fazı bir denge ikinci fazıdır. Ni-Ti ve Ni-Cr-Ti sistemlerinde γ ve FCC matrisine yakın eşleşmeye sahip yarı kararlı bir fazdır. Bu fazların her ikisi de benzer kafes parametrelerine sahiptir ve çökeldiklerinde tutarlılıkları düşük

kabalaşma oranı gösterir. Bu nedenle, bu fazlara sahip alaşımlar 0.7 Tm'de bile oldukça yavaş yaşlanır. Bir başka güçlendirme mekanizması, ana element krom ile katı çözelti sertleştirilmesi ile sağlanır. %20'lik kobalt ve molibden, tungsten, tantal gibi diğer elementler toplam %15'e kadar eklenebilir. γ fazında bu elementler çözülebilir ve sertleşme etkisi iki kat olabilir (Smallman, [36]).

2.3. Inconel 718

Inconel 718, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklıklara kadar iyi oksidasyon korozyon direnci nedeniyle en yaygın kullanılan nikel bazlı süper alaşımdır. 1960'ların başında piyasaya sürülmesi, gaz türbini motor teknolojisinde önemli bir ilerleme tanımladı. Daha hafif ve daha basit yapıya sahip daha düşük maliyetli motorların üretilmesini sağlamıştır. 1963 yılında SR71 Blackbird J58 motorunun dağıtıcı (difüzör) kasası için ilk kullanımından itibaren, günümüzde özellikle havacılık endüstrisinde birçok endüstride nikel alaşımlarının en yaygın olarak kullanılanıdır. Disklerde, millerde, kasalarda, statorlarda, kanatlarda, contalarda, desteklerde, borularda ve bağlantı elemanlarında kullanılmaktadır (Paulonis, [37]).

Inconel 718'in FCC matrisinde, çöken ana fazlar yarı kararlı γ'' -Ni₃Nb, denge γ - Ni₃Al ve denge δ fazlarıdır. Inconel 718'in yaş sertleşmesi, alışkanlık düzlemi ile uyumlu disk şekilli morfolojiye sahip γ'' Ni₃Nb faz parçacıklarının çökeltilmesiyle sağlanır. Güçlendirmenin bir kısmı, koherent γ -Ni₃Al fazının çökeltilmesiyle de sağlanabilir. δ denge fazı, yarı kararlı γ'' -Ni₃Nb fazına karşılık gelir. Servis sırasında Inconel 718 ve γ'' ile güçlendirilmiş diğer süper alaşımların δ oluşumundan şüphelenilebilir. Ara sıcaklıklarda çok uzun süre maruz kalma sırasında, δ fazı, γ'' fazının bir dönüşüm ürünü oluşturur. δ faz, östenit tane sınırlarında ve düşük sıcaklıklarda uyumlu ve tutarsız ikiz sınırlarda çekirdeklenir. Bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda taneler arası çökelirler. δ partiküllerinin çökeltilmesinin γ'' ile güçlendirilmiş alaşımların gücünü azalttığı bilinmektedir, ancak faz çökmesi kontrol edilebilirse, iyi gerilme kırılma özellikleri ve tane stabilizasyonu gibi faydalı etkileri vardır (Sundaraman, [38], Mahadevan, [39]). Inconel 718'in kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir. Alaşımın fiziksel özellikleri, çekme mukavemeti ve akma mukavemeti Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. Inconel 718'in kimyasal bileşimi

Nikel (Artı Kobalt)	50.00-55.00
Krom	17.00-21.00
Demir	Dengeli
Niyobyum (Artı Tantalum)	4.75-5.50
Molibden	2.80-3.30
Titanyum	0.65-1.15
Alüminyum	0.20-0.80
Kobalt	1.00 maks
Karbon	0.08 maks
Manganez	0.35 maks
Silikon	0.35 maks
Fosfor	0.015 maks
Kükürt	0.015 maks
Bor	0.06 maks
Bakır	0.30 maks

Tablo 2. Inconel 718'in oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda fiziksel özellikler [40]

Sıcaklık (°C)	Özgül Isı (J/Kg.K)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Elastisite Modülü (GPa)	Termal genleşme katsayısı (104/K)
20	460	11.5	204	14.1
100	458	12.1	199	14.1
200	468	13.5	193	14.1
300	485	15.2	187	14.2
400	501	17.1	180	14.4
500	514	18.8	173	14.8
600	533	20.6	166	15.3
700	604	24.1	158	16.4
800	615	24.2	150	17.0
900	626	25.0	143	17.4
1000	637	25.8	134	
1100	635	26.6	126	
1200	658	28.7	122	

Tablo 3. Inconel 718'in oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemeti ve akma mukavemeti

Sıcaklık (°C)	Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)
20	1280	1030
100	1280	1060
200	1250	1040
300	1220	1020
400	1180	1000
500	1150	980
600	1060	920
650	1000	860
700	1040	870
750	880	760
800	780	640

Inconel 718'in önerilen çalışma sıcaklığı 649°C'dir. Alaşımın özellikleri büyük ölçüde sertleşme sırasında γ'' -Ni₃Nb çökelme güçlendirmesine bağlıdır. Standart ısıtma prosedürleri, 930-1010°C'de hızlı soğutma ve ardından 720°C'de 8 saat boyunca sertleştirme ısıtma işlemi ve ve sonraki 8 saat 50°C/saat hızında 620°C'ye kadar yavaş soğutma şeklindedir. Sertleşme süresi yaklaşık 18 saat sürer.

Yaklaşık 649°C'de γ'' 'nin δ 'ye dönüşümü gerçekleşir ve bu, mukavemetin önemli ölçüde bozulmasına yol açar. Ayrıca Inconel 718'de oluşan koruyucu oksit tortusu Cr₂O₃'tür ve Cr₂O₃ oluşturan alaşımların yüksek sıcaklıklarda etkin kullanımı, uçucu CrO₃ oluşumu nedeniyle kısıtlanır ve 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda tufal kaybına neden olur. Özelliklerdeki bu değişiklikler, alaşımın çalışma sıcaklığı yüksekse, belirli uygulamalar için gereksinimleri karşılamak için yüzey işlemlerinin uygulanabileceğini göstermektedir (Wang and Chen, [41]).

Inconel 718, diğer alaşımlara göre daha az nikel içermekte ve kobalt içermemektedir. Bu nedenle, o zamandaki diğer rakip alaşımlardan daha ucuza ve bir şekilde daha kolay elde edilebilirdi. 1970'lerin ikinci yarısında kobalt kıtlığı ve yüksek alaşım fiyatları ortaya çıktığında, daha fazla tasarımcı Inconel 718'e geçmiştir. Yaklaşık 649°C'ye kadar dayanıklılık özellikleriyle birlikte maliyet ve bulunabilirlik, gaz türbini diskleri olarak kullanılmasını sağlamıştır (Donachie, [29]). Inconel 718'in gaz türbinli motorlardaki diğer uygulama alanları, türbinler, blis'ler (diskler), kılıflar, yüzükler ve egzoz parçaları (farinia group) olarak sıralanabilir.

Inconel 718, gaz türbinlerinde, roket motorlarında, uzay araçlarında, nükleer reaktörlerde, pompalarda ve aletlerde kullanılan niyobyum modifiyeli nikel bazlı bir süper alaşımdır (Chang et al., [42]).

Inconel 718, genellikle katı çözültide ve eskitilmiş durumda kullanılır; sıcaklıkların, sürelerin ve soğutma hızlarının tam durumu, uygulamaya ve mekanik özellik ihtiyacına bağlıdır. Yüksek gerilme ve yorulma mukavemetinin yanı sıra iyi stres kopma özellikleri gerektiren birçok havacılık uygulamasında aktiftir. Solvus çizgisinin altında bir solüsyona alma işlemi ve aşağıdaki gibi iki aşamalı bir yaşlandırma işlemi kullanılır:

- 1-2 saat süreyle 925 ila 1000°C'de çözelti ısıtma işlemi (hava ile soğutma veya daha hızlı)
- 720 °C'de 8 saat yaşlandırma ve ardından 620°C'ye fırın soğutma
- Toplam 18 saat yaşlandırma süresi (hava soğutmalı) için 620°C'de tutulma .

2.3.1. Inconel 718 malzemelerin üretim yöntemleri

Inconel 718, malzemeler genel olarak ergitme, dövme ve haddeleme, toz metalurjisi, hassas döküm ve kaynak işlemi olmak üzere çeşitli yöntemlerle üretilmektedir.

Süper alaşımlar için spesifik ergitme metotları mümkün olan en homojen ve en temiz yapıyı elde etmek için geliştirilmiştir. Inconel 718 için özellikle geliştirilen yöntemlerde kısa ömürlü yorulma mukavemeti için ciddi anlamda gerek duyulan kompresör diski ve türbin uygulamasına odaklanılmıştır. Kısa ömürlü yorulma mukavemeti ayrışma ve kalıntı gibi iç hataların sayısı ile alakalıdır (Tablo 4). Meydana gelen beyaz noktalar üstünde araştırmalar son dönemlerde daha da artmıştır. Bu hataların vakumlu ark ile yeniden ergitme (VAYE) işlemi ile meydana geldiği bulunmuştur. Öte yandan bu sorunun elektro cüruflla yeniden ergitme (ECYE) ile çözüldüğü ve inklüzyonların daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple düşük çevrimli kısa ömürlü yorulma için elektro cüruflla tekrardan ergitmenin daha avantajlı olduğu düşünülmektedir. Öte yandan elektro cüruflla tekrardan ergitme ile elektro cüruflla tekrardan ergitmenin vakum indüksiyon ergitmesiyle (VİNER) beraber kullanılması da oldukça avantajlıdır (

Tablo 5) (Davis J.R., [43]).

Tablo 4. Inconel 718 alaşımında hatalar (William vd. 1987)

HATA	BİLEŞİMİ	İNCELEME YÖNTEMİ
Kalıntılar (oksitler, nitrürler)	N, O, Mg, Ca, Al	Kısa ömürlü yorulma deneyi
Nitrürler	N, Al, Mg	Kısa ömürlü yorulma deneyi
Karbürler ve karbür demetleri	Ca, Al	Kısa ömürlü yorulma deneyi

Boşluklar	-	Ultrasonik test ve makro dağlama
Benekler	Yüksek Ti ve Nb	Ultrasonik test ve makro dağlama
Beyaz noktalar	Düşük Ti ve Nb	Ultrasonik test ve makro dağlama

Tablo 5. Demir Nikel bazlı süperalaşımlar için ergitme üretim işlemleri [44]

İŞLEM	AMAÇ
VİNER/VAYE	Nitrür ve karbürleri minimize etmek, iğnemsî yapıları ve kümelenmeyi gidermek
VİNER/ECYE/VAYE	Beyaz noktaları en aza indirmek ve yapıyı en temiz haliyle elde etmek
VİNER/ECYE	Temiz yapı saplamak, beyaz noktaların giderilmesi, reaktif elementlerin kontrolü

Demir nikel bazlı süperalaşımlara paslanmaz çelikler gibi atmosfere açık ergitme metotları ile işlem yapılabilir. Buna ek olarak bu alaşımların büyük bir kısmında vakum indüksiyon ergitme gerekmektedir. Bu yöntemin kullanılması Al ve Ti seviyelerinin kontrol altında tutulabilmesini sağlamakta ve böylece cüruf ve arayer gazlarının meydana gelmesi en düşük düzeye çekilebilmektedir (Davis J.R., [43]).

Demir-Nikel bazlı süperalaşımlar ergitilirken ilk VİNER işlemi kullanılmaktadır. Hassas döküm ile işlenecek olan malzemelerde ergitme yöntemi tek olabilmektedir. Ayrıca dövme ile malzeme biçimlendirilecekse, örneğin büyük bir gaz türbini parçası gibi sıcak biçim verilmesi gereken yüksek mukavemetli bir malzeme ise, yeniden ergitme ile ikincil işlem gerekmektedir. VİNER ingotları genel olarak homojen olmayan, kaba, alaşım elementlerle segregasyon oluşturmuş taneli yapıdadır. Yeniden ergitilerek döküm yapılacak birincil materyalin işlenmesinde herhangi bir sorun olmamasına rağmen, bu faktörler Astroloy, Waspallıy, Inconel 901 ve Inconel 718 gibi dövme alaşımların sıcak biçimlendirilmelerini sınırlandırmaktadır. Bu sorunlar VİNER işleminden sonra VAYE ve EGYE kullanımıyla çözülebilmektedir. Yüksek γ ' hacim (V_K) değerli olan süperalaşımlarda VİNER/ECYE ya da VİNER/VAYE işlemleri dahi sonraki sıcak işlemler için ingot yapısını uygun hale getirememektedir. Bu tür demir nikel bazlı süperalaşımlar TM yöntemleriyle imal edilmektedir. İngot ergitme teknolojisinde yeni ortaya çıkan vakumlu çift ark elektrotlu yeniden ergitme gibi işlemler yüksek mukavemeti olan bu tür alaşımları

istenen rafınasyona ulaştırabilmektedir. Bu şekilde dövme ve ekstrüzyon uygulanabilen ingotlar oluşturulabilmektedir.

Demir nikel ve nikel bazlı süperalaşımların kalıntı seviyesini en aza indirmek ve özelliklerini geliştirmek için elektron bombardımanlı tekrardan ergitme (EBYE) gibi alternatif bir rafınasyon yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem döküm ya da dövme için ön malzeme imalatına olanak sağlamaktadır. Yöntem vakum ark çift elektrotlu yeniden ergitme ve argon oksijen gaz arıtması ile EBYE gibi geliştirilmiş sekonder ergitme yöntemleri ekonomikliği nedeniyle süperalaşım üretiminde geniş ölçüde tercih edilmektedir (Kuşhan M.C, [45]).

Dövme ve haddelemede süperalaşımların plastik biçimlendirilmesinde kullanılmaktadır. Dövme kapsamında ekstrüzyon, ekstrüzyon dövme ve ekstrüzyon-haddeleme başlıca yöntemleri oluşturmaktadır. Bu işlem doğrudan ingot yapısı ve alaşım içeriğine göre karar verilerek yapılmaktadır. Haddeleme ya da ekstrüzyon sonrasında homojenleştirme ısı işlemi uygulanmaktadır. Ekstrüzyon işlemi uygun tane büyüklüğü oluşturmak ve izotermal süper plastik dövme işlemine hazır hale getirmek için de kullanılır. Alaşımların her tipi her yöntemle biçimlendirilirken ekonomik olmamaktadır. Ekonomikliği nedeniyle Demir nikel ve nikel bazlı süperalaşımlara en fazla uygulanan işlem dövmedir ve bu işlem presle ya da şahmerdan ile gerçekteştirilmektedir. Metot olarak dövme, sıcaklığın devamlı düşürölmesi sürecinde yapılmaktadır. Çünkü işlem uygulanacak materyal ön ısıtma fırınından çıkarılıp ondan düşük ısıda olan kalıp içine koyulmaktadır. Son dönemlerde izotermal dövme işlemi için işlenen parça ve kalıbı yalıtarak ya da ısıtarak aynı sıcaklık korunmaktadır (Günebakmaz S, [46]).

Homojen tane boyutlu son ürün için genelde haddeleme ve ekstrüzyon ile tavlama yapılmaktadır. Yöne de bazı süperalaşımlar sıcaklık uygulanmadan soğuk işlemle biçimlendirilebilmektedir. İki değişik yaklaşımdan birisi kullanılarak dövme işlemleri yapılmaktadır. Bunların ilkinde amaç mikroyapıdır. Termomekanik işlemlere malzeme içindeki mikro yapıya dikkat edilerek işlem yapılmaktadır. İkincisinde ise önemli olan fiyattır. Bu nedenle en ucuz araçlarla, en uygun geometrik şekillerle tavlama yapılarak üretim gerçekteştirilmektedir (Günebakmaz S, [46]). Demir-nikel bazlı süper alaşımlardan bazılarının uygun dövme sıcaklıkları (°C) ve dövülebilirlikleri aşağıda

Tablo 6 'da ele alınmaktadır.

Tablo 6. Demir nikel bazlı bazı süperalaşımların dövme sıcaklığı ve dövülebilirlikleri [47]

Alaşım	Dövülebilirlik	Dövme Sıcaklığı (°C)
Inconel 718	1065	Çok iyi
Inconel 901	1095	İyi-Çok iyi
Hastelloy X	1095	Çok iyi
A-286	1065	Çok iyi

Tablo 6 doğrultusunda genellikle süper alaşımların dövme sıcaklığının 1000-1100 °C arasında değiştiği söylenebilmektedir. Süper alaşımların dövülebilirliğinde kompozisyonu oldukça önemlidir. Örneğin kükürt gibi elementler olduğu zaman dövme ile çatlama meydana gelebilmektedir. Kükürtün fazla olduğu durumlarda Ce (Seryum) ve Mg (Magnezyum) gibi elementlerin kükürt ile bağlanması ve dövülebilirliğin geliştirilmesi yapılabilmektedir. Ayrıca karbonitrürler ve nitrürler de bazı çökeltiler meydana getirerek çatlama ya da özelliklerin kötüleşmesine neden olabilmektedir (Loria, [47]).

Süper alaşımların üretiminde diğer bir yöntem toz metalürjisi (TM)'dir ve oldukça fazla kullanılmaktadır. Uçak motor parçaları gibi yüksek kalite olması gereken ön alaşımlı süperalaşım tozlarından sıcak izostatik presleme ve izotermal dövme metotları ile üretim mümkün olmaktadır (Basmacı, 2002). Yüksek mukavemete sahip Inconel 100 gibi gaz türbin diski alaşımlarının geleneksel yöntemlerle işlenmesi oldukça zordur ve pratik olmamaktadır. Bu sebeple üretimleri için TM tercih edilmektedir. Atmosfer olarak toz üretiminde soygaz kullanılmaktadır ve sıcak izostatik presleme ve ekstrüzyon kullanılarak tozlar birleştirilmektedir. Sıcak izostatik presleme ile daha sonraki işleme ya da dövmeye ya da son işleme uygun parça imal edilmektedir. Son işlemde genelde izotermal dövme tercih edilmektedir (Günebakmaz S, [46]).

Türbin alaşımlarının yapımında da toz teknikleri kullanılabilmektedir. Mekanik alaşımlama özelliklerden maksimum yararlanabilmek için en fazla kullanılan yöntemdir. Hızlı katılama teknolojisi çok yüksek çok yüksek V_k γ 'değeri olan yüksek alaşım içeren süperalaşımların işlenmesi için kullanılmaktadır ve ileri gaz türbini malzemeler de bu teknikte üretilmektedir. Hızlı katılama teknolojisiyle üretilen alaşımlar yönlü

dökülmüş alaşımlar gibi kazanç sağlamaktadır. Yönlü yeniden kristalleşme uzamış ve çok kristalli tanelerin esas yükleme eksenine paralel şekilde yönlendirilmesinde kullanılmaktadır (Kuşhan M.C, [45]).

Süper alaşımların üretiminde kullanılan diğer bir yöntem hassas dökümdür. Bu yöntemle üretilen parçalar son boyutlarına yakın şekilde imal edilmektedir. Genellikle birkaç kg altında olan parçalardır. Ancak hassas döküm daha büyük parçalarda da işe yarayabilmektedir. Hassas döküm kullanılarak büyük parçaların dökümünde Inconel 718 en ekonomik alaşımı oluşturmaktadır. Döküm kalıp tasarımı ve maça malzemeleri ile son dönemlerde kalıntı kontrolü ve tane boyutundaki gelişmeler döküm kalitesini artırmıştır. Döküm içinde meydana gelen kalın kesitli parçalar ve gözeneklerde ve yüksek V_k γ' değeri olan bazı alaşımlardan yapılmış parçalarda bu teknik sorun çıkarmaktadır (Davis J.R., [43]).

Dökümün yönlendirilmiş katılaşma ile yapılması genellikle uygulanan bir yöntemdir. Kolonsal tane yapıları fırında tek eksenli ısı akışı ile katılaşma çevrimi sırasında üretilmektedir. Kolonsal tane büyümesinin bir aşaması da tek kristal üretim teknolojisinin uçak gaz türbin hava engellerinde kullanılmasıdır. Alaşım kompozisyonunun ayarlanması ve tane sınırlarının kaldırılmasında mukavemeti artıran bir işlemdir (Davis J.R., [43]).

Süper alaşımların üretiminde kullanılan bir diğer yöntemde kaynaktır. Demir nikel bazlı süperalaşımların birçoğu, $Ni_3(Al, Ti)$ birincil gama (γ'), güçlendirici mekanizması nedeniyle ısıl işlem yapılarak çözündürülerek kaynak edilmektedir. Bazı alaşımlarda özel ısıl işlemlere kaynak öncesinde ihtiyaç duyulmaktadır. Nikel bazlı süperalaşımlar $Ni_3(Al,Ti)$ birincil gama (γ') fazı olan yaşlandırma sertleşmesi çökeltilerinden maksimum mukavetmelerini elde etmektedir. γ' fazı çok hızlı bir şekilde çökelmektedir ve deformasyon yaşanması kaynak süresince çatlamalara neden olmaktadır. Deformasyon çatlamasının engellenmesinde Nb eklenmesi işe yaramaktadır. Bu ekleme işlevi yaşlanma sertleşmesi yapan (Ni_3Nb) γ'' fazını oluşturmaktadır ve bu faz sınırlı miktarda $Ni_3(Al, Ti)$ γ' fazı ile birlikte olduğunda, deformasyon yaşanması çatlama olmaksızın mukavemet artışı meydana gelmektedir (Günebakmaz S, [46]).

Inconel 718 başta olmak üzere demir-nikel bazlı alaşımlarda Nb eklendiğinde kaynakla alakalı mikro çatlaklarda tane büyüklüğünün etkisiyle ilgili deneysel araştırmalar

ve teoriler ile uyum göstermektedir. Bu denetlerde mikro çatlaklara büyük tanelerin zıt etkisi olduğu gösterilmiştir (Bavarian, [48]).

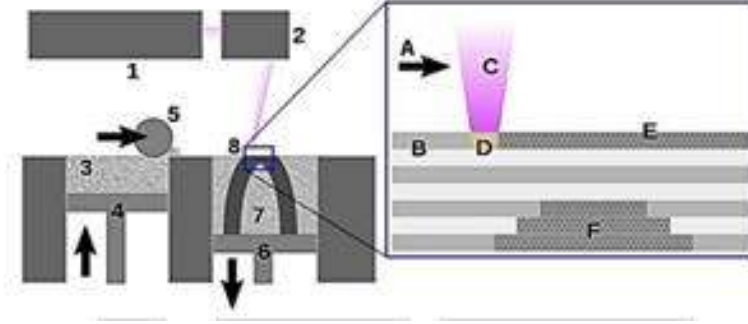
Bu yöntemler arasında Inconel 718 esas olarak toz yatağı prosesleriyle işlenir. Bu malzemeyi işleyebilen Metal Eİ teknolojileri, Elektron Işını Ergitme (EBM), Seçici Lazer Eritme (SLM) ve son zamanlarda Bağlayıcı Püskürtmeyi (Günebakmaz S, [46]). Malzeme eklemeli imalat teknolojisi ve ergitme aşağıda ele alınacaktır.

Seçici Lazer Eritme (SLM), metalik tozlardan metal makineler üretmek için gelişmiş bir eklemeli üretim sürecidir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine göre, tozun seçici bölümlerini katman katman eritmek ve kaynaştırmak için bir enerji temeli olarak yüksek yoğunluklu lazer kullanan bir toz yatağı füzyon işlemidir. Bu teknolojinin patenti ilk olarak 1997 yılında Alman Patent ve Ticari Marka Ofisine uygulanmış ve 1998'de yayınlanmıştır. 2001 yılında, doğrudan seçici lazer sinterleme (SLS) konusundaki orijinal çalışmalarına dayanan Das ve Beaman tarafından da patent başvurusu yapılmıştır.

Bir eklemeli üretim katmanı yeniliği olan SLS, küçük plastik, metal, sanatsal veya cam toz parçacıklarını ideal bir üç boyutlu şekle sahip bir kütle halinde eritmek için güçlü bir lazerin (örneğin bir karbon dioksit lazeri) kullanımını içermektedir. Lazer, toz yatağının dışında parçanın 3 boyutlu gelişmiş bir tasvirinden (örneğin bir CAD kaydından veya tarama bilgisinden) üretilen çapraz alanları filtreleyerek toz halindeki malzemeyi seçici olarak eritmektedir ve her bir enine kesit incelendikten sonra, toz yatağı bir katman kalınlığı kadar aşağı indirilir, üstüne başka bir malzeme katmanı uygulanmakta ve parça tamamlanana kadar döngü yeniden karıştırılmaktadır (Şekil 4 SLS imalat Şeması) (Johnson, [49]).

SLS/SLM, 2 boyutlu katman yığını belirlediği parça hesaplamasının 3 boyutlu CAD tasviri aracılığıyla toz yataklarına lazer enerjisi kullanarak 3 boyutlu parçalar üretmektedir. Her katman daha sonra gerekli kesit alanı üzerinde bir lazer noktası kontrol edilerek ve ince bir laminada partikülleri çözmek, sinterlemek ve birleştirmek için lazer kullanılarak yapılmaktadır. Yakın zamanda hazırlanan katmanın başına bir toz katmanı daha yayarak ve inceleme döngüsünü yeniden karıştırarak; sonraki katmanlar yapılır ve tüm 2 boyutlu katman yığını yapılandırılır ve ilk 3B boyutlu CAD güçlü model tarafından tasvir edilen matematiği çerçevelemek için birlikte güçlendirilene kadar önceden var olan

katmanlara eklenmektedir. Araştırma, parçaların güvenilir bir şekilde oluşturulması için SLS/SLM ölçüsünün bilim temelini oluşturmak için alüminyum kompozitlerle ilgili olarak SLS/SLM ölçüsünün varyasyonlarını anlamaktır (Johnson, [49]).

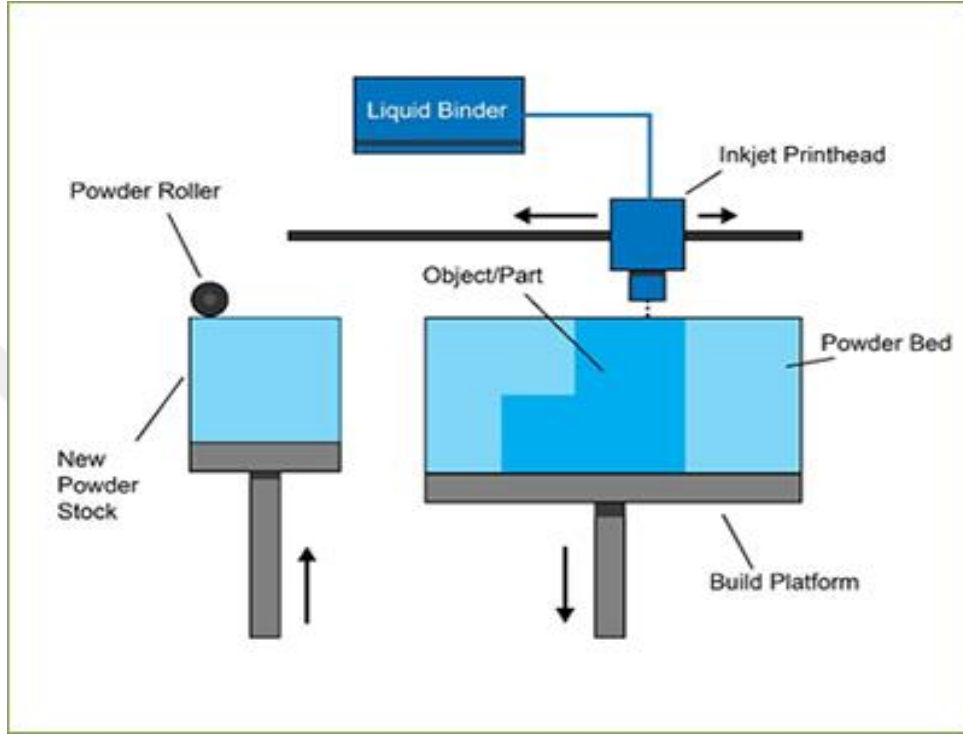


Şekil 4. SLS Şeması [49]

SLS, toz olarak mevcut olması ve toz parçacıklarının ısı uygulandığında erime veya sinterleme eğiliminde olması koşuluyla hemen hemen her malzemeyi işlemek için kullanılabilir. Çoğu malzeme için durum böyledir. Düşük füzyon veya sinterleme özelliklerini gösteren tozlar, bazik toza geçici bir bağlayıcı malzeme (tipik olarak bir polimer bağlayıcı) eklenerek lazerle sinterlenebilir. Tam parça sinterlendikten sonra, “yeşil” parça bir termal fırında ayrıştırılarak geçici bağlayıcı çıkarılabilir. Bir kurban bağlayıcının kullanılması, lazerle sinterlenebilir malzemelerin paletin büyütülmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, diğer hızlı prototipleme işlemlerine kıyasla, fedakar bağlayıcı olmadan lazerle sinterlenebilir malzemelerin (tozların) yelpazesi oldukça geniştir. Polimer tozları, SLS'de ilk ve hala en yaygın olarak uygulanan malzemelerdir. Polikarbonat (PC) tozları gibi amorf polimerler, çok iyi boyutsal doğruluk, özellik çözünürlüğü ve yüzey kalitesi (tane boyutuna bağlı olarak) ile parçalar üretebilir. Ancak, bunlar yalnızca kısmen konsolide edilmiştir. Tipik uygulamalar, silikon kauçuk ve dökme epoksi kalıpların imalatında kullanılan SLS uygulamalarıdır (McAlea vd., [50]). Ayrıca SLS inconel 718 üretiminde de kullanılmaktadır.

Bağlayıcı püskürtme işlemi ise iki malzeme kullanmaktadır; toz bazlı bir malzeme ve bir bağlayıcı. Bağlayıcı, toz katmanları arasında bir yapıştırıcı görevi görmektedir. Bağlayıcı genellikle sıvı formda ve yapı malzemesi toz formundadır. Bir baskı kafası, makinenin x ve y eksenleri boyunca yatay olarak hareket etmekte ve yapı malzemesinin ve bağlama malzemesinin değişen katmanlarını biriktirmektedir (Şekil 5). Her katmandan

sonra, yazdırılmakta olan nesne yapı platformuna indirilmektedir. Ciltleme yöntemi nedeniyle, malzeme özellikleri her zaman yapısal parçalar için uygun değildir ve göreceli baskı hızına rağmen, ek sonradan işleme genel işleme önemli ölçüde zaman kazandırabilmektedir (Moiz, [30]).



Şekil 5. Bağlayıcı Püskürtme Şeması [51]

Diğer toz bazlı üretim yöntemlerinde olduğu gibi, basılan nesne toz yatağı içinde kendi kendine desteklenmekte ve tamamlandıktan sonra bağlanmamış tozdan çıkarılmaktadır. Teknolojiye genellikle 3B teknolojisi denmekte ve telif hakkı bu adla korunmaktadır. İşlem genel olarak şu basamaklarla gerçekleşmektedir (Binderjetting, [51]).

- Toz malzeme, bir silindir kullanılarak yapı platformunun üzerine yayılır.
- Baskı kafası, gerektiğinde tozun üzerine bağlayıcı yapıştırıcıyı bırakır.
- Yapı platformu, modelin katman kalınlığı kadar düşürülür.
- Bir önceki tabakanın üzerine başka bir toz tabakası yayılır. Nesne, tozun sıvıya bağlandığı yerde oluşur.
- Bağlanmamış toz, nesneyi çevreleyen pozisyonda kalır.
- İşlem, tüm nesne yapılarına kadar tekrarlanır.

2.3.2. Inconel 718 için eklemeli (katmanlı) imalat

Inconel 718 bileşenlerinin geleneksel işleme yöntemleriyle üretimi, oda sıcaklığında işleme için aşırı takım aşınması ve düşük malzeme kaldırma oranları ve yüksek sıcaklıkta şekillendirme işlemleri için refrakter eleman ayrımı (Nb ve Mo) nedeniyle zor olabilmektedir. Zorluk ve gelişmiş üretim yöntemlerinin kullanılmasına duyulan ihtiyaç, dahili soğutma kanallarına sahip türbin kanatları veya sıvı yakıtlı roket motoru enjektörlerinin çok sayıda küçük memeleri gibi karmaşık Inconel 718 bileşenlerinin üretimi için yüksek düzeydedir (Soller vd., [52]).

Diğer bir ifadeyle katkısız Inconel ile istenilen tasarımları elde etmek zor olabilmektedir. Yani, yüksek sıcaklıkta korozyon ve sürünme direnci gibi mekanik performans özelliklerini etkileyebileceğinden, geleneksel üretim yöntemleri kullanıldığında bileşen performansı düşebilmektedir. Herhangi bir işleme, dövme veya kaynak işleminin başlangıcında bir tavlama adımı da gereklidir. Inconel 718'in eklemeli üretimi, mekanik özelliklerin feda edilmediğini ve hatta döküm veya dövme parçaların özelliklerini aşabileceğini göstermiştir (Hunt, [53]).

Daha önce bahsedildiği üzere eklemeli imalat (Eİ), herhangi bir parçaya özel alet veya bilgi olmadan doğrudan bir bilgisayar CAD modelinden, toz veya tel besleme stoğundan katman katman üç boyutlu (3B) parçaların oluşturulmasına izin veren gelişmiş bir üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Yalçın ve Ergene, [14]).

Tipik olarak, besleme stoğunun (seçici olarak) eritilmesi veya sinterlenmesi için bir lazer veya bir elektron ışını kullanılmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında, Malzemelerin katman katman eklenmesi ile gerçekleşen eklemeli imalat yöntemi yani 3B baskı sistemli imalat bir avantajlar dizini sunmaktadır (Özsoy ve Duman, [54]).

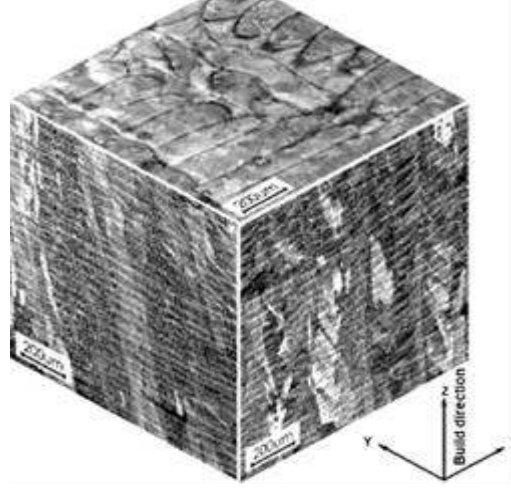
Bu dizini içeren sıralamaya aşağıda yer verilmektedir.

- Geleneksel olarak üretilmeyen geometrili karmaşık şekilli bileşenlerin imalatına izin vermesi,
- Üretim-geliştirme döngüsünü ve kısa sürede ve düşük finansal yatırımla küçük parti parçaları üretme yeteneği,

- Malzeme kullanımını optimize ederek maliyetten tasarruf etme,
- Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş parçalar üretme yeteneği

Bu avantajlar, Eİ'yi havacılık, ulaşım, savunma ve biyomedikal dahil olmak üzere çok çeşitli endüstriler için çekici kılmaktadır. Düşük alüminyum ve titanyum içeriği nedeniyle Inconel 718'in iyi kaynaklanabilirliği, Eİ için faydalıdır. Eİ teknikleri, hammadde türlerine (toz veya tel) ve kullanılan enerji kaynağına (lazer veya elektron ışını) göre kategorize edilebilmektedir. Inconel 718 için, doğrudan lazer biriktirme (DLD), doğrudan elektron ışını (tel) biriktirme (DEBD), seçici lazerle eritme (SLM) elektron ışını ergitme (EBM) olmak üzere farklı Eİ yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle Eİ kapsamında üretilen Inconel 718'lerin özelliklerine bakılacak olursa (Hosseini ve Papavich, [55]).

Çok sayıda çalışma, biriktirme ve ısıtım işlem sonrası koşullar altında farklı Eİ prosesleri için Eİ Inconel 718'in mikro yapısını incelemiştir, Şekil 6 birbirine dik üç düzlemde yerleşik SLM Inconel 718'in mikro yapısını göstermektedir. Katmanlı malzeme yapısı ve sütunlu mimari yapılar boyunca görülebilmektedir. X ve Y düzlemleri için sütunlu γ dendritleri ve Z-düzleminin (tarama yüzeyi) eş eksenli yapısı, Z-doğrultusunda uzamış çubuk şekilli taneleri göstermektedir. Sütunlu yapılar, önceki katmanların kısmen yeniden erimesi ve γ dendritlerinin heterojen çekirdeklenmesi (yani epitaksiyel büyüme) nedeniyle birkaç biriken katman boyunca uzanmaktadır (Özsoy ve Duman, [54] ; Hosseini ve Papavich, [55]).

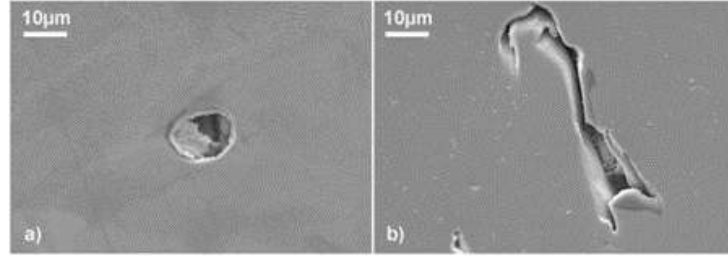


Şekil 6. SLM Inconel 718'in mikro yapısı [55]

Eİ Inconel 718'in kristalografik dokusunu araştıran birkaç çalışma vardır, ör. Eİ işleminde sonra üretilen doku, yerel ısı akış yönlerine ve FCC yapısının tercih edilen altı $\langle 001 \rangle$ büyüme yönünden birinde rekabetçi tane büyümesine bağlı olarak değişmektedir. Rakabetçi tane büyümesi, malzemenin yönlerinden birinin Şekil 7'de yer aldığı üzere “Z” yönüne paralel bir büyüme sağlama eğilimini gösterecektir. Güç girişi ve tarama stratejisi gibi proses parametrelerine bağlı olarak, Eİ Inconel 718 için dizi küp dokusundan fiber dokusuna, kadar rastgele bir dokuya kadar bir dizi doku olduğu düşünülecek olursa, yüksek sıcaklıkta sünme-yorulma uygulamaları için olası malzeme dokusunun, aslında tercih edilen doku formunda kalmasını zorlayıcı yönlerini görmeyi mümkün kılmaktadır. Bu da sahaya özgü yük-uyarlama özelliklerinin geliştirilmesi için bir tasarım parametresi olarak kullanılabilecek, böylelikle istenilen özelliklerin doku formu ile eklenebileceği bir parametrenin geliştirilmek üzere kullanılacak parametreler oluşturabileceği bildirilmiştir (Çelik ve Özkan, [56], Erener ve Boz, [57]).

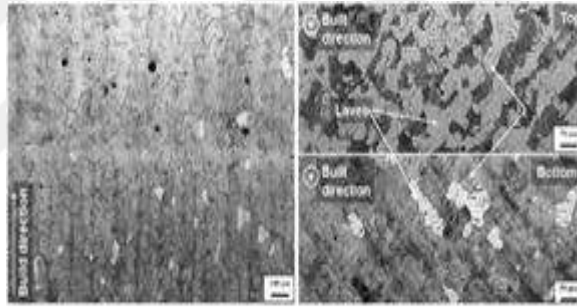
Toz bazlı Eİ Inconel 718'in mikro yapısında gözlemlenen bir başka tipik özellik de gözenekliliktir. Genel olarak, Eİ alaşımları için, nihai ürün kabulü için önemli bir konu yoğunluk (gözeneklilik) ve/veya çatlakların varlığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, dairesel şekilli gözenekler (7a) genellikle gazın erimiş metal içinde tutulması nedeniyle oluşurken, düzensiz şekilli 'füzyon eksikliği' gözenekleri (7b) imalat işlemi sırasında tam olmayan hammadde füzyonuna atfedilmektedir (Hosseini ve Papavich, [55]).

Çatlaklar ise, Eİ kaynaklı artık gerilmelerden veya katılaşma veya sıvılaşma çatlamaının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Erener ve Boz, [57]).



Şekil 7. SLM Inconel 718 için Gözlemlenen Farklı Gözeneklilik Türü [55]

Eİ Inconel 718'in mikro yapısı, yapıların farklı bölümleri tarafından deneyimlenen yüksekliğe bağlı termal profil nedeniyle tipik olarak bina yüksekliği boyunca değişmektedir (Şekil 8). Yapı alt tabakası ile doğrudan temas nedeniyle, alt katmanlar için genellikle daha büyük bir soğutma hızı elde edilmektedir. Bu nedenle, üst katmanlar, alt katmanlara kıyasla daha kaba sütunlu dendritler sunmaktadır (Hosseini ve Papavich, [55]).



Şekil 8. Yapı yüksekliği sayesinde SLM Inconel 718'in mikro yapısının değişimi [55]

Şekil 8'de gösterildiği gibi, Eİ Inconel 718' deki mikro-segregasyon, esas olarak Nb ve Mo açısından zengin Laves fazı biçiminde belirgindir. Yapının üst katmanındaki daha düşük soğutma hızı, genellikle daha yüksek oranda Laves fazına ve hatta kalın ve sürekli bir Laves ağının oluşmasına neden olmaktadır (Hosseini ve Papavich, [55]).

İşte bu ağlanma yahut dendritlerin oluşumuna neden olan artık gerilmesi, malzemenin bir parçası olarak kullanıldığında yüzey onarımına imkân tanımak için yönlendirilebilmektedir. Böylelikle malzemenin istenen özelliklerin artırılması, istenmeyen özelliklerin ise etki yönünden azaltılması sağlanabilmektedir. İşte eklemeli imalatın bir parçası olan 3B baskısının kullanılması, imalat sırası veya sonrasında malzeme kuvvetlendirmesine etki edebilmektedir. Bu temel motivasyon, malzeme bilimi açısından

en iyi özelliklerin bir araya gelmesi imkanını yakalama fırsatı sunan teknikleri işaret etmektedir (Sürmen, [58]).

2.3.3. Inconel 718 ergitme yöntemleri ve sınırlılıkları

Inconel 718 gibi nikel bazlı süper alaşımlar için ergitme yöntemleri malzemenin temel özelliği nedeniyle oldukça yüksektir. Inconel 718 alaşımları 700 °C'den etkilenmemesi yüksek ergime kabiliyetine ilişkin fikir verici olmaktadır (Ergene, [59]). Çok uzun süreli 650 °C sıcaklığa maruz bırakılan Inconel 718 süper alaşımlarda yüzeysel şekil değişikliğinin gözlenmemesi bu fikri pekiştirmektedir (Katı, Bölükbaşı ve Ozan, [60]). Inconel 718 süper alaşımları yapısında demir ve nikel elementlerini bulunduran süper alaşımların karakteristik olarak sergiledikleri fiziksel özellikleri arasında yüksek ısı dayanımı ile birlikte sert yüzey ve yapıları gözeneklerinin gözle görülmesi mümkün olmayan pürüzsüzlüğü yansıtmaktadır. Tüm bunların yanı sıra mükemmel mekanik özellikler gösteren süper alaşımların özellikleri arasında yüksek mukavemet kabiliyeti, korozyon direnci bulunmaktadır. Kırılganlık ve süneklik gibi fiziksel mekanik özellikler de üretimin nihai hedefine yani malzemenin kullanım alanına göre kimi zaman istenen kimi zaman ise istenmeyen özelliklerini sergilemektedir (Gasson, [61]).

Inconel 718'in ısıtılma işlem ve döküm gibi maliyetli üretim aşamalar sorunlarının yanı sıra, temel mekanik ve fiziksel özelliklerin yeniden düzenlenmesine ilişkin deneylerin yapılması, ergitme yöntemlerinin de yeniden düzenlenmesine yol açmıştır. Sinter lazerleme veya eklemeli imalat yahut elektron ışın ergitmeli eklemeli imalat veya elektron bombardımanı ile yeniden ergitme yöntemleri günümüzde kullanılan teknolojileri tanımlamaktadır ve avantajları ısıtılma işlem gibi ergitme yönteminin takibinde döküm ve maçalama gibi şekillendirme süreçlerine ayrılan ek alan ve ekipmanların teknoloji ile yeniden yorumlandığı modern ergitme ve şekillendirme yöntemleri olarak görülmektedir (Panwisawas, Tang ve Reed, [62]). Bu yöntemlerin Inconel 718 için kullanılabilirliğini gösteren literatür köklü bir geçmişe sahip olmayan teknolojileri içerdiğinden yeni olmakla birlikte yoğun olarak devam etmektedir.

2.3.4. Inconel 718 malzemelerin kullanım alanları

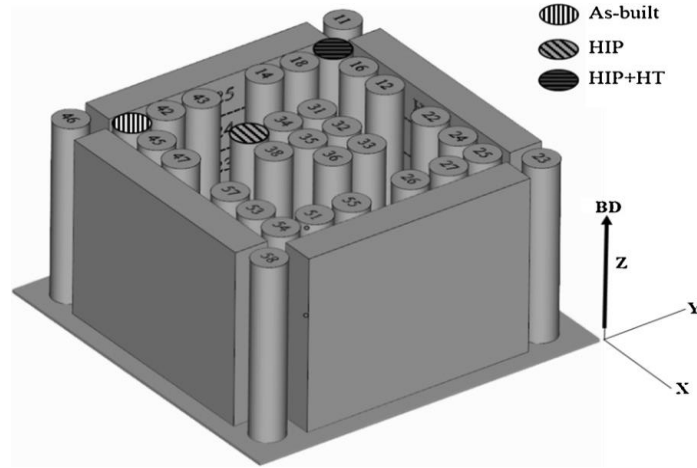
Nikel esaslı süper alaşımlar ileri teknoloji ürünü olan hava taşıtları ve savunma sanayinin vazgeçilmez ekipmanlarında ve motorlarda yüksek ölçüde tercih edilmektedir. Bu tercih nedeni 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre dayanımalarını korumalarından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, uçak motoru, endüstri tesislerinin tahliyesini sağlayan gaz türbinleri, uzay araçlarının çeşitli aksamaları, uzay roketlerinin fırlatılmasını sağlayan aksamalarda, roket çıkışlarında ve motorlarında, nükleer santrallerde ve reaktörlerinde, su altı araçlarında, buhar türbinlerinde, jeotermal enerji tesis aksamalarında, petrol ve petrokimya tesis ekipmanları gibi akla gelebilecek her türlü yüksek sıcaklığın söz konusu olduğu ortamlarda kullanılan, makine, ekipman ve aksamalarında sıklıkla tercih edilmektedirler.

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde elektron ışın ergitme yöntemi ile üretilen Inconel 718 süper alaşımlarında ısıtıl işlem ve sıcak izostatik preslemenin mikro-yapıya ve mekanik özelliklere etkileri konusunda yapılan çalışmalar incelenmiş olup yöntem belirleme konusunda literatür özetinden yararlanılmıştır.

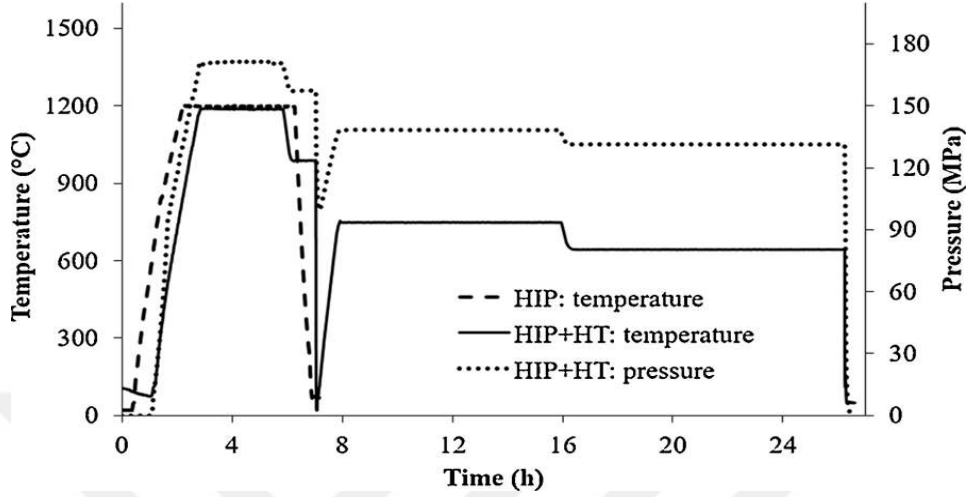
Literatür taraması sırasında, Goel ve arkadaşları [63], tarafından EBM yöntemiyle üretilen Inconel 718 süper alaşımının mikro yapısının ve sertliğinin incelenmiş olduğu çalışma yapılan bu çalışmaya uygun bulunarak yönetime dair adımları, bu çalışmada da kullanılacak olan izostatik presleme yöntemine başvurusu ayrıntılarıyla değerlendirilmiştir.

Goel ve arkadaşları [63], çalışmasında izostatik presleme yöntemi, izostatik presleme (HIP) ve izostatik presleme + ısıtıl işlem (HIP+HT) kombinasyonu uyguladıkları ve tek HIP kalıbı üzerinde denedikleri görülmektedir. Araştırmacılar, her iki uygulamanın sonuçlarını değerlendirirken malzemede bulunan kusurların önemli ölçüde giderilmiş olduğu ve sütunlu tane yapısı, seyrek boşluklu yapıya dönüştüğünü gözlemlediklerini bildirmişlerdir. Araştırmacılar son olarak sadece γ'' fazı üzerine HIP uygulaması sertliği düşürürken kombine uygulamasının HIP+HT bu sertlik değerlerinde iyileştirme sağladığını da ileri sürmüşlerdir. Araştırmacıların kullandıkları EBM yapısının CAD modeli Şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9. Bu çalışmada incelenen EBM yapısının CAD modeli. Ok yapım yönünü gösterir. Yapılmış durumda incelenen çubuklar ve işlem sonrası işlemde geçenler etiketlenir [63].

Goel ve arkadaşları [63], ayrıca sıcaklık bildiriminde de bulunarak izostatik presleme için ilk işlem (HIP) ikinci işlem yani izostatik presleme+ısıtma işlemi (HIP + HT) grafiğini oluşturmuşlardır. Şekil 10’de bu grafiğe yer verilmektedir.



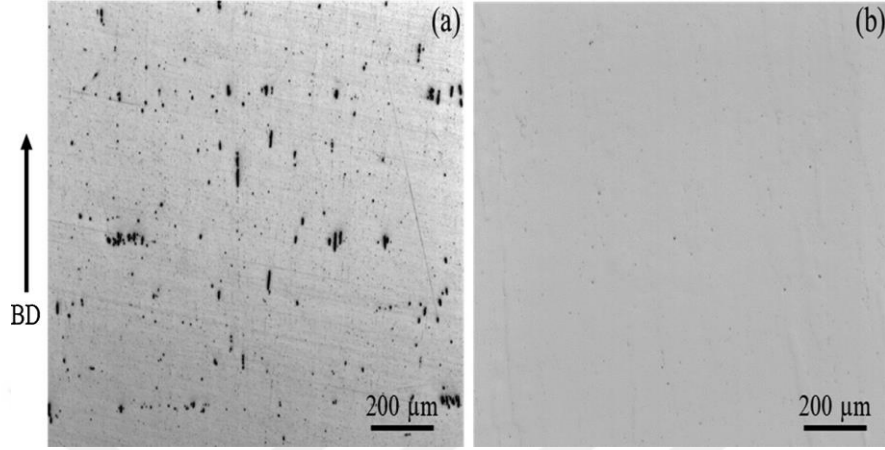
Şekil 10. HIP ve HIP + HT Grafiği [63]

Grafikte HIP ve HIP + HT sırasında termal profilleri noktalarla gösterirken, Basınç profilini tam çizgi ile HIP + HT sırasında sıcaklıkla basınç değişimini ise kesikli çizgiler ile gösterilmektedir. Bu da bu çalışmanın konusu olan Inconel 718’in basınç ve sıcaklık ilişkisindeki davranışını sergilemesi açısından yararlı görülmüştür. Bu çalışmaya dayanarak sonradan yapılan işlemlerin etkileri Tablo 7’de verilmiştir. Goel ve arkadaşları [62]; FC, RC ve RT sırasıyla fırın soğutmayı, hızlı soğutmayı ve oda sıcaklığını belirtmektedir.

Tablo 7. Sonradan Yapılan İşlemlerde Inconel 718’in Davranışı [63]

Sonradan Yapılan İşlemler	Döngü
HIP	1200 °C/ 120 MPa/ 4 h/ RC (Yaklaşık Olarak 42 °C/min)
HIP+HT	1185 °C/ 170 MPa/ 3 h/ FC (Yaklaşık Olarak 13 °C/min) Çözelti Sıcaklığı (980 °C) Çözelti İşlemi (ST): 980 °C/ 157 MPa/ 1 h/ RC to RT Yaşlandırma: 740 °C/ 138 MPa/ 8 h/ FC to 635 °C/ 131 MPa/ 10 h/ RC to RT

Goel ve arkadaşları [63], çalışmasında ayrıca, HIP+HT uygulanan numunelerde, HIP+HT uygulanmayan numunelere göre mikro yapılarında iyileşmelerin olduğu optik mikroskop görüntüleriyle Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. Ok yönü imalat yönünü göstermektedir. (a) yapılmaz malzeme, (b) HIP uygulaması [62]

Deneyisel çalışmaları sonucunda Goel ve arkadaşları EBM yöntemiyle üretilen Inconel 718 ile ilgili şu sonuçlara ulaşmışlardır Goel ve arkadaşları [63],

- Hem HIP, hem de HIP-HT uygulamaları sonucunda As-built yapısal üretilen Inconel 718’e göre mikroyapıda ciddi iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir.
- As-built Inconel 718 malzemenin imal yönü, işlem sonrasında da değişmemiştir. Buna rağmen düzensiz tanecik dağılımı işlem sonrasında da gözlemlenmiştir.
- HIP, ‘ δ ’ fazının tamamen çözülmesini sağlamıştır.
- HIP, ‘ γ'' ’ nin tamamen çözülmesine yol açtı ve bu da önemli bir as-built malzemeye kıyasla sertlik azalmasına neden olmuştur. Ancak, HIP + HT, as-built haliyle karşılaştırıldığında ‘ γ'' ’ artışına neden olmuştur, HIP + HT işlemleri uygulanan numunede iki aşamalı kontrollü ısı işlem sonucu yaşlanma ve daha yüksek mikro sertlik şeklinde kendini göstermiştir.

Goel ve arkadaşları [63], tarafından yapılan çalışmada izlenen bu yöntem bu çalışmanın da uygulanması sırasında kullanılacağından çalışmanın özetine ayrıntıları ile yer verilmiştir. Bununla birlikte bu tez çalışmasına benzer çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür. Goel ve arkadaşları [63], çalışmasına ek olarak, Michael M. Kirka ve arkadaşları [64], çalışmasına rastlanmıştır.

“Elektron ışını eritme işlemiyle üretilen sonradan işlenmiş Inconel 718'in mekanik davranışı” konusunu ele almışlar üretim yönlerine göre ikincil HIP ve STA işleminin Inconel 718'in mekanik özellikleri incelemişlerdir. Elektron ışını eritme (EBM) işlemi, Inconel 718'i imal etmek için kullanmışlardır. Mikroyapı ve gerilme özellikleri hem imal edildiği gibi hem de sonradan işlenmiş durumda enine (T-oryantasyonu) ve uzunlamasına (L-oryantasyonu) yapı yönüne göre karakterize edilmiştir.

İşlem sonrası, mikro yapıyı homojenleştirmek amacıyla, hem sıcak izostatik presleme (HIP) hem de çözelti işlemi ve yaşlandırma (STA) işlemleri ile çalışma sunulmuştur. Çalışma fabrikasyon durumunda (as-built) EBM Inconel 718, yapı yüksekliğinin bir fonksiyonu olan uzamsal olarak bağımlı bir mikro yapı sergilediği araştırmada belirtilmiştir. Son birkaç tabakayı kapsayan, denge katılaşma koşulları altında tahmin edilen ürünlerden (karbürler ve Laves fazı) oluşan bir özlü dendritik yapıya sahip olarak, yapının üst yüzeyinden artan mesafeyle, özlü dendritik yapı, ikincil dendrit oluşumlarının tamamen çözülmesiyle giderek daha homojen hale geldiği araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir. Araştırmada ayrıca, zamansal faz kinetiğinin, güçlendirici γ 'nin çözülmesine ve tanecikleri kaplayan ince iğnelerden oluşan ağların çökmesine yol açtığı gözlemlenmiştir (Michael M. Kirka ve arkadaşları, [64]).

Araştırmadan elde ettikleri sonuçlar ise şu şekildedir:

- Mikroyapısal olarak, post-proses, δ ağlarının çözülmesine ve yapının yüksekliği boyunca homojen γ " çökmesine neden olmuştur. Üretildiği haliyle (as-built), çekme davranışı, hem 20 °C'de hem de 650 °C'de T- enine yönelimi içinde bir yükseklik hassasiyeti sergiler.
- L-oryantasyonu boyunca gerilme davranışı, tamamen ısıtılma işlemi görmüş durumda referans dövme materyali ile karşılaştırılabilir mukavemet değerleri sergiler. Son işlemten sonra, EBM Inconel 718 için akma mukavemeti, nihai mukavemet ve uzamanın, üretildiği haliyle (as-built), malzemeye kıyasla faydalı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.
- Ayrıca, son işlemin bir sonucu olarak, nihai akma mukavemetinin uzamsal varyansı ve enine doğrultudaki başarısızlıktaki uzama sırasıyla 4 ve 3 kat azalmıştır.
- Deneysel çalışmalarında EBM teknolojisiyle üretilmiş olan Inconel 718 test edilmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir.

Araştırmacıların çalışmalarında bu çalışmaya benzer bir biçimde hem sıcak izostatik presleme (HIP), özelti işlemi ve yaşlandırma işlemlerine yer verdikleri görölmüştür. Bu sebeple çalışmanın yöntem aşamasında yarar sağlayacağı düşünülmektedir.



4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Üretim ve Numune Hazırlama

4.1.1 Proses Parametreleri

Deneme çalışmalarında iki farklı tarama (hatch) enerjisi akımı değeri karşılaştırılmıştır. Bunların ilki üretici firma tarafından Inconel 718 malzemenin üretimi için iletilmiş olan parametre değeri olup, kontrol parametresi olarak sürece dahil edilmiştir. Bu parametreler, Tablo 8’de P1 ve P2 olarak tanımlanmış ve değerleri sırasıyla 32 mA ve 24 mA’dır. Ayrıca, elektron ışın akımı olarak (Speed Factor) 150 kullanılmıştır. Ekipman direk olarak hız değişimine, bu araştırmada kullanılan otomatik kullanım modunda izin vermemekle beraber, birimsiz olarak arka plandaki hesaplamalarda kullanılan SF değeri gözlemlenmektedir. Şekil 15a’da parametrelerin Arcam makinası üzerinde değişimi gösterilmektedir.

EBM prosesinin doğası gereği yüksek olan yüzey pürüzlülüğünün etkisini kaldırmak amacıyla frezeleme işlemi uygulanmaktadır (Şekil 20). Yüzey işleme, yüzey pürüzlülüğünün yüksek seviyede olması ve bu durumun yüzeyden içeri ilerleyecek mikro çatlakların oluşmasına sebep olma durumu yüzünden özellikle gerçekleştirilmekte olup, parçanın dış bölgesini oluşturmakta kullanılan contour parametrelerinin etki ettiği bölgeyi ortadan kaldırmaktadır. Bu sebeple çalışmada contour parametrelerinin değişiminin etkisine yer verilmemiştir.

4.1.2 Elektron Işın ile Ergitme Yöntemiyle Üretim

Üretimler 150x150 mm ölçülerinde imalat tablası kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, numuneler tablanın farklı bölgelerinde yerleştirilmiştir. Üretimler Şekil 12a’daki Arcam A2X EBM makinası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim sırasındaki ve sonrasındaki üretim görselleri Şekil 15b’de verilmiştir. Carpenter Additive Firması tarafından üretilen boyut dağılımı 45–105 μm ($-100 + 325$ mesh) olan Inconel 718 metal tozları kullanılmıştır. Üretim programı, tablanın farklı noktalarında konumlandırılmış olan

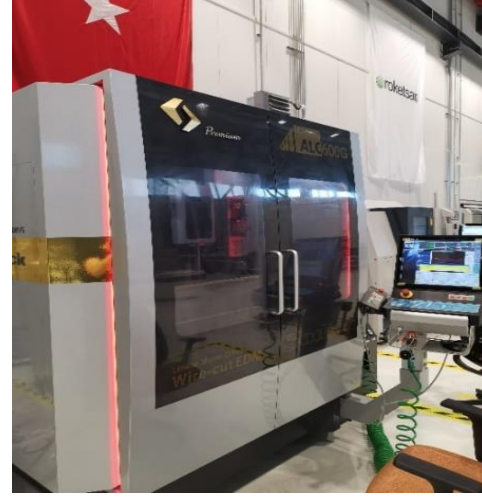
çekme testi numunelerinin ve yoğunluk küplerinin konvansiyonel işleme payları ile yerleştirilmesiyle başlamıştır. Gerçekleştirilen üretim kapsamında çok sayıda çekme kuponu ve yoğunluk ölçüm numunesinin üretimi mümkün kılınmıştır. Geliştirme çalışmaları için kullanılması planlanan ve tabla üzerinde temas etmeyecek şekilde basılmış olan numuneler ise toz temizleme işlemi (PRS-Powder Recovery System) sırasında (Şekil 16) tabladan ayrılarak işlemeye hazır halde üretim bütününden çıkarılmışlardır. Numunelerin üretim tablasında ayrılabilmesi için de tel erozyon yöntemi ile kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Tel erozyonda kesim ile tabladan ayırma işlemi Sodick ALC800G Şekil 12b’de görülen tezgâhta gerçekleştirilmiştir.

Deney çalışmalarında üretilen numuneler, kodları ve özellikleriyle beraber Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Üretim Detayları ve Numune Kodları

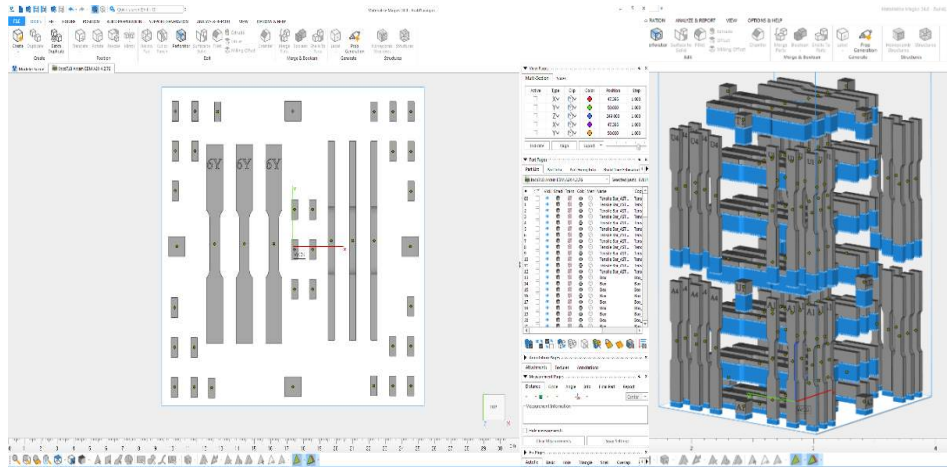
Kupon No	Eİ+Isıl İşlem	Eİ+HIP + Isıl İşlem	Eİ
P1-1	✓	✓	
P1-2	✓	✓	
P1-3	✓	✓	
P2-1	✓	✓	
P2-2	✓	✓	
P2-3	✓	✓	
P1-1-Eİ			✓
P1-2-Eİ			✓
P1-3-Eİ			✓
P2-1-Eİ			✓
P2-2-Eİ			✓
P2-3-Eİ			✓

Her 2 farklı (tarama) enerjisi akım değeri için 3’er adet çekme test numunesi üretilmiştir. Bu sayede üretimden kaynaklı hataların ve test sırasında gerçekleşebilecek çevresel etkilerin sonuçlar üzerindeki değişimlere minimum seviyede müdahil olması hedeflenmiştir.



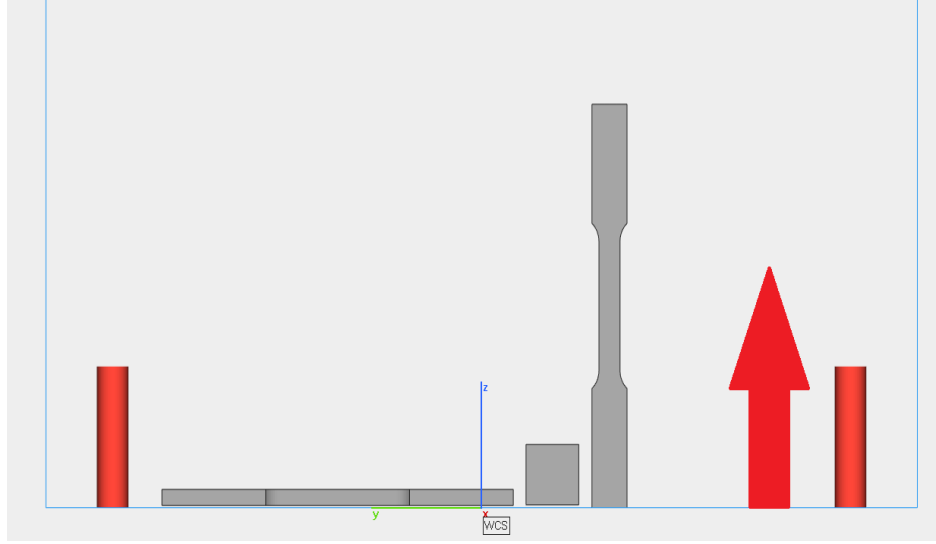
Şekil 12 a.Arcam A2X Ekipmanı ve b. Sodick Tel Erozyon İle Kesim Tezgâhı

Ayrıca ısılsız işlem durumu gözlemlenmesi amacıyla her iki parametre ile de üç adet fazla kuponun, mikro yapı incelemesi amacıyla üretimi gerçekleştirilmiş ve bunlara ısılsız işlem uygulanmayarak yani eklemeli imalat sonrası durum (Eİ) olarak adlandırılmışlardır.

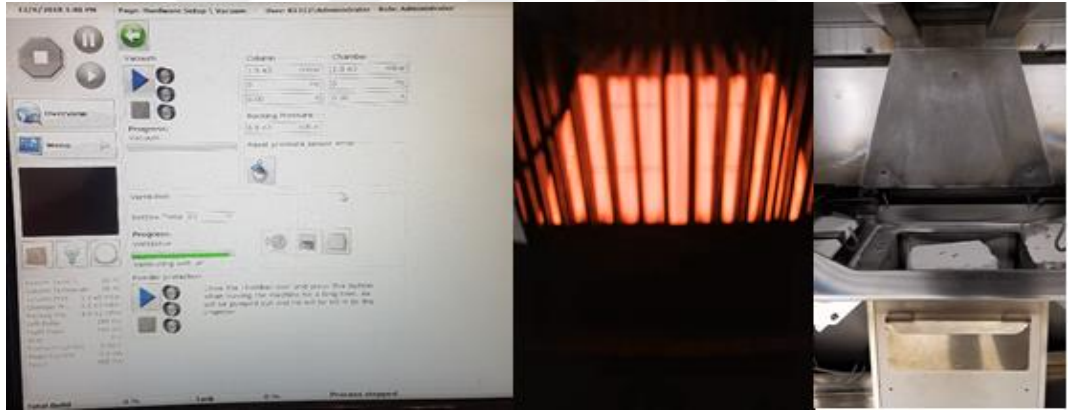


Şekil 13. Magics Üretim Hazırlama Programında Tabla Üzerine Yerleştirilmiş Numuneler

Bu çalışmada tabla üzerinde üretilen düz numuneler 100*10*20 mm boyutlarında üretilmiştir (Şekil 13). Bu üretimlerine hazırlanması sırasında Materialise Magics programı kullanılmış olup, tabla üzerindeki parça yerleşimleri bu program aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



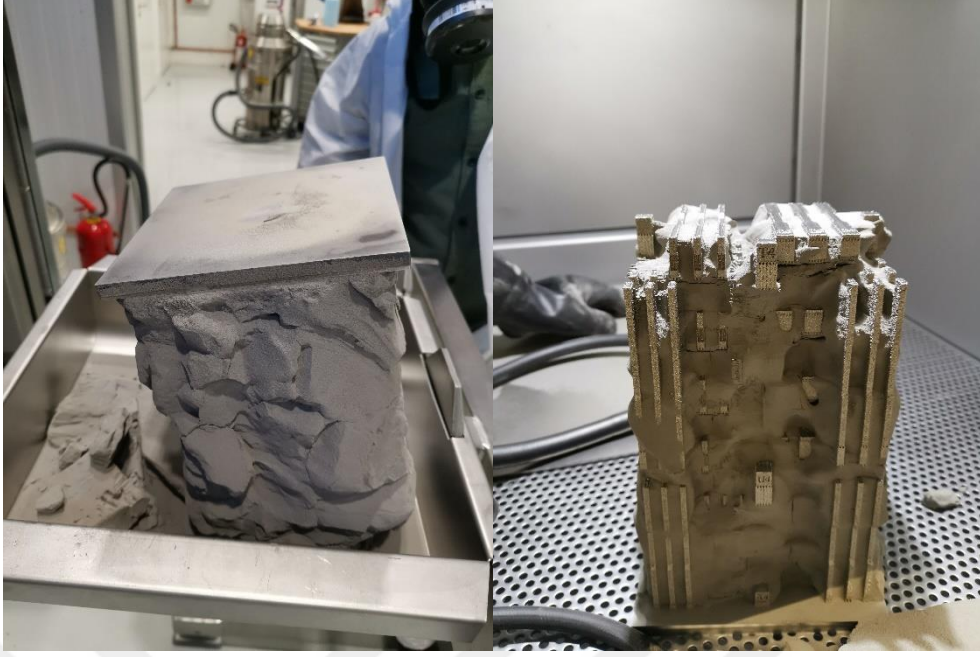
Şekil 14. Yapım yönü ile yön arasındaki oryantasyon ilişkisini gösteren şematik boyuna ve enine malzeme yönelimleri



(a)

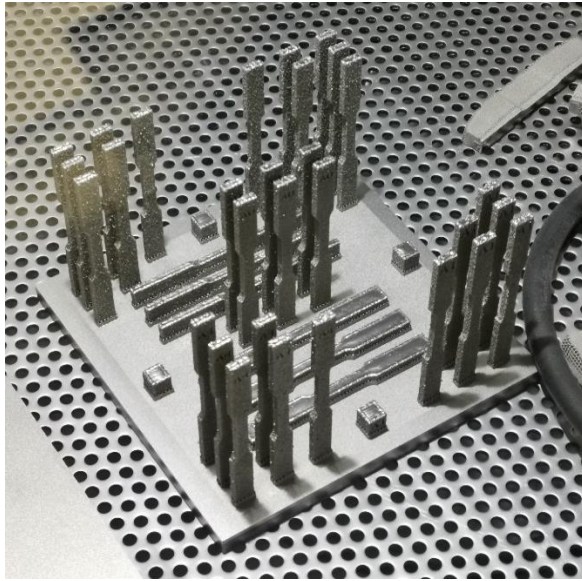
(b)

Şekil 15 a.EBM Kontrol Parametre Değiştirme ve b.Ekipman Kullanım Ara Yüzü, Üretim Sırasında Ve Sonrasında Görseller.



Şekil 16 Üretim Sonrası Toz Temizleme (PRS İşlemi) Öncesinde Alınan Görseller

İki farklı yönden tabla üzerindeki yerleşime dair program ara yüzü görselleri Şekil 13'te verilmiştir. Tabla üzerindeki üretim yönüne göre parça yerleşimi Şekil 14'te verilmekte olup, dikey ve yatay yönde üretilen çekme kuponları ile testler gerçekleştirilmiştir. Üretim sonrası çekme kuponları Şekil 17'te gösterilmiştir.



Şekil 17. Üretim sonrası çekme kuponları.

4.2 Isıl İşlem

Üretim sonrasında Şekil 18’de ısıl işlemin gerçekleştirilmesi amacıyla Inconel 718 malzeme için 1000°C’den hızlı soğutma ile uygulanan çözündürme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında 720°C’de 8 saat boyunca ve 620°C’de 10 saat boyunca çökelti sertleştirme işlemi uygulanmış, havada soğutma ile işlem sonlandırılmıştır.



Şekil 18. Protherm Isıl İşlem Fırını

4.3 Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

Sıcak izostatik presleme prosesinde, ilgili eklemeli imalata uygun metal tozunun malzeme veri dokümanında belirtilmiş olan parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler Inconel 718 malzeme için, Argon altında 1141°C sıcaklıkta 100MPa basınçta 240 dakika bekletme, sonrasında ise inert ortamda 427°C’ye kadar soğutma olarak verilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde soğuma eğrisi oda sıcaklığına kadar inert ortamda gerçekleştirilecek şekilde uygulanmıştır. Proses için Quintus markalı sıcak izostatik pres makinesi kullanılmış olup, haznesinde molibden fırın kullanılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19 Quintus Marka HIP ekipmanı haznesi içerisindeki test kuponlarının görseli.

4.4 Çekme Testi

Çekme testleri, özellikle havacılık ve savunma alanında kullanılmakta olan EBM ile üretilmiş Inconel 718 malzemeli parçaların standart imalat proseslerine dâhil edilebilmesi amacıyla son derece önemli veriler sağlayacak olup, tasarım süreçlerine de girdi sağlar. Şekil 20’de imalat yönüne göre (paralel) numuneler monolitik çekme testi için düz çekme kuponları olarak işlenmiştir. ASTM E8-M’e göre gerçekleştirilen çekme testleri Instron 5500R cihazı ile gerçekleştirilmiştir (ASTM E8-M, 2016, [66]). Bu standarda uygun olarak çalışmalarda silindirik ve dikdörtgen kesitli numuneler kullanılmıştır.



Şekil 20 Freze Tezgâhında İşlenen Çekme Kuponu

4.5 Yoğunluk Testleri

Yoğunluk testlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla ise her iki akım değerlerine sahip olan birer adet 10x10x10 mm boyutlarında küp şeklinde yapı üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu numunelerin yoğunlukları Şekil 21’da gösterilen Mettler Toledo markalı cihazı kullanarak Arşimet yöntemi ile ölçülmüştür.



Şekil 21. Yoğunluk Testi Ölçüm Cihazı.

Yoğunluk ölçümleri testleri, özellikle parametrelerin etkisinin incelenmesi, parça içinde kalmış olan boşluklar sebebiyle oluşacak porozitenin (boşluk oranı) belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. HIP prosesi uygulanması sonrasında parça içinde oluşmuş

bu boşlukların hangi seviyede ortadan kaldırılabileceği de yoğunluk ölçümleri sonrasında belirlenmiş olacaktır.

Ölçümlerin doğruluğunun arttırılması amacıyla her numunenin yoğunluğu 3 kere ölçülmüş olup, ortalama değerler karşılaştırmalarda kullanılmıştır.

4.6 Mikroyapı İncelemesi

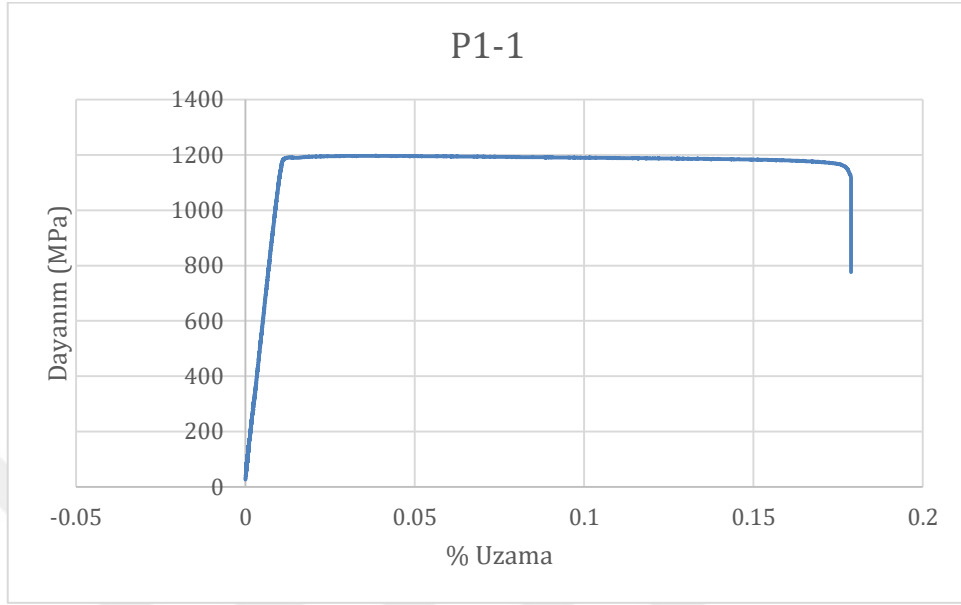
Zeiss Optik mikroskop mikroyapı incelemelerinde kullanılmıştır. Numuneler otomatik bakalite alma makinalarında hazırlanmıştır. İncelemelerde ortalama yoğunluk değerine sahip olan P1-1 ve P2-2, P1-2-Eİ ve P2-2-Eİ, HIP numunelerinde ise P2-4-HIP ve P1-4-HIP numuneleri incelenmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

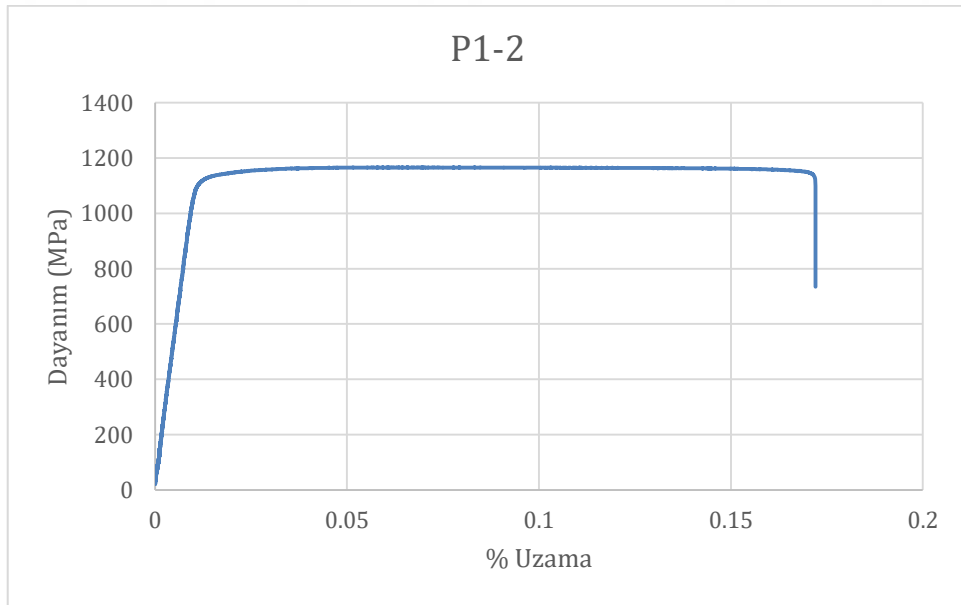
4.bölümde detaylı açıklamaları gerçekleştirilmiş olan deneysel test prosedürlerine göre uygulanan testler ve sonuçları HIP öncesi ve HIP sonrası olarak ayrılarak detaylandırılmıştır.

5.1 Eklemeli İmalat + Isıl İşlem

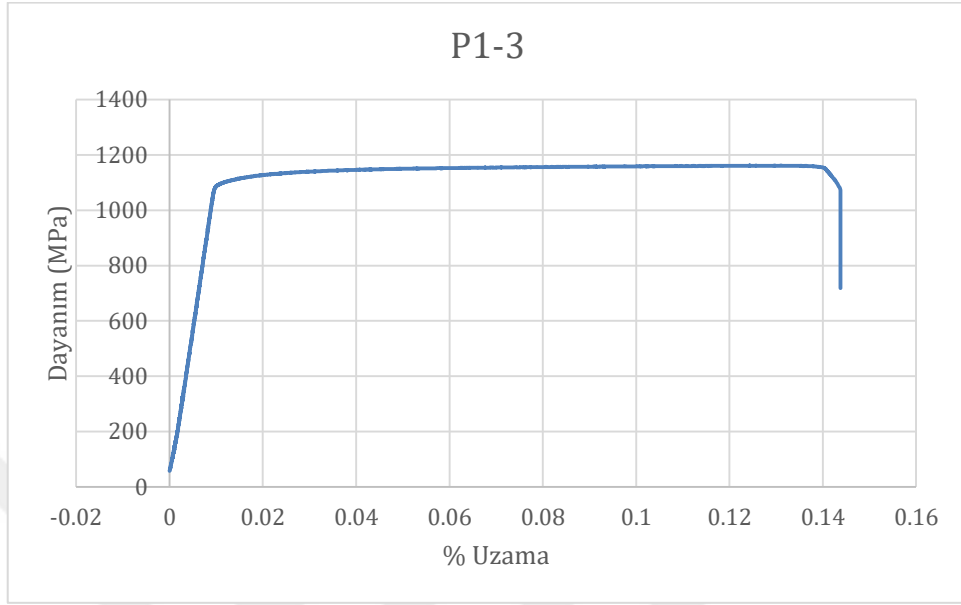
Kullanılan çekme testi numuneleri ASTM E8-M [66] standardı kullanılarak planlanmış, üretim sonrasında işleme payı ile üretilen numuneler işlenerek çekme kupon boyutlarına getirilmiştir. Bu işlem sonuçlar üzerinde olumsuz etkiye sebep olacak olan yüzey pürüzlülüğünün de minimum seviyeye indirilmesine katkıda bulunmaktadır. Çekme test ve yoğunluk ölçüm sonuçları Tablo 9’da listelenmiştir.



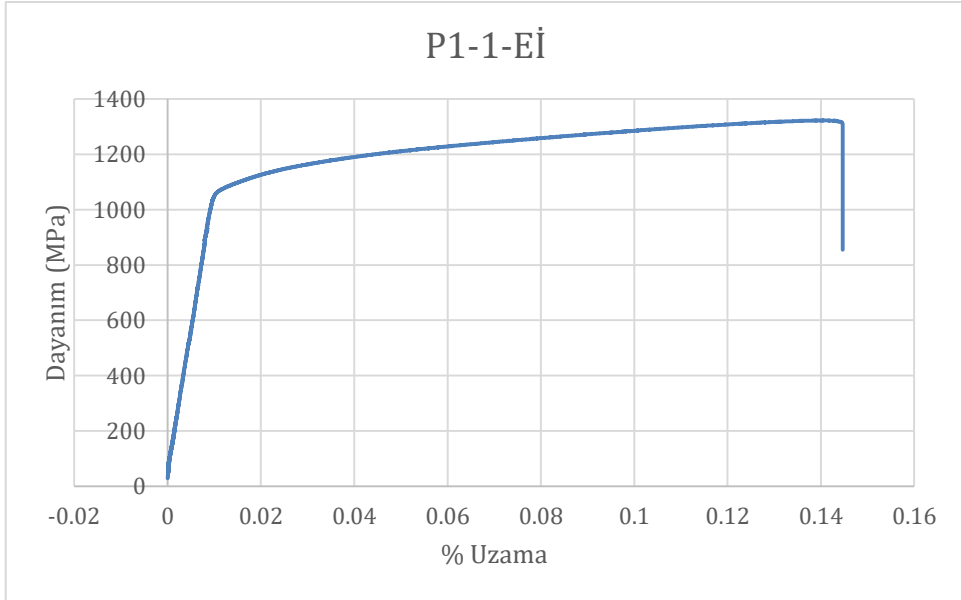
Şekil 22 P1-1 Kuponu Çekme Test Sonuçları



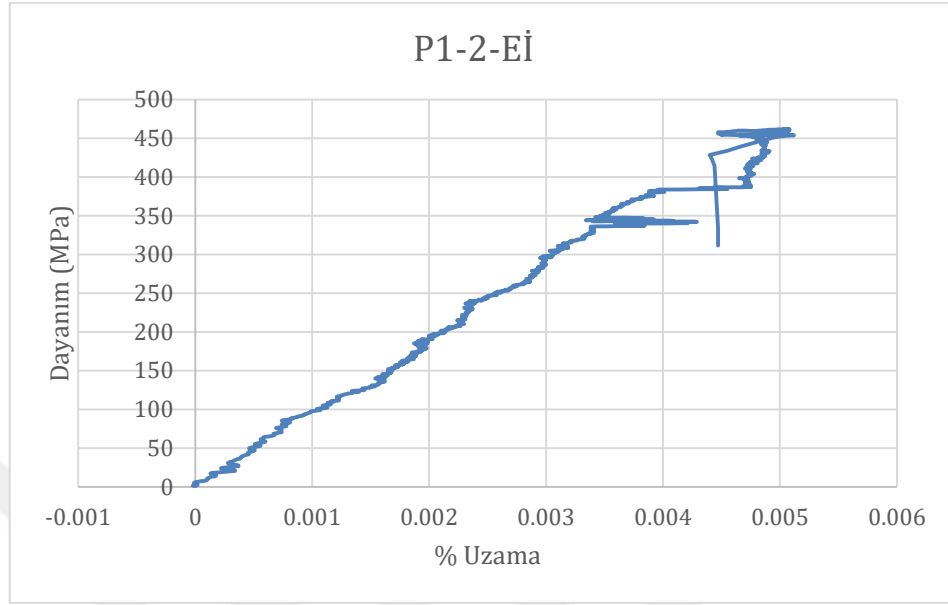
Şekil 23 P1-2 Kuponu Çekme Test Sonuçları



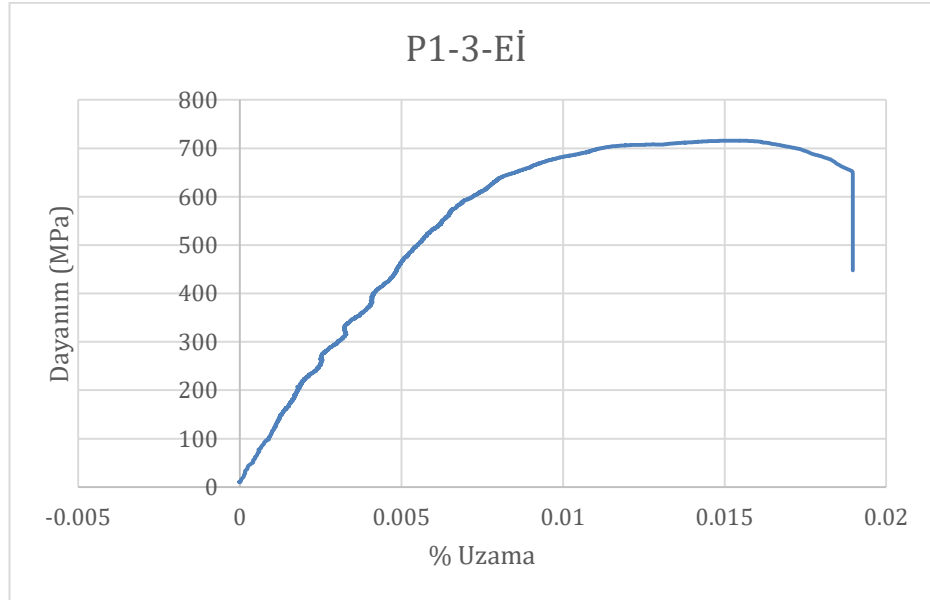
Şekil 24 P1-3 Kuponu Çekme Test Sonuçları



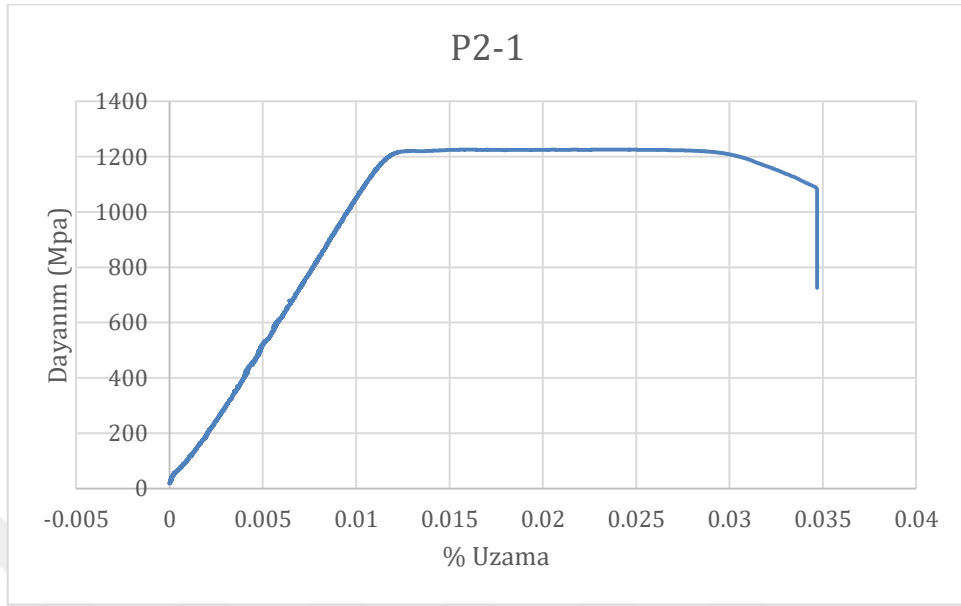
Şekil 25 P1-1-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları



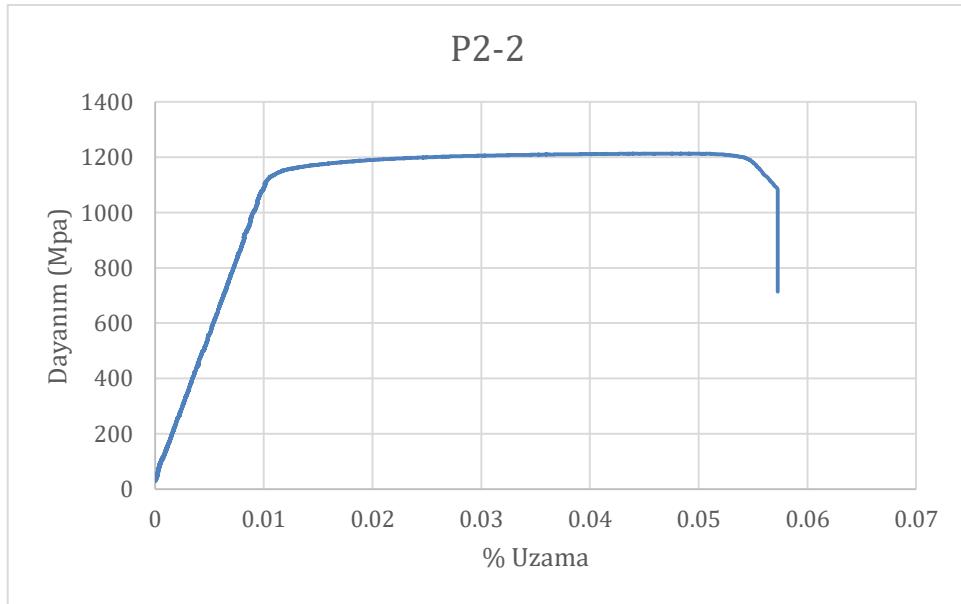
Şekil 26 P1-2-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları



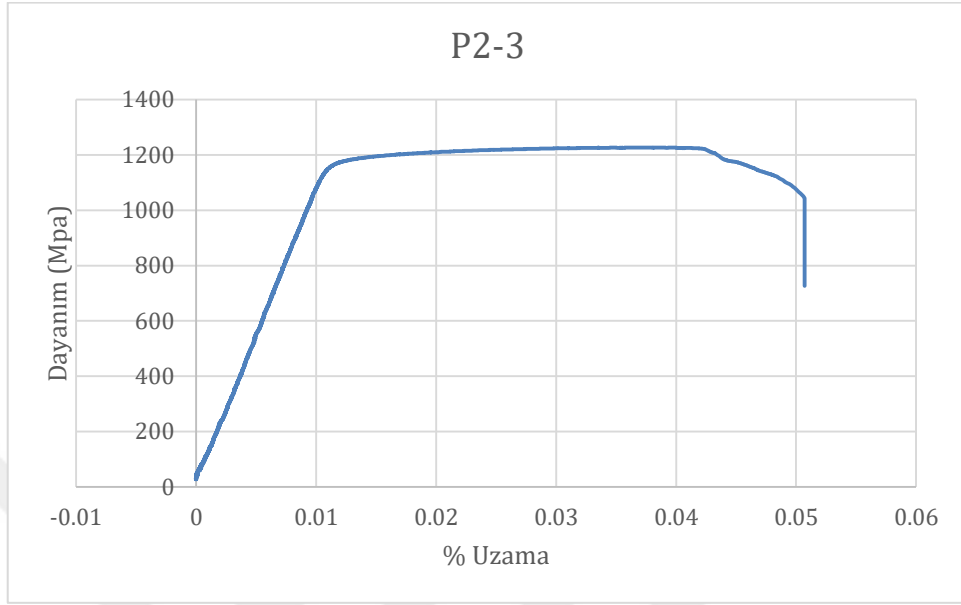
Şekil 27 P1-3-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları



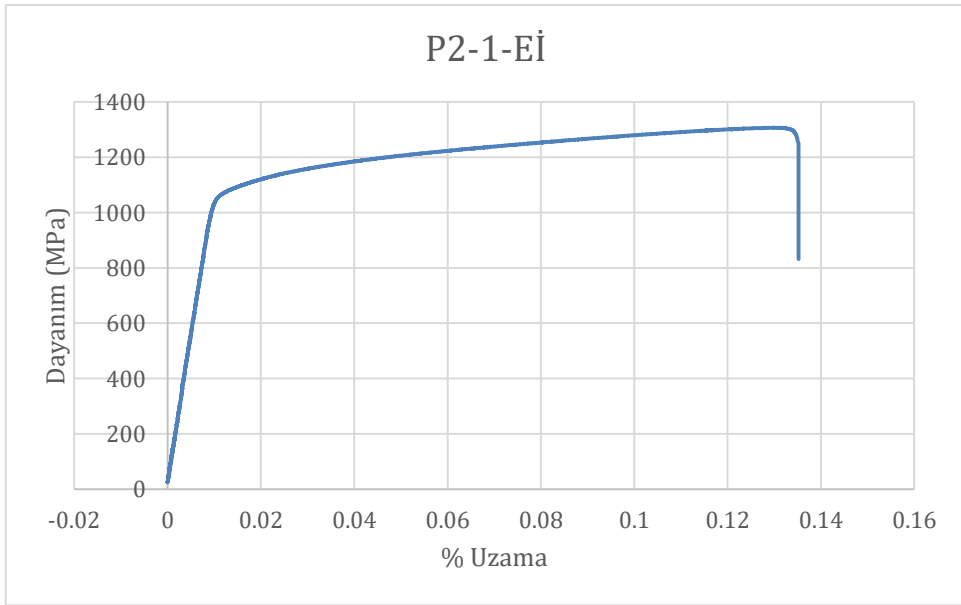
Şekil 28 P2-1 Kuponu Çekme Test Sonuçları



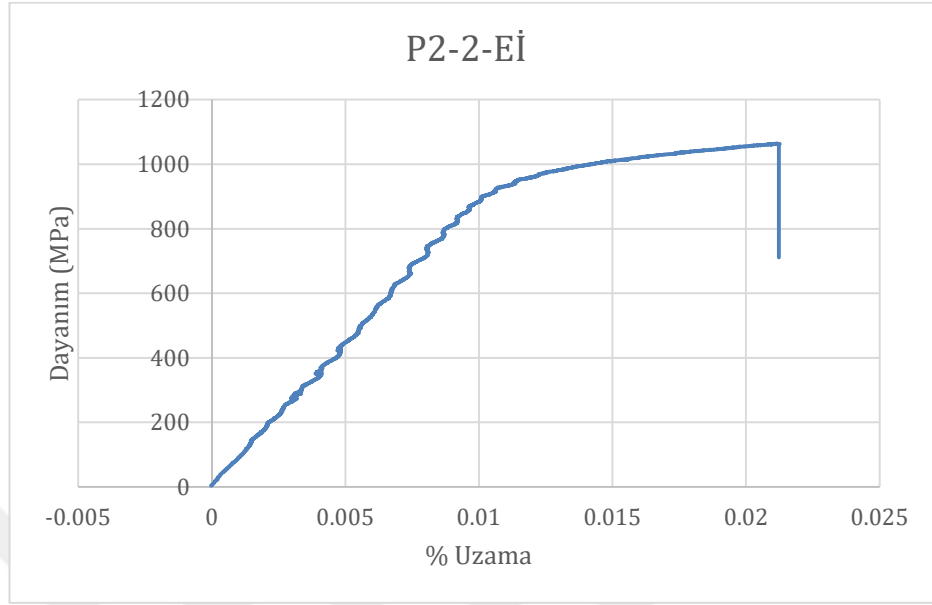
Şekil 29 P2-2 Kuponu Çekme Test Sonuçları



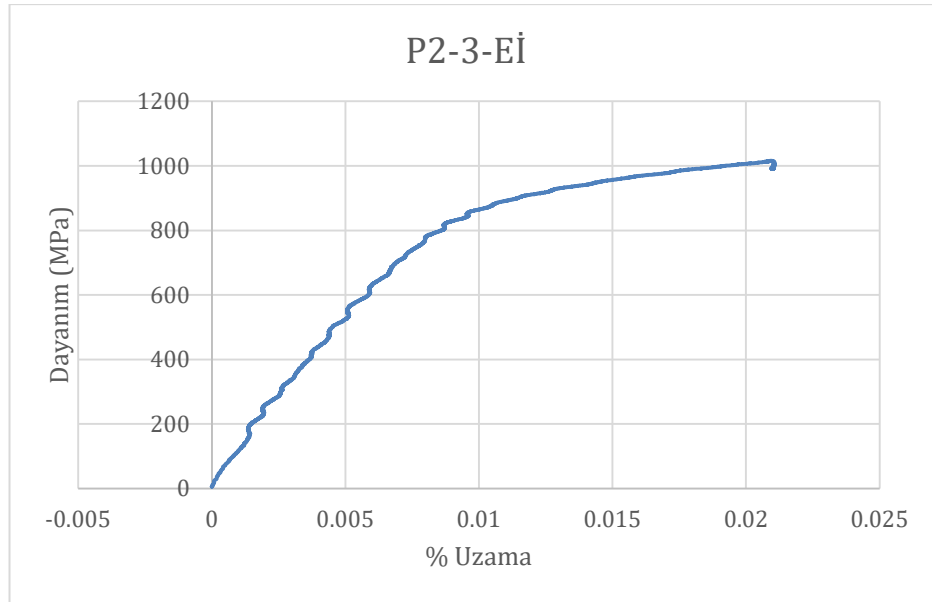
Şekil 30 P2-3 Kuponu Çekme Test Sonuçları



Şekil 31 P2-1-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları



Şekil 32 P2-2-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları



Şekil 33 P2-3-Eİ Kuponu Çekme Test Sonuçları

Tablo 9. Eklemeli İmalat ve Eİ+Isıl İşlem Sonrası Çekme Testi Sonuçları

Kupon No	Yoğunluk (%)	Grafik Numarası	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Akma Dayanımı Ortalaması (MPa)	Çekme Dayanımı Ortalaması (MPa)	% Ortalama Uzama
P1-1	99,81	Şekil 22	1191	1197	17,9	1137	1175	16
P1-2	99,84	Şekil 23	1118	1167	17,2			
P1-3	99,75	Şekil 24	1102	1162	14,3			
P2-1	99,60	Şekil 28	1220	1226	3,4	1187	1222	4,7
P2-2	99,63	Şekil 29	1159	1214	5,7			
P2-3	99,84	Şekil 30	1183	1227	5			
P1-1-Eİ	99,61	Şekil 25	1076	1323	14,5	1076	1323	14,5
P1-2-Eİ	98,90	Şekil 26	-	462	0,5	-	-	-
P1-3-Eİ	98,75	Şekil 27	676	716	1,9	-	-	-
P2-1-Eİ	99,58	Şekil 31	1068	1307	13,5	1068	1307	13,5
P2-2-Eİ	98,62	Şekil 32	980	1063	2,1	-	-	-
P2-3-Eİ	99,01	Şekil 33	888	1016	2,1	-	-	-
ASTM B637 İNCONEL 718	-	-	1034	1275	6	-	-	-

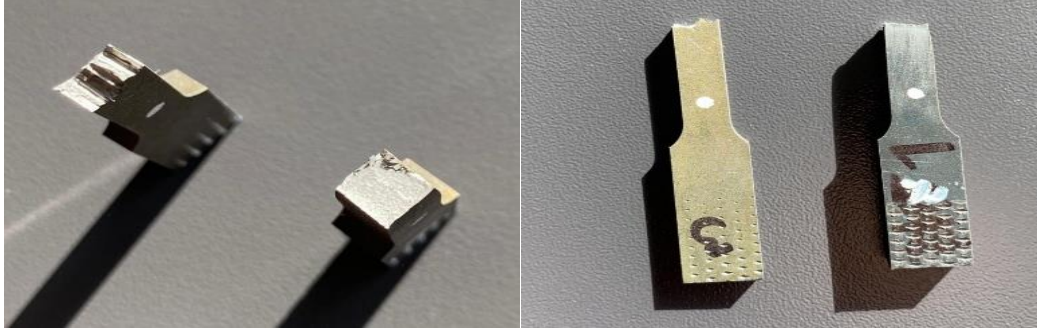
Çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde tarama enerjisi akımı 24 mA'dan 32 mA'ya çıkarıldığında özellikle yüzde uzamada daha yüksek değer görülmektedir. Yani yüzde uzama yaklaşık % 300 artmıştır. Yüksek tarama akımının, toz ham malzemeler üzerinde daha etkin bir ergimeye sebep olduğu ve bu şekilde porozite/ eksik ergime oluşumunun azaldığı mikroyapı ve yoğunluk değerleriyle gösterilmektedir. Düşük yoğunluk değerlerine sahip olan 24 mA tarama akımı ile üretilen numunelerde porozitelerinin yanında çatlakların oluştuğu, bu tür hataların 32 mA tarama akım değerinde bulunmaması sebebiyle malzemenin kırılma davranışının önüne geçilmiştir. Kırılma davranışın görüldüğü çekme kuponu örnekleri Şekil 34'te gösterilmektedir.

Asbuilt numuneler üzerinde yapılan ikincil üretimlerde (P1-2/P1-3 ve P2-2/P2-3) üretim sürecinde toz serme ile ilgili sorun ile karşılaşıldığı için eksik ergime ve çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Üretim sürecinde meydana gelen sıkıntılar nedeniyle parça yoğunluğunda düşüş gözlemlenmiş bu sebeple elde edilen çekme testi sonuçları ortalama dışında bırakılmıştır.

Akma dayanımı ve maksimum çekme dayanımı değerleri ise tarama enerjisi akım değerinin 24 mA'dan 32 mA'ya çıkarılmasıyla benzer seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Isıl işlemsiz numunelerde ise her iki parametre değeri için de akma dayanımının daha düşük kaldığı gözlemlenmektedir. Yoğunluk test sonuçlarına göre sırasıyla P1 ve P2 kodlu numuneler değerlendirildiğinde, P1 numuneleri için yoğunluk değeri ortalaması %99,8 ve P2 numuneleri için yoğunluk değeri ortalaması %99,69 seviyesinde teorik yoğunluk seviyeleri ölçümlenmiştir. Daha etkin ergime ve yüksek enerji girdisi sebebiyle P1 numunelerinin yoğunluk ortalamalarının yüksek olduğu değerlendirilmiştir.

Isıl işlem sonrası her iki enerji akımı ile imal edilen P1 ve P2 numuneleri için akma dayanımları artarken çekme dayanımları bir miktar azalmıştır. Numunelerdeki akma mukavemetinin ve süneklik özelliklerinin artırıldığı gözlemlenmiştir.

Eklemeli imalat (Eİ-asbuilt) malzemeler eritme (melt) adımı dışında elektron ışıını ile ön ısıtma (preheat) adı verilen ısıtma işlemi uygulanmakta olup toz keki ile parça sıcaklığının belirli bir seviyede tutulması sağlanmaktadır. Çalışmalarda bu aşamanın bir ısıtma işlem etkisi göstererek parça mukavemetine olumlu etki ettiği değerlendirilmektedir.



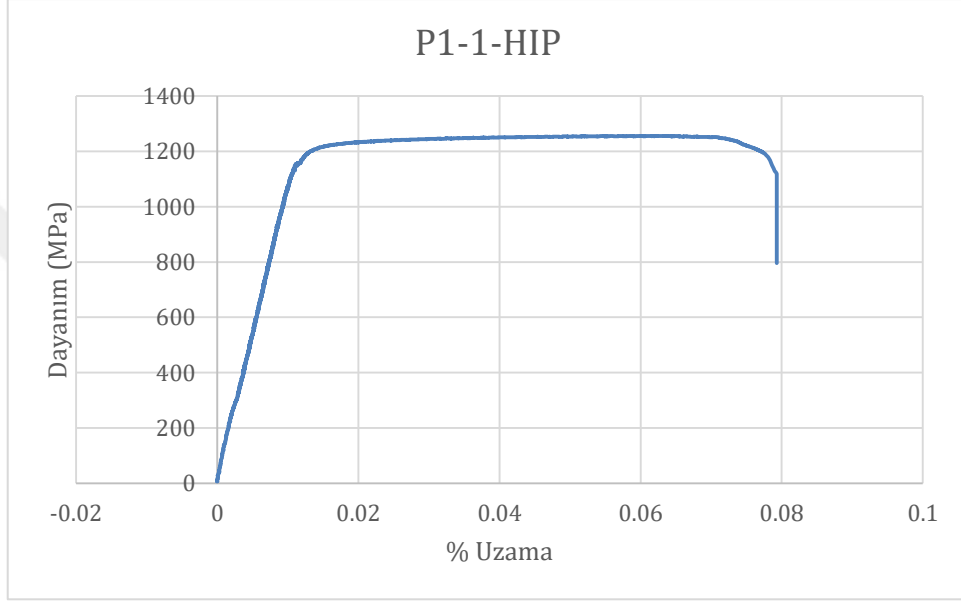
Şekil 34 Isıl işlem sonrası çekme testinde kopan bazı numunelerin görüntüleri



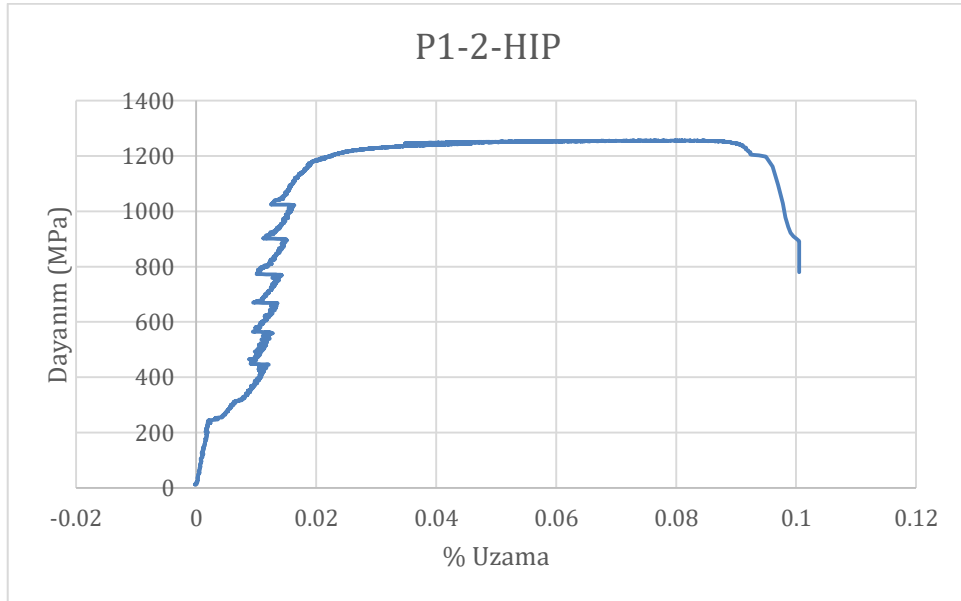
Şekil 35 P1 ve P2 Eİ numunelerinin çekme testinde kopan bazı görüntüleri

5.2 Eklemeli İmalat +HIP+ Isıl İşlem

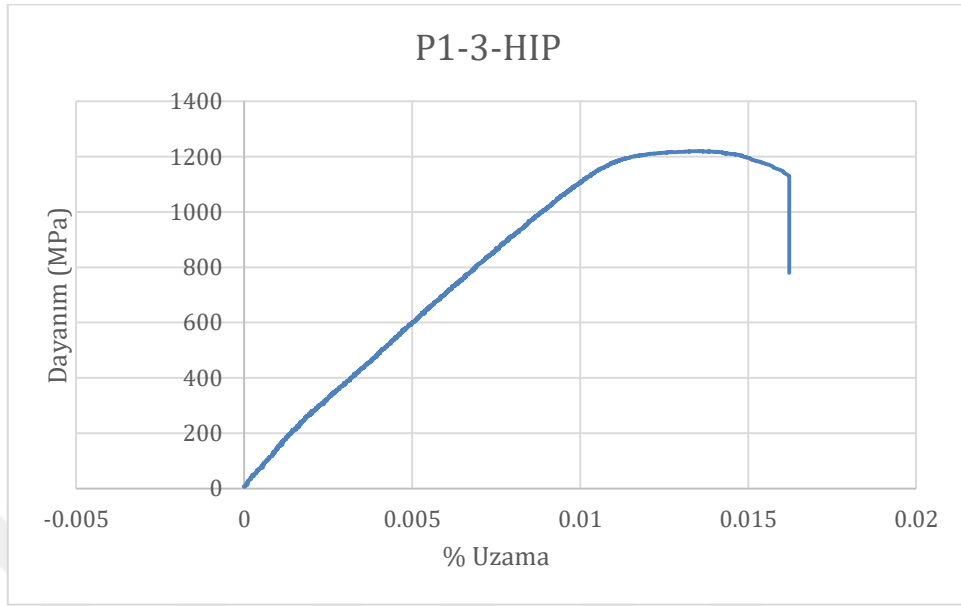
Sıcak izostatik presleme işleminin uygulanması ile üretilen numunelere, nihai işleme ile son haline getirilmiş ve çekme kuponları oluşturulmuştur. Bu kuponlara uygulanan çekme testleri, P1 ve P2 parametreleri ile üretilen 4'er kupon ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar değerlendirilirken 4 kuponun ortalama akma, çekme dayanımları ile % uzama değerleri Tablo 10' da listelenmiştir.



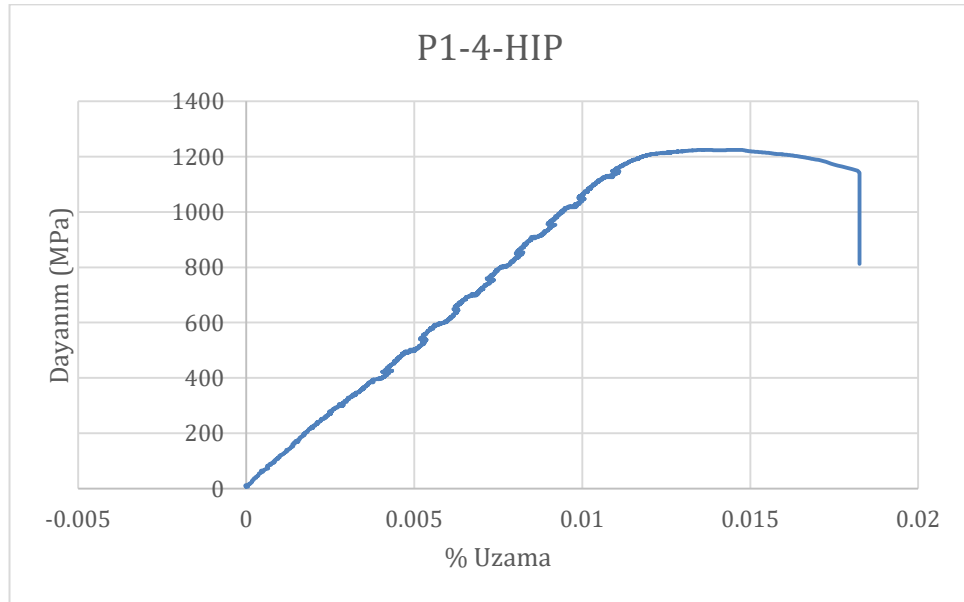
Şekil 36 P1-1-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



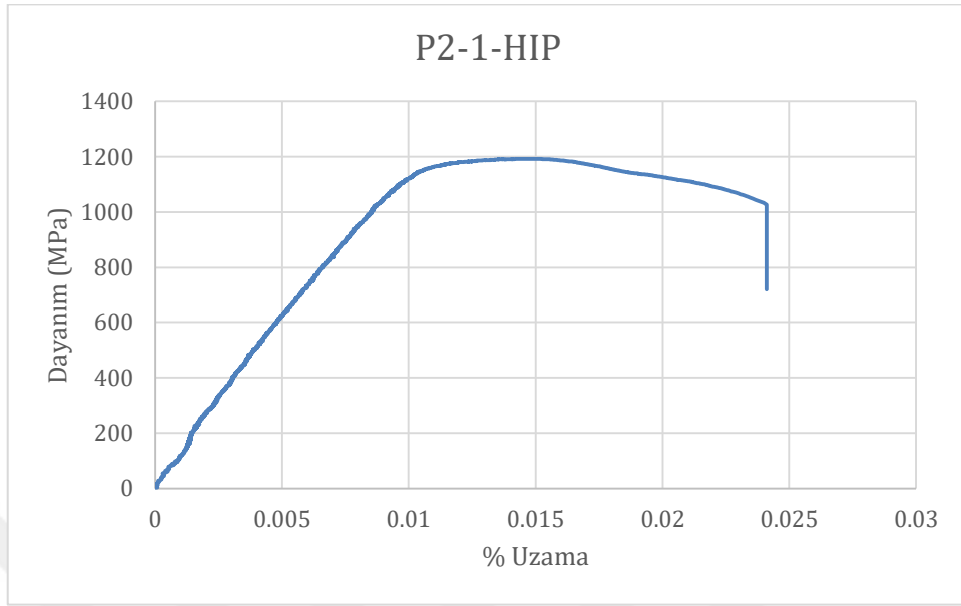
Şekil 37 P1-2-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



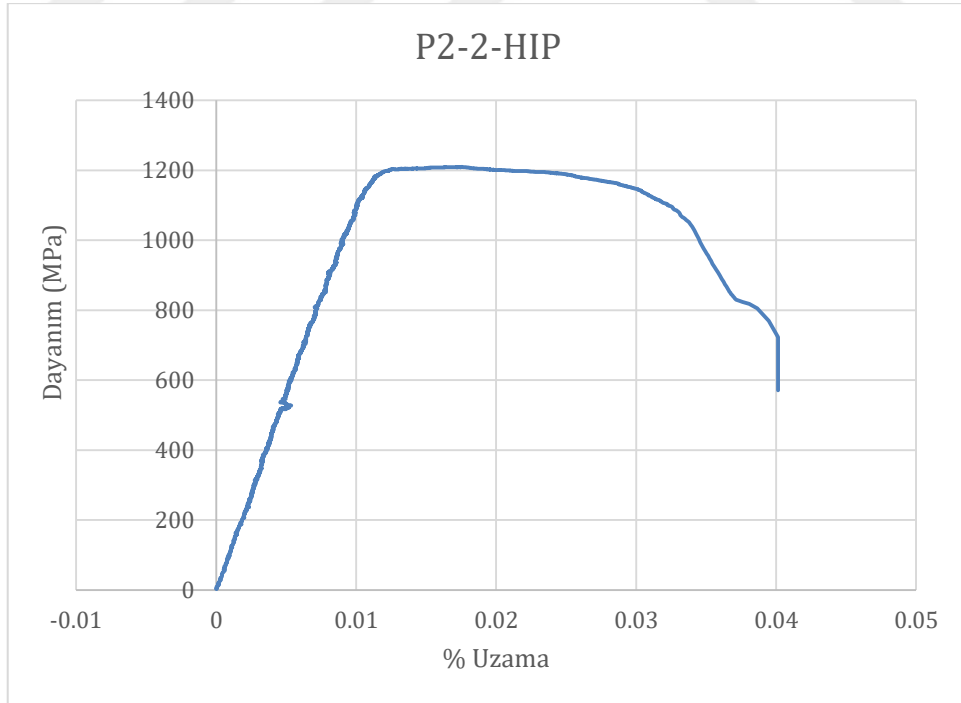
Şekil 38 P1-3-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



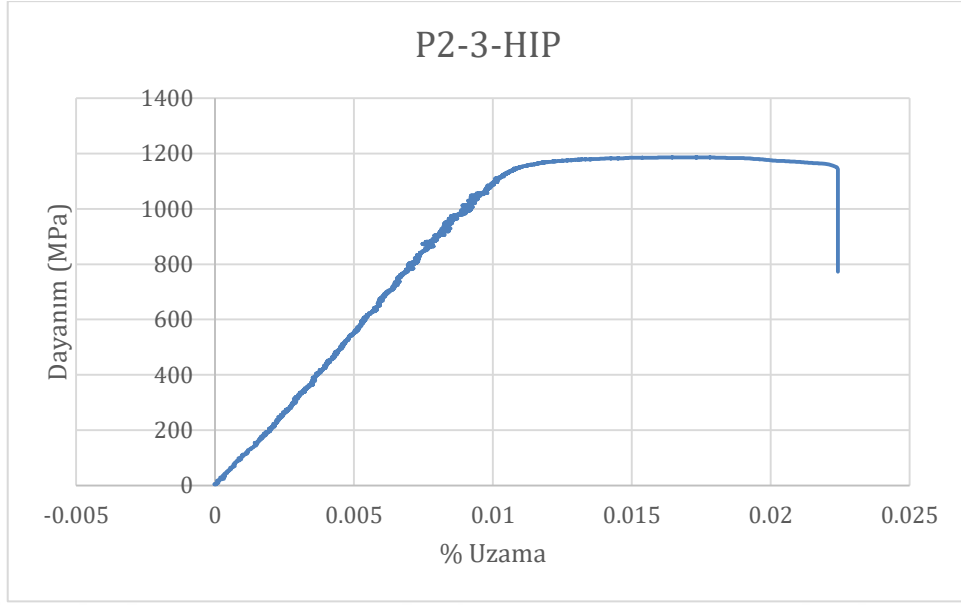
Şekil 39 P1-4-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



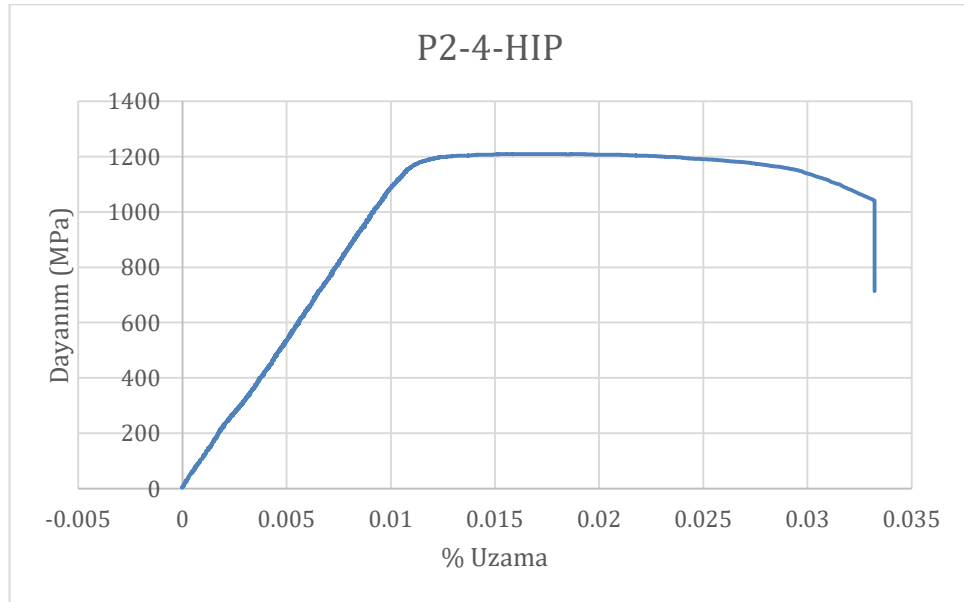
Şekil 40 P2-1-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



Şekil 41 P2-2-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



Şekil 42 P2-3-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları



Şekil 43 P2-4-HIP Kuponu Çekme Test Sonuçları

Tablo 10. Eklemeli İmalat +HIP+ Isıl İşlem Sonrası Çekme Testi Sonuçları

Kupon No	Yoğunluk (%)	Grafik Numarası	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Akma Dayanımı Ortalaması (MPa)	Çekme Dayanımı Ortalaması (MPa)	% Ortalama Uzama
P1-1-HIP	99,80	Şekil 36	1177	1192	8,0	1188,75	1199,75	5,35
P1-2-HIP	99,92	Şekil 37	1203	1210	10,0			
P1-3-HIP	99,83	Şekil 38	1173	1187	1,6			
P1-4-HIP	99,89	Şekil 39	1202	1210	1,8			
P2-1-HIP	99,75	Şekil 40	1200	1256	2,4	1214	1239,25	3,0
P2-2-HIP	99,83	Şekil 41	1217	1220	4,0			
P2-3-HIP	99,70	Şekil 42	1224	1225	2,2			
P2-4-HIP	99,81	Şekil 43	259(Test Kaynaklı Hata Bildirildi)	1256	3,4			

HIP sonrasında iki farklı parametrenin numuneleri değerlendirildiğinde, P1 parametresine ait ortalama yoğunluk/doluluk oranının P2'den yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir.

P2-4 numaralı kuponda test makinesi kaynaklı hata olduğu için akma dayanımı değeri dikkate alınmamıştır. Tablo 10'daki verilere göre, HIP sonrası akma ve çekme dayanımı değerlerinde aynı parametrenin HIP yapılmamış değerlerine göre yaklaşık %5 seviyesinde artış gözlemlenmiş olup, % uzama değerinde düşüş olduğu görülmüştür. HIP sonrası P1 yüksek akım enerjisi ile üretilen numunelerin daha sünek olduğu görülmüştür. Sames, 2015'te gerçekleştirmiş olduğu tez çalışmasında akım değerindeki artışın enerji girdisini arttırdığını göstermiş ve bu durumun parça yoğunluğunu yükselttiği belirtmiştir (Sames, [67]).

Tablo 9 ile Tablo 10'daki sonuçlar karşılaştırıldığında HIP prosesinin her iki akım değeri için de mikro-çatlakları ve boşlukları azalttığı görülmüştür. Özellikle yüksek akım enerjisine sahip 32mA'le imal edilen P1 numunelerinin çekme ve akma mukavemet değerlerinin, 24mA'le imal edilen P2 numunelerine yakın değerler olduğu , yoğunluk ve % uzamaların daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. HIP sonrası P1 numunelerinde Tablo 9 ile Tablo 10'daki değerler karşılaştırıldığında % uzama değerinde görülen düşüşün sebebi olarak, HIP parametre seti ve üretim sırasında yapılan ön ısıtmaya bağlı olarak tanecik boyutu değerinin değişimi gösterilebilir. HIP sonrası düşük akım tarama enerjili P2 numunesini için yoğunluk ve % uzama da iyileşmeler olmasına karşın çekme ve akma mukavemetinde iyileşmelerin olmadığı gözlemlenmiştir.

Örnek olarak A.Strondl ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada EBM yöntemiyle üretilmiş Inconel 718 numunelerinde HIP prosesi sonrasında ortalama % 1,1 yüzde uzama değerlerine erişmiş olup 1187 MPa akma dayanımı, 1232 MPa çekme dayanımı ile Tablo 10'dakilere yakın mukavemet değerleri elde etmişlerdir (A.Strondl ve arkadaşları , [68]).

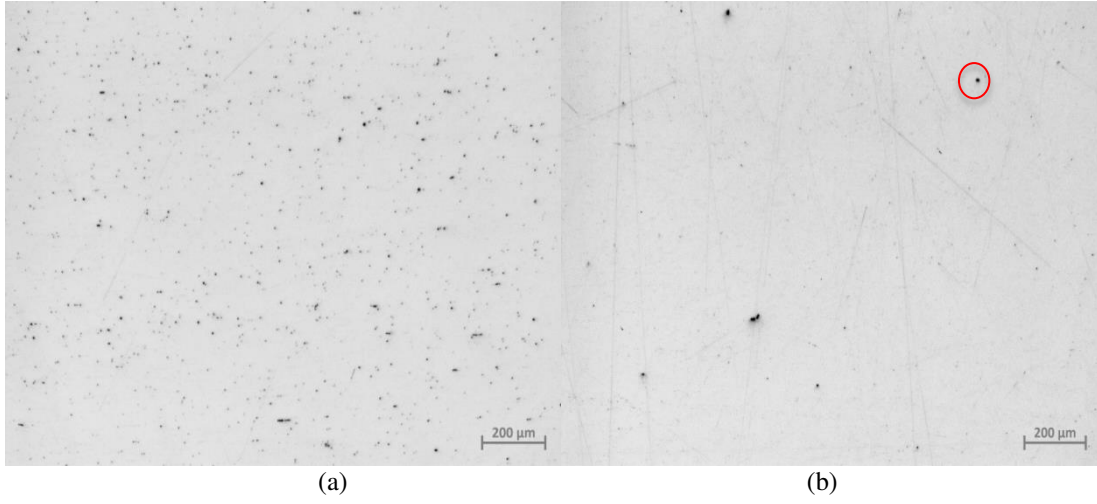


Şekil 44 HIP Sonrası P1 ve P2 numunelerine ait çekme testi sonucu kopan görüntüleri

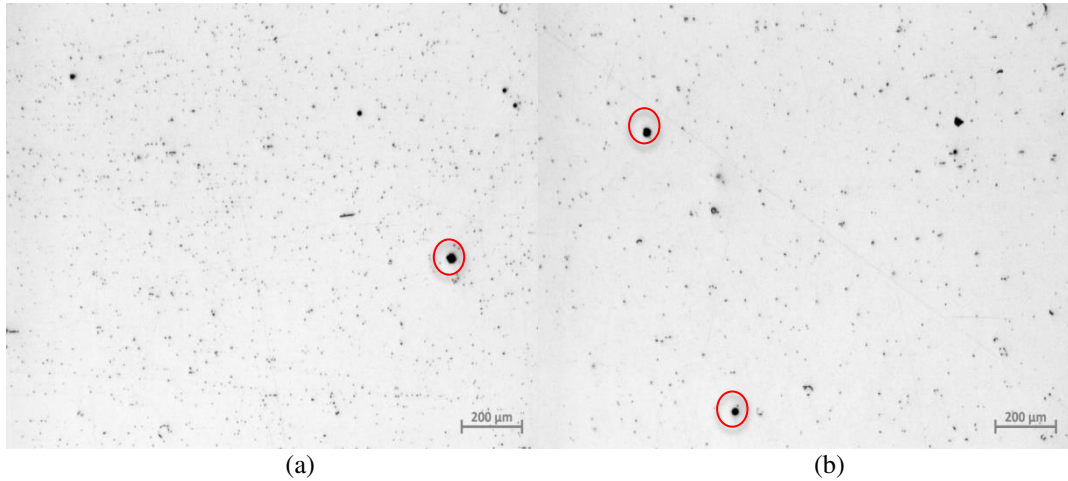
5.3 Mikroyapı İncelemeleri

5.3.1 HIP Öncesi Mikro Yapı

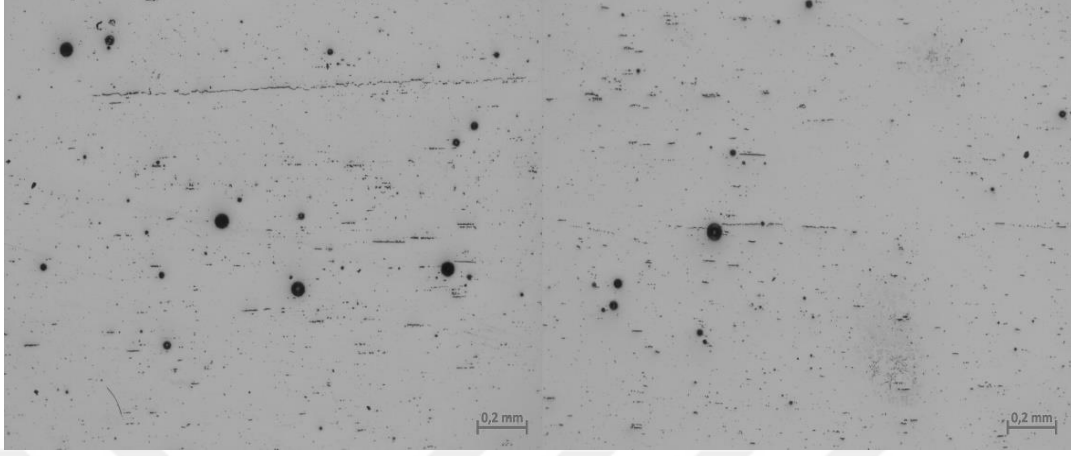
Şekil 45 ve Şekil 46'daki mikroyapı görüntüleri karşılaştırıldığında P1 numunelerinde daha az porozite ve eksik ergime alanlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu da yukarıda verilen P1 numunelerindeki yüksek yoğunluk değerleri sonuçlarıyla uyusmaktadır. P2 parametresine ait numunelerde (Şekil 45a ve 46b) küresel gaz porozitelerine rastlanmaktadır. Şekil 45b ve Şekil 46b karşılaştırıldığında üstten incelenen mikro yapılarda P1 numunesinde daha az gaz porozitesine rastlanmaktadır." Şekil 46 'de küresel gaz poroziteleri kırmızı daire içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 45 P1 Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey



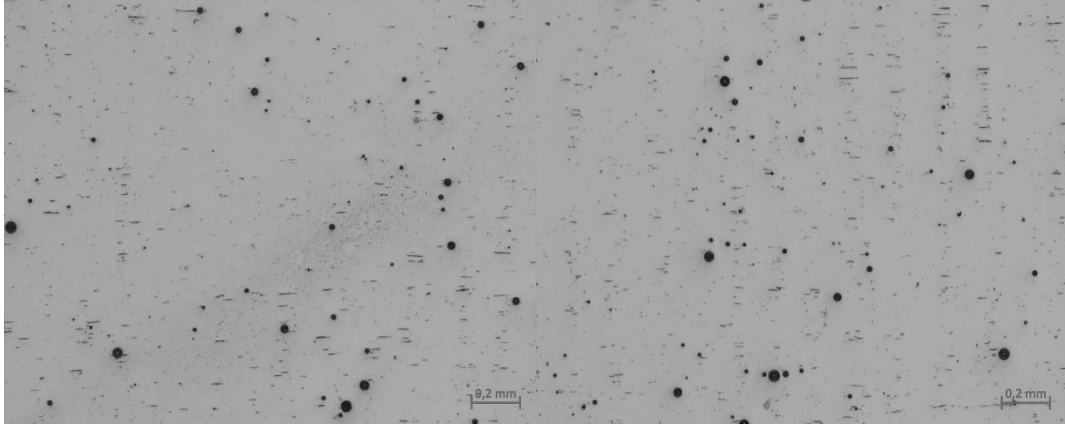
Şekil 46 P2 Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey



(a)

(b)

Şekil 47 P1-2-Eİ Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey



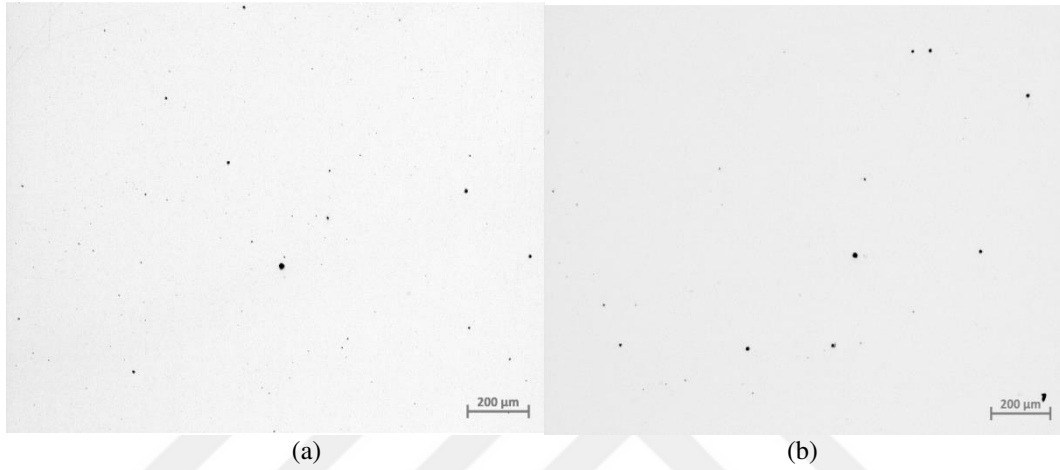
(a)

(b)

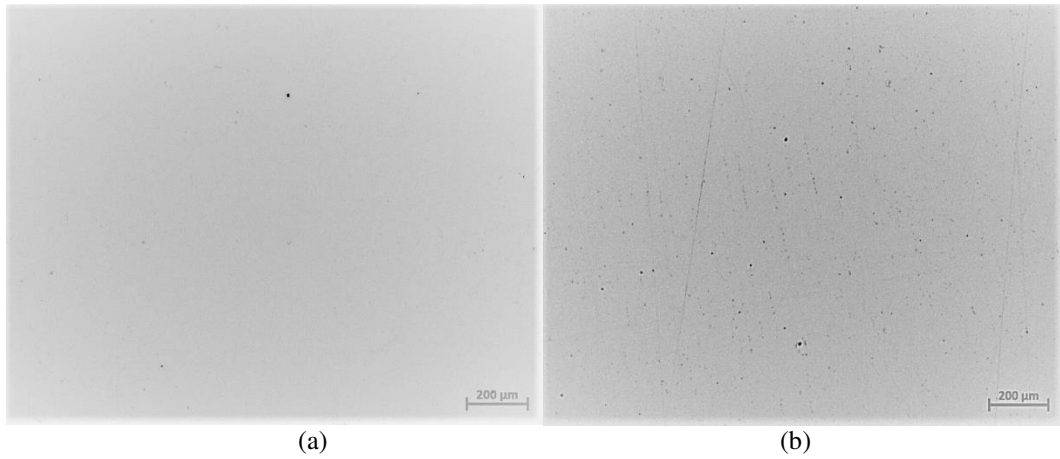
Şekil 48 P2-2-Eİ Numunesine Ait Mikroyapı a. Üretim Yönünde Olan Yan Yüzey, b. Üst Yüzey

5.3.2 HIP Sonrası Mikro Yapı

HIP numuneler için de "Genel olarak HIP yapılmış numunelerin mikro yapıları incelendiğinde, porozite seviyesinin hem üst Şekil 49 , hem de yan yüzey Şekil 50 mikroyapılarında önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Yoğunluk değerlerine benzer şekilde görsellerden yapılan optik incelemede de P1 ve P2 parametrelerine ait doluluk oranının birbirine yakın olarak HIP sonrasında olduğu görülmektedir.



Şekil 49 P1 HIP Numunesine Ait Mikroyapı a Üst Yüzey, P2 HIP Numunesine Ait Mikroyapı b Üst Yüzey



Şekil 50 P1 HIP Numunesine Ait Mikroyapı a Yan Yüzey, P2 HIP Numunesine Ait Mikroyapı b Yan Yüzey

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu tez çalışması kapsamında, elektron ışın ergitmeli toz yataklı eklemeli imalat prosesinde Inconel 718 malzeme ile üretim yapılmasına yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, prosesin genel özellikleri, kullanım alanları ve önemli parametrelerinin görülmesi amacıyla detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Üretim prosesinde, iki farklı üretim parametresinin etkisinin gözlemlenmesi amacıyla deneyler uygulanmıştır. Eklemeli imalat parçaları için kullanımı yoğun olarak gerçekleştirilen sıcak izostatik presleme (HIP) işleminin etkilerinin de değerlendirilmesi amacıyla da oluşturulan deney planı detaylandırılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm testler ve altyapılar, deney tasarımı bölümünde anlatılmış olup, çekme testleri ve yoğunluk ölçümleri sonuçları bulgular bölümünde detaylı olarak sunulmaktadır.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, standart parametre dışında belirlenen tarama akımı parametresinin, mukavemet değerlerine olumlu katkı sağladığı ve % uzama değerini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Sonrasında gerçekleştirilen HIP prosesi ve bu proses ile üretilen kuponların değerleri incelendiğinde ise, her iki parametre seti için de akma ve çekme dayanımında iyileşmeler olduğu görülmektedir.

6.2. Öneriler

Bu çalışma sonuçları, elektron ışıın ergitmeli eklemeli imalat prosesi için kritik olan bir parametrenin, mekanik özellikler üzerindeki etkisini ve HIP prosesinin çıkan parçaların ardıl işlemlerinde nasıl kullanılabileceğine dair sonuçlar oluşturmuştur.

İlerleyen dönem çalışmalarında, özellikle HIP prosesinin parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla detaylı bir deney planı oluşturulabileceğine ve akma / çekme dayanımı ile yoğunluk değerlerinde elde edilen gelişmelerin, % uzama için de elde edilmesi amacıyla bir çalışma gerçekleştirilebileceği gözlemlenmiştir.

Eklemeli imalat (Eİ-asbuilt) malzemeler eritme (melt) adımı dışında elektron ışıını ile ön ısıtma (preheat) adı verilen ısıtma işlemi uygulanması çalışmalarda bu aşamanın bir ısıtma işlem etkisi göstererek parça mukavemetine olumlu etki ettiği değerlendirilmiş olup bu konuda etkinin araştırılabilmesi ek bir çalışmanın yapılabilmesi değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda özellikle Inconel 718 malzemenin standart HIP parametreleri dışında, özel parametreler ile nasıl proses edilebileceğine dair literatür araştırılması gerçekleştirilebileceği gibi, mikroyapı özelliklerinin nasıl değiştiğine dair de testlerin uygulanması sonuçları zenginleştirebilecektir. Gerçekleştirilen çalışmanın, bu tür yeni araştırma konularının oluşmasına yol gösterici sonuçlar ortaya çıkardığı ve gelişmeye açık yönlerin olduğunu gösterdiği değerlendirilmesi oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Gong, X., Anderson, T., & Chou, K. (2012, June). Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology. In *International Symposium on Flexible Automation* (Vol. 45110, pp. 507-515). American Society of Mechanical Engineers.
- [2] Sochalski-Kolbus, L. M., Payzant, E. A., Cornwell, P. A., Watkins, T. R., Babu, S. S., Dehoff, R. R., ... & Duty, C. (2015). Comparison of residual stresses in Inconel 718 simple parts made by electron beam melting and direct laser metal sintering. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(3), 1419-1432.
- [3] Murr, L. E., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Rodela, A., Martinez, E. Y., ... & Wicker, R. B. (2009). Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2(1), 20-32.
- [4] Antony, A. A. (2012). *Microstructure, texture and mechanical property evolution during additive manufacturing of Ti6Al4V alloy for aerospace applications*. The University of Manchester (United Kingdom).
- [5] Deng, D., Moverare, J., Peng, R. L., & Söderberg, H. (2017). Microstructure and anisotropic mechanical properties of EBM manufactured Inconel 718 and effects of post heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*, 693, 151-163.
- [6] Avcı, A. (2015). *Termal bariyer kaplamaların oksidasyon ve sıcaklık korozyonu davranışının incelenmesi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [7] Nakano, H., Kato, R., Kakami, C., Okamoto, H., Mamada, K., & Maki, K. (2019). Development of biocompatible resins for 3D printing of direct aligners. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 32(2), 209-216.
- [8] Hornick, J. (2017). 3D printing in Healthcare. *Journal of 3D printing in medicine*, 1(1), 13-17.

- [9] Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y. G., & Zhang, J. (2018). Additive manufacturing processes and equipment. In *Additive Manufacturing* (pp. 39-51). Butterworth-Heinemann.
- [10] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker. (2010). Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. Springer.
- [11] Hull, C.W. and UVP, Inc. (1986) Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography. US Pat 4575330.
- [12] Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.
- [13] Soller, S., Behr, R., Beyer, S., Laithier, F., Lehmann, M., Preuss, A., & Salapete, R. (2017). Design and testing of liquid propellant injectors for additive manufacturing. In 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences, EUCASS), Milano, Italy
- [14] Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-d eklemeli imalat yöntemine metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
- [15] Uçan KARAKILINÇ, Bekir YALÇIN, Berkay ERGENE /POLİTEKNİK DERGİSİ, *Politeknik Dergisi*,2019;22(4):801-810
- [16] Attaran, M. (2017). Additive manufacturing: the most promising technology to alter the supply chain and logistics. *Journal of Service Science and Management*, 10(03), 189.
- [17] Khan H.M., KARABULUT Y., Kitay O.,KAYNAK Y., Jawahir I. (2020) Machining Science andTechnology, cilt.25, sa.1, ss.118-176, (SCI İndekslerineGirenDergi)
- [18] Kashiwagi M., Hoshi Y (2012) Electron beam processing system and its application (pp. 47-54)

- [19] Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. *materials*, 10(6), 672.
- [20] Arcam.com- GE Additive_EBM_White paper_FINAL.pdf
- [21] Ahmed, S. (1990). The design and fabrication of nickel-base superalloys. *Jom*, 42(8), 24-26.
- [22] Bullock, E., Brunetaud, R., Condé, J. F., Keown, S. R., & Pugh, S. F. (Eds.). (2012). *Research and development of high temperature materials for industry*. Springer Science & Business Media.
- [23] Lee, J. A. (2012). Hydrogen embrittlement of nickel, cobalt and iron-based superalloys. *Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy Technologies*, 624-667.
- [24] Geddes, B., Leon, H., & Huang, X. (2010). *Superalloys: alloying and performance*. Asm International.
- [25] Wahl, J. B., & Harris, K. (2011). Advanced Ni base superalloys for small gas turbines. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 50(3), 207-214.
- [26] Basuki, E. A., Prajitno, D. H., & Muhammad, F. (2017, January). Alloys developed for high temperature applications. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1805, No. 1, p. 020003). AIP Publishing LLC.
- [27] Tamarin, Y. (2002). *Protective coatings for turbine blades*. ASM international.
- [28] Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier.
- [29] Donachie, M. J., & Donachie, S. J. (2002). *Superalloys: a technical guide*. ASM international.
- [30] Moiz, M. (2013). The influence of grain size on mechanical properties of Inconel 718.
- [31] Bose, S. (2007). *High Temperature Coating*.

- [32] Weaver.A (2013). Skill Demands and Mismatch in U.S. Manufacturing: Evidence and Implications (pp 1-41)
- [33] Geddes b., Hugo l., Huang X. (2010) Superalloys Alloying and Performance
- [34] Coutsouradis D., Davin A., Lamberigts M. (1987) Cobalt-based superalloys for applications in gas turbines, *Materials Science and Engineering* 88:11-19
- [35] P. W. Schilke (2004) , Advanced Gas Turbine Materials and Coatings, GER-3569G, GE Energy
- [36] Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). *Modern physical metallurgy and materials engineering*. Butterworth-Heinemann.
- [37] Paulonis, D. F., & Schirra, J. J. (2001). Alloy 718 at Pratt & Whitney–Historical perspective and future challenges. *Superalloys*, 718(625,706), 13-23.
- [38] Sundararaman, M., Mukhopadhyay, P., & Banerjee, S. (1988). Precipitation of the δ -Ni₃Nb phase in two nickel base superalloys. *Metallurgical transactions A*, 19(3), 453-465.
- [39] Mahadevan, S., Nalawade, S., Singh, J. B., Verma, A., Paul, B., & Ramaswamy, K. (2010, October). Evolution of δ phase microstructure in alloy 718. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Superalloy* (Vol. 718, pp. 737-750).
- [40] Uzunonut, Y. (2017). Examination of Inconel 718 Welding Microstructure. *International Journal of Scientific and Technological Research*.
- [41] Wang, J. and Chen, C. (2006) Biosorption of Heavy Metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a Review. *Biotechnology Advances*, 24, 427-451.
- [42] Lee, S.-C., Chang, S.-H., Tang, T.-P., Ho, H.-H., & Chen, J.-K. (2006). Improvement in the Microstructure and Tensile Properties of Inconel 718 Superalloy by HIP Treatment. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 47(11)
- [43] Davis J.R., Alloy Digest Sourcebook: Stainless Steels
- [44] R. G. Thompson, M. C. Koopman, and B. H. King, Grain Boundary Chemistry of Alloy 718-Type Alloys, (pp. 1-18)

- [45] Kuşhan M.C. (2016) Elektron bombardıman kaynaklı Fe-Niasalı inconel718'in ısı tesiri altındaki bölgesindeki mikro çatlakların incelenmesi, Eskisehir Osmangazi Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği
- [46] Günebakmaz S. (2007) Toz Metalurjisi Yöntemi ile İnconel 718 Süper Alaşımın Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması
- [47] Encai Guo, Fengqin Xu and E.A. Loria, Improving thermal stability of alloy 718 via small modifications in composition, (pp. 1-10)
- [48] Bavarian, B., Emmons, J.R., 1990, Microfissuring in the heat affected zone of Inconel 718 weldments, ISTFA 90 (Prod. Conf.), 363-383.
- [49] Johnson H.V. (2020) , Manufacturing Processes
- [50] Joseph J. Beaman J.J., Barlow J.W., Bourell D.L., Crawford R.H., Marcus H.L., McAlea K.P., Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing
- [51] lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting
- [52] Soller, S., Behr, R., Beyer, S., Laithier, F., Lehmann, M., Preuss, A., & Salapete, R. (2017). Design and testing of liquid propellant injectors for additive manufacturing. In 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences, EUCASS), Milano, Italy
- [53] Hunt R.C., Gazella R.M., Polanka M.D., Kemnitz R., Eckley C.C., Sexton B.M., Sebastian J.R., Testing and Characterization of Additive and Traditionally Manufactured Inconel 718 in a Combustion Materials Test Facility
- [54] Özsoy, K., & Duman, B. (2017). EKLEMELİ İMALAT (3 BOYUTLU BASKI) TEKNOLOJİLERİNİN EĞİTİMDE KULLANILABİLİRLİĞİ. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 1(1), 36-48.
- [55] Hosseini, E., ve Popovich, V. A. (2019). A review of mechanical properties of additively manufactured inconel 718. Additive Manufacturing, 30, 100877.

- [56] Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107-121.
- [57] Erener, Ş., & Serkan, B. O. Z. (2021). Modern Üretim Tekniklerinde Eklemeli İmalat Sistemlerinin Yeri Ve Kullanım Alanları. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1), 47-56.
- [58] Sürmen, H.K. (2019). eklemeli imalat (3b baskı): teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- [59] Ergene, B. (2022). Farklı bağıl yoğunluklardaki Inconel 718 ve Ti6Al4V biyomedikal parçaların seçici lazer ergitme (SLE) metoduyla üretiminin simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 469-484.
- [60] Katı, N., Bölükbaşı, M., & Ozan, S. (2018). Inconel 718 Süper Alaşımın Plazma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Akım Şiddetinin Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 593-599..
- [61] Gasson, P. C. (2008). *The Superalloys: Fundamentals and Applications* RC Reed Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge, CB2 2RU, UK, 2006. 372pp. Illustrated.£ 80. ISBN 0-521-85904-2. *The Aeronautical Journal*, 112(1131), 291-291.
- [62] Panwisawas, C., Tang, Y. T., & Reed, R. C. (2020). Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications*, 11(1), 1-4
- [63] Goel, S., Sittiho, A., Charit, I., Klement, U., & Joshi, S. (2019). Effect of post-treatments under hot isostatic pressure on microstructural characteristics of EBM-built Alloy 718. *Additive Manufacturing*, 28, 727-737.
- [64] Kirka, M. M., Medina, F., Dehoff, R., & Okello, A. (2017). Mechanical behavior of post-processed Inconel 718 manufactured through the electron beam melting process. *Materials Science and Engineering: A*, 680, 338-346.
- [65] specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf
- [66] ASTM E8-E8M-2016a.pdf

- [67] Sames, W. (2015). Additive manufacturing of Inconel 718 using electron beam melting: processing, post-processing, & mechanical properties (Doctoral dissertation).
- [68] Strondl, A., Palm, M., Gnauk, J., & Frommeyer, G. (2011). Microstructure and mechanical properties of nickel based superalloy IN718 produced by rapid prototyping with electron beam melting (EBM). *Materials Science and Technology*, 27(5), 876-883.

