

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN ENERJİ BİRİKTİRME YÖNTEMİNDE DEĞİŞKEN TAKIM
YOLUNUN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Recep ÖZKÖK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2022

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN ENERJİ BİRİKTİRME YÖNTEMİNDE DEĞİŞKEN TAKIM
YOLUNUN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Recep ÖZKÖK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Doruk Erdem YUNUS

HAZİRAN 2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Recep ÖZKÖK

İmzası :

X X X X



Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans öğrenimim süresince her zaman desteğini esirgemeyen ve çalışmalarına yön veren sayın Dr. Öğr. Üyesi Doruk Erdem YUNUS'a sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Yüksek Lisans tez çalışması boyunca gerçekleştirilen deneysel çalışmalara katkılarıyla destek olan saygıdeğer Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a şükranı bir borç bilerek teşekkürlerimi sunarım.

Yorucu, uzun ve zorlu bir süreç olan yüksek lisans öğrenimim boyunca, bana gayret ve azim aşılayan canım annem Nebahat ÖZKÖK'e şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

HAZİRAN 2022

Recep Özkök

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ... ..	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
1.2.1 Eklemeli imalat teknolojisi	3
1.2.1.1 Doğrudan enerji biriktirme yöntemi	3
1.2.1.2 Malzeme ekstrüzyonu yöntemi	4
1.2.1.3 Malzeme püskürtme yöntemi	5
1.2.1.4 Bağlayıcı püskürtme yöntemi	6
1.2.1.5 Toz yataklı füzyon yöntemi	6
1.2.1.6 Levha laminasyonu yöntemi	7
1.2.1.7 Vat polimerizasyon yöntemi	8
1.2.2 Pazlanmaz çelik malzemesi	9
1.2.2.2 Toz malzemeler	10
1.2.3 Ekipmanlar	12
1.2.4 Proses kontrol parametreleri	13
1.2.4.1 Lazer gücü	15
1.2.4.2 Toz besleme hızı	16
1.2.4.3 İlerleme hızı	17
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	18
2.1. Deneyin Yapılışı.....	18
2.1.1 PH 13-8 mo malzemesi	18
2.1.2 17-4 PH malzemesi	18
2.1.3 DED sistemi	19
2.1.4 S şekilli numunelerin üretilmesi	20
2.1.5 Blok numunelerin üretilmesi	23
3. SONUÇLAR	26
3.1 Enerji Yoğunluğunun Malzemenin Geometrik Özelliklerine Etkisi	26
3.2 Gözenek Miktarı Tespiti.....	29
3.3 Sertlik Testi	35
3.4 Sonuç	37
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ.....	42

KISALTMALAR

CNC	: Computer Numerical Control
CAM	: Computer Aided Manufacturing
DED	: Doğrudan Enerji Biriktirme
LMD	: Lazer Metal Biriktirme
PH	: Çökeltiyle Sertleştirilmiş



SEMBOLLER

H	: Isı miktarı
T_s	: İlerleme Hızı
k	: Termal Verimlilik
P_{net}	: Alt Katmana İletilen Güç
P_{giriş}	: Üretilen Enerjinin Giriş Gücü
P	: Lazer Gücü
R_b	: Nokta Yarıçapı
V_{beam}	: Lazer İlerleme Hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : DED üretim parametrelerinin biriktirilen katmanlar üzerindeki etkisi.	13
Çizelge 2.1 : PH 13-8 Mo Paslanmaz Çeliği Kompozisyonu.....	18
Çizelge 2.2 : 17-4 PH Paslanmaz Çeliği Kompozisyonu.	19
Çizelge 2.3 : DED Sistemi Özellikleri.....	20
Çizelge 2.4 : Giriş proses parametreleri ve seviyeleri.	21
Çizelge 2.5 : Deney Tasarımı.	22
Çizelge 3.1 : Lazer enerji yoğunluğu kategorizasyon matrisi	26
Çizelge 3.2 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde sertlik testi sonuçları.	35
Çizelge 3.3 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde sertlik testi sonuçları.	36
Çizelge 3.4 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde sertlik testi sonuçları.	36
Çizelge 3.5 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde sertlik testi sonuçları.	36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Doğrudan enerji biriktirme yöntemi şematik gösterimi	4
Şekil 1.2 : Malzeme ekstrüzyonu yöntemi şematik gösterimi.....	5
Şekil 1.3 : Malzeme püskürtme yöntemi şematik gösterimi.....	5
Şekil 1.4 : Bağlayıcı püskürtme yöntemi şematik gösterimi	6
Şekil 1.5 : Toz yataklı füzyon yöntemi şematik gösterimi	7
Şekil 1.6 : Levha laminasyonu yöntemi şematik gösterimi.....	8
Şekil 1.7 : Levha laminasyonu yöntemi şematik gösterimi.....	9
Şekil 1.8 : Schaeffler-Delong diyagramı, birbirinden farklı kimyasal kompozisyona sahip alaşımların fazları (Paslanmaz Çelik)	10
Şekil 1.9 : Gaz atomizasyon yöntemi ile üretim şematik gösterimi	11
Şekil 1.10 : DED yöntemi prosesinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.1 : Erlaser LMD Tezgahı.....	19
Şekil 2.2 : S şekilli numunelerin şematik gösterimi.	22
Şekil 2.3 : S-şekilli numunelerin eldesi.	23
Şekil 2.4 : “1” ve “2” nolu blok numuneler (yan görünüş).	24
Şekil 2.5 : “1” ve “2” nolu blok numuneler (Üst görünüş).....	24
Şekil 2.6 : “1” nolu blok numune takım yolu stratejisi.....	25
Şekil 2.7 : “2” nolu blok numune takım yolu stratejisi.....	25
Şekil 3.1 : Düşük enerji yoğunluklu S şekilli numuneler.	26
Şekil 3.2 : Orta Seviye enerji yoğunluklu S şekilli numuneler.	27
Şekil 3.3 : Yüksek enerji yoğunluklu S şekilli numuneler.	28
Şekil 3.4 : Blok üzerinden alınan 2 ayrı numune (beyaz renkte gösterilmiştir).....	29
Şekil 3.5 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde incelemesi.	29
Şekil 3.6 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde makro görünüşü.	30
Şekil 3.7 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde gözenek incelenmesi.....	30
Şekil 3.8 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde incelenmesi.	31
Şekil 3.9 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü.	31
Şekil 3.10 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde gözenek incelenmesi.....	32
Şekil 3.11 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde incelenmesi.....	32
Şekil 3.12 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde makro görünüşü.....	33
Şekil 3.13 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde gözenek incelenmesi.	33
Şekil 3.14 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde incelenmesi.	34

Şekil 3.15 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü.	34
Şekil 3.16 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde gözenek incelemesi	35
Şekil 3.17 : Numune üzerindeki sertlik ölçüm bölgeleri.	35
Şekil 3.18 : Blok Numuneleri Sertlik Testi Kıyaslama Grafiği.....	37



DOĞRUDAN ENERJİ BİRİKTİRME YÖNTEMİNDE DEĞİŞKEN TAKIM YOLUNUN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Eklemeli imalat (AM), sağladığı tasarım esnekliği, geleneksel yöntemlerle elde edilen parçalara yakın mekanik özelliklerin sağlanması ve tedarik sürelerini kısaltması nedeniyle birçok endüstride tercih sebebi olmaktadır. Doğrudan enerji biriktirme (DED), eklemeli imalatın bir çeşididir ve lazer metal biriktirme (LMD) DED prosesinin bir alt kolu olarak kabul edilmektedir. Bir nozülünden beslenen toz malzemeyi ergitmek ve biriktirmek için lazer enerjisini kullanmaktadır. Bu tez çalışması, PH -13-8 Mo paslanmaz çelik tozu kullanılarak S şeklindeki numunelerin üretilerek parametre optimizasyonu ve sonrasında 17-4 PH tozu kullanılarak blok numunelerin üretilerek takım yolu optimizasyonu çalışmalarını sunmaktadır. Enerji yoğunluğu kavramının elde edilen numune geometrisine etkisi, enerji yoğunluğunu doğrudan etkileyen proses parametrelerinin belirlenerek S şeklinde tek sıralı numuneler üretilerek yapılmıştır. Sonuç olarak düşük enerji yoğunluğuna sahip parametreler kullanılarak S şeklindeki duvarların istenen yapıda olmadığı ve uygunsuz olduğu söylenebilir. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip parametrelerle ise daha uygun yapıda ve hacimsel olarak daha büyük yapıda numuneler elde edilebilmektedir. Ancak numunelerin geometrisi biriktirme boyunca ısı birikme nedeniyle sabit kalmamaktadır ve değişken yapıya sahiptir. Herhangi bir enerji yoğunluğunda elde edilen numunelerde bu tür geometrik kusurlar görülebilmektedir. Bu türdeki kusurlar, hareket halindeki bir nozülünden tozu ergitmek için yeterli ısı enerjisi elde edilemediğinde ortaya çıkmaktadır. Bu kusurun seviyesi enerji yoğunluğuna göre değişiklik göstermektedir. İlk deney tamamlandıktan sonra takım yolu stratejisinin malzeme kesitindeki sertlik ve gözenekliliğine etkisi PH-13-8 Mo paslanmaz çelik malzemesine benzer bir kompozisyona sahip 17-4 PH paslanmaz çelik malzemesi ile blok numuneler 2 farklı takım yolu strateji uygulanarak üretilmiştir. Değişken takım yolu stratejisi ile üretilen numuneler kesit boyunca daha fazla gözenekliliğe sahiptir ve sertlik açısından daha iyi sonuçlar sağlamıştır. Sabit takım yolu stratejisi ile üretilen numuneler ile değişken takım yolu stratejisiyle üretilen numunelere göre daha düşük gözenekliliğe sahip ve sertlik olarak daha düşük sonuçlar vermiştir. Gözeneklilik parça içerisindeki bulunma oranı ve büyüklüğü ile birlikte parçaların mekanik dayanımını düşürmekte ve parça isterlerinin sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple eklemeli imalatla üretilen numuneler için minimum düzeyde gözenek oluşumu beklenmektedir. Aksi halde “HIP” gibi basınç altında ısı işlem gerektiren ek proseslerle gözeneklerin azaltılması gerekmekte ve bu durum yüksek maliyetler yaratmaktadır.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, katmanlı imalat, doğrudan enerji biriktirme, lazer metal biriktirme, PH 13-8 Mo, 17-4 PH

THE EFFECT OF VARIABLE TOOL PATH IN DIRECTED ENERGY DEPOSITION METHOD ON THE MATERIAL PROPERTIES

SUMMARY

Additive manufacturing (AM) is preferred in many industries due to the design flexibility it provides, providing mechanical properties close to parts obtained by traditional methods and shortening lead times. Direct energy deposition (DED) is a variant of additive manufacturing and laser metal deposition (LMD) is considered a sub-branch of the DED process. It uses laser energy to melt and deposit powder material fed from a nozzle. This thesis presents parameter optimization by producing “S” shaped samples using PH -13-8 Mo stainless steel powder and then tool path optimization studies by producing block samples using 17-4 PH powder.

The effect of the concept of energy density on the obtained sample geometry was made by producing S-shaped single-row samples by determining the process parameters that directly affect the energy density. As a result, using parameters with low energy density, it is clear that S-shaped walls are not in the desired structure and are inappropriate. With parameters with high energy density, samples with a more suitable structure and larger in volume can be obtained. However, the geometry of the samples does not remain constant during deposition due to thermal deposition and has a variable structure. Such geometric defects can be seen in samples obtained at any energy density. Such defects occur when sufficient heat energy cannot be obtained from a moving nozzle to melt the powder. The level of this defect varies according to the energy density. After the first experiment was completed, the effect of the toolpath strategy on the hardness and porosity of the material cross-section, 17-4 PH stainless steel material with a composition used similar to the PH-13-8 Mo stainless steel material, block samples were produced by applying 2 different toolpath strategies. The samples produced with the variable tool path strategy had more porosity across the section and provided better results in terms of hardness. The samples produced with the fixed tool path strategy had lower porosity and lower hardness than the samples produced with the variable tool path strategy. Porosity reduces the mechanical strength of the parts because of volume ratio of porosity and size of the porosity and makes it difficult to meet the part requirements. Therefore, minimal porosity formation is expected for samples produced by additive manufacturing. Otherwise, it is necessary to reduce the porosities with additional processes that require heat treatment under pressure, such as "HIP", and this creates high costs.

Keywords: Additive Manufacturing, Direct Energy Deposition, Laser Metal Deposition, PH 13-8 Mo, 17-4 PH

1. GİRİŞ

Eklemeli İmalat 3 boyutlu bir CAD model kullanılarak 3 boyutlu nesnelerin elde edilebilmesi için kullanılan bir üretim teknolojisidir. Malzeme katman katman biriktirilerek elde edilmek istenen tasarım veya tasarıma yakın bir yapıda elde edilebilir [1]. Eklemeli imalat prosesleri yediye ayrılmaktadır. Bunlar; Doğrudan enerji biriktirme yöntemi, Malzeme ekstrüzyonu yöntemi, Malzeme püskürtme yöntemi, Bağlayıcı püskürtme yöntemi, Toz yataklı füzyon yöntemi, Levha laminasyonu yöntemi, Vat fotopolimerizasyon yöntemidir [2]. Doğrudan enerji biriktirme altında yer alan bir diğer proses Laser metal biriktirme LMD yöntemidir. Bu yöntemde enerji kaynağı olarak lazer kullanılmakta olup sarf malzeme olarak tel veya toz kullanılabilmektedir. Lazer aracılığıyla ortaya çıkan ısı enerjisi sarf malzemeyi tabla üzerinde eriterek eriyik havuzu oluşturmaktadır. Sarf malzemenin eriyik havuza beslenmeye devam etmesiyle birlikte 3 boyutlu CAD modele göre tabla üzerinde katılmış bir yapı elde edilir. Üretim boyunca oksidasyonu önlemek için eriyik havuzu üzerine doğrudan asal gazlar salınmaktadır [3]. Lazer metal biriktirme (LMD) yöntemi parça onarımı uygulamalarında, yüzey kaplama uygulamalarında, 3 boyutlu nesnelerin üretimi ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FGM) malzemelerin üretimi de dahil olmak üzere birçok farklı uygulama alanına sahiptir [4]. LMD yöntemi ile üretilen 3 boyutlu nesnelerin neredeyse hepsi proses parametrelerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. LMD yönteminde en kritik proses parametreleri; lazer gücü, ilerleme hızı, toz besleme hızı, gaz akış hızı, lazer nokta çaplarıdır. Yağış sertleşmesi (çökelti ile sertleşen) paslanmaz çelikleri (PH) ilk olarak II. Dünya Savaşı sırasında US Steel firmasının “Stainless W” (UNS S 17600) ismiyle piyasaya sürdüğünde ilk olarak standart bir malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır [5]. Korozyona dayanıklı alaşımlardır [6]. Östenitik veya ferritik paslanmaz çelik türlerinden daha yüksek dayanıma sahiptirler [7]. PH 13-8 Mo paslanmaz çeliği yüksek mukavemete ve yüksek sertliğe, iyi süneklik , tokluk ve korozyon direncine sahip martensitik çökeltme ve/veya yaşlanmayla sertleşen bir paslanmaz çeliktir [8]. PH 13-8 Mo paslanmaz çeliği nükleer reaktör parçaları, havacılık iniş takımı parçaları, saftlar, valf parçaları, petro-kimyasal uygulamalar gibi birçok uygulamada ve sektörde

kullanılmaktadır [8]. 17-4 PH malzemesi ise sağladığı orta düzeydeki korozyon direncinin yanı sıra yüksek mukavemet ve sertlik sunan martensitik bir paslanmaz çeliktir. 17-4 PH çeliği martensitik çeliklerin gösterdiği gibi yüksek mekanik özelliklere, diğer taraftan da östenitik çelikler gibi daha yüksek korozyon direncine sahip malzemelerdir [9]. Havacılıkta, medikal ve denizcilik sektöründe, kağıt üretiminde kullanılan ekipmanların üretiminde, gıda işleme ekipmanlarının üretiminde yaygın olarak kullanımı mevcuttur.

1.1 Tezin Amacı

Metal eklemeli imalat son yıllarda havacılık, otomotiv, denizcilik, medikal sektörlerinde etkinliğini arttırmıştır. Düşük hacimde parça üretimi gerektiren uygulamalarda kalıp maliyetlerine alternatif olarak eklemeli imalat tercih edilmektedir. Dolu malzemelerden talaş kaldırarak elde edilen ürünlerde de fizibilite çalışmalarında eklemeli imalata geçişin maliyetlerin azaltılması, malzeme israfının azaltılmasında verimli sonuçlar sağladığı görülmektedir. Malzeme tedarikinin zorlaştığı günümüzde minimum malzeme ile maksimum fayda açısından eklemeli imalat tercih sebebidir.

Metal eklemeli imalatla elde edilen parçaların kalitesini üretim proses parametreleri doğrudan etkilemektedir. Her bir makine, kullanılan enerji türü, ekipmanlar, ekipmanların konfigürasyonu gibi birçok faktöre bağlı olarak proses parametreleri farklılık göstermektedir. Bu sebeple istenen malzeme ile elde edilmek istenen parça özelliklerine göre deney tasarımlarının yapılarak optimum proses parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için bir dizi parametre çalışması gerekmektedir. İlk olarak lazer gücü, ilerleme hızı, toz besleme hızı gibi ana parametrelerin seçimi, sonrasında da geometriye bağlı olarak takım yolu stratejisinin belirlenmesi gerekmektedir.

Tezin ilk amacı PH-13-8 Mo malzemesi için optimum proses parametrelerinin S şekilli numune üretimi yapılarak belirlenmesidir. Tezin 2. Amacı ise yine benzer bir kompozisyona sahip olan 17-4 PH malzemesi için takım yolu stratejisinin belirlenmesidir.

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Eklemeli imalat teknolojisi

Eklemeli imalat denince akla ilk gelen soru, mevcuttaki problemlerimi konvensiyonel yöntemlere kıyasla daha avantajlı olarak çözebilecek miyim, sorusudur. Bazı uygulamalarda, etkili ve isterlere uygun sonuçlar gözlemlenirken kalite, maliyet, zaman da mevcut yöntemlerle yapılacak kıyaslama çalışmalarında ele alınmalıdır. Bazı uygulamalarda eklemeli imalat teknolojileri avantajlı olurken bazılarında ise yeterli olamamaktadır.

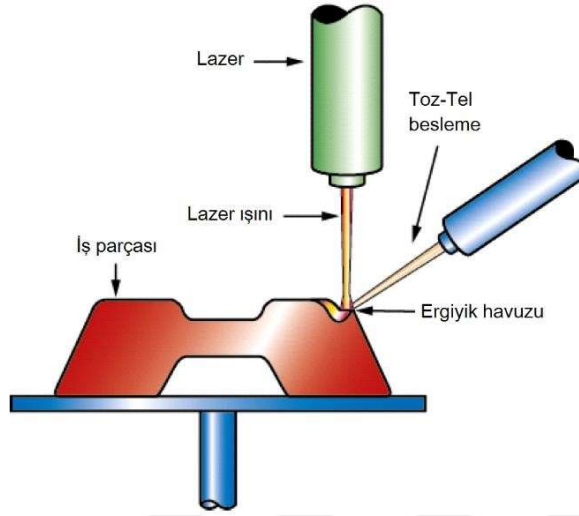
Eklemeli imalat proseslerini anlamak elde edilmek istenen parçaya istinaden hangi üretim yönteminin en uygun çözüm olduğunu belirlemeye olanak sağlar. Nihayetinde elde ettiğiniz malzemelerin özellikleri, geleneksel malzemeler, maliyet, kalite, zaman vb. tamamı birbirleriyle her zaman bağlantılıdır. Eklemeli imalat birçok sektörde ve araştırma merkezinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen açık kaynak bulmak oldukça zordur. Aşağıda ilgili yöntemler ayrı ayrı incelenmiştir.

- Doğrudan enerji biriktirme yöntemi,
- Malzeme ekstrüzyonu yöntemi,
- Malzeme püskürtme yöntemi,
- Bağlayıcı püskürtme yöntemi,
- Toz yataklı füzyon yöntemi,
- Levha laminasyonu yöntemi,
- Vat fotopolimerizasyon yöntemi,

1.2.1.1 Doğrudan enerji biriktirme yöntemi

Direct Energy Deposition (DED) yönteminde malzemeler termal enerji vasıtasıyla eritilerek biriktirilir. Bu işlemde, malzeme eritilerek termal bir havuz oluşturulur. Malzeme olarak metal tel veya toz kullanılabilir. Termal enerji olarak lazer, elektron ışını, plazma kaynak torcu kullanılabilir. Bu yöntem altında sıralanan teknolojiler genellikle robotlar ve çok eksenli yapılarla kullanılır. Böylece yapı yalnızca yatay olarak değil çeşitli açılarda da oluşturulabilir. Karmaşık yapıların elde edilmesi için ikincil işlemlere de gereksinim duyulabilmektedir. DED yöntemi ayrıca parçaların

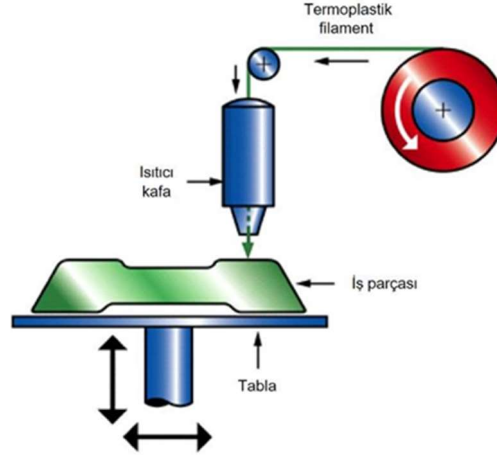
onarımı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de DED yöntemine ait şematik gösterim paylaşılmıştır.



Şekil 1.1 : Doğrudan enerji biriktirme yöntemi şematik gösterimi [2].

1.2.1.2 Malzeme ekstrüzyonu yöntemi

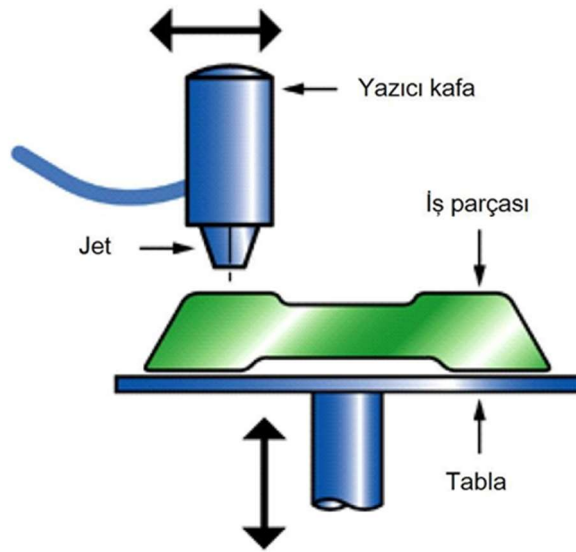
Bir nozül kullanılarak malzemenin belirlenmiş bir yol boyunca eklemeli imalat ile biriktirildiği üretim yöntemidir. Bu yöntemde, üretilecek numune veya parça bir nozulden çıkan materyalden yapılır. Bu yöntemdeki işlemlerin karakteristik adımları; materyal parçanın/numunenin enine kesiti üzerinden biriktirilir, genellikle iç bölgede kısmi olarak oyuk bir yapı mevcuttur ve alt kısımlar için destek yapıları tercih edilebilir. Sırasıyla bu işlemler parça üretimi bitene kadar tekrar eder. Bu proseste parçayı/numuneyi üretmek için nozulün uc kısmında eritilmiş olan termoplastik filament malzemesi kullanılır. Üretimi besleyen birden fazla nozul mevcut olabilmektedir. Bu yöntemin bir diğer uygulama alanlarında farklı malzemelerin biriktirebildiği şırınga veya haznelerde viskoz haldeki sıvılar kullanılabilir. Şekil 2.1’de malzeme ekstrüzyonuna ait şematik gösterim paylaşılmıştır.



Şekil 1.2 : Malzeme ekstrüzyonu yöntemi şematik gösterimi [2].

1.2.1.3 Malzeme püskürtme yöntemi

Yazıcıya benzeyen bir yapıda iki boyuttaki mürekkepi püskürterek çeşitli numuneler/parçalar oluşturulur. Materyal, nesne yüzeyine veya platforma doğru püskürtülerek biriktirme işlemi yapılır, böylece katılaşma ile ve nesne katman katman oluşturularak tamamlanır. Bu yöntem için kullanılan makineler, biriktirmenin kontrol edilmesi ve yapı olarak farklılıklar göstermektedir. Biriktirme işlemi sonrası UV ışık teknolojisi kullanılarak malzeme katmanları sertleştirilir. Materyalin damlacıklar halinde biriktirilmesi gerektiğinden, seçilebilecek olan malzeme çeşidinin sayısı sınırlı olmaktadır. Damlacık oluşturma kabiliyeti ve yapılarının yapışkan olması sebebiyle polimer malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.3'te malzeme püskürtme yöntemine ait şematik gösterim paylaşılmıştır.

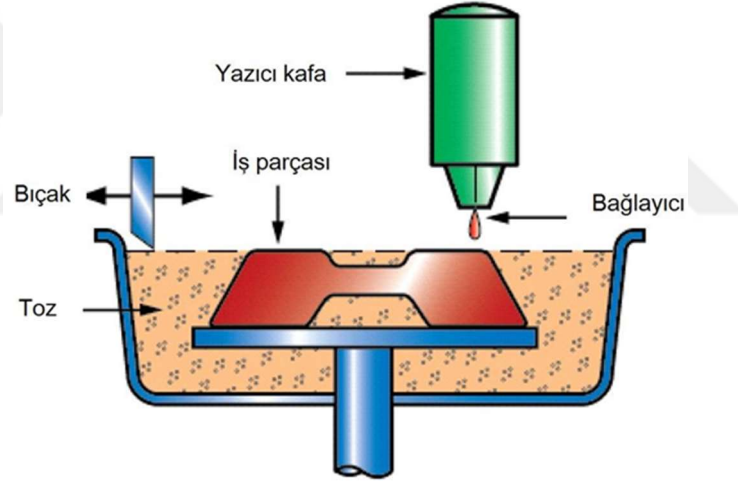


Şekil 1.3 : Malzeme püskürtme yöntemi şematik gösterimi [2].

1.1.1.4 Bağlayıcı püskürtme yöntemi

Toz sarf malzemeler kullanılarak sıvı bağlayıcı aracılığıyla final parça elde edilecek şekilde biriktirme işleminin yapıldığı yöntemdir. Genel olarak bu işlemde toz malzeme yüzey üzerine serilir. Bağlayıcı malzeme uygulanarak malzemenin birleşmesi sağlanır. Kütleme ve sertleştirme gerçekleşir. Tekrar bir toz katmanı serilerek işlem devam eder.

Parça hazır olduğunda, cihazdan çıkartılır ve tozdan ayrıştırılır. Elde edilen parçanın kullanılan bağlayıcı malzemeye bağlı olarak soğumaya bırakılması ve sertleşmesi beklenir. Parçanın dayanımına kullanılan bağlayıcı malzeme doğrudan etki ettiğinden dolayı fırın kullanılarak sinterleme ve/veya diğer ek işlemlerle parça yapısal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi beklenir. Bu durum tedarik süresini arttıracığından bu yöntem için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Şekil 1.4'te bağlayıcı püskürtme yöntemine ait şematik gösterim paylaşılmıştır.



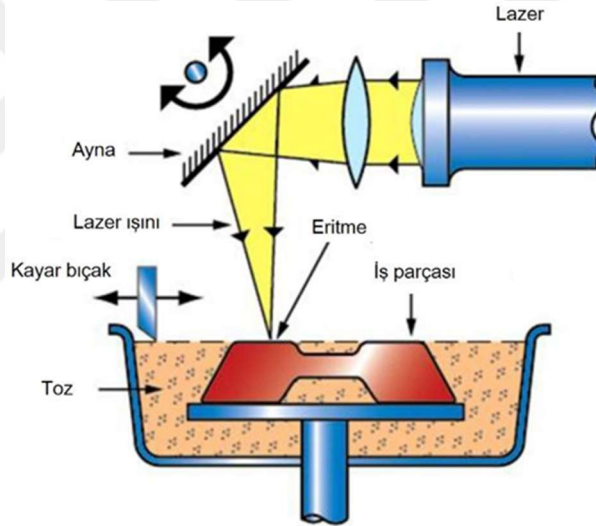
Şekil 1.4 : Bağlayıcı püskürtme yöntemi şematik gösterimi [2].

1.2.1.5 Toz yataklı füzyon yöntemi

Isıl bir enerji kullanılarak toz yatağında bulunan bölgeleri seçici olarak birleştirme işlemiyle elde edilen numune veya parçanın eklemeli imalat ile üretim yöntemine verilmiş olan isimdir. Bu işlemde elde edilecek parçanın/numunenin enine olan kesitlerini biriktirmek için toz malzemeye termal enerji girdisi yapılır. Toz düz bir yüzeyde dağıtılarak termal enerji oluşturulacak malzeme kesiti boyunca yüzeye uygulanır. Final parça elde edilene kadar yapılan işlemler tekrarlanır.

Seçici lazer sinterleme prosesinin plastik malzeme kullanılarak yapılması, bu teknolojiadaki eski uygulamalardan biridir. Metal malzeme kullanılarak doğrudan lazer sinterleme teknolojisi metal malzemeler ve seramikler için yaygın olarak kullanılır.

Metal ve seramik malzemelerin üretimine uygun olarak seçici lazer ergitme teknolojisi kullanılır. Lazer sinterleme teknolojisine benzer olarak çalışır. Yoğunluğu yüksek parçalar elde edilmesi nedeniyle tercih sebebidir. Döküm teknolojisine kıyasla üretim esnasında parça sıcaklığı artmakta ve elde edilen mekanik özellikler farklılık göstermektedir. Elektron ışını kullanarak ergitme teknolojisi, lazer enerjisi yerine yüksek enerjiye sahip elektron ışınını kullanarak üretim yapar. Seçici lazer ergitme yöntemine kıyasla homojen olarak ısı dağılımına sahiptir. Döküm malzemelere yakın mekanik özelliklere ulaşılması muhtemeldir. Şekil 1.5'te toz yataklı füzyon yöntemine ait şematik gösterim paylaşılmıştır.



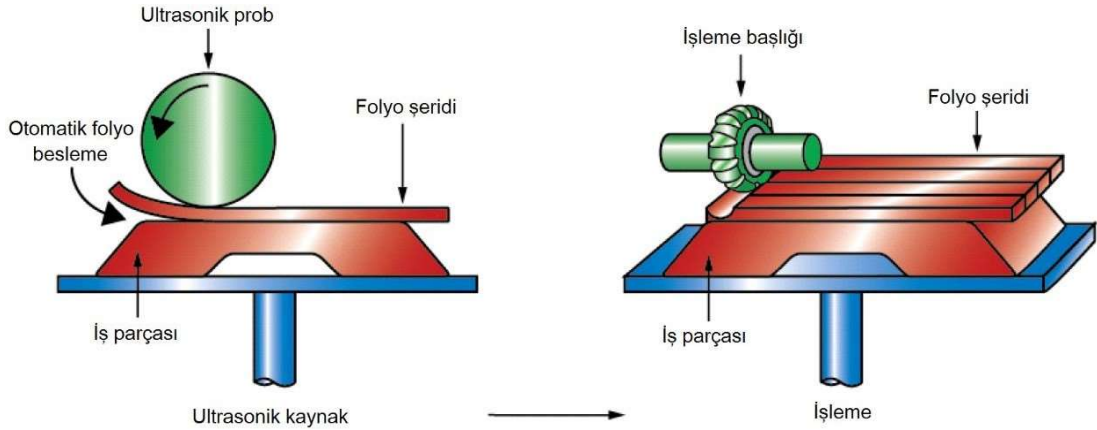
Şekil 1.5 : Toz yataklı füzyon yöntemi şematik gösterimi [2].

1.2.1.6 Levha laminasyonu yöntemi

Katmanlar birleştirilerek parçanın oluşturulduğu eklemeli imalat yöntemidir. Levha kalıplama olarak bilinen kategorinin bir diğer tanımıdır. Malzeme tabakalarının birleştirilerek parçalandığı işlem türü ise Sheet laminasyon işlemidir. Bu tür bir yöntemde en az iki işlem olmak üzere ultrasonik katmanlı üretim ve laminasyon parça üretimi adımları bulunmaktadır.

Şekil 1.6'da paylaşıldığı üzere malzeme istediği güçte ve frekansta dönen bir snotrot kullanılarak birleştirilir. Snotrotun yüksek frekansı katmanların sürtünme yardımıyla

erimesine neden olur. Kaliteli bir yüzey elde etmek ve işlemeyi kolay hale getirmek için öğütücü kafadan faydanılabilir.

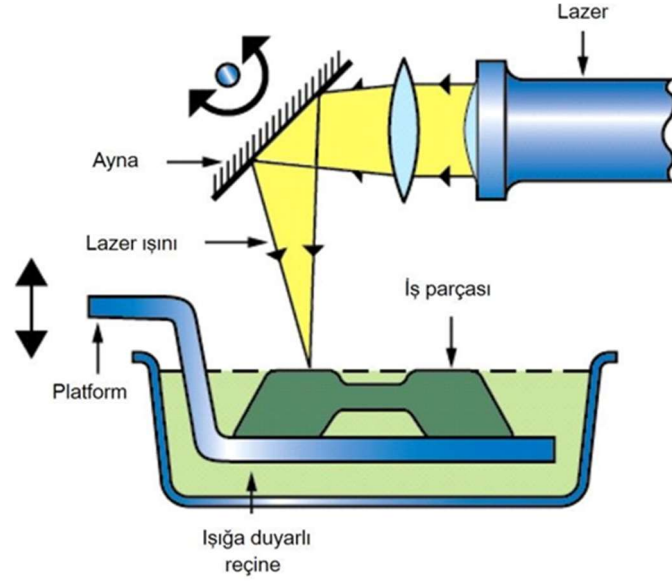


Şekil 1.6 : Levha laminasyonu yöntemi şematik gösterimi [2]

1.2.1.7 Vat polimerizasyon yöntemi

Bir diğer eklemeli imalat yöntemi olarak vat polimerizasyon yönteminde bir haznede bulunan sıvı haldeki fotopolimerin ışık kullanılarak aktif edilmiş polimerizasyonla sertleştirilmesi sağlanır. Bu işlem kimyasal bir yöntemdir.

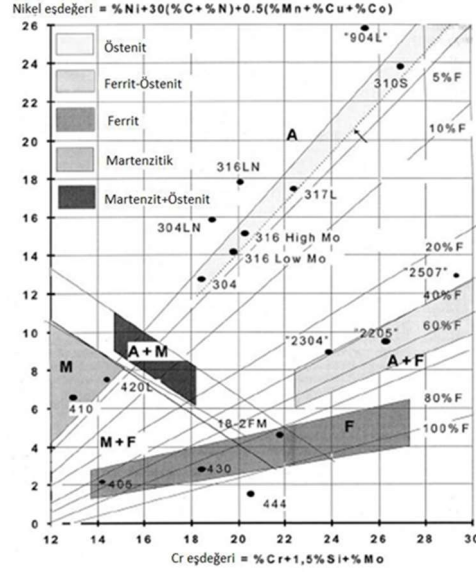
Kullanılan ışık hüzmesi noktasal veya çalışılan iş parçasının tam bir kesiti boyunca olabilmektedir. Bazı uygulamalarda ışık hüzmesi led olmakla birlikte genellikle lazer olmaktadır. Kullanılan enerji kaynağı, sıvı kabın alt kısmında ya da yukarısında olabilmektedir. Enerji kaynağının aşağıda veya yukarıda olması parçanın hangi yönde üretileceğini belirlemektedir. İlk ticarileşen katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan Stereolithography apparatus (SLA) teknolojisi ultraviyole ışın kullanılarak tarama işleminin yapılmasını sağlar. Şekil 1.7’de levha laminasyonuna ait şematik gösterim paylaşılmıştır.



Şekil 1.7 : Levha laminasyonu yöntemi şematik gösterimi [2].

1.2.2 Paslanmaz çelik malzemesi

Zorlu ortam koşullarına dayanıklı bir malzeme olan paslanmaz çelikler, minimum %12 civarında Cr içeren bir çelik alaşımdır. Bu seviyede Cr oranı korozyon direnci sağlamak içindir. Çelik yüzeyinde oluşan krom oksit ince film tabakası oksidasyonu önleyerek korozyon direncini artırır. Mikro yapısına göre paslanmaz çelikler yaygın olarak beş farklı gruba ayrılmaktadır; Martensitik, Ferritik, Östenitik, Dupleks ve PH Çelikleri (Çökelti ile sertleştirilen). İlgili grupların kimyasal bileşimleri Şekil 1.8’de paylaşılmıştır. Yapılan çalışmada yağış sertleşmesi (çökelti ile sertleşen) paslanmaz çelikleri (PH) kullanılmıştır.



Şekil 1.8 : Schaeffler-Delong diyagramı, birbirinden farklı kimyasal kompozisyona sahip alaşımların fazları (Paslanmaz Çelik) [10].

1.2.2.2 Toz malzemeler

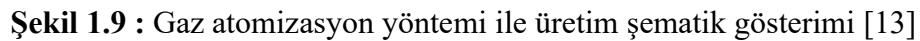
İlgili çalışmada tercih eden yöntem olan Direct Energy Deposition (DED) yönteminde tercih edilen toz boyutu Powder Bed (PB) yönteminde kullanılan boyutlara nazaran daha büyüktür. DED yönteminde tercih edilen toz boyutları 10 ila 100 μm arasında değişmektedir. Toz şeklinin küre olması yaygındır. Küre şeklindeki toz taneciklerinin tercih edilmesinin sebebi proses boyunca ergimiş havuzdaki inert bir gazın hapsolmasını mümkün olduğunca önlemektedir. Bu şekilde yapıda istenmeyen gözenegın azaltılması sağlanabilir. Gözenek miktarı, boyutu mekanik dayanımı doğrudan etkilediği için bu işlemden dikkat edilmesi gereken önemli durumlardan biridir. Ayrıca oksit oluşumu istenmemekle birlikte bu problemin ortadan kaldırılması için ortamdaki oksijen miktarının azaltılması gerekmektedir. Ortama argon, azot, helyum gibi metal toz ile reaksiyona girmeyen veya düşük miktarda olasılığı olan koruyucu gazlar kullanılmaktadır. Kritik uygulamalarda oksijen miktarının anlık ölçülmesi ve belirli seviyelerin üzerine çıkması durumunda operatörün uyarılması beklenmektedir.

Toz malzemenin doğrudan ilişkili olduğu bir diğer durum toz besleme hızı parametresidir. Nozülünden çıkan tozun belirli bir zamandaki kütlesini ifade etmektedir. Toz besleme hızı genellikle 1-10 g/dk arasında değişmektedir.

Bir diğer önemli proses parametresi katmanlar arasındaki bekleme süresidir. Üretilecek parça boyutu, malzeme, takım yolu stratejisi ve katmanın uzunluğuna bağlı

Kullanılan toz boyutuna, şekline ve hangi yöntemle üretildiğine göre tozlar farklılık göstermektedir. Eklemeli imalat yöntemleri için genel olarak metal tozları gaz atomizasyonu, plazma atomizasyon ve plazma dönen elektrot yöntemi (PREP) ile üretilmektedir.

Geleneksel olarak Gaz atomizasyon yöntemi ile küresel toz elde edilmektedir. Bu yöntem, Şekil 1.9’da gösterildiği gibi, sıvı haldeki bir metalin çok yüksek hızdaki bir havanın, nitrojenin, argonun yada helyumun yardımıyla dağıtılması işlemi aracılığıyla oluşmaktadır. Bu yöntem aracılığıyla magnezum, titanyum, bakır, çinko, alüminyum, nikel içerikli alaşımlar, kobalt içerikli alaşımlar ve diğer bazı metaller küresel olarak toz hale getirilmektedir. Reaktif metaller (titanyum ve bazı süper alaşımlar) atomize edildikçe oksidasyon durumundan kaçınmak için asal gazlar (neon, helyum, argon, kripton, radon, ksenon) kullanılmaktadır [12].



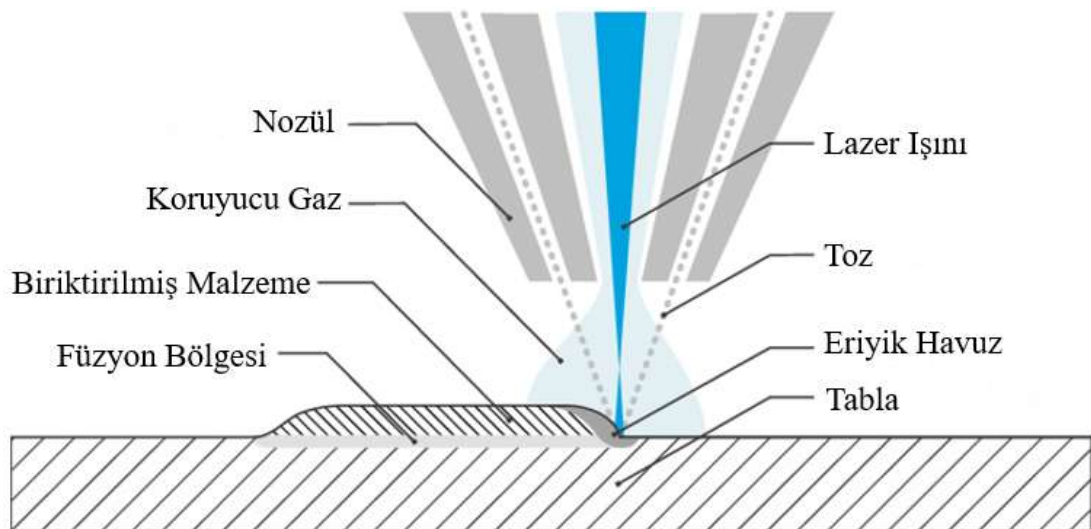
Plazma atomizasyonu yöntemi kullanılarak içeriye beslenmekte olan hammaddenin bir plazma torçu kullanılarak ısıtılması ve ardından ergitilmesi, son olarak da uygun koşullarda soğutulması ve sertleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Prosese bağlı olarak beslenmekte olan hammadde tel, çubuk veya tanecikler bütünü olabilmektedir. Bu yöntemle yaygın olarak Molibden alaşımları küreselleştirilmektedir. Üretilen taneciklerin boyutlarının dağılımı 0 ila 250 μm aralığındadır.

Plazma dönen elektrot yöntemi ile üretim

Plazma dönen elektrot yöntemi santrifüjlü atomizasyon yöntemi olarak bilinmektedir. Yüksek hızlarda dönmekte olan bir çubuğun (hammadde) ucu bir plazma torçu kullanılarak eritilir, santrifüj aracılığıyla erimiş olan metal tanecikler oluşturulur. Bu yöntem plazma atomizasyonu yöntemine benzemekte olup bahsedildiği üzere hammadde olarak dönmekte olan bir çubuk kullanılmasıdır. Santrifüj kuvveti hızlı bir şekilde katılaşma sağlamaktadır. Ayrıca önceki yöntemlerde olduğu gibi asal bir gaz kullanılarak oksidasyonun önüne geçilmektedir. Elde edilen tanecik boyutlarının aralığı 0 ila 100µm aralığındadır.

1.2.3 Ekipmanlar

Doğrudan Enerji Biriktirme yönteminde kullanılacak ekipmanlar ihtiyaç durumuna özel olarak seçilmektedir. Ancak bu tür uygulamalarda genel olarak endüstriyel tipte bir robot, lazer rezenatör (enerji kaynağı), toz besleme ünitesi, nozül, gaz besleme sistemi ve tüpler gibi temel elemanlardan oluşmaktadır. Spesifik olarak elde edilmek istenen parça özelliklerine göre kurgulanan bu tür yapılarda kullanılan optimum parametreler sistemden sisteme farklılık göstermektedir. Elde edilen bir parametrenin başka bir sistemde aynı şekilde sonuç vermesi muhtemel değildir. Bu sebeple adaptasyonun sağlanması yoğun çalışmalar gerektirmektedir. Bu yöntemde en önemli parametrelerden biri lazerin gücü, lazerin ışın çapı (spot size), robotun ilerleme hızı ve tozun beslenme hızıdır. Şekil 1.10'da DED yöntemi ile lazer ışını aracılığıyla tozun eritilerek eriyik havuz oluşturulması şematize edilmiştir.



Şekil 1.10 : DED yöntemi prosesinin şematik gösterimi [14].

Biriktirilen katmanların yüksekliği, kalınlığı ve en üst yüzeyde elde edilmek istenen yüzey pürüzlülüğü önemlidir. Katmanın tamamlanması sonrası tekrar işleme devam edilmesi durumunda ergitilen yeni alanın genişliği ve derinliği aynı şekilde dikkate alınmaktadır. Elde edilen kesit yüzey gerilimi nedeniyle dairesel olmaktadır.

Proses parametrelerinin elde edilen katman özelliklerine etkisi Çizelge 1.1’de paylaşılmıştır [15].

Çizelge 1.1 : DED üretim parametrelerinin biriktirilen katmanlar üzerindeki etkisi.

Değişken Parametreler	Katmanların yüksekliği	Katmanların genişliği	Alt Katmana Nüfuziyet
(W) Lazer gücü	↓	↑	↑
(mm) Lazer odak çapı	↑	↓	↓
(litre/dk) Toz besleme Hızı	↑	↑	↓
(mm/dk) İlerleme hızı	↑	↓	↓

1.2.4 Proses kontrol parametreleri

DED yöntemiyle bir parçanın üretim aşamaları, beklenen parça isterlerini elde etmek ve başarılı bir üretim sağlamak için kontrolü sağlanan veya izlenen, ayarlanan birçok proses parametresinden oluşmaktadır. Elde edilen parçanın mikro yapısına etkileyen en önemli parametreler ele alınacak olursa bunlar; lazer gücü, toz besleme hızı, lazer ilerleme hızı ve lazerin tarama stratejisidir. Malzemeye bağlı olarak bu çeşitli parametreler değişiklik göstermekte olup elde edilen parçanın mekanik özelliklerini, gözenek oluşumunu ve miktarını etkilemektedir. Ayrıca kullanılan parametreler elde edilen eriyik havuzun şeklini, bu havuzun soğuma hızını ve termal gradyanları etkilemektedir.

DED yöntemiyle üretilecek bir parçanın üretim süresini doğrudan etkileyen parametrelerden biri lazer ilerleme hızıdır. Genellikle 1 ila 20 mm/sn aralığında değişmektedir. Bir diğer parametre ise lazer tarama stratejisi/takım yoludur. Takım yolu operatör yada ilgili kodu yazan proses mühendisi tarafından belirlenir. Önceden yığılan katmanın yüksekliğine göre lazerin konumlandırılması sağlanır. Lazer gücü ise lazer enerji kaynağından sağlanan toplam güçtür. 100 ila 5000 W seviyelerinde gerçekleşmekte olup ışın çapı ise 1-3 mm aralığındadır.

Her bir birim alan için ince bir mikroyapı elde edilmesi hedefleniyor ise lazer gücünün düşük seviyelerde tutulması ve yüksek ilerleme hızının tercih edilmesi düşük seviyede

bir enerji girdisine sebep olacağı ve soğuma hızını arttıracacağı için doğru bir tercih olacaktır. Diğer taraftan enerji girdisi arttırılmak istenirse yüksek lazer gücü ve daha düşük bir ilerleme hızı tercih edilirse dolayısıyla soğuma hızı azalacağı için kaba bir mikro yapı elde edilebilir.

Lazer gücünün arttığı durumlarda ölçülen sertlik azalmaya başladığı görülmektedir. Bunun olası nedeni, soğutma hızı ne kadar yüksek olursa lazer gücünün o kadar düşük olmasıdır. Soğumanın hızlı olması, su verme işlemine benzer şekilde biriktirilen malzemenin mikro yapısını ve özelliklerini etkilemektedir. Bu durum yüksek mukavemet ve sertliğe sahip bir mikro yapı ile sonuçlanır. Genel olarak, soğutma hızı ne kadar yüksek olursa, sertliğe olan etkisi o kadar büyük olmaktadır [16].

Bir diğer çalışmada, lazer gücü artışının ortalama sertlik değerini önce düşürdüğü, sonra da yükselttiği ve sonrasında tekrar azalttığı keşfedilmiştir. Daha düşük lazer gücü seviyelerinde görülen orijinal yüksek sertlik değerleri, toz parçacıklarının yetersiz erimesine ve ayrıca eriyik havuzunun daha hızlı katılaşmasına neden olabilir. Bu durum daha yüksek bir mikrosertlik değerine yol açmaktadır [17].

Lazer gücü arttırıldığında toz partikülleri daha verimli bir şekilde erimekte ve bu durum da daha düşük bir mikrosertlik derecesi ile sonuçlanmaktadır. Lazer gücü optimize edildikçe mikrosertlik de artmaktadır. Bu durum toz partikülünün optimum bir şekilde erimesinden kaynaklanmaktadır [17].

Toz akış hızı arttıkça mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum çökeltilmiş titanyum alaşımında daha yüksek toz akış hızında tozun uygunsuz eritilmesinin bir sonucudur. Toz akış hızının, biriktirilen malzemenin özelliklerine zarar verebilecek şekilde erimesine yol açmaması için çok fazla arttırılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. [18].

Ergimiş havuzdaki tozun yoğunluğunun arttırılması ve sonuç olarak daha yüksek katman seviyesi elde edilmek isteniyorsa Toz besleme hızının arttırılması gerekecektir. Toz besleme hızı mikro yapıyı da doğrudan etkilemektedir. Toz besleme hızını püskürtülen toz miktarı, lazer odak noktası, tozun akış şekli (nozül tipine göre) etkilemektedir. Lazerin ilerleme yönüne göre tozun beslenmesi lazerin arkasında veya önünde olabilmektedir. Bu durum katılaşmanın hızını (ısı transferini) etkileyebilmektedir. Lazerin odak bölgesi ile tozun besleme bölgesi ergimiş havuza püskürtülen tozun miktarını ve eriyen toz miktarını belirlemektedir.

Tozun püskürtülme noktası lazer ışını odak bölgesinin önünde olduğunda püskürtülen tozun miktarı toz püskürtülme noktası lazer ışını odak bölgesinin arkasında olduğu senaryoya göre daha az olmaktadır. Sonuç olarak ikinci senaryoda toz püskürtülme noktası ile lazer ışını odak bölgesi arasındaki kesişmenin daha fazla olmasından dolayı ergimiş havuzun daha büyük olmasından dolayıdır [19].

Toz miktarının üretim boyunca korunması için, toz besleme hızı ve lazerin ilerleme hızı lazer ışını odak bölgesi ve toz besleme bölgesi arasındaki mesafeye göre uygun bir şekilde adapte edilmelidir. Sabit kütle akış oranını korumak için, toz besleme hızı ve lazer ilerleme hızı, ilerleme yönüne ve lazer ışını ile toz besleme nozülü arasındaki mesafeye göre ayarlanabilir. Bu sürecin karmaşık olması sebebiyle optimum proses parametrelerini hesaplamayı sağlayacak bir nicel çalışma şuan için bulunmamaktadır.

Çeşitli katmanlı imalat yöntemlerinde takım yolu oluşturmak için günümüzde daha çok talaş kaldırma için tercih edilen CAM yazılımları aktif olarak kullanılmaktadır. Talaş kaldırırken faydalanan her bir katmanın eksiltilmesi işlemi eklemeli imalatla oluşturulması şeklinde ilerlediği için ilgili prensip temelde aynı olmaktadır. Bu prensipin aynı olmasına rağmen çeşitli farklılıklar bulunmaktadır. Lazer ışınının çapı, katmanların birbiri üzerine binme miktarı gibi eklemeli imalatın doğasında bulunan termal özellikleri doğrudan etkileyen bir takım noktalar bulunmaktadır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, kalıntı gerilmelerin azaltılması, gözenek miktarı ve boyutlarının en aza indirilmesi için bu parametreler ilgili cihaza uygun olarak optimize edilmelidir. Optimum parametrelerin elde edilmesi durumunda parça yoğunluğunun artışı, mikro yapının istenen seviyelerde elde edilmesi gibi pozitif sonuçlar doğurabilmektedir. Takım yolu stratejisinin belirlenmesi eklemeli imalatla bu nedenle en önemli adımlardan birisidir. Tarama stratejisi üretim süresini azaltmanın yanında daha iyi bir parça kalitesinin sağlanması için önemli bir role sahiptir.

1.2.4.1 Lazer gücü

Lazer gücünün elde edilmek istenen birçok çıktı üzerinde etkisi vardır; toz verimliliği, elde edilmek istenen yüzeyin kalitesi, katman yüksekliği ve genişliği. Lazer gücünün artırılması durumunda, katmanların genişliğinin artışı gözlemlenir, alt bölgelerde bulunan toz taneciklerinin tamamıyla erimesi için daha yüksek seviyede enerjiye ihtiyaç vardır [20]. Bu durum yüzeyin kalitesini iyileştirmektedir. Sadece lazer gücü

seviyesinin arttırılması katman yüksekliğinin arttırılması için yeterli değildir. Diğer parametreler; ilerleme hızı, toz besleme hızı, lazerin odak çapı sabit ise lazer gücü arttırılması yeterli olmayacaktır. Elde edilmek istenen kaliteli yüzey, katmanın yüksekliği ve genişliği için iyi bir denge sağlanması gerekmektedir.

Her bir uzunluk birimi başına, bir enerji kaynağı kullanılarak sağlanan enerji miktarı “Isı girdisi” olarak bilinmektedir. Aşağıdaki formülle tanımlanabilmektedir:

$$H = \frac{P_{net} (J)}{T_s (cm)} \quad (1)$$

Aşağıdaki şekilde gösterilen $P_{giriş}$ tanımlanacak olursa lazer enerji kaynağı aracılığıyla Watt olarak elde edilen güçtür. P_{net} ise Watt olarak alt bölgeye iletilen net güçtür. Termal verimlilik katsayısı olan “k” $P_{giriş}$ gücünün metale aktarılan yüzde miktarını tanımlamaktadır. T_s ise lazerin ilerleme hızıdır. Termal verimliliğin gücün iletiminde ne kadar önemli olduğu aşıkardır. Enerji girdisi elde edilen her bir katmanın yüksekliği ve eni, katmandaki gözenek miktarı ve boyutu gibi birçok malzemesel ve fiziksel farklılıktan sorumlu olmaktadır.

$$P_{net} = k \cdot P_{giriş} \quad (2)$$

1.2.4.2 Toz besleme hızı

Toz malzeme kullanılması hedefleniyorsa Direct Energy Deposition yönteminde lazer enerji kaynağı tercih sebebidir. Diğer DED yöntemi türlerinden olan plazma ark ve elektron ışını ile ergitme seçenekleri tel malzemelerin ergitilmesi için kullanılmaktadır. Toz kullanılan uygulamalarda ısı girdisi düşük olduğu için tele kıyasla hassasiyeti daha yüksektir. Bu nedenle hassas uygulamalarda daha çok toz tercih edilmektedir. Bu durum parça onarımının gerekli olduğu durumlarda ana malzeme özelliklerine yakın onarım yapılabilmesi sebebiyle toz kullanımını avantajlı hale getirmekte, parçalardaki çarpılma ve bozulma ihtimalini azaltmaktadır. Tozun ergimiş havuza beslenme oranı ilgili bölgenin soğuması ve erimesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmaktadır. Ayrıca biriktirme işlemi boyunca elde edilen verimlilik, biriktirilen parçanın hacmi, kaydedilen hassasiyet ve toplam üretimin süresi önem arz etmektedir. Katman kalınlığı tozun beslenme hızı arttıkça artış göstermektedir. Fakat tozun hızı arttırılırken enerji girdisi de artmalıdır. Aksi halde katmanların kalitesi olumsuz etkilenecektir. Ek olarak toz besleme hızının kontrolsüz artışı aşırı birikmeye sebep olarak final parçanın geometrik olarak doğruluk seviyesini düşürebilmektedir.

Sonuç olarak, doğru toz besleme hızının ilgili uygulamaya özel olarak belirlenmesi önem arz etmektedir.

1.2.4.3 İlerleme hızı

Katmanların elde edilmesi süresince ilerleme hızı da soğuma ve ergime miktarlarına doğrudan etki etmektedir. İlerleme miktarının artışı katman kalınlığını düşürmektedir. Ayrıca katmanın genilkiği ve alt katmana nüfuziyetinde düşük gözlemlenebilmektedir. İlerleme hızı arttığına birim alandaki enerji yoğunluğu seviyesi düşmektedir. Azaldığında ise birim alandaki enerji yoğunluğu artmaktadır. İlerleme hızının belirlenmesi final parçadan beklenen kaliteye bağlı olarak seçilmeldir. Elde edilen katmanın geometrisi ilerleme hızından etkilenmektedir. İlerleme hızı olması gereken durumdan fazla ise beklenen ergime gerçekleşemez ve üretim bu şekilde gerçekleşir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deneyin Yapılışı

2.1.1 PH 13-8 mo malzemesi

S şeklindeki numunelerin üretiminde Sandvik Osprey Ltd, UK tarafından sağlanan 45-150 µm partikül boyutunda gaz atomize PH 13-8 Mo paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. İlgili malzeme spesifik olarak bazı havacılık parçalarından beklenen malzeme özelliklerine uygun olarak geliştirilmiştir. Isıl işlem uygulanabilmektedir. Çizelge 2.1’de kimyasal kompozisyonu paylaşılmıştır.

Çizelge 2.1 : PH 13-8 Mo Paslanmaz Çeliği Kompozisyonu.

Elementler	Kompozisyon (%)
Cr	11.8
Ni	9.3
Mo	1.56
Al	1.43
Mn	0.3
Si	0.19
C	0.017
Fe	Dengelenmiş

2.1.2 17-4 PH malzemesi

17-4 paslanmaz çeliği %17 krom ve %4 nikel içermesinden dolayı bu ismi almıştır. Korozyon direnci olarak 304 çeliğine benzer bir özellik göstererek dayanıklı, mekanik özellikleri yüksek ve yaşlandırma ile sertleşmektedir. En yaygın kullanımı havacılık olup medikal ve denizcilik sektöründe, kağıt üretiminde kullanılan ekipmanların üretiminde, gıda işleme ekipmanlarının üretiminde kullanımı mevcuttur.

Oerlicon Metco firması ürünü olan 17-4 PH tozu gaz atomizasyonu ile üretilmiştir. Yağış sertleşmesi paslanmaz çeliği olarak bilinen PH çelikleri literatüre göre östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksek mukavemet göstermektedirler. Diğer martensitiklerden mukavemet, süneklik ve korozyon direnci açısından daha iyi performans göstermektedirler. Bir diğer önemli özelliği ısıtıl işlem uygulanabilmesidir.

17-4 PH malzemesi PH ailesinde en çok kullanılan toz malzemedir. 17 4 PH paslanmaz çelik, yüksek mukavemet ve hafif korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılan Cr-Ni-Cu esaslı bir paslanmaz çeliktir. Çizelge 2.2’de kimyasal kompozisyonu paylaşılmıştır.

Çizelge 2.2 : 17-4 PH Paslanmaz Çeliği Kompozisyonu.

Elementler	Kompozisyon (%)
Cr	17
Ni	4.5
Cu	4.0
Nb+Ta	0.3
C	<0.07
Diğer	<1.0
Fe	Dengelenmiş

2.1.3 DED sistemi

DED sistemi bir robot kol (Kuka Kr 90) üzerinde eriyen bir malzemeyi depozisyon yapan bir nozul barındırmaktadır. Malzeme ekstrüzyonuna benzemektedir. Nozulün sabit bir yapıda olmaması ve birçok yönde hareket edebilmesi onu bu yöntemden ayırtmaktadır. Çok eksenli robotlar aracılığıyla birçok yönde malzeme biriktirilmektedir. Toz olarak birçok malzeme kullanılabilir. PH 13-8 Mo ve 17-4 PH malzemeler Şekil 2.1’de belirtilen Erlaser hard + clad sistemi aracılığıyla üretilmiştir.



Şekil 2.1 : Erlaser LMD Tezgahı.

Erlaser sisteminde 6 eksenli bir robot bulunmaktadır. Bu robot 3 metre civarında çalışabilmektedir. Bu cihazın ticari olarak kullanımı kalıp tamiri ve lazer sertleştirme uygulamalarıdır. İlgili çalışmada cihaz üreticisi tarafından da önerildiği üzere nozul ile iş parçası arasındaki çalışma mesafesi 12 mm’dir. Çaptaki lazer nokta boyutu 3,5 mm’dir. Makinenin detaylı teknik özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.4’te belirtilmiştir. En

yüksek 4000W seviyesine çıkabilen Lazer gücü 1070nm dalga boyuna sahiptir. (Laserline marka LDF 5000-100) Nozül kısmı 3 ayrı noktadan toz püskürten bir yapıdadır. Toz besleme ünitesinin markası GTV'dir. Nozülden üretim esnasında ergitilen bölge üzerine yüksek saftalıkta argon gazı makine için önerilen 6 litre/dk hızla basılmıştır. Çizelge 2.3'te Erlaser sisteminin özellikleri detaylı olarak paylaşılmıştır.

Çizelge 2.3 : DED Sistemi Özellikleri

Sistem Bileşenleri	Parametre	Özellikler
SİSTEM PROSES PARAMETRELERİ	Lazer gücü	0.3 - 2 kW
	Lazer yoğunluğu	104 - 105 W/cm ²
	Spot geometrisi	Dairesel
	Tarama genişliği	0.5-5 mm
	İlerleme hızı	0.5-2.5 m/dk
	Kullanılan Gaz	Argon, < 5l/dk
	Besleme tipi	Toz
	Prosesin sıcaklığı	Erime sıcaklığının üzerinde
LAZER ALTYAPISI	Lazer	Laserline LDF 5000-100 P _{max} 4000 W Fiber $\varnothing$ = 1000 μ m f _{col} 100 mm (2") f _{col} 300 mm $\varnothing$ foc 3 mm
NOZUL BİLGİLERİ	Eşeksenli toz nozulu (FhG -ILT)	Çalışma bölgesine uzaklık 12 mm
TOZ BESLEME SİSTEMİ	GTV	PF 2/2 toz besleme
ROBOT BİLGİLERİ	KUKA KR90	Maksimum çalışma uzaklığı 3095 mm Taşıma kapasitesi 140 kg Hassasiyeti +/- 0.06 mm İz düşümü 830x830 mm

2.1.4 S şekilli numunelerin üretilmesi

S şekilli numunelerin üretilmesi ve elde edilen bulgular ön çalışma olarak yayınlanmıştır [21]. Deneyler tasarımı yapılırken proses parametre kombinasyonunu belirlemek için Taguchi tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada, proses parametreleri

olarak lazer gücü, tarama hızı, toz besleme hızı ve gaz akış hızı kullanılmıştır. Proses giriş parametreleri Çizelge 2.4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 2.4 : Giriş proses parametreleri ve seviyeleri.

No	Parametre	1	2	3	4	5
1	Lazer Gücü (W)	600	800	1000	1200	1500
2	Tarama Hızı (m/s)	6	8	10	12	15
3	Toz Akış Hızı (devir/dk)	2.5	3	3.5	4	4.5
4	Gaz Akış Hızı (litre/dk)	1	3	5	7	9

Çizelge 2.4'te belirtilen giriş parametreleri Minitab yazılımına girdi olarak kullanılmış ve bir dizi proses parametresi oluşturulmuştur. Enerji yoğunluğu, $E(J/mm^3)$ bir malzemenin birim hacmi başına sisteme verilen enerjiyi ölçmek için kullanılan bir parametredir. Ortaya çıkan deney tasarımı Çizelge 2.5'te paylaşılmıştır.

Çizelge 2.5 : Deney Tasarımı.

Numune No	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Toz Besleme Hızı (devir/dk)	Gaz Akış Hızı (litre/dk)	Lazer Enerji Yoğunluğu (j/mm ³)	Ortalama Yükseklik (mm)
1	600	6	2,5	1	10,39	9,64
2	600	8	3	3	7,80	8,98
3	600	10	3,5	5	6,24	0,00
4	600	12	4	7	5,20	0,00
5	600	15	4,5	9	4,16	0,00
6	800	6	2,5	1	13,86	13,95
7	800	8	3	3	10,39	11,28
8	800	10	3,5	5	8,32	9,73
9	800	12	4	7	6,93	9,19
10	800	15	4,5	9	5,54	3,07
11	1000	6	2,5	1	17,32	20,58
12	1000	8	3	3	12,99	13,78
13	1000	10	3,5	5	10,39	13,21
14	1000	12	4	7	8,66	4,47
15	1000	15	4,5	9	6,93	4,15
16	1200	6	2,5	1	20,79	19,47
17	1200	8	3	3	15,59	17,33
18	1200	10	3,5	5	12,47	4,87
19	1200	12	4	7	10,39	5,50
20	1200	15	4,5	9	8,32	5,15
21	1500	6	2,5	1	25,98	22,48
22	1500	8	3	3	19,49	6,91
23	1500	10	3,5	5	15,59	6,69
24	1500	12	4	7	12,99	6,55
25	1500	15	4,5	9	10,39	6,47

Her bir proses parametresi için özel olarak tasarlanmış S-şekilli tek sıralı numuneler toplamda 20 katman olarak biriktirilmiştir.

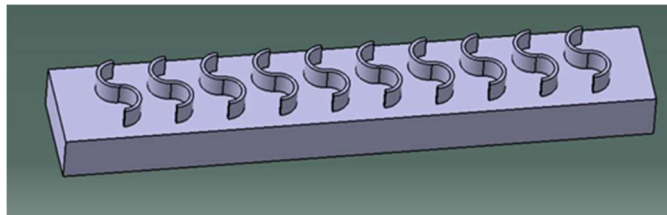
$$E = \frac{P}{V_{beam} \pi r_b^2} \quad (3)$$

P, Lazer gücü, (W)

r_b = Nokta yarıçapı (mm)

V_{beam} = Tarama hızı (mm/sn)

Şekil 2.2’de S-şekilli numunelerin 3 boyutlu CAD modeli bir tabla üzerinde olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : S şekilli numunelerin şematik gösterimi.

Biriktirme yönü tek yönlüdür. ilk 10 katmandan sonra bir dakikalık bir bekleme süresi ile biriktirme işlemine devam edilmiştir. Biriktirme sonrasında numunelerin üzerinde 5 eşit mesafeli bölge belirlenerek yükseklikler ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Böylece her bir numune için yükseklik ortalaması belirlenmiştir. Yükseklikler, G0091 model INSIZE elektronik kumpas kullanılarak ölçülmüştür.

S-şekilli numunelerin üretimi gerçekleştirildikten sonra bazı parametreler için S-şekilli numunelerin hiç oluşmadığı gözlemlenmiştir. Numunelerin bir kısmı başarıyla oluşturulmuştur. Şekil 2.3'te biriktirilmiş tüm S-şekilli tek sıralı numuneleri paylaşılmıştır.



Şekil 2.3 : S-şekilli numunelerin eldesi.

2.1.5 Blok numunelerin üretilmesi

İlgili deney çerçevesinde deneyin numuneleri kare prizma olarak seçilmiştir. Takım yolu stratejisinin elde edilecek numunenin mikroyapısında değişikliğe neden olacağı varsayılmaktadır.

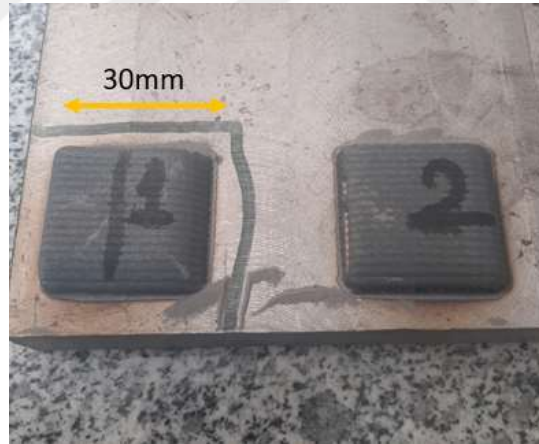
Gerçekleştirilen deneyde toz malzeme olarak 17-4 PH paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Elde edilen numuneler testere ile kesilip hazırlanarak sonrasında bakalite alınmıştır. Numunelerin gözenek miktarı tespiti, sertlik testleri gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin üretiminde kullanılacak olan toza uygun olarak bir tabla kullanımı gereklidir. Bu çalışma kapsamında 1050 çeliğinin uygun olması sebebiyle 200x200x50 mm boyutlarında kullanılmıştır. 30x30 mm ebatında ve 5 katman olarak dikdörtgen prizma yapısı oluşturularak 2 ayrı takım yolu parametresi için üretim yapılmıştır. Her bir katman yaklaşık 1mm yüksekliğe sahiptir. “1” nolu numune için takım yolu her bir katman için aynı yönlü olarak sağlanmıştır. “2” nolu numune için

ise 1-3-5 katmanlarında aynı yönlü tarama stratejisi uygulanırken 2 ve 4 katmanlarında 90° farklı yönde tarama stratejisi uygulanarak her bir katmanın farklı yönde biriktirilmesi sağlanmıştır. Numunelerin üretimi boyunca %99.9 saflığa sahip Argon gazı kullanılmıştır. Blok üretimi için seçilen optimum parametreler yayın aşamasında olduğu için paylaşılamamaktadır. Ancak optimizasyon çalışmasında kullanılan parametreler 1kW ila 2.6kW arasında değiştiği söylenebilir. [22] Çalışma kapsamında üretilen “1” ve “2” nolu bloklar Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’te paylaşılmıştır.



Şekil 2.4 : “1” ve “2” nolu blok numuneler (yan görünüş).



Şekil 2.5 : “1” ve “2” nolu blok numuneler (Üst görünüş).

“1” nolu blok numune ve “2” nolu blok numune için takım yolu stratejileri Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de paylaşılmıştır. 1 nolu blok numune için sabit takım yolu stratejisi belirlenerek aynı yönlü olarak 5 katman biriktirilmiştir. 2 nolu blok numune için ise her bir katman için farklı yön belirlenerek toplamda 5 katman biriktirilmiştir.

1. Blok Numune Takım Yolu Stratejisi



5 katman x yönünde

Şekil 2.6 : “1” nolu blok numune takım yolu stratejisi.

2. Blok Numune Takım Yolu Stratejisi



1,3 ve 5. katman x yönünde



2 ve 4. katman y yönünde

Şekil 2.7 : “2” nolu blok numune takım yolu stratejisi.

3. SONUÇLAR

3.1 Enerji Yoğunluğunun Malzemenin Geometrik Özelliklerine Etkisi

Enerji yoğunluğu, lazer/elektron ışını toz yatağı yöntemi, lazer metal biriktirme yöntemi, tel ark eklemeli üretim vb. gibi eklemeli üretim süreçlerinde en etkili parametrelerden biridir. Enerji yoğunluğu, malzeme biriktirme/ergitme için en kritik parametredir ve doğru bir şekilde seçilmelidir.

Çizelge 3.1’de biriktirilen malzemenin geometrik özelliklerine göre üç farklı kategoride gruplandırılmış enerji yoğunlukları (özellik enerji) paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1 : Lazer enerji yoğunluğu kategorizasyon matrisi

Ölçüm Bölgesi	Lazer Enerji Yoğunluğu	Kategori	Ort. Yükseklik (mm)
1	0-7.99	Düşük	3,62
2	8-12.99	Orta	8,24
3	13 ve üzeri	Yüksek	15,24

Düşük enerji yoğunluğu girdisi yapılarak elde edilen numuneler Şekil 3.1’de paylaşıldığı üzere yüzeye hiç yapışmayan veya uygun olmayan S şekilli geometrilerin elde edilmesine neden olmuştur.

Düşük Enerji Yoğunluğu Numuneleri



Şekil 3.1 : Düşük enerji yoğunluklu S şekilli numuneler.

Enerji yoğunluğu tozun erimesini, biriktirilen geometri ölçülerini, seyreltme oranını ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör olduğu söylenebilir. Düşük enerji yoğunluğu, tozu uygun şekilde eritmek için gerekenden daha az ısı enerjisi ürettiği için

uygunsuz depozisyon sonuçlarına ulaşmak kaçınılmazdır. Çok düşük enerji yoğunluğu girdisi içermesi nedeniyle numune 3, 4, 5'te uygun geometriler elde edilememiştir. 9 ve 2 numaralı numunelerde daha yüksek tarama hızı ve nispeten daha düşük lazer gücü içermesi sebebiyle “balling defect” gözlemlenmiştir. Üstteki tabloda belirtildiği üzere yüksek enerji yoğunlukları için ortalama olarak biriktirilmiş yükseklikler paylaşılmıştır. Tozu eritmek için tercih edilen düşük enerji yoğunluğu nedeniyle, ortalama biriktirme yüksekliği 3,62 mm olarak uygunsuz şekilde edilmiştir.

Orta düzeydeki enerji yoğunlukları kullanılarak isterlere daha uygun S şeklinde tek sıralı numuneler üretilmiştir. Şekil 3.2’de orta düzeydeki enerji yoğunlukları ile biriktirilmiş S-şekilli numuneler paylaşılmaktadır.



Şekil 3.2 : Orta Seviye enerji yoğunluklu S şekilli numuneler.

Daha düşük lazer gücü ve daha yüksek tarama hızı kullanılması nedeniyle 1, 7 ve 8 nolu numunelerde “balling defect” gözlemlenmiştir. Ancak diğer denemeler geometrik olarak iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Kenar bölgelerde fazla birikme biriktirme başlangıcı ve bitişlerinde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi robot hızının kontrolsüz olmasındandır. Robot başlangıçta hareketsiz halde iken yavaş yavaş hızlanır ve sona doğru hızını düşürerek tekrar hareketsiz duruma geçer. Robotun hızlanma ve yavaşlama durumları kenarlarda fazla malzeme birikmesine katkıda bulunur ve optimize edilmelidir. Orta düzeyde enerji yoğunluğu kullanılarak biriktirilen duvarların ortalama yüksekliği, düşük enerji yoğunluğu sonuçlarından daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Orta düzeyde enerji yoğunluğu numuneleri için ortalama biriktirme yüksekliği 8.24 mm civarındadır. Bunun sebebi biriktirilen malzeme için gerekli olan yeterli enerji yoğunluğunun sağlanmasıyla işlem sırasında daha fazla malzemenin eritilmesi ve biriktirilebilmesidir.

Daha yüksek enerji yoğunluğu aralığı kullanılarak üretilen S-şekilli numunelerin yükseliğinde artan biriktirme oranları nedeniyle artış gözlemlenmiştir. Daha yüksek lazer gücü ve daha düşük tarama hızı seçilerek daha yüksek yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılmıştır. Yüksek enerji yoğunlukları, numune üretimi boyunca daha fazla ısı girdisine yol açmaktadır. Bu durum biriktirilen parça yüksekliğinin artmasıyla katman katman ısı birikmeye neden olmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu tercihi biriktirme miktarını/oranını artırmak ve hacimsel olarak daha büyük yapılar elde etmek için verimli olması sebebiyle iyi bir seçenek olabilmektedir. Ancak bununla birlikte, katmanlardaki ısı birikme numunenin mikro yapısını/mekanik özelliklerini etkileyerek gözenek ve çatlak oluşumu gibi istenmeyen kusurlara sebep olabilmektedir. Ek olarak elde edilen numune/parçanın geometrisini bozmaya çalışan artık gerilmelere neden olabilmektedir. Isının ilgili katmanlarda birikmesiyle birlikte, ergime bölgesinin yanı sıra altta kalan katmanların sıcaklığı da artacaktır. Bu durum ergime bölgesinin akışkanlığını etkileyerek elde edilmek istenen parça/numune şeklinin formunu kontrol etmeyi zorlaştırmaktadır. Şekil 3.3'te 17, 11, 16 ve 21 nolu numunelerde elde edilen uygun olmayan geometriler paylaşılmaktadır.

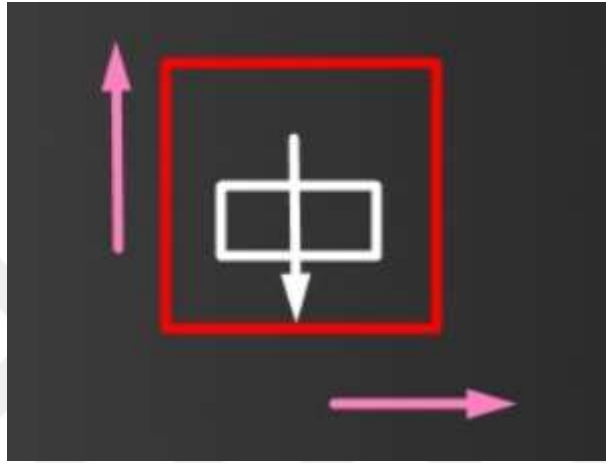


Şekil 3.3 : Yüksek enerji yoğunluklu S şekilli numuneler.

Elde edilen numune yükseklikleri dikkate alınacak olursa, numunelerin ölçülen ortalama yükseklikleri düşük ve orta enerji yoğunluğu ile elde edilen deney sonuçlarından nispeten daha yüksektir. Düşük ve orta enerji yoğunluğu deney sonuçlarına kıyaslama neredeyse iki ve/veya üç kat daha fazla yükseklik elde edilerek 15.34 mm olarak ölçüm sağlanmıştır. Bunun nedeni, daha yüksek enerji yoğunluğunun ergimiş havuz bölgesinde daha fazla ısı birikmesine doğrudan katkı sağlaması ve daha fazla tozun ergitilerek nihayetinde daha fazla malzeme kütlesine erişilebilmesidir.

3.2 Gözenek Miktarı Tespiti

Takım yolu stratejisinin belirlenmesi için üretilen “1” ve “2” nolu blok numunelerin incelenmesindeki kritik noktalardan biri, malzeme özelliklerine etki eden takım yoluna dik ve paralel olarak üretilmiş numunelerin kesilmesi ve bu yönlenderden incelenmesidir. Buna uygun olarak numuneler testere ile kesilmiş sonrasında bakalite alınmış, zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Şekil 3.4’te ilgili numunelerin bloktan çıkartılması paylaşılmıştır.



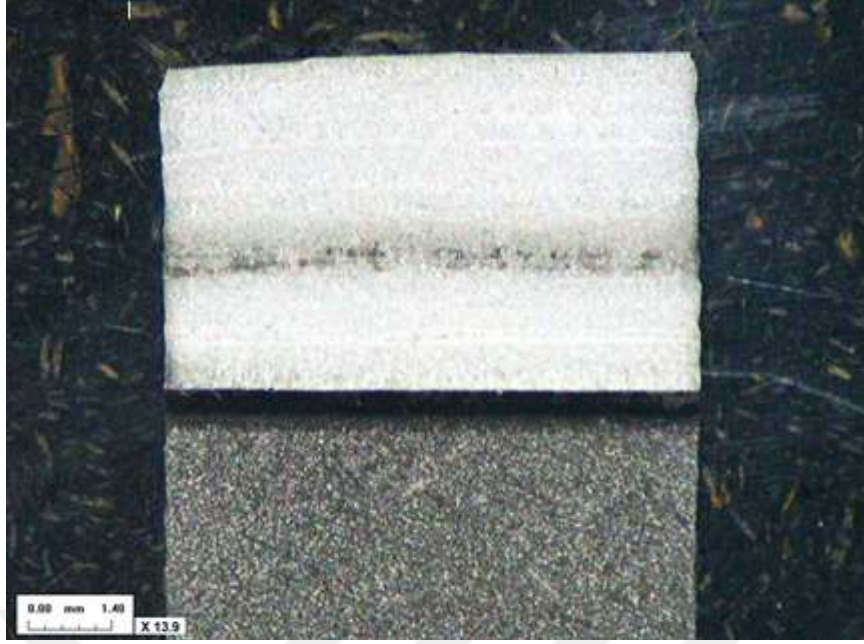
Şekil 3.4 : Blok üzerinden alınan 2 ayrı numune (beyaz renkte gösterilmiştir).

Numuneler ilk olarak takım yoluna dik olarak Şekil 3.5’te paylaşılan görseldeki gibi incelenmiştir.



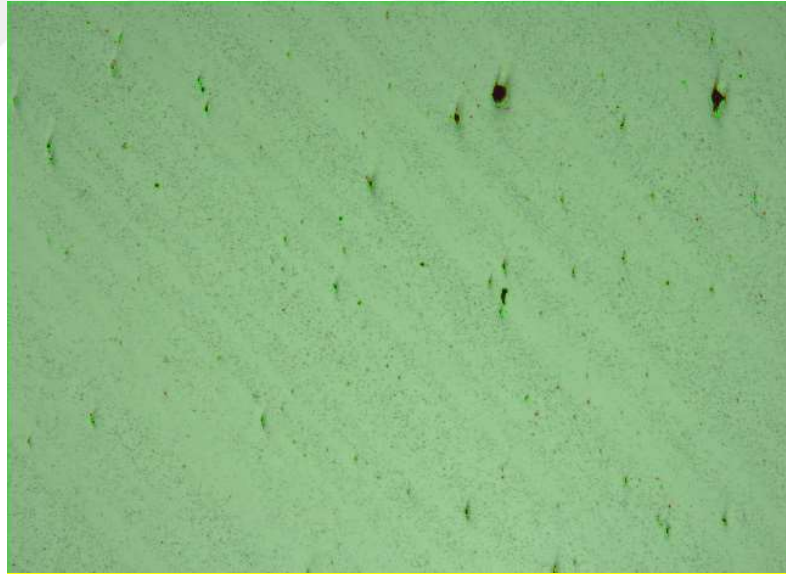
Şekil 3.5 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde incelenmesi.

İlgili numunenin takım yoluna dik yönde makro görünüşü Şekil 3.6’da paylaşılmıştır.



Şekil 3.6 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde makro görünüşü.

1 nolu numune için optik mikroskop altında yapılan inceleme sonucunda %0.28 gözenek miktarına ulaşılmıştır.



Şekil 3.7 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde gözenek incelenmesi.

“1” nolu numune takım yoluna paralel olarak Şekil 3.8’de paylaşıldığı gibi incelenmiştir.



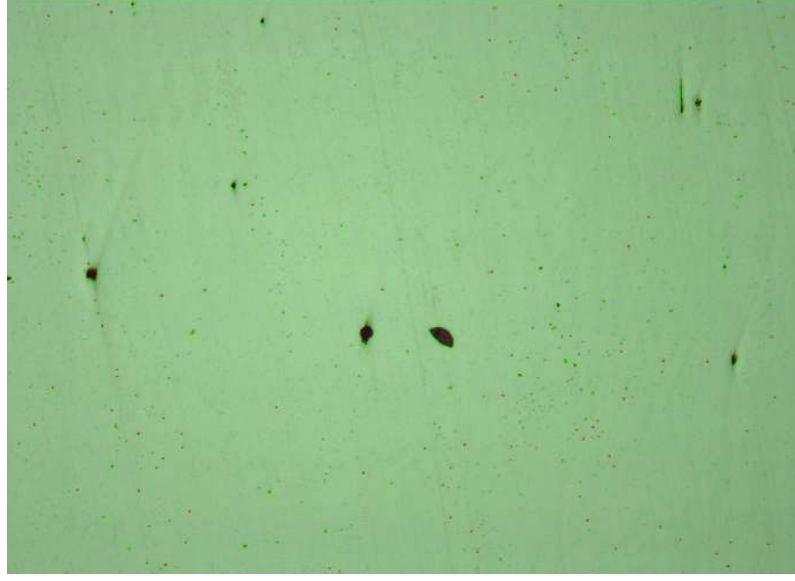
Şekil 3.8 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde incelenmesi.

İlgili numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü Şekil 3.9’da paylaşılmıştır.



Şekil 3.9 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü.

1 nolu numune için optik mikroskop altında yapılan inceleme sonucunda %0.27 gözenek miktarına ulaşılmıştır. Şekil 3.10’da gözenek incelemesi paylaşılmıştır.



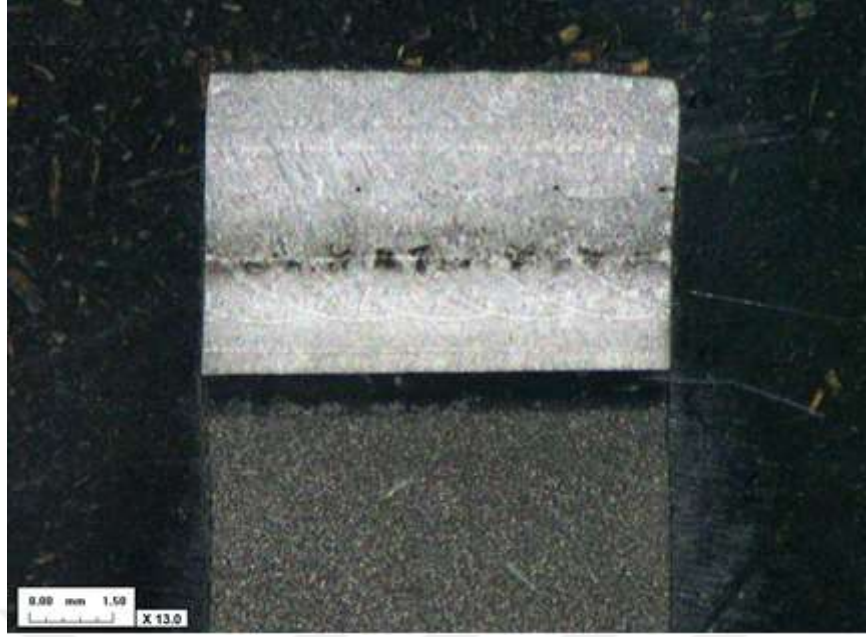
Şekil 3.10 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde gözenek incelemesi.

“2” nolu numune takım yoluna dik olarak Şekil 3.11’de paylaşıldığı gibi incelenmiştir.



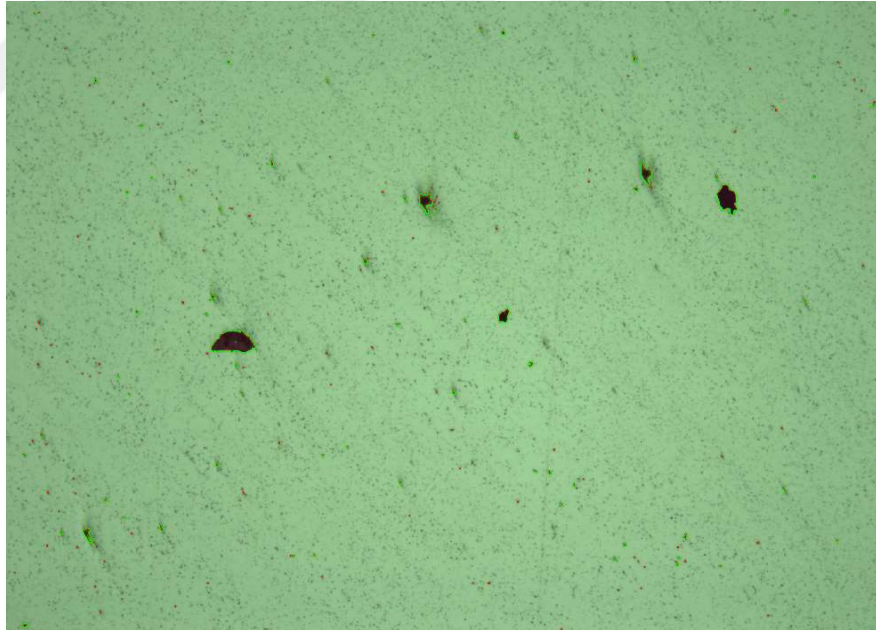
Şekil 3.11 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde incelenmesi.

İlgili numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü Şekil 3.12’de paylaşılmıştır.



Şekil 3.12 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde makro görünüşü.

2 nolu numune için optik mikroskop altında yapılan inceleme sonucunda %0.34 gözenek miktarına ulaşılmıştır. Şekil 3.13’te gözenek incelemesi paylaşılmıştır.



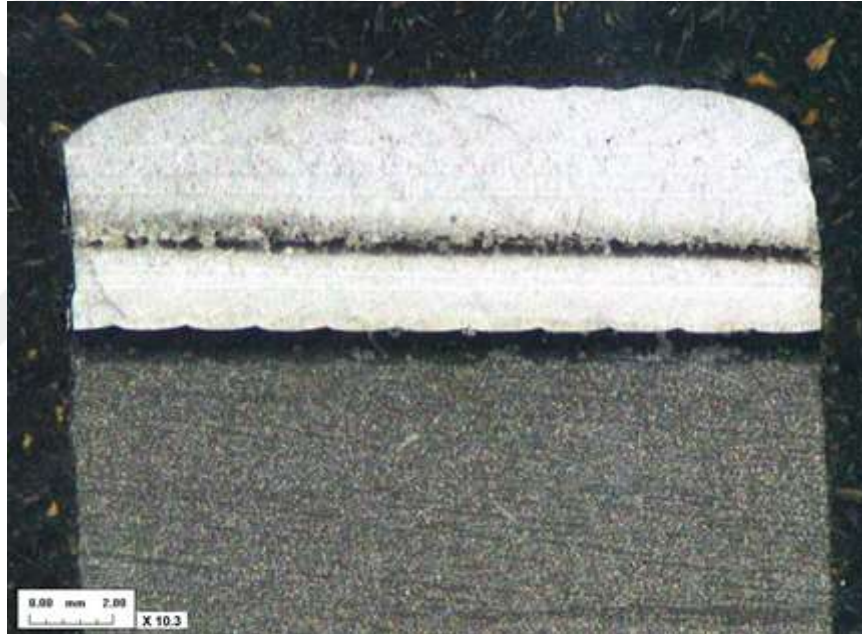
Şekil 3.13 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde gözenek incelemesi.

“2” nolu numune takım yoluna paralel olarak Şekil 3.14’te paylaşıldığı gibi incelenmiştir.



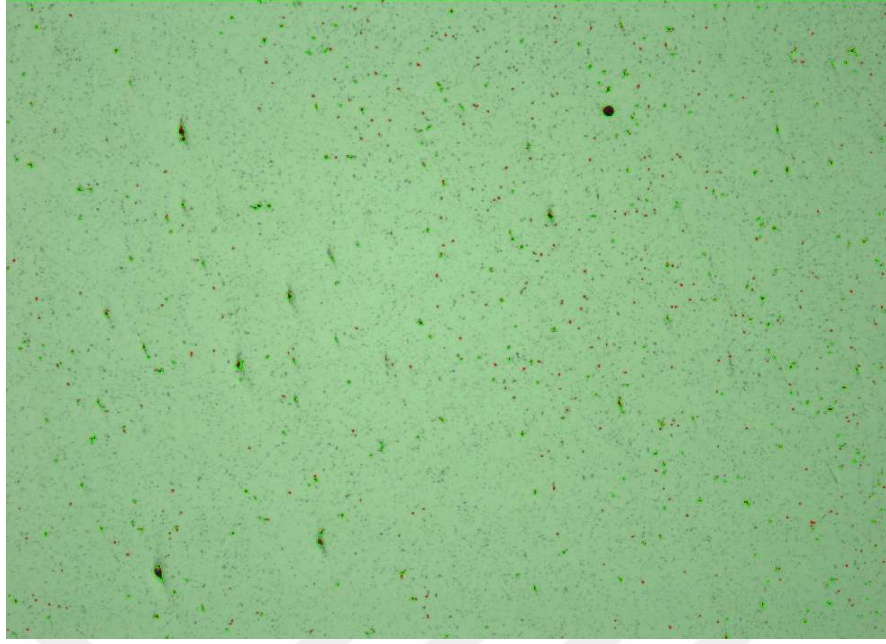
Şekil 3.14 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde incelemesi.

İlgili numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü Şekil 3.15’te paylaşılmıştır.



Şekil 3.15 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde makro görünüşü.

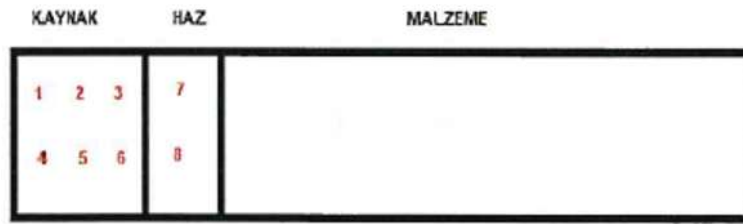
2 nolu numune için optik mikroskop altında yapılan inceleme sonucunda %0.36 gözenek miktarına ulaşılmıştır.



Şekil 3.16 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde gözenek incelemesi.

3.3 Sertlik Testi

Blok numunelerden çıkartılan numuneler bakalite alındıktan sonra sertlik testine tabi tutulmuştur. Toplam 8 noktadan ölçüm alınmıştır. 6 nokta biriktirilmiş, 2 nokta ise haz bölgesinden ölçüm alınmıştır. Şekil 3.17’de ölçüm alınan bölgeler hazırlanmış deney numuneleri üzerinden gösterilmektedir.



Şekil 3.17 : Numune üzerindeki sertlik ölçüm bölgeleri.

1 nolu blok numunesi üzerinden alınan ölçümler Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.2 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde sertlik testi sonuçları.

Ölçüm Bölgesi	1	2	3	4	5	6	7 (Haz)	8 (Haz)
Ölçüm Değeri (HV)	339	356	350	350	343	344	363	367

Çizelge 3.3 : “1” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde sertlik testi sonuçları.

Ölçüm Bölgesi	1	2	3	4	5	6	7 (Haz)	8 (Haz)
Ölçüm Değeri (HV)	344	345	335	336	339	320	355	376

2 nolu blok numunesi üzerinden alınan ölçümler Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’te paylaşılmıştır.

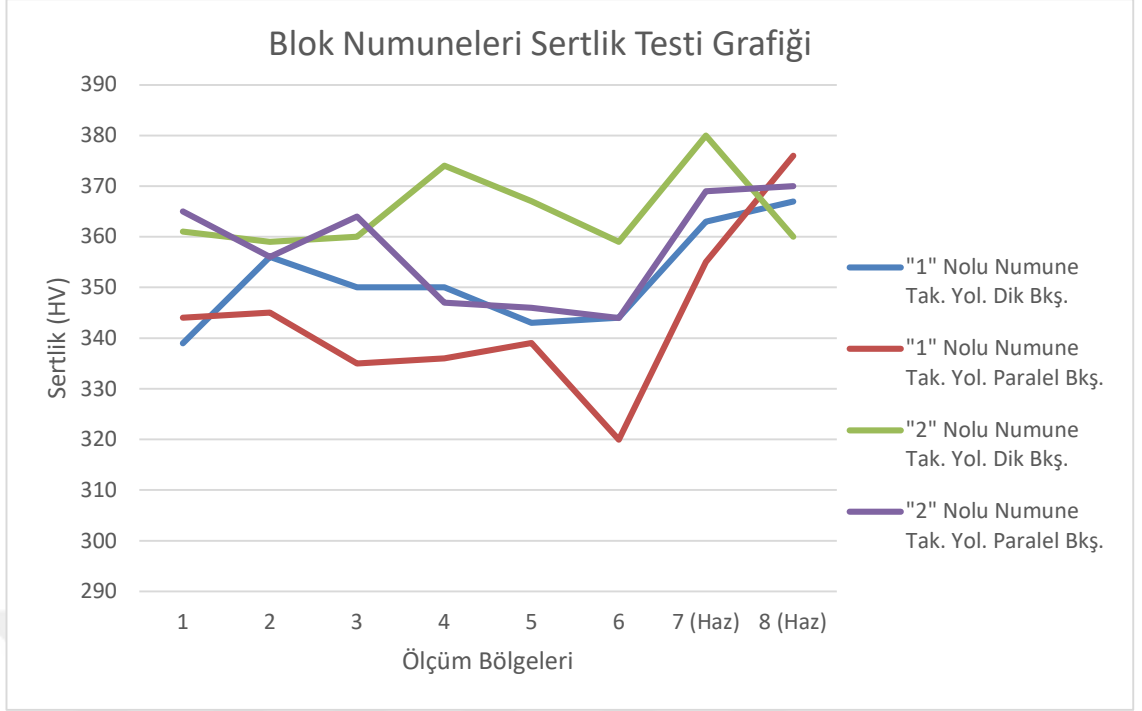
Çizelge 3.4 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna dik yönde sertlik testi sonuçları.

Ölçüm Bölgesi	1	2	3	4	5	6	7 (Haz)	8 (Haz)
Ölçüm Değeri (HV)	361	359	360	374	367	359	380	360

Çizelge 3.5 : “2” nolu blok üzerinden alınan ilk numunenin takım yoluna paralel yönde sertlik testi sonuçları.

Ölçüm Bölgesi	1	2	3	4	5	6	7 (Haz)	8 (Haz)
Ölçüm Değeri (HV)	365	356	364	347	346	344	369	370

1 ve 2 nolu blok numunelerden takım yoluna dik ve paralel yönde yapılan toplamda 4 ayrı sertlik sonuçları Şekil 3.18’de paylaşılmaktadır. Değişken takım yolu stratejisine sahip 2 nolu numune üzerinden elde edilen sertlik değerleri sabit takım yolu stratejisine sahip 1 nolu numuneye göre nispeten daha yüksektir. 2 nolu numune için sertlik değerinin yüksek olmasının sebebi 1 nolu numuneye göre soğumanın tam olarak gerçekleşmeden 90o farklı yönden diğer katman biriktirilmesi ve ısı enerjisinin bölgesel olarak daha fazla birikmesidir. 1 nolu numune sabit yönde biriktirilirken robot ilk katmanın başlangıç noktasına gelmekte ve tekrar aynı yönlü biriktirme yapmaktadır. Bu süreçte bitiş bölgesinin soğuması gerçekleşmektedir.



Şekil 3.18 : Blok Numuneleri Sertlik Testi Kıyaslama Grafiği.

3.4 Sonuç

Doğrudan enerji biriktirme yöntemi büyük, yoğun ve yapısal parçalar üretmek için oldukça etkili bir eklemeli imalat yöntemidir. Tez çalışmasında biriktirilen parçaların geometrik biçimlerini etkileyen en kritik süreç parametrelerinden olan enerji yoğunluğu ve takım yolu stratejisi araştırılmıştır ve sonuçlar paylaşılmıştır.

İlgili tez çalışmasından aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

Enerji yoğunluğu, lazer gücü, lazer nokta boyutu (spot size) ve tarama hızı ile doğrudan ilişkili bir parametredir. Toz malzemeyi DED yöntemiyle ergitmek ve biriktirmek için kullanılan ısı girdisi, biriktirilen parçanın geometrik formunu etkilemektedir.

Düşük enerji yoğunluğuna sahip üretim parametreleri, uygun olmayan biriktirme sonuçlarının elde edilmesine sebep olmaktadır. Daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip üretim parametreleri nispeten daha yüksek ve yüksek hacimli yapılar elde edilmesini sağlar. Ancak ısı birikme nedeniyle uygun olmayan geometriler elde edilebilmektedir. Optimize edilmeyen lazer gücü ve tarama hızı kullanıldığında “balling effect” ile sonuçlanabilmektedir. Enerji yoğunluklarının seviyelerine bağlı olarak, daha yüksek

enerji yoğunluğu denemelerinde maksimum ortalama yükseklik elde edilirken ve orta ve düşük enerji yoğunluğu denemeleri için daha düşük yükseklik elde edilmektedir.

Değişken takım yolu stratejisi uygulanarak üretilen parçalarda sabit takım yolu stratejisi uygulanarak üretilen parçalara göre daha çok gözeneklilik ile sonuçlanmaktadır. Her iki yöntemde de yapılan biriktirme işleminde katman yönleri ve lineer ısı girişı sebebiyle erimeyen tozların literatürde de belirtildiği üzere gözeneklilik (lack of fusion kaynaklı) oluşturmaya sebep olmuştur [23]. Değişken takım yolu stratejisi uygulanarak üretilen numunelerde kaynak yönlerinin farklılığı sebebiyle erimeyen toz miktarı daha fazladır ve gözeneklilik miktarı daha fazladır.

Değişken takım yolu stratejisi uygulanarak üretilen parçalarda elde edilen mikrosertlik testi sonuçları sabit takım yolu stratejisi uygulanarak üretilen parçalara göre daha yüksektir. Bunun nedeni ise soğuma süresinin değişken takım yolu stratejisinde daha az olması ve ısı birikme sonucunda daha yüksek mekanik değerlerdir.

Benzer bir teknoloji olan Laser engineered net shaping (LENS) teknoloji ile üretilen 17-4 PH numunelerinde en düşük ısı işlem şartında 376 HV'ye ulaşılırken en yüksek 519 HV'ye ulaşılmıştır [24]. 17-4 PH malzemesi kullanılarak SLM yöntemiyle ısı işlem uygulamaksızın yapılan üretimde ise 350 HV değerlerine yaklaşılmıştır [25]. Bu değerler tez çalışmamızda elde edilen sertlik değerlerine benzer sonuçlardır.

LMD yöntemi ile 17-4 PH malzemesinin tarama hızına bağlı olarak incelendiği başka bir çalışmada lazer gücünün nispeten yüksek seçilmesi sebebiyle (2.4 kW) 200-250 HV değer aralığında tez çalışmamızda ise elde edilen değerlerden daha düşük mikrosertlik sonuçlarına ulaşılmıştır [26].

Sonuç olarak takım yolu stratejisinin mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğu söylenebilir. Bunun temel sebebi biriktirme süresince ısı transferindeki farklılıklar ve termal aktivitedir [27]. Mikrosertlik olarak çalışma elde edilen bulguların literatürdeki bilgilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **What Is Additive Manufacturing? Definition, Types And Processes.** “t.y.” Eriřim: 05 Aralık 2021, www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing.
- [2] **CES EduPack** (2015) [Computer software]. Cambridge, United Kingdom : Granta Design Ltd.
- [3] **Gu, D. D.** (2012). Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms, *International Materials Reviews*, 57 (3), 133–64.
- [4] **Dinda, G. P.** (2009). Laser Aided Direct Metal Deposition of Inconel 625 Superalloy: Microstructural Evolution and Thermal Stability, *Materials Science and Engineering*, 509 (1–2), 98–104.
- [5] **Precipitation Hardened Stainless Steels.** “t.y.” Eriřim: 07 Aralık 2021, www.materials.sandvik/en/materials-center/expert-columns/archive/2018/02/precipitation-hardened-stainless-steels
- [6] **Precipitation Hardening Stainless Steels** “t.y.” Eriřim: 08 Aralık 2021 www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/precipitation-hardening-stainless-steels-102
- [7] **Kazior, Jan,** (2013). Properties of Precipitation Hardening 17–4 PH Stainless Steel Manufactured by Powder Metallurgy Technology, *Advanced Materials Research*, 811, 87–92.
- [8] **13–8 Mo Tech Data.** “t.y.” Eriřim: 10 Aralık 2021 www.hightempmetals.com/techdata/hitemp13-8MOdata.php.
- [9] **1.4542 (17-4 PH).** “t.y.” Eriřim: 15 Aralık 2021 <https://www.saglammetal.com/tr/celik/paslanmaz-celikler/martensitik-ostenitik-paslanmaz-celikler/14542-17-4-ph>
- [10] **Leffler B.** (1996). *Stainless steels and their properties*, Stockholm: Avesta Sheffield AB Research Foundation.
- [11] **S. M. Thompson, L. Bian, N. Shamsaei, and A. Yadollahi,** (2015). An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics, *Addit. Manuf.*, 8, 36–62.
- [12] **Neikov OD, Naboychenko S, Mourachova IB, Gopienko VG, Frishberg IV, Lotsko DV** (2009). *Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications*, Amsterdam: Elsevier.
- [13] **G. Matsagopane, E. Olakanmi, A. Botes, and S. Kutua,** (2019). Conceptual Design Framework for Setting Up Aluminum Alloy Powder Production System for Selective Laser Melting (SLM) Process, *The Minerals, Metals&Materials Society*.

- [14] **Torsten Petrat, Christian Brunner-Schwer, Benjamin Graf, Michael Rethmeier,** (2019). Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct energy deposition, *Procedia Manufacturing*, 36, 256-266.
- [15] **Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker,** (2015). 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, *Additive Manufacturing Technologies*, 1–5.
- [16] **Zhang, K., Wang, S., Liu, W., & Shang, X.,** (2014). Characterization of stainless steel parts by laser metal deposition shaping. *Materials & Design*, 55, 104-119.
- [17] **Adeyemi, Adebola & Akinlabi, Esther & Mahamood, R.,** (2019). Influence of Laser Power on the Microhardness and Wear Resistance Properties of Laser Metal Deposited 17-4 PH Stainless Steel. *Annals of Dunarea de Jos University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology*.
- [18] **Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T.,** (2017). Scanning speed and powder flow rate influence on the properties of laser metal deposition of titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5)
- [19] **Li, Y., Yang, H., Huang, W., Li, J. and Zhou, Y.** (2003). The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming, continuous river flow forecasts in two contrasting catchments, *Metall. Mater. Trans. A*, 360, 18–25.
- [20] **Do-Sik Shim, Gyeong-Yun Baek, Jin-Seon Seo, Gwang-Yong Shin, Kee-PoongKim, and Ki-Yong Lee.,** (2016) Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (ded) process., *Optics Laser Technology*, 69–78.
- [21] **Muslim, T., Karagoz, T. ., Ozkok, R., Yilmaz, O. ., & Kas, M.** (2021). Influence of laser energy density on geometrical forms produced by laser metal deposition of PH 13-8 Mo stainless steel. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1(3).
- [22] **Adeyemi, A. A., Akinlabi, E., Mahamood, R. M., Sanusi, K. O., Pityana, S., & Tlotleng, M.** (2017). Influence of laser power on microstructure of laser metal deposited 17–4 ph stainless steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225, 012028.
- [23] **European Powder Metallurgy Association,** (2021). *Free course materials from the SAM Project's Additive Manufacturing Lectures on Steels - Part 2 – lecture#10* [PowerPoint slides]. Retrieved from <https://www.epma.com/epma-news/free-course-materials-from-the-sam-project-s-additive-manufacturing-lectures-on-steels-part-2>
- [24] **I. Mathoho, E.T Akinlabi, & N. Arthur** (2019). Microstructure and microhardness of heat treated 17-4 ph stainless steel produced by lens technique. *20th Annual International RAPDASA Conference, Emoya Estate, Bloemfontein, South Africa, 06-08 November 2019*

- [25] **Mahmoudi, M., Elwany, A., Yadollahi, A., Thompson, S.M., Bian, L. and Shamsaei, N.** (2017). Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 280-294.
- [26] **Bayode, A., Akinlabi, E.T. and Pityana,** (2016). Microstructure and microhardness of 17-4 PH stainless steel made by laser metal deposition. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2016 Vol II, WCECS 2016, 19-21 October 2016, San Francisco, USA.*
- [27] **Kandice S.B. Ribeiro, Fábio E. Mariani, Reginaldo T. Coelho,** (2020). A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes. *Procedia Manufacturing*, 48, 663-670.



ÖZGEÇMİŞ

FOTOĞRAF

Ad-Soyad : -

Doğum Tarihi ve Yeri : -

E-posta : -

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2022 , Bursa Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Pamukkale Üniversitesi-Otomotiv Mühendisliği bölümünü fakülte ve bölüm 1.si olarak bitirdi. (Haziran 2018)
- Proje Mühendisi, DTA Mühendislik, (Mayıs 2019 - Eylül 2019)
- Ar-Ge Proje Destek Mühendisi, Coşkunöz Kalıp Makina San. Tic. A.Ş., (Eylül 2019 - Aralık 2020)
- Ar-Ge Proje Mühendisi, Coşkunöz Kalıp Makina San. Tic. A.Ş. (Ocak 2021 – Haziran 2022)
- İleri Teknoloji Araştırma Uzmanı, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. (Haziran 2022 – Devam Ediyor)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Influence of laser energy density on geometrical forms produced by laser metal deposition of PH 13-8 Mo stainless steel, (2021), Journal of Additive Manufacturing Technologies
- Yönlendirilmiş Enerji Girdili Eklemeli İmalat Yönteminde Değişken Takim Yolu Stratejisinin Etkisi, IMSTEC 2021 International Symposium