T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

SEÇICI LAZER ERGITME YÖNTEMIYLE METAL ALAŞIMLARINDA MIKROKANAL ÜRETIMININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESI

Hamaid Mahmood KHAN

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU



Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

İstanbul-2019

Bu çalışma, 16.04.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından .....Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ...Makine Mühendisliği Programında .....Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Derya DIŞPINAR
Istanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
FakülteFakülte Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Yusuf KAYNAK
Marmara Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi

Doç. Dr. Özdoğan KARAÇALI
Istanbul Üniversitesi Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Makina Fakültesi

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

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin ..... numaralı projesi ile desteklenmiştir.
Bu tez, ... numaralı ..... projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu projede beni destekleyen herkese, özellikle danışmanım Prof. Dr. M. Hüsnü DIRIKOLU'ya çok değerli destek ve rehberliği için teşekkür ediyorum. Ayrıca laboratuarda çalışmama izin verdiği için Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi ALUTEAM araştırma laboratuvarına ve nezdinde yöneticisi Dr. Öğ. Üyesi Ebubekir KOÇ'a teşekkür ederim. Ve nihayet aileme, Zahoor Ali KHAN ve Haneefa KHATOON'a, Hammad Mahmood KHAN, Hafeeza KHATOON ve Ahmed Mehmood KHAN kardeşlerime ve ailelerine özel teşekkürler, eşim Hina TARIQUE ve oğlumuz İsa Ali KHAN'a, tarif edilemez yardımları için özel bir teşekkür.

Nisan 2019 Hamaid Mahmood KHAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xvi**
SUMMARY ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **7**
2.1 GİRİŞ 7
2.1.1 Toz Bazlı Fabrikasyon (TBF) 8
2.2 SLE'DE TOZ FÜZYON MEKANİZMASI 12
2.2.1 Yüzey Gerilimi Etkileri 14
2.2.2 Marangoni Konveksiyonu 15
2.2.3 Nemin Etkisi 15
2.2.4 Oksijen Gazının Etkisi 16
2.2.5 Rayleigh İstikrarsızlığı 17
2.3 SLE AL ALAŞIMLARI 17
2.3.1 Yoğunlaştırma 19
2.3.2 Mikroyapı 23
2.3.3 Kristalografik Doku 26
2.3.4 Mekanik Özellikler 27
2.3.5 Ön Isıl İşlem Ve Sonrası 28
2.3.6 Yüzey Pürüzlülüğü ve Korozyon 29
2.3.7 Alüminyum Alaşımları Üzerindeki Nadir Toprak Metal Etkisi 30
2.4 ÇIKINTI YÜZEYLERİ VE YATAY OLARAK OLUŞTURULMUŞ DAİRESEL PROFİLLER 30
2.4.1 Artık Gerilmeler 31
2.4.2 Eğrilik 34
2.4.3 Cüruf Oluşumu 35

2.5 SAYISAL ÇALIŞMALAR 36
2.6 AlSi10Mg ALAŞIMLARIYLA İLGİLİ ZORLUKLARI 38
3. MALZEME VE YÖNTEM 40
3.1 GİRİŞ 40
3.1.1 Deneyler 40
3.1.2 Sayısal Modelleme 42
3.1.2.1 Isıl Analiz 42
3.1.2.2 Lazer Isı Enerjisinin Modellenmesi 44
3.2 YÜZEY MORFOLOJİSİ İNCELEMELERİ 45
3.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu 46
3.2.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sistemi 47
4. BULGULAR 48
4.1 ÇELİK MALZEMELİ ÇIKINTI ANALİZİ 48
4.1.1 Giriş 48
4.1.2 Parametre Seçimi 49
4.1.3 Değerlendirme 50
4.2 PARÇA KONUMU VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 55
4.2.1 Giriş 55
4.2.2 Değerlendirme 56
4.3 AlSi10Mg İÇİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 57
4.3.1 Giriş 57
4.3.2 Sonuç 57
4.4 ÇOKLU PLATFORMDA ISI AKIŞI 60
4.4.1 Giriş 60
4.4.2 Değerlendirme 62
4.4.2.1 *3, 4 ve 5 nolu Tek Katmanlarda Isı Akışı (370 W, 1300 mm/s)* 63
4.4.2.2 *3-4 ve 4-5 Bölgeleri Arası Sınır Katmanlarında Isı Akışı (370 W, 1300 mm/s).* 63
4.4.2.3 *Çok Eklemeli Isı Akışı (370 W, 1300 mm/s)* 64
4.4.3 Farklı Lazer-Hız Değerlerinde Tek Bir Katman Üzerindeki 5 Noktada Isı Akışı. 65
4.5 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN UNSUR ÖZELLİKLERİ 68
4.5.1 Giriş 68
4.5.2 Sonlu eleman analizi (SEA) 68

4.5.3 Tartışma 70
4.5.3.1 *1 Grup numunelerin incelenmesi* 70
4.5.3.2 *2 Grup numunelerin alt tabaka parametreleriyle üretimi* 74
4.5.3.3 *Çoklu Eklemeli 2. Grup numuneleri* 74
4.6 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MUKAVEMET AÇILARINDAN İNCELENMESİ. 76
4.6.1 Giriş 76
4.6.2 Deneyler 77
4.6.3 Sonuç 79
4.6.3.1 *Weibull Dağılımı* 79
4.6.3.2 Doğrusal regresyon yöntemi 82
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 87
5.1 ÇELİK MALZEMELİ ÇIKINTI ANALİZİ 87
5.2 PARÇA KONUMU VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 89
5.3 AlSi10Mg İÇİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 90
5.4 ÇOKLU PLATFORMDA ISI AKIŞI 91
5.5 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN UNSUR ÖZELLİKLERİ 92
5.6 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MUKAVEMET AÇILARINDAN İNCELENMESİ. 92
5.7 SONUÇLAR 92
KAYNAKLAR 94
ÖZGEÇMİŞ 119

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1-1: (a) lazer yolunda bilye oluşumu ve (b) fabrikada üretilen gözenekler ve çatlaklar (Gu ve diğ., 2012; Liu ve diğ., 2017)..... 4

Şekil 1-2: SLE işlenmiş parçalar destek yapılı ve desteksiz..... 5

Şekil 2-1: Eİ Süreçlerinin Sınıflandırılması..... 7

Şekil 2-2: SLS sürecinin şematik modeli..... 9

Şekil 2-3: Eİ işlemlerinde Al alaşımları tüketiminde hava tahmini. 12

Şekil 2-4: SLE işleminde iz üstüste binme ve tekrar Ergimeyi gösteren şemalar. 12

Şekil 2-5: As-AlSi10Mg olarak üretilmiş optik mikrograflar; platforma (a) paralel bir düzlem ve platforma (b) dik bir düzlem. 13

Şekil 2-6: Yüzey geriliminin katılaşmış iz üzerindeki etkisi. (a) yüzey gerilimi çekici kuvveti aştığında, θ <90 (b) yüzey çekici kuvveti yüzey gerilimi aştığında, θ> 90. 14

Şekil 2-7: Toz ile lazer etkileşiminin şematik genel görünümü (Weingarten ve diğ., 2015)..... 15

Şekil 2-8: 6061-örnek bir kesitin Optik ve TEM Mikrografları; (A) Keller'in reaktifleriyle parlatma ve dağlama işleminden sonra numune; (B) NaOH çözeltisi ile derin kazınmış (Louvis ve diğ., 2011)..... 16

Şekil 2-9: Lazer gücü ve tarama hızının yoğunlaşmaya etkisi (Buchbinder ve diğ., 2011)..... 21

Şekil 2-10: Kuluçkalamanın yoğunlaşmaya etkisi (Aboulkhair ve diğ., 2014). 22

Şekil 2-11: Su reaktifinde HF ile aşındırma işleminden sonra AlSi10Mg'nin Z ve XY doğrultusundaki mikro yapısı (Sağ) (Calignano ve diğ., 2013; Manfredi ve diğ., 2014)..... 23

Şekil 2-12: İmalat yönü boyunca AlSi10Mg numunelerinin optik mikrografları (Manfredi ve diğ., 2013)..... 24

Şekil 2-13: Daha fazla çoğaltılan A, B, C bölgelerini gösteren TEM kullanılarak SLE tarafından bir AlSi10Mg'nin üstten görüntüsünün mikro yapısı. İki yönlü taramaya sahip bir bölgenin ince, kaba ve HAZ bölgesini gösteren C Bölgesi (Thijs ve diğ., 2013)..... 24

Şekil 2-14: Numunelerin TEM görüntüleri (Lam ve diğ., 2015). 25

Şekil 2-15: EBSD yönlendirmesi, SLE AlSi10Mg parçasının iki dik görünümünde eşlenir (Thijs ve diğ., 2013). 27

Şekil 2-16: Yapı yönü boyunca çekme dayanımı. 28

Şekil 2-17: Yüzey pürüzlülüğünün FESEM görüntüleri, (a) Ra = 23 μm ile numune, (b) 8 bar'da ateşlemeden sonra numune (Manfredi ve diğ., 2013). 30

Şekil 2-18: Tek katmanlardaki gerilme gradyanları (Salmi ve diğ., 2017). 31

Şekil 2-19: Bina yönü boyunca sıcaklık ve artık gerilme dağılımı (Salmi ve diğ., 2017). 32

Şekil 2-20: Bina yönü boyunca kalan gerilmeler (Salmi ve diğ., 2017). 32

Şekil 2-21: Destekli ve desteksiz yapılarda geliştirilen gerilmelerin karşılaştırılması (Salmi ve diğ., 2017). 33

Şekil 2-22: SLE'de tek katmanda çözgü oluşumunun şematik diyagramı (Vora ve diğ., 2015). 34

Şekil 2-23: SLE parçalarında çözgü. 35

Şekil 2-24: SLE'de çözgü. 35

Şekil 2-25: (a) Delik etrafındaki şematik gösterim ve (b) deneysel analizde kullanılan kübik model. 39

Şekil 3-1: SLE EOS M290 makinesi için EOS web sitesinden dosya fotoğraf. 41

Şekil 3-2: Lazer ışınımı sırasında toz yatağının ısıl davranışının şematik gösterimi (Li ve Gu, 2014). 41

Şekil 3-3: AlSi10Mg katı ve gevşek tozların sıcaklığa bağlı yoğunluğu. 42

Şekil 3-4: AlSi10Mg'nin sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri (a) Termal İletkenlik (b) Özgül Isı. 43

Şekil 3-5: Küresel tozlar MS1. 45

Şekil 3-6: Hitachi'den taramalı elektron mikroskobu (TEM). 46

Şekil 3-7: Mitutoyo SJ500P makinesi. 47

Şekil 4-1: Çıkma modelinin şematik diyagramı. Tüm ölçüler mm'dir. 48

Şekil 4-2: Fabrikasyon 16 MS1 çıkıntı örnekleri. 49

Şekil 4-3: Çıkıntı örneğinin geometrik yerleşimi. 50

Şekil 4-4: Destek düzeneğindeki diş profilini gösteren şematik diyagram. 52

Şekil 4-5: Bozulmamış bir bölgede yüzey pürüzlülüğünün tarama parametreleri ve diş profillerine göre değişimi. 54

Şekil 4-6: Bozulma Boyunda (D1) tarama parametreleri ve diş profillerine göre değişim. 54

Şekil 4-7: Farklı diş profilleri için tarama parametrelerine göre çarpık bölgenin yüzey pürüzlülüğündeki değişiklik. 55

Şekil 4-8: (a) fabrikasyon bir modelin şematik diyagramı ve (b) bir substrat üzerine konumlanan parçalar. 55

Şekil 4-9: Surface roughness variation in flat and inclined surface. 56

Şekil 4-10: 7 farklı yüze sahip bir modelin şematik diyagramı. 57

Şekil 4-11: (**a**) Sonlu eleman modeli, (**b**) Bölgeler düzeni. 61

Şekil 4-12: 370 W lazer gücü ve 1300 mm/s tarama hızı için sıcaklık dağılımları: 62

Şekil 4-13: Sınır katmanlarda sıcaklık dağılımı (370 W, 1300 mm/s) (**a**) 3-4 ve (**b**) 4-5. 63

Şekil 4-14: (**a**) İlk katmandaki A, C ve E noktalarında Zamana bağlı işleme, (**b**) verilen 5 yerdeki 3 katmanda ergiyik havuz derinliği. 65

Şekil 4-15: 3 tabakanın A-E noktalarındaki havuz derinlikleri (**a**) 360 W, 1000 mm/sn, (**b**) 250 W, 1000 mm/sn ve (**c**) 200 W, 1000 mm/sn. 67

Şekil 4-16: Sonlu eleman modeli. 69

Şekil 4-17: Nümerik analiz için parça modeli. 69

Şekil 4-18: 6 adet yatay dairesl kanallı numunenin TEM mikrografları. 71

Şekil 4-19: Sıcaklık dağılımları: (a) 360 W ve 1000 mm/sn ile (b) 370 W ve 1300 mm/sn. 71

Şekil 4-20: Kübik tüm modelin iç dikdörtgen bölgesinde oluşturulan SEA modeli. 72

Şekil 4-21: Tarama hızına ve Lazer güç değişimine göre Ergiyik havuz derinliği. 72

Şekil 4-22: 2. Grup numunelerin TEM analizleri. 73

Şekil 4-23: (a) 65 W ve 1000 mm/sn ile (b) 150 W ve 1000 mm/sn. için sıcaklık dağılımları. 74

Şekil 4-24: İlk üç katı 65 W ve 1000 mm/snn'de işlenmiş yapı üzerinde 360 W ve 1000 mm/snn ile oluşturulmuş 4. kattaki sıcaklık dağılımı. 75

Şekil 4-25: 2. Gruptaki (a) 4. ve (b) 3. Numunelerin TEM görüntüleri. 75

Şekil 4-26: KÜ ile AlSi10Mg'den imal edilen 22 adet numune (4 adedi sonradan eklenmiştir). 78

Şekil 4-27: Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı, % 0.2 offset basma mukavemeti. 78

Şekil 4-28: (a) Basmada akma mukavemeti için (b) Basma mukavemeti için Regresyon doğrusu. 81

Şekil 4-29: Basmada akma mukavemeti için Weibull güvenirlik dağılımı. 85

Şekil 4-30: Basma mukavemeti için Weibull güvenirlik dağılımı. 85

Şekil 5-1: a) Yalnızca 7.16 mm çıkıntı uzunluğunda üretilen Numune 8, a) İki farklı destek bloğuyla Numune 8. İlk 7.16mm için, örnek 8'in destek profili seçildi ve örnek 4'ün uzunluk destek profilinin geri kalanı için kullanıldı. 89

Şekil 5-2: (a, c) merkez ve (b, d) köşe örnekleri için hassas kanalların SEM görüntüsü. 90

Şekil 5-3: Proses parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü değişimi. 91

TABLO LİSTESİ

Tablo 1-1: 3D modellerin ağ haline getirilmesi için ortak dosya formatları. 2

Tablo 1-2: AM tarafından işlenen mevcut ticari malzemeler. 3

Tablo 2-1: Bazı önde gelen Eİ üreticilerinin listesi. 8

Tablo 2-2: Dünyanın önde gelen SLE üreticilerinden bazıları. 10

Tablo 2-3: SLE ile işlenen bazı genel metallerin listesi. 18

Tablo 2-4: Farklı spesifik sıcaklıklarda parça özellikleri. 19

Table 2-5: SLE sürecinde kategorik veri işleme ve malzeme parametreleri (Aboulkhair ve diğ., 2014). 20

Tablo 2-6: Olarak verilen örneklerin TEM-EDS sonuçları Şekil 2-14 (Lam ve diğ., 2015) 26

Tablo 2-7: Farklı Eİ işlemlerinin analizinde yapılan sayısal çalışma. 36

Tablo 4-1: MS1 chemical composition. 49

Tablo 4-2: Proses ve destek parametreleri. 49

Tablo 4-3: Çıkma bölgelerinde kullanılan destek profil parametreleri 51

Tablo 4-4: T1 - orijinal, T2 - son kalınlık, D1 - bozulmamış çıkma uzunluğu, D2 - çarpık çıkma uzunluğu ile çıkıntı kalınlığında değişiklik. 52

Tablo 4-5: D1 (Ra1) ve D2 (Ra2) bölgelerinde yüzey pürüzlülük değerleri. 53

Tablo 4-6: İki diş parametresi arasındaki maksimum mesafe (d). 53

Tablo 4-7: Farklı numune konumlarında düz ve eğimli yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü. 56

Tablo 4-8: Yüzey pürüzlülüğü parametreleri. 57

Tablo 4-9: AlSi10Mg örnekleri için işleme parametreleri. 58

Tablo 4-10: Farklı işleme parametrelerinde 7 farklı yüzey pürüzlülüğü. 59

Tablo 4-11: Maximum nodal temperature at different locations of 3 layers. 64

Tablo 4-12: Tüm izleme noktalarında lazer geçişinden sonra asgari düğüm sıcaklıkları (K). 65

Tablo 4-13: Analizde kullanılan AlSi10Mg malzemesinin fiziksel özellikleri ve temel işlem parametreleri. 68

Tablo 4-14: 1. Grup numuneler için alınan Lazer gücü, Tarama hızı ve Tarama yönleri değerleri. 70

Tablo 4-15: 2. Grup SLE üretim parametreleri. 73

Tablo 4-16: Bu analizde kullanılan AlSi10Mg parametrelerinin ve fiziksel değerlerinin işlenmesi. 77

Tablo 4-17: Basma deneyleri sonuçları. 79

Tablo 4-18: Basmada akma mukavemeti için güvenirlik analizi. 83

Tablo 4-19: Basma mukavemeti için güvenirlik analizi. 84

Tablo 4-20: Weibull dağılım parametreleri. 86

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

Simgeler Listesi

r0 : spotboyut çapı 44
γlg : sıvı-gaz ara yüz 14
γsg : katı-gaz ara yüz 14
γsl : katı sıvı ara yüz 14
σ0 : cıkık için gerekliolan stres içindir 27
σY : Akma dayanımı için olduğu durumlarda 27
d : Tane büyüklüğüdür 27
h_c : ısı taşınım katsayısıdır 42
k : Güçlendir sabitdir 27
K_g : argon iletken 44
k_s : AlSi10Mg iletken 44
P : lazer gücü 38
q_v :ısı girişidir 42
r : lazer ışınının ortasındaki Gauss yüzeyini 44
R : Güvenirlilik 83
Ra : Yüzey püzürlülüğü 53
T : Ortam sıcaklığının 42
t : penetrasyon derinliğini 44
v : tarama hızı 38
α : toz emme katsayısdır 44
ε : yayım katsayısıdır 42
η : vektör 42
ρ_{powder} : Toz yoğunluluk 44
σ : Stefan Boltzmann sabitidir 42
ϕ : Gözeneklilik seviyesi 44
ψ : Üstel faktör 44

Kısaltmalar Listesi

Al : Aluminum 28
AMC : Alüminyum Matris kompozitlerinin 28
CET : Eşmerkezli Geçiş 36
DFŞ : Doğrudan Fotoğraf Şekillendirme 7
DMLS : Doğrudan Metal Lazer Sinterleme 1
Eİ : Eklemeli İmalat 1
ELE : Elektron Işını Ergitme 7
HAZ : Isı Etkilenen Bölgelere 22
HP : hızlı prototipleme 1
KFP : Katı Folyo Polimerizasyonu 7
LMS : Lazer mikro sinterleme 37
LTNŞ : Lazer Tasarımlı Net Şekillendirme 7
Mg : Magnesium 28
MS1 : Maraging çelik 45
SC : Sayısal Kontrol 1
Sc : Scandium 28
Sı : Silicium 28
SL : Stereolithography 7
SLE : Seçici Lazer Ergitme 1
SLS : Seçici Lazer Sinterleme 1
TBF : Toz Bazlı Fabrikasyonun 8
TEM : Taramalı elektron mikroskobu 16
TYF : Toz yatak Fusion 1
YPÖS : Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sistemi 45
β : Ölçeği parametreleridir 80
γ : Şekil parametreleridir 80

ÖZET

DOKTORA TEZİ

Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Metal Alaşımlarında Mikrokanal Üretiminin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

Hamaid Mahmood KHAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Seçici Lazer Ergitme (SLE), geleneksel yöntemlerle neredeyse imkansız olan parça imalatı için geniş bir platform sağlayarak üretimde devrim yaratmaktadır. SLE'de metal tozları, güçlü lazer kaynağıyla yüzeylerine ışıma olduğunda ergimeyle kaynaşır. Yüksek tarama hızında yönlendirilen lazer kaynaklı ısı enerjisi, üretilen parçaların nihai mekanik ve mikroyapısal özelliklerini belirleyen ve lazerin etkidiği noktada oluşan ergiyik havuzundaki fiziksel ve kimyasal olayları değiştirir. Ayrıca ergime havuzunun şekli, soğutma kanalları, geometrik toleranslı parçaları, hücresel tip kafes profilleri vb. karmaşık geometrilerin yapısal bütünlüğünü de önemli oranda etkiler.

Bu tez çalışması destek yapıları olan ve olmayan çıkıntılı yüzeylerin SLE imalatında karşılaşılan zorlukları aşmayı hedeflemektedir. Tarama yatağına paralel inşa edilmiş küçük dairesel profiller, eğimli çıkıntı yüzeyleri olarak kabul edilebilir. Yatay deliklerin imal edilmesi, tozların oluşturduğu cüruftan veya hassas dairesel yatay kanalların tıkanmasına neden olan ayarsız enerji düzeyinden dolayı imal edilmesi zordur. Bu nedenle, bu çalışma kanal yüzeyinin

yüzey pürüzlülük özelliklerini ve ergiyik havuz derinliğini kontrol etmek için özellikle lazer gücü ve tarama hızı gibi uygun işlem parametrelerini belirlemeye odaklanmıştır.

Çalışma, imal edilen destekli veya desteksiz parçaların yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek için 5 ana bölüme ayrılmıştır. Bunun için eğimli, dikey ve yatay profiller gibi 3 farklı yüzeyi, çıkıntı yüzeyli bir geometriyi ve tarama platformuna paralel olarak oluşturulan dairesel bir profili analiz etmek için 5 farklı model seçilmiştir. ANSYS simülasyon paketi, ergiyen aktif katmanlardaki ısı akışını analiz etmek için kullanılmıştır. Bu analizlerde ergitilmiş havuzun kesitini, gevşek toz bölgelerini ve alt katmanların yüzey profilini değerlendirmek üzere nümerik ve daha sonra da deneysel karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğünün, toplam çıkma uzunluğundan, kullanılan destek türlerinden ve numunenin platformdaki konumundan etkilendiği tespit edilmiştir. Yüksek ısı dağıtımı için yoğun desteklerin daha iyi bir olduğu hesaplanmıştır. Buna ek olarak, hibrit desteklerin karmaşık çıkıntı geometrilerinde denge sağladığı görülmüştür. Köşelerdeki yüzey pürüzlülüğünün, merkezde işlenenden oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir.

Yapılan ANSYS temelli analiz çalışması, dairesel kesitli kanal içeren parçalar için uygun işlem parametrelerinin tanımlanmasını sağlayabilmiştir. Tozun içindeki ısı dağılımının, altta yatan desteklere veya katı olan tabana kıyasla oldukça zayıf olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, bu durumda dairesel bir delik gibi çıkıntı profillerin imalatında kullanılan alt katman parametrelerinin, yüzeyi ve yapısal bütünlüğü etkilediği de görülmüştür. Neticede 0.5 mm çapındaki dairesel kesitli bir mikrokanalın taban ve tavan kısımlarını oluşturacak ilk birkaç katmandaki lazer gücünün ve tarama hızının 65 W ve 1000 mm/sn şeklinde alınmasının, ardından geriye kalan kısımlarda ise bu işlem parametrelerinin 370 W ve 1300 mm/sn olarak ayarlanmasının, böyle bir kanalın AlSi10Mg alaşımı malzemeli bir parçanın içinde başarıyla üretilebileceği gösterilmiştir. Bu analiz yaklaşımının farklı malzeme, kesit boyutları ve geometrilerde de kullanılabileceği değerlendirilmektedir.
Nisan 2019, 139. sayfa.

Anahtar kelimeler: Seçici Lazer Ergitme (SLE), ANSYS, AlSi10Mg, Eklemeli İmalat (Eİ), Çıkma Yüzeyi, Yüzey Pürüzlülüğü

SUMMARY

Ph.D. THESIS

Experimental and Numerical Investigation of Microchannel Production in Metal Alloys by Selective Lazer Melting Method

Hamaid Mahmood KHAN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU

Selective Laser Melting (SLM) is revolutionizing manufacturing by providing a wide platform to produce customized goods that were nearly impossible with traditional methods. In SLM, the metal powders fuse on melting as the high-powered laser source irradiates the surface. The high heat energy at a high scan rate alters several physical and chemical phenomena inside a melt pool that defines the final mechanical and microstructural features in the fabricated parts. Moreover, the shape of the melt pool also strongly affects the structural integrity of complex geometries such cooling channels, non-assembly structures, clearance parts, trusses, cellular lattice profiles etc.

The study targets the challenges faced in designing overhang surfaces with and without support structures. The small circular profiles built parallel to the scanning bed can be assumed as inclined overhang surfaces. The fabrication of horizontal holes is difficult to fabricate due to high incident energy that results in deeper melt pool shapes that either forms high dross or total

blockage of circular precision channels. Therefore, this study was undertaken to evaluate the surface roughness features of down-skin surface and to control the melt pool depth with a suitable selection of processing parameters particularly laser power and scan rate.

The study was divided into 5 main chapters to evaluate the surface roughness of fabricated parts with and without supports. For this different sample were chosen to analyze the different surfaces such as inclined, vertical and horizontal profiles and different geometries with overhang surfaces and circular profile built parallel to scanning platform. The simulation package provided by ANSYS was used to numerical model a simple system to analyze the heat flow effect in the active layers supported by different underlying platforms. The prime focus was to assess the melt pool depth formation in regions with loose powder base and to evaluate the surface profile of down-skin region.

The surface roughness was found to influence with total overhang length, kind of supports used and the position of sample on a built platform. For high heat dissipation, dense supports provide better solution with slight or negligible curls in processed layers in overhang regions. Additionally, the hybrid supports were found to provide balance in complex overhang geometries. Surface roughness of inclined surface in the corner samples was found quite high than the samples processed at the center of build plate. The ANSYS study enables to identify the suitable process parameters for circular built geometries. The heat dissipation in powder was observed quite poor in comparison to underlying supports or solid base. Moreover, the down-skin parameters used in fabricating overhang profiles such as circular hole in this case strongly affects its surface and structural integrity. The parameters (65W, 1000mm/s) in the first few layers (4 or 5) followed by core processing parameters (370W, 1300mm/s) was observed to successfully fabricate 0.5mm hole.
April 2019, 139. pages.

Keywords: Selective Laser Melting, ANSYS, Additive Manufacturing, AlS'10Mg, Overhang Surface, Surface oughness

1. GİRİŞ

Seçici Lazer Ergitme (SLE) hızlı prototipleme (HP) tekniklerinden biri olup, bir Eklemeli İmalat (Eİ) işlemidir. Bu teknikte yönlendirilmiş bir lazer ışını kullanarak eş kalınlıklı ve adımsal olarak katmanlar halinde serpilen metal tozlarının ergitilmesi suretiyle, klasik yöntemlerle imal edilemeyecek derecede karmaşık geometrili parçaların imalatı mümkün olmaktadır (Everton ve diğ., 2016). Bu teknik başlangıçta, geleneksel malzemelerin termomekanik özelliklerine sahip olan ancak nispeten daha yüksek bir yapım hızında imalat yapabilen bir parça imalat yöntemi olduğu düşünülmüştür (Campanelli ve diğ., 2010; Levy ve diğ., 2003). Ancak SLE'nin Eklemeli yaklaşımı karmaşık yeni parçaların tasarlanmasına olanak tanımış ve bugüne dek elde edilen olumlu sonuçlar SLE'nin birçok sektörde ticari olarak kabul görmesini sağlamıştır (Chua ve diğ., 2010).

SLE'nin çok Eklemeli yaklaşımı, 3D CAD model tasarımını, herhangi bir destekleyici 3D dilimleme programını kullanarak, modeli tipik olarak 20 ila 100 μm arasında son derece ince katmanlara böler ve parça üretimi için 3D yazıcıya gönderir (Ceccarelli ve diğ., 2016; Zeltmann ve diğ., 2016). Dilimlerin yüzey topolojisi, lazerin üzerinde gezineceği üçgensel elemanlara bölünür. Yüzeyi bir ağ gibi kaplayan üçgensel bölgelerin bilgisi bir dosya formatında saklanır. Tablo 1-1, dosya mozaikleme için yaygın olarak kullanılan bazı formatları listelemektedir.

Depolanan geometrik bilgi daha sonra, 3B yazıcılara dosya aktarmak için takım tezgahı programlamasında yaygın olarak kullanılan Sayısal Kontrol (SC) G-kodu verilerini üretmek için kullanılır. Netfabb Standard, SelfCAD, Simplify3D, Kisslicer, MakerBotprint, Slic3r vb. günümüzde kullanılan birçok dilimleme yazılımı bulunmaktadır.

SLE işleminde, sürekli bir lazer taraması ile katmanın ergitilmesi esastır (Bremen ve diğ., 2012). Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) veya Toz yatak Füzyon (TYF) işlemlerinde ise toz partikülleri ergimeye yakın sıcaklıklarda işlenir (Williams ve diğ., 2005). SLE'de, tozların tamamen Ergimesi, daha iyi fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikler ortaya çıkarmaktadır (Vandenbroucke ve Kruth, 2007; Vrancken ve diğ., 2012).

Tablo 1-1: 3D modellerin ağ haline getirilmesi için ortak dosya formatları.

Tip	Tam form	Bilgi	Kurucu
STL	Standart mozaik dil	3B modellerin basit düzenini kodlar. Temelde tek renk destekler	3dsystems.com 1987
OBJ	Wavefront nesne	Çok renkli ve doku içeren yüzey geometrisini kodlayın	Wavefront Technologies 1984
3MF	3D üretim biçimi	Encode Solid model Ağ, doku, malzeme, renk ve baskı bileti gibi bilgiler	3MF Consortium
PLY	Çokgen dosya biçimi	3B modelin her bir elemanının geometrik ve özellik verilerini saklar	Stanford University 1994
VRML	Sanal gerçeklik modelleme dili	3 boyutlu (3B) etkileşimli vektör grafiklerini temsil etmek için standart dosya formatı	
AMF	Katkı imalat dosya biçimi	3D baskı için XML tabanlı açık standart STL ve OBJ kadar ünlü değil	
COLLADA		Etkileşimli 3D uygulamalar için değiş tokuş dosya formatı	Sony Computer Entertainment 2004
FBX		Aydınlatma, Gölgelendirme ve Doku eşleme bilgileri	Autodesk FBX

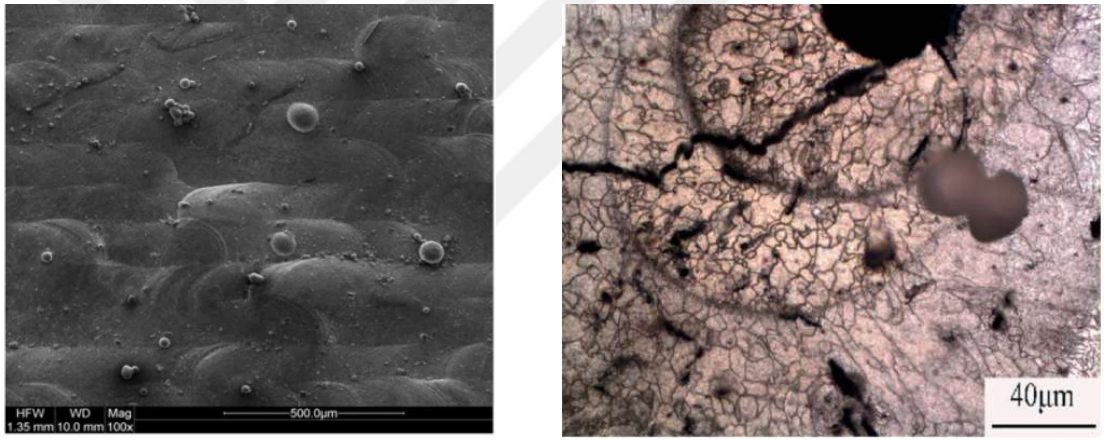
Ayrıca, geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında SLE, tıp, savunma, havacılık, otomotiv vb. birçok sektörde az sayıda gerekli olan karmaşık parçaların imalatında uygun maliyetli bir yaklaşım sunmaktadır (Khairallah ve diğ., 2016; Read ve diğ., 2015). Şu anda, birkaç malzeme SLE'de başarılı bir şekilde kullanılabilmiştir. Tablo 1-2, en sık kullanılan malzemelerden bazılarını ve bunların uygulamalarını göstermektedir. Birkaç Eİ tezgah üreticisi de işleme için malzeme sağlayabilmektedir.

Tablo 1-2: AM tarafından işlenen mevcut ticari malzemeler.

	Amorf	Yarı-Crystaline	Termoset	Malzeme Ekstrüzyon	KDV polimerizasyonu	Malzeme jeti	Toz Yatak Füzyon	Ciltçi Jeti	Sayfa Laminasyon	Yönlendirilmiş Enerji Birikimi
ABS [Acryonitrile bütadien stiren]	X			X						
Polikarbonat	X			X						
PC/ABS karışım	X			X						
PIA [Polylactic asit]	X			X						
Polyetherimide PEI]	X			X						
Akrilikler			X		X	X				
İnceltilebilen			X		X	X				
Kullanırdı			X		X	X				
Poliamid (naylon) 11 ve 12		X					X			
Temiz		X					X			
Cam dolu		X					X			
Karbon dolu		X					X			
Metal Al dolu		X					X			
Bağlı polimer	X	X		X						
Polistiren	X						X			
Polipropilen		X					X			
Polyester "Esnek"							X			
Polyetheretherkeytone (göz)		X		X			X			
Termoplastik poliüretan (Elastomer)				X			X			
Çikolata		X		X						
Kağıt									X	
Alüminyum alaşımları							X	X	X	X
Co-Cr alaşımlar							X	X		X
Altın							X			
Nikel alaşımlar							X	X		X
Gümüş							X			
Paslanmaz çelik							X	X	X	X
Titanyum, ticari saflık							X	X	X	X
Ti-6AI-4V							X	X	X	X
Takım çeliği							X	X		X

Alüminyum alaşımları SLE işleminde kullanılan en fazla test edilmiş malzemeler arasındadır ancak Titanyum ve Nikel içeren diğer hafif alaşımlara kıyasla kullanımı oldukça zordur. Bu, oksijene (Herzog ve diğ., 2016; Louvis ve diğ., 2011; Rao ve diğ., 2016; Tang ve Pistorius, 2017) olan büyük afinitesi ve lazerle yüksek yansıtıcılığı ve emiciliği nedeniyle işlemi oldukça öngörülemeyen ve dolayısıyla iyileşmeye açık bırakmaktadır (Buchbinder ve diğ., 2011; Montero Sistiaga ve diğ., 2016).

SLE ayrıca Al alaşımlarının parça tasarımında çekici bir alternatif sunar ve daha hafif ve verimli yakıt sistemlerinin yapımında savunma, otomotiv ve havacılık gibi ana sektörler tarafından giderek daha fazla benimsenmektedir (Frazier, 2014; Olakanmi ve diğ., 2015; Singh ve diğ., 2017). (Al alaşımları) mukavemet/ağırlık oranlarına göre daha yüksek mukavemet oranlarına bağlı olarak, Aircraft A320 için tasarlanan daha ağır çelik menteşelerin yerine % 64 daha hafif bir Al menteşesi üretiminde kullanılmıştır (Tomlin ve Meyer, 2011). SLE'li Al, bina ısı radyatörleri (Kruth ve diğ., 2007) ve minyatür ısı eşanjörleri, otomotiv radyatörleri (Neugebauer ve diğ., 2011) ve yüksek ısı transferine sahip yüzeyler (Ventola ve diğ., 2014) için de kullanılmıştır. Dahası, geleneksel yöntemlerle hayal edilmesi güç yeni sağlam bileşenler SLE denenmekte ve test edilmeye devam edilmektedir (Bineli ve diğ., 2011).



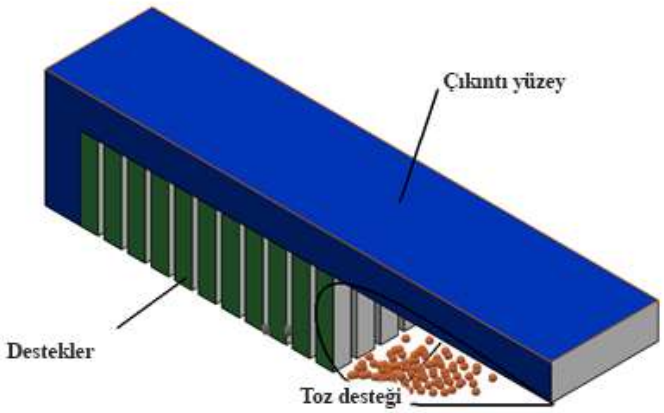
(a) (b)

Şekil 1-1: (a) lazer yolunda bilye oluşumu ve (b) fabrikada üretilen gözenekler ve çatlaklar (Gu ve diğ., 2012; Liu ve diğ., 2017).

Tipik bir SLE işleminde, bilye oluşumu (Şekil 1-1:(a)), düzensiz gözeneklilik (Şekil 1-1:(b)), yapışkan oksit tabakaları, alaşım elemntlerinin buharlaşması, pürüzlü yüzeyler ve yapıların tamamen parçalanması gibi birçok engel vardır (Dai ve Gu, 2015; Gu ve diğ., 2012; Gu ve Shen, 2009; Liu ve Chen, 2017; Ma ve diğ., 2014; Zhang ve diğ., 2012). Yukarıdaki sorunları ele almak için birçok çalışma yapılmıştır, ancak bu imalat sürecini karlı kılmak için araştırmalara devam edilmesi gerekmektedir.

Bu zorluklardan biri, yatay olarak inşa edilmiş dairesel delikler, boşluklu yüzeyler vb. içeren çıkıntı yapılarıdır. Lazer'in yüksek özgül enerjisi, ekstra ömür için bertaraf edilmesi gereken

gerilmelere neden olur (Bhavar ve diğ., 2014; Calignano, 2014; M. Cloots ve diğ., 2013). Alttaki katı bölge, altta yatan gevşek toz ile karşılaştırıldığında ısıl gerinimleri önemli ölçüde azaltır. Gevşek tozların zayıf termal iletkenliği, sıvı varlığını uzatır ve bu nedenle Ergime havuzu boyutunu uzatır. Bu, kritik geometrilerin kesinliğini ciddi şekilde etkileyen atık kütlesinin düşmesine neden olur (Fox ve diğ., 2016; Wu ve diğ., 2017). Bu nedenle, parçalar genellikle hızlı ısı dağılımı ve düşük rezidüel stres için destek yapıları üzerine kuruludur (Patterson ve diğ., 2017). Bununla birlikte, destek yapıları üretimde maliyet katmakta, üretim süresini kısaltmakta ve toz israfını oldukça arttırmaktadır. Ayrıca, destek yapılarının dayanabileceği belli bir uzunluk vardır (Liu ve diğ., 2016). Daha iyi ısı akış mekanizması için destek yapısını değiştirmek ve uzun tarama uzunluğunu desteklemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Hussein ve diğ., 2013; Zeng ve diğ., 2015). Bazı araştırmalar, bazı durumlarda (uzun dairesel kanallar) kaldırılması neredeyse imkansız olduğu için, desteksiz bina yapıları üzerine odaklanmıştır (Vora ve diğ., 2015; Wu ve diğ., 2017). Şekil 1-2, destekleri olan ve olmayan SLE parçalarını göstermektedir.



Şekil 1-2: SLE işlenmiş parçalar destek yapılı ve desteksiz.

Bu nedenle, Al alaşımlarıyla ilgili yukarıdaki sorunlara değinmek için, SLE işleminin çeşitli fiziksel ve kimyasal yönlerinin dikkatlice değerlendirilmesi gerekir. Alüminyum alaşımları genellikle ısıl işlem görebilen, ısıl işlem görmeyen ve döküm alaşımları olmak üzere üç tipte sınıflandırılır ve hepsi SLE ile işlenemez (Brandl ve diğ., 2012; Kim ve diğ., 2001). Genellikle mekanik ve mikroyapısal güçlendirme için özel elementler ile birlikte Al eklenir ve Al alaşımlarının SLE'si, kaynak ve döküm gibi geleneksel yöntemlerin karşılaştığı aynı zorluğu

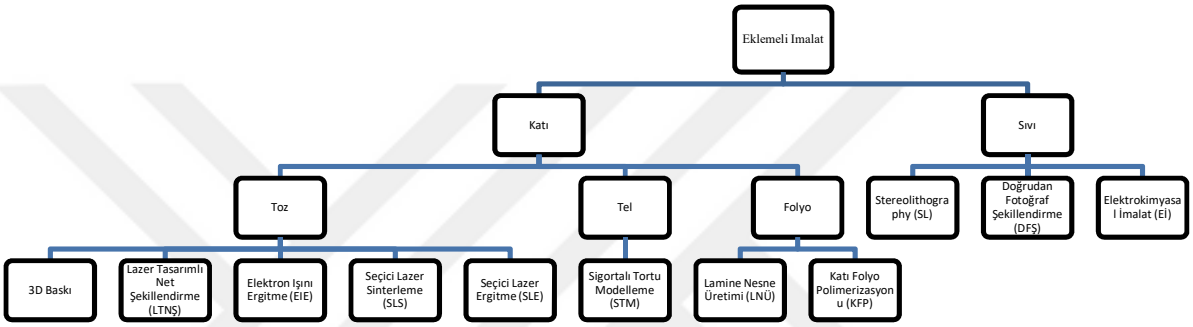
giderir (Bartkowiak ve diğ., 2011; Pickens ve Laboratories, n.d.). Bu çalışmanın amacı, SLE'deki dairesel delikli çıkıntı yüzeyleri ile ilgili sorunu ele almaktır. Tez çalışması, genel mekanik ve mikroyapısal incelemelerin yanında çıkıntı bölgeleriyle ilgili konuları içeren en yeni bilimsel literatürü dikkate almaktadır. Daha sonra, herhangi bir çıkma yüzeyinin sürdürülebilirliğini belirleyen ilk birkaç katmanda meydana gelen olguyu anlamak için Sonlu Elemanlar Analizi paketi, yani ANSYS kullanılarak yapılan Sayısal çalışma takip etmektedir. Sayısal ve deneysel karşılaştırmalar son kısımlarda yer almaktadır.

Bu tez 11 bölüme ayrılmıştır. Bölüm 1, Eklemeli Üretim tekniklerine, özellikle de SLE sürecine giriş niteliğindedir. 2. Bölüm, literatür taramasını ve SLE işleminin özellikle Al alaşımları bağlamındaki gelişmelerini incelemektedir. Bölüm 3, deneysel ve sayısal çalışmada benimsenen materyal ve metodolojileri tartışır. 4. Bölüm, farklı destek profilleri ile çıkıntı yapısının yüzey pürüzlülüğü üzerine bir çalışmadır. Bölüm 5, yarı pozisyonun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemektedir. Hem bölüm 4 hem de 5, SLE işleminde Marajing çeliği (MS1) tozu kullanmaktadır. Bölüm 6, 7, 8 ve 9 ise AlSi10Mg tozunu incelemektedir. Bölüm 6, farklı yüzlerin genel yüzey pürüzlülüğüne odaklanmaktadır. Bölüm 7, lazer kaynağının ANSYS paketini katı bir işlenmiş taban, destek yapısı ve gevşek toz baz gibi çoklu platformlar üzerindeki etkisinin kullanıldığı sayısal bir çalışma hakkındadır. Bölüm 8, yatay olarak oluşturulmuş dairesel profillerin tasarımında deneysel araştırmaların dahil edilmesiyle Bölüm 7'nin bir uzantısı olacaktır. Bölüm 9, SLE ile işlenmiş AlSi10Mg parçalarındaki basma mukavemeti değişimi için Weibull istatistiksel metodunun kullanımına odaklanmıştır. Bölüm 10, bu tezin gelecekteki yönlerini kısaca tartışacak ve son olarak, Bölüm 11’de sonuçlar ortaya konulacaktır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 GİRİŞ

Seçici Lazer Ergitme (SLE) Eklemeli İmalat (Eİ) işlemi son yirmi yılda büyük gelişmeler kaydetmiştir. Diğer yaygın Eİ yöntemleri Şekil 2-1'de gösterilmektedir.



Şekil 2-1: Eİ Süreçlerinin Sınıflandırılması.

Herhangi bir Eİ işleminin uygulanmasındaki temel yaklaşım katman bazında sağlam bir yapı elde etmektir (O'Regan ve diğ., 2016). İşlemin uygulanmasına CATIA, SolidWorks, SolidEdge, Pro-E vb. CAD programında bir model çizerek başlanır. Daha sonra CAD dosyasındaki dilimlerin her birine çoğunlukla üçgensel bölünme ağı oluşturulur (Tablo 1-1). Bu dosyalar model hakkındaki geometrik, malzeme, renk ve diğer önemli bilgileri kaydeder (McMenamin ve diğ., 2014; Peng ve diğ., 2016). Sonra ^D metal yazıcısına gönderilen bilgiler yardımıyla parça katman ardı katman ile imal edilir. Gerektiği yerde destek yapıları sağlanır ve gerekirse parçalar daha yüksek verimlilik için son işlemden geçirilebilir (Huotilainen ve diğ., 2014). Eklemeli İmalat tezgah üreticilerinden bazıları Tablo 2-1'de listelemektedir.

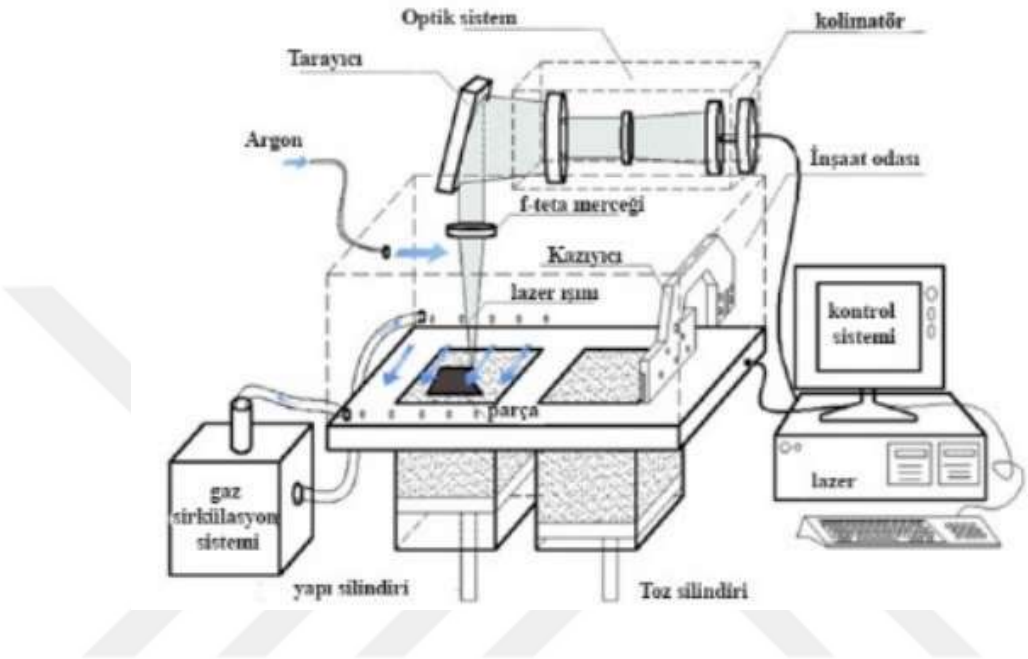
Tablo 2-1: Bazı önde gelen Eİ üreticilerinin listesi.

S. No	Üretici	Özellikleri
1	3D Systems (1983)	3B bir makine, parça malzemeleri, parça hizmetleri vb. Üretim, tasarım ve mühendislik, 3B tarama ve sağlık
2	ExOne (2005)	Metal, kum ve seramik işleme. Prototip ve araştırma yazıcıları ve ticari parçaların üretimi için.
3	HP Inc.	Çoklu Jet Fusion teknolojisine dayanır.
4	Materialize NV	Belçika merkezli şirket ve hastaya özel rehberler oluşturabiliyor ve 165'i bekleyen 95'in üzerinde patenti bulunuyor.
5	Nano Dimension	3D elektronik baskı ve nanoteknoloji bazlı mürekkep ürünleri. Çok Eklemeli devre kartlarını 2020'ye kadar birkaç saatte işleyebilme
6	Organovo	Biyo-tıbbi uygulamalara doğru yol yapımı
7	Proto Labs (1999)	Stereolitografi, SLS ve DMLS üretebilir
8	Stratasys (1988)	Tıbbi, otomotiv, havacılık ve eğitim pazarına yayıldı
9	SLE Solutions group AG	Almanya'da bulunan. Havacılık, otomotiv, tıp ve dişçilik ile araştırma ve eğitim alanlarına hizmet vermek
10	Voxeljet	Servisleri arasında dökümhaneler, otomotiv, ters mühendislik, havacılık, pompa ve ağır sanayi, mimarlık, sanat ve tasarım ile film ve müzeler yer almaktadır.
11	EOS GmbH	3D Polimer ve Metal SLS ve SLE tezgahları.

2.1.1 Toz Bazlı Fabrikasyon (TBF)

Toz Bazlı Fabrikasyonun (TBF) sınıflandırılması Şekil 2-1'de verilmiştir ve şematik modeli Şekil 2-2'te gösterilmektedir. Tozlar ana odaya bir hazne veya piston tabanlı odadan girer (Kruth ve diğ., 2007; Ruan ve diğ., 2006). Bundan sonra, ya bir merdane ya da silici bıçak kullanılarak alt tabakaya ya da daha önce işlenmiş katmanın üzerine yayılır (Roy ve Cullinan, 2015). Daha sonra lazer, katı bir geometri oluşturmak üzere tozları kaynatmak için seçici olarak tarar. Lazer kaynağının kullanıldığı bu ince toz seçimi, toplu tozları birlikte sinterlemek için

sıkıştırma kuvvetinin kullanıldığı geleneksel sinterleme işleminden farklıdır (Oghbaei ve Mirzaee, 2010; Witvrouw ve diğ., 2015).



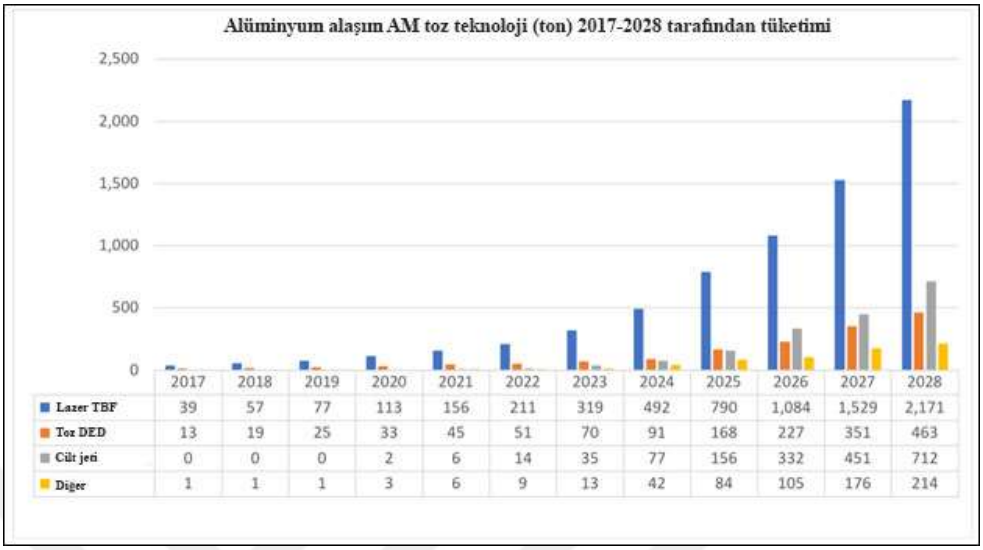
Şekil 2-2: SLS sürecinin şematik modeli.

Seçici Lazer Ergime (SLE), bir tarama bölgesi içindeki tüm toz parçacıklarını ergitmek için yüksek lazer gücü kullanır. Bu, herhangi bir bağlayıcı yapısal düzenleme gerektirmez. Parçalar genellikle geliştirilmiş mekanik ve mikroyapısal özellikler ile bulunur. Tablo 2-2, ticari SLE sistemleri üreten bazı Eİ şirketlerini listeler. Şekil 2-3, Eİ işlemlerinin farklı alanlarında Al alaşımlarının tüketiminin olası tahminini göstermektedir.

Tablo 2-2: Dünyanın önde gelen SLE üreticilerinden bazıları.

Üretici	Ülke	Ürünler	Hizmetleri
Arcam http://www.arcam.com/	İsveç, 1997	EBM donanım ve yazılım, malzeme ve toz işleme	Ortopedik, Havacılık vb.
3D Systems https://www.3dsystems.com/	İngiltere	3D yazıcılar için Metal, plastik, diş, döküm (balmumu) vb. Ayrıca malzeme sağlamak	Havacılık ve savunma, otomotiv, sağlık, diş, öğretim ve eğitim
SLE Solutions https://SLE-solutions.com/	Almanya, 2011	SLE ve vakum döküm plastik prototipler, yazılım ve hizmetleri için	Havacılık, havacılık, tıp ve diş hekimliği, takım, enerji ve otomotiv
EOS https://www.eos.info/en	Almanya, 1989	Yazıcılar için metaller (DMLS) ve plastik, yazılım ve Hizmetleri	Havacılık ve uzay, otomotiv, sanayi, tıp, takım, vb araştırma.
Concept Laser https://www.concept-laser.de	Almanya, 2000	Metaller için sağlar plastik vs. Çok lazer cusing ve büyük boy zarf oluşturmak	Havacılık ve uzay, otomotiv, Medikal, takı, kalıp ve diş
Renishaw http://www.renishaw.com/en	İngiltere, 1973	3D metal yazıcı, tarayıcı, malzeme, yazılım ve Hizmetleri	Havacılık ve uzay, otomotiv, Medikal, elektronik, ağır sanayi, bilimsel araştırma
DMG Mori https://en.dmgmori.com/		SLE, hibrid SLE makine birleştirmek torna ve freze	Çeşitli
Additive Industries https://additiveindustries.com/	Hollanda, 2015	MetalFAB1 birden fazla lazerler, ısıl işlem, otomatik yapı plaka işleme ve depolama	Çeşitli

Aspect http://aspect.jpn.com/english/index.html	Japonya	Metal 3D printerlere harcama maddeler, yazılım ve araştırma	Çeşitli
Farsoon http://www.lss-europe.com/en/	Çin	Metal 3D printerlere harcama maddeler, malzeme ve Hizmetleri	Çeşitli
Huake 3D https://en.industryarena.com/huake3d	Çin	Metal 3D printerlere harcama maddeler	Çeşitli
ITRI https://www.itri.org.tw/eng/index.aspx	Tayvan	Metal 3D printerlere harcama maddeler ve aksesuarları, yazılım ve hizmet	Tıp, araştırma ve diğerleri
Longyuan	Çin	Metal 3D printerlere harcama maddeler	
Matsuura	Japonya	DMLS, karma metal 3D printerlere harcama maddeler	Çeşitli
OPM Lab	Japonya	Metal 3D printerlere harcama maddeler	Çeşitli
Sisma http://www.sisma.com/eng/	İtalya	Metal 3D printerlere harcama maddeler	Sanayi, takı, diş vs.
Shining 3D http://en.shining3d.com/	Çin	Metal 3D yazıcılar, tarayıcılar, SLS, SLE, SLA	Çeşitli
Trumpf https://www.trumpf.com/en_IN/	Almanya	Metal fusion lazer ve metal birikimi lazer	Çeşitli
Markforged https://markforged.com/	ABD	3D baskı (sinterleme) ve metal enjeksiyon kalıplama, malzeme, yazılım,	Sanayi, ticari, otomotiv, havacılık, elektronik vs.

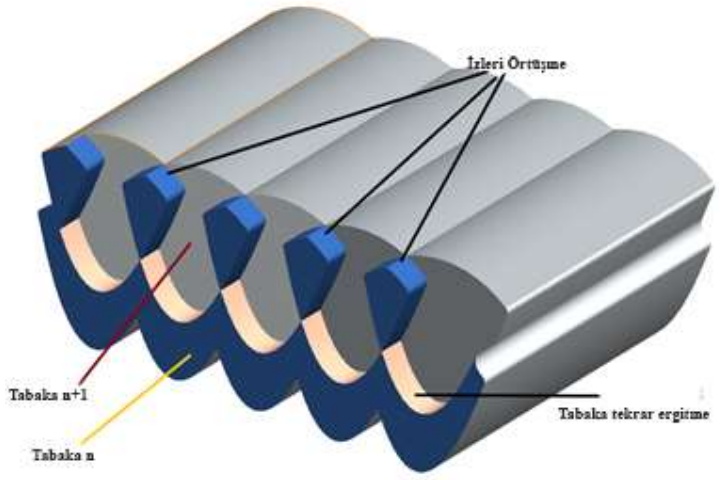


	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Lazer TBF	39	57	77	113	156	211	319	492	790	1,084	1,529	2,171
Toz DED	13	19	25	33	45	51	70	91	168	227	351	463
Cilt jeti	0	0	0	2	6	14	35	77	156	332	451	712
Diğer	1	1	1	3	6	9	13	42	84	105	176	214

Şekil 2-3: Eİ işlemlerinde Al alaşımları tüketiminde hava tahmini.

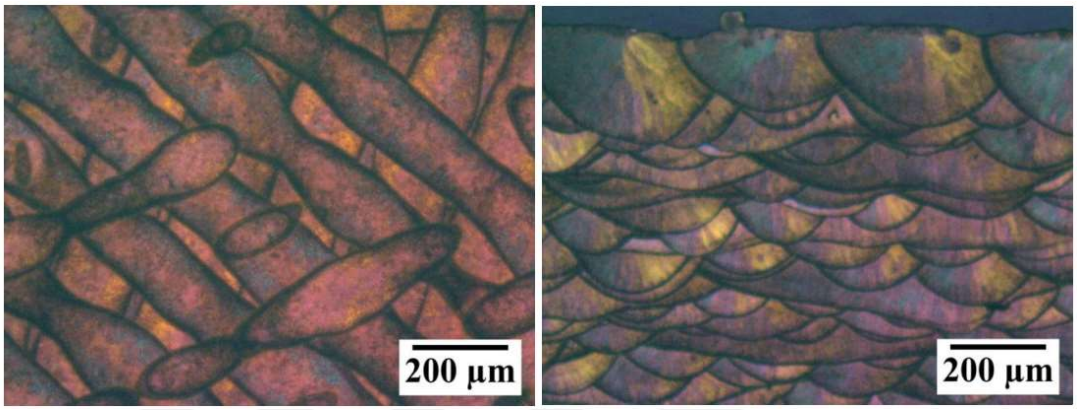
2.2 SLE'DE TOZ FÜZYON MEKANİZMASI

SLE işleminde izler ve tek tek tabakalar arasında güçlü metalik bir bağlanma elde etmek için, bitişik izler arasında örtüşme ve daha önce katılaşmış tabakaların kısmen yeniden ergitilmesi, Şekil 2-4'te gösterilen daha yüksek yoğunlaştırma için gereklidir (Hanzl ve Kroupa, 2015; Mohammadi, Ketabchi ve Kalaki, 2011; Su ve Yang, 2012; Yasa ve Deckers, 2011).



Şekil 2-4: SLE işleminde iz üstüste binme ve tekrar Ergimeyi gösteren şemalar.

Katman kalınlığını içeren işleme parametreleri, önceki katların tekrar Ergimesinde önemli bir rol oynar. Öte yandan, tarama parametreleri, bitişik tarama izleri arasındaki örtüşme derecesini belirler (Su ve Yang, 2012; Yan ve diğ., 2015).



(a) (b)

Şekil 2-5: As-AlSi10Mg olarak üretilmiş optik mikrograflar; platforma (a) paralel bir düzlem ve platforma (b) dik bir düzlem.

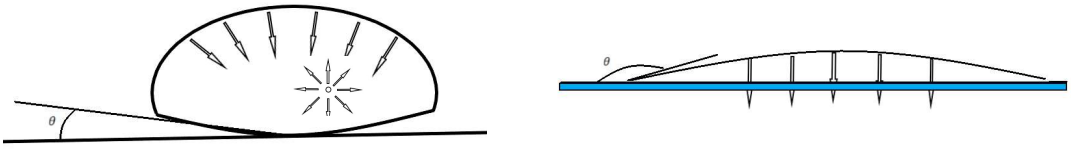
Lazer gücü ve tarama hızı, ergiyik havuz şeklini ve geometrik boyutunu güçlü şekilde etkiler (Kempen ve diğ., 2011). Yüksek özgül enerji, yüksek lazer güçleri düşük tarama hızlarında kullanıldığında ortaya çıkar. Öte yandan, düşük lazer gücü ile yüksek tarama hızları kullanıldığında düşük özgül enerji elde edilir. Spesifik enerji, birim alan başına lazer girişi olarak ölçülür (Maskery ve diğ., 2017). Ergiyik havuzu içindeki ve etrafındaki ısı dağılımı, temel olarak malzemeye ve fiziksel durumuna (toz, sıvı veya katı) bağlıdır. Yüksek enerji uygulaması, tozun fazla Ergimesine bağlı olarak büyük Ergime havuzu şekliyle sonuçlanırken, düşük özgül enerji, daha küçük boyutlu Ergime havuzları ile sonuçlanır (Olakanmi, 2008). Şekil 2-5, yapı boyunca ve tarama yönüne paralel yarı hilal ergimiş havuz şeklini göstermektedir.

Çelik, Nikel, Titanyum ve Alüminyum gibi farklı malzemeler ve bunların alaşımları için olaya özgü enerji ile ilgili daha önce birçok çalışma rapor edilmiştir (Aboulkhair ve diğ., 2015; Kempen ve diğ., 2012; Kuroda ve diğ., 1998; Thijs, Kempen, ve diğ., 2013; Vrancken ve diğ., 2012; Yasa ve diğ., 2010). İşlem enerjisi ayrıca, imal edilen yapıların genel yüzey pürüzlülüğünü ve yapısal bütünlüğünü de etkiler. Sadece bu değil, aynı zamanda toz kalitesi de nihai yüzeyde belirli bir değişiklik göstermektedir, çünkü tozlar zaman içinde malzemenin

kalitesini düşüren yüksek sıcaklıkta uzun süre maruz kaldıklarından ve hafif metaller ve polimerler arasında daha belirgin oldukları görülmüştür (Asgari ve diğ., 2017; Dotchev ve Yusoff, 2009; Schmid ve diğ., 2015; Shvab ve diğ., 2016). Ek olarak, toplanma, yüksek yüzey pürüzlülüğü ve anahtar deliği veya mikroyapısal gözeneklilikler gibi yüzey anormallikleri hakkında da birçok rapor belirtilmiştir (Senthilkumaran ve diğ., 2009a; Wohlers ve Caffrey, 2015).

2.2.1 Yüzey Gerilimi Etkileri

Yüzey gerilimi SLE'de önemli bir rol oynar. Sıvı parçacıklarının Ergime havuzundaki etkileşimi, katılaşmış tarama izinin son şeklini belirler (Shrestha ve Chou, 2017; Wudy ve diğ., 2014). Herhangi bir akışkan sisteminde, dış kuvvetin yokluğunda, bir kütle içindeki parçacık, Şekil 2-6(a) 'de gösterildiği gibi çekici moleküller arası kuvvetler nedeniyle her taraftan eşit olarak çekilir.



(a) (b)

Şekil 2-6: Yüzey geriliminin katılaşmış iz üzerindeki etkisi. (a) yüzey gerilimi çekici kuvveti aştığında, θ <90 (b) yüzey çekici kuvveti yüzey gerilimi aştığında, θ> 90.

Bununla birlikte, hava-sıvı ara yüzündeki parçacık sadece sıvı parçacık üzerinde bir gerilim oluşturan sıvıya doğru çekilir. Gerilim etkisini en aza indirmek için, çevresindeki sıvı, Şekil 2-6(a) (Davies, 2012; Haller, 1965)'de gösterildiği gibi daha kıvrımlı bir profile sahip olacak şekilde şekil değişikliğine uğrar. SLE işlemi, üç farklı maddenin, yani katı, sıvı ve gazın bir birleşimidir. Gözenekliliğin önlenmesi için, katı yüzeyin ergimiş sıvı ile ıslatılması şarttır (Oghbaei ve Mirzaee, 2010). Termodinamik olarak stabil bir statik sıvı damlasında, ıslanma, katı-sıvı ara yüz (γ_{sl}), sıvı-gaz ara yüz (γ_{lg}) ve Katı-gaz ara yüz (γ_{sg}) sisteminin yüzey gerilimi kullanılarak ölçülür ve şöyle tanımlanır;

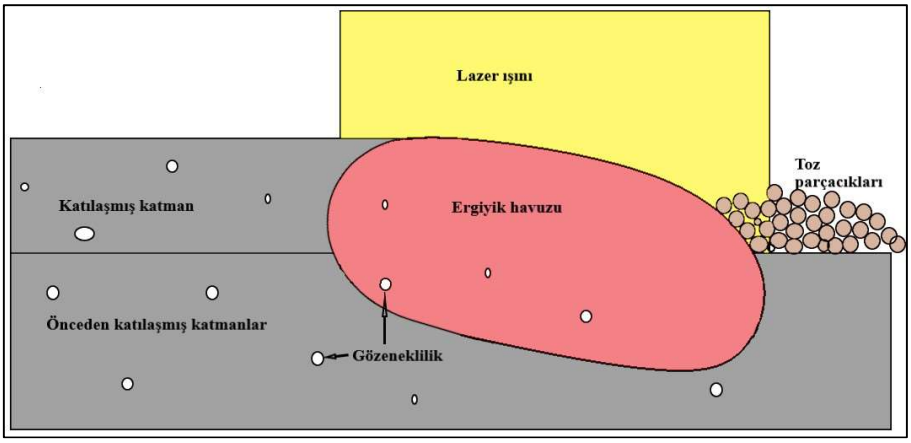
$$cos\theta = \frac{\gamma_{sg}-\gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (2\text{-}1)$$

2.2.2 Marangoni Konveksiyonu

Yüksek lazer hızında dik termal gradyan, ergimiş sıvının ergimiş bir havuz içinde radyal olarak akmasını sağlar ve bu olay Marangoni konveksiyonu olarak bilinir (Olakanmi ve diğ., 2015). Düşük çözünürlüğün Oksijen, Kükürt, Hidrojen, Selenyum ve Tellurium gibi elementlerin Ergimiş metal sıvı havuzunun yüzey gerilimini değiştirdiği bilinmektedir (Louvis ve diğ., 2011).

2.2.3 Nemin Etkisi

Al alaşım tozları, % 0.015 kütle miktarında su buharı içerir. H'nin ergimiş Al içindeki çözünürlüğü, nemdeki H yüzdesine kıyasla oldukça düşüktür. Katılaşma sırasında H fazlalığı çözünmez kalır ve yapıdaki gözeneklere ve çatlaklara yol açar. H kütle içeriğini azaltmak için ya yüksek sıcaklıkta bir fırında ısıtılır (aglomerasyonu önlemek için maksimum 200 ^{0}C) veya fiili taramadan önce nemi buharlaştırmak için düşük lazer gücünde önceden taranır. İkinci yaklaşım, SLE'li yapılarda H ile ilişkili gözenekliliğin azaltılmasında oldukça etkili bulunmuştur (Fulcher ve diğ., 2014; Weingarten ve diğ., 2015).

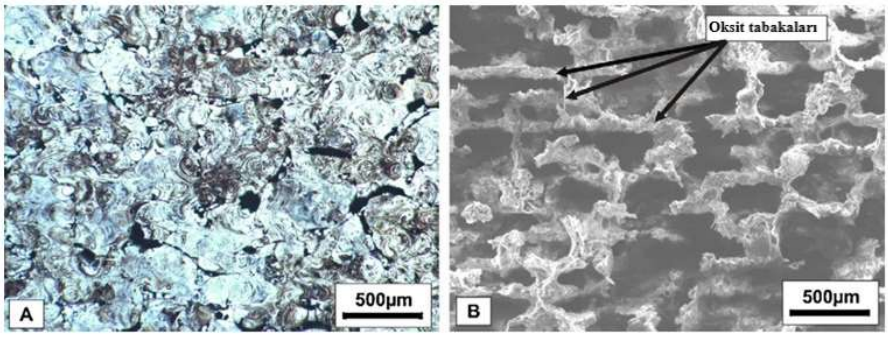


Şekil 2-7: Toz ile lazer etkileşiminin şematik genel görünümü (Weingarten ve diğ., 2015).

2.2.4 Oksijen Gazının Etkisi

Ergimiş metal içindeki oksijen, metal oksitler oluşturmak için yüksek sıcaklıkta metal ile reaksiyona girdiğinde yüzey gradyanını değiştirir. Metal oksitlerin varlığı, tarama izlerinin kenarlarında büyük ölçüde görülür. Gelen ışın, üst yüzeyde herhangi bir metal oksit mevcudiyetini önler ve sıvı karıÇması ayrıca alt yüzeyde oluşumlarını önler. Alumidlerin kırılması zor olduğu için Aluminyum ile olan durum oldukça zordur, fakat Al biraz oksijen konsantrasyonunda bile oksitler oluşturabilir. Alların Ergime noktası sadece 660 ^{0}C 'dir, burada oksitlerin kaynama noktası 2000 ^{0}C'yi geçmektedir. Bu nedenle, bu oksit tabakasını kırma ihtiyacı, sağlam Al alaşım parçaları elde etmede ilk adımdır.

En iyi kontrol edilen SLE ortamının bile %0,1-0,2 oranında oksijen içerdiği bilinmektedir. Bu nedenle, oksit filmlerinin özellikle Ergiyik havuzunun altından ve kenarlarından sıvı girişi için kırılması tercih edilir. Önceden katılaşmış katmanın tekrar eritilmesi, katmanın altındaki oksit filmlerini çıkarır. Kenarlardaki oksitler, Şekil 2-8'da gösterildiği gibi sürekli bir duvar veya küçük çatlaklar (alternatif tarama) formunda kalır. Doğru işlem parametreleri ve tarama modellerinin benimsenmesi, oksitle ilgili çatlakları büyük ölçüde Al alaşımlarında ortadan kaldırdığı gözlenmiştir (Aboulkhair ve diğ., 2014).



Şekil 2-8: 6061-örnek bir kesitin Optik ve TEM Mikrografları; (A) Keller'in reaktifleriyle parlatma ve dağlama işleminden sonra numune; (B) NaOH çözeltisi ile derin kazınmış (Louvis ve diğ., 2011).

2.2.5 Rayleigh İstikrarsızlığı

Tarama izinin stabilitesinin yüksek tarama hızı ile ağır etkilediği ve sonucun Marangoni Konveksiyonundan daha zarar verici olduğu görülmüştür (Gusarov ve diğ., 2007). Yüksek tarama hızının kullanılması, tarama izini dengesizleştiren bilye oluşumuna ve daha sonra taze toz tabakalarının döşenmesine yol açar. Yüksek hızlar, çok sayıda topun içine giren dar ve ergimiş bir iz ile sonuçlanır ve fenomen malzeme yüzey gerilimine bağlıdır (Rombouts ve diğ., 2006). Rayleigh'nin neredeyse silindir şeklindeki yüksek bir hızda ergimiş pistin kararsızlığı üzerine birçok çalışma yapılmıştır ve pist uzunluğuna 'l' ve çap 'd' ye bağlı olduğu bulunmuştur. l/d oranı 2,8-3,3'ün dışına düşüyorsa paslanmaz çelik için dengesiz bir şekil oluşuyor (Childs ve diğ., 2005). Diğerleri iz uzunluğunun stabilite sınırını π (Kruth ve diğ., 2007) ve 2.1 (Kruth ve diğ., 2003)'in altında buldu.

2.3 SLE AL ALAŞIMLARI

SLE sistemindeki Alüminyum alaşımları gibi yüksek oranda reaktif metal tozlarının kullanılması, çok fazla araştırma gerektiren zorlu bir iştir. Al tozlarının taşınmasındaki ana kaygılardan biri, bir hazne ve akış tüpleri içindeki akışkanlığını etkileyen nem etkisidir. Al tozu topaklaşması, düzensiz bir toz dağılımına neden olan toz düzenini engeller. Bu nedenle, tozlar kontrollü bir ortamda saklanır ve özel olarak tasarlanmış bir depolama tankında taşınır. Al tozlarının yüksek nem altında taranması, Bölüm **Error! Reference source not found.**'te tartışıldığı gibi Hidrojene bağlı gözeneklilik ile sonuçlanır. Bölüm **Error! Reference source not found.** ve **Error! Reference source not found.**'te tartışıldığı gibi oksijen seviyesinin varlığı, Al alaşımlarının SLE durumunda da iyi rapor edilmiştir (Louvis ve diğ., 2011; Montero Sistiaga ve diğ., 2016; Tang ve Pistorius, 2017).

SLE'nin başarısı, atmosfer ve parça konumlandırma kontrolü yanında doğru işleme ve malzeme parametrelerinin seçimi ile ilgilidir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama deseni, tarama ve katman kalınlığı gibi işleme parametreleri önemli bir rol oynamaktadır. Daha önce çeşitli Al alaşımları için daha yüksek yoğunlaştırma ve ulaşılabilir mekanik ve mikroyapısal özellikler elde etmek için uygun parametreler hakkında birkaç çalışma rapor edilmiştir. SLE bazlı AM'de kullanılan başlıca metallerin bazıları Tablo 2-3'te verilmiştir.

Tablo 2-3: SLE ile işlenen bazı genel metallerin listesi.

Malzemeleri	Özellikleri	Uygulama
AlSi10Mg, AlSi10Mg/2000C	İyi termal özellikler, yüksek ağırlık / ağırlık oranı ve yüksek dinamik özellikler	Fonksiyonel prototip, Havacılık ve uzay İçişleri, savunma, otomotiv vb için uygundur (Atzeni ve Salmi, 2012; Cabrini ve diğ., 2016; Tomlin ve Meyer, 2011)
Ti6Al4V, Ti6Al4V/ELI	İyi korozyon direnci ve yüksek saflıkta yüksek güç / yoğunluk	Fonksiyonel prototipler, biyomedikal implantlar, Havacılık ve Uzay vb. İçin uygundur (Arie ve diğ., 2018; Hendrickson ve diğ., 2017; Nouri ve diğ., 2011)
Maraging çelik MS1	Kolayca işlenebilir, yaşla sertleştirilebilir ve iyi termal iletkenlik.	Takımlama, seri üretim ve diğer mekanik uygulamalar için uygundur (Yasa ve diğ., 2010).
Kobalt krom (CoCrMo) – MP1, SP2	Yüksek mukavemet ve korozyon direnci. Sıcaklıkla geliştirilmiş mekanik özellikler	Yüksek sıcaklık mühendisliği ve biyomedikal uygulamalar için uygundur (Wu ve diğ., 2014; Zhou ve diğ., 2015; Zhou ve diğ., 2015).
Nikel alaşımlar IN625, HX, 738, 718	Oksidasyon dahil, ısı ve korozyon direnci. İyi ısıl işlem ve işlenebilir özellikler ile yüksek gerilme, sürünme ve kopma mukavemeti	Yüksek sıcaklıkta çalışma ve oksidasyon direnci gerektiren çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygundur. Ayrıca Havacılık, tamir ve fonksiyonel prototipler sunmaktadır (Shvab ve diğ., 2016)
Paslanmaz çelik CX, GP1, PH1, 316L	Yüksek süneklik, mükemmel korozyon direnci, kolay sertleşebilir vs.	Saat ve takı yapımı, otomotiv, havacılık ve gıda ve kimyasal tesisler için uygundur (Liu ve diğ., 2017; Sarkar ve diğ., 2017; Xie ve diğ., 2013).

Terminoloji, yani işlem parametrelerinin seçimi ile ilişkili özgül ısı, ışınlanmış bölgedeki indüklenen ısının etkisini ölçmek için sıklıkla belirtilir ve aşağıdaki şekilde verilir;

$$\psi = p/vdh \quad (2\text{-}2)$$

p lazer gücü ise, v tarama hızıdır, d katman kalınlığıdır ve h bitişik tarama izi arasındaki tarama boşluğudur. Spesifik ısıya bağlı parça özelliklerindeki farklılık Tablo 2-4'te gösterilmektedir.

Bu bölüm, parametre ile ilgili proses kontrolünde yapılan katkıyı kısaca vurgulamaktadır. Bu, parçaları optimize etmek için basit bir yaklaşım olmasına rağmen, son işlemenin yanı sıra, çoğunlukla kişisel deneyim ve kullanıcıların farkındalığına da bağlıdır. Prosesle ilgili kriterler çoğunlukla SLE ile test edilen tüm materyaller için benzerdir, bu nedenle, Al alaşımlarının işlenmesiyle ilgili geniş bir tablo sağlamak için, diğer materyallerin PBF'sinden örnekler de bu bölüme dahil edilmiştir. Tablo 2-3, SLE sistemindeki çeşitli işlem ve malzeme ile ilgili parametrelerin kategorilerini açıklamıştır.

Tablo 2-4: Farklı spesifik sıcaklıklarda parça özellikleri.

Düşük özgül ısı	Eşik değeri	Yüksek özgül ısı
Düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızı	Optimal lazer gücü ve tarama hızı	Yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı
Zayıf mekanik ve mikroyapısal özellikler	Ulaşılabilir mekanik ve mikroyapısal özellikler	Zayıf mekanik ve mikroyapısal özellikler
Düşük yoğunlaştırma	Yüksek yoğunlaştırma	Düşük yoğunlaştırma
Anahtar deliği tipi gözeneklilik	Daha az gözeneklilik	Metalurji tipi gözeneklilik
Kaynaşmayan tozlar nedeniyle gözeneklilik		Gaz sıkışmasına bağlı porozite

2.3.1 Yoğunlaştırma

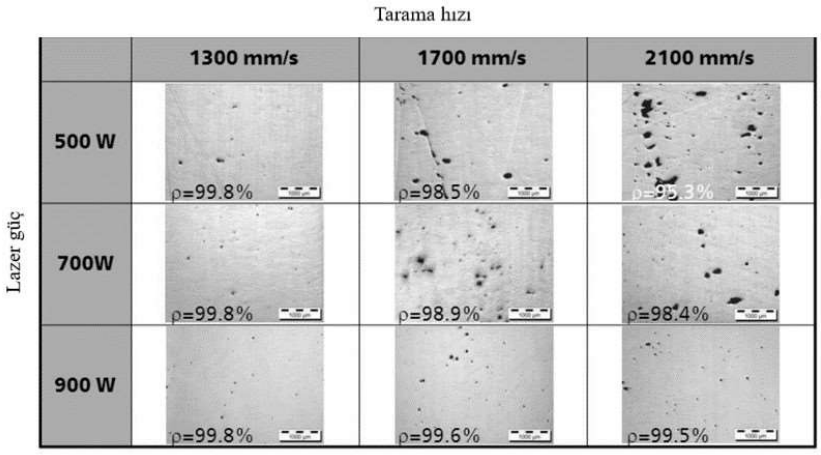
SLE'de yoğunlaşma, geleneksel yöntemlere yakın veya daha iyi özelliklerle art arda gözeneksiz yapılar elde etmeyi ifade etmektedir. Al alaşımları ve diğer malzemeler için SLE işlemi kullanılarak %99'dan fazla malzeme yoğunluğu elde edildiğine dair literatür bilgileri bulunmaktadır (Aboulkhair ve diğ., 2014; Bourell ve diğ., 2017; Buchbinder ve diğ., 2011; Kempen ve diğ., 2011; Zhang ve diğ., 2013). Yoğunluk doğrudan ilgili gözeneklilikten etkilenir (Zhang ve diğ., 2012);

- Katılaşma sırasında gaz tutma
- Toz parçacıklarının eksik Ergimesi (Kobryn ve diğ., 2000; Panwisawas ve diğ., 2015).

Ayrıca, yüksek hızda Ergiyik havuz yolu, yüksek yüzey gerilimi nedeniyle dengesizleşir ve top tipi topografyaya neden olur (Gu ve diğ., 2012).

Table 2-5: SLE sürecinde kategorik veri işleme ve malzeme parametreleri (Aboulkhair ve diğ., 2014).

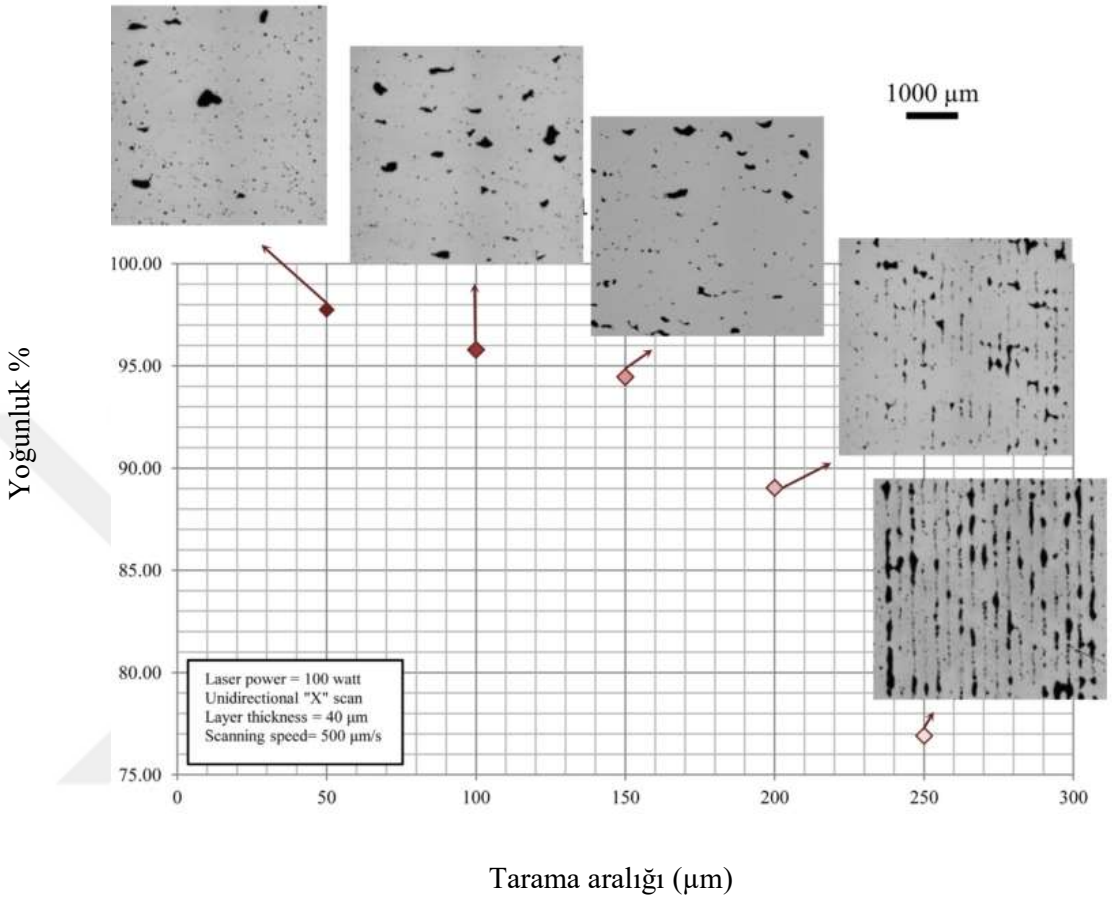
İşlem parametreleri			
İlgili lazer	İlgili tarama	Toz ile ilgili	Sıcaklık ile ilgili
Güç	Hızlı tarama	Partikül büyüklüğü	Oda sıcaklığı
Nokta boyutu	Tarama aralığı	Şekil ve dağıtım	Toz besleyici sıcaklık
Darbe süresi	Tarama deseni	Toz yatak yoğunluğu	Sıcaklık homojenlik
Darbe frekansını		Katman kalınlığı	
		Malzeme özellikleri	



Şekil 2-9: Lazer gücü ve tarama hızının yoğunlaşmaya etkisi (Buchbinder ve diğ., 2011).

Öte yandan, yavaş tarama hızı toz parçacıklarının tamamen Ergimesini sağlamasına rağmen, aynı zamanda AlSi10Mg ve diğer Al alaşımlarında olduğu gibi düşük Ergime noktalı alaşımların anahtar elemanlarını buharlaştırır (Li ve diğ., 2017). Bu ayrıca işlenen örnekte mukavemetini düşürmenin yanı sıra gözeneklilik yaratır.

Tarama hızına bağlı olarak, iki tür gözeneklilik ortaya çıkar; bunlar metalurji ve anahtar deliği gözenekliliği (Tablo 2-4). Metalurjik gözenekler, sıkışan gazların kaçmasından dolayı düşük tarama hızında meydana gelir. Küçük ve küresel morfoloji ile çok sayıda ortaya çıkarlar. Anahtar Deliği Gözenekleri, diğer taraftan, yüksek tarama hızlarının sonucudur ve çoğunlukla eksik toz eritmeye bağlanır. Şeklinde düzensizdirler ve boyutları daha büyüktür (Bose ve German, 1988; Kasperovich ve Hausmann, 2015).



Şekil 2-10: Kuluçkalamanın yoğunlaşmaya etkisi (Aboulkhair ve diğ., 2014).

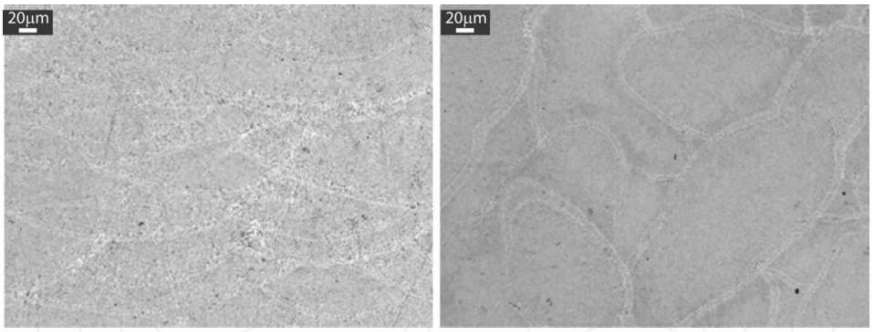
Tarama alanı, tarama düzeni ve katman kalınlığı gibi faktörler de parça yoğunluğunu etkiler. Tarama izlerinin üst üste binmesi, genellikle iz füzyonu için uygulanır (Şekil 2-10). Büyük tarama alanının gözenekliliğin artmasına neden olduğu yerlerde, düşşük tarama alanı büyük Isı Etkilenen Bölgelere (HAZ) neden olur (Aboulkhair ve diğ., 2014; Calignano ve diğ., 2013; Ning ve diğ., 2005; Wang ve diğ., 2007). Kat konsolidasyonu için önceden katılaşmış katmanların tamamen Ergimesini ve kısmen Ergimesini sağlamak için daha düşük katman kalınlığı uygulanır. Aynı zamanda, gaz tutma ve gözlenmemiş toz parçacıklarının varlığından kaynaklanan gözenekleri yok etmek için tabaka kalınlığının aşağısına kadar eşit ısı dağılımının sağlanması için seçilmiştir (Savalani ve Pizarro, 2016; Trevisan ve diğ., 2017).

Kalıntı stres, SLEed yapılarında ciddi düzensizliklerin ana nedenidir. Buna ek olarak, işlenmiş parçalardaki anizotropi mekanik dayanımda tek biçimliliği etkiler (Kok ve diğ., 2017). Yukarıdaki zorlukların üstesinden gelmek için çalışmalar yapılır ve arzu yoğunlaşması ve

mekanik dayanım elde etmek için tarama düzenleri değiştirilir (Kudzal ve diğ., 2017; Song ve Koenig, 1997). Ada desenleri ve alternatif tarama uygulamalarındaki küçük tarama izlerinin, son kısımlarda kalıntı stresi ve anizotropiyi azalttığı bulunmuştur (Aboulkhair ve diğ., 2014; Trevisan ve diğ., 2017). Ayrıca, düşük lazer gücünde ön taramanın toz paketleme yoğunluğunu arttırdığı ve nem içeriğini azalttığı ve ayrıca Al alaşımlarında% 99 yoğunluğa neden olduğu bulundu. Sıcak izostatik presleme ve post ısıl işlemler, imal edilmiş SLE yapılarında gözenekleri azaltmak için mükemmel işlem sonrası stratejileridir (Das, 1999).

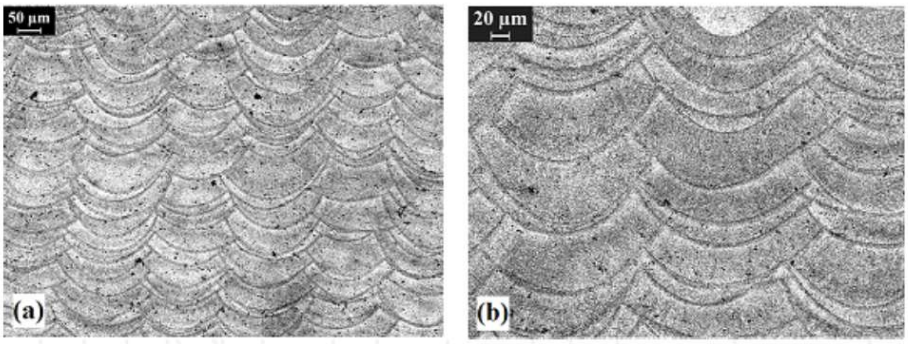
2.3.2 Mikroyapı

SLE'de işlenen malzemeler, Ergime havuzu davranışını derinden etkileyebilecek 10^6 - 10^8 K/s derecesinde çok yüksek soğutma hızları yaşayabilir. Bu soğutma oranlarında difüzyona dayalı katı hal faz dönüşümü tamamen baskılanabilir. Ayrıca, aşırı doymuş çözeltilerin, denge dışı fazların ve çok az elementel ayrışmalara sahip aşırı ince mikro yapıların oluşumu mümkün olabilmektedir (Yazdian ve diğ., 2010; Zhao ve diğ., 2011).



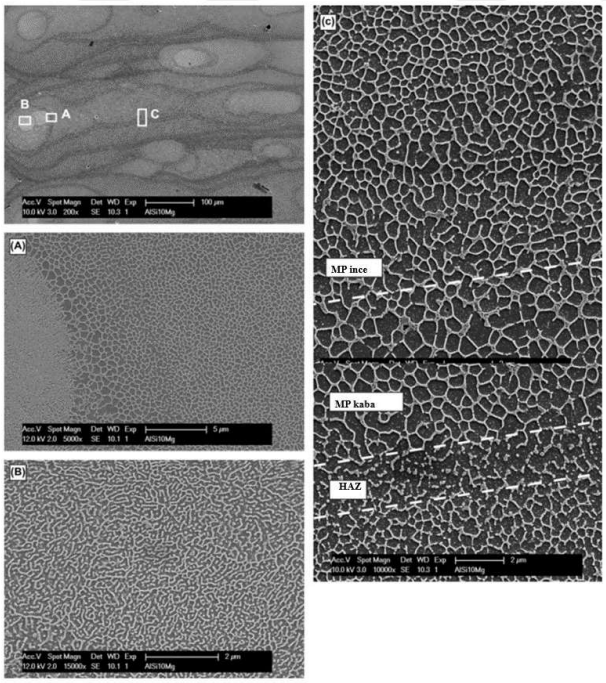
Şekil 2-11: Su reaktifinde HF ile aşındırma işleminden sonra AlSi10Mg'nin Z ve XY doğrultusundaki mikro yapısı (Sağ) (Calignano ve diğ., 2013; Manfredi ve diğ., 2014).

Şekil 2-11, imalat yönü boyunca ve toz biriktirme düzlemine paralel optik görüntüleri göstermektedir. Ergime havuzunun geometrisi, alternatif tarama desenlerinin (67^0) uygulanması nedeniyle (Hauser ve diğ., 2004) şeklinde hilal ve düzensiz olarak görünmüştür. Tek yönlü veya iki yönlü tarama düzenleri durumunda, Şekil 2-12'te gösterildiği gibi düzenli hilal şekilleri gözlenir. Şekil 2-13'teki Ergiyik havuzu yapısı, SLE makinesinde AlSi10Mg'nin iki yönlü taramasından sonra elde edildi.



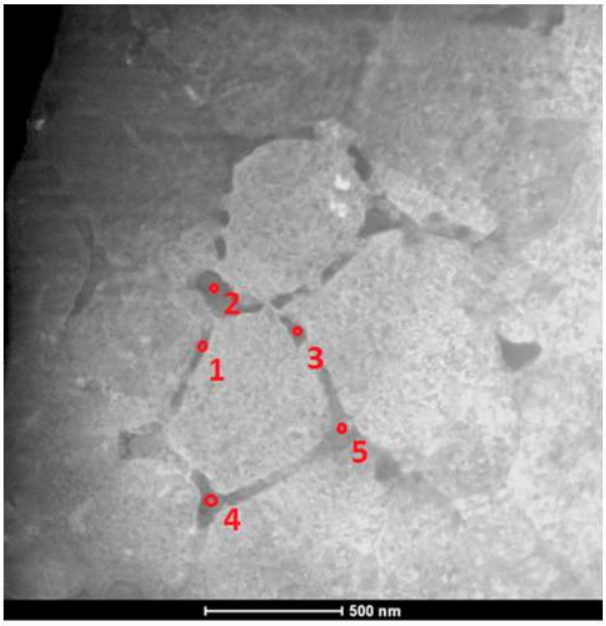
Şekil 2-12: İmalat yönü boyunca AlSi10Mg numunelerinin optik mikrografları (Manfredi ve diğ., 2013).

A, B, C bölgelerinin mikro yapısı Şekil 2-13 (c) 'te büyütülmüş olarak gösterilmiştir. TEM analizi, merkezi bölgede a-Al matrisinin varlığını ve tane sınırı bölgesinde çubuk benzeri lifli Si yapısının varlığını gösterir.



Şekil 2-13: Daha fazla çoğaltılan A, B, C bölgelerini gösteren TEM kullanılarak SLE tarafından bir AlSi10Mg'nin üstten görüntüsünün mikro yapısı. İki yönlü taramaya sahip bir bölgenin ince, kaba ve HAZ bölgesini gösteren C Bölgesi (Thijs ve diğ., 2013).

Sırasıyla, matris ve tane sınır bölgesindeki Al ve Si hücrelerinin ağları, Ergiyik havuzu sınırına yakın Si parçacıklarının fazla yayılmasından dolayı bitişik HAZ bölgeleri hariç tüm Ergiyik havuzu bölgesinde süreklilikte bulunmuştur. Bu, Si morfolojisini ve görünümlerini idiyomorfik kristaller şeklinde ortaya koyar (Thijs ve diğ., 2013).



Şekil 2-14: Numunelerin TEM görüntüleri (Lam ve diğ., 2015).

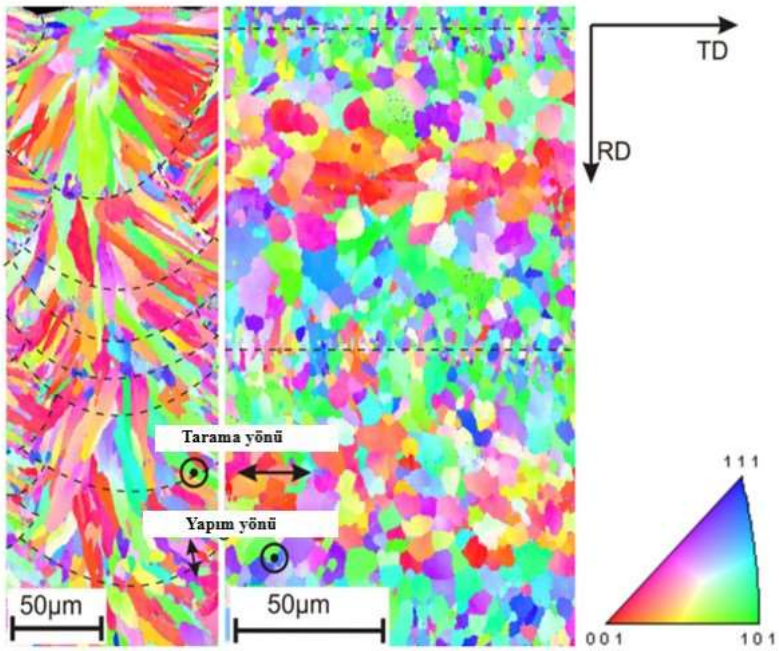
Dengesiz SLE süreci, tane boyutlarını ve faz oluşumunu daha da değiştiren katı çözünürlük sınırını değiştiren daha yüksek bir katılaşma oranı sunar (Gu ve Shen, 2007). Hızlı katılaşma, toplam Si Si sayısında azalma ile sonuçlanan diğer Si partikülleri ile birleştiği yerde, tanecik sınırındaki Si parçacıklarının ayrılmasını teşvik eder. Aynı zamanda, Si'nin Al içindeki katı çözünürlüğü artar, süper doygun bir çözelti ile sonuçlanır. Çözünürlük, daha yüksek soğutma oranlarını teşvik ederek değişen işleme parametreleriyle daha da arttırılabilir (Şekil 2-14 ve Tablo 2-6) (Lam ve diğ., 2015; Rao ve diğ., 2016).

Tablo 2-6: Olarak verilen örneklerin TEM-EDS sonuçları Şekil 2-14 (Lam ve diğ., 2015).

	Element	Weight %	Atomic %
Point 1	Mg (K)	1.03	1.19
	Al (K)	10.84	11.22
	Si (K)	88.11	87.58
Point 2	Mg (K)	0.41	0.47
	Al (K)	12.55	12.99
	Si (K	87.02	86.52
Point 3	Mg (K)	2.16	2.48
	Al (K)	11.18	11.54
	Si (K	86.65	85.96
Point 4	Mg (K)	1.67	1.92
	Al (K)	5.98	6.19
	Si (K	92.34	91.87
Point 5	Mg (K)	0.0	0.0
	Al (K)	41.03	42.00
	Si (K	58.99	57.99

2.3.3 Kristalografik Doku

SLE'deki hızlı soğutma hızları ve yönlü katılaşma kristalografik dokuyu etkiler. Soğutma aşamasında katılaşma cephesindeki hızlı çekirdeklenme, epitaksiyel tane büyümesine yol açar. Sütunlu tahıl ilerlemesinin rekabetçi doğası, tahılı maksimum termal gradyan boyunca yönlendirir. Ergiyik havuzu yüzeyindeki yüksek sıcaklık, Şekil 2-15'da gösterildiği gibi ekinlenmiş tahıl yapısına yol açar. Doku ve etkileri, biriktirme sırasındaki tarama yönü değiştirilerek bir şekilde kontrol edilebilir.



Şekil 2-15: EBSD yönlendirmesi, SLE AlSi10Mg parçasının iki dik görünümünde eşlenir (Thijs ve diğ., 2013).

2.3.4 Mekanik Özellikler

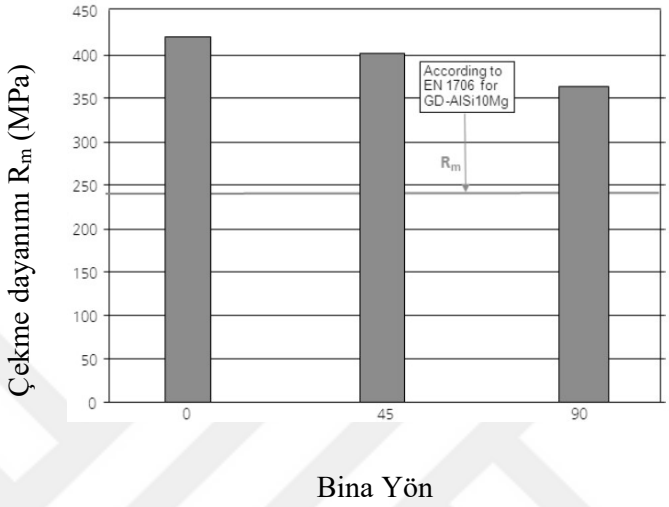
Mekanik özellik, herhangi bir üretim sisteminde ana amaçtır. SLE'de, işleme ve malzeme parametrelerinin seçimi istenen mekanik özelliklere karar verir (Frazier, 2014). SLE'deki yüksek katılaşma oranı, ultra ince tanecik yapısına yol açar ve gücü, olarak tanımlanan Hall-Petch denklemi kullanılarak ölçülür.

$$\sigma_Y = \sigma_0 + k(d)^{-\frac{1}{2}} \tag{2-3}$$

σ_Y'nin akma dayanımı için olduğu durumlarda, σ_0 çıkık için gerekli olan stres içindir, k güçlendirme sabitidir ve '*d*' tane büyüklüğüdür (Vrancken ve diğ., 2012). Son derece ince taneli yapılar, esasen SLE bileşeninin gücünden sorumlu olan yer değiştirme hareketini önler (Ma ve diğ., 2014).

SLE'deki sertlik, geleneksel olarak üretilen parçalardan daha iyi bir yol kaydetti (Feuerhahn ve diğ., 2013; Thijs ve diğ., 2013). Ek olarak, tarama alanının yoğunluğunu önemli ölçüde

etkilemesine rağmen parçaların sertliği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı bulunmuştur (Calignano ve diğ., 2013).



Şekil 2-16: Yapı yönü boyunca çekme dayanımı.

SLE'deki imalat yönü, parçanın gücünü etkiler ve yapıda anizotropiye yol açar (Şekil 2-16). Neredeyse tüm mekanik özelliklerin, XY düzlemi boyunca inşa edilmiş ve ısıl işlem görmüş numunelerde daha iyi olduğu gözlendi. Kısa tarama vektörünün (ada tarama modeli) benimsenmesi, yapıdaki anizotropiyi büyük ölçüde azaltır (Buchbinder ve diğ., 2011; Fulcher ve diğ., 2014; Lam ve diğ., 2015; Louvis ve diğ., 2011; Manfredi ve diğ., 2013; Maskery ve diğ., 2015).

Alüminyum Matris kompozitlerinin (AMC) üretiminde Al alaşımlarında güçlendirici partiküllerin eklenmesi de son zamanlarda güçlü bir tanıma kazanmaktadır. Bunun nedeni düşük yoğunlukları ve daha yüksek özgül mukavemetleri ve aşınma, sürtünme, yağlama ve nispi hareketteki yüzeyleri etkileşime sokma ile ilgili diğer özellikler gibi daha iyi tribolojik özellikleridir (Baradeswaran ve Elaya Perumal, 2013; Dadbakhsh ve Hao, 2012; Lorusso ve diğ., 2016; Peng ve diğ., 2016).

2.3.5 Ön Isıl İşlem Ve Sonrası

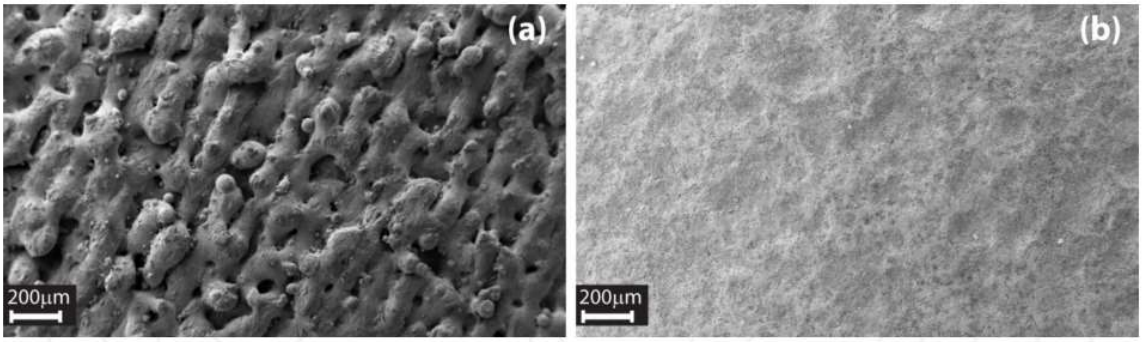
SLM'deki dik ısıl gradyanlar ve büyük artık gerilmeler yapı içinde çeşitli anormallikler doğurur. Bu nedenle, kalıtsal kusurların üstesinden gelmek ve mekanik ve mikroyapısal performansı

artırmak için ısıl işlem sonrası uygulanır (Hussein ve diğ., 2013; Knowles ve diğ., 2012; Zaeh ve Ott, 2011). Isıl işlem sonrası artışların gözenekler ve çatlaklar doldurduğu yerlerde, ön ısıl işlem nemi ve diğer gaz halindeki maddeleri alarak sıvı akışkanlığını arttırır (Atzeni ve Salmi, 2012; Mertens ve diğ., 2015; Mower ve Long, 2016).

Yapısal olarak, Al-Si alaşımlarının sertliğini arttıran Al'da Si'nin çözünürlüğünün daha yüksek olduğu bulunmuştur. Isıl işlem sonrası numuneler Si partikülünün Al matrisinden ayrıldığını ve mevcut diğer Si partikülleriyle tane sınır bölgesinde yerleştiğini gördü (Cabrini ve diğ., 2016a; Cabrini ve diğ., 2016b; Nie ve Muddle, 2001). Bu, Mg2Si çökeltisinin oluşumu nedeniyle SLMed yapılarının esnek karakterini sertlikten ödün vermeden geliştirir (Aboulkhair ve diğ., 2016; Li ve diğ., 2016). Si partiküllerinin kalınlaştırılması, Al-Si alaşımlarını daha yüksek aşındırıcı saldırılara maruz bırakabilir, bu nedenle işlenen parçalara ısıl işlem miktarı vermede önlemler alınması gerekir (Osório ve diğ., 2008). Bununla birlikte, genel mekanik performans inşa edilen yapılara kıyasla önemli ölçüde iyileşmiştir (Brandl ve diğ., 2012; Rosenthal ve diğ., 2014, 2015).

2.3.6 Yüzey Pürüzlülüğü ve Korozyon

As-SLE parçasının yüzey kalitesi, yüksek kalitenin tercih edildiği birçok uygulama için oldukça kabadır. Böyle bir tedavide, yüzey, yüzeydeki düzensizlikleri gidermek için yüzeye doğru küçük cam topların hızlandırıldığı atışla çekme yöntemlerine tabi tutulur (AlMangour ve Yang, 2016). Topa vurma işleminin hızlı zinciri, yüzeyde çekme yükü sırasında herhangi bir çatlak ilerlemesini sınırlayan belli bir derinliğe kadar baskı gerilmesi sağlar. Şekil 2-17, bir atış çekme işleminin SLEed parçanın yüzeyine yapabileceği farkı göstermektedir. Püskürtme kalıntısı alanlarının derinliğini iyileştirmek için atışla çekme yöntemi dikkatle optimize edilebilir (Calignano ve diğ., 2013; Manfredi ve diğ., 2013; Manfredi ve diğ., 2014; Salmi ve diğ., 2017).



Şekil 2-17: Yüzey pürüzlülüğünün FESEM görüntüleri, (a) Ra = 23 µm ile numune, (b) 8 bar'da ateşlemeden sonra numune (Manfredi ve diğ., 2013).

2.3.7 Alüminyum Alaşımları Üzerindeki Nadir Toprak Metal Etkisi

Geleneksel imalatta nadir alaşımların nadir toprak metalleri ile eklendiği ve sonuçların oldukça tatmin edici olduğu görülmüştür. Örneğin, Al'a Sc'nin eklenmesi, kafes zorlanmasına neden olan Al_3Sc çökeltisinin oluşmasına neden olur ve böylece çalışma sırasında yer değiştirme hareketini önler. Bu, Al-Sc alaşımlarında yüksek sertlik, % 100'e yakın yoğunlaşma ve anizotropiyi azaltma ile sonuçlanır. Zr, Sc gibi çalışır ve Al_3Zr'nin oluşumu, tahıl büyümesini sınırlar ve mekanik mukavemeti arttırır (Ahmad, 2003; Bose ve German, 1989; Fujii ve diğ., 2003; Rogal ve diğ., 2013; Schmidtke ve diğ., 2011; Spierings ve diğ., 2016; Yingjun ve diğ., 2005). Al alaşımlarındaki Ce ayrıca sertlik, çekme dayanımı, süneklik gibi çeşitli mekanik özellikleri de arttırır, çünkü Ce ilavesi ötektik sıcaklığı azaltır ve yüksek akışkanlık sağlar. Dahası, Ce, tıpkı Sc gibi tahıl yapısını iyileştirir (Ahmad ve Asmael, 2016; Tsai ve diğ., 2011; Vijayan ve Narayan Prabhu, 2015; Vončina ve diğ., 2010, 2011).

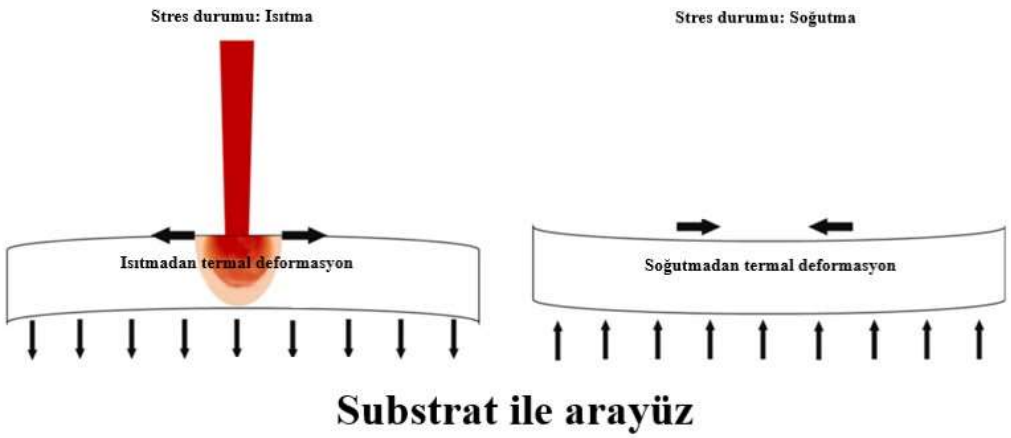
2.4 ÇIKINTI YÜZEYLERİ VE YATAY OLARAK OLUŞTURULMUŞ DAİRESEL PROFİLLER

Çıkıntı yapıları, bazı durumlarda kaçınılmaz olan birçok karmaşık yapının önemli parçalarıdır. Çıkıntılı yüzeylerin arızalara eğilimli olduğu yerlerde yapısal destekler gerekir. Destek yapılarının kullanımı, bu süreçte SLM'de karmaşık özelliklere sahip olmak için tolere edilmek için sıkıntı yaratan, ekstra iş sonrası, ekstra maliyet, malzeme ve zaman vb. Fiyatlarındaki yüzeyi aşmak için denge sağlar (Clijsters ve diğ., 2012; Wang ve diğ., 2013). Zamandan tasarruf

etmek ve iş sonrası muameleyi en aza indirmek için çıkıntı için destek yapılarının tasarlanmasında (Jhabvala ve diğ., 2012; Sundar ve diğ., 2014) ve parçaların kolayca çıkarılması ve malzeme tasarrufu için yeni destek profilleri tasarlanmasında çeşitli çalışmalar bildirilmiştir (Hussein ve diğ., 2013; Strano ve diğ., 2013). Özel tarama desenleri (Mohanty ve Hattel, 2016) ve değişen işlem parametreleri (Patterson ve diğ., 2017), destekleri olan veya olmayan tasarımlarında büyük ölçüde araştırılan diğer iki ana alandır. Küçük dairesel yatay profillerle ilgili problemlerde, eğik veya çıkma açısı, sadece birkaç yazar tarafından tartışılmıştır (Dana ve diğ., 2016; M. Cloots ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2013).

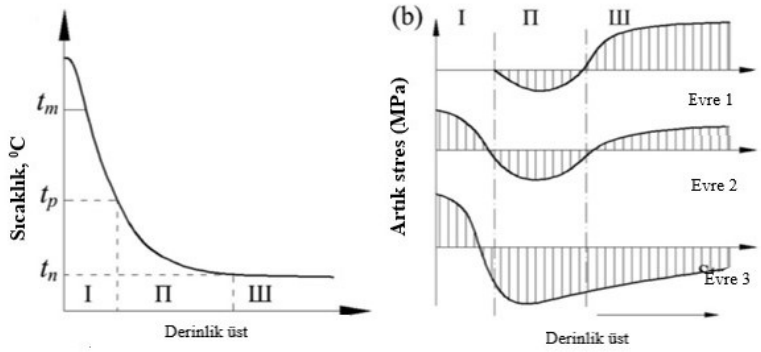
2.4.1 Artık Gerilmeler

SLE sürecinde geliştirilen artık gerilmeler işleyen parçalara ve yapısal bütünlüğe zarar vermektedir. Bu, cüruf oluşumu, çözgü, merdiven etkisi, zayıf yüzey kalitesi, gözeneklilik, stres gradyanı (Şekil 2-18) veya hatta yapının tamamen başarısızlığı gibi çıkıntı yüzeylerinde ciddi anormallikleri ortaya çıkarır (Fox ve diğ., 2016; Mugwagwaa ve diğ., 2018; Osakada ve Shiomi, 2006; Santos ve diğ., 2006; Wang ve diğ., 2013).

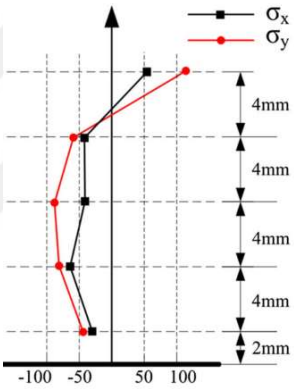


Şekil 2-18: Tek katmanlardaki gerilme gradyanları (Salmi ve diğ., 2017).

Kalıntı gerilmenin ana nedeni, dik termal gradyanlar ve yapılarda sertleşme etkileri sağlayan hızlı termal çevrimlerdir (Şekil 2-19).



Şekil 2-19: Bina yönü boyunca sıcaklık ve artık gerilme dağılımı (Salmi ve diğ., 2017).



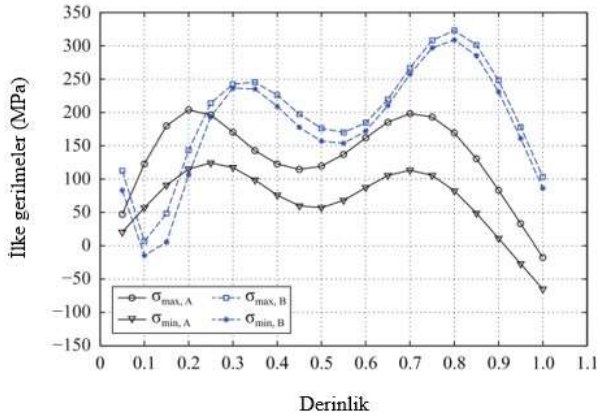
Şekil 2-20: Bina yönü boyunca kalan gerilmeler (Salmi ve diğ., 2017).

Katılaşma işlemi, sabit taban plakasının (Salmi ve diğ., 2017) yakınındaki katmanda (katman 1) gerilimi indükler. Üstteki yeni katmanların taranması, katman 1'in plastikliğini aşıyor. Bu, çekme gerginliğini, sıkıştırma gerilmesi ile değiştiriyor. Daha sonra yeni katmanların eklenmesi, katman 1'deki sıkıştırma gerginliğini daha da arttırır. Bununla birlikte, net döngüsel gerilme, termal döngülerde ısı birikimine bağlı olarak, bina doğrultusu boyunca katmanlarda net sıkıştırma gerilimi azalır. Bu müteakiben yapılmış katmanlardaki termal gradyanı azaltır. Daha fazla katman eklendikçe, üst katmanlardaki gerilmeler gerilir. Şekil 2-20, yapım doğrultusu boyunca kalıntı gerilmenin gelişimini şematik olarak göstermektedir (Liu ve diğ., 2016).

Taranan bölgede kalan gerilme, uzun izlerde daha yüksek bulundu ve enlemesine göre daha uzunlamasına yönde ölçüldü (Gusarov ve diğ., 2011). Kalıntı gerilmelerin ölçümü, yüksek lokalize sıcaklıklardan dolayı zor bir iştir. Stresleri hafifletmek için bazı çözümler önerilmiştir

(Cheng ve diğ., 2016; Kruth ve diğ., 2012), Colegrove ve diğ. (Colegrove ve diğ., 2017), birikme stresini azaltmak için silindirleri kullanan bir toplu deformasyon yöntemini benimsemiştir.

Işınlanmış bölgeden ısı dağılımı, ısı kaçışının altında yatan yüzeye dayanır. A. Salmi ve ark. (Salmi ve diğ., 2017), doğrudan substrat üzerine inşa edilen numuneler (Numune A), Şekil 2-21'de gösterildiği gibi destek yapıları (Numune B) üzerine inşa edilmiş numunelere kıyasla daha az artık stres ve daha az termal gradyan oluşturma eğilimindedir. Ayrıca yapıdaki kalıntı gerilmeleri azaltmak için başka etkili yöntemler olduğu bulunmuştur (Franchim ve diğ., 2009; Niku-Lari, 1987; Sanz ve Navas, 2013).



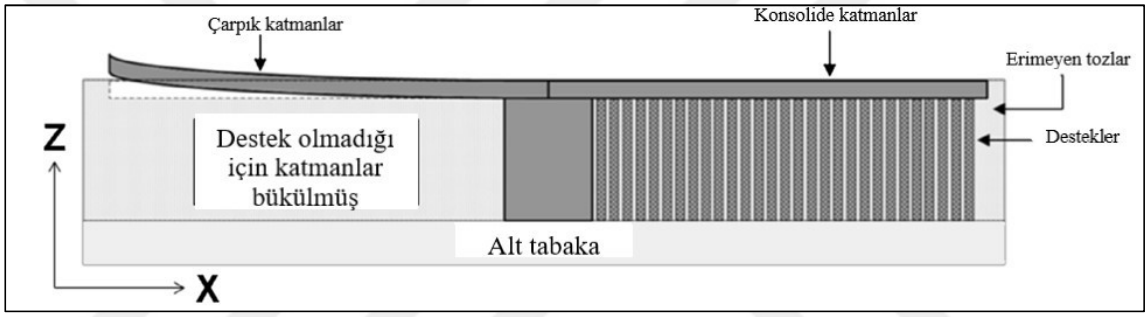
Şekil 2-21: Destekli ve desteksiz yapılarda geliştirilen gerilmelerin karşılaştırılması (Salmi ve diğ., 2017).

Çıkıntılı yapılardaki termal gerilmeler, çıkıntılı kısımlarda zayıf matris destek tabanı nedeniyle daha kötü bulunmuştur (Romano ve diğ., 2015). İşleme parametrelerinin kontrol edilmesinin, özellikle lazer gücünün ve tarama hızının, artık gerilimi düşürdüğü (Fox ve diğ., 2016; Sundar ve diğ., 2014; Wang, Yang, Yi, ve diğ., 2013) ve tabakaların delaminasyonunu önlediği bulundu (Pohl ve diğ., 2001). Ayrıca, yüksek yatak sıcaklıkları (180 ^{0}C) ve kısa tarama vektörleri de katmanlardaki kıvrık kıvrılmalarda pozitif bulunmuştur (Kruth ve diğ., 2012; Yasa ve diğ., 2011). Ayrıca, ısıl işlem sonrası, yapı içerisinde üretim sırasında ortaya çıkan kalıntı ısınma gerilmelerini serbest bırakır (Shiomi ve diğ., 2004). Platform oluşturmaya meyilli yüzeyler de farklı açılar için incelenmiştir. Katman kalınlığına ve çıkma uzunluğuna bağlı olarak yalnızca

belirli bir kritik açıya (37^0) kadar kendi kendine sürdürebilirliğe sahip oldukları bulundu (Thomas ve Bibb, 2008; Wang, ve diğ., 2013).

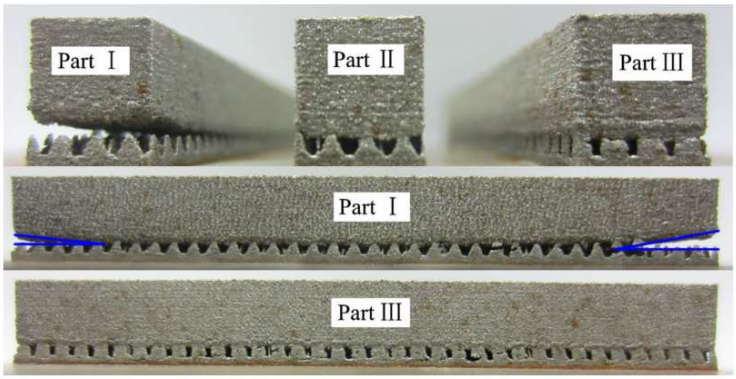
2.4.2 Eğrilik

Aynı katılaştırılmış katman sayısının tekrar tekrar sinterlenmesi, plastik deformasyona yol açan içsel mukavemeti aşan stres birikimini arttırır (Mercelis ve Kruth, 2006; Salmi ve diğ., 2017).



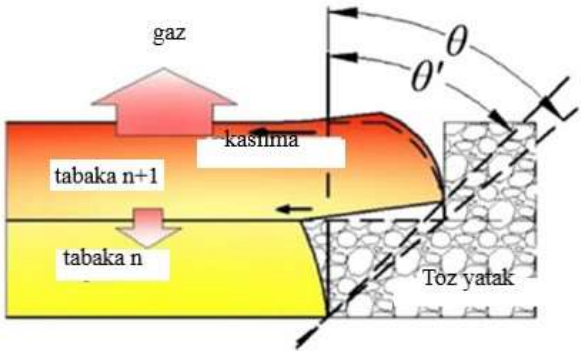
Şekil 2-22: SLE'de tek katmanda çözgü oluşumunun şematik diyagramı (Vora ve diğ., 2015).

Yeni katmanın taranması, çevredeki tozun sınırlı tutmasından dolayı yanlara doğru genişler (Matsumoto ve diğ., 2002). Katılaşma sırasında, daralma, katmanın bükülmesine neden olur. Kalıntı gerilmenin tepe değerleri genellikle tarama izinin başlangıcında bulunur. Bu, Şekil 2-22'te and Şekil 2-23'te (Mohanty ve Hattel, 2016) gösterildiği gibi, iz ucunda çözgü ve çatlaklarla sonuçlanır. Ray uçlarında güçlü bir destek bu tür düzensizlikleri önlemek için uygun bulunmuştur (Calignano, 2014; Gan ve Wong, 2016; Jhabvala ve diğ., 2012; M. Cloots ve diğ., 2013; Strano ve diğ., 2013).



Şekil 2-23: SLE parçalarında çözgü.

Katmanlardaki çözgüler, gerilme stresinden dolayı yüzeyde bükülmeye neden olur. Daha fazla katman eklendikçe, yapıdaki çarpıntı, iz uçlarındaki çıkıntı, Şekil 2-24 (Oter ve diğ., 2018) şematik olarak gösterildiği gibi katman kalınlığını geçinceye kadar büyür. Bu çıkıntı pürüzsüz toz düzenine müdahale eder ve ayrıca toz kazıyıcı işlevinde bir soruna neden olur ve hatta makinanın bozulmasına neden olabilir (Gan ve Wong, 2016; Wang ve diğ., 2013).



Şekil 2-24: SLE'de çözgü.

2.4.3 Cüruf Oluşumu

SLMed parçalarında sıkça görülen diğer kusur cüruf oluşumu. Küçük dairesel deliklerin gerektiği geometrilerde, yüksek ısı, üst yüzeyden kütlesel düşüşe neden olur. Bu, ya boşluğu ortadan kaldırır ya da montaj yapılmayan yapılarda yetersiz boşluk sağlar (Wang ve diğ., 2013).

2.5 SAYISAL ÇALIŞMALAR

Ergiyik havuzunun incelenmesi, Eİ yapılarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri hakkında büyük bir fikir edindiğini ortaya koymaktadır (Dong ve diğ., 2009). SLE'ye ilk birkaç küçük katmanın katılımı, kullanım sorunları nedeniyle değerlendirilmesi zordur. Bu nedenle, süreci daha yakından düzenlemek için çeşitli sayısal çalışmalar yapılmıştır (Loh ve diğ., 2015; Song ve diğ., 2018; Wu ve diğ., 2017).

Lazer kaynağı kullanarak ısı oluşumunu modellemek için çeşitli genel amaçlı ticari kodların kullanıldığı bildirilmiştir. Tablo 2-7, sayısal çalışmaları kullanarak yapılan çalışmalardan bazılarını rapor etmektedir.

Tablo 2-7: Farklı Eİ işlemlerinin analizinde yapılan sayısal çalışma.

S. No.	Model study	Material Examine	Package	Reference
1	Isı iletimi ve elastik deformasyon için tek Eklemeli 2D çalışma	Nickel Alloy		(Matsumoto ve diğ., 2002)
2	Sıcaklık ve yoğunluk dağılımı için 3D geçici FE model analizi	Polycarbonate powder	Abaqus	(Dong ve diğ., 2009)
3	Sıcaklık dağılımı ve Ergime havuzu büyüklüğü analizi için 2D modellerin SLE çalışması	$TiAl_6V_4$		(Huang ve diğ., 2016)
4	Eşmerkezli Geçiş (CET) kriteri sütununu kullanarak tek bir yolda inşa edilmiş SLE'nin mikroyapı analizi.	$AlSi_{10}Mg$	ANSYS	(Liu ve diğ., 2018)
5	2B çok kanallı modelin Ergime havuzu penetrasyon çalışması	316L	ANSYS	(Foroozmehr, ve diğ., 2016)
6	Ergiyik havuz şekil analizi için SLE 3D modelinin çok Eklemeli çökeltme çalışması	$TiAl_6V_4$	Abaqus	(Fu ve Guo, 2014)
7	LBF sisteminin geçici termo-mekanik modellemesi - 2D çalışma	Nickel and Porcelain powder	ANSYS	(Dai ve Shaw, 2004)
8	Lazer sinterleme ile tek metalik katman analizi	$TiAl_6V_4$	ANSYS ve Matlab	(Patil ve Yadava, 2007)
9	FE Sıcaklık ve stres alanı dağılımı için tek izli 3D model analizi.	316L	ANSYS	(Hussein ve diğ., 2013)
10	Sıcaklık dağılımının 3D FE analizi	$TiAl_6V_4$	ANSYS	(Roberts ve diğ., 2009)
11	Sıcaklık dağılımının 3D FE analizi			(Michaleris, 2014)

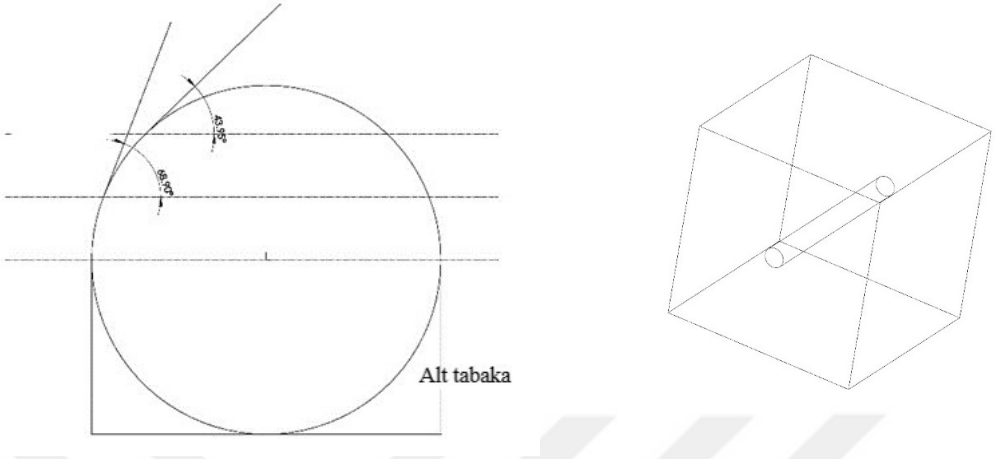
12	3D multi-track, sıcaklık, termal gradyan, katılaşma oranı dağılımı ve Ergime havuzu analizi için çok Eklemeli bir model.	$AlSi_{10}Mg$	ANSYS	(Hu ve diğ., 2016)
13	Lazer bazlı AM prosesinin ısı dağılımı analizi	Al7075, Ti64, 316L	ANSYS	(Romano ve diğ., 2015)
14	Değişken işlem parametreleri ile ısıl dağılım çalışması ve Ergiyik havuz şekil araştırması	$AlSi_{10}Mg$	ANSYS	(Li ve Gu, 2014)
15	Geçici sinterleme sıcaklığının simülasyonu	Al_2O_3 Ceramic powder	ANSYS	(Xing ve diğ., 2013)
16	Volumetrik ısı kaynağına sahip üç boyutlu sonlu elemanlar ısı transfer simülasyonları	316L	COMSOL	(Tran ve Lo, 2018)
17	Lazer mikro sinterleme (LMS) için tek metalik toz katmanında sıcaklık dağılımının simülasyonu	Solid Iron	ANSYS	(Yin ve diğ., 2012)
18	Destek yapılarının ısıl iletkenliğinin değerlendirilmesi	$TiAl_6V_4$	ANSYS	(Zeng ve diğ., 2015)
19	SLS modelini kullanarak sıcaklık değerlendirmesi	Titanium		(Kolossov ve diğ., 2004)
20	Epitaksiyel kolumnar tanelerin doku tahmini	$AlSi_{10}Mg$		(Liu ve To, 2017)
21	Çok Eklemeli modelin kalıntı gerilme değerlendirmesi	$AlSi_{10}Mg$	Abaqus	(Wu ve diğ., 2017)
22	Ergime havuzu şeklinin ilerlemesi ve sıcaklık değişiminin oranı üzerine tartışmalar	Al6061	COMSOL	(Loh ve diğ., 2015)

SLE'deki ergimiş sıvı, güçlü birleşme için altta yatan birkaç kat erir (Murr ve diğ., 2012). Altta yatan yüzey, genel ısı dağılımında aktif bir rol oynar (Jhabvala ve diğ., 2012; Strano ve diğ., 2013). Sayısal çalışma, ısı üretimi ve dağıtım fenomenini anlamak için bir SLE işlemini tanımlamak için basit bir model kullanır. Çalışmaların çoğu, farklı fiziksel ortamları kullanarak Ergime havuzunun büyüklüğünü, sıcaklık dağılımını ve stres analizini belirlemeye odaklanmıştır. Paket sınırlamaları, simülasyon süresi ve tam uçlu SLE kasasının modellenmesinde maliyet nedeniyle 3B veya 2B geometriyi başarılı bir şekilde modellemek için çeşitli varsayımlar alınmıştır (Hu ve diğ., 2016; Zhigang ve diğ., 2006).

2.6 AlSi10Mg ALAŞIMLARIYLA İLGİLİ ZORLUKLARI

Al alaşım tozlarında yüksek yansıtma ve lazer emiciliği nedeniyle, tarama işlemi özellikle (yatay olarak tasarlanmış) küçük dairesel profillerin imalatında zorlu bir görevdir (Hathaway ve diğ., 2018; Liu ve diğ., 2017). Bu tür minik profillerde destek yapısının kullanılması geçerli değildir. Bu, desteklerin kaldırılmasındaki zorluktan ve yapının kendisine verilen tehlikeden kaynaklanmaktadır. Küçük dairesel profillerin sürdürülebilirliğini analiz etmek için bazı çalışmalar yapılmıştır, ancak çözümler sorunları tamamen ele almak için yeterli değildi (Calignano ve diğ., 2014; Chen ve Zhezheng, 2011; Patterson ve diğ., 2017; Sossou ve diğ., 2018). Bu nedenle, bu çalışma temel olarak aşağı cilt bölgesi ile ilişkili işleme parametrelerinin değiştirilmesine odaklanacaktır. Bu yazarların bilgisine göre tamamen araştırılmamıştır. SLE makinesindeki (EOS) aşağı cilt parametresi genellikle bir destek yapısı ile varsayılır, ancak mevcut durumda, çok küçük dairesel bir profilden (Ø0.5mm) dolayı böyle bir yapı seçilmez. Aşağı cilt için istenen parametreleri elde etmek amacıyla, 3B model için sonlu eleman kodları, faz dönüşümü, çoklu malzeme formülasyonu, sıcaklığa bağlı fiziksel özellikler ve eleman doğum ve ölüm teknikleri dikkate alınarak yazılmıştır. Bu, Ergime havuzu derinliğini kontrol etmek ve aşırı toz Ergimesini önlemek için yapılır. Daha sonra ANSYS modelinin sonuçları, bulguları doğrulamak için SLE makinesinde bir deney yapmak için kullanıldı ve sonuçlar çok tatmin edici bulundu. Düşük olay enerjisinin seçimi, lazer enerjisinin daha az nüfuz etmesine neden olur ve ardından daha az çapak oluşumuna yol açar (Liao ve Yu, 2007).

Önceden katılaşmış birkaç katmanın tekrar eritilmesi SLE alanında iyi bilinmektedir (Gan ve Wong, 2016; Townsend ve diğ., 2016). Aşağı cilt için katman sayısı varsayılan olarak 3'tür, ancak kullanıcının isteğine göre artırılabilir veya azaltılabilir. Daha sonra, çekirdek parametrelerle taramanın, aşağı cilt bölgesinin 3 katmanını yeterince erittiği bulunmuştur. Bu çalışma, binanın yönü boyunca dairesel geometrilerin başarılı bir şekilde tasarlanmasında lazer gücü (P) ve tarama hızı (v) etrafında döndürülmüştür. Destek yapıları olan ya da olmayan eğimli bölgelerin yanı sıra, düzlemde de önemli bir çalışma yapılmıştır (Calignano, 2014; Mohanty ve Hattel, 2016; Wang ve diğ., 2013). Çıkıntıdan farklı olarak, dairesel profiller sırayla Şekil 2-25 (a) 'da gösterildiği gibi eklenen taze tabakalarla oluşturulur.



(a) **(b)**

Şekil 2-25: (a) Delik etrafındaki şematik gösterim ve (b) deneysel analizde kullanılan kübik model.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 GİRİŞ

Bu bölümde kullanılan malzemeler, uygulamalı deneysel yöntemler ve cihazlar, proje çalışması sırasında kullanılan yazılım paketleri ele alınmaktadır. Metodoloji bölümü, deneysel ve teorik olarak iki bölüme ayrılmıştır.

İlk bölümde, SLE sürecinin temelleri tartışılmıştır. İnceleme, çıkıntılı yüzey ve dairesel profiller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapılarını analiz etmek ve mekanik özelliklerini test etmek için kullanılan diğer ekipman ve prosedürler de ayrıca belirtilmiştir.

İkinci bölüm olan sayısal çalışmada ise SLE işlemi sırasındaki ısı üretimi ve yayılmasının fiziksel temelleri Sonlu elemanlar modeli kullanılarak ANSYS gibi ticari bir paket üzerinde incelenmiştir.

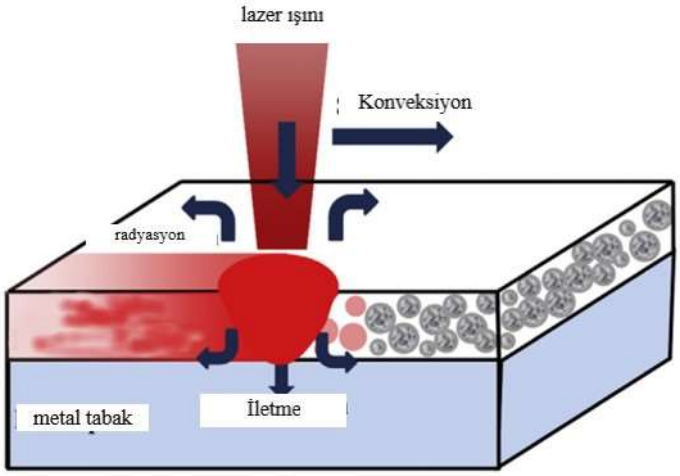
3.1.1 Deneyler

Tüm deneysel çalışmalar, İstanbul Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nin AluTEAM denilen Alüminyum Araştırma Merkezi'ndeki 400 W güç kapasiteli SLE M290 model EOS ^D metal yazıcı tezgahı üzerinde gerçekleştirilmiştir. SLE'deki ısı oluşumu ve yayılmasının şematik modeli Şekil 3-2'de gösterilmektedir. Lazer ışını, bilgisayar modeline göre toz parçacıklarını kaynaştırarak katmanı birleştirir. Oksitlenmeyi önlemek için, oksijen seviyesi sürekli olarak 10-12 mbar basınçta Argon gazı beslemesiyle % 0.1 - 0.3 arasında tutulur.

Çıkma yüzeyinin tasarlanmasındaki zorlukları tam olarak anlamak için, deney ilk olarak MS1'e ayrılan marajing çelik üzerinde yapılmıştır. Daha sonra, Argon gazı haznesi monte edildiğinde, üretim AlSi10Mg'ye kaydırıldı. Daha önce, destek yapısının çıkma bölgeleri üzerindeki etkisini kontrol etmek için bir çıkıntı çalışması yapılmıştır. Bu özel durumda, çıkıntı bölgelerinin yüzey pürüzlülüğü, eğilme ve yapısal karalılığını analiz etmek için farklı destek geometrilerine sahip 16 örnek üretilerek, yerleşik pozisyonların etkisi yüzey pürüzlülüğü ölçümü için değerlendirilmiştir.



Şekil 3-1: SLE EOS M290 makinesi için EOS web sitesinden dosya fotoğraf.



Şekil 3-2: Lazer ışınımı sırasında toz yatağının ısıl davranışının şematik gösterimi (Li ve Gu, 2014).

İkinci aşamada, SLE makinesine Al tozu eklendiğinde, çalışma, destek yapıları olmadan küçük çıkıntıların (yatay olarak oluşturulan dairesel profiller) karalılığına odaklanmıştır. Süreci yakından anlamak için çeşitli önlemler alındı. İlk önce, 7 farklı yüz içeren bir modelde en az yüzey pürüzlülüğünü bulmak için optimum bir parametre belirlendi. Daha sonra, yatay olarak oluşturulan dairesel profillerin tasarlanmasına odaklanıldı. İlk olarak, çekirdek parametreleri değiştirildi ve 18 örnek üretildi. Daha sonra, dairesel deliklerin iç yüzey kalitesini gözlemlemek için aşağı deri parametrelerinde değişikliklerle 7 numune daha üretildi. Bu çalışma ANSYS paketinde nümerik analiz ile desteklenmiştir.

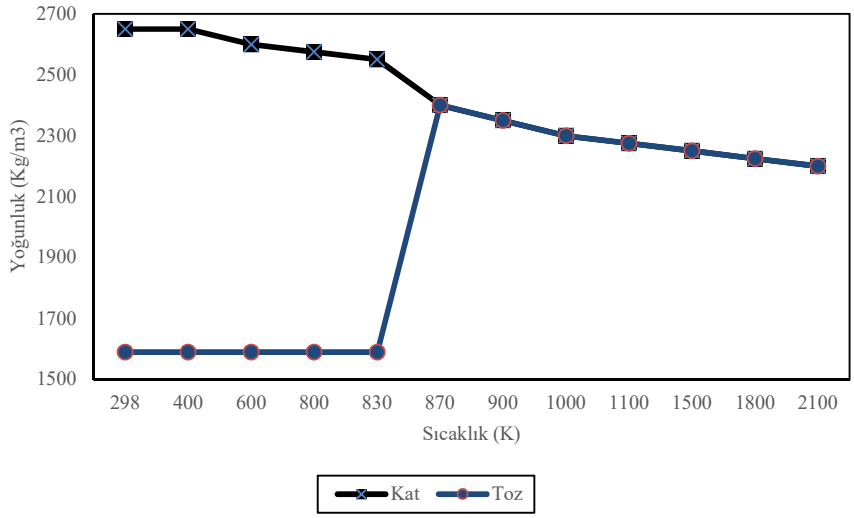
3.1.2 Sayısal Modelleme

3.1.2.1 Isıl Analiz

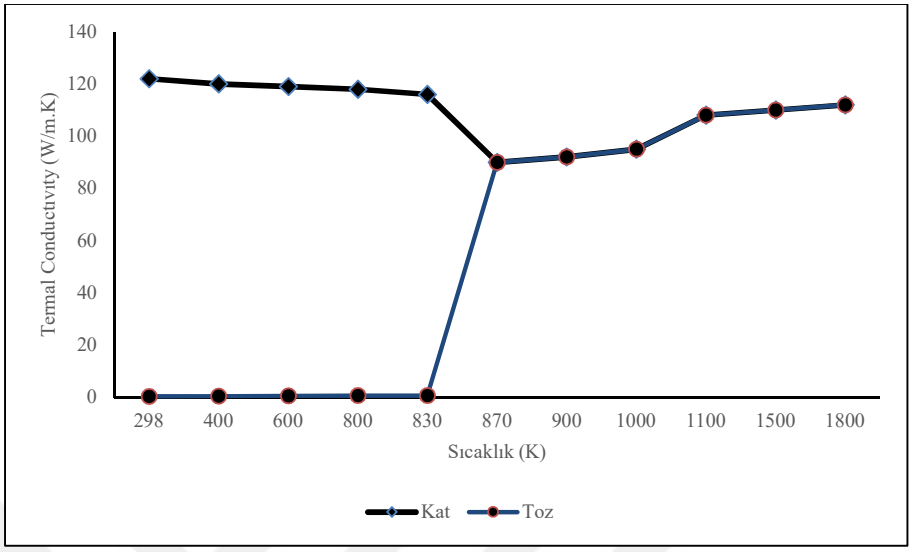
Hareketli lazer toz yatağını tarar ve yüksek ısı üretir. Bu ısı, katılaşmış bir yapı oluşturmak için toz parçacıklarını eritir (Yin ve diğ., 2012). SLE işleminde ısı üretimi için temel denklem [206];

$$k\frac{\partial T}{\partial \eta} - q_v + h_c(T - T_0) + \sigma\varepsilon(T^4 - {T_0}^4) \tag{3-1}$$

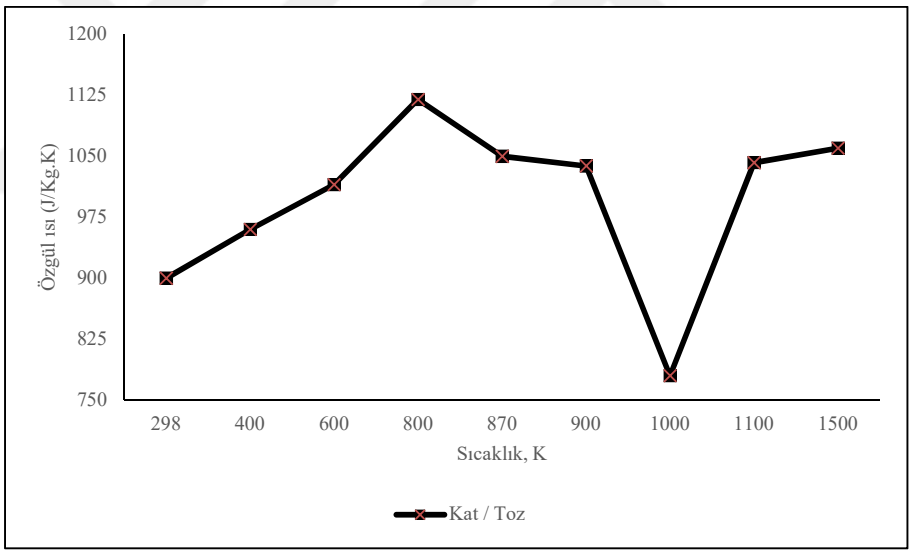
Ortam sıcaklığının T_0, 303 K; k, tozun ve katı yapının sıcaklığa bağlı ısıl iletkenliğini; q_v , ısı girişidir; η , toz yüzeyinin bir vektörüdür; h_c, ısı taşınım katsayısıdır; σ, Stefan Boltzmann sabitidir ve ε, toz malzemesinin yayım katsayısıdır.



Şekil 3-3: AlSi10Mg katı ve gevşek tozların sıcaklığa bağlı yoğunluğu.



(a)



(b)

Şekil 3-4: AlSi10Mg'nin sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri (a) Termal İletkenlik (b) Özgül Isı.

Isı iletkenliği, özgül ısı ve yoğunluk, hem katı hem de toz AlSi10Mg için sıcaklığa bağlı olarak alınır (Şekil 3-3 ve Şekil 3-4). Katılaştırma ve katılaşma sırasında faz transformasyonu için senaryoda ANSYS element doğum ve ölüm tekniği eklendi.

$$\rho_{powder} = \rho_{bulk}(1-\phi) \tag{3-2}$$

Burada, ϕ = 0.4, oda sıcaklığında (Foroozmehr ve diğ., 2016). Bu, ρ_{powder} = 1590 kg.m^{-3} verir. Toz yatağının ısıl iletkenliği (Xing ve diğ., 2013) 'den alınır ve şöyle verilir;

$$k_p = \frac{k_s(1-\phi)}{(1+\psi\frac{k_s}{k_g})} \tag{3-3}$$

K_g, k_s ve ψ argon gazı, iletken AlSi10Mg ve bazı üssel faktörlerin termal iletkenlikleridir. Üstel faktör (Xing ve diğ., 2013) olarak verilir.

$$\psi = 0.02 * 10^{2(\phi-0.3)} \tag{3-4}$$

$\phi = 0.4$, ψ = .025179 alınır. Argon yoğunluğu, toplam toz yoğunluğuna kıyasla çok küçüktür, bu nedenle, tozun özgül ısısı, katı AlSi10Mg'ye benzer şekilde alınır (Xue ve Barlow, 1990). Özgül ısı değerleri Şekil 3-4 (b) 'te verilmiştir. Katı maddenin entalpisi, (Hussein ve diğ., 2013) olarak verilen denklemden elde edilebilir;

$$H = \int \rho c_p dT \tag{3-5}$$

3.1.2.2 Lazer Isı Enerjisinin Modellenmesi

SLE işleminde, dış ısı enerjisinin tek kaynağı lazer gücünden gelir ve lazerin hareketi doğada neredeyse Gaussian olarak tanımlanır. Isı akısı, lazer ışınının merkezini tanımlayan Gauss profilinin merkezinde maksimumdur. Matematiksel olarak (Liu ve diğ., 2018);

$$q_v = \frac{2\alpha P}{\pi t {r_0}^2} exp(-\frac{2r^2}{{r_0}^2})\exp(-\frac{z}{t}) \tag{3-6}$$

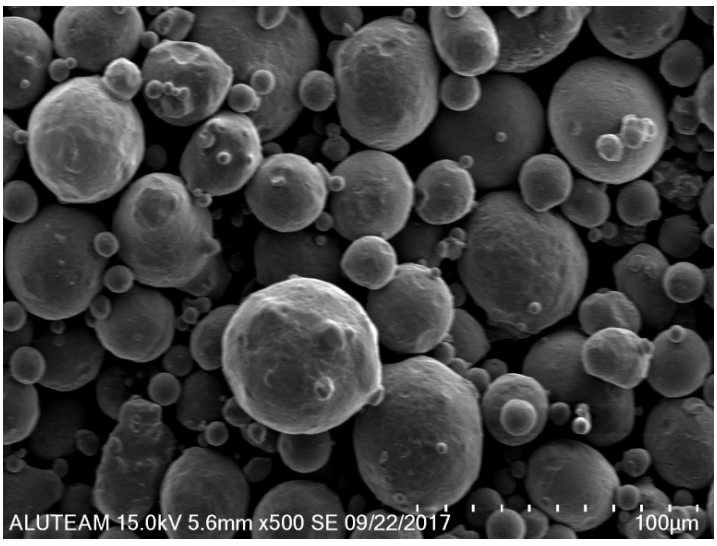
P lazer gücü ise, α toz AlSi10Mg'nin emme katsayısıdır ve değeri 0.09'dur (Hu ve diğ., 2016). 't' penetrasyon derinliğini, r_0 spot boyut çapı için duruyor ve r, lazer ışınının ortasındaki Gauss yüzeyini anlatıyor. Katmanın tepesindeki radyal mesafe r;

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0 - V * (t - \frac{l}{V} * (n - 1)))^2 \quad (3\text{-}7)$$

Burada V, tarama hızıdır, t, zamandır ve x_0, y_0, lazer kaynağının kaynağını belirtir; Tüm değerler SI birimlerinde, katman kalınlığı ise 30 μm olarak alınmıştır.

3.2 YÜZEY MORFOLOJİSİ İNCELEMELERİ

Bu bölüm, Taramalı elektron mikroskobu (TEM) ve Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sistemi (SRMS) gibi malzeme karakterizasyonu için kullanılan cihazlarla ilgilidir. Bu, lazer sinterlenmiş numunelerin mikroyapısal özelliklerini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemek için yapılır. İlk aşamada, TEM gözlemi için toz numuneleri hazırlandı. Burada, grafit macunu kullanılarak bir saplama üzerine küçük bir toz numunesi (yaklaşık 50 g) yerleştirildi. Örnek daha sonra TEM odasına yerleştirilmeden önce düzgün şekilde temizlendi. Sinterlenmiş MS1 veya AlSi10Mg örnekleri aşağıdaki gibi hazırlandı. Tamamlanan örnekler ilk önce platform yatağından çıkarıldı ve daha sonra, eklenen destek yapısı bir kesici alet kullanılarak çıkarıldı. Çıkma yapılarında, çıkma bölgelerine sıfır hasar verilmesini sağlamak için destek profilleri çok dikkatli bir şekilde çıkarılmıştır. Al numuneleri durumunda, dairesel delikler için destek yapıları temin edilmemiştir.



Şekil 3-5: Küresel tozlar MS1.

Örnekler aşamalı olarak daha ince öğütme silisyum karbür kağıtları kullanılarak topraklanmıştır. Daha sonra, numunenin yüzeyinde çizikleri önlemek için bir çözelti ile muamele edildiler. Parlak yüzey daha sonra sulandırılmış Keller'in ajanı ile mikroyapısal değerlendirme için kazınmıştır.



Şekil 3-6: Hitachi'den taramalı elektron mikroskobu (TEM).

3.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu

Partikül büyüklüğü ve şekli, yüzey morfolojisi ve başlangıç tozlarının ve işlenmiş AlSi10Mg numunelerinin mikroyapısı gibi toz örneklerin görüntülerini yakalamak için HITACHI SU3500 SEM makinesi kullanıldı. Tozlar ve SLEed örnekleri, SEM odasına yerleştirilmeden önce çift taraflı karbon macun bandı kullanılarak saplamalar üzerine tutturuldu. Son olarak, dairesel deliklerin yakınındaki görüntüler eşzamanlı olarak alındı ve analiz edildi.



Şekil 3-7: Mitutoyo SJ500P makinesi.

3.2.2 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sistemi

Mitutoyo SJ500P makinesinde yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapıldı. Bölüm 4'te, çıkma yüzeyinin derisi üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmıştır. Çıkma uzunluğu boyunca iki farklı noktada sadece Ra değerleri belirlenmiştir. İki nokta, çıkma yüzeyinin çarpık ve çarpık olmayan bölgesinde fark edildi. Ra (aritmetik ortalama sapma): Merkez çizgisi ortalaması olarak da bilinen aritmetik ortalama, merkez çizgilerinin ortasındaki ortalama değeri olarak tanımlanır. Ra ölçümünde, cebirsel işaret dikkate alınmaz.

$$R_a = \frac{1}{L}\int_0^L |y(x)|dx \ldots\ldots\ldots$$

4. BULGULAR

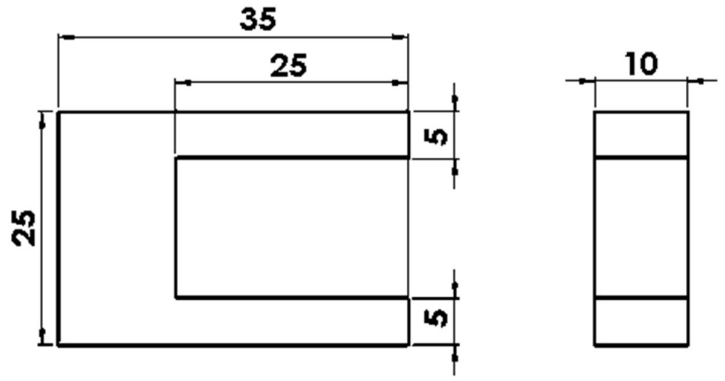
Tezde yapılan çalışmalara bağlı olarak bu bölüm 6 bölüme ayrılmıştır. Her bölümde, bölüm konusuna kısa bir genel bakış bulunmaktadır ve ilgili sonuçlar sunulmuştur. Her bölümün tartışması, 5. Bölüm'de tartışma ve sonuç bölümünde açıklanacaktır.

- ÇELİK MALZEMELİ ÇIKINTI ANALİZİ
- PARÇA KONUMU VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
- AlSi10Mg İÇİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
- ÇOKLU PLATFORMDA ISI AKIŞI
- SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN UNSUR ÖZELLİKLERİ
- SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MUKAVEMET AÇILARINDAN İNCELENMESİ.

4.1 ÇELİK MALZEMELİ ÇIKINTI ANALİZİ

4.1.1 Giriş

Parçalar, meyillerin muhtemel etkisini ortadan kaldırmak için yapı platformuna paralel büyük çıkıntılara sahip olacak şekilde tasarlanmıştır, çünkü eğimli destekler belirli kritik açılara kadar kendini destekleme özelliğine sahiptir. Şematik 3D model Şekil 4-1'de gösterilmektedir.



Şekil 4-1: Çıkma modelinin şematik diyagramı. Tüm ölçüler mm'dir.

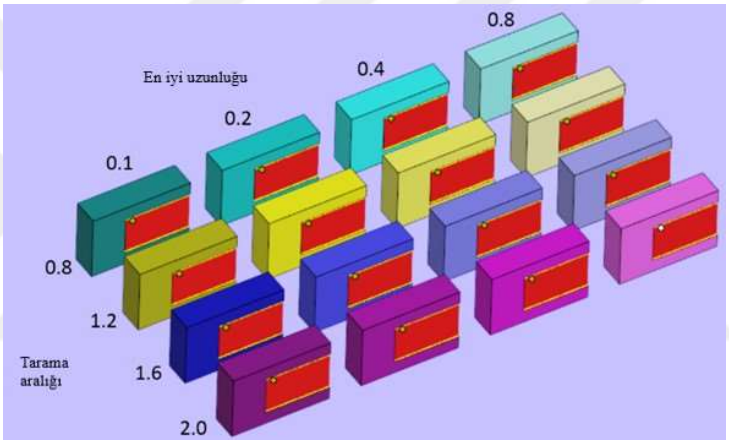
Bu çalışmada EOS GmbH tarafından sağlanan MS1 soğuk iş aleti çelik tozu (40 μm küresel) kullanılmıştır. Tozun kimyasal bileşimi Tablo 4-1'da verilmiştir.

Tablo 4-1: MS1 chemical composition.

Standard	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Co (%)	Ti (%)	Mo (%)	C (%)
DIN 1.2709	=<0,03	=<1	=<1	17-19	9-11	0,9-1	4-6	=<0,03

4.1.2 Parametre Seçimi

Bu çalışmada, Şekil 4-2'de gösterildiği gibi farklı destek parametrelerine sahip 16 parça üretilmiştir. Proses parametreleri (lazer gücü, tarama hızı) her numune için sabittir ve destek profillerinin hatch mesafesi ve üst uzunluk değerleri dahil olmak üzere Tablo 4-2'de verilmiştir.



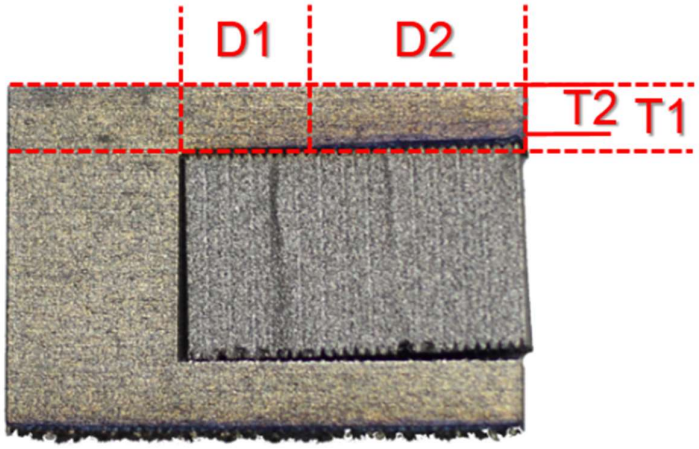
Şekil 4-2: Fabrikasyon 16 MS1 çıkıntı örnekleri.

Tablo 4-2: Proses ve destek parametreleri.

S. No.	Parametre	Birim	Değer
Parça	Lazer Gücü	W	100
	Tarama hızı	mm/s	850
Destek	XY Ofset	mm	0.04
	Z Ofset	mm	0.04
Diş	Yükseklik	mm	0.6
	Taban uzunluğu	mm	0.7
	Baz uzunluğu	mm	0.1

Destek profilleri kullanılarak çıkıntılı yüzeyin sürdürülebilirliğine odaklandığından tüm analiz için standart işlem parametreleri seçildi. Şekil 4-3, çıkıntı modelinin geometrik bir düzenini verirken, Tablo 4-2, 16 örneğin destek yapıları için geometrik parametreleri göstermektedir. 16

örneğin her biri farklı tarama ve diş parametreleri kombinasyonları ile üretilir ve nihai düzenleri de Tablo 4-2'da verilmiştir. Tablo 4-3, çıkma uzunluğunun kenarındaki geometrik değişikliklerin derecesini göstermektedir. Tablo ayrıca her numunede bozulmamış çıkma uzunluğunu da içerir. Tablo 4-4, çıkma uzunluğunun çarpık ve bozulmamış bir kısmı olarak tanımlanan iki farklı konumdaki yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir.



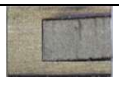
Şekil 4-3: Çıkıntı örneğinin geometrik yerleşimi.

4.1.3 Değerlendirme

Tablo 4-3, Tablo 4-4 ve Tablo 4-5, örneklerin hemen hemen hepsinin bir miktar eğrilik gösterdiğini ve büyük ölçüde kullanılan destek yapısının türüne bağlı olduğunu belirtir. Yoğun desteği olan örnek 4, en yüksek yüzey pürüzlülüğü ve çıkma kalınlığında sıfır çarpma ile bulundu.

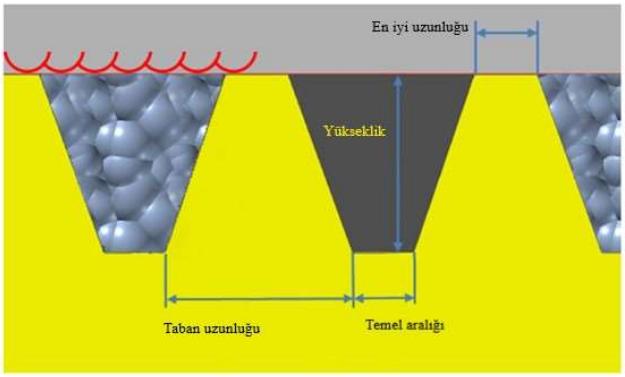
İki bitişik yapısal destek kolonu arasındaki mesafe, altta yatan tozlarda ısı birikimini önlemek için lazer ışını çapından daha az olmalıdır (Wang ve diğ., 2013). Bu mesafe; $d = (z + y) - x$ ve 'x', 'y', 'z' ve 'd' parametrelerinin sırasıyla diş üst uzunluğu, taban aralığı, taban uzunluğu ve bitişik dişin üst kenarları arasındaki mesafeyi Şekil 4-4'te verilen şekilde tanımladığı durumlarda Tablo 4-6, çeşitli diş parametreleri ile 'd' mesafesini göstermektedir.

Tablo 4-3: Çıkma bölgelerinde kullanılan destek profil parametreleri

Numune	* Yumurtadan çıkan Döner açısı	Üst uzunluğu (mm)	Destek Hacmi (mm^3)	Yan	Ön
1	0.8x0.8x45	0.1	1927.7		
2	0.8x0.8x45	0.2	1937.8		
3	0.8x0.8x45	0.4	1957.77		
4	0.8x0.8x45	0.8	1997.22		
5	1.2x1.2x45	0.1	1356.07		
6	1.2x1.2x45	0.2	1364		
7	1.2x1.2x45	0.4	1379.85		
8	1.2x1.2x45	0.8	1401.98		
9	1.6x1.6x45	0.1	1063.75		
10	1.6x1.6x45	0.2	1068.8		
11	1.6x1.6x45	0.4	1078.78		
12	1.6x1.6x45	0.8	1098.48		
13	2x2x45	0.1	895.8		
14	2x2x45	0.2	900.32		
15	2x2x45	0.4	909.37		
16	2x2x45	0.8	923.93		

Tablo 4-4: T1 - orijinal, T2 - son kalınlık, D1 - bozulmamış çıkma uzunluğu, D2 - çarpık çıkma uzunluğu ile çıkıntı kalınlığında değişiklik.

Numune	T1 (mm)	T2 (mm)	ΔT (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)
1	5,00	4.08	0.92	7.28	17.72
2	5,00	4.45	0.55	7.65	17.35
3	5,00	4.73	0.27	13.31	11.69
4	5,00	4.98	0.02	25	0
5	5,00	3.99	1.01	4.94	20.06
6	5,00	4.06	0.94	5.08	19.92
7	5,00	4.06	0.94	5.68	19.32
8	5,00	4.81	0.19	7.16	17.84
9	5,00	3.96	1.04	3.63	21.37
10	5,00	4.14	0.86	3.89	21.11
11	5,00	4.21	0.79	4.16	20.84
12	5,00	4.71	0.29	4.9	20.1
13	5,00	0.45	4.55	0	25
14	5,00	0.45	4.55	0	25
15	5,00	3.71	1.29	2.19	22.81
16	5,00	3.92	1.08	1.83	23.17



Şekil 4-4: Destek düzeneğindeki diş profilini gösteren şematik diyagram.

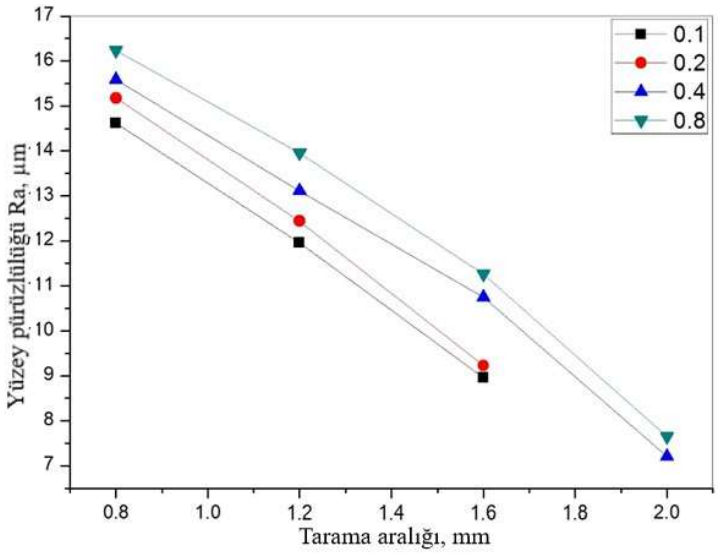
Tablo 4-5: D1 (Ra1) ve D2 (Ra2) bölgelerinde yüzey pürüzlülük değerleri.

Numune	R_a 1 (µm)	R_a 2 (µm)	ΔR_a (µm)
1	14.6194	16.6388	2.0194
2	15.1764	16.8921	1.7157
3	15.5896	17.0485	1.4589
4	16.2397	16.9812	0.7415
5	11.9621	15.2258	3.2637
6	12.4388	15.4011	2.9623
7	13.1098	15.8706	2.7608
8	13.9519	16.2261	2.2742
9	8.9578	12.5574	3.5996
10	9.223	12.7884	3.5654
11	10.7482	14.0723	3.3241
12	11.2551	14.5343	3.2792
13	-	-	-
14	-	-	-
15	7.2103	12.8782	5.6679
16	7.6421	13.2983	5.6562

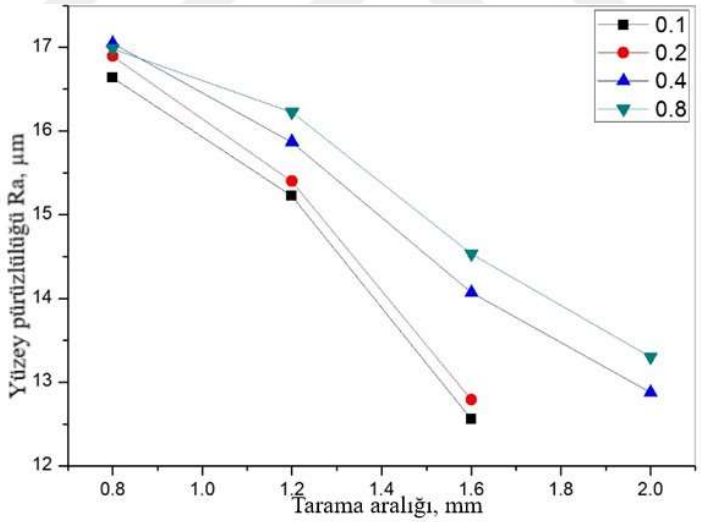
Tablo 4-6: İki diş parametresi arasındaki maksimum mesafe (d).

x (mm)	y (mm)	z (mm)	d (mm)	Işın çapı (mm)
0.1	0.1	0.7	0.7	0.07
0.2	0.1	0.7	0.6	
0.4	0.1	0.7	0.4	
0.8	0.1	0.7	0	

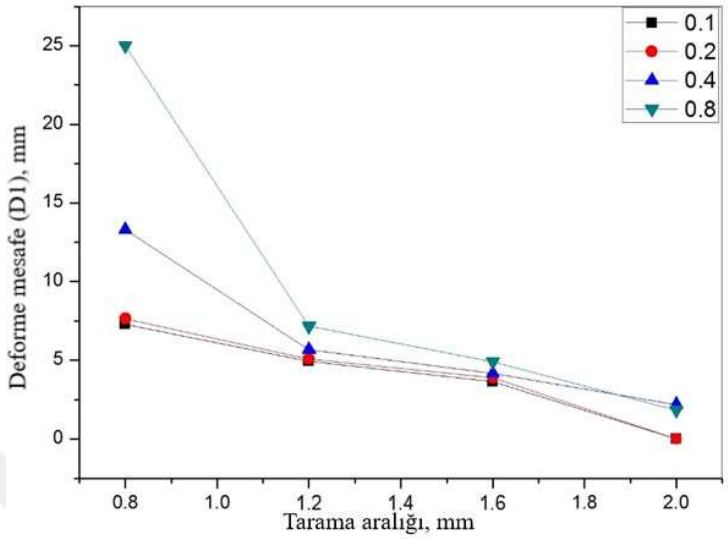
Çıkma yüzeyinin farklı destek profillerinde yüzey pürüzlülüğü, Şekil 4-5, Şekil 4-6 ve Şekil 4-7'de gösterilmektedir.



Şekil 4-5: Bozulmamış bir bölgede yüzey pürüzlülüğünün tarama parametreleri ve diş profillerine göre değişimi.



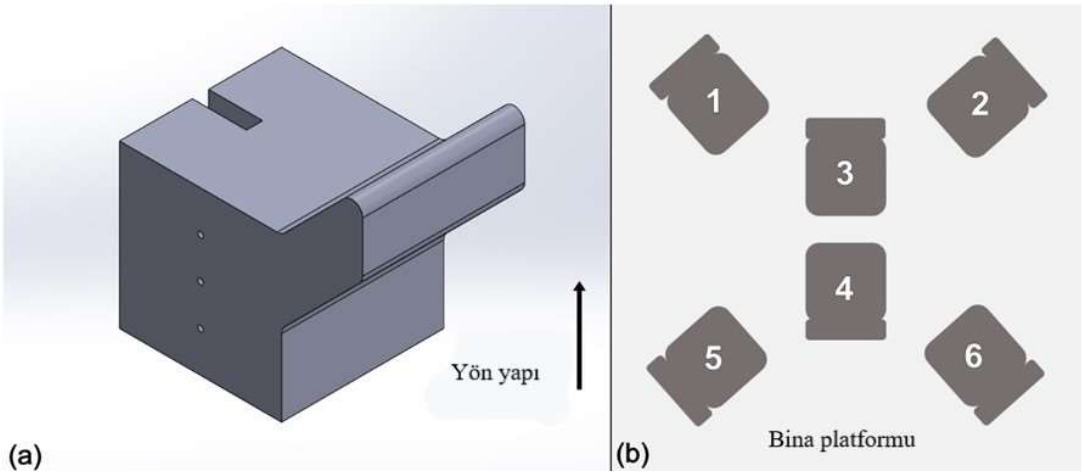
Şekil 4-6: Bozulma Boyunda (D1) tarama parametreleri ve diş profillerine göre değişim.



Şekil 4-7: Farklı diş profilleri için tarama parametrelerine göre çarpık bölgenin yüzey pürüzlülüğündeki değişiklik.

4.2 PARÇA KONUMU VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

4.2.1 Giriş



Şekil 4-8: (a) fabrikasyon bir modelin şematik diyagramı ve (b) bir substrat üzerine konumlanan parçalar.

SLE'deki parça konumlandırmanın etkisi, yazarın bilgisine göre araştırılmamıştır, ancak polimerler hakkındaki bazı raporlar sadece son zamanlarda tartışılmıştır (Dotchev ve Yusoff, 2009). Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, platform tablasının köşesinde ve ortasındaki farklı

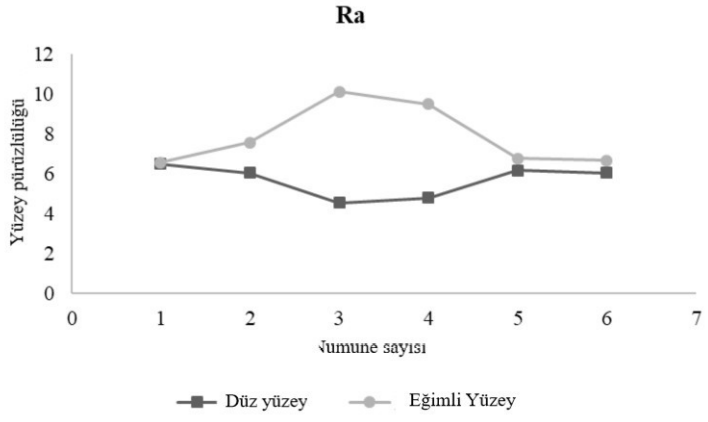
kısımlardaki yüzey pürüzlülüğünün mekanik etkisini araştırmaktır. Araştırma için toz MS1 seçilmiş ve örnek şematik model ve farklı yerleri Şekil 4-8'te verilmiştir. Tüm numuneler bir döngüde 100W, 850mm / s'de işlenmiştir.

4.2.2 Değerlendirme

Bu SLE operasyonu daha önce açısal kaynak konusuna değindiği için kaynak teknolojisi ile yakın bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Kim ve diğ., 2008; Mei ve diğ., 2017). SLE'de, lazer taramasının yolu iki döner aynanın desteği ile hedef alana yansıtılır (Tang ve diğ., 2004). Kaynakta, lazerin açısal etkisi kaynak yüzeyine normal açı arttıkça penetrasyonu azaltan geniş spot alanı ile sonuçlanır. Sonuç olarak, toplam enerji yoğunluğu, yüzey özelliklerini ve mekanik özellikleri etkileyen gücü zayıflatır (Liao ve Yu, 2007; Mei ve diğ., 2017). Düz (yatay) ve parçaların eğimli yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü Tablo 4-7'de verilmiştir.

Tablo 4-7: Farklı numune konumlarında düz ve eğimli yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü.

Average Surface Roughness, Ra (µm)						
Part	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Flat Surface	6.5029	6.0571	4.5552	4.7987	6.1806	6.0484
Inclined Surface	6.5731	7.5796	10.1381	9.5168	6.7806	6.6759

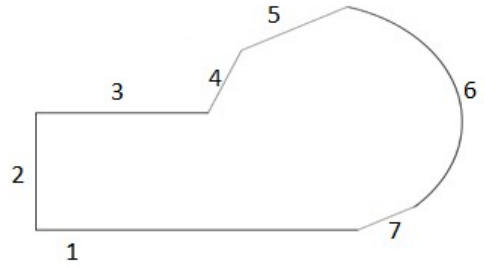


Şekil 4-9: Surface roughness variation in flat and inclined surface.

4.3 AlSi10Mg İÇİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

4.3.1 Giriş

SLE ile işlenmiş AlSi10Mg için farklı yüzeylerin pürüzlülük değeri ölçüldü. 7 farklı yüze sahip yirmi iki farklı örnek (Şekil 4-10) farklı işleme parametreleriyle üretildi (Tablo 4-8 ve Tablo 4-9). Numuneler düzenli destek yapıları ile yapılmış ve yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüş Tablo 4-10 verilmiştir.



Şekil 4-10: 7 farklı yüze sahip bir modelin şematik diyagramı.

4.3.2 Sonuç

Tablo 4-8: Yüzey pürüzlülüğü parametreleri.

Length	12500	Microns
Adım	1	Microns
Hız	1000	Microns/s
Z aralığı	800	Microns
Örnek uzunluğu	2500	Microns
Örnek No.	2	Numara

Tablo 4-9: AlSi10Mg örnekleri için işleme parametreleri.

S. No	Lazer gücü	Tarama hızı
1	150	750
2	150	600
3	150	450
4	150	300
5	200	1000
6	200	900
7	200	800
8	200	700
9	200	600
10	200	500
11	250	1250
12	250	1000
13	250	750
14	250	500
15	300	1500
16	300	1200
17	300	900
18	370	2000
19	370	1600
20	340	1150
21	360	1000
22	370	1300

Tablo 4-10: Farklı işleme parametrelerinde 7 farklı yüzey pürüzlülüğü.

Yüzey numarası	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**Ortalama**
Numuneler	Ra							
1	23.5688	9.4166	18.1286	19.1026	23.5561	30.7588	24.1016	21.2333
2	22.4947	11.8378	21.2619	18.1702	21.7399	37.1002	23.2757	22.2686
3	20.2724	8.6668	22.3760	20.0491	22.0025	32.2364	20.7207	20.9034
4	19.0464	9.9788	20.5094	17.1674	23.6057	36.2704	21.6166	21.1707
5	22.7758	9.5574	23.4897	33.7693	23.9180	32.4153	20.8226	23.8212
6	33.0980	10.5884	19.4578	13.3154	36.0188	56.2848	33.6270	28.9129
7	22.6100	13.7948	21.9742	17.3584	24.2025	32.6996	24.0049	22.3778
8	25.3830	11.1747	23.7145	21.7926	24.8262	32.8543	20.9522	22.9568
9	22.3120	9.8399	22.9001	18.4980	25.5020	34.0868	24.4651	22.5148
10	24.6152	8.4754	22.3862	21.6005	25.0112	30.3818	20.7038	21.8820
11	32.6333	17.6689	19.9160	20.0496	34.8388	82.0362	33.9617	34.4435
12	27.6770	12.2880	20.7843	19.9834	29.7949	55.0019	25.5450	27.2964
13	25.8776	13.1899	18.2186	17.7423	26.9602	44.8573	23.7830	24.3756
14	21.7686	10.6396	19.7528	19.7478	21.8924	40.3836	24.1444	22.6185
15	23.8010	9.5403	18.0537	22.5967	21.7845	33.9659	24.9587	22.1001
16	30.0292	12.0309	25.9089	17.9649	24.7235	60.8294	24.2670	27.9648
17	29.1746	9.0621	19.5768	16.9208	26.3979	71.0576	22.4371	27.8038
18	25.3543	12.3321	20.9849	27.4316	23.6393	43.8257	20.6105	24.8826
19	22.9234	11.1120	21.5048	21.8135	16.9839	42.3196	19.3496	22.2867
20	21.1885	5.0872	21.5060	15.1488	24.6104	47.1551	24.0089	22.6721
21	23.7511	12.3450	27.4758	22.7951	21.1023	43.0756	21.8061	24.6216
22	22.4068	13.5922	23.5531	15.2555	18.1144	12.7756	18.8178	17.7879

4.4 ÇOKLU PLATFORMDA ISI AKIŞI

4.4.1 Giriş

Seçmeli Lazer Ergime (SLE) metoduna uygun imalat parametreleri elde etmek için, Ergiyik Havuz Analizi'ni uygulamak gerekir (Dong ve diğ., 2009). Bu analizle ilgili olarak, geçen 10 yılda çok sayıda deneysel ve sayısal bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Loh ve diğ., 2015; Song ve diğ., 2018; Wu, Wang, ve diğ., 2017).

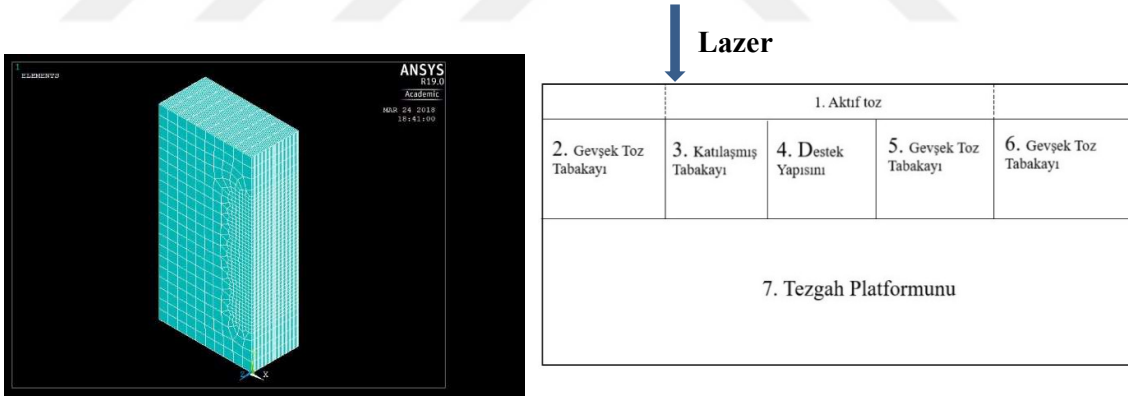
Yakın gelecekte 3B metal baskı makinelerinin üretiminde büyük bir artışın yaşanması ve araştırma enstitülerinin Metal Katmanlı imalatla ilgili büyük ilerlemeler sağlamaları beklenmektedir (Frazier, 2014; Singh ve diğ., 2017).

SLE yönteminde yüksek güçlü lazer kaynağı, 3B parçaların katman bilgilerini kullanarak, istenen geometrik ve fiziksel özellikleri elde etmek için metal tozunu hızla ergitir. Ergimiş sıvı, ısı iletimiyle daha önce oluşturulan katmanları da ergiterek ergiyik havuzunu meydana getirir ve böylece daha güçlü katmanlar arası bağlantı oluşturur (Murr ve diğ., 2012). Bununla birlikte, ergiyik havuzunun boyut ve şeklinin oluşumu diğer bazı faktörlere de bağlıdır. Örneğin, alttaki tezgah platformu ergiyik havuzunun şeklini önemli ölçüde etkiler (Jhabvala ve diğ., 2012; Strano ve diğ., 2013; Wu, Ma, ve diğ., 2017). İlaveten tezgah platformunun malzeme tipi, lazer gücü, tarama hızı, tabaka kalınlığı, tarama deseni vb. faktörlerin de ergiyik havuzunun farklı şekil ve boyutlar almasıyla sonuçlanacağı düşünülmektedir (Olakanmi, 2013; Olakanmi ve diğ., 2015).

Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşım tozunun, yüksek özgül mukavemete, yüksek ısıl iletkenliğe ve üstün korozyon direncine sahip olması nedeniyle farklı sektörlerde kullanılmaktadır (Kempen ve diğ., 2011; Tang ve Pistorius, 2017). Bununla birlikte, AlSi10Mg'un ilave talaşlı imalat gerektirmesi, zayıf akışkanlık, yüzeysel oksit oluşumu ve ciddiyetle ele alınması gereken yüksek yansıtma gibi zorlukları da barındırmaktadır. İstenen sonuçları elde etmek için işlenmiş parçaların mikroyapısal ve mekanik özelliklerini değerlendiren bir kaç bilimsel çalışma yapılmıştır (Aboulkhair ve diğ., 2014, 2016, 2015; Kempen ve diğ., 2012). Bununla birlikte, AlSi10Mg ile desteksiz üst çıkıntı geometrilere dair rapor edilen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışmalar büyük ölçüde deneme-yanılma ve kullanıcı deneyimine odaklanmıştır (Louvis ve diğ., 2011; Tang ve Pistorius, 2017). Ergiyik

havuzunun metal döküm alaşımlarındaki, polimerlerdeki ve kompozitlerdeki oluşumuna yönelik sonlu eleman yaklaşımları literatürde mevcuttur (Hu ve diğ., 2016; Wu ve diğ., 2017).

Bu tez çalışmasında, destek yapıları bulunan ve bulunmayan üst çıkıntılı geometrilerin başlangıç katmanlarındaki cüruf oluşumu, Ergiyik Havuzu sayısal yaklaşımı yardımıyla araştırılmıştır. ANSYS® üzerinde doğrusal olmayan ısı geçişi simülasyon çalışması için bir 3B sonlu eleman modeli seçilmiştir. Şekil 4-11(b)'de gösterildiği gibi, sonlu eleman modeli 7 bölgeye ve yapıya bölünmüştür. 2., 5. ve 6. bölgeler gevşek toz tabakalarını; 3. bölge katılaşmış tabakayı, 4. bölge destek yapısını, 7. Bölge tezgâh platformunu ve 1. bölge ise üretilecek aktif üst çıkıntıya ait metal tozunu göstermektedir. Tarama bölgesinin dışında yer alan 2 ve 6 bölgeleri, 1 nolu aktif çıkıntı katmanından sonra ısı geçişinin devamını analiz etmek amacıyla oluşturulmuştur. 1. Bölgenin kesik çizgiler arasındaki kısmı esas istenilen üst çıkıntı detayı olduğundan, bu bölge daha ince Solid70 elemanlarıyla oluşturulmuştur. Diğer bölgelerde kalan kısımlarda, simülasyon zamanından tasarruf etmek için, sonlu eleman ağı büyük elemanlarla oluşturulmuştur.



a. Sonlu eleman ağı **b**. Sonlu eleman model yapısı

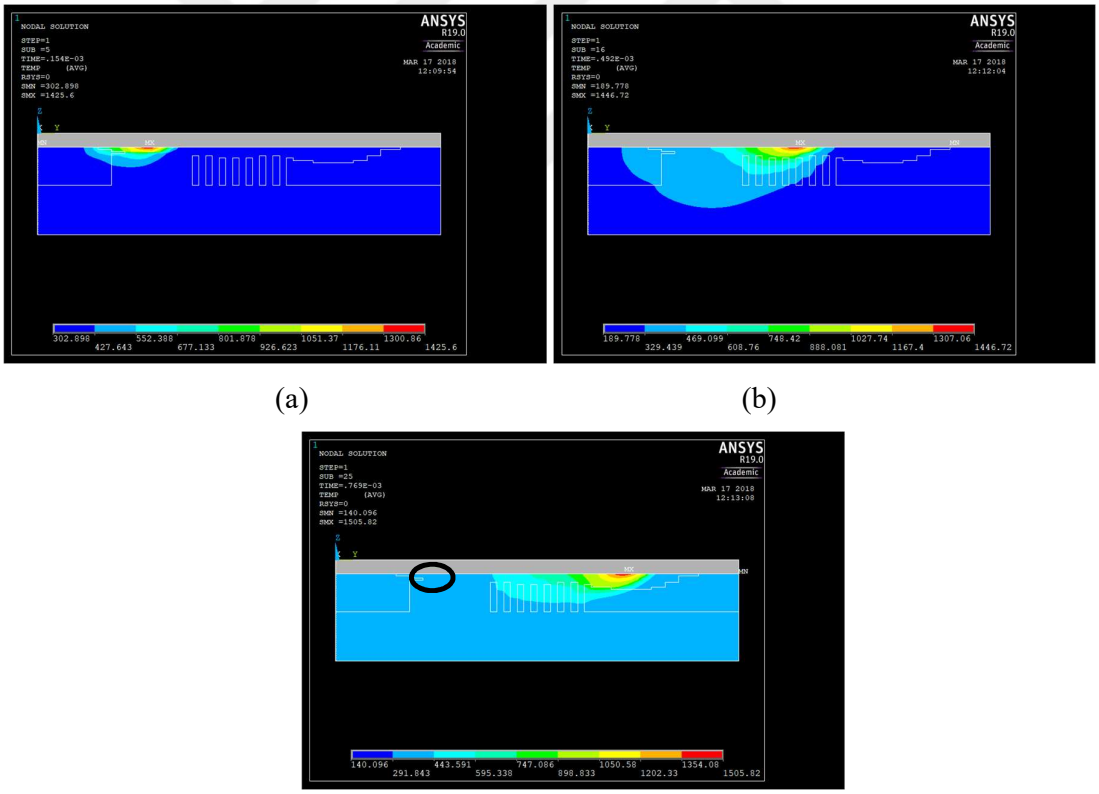
Şekil 4-11: (**a**) Sonlu eleman modeli, (**b**) Bölgeler düzeni.

İlk birkaç katmandaki ısıl taramanın etkisini yakalamak için uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri sırasıyla 1.8 mm, 0.9 mm ve 0.45 mm olacak şekilde ANSYS® sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Lazer ışını Z doğrultusunda olup, taramayı Y ekseni boyunca yapmaktadır. Katmanların oluşum yönü ise XY düzleminde ve Z eksenine dik doğrultudadır. Bu simülasyon

modelinde, 20700 adet 6 yüzeyli ve 3 boyutlu ısıl analiz özellikli Solid70 elemanı ve 23184 düğüm kullanılmıştır.

4.4.2 Değerlendirme

Bu çalışma, AlSi10Mg alaşımının SLE imalat sürecini sayısal bir model yardımıyla incelenmesini amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, Şekil 4-11(a) ve (b)'de gösterilen sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bu modelde katılaşmış 3 nolu bölge, 4 nolu destek yapısı ve 2, 5 ve 6 nolu gevşek toz bölgeleri arasındaki ısı geçişi incelenmiştir. Tüm sistem lazer taramasından önce oda sıcaklığında kabul edilmiştir. Bu modelde elemanlara doğum ve ölüm tekniği uygulanmıştır.



(a) (b)

(c)

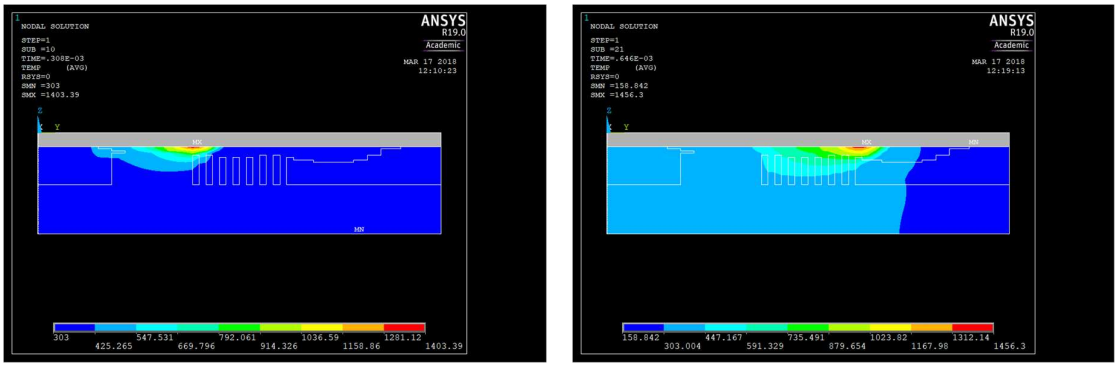
Şekil 4-12: 370 W lazer gücü ve 1300 mm/s tarama hızı için sıcaklık dağılımları: **(a)** 3 bölgesi, (**b**) 4 bölgesi ve (**c**) 5 bölgesi.

4.4.2.1 *3, 4 ve 5 nolu Tek Katmanlarda Isı Akışı (370 W, 1300 mm/s)*

Ergiyik havuzun oluşumu ve üç farklı bölgedeki sıcaklık dağılımı Şekil 4-12'de gösterilmektedir. Uygun olmayan ısı dağılımı, toz parçacıklarının fazla Ergimesi nedeniyle geniş ve daha derin ergimiş havuz şekilleri ile sonuçlanır. Şekil 4-12'de görüldüğü gibi, ısı dağılımı bölge 3'ten 5'e indirgenirken, ergiyik havuzun geometrisi aynı oranda yükselmiştir. Şekil 4-12'deki gri gölgeler ölü tabakaları ve mavi bölgeye çizilen çizgiler ise katılaşmış tozu temsil etmektedir. Taramanın başlangıcındaki eksik ergime Şekil 4-12(c) 'deki gibi çevrelenmiş tabaka ile gösterilmektedir. Bu durum (Hu ve diğ., 2016) nolu referanstaki bulgularla da uyumluluk göstermektedir. Burada platform üzerindeki ilk tabakanın tamamlanmamış ergimesi gözlenmiştir. 3'ten 5'e kadar olan bölgelerdeki soğuma hızlarında, düşük ısı geçişi nedeniyle azalma olmuştur. 3., 4. ve 5. bölgelerde ölçülen soğutma hızları sırasıyla 4.21E6, 3.54E6 ve 2.17E6 K/sn'dir.

4.4.2.2 *3-4 ve 4-5 Bölgeleri Arası Sınır Katmanlarında Isı Akışı (370 W, 1300 mm/s).*

Bu bölümde, bölgelerarası sınır katmanlarındaki ısı yayılımı incelenmiştir. 3-4 arası katmandaki ısı geçişinin, 4-5 arasındakinden daha yüksek oranda olduğu görülebilmektedir (Şekil 4-13). Bu nedenle, katı veya yarı-katı geometrilere bitişik küçük çıkıntıların, yapısal kusurlar olmadan üretilmesinin daha kolay olduğu söylenebilir (Wang ve diğ., 2013).



(a) (b)

Şekil 4-13: Sınır katmanlarda sıcaklık dağılımı (370 W, 1300 mm/s) (**a**) 3-4 ve (**b**) 4-5.

Tarama izlerinin uçlarındaki ısının geçişi Şekil 4-12 ve Şekil 4-13'teki beyaz çizgilerden de görülebilir. Bölge 2 ve 6'nın gevşek tozları da katılaşabilir ve bu etki lazer ilerlemesi doğrultusu

üzerindeki 6 bölgesinde maksimum düzeye ulaşır. Artan bu dış ergimeyi önlemek için SLE işleminde, ivmelenme ve yavaşlama aşamalarında lazerin kapatılması (skywriting) yaklaşımı uygulanır (Manfredi ve diğ., 2014).

4.4.2.3 *Çok Eklemeli Isı Akışı (370 W, 1300 mm/s)*

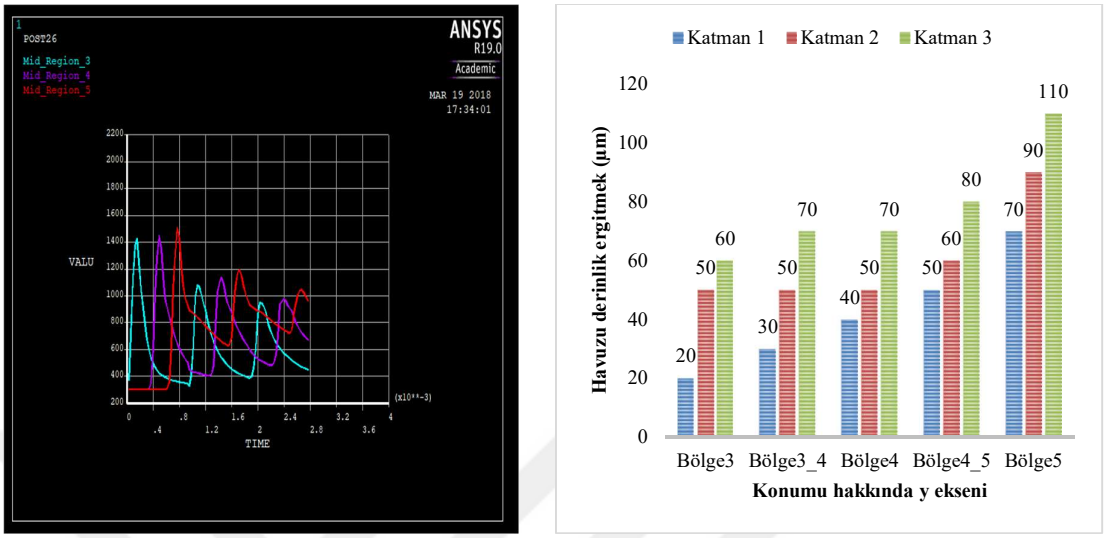
Ergimiş havuz oluşumu ve sıcaklık dağılımı, beş ayrı izleme noktasında, yani 3 (A), 4 (C) ve 5 (D) bölgelerinin ortalarında ve 3-4 (B) ve 4-5 (E) sınırlarında incelenmiştir. A - E'de ölçülen düğüm sıcaklıkları Tablo 4-11'de verilmiştir. Sıcaklık, A noktasından E'ye ve 1'den 3'e kadar olan tabakalarda artmıştır. Bu bulgu, diğer bulgularla da iyi uyum göstermektedir (Hu ve diğ., 2016; Wu, Wang, ve diğ., 2017).

Birinci tabakada, B noktasındaki sıcaklık, A noktasından daha az bulunmuştur. Bu, (3) bölgesindeki sıcaklığın artması, bölge (2) tozlarından kaynaklanmaktadır. Eğer bölge (2) göz ardı edilirse, A'daki sıcaklık 1403.39 K'dan düşük olmaktadır. Ayrıca, 2. bölgedeki tozlar katılaştıkça, üstteki 3 bölgesinde daha iyi ısı akışı sağlanır. Sıcaklık dağılımı gibi, ergiyik havuzun derinliği de A noktasından E'ye ve 1'den 3'e kadar olan katmanlar arasında artmaktadır. Elde edilen değerler Şekil 4-14(b) 'te verilmektedir.

Tablo 4-11: Maximum nodal temperature at different locations of 3 layers.

	Bölge 3(A)	**Bölge -4(B)**	**Bölge 4 (C)**	**Bölge 4-5 (D)**	**Bölge 5 (E)**
Tabaka 1	1425.60	1403.39	1446.72	1456.02	1505.82
Tabaka 2	1489.34	1509.72	1524.27	1536.33	1571.52
Tabaka 3	1505.09	1535.36	1554.35	1572.41	1608.80

A, C ve E noktalarındaki düğüm sıcaklık dağılımları Şekil 4-14(a) 'te verilmiştir. C ve E noktalarının yeniden ergitilmesi, tabaka 2 ve 3'ün taranmasından görülebilir.



(a) (b)

Şekil 4-14: (**a**) İlk katmandaki A, C ve E noktalarında Zamana bağlı işleme, (**b**) verilen 5 yerdeki 3 katmanda ergiyik havuz derinliği.

İlk kattaki ısı birikimi, ergiyik havuzun derinliğini belirler. Sonraki katlarda, ısı birikimi artar ve bu da ergiyik havuzun derinliğini arttırır. Taramadan önce tüm düğümlerdeki sıcaklıklar 303 K idi. Lazer ilk katmanı tararken, A noktasındaki sıcaklığın en az 326,7 K değerine ulaştığı görülür. İkinci tabaka tarandığında, erişilen sıcaklık 390.9 K'dir. Katman taramasının sonunda diğer tüm noktalar için asgari düğüm sıcaklığı Tablo 4-12'de verilmiştir.

Tablo 4-12: Tüm izleme noktalarında lazer geçişinden sonra asgari düğüm sıcaklıkları (K).

	A	**B**	**C**	**D**	**E**
Tabaka 1	326.7	342.9	408	488.5	640
Tabaka 2	390.9	420	478.6	575.8	735.5

Sıcaklık artışı, D ve E bölgelerindeki yüksek ısı birikimine işaret etmektedir. Bu, yeni tabakalar sürece eklendikçe, ergiyik havuzun büyümesinin ve yüksek sıcaklığın sebebi olarak görülebilir.

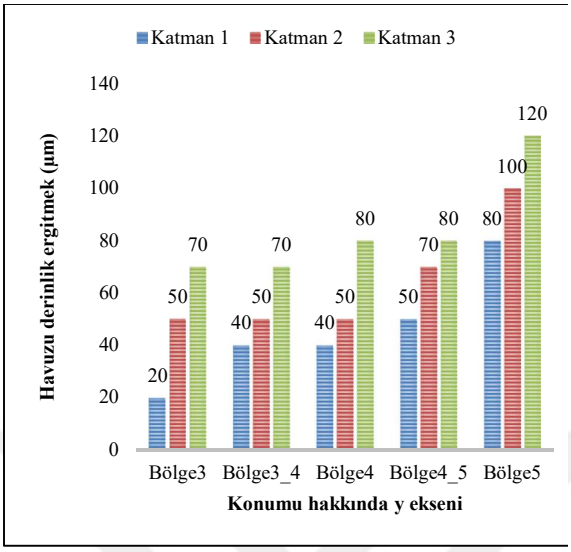
4.4.3 Farklı Lazer-Hız Değerlerinde Tek Bir Katman Üzerindeki 5 Noktada Isı Akışı.

Alt hacim bölgesinde, tez çalışmasının deneysel incelemelerinin üzerinde gerçekleştirildiği tezgâhın imalatçısı olan EOS'un önerdiği 360 W ve 1000 mm/s standart parametreleri kullanılmıştır. Sıcaklık dağılımının ve ergiyik havuzun derinliğinin değişimini gözlemleyebilmek için 250 W – 1000 mm/sn ve 200 W – 1000 mm/sn gibi diğer parametrelerle de analizler yapılmıştır (Şekil 4-15). Ergiyik havuzun derinliği Denklem 1'deki özgül enerjiye, ψ , bağlıdır.

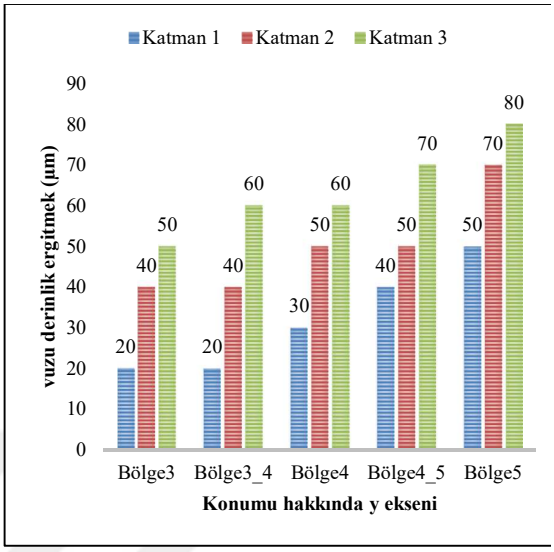
$$\psi = \frac{P}{vdh} \tag{4-1}$$

Burada P, lazer gücünü ve v, d ile h ise sırasıyla tarama hızını, katman kalınlığını ve tarama alanını ifade etmektedir. Tek paso probleminde, özgül enerji, $\frac{P}{v}$'nin bir fonksiyonudur. Mevcut durumda, hız sabittir, bu yüzden $\psi \propto P$ 'dir.

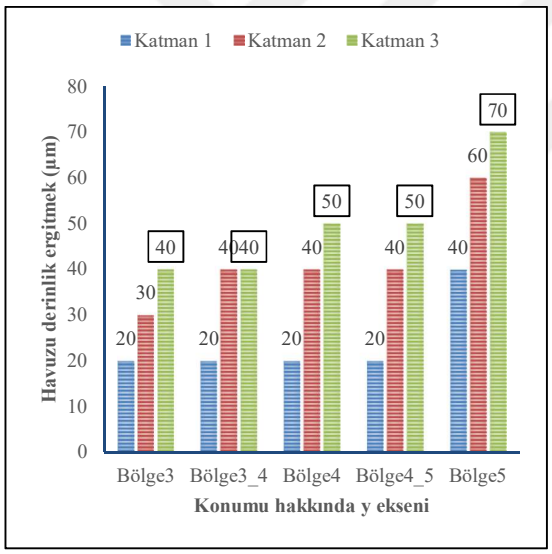
Daha az güç daha az ısı oluşumuna, düşük sıcaklık kazanımına ve küçük ergiyik havuza karşılık gelir. Bu, aşırı sıcak yüzeylerde artık ısı olarak kabul edilebilir ve burada toz Ergimesi azami düzeyde olacaktır. Bu nedenle hassas kanallar gibi küçük yapılarda artık ısının kontrolü şarttır. Bununla birlikte, yapıdaki gözeneklerin neden olduğu mekanik kusurlardan ve zayıf mikroyapısal özelliklerden kaçınmak için SLE parametrelerinin seçimi dikkatlice yapılmalıdır (Cabrini ve diğ., 2016; Rosenthal ve diğ., 2014; Thijs ve diğ., 2013).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4-15: 3 tabakanın A-E noktalarındaki havuz derinlikleri (**a**) 360 W, 1000 mm/sn, (**b**) 250 W, 1000 mm/sn ve (**c**) 200 W, 1000 mm/sn.

4.5 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN UNSUR ÖZELLİKLERİ

4.5.1 Giriş

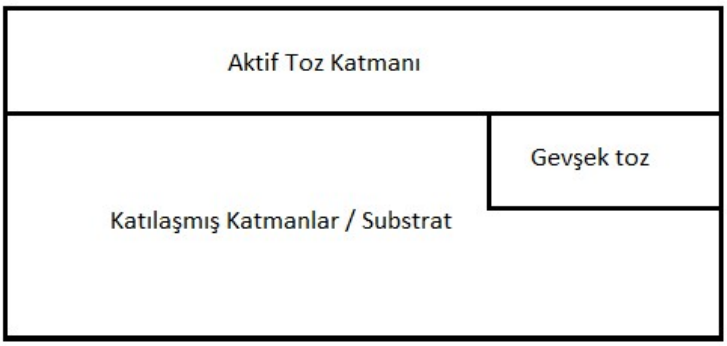
Yatay bir dairesel kanalın SLE ile üretilebilirliğinin incelenmesi için prizmatik bir numune biçimi seçilmiştir (Şekil 4-17 ve Şekil 4-20). Teorik karşılaştırmalarda kullanılmak üzere yapılacak deneyler için toplamda 17 adet numune argon gazı ortamında yapılan SLE işlemiyle üretilmiştir. Bu numunelerin 10 adedi (1. Grup) standart çekirdek parametreleri ve geriye kalan 7 numune (2. Grup) ise alt tabaka işlem parametreleri değiştirilerek üretilmiştir. Diğer önemli tezgah parametreleri Tablo 4-13'te verilmiştir.

Tablo 4-13: Analizde kullanılan AlSi10Mg malzemesinin fiziksel özellikleri ve temel işlem parametreleri.

Özellikler	**Değerler**
Katman kalınlığı	30 µm
Lazer Işın çapı	100 µm
Tarama stratejisi	Alternate, 67^0
Solidüs	830 K
Likidüs	863 K

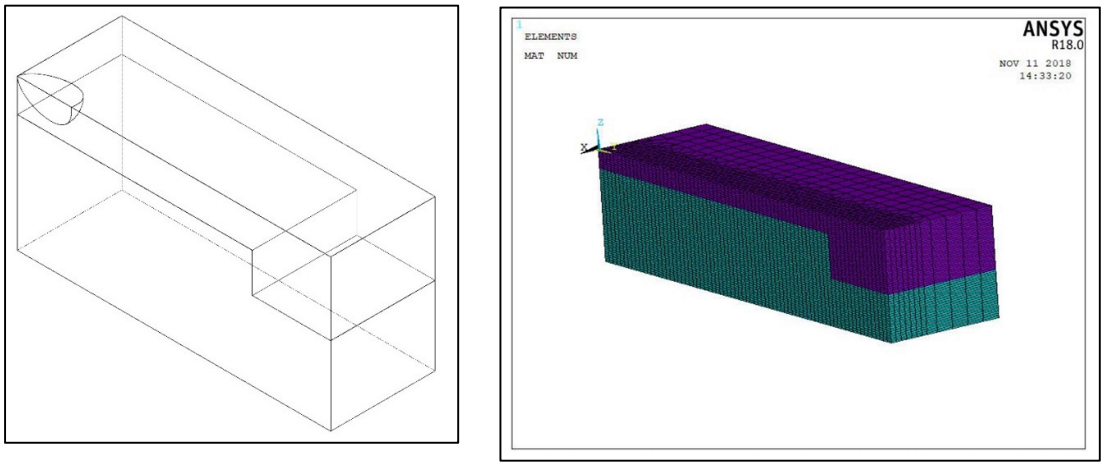
4.5.2 Sonlu eleman analizi (SEA)

Sonlu elemanlar metodu çalışması, çok Eklemeli bir durumda, hareketli Gauss kaynağını toz yatağında etkin bir şekilde benzetebilmek için geçişli ısıl analizi uygulayabilen ANSYS üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune modeli, aktif toz tabakaları, katılaşmış taban ve içi boş dairesel kanal unsurunu temsil edecek gevşek toz olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır (Şekil 4-17).



Şekil 4-16: Sonlu eleman modeli.

Simülasyonda 1.2mm x 0.9mm x 0.42mm (L x W x H) boyutlarında eksenel simetrik üç boyutlu bir numune modeli kullanılmıştır. Şekil 4-17a'de gösterildiği gibi dairesel bölge yerine sayısal analiz için dikdörtgensel bölge oluşturulmuş ve bu içi boş kanalı belirtmektedir. Simülasyon analizi, ANSYS 19.0 öğrenci versiyonu kullanılarak yapılmıştır. Tarama yönü Y ekseni boyunca alınmıştır. Model ağı (Şekil 4-17b), 31476 düğüm ve 27720 adet Solid70 tipi eleman ile oluşturulmuştur.



(a) (b)

Şekil 4-17: Nümerik analiz için parça modeli.

Tablo 4-14: 1. Grup numuneler için alınan Lazer gücü, Tarama hızı ve Tarama yönleri değerleri.

Numune	Güç	Tarama hızı	Tarama yönü	Ön sinter gücü	Ön sinter tarama hızı	Ön sinter yönü
1	370	1300	190			
2	370	1300	190	180	900	130
3	340	1150	210			
4	340	1150	210	180	900	130
5	360	1000	210			
6	360	1000	210	180	900	130
7	300	1000	190			
8	370	1600	190			
9	370	2000	210			
10	340	1300	210			

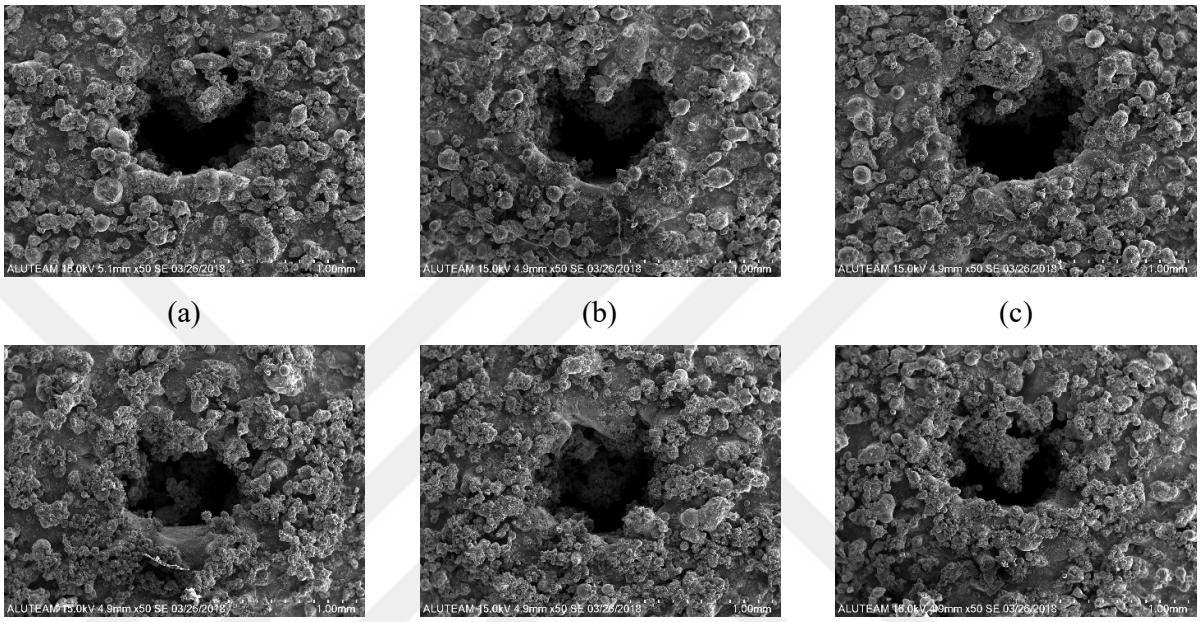
4.5.3 Tartışma

Tablo 4-14'te verilen işlem parametreleri ile SLE M290 EOS marka SLE tezgahında 5 x 5 x 5 mm^3 boyutlarında kübik numuneler üretilmiştir. Model, merkezde ϕ0.5 mm boyutunda ve oluşturulma yönüne dik olan küçük bir delik içermektedir. Tablo 4-14'te, çekirdek parametreleri değişken alınmış ancak alt tabaka (360.W, 1000 mm/sn) ve üst tabaka (340.W, 1150 mm/sn) parametreleri, 1. gruptaki tüm numuneler için aynı tutulmuştur. Ayrıca ön sinterleme stratejisi 2, 4 ve 6 numaralı numunelerde olduğu gibi seçilmiştir.

4.5.3.1 *1 Grup numunelerin incelenmesi*

Örneklerde yakından incelenen Dairesel kanallarda, alt tabaka bölgelerindeki yüksek lazer gücü ve fazla toz ergimesinden dolayı profil tıkanmalarına rastlanmıştır. Ek olarak, "E" izleme noktasında gözlemlenen yüksek sıcaklıkların nedeninin Eklemeli taramadan kaynaklanan enerji birikiminin olduğu da anlaşılmıştır. Ergiyik havuzunun taranmasından oluşturulan ikinci tabakanın derinliğinin 90 µm ve üçüncü tabakanın ise 110 µm olduğu görülebilmektedir. Şekil 4-18'de ise 1. grubun Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) mikrografları gösterilmektedir.

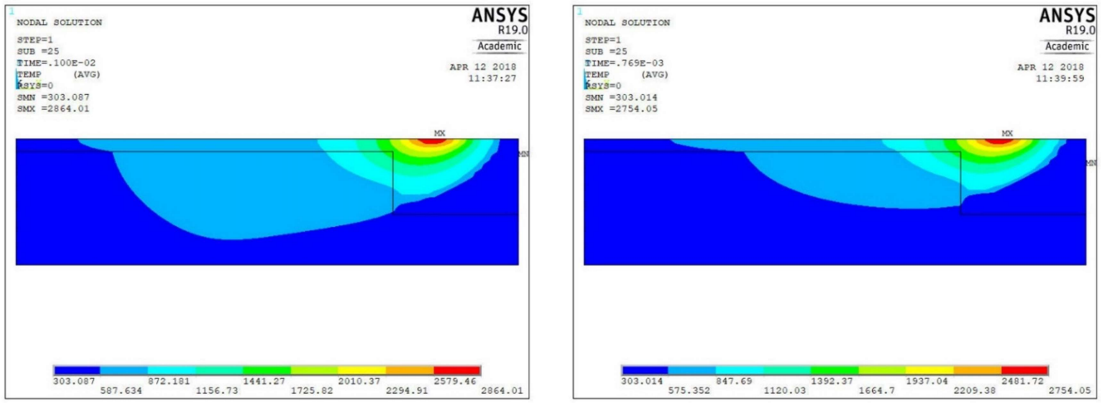
Buradan ön sinterleme stratejisinin, dairesel profilin üst yüzeyi üzerinde bir etkisinin olmadığı görülebilmektedir.



(a) (b) (c)

(e) (f) (g)

Şekil 4-18: 6 adet yatay dairesl kanallı numunenin TEM mikrografları.

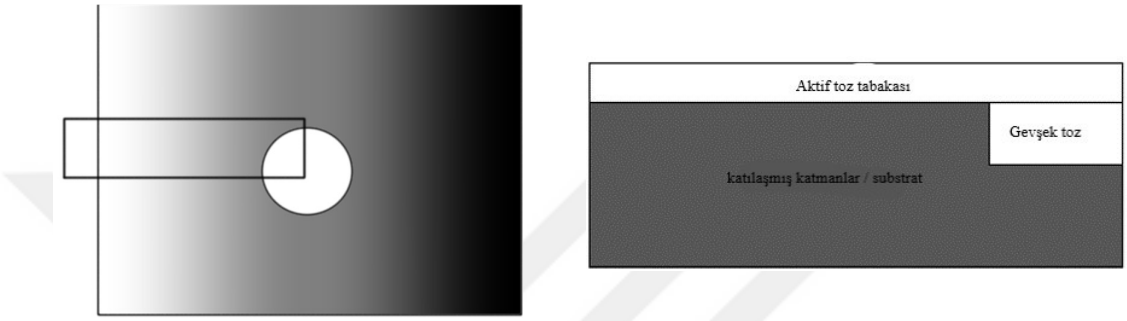


(a) (b)

Şekil 4-19: Sıcaklık dağılımları: (a) 360 W ve 1000 mm/sn ile (b) 370 W ve 1300 mm/sn.

Taranan tabaka boyutları küçük olduğundan dolayı ilk birkaç tabakanın incelemesi zor olmuştur. Bu nedenle, Şekil 4-19'de gösterildiği üzere iki farklı işlem parametrelerindeki sıcaklık dağılımı ve ergiyik havuzu boyutları ancak sayısal hesaplamalarla incelenebilmiştir.

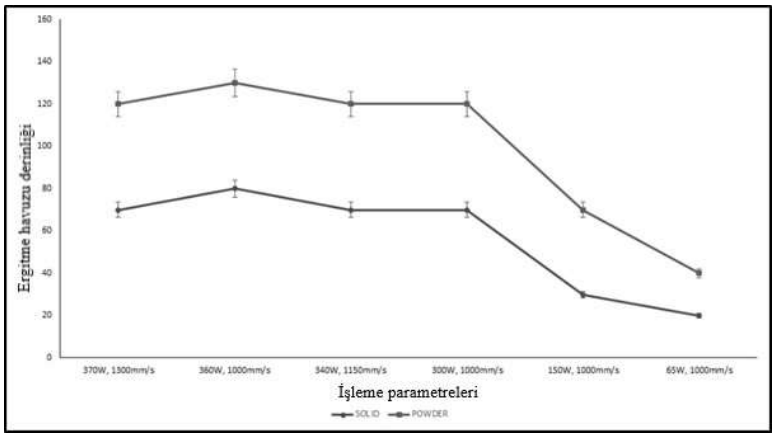
Hesaplama süresinden tasarruf etmek için modelin yarısı analiz edilmiştir. Şekil 4-20(a)'de görüldüğü gibi modelin iç köşesi sadeleştirilip Şekil 4-20(b)'de verilen SEA modeli oluşturulmuştur.



(a) (b)

Şekil 4-20: Kübik tüm modelin iç dikdörtgen bölgesinde oluşturulan SEA modeli.

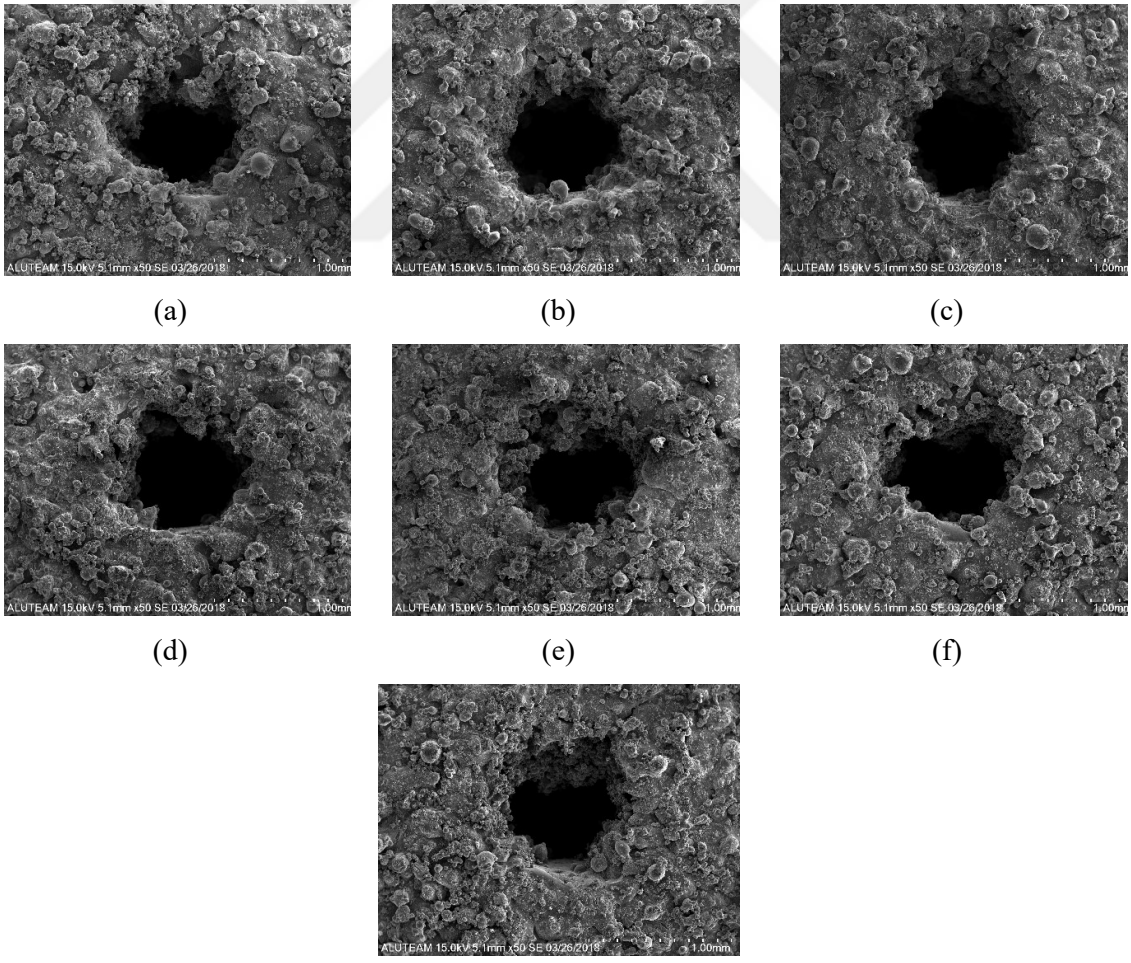
Sayısal araştırmalar için ilk olarak 1. ve 5. numune parametreleri kullanılmış ve her ikisi de daha derin nüfuziyet ortaya koymuştur. Şekil 4-21'de farklı lazer güçleri ve tarama hızlarındeki ergiyik havuz derinliği gösterilmektedir.



Şekil 4-21: Tarama hızına ve Lazer güç değişimine göre Ergiyik havuz derinliği.

Tablo 4-15: 2. Grup SLE üretim parametreleri.

2. Grup numune	Lazer gücü	Tarama hızı	Katman numarası
1	65	1000	3
2	65	1000	4
3	65	1000	5
4	65	1000	6
5	150	1000	3
6	150	1000	4
7	150	1000	5



(a) (b) (c)

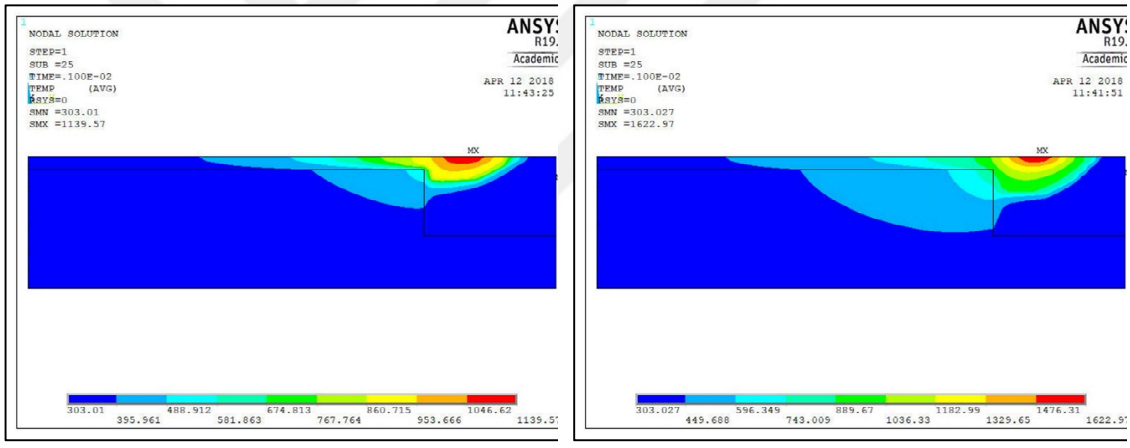
(d) (e) (f)

(g)

Şekil 4-22: 2. Grup numunelerin TEM analizleri.

4.5.3.2 *2 Grup numunelerin alt tabaka parametreleriyle üretimi*

Bir sonraki adımda, temel parametreler Tablo 4-15'te verilen 7 örnek için aynı tutulurken alt tabaka parametreleri değiştirilmiştir. Varsayılan olarak, alt tabaka parametreleri sadece 3 katman için taranmış olup, katmanlar 150 W ve 65 W gibi iki farklı lazer gücü için imal edilmiştir. İki, üç ve dört no'lu numuneler diğerlerine göre daha az cüruf göstermiş, ancak hemen hemen tüm numunelerde 1. Gruptakilere kıyasla daha iyi üretim detayları ortaya koymuştur (Şekil 4-22). Şekil 4-23'te 65 W ve 150 W ile sıcaklık dağılımı ve ergiyik havuzu oluşumu gösterir ve ergiyik havuzu derinliği Şekil 4-19'dekine göre daha küçük gözlemlenmektedir.



(a) (b)

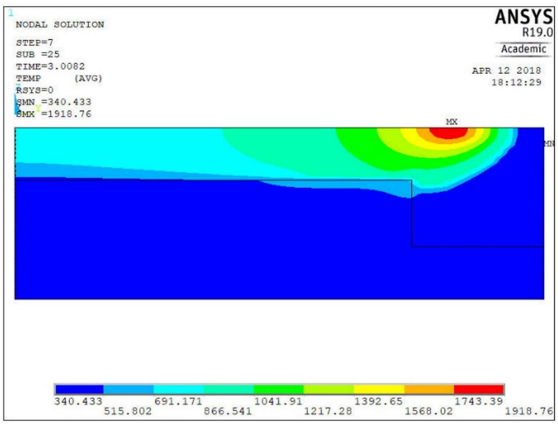
Şekil 4-23: (a) 65 W ve 1000 mm/sn ile (b) 150 W ve 1000 mm/sn. için sıcaklık dağılımları.

4.5.3.3 *Çoklu Eklemeli 2. Grup numuneleri*

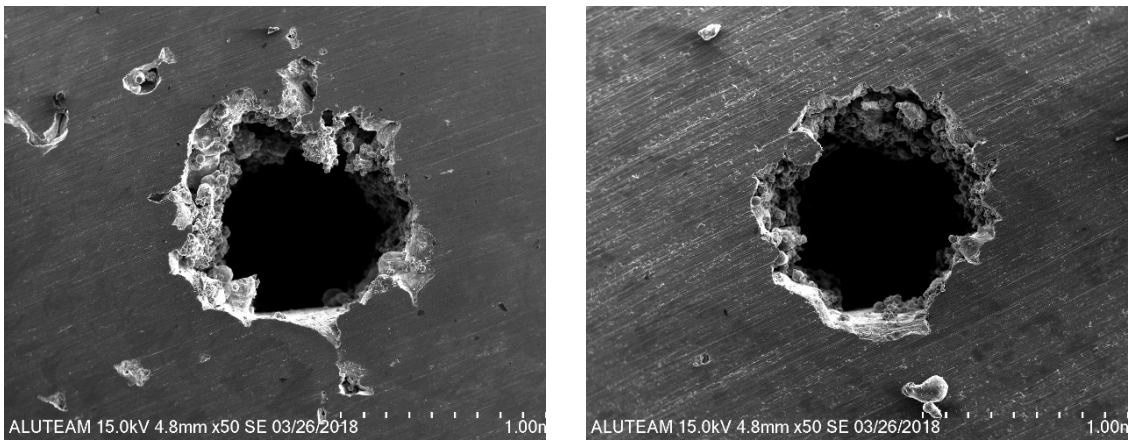
Sıcaklığının çoklu katmanlar üzerindeki etkisini gözlemlemek için 4 Eklemeli bir model ele alınmıştır. İlk üç katmanı taramak için 65 W ve 1000 mm/sn; 4. katman içinse 360 W, 1000 mm/sn değerleri kullanılmıştır. Şekil 4-24'te 4. katmanın daha önce katılaşmış tabakalar üzerinde taranması sırasında oluşan ısının etkisi görülmektedir. Ayrıca, 360 W lazer gücü için nufuziyet derinliği son tabaka derinliğine eşit alınmıştır (Liu ve diğ., 2018).

Şekil 4-24'te görüldüğü gibi, 4. tabakanın taranması sırasında, sıcak ergimiş havuz önceden katılaşmış 3. tabakaya nüfuz etmektedir. 2. Grub'un 1 nolu numunesinde hafif cüruf oluşumu

Şekil 4-25 (b)'teki SEM görüntüsü sayesinde gözlemlenmiştir. Alt tabaka (Down-skin) bölgesi için ilk katmanın tabanına ulaşamayan yetersiz ısı gözeneklere neden olur. 4. tabakanın SEM görüntüsü Şekil 4-25 (a) 'te verilmiştir. Yuvarlak profiller elde etmek için, işleme parametrelerinin dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Örneğin, SLE'deki tarama sürekli değildir, bu nedenle, kenarlardan deliğe sıvı girmesini önlemek için münferit noktalar arasındaki mesafenin kontrol edilmesi gerekmektedir. Üstelik, böyle küçük bir boyut için dairesel profiller katman kalınlığının katlarında olmalıdır, aksi halde düzgün olmayan boyutlar tozların fazla ergimesine neden olabilir. Ayrıca, bir deliğin yeri yukarıdaki sebepten dolayı tabaka kalınlığının katları oranında seçilmesi gerekliliği tespit edilmiştir.



Şekil 4-24: İlk üç katı 65 W ve 1000 mm/snn'de işlenmiş yapı üzerinde 360 W ve 1000 mm/snn ile oluşturulmuş 4. kattaki sıcaklık dağılımı.



(a) (b)

Şekil 4-25: 2. Gruptaki (a) 4. ve (b) 3. Numunelerin TEM görüntüleri.

4.6 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MUKAVEMET AÇILARINDAN İNCELENMESİ.

4.6.1 Giriş

Seçmeli Lazer Eritme (SLE), Toz Bazlı Üretim (TBÜ) tekniklerinden olan Katmanlı Üretim (KÜ) metodlarından biridir. SLM'de, birkaç küçük tabaka halindeki tozlar, katı bir yapı oluşturmak için yüksek güçlü bir lazer kaynağı kullanılarak birbirine kaynaştırılır. Şimdiye kadar, mikro işlem, mekanik mukavemet ve korozyon ile ilgili KÜ sürecinin çeşitli yönleri üzerinde hem sayısal olarak (Khan ve diğ., 2018a; Khan ve diğ., 2018b) hem de deneysel olarak (Koc ve diğ., 2016; Kruth ve diğ., 2005) araştırma yapılmıştır. Sonuç olarak, endüstriyel kuruluşlar için parçalar üretilmesinde önem kazanmış bulunmaktadır (Everton ve diğ., 2016; Gong ve diğ., 2014).

Bununla birlikte, SLE'de aynı şekilde işlenmiş iki numune aynı fiziksel özelliklere sahip olamaz. Bu da toz yayıcıya göre parçaların işlenmesinden, çevrilmesinden veya oryantasyonundan kaynaklanmaktadır (Drummer ve diğ., 2012; Olakanmi ve diğ., 2015). Bunun yanında parçalar farklı yönlerde değişen mekanik mukavemete sahip ve böylece anizotropiye oldukça duyarlıdır (Zhang ve diğ., 2016). Bu nedenle, SLE parçalarının gerçek mekanik davranışını tanımlamak için belirli bir değer yoktur. Diğer taraftan istatistiksel analiz, tasarım hedeflerini güvenli parametreler içinde elde etmek için uygun bir araçtır. Weibull dağılımı böyle bir analiz aracı olup, yakın zamanda KÜ parçalarının ve diğer kompozit yapıların yorulma ve kırılma özelliklerinin tanımlanmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Quercia ve diğ., 2016).

Weibull dağılımı, bir deneyde farklı sonuçların ortaya çıkma olasılığını matematiksel olarak ölçmek için sürekli bir olasılık dağılımı fonksiyonuna dayanır (Birgoren ve Dirikolu, 2004; Brandl ve diğ., 2012; Quercia ve diğ., 2016). Weibull dağılımı genellikle tahmin yaklaşımını geliştirmek için güvenilirlik ve başarısızlık analizinde kullanılır. Kompozit malzemeler için mekanik özelliklerin belirlenmesinde literatürde birkaç çalışma bulunmaktadır. KÜ'de, E. Brandl ve diğ. (Brandl ve diğ., 2012), farklı yönlerde inşa edilen ısıl işlem görmüş numunelerde yorulma mukavemetini araştırmak amacıyla Wohler eğrilerinin interpolasyonunda Weibull dağılımını kullanmışlardır.

Bu çalışmada AlSi10Mg alaşım malzemesinden 25 adet küp numunesi standart EOS işleme parametreleri kullanılarak SLE ile üretilmiştir. Tüm örneklerin basma mukavemeti değerlerindeki değişimler Weibull dağılımı kullanılarak modellenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar grafik şeklinde sunulmuştur.

4.6.2 Deneyler

Deneylerdeki numune, SLE, EOS M290 GmbH makinesinde AlSi10Mg alaşımlarından hazırlanmıştır. Analiz için 5x5x5 mm^3 boyutunda basit kübik bir model seçilmiş ve 25 numunenin tamamında EOS'un standart işlem parametreleri uygulanmıştır (4-26). Tarama parametreleri Tablo 4-16'da gösterilmiştir. Basma deneyi için, nispeten benzer fiziksel boyutlara sahip olan 22 numune seçilmiştir. Basma deneyi, 100 kN'luk bir yükleme kapasitesine sahip Instron 5982 çift kolonlu test sistemi üzerinde ASTM E 8M-04 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

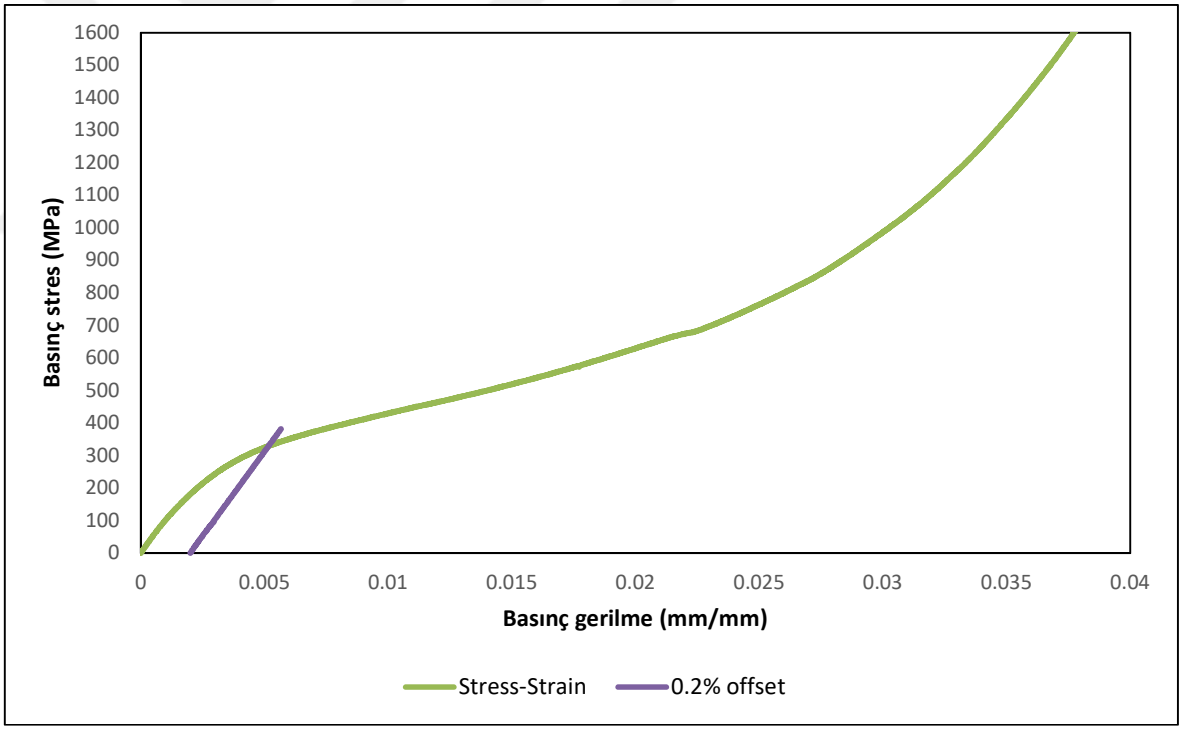
Tablo 4-16: Bu analizde kullanılan AlSi10Mg parametrelerinin ve fiziksel değerlerinin işlenmesi.

Özellikler	**Değerler**
Lazer Gücü	370 W
Tarama Hızı	1300 mm/s
Kuluçkalık	190 µm
Katman Kalınlığı	30 µm
Spot Boyut Çapı	100 µm
Tarama Stratejisi	Alternate, 67^0

Basma deneylerinde 0.5mm/dk'lık hız ve oda koşulları kullanılmıştır. Tablo 4-17'de basma gerilmeleri, gerinim ve örnek sayılarına karşılık gelen numune büyüklükleri gösterilmektedir.



Şekil 4-26: KÜ ile AlSi10Mg'den imal edilen 22 adet numune (4 adedi sonradan eklenmiştir).



Şekil 4-27: Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı, % 0.2 offset basma mukavemeti.

Tablo 4-17: Basma deneyleri sonuçları.

Numune No:	Basmada akma muk. (MPa)	Basma muk. (MPa)	Boyutlar (mm^2) (L x W)	Kesit alanı (mm^2)
1	329.89	585.06	5.11 x 5.14	26.27
2	353.02	585.69	5.10 x 5.11	26.06
3	321.03	561.83	5.09 x 5.08	25.86
4	382.59	571.90	5.12 x 5.11	26.16
5	337.52	578.68	5.11 x 5.11	26.11
6	344.01	579.87	5.11 x 5.09	26.01
7	342.98	586.90	5.11 x 5.11	26.11
8	359.96	566.04	5.16 x 5.11	26.37
9	337.67	579.67	5.12 x 5.10	26.11
10	368.35	588.66	5.12 x 5.11	26.16
11	364.12	598.93	5.11 x 5.10	26.06
12	361.77	618.11	5.09 x 5.08	25.86
13	356.18	594.29	5.09 x 5.09	26.11
14	349.61	592.75	5.11 x 5.11	25.91
15	335.77	590.89	5.12 x 5.11	26.11
16	344.34	574.45	5.11 x 5.12	26.16
17	354.14	573.43	5.12 x 5.12	26.16
18	340.27	582.35	5.15 x 5.12	26.21
19	341.72	592.90	5.12 x 5.09	26.37
20	338.02	592.65	5.14 x 5.12	26.06
21	370.92	593.38	5.12 x 5.11	26.32
22	343.79	592.50	5.11 x 5.11	26.16

4.6.3 Sonuç

4.6.3.1 *Weibull Dağılımı*

Weibull dağılımı, SLE ile üretilmiş numunelerin karakteristik basma gerilmelerini ölçmek için kullanılır. İki veya üç parametreli olmak üzere iki popüler Weibull dağılımı vardır. Üç parametreli Weibull dağılımı, kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu tarafından verilir (Weibull, 1951);

$$F(x;\alpha,\beta,\gamma) = 1 - \exp\left(-(\frac{x-\alpha}{\beta})^{\gamma}\right) \quad (4\text{-}2)$$

$$\alpha,\beta,\gamma \geq 0$$

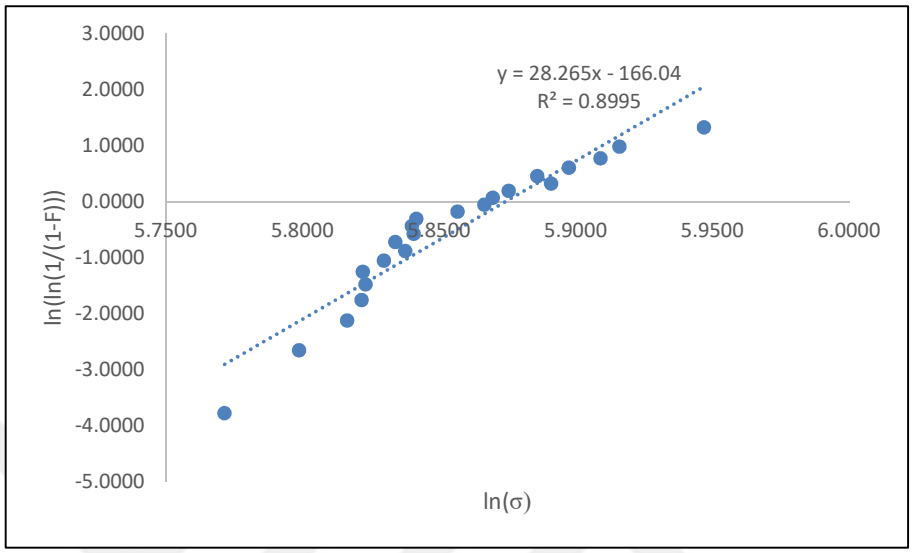
α, β ve γ, sırasıyla dağılımın konumu, ölçeği ve şekil parametreleridir. α = 0 ise, üç parametreli Weibull dağılımı iki parametreli Weibull dağılımına dönüşür ve formülü aşağıdaki şekilde yazılır;

$$F(x;\beta,\gamma) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}\right) \quad (4\text{-}3)$$

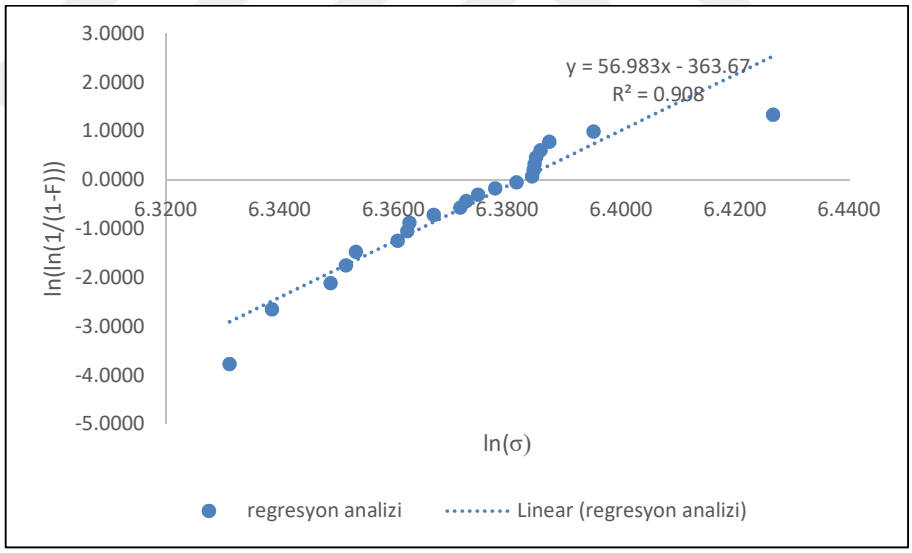
Mevcut ayarlarda F (x; β, γ) olasılık fonksiyonu, basma mukavemetinin x değerine eşit veya daha az olduğunu gösterir. Bir başka R (x; β, γ) güvenilirliği F (x; β, γ) + R (x; β, γ) = 1 eşitliğinden çıkarılabilir. Burada R (x; β, γ), basma mukavemeti olasılığının en azından x'e eşit olduğunu göstermektedir.

$$R(x;\beta,\gamma) = \exp\left(-(\frac{x}{\beta})^{\gamma}\right) \quad (4\text{-}4)$$

$$\beta,\gamma \geq 0$$



(a)



(b)

Şekil 4-28: (a) Basmada akma mukavemeti için (b) Basma mukavemeti için Regresyon doğrusu.

F (x; β, γ) dağılım fonksiyonunun ölçeğini ve şekil γ parametrelerini değerlendirmek için, MS Excel ™ yazılımı kullanılarak düz bir çizginin yerleştirildiği bir doğrusal regresyon yöntemi uygulanmıştır. Yukarıdaki parametreleri gözlemlemek için çok sayıda yöntem ve yazılımlar bulunmaktadır. Ancak mevcut analiz için doğrusal regresyon istatistik yaklaşımı seçilmiştir.

4.6.3.2 Doğrusal regresyon yöntemi

Doğrusal bir regresyon yönteminin kullanılma amacı, F (x; β, γ) = 1-$exp\left(-(\frac{x}{\beta})^{\gamma}\right)$, denklemini, kolay bir değerlendirme için düz bir çizginin en basit biçimine dönüştürmektir. Yukarıdaki denklem ilk olarak $1 - F(x;\beta,\gamma) = exp\left(-(\frac{x}{\beta})^{\gamma}\right)$ şeklini alır ve daha sonra denklemin her iki tarafına çift logaritması uygulanmıp aşağıdakı denklemi elde edilir;

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(x;\beta,\gamma)}\right)\right] = \gamma\ln(x) - \gamma\ln(\beta) \quad (4\text{-}5)$$

Denklem 3, $Y = mX + c$ satırını andırır. F (x; β, γ) fonksiyonu burada bilinmeyen bir parametredir ve bu deneyde test edilen 22 numunenin gözlemlenen basma değerlerinden tahmin edilir. Basma değerleri ilk önce en küçükten en büyük sıkıştırma gerilmelerine kadar artan değerler dizisi halinde sıralanır. Daha sonra F (x; β, γ) fonksiyonu aşağıdaki şekilde olur;

$$F(x_i;\beta,\gamma) = (x_i - 0.5)/n \quad (4\text{-}6)$$

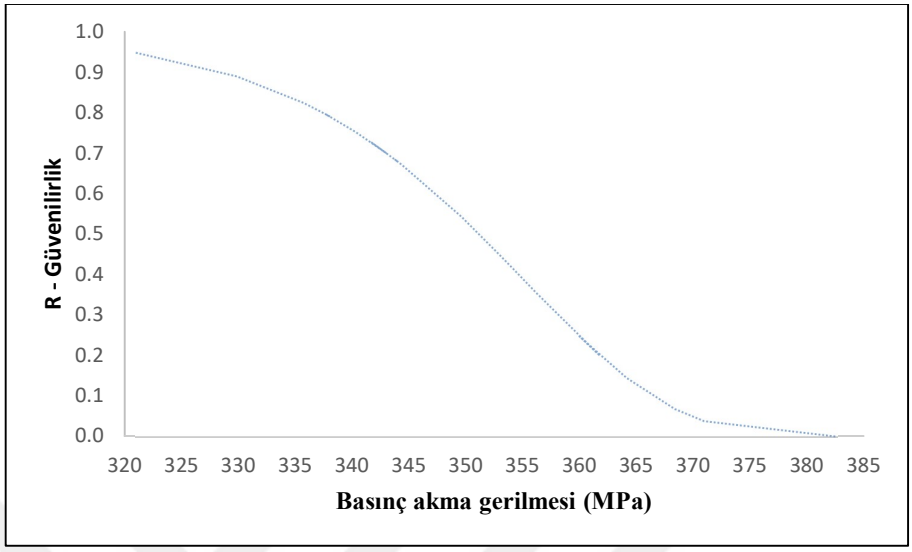
Söz konusu parametreler elde edilen basınç verim stres ve basınç dayanımı ile ilgili olarak Tablo 4-17 ve Tablo 4-19 ve Tablo 4-18. Burada n; numune toplamı olup sayısı 22'dir. Şekil 4-28(a) ve (b)'de gösterildiği gibi β ve γ parametrelerini tahmin etmek için doğrusal regresyon $Y = ln\left[ln\left(\frac{1}{1-F(x;\beta,\gamma)}\right)\right]$ ve $X = ln(x)$ değerleri çizilerek regresyon çizgisi elde edilir.

Tablo 4-18: Basmada akma mukavemeti için güvenirlik analizi.

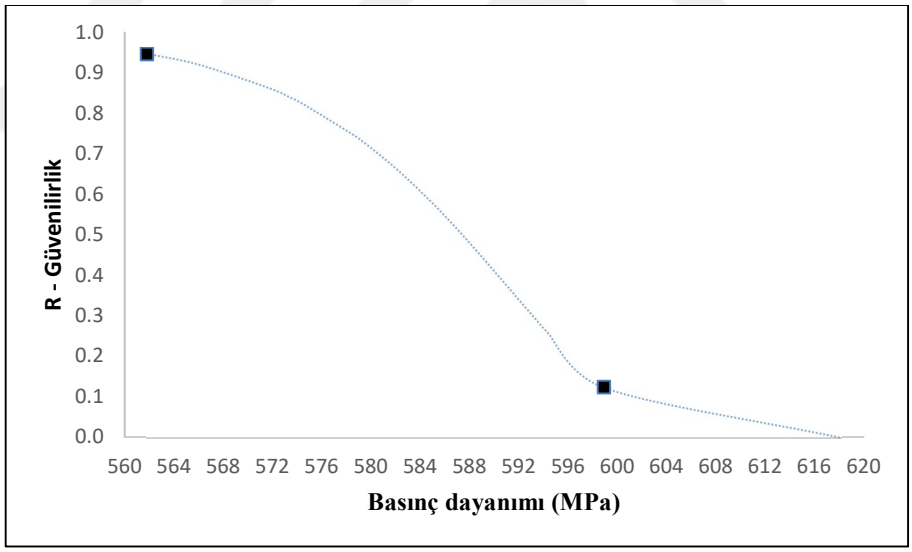
S. No	Basınç Verme Stres (MPa) (x)	$F(x_i;\beta,\gamma)$	$X = ln(x)$	$Y = ln\left[ln\left(\frac{1}{1-F(x;\beta,\gamma)}\right)\right]$	Güvenilirlik R(x; β, γ)
1	321.027	0.023	5.772	-3.773	0.947
2	329.892	0.068	5.799	-2.650	0.888
3	335.768	0.114	5.816	-2.115	0.822
4	337.517	0.159	5.822	-1.753	0.797
5	338.023	0.205	5.823	-1.475	0.790
6	337.673	0.250	5.822	-1.246	0.795
7	340.274	0.295	5.830	-1.049	0.752
8	342.976	0.341	5.838	-0.875	0.700
9	341.720	0.386	5.834	-0.717	0.725
10	344.012	0.432	5.841	-0.570	0.678
11	343.790	0.477	5.840	-0.433	0.683
12	344.345	0.523	5.842	-0.302	0.671
13	349.610	0.568	5.857	-0.175	0.542
14	353.016	0.614	5.867	-0.050	0.447
15	354.141	0.659	5.870	0.073	0.414
16	356.183	0.705	5.875	0.198	0.355
17	361.774	0.750	5.891	0.327	0.200
18	359.957	0.795	5.886	0.462	0.247
19	364.123	0.841	5.897	0.609	0.145
20	368.350	0.886	5.909	0.777	0.069
21	370.916	0.932	5.916	0.988	0.038
22	382.585	0.977	5.947	1.331	0.0004

Tablo 4-19: Basma mukavemeti için güvenirlik analizi.

S. No	Basınç dayanımı (MPa) (x)	$F(x_i;\beta,\gamma)$	$X = ln(x)$	$Y = ln\left[ln\left(\frac{1}{1-F(x;\beta,\gamma)}\right)\right]$	Güvenilirlik $R(x;\beta,\gamma)$
1	561.833	0.023	6.331	-3.773	0.947
2	566.042	0.068	6.339	-2.650	0.920
3	571.903	0.114	6.349	-2.115	0.860
4	573.429	0.159	6.352	-1.753	0.839
5	574.446	0.205	6.353	-1.475	0.823
6	578.681	0.250	6.361	-1.246	0.744
7	579.666	0.295	6.362	-1.049	0.722
8	579.870	0.341	6.363	-0.875	0.718
9	582.347	0.386	6.367	-0.717	0.655
10	585.061	0.432	6.372	-0.570	0.576
11	585.688	0.477	6.373	-0.433	0.556
12	586.902	0.523	6.375	-0.302	0.517
13	588.660	0.568	6.378	-0.175	0.457
14	590.889	0.614	6.382	-0.050	0.379
15	592.499	0.659	6.384	0.073	0.322
16	592.652	0.705	6.385	0.198	0.317
17	592.751	0.750	6.385	0.327	0.313
18	592.899	0.795	6.385	0.462	0.308
19	593.376	0.841	6.386	0.609	0.292
20	594.286	0.886	6.387	0.777	0.261
21	598.932	0.932	6.395	0.988	0.123
22	618.111	0.977	6.427	1.331	0.000



Şekil 4-29: Basmada akma mukavemeti için Weibull güvenirlik dağılımı.



Şekil 4-30: Basma mukavemeti için Weibull güvenirlik dağılımı.

Böylece sıkıştırma verim stres için elde edilen denklem form;

$$y = 28.265x - 166.04 \quad (4\text{-}7)$$

Burada, m = γ = 28.265, regresyon çizgisinin eğimi, şekil parametresinin değerini gösterir. γ> 0, basma yüklemesi nedeniyle artan bir hata oranını belirtir. Daha büyük basma değerlerinde

her birim artış için malzemenin kırılma olasılığını gösterir. Parametre verilerinin dağılım ölçeği, (4-5 ve (4-7 denklemlerinden elde edilebilir ve β = 355.73 MPa'yı bulunur.

X = 355.73 MPa için verilen sıkıştırma gerilmesinin ortaya çıkmasının R (x; β, γ) güvenilirliği β ve γ parametreleri kullanılarak denklem (4-4'ten çıkarılabilir. Bu nedenle, $R(355.73; 355.73; 28.265) = 0.3545$, yani test edilen AlSi10Mg alaşımlarının %43.59'u, en az 1396.02 MPa'lık bir basma mukavemetine sahiptir. Şekil 4-29 ve Şekil 4-30'de R (x; β, γ) çizimi gösterilmiştir.

Tabloda, 321.03 MPa'dan daha düşük basma akma mukavemeti olan bileşenin basma testinde kırılmayacağını göstermektedir. Öte yandan, 382.5 MPa'nın üzerindeki basma gerilmeleri, testten sadece % 0.04 şansla kırılmadan çıkacaktır. 0.90 güvenilirlik değeri için, basma mukavemeti 328.08 MPa'da bulunmuştur. Bu, incelenen numunelerin neredeyse % 90'ının, 328.08 MPa'a eşit veya daha düşük basmada akma mukavemeti ile basma testinden hasarsız geçeceği anlamına gelir.

Basma mukavemetine karşılık gelen değerler, basmada akma dayanımı değerleri ile birlikte Tablo 4-20'de verilmiştir.

Tablo 4-20: Weibull dağılım parametreleri.

Parametreler		**Basınç akma dayanımı**		**Basınç dayanımı**	
Denklem		$y = 28.265x - 166.04$		$y = 17.024x - 113.71$	
$m = \gamma$		28.265		17.024	
β		355.73		795.65	
$R(x; \beta, \gamma)$	**@*x***	**355.73**	35.45%	**591.20**	36.74%
Alt limit, *R*		**321.03**	94.65%	**561.83**	94.66%
Üst limit, *R*		**382.5**	0.04%	**618.11**	~0.00%
R = 90%		328.08 MPa		569.07 MPa	

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölüm, aynı başlık altında 4. bölümde yapılan tartışmayı ele almaktadır.

- ÇELİK MALZEMELİ ÇIKINTI ANALİZİ
- PARÇA KONUMU VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
- AlSi10Mg İÇİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
- ÇOKLU PLATFORMDA ISI AKIŞI
- SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN UNSUR ÖZELLİKLERİ
- SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MUKAVEMET AÇILARINDAN İNCELENMESİ.

5.1 ÇELİK MALZEMELİ ÇIKINTI ANALİZİ

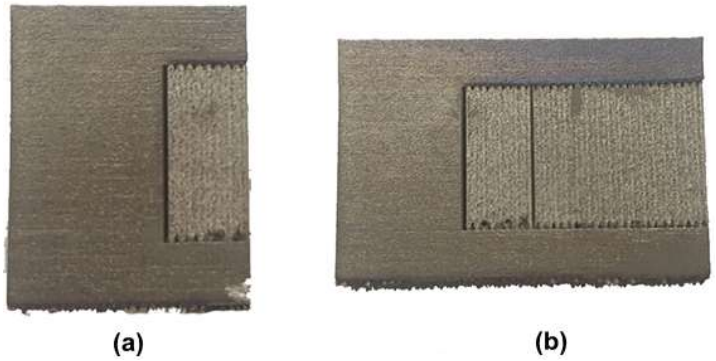
Tablo 4-6, böyle küçük bir ışın boyutu (0.07 mm) için, yüksek ısı dağılımı için dişin büyük üst uzunluğunun gerekli olduğunu göstermektedir. Yeni katmanların eklenmesiyle, sıkı bir şekilde paketlenmiş destek profilleri, artan ağırlığa başarıyla dayanır ve ayrıca çıkıntı bölgelerinde biriken gerilimi önler (Senthilkumaran ve diğ., 2009b). Olay enerjisi tüm numuneler için aynı olduğundan, termal artık gerilmeyi azaltmak tamamen destek geometrisine bağlıydı. Tarama parçalarının başlangıcı, yüksek gerilimli bölgelerdir. Bu katılaşma sırasında yüksek çekme kuvveti ile sonuçlanır. Sonuç olarak, destek yapısı alt tabandan ayrılır ve Şekil 4-3'ta gösterildiği gibi çıkıntı yüzeyinde çarpıklığa neden olur. Çıkıntı uzunluğundaki veya fileto ilavesi gibi uzun tarama parçalarındaki eğilmeleri önlemek için bazı çözümler önerilmiştir (Zhu ve diğ., 2006).

Çıkma yüzeyinin farklı destek profillerinde yüzey pürüzlülüğü, Şekil 4-5, Şekil 4-6 ve Şekil 4-7'te gösterilmektedir. Beklendiği gibi, yoğun destek, özellikle alt-tabakadan çıkarma işleminden sonra kalan fazla miktarda kaba tortu nedeniyle, yüksek yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlanmaktadır. Dahası, yoğun destek profillerine sahip numunelerin çıkarılması sadece zor değildi, aynı zamanda kesme işleminden sonra yüzey üzerinde birçok çizik bıraktı. Bu nedenle, diş parametrelerinin kapaklara kıyasla yüzey kalitesini güçlü şekilde etkilediği bulunmuştur. Destek profillerindeki farklılığın sertlik üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı bulundu. Sertlik, tüm çıkma uzunluklarında 35 Hv ± 2'de ölçülmüştür.

Çıkma yüzeyi birkaç karmaşık geometrinin bir parçasıdır. Bazı durumlarda, çıkma yüzeyi için düzenli destek sağlanması çok karmaşıktır. Örneğin, küçük dairesel deliklerdeki veya montaj yapılmayan yapılardaki destekler yalnızca çıkarılması zor değildir, aynı zamanda çıkarılması bazen parçalara zarar verir. Bu nedenle, bu gibi durumlarda, ışık destekleri daha uygun ve verimli bulundu. Bu çalışmada, çıkma uzunluğundaki çarpıklığın derecesi analiz edildi. Farklı destek profillerinin sadece belirli uzunluklar için uygun olduğu bulundu. Örneğin, örnek 8'de, ilk 7.16 mm çıkma uzunluğunda hiçbir çözgü belirtisi görülmedi. Diğer numunelerin bozulmamış uzunluğu Tablo 4-4'te verilmiştir. 13 ve 14 numaralı numuneler yüksek çarpıklık göstermiştir ve bu nedenle, zayıf destek tabanı nedeniyle sinterlenememiştir. Bu iki numune için tarama işlemi, toz sıyırıcısına zarar gelmemesi için sonlandırıldı.

Numune 8 için sunulan hipotezi doğrulamak için, çıkma uzunluğunun bir kısmı, Şekil 5-1 (a) 'de gösterildiği gibi 7.16 mm uzunluğunda yeniden oluşturulmuştur. Yeni örnek hiçbir bükülme göstermedi ve yüzey pürüzlülüğü de değişmedi. Bu nedenle, bulgular çıkma uzunluğunun daha büyük, yapıdaki enerji girişinin daha yüksek olduğunu, dolayısıyla eğrilmeyi önlemek için yoğun destek yapıları önerildiğini ortaya koymaktadır. Tersine, desteğin kaldırılmasının zor olduğu çıkıntı bölgeleri, daha hafif destek kullanılabilir.

Başka bir durumda, toplam 25 mm çıkma uzunluğu için bir hibrit destek yapısı önerilmiştir. İlk 7.16 mm sarkma uzunluğuna, örnek 8'in destek profili verildi ve geri kalan, Şekil 5-1 (b) 'de gösterildiği gibi örnek 4 profili ile kaplandı. Yeni durum, 0.73 mm ve genel bozulmamış 13.09 mm uzunluğunda önemli bir bükülme gösteriyor. Bunun nedeni başlangıçtaki zayıf destek ve enerji girdisine kıyasla nispeten büyük bir çıkma büyüklüğüdür.

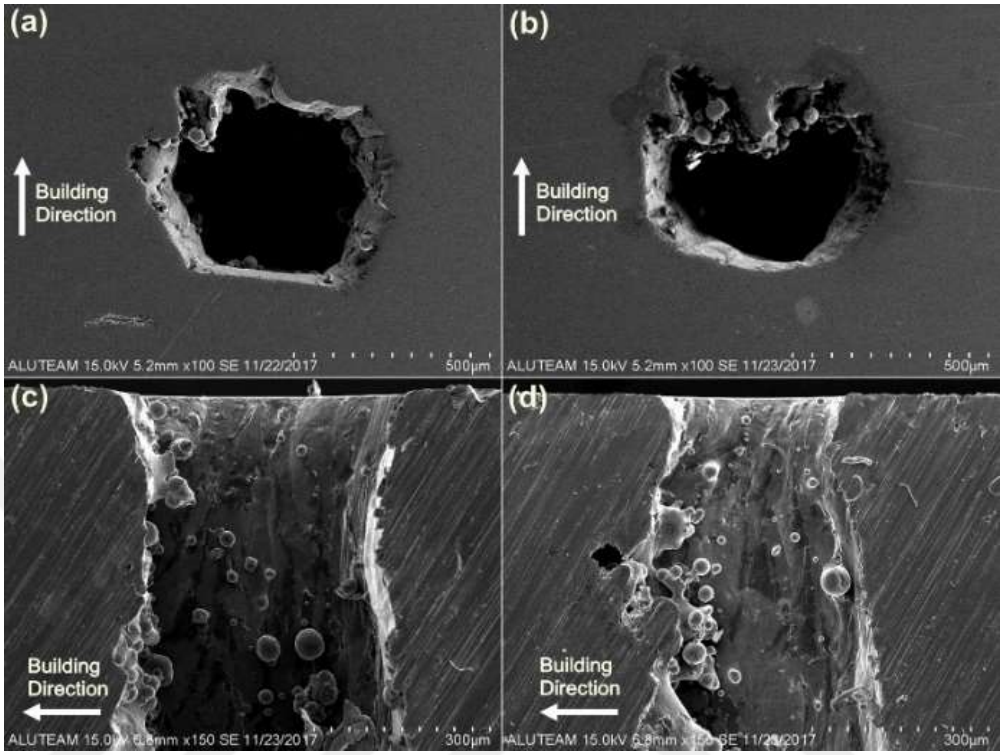


Şekil 5-1: a) Yalnızca 7.16 mm çıkıntı uzunluğunda üretilen Numune 8, a) İki farklı destek bloğuyla Numune 8. İlk 7.16mm için, örnek 8'in destek profili seçildi ve örnek 4'ün uzunluk destek profilinin geri kalanı için kullanıldı.

Bu çalışmanın odağı, çıkıntı bölgesi için mümkün olan en iyi destek yapısını tespit etmektir. Daha az artık gerilmenin ve küçük çözgülerin çıkma yüzeylerinde yoğun destek yapıları ile bağlantılı olduğu bulundu.

5.2 PARÇA KONUMU VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Görüldüğü gibi, düz yüzeyin yüzey pürüzlülüğü, parça konumuna bakılmaksızın tüm işlenmiş numunelerde eğimli yüzeyden her zaman düşük bulunmuştur (Şekil 4-9). Bununla birlikte, farklı köşelerde işlenen örnekler için yüzey pürüzlülüğü açısından önemsiz bir değişiklik vardı. Köşe örneklerindeki merkeze kıyasla nispeten yüksek yüzey pürüzlülüğü, lazer ışınının açılı bir şekilde gerçekleşmesi ile gerçekleştirilebilir. Yatay olarak oluşturulmuş silindirik kanalların kesit ve iç bölümlerinin SEM görüntüleri Şekil 5-2'de verilmiştir. Ek olarak, denenen tüm numuneler için aynı ölçülen sertlik değeri aynıdır.



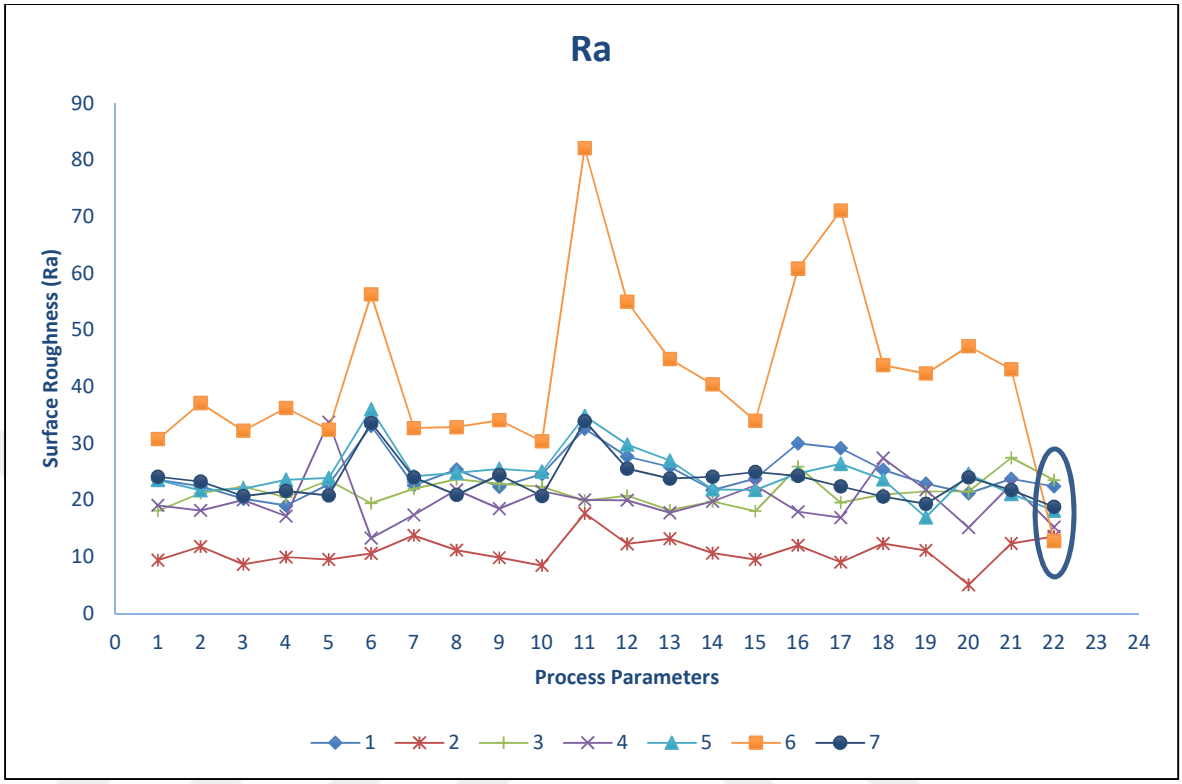
Şekil 5-2: (a, c) merkez ve (b, d) köşe örnekleri için hassas kanalların SEM görüntüsü.

Merkezi olarak işlenmiş bir numunenin dairesel profilleri, köşeli numunelere kıyasla daha iyi iç yüzeyler göstermiştir. Aynı şekilde, ağır cüruf oluşumu ve üst yüzey düzensizlikleri köşe örneklerinde daha belirgindir.

SLE'deki fabrikasyon konumu ilginç bir kanıt ortaya çıkardı. Santral örneklerin düz ve eğimli yüzlerinin yüzey pürüzlülüğü, köşelerden daha iyi bulunmuştur. Ayrıca, merkezi olarak işlenmiş numunelerdeki yatay delikler daha az yüzey düzensizliği gösterir.

5.3 AlSi10Mg İÇİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Farklı yüzlerin yüzey pürüzlülüğündeki değişim Şekil 5-3 gösterilmektedir. Gözlendiği gibi, yüz 6 en yüksek ve yüz 2 test edilen tüm parametreler arasında en düşük yüzey pürüzlülük değerlerini göstermektedir.



Şekil 5-3: Proses parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Yüzey pürüzlülüğü değerinin yüzey tipine ve uygulanan parametrelere göre değiştiği bulunmuştur. Yapı yönü boyunca yüzeyin (yüz 2) en az yüzey pürüzlülüğü olduğu, yuvarlak yüzeyin (yüz 6) maksimum pürüzlülüğü gösterdiği bulunmuştur. İncelenen tüm parametrelerden, 22 parametre seti en iyi performansı gösterir.

5.4 ÇOKLU PLATFORMDA ISI AKIŞI

Bu çalışmanın amacı, farklı bölgelerdeki sıcaklık dağılımını, üst çıkıntı yapılara referansla, sayısal olarak incelemektir. Aktif toz tabakasının altındaki gevşek toz tabanının, ısının zayıf bir şekilde yayılmasını sağladığı görülmüştür. Bunun, tozların aşırı ergimesine ve katı veya destek tabanına kıyasla sıcaklıkta aşırı yükselmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Yeni tabakaların eklenmesi, çıkıntı yapılarda yüksek artık gerilmelere neden olur. Bu gerilmeler, pütürlü yüzey, cüruf ve çözgü gibi mekanik açıdan zararlı yapıların oluşumuna ve hatta işin tamamen başarısızlığına sebep olur.

5.5 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN UNSUR ÖZELLİKLERİ

Yatay dairesel kesitli kanalı elde etmede gerekli işlem parametreleri sayısal ve deneysel yaklaşımlarla incelemeler yapılmıştır. Yüksek cüruf oluşmasını önlemek için alt tabaka bölgesinin ilk bir kaç katmanının ön sinterlemeyle oluşturulması gerekmektedir. 65 W Lazer gücü ve 1000 mm/snn. Tarama hızı, alt tabaka bölgesinde ağır cüruf oluşumunu azaltmak için en uygun işlem parametreleri olarak tespit edilmiştir.

5.6 SEÇMELİ LAZER ERGİTME (SLE) İŞLEMİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN MUKAVEMET AÇILARINDAN İNCELENMESİ.

AlSi10Mg, SLE işleminde en çok test edilen alaşımlardan biridir. Otomobil, Uçak ve diğer endüstriyel sektörlerde çeşitli parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Buradaki Weibull dağılımı, test edilen 22 adve diğSi10Mg numunenin basmada akma mukavemetini ve basma mukavemetini ölçerek işlem sırasında değişken basma yüklemesine dayanacak şekilde işlenmiş parçaların güvenilirliğini tespitte kullanılmıştır. Sonuç olarak, %90 güvenilirlik ile test edilen numunelerin basmada akma mukavemeti ve basma mukavemeti sırasıyla 328.08 MPa ve 569.07 MPa olarak istatistiksel bir yaklaşımla bulunabilmiştir.

5.7 SONUÇLAR

Additive Manufacturing'in ortaya çıkışı, teknolojiyi benzeri görülmemiş bir düzeye getirmiştir ve Endüstri devrimi 4.0 getirmesi beklenmektedir. Sadece bazı büyük firmaların özel ihtiyaçlara yönelik özel ürünler ürettiği asıl aşamasında. Bu nedenle, küçük ve orta ölçekli imalat şirketleri için tamamen uyarlanabilir hale getirilmesi için daha fazla araştırılması gerekmektedir. Diğer AM tekniklerinin aksine SLE, yüksek mukavemetli metal parçaların imalatında ve çok çeşitli malzemelerin araştırılmasında geniş bir platform sunmaktadır.

Yatay olarak oluşturulmuş dairesel geometrilerin veya düşük açılı yapı yüzeylerinin yapı plakası ile tasarlanması, SLE'deki başarılı imalatta hala büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Bu tez, yukarıda belirtilen geometrilerin tasarlanmasındaki zorluklara bakmak için bir fırsat sunmaktadır. Çıkma yüzeylerinin aşağı cilt bölgesi ile ilişkili yüzey pürüzlülüğü, önce gelen ısının etkisini değerlendirmek için ilk olarak araştırılan önemli bir araçtır. Uzun çıkma

uzunluğunun, bukleler olmadan yoğun şekilde desteklenerek üretilebileceği bulunmuştur. Bununla birlikte, tüm çıkıntı geometrileri, parça karmaşıklığı nedeniyle destek veya karmaşık iş sonrası muamele nedeniyle yoğun destek içermemelidir. Bu nedenle, bu tür zorlukların üstesinden gelmek için minimal destek veya hibrit destek yapıları sağlanabilir.

SLE'deki yapı pozisyonunun, özellikle eğimli yüzeylerin yüzey pürüzlülüğünü etkilediği bulundu. Yapı plakasının köşelerinde eğimli yüzeylerin, merkezi olarak üretilmiş parçalara kıyasla pürüzlülüğü büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. AlSi10Mg ile üretilen parçalarda yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametreleri de incelenmiştir. Farklı parametrelerin seçilen numunenin farklı yüzeyleri üzerinde farklı etkileri vardır. EOS tarafından kullanılan standart işlem parametreleri minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü ile bulundu.

ANSYS simülasyon paketi, SLE'deki ilk birkaç parça imalat katmanındaki ısı akışını modellemek için Sayısal analiz için seçildi. Ergiyik havuzunun oluşumunun sıcaklığa ve altta yatan platformlara büyük ölçüde bağımlı olduğu bulundu. Çalışmanın odağı, lazer ışınımının, gevşek toz ile desteklenen aktif katmandaki etkisini değerlendirmekti. Bu, ergimiş havuz şeklini, cüruf oluşumunu en aza indirmek için özellikle derinliğini izlemektir. Bu çalışma daha sonra yatay olarak oluşturulan dairesel profillerin başarılı bir şekilde imalatında kullanılmıştır. Aşağı cilt bölgesi için işleme parametrelerinin nihai Ergiyik havuzu şeklini ağır şekilde etkilediği bulundu. İlk birkaç katmanda (4 veya 5) düşük olay enerjisi (65W, 1000mm / s) ve bunu takiben çekirdek işleme parametreleri (370W, 1300mm / s), 0.5mm'lik çukurun başarılı üretimi için bu çalışmada optimum bir seçenek bulunabilmiştir.

KAYNAKLAR

Aboulkhair, N.T., Everitt, N.M., Ashcroft, I. ve Tuck, C. 2014. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 1(November):77–86.

Aboulkhair, N.T., Tuck, C., Ashcroft, I., Maskery, I. ve Everitt, N.M. 2015. On the precipitation hardening of selective laser melted AlSi10Mg. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 46(8):3337–3341.

Aboulkhair, N.T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I. ve Everitt, N.M. 2016. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 667:139–146.

Ahmad, Z. 2003. The properties and application of scandium-reinforced aluminum. *Jom*. 55(2):35–39.

Ahmad, R. ve Asmael, M.B.A. 2016. Influence of Cerium on Microstructure and Solidification of Eutectic Al–Si Piston Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*. 31(15):1948–1957.

AlMangour, B. ve Yang, J.-M. 2016. Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing. *Materials ve Design*. 110:914–924.

Arie, M.A., Shooshtari, A.H. ve Ohadi, M.M. 2018. Experimental characterization of an additively manufactured heat exchanger for dry cooling of power plants. *Applied Thermal Engineering*. 129:187–198.

Asgari, H., Baxter, C., Hosseinkhani, K. ve Mohammadi, M. 2017. On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg_200C using recycled powder. *Materials Science and Engineering: A*. 707(September):148–158.

Atzeni, E. ve Salmi, A. 2012. Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 62(9):1147–1155.

Autodesk Launches Netfabb 2017 Solution for Additive Manufacturing | Netfabb. n.d. [Online], Available: https://www.netfabb.com/blog/autodesk-launches-netfabb-2017-solution-additive-manufacturing [2018, April 29].

Baradeswaran, A. ve Elaya Perumal, A. 2013. Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites. *Composites Part B: Engineering*. 54(1):146–152.

Bartkowiak, K., Ullrich, S., Frick, T. ve Schmidt, M. 2011. New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique. *Physics Procedia*. 12(PART 1):393–401.

Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K. ve Singh, R. 2014. A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. In *4th International Conference and Exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM-2014, September*. 1–2.

Bineli, R.A.R., Peres, A.P.G., Jardini, A.L. ve Maciel Filho, R. 2011. Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for Design and Construction of Microreactors. *6th Brazilian conference on manufacturing Engineering*. 1–7.

Birgoren, B. ve Dirikolu, M.H. 2004. A computer simulation for estimating lower bound fracture strength of composites using Weibull distribution. *Composites Part B: Engineering*. 35(3):263–266.

Bose, A. ve German, R.M. 1988. Sintering atmosphere effects on tensile properties of heavy alloys. *Metallurgical Transactions A*. 19(10):2467–2476.

Bose, A. ve German, R.M. 1989. Microstructural refinement of W-Ni-Fe heavy alloys by alloying additions. *Metallurgical Transactions A*. 20(4):779.

Bourell, D., Kruth, J.P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A.M. ve Clare, A. 2017. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 66(2):659–681.

Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V. ve Buchbinder, D. 2012. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials ve Design*. 34:159–169.

Bremen, S., Meiners, W. ve Diatlov, A. 2012. Selective laser melting. *Laser Technik Journal*. 9(2):33–38.

Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W. ve Bültmann, J. 2011. High power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*. 12(PART 1):271–278.

Cabrini, M., Lorenzi, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Manfredi, D., Fino, P., Biamino, S. ve Badini, C. 2016. Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by means of Direct Metal Laser Sintering. *Journal of Materials Processing Technology*. 231(January):326–335.

Cabrini, M., Lorenzi, S., Pastore, T., Pellegrini, S., Ambrosio, E.P., Calignano, F., Manfredi, D., Pavese, M., ve diğ. 2016. Effect of heat treatment on corrosion resistance of DMLS AlSi10Mg alloy. *Electrochimica Acta*. 206:346–355.

Calignano, F. 2014. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials and Design*. 64:203–213.

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Iuliano, L. ve Fino, P. 2013. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *INTERNATIONAL JOURNAL, ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*. 67(9–12):2743–2751.

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Biamino, S., Pavese, M. ve Fino, P. 2014. Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys. *Procedia CIRP*. 21:129–132.

Campanelli, S.L., Contuzzi, N., Angelastro, A. ve Ludovico, A.D. 2010. Capabilities and performances of the selective laser melting process. In InTech *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*.

Ceccarelli, M., Carbone, G., Cafolla, D. ve Wang, M. 2016. How to use 3D printing for feasibility check of mechanism design. In Springer *Advances in Robot Design and Intelligent Control*. 307–315.

Chen, Y. ve Zhezheng, C. 2011. Joint analysis in rapid fabrication of non-assembly mechanisms. *Rapid Prototyping Journal*. 17(6):408–417.

Cheng, B., Shrestha, S. ve Chou, K. 2016. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 12:240–251.

Childs, T.H.C., Hauser, C. ve Badrossamay, M. 2005. Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: experiments and modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 219(4):339–357.

Chua, C.K., Leong, K.F. ve Lim, C.S. 2010. *Rapid Prototyping: Principles and Applications (with Companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company.

Clijsters, S., Craeghs, T. ve Kruth, J.-P. 2012. A priori process parameter adjustment for SLM process optimization. In Taylor ve Francis Group. *Innovative developments on virtual and physical prototyping*. 553–560.

Colegrove, P.A., Donoghue, J., Martina, F., Gu, J., Prangnell, P. ve Hönnige, J. 2017. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scripta Materialia*. 135:111–118.

Dadbakhsh, S. ve Hao, L. 2012. In situ formation of particle reinforced Al matrix composite by selective laser melting of Al/Fe2O3 powder mixture. *Advanced Engineering Materials*. 14(1-2):45–48.

Dai, D. ve Gu, D. 2015. Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi10Mg powder. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 88:95–107.

Dai, K. ve Shaw, L. 2004. Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders. *Acta Materialia*. 52(1):69–80.

Dana, M., Zetkova, I. ve Hanzl, P. 2016. Need for support structures depending on overhang size. *MM Science Journal*. March(4):856–861.

Das, S. 1999. Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing. *Jom*.

51(4):2–2.

Davies, J.T. 2012. *Interfacial phenomena*. Elsevier.

Dong, L., Makradi, A., Ahzi, S. ve Remond, Y. 2009. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process. *Journal of Materials Processing Technology*. 209(2):700–706.

Dotchev, K. ve Yusoff, W. 2009. Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal*. 15(3):192–203.

Drummer, D., Drexler, M. ve Kühnlein, F. 2012. Effects on the Density Distribution of SLS-Parts. *Physics Procedia*. 39:500–508.

EOS. n.d. *EOS M 290 - industrial 3D printed parts from metal materials*. [Online], Available: https://www.eos.info/eos-m290 [2017, November 27].

EOS Metal Materials for Additive Manufacturing. n.d. [Online], Available: https://www.eos.info/material-m [2018, June 02].

Everton, S.K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R.K. ve Clare, A.T. 2016. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials and Design*. 95:431–445.

Feuerhahn, F., Schulz, A., Seefeld, T. ve Vollertsen, F. 2013. Microstructure and properties of selective laser melted high hardness tool steel. *Physics Procedia*. 41:843–848.

Foroozmehr, A., Badrossamay, M., Foroozmehr, E. ve Golabi, S. 2016. Finite Element Simulation of Selective Laser Melting process considering Optical Penetration Depth of laser in powder bed. *Materials and Design*. 89:255–263.

Fox, J.C., Moylan, S.P. ve Lane, B.M. 2016. Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*. 45:131–134.

Franchim, A.S., de Campos, V.S., Travessa, D.N. ve de Moura Neto, C. 2009. Analytical modelling for residual stresses produced by shot peening. *Materials ve Design*.

30(5):1556–1560.

Frazier, W.E. 2014. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 23(6):1917–1928.

Fu, C.H. ve Guo, Y.B. 2014. 3-Dimensional Finite Element Modeling of Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Alloy. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1129–1144.

Fujii, H., Akiyama, H., Kaneko, J., Sugamata, M. ve Blaz, L. 2003. Al-Sc Master Alloy Prepared by Mechanical Alloying of Aluminum with Addition of Sc2O3. *Materials Transactions*. 44(5):1049–1052.

Fulcher, B.A., Leigh, D.K. ve Watt, T.J. 2014. Comparison of AlSi10Mg and Al 6061 Processed Through DMLS. *Proceedings of the 25th Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)*. 404–419. [Online], Available: http://sffsymposium.engr.utexas.edu/2014TOC.

Gan, M.X. ve Wong, C.H. 2016. Practical support structures for selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 238:474–484.

Georgiev, P. n.d. 3D PRINTING AND NAVAL ARCHITECTURE: A LITERATURE REVIEW.

Gong, H., Gu, H., Zeng, K., Dilip, J.J.S., Pal, D., Stucker, B., Christiansen, D., Beuth, J., ve diğ. 2014. Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder. In *Solid freeform fabrication symposium*. 256–267.

Gu, D. ve Shen, Y. 2007. Effects of dispersion technique and component ratio on densification and microstructure of multi-component Cu-based metal powder in direct laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*. 182(1–3):564–573.

Gu, D. ve Shen, Y. 2009. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials ve Design*. 30(8):2903–2910.

Gu, D., Hagedorn, Y.C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R.J.S., Wissenbach, K. ve Poprawe, R. 2012. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta Materialia*.

60(9):3849–3860.

Gusarov, A. V, Yadroitsev, I., Bertrand, P. ve Smurov, I. 2007. Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. *Applied Surface Science*. 254(4):975–979.

Gusarov, A. V, Pavlov, M. ve Smurov, I. 2011. Residual stresses at laser surface remelting and additive manufacturing. *Physics Procedia*. 12:248–254.

Haller, W. 1965. Rearrangement Kinetics of the Liquid—Liquid Immiscible Microphases in Alkali Borosilicate Melts. *The Journal of Chemical Physics*. 42(2):686–693.

Hanzl, P., Zetek, M., Bak??a, T. ve Kroupa, T. 2015. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. *Procedia Engineering*. 100(January):1405–1413.

Hathaway, B.J., Garde, K., Mantell, S.C. ve Davidson, J.H. 2018. Design and characterization of an additive manufactured hydraulic oil cooler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 117:188–200.

Hauser, C., Childs, T.H.C. ve Badrossamay, M. 2004. Further developments in process mapping and modelling in direct metal selective laser melting. *15th Solid Free Form Fabrication Proceedings, eds. Bourell, RH* ve diğ., *Austin (Texas) August*. 2–4.

Hendrickson, M., Mantri, S.A., Ren, Y., Alam, T., Soni, V., Gwalani, B., Styles, M., Choudhuri, D., ve diğ. 2017. The evolution of microstructure and microhardness in a biomedical Ti–35Nb–7Zr–5Ta alloy. *Journal of Materials Science*. 52(6):3062–3073.

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. ve Emmelmann, C. 2016. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 117:371–392.

Hu, H., Ding, X. ve Wang, L. 2016. Numerical analysis of heat transfer during multi-layer selective laser melting of AlSi10Mg. *Optik*. 127(20):8883–8891.

Huang, Y., Yang, L.J., Du, X.Z. ve Yang, Y.P. 2016. Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during selective laser melting. *International Journal of Thermal Sciences*. 104:146–157.

Huotilainen, E., Jaanimets, R., Valášek, J., Marcián, P., Salmi, M., Tuomi, J., Mäkitie, A. ve Wolff, J. 2014. Inaccuracies in additive manufactured medical skull models caused by the DICOM to STL conversion process. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*. 42(5):e259–e265.

Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R. ve Young, P. 2013. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 213(7):1019–1026.

Hussein, A., Hao, L., Yan, C. ve Everson, R. 2013. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting. *Materials ve Design*. 52:638–647.

Industry leaders discuss exponential growth potential of aluminum alloys additive manufacturing - 3D Printing Media Network. n.d. [Online], Available: https://www.3dprintingmedia.network/aluminum-alloys-additive-manufacturing/ [2018, June 04].

Jhabvala, J., Boillat, E., André, C. ve Glardon, R. 2012. An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 59(1):137–142.

Kasperovich, G. ve Hausmann, J. 2015. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 220:202–214.

Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W. ve Kruth, J.P. 2011. Process Optimization and micostructural analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg. *Solid Freeform Fabrication*. 484–495.

Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J. ve Kruth, J.-P.P. 2012. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 39(March 2017):439–446.

Khairallah, S.A., Anderson, A.T., Rubenchik, A. ve King, W.E. 2016. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of

pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*. 108:36–45.

Khan, H.M., Dirikolu, M.H. ve Koç, E. 2018. Parameters optimization for horizontally built circular profiles: Numerical and experimental investigation. *Optik*. 174(August):521–529.

Khan, H.M.M., Dirikolu, M.H.H., Koç, E. ve Oter, Z.C.C. 2018. Numerical investigation of heat current study across different platforms in SLM processed multi-layer AlSi10Mg. *Optik*. 170(May):82–89.

Kim, C., Kim, J., Lim, H. ve Kim, J. 2008. Investigation of laser remote welding using disc laser. *Journal of Materials Processing Technology*. 201(1–3):521–525.

Kim, S.W., Kim, D.Y., Kim, W.G. ve Woo, K.D. 2001. The study on characteristics of heat treatment of the direct squeeze cast 7075 wrought Al alloy. *Materials Science and Engineering A*. 304–306(1–2):721–726.

Knowles, C.R., Becker, T.H. ve Tait, R.B. 2012. The effect of heat treatment on the residual stress levels within direct metal laser sintered Ti-6Al-4V as measured using the hole-drilling strain gauge method. In *Proceedings of the 13th international RAPDASA conference*.

Kobryn, P.A., Moore, E.H. ve Semiatin, S.L. 2000. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V. *Scripta Materialia*. 43(4):299–305.

Koc, E., Akca, Y., Oter, Z.C. ve Coskun, M. 2016. SELECTIVE LASER SINTERING OF ALUMINUM EXTRUSION DIES. (12).

Kok, Y., Tan, X.P., Wang, P., Nai, M.L.S., Loh, N.H., Liu, E. ve Tor, S.B. 2017. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials ve Design*.

Kolossov, S., Boillat, E., Glardon, R., Fischer, P. ve Locher, M. 2004. 3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 44(2–3):117–123.

Kruth, J.-P., Froyen, L., Rombouts, M., Van Vaerenbergh, J. ve Mercells, P. 2003. New ferro

powder for selective laser sintering of dense parts. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 52(1):139–142.

Kruth, J.-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. ve Rombouts, M. 2005. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 11(1):26–36.

Kruth, J.-P., Deckers, J., Yasa, E. ve Wauthlé, R. 2012. Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 226(6):980–991.

Kruth, J.-P.J.-P.P., Levy, G., Klocke, F. ve Childs, T.H.C.H.C. 2007. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 56(2):730–759.

Kudzal, A., McWilliams, B., Hofmeister, C., Kellogg, F., Yu, J., Taggart-Scarff, J. ve Liang, J. 2017. Effect of scan pattern on the microstructure and mechanical properties of Powder Bed Fusion additive manufactured 17-4 stainless steel. *Materials and Design*. 133:205–215.

Kuroda, D., Niinomi, M., Morinaga, M., Kato, Y. ve Yashiro, T. 1998. Design and mechanical properties of new i type titanium alloys for implant materials. *Materials Science and Engineering A243*. 243:244–249.

Lam, L.P., Zhang, D.Q., Liu, Z.H. ve Chua, C.K. 2015. Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting. *Virtual and Physical Prototyping*. 10(4):207–215.

Levy, G.N., Schindel, R. ve Kruth, J.-P. 2003. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 52(2):589–609.

Li, Y. ve Gu, D. 2014. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Materials ve Design*. 63:856–867.

Li, R., Wang, M., Yuan, T., Song, B., Chen, C., Zhou, K. ve Cao, P. 2017. Selective laser melting of a novel Sc and Zr modified Al-6.2 Mg alloy: Processing, microstructure, and properties. *Powder Technology*. 319:117–128.

Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., Yan, C. ve Shi, Y. 2016. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*. 663:116–125.

Liao, Y.-C. ve Yu, M.-H. 2007. Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 190(1–3):102–108.

Liu, J. ve To, A.C. 2017. Quantitative texture prediction of epitaxial columnar grains in additive manufacturing using selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 16:58–64.

Liu, C., Zhang, M. ve Chen, C. 2017. Effect of laser processing parameters on porosity, microstructure and mechanical properties of porous Mg-Ca alloys produced by laser additive manufacturing. *Materials Science and Engineering A*. 703(April):359–371.

Liu, S., Zhu, H., Peng, G., Yin, J. ve Zeng, X. 2018. Microstructure prediction of selective laser melting AlSi10Mg using finite element analysis. *Materials and Design*. 142:319–328.

Liu, Y., Yang, Y. ve Wang, D. 2016. A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 87(1–4):1–10.

Liu, Y., Zhang, J., Yang, Y., Li, J. ve Chen, J. 2017. Study on the influence of process parameters on the clearance feature in non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*. 27:98–107.

Loh, L.E., Chua, C.K., Yeong, W.Y., Song, J., Mapar, M., Sing, S.L., Liu, Z.H. ve Zhang, D.Q. 2015. Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 80:288–300.

Lorusso, M., Aversa, A., Manfredi, D., Calignano, F., Ambrosio, E.P., Ugues, D. ve Pavese, M. 2016. Tribological Behavior of Aluminum Alloy AlSi10Mg-TiB2 Composites Produced by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Journal of Materials Engineering and Performance*. 25(8):3152–3160.

Louvis, E., Fox, P. ve Sutcliffe, C.J. 2011. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*. 211(2):275–284.

M. Cloots*, A.B. Spierings*, K.W. 2013. Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. 131–139.

M. Cloots*, A.B. Spierings*, K.W., Cloots, M., Spierings, A.B., Wegener, K. ve M. Cloots*, A.B. Spierings*, K.W. 2013. Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM. 131–139.

Ma, K., Wen, H., Hu, T., Topping, T.D., Isheim, D., Seidman, D.N., Lavernia, E.J. ve Schoenung, J.M. 2014. Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy. *Acta Materialia*.

MakerBot Print Software | MakerBot. n.d. [Online], Available: https://www.makerbot.com/print/ [2018, April 29].

Manfredi, D., Calignano, F., Krishnan, M., Canali, R., Ambrosio, E.P. ve Atzeni, E. 2013. From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial alsimg alloy processed through direct metal laser sintering. *Materials*. 6(3):856–869.

Manfredi, D., Calignano, F., Ambrosio, E.P.P., Krishnan, M., Canali, R., Biamino, S., Pavese, M., Atzeni, E., ve diğ. 2013. Direct Metal Laser Sintering: An additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications. *Metallurgia Italiana*. 105(10):15–24.

Manfredi, D., Calignano, F., Krishnan, M., Canali, R., Ambrosio, E.P., Biamino, S., Ugues, D., Pavese, M., ve diğ. 2014. Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs). *Light Metal Alloys Applications*. (October):3–34.

Maskery, I., Aboulkhair, N.T., Tuck, C., Wildman, R.D., Ashcroft, I.A., Everitt, N.M. ve

Hague, R.J.M. 2015. Fatigue performance enhancement of selectively laser melted aluminium alloy by heat treatment. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. (August):1017–1025.

Maskery, I., Aboulkhair, N.T., Aremu, A.O., Tuck, C.J. ve Ashcroft, I.A. 2017. Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing*. 16:24–29.

Matsumoto, M., Shiomi, M., Osakada, K. ve Abe, F. 2002. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42(1):61–67.

McMenamin, P.G., Quayle, M.R., McHenry, C.R. ve Adams, J.W. 2014. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. *Anatomical sciences education*. 7(6):479–486.

Mei, L., Yan, D., Chen, G., Wang, Z. ve Chen, S. 2017. Influence of laser beam incidence angle on laser lap welding quality of galvanized steels. *Optics Communications*. 402(May):147–158.

Mercelis, P. ve Kruth, J.-P. 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 12(5):254–265.

Mertens, A., Dedry, O., Reuter, D., Rigo, O. ve Lecomte-Beckers, J. 2015. Thermal treatments of AlSi10Mg processed by laser beam melting. In Austin *Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 1007–1016.

Michaleris, P. 2014. Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes. *Finite Elements in Analysis and Design*. 86:51–60.

Mohammadi, H., Ketabchi, M. ve Kalaki, A. 2011. Microstructure evolution of semi-solid 7075 aluminum alloy during reheating process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 20(7):1256–1263.

Mohanty, S. ve Hattel, J.H. 2016. Improving accuracy of overhanging structures for selective laser melting through reliability characterization of single track formation on thick powder

beds. In Vol. 9738. 97381B-9738–14. [Online], Available: http://dx.doi.org/10.1117/12.2212621.

Montero Sistiaga, M.L., Mertens, R., Vrancken, B., Wang, X., Van Hooreweder, B., Kruth, J.-P.P. ve Van Humbeeck, J. 2016. Changing the alloy composition of Al7075 for better processability by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 238:437–445.

Mower, T.M. ve Long, M.J. 2016. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A*. 651:198–213.

Mugwagwaa, L., Dimitrova, D., Matopea, S. ve Yadroitsevb, I. 2018. Influence of process parameters on residual stress related distortions in selective laser melting. *Procedia Manufacturing*. 21:92–99.

Murr, L.E., Martinez, E., Amato, K.N., Gaytan, S.M., Hernandez, J., Ramirez, D.A., Shindo, P.W., Medina, F., ve diğ. 2012. Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: Examples of 3D materials science. *Journal of Materials Research and Technology*. 1(1):42–54.

Neugebauer, R., Müller, B., Gebauer, M. ve Töppel, T. 2011. Additive manufacturing boosts efficiency of heat transfer components. *Assembly Automation*. 31(4):344–347.

Nie, J.F. ve Muddle, B.C. 2001. On the form of the age-hardening response in high strength aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 319:448–451.

Niku-Lari, A. 1987. OVERVIEW ON THE SHOT PEENING PROCESS. In Elsevier *Advances in surface treatments*. 155–170.

Ning, Y., Wong, Y.S. ve Fuh, J.Y.H. 2005. Effect and control of hatch length on material properties in the direct metal laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 219(1):15–25.

Nouri, A., Hodgson, P.D. ve Wen, C. 2011. Effect of ball-milling time on the structural characteristics of biomedical porous Ti–Sn–Nb alloy. *Materials Science and Engineering: C*. 31(5):921–928.

O'Regan, P., Prickett, P., Setchi, R., Hankins, G. ve Jones, N. 2016. Metal Based Additive Layer Manufacturing: Variations, Correlations and Process Control. *Procedia Computer Science*. 96:216–224.

Oghbaei, M. ve Mirzaee, O. 2010. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 494(1–2):175–189.

Olakanmi, E.O. 2008. Direct selective laser sintering of aluminium alloy powders. (November). [Online], Available: http://etheses.whiterose.ac.uk/1476/.

Olakanmi, E.O. 2013. Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al-Mg, and Al-Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 213(8):1387–1405.

Olakanmi, E.O., Cochrane, R.F. ve Dalgarno, K.W. 2015. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*. 74:401–477.

Osakada, K. ve Shiomi, M. 2006. Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 46(11 SPEC. ISS.):1188–1193.

Osório, W.R., Goulart, P.R. ve Garcia, A. 2008. Effect of silicon content on microstructure and electrochemical behavior of hypoeutectic Al–Si alloys. *Materials Letters*. 62(3):365–369.

Oter, Z.C., Coskun, M., Akca, Y., Surmen, O., Yilmaz, M.S., Ozer, G., Tarakci, G., Khan, H.M., ve diğ. 2018. Support Optimization for Overhanging Parts in Direct Metal Laser Sintering. *Optik*.

Panwisawas, C., Qiu, C.L., Sovani, Y., Brooks, J.W., Attallah, M.M. ve Basoalto, H.C. 2015. On the role of thermal fluid dynamics into the evolution of porosity during selective laser melting. *Scripta Materialia*. 105:14–17.

Patil, R.B. ve Yadava, V. 2007. Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering. *International Journal of Machine Tools*

and Manufacture. 47(7–8):1069–1080.

Patterson, A.E., Messimer, S.L. ve Farrington, P.A. 2017. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need. *Technologies*. 5(2):15.

Peng, H., Go, D.B., Billo, R., Gong, S., Shankar, M.R., Gatrell, B.A., Budzinski, J., Ostiguy, P., ve diğ. 2016. Part-scale model for fast prediction of thermal distortion in DMLS additive manufacturing ; Part 1 : a thermal cicuit network model. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 361–381.

Pickens, J.R. ve Laboratories, M.M. n.d. High-Strength Aluminum P / M Alloys. 2:200–215.

Pohl, H., Simchi, A., Issa, M. ve Dias, H.C. 2001. Thermal stresses in direct metal laser sintering. In *Proceedings of the 12th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX*.

Quercia, G., Chan, D. ve Luke, K. 2016. Weibull statistics applied to tensile testing for oil well cement compositions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 146:536–544.

Rao, H., Giet, S., Yang, K., Wu, X. ve Davies, C.H.J. 2016. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting. *Materials ve Design*. 109:334–346.

Rao, S., Cunningham, R., Ozturk, T. ve Rollett, A.D. 2016. Measurement and Analysis of Porosity in Al-10Si-1Mg Components Additively Manufactured by Selective Laser Melting. *Materials Performance and Characterization*. 5(5):701–716.

Read, N., Wang, W., Essa, K. ve Attallah, M.M. 2015. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials ve Design (1980-2015)*. 65:417–424.

Roberts, I.A., Wang, C.J., Esterlein, R., Stanford, M. ve Mynors, D.J. 2009. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49(12–13):916–923.

Rogal, Dutkiewicz, J., Atkinson, H. V., Lityńska-Dobrzyńska, L., Czeppe, T. ve Modigell, M.

2013. Characterization of semi-solid processing of aluminium alloy 7075 with Sc and Zr additions. *Materials Science and Engineering A*. 580:362–373.

Romano, J., Ladani, L., Razmi, J. ve Sadowski, M. 2015. Temperature distribution and melt geometry in laser and electron-beam melting processes - A comparison among common materials. *Additive Manufacturing*. 8:1–11.

Rombouts, M., Kruth, J.-P., Froyen, L. ve Mercelis, P. 2006. Fundamentals of selective laser melting of alloyed steel powders. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 55(1):187–192.

Rosenthal, I., Stern, A. ve Frage, N. 2014. Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg parts produced by the laser beam additive manufacturing (AM) technology. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 3(6):448–453.

Rosenthal, I., Tiferet, E., Ganor, M. ve Stern, A. 2015. Post-Processing of AM-SLM AlSi10Mg Specimens: Mechanical Properties and Fracture Behaviour. *The Annals of" Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII: Welding Equipment and Technology*. 26:33.

Roy, N.K. ve Cullinan, M.A. 2015. μ-SLS of Metals: Design of the powder spreader, powder bed actuators and optics for the system. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 134–155. [Online], Available: https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-11-Roy.pdf.

Ruan, J., Sparks, T.E., Fan, Z., Stroble, J.K., Panackal, A. ve Liou, F. 2006. A review of layer based manufacturing processes for metals. In University of Texas Press, Austin *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 233–245.

Salmi, A., Atzeni, E., Iuliano, L. ve Galati, M. 2017. Experimental Analysis of Residual Stresses on AlSi10Mg Parts Produced by Means of Selective Laser Melting (SLM). *Procedia CIRP*. 62:458–463.

Santos, E.C., Shiomi, M., Osakada, K. ve Laoui, T. 2006. Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 46(12–13):1459–1468.

Sanz, C. ve Navas, V.G. 2013. Structural integrity of direct metal laser sintered parts subjected to thermal and finishing treatments. *Journal of Materials Processing Technology*. 213(12):2126–2136.

Sarkar, S., Siva Kumar, C. ve Kumar Nath, A. 2017. Effect of mean stresses on mode of failures and fatigue life of selective laser melted stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. 700(May):92–106.

Savalani, M.M. ve Pizarro, J.M. 2016. Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium. *Rapid Prototyping Journal*. 22(1):115–122.

Scanning Electron Microscope SU3500 : Hitachi High-Technologies in Europe. n.d. [Online], Available: https://www.hitachi-hightech.com/eu/product_detail/?pn=em-su3500veversion= [2019, January 19].

Schmid, M., Amado, A. ve Wegener, K. 2015. Polymer powders for selective laser sintering (SLS). *30th International Conference of the Polymer Processing Society*. 160009(2015):160009.

Schmidtke, K., Palm, F., Hawkins, A. ve Emmelmann, C. 2011. Process and Mechanical Properties: Applicability of a Scandium modified Al-alloy for Laser Additive Manufacturing. *Physics Procedia*. 12:369–374.

Senthilkumaran, K., Pandey, P.M. ve Rao, P.V.M. 2009a. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering. *Materials and Design*. 30(8):2946–2954.

Senthilkumaran, K., Pandey, P.M. ve Rao, P.V.M. 2009b. New model for shrinkage compensation in selective laser sintering. *Virtual and Physical Prototyping*. 4(2):49–62.

Shiomi, M., Osakada, K., Nakamura, K., Yamashita, T. ve Abe, F. 2004. Residual stress within metallic model made by selective laser melting process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 53(1):195–198.

Shrestha, S. ve Chou, K. 2017. Mesoscopic Multilayer Simulation of Selective Laser Melting Process. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. (January):1191–1202.

Shvab, R., Leicht, A., Hryha, E. ve Nyborg, L. 2016. Characterization of the Virgin and

Recycled Nickel Alloy HX Powder Used for Selective Laser Melting. In The European Powder Metallurgy Association *European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy. European PM Conference Proceedings*. 1–6.

Singh, S., Ramakrishna, S. ve Singh, R. 2017. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 25:185–200.

Slic3r - G-code generator for 3D printers. n.d. [Online], Available: http://slic3r.org/ [2018, April 29].

Song, Y.-A. ve Koenig, W. 1997. Experimental study of the basic process mechanism for direct selective laser sintering of low-melting metallic powder. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 46(1):127–130.

Song, J., Chew, Y., Bi, G., Yao, X., Zhang, B., Bai, J. ve Moon, S.K. 2018. Numerical and experimental study of laser aided additive manufacturing for melt-pool profile and grain orientation analysis. *Materials and Design*. 137:286–297.

Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G. ve Gomes, S. 2018. An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. *Journal of Computational Design and Engineering*. 5(1):3–18.

Spierings, A.B., Dawson, K., Voegtlin, M., Palm, F. ve Uggowitzer, P.J. 2016. Microstructure and mechanical properties of as-processed scandium-modified aluminium using selective laser melting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 65(1):213–216.

STL File Format for 3D Printing - Simply Explained | All3DP. n.d. [Online], Available: https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/#pointone [2018, April 29].

Strano, G., Hao, L., Everson, R.M. ve Evans, K.E. 2013. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 66(9–12):1247–1254.

Su, X. ve Yang, Y. 2012. Research on track overlapping during Selective Laser Melting of powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 212(10):2074–2079.

Sundar, R., Hedaoo, P., Ranganathan, K., Bindra, K.S. ve Oak, S.M. 2014. Application of Meshes to Extract the Fabricated Objects in Selective Laser Melting. *Materials and Manufacturing Processes*. 29(4):429–433.

Surftest- SJ-500/P Series 178. n.d. [Online], Available: https://ecatalog.mitutoyo.com/Surftest-SJ-500P-Series-178-C1718.aspx [2019, January 19].

Tang, M. ve Pistorius, P.C. 2017. Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*. 94:192–201.

Tang, Y., Loh, H.T., Fuh, J.Y.H., Wong, Y.S., Lu, L., Ning, Y. ve Wang, X. 2004. Accuracy Analysis and Improvement for Direct Laser Sintering. 119260.

Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J.P. ve Van Humbeeck, J. 2013. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*. 61(5):1809–1819.

Thijs, L., Sistiaga, M.L.M., Wauthle, R., Xie, Q., Kruth, J.-P. ve Van Humbeeck, J. 2013. Strong morphological and crystallographic texture and resulting yield strength anisotropy in selective laser melted tantalum. *Acta Materialia*. 61(12):4657–4668.

Thomas, D. ve Bibb, R. 2008. Identifying the geometric constraints and process specific challenges of selective laser melting. In *Proceedings of Time Compression Technologies Rapid Manufacturing Conference, Coventry, United Kingdom*.

Tomlin, M. ve Meyer, J. 2011. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part. *The 7th Altair CAE Technology Conference 2011*. 1–9.

Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R.K. ve Taylor, J.S. 2016. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering*. 46:34–47.

Tran, H.C. ve Lo, Y.L. 2018. Heat transfer simulations of selective laser melting process based on volumetric heat source with powder size consideration. *Journal of Materials Processing Technology*. 255(December 2017):411–425.

Trevisan, F., Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Aversa, A., Ambrosio, E.P., Lombardi, M., Fino, P., ve diğ. 2017. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy:

Process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*. 10(1).

Tsai, Y.-C., Lee, S.-L. ve Lin, C.-K. 2011. Effect of trace Ce addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (AL–7SI–0.35 Mg) aluminum alloys. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 34(5):609–616.

Vandenbroucke, B. ve Kruth, J.-P. 2007. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*. 13(4):196–203.

Ventola, L., Robotti, F., Dialameh, M., Calignano, F., Manfredi, D., Chiavazzo, E. ve Asinari, P. 2014. Rough surfaces with enhanced heat transfer for electronics cooling by direct metal laser sintering. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 75:58–74.

Vijayan, V. ve Narayan Prabhu, K. 2015. Effect of chilling and cerium addition on microstructure and cooling curve parameters of Al–14%Si alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 54(1):66–76.

Vončina, M., Kores, S. ve Medved, J. 2010. Influence of Ce addition on solidification and mechanical properties of AlSi10Mg alloy. *Proceedings of Tofa 2010 Discussion Meeting on Thermodynamics. Porto*. (75):12–17.

Vončina, M., Kores, S., Mrvar, P. ve Medved, J. 2011. Effect of Ce on solidification and mechanical properties of A360 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 509(27):7349–7355.

Vora, P., Mumtaz, K., Todd, I. ve Hopkinson, N. 2015. AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting. *Additive manufacturing*. 7:12–19.

Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.-P. ve Van Humbeeck, J. 2012. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 541:177–185.

Wang, D., Yang, Y., Zhang, M., Lu, J., Liu, R. ve Xiao, D. 2013. Study on SLM fabrication of precision metal parts with overhanging structures. In IEEE *Assembly and Manufacturing (ISAM), 2013 IEEE International Symposium on*. 222–225.

Wang, D., Yang, Y., Yi, Z. ve Su, X. 2013. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 65(9–12):1471–1484.

Wang, R.J., Wang, L., Zhao, L. ve Liu, Z. 2007. Influence of process parameters on part shrinkage in SLS. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 33(5–6):498–504.

Weihull, W. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech*. 18:290–293.

Weingarten, C., Buchbinder, D., Pirch, N., Meiners, W., Wissenbach, K. ve Poprawe, R. 2015. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology*. 221:112–120.

Williams, J.M., Adewunmi, A., Schek, R.M., Flanagan, C.L., Krebsbach, P.H., Feinberg, S.E., Hollister, S.J. ve Das, S. 2005. Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering. *Biomaterials*. 26(23):4817–4827.

Witvrouw, A., Hooreweder, B. Van ve Kruth, J.-P. 2015. Additive Manufacturing in Aerospace Engineering. [Online], Available: http://www.kul-a-ndt.be/06.pdf.

Wohlers, T. ve Caffrey, T. 2015. Wohlers Report 2015-3D Printing and Additive State of Industry. *Fort Collins (Colorado, USA)*.

Wu, J., Wang, L. ve An, X. 2017. Numerical analysis of residual stress evolution of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting. *Optik*. 137:65–78.

Wu, L., Zhu, H., Gai, X. ve Wang, Y. 2014. Evaluation of the mechanical properties and porcelain bond strength of cobalt-chromium dental alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 111(1):51–55.

Wu, Q., Ma, Z., Chen, G., Liu, C., Ma, D. ve Ma, S. 2017. Obtaining fine microstructure and unsupported overhangs by low heat input pulse arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. 27:198–206.

Wudy, K., Drummer, D. ve Drexler, M. 2014. Characterization of polymer materials and

powders for selective laser melting. *AIP Conference Proceedings*. 1593(May):702–707.

Xie, F., He, X., Cao, S. ve Qu, X. 2013. Structural and mechanical characteristics of porous 316L stainless steel fabricated by indirect selective laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*. 213(6):838–843.

Xing, J., Sun, W. ve Rana, R.S. 2013. 3D modeling and testing of transient temperature in selective laser sintering (SLS) process. *Optik*. 124(4):301–304.

Xue, S. ve Barlow, J.W. 1990. Thermal Properties of Powders. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 179–185.

Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Huang, J. ve Zhu, W. 2015. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering. *Materials Science and Engineering A*. 628:238–246.

Yasa, E., Kempen, K. ve Kruth, J. 2010. Microstructure and mechanical properties of Maraging Steel 300 after selective laser melting. *Proceedings of the 21st International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 383–396. [Online], Available: http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2010/2010-32-Yasa.pdf.

Yasa, E., Kruth, J.-P. ve Deckers, J. 2011. Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 60(1):263–266.

Yazdian, N., Karimzadeh, F. ve Tavoosi, M. 2010. Microstructural evolution of nanostructure 7075 aluminum alloy during isothermal annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 493(1–2):137–141.

Yin, J., Zhu, H., Ke, L., Lei, W., Dai, C. ve Zuo, D. 2012. Simulation of temperature distribution in single metallic powder layer for laser micro-sintering. *Computational Materials Science*. 53(1):333–339.

Yingjun, G., Chuanggao, H., Xianhua, H., Qifeng, M. ve Hui, L. 2005. Atomic Bonding and Properties of Al–Mg–Sc Alloy. *Materials Transactions*. 46(6):1148–1153.

Zaeh, M.F. ve Ott, M. 2011. Investigations on heat regulation of additive manufacturing processes for metal structures. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 60(1):259–262.

Zeltmann, S.E., Gupta, N., Tsoutsos, N.G., Maniatakos, M., Rajendran, J. ve Karri, R. 2016. Manufacturing and security challenges in 3D printing. *Jom*. 68(7):1872–1881.

Zeng, K., Pal, D., Teng, C. ve Stucker, B.E. 2015. Evaluations of effective thermal conductivity of support structures in selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 6:67–73.

Zhang, B., Liao, H. ve Coddet, C. 2012. Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture. *Materials ve Design*. 34:753–758.

Zhang, B., Liao, H. ve Coddet, C. 2013. Microstructure evolution and density behavior of CP Ti parts elaborated by Self-developed vacuum selective laser melting system. *Applied Surface Science*. 279:310–316.

Zhang, H., Enxiang, F.A.N., Wang, C., He, L. ve Liao, W. n.d. INVESTIGATION ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF ONE WROUGHT NICKEL BASED SUPERALLOY OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING PROCESS.

Zhang, Q., Chen, J., Zhao, Z., Tan, H., Lin, X. ve Huang, W. 2016. Microstructure and anisotropic tensile behavior of laser additive manufactured TC21 titanium alloy. *Materials Science and Engineering A*. 673:204–212.

Zhao, W., Oztekin, A., Neti, S., Tuzla, K., Misiolek, W.M. ve Chen, J.C. 2011. Thermal analysis of encapsulated phase change materials for energy storage. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011*. 4(PARTS A AND B):831–837.

Zhigang, H., Yuanxun, W., Chunzhi, L. ve Chuanyao, C. 2006. A multi-coupled finite element analysis of resistance spot welding process. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 19(1):86–94.

Zhou, X., Li, K., Zhang, D., Liu, X., Ma, J., Liu, W. ve Shen, Z. 2015. Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 631:153–164.

Zhou, X., Wang, D., Liu, X., Zhang, D., Qu, S., Ma, J., London, G., Shen, Z., ve diğ. 2015. 3D-imaging of selective laser melting defects in a Co–Cr–Mo alloy by synchrotron radiation micro-CT. *Acta Materialia*. 98:1–16.

Zhu, H.H., Lu, L. ve Fuh, J.Y.H. 2006. Study on Shrinkage Behaviour of Direct Laser Sintering Metallic Powder. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 220(2):183–190.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Hamaid Mahmood KHAN
Doğum Yeri	Aligarh, India
Doğum Tarihi	11.06.198411.06.1984
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer: 99841443282
Telefon	5433766440
E-Posta Adresi	hamaidmahmood.khan@ogr.iu.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Aligarh Muslim University
Fakülte	Zakir Hussain college of engineering and technology
Bölümü	Mechanical engineering
Mezuniyet Yılı	Tarih girmek için tıklayın veya dokunun.

Yüksek Lisans	
Üniversite	University of College London
Enstitü Adı	Kings College London
Anabilim Dalı	Mechanical Engineering
Programı	MS Engineering with Business Management

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Makine Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler

1. **H.M. Khan**, H. Dirikolu, E. Koc, Numerical Investigation of heat current study across different platforms in SLM processed multi-layer AlSi10Mg, *Optik*, 2018.
2. **H.M. Khan**, H. Dirikolu, E. Koc, Parameters Optimization for horizontally built Circular profiles: Numerical and Experimental Investigation. *Optik*, 2018.
3. Oter, Zafer ve diğ., **H.M. Khan**, Support Optimization for Overhanging Parts in Direct Metal Laser Sintering. *Optik*, 2018