



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE İMAL EDİLEN
FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ AISi10Mg
ALAŞIMLARININ TEL ELEKTRO EROZYON
İŞLEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YAĞMUR YASİN SARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR

2025



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE İMAL EDİLEN
FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ AISi10Mg
ALAŞIMLARININ TEL ELEKTRO EROZYON
İŞLEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YAĞMUR YASİN SARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Levent URTEKİN

KIRŞEHİR

2025

KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

30/10/2025

Öğrenci

Yağmur Yasin SARI

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ	I
TEŞEKKÜR.....	III
ÖZET.....	IV
ABSTRACT	V
TABLolar DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektriksel Deşarj İşleme (EDM) Teorisi	1
1.1.1. Tel elektrik deşarj işleme (WEDM).....	2
1.2. Metal Eklemeli İmalat Teorisi	4
1.2.1. Toz yatak füzyon prosesleri	7
1.2.1.1. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi.....	7
1.2.1.2. Elektron demeti ile ergitme.....	8
1.2.1.3. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)	8
1.2.2. SLE sonrası ısıt işlemler	9
1.3. Katmanlı İmalatın Avantajları ve Dezavantajları	10
1.4. Amaç.....	11
1.5. Çalışmanın Önemi	12
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	13
3. MATERYAL VE METOT	23
3.1. Materyal ve SLE ile Üretim.....	23
3.2. Isıl İşlem Prosedürü	25
3.3. Tel-EDM İşlemi.....	26
3.3.1. Malzeme kaldırma hızı (MRR).....	27
3.4. RSM ile Optimizasyon.....	28
3.5. Metalografik Çalışmalar	31
3.6. Yüzey Pürüzlülük Analizleri	32
3.7. Mikrosertlik Ölçümleri	33
3.8. Modelleme	33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1. RSM ile MRR tahmini.....	35

4.2. RSM ile SR Tahmini.....	40
4.3. Isıl İşlemin WEDM Süreci Üzerindeki Etkisi	45
4.4. XRD Analizleri	47
4.5. Mikroyapı Analizleri ve Görüntüleri	49
4.6. Mikrosertlik Ölçümleri ve Değerlendirmeleri	59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	67
EKLER.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	77

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca yardımını, desteğini ve hoşgörüsünü esirgemeyen bilgisi, tecrübesi ve çalışma anlayışıyla bir rol model olan hayatımın her aşamasında örnek aldığım çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Levent URTEKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım çalışmama ışık tutan, bana daima yol gösteren ve benden bilgilerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Asım GENÇ'e şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca birlikte çalıştığımız süreçte bilgi ve deneyimlerini paylaşarak çalışmalarımın ilerlemesine katkıda bulunan kıymetli Arş. Gör. Faik YILAN'a özel olarak teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, AMASMA araştırma grubuna desteklerimi için çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her döneminde maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan anneme ve babama; başta kardeşim Taha Yusuf SARI olmak üzere aileme duyduğum derin teşekkür ve sevgiyi burada ifade etmekten onur duyuyorum.

Yapılan bu çalışmayı 125M323 nolu proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkürlerimi sunarım.

Ekim, 2025

Yağmur Yasin SARI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME İLE İMAL EDİLEN FARKLI ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ ALSi10Mg ALAŞIMLARININ TEL ELEKTRO EROZYON İŞLEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yağmur Yasin SARI

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Levent URTEKİN
Yıl: 2025, Sayfa: 77
Jüri: Prof. Dr. Levent URTEKİN
Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ
Dr. Öğr. Üyesi Asım GENÇ

Bu tez çalışması, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen ALSi10Mg alaşımının tel elektro erozyon (Tel-EDM) yöntemiyle işlenebilirliğini, ısıtma işlemi uygulanmamış, 450 °C ve 550 °C sıcaklıklarda 2 saat süreyle ısıtma işlemi uygulanmış koşullarda incelemiştir. Çalışmanın amacı, ısıtma işleminin mikro yapı, malzeme kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) üzerindeki etkilerini belirlemek ve Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ile optimum Tel-EDM işlem parametrelerini ortaya koymaktır. Elde edilen sonuçlara göre, ısıtma işlemi uygulaması ALSi10Mg malzemesinin işlenebilirliğini belirgin biçimde iyileştirmiştir. Isıtma işlemi uygulanmamış numunelerde ortalama MRR ve SR değerleri sırasıyla 2.02 mm³/dak ve 3.26 µm olarak ölçülmüştür. 450 °C'de uygulanan ısıtma işlemi sonrasında MRR yaklaşık %10 artarak 2.24 mm³/dak seviyesine ulaşmış, SR %9 azalarak 2.95 µm'ye düşmüştür. En yüksek verimlilik 550 °C'de elde edilmiş olup, MRR 2.33 mm³/dak ve SR 2.70 µm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, işlemsiz duruma göre sırasıyla %11 artış ve %14 azalma anlamına gelmektedir. RSM analizi sonucunda optimum işlem parametreleri $T_{on} = 117.5 \mu s$, $T_{off} = 56.5 \mu s$ ve $WF = 5.5 \text{ m/s}$ olarak tespit edilmiştir. Isıtma işlemi birlikte Si partiküllerinin yeniden dağılımı ve Mg₂Si fazının yoğunlaşması, elektriksel iletkenliği artırarak boşalım bölgesinde daha kararlı bir malzeme kaldırma süreci oluşturmuştur. Parametrelerin etki sırası ($T_{on} > WF > T_{off}$) tüm koşullarda sabit kalmış, bu da ısıtma işleminin malzemenin enerjiye verdiği tepkiyi iyileştirdiğini ancak sürecin temel enerji kontrollü yapısını değiştirmediğini göstermiştir. Bu bulgular, ısıtma işlemi görmüş ALSi10Mg alaşımının WEDM yöntemiyle daha yüksek üretim verimliliği ve üstün yüzey kalitesiyle işlenebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, hem enerji verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, SLM tabanlı ALSi10Mg alaşımlarının hassas imalat süreçlerinde kullanılabilirliğini artırarak havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren alanlarda uygulama potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Seçici lazer ergitme, ALSi10Mg alaşımı, Isıtma işlemi, Tel-EDM, YYY

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION ON THE MACHINING PERFORMANCE OF THE WEDM PROCESS OF SELECTIVE LASER MELTED AlSi10Mg ALLOY WITH HEAT TREATMENTS

Yağmur Yasin SARI

KIRŞEHİR AHİ EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Supervisor: Prof. Dr. Levent URTEKİN
Year: 2025, Pages: 77
Juries: Prof. Dr. Levent URTEKİN
Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ
Assist. Prof. Dr. Asım GENÇ

This study investigates the machinability of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting (SLM) using the Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) process under three different conditions: as-built, heat-treated at 450 °C for 2 hours, and heat-treated at 550 °C for 2 hours. The aim of the study is to determine the effects of heat treatment on microstructure, material removal rate (MRR), and surface roughness (SR), and to identify the optimal WEDM process parameters using the Response Surface Methodology (RSM). The results revealed that heat treatment significantly improved the machinability of the AlSi10Mg material. The average MRR and SR values of the as-built samples were measured as 2.02 mm³/min and 3.26 µm, respectively. After heat treatment at 450 °C, the MRR increased by approximately 10% to 2.24 mm³/min, while SR decreased by 9% to 2.95 µm. The highest performance was achieved at 550 °C, where MRR reached 2.33 mm³/min and SR decreased to 2.70 µm, corresponding to an 11% increase and a 14% reduction compared to the as-built condition. The optimal process parameters obtained through RSM analysis were $T_{on} = 117.5$ µs, $T_{off} = 56.5$ µs, and $WF = 5.5$ m/s. The redistribution of Si particles and the densification of the Mg₂Si phase resulting from heat treatment enhanced the electrical conductivity and created a more stable material removal process in the discharge zone. The order of influence of the parameters ($T_{on} > WF > T_{off}$) remained constant under all conditions, indicating that heat treatment improved the material's response to discharge energy without altering the inherently energy-controlled nature of the WEDM process. The findings demonstrate that heat-treated AlSi10Mg alloys can be machined with higher productivity and superior surface quality using the WEDM method. These results contribute to energy-efficient and environmentally sustainable manufacturing approaches. Consequently, this study highlights the potential of SLM-based AlSi10Mg alloys for high-performance applications in aerospace, automotive, and defense industries where dimensional precision and surface integrity are critical.

Key Words: Selective laser melting, AlSi10Mg alloy, Heat treatment, WEDM, RSM

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 3.1. AlSi10Mg malzemenin özellikleri	23
Tablo 3.2. AlSi10Mg tozlarının kimyasal bileşimi	23
Tablo 3.3. Tel-EDM parametreleri.....	29
Tablo 3.4. SLE ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının Tel-EDM proses parametre tasarımı ve MRR tepki değerleri	29
Tablo 3.5. SLE ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının Tel-EDM proses parametre tasarımı ve SR tepki değerleri	30
Tablo 4.1. Model detayları	35
Tablo 4.2. İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile MRR analizi	37
Tablo 4.3. İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile SR analizi	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1.	Tel-EDM işleminin şematik gösterimi 3
Şekil 1.2.	SLE işleminin şematik gösterimi 8
Şekil 1.3.	AlSi10Mg numunelerin ısıtılma sonrası mikroyapısı 10
Şekil 1.4.	Eklemeli imalat avantajları ve dezavantajlar 11
Şekil 3.1.	AlSi10Mg tozlarının taramalı elektron mikroskopu görüntüsü 23
Şekil 3.2.	Alüminyum-silisyum faz diyagramı 24
Şekil 3.3.	SLE-AlSi10Mg üretim çalışması ve ısıtılma fırını 26
Şekil 3.4.	Tel-EDM cihazı ve işleme anı 27
Şekil 3.5.	Taramalı Elektron Cihazı (SEM) 31
Şekil 3.6.	XRD Cihazı 32
Şekil 3.7.	Yüzey Pürüzlülük Cihazı 32
Şekil 3.8.	Vickers Sertlik Test Cihazı 33
Şekil 4.1.	Etki eden faktörlerin etkileşiminin MRR üzerindeki etkisi (a-c) işlemsiz AlSi10Mg (d-f) 450T AlSi10Mg ve (g-i) 550T AlSi10Mg 40
Şekil 4.2.	Etki eden faktörlerin etkileşiminin SR üzerindeki etkisi (a-c) işlemsiz AlSi10Mg (d-f) 450T AlSi10Mg ve (g-i) 550T AlSi10Mg..... 44
Şekil 4.3.	a) AlSi10Mg numunelerinin farklı ısıtılma işlemleri koşullarındaki XRD desenleri, b) Si fazının büyütülmüş görünümü ve c) Mg ₂ Si fazının büyütülmüş görünümü..... 48
Şekil 4.4.	a) İşlemsiz, b)450 °C–2s ve c) 550 °C–2s numunelerin EDS sonuçları 51
Şekil 4.5.	AlSi10Mg alaşımının işlemsiz ve farklı ısıtılma işlemlerinde SEM görüntüleri 55
Şekil 4.6.	Tel-EDM işlemi sonrasında işlemsiz ve farklı ısıtılma işlemlerindeki AlSi10Mg numunesinin EDS görüntü haritaları 59
Şekil 4.7.	Farklı ısıtılma işlemi uygulanmış AlSi10Mg ait sertlik dağılımı 59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
α	: Alfa
A	: Amper (akım)
T_{on}	: Darbe açık süresi (pulse on-time)
T_{off}	: Darbe kapalı süresi (pulse off-time)
mm^3/dk	: Hacimsel hız (milimetre ³ /dakika)
MPa	: Megapascal (basınç/gerilme)
m/s	: Metre/saniye (hız)
μm	: Mikrometre (uzunluk)
$^{\circ}C$: Santigrat derece (sıcaklık)
θ	: XRD’de kırınım açısı
V	: Volt (gerilim)

Kısaltmalar	Açıklama
Sa	: Alan tabanlı ortalama yüzey pürüzlülüğü
AW-DED	: Ark Tel Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
UTS	: Çekme Dayanımı (Ultimate Tensile Strength)
DMLS	: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
AM	: Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing)
EDM	: Elektriksel Deşarj İşleme
EB-DED	: Elektron Işını Tel Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
EB-PBF	: Elektron Işını Toz Yatak Füzyonu
LW-DED	: Lazer Tel Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
L-PBF/LPBF	: Lazer Toz Yatak Füzyonu
LP-DED	: Lazer Toz Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
Rz	: Maksimum profil yüksekliği (yüzey pürüzlülüğü)
MRR	: Malzeme Kaldırma Hızı
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
HRB	: Rockwell Sertliği (B ölçeği)

SV	:	Servo Voltajı (EDM/WEDM parametresi)
SLM	:	Seçici Lazer Ergitme (EN kısaltma)
SLE	:	Seçici Lazer Ergitme (TR kısaltma)
STL	:	Stereolitografi dosya formatı
TWR/EWR	:	Takım/Tel Aşınma Oranı
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
TAUM	:	Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (Erciyes Üni.)
WT	:	Tel gerilimi (Wire Tension)
PBF	:	Toz Yatak Füzyonu (genel aile)
TEM	:	Transmisyon Elektron Mikroskobu
HV/VHN	:	Vickers Sertliği
XRD	:	X-ışını Kırınımı (Faz Analizi)
DED	:	Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme
HSTR	:	Yüksek sıcaklık dayanımlı/mukavemetli malzemeler
SR	:	Yüzey pürüzlülüğü (genel gösterge)

1. GİRİŞ

1.1. Elektriksel Deşarj İşleme (EDM) Teorisi

EDM, elektrik enerjisinin iki elektrot arasında, dielektrik bir sıvı içinde gerçekleşen elektriksel boşalmalar aracılığıyla ısı enerjisine dönüştürüldüğü termoelektrik prensibe dayanır. Gerilim uygulandığında, katot takım elektrot görevini görürken, anot iş parçası olarak çalışır.

Elektrotlar arasındaki dar boşluk, dielektrik sıvı ile tamamen doldurulur. Uygulanan potansiyel farkı nedeniyle elektronlar katottan salınır ve anoda doğru hızlandırılır. Elektronlar dielektrik sıvı içinde hareket ederken sıvı molekülleri ile çarpışır ve bu moleküllerin elektron ve pozitif iyonlara ayrılmasına neden olur. Elektrotlar arasında iyonize olmuş dielektrik sıvı moleküllerinden oluşan dar bir sütun meydana gelir ve bu sütun, plazma kanalı olarak bilinen elektriksel bir yol oluşturur. Plazma kanalı çok düşük elektriksel dirence sahiptir ve bu sayede çok sayıda elektronun akışına imkân tanır.

Bu elektron akışı sırasında, iş parçası yüzeyinde yoğunlaşan darbe ve kinetik enerji sıcaklığın önemli ölçüde artmasına neden olur. Katot ile anot arasındaki plazma bölgesi 8.000–12.000 °C, hatta bazı durumlarda 20.000 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklara erişir. Bu yüksek sıcaklık, her iki elektrot yüzeyinde de malzemenin ergimesine ve buharlaşmasına yol açar. Sonuç olarak, malzeme yüzeyinde kraterler oluşur. Darbe kesildiğinde plazma bölgesi bozulur ve dolaşan dielektrik sıvı, işlenmiş malzemeyi elektrotlar arasındaki boşluktan küçük talaş parçacıkları şeklinde uzaklaştırır. İşleme, tekrarlayan elektriksel boşalmalar (kıvılcımlar) ile malzemenin kademeli olarak kaldırılması yoluyla gerçekleşir.

EDM, dielektrik bir sıvı içinde daldırılmış, elektrik iletkenliğine sahip herhangi bir malzemeyi işleyebilir. Takım ile iş parçası doğrudan temas etmez. Bu doğrudan temasın olmaması, iş parçasına etki edebilecek mekanik yükleri, yüzey problemlerini ve diğer olumsuz etkileri ortadan kaldırır. EDM sürecinin çeşitli alt kategorileri vardır. Temel EDM türleri arasında Tel Erozyon (WEDM), dalmalı (Sinker) EDM ve delik delme EDM yer alır. Bu yöntemlerin her biri farklı elektrot tasarımlarına sahip olsa da üç temel bileşeni ortaktır: iletken malzeme, dielektrik sıvı ve güç kaynağı (Şahin ve ark., 2023).

EDM tekniğinin özel bir türü olan WEDM, düşük maliyeti, yüksek boyutsal hassasiyeti ve üstün yüzey kalitesi sayesinde en yaygın kullanılan geleneksel olmayan işleme tekniklerinden biridir. Bu yöntemle işleme sırasında iş parçası veya takım üzerinde herhangi bir mekanik gerilme oluşmaz (Ho ve ark., 2004; Genç ve ark., 2021).

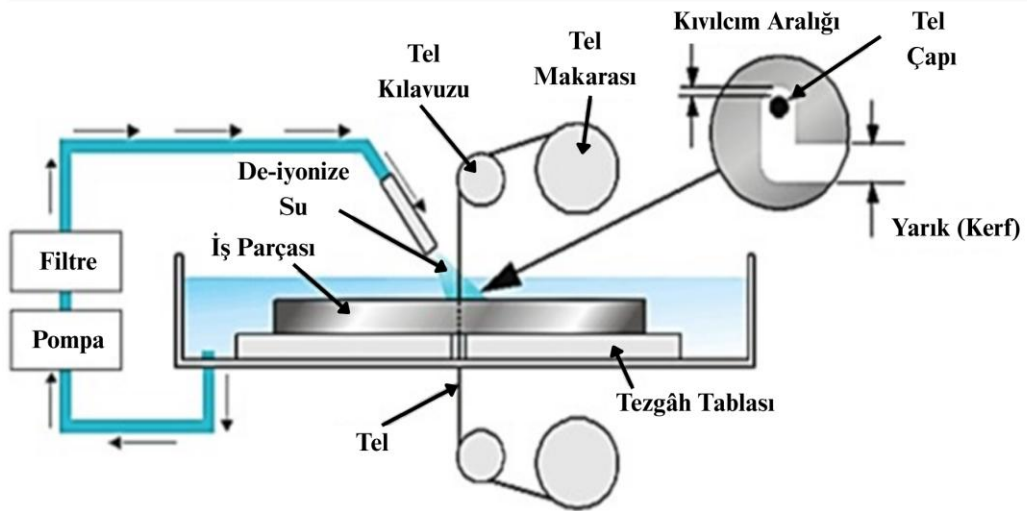
WEDM, elektriksel boşalmalar yoluyla elektrik iletkenliğine sahip metallere karmaşık 2D ve 3D geometrilerin üretilebilmesini sağlayan termoelektrik bir süreçtir.

WEDM’de tel elektrot genellikle bakır (Cu), pirinç (CuZn) veya tungsten (W) malzemeden üretilir. Tel, iki makara arasına sarılır ve işleme süresince sabit bir hızla hareket eder. İşleme işlemi, malzemenin elektrota doğru ilerletilmesiyle gerçekleşir. Parça elektrota yaklaştığında — genellikle aradaki boşluk birkaç mikrometreden daha az olduğunda — dielektrik yalıtım bozulur ve sınırlı, lokalize bir bölgede plazma kanalı oluşur. Malzeme kaldırma mekanizması, temel EDM prensibi ile aynıdır (Gupta ve ark., 2019).

1.1.1. Tel elektrik deşarj işleme (WEDM)

Tel erozyon, karmaşık şekil ve profillere sahip bileşenlerin imalatında yaygın olarak kabul gören, geleneksel olmayan bir talaş kaldırma yöntemidir. Geleneksel EDM sürecinin özgün bir uyarlaması olarak değerlendirilen WEDM, kıvılcım oluşumunu başlatmak için bir elektrot kullanır. Ancak WEDM’de, çapı 0,05–0,3 mm arasında değişen ince bakır, pirinç veya tungsten telden yapılmış, sürekli hareket eden bir tel elektrot kullanılır. Bu tel, çok küçük köşe yarıçaplarına ulaşabilme kapasitesine sahiptir. Tel, mekanik bir germe sistemi ile sürekli olarak gergin tutulur, bu da hatalı parça üretme eğilimini azaltır (Ehsan Asgar ve Singh Singholi, 2018)(Urtekin ve ark., 2024). WEDM sürecinde, malzeme telin önünde aşındırılır ve iş parçası ile tel arasında doğrudan temas olmadığı için işleme sırasında mekanik gerilmeler ortadan kalkar. Buna ek olarak, WEDM; egzotik, yüksek mukavemetli ve yüksek sıcaklık dayanımlı (HSTR) malzemeleri işleyebilme kapasitesine sahiptir ve ısıl işlem görmüş çeliklerin işlenmesi sırasında ortaya çıkabilecek geometrik değişimleri önler (Goyal ve ark., 2022).

WEDM, ilk olarak 1960’ların sonlarında imalat endüstrisine tanıtılmıştır. Bu sürecin geliştirilmesi, EDM’de kullanılan işlenmiş elektrotun yerine geçebilecek bir teknik arayışı sonucunda ortaya çıkmıştır. 1974 yılında D.H. Dulebohn, WEDM sürecinde işlenecek parçanın şeklinin otomatik olarak kontrol edilmesi için optik hat takip sistemini uygulamıştır. 1975 yılına gelindiğinde, sürecin ve yeteneklerinin endüstri tarafından daha iyi anlaşılmasıyla WEDM’nin popülaritesi hızla artmıştır. 1970’lerin sonlarına doğru bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) sisteminin WEDM’ye entegre edilmesi, işleme sürecinde önemli bir evrim sağlamıştır. Bu gelişmeler sonucunda, WEDM’nin geniş yetenekleri özellikle telin işlenecek parçadan geçirilmesi gereken her türlü delik işleme operasyonunda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. WEDM’nin yaygın uygulama alanları arasında sac kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, fikstürler, mastarlar, prototipler, uçak ve medikal parçalar ile taşlama taşı form takımları yer almaktadır (Han ve ark., 2007; Singh ve Garg, 2009; Ahuja ve ark., 2020; Goyal ve ark., 2022). Şekil 1.1’de Tel-EDM işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.1. Tel-EDM işleminin şematik gösterimi (Mohd Abbas ve ark., 2007)

WEDM'nin malzeme kaldırma mekanizması, elektriksel boşalmalar (kıvılcımlar) ile oluşan erozyon etkisine dayanan geleneksel EDM sürecine oldukça benzer. WEDM'de, iş parçasından malzeme; iş parçası ile tel arasında, sürekli olarak işleme bölgesine beslenen dielektrik sıvı akışı içerisinde meydana gelen ardışık ve ayrı kıvılcımlar aracılığıyla uzaklaştırılır. Günümüzde WEDM genellikle, tamamen dielektrik sıvı ile doldurulmuş bir tank içine daldırılmış iş parçaları üzerinde uygulanmaktadır. Bu daldırma yöntemi, özellikle değişken kalınlığa sahip iş parçalarında sıcaklık stabilizasyonunu ve etkin yıkamayı sağlar (Muthuramalingam ve Mohan, 2015).

WEDM sürecinde, katot ile anot arasında bir plazma kanalı oluşturmak için elektrik enerjisi kullanılır ve bu enerji 8.000–12.000 °C, hatta 20.000 °C'ye kadar ulaşabilen sıcaklıklarda ısı enerjisiye dönüştürülür. Bu yüksek sıcaklık, her iki kutup yüzeyinde de malzemenin önemli ölçüde ısınmasına ve erimesine yol açar. 20.000–30.000 Hz frekans aralığında darbeli doğru akım güç kaynağı kapatıldığında plazma kanalı bozulur. Bu durum, sıcaklığın aniden düşmesine neden olur ve dolaşan dielektrik sıvı, plazma kanalına nüfuz ederek erimiş parçacıkları kutup yüzeylerinden mikroskobik talaşlar şeklinde uzaklaştırır.

EDM ve WEDM'nin malzeme kaldırma mekanizmaları benzer olsa da, işlevsel özellikleri aynı değildir. WEDM'de ince tel, mikroişlemci kontrollü olarak iş parçası boyunca sürekli beslenir ve bu sayede karmaşık şekilli parçalar son derece yüksek hassasiyetle işlenebilir. Kesme yüzeyinde, iş parçası kalınlığına bağlı olarak değişen açılarda koniklik elde etmek mümkündür; 100 mm kalınlığındaki bir iş parçasında yaklaşık 15°, 400 mm kalınlığında ise yaklaşık 30°'ye kadar koniklik sağlanabilir. Mikroişlemci ayrıca tel ile iş parçası arasındaki

0,025–0,05 mm aralığında değişen boşluğu sürekli olarak korur. WEDM, geleneksel EDM’de kaba ve ince işleme adımlarını gerçekleştirmek için gereken önceden şekillendirilmiş karmaşık elektrotlara olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Ancak WEDM’de, istenen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi seviyesine ulaşmak için telin işlenecek profil boyunca birden fazla geçiş yapması gerekir (Almeida ve ark., 2021; Saha ve ark., 2022).

1.2. Metal Eklemeli İmalat Teorisi

Eklemeli üretim/imalat (Additive Manufacturing – AM), atıkların azaltılması, tedarik zincirlerinin sadeleştirilmesi ve tasarım alanındaki kısıtlamaların azaltılması gibi birçok avantajı sayesinde son yıllarda hızlı bir şekilde popülerlik kazanmıştır. Bu avantajlar, endüstrinin AM’yi çevresel yükün azaltılması ile ekonomik ve sosyal faydaların artırılması açısından daha sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, AM’nin sürdürülebilir bir imalat yöntemi olarak potansiyeli tam anlamıyla araştırılmamış olup, çevre ve ekonomi üzerindeki uzun vadeli etkileri hakkında sınırlı bilgi mevcuttur (Rouf ve ark., 2022).

Bazı AM süreçleri, örneğin lazer gibi yüksek güçlü ısıtma sistemlerini kullanarak metal tozlarını katman katman eritip yeniden şekillendirmekte ve nihai forma dönüştürmektedir. Malzemenin ergime sıcaklığının aşılması için gerekli ısı enerjisi, elektrik enerjisi aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu yüksek yoğunluklu enerji kullanımı, elektrik maliyetlerinin son 50 yıldır Amerika Birleşik Devletleri’nde ortalama kWh başına yaklaşık 10 cent seviyesinde sabit kalması nedeniyle, maliyet açısından genellikle önemsiz görülmektedir. Dolayısıyla, AM ile üretilen ürünlerin toplam maliyetinde elektrik kullanımının payı oldukça sınırlıdır.

Bununla birlikte, AM süreçlerinin çevresel performansını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için yalnızca doğrudan enerji tüketimi değil; kaynak kullanımı, üretim parametrelerinin verimliliği ve süreç sonunda oluşan atıkların da dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle araştırmamızın amacı; seçici lazer ergitme (SLE) yöntemiyle üretilmiş ve ısı işlem uygulanmış malzemelerde süreç parametrelerinin enerji kullanımı, kaynak verimliliği ve çevresel etkiler üzerindeki rolünü belirlemek ve bu etkilerin sistematik çevresel performans üzerindeki yansımalarını ortaya koymaktır. Bu hedefler, deneysel çalışmalar ve sürdürülebilirlik odaklı performans değerlendirmeleriyle gerçekleştirilecektir (Yılan ve ark., 2024).

Metal katmanlı imalat, ergitme tabanlı veya katı hâl tabanlı süreçler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Her bir üretim yolu, kullanılan enerji kaynağı, besleme türü ve katman oluşum yaklaşımına bağlı olarak farklı yöntemlere ayrılabilir. Metal AM süreçlerinin genel

özellikleri literatürde kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Genel olarak, ister ergitme tabanlı ister katı hâl tabanlı olsun, metal AM süreçleri önemli ölçüde tasarım serbestliği sunar ve net şekle yakın veya net şekilli ürünler üretebilir. Ergitme tabanlı metal AM, metal AM'nin en yaygın üretim yaklaşımıdır. Katı hâl tabanlı yöntemlere kıyasla, sürtünme karıştırma kaynağı gibi teknikler kullanılsa da, ergitme tabanlı AM daha geniş bir alaşım tasarımı ve yeni mikro yapı üretme olanağı sunar. Bunun nedeni, hızlı veya aşırı hızlı katılaşma süreçlerinin sağladığı potansiyeldir. Ancak bu hızlı erime–katılaşma süreci, ergitme tabanlı metal AM ile üretilmiş parçalarda bazı sorunlara da yol açabilir. Bu sorunlar arasında şunlar yer alır:

- *Mikro yapı ve özelliklerin heterojenliği:* AM parçalarının mekanik özelliklerindeki anizotropi, üretim geçmişi ve mikro yapısal farklılıklarla doğrudan ilişkilidir. Eş eksenli tane yapısına ulaşmak, anizotropik mekanik özellikleri büyük ölçüde ortadan kaldırılabilese de, bu durum ticari olarak yaygın kullanılan alaşımlar için hâlâ zorlu bir hedefdir. Bu bağlamda, tel beslemeli AM süreçleri, anizotropik mekanik özelliklere sahip olmayan tam eş eksenli taneli yapılar üretebilir.

- *Sınırlı metal alaşımı:* Genel olarak, ergitme tabanlı yöntemlerde kullanılabilen metal ve alaşım sayısı sınırlıdır. Bu durum, AM için metal ve alaşım seçimini kısıtlar. Bununla birlikte, alaşımların AM'ye özgü olarak uyarlanabileceği ve optimize edilebileceği çalışmalar mevcuttur. Ancak bu geliştirme çalışmaları hâlâ sınırlı düzeydedir.

- *Kalıcı gerilmeler ve kusurlar:* AM süreçlerinde, üretim parametreleri ve koşulları, kalıcı gerilmeler ve kusurların oluşmasına yol açabilir. Bu durum, parçanın mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, ısıtma işlemi, yüzey onarımı ve kaplama gibi ikincil işlemler, nihai ürünün performansını artırmak amacıyla sıklıkla uygulanır.

- *Pürüzlü iç ve dış yüzeyler:* Metal AM'nin sunduğu tasarım özgürlüğü, parçaların karmaşık iç geometrilerle üretilmesini mümkün kılar. Ancak, bu karmaşık bölgeler üretim sonrası bitirme işlemlerini zorlaştırabilir. Özellikle dinamik yük altındaki uygulamalarda, iç yüzeylerin pürüzlü olması, yorulma direncini azaltabilir. AM ile üretilen parçalar, genellikle ek işlemlerle yüzey kalitesinin iyileştirilmesini gerektirir (Bhat ve ark., 2021 ; Medvedev ve ark., 2022).

Toz yatak füzyonu (PBF) ile imalat, süreç parametreleri sırasında gerçekleşen fiziksel olayların etkileşimine büyük ölçüde bağlıdır. PBF süreçlerinde, hem makro hem de mikro ölçekte birden fazla ısı transferi mekanizması eş zamanlı olarak çalışır. Mikroskobik ölçekte ısı transferi, tek tek toz parçacıkları arasında gerçekleşir. Katı bölgelerde ısı transferi, toz

bölgelerine kıyasla daha hızlıdır. Toz parçacıkları arasındaki hava boşlukları yalıtkan görevi görerek ısı transferini yavaşlatır. Toz ortamında ısı iletim, sürekli bir katı yapıdaki kadar etkili değildir; iletim yalnızca parçacıkların fiziksel olarak temas ettiği noktalarda gerçekleşir.

İmalat platformu genellikle yüksek ısı iletkenliğe sahip bir malzemeden yapılır ve ısı emici görevi görerek erimiş tozun hızlı bir şekilde katılaşmasını destekler. Toz yatağı içindeki karmaşık ısı transferi yapısı nedeniyle, eşzamanlı olarak işleyen çoklu ısı transferi mekanizmalarını kapsayan etkili bir ısı iletkenlik yaklaşımı kullanılır. Bunun yanı sıra, üretim odasında makro ölçekte radyasyon ve konveksiyon da önemli ısı transferi modlarıdır. Bunların önemi, kullanılan özel sürece bağlı olarak değişir. Lazerle ergitme ve sinterleme işlemleri inert atmosferlerde gerçekleştirilir; bu sayede yapı yüzeyinin konvektif soğutulması sağlanır. Toz yatağı içerisinde radyasyon, etkili ısı iletkenliğe katkıda bulunur. Ayrıca bu süreçlerde faz dönüşümü, tane gelişimi, magnezyum etkisiyle yönlendirilen ergimiş havuz içindeki akışkan hareketi, katılaşma sonucu oluşan büzülme ve tozun ıslanması gibi birçok fiziksel mekanizma da etkindir.

Katmanlı imalat, geleneksel üretim tekniklerine kıyasla birçok avantaj sunar ve sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu teknolojinin malzeme kullanımını optimize etme yeteneği, atık miktarını azaltır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde işlem sırasında önemli miktarda malzeme atığı ortaya çıkarken, katmanlı imalat parçaları katman katman ekleme yöntemiyle üretilir. Bu strateji, hem maliyetleri hem de çevresel etkileri önemli ölçüde azaltır.

Sürdürülebilirlik açısından malzeme seçimi de kritik öneme sahiptir. Katmanlı imalat, hafif yapılar, karmaşık geometriler ve tasarım esnekliği sayesinde ürün verimliliğini ve işlevselliğini artırır. Tasarım sürecinde yapılan optimizasyonlar sayesinde nihai ürünlerde malzeme tasarrufu sağlanır ve performans iyileştirilir. Özellikle havacılık ve savunma sanayilerinde katmanlı imalat, tasarım özgürlüğü ve hafiflik açısından önemli avantajlar sunar. Bu avantajlar arasında hafif ve esnek tasarımlı parçaların üretilmesi, malzeme kaybının azaltılması ve talep üzerine hızlı parça üretimi yer alır. Katmanlı imalat, aynı zamanda aerodinamik performans, ağırlık/sağlamlık oranı ve fonksiyonel entegrasyonun geliştirilmesine de katkı sağlar. Bu teknoloji sayesinde, geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilemeyen karmaşık ve hafif tasarımlar üretilebilir. Sonuç olarak, katmanlı imalatın havacılık ve savunma bileşenlerinde kullanımı; üretim sürelerinin kısalması, maliyetlerin düşmesi ve tedarik zinciri verimliliğinin artması gibi sürdürülebilirlik açısından kritik katkılar sunmaktadır (Niaki ve ark., 2019).

1.2.1. Toz yatak füzyon prosesleri

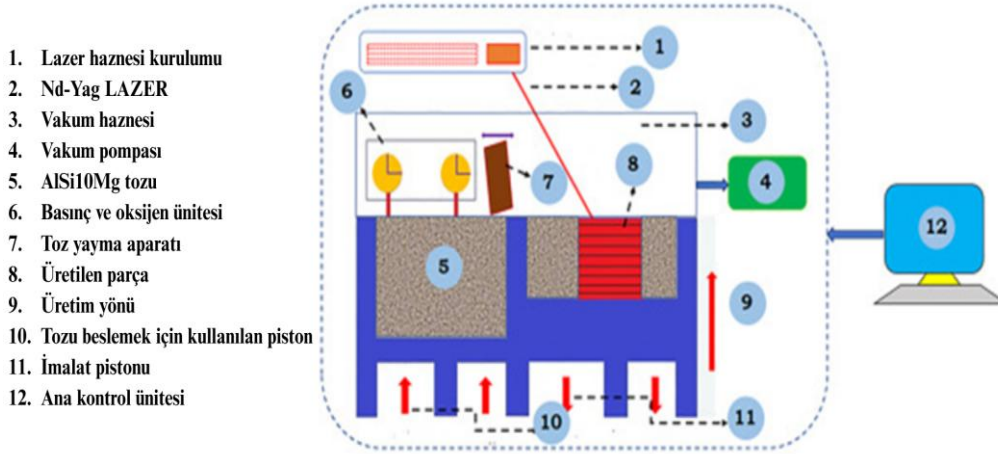
1.2.1.1. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi

Bir SLM sisteminin temel bileşenleri şematik olarak ilgili şekilde gösterilmektedir. Süreç; tozun serilmesi ve lazer taraması gibi adımları içeren bir dizi işlemten oluşur. İşlem, oksidasyonu önlemek amacıyla inert, kontrollü atmosfer ortamında gerçekleştirilir. Bu aşamada ergitme ve katılma süreçleri kontrollü bir şekilde yürütülür. Şekil 1.2’de SLE işleminin şematik gösterimi verilmiştir.

SLM’nin işlem basamakları şu şekilde özetlenebilir:

1. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında oluşturulan üç boyutlu model, genellikle STL dosya formatına dönüştürülür.
2. Model, Z eksenini yüksekliği, yüzey kalitesi ve destek yapılarının en aza indirilmesi gibi kriterler göz önünde bulundurularak optimum üretim yönelimine göre ayarlanır.
3. Destek yapıları oluşturulur ve minimum destek kullanımı için gerekli tüm yinelemeler tamamlanır.
4. Dosya, eşit kalınlıktaki katmanlara bölünür ve makineye aktarılır.
5. Yapı plakası, ısı dağılımını kolaylaştırmak ve düzensiz termal genişmeden kaynaklanan parça deformasyonunu önlemek amacıyla önceden ısıtılır.
6. Belirlenmiş kalınlıkta bir toz tabakası yapı plakasına serilir.
7. Odaklanmış lazer ışını, XY düzleminde hareket ederek hedeflenen bölgeleri seçici olarak tarar ve eritir.
8. Yapı plakası, bir sonraki toz katmanının serilebilmesi için katman kalınlığına eşit bir mesafe aşağıya indirilir.

Adım 6’dan 8’e kadar olan işlemlerin tekrarlanmasıyla parça, katman katman üretilir. Üretim süresinin bir kısmı, tozun taranması gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişen “birincil süreyi; diğer kısmı ise yapı plakasının indirilmesi ve yeni toz katmanının serilmesi gibi “ikincil süreyi kapsar. Bu ikincil süre, genellikle “yeniden kaplama” olarak adlandırılır (Khoo ve ark., 2015; Pinkerton, 2016).



Şekil 1.2. SLE işleminin şematik gösterimi (Sheshadri ve ark., 2021)

1.2.1.2. Elektron demeti ile ergitme

Elektron ışını toz yatak füzyonu (EB-PBF), yüksek enerjili bir elektron ışını kullanarak metal tozunu katman katman eritip tamamen yoğun katı bileşenler üretmeye dayalı bir katmanlı imalat yöntemidir. Elektron ışını vakum ortamında çalıştığı için üretim de vakum altında gerçekleştirilir. Bu durum, oksijene duyarlı malzemelerdeki safsızlıkların azalmasını sağlar. EB-PBF sistemleri, bir katmanın ergitilmesinden önce elektron ışınının toz yüzeyinde hızlıca taranması yoluyla ön ısıtma yapar. Bu işlem, artık gerilmelerin en aza indirilmesine yardımcı olur. Bu yöntemle üretilen parçaların mekanik özellikleri, döküm yöntemiyle üretilen malzemelere benzerlik gösterebilir. Bu da, geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında EB-PBF ile üretilen bileşenlerin uygunluğunu ortaya koyar (Karunakaran ve ark., 2012).

Maksimum üretim boyutları, lazer toz yatak füzyonuna (L-PBF) benzer olup, en yeni modellerde dairesel yapı çapı 350 mm ve yükseklik 380 mm'ye ulaşabilmektedir. EB-PBF sistemleri genellikle daha büyük toz hammaddeler kullanır, bu da yüzey pürüzlülüğü değerlerinin daha yüksek olmasına neden olabilir. Bununla birlikte, bu sistemler oldukça gelişmiştir ve yüksek güç ile hızlı tarama özelliği sayesinde nispeten kısa üretim süreleri sunar.

1.2.1.3. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)

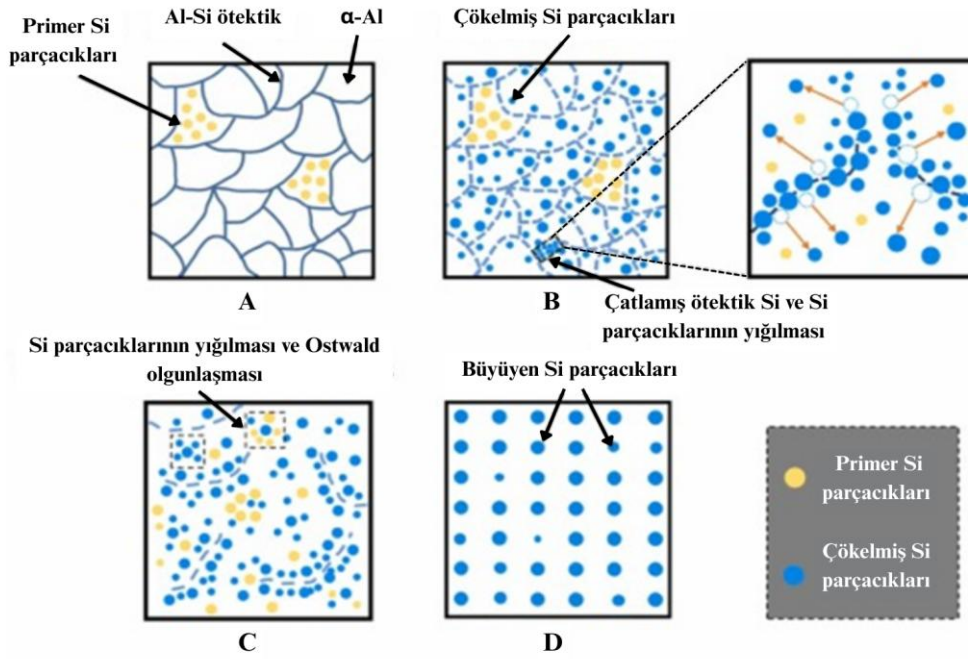
Toz yataklı süreçlerden farklı olarak, yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) tekniklerinde, stok malzeme toz veya tel formunda doğrudan ergime havuzuna beslenir. Ergime havuzu, elektrik arkı, lazerler veya elektron ışınları gibi bir enerji kaynağı ile oluşturulur. DED, toz yatağına bağlı olmadığı için geometrik açıdan daha fazla serbestlik sağlar ve üretim boyutu sınırlamaları bulunmaz. Bu nedenle çok büyük bileşenler bu teknikle üretilebilir. DED makineleri, özellikle yüksek değere sahip mevcut bileşenlerin onarımında, örneğin türbin kanatlarında yaygın olarak kullanılır.

DED, toz yataklı teknolojilere kıyasla daha düşük çözünürlük (minimum özellik boyutu yaklaşık 1 mm) sunduğu için, genellikle daha büyük bileşenlerin veya daha düşük çözünürlük gerektiren parçaların üretiminde tercih edilir. Bu tür parçalar gerektiğinde son işlem adımlarında talaşlı imalat teknikleriyle işlenebilir. DED tekniklerinin farklı avantaj ve dezavantajlara sahip çeşitli türleri vardır. Lazer Toz DED (LP-DED), lazerin enerji kaynağı olarak kullanıldığı en yaygın yöntemlerden biridir. Toz besleme sistemi, bir robotik veya portal sistemine bağlı bir biriktirme başlığı ile ergime havuzuna üflenir ve önceki katmanla birleştirilerek serbest biçimli bir yapı oluşturur (Roberto ve Bineli, 2011).

Alternatif bir yöntem olan Lazer Tel DED (LW-DED) ise aynı prensibi kullanır ancak hammadde olarak tel beslenir. Tel besleme sistemi eksen dışı veya eş eksenli olabilir. Bu yöntem, malzeme verimliliği açısından avantajlı olsa da çözünürlük bakımından sınırlıdır. Diğer sistemler arasında Ark Tel DED (AW-DED) ve Elektron Işını Tel DED (EB-DED) bulunur. Bu yöntemlerde enerji kaynağı olarak sırasıyla elektrik arki veya elektron ışını kullanılır. Her bir DED sürecinin farklı çözünürlük ve biriktirme hızı özellikleri vardır. Bu durum, ısıtma ve soğutma oranlarında değişkenliğe yol açarak metalurjik özelliklerde ve mekanik ile termofiziksel özelliklerde farklılıklar oluşturabilir (Majeed ve ark. 2019; Limbasiya ve ark. 2022).

1.2.2. SLE sonrası ısıl işlemler

SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının ısıl işlem süresince mikroyapısal evrimi Şekil 3'te gösterilmektedir. Üretim sonrası alaşım, ince Si parçacıkları, lifsi yapıda ötektik Si ağı ve aşırı doymuş α -Al matrisi içeren karakteristik bir mikroyapıya sahiptir (Durum A). Isıl işlemin başlamasıyla birlikte ötektik Si ağı parçalanmakta ve ince Si parçacıkları çökelmektedir (Durum B). Isıl işlem ilerledikçe, Si parçacıkları genellikle Al-Si ötektik sınırlarında çökelmekte, zamanla bir araya gelerek Ostwald olgunlaşması ile büyümekte ve bu süreçte parçacık sayısı azalırken boyutları artmaktadır; böylece daha kararlı bir yapı oluşmaktadır (Durum C). Uzun süreli ısıl işlem sonucunda ise irileşen Si parçacıkları Al matrisi içerisinde homojen olarak dağılmakta ve son kararlı mikroyapı elde edilmektedir (Durum D). Bu mikroyapısal dönüşüm, alaşımın mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmekte; sertlikte bir miktar azalma yaşanırken süneklik ve kırılma tokluğunda artış sağlanmakta, böylece dayanım-süneklik dengesi ısıl işlem koşullarına bağlı olarak optimize edilebilmektedir (Wu ve ark., 2016; Li ve ark., 2016; Li ve ark., 2022; Ge ve ark., 2023). Şekil 1.3'te AlSi10Mg numunelerin ısıl işlem sonrası mikroyapısı verilmiştir.



Şekil 1.3. AlSi10Mg numunelerin ısıtım sonrası mikroyapısı (Chen ve ark., 2025)

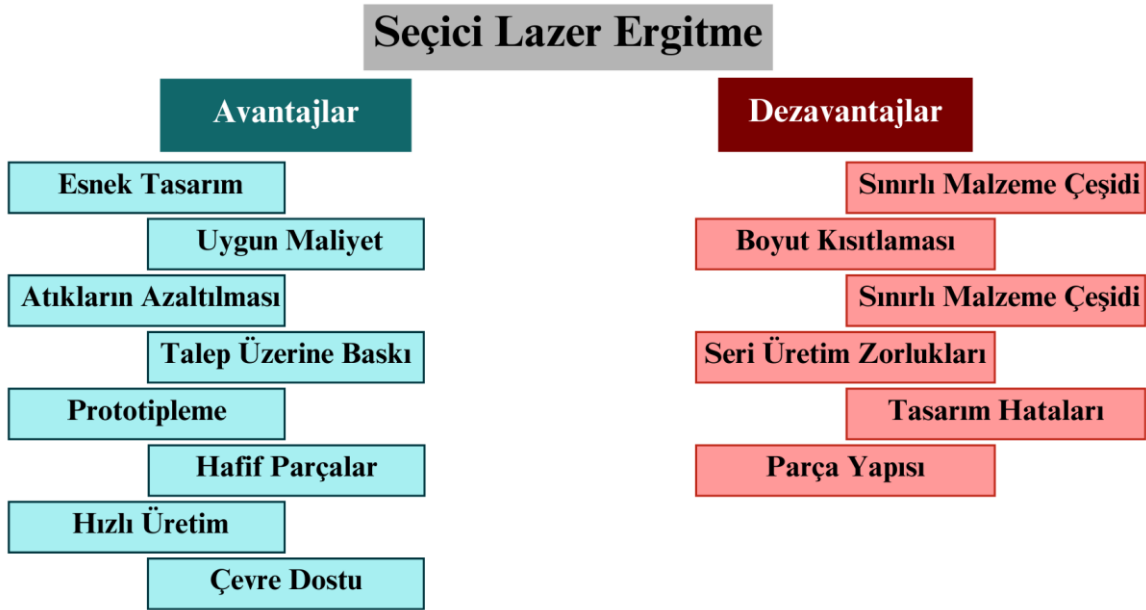
1.3. Katmanlı İmalatın Avantajları ve Dezavantajları

Katmanlı imalat (AM), çok yönlü uygulamaları ve imalat sektörüne sunduğu önemli faydalar sayesinde geniş çapta benimsenmiştir. AM üretimi, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla pek çok avantaja sahiptir. En önemli faydalardan biri, malzemelerin istenen geometrik şekle getirilmesi için kalıplara ihtiyaç duyulmamasıdır. Geleneksel tekniklerde yaygın olarak kullanılan kütle deformasyonu ve talaşlı imalat yöntemlerinin aksine, AM süreçlerinde kalıp gereksiniminin ortadan kalkması, üretimi basitleştirirken aynı zamanda kalıp üretim zincirinden kaynaklanan emisyon ve atıkları azaltarak çevresel etkileri düşürür.

AM'nin bir diğer avantajı, parça geometrisinde sınırlamaların olmamasıdır. Bu özellik, özelleştirilmiş ürünler için tedarik zincirlerinin kısaltılmasına ve geleneksel imalata kıyasla malzeme israfının azaltılmasına imkân tanır, böylece çevresel etkiler daha da düşer. Kalıp ihtiyacının ortadan kalkması ve üretimde geometrik özgürlüğün artması, sadece çevresel etkiler açısından değil, üretim maliyetleri bakımından da avantaj sağlar. Geleneksel üretim süreçlerinde, kalıpların kendileri işlenmek zorunda olduğundan imalat maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturur.

AM'nin üretim avantajları arasında endüstriyel verimlilik, seri özelleştirme, talep üzerine üretim, yerleştirilmiş üretim, kalite iyileştirme, ek maliyet oluşturmadan aynı anda çoklu yinleme yapabilme, tedarik zinciri verimliliğinin artırılması gibi unsurlar yer alır. AM'nin sunduğu geometrik esneklik, ürün boyutu ve şeklini farklı müşteri tercihlerine göre özelleştirmeye imkân tanır; üreticilerin değişen pazar taleplerine hızla uyum sağlamasını

kolaylaştırır. Ayrıca, geleneksel üretim teknikleriyle üretimi yüksek maliyetli olan karmaşık parçaların, ek bitirme işlemleri gerekmeden üretilmesini mümkün kılar. Yüksek yapısal karmaşıklığa sahip bileşenler için AM, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla ekonomik avantaj da sunar (Attaran, 2017). Bununla birlikte, AM üretimi henüz tüm endüstrilerde yaygın olarak uygulanmamaktadır ve hızlı büyümeyi sağlayacak şekilde hayata geçirilmesinde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. AM süreçlerinin uygulanmasındaki başlıca engeller; üretim boyutlarındaki kısıtlamalar, üretim süresinin uzunluğu, maliyetler ve metal ile polimer tozları gibi AM hammaddelerinin üretiminde yüksek enerji tüketimidir (Shahrubudin ve ark., 2019; Yılan ve ark., 2024). Şekil 1.4'te Eklemeli imalat avantajları ve dezavantajları verilmektedir.



Şekil 1.4. Eklemeli imalat avantajları ve dezavantajları (Limbasiya ve ark., 2022)

1.4. Amaç

Bu çalışmanın temel amacı, eklemeli imalat (Seçici Lazer Ergitme – SLE) yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının, ısıl işlem sonrası Tel Elektro Erozyon (Tel-EDM) yöntemiyle işlenebilirliğinin kapsamlı bir şekilde incelenmesidir. Çalışma kapsamında farklı Tel-EDM parametrelerinin (darbe süresi, tel hızı, yıkama basıncı, tel gerilimi vb.) işleme performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Deneysel süreçte hem ısıl işlem görmüş hem de işlemsiz numuneler kullanılarak, yüzey pürüzlülüğü, işleme süresi, tel kesim akımı, malzeme kaldırma oranı, mikro yapı ve sertlik gibi kritik çıktıların karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece, eklemeli imalat sonrası uygulanan son işlem süreçlerinin optimize edilmesine yönelik bilimsel veriler elde edilmesi hedeflenmiştir.

1.5. Çalışmanın Önemi

Bu çalışmanın önemi birkaç boyutta değerlendirilebilir. Öncelikle, literatürde ısı işlem uygulanmış SLE- $AlSi10Mg$ numunelerinin Tel-EDM ile işlenebilirliği üzerine yapılmış kapsamlı araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle proje, mevcut bilgi eksikliğini gidererek literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, $AlSi10Mg$ alaşımı; havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi stratejik sektörlerde yüksek mukavemet/ağırlık oranı, iyi döküm kabiliyeti ve korozyon direnci nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu bağlamda, SLE yöntemiyle üretilen parçaların Tel-EDM ile yüksek hassasiyetle işlenmesine yönelik en uygun parametrelerin belirlenmesi, bu sektörlerin ihtiyaç duyduğu karmaşık geometri ve hassas toleranslı parçaların üretiminde doğrudan uygulama potansiyeline sahiptir.

Çalışmanın bir diğer önemli boyutu, sürdürülebilirlik ve ekonomik katkıdır. Tel-EDM yöntemi temassız işleme özelliği sayesinde talaşlı imalata kıyasla daha az malzeme kaybı oluşturmakta, yüksek boyutsal hassasiyet sağlamakta ve özellikle sert veya karmaşık yapı malzemelerin işlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak yöntemin enerji tüketimi ve dielektrik sıvı kullanımını gibi sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu çalışmada elde edilen bulgular, optimum işleme koşullarının belirlenmesiyle hem enerji verimliliğine hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Son olarak, tez çalışması eğitim ve insan kaynağı açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Çalışma, bir lisansüstü tezine doğrudan katkı sağlayarak akademik eğitimin niteliğini artırmakta, aynı zamanda üniversite–sanayi iş birliğini destekleyerek nitelikli araştırmacı yetiştirilmesine imkân tanımaktadır. Böylece çalışma, yalnızca akademik literatüre değil, aynı zamanda endüstriyel üretim süreçlerine ve insan kaynağının gelişimine de değer katmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sürdürülebilirlik, tüm alanlarda kendi kendine yeterliliği sağlayarak ve şimdiki ve gelecek nesilleri tehlikeye atmadan üretim yaparak gelecek nesiller için daha iyi bir dünya yaratmayı hedeflemektedir. Bu kavram üç ana başlık altında değerlendirilir: çevre koruma, sosyal kalkınma ve ekonomik büyüme. Sürdürülebilir üretim, atık oluşumunu, enerji tüketimini ve tehlikeli kimyasal oluşumunu azaltarak çevre dostu ve ekonomik üretimi teşvik eder. Eİ ve Tel-EDM gibi hızla ilerleyen üretim teknolojileri, havacılık, savunma, otomotiv ve sağlık gibi stratejik endüstriyel üretim alanlarında kullanılmaktadır. Eİ, malzeme israfı ve karmaşık geometrilerin üretimindeki zorluklar gibi geleneksel üretim kısıtlamalarının üstesinden gelebilir. Temassız bir işleme süreci olan Tel-EDM, Eİ ile üretilen parçaların işlenmesine olanak tanır, malzeme israfını azaltır ve iş parçası performansını iyileştirir. Ancak Tel-EDM, enerji tüketimi ve çevresel etki nedeniyle sürdürülebilirlik konusunda endişelere yol açmaktadır Şentürk ve ark. (2025). SLE yöntemi ile üretilen parçaların Tel-EDM sürecini ele alan literatür çalışmaları bu bölümde ele alınmıştır.

Bicknell ve Manogharan (2018), AM ve dövme 316L silindirik numuneleri WEDM'de L9 tasarım ve üç tekrar ile karşılaştırmış; kesme voltajı 6–18 V, T_{on} 6–18 μs ve T_{off} 12–24 μs olarak sınanmıştır. Genel eğilim, AM parçaların daha hızlı kesildiğini gösterir: örneğin 12 V–12 μs –12 μs koşulunda AM 250,67 s, dövme 327,72 s (fark 77,05 s). Ra değerleri koşullara göre birbirine yakın seyretmiştir; 18 V–6 μs –24 μs 'te AM 2,37 μm , dövme 2,64 μm ; 6 V–12 μs –18 μs 'te AM 2,62 μm , dövme 2,46 μm . Sertlikte HRB çoğunlukla dövme lehinedir; 6 V–6 μs –12 μs 'te AM 85,4 iken dövme 90,1 ölçülmüştür. ANOVA, işleme süresi üzerinde kesme voltajını ve voltajın T_{on}/T_{off} ile etkileşimini belirleyici bulmuştur.

Kumar ve ark. (2019), spray impingement tekniği ile soğutma altında AISI D2 (55 ± 1 HRC) sert tornalamayı L16 düzeninde hız 63–182 m/dak, ilerleme 0.04–0.16 mm/dev ve talaş derinliği 0.1–0.4 mm aralıklarında incelemiştir; yüzey pürüzlülüğü 0.496–1.324 μm , yanak aşınması 0.036–0.124 mm ve kesme sıcaklığı 120.4–217 °C aralıklarında raporlamıştır. 108 m/dak, 0.04 mm/dev ve 0.1 mm koşullarında (1.5 bar hava, 1 bar su) takım ömrü 105 dk olup işlenen hacim 45.36 cm³'e ulaşmıştır; ANOVA, aşınma üzerinde en etkili değişkenin kesme hızı olduğunu göstermiştir. Ek olarak, su damlacıklarının buharlaşma gizli ısısı sayesinde kesme sıcaklığının düşmesi, takım aşınmasını sınırlayarak daha stabil ve çevreci bir işleme sağlamıştır.

Kumar ve ark. (2019), yılında yaptıkları çalışmada Inconel 825'in tel erozyonunda çoklu yanıtların iyileştirilmesi amacıyla yüzey yanıt yöntemi ile gri ilişki analizini birleştirerek yarım

kesirli merkezi bileşik tasarımıyla 52 deney yürütmüş; deşarj açık süresini 107–115 μ s, deşarj kapalı süresini 32–44 μ s, boşluk gerilimini 42–58 V, tepe akımını 110–150 A, tel gerilimini 8–12 kgf ve tel ilerlemesini 4–8 m/dak aralıklarında sınamıştır. Gri derecelendirme ile önerilen A4B1C1D5E4F2 düzeylerinde malzeme kaldırma hızı 36,13'ten 41,828 mm²/dakikaya yükselmiş, yüzey pürüzlülüğü 2,842'den 2,445 mikrometreye ve tel aşınma oranı 0,01832'den 0,01758'e gerilemiştir; bu bulgular sırasıyla yüzde 13,62 artış, yüzde 13,97 ve yüzde 4,03 azalma anlamına gelmektedir. Doğrulama deneyi tüm tepkilerde öngörü–deney farkının yüzde 5'in altında kaldığını gösterirken, etki sıralaması deşarj açık süresi > tel ilerlemesi > deşarj kapalı süresi > tepe akımı > boşluk gerilimi > tel gerilimi biçiminde belirlenmiş ve işlenmiş yüzeyde krater, çukurcuk, döküntü ile yeniden katılmış tabaka gibi tipik izler gözlenmiştir.

Routara ve ark. (2020), T6-Al7075'in EDM'de durağan ve döner takım modlarını L9 düzeniyle karşılaştırmış; kıvılcım aralığını 0,2–0,4 mm, T_{off}'u 30–70 ms ve akımı 4–8 A aralığında sınamıştır. Döner modda MRR 0,0358–0,0561 mm³/dak aralığına çıkarken durağan modda 0,0273–0,0488 mm³/dak aralığında kalmış; Ra durağanda 3,8–4,5 μ m, dönerde 4,0–4,7 μ m olarak raporlanmıştır. TWR döner modda 0,00103–0,00268 mm³/dak, durağanda 0,00064–0,00254 mm³/dak aralığında ölçülmüştür. Çoklu yanıt için TOPSIS değerlendirmesi, durağan modda d 0,2 mm, T_{off} 70 ms ve I 6 A bileşimini (yaklaşık yakınlık katsayısı 0,646), döner modda ise d 0,4 mm, T_{off} 50 ms ve I 8 A bileşimini (yaklaşık yakınlık katsayısı 0,767) en elverişli kombinasyonlar olarak önermiştir.

Sahu ve Mahapatra (2020), kısa menzilli haberleşme sistemleri için düşük maliyetli ve yüksek performanslı RF tasarım tekniklerini incelemiştir. Çalışmada 2.4, 5.8 ve 60 GHz bantlarındaki sistemler karşılaştırılmış; mikroşerit antenlerin 6–8 dB kazanç ve %5–10 bant genişliği sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca düşük gürültü yükselteçlerinde 0.9–1.2 dB gürültü katsayısının kritik olduğu, FR-4 tabanlı baskı devrelerin yüksek frekansta %15'e kadar kayıp oluşturduğu, buna karşın Rogers tabanlı malzemelerin daha kararlı performans sağladığı vurgulanmıştır. Faz gürültüsünün –90 dBc/Hz altında tutulması ve güç tüketiminin 50 mW seviyesinde kalması da taşınabilir uygulamalar için önemli bulunmuştur.

Ahmed ve ark. (2020), Inconel 718'de hibrit EDM-ark (HEDAM) delme için bakır, pirinç ve CuW elektrotları karşılaştırmış; 12,5 mm kalınlıktaki numunelerde 3,0 mm tübüler elektrot ve su bazlı Vitol KS dielektrik kullanmıştır. Deneylerde DC güç kaynağı akımı 50 ile 140 A, darbeli güçte akım 35 A, darbe açık ve kapalı süreleri 20 ile 20 mikrosaniye, yıkama basıncı 4 ile 10 MPa ve dönme hızı 100 ile 2000 dev/dak aralıklarında denenmiştir. Bulgular, HEDAM ortalama malzeme kaldırma hızının yaklaşık 200 milimetreküp/dakikaya ulaştığını ve aynı koşullarda EDM'e kıyasla yaklaşık on iki kat artış sağladığını; elektrot aşınma oranının

yaklaşık yüzde 3,5 düzeyinde kaldığını göstermiştir. Akım arttıkça HEDAM'da MRR 311 ile 355 milimetre-küp/dakika aralığına yükselmiş; EWR bakırda en yüksek, pirinçte daha düşük, en düşük ise CuW elektrotla gözlenmiştir. Sekiz MPa basınç ve 2000 dev/dak hızda bakır ve pirinç elektrotlarla ortalama yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğu, giriş yüzeyinde çıkışa göre daha fazla mikroçatlak bulunduğu raporlanmıştır.

Boban ve ark. (2020), WEDP'nin AM-SS316L üzerindeki etkinliğini T_{on} 5–15 μ s ve SV 15–25 V aralığında tam faktöriyel deneylerle incelemiş; as-built yüzeyde ortalama Sa 3,75 μ m iken tüm kombinasyonlarda Sa 1 μ m'un altına inmiş, en iyi sonuç T_{on} 10 μ s ve SV 20 V koşulunda 0,739 μ m olarak elde edilmiştir (yaklaşık %70–80 iyileşme). T_{on} yükseldikçe pürüzlülüğün arttığı gözlenmiş; EDS'de telden Zn ve Cu geçişinin düşük düzeyde kaldığı belirtilmiştir. Yöntemin genellenebilirliğini göstermek üzere SLM-TiAl üzerinde de Sa 3,87 μ m'den 0,884 μ m'a (~%77) düşüş raporlanmıştır.

Franczyk ve ark. (2021), AlSi10Mg üzerinde SLM parametresi olarak tarama hızını (800, 1000, 1200, 1400 mm/s) ve WEDM parametresi olarak akım genliğini (8–32 A) birlikte ele alarak performans ve yüzey pürüzlülüğünü incelemiştir; deneylerde T_{on} 10 μ s, T_{off} 350 μ s, S0 0,28 mm, tel besleme 10 mm/s ve 294 K'de iletkenliği 89,5 μ S/cm olan demineralize su kullanılmıştır. Sonuçlar, akım arttıkça Ra ve Rz'nin yükseldiğini; SLM tarama hızı arttıkça her iki değer azaldığını göstermiş; $I = 32$ A ve $v_s = 1400$ mm/s koşulunda kesme hızı yaklaşık 0,16 mm/s'ye ulaşmıştır. Toplam enerji tüketimi 53,7 kJ ile ($v_s = 1000$ mm/s, $I = 8$ A) en düşük, 101,0 kJ ile ($v_s = 800$ mm/s, $I = 32$ A) en yüksek olarak raporlanmıştır. Çok ölçütlü optimizasyonda finisaj aralığı kabulüyle (Ra 2,5–5,0 μ m; Rz 15–20 μ m) en elverişli ayarlar 9 A akım ve 800 mm/s tarama hızı olarak belirlenmiştir.

Vaidyaa ve ark. (2021), SLM ile üretilmiş AlSi10Mg'nin WEDM sürecindeki çoklu amaçlı özelliklerini hibrit ANN–GA yaklaşımıyla optimize etmiştir. Taguchi tasarımıyla üç etkili faktör değerlendirilmiş; WEDM'de deşarj akımı, deşarj gerilimi ve T_{on} girişleri kullanılmıştır. Beş adet üç katmanlı ileri beslemeli MLP denenmiş, en iyi ANN mimarisi 3–10–2 olarak belirlenmiş ve Levenberg–Marquardt algoritmasıyla logsig ile purelin aktarım fonksiyonları kullanılmıştır. GA tabanlı çoklu yanıt optimizasyonu sonucunda 12 A akım, 42 V gerilim ve 12 μ s T_{on} altında mikrosertlik 478 VHN seviyesine çıkarılmış, yüzey pürüzlülüğü 4,3 μ m düzeyine indirilmiş; her iki sonuç da yüzde 98'in üzerinde güvenle doğrulanmıştır. Optimize numunenin yüzeyinde Si parçacıkları, α -Al ve Mg₂Si fazlarının gözlemlendiği ve bu numunenin diğer deneklere kıyasla daha üstün yüzey kalitesi sunduğu raporlanmıştır.

Ozoner ve ark. (2021), LBPF-Inconel 939'da WEDM parametrelerinin ve baskı yönünün yüzey bütünlüğü ile çekme dayanımı üzerindeki etkilerini Taguchi L18 düzeniyle

incelemiştir; T_{on} 0,1–0,6 ms, T_{off} 3–12 ms ve açık voltaj 80–200 V aralıklarında, XY/Z yönlerinde tek paso kesimler 0,30 mm Cu tel ile uygulanmıştır. EOS M290 (400 W) ile üretilen numunelere 1160 °C’de 4 saat çözelti ve 850 °C’de 16 saat yaşlandırma uygulanmıştır. Recast kalınlığı 0–8 μ m, Sa 2,50–8,12 μ m, UTS 1340–1470 MPa aralıklarında raporlanmıştır; T_{on} artışı recast ve Sa’yı yükseltirken, T_{off} artışı her ikisini düşürmüştür. 200 V seviyesinde ortalama UTS 1408 MPa’a gerilemiştir; XY örneklerinin ortalama UTS değeri 1431 MPa iken Z örneklerinde 1414 MPa ölçülmüştür; pulse off/pulse on oranındaki artış recast’ı azaltmıştır.

Boban ve Ahmed (2022), yılında yaptıkları çalışmada bilim insanları, MAM ile üretilmiş AlSi10Mg ve Ti6Al4V için düşük enerjili WEDP’nin etkinliğini incelemiştir; Sa açısından AlSi10Mg’de yaklaşık yüzde 79, Ti6Al4V’de yaklaşık yüzde 91 iyileşme rapor etmiştir. AlSi10Mg’de parlatılmış yüzeyin altında mikrosertlik değişimi işlenmiş tabakaya doğru yaklaşık 300 μ m derinliğe kadar gözlenmiş, Ti6Al4V’de belirgin sertlik değişimi bildirilmemiştir; korozyon direnci AlSi10Mg’de korunurken Ti6Al4V’de artmıştır. Süreçte daha düşük T_{on} ayarlarının krater boyutunu ve yeniden katılaşmış tabakayı azalttığı belirtilmiş, böylece WEDP’nin her iki alayım için de uygulanabilir ve etkili bir finisaj yöntemi olduğu gösterilmiştir.

Boban ve Ahmed (2022), AlSi10Mg ve Ti6Al4V alayımlarında düşük enerjili WEDP’nin son-işlem performansını karşılaştırmıştır; T_{on} 3–15 ve SV 15–45 V aralıklarında tek geçişle denemeler yapmıştır. AlSi10Mg’de Sa yaklaşık %79 iyileşmeyle 6,15 μ m’den 1,25 μ m’ye, Ti6Al4V’de ise yaklaşık %91 iyileşmeyle 9,32 μ m’den 0,84 μ m’ye düşmüştür. Ti6Al4V’nin korozyon potansiyeli ~0,20 V’dan ~0,37–0,38 V’a yükselirken AlSi10Mg’de kayda değer değişim gözlenmemiştir. AlSi10Mg’de mikrosertlik değişimi yüzeyden ~300 μ m derinliğe kadar izlenmiş, Ti6Al4V’de belirgin bir değişim raporlanmamıştır. Yeniden katılaşmış tabaka kalınlığı AlSi10Mg’de $\sim 2,92 \pm 0,58$ μ m, Ti6Al4V’de $\sim 7,55 \pm 1,09$ μ m ölçülmüştür; düşük T_{on} ve yüksek SV, krater/çatlak eğilimini sınırlayarak yüzey bütünlüğünü iyileştirmiştir.

Machno ve ark. (2022), AISI 316L’nin SLM ve döküm numunelerini WEDM sonrası karşılaştırmıştır; T_{on} 10 μ s, T_{off} 350 μ s, S 0,28 mm, tel besleme 10 mm/s ve akım 8–72 A aralığında uygulanmıştır. SLM numunesinde 72 A düzeyinde Ra yaklaşık 10 μ m civarında kalırken, döküm numunede 56 A’dan 72 A’ya çıkıldığında Ra 9 μ m’den 14 μ m’ye yükselmiştir; aynı koşullarda SLM’nin Ra değeri döküme göre yaklaşık yüzde 25 daha düşüktür. SLM için 72 A’da hacimsel kesme hızı yaklaşık 5×10^{-11} m³/s olup Ra 10 μ m ve altında tutulmuştur. Beyaz tabaka kalınlığı akımla artmış; HAZ kalınlığı 8 A’da yaklaşık 2,0–4,5 μ m aralığında ölçülürken 24–72 A aralığında yaklaşık 11 μ m düzeyinde seyretmiştir.

Bag ve ark. (2022), sert parça malzemelerinde sürdürülebilir işleme koşullarını derleyerek MQL'nin taşkın yağlamaya çevresel ve ekonomik açıdan güçlü bir alternatif olduğunu; sıcaklık ve kesme kuvvetlerini belirgin biçimde düşürüp takım ömrünü ve yüzey kalitesini artırdığını vurgulamıştır. Ayrıca CO₂+MQL ve vortex-tube destekli MQL gibi hibrit çözümlerin talaş tahliyesini iyileştirerek daha temiz/yeşil üretime kapı araladığını belirtmişlerdir. Literatür taramasında, sebze yağı bazlı MQL'nin özellikle 0,1 mm/dak ilerleme ve 90 m/dak kesme hızı koşullarında uygulanabilir olduğu, criyo-MQL'nin ise sert tornalamada daha agresif kesme rejimlerini sürdürebildiği ifade edilmiştir. Bu bulgular, 45 HRc ve üzeri çelikler ile süperalaşımın işlenmesinde akışkan tüketimini azaltan MQL tabanlı soğutma-yağlama stratejilerinin hem çevresel etkileri hem de parça kalitesini aynı anda iyileştirebildiğini göstermektedir.

Oniszcuk-Świercz ve Świercz (2023), kesilmesi zor malzemelerden mikro parçaların hassas işlenmesi için tel elektrik deşarj işleme (Tel-EDM) kullanımını ele almaktadır. İşlem parametrelerinin yüzey topografyası ve malzeme çıkarma oranı (MRR) üzerindeki etkisini anlamak, mikro Tel-EDM üretkenliğini artırmak için çok önemlidir. Çalışma, deşarj enerjisinin, zaman aralığının ve tel hızının Sa, Sk, Spk, Svk ve MRR dahil üzere yüzey topografyası özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Sonuçlar, deşarj enerjisinin yüzey topografyası parametreleri üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu, zaman aralığının da önemli olduğunu göstermektedir. Tel hızını azaltmak maliyetleri düşürebilir ve sürecin sürdürülebilirliğini iyileştirebilir.

Galati ve ark. (2023), Ti6Al4V'nin döküm, PBF-LB ve PBF-EB ile üretilmiş hallerinde WEDM performansını karşılaştırmış; 0,18 mm molibden tel ile I 2–4 A, T_{on} 10–30 µs, DC 5,88–14,29 ve kalınlık 10–30 mm aralıklarında toplam 81 koşul denemiştir. Kesme hızları teknolojiler arasında benzer bulunurken (Vc yaklaşık 1,30–1,35 mm/dak), yüzey pürüzlülüğü üretim tekniğine güçlü biçimde duyarlı çıkmıştır: Rax dökümde 6,88 µm, PBF-EB'de 8,63 µm, PBF-LB'de 9,99 µm; buna paralel Sq değeri PBF-LB'de 8,17 µm iken PBF-EB'de 4,41 µm ve dökümde 4,60 µm ölçülmüştür. Yüzeydeki küresel döküntülerin ortalama boyutu PBF-LB için 14,75±4,02 µm, PBF-EB için 17,73±4,87 µm, döküm için 12,83±2,13 µm'dur. ANOVA değerlendirmesi, Rax üzerinde üretim teknolojisinin belirleyici, Vc üzerinde ise etkisiz olduğunu; Vc'yi esasen DC'nin artırdığını, Rax'ı iyileştirmek için düşük akım ve kısa T_{on}'un tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Song ve ark. (2023), SS316L'den mikrogripper üretiminde SLM ile ana gövdeyi oluşturarak yalnızca 0,1 mm kalınlıklı esnek mafsalları WEDM ile işleyip hibrit bir süreç önermiştir. WEDM tek başına uygulandığında toplam süre 6600 saniye iken hibrit yöntemde

3D baskı yaklaşık 34–35 dakika ve ardından WEDM 7–9 dakika sürmüş, böylece üretim zamanı belirgin biçimde kısalmıştır; yüzey pürüzlülüğü WEDM’de 1,51 mikrometre, hibritte 1,64 mikrometre ölçülmüştür. Ayrıca hibritte sertlik 165 HV seviyesine çıkmış ve dayanıklılık testlerinde kırılmaya kadar çevrim sayısı WEDM’de ortalama 1397 iken hibritte yaklaşık 3184–3346 aralığına yükselmiştir. Çalışmanın sonuç kısmında, toplam üretim süresinde ortalama yüzde 61 azalma ve tel sarfında yüzde 93’e varan düşüş raporlanmıştır.

Abeni ve ark. (2023), LPBF ile üretilmiş 17-4PH paslanmaz çeliğin mikro ölçekte son işleminde MM ve mikro-EDM süreçlerini karşılaştırmıştır; LPBF’de 50 W lazer gücü, 80 µm spot, 300 mm/s tarama hızı, 50 µm hatch ve 30 µm katman kalınlığı kullanılmıştır. MM için 200 ve 800 µm takımlarla kanallarda malzeme kaldırma hızı 0,23 ile 4,77 mm³/dakika, deliklerde 1,80 ile 60,0 mm³/dakika aralığında raporlanmıştır; mikro-EDM’de 200 µm elektrotla kısa-orta-uzun darbe şekillerinde 0,00021 ile 0,00668 mm³/dakika, 800 µm elektrotla 0,00787 ile 0,10820 mm³/dakika aralıkları elde edilmiştir. As-built yüzey pürüzlülüğü 12,85 ± 0,18 µm ölçülmüş; MM ile kanal tabanında ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,3 mikrometrenin altında kalırken mikro-EDM’de tipik krater yapısı nedeniyle 0,66 mikrometreye kadar çıkmıştır. Mikro delmede MM, hedef çapa yakın boyutsal doğruluk sağlarken mikro-EDM daha düşük dairesellik hatasıyla daha iyi şekil kalitesi sunmuştur.

Khan ve Senthilkumar (2023), WAAM ile üretilen Nimonic 90 üzerinde WEDM parametrelerinin etkisini RSM-CCD ile incelemiş; giriş değişkenleri olarak T_{on} (80–110 µs), SV (50–80 V) ve WT (10–12 N) kullanmıştır. Deneylede 0,25 mm çinko kaplı pirinç tel ve deiyonize su tercih edilmiş; 20 koşulda MRR 3,256–7,210 mm³/dk ve SR 2,890–4,499 µm aralığında elde edilmiştir. En yüksek MRR T_{on} 110 µs, SV 80 V, WT 12 N koşulunda 7,210 mm³/dk; en düşük SR T_{on} 80 µs, SV 50 V, WT 12 N koşulunda 2,890 µm olarak raporlanmıştır. Ana etki analizleri WT’nin MRR ve SR üzerinde belirleyici, SV’nin ise SR için baskın olduğunu göstermiştir.

Gusain ve ark. (2024), LPBF-IN718 kafes yapılarda EDM ile yakın dairesel deliklerin seçici kaldırılmasını incelemiş; 200 W lazer gücü ve 200 µs poz süresiyle üretilen, strut çapı 100–150 µm olan yapıları 954 °C’de 1 saat çözelti ve 718 °C’de 8 saat yaşlandırma ile ısıtılıştan sonra 900 µm tungsten elektrot, 4 A akım, 50–100 µs pulse-on ve yüzde 56–72 duty ayarlarıyla delmiştir. Recast tabaka kalınlığı 10,2 ± 2,6 µm olarak ölçülmüş, pulse-on süresi arttıkça çatlak yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. EDS analizleri recast tabakada belirgin karbon tepeciklerini ve kenarlarda Nb’nin yüzde 4,37 ile 10,91 arasında segregasyonu göstermiştir. Mikrosertlik düğümlerde 445–569 HV aralığında değişmiş; kenar

yakınında 471 ± 18 HV ve 420 ± 20 HV düşüşleri raporlanırken, kenardan uzakta 497 ± 25 HV, 513 ± 32 HV ve 525 ± 20 HV artışları kaydedilmiştir.

Arunadevi ve ark. (2024), DED ile üretilen SS316L numuneleri WEDM ile kesip L9 diziliminde hız 30–40, akım 30–40 ve offset 0,1–0,3 aralıklarında çalışarak yüzey pürüzlülüğü ve çamur erozyonu davranışını değerlendirmiştir; WEDM sonrası pürüzlülük 4,23 ile 9,24 mikrometre aralığında ölçülmüş, en düşük değer 35 birim hız ve 0,3 offset koşulunda 4,2295 mikrometre, en yüksek değer 35 birim hız, 40 A akım ve 0,3 offset ile 9,241 mikrometre olarak raporlanmıştır; ANOVA sonuçları akımın pürüzlülüğe yüzde 57 katkıyla en etkili faktör olduğunu, hız ve offset katkılarının sırasıyla yüzde 0,8 ve yüzde 0,9 düzeyinde kaldığını göstermiştir; slurry erozyon testlerinde aşınma oranı $1,1 \times 10^{-5}$ ile $1,5 \times 10^{-4}$ aralığında bulunmuş, ANOVA’da hızın yüzde 17,26 ve çamur derişiminin yüzde 15,5 katkı ile baskın, çarpma açısının ise yüzde 4,2 düzeyinde etkili olduğu belirlenmiştir; aşınma oranı tahmininde KNN en iyi modeli sunarak R^2 değeri 0,916 ve RMSE 0,1974 ile doğrusal regresyona R^2 0,718 ve ANN’e R^2 0,486 karşı üstün performans sergilemiştir.

Bicknell ve ark. (2024), AM parçaların tablaya WEDM ile ayrılmasında tel kopmalarını azaltmak için destek tasarımı ve işlem parametrelerini birlikte değerlendirerek SS316L üzerinde deneyler yapmıştır. Çalışmada gerilim 25, 27 ve 30 V; tel besleme 7, 10 ve 13 m/dak; su yıkama 5, 10 ve 15 L/dak olarak sınanmış, gerilimin düşürülmesinin belirleyici olduğu görülmüştür. Özellikle 25 V düzeyinde tel kopması gözlenmemiş; 25 V, 10 m/dak ve 10 L/dak kombinasyonunda ortalama işleme süresi yaklaşık 250 saniyeye inmiştir. Destek geometrileri içinde 0.04" yatay kafes en kısa sürede kesilmiş; katı numunede ise süre, en yavaş destek türüne kıyasla yaklaşık 80 saniye daha uzun bulunmuştur. ANOVA sonuçları, gerilimin işleme süresi ve kopma üzerinde en baskın etken olduğunu göstermiştir.

R ve ark. (2024), Taguchi entegre Gri İlişkisel Analiz (GRA) kullanılarak SLEed AlSi10Mg'nin Tel Erozyon İşleme (Tel-EDM) sırasında çoklu tepkiyi optimize etmeye odaklanmaktadır. Seçici Lazer Eritme (SLE), geleneksel üretim süreçlerinin yerini alabilen popüler bir Eklemeli Üretim yöntemidir. Çalışma, Tel Erozyon hassas işleme tekniği kullanılarak, yapıldığı haliyle parçanın işlenebilirliğini değerlendirmektedir. Çoklu tepki optimizasyonu, dört etki eden faktörü dikkate alarak maksimum malzeme çıkarma oranına ve en düşük yüzey pürüzlülüğüne ulaşmayı amaçlamaktadır: darbe Açık süresi, darbe Kapalı süresi, servo voltajı ve tel besleme hızı. Çalışmanın sonuçları, başlangıç Tel Erozyon parametre ayarlarına kıyasla çoklu tepki özelliklerinde %38,57'lik bir iyileştirme göstermektedir. Bu standartlaştırılmış yaklaşım, hızlı ve hassas yüzey pürüzlülüğü tahmini ve optimizasyonu için

bir potansiyel sunarak, SLE AlSi10Mg'nin Tel Erozyon İşleme sırasında daha iyi malzeme çıkarılmasıyla sonuçlanmaktadır.

Balla ve ark. (2024), yılında yayınladıkları bir bilimsel makalede LPBF ile üretilen AlSi12 üzerinde kumlama, kimyasal anodizasyon, WEDM ve mikrofrezeyi karşılaştırmış; DMP Flex 100 makinede lazer gücü 90 W, tabaka kalınlığı 30 μm , tarama hızı 600 mm/s ve hatch aralığı 0,06 mm ile 10 \times 10 \times 10 mm numuneler üretmiştir. WEDM deneylerinde T_{on} 30 ve 60 μs , T_{off} 3 μs , tepe akımı 3 ve 6 mA; mikrofrezede devir 14 000 rpm, ilerleme 20 mm/dak ve kesme derinliği 100 μm kullanılmıştır. As-built yüzeyde Sa 22,74 μm iken kumlama ile 9,05 μm , anodizasyon ile 11,25 μm , WEDM ile 3,98 μm ve mikrofrezede 0,256 μm elde edilmiş; buna karşılık yaklaşık iyileşmeler sırasıyla %60, %50, %82,5 ve %98,8 olarak raporlanmıştır. Mikrofrezede mikrosertlik 78,64 HV'den 113,2 HV'ye yükselirken WEDM ve elektropolajda azalma gözlenmiş; genel değerlendirmede mikrofrezeyi, ardından WEDM'i en etkili bitirme işlemleri olarak önermişlerdir.

Doreswamy ve ark. (2024), yaptıkları bir çalışmada WAAM ile üretilmiş Al-Mg 5356 alaşımının WEDM işlenebilirliğini Taguchi L27 düzeninde incelemiş; gerilim 75–90 V, akım 2–6 A, T_{on} 20–50 μs , T_{off} 10–30 μs ve tel hızı 11–5,5 m/s aralıklarını sınamıştır. En yüksek malzeme kaldırma hızı 90 V, 6 A, 35 μs T_{on} , 10 μs T_{off} ve 5,5 m/s tel hızıyla 0,125 g/dakika olarak elde edilmiştir; en düşük kerf genişliği 75 V, 6 A, 20 μs T_{on} , 20 μs T_{off} ve 11 m/s'de 0,115 mm; en düşük yüzey pürüzlülüğü 75 V, 2 A, 20 μs T_{on} , 10 μs T_{off} ve 8,8 m/s'de 4,20 μm olarak raporlanmıştır. Ortalama etki ve ANOVA analizleri T_{off} 'un MRR üzerinde yüzde 66,8'e varan düşüşle en baskın faktör olduğunu, akımın 2'den 6 A'ye artmasıyla MRR'nin yaklaşık yüzde 99,5 yükseldiğini, Ra üzerinde T_{on} 'un yüzde 39,1 artışla belirleyici, tel hızının düşmesinin ise Ra'yı yaklaşık yüzde 19,1 azalttığını göstermiş; gerilimin tüm tepkilerde istatistiksel etkisi zayıf bulunmuştur. EDS sonuçları, krater bölgelerinde Al 33,12 ve Mg 3,67 ağırlık yüzdesiyle birlikte O, C ve N zenginleşmesini; mikro-boşlukta ise Al 94,55 ve Mg 5,45 ile taban bileşimine yakın bir dağılımı ortaya koymuştur.

Murali Krishnan ve ark. (2025), yılında yayınladığı bir makalede SLM yöntemiyle ürettikleri AlSi10Mg parçalarının tel erozyon (Wire-EDM) işlemi için çoklu yanıt (multi-response) optimizasyonunu Taguchi–Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis - GRA) ile gerçekleştirmiştir. Deneysel tasarımda dört parametre (pulse on-time, pulse off-time, servo voltajı ve tel besleme hızı) dört seviyede değerlendirilmiş ve L₁₆ Ortogonal Dizilim kullanılmıştır. GRA'ya göre en iyi parametre kombinasyonu A3 B1 C4 D4 (pulse on-time = 118 μs , pulse off-time = 44 μs , servo voltaj = 60 V, tel hız = 7 m/s) olarak tespit edilmiş ve doğrulama deneyinde başlangıç koşullarına kıyasla çoklu yanıt niteliği %38,57 oranında

iyileşmiştir. Bu iyileşme, MRR'nin 0,05354 g/min'den 0,32140 g/min'e çıkması ile gerçekleşmiş; yüzey pürüzlülüğü ise sadece 1,429 μm 'den 1,433 μm 'ye hafif bir artış göstermiştir.

Behera ve ark. (2025), Nimonic alaşımının EDM ile işlenebilirliğini sade dielektrik ve nano-GO (5 g/L) katkılı dielektrik altında, bakır ve pirinç elektrotlarla karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bulgular, nano-GO kullanımı ve bakır elektrot kombinasyonunda performansın belirgin biçimde arttığını; 70 V gerilim, 200 μs T_{on} ve 0,5 kgf/mm² baskı kuvveti koşullarında malzeme kaldırma hızının 16,231 mm³/dakikaya ulaştığını, takım aşınma hızının 0,0062 mm³/dakikaya düştüğünü ve yüzey pürüzlülüğünün 5,1423 μm düzeyine indiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, sürdürülebilir EDM uygulamalarında nano-GO katkılı dielektriğin, özellikle bakır elektrotla birlikte, işleme kalitesi ve verimliliği artırdığını ortaya koymaktadır.

Dolayısıyla bu tez çalışmasında, SLE ile AlSi10Mg'nin Tel-EDM üzerine farklı çalışmalar yapıldığını gözlemledik. Ancak, yazarların bilgisine göre, ısıtma işlemi uygulanan SLE ile elde edilen AlSi10Mg parçalarının Tel-EDM üzerine sistematik bir çalışma girişimleri yoktu. Bu nedenle, Isıtma işlemi ile Tel-EDM giriş parametrelerinin AlSi10Mg alaşımları üzerinde bileşik etkilerinin optimize araştırması yürütülmüştür.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal ve SLE ile Üretim

Bu çalışmada kullanılan AlSi10Mg tozları, ASTM F3318-18'e uygun olarak ERMAKSAN'dan temin edilmiş ve gaz atomizasyonu ile üretilmiştir. Yüksek küresellik (düşük uydu oranı), düzgün yüzey ve 14–40 µm dar dağılımı sayesinde iyi akışkanlık ve homojen serim sağlar; bu da paketlenme yoğunluğunu artırıp gözenek/katman ayrımı riskini azaltır. Tablo 3.1'de AlSi10Mg malzemenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. AlSi10Mg malzemenin özellikleri

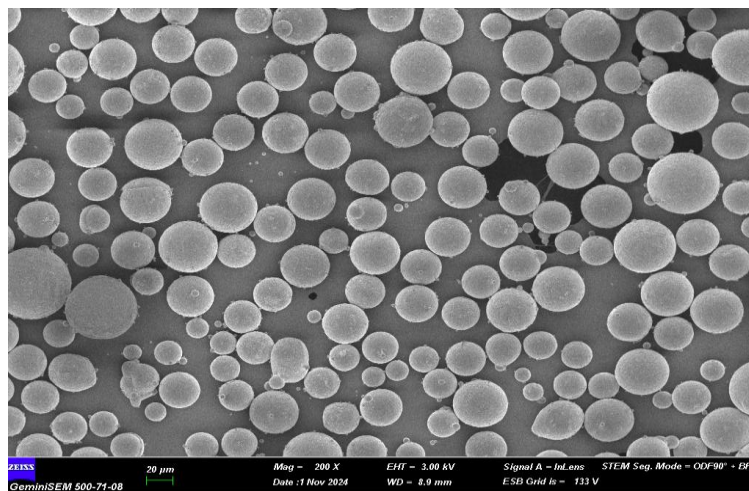
Malzeme	Ortalama parçacık boyutu	Erime noktası	Yoğunluk
AlSi10Mg	15–40 µm	577°C	2.68 g/cm ³

Kimyasal bileşim Al (kalan), Si %9–11, Fe %0.55, Mg %0.20–0.45, Mn %0.45, Ni %0.05, Cu %0.05 düzeyindedir. Tablo 3.2'de AlSi10Mg tozlarının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3.2. AlSi10Mg tozlarının kimyasal bileşimi

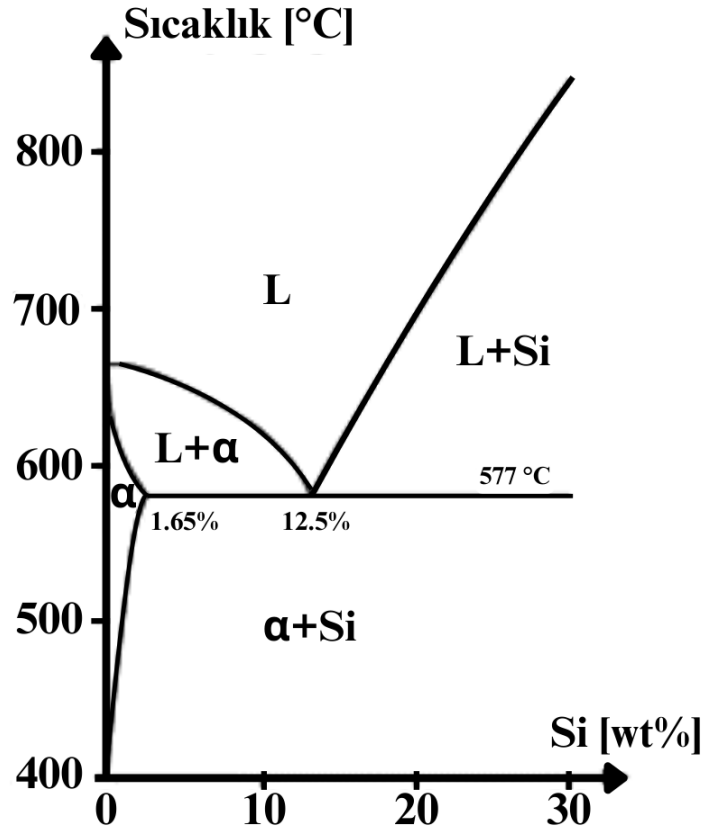
Bileşim	Al	Si	Fe	Mg	Mn	Ni	Cu
Wt%	Kalan	9–11	0.55	0.2–0.45	0.45	0.05	0.05

Bu bileşim ve toz morfolojisi, SLE sürecinde ergitme havuzunun kararlılığına, enerji soğurumu ve katılma davranışına olumlu katkı verir; düşük oksijen içeriği ise oksit film oluşumunu sınırlayarak yüzey kalitesi ve tekrarlanabilirlik açısından avantaj sağlar. Küresel morfoloji ve yüzey düzgünlüğü Şekil 3.1'de çalışmada kullanılan AlSi10Mg tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg tozlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

Al-Si ikili faz diyagramında AlSi10Mg alaşımı yaklaşık %10 Si içeriği ile ötektik bileşimin (%12,5 Si, 577 °C) hemen altında yer almakta ve bu nedenle hipoötektik sınıfta değerlendirilmektedir. Bu konum, yüksek sıcaklıklarda sıvı fazdan önce α -Al fazının katılaşmaya başlamasına, ardından ötektik reaksiyonla α -Al matrisi içerisinde Si parçacıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Böylece, AlSi10Mg alaşımı üretim sonrası α -Al matrisi ve ince dağılmış Si parçacıklarından oluşan karakteristik bir mikroyapıya sahiptir. Faz diyagramındaki bu özel konum, alaşımın iyi akışkanlık, düşük sıcaklıkta katılaşma aralığı ve yüksek döküm kabiliyeti sergilemesini sağlamakta, aynı zamanda mekanik özellikler açısından da yüksek dayanım ve yeterli süneklik dengesini mümkün kılmaktadır Şekil 3.2’de Alüminyum-silisyum faz diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.2. Alüminyum-silisyum faz diyagramı (Brandl ve ark., 2012)

SLM işlemine başlamadan önce tozlara ön arıtma uygulanmıştır. Öncelikle yüzeydeki safsızlıkları gidermek amacıyla distile su içerisinde ultrasonik karıştırma ile temizlenmiş, ardından 80 °C’de 24 saat boyunca vakum altında kurutulmuştur. Bu işlem, nem ve oksijenin uzaklaştırılmasıyla birlikte SLM sırasında oluşabilecek gözeneklilik ve oksidasyon gibi

kusurların önlenmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Böylece lazer işleme süreci için uygun başlangıç koşulları sağlanmıştır.

Numuneler, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi İleri Alaşımlar Üretim Merkezi'nde bulunan ENAVISION 250 SLM cihazı (ERMAKSAN, Türkiye) ile üretilmiştir Şekil 3.3(b). Üretimler argon gazı atmosferi altında gerçekleştirilmiş olup işlem parametreleri sabit tutulmuştur. Kullanılan parametreler;

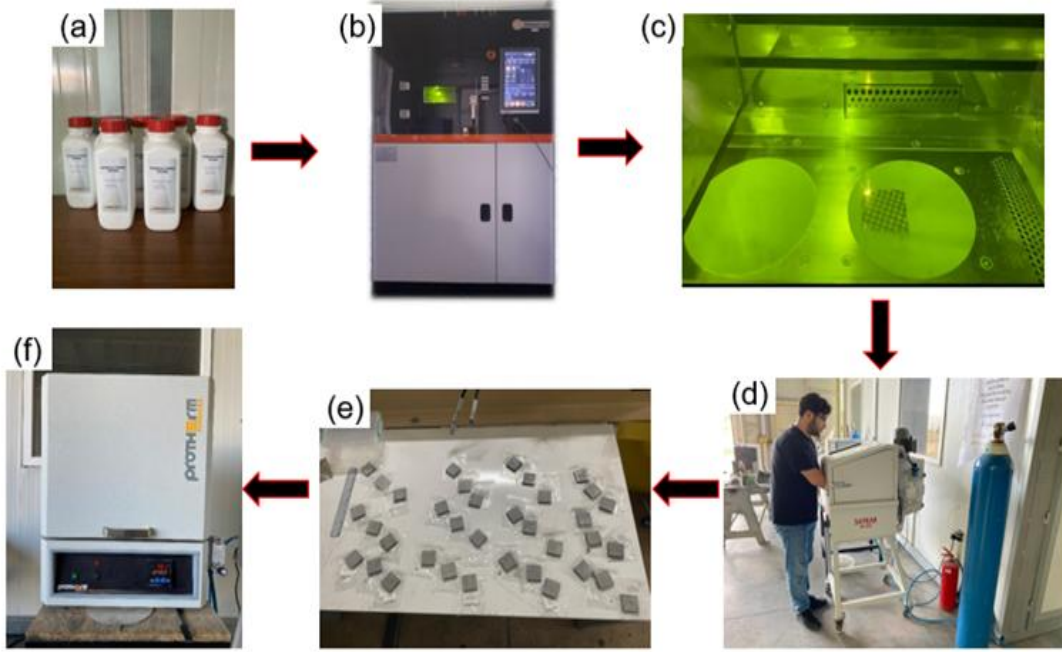
- Lazer gücü: 320-350 W,
- Tarama aralığı (hatch distance): 100-150 μm ,
- Tarama hızı: 800-120 mm/sn,
- Katman kalınlığı: 30-40 μm ,
- Lazer nokta çapı: 85 μm ,
- Odaklanma mesafesi: 4 mm,
- Tarama stratejisi: Alternatif,
- Tarama deseni: Altıgen Şekindedir.

Kullanılan SLM cihazı 400 W fiber lazer gücüne sahip olup maksimum tarama hızı ve 15–50 μm aralığında katman kalınlığına ulaşabilmektedir. Numune üretim sürecine ilişkin aşamalar; üretim anına ait görüntü, kuşlama işlemi ve elde edilen numuneler Şekil 3.3(c-e)'de görsel olarak sunulmuştur.

3.2. Isıl İşlem Prosedürü

SLE ile üretilen AlSi10Mg parçalarına argon atmosferi altında bir fırında (Protherm Furnaces-PLF 130/3; Alser Technic Ceramic Inc) ısıl işleme tabi tutulmuştur. Standart T6 ısıl işlem süreci uygulanacak olup üretilen numuneler çözündürme işleminden sonra yapay yaşlandırma yapılmıştır (Li ve ark., 2016). SLE ile üretilen AlSi10Mg alaşımının yaşlandırılabilir bir alaşım olarak kabul edilmesinden dolayı T6 ısıl işlemlerinin etkisine odaklanılmıştır. Bu aşamada, SLE ile üretilen numunelere 450 °C ve 550 °C'lik farklı sıcaklıklarda 2 saat boyunca çözeltiye tabi tutuldu ve ardından su ile söndürüldü. Çözeltiye dayalı ısıl işleminden sonra, numuneler hemen 180 °C'de 12 saat boyunca yapay yaşlandırmaya tabi tutuldu ve ardından oda sıcaklığında su ile söndürüldü. Bu duruma göre, çalışma için numune grupları aşağıda listelenmiştir. Bu sıcaklıklar, AlSi10Mg'nin ≈ 577 °C ötektik/ergime sınırının altında kalarak Si'nin matristen ayrışması ve Mg₂Si çökmesinin kademeli izlenmesine, dolayısıyla ısıl işlemin WEDM işlenebilirliği (MRR artışı, SR azalması) üzerindeki etkisinin güvenle değerlendirilmesine imkân verdiği için tercih edilmiştir. Şekil 3.3'te SLE-AlSi10Mg üretim çalışması ve ısıl işlem fırını verilmiştir.

- İşlemsiz AlSi10Mg
- 450T AlSi10Mg
- 550T AlSi10Mg



Şekil 3.3. SLE-AlSi10Mg üretim çalışması ve ısıl işlem fırını

Eklemeli imalat yöntemleri, geleneksel üretim süreçlerine kıyasla birçok avantaja sahip olsa da, işlenebilirlik, mekanik özellikler ve yüzey kalitesi gibi faktörler açısından sınırlamalar da barındırabilmektedir. Bu nedenle, eklemeli imalat ile üretilen parçaların çoğu ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemler, bu parçaların özelliklerini iyileştirmek ve belirli hedeflere ulaşmak için kritik bir adım olmuştur.

3.3. Tel-EDM İşlemi

Bu çalışmada, ısıl işleme tabi tutulmuş ve SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının Tel-EDM işlemi, Ultracut-F1 marka takım tezgâhı cihazı ile gerçekleştirilmiştir. SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numuneler üzerinde farklı Tel-EDM parametrelerinin işleme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel olarak kullanılan Tel-EDM parametreleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Bu parametreler arasında darbe süresi, tel hızı ve diğer etkenler yer almış, her bir parametrenin tel kesim akımı, işleme süresi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Cihazın iş tablası boyutu 440×650 mm, ana eksen hareketi (X, Y) 300×400 mm ve yardımcı eksen hareketi (u, v) 80×80 mm olarak belirlenmiştir. İşlenebilecek maksimum iş parçası yüksekliği 250 mm, işlenebilecek maksimum iş parçası ağırlığı ise 300 kg’dır.

Maksimum koniklik açısı $\pm 30^\circ/50$ mm olarak ayarlanabilmekte, cihazın çözünürlüğü 0.0005 mm'dir. Ayrıca, maksimum JOG hızı 900 mm/dakikadır. Tel makarasının kapasitesi 6 kg olup, DIN 160/P5 standardına uygundur. Cihazda dielektrik sıvı olarak deiyonize su kullanılmaktadır. Tel elektrot ise 0.25 mm çapında pirinç teldir. Şekil 3.4'te Tel-EDM cihazı ve işleme anı verilmiştir.



Şekil 3.4. Tel-EDM cihazı ve işleme anı

DeneySEL çalışmalarında 0.25 mm çapında pirinç tel kullanılmış, bu telin işleme sırasında gösterdiği performans değerlendirilerek işleme verimliliği ve kalite kriterleri karşılaştırılmıştır. DeneySEL prosedürlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla, her bir parametre için yapılan testler üç kez tekrarlanmış ve elde edilen verilerin ortalamaları alınarak sonuçların tutarlılığı değerlendirilmiştir. Böylece, tel erozyon işlemi sırasında farklı parametrelerin etkisi daha doğru bir şekilde gözlemlenmiştir.

3.3.1. Malzeme kaldırma hızı (MRR)

MRR, bir işleme sürecinde iş parçasından belirli bir süre içerisinde kaldırılan malzeme miktarını ifade eder. Bu değer, üretim kalitesi, üretim hızı ve imalat verimliliği ile doğrudan ilişkili olduğu için en önemli yanıt değişkenlerinden biridir. Bu çalışmada MRR, ağırlık kaybı yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. DeneySEL işlem başlamadan önce ve işlem tamamlandıktan sonra numunenin ağırlığı, 0.001 g hassasiyete sahip dijital terazi ile ölçülmüştür. Böylece, işleme öncesi ağırlık (W_i) ve işleme sonrası ağırlık (W_f) değerleri elde edilmiştir (Vaidyaa ve ark., 2021).

MRR, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$MRRR = \frac{W_i \times W_f}{t} \text{ (g/min)} \quad (3.1)$$

Burada:

- W_i = Numunenin başlangıç ağırlığı
- W_f = Numunenin işleme sonrası ağırlığı
- t = İşleme süresi (dakika).

3.4. RSM ile Optimizasyon

Yanıt yüzey yöntemi (YYY), deneysel verilerden yararlanarak sistemlerin modellenmesi, analiz edilmesi ve optimizasyonu amacıyla geliştirilen kapsamlı bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntem, birçok matematiksel ve istatistiksel teoriyi bir araya getirir ve genellikle deney tasarımı (DOE – Design of Experiments), modelleme, model uygunluk testi ve varyans analizi (ANOVA) gibi adımları içerir. YYY analizinde temel amaç, bağımsız değişkenler (örneğin darbe süresi, darbe aralığı, tel hızı gibi işlem parametreleri) ile yanıt değişkeni (örneğin MRR veya SR) arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eden bir denklem oluşturmaktır. Bu ilişki, belirli sayıda yapılan deneylerden elde edilen verilere dayanarak oluşturulur. Deney tasarımı (DOE), bu sürecin doğruluğunu doğrudan etkiler; çünkü faktörlerin uygun kombinasyonlarla denenmesi, modelin güvenilirliğini artırır. ANOVA analizi, oluşturulan modelin doğruluğunu ve istatistiksel anlamlılığını test etmek için kullanılır. Böylece modelin, gerçek deney sonuçlarını ne derece doğru tahmin ettiğini gösteren R^2 ve p-değeri gibi istatistiksel göstergeler elde edilir (Meena ve ark. 2024 ; Chen ve ark. 2025).

Bu çalışmada, seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi ile üretilen numunelerin yoğunlukları üzerine işlem parametrelerinin etkilerini incelemek amacıyla Box-Behnken yöntemine dayalı 3 faktörlü ve 3 seviyeli bir deneysel tasarım uygulanmıştır (Veljković ve ark., 2019). Deneysel tasarımda üç temel parametre ele alınmıştır: darbe vuru süresi (T_{on}), darbe kapatma süresi (T_{off}) ve tel besleme hızı (WF). Deneylerden elde edilen veriler özel yazılımlar aracılığıyla analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan parametre faktörleri ve seviyeleri Tablo 3.3'te sunulmuştur. Seçilen parametre aralıkları, literatürde AlSi10Mg alaşımının SLM üretimine yönelik rapor edilen değerlerle uyumlu olacak şekilde belirlenmiş ve ayrıca laboratuvarında gerçekleştirilen ön denemeler ile optimize edilmiştir. Toplamda 15 deney noktası, Box-Behnken tasarım ilkeleri doğrultusunda oluşturulmuş ve yanıt değişkeni olarak malzeme yoğunluğu esas alınmıştır.

Box-Behnken yöntemi, diğer deneysel tasarım yöntemlerine kıyasla daha az sayıda deneyle güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanınması, parametreler arasındaki etkileşimlerin daha etkin bir şekilde analiz edilmesini sağlaması ve üç değerlerde deney yapılmasını gerektirmemesi nedeniyle tercih edilmiştir.

Tablo 3.3. Tel-EDM parametreleri

Seviye	Darbe Vurum Süresi (T _{on})	Darbe Kapatma Süresi (T _{off})	Tel Besleme Hızı (WF)
-1	110	55	4
0	115	58	5
1	125	61	6

Bu faktörlerin farklı seviyelerdeki kombinasyonları, Box–Behnken deney tasarımı (BBD) kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarım, işlem parametrelerinin hem tekil hem de etkileşimli etkilerini istatistiksel olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Deneyler, önce işlemsiz numuneler üzerinde, ardından 450 °C-2s (T450) ve 550 °C-2s (T550) ısıtılmış numuneler üzerinde yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, ısıtılmış işlemin WEDM parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. MRR ve SR değerlerine ilişkin deneysel veriler sırasıyla Tablo 3.4. ve Tablo 3.5.’te sunulmuştur. Tüm deneyler üç kez tekrarlanmış olup, tabloya yalnızca ortalama değerler dahil edilmiştir.

Tablo 3.4. SLE ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının Tel-EDM proses parametre tasarımı ve MRR tepki değerleri

Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	Darbe Süresi (µs)	Darbe Aralığı (µs)	Tel İlerleme Hızı (m/s)	İşlemsiz MRR ($\frac{mm^3}{dak}$)	450T MRR ($\frac{mm^3}{dak}$)	550T MRR ($\frac{mm^3}{dak}$)
1	110	55	5	0,18	0,194	0,207
2	125	55	5	0,36	0,389	0,414
3	110	61	5	0,1	0,108	0,115
4	125	61	5	0,28	0,302	0,322
5	110	58	4	0,11	0,119	0,127
6	125	58	4	0,29	0,313	0,333
7	110	58	6	0,17	0,184	0,196
8	125	58	6	0,35	0,378	0,402

Tablo 3.4. (Devamı) SLE ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının Tel-EDM proses parametre tasarımı ve MRR tepki değerleri

Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	Darbe Süresi (μ s)	Darbe Aralığı (μ s)	Tel İlerleme Hızı (m/s)	İşlemsiz MRR ($\frac{mm^3}{dak}$)	450T MRR ($\frac{mm^3}{dak}$)	550T MRR ($\frac{mm^3}{dak}$)
9	115	55	4	0,21	0,227	0,241
10	115	61	4	0,13	0,14	0,149
11	115	55	6	0,24	0,159	0,276
12	115	61	6	0,16	0,173	0,184
13	115	58	5	0,27	0,292	0,31
14	115	58	5	0,19	0,205	0,218
15	115	58	5	0,2	0,216	0,23

Tablo 3.5. SLE ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının Tel-EDM proses parametre tasarımı ve SR tepki değerleri

Run	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
	Darbe Süresi (μ s)	Darbe Aralığı (μ s)	Tel İlerleme Hızı (m/s)	İşlemsiz SR (μ m)	T450 SR (μ m)	T550 SR (μ m)
1	110	55	5	2,4	2,208	2,04
2	125	55	5	3,3	3,036	2,805
3	110	61	5	2	1,84	1,7
4	125	61	5	2,9	2,668	2,465
5	110	58	4	2,1	1,932	1,785
6	125	58	4	3	2,76	2,55
7	110	58	6	2,3	2,116	1,955
8	125	58	6	3,2	2,944	2,72
9	115	55	4	2,6	2,392	2,21
10	115	61	4	2,2	2,024	1,87
11	115	55	6	2,7	2,484	2,295
12	115	61	6	2,3	2,116	1,855
13	115	58	5	2,8	2,576	2,38
14	115	58	5	2,4	2,208	2,04
15	115	58	5	2,5	2,3	2,215

3.5. Metalografik Çalışmalar

İşlemsiz ve ısıtılmış SLE- AlSi10Mg numunelerinin mikroyapıları, 15 kV voltaj ve 8 mm inceleme mesafesi koşullarında, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Mikro yapı karakterizasyonu öncesinde numuneler standart metalografik hazırlık adımlarına tabi tutulmuştur. Bu kapsamda numuneler önce zımparalanmış, ardından parlatma makinesi ile parlatılmıştır. Numunelerin genel yapısını ortaya çıkarmak için metal optik mikroskop altında incelenmiş ve burada hacimce farklı yüzdelerde hazırlanan HNO_3 , HF, HCl ve H_2O karışımları ile dağlama işlemi uygulanmıştır.

Numunelerin faz analizi için X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri, 40 kV ve 30 mA'da çalışan Cu tüplü bir difraktometre ile gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde kırınım açısı (2θ), 25° ile 95° arasında değiştirilerek spektrum elde edilmiş ve mevcut fazlar tanımlanmıştır. Tüm bu analizler, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) bünyesinde bulunan cihazlar Şekil 3.5'te Taramalı Elektron Cihazı ve Şekil 3.6'da XRD Cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Taramalı Elektron Cihazı (SEM)



Şekil 3.6. XRD Cihazı

3.6. Yüzey Pürüzlülük Analizleri

Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş bir yüzeyin ideal düzlemden ne kadar sapma gösterdiğini ifade eder. Pürüzlü yüzeyler fazla sapma üretirken, düzgün yüzeylerde bu sapma minimum düzeydedir. Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş bir numunenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu için kritik bir parametre olarak değerlendirilmiştir. WEDM sonrası oluşan yeniden katılaşmış yüzeyin pürüzlülük değerlerini (Ra), Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki MarSurf yüzey pürüzlülük test cihazı (Model PS 10) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümlerde 10 μm çapında ve 0,01 μm hassasiyetinde elmas uç kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü (Ra), ISO 1997 standardına uygun olarak, takım yoluna dik yönde ölçülmüştür (örnek uzunluğu: 4 mm). Her numune için yapılan üç ölçümün ortalaması alınarak, ilgili numunenin yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri belirlenmiştir. Şekil 3.7'de Yüzey Pürüzlülük Cihazı verilmiştir.



Şekil 3.7. Yüzey Pürüzlülük Cihazı

3.7. Mikrosertlik Ölçümleri

WEDM sonrası işlenmiş numunelerin yeniden katılaşmış yüzeylerinde mikrosertlik ölçümleri, ASTM E384 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için, standart elmas uçlu (dikdörtgen tabanlı piramit geometrisine sahip) Vickers sertlik cihazı (Model EMCO test) kullanılmıştır. Testlerde 5 kgf yük, 10 saniye süreyle uygulanmıştır. Her numune için üç farklı ölçüm yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması, ilgili numunenin tipik sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.8’de Vickers Sertlik Test Cihazı verilmiştir.



Şekil 3.8. Vickers Sertlik Test Cihazı

3.8. Modelleme

Bu çalışmada Tel-Elektrik Erozyon (Tel-EDM) sürecinin işlenebilirlik çıktıları olan malzeme kaldırma hızı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) ile temel işlem parametreleri arasındaki ilişki, Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kapsamında modellenmiştir. Bu kapsamda MRR/SR üzerinde etkili görülen darbe açık süresi (T_{on}), darbe kapalı süresi (T_{off}) ve tel besleme hızı (WF) faktörleri modele dâhil edilmiştir. Deneysel verilerin dengeli ve verimli biçimde toplanabilmesi için üç seviyeli Box–Behnken (BBD) tasarımı kullanılmıştır. Çalışmada T_{on} (110–125 μ s), T_{off} (55–61 μ s) ve WF (4–6 m/s) aralıkları esas alınarak seviye kombinasyonları oluşturulmuştur. Deneyler işlemsiz, 450 °C–2 s ve 550 °C–2 s ısıtılmış AlSi10Mg numuneler üzerinde yürütülmüş; böylece mikroyapısal durumun model davranışına yansımaları da değerlendirilebilmiştir. Yanıt değişkenlerinden MRR, ağırlık kaybı yöntemine göre

hesaplanmıştır. Numunelerin işlem öncesi (W_i) ve sonrası (W_f) kütleleri yüksek hassasiyetli terazi ile ölçülmüş; işlem süresi (t) dikkate alınarak birim zamanda kaldırılan hacim değerleri türetilmiştir. SR ölçümleri ise ilgili standartlara uygun şekilde alınmış ve pürüzlülük parametreleri istatistiksel tutarlılık yönünden kontrol edilmiştir. Modelleme ve analizler tasarım/deney istatistiği yazılımları kullanılarak yürütülmüştür. Aday model türleri olarak doğrusal, iki faktörlü etkileşim (2FI), kuadratik ve kübik yapılar değerlendirilmiş; seçimde sıralı p-değeri, uygunsuzluk (lack-of-fit) p-değeri, düzeltilmiş R^2 ve tahmin edilen R^2 gibi ölçütlerden yararlanılmıştır. Kurulan modeller artık (residual) analizleri ve ANOVA ile doğrulandıktan sonra tepki yüzeyi ve izoyanıt grafikleri üzerinden parametre-yanıt etkileşimleri incelenmiştir. Böylece $T_{on}-T_{off}-WF$ üçlüsünün MRR ve SR üzerindeki eşzamanlı etkileri görselleştirilmiş; ısı işlemin süreci yöneten enerji parametrelerinin görece önem sırasını değiştirmede, ancak malzemenin bu enerjiye tepkisini düzenleyerek katsayıların büyüklüklerine ve yanıt yüzeylerinin eğimine yansıyan işlenebilirlik iyileşmelerine zemin hazırladığı gösterilmiştir. Sonuç olarak, bu bölümde benimsenen YYY tabanlı modelleme kurgusu; deneysel veriyi istatistiksel olarak tutarlı denklemlere dönüştürerek, sonraki bölümde sunulan parametre etkileri, model yeterliği ve optimum ayarların belirlenmesi için gerekli metodolojik altyapıyı sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. RSM ile MRR tahmini

Modelin oluşturulması sonrasında, farklı model türleri (doğrusal, iki faktörlü etkileşim, ikinci derece ve kübik) karşılaştırılmış ve modelin uygunluğu istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Tablo 4.1’de verilen sıralı p-değerleri, uygunsuzluk p-değerleri, düzeltilmiş R² ve tahmin edilen R² değerleri dikkate alınarak en uygun model belirlenmiştir. Tablodaki sonuçlara göre, doğrusal modelin p-değeri 0.0001’in altında olup anlamlı kabul edilmiştir. Ayrıca düzeltilmiş R² değeri 0,9330, tahmin edilen R² değeri ise 0,9322 olarak bulunmuştur. Bu değerler, modelin yüksek bir uyum düzeyine sahip olduğunu ve deneysel verileri istatistiksel olarak doğru şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Kuadratik ve kübik modellerde R² değerleri daha düşük, özellikle kübik modelde negatif tahmin edilen R² değeri gözlemlendiği için doğrusal modelin uygunluğu daha yüksek bulunmuştur. Tablo 4.1’de Model detayları verilmektedir.

Tablo 4.1. Model detayları

Kaynak	Sıralı p-değeri	Uygunsuzluk p-değeri	Düzeltilmiş R ²	Tahmin edilen R ²	
Doğrusal	<0,0001	<0,0001	0,9330	0,9322	Önerilen
2FI	0,1052	<0,0001	0,9081	0,9096	
Kuadratik	0,2472	<0,0001	0,8828	0,8771	
Kübik	0,1157	<0,0001	0,7222	-1,7659	Örtüşen/Çakışan

Bu doğrultuda oluşturulan doğrusal modeller aşağıda verilmiştir:

$$\text{İşlemsiz MRR} = 0,23 + A * 0,09 - B * 0,04 + C * 0,0225 \left(\frac{mm^3}{dak} \right) \quad (4.1)$$

$$450T \text{ MRR} = 0,2484 + A * 0,0971 - B * 0,0433 + C * 0,0244 \left(\frac{mm^3}{dak} \right) \quad (4.2)$$

$$550T \text{ MRR} = 0,2572 + A * 0,0965 - B * 0,0411 + C * 0,0280 \left(\frac{mm^3}{dak} \right) \quad (4.3)$$

Burada A darbe açık süresi (µs), B darbe kapalı süresi (µs) ve C tel ilerleme hızını (m/s) ifade etmektedir.

Elde edilen modellerin katsayıları incelendiğinde, darbe açık süresinin katsayısı pozitif, darbe kapalı süresinin katsayısı ise negatiftir. Bu durum, darbe açık süresi arttıkça malzeme kaldırma oranının yükseldiğini, darbe kapalı süresi arttıkça ise azaldığını göstermektedir. Darbe açık süresi uzadığında iş parçasına aktarılan enerji artmakta, buna bağlı olarak daha fazla malzeme erozyon yoluyla uzaklaşmaktadır. Buna karşılık, darbe kapalı süresinin artması,

boşalma aralıklarının uzamasına neden olarak enerji yoğunluğunu azaltmakta ve MRR değerinde düşüşe yol açmaktadır. Tel ilerleme hızının katsayısının pozitif olması, tel hızındaki artışın erozyon kararlılığını iyileştirerek malzeme kaldırma oranını artırdığını göstermektedir.

Isıl işlem koşullarına göre elde edilen modeller karşılaştırıldığında, sıcaklığın artmasıyla birlikte MRR değerlerinin düzenli olarak yükseldiği görülmektedir. Isıl işlem, malzemenin mikro yapısında yumuşama ve gevşeme oluşturarak işlenebilirliği artırmakta ve bu da erozyon verimini yükseltmektedir. Özellikle 550 °C’de ısıl işlem gören numunelerde en yüksek malzeme kaldırma oranı elde edilmiştir.

Denklemlerin katsayılarına göre darbe açık süresi, malzeme kaldırma oranı üzerinde etkili faktör olarak belirlenmiştir. Tel ilerleme hızı ikinci derecede etkili olurken, darbe kapalı süresi en düşük etkiye sahiptir. Parametrelerin etki sırası genel olarak şu şekilde belirlenmiştir: A (darbe açık süresi) > C (tel ilerleme hızı) > B (darbe kapalı süresi). Elde edilen doğrusal modeller, yüksek R² değerleri ve düşük p-değerleri sayesinde güvenilir bulunmuştur. Bu sonuçlar, tel erozyon işleminde uygun parametre seçiminin, özellikle darbe süresi ve tel hızının doğru ayarlanmasının, işlenebilirlik ve üretim verimliliği açısından belirleyici olduğunu göstermektedir.

İşlemsiz, 450 °C ve 550 °C ısıl işlem uygulanmış AlSi10Mg numuneleri için malzeme kaldırma oranının (MRR) varyans analizi sonuçları Tablo 4.2’te verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tüm modellerin p-değerleri 0,0001’in altında olup, %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, oluşturulan modellerin deneysel verilerle güçlü bir uyum gösterdiğini ve güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. İşlemsiz numunelerde modelin genel anlamlılığı <0,0001 olup, darbe açık süresi (A) faktörünün F-değeri 118,07 ile en yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Darbe aralığı (B) 22,17, tel ilerleme hızı (C) ise 7,02 F-değeriyle daha düşük düzeyde etkili olmuştur. 450 °C’de gerçekleştirilen deneylerde benzer eğilim korunmuş, darbe açık süresi yine en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Ancak ısıl işlemle birlikte modelin F-değeri 48,56’ya yükselmiş ve modelin genel anlamlılığı artmıştır. 550 °C’de ise F-değeri 36,83 olarak elde edilmiş olup, model istatistiksel olarak anlamlı kalmıştır. Denklemlerin katsayıları incelendiğinde, darbe açık süresinin katsayısının pozitif, darbe kapalı süresinin katsayısının negatif olduğu görülmektedir. Bu durum, darbe açık süresinin artmasıyla malzeme kaldırma oranının yükseldiğini, darbe kapalı süresinin artmasıyla ise azaldığını göstermektedir. Tel ilerleme hızındaki artış da pozitif etkiye sahip olup, erozyonun sürekliliğini ve malzeme boşalım kararlılığını artırmaktadır.

Isıl işlemin MRR üzerindeki etkisi incelendiğinde, ısıl işlem görmüş numunelerde malzeme kaldırma oranlarının işlemsiz numunelere kıyasla arttığı belirlenmiştir. Bu artış, ısıl

işlemin AlSi10Mg malzemesinin mikroyapısında neden olduğu gerilim giderimi ve tane sınırı rahatlamasıyla ilişkilidir. Özellikle 450 °C’de uygulanan ısıl işlem sonrasında, yapıda meydana gelen gevşeme ve ergiyik bölgesinin genişlemesi sonucu erozyon veriminin arttığı gözlenmiştir. 550 °C’de ise malzeme kaldırma oranı artmaya devam etse de, yüksek sıcaklığın neden olduğu yeniden çökme (precipitation) ve tane büyümesi, mikroyapıda homojenliğin azalmasına yol açarak artışın sınırlı düzeyde kalmasına neden olmuştur. Ayrıca bu sıcaklıkta yüzeyde oksit tabakalarının oluşması, elektriksel boşalma verimliliğini kısmen düşürmüştür.

Bu bulgular, ısıl işlemin belirli bir sıcaklığa kadar malzeme işlenebilirliğini artırdığını, ancak yüksek sıcaklıklarda mikroyapısal değişimlerin etkinin doygunluğa ulaşmasına yol açtığını göstermektedir. Genel olarak darbe açık süresi (A) en etkili parametre olurken, tel ilerleme hızı (C) ikinci sırada, darbe kapalı süresi (B) ise en düşük etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, tel erozyon işleminde uygun parametre kombinasyonunun seçilmesinin işlenebilirlik ve üretim verimliliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Tablo 4.2’de İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile MRR analizi verilmektedir.

Tablo 4.2. İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile MRR analizi

Model	Kaynak	Kareler Toplamı	DF	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
İşlemsiz	Model	0,0850	3	0,0283	49,09	<0,0001	Anlamlı
	A–Darbe Süresi	0,0682	1	0,0682	118,07	<0,0001	
	B–Darbe Aralığı	0,0128	1	0,0128	22,17	0,0006	
	C–Tel İlerleme Hızı	0,0040	1	0,0040	7,02	0,0226	
	Artık	0,0064	11	0,0006			
	Uyumsuzluk	0,0026	9	0,0003	0,1491	0,9835	Anlamlı değil
	Hata	0,0038	2	0,0019			
Toplam	0,0914	14					
450T	Model	0,0991	3	0,030	48,56	<0,0001	Anlamlı
	A–Darbe Süresi	0,0794	1	0,0794	116,70	<0,0001	
	B–Darbe Aralığı	0,0150	1	0,0150	22,00	0,0007	
	C–Tel İlerleme Hızı	0,0048	1	0,0048	6,99	0,0229	
	Artık	0,0075	11	0,0007			

Tablo 4.2. (Devamı)İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile MRR analizi

Model	Kaynak	Kareler Toplamı	DF	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
	Uyumsuzluk	0,0030	9	0,0003	0,1482	0,9828	Anlamlı değil
	Hata	0,0045	2	0,0022			
	Toplam	0,1066	14				
550T	Model	0,0982	3	0,0327	36,83	<0,0001	Anlamlı
	A–Darbe Süresi	0,0784	1	0,0784	88,20	<0,0001	
	B–Darbe Aralığı	0,0135	1	0,0135	15,23	0,0025	
	C –Tel İlerleme Hızı	0,0063	1	0,0063	7,06	0,0223	
	Artık	0,0098	11	0,0009			
	Uyumsuzluk	0,0045	9	0,0005	0,1928	0,9682	Anlamlı değil
	Hata	0,0052	2	0,0026			
	Toplam	0,1080	14				

Şekil 4.1’de, işlemsiz, 450 °C ve 550 °C ısıtılma işlemi uygulanmış AlSi10Mg numunelerinde darbe açık süresi (T_{on}), darbe kapalı süresi (T_{off}) ve tel ilerleme hızının (WF) malzeme kaldırma oranı (MRR) üzerindeki etkisini gösteren üç boyutlu yüzey grafiklerine yer verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her üç durumda da MRR’nin darbe açık süresiyle doğru, darbe kapalı süresiyle ters orantılı bir değişim gösterdiği belirlenmiştir.

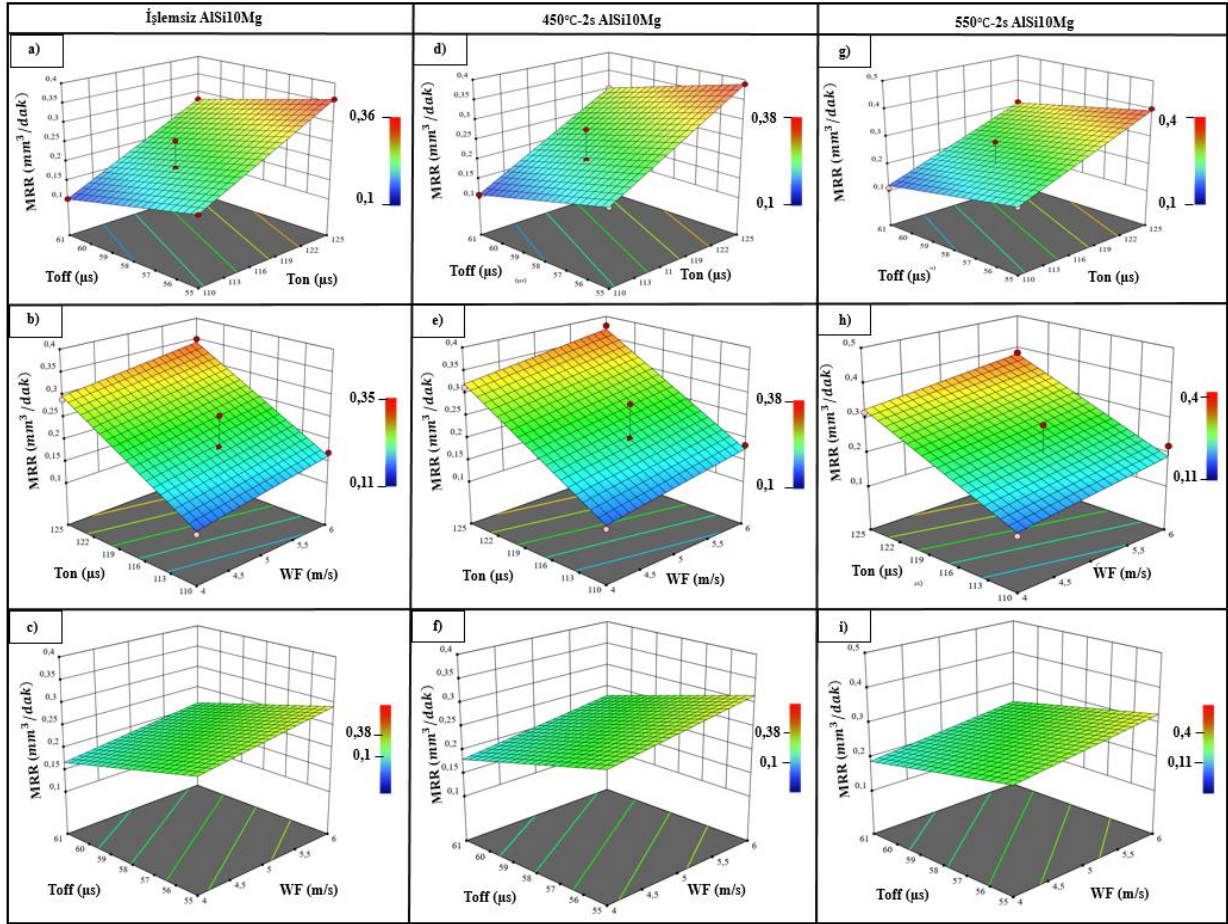
Şekil 4.1a, 4.1d ve 4.1g’de görüldüğü üzere darbe açık süresinin artışı, boşalım süresi boyunca aktarılan enerji miktarını artırarak yüzeyden daha fazla malzeme uzaklaştırılmasına neden olmuş ve buna bağlı olarak MRR değerleri yükselmiştir. Buna karşılık, darbe kapalı süresinin uzaması boşalım aralıklarının artmasına yol açmış, bu da enerji yoğunluğunu azaltarak MRR’de düşüşe neden olmuştur. Bu etki özellikle işlemsiz numunelerde daha belirgin şekilde gözlemlenmiştir.

Şekil 4.1b, 4.1e ve 4.1h incelendiğinde, tel ilerleme hızındaki artışın MRR üzerinde pozitif bir etki yarattığı görülmektedir. Tel hızının artması, tel yüzeyinin daha sık yenilenmesini sağlayarak kararlı boşalım koşullarının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ancak 550 °C’de ısıtılma işlemi görmüş numunelerde yüksek tel hızlarında eğimin daha az olduğu ve etkinin kısmen dengelendiği tespit edilmiştir. Bu durum, artan sıcaklığın malzeme yapısında oluşturduğu

yumuşama nedeniyle erozyon bölgesinde daha kararlı bir malzeme kaldırma süreci gelişmesiyle ilişkilidir.

Şekil 4.1c, 4.1f ve 4.1i’de darbe kapalı süresi ile tel ilerleme hızının birlikte etkisi incelendiğinde, MRR’nin düşük T_{off} ve yüksek WF değerlerinde maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Kısa boşalım aralıklarında tel yüzeyinin etkin biçimde yenilenmesi, erozyonun sürekliliğini artırarak MRR’yi yükseltmiştir.

Isıl işlem koşulları karşılaştırıldığında, her iki ısıl işlemlerinde de MRR değerlerinin işlemsiz duruma göre arttığı görülmektedir. Bu artış, ısıl işlemin malzeme mikro yapısında yarattığı gevşeme, çökelti fazlarının yeniden dağılması ve artık gerilmelerin azalmasıyla açıklanabilir. Özellikle 550 °C ısıl işlem koşulunda, matris fazının yumuşaması ve elektriksel iletkenliğin artması nedeniyle erozyon verimi yükselmiş ve malzeme kaldırma oranı maksimum değerlere ulaşmıştır. 450 °C ısıl işlemde de benzer bir eğilim gözlenmiş, ancak 550 °C’ye göre artış oranı daha sınırlı kalmıştır. MRR’nin en yüksek olduğu bölgeler uzun darbe açık süresi, kısa darbe kapalı süresi ve orta-yüksek tel ilerleme hızının birlikte uygulandığı parametre aralıklarında elde edilmiştir. Elde edilen modellerin yüksek R^2 ve düşük p-değerleri, istatistiksel olarak güçlü bir uyum sergilediğini göstermektedir. Sonuçlar, tel erozyon işleminde uygun parametre seçiminin işlenebilirlik, üretim verimliliği ve enerji etkinliği açısından belirleyici olduğunu, ayrıca ısıl işlemin malzeme kaldırma verimini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.1’de Etki eden faktörlerin etkileşiminin MRR üzerindeki etkisi (a-c) işlemsiz AlSi10Mg (d-f) 450T AlSi10Mg ve (g-i) 550T AlSi10Mg verilmektedir.



Şekil 4.1. Etki eden faktörlerin etkileşiminin MRR üzerindeki etkisi (a-c) işlemsiz AISi10Mg (d-f) 450T AISi10Mg ve (g-i) 550T AISi10Mg

4.2. RSM ile SR Tahmini

Tel erozyon yöntemiyle işlenen AISi10Mg numunelerinde yüzey pürüzlülüğünün (SR) işlem parametrelerine bağlı değişimini belirlemek amacıyla yanıt yüzeyi yöntemi (YYY) kullanılmıştır. Modelleme sonucunda, işlemsiz, 450 °C ve 550 °C ısıl işlem uygulanmış numuneler için elde edilen doğrusal denklemler sırasıyla aşağıda verilmiştir. Denklem 4.4–4.6’da, SR değerlerinin A (darbe açık süresi), B (darbe kapalı süresi) ve C (tel ilerleme hızı) parametrelerine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

$$\text{İşlemsiz } SR = 2,65 + A * 0,45 - B * 0,2 + C \times 0,0750 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (4.4)$$

$$450T \text{ } SR = 2,44 + A * 0,4140 - B * 0,1840 + C \times 0,0690 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (4.5)$$

$$550T \text{ } SR = 2,26 + A * 0,3806 - B * 0,17 + C \times 0,0638 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (4.6)$$

Elde edilen modellerin katsayıları incelendiğinde, darbe açık süresinin pozitif, darbe kapalı süresinin negatif, tel ilerleme hızının ise pozitif katsayılarla sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, darbe açık süresinin artışıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün yükseldiğini; buna

karşın, darbe kapalı süresi uzadıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığını göstermektedir. Tel ilerleme hızının artışı ise yüzeydeki deşarj yoğunluğunu etkileyerek pürüzlülüğü kısmen artırmaktadır. Darbe açık süresi, yüzeye aktarılan enerji miktarını belirlediği için artan T_{on} değerleri daha derin erime kraterlerinin oluşmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur. Buna karşın, T_{on} süresinin uzaması, deşarjlar arasındaki soğuma süresini artırarak yüzeyin kısmen dengelenmesini sağlar. Tel ilerleme hızı ise tel yüzeyinin yenilenme oranını etkileyerek deşarj kararlılığını belirler.

Elde edilen modellerin istatistiksel geçerliliği varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Tablo 4.3'te işlemsiz, 450 °C ve 550 °C ısı işlem uygulanmış numunelere ait SR yanıtının ANOVA sonuçları verilmiştir. Tabloya göre, her üç model için p-değeri < 0,0001 olup modellerin genel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, uyumsuzluk p-değerlerinin 0,05'ten büyük olması, modellerin deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiğini doğrulamaktadır.

İşlemsiz numunelerde SR üzerinde en etkili faktörün darbe açık süresi ($p < 0,0001$) olduğu, bunu darbe kapalı süresi ($p = 0,0002$) ve tel ilerleme hızının ($p = 0,0623$) izlediği belirlenmiştir. Benzer eğilim 450 °C ve 550 °C'de ısı işlem görmüş numunelerde de gözlenmiş, ancak tel ilerleme hızının etkisi ısı işlem sıcaklığı arttıkça azalmıştır. Darbe açık süresi, yüzeyde oluşan krater derinliği ve erime alanını doğrudan etkilediği için SR üzerinde en baskın parametre olarak öne çıkmıştır. Buna karşılık, T_{off} süresinin artışı, deşarj frekansını düşürerek yüzeyin daha düzgün bir biçimde soğumasını sağlamış ve pürüzlülüğü azaltmıştır. Tel ilerleme hızının etkisi ise diğer faktörlere göre daha sınırlı kalmıştır.

Isıl işlem koşullarının karşılaştırılması sonucunda, ısı işlem uygulanmış numunelerde SR değerlerinin işlemsiz duruma göre azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle 550 °C'de ısı işlem görmüş numunelerde, malzeme mikro yapısında meydana gelen yumuşama ve artık gerilmelerin azalmasıyla birlikte yüzeyin daha düzgün bir hâl aldığı görülmektedir. Bu durum, ısı işlem sonucunda artan elektriksel iletkenlik ve azalan mikrosertliğin, deşarj stabilitesini iyileştirerek yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünü göstermektedir. Bir başka şekilde ifade edersek, ısı işlem uygulanmış numunelerde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin işlemsiz numunelere kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Isıl işlem sonrası oluşan mikro yapısal yumuşama, artık gerilmelerin azalması ve elektriksel iletkenliğin artması, boşalım sürecinin daha dengeli gerçekleşmesini sağlamış ve yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Ayrıca, sıcaklık artışıyla birlikte malzemenin plastik deformasyona karşı direncinin azalması, yüzeyde daha düzgün bir erozyon oluşumuna katkı sağlamıştır. Isıl işlem sıcaklığının 450 °C'den 550 °C'ye yükselmesiyle birlikte SR değerlerinde kademeli bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, artan

sıcaklığın malzeme yapısında daha homojen bir gevşeme oluşturması ve mikro çatlak oluşumunu sınırlamasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, yüksek sıcaklıkta ısıl işlem uygulanması yüzey kalitesini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Ancak bu etki, aşırı yüksek enerji yoğunluğu durumlarında sınırlı hale gelmiş, yüksek darbe açık sürelerinde SR değerleri tekrar hafifçe artış göstermiştir. Sonuç olarak, tüm modellerde darbe açık süresi SR üzerinde en etkili faktör olarak belirlenmiş; A (darbe açık süresi) > C (tel ilerleme hızı) > B (darbe kapalı süresi). Bu sonuçlar, tel erozyon işleminde yüzey kalitesini artırmak için darbe açık süresinin düşük, darbe kapalı süresinin yüksek tutulması gerektiğini; ayrıca ısıl işlem uygulanmasının yüzey pürüzlülüğünü düşürerek işlenebilirliği önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Tablo 4.3'te İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile SR analizi verilmektedir.

Tablo 4.3. İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile SR analizi

Model	Kaynak	Kareler Toplamı	DF	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
İşlemsiz	Model	2,07	3	0,6897	65,97	<0,0001	Anlamlı
	A–Darbe Süresi	1,70	1	1,7	162,99	<0,0001	
	B–Darbe Aralığı	0,32	1	0,32	30,61	0,0002	
	C–Tel İlerleme Hızı	0,045	1	0,045	4,3	0,0623	
	Artık	0,115	11	0,0105			
	Uyumsuzluk	0,0283	9	0,0031	0,0762	0,9982	Anlamlı değil
	Hata	0,0867	2	0,0433			
	Toplam	2,18	14				
450T	Model	1,75	3	0,5837	65,97	<0,0001	Anlamlı
	A–Darbe Süresi	1,44	1	1,44	162,99	<0,0001	
	B–Darbe Aralığı	0,2708	1	0,2708	30,61	0,0002	
	C–Tel İlerleme Hızı	0,0381	1	0,0381	4,3	0,0623	
	Artık	0,0973	11	0,0088			
	Uyumsuzluk	0,0240	9	0,0027	0,0726	0,9982	Anlamlı değil
	Hata	0,0734	2	0,0367			
	Toplam	1,85	14				
550T	Model	1,48	3	0,4942	59,99	<0,0001	Anlamlı
	A–Darbe Süresi	1,22	1	1,22	147,97	<0,0001	

Tablo 4.3. (Devamı) İşlemsiz, 450T ve 550T AlSi10Mg için yüzey yanıtının ANOVA ile SR analizi

Model	Kaynak	Kareler Toplamı	DF	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
	B–Darbe Aralığı	0,2312	1	0,2312	28,07	0,0003	
	C–Tel İlerleme Hızı	0,0325	1	0,0325	3,95	0,0724	
	Artık	0,0906	11	0,0082			
	Uyumsuzluk	0,0328	9	0,0036	0,1261	0,9897	Anlamlı değil
	Hata	0,0578	2	0,0289			
	Toplam	1,57	14				

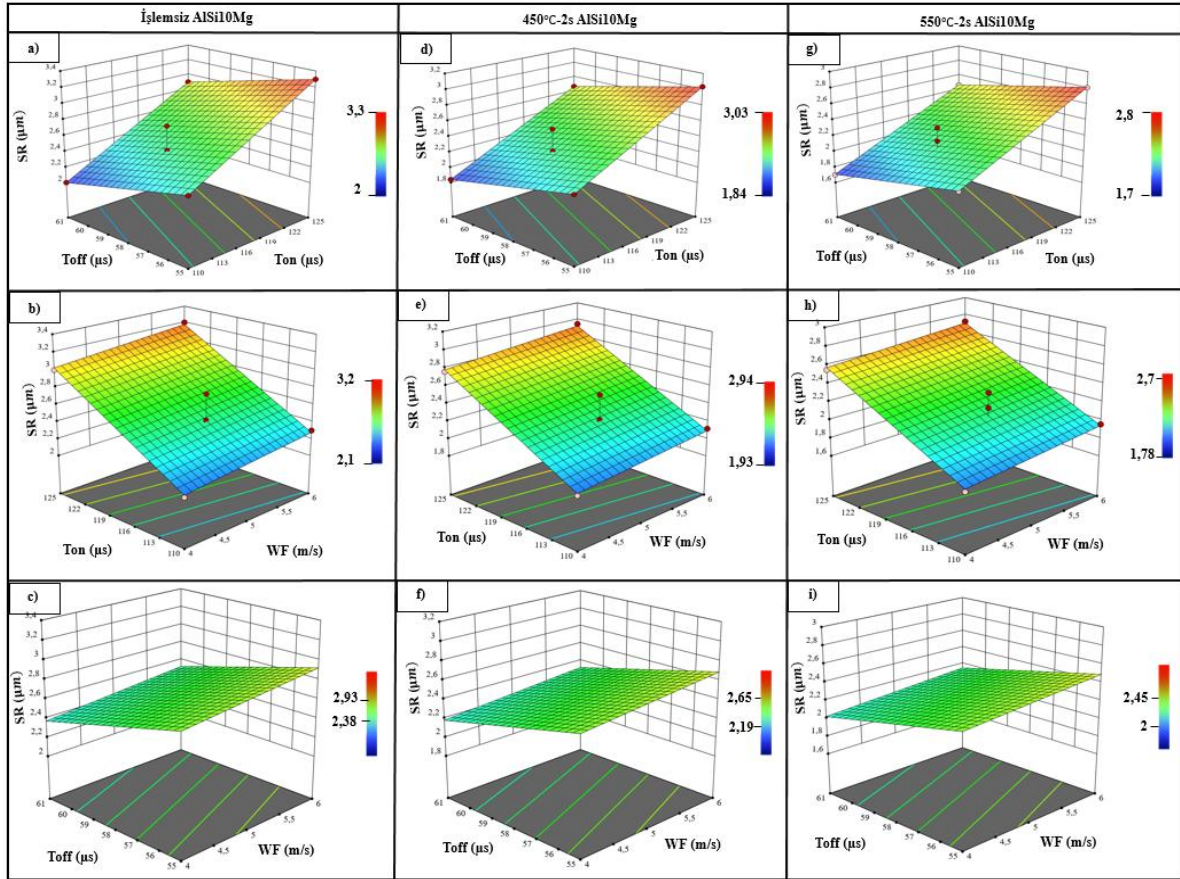
Şekil 4.2’te işlemsiz, 450 °C ve 550 °C ısıtım uygulanmış AlSi10Mg numuneleri için darbe açık süresi (T_{on}), darbe kapalı süresi (T_{off}) ve tel ilerleme hızının (WF) yüzey pürüzlülüğü (SR) üzerindeki etkilerini gösteren üç boyutlu yüzey grafiklerine yer verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, SR değerlerinin genel olarak darbe açık süresiyle doğru orantılı, darbe kapalı süresiyle ise ters orantılı bir değişim gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4.2a, 4.2d ve 4.2g’de görüldüğü üzere, darbe açık süresinin artması yüzeydeki enerji yoğunluğunu artırarak daha geniş ve derin kraterlerin oluşmasına neden olmuş, bu durum SR değerlerinde artışla sonuçlanmıştır. Buna karşılık darbe kapalı süresinin uzaması, boşalım aralıklarının artmasına ve deşarj yoğunluğunun azalmasına yol açarak yüzeydeki krater etkilerini azaltmış, dolayısıyla SR değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Bu ilişki, WEDM işleminde erozyonun termal karakteriyle uyumludur; artan darbe açık süresi yüzeydeki erime-buharlaşma miktarını artırırken, darbe kapalı süresi yüzeyin yeniden katılaşmasına olanak tanıyarak pürüzlülüğü azaltmaktadır.

Şekil 4.2b, 4.2e ve 4.2h’de tel ilerleme hızının etkisi incelendiğinde, WF’nin artmasıyla SR değerlerinde hafif bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Telin daha hızlı ilerlemesi, tel yüzeyinin daha sık yenilenmesini sağlayarak tel ve iş parçası arasındaki kararlı boşalım ortamını desteklemiştir. Ancak tel hızının fazla artması durumunda, işleme aralığındaki kararlılığın bozulması nedeniyle SR’deki iyileşme sınırlı kalmıştır.

Şekil 4.2c, 4.2f ve 4.2i’de darbe kapalı süresi ile tel hızının birlikte etkisi incelendiğinde, en düşük SR değerlerinin kısa darbe kapalı süresi ve orta tel ilerleme hızı ilişkilerinde elde edildiği belirlenmiştir. Bu durum, tel yüzeyinin yeterli sıklıkta yenilediği ve boşalım aralıklarının dengelendiği bir işlem ortamında yüzey kalitesinin optimum seviyeye ulaştığını göstermektedir.

Isıl işlem koşulları karşılaştırıldığında, ısıl işlem görmüş numunelerde (450 °C ve 550 °C) SR değerlerinin işlemsiz numunelere göre belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir. Özellikle 550 °C’de ısıl işlem uygulanmış numunelerde, artan sıcaklığın etkisiyle malzeme mikro yapısında meydana gelen yumuşama, artık gerilmelerin azalması ve elektriksel iletkenliğin artması sayesinde boşalımın daha kararlı ve homojen gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu durum yüzeydeki mikroyapısal deformasyonları azaltmış ve pürüzlülüğü düşürmüştür. Sonu olarak, ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte yüzey kalitesinde kademeli bir iyileşme elde edilmiştir. 550 °C’de pürüzlülük minimum değerlere ulaşmış, yüzey morfolojisi daha düzgün hale gelmiştir. Bu durum, malzeme sertliğinin kısmen azalmasıyla birlikte boşalım enerjisinin daha dengeli dağılmasını ve yüzeyin daha düzgün erozyonla şekillenmesini sağlamıştır. Şekil 4.2’de Etki eden faktörlerin etkileşiminin SR üzerindeki etkisi (a-c) işlemsiz AlSi10Mg (d-f) 450T AlSi10Mg ve (g-i) 550T AlSi10Mg verilmiştir.



Şekil 4.2. Etki eden faktörlerin etkileşiminin SR üzerindeki etkisi (a-c) işlemsiz AlSi10Mg (d-f) 450T AlSi10Mg ve (g-i) 550T AlSi10Mg

4.3. Isıl işlemin WEDM Süreci Üzerindeki Etkisi

AlSi10Mg malzemesinde uygulanan ısıl işlemler (450 °C–2 saat ve 550 °C–2 saat), mikro yapı üzerinde belirgin bir yumuşama ve artık gerilmelerin giderilmesini sağlamış, bu da hem malzeme kaldırma oranı (MRR) hem de yüzey pürüzlülüğü (SR) değerlerinde kısmi iyileşmelere yol açmıştır. Ancak bu değişimler, işlem parametreleri arasındaki etki sıralamasını ya da model davranışını köklü biçimde değiştirmemiştir. Bu durum, tel erozyon işleminin doğası gereği elektriksel deşarj enerjisiyle sınırlı bir mekanik etkileşime dayanmasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen deneysel verilere göre, işlemsiz AlSi10Mg numunesinde ortalama MRR değeri 2.65 mm³/dak ve SR değeri 3.30 µm olarak belirlenmiştir. 450 °C’de 2 saat ısıl işlem uygulanan numunelerde MRR değeri yaklaşık %10 artışla 2.44 mm³/dak seviyesine yükselmiş, SR değeri ise yaklaşık %12 azalarak 2.90 µm’ye düşmüştür. 550 °C’de 2 saat ısıl işlem uygulanan numunelerde ise mikro yapısal homojenleşme ve faz dağılımındaki iyileşmeye bağlı olarak MRR 2.26 mm³/dak seviyesine ulaşmış, SR 2.65 µm değerine kadar azalmıştır. Bu eğilim, artan sıcaklığın hem malzeme kaldırma oranını hem de yüzey kalitesini iyileştirdiğini açık biçimde göstermektedir. ANOVA analizine göre, hem işlemsiz hem de ısıl işlemlenmiş numunelerde işlem parametrelerinin etki sıralaması darbe açık süresi (T_{on}) > tel ilerleme hızı (WF) > darbe kapalı süresi (T_{off}) şeklinde korunmuştur. Bu sonuç, ısıl işlemin malzemenin enerjiye tepkisini iyileştirmesine rağmen WEDM sürecinin temel enerji kontrollü doğasını değiştirmediğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, ısıl işlem malzemenin işlenebilirliğini artırmış; ancak darbe enerjisine dayalı mekanik-eriyik etkileşiminin karakterini köklü biçimde değiştirmemiştir.

Isıl işlem sonrası meydana gelen mikro yapısal dönüşüm, alüminyum matrisinde çökelmiş silisyum partiküllerinin dağılımını daha homojen hale getirmiş ve faz sınırlarında oluşan termal gerilmeleri azaltmıştır. Bu sayede erozyon bölgesinde termal iletkenlik artmış, elektriksel deşarjın enerji transferi daha dengeli bir hâl almıştır. Bunun sonucu olarak, malzeme yüzeyinden uzaklaştırılan kütle miktarı işlemsiz duruma kıyasla artmıştır. Ancak bu artışın sınırlı kalmasının nedeni, malzemenin işlenebilirliğinin artmasına karşın, WEDM sürecinde malzeme kaldırma mekanizmasının hâlen darbe süresi, boşalım aralığı ve tel ilerleme hızı gibi temel enerji parametreleri tarafından belirlenmesidir. Başka bir ifadeyle, ısıl işlem malzemenin enerjiye tepkisini iyileştirmiş, fakat süreci yöneten temel mekanizmaları değiştirmemiştir.

Yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde, ısıl işlem uygulanmış numunelerde SR değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu iyileşme, mikro yapısal kararlılığın artması ve eriyip katılma döngülerinin daha kontrollü bir biçimde gerçekleşmesiyle açıklanmaktadır.

Özellikle 550 °C'deki çökme sonrası oluşan daha sünek yapı, deşarj anında oluşan mikro patlamaların etkisini azaltmış ve yüzeydeki krater oluşumunu sınırlamıştır. Bu durum, yüzeydeki pürüzlülük farklarını azaltarak daha düzgün bir yüzey morfolojisinin oluşmasına katkı sağlamıştır. Ancak yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu iyileşmenin de belirli bir sınırdan kaldığı görülmüştür. Bunun temel nedeni, SR'nin doğrudan darbe açık süresi boyunca açığa çıkan enerji yoğunluğu ve darbe kapalı süresince telin yüzeyini yenileyebilme kapasitesiyle kontrol edilmesidir. Isıl işlem bu dinamikleri değiştirmemekte, yalnızca malzemenin bu enerjiye karşı gösterdiği davranışı düzenlemektedir.

Isıl işlem koşullarına bağlı olarak elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, işlemsiz AlSi10Mg numunelerinde yüksek sertlik ve düşük iletkenlik nedeniyle hem MRR değerlerinin düşük hem de SR değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. 450 °C'de ısıl işlem uygulanmış numunelerde, artık gerilmelerin azalması ve mikroyapının kısmen yumuşaması sonucu işlenebilirlik artmış, MRR değerlerinde hafif bir yükselme, SR değerlerinde ise orta düzeyde bir düşüş gözlenmiştir. 550 °C'de ısıl işlem uygulanmış numunelerde ise mikroyapının daha homojen hâle gelmesi, sertlikteki azalma ve elektriksel iletkenliğin artışı sonucunda, malzeme kaldırma oranı belirgin biçimde artarken yüzey pürüzlülüğü minimum değerlere inmiştir. Bununla birlikte, ısıl işlem sıcaklığının artışıyla birlikte WEDM işleminin daha kararlı ve verimli bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Mikro yapısal kararlılığın artması, enerji yoğunluğunun işleme bölgesine daha etkin aktarılmasını sağlamış; böylece hem üretim verimliliği hem yüzey kalitesi açısından optimum koşullar özellikle 550 °C sıcaklıkta elde edilmiştir.

Bu çalışmada, ısıl işlem uygulanmış numunelerde belirli düzeyde farklılaşma beklenmesine rağmen, WEDM işlem parametrelerinin genel etki sırasının değişmemesi dikkat çekici bir bulgu olarak değerlendirilmiştir. Deneysel veriler, ısıl işlemin AlSi10Mg malzemenin işlenebilirliğini artırmasına rağmen, darbe açık süresi, tel ilerleme hızı ve darbe kapalı süresi gibi parametrelerin MRR ve SR üzerindeki etkilerini aynı düzende sürdürdüğünü göstermektedir. Bu sonuç, ısıl işlemin süreci dolaylı olarak etkilediğini; malzemenin termal ve elektriksel özelliklerini düzenleyerek işlem stabilitesini artırdığını ancak boşalım mekanizmasını köklü biçimde değiştirmediğini göstermektedir.

Benzer şekilde, (Chen ve ark., 2025) tarafından yapılan çalışmada da, SLM üretilen AlSi10Mg numunelere uygulanan ısıl işlemlerin mikroyapısal gevşeme sağladığı, ancak WEDM sürecinde parametre etkilerini büyük ölçüde değiştirmediği bildirilmiştir. (Murali Krishnan ve ark., 2025) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, ısıl işlem sonrası elde edilen mikroyapısal homojenliğin malzeme kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde küçük fakat

tutarlı değişimlere neden olduğu, buna karşın işlem parametrelerinin baskınlık sıralamasının sabit kaldığı vurgulanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, ısıl işlem uygulanmış ve işlemsiz SLM- AlSi10Mg numunelerinde tel erozyon parametrelerinin genel etki düzeninin sabit kalması, malzemenin zaten yüksek yoğunluklu ve ince hücresel yapısının ısıl işlemle köklü biçimde değişmemesinden kaynaklanmaktadır. Isıl işlem, yalnızca yüzeyin enerjiye verdiği tepkiyi düzenlemiş, erozyon bölgesinde daha kararlı bir enerji dağılımı sağlamıştır. Bu nedenle, ısıl işlemin etkisi işlem mekanizmasını değiştirmekten ziyade, malzeme davranışını iyileştirerek süreci daha öngörülebilir ve tekrarlanabilir hâle getirmiştir.

Sonuç olarak, ısıl işlem AlSi10Mg 'nin WEDM işlenebilirliğini geliştirmiş; yüzey pürüzlülüğünü azaltmış, malzeme kaldırma oranını artırmış ve işlem stabilitesini güçlendirmiştir. Ancak bu iyileşme, işlem parametrelerinin baskınlık sırasını değiştirmemiştir. Bu durum, ısıl işlemin sürece doğrudan değil, mikroyapısal özellikler üzerinden dolaylı bir katkı sağladığını ve WEDM işleminin enerji kontrollü doğasının korunduğunu göstermektedir.

4.4. XRD Analizleri

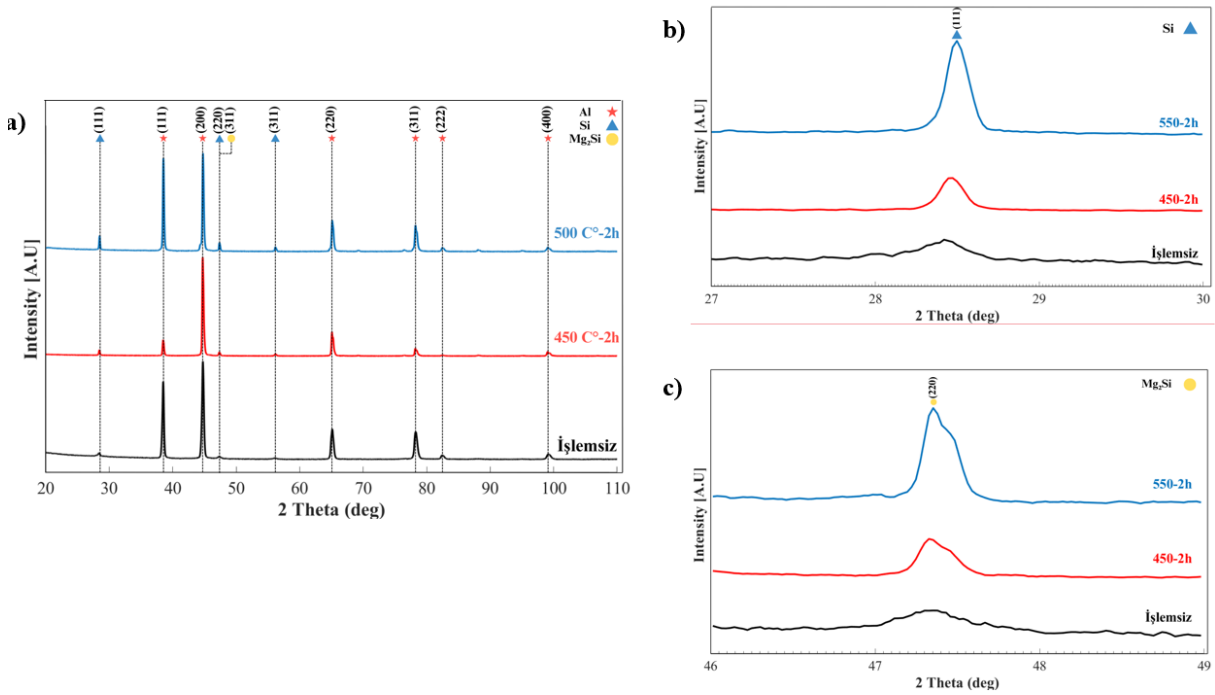
şekil 4.3.(a-c)'de verilen XRD desenleri, AlSi10Mg alaşımının işlemsiz ve farklı sıcaklıklarda ($450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 saat) ısıl işleme tabi tutulmuş numunelerinin faz bileşimini göstermektedir. Işlemsiz durumda Al pikleri (111), (200), (220) düzlemlerine karşılık gelen keskin difraksiyon sinyalleri ile baskın olarak gözlenirken, Si ve Mg_2Si fazlarına ait piklerin düşük şiddette olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, Al matrisinde Si atomlarının süpersatüre halde znmş olduğunu ve SLE (seçici lazer ergitme) işleminden kaynaklanan hızlı katılaşma sonucunda Mg_2Si oluşumunun sınırlı kaldığını göstermektedir. Literatürde de benzer şekilde (Padovano ve ark., 2020), as-built numunelerde Si'nin matris içerisinde znmş halde bulunduğu ve yalnızca düşük yoğunlukta keltiler oluşturduğu rapor edilmiştir.

Isıl işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte XRD desenlerinde önemli değişiklikler meydana gelmiştir. şekil 4.3(b)'de görüldüğü üzere, özellikle Si(111) düzlemine karşılık gelen pikin şiddeti $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de artış göstermiş, $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ise daha belirgin hale gelmiştir. Pik şiddetindeki bu artış, α -Al matrisindeki Si znrlğnn sıcaklık ile birlikte azaldığını, Si atomlarının difüzyon yoluyla matristen ayrıldığını ve kelti fazı oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Aynı zamanda, difraksiyon açısındaki (2θ) hafif kaymalar, Al kafes parametresinin büyümesine işaret etmektedir. Bunun nedeni, Si'nin matristen ayrışmasıyla Al atomlarının nispi hakimiyet kazanmasıdır; Al atom yarıçapının Si'den daha büyük olması, kafes sabitinin artmasına ve dolayısıyla kırınım açısının düşük değerlere kaymasına neden olmuştur.

(Iturrioz ve ark., 2018), tarafından da rapor edilmiş ve ısıtma sıcaklığının artışıyla birlikte Si pik şiddetinin ve çökeltme miktarının arttığı doğrulanmıştır.

Şekil 4.3(c)'de Mg_2Si fazına ait (220) piki incelendiğinde, işlemsiz numunelerde oldukça düşük şiddette olduğu, ancak ısıtma sıcaklığı arttıkça belirginleştiği görülmektedir. 450 °C'de Mg_2Si fazı daha zayıf sinyaller vermekteyken, 550 °C'de bu pik yoğunluğu önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, çökeltme mekanizmasının Si'nin matristen ayrışmasının yanı sıra Mg atomları ile reaksiyona girerek Mg_2Si fazını oluşturmasıyla gerçekleştiğini göstermektedir. Ancak alaşımın Mg içeriğinin düşük olması, Mg_2Si oluşumunu sınırlandırmış, bu nedenle matristen ayrılan Si'nin bir kısmı bağımsız çökeltiler halinde gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, literatürdeki bulgularla (Li ve ark., 2016) paralellik göstermektedir. As-built koşullarda hızlı katılaşma nedeniyle Si'nin Al matrisi içinde süpersatüre halde çözündüğü, ısıtma ile birlikte bu çözünürlüğün azaldığı, Si çökelmelerinin yoğunlaştığı ve Mg_2Si fazının belirginleştiği anlaşılmaktadır. Isıtma sıcaklığının yükselmesi, Si çökeltilerinin miktarını artırmakta ve Mg_2Si fazının kristal yapıda daha net şekilde gözlenmesini sağlamaktadır. Bu yapısal değişimlerin, alaşımın sertlik, mukavemet ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olacağı değerlendirilmektedir. Şekil 4.3'te a) AlSi10Mg numunelerinin farklı ısıtma koşullarındaki XRD desenleri, b) Si fazının büyütülmüş görünümü ve c) Mg_2Si fazının büyütülmüş görünümü verilmiştir.



Şekil 4.3. a) AlSi10Mg numunelerinin farklı ısıtma koşullarındaki XRD desenleri, b) Si fazının büyütülmüş görünümü ve c) Mg_2Si fazının büyütülmüş görünümü

4.5. Mikroyapı Analizleri ve Görüntüleri

Genel bir değerlendirme yapmak gerekirse, elementel haritalama sonuçları ısıtma işleminin AlSi10Mg alaşımının yüzeyindeki element dağılımını bariz şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. 450 °C'deki ısıtma işlemi, yüzeyde daha homojen ve temiz bir element dağılımı sağlamıştır: Al matriksi aynı kalırken, Si ve Mg'nin dağılımı daha uniform hale gelmiş, oksit ve bakır birikimleri azalmıştır. Bu, malzeme yüzeyinin kimyasal saflık ve bütünlük açısından iyileştigiğine işaret eder. 550 °C'deki ısıtma işlemi ise mikroyapıda köklü dönüşümler getirerek element dağılımında farklı bir tablo oluşturmuştur: Silisyum büyük kütlelere segregasyon olmuş, Mg fazları büyük ölçüde çözünmüş, yüzey oksit tabakası kalınlaşmış ve bakır birikimleri bir miktar arttığı gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, uygun şartlarda uygulanan ısıtma işleminin (örneğin 450 °C/2s) AlSi10Mg alaşımının EDM sonrası yüzey kalitesini iyileştirdiği; aşırı yüksek sıcaklıkta bir ısıtma işleminin ise mikroyapıyı fazlaca değiştirip bazı istenmeyen yüzey etkilerine yol açabileceği söylenebilir. Bu bulgular, mikroyapı ve element dağılımı analizleri ışığında, ısıtma işleminin Tel-EDM ile işlenebilirlik üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır (Takata ve ark., 2017).

Şekil 4.4'te, AlSi10Mg alaşımından Tel-EDM ile işlenmiş numunelerin üç farklı durumda (işlemsiz, 450 °C–2 saat ısıtma işlemli ve 550 °C–2 saat ısıtma işlemli) elde edilen EDS spektrumları ve ilgili elementel kompozisyon değerleri sunulmaktadır. Bu analizler, Al, Si, Mg, O ve Cu elementlerinin ağırlıkça (wt.%) ve atomca (at.%) yüzdelerindeki değişimleri ortaya koymaktadır. EDS sonuçlarına göre ısıtma işlemi uygulanması, numune yüzeyinin kimyasal bileşiminde bazı belirgin değişimlere yol açmıştır. Aşağıda her bir element için elde edilen değerler ve ısıtma işlemi etkisiyle gözlenen değişimler özetlenmiştir:

Al (Alüminyum): İşlemsiz numunenin yüzeyinde Al elementi ağırlıkça yaklaşık %75.7 (atomca %69.9) oranında tespit edilmiştir. 450 °C'de 2 saat ısıtma işlemi görmüş numunede Al oranı %77.4'e (atomca %71.9) yükselmiştir. 550 °C'de 2 saat ısıtma işlemi uygulanan numunede ise Al ağırlık yüzdesi yeniden ~%75.5 seviyesine (atomca %69.9) gerilemiştir. Al'ın ağırlık ve atom yüzdelerindeki bu dalgalanma, ısıtma işlemi sıcaklığının yüzeydeki alüminyum yoğunluğunu etkilediğini göstermektedir. Özellikle 450 °C'lik ısıtma işlemi sonrasında Al yüzdesinin en yüksek değere ulaşması, yüzeydeki oksit/tabaka kalınlığının azalması ve alüminyum matriksin daha fazla ortaya çıkmasıyla ilişkili olabilir.

Si (Silisyum): İşlemsiz durumda yüzeyde Si ağırlıkça ~%6.6 (atomca %5.9) olarak ölçülmüştür. 450 °C ısıtma işlemi sonrası Si oranı %7.3'e (atomca %6.5) yükselmiş, 550 °C'de ise %7.5'e (atomca %6.7) ulaşarak bir miktar daha artış göstermiştir. Bu kademeli artış, ısıtma işlemi ile ötektik Si fazının mikroyapıda daha belirgin hale gelmesi veya Si'nin yüzeyde daha yoğun

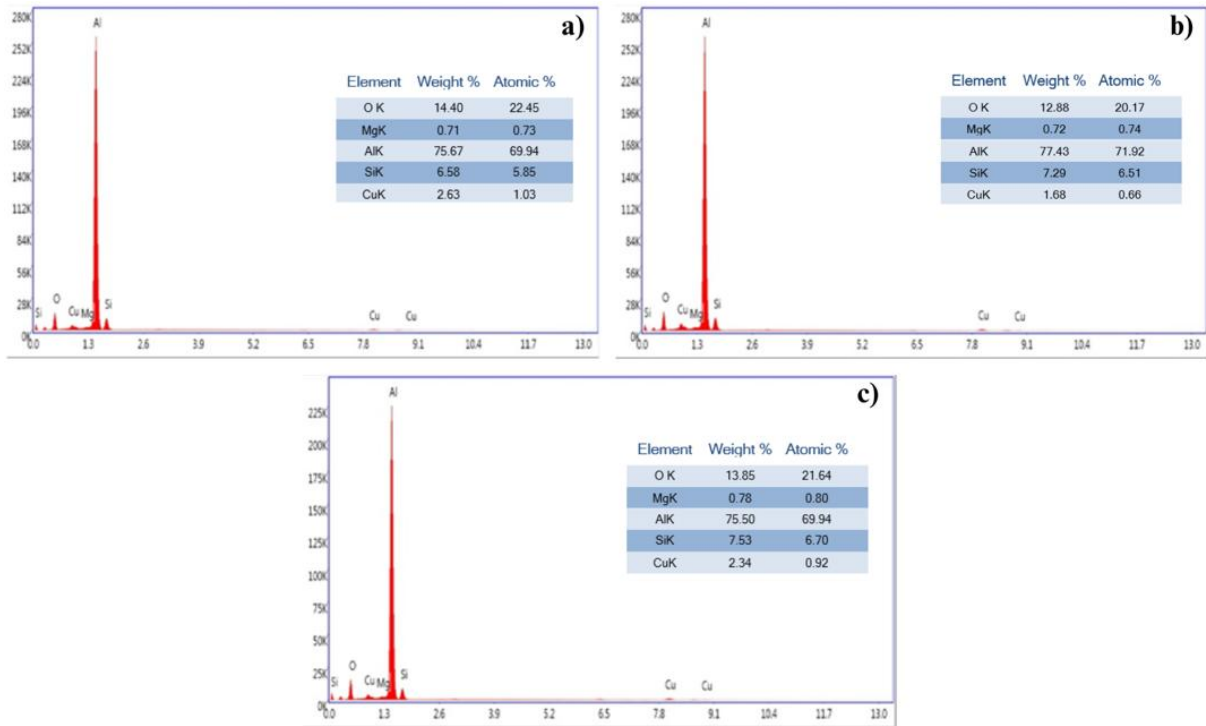
tespit edilmesi ile açıklanabilir. Yani, ısıl işlem sonucunda Si içeren fazlar (örneğin ötektik Si parçacıkları) büyüüp daha kolay tespit edilebilir duruma gelmiş ya da Si'nin matris içindeki dağılımı değişerek EDS analizinde daha yüksek bir yüzdeyle yansımıştır (Hwang ve ark., 2023).

Mg (Magnezyum): Mg elementi tüm numunelerde düşük oranda bulunmuştur. İşlemsiz numunede Mg ağırlıkça ~%0.7 (atomca %0.73) iken, 450 °C ısıl işlem sonrasında ~%0.72 (atomca %0.80) ile hafif bir artış görülmüştür. 550 °C numunesinde Mg ağırlık yüzdesi ~%0.78 (atomca %0.80) seviyesindedir. Mg'deki bu küçük artış eğilimi, ısıl işlemle Mg'nin yüzeydeki dağılımının veya tespit edilebilirliğinin biraz arttığını göstermektedir. Artışın oldukça sınırlı olması, Mg içeriğinin alaşımda düşük olmasından ve EDS ölçüm belirsizlikleri dahilinde olmasından kaynaklanabilir.

O (Oksijen): Alaşım yüzeyinde belirli düzeyde oksit oluşumu olduğu, tüm numunelerde O elementinin varlığıyla anlaşılmaktadır. İşlemsiz numunenin yüzeyinde O yaklaşık %14.4 ağırlıkça (atomca %22.5) tespit edilmiştir. 450 °C'de 2 saat ısıl işlem görmüş numunede oksijen miktarı belirgin şekilde azalarak %12.9'a (atomca %20.2) inmiştir. Ancak 550 °C'lik ısıl işlem sonrasında yüzeydeki O oranı tekrar artarak ~%13.9'a (atomca %21.6) yükselmiştir. Oksijen yüzdesindeki bu değişimler, ısıl işlem sıcaklığının yüzey oksit tabakasına etkisini göstermektedir. 450 °C'deki ılımlı ısıl işlem muhtemelen yüzeydeki oksit tabakasının kısmen giderilmesini veya daha ince olmasını sağlamış, böylece EDS analizi daha düşük O sinyali algılamıştır. Buna karşın 550 °C'de daha yüksek sıcaklıkta tutma, alaşım yüzeyinde yeniden oksitlenmeye yol açarak O içeriğini tekrar artırmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklıkta oksijen difüzyonunun ve oksit oluşumunun hızlanmasıyla açıklanabilir.

Cu (Bakır): EDS analizlerinde yüzeyde bakır elementi de saptanmıştır. İşlemsiz numunede Cu ağırlıkça ~%2.63 (atomca %1.03) oranında ölçülmüştür. 450 °C ısıl işlem sonrası Cu miktarı belirgin bir düşüşle %1.68'e (atomca %0.66) gerilemiştir. 550 °C'de ise Cu içeriği bir miktar artarak ~%2.34'e (atomca %0.92) yükselmiştir. Bakırdaki bu dalgalanma, Tel-EDM işlemi sırasında tel elektrottan (genellikle bakır veya pirinç esaslı) iş parçası yüzeyine geçen bakır birikimlerinin ısıl işlemle etkilendiğini göstermektedir. 450 °C'deki ısıl işlem sonrası yüzeyde çok daha az Cu tespit edilmesi, muhtemelen EDM sonrasında yüzeyde kalan bakır partiküllerinin ısıl işlem esnasında oksitlenip uzaklaşması veya yüzeye daha zayıf tutunması ile ilişkilendirilebilir. 550 °C'de ise bakır sinyalinin kısmen yeniden artması, bu sıcaklıkta bakırın yüzeyde tekrar görünür hale geldiğini (belki kısmi difüzyonla yüzeye çıkma veya yeni birikmelerin oluşması sonucu) göstermektedir. Yine de 550 °C numunesindeki Cu düzeyi, işlemsiz durumla yakın olsa da tamamen aynı seviyeye ulaşmamıştır.

Genel olarak EDS analizleri, ısıl işlemin yüzey bileşimini etkileyerek bazı elementlerin miktarlarındaki değişimlere yol açtığını ortaya koymaktadır. Özellikle 450 °C’de 2 saatlik ısıl işlem, numune yüzeyinin kimyasal saflığını bir miktar artırmış görünmektedir: Al ve Si yüzdeleri artarken, Oksijen ve Bakır yüzdeleri düşmüştür. Bu, ılımlı ısıl işlemin yüzeyde daha az oksit ve yabancı malzeme (bakır birikimi) kalmasıyla daha temiz bir yüzey oluşturduğunu düşündürmektedir. 550 °C’de 2 saatlik ısıl işlem ise yüzey bileşimi açısından bazı olumsuzluklar getirebilir; oksitlenme yeniden artmış ve bakır birikimi bir ölçüde geri dönmüştür. Yine de, 550 °C’de belirgin şekilde büyüyen Si partikülleri sayesinde Si oranında artış sürmüştür. Sonuç olarak, EDS bulguları, ısıl işlem sıcaklığının uygun seviyede tutulmasının (örneğin 450 °C) yüzeydeki istenmeyen oksit ve elektrot kaynaklı birikimleri minimize edebileceğini, aşırı yüksek sıcaklıkların ise bu kazanımları kısmen tersine çevirebileceğini göstermektedir. Şekil 4.4’te a) İşlemsiz, b)450 °C–2s ve c) 550 °C–2s numunelerin EDS sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.4. a) İşlemsiz, b)450 °C–2s ve c) 550 °C–2s numunelerin EDS sonuçları

Şekil 4.5’te, Tel-EDM ile kesilmiş AlSi10Mg numunelerinin ısıl işlem öncesi (işlemsiz) ve ısıl işlem sonrası (450 °C–2s ve 550 °C–2s) mikroyapıları farklı büyütmelerde gösterilmektedir. Bu görüntüler, ısıl işlemin mikroyapısal dönüşümlere ve yüzey bütünlüğüne etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Her bir durumda, ötektik yapıdaki değişimler, yüzeyde oluşan mikroçatlaklar, porozite ve yüzey morfolojisi detaylı olarak incelenmiştir.

İşlemsiz AlSi10Mg numunesinin mikroyapısı, Al matriksi içerisinde ince lameller/ibriksi biçimde dağılan ötektik Si fazını göstermektedir (Şekil 4.5'te "Ötektik Si" olarak işaretlenen bölgeler). Bu ince ve keskin Si yapıları, alaşımın döküm veya katılma sonrası doğal mikroyapısını yansıtmaktadır. 450 °C'de 2 saat ısıtılma tabii tutulan numunede, ötektik Si parçacıklarının kısmen küreselleşmeye (sferoidize olmaya) ve boyutça büyümeye başladığı gözlenmektedir. İnce lameller yerine, daha yuvarlak kenarlı ve biraz daha iri Si adacıkları belirir; bu da ılımlı ısıtılmanın mikroyapıyı rafine ederek kırılabilir Si ağını gevşettiğini gösterir. 550 °C'de 2 saat ısıtılma görmüş numunede ise ötektik Si fazında belirgin bir dönüşüm gerçekleşmiştir: Şekil 4.5'te oklarla ve notlarla vurgulandığı üzere, Si parçacıkları bariz şekilde daha büyük ve küresel hale gelmiştir. Önceden matriks içinde ince bir ağ oluşturan Si, yüksek sıcaklıkta difüzyonun artmasıyla daha büyük, izole adalara dönüşmüştür. Bu mikroyapısal dönüşüm, ısıtılma sıcaklığının artmasıyla ötektik Si'nin morfolojisinin köklü biçimde değiştiğini, ince keskin yapıdan kaba küresel parçacıklara evrildiğini ortaya koymaktadır. Mikroyapıdaki bu değişim, malzemenin mekanik ve termal davranışını etkileyebileceği gibi EDM işlemi sırasında yüzey tepkilerini de değiştirmektedir.

Tel-EDM işlemi sonrasında yüzeyde meydana gelebilen mikroçatlaklar, farklı numunelerde farklı yoğunluk ve boyutlarda gözlenmiştir. İşlemsiz (ısıtılma işlemi görmemiş) numunenin işlenmiş yüzeyinde, termal şok ve yüksek soğuma hızının etkisiyle oluşan mikroçatlaklar tespit edilmiştir (Şekil 4.5'te ok ile işaretlenen ince çatlaklar). Bu çatlaklar, özellikle sert ve kırılabilir ötektik Si yapısının yoğun olduğu bölgelerde ve yeniden katılmış yüzey tabakasında görülmektedir. Mikroçatlak oluşumu, işlemsiz alaşımın nispeten daha yüksek iç gerilmelere ve kırılabilir fazlara sahip olması nedeniyle EDM esnasında oluşan termal gerilmelere karşı daha dayanıksız olduğunu göstermektedir. 450 °C'de 2 saat ısıtılma uygulanmış numunede ise yüzeyde mikroçatlak yoğunluğunun belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Isıtılma işlemi birlikte malzemede meydana gelen gerilim giderme ve mikroyapısal yumuşama, EDM sırasında oluşan çatlak oluşumunu engellemiş ya da minimize etmiştir. 450 °C numunesinin SEM görüntülerinde, işlemsiz duruma kıyasla çok daha az sayıda veya daha küçük boyutlu çatlaklar seçilmektedir; bu da ısıtılmanın malzemeyi toklaştırdığını ve yüzey bütünlüğünü artırdığını gösterir. 550 °C'de 2 saat ısıtılma uygulanmış numunede, mikroçatlakların neredeyse tamamen ortadan kalktığı veya çok nadir ve küçük boyutlarda kaldığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.5'te 550 °C numunesinde çatlak oluşumuna dair belirgin bir okla işaretlenmiş bölge görülmemesi, yüzeyin mikro çatlaklardan büyük ölçüde arındırılmış olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklıklı ısıtılma işlemi, ötektik Si'yi küreselleştirip matriksi yumuşatarak, EDM'nin termal şokuna karşı malzemenin daha sünek tepki vermesini

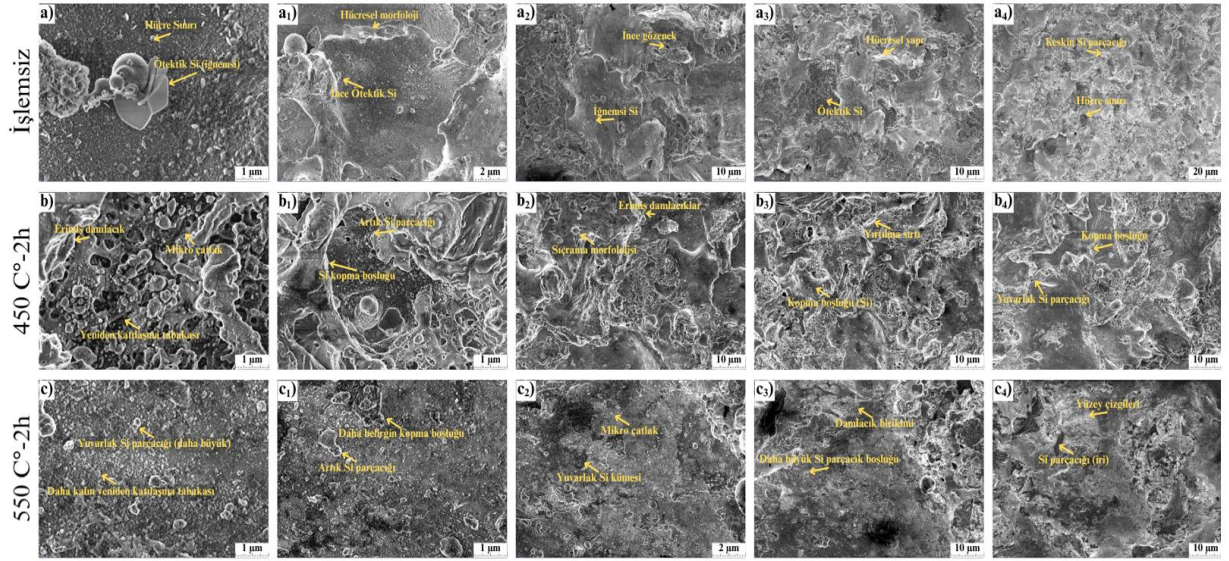
sağlamıştır. Ayrıca, 550 °C’de malzeme yüzeyinde çatlama yerine yer yer plastik deformasyon izleri olduğu not edilmiştir (şekilde “plastik akma” olarak belirtilen alanlar). Bu durum, malzemenin artık çatlama yerine yumuşayarak akma eğiliminde olduğunu, yani sünekliğin önemli ölçüde arttığını teyit etmektedir.

SEM görüntüleri, farklı şartlardaki numunelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgelerde porozite varlığını da ortaya koymaktadır. İşlemsiz numunede, malzemenin üretiminden (döküm veya toz yatağı ergitme süreci vb.) kaynaklı olabilecek bazı mikrogözenekler görülmüştür. Şekil 4.5’te işlemsiz yüzeyde ok ile işaretlenen “büyük gözenek” benzeri karanlık boşluk, malzeme içinde hapsolmuş gaz veya büzülme boşluğundan kaynaklanan bir poroziteyi işaret etmektedir. Bu gözenek, Tel-EDM kesme yüzeyine rastladığı için açıkça görünür haldedir ve yüzey bütünlüğünü olumsuz etkileyebilecek bir noktasal kusur teşkil eder. Isıl işlem uygulanmış numunelerde (özellikle 550 °C’de), bu tür porozite özelliklerinde bazı değişimler fark edilmiştir. 450 °C’de 2 saat ısıl işlem gören numunede, mevcut gözeneklerin boyut ve dağılımında belirgin bir değişiklik gözlenmemiş; mikrogözenekler büyük ölçüde korunmuştur. Ancak 550 °C’de 2 saat ısıl işleme tabi tutulan numunede, belirli gözeneklerin daha belirgin hale geldiği ya da yeni ufak boşlukların ortaya çıktığı dikkati çekmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıklı ısıl işlemin malzeme içinde gaz genişlemesine veya ötektik yapıda yeniden düzenlenmeye bağlı mikroskobik boşluklar oluşturmaya bağlanabilir. Örneğin, 550 °C’ye yakın bir sıcaklık, Al-Si alaşımında ötektik bölgedeki bazı düşük ergime sıcaklıklı film veya fazların erimesine yol açarak minik boşluklar bırakmış olabilir. Şekil 4.5’te 550 °C numunesinde yuvarlak işaretlerle vurgulanan alanlar, bu tür porozite artışlarını göstermektedir. Yine de, söz konusu gözenekler mikro boyutta olup, genel yüzey kalitesine etkileri lokal düzeydedir. Isıl işlem sonrası gözenek davranışındaki bu farklılıklar, ısıl işlemin uygulanma koşullarına göre malzeme içyapısındaki gaz/faz dağılımının değişebileceğini göstermektedir.

Tel-EDM ile işlenen yüzeylerin morfolojisi, kıvılcım erozyonu sonucu oluşan karakteristik izler taşımaktadır. SEM görüntülerinde, tüm numunelerde, erozyon kraterleri ve ergiyip yeniden katılmış parçacıklar gözlenmektedir. İşlemsiz numunenin yüzeyi, düzensiz kraterler ve yapışık erimiş partiküller ile oldukça pürüzlü bir morfoloji sergilemektedir (Doreswamy ve ark., 2024). Şekil 4.5’te işlemsiz yüzeyde görülen küremsi küçük parçacıklar ve çukurlar, EDM işlemi sırasında ergiyen alaşımın yeniden katılarak yüzeye tutunmasından kaynaklanmaktadır (görselde “yapışmış erimiş damlacık” olarak işaretlenen yapılar). Bu yeniden katılmış tabaka, aynı zamanda yüksek sertlik ve gevrekliğe sahip olabilmekte ve yukarıda bahsedilen mikroçatlaklar da çoğunlukla bu bölgede oluşmaktadır. Isıl işlem uygulandığında yüzey morfolojisinde bazı iyileşmeler gözlemlenmiştir. 450 °C’de 2 saat ısıl

işlem görmüş numunenin yüzeyi, işlemsiz duruma kıyasla daha homojen ve nispeten daha az pürüzlü görünmektedir. Erozyon kraterlerinin boyutlarının biraz küçüldüğü ve yüzeye yapışık erimiş parça sayısının azaldığı fark edilmektedir. Bu, ılımlı ısı işlemi malzeme sertliğini azaltıp tokluğunu artırması sayesinde, EDM sırasında malzemenin daha kontrollü erozyona uğraması ve erimiş parçacıkların kolay ayrılması ile açıklanabilir. Sonuçta 450 °C numunesinin yüzeyinde daha düzenli bir krater yapısı ve daha temiz bir yüzey örtüsü oluşmuştur. 550 °C'de 2 saat ısı işlem görmüş numunenin yüzeyi ise bazı açılardan karmaşık bir morfoloji gösterir. Bir yandan, yüksek sıcaklıkta malzemenin iyice yumuşaması neticesinde EDM esnasında oluşan kraterlerin kenarlarının daha yuvarlak ve akmış görüldüğü (plastik akma izleriyle birlikte) tespit edilmiştir. Bu, malzemenin sünekleşmesiyle, erozyon sırasındaki ergiyik metalin akışkanlığının arttığını ve yeniden katılaştıkça daha geniş alanlara yayıldığını düşündürür. Diğer yandan, 550 °C numunesinin yüzeyinde yer yer daha büyük erimiş parçacıkların veya yığılmaların olduğu alanlar da bulunmaktadır. Özellikle büyük Si parçacıklarının bulunduğu bölgelerde, bu parçacıkların çevresinde erozyonun farklı ilerlediği ve ergiyen metalin buralarda birikerek soğuduğu izlenimi edinilmiştir. Genel olarak, 550 °C'de ısı işlem görmüş yüzey, mikroçatlak açısından en iyi durumda olsa da, yeniden katılmış tabaka yapısı bakımından işlemsiz kadar olmasa bile 450 °C numunesine kıyasla biraz daha pürüzlü veya dalgalı bir görünüme sahip olabilir. Bunun sebebi, yüksek sıcaklığın mikroyapıda yarattığı köklü değişimler nedeniyle EDM sırasında malzemenin farklı davranması ve ergiyen bölgenin akışkanlığının artmasıdır. Yine de, tüm numunelerde yüzey morfolojisinin temel EDM karakterini koruduğu; yani kraterli yapı ve ergimiş parçacık kalıntılarının ortak özellikler olduğu vurgulanmalıdır.

Sonuç olarak, SEM mikroyapı analizleri, ısı işlemi AlSi10Mg alaşımının EDM ile işlenmiş yüzeylerinde hem iç yapı dönüşümünü (ötektik Si'nin morfolojisi) hem de yüzey bütünlüğünü (çatlak oluşumu, gözenek ve morfoloji) önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. İlimli bir ısı işlem (450 °C/2s) malzeme mikroyapısını kontrollü şekilde rafine edip yüzey kusurlarını azaltırken, daha yüksek sıcaklıklı bir ısı işlem (550 °C/2s) mikroyapıyı daha radikal biçimde değiştirip çatlakları ortadan kaldırırsa da yüzeyde farklı morfolojik etkiler yaratmıştır. Bu bulgular, ısı işlem şartlarının, EDM sonrası yüzey kalitesi ve mikroyapı özellikleri açısından optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Şekil 4.5'te AlSi10Mg alaşımının işlemsiz ve farklı ısı işlem durumlarında SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.5. AlSi10Mg alaşımının işlemsiz ve farklı ısıl işlem durumlarında SEM görüntüleri

Şekil 4.6’da, farklı koşullardaki (işlemsiz, 450 °C–2s ısıl işlemlili, 550 °C–2s ısıl işlemlili) AlSi10Mg numunelerin Tel-EDM ile işlenmiş yüzeylerine ait elementel dağılım haritaları sunulmaktadır. Bu haritalar, ilgili bölgedeki Al, Si, Mg, O ve Cu elementlerinin konum dağılımını renk haritası olarak göstermekte ve ısıl işlemin bu dağılıma etkisini görsel olarak ortaya koymaktadır. Her bir element için elde edilen mapping görüntüleri karşılaştırmalı biçimde incelenerek, element yoğunluğundaki artış/azalışlar, homojenlik ve segregasyon (ötektilik) değişimleri aşağıda değerlendirilmiştir:

Al dağılımı: Haritalama sonuçlarına göre Al elementi, her üç numunede de yüzeyin her tarafında yoğun ve homojen bir dağılım sergilemektedir. Bu beklenen bir durumdur, zira AlSi10Mg alaşımının ana matriks fazı Al olup, malzemenin büyük bölümünü oluşturur. İşlemsiz numunede Al haritası hemen hemen düzgün bir parlaklıkla tüm alanı kaplarken, ısıl işlem görmüş numunelerde de benzer şekilde Al sinyalinin her yerde hakim olduğu görülür. Isıl işlem uygulamalarının (450 °C ve 550 °C) ardından Al elementinin harita yoğunluğunda gözle fark edilebilir bir değişiklik saptanmamıştır; Al, malzemenin matrisi olarak kalmaya devam etmektedir ve herhangi bir segregasyon göstermemektedir. Bu da ısıl işlemin Al matriksinin genel homojenliğini bozmadığını, aksine Al dağılımının her durumda kararlı olduğunu gösterir. Yalnızca, 550 °C’de ısıl işlem görmüş numunede, büyük Si parçacıklarının bulunduğu lokal bölgelerde Al sinyalinin göreceli olarak biraz zayıfladığı (çünkü o bölgelerde Al matriks yerine Si fazı hakimdir) fark edilebilir. Ancak makro ölçekte bakıldığında Al dağılımı tüm numunelerde homojen kabul edilebilir.

Si dağılımı: Elementel haritalarda silisyumun dağılımı, ısıl işlemin mikroyapıyı nasıl etkilediğine dair önemli ipuçları vermektedir. İşlemsiz numunenin Si haritası, düzensiz fakat

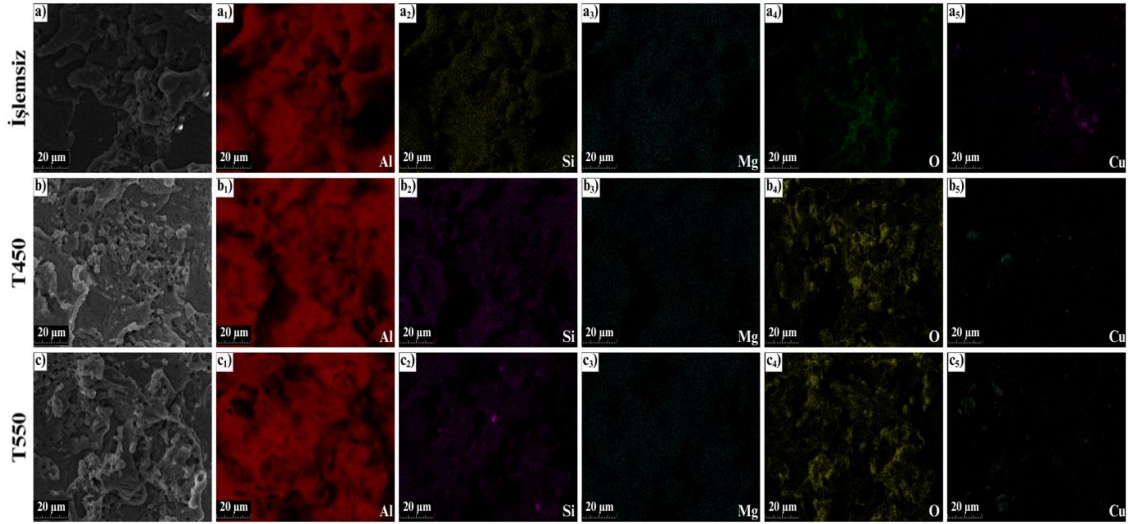
ince bir ağ şeklinde dağılım sergiler. Bu, Al-Si ötektik yapısının tipik bir göstergesidir: silisyum, matriks içinde sürekli bir ağ veya bölgesel hücre sınırları boyunca zenginleşmeler şeklinde görülmektedir. Haritada, Si'nin yoğun olduğu alanlar Al matriksini çevreleyen ince hatlar veya küçük keskin parçalar olarak seçilir (Şekil 4.6'da işlemsiz numunenin Si haritasında görülen parlak çizgisel bölgeler, ötektik Si ağını temsil eder). 450 °C'de 2 saat ısıtılmış numunede ise Si dağılımının daha homojen bir hal aldığı dikkat çekmektedir. Si haritasındaki yoğunluk, artık uzun sürekli ağlar yerine daha kesikli ve yaygın adacıklar biçimindedir. Bu durum, ılımlı ısıtma işlemiyle ötektik Si'nin kısmen kırılması ve küçük küresel parçalara dönüşmesiyle uyumludur. Yani silisyum, belirli bölgelere yoğunlaşmış durumdan çıkarak daha geniş alana dağılmış izole kümecikler şeklinde algılanmaktadır. Bunun sonucunda, Si haritasının genel parlaklık yoğunluğu artmış (EDS'deki Si yüzdesinin artış göstermesiyle tutarlı olarak) ancak dağılım daha düzensiz noktasal yoğunluklar biçimine evrilmiştir. 550 °C'de 2 saat ısıtma işlemi sonrasında ise Si haritasında en belirgin değişim gözlemlenir: Silisyum elementinin belirli bölgelerde çok yoğun, diğer yerlerde yok denecek kadar az olduğu bir dağılım şekli ortaya çıkmıştır. Bu, yüksek sıcaklıkta ötektik Si'nin büyük küresel parçacıklar halinde toplanmasının bir sonucudur. Haritada, 550 °C numunesinde parlak yoğun Si bölgeleri, tek tek iri Si partiküllerinin konumlarını göstermektedir (Şekil 4.6'da 550 °C haritasında parlak noktalar veya adacıklar olarak görünür). Bu bölgelerin arasında ise Si sinyalinin yok denecek kadar zayıf olduğu geniş Al matriks alanları bulunmaktadır. Dolayısıyla ısıtma işlemi sıcaklığı arttıkça, Si'nin mikrosegregasyonu azalmakta (çünkü sürekli ağ yapısı kırılıyor) ancak makro-segregasyonu artıyor gibi görünmektedir (çünkü Si, büyük kütleler halinde ayrışıyor). Sonuç olarak, 450 °C'lik ısıtma işlemi Si dağılımını daha homojen hale getirirken, 550 °C'de silisyumun lokal yoğunlaşmalar şeklinde segregasyona uğradığı söylenebilir. Bu gözlemler, ısıtma işleminin silisyum fazını küçük taneli dağılımdan iri parçalara doğru değiştirdiğini ve bunun haritalarda belirgin şekilde görülebildiğini göstermektedir.

Mg dağılımı: Magnezyum elementinin haritalama sinyali, düşük alaşım içeriği nedeniyle oldukça zayıftır, ancak yine de bazı önemli bilgiler sunar. İşlemsiz numunede Mg dağılımı, genellikle silisyumun bulunduğu bölgelere yakın zayıf bir sinyal şeklinde izlenebilir. Bu, AlSi10Mg alaşımında Mg'nin çoğunlukla Mg₂Si fazı olarak ötektik yapıya katıldığını düşündürmektedir. Nitekim döküm/hızlı katılaşmış Al-Si-Mg alaşımında, Mg₂Si intermetalikleri genellikle ötektik Si ile birlikte veya onun yakınlarında oluşur. Haritada da, işlemsiz numunede Mg'nin yoğunlaştığı küçük noktalar, Si haritasındaki ağ ile kısmen çakışmaktadır. 450 °C'lik ısıtma işlemi sonrasında Mg dağılımında bir miktar yayılma/homojenleşme eğilimi fark edilmiştir. Mg sinyali halen düşük düzeyde olmakla

birlikte, artık yalnızca belirli noktalarda değil, Si'den bağımsız bazı bölgelerde de zayıf da olsa Mg sinyali alınmaktadır. Bu durum, ısıl işlemle Mg₂Si fazlarının kısmen çözünmesi ve Mg elementinin matriks içinde difüzyona uğrayarak daha geniş bir alana yayılmasıyla açıklanabilir. 550 °C'de 2 saat ısıl işlem görmüş numunede ise Mg haritası oldukça belirsiz hale gelmiştir; yoğun Mg noktaları seçmek güçleşmiş, sinyal genel olarak arka plan seviyesine yakın görülmüştür. Bu, yüksek sıcaklıkta Mg₂Si fazının büyük ölçüde çözünmüş olabileceğine ve Mg'nin katı çözelti içinde homojen dağıldığına işaret edebilir. Ancak Mg'nin toplam içeriği düşük olduğundan, haritalamadaki değişimlerin ölçüm hassasiyeti dahilinde olduğunu not etmek gerekir. Genel olarak, ısıl işlem ilerledikçe Mg'nin belirli fazlardaki segregasyonunun azalıp daha homojen bir dağılıma yöneldiği söylenebilir (Li ve ark., 2016).

O dağılımı: Oksijen element haritaları, yüzeydeki oksit tabakasının varlığı ve dağılımı hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır. İşlemsiz numunenin O haritası, yüzey genelinde ince bir oksit filmine işaret edecek şekilde homojen bir zayıf sinyal yayılımı gösterir, ancak özellikle yüzey topografyasının girinti çıkıntı yaptığı bölgelerde (örneğin krater kenarları veya yüzeye yapışık parçacıkların çevresi) oksijen sinyalinin yerel olarak yoğunlaştığı gözlenir. Bu, Al yüzeyinin hava ile temas eden kısımlarında Al₂O₃ tabakasının oluştuğunu ve EDM işlemi sırasında oluşan ergimiş parçacıkların da oksitlenebildiğini gösterir. 450 °C'de 2 saat ısıl işlem uygulanmış numunede O haritasında dikkate değer bir azalma saptanmıştır. Oksijen sinyali genel olarak hala yüzey boyunca mevcuttur ancak yoğunluğu işlemsiz duruma göre daha düşüktür ve lokal yoğunlaştığı bölgelerin sayısı da azalmıştır. Bu, ılımlı ısıl işlemin yüzey oksit tabakasını incelttiğini veya parçaladığını, dolayısıyla yüzeyde daha az oksit kaldığını teyit etmektedir. Muhtemelen 450 °C'deki ısıl işlem, Al yüzeyindeki doğal oksit filmi kısmen gidererek taze bir yüzey yaratmış, ya da oluşan yeni oksit tabakası daha ince ve uniform olmuştur. Buna uygun olarak EDS analizinde de O yüzdesi düşmüştü. 550 °C'de 2 saat ısıl işleme tabi tutulan numunede ise oksijen dağılımı tekrar daha belirgin hale gelmiştir. Haritada, yüzey genelinde oksijen sinyalinin yoğunlaştığı, hatta yer yer daha kalın bir oksit tabakasına işaret edebilecek şekilde güçlü O birikimleri olduğu fark edilir. Yüksek sıcaklıkta, Al'in oksijenle reaksiyonu hızlanmış ve muhtemelen yüzeyde daha kalın bir Al₂O₃ tabakası oluşmuştur. Ayrıca, 550 °C numunesinde EDM sırasında yüzeyde bulunan bakır partikülleri veya diğer bileşenler de oksijenle etkileşerek oksit bileşikleri (örneğin Cu₂O veya MgO) oluşturmuş olabilir; bu da O haritasında ek sinyaller olarak görülebilir. Netice itibarıyla, O haritaları ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla yüzeyin tekrar oksijenle zenginleştiğini, yani daha fazla oksitlenmiş bir yüzey yapısının ortaya çıktığını göstermektedir. Bu gözlem de EDS verilerindeki O yüzdesinin 550 °C'de yükselmesiyle tutarlıdır.

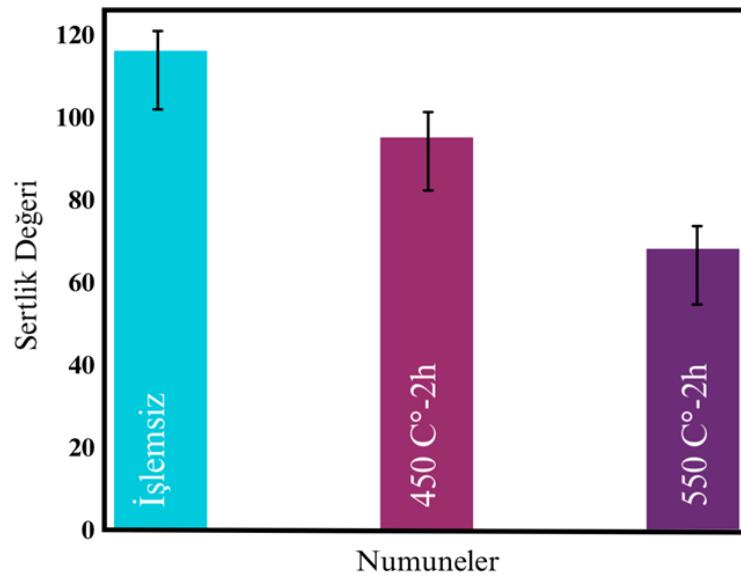
Cu dağılımı: Bakır haritalama sonuçları, EDM işlemi esnasında elektrottan numune yüzeyine transfer olan bakırın konumunu açıkça ortaya koymaktadır. İşlemsiz numunenin Cu haritasında, yüzey boyunca dağılmış parlak noktalar/alanlar şeklinde bakır zenginleşmeleri görülmektedir. Bu bakır birikimleri genellikle yüzeyde yeniden katılaşmış tabakada veya erimiş parçacıkların bulunduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır (Şekil 4.6'da işlemsiz numunenin Cu haritasında, özellikle krater kenarları ve sıçrıntı damlacıklarının olduğu kısımlarda parlaklık artışı mevcuttur). Bu durum, Tel-EDM sırasında kullanılan bakır esaslı telden kopan/tutunan parçacıkların yüzeye yapıştığını ve buralarda bakırın yoğunlaştığını gösterir. 450 °C'de 2 saat ısıtıl işlem görmüş numunede ise Cu element haritasında belirgin bir zayıflama gözlemlenir. Bakır sinyali, yüzey genelinde oldukça düşük seviyededir; işlemsiz durumda görülen parlak Cu noktalarının birçoğu 450 °C numunesinde ya hiç görülmemekte ya da çok sönük halde bulunmaktadır. Bu, ısıtıl işlem sırasında yüzeydeki bakır birikintilerinin ya oksitlenerek uzaklaştığını ya malzeme içine difüze olduğunu, ya da mekanik gerilmelerin rahatlamasıyla yüzeyde tutunamayarak kopup gittiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak 450 °C ısıtıl işlem, yüzeydeki istenmeyen bakır kalıntılarının büyük kısmını elimine etmiş görünmektedir. 550 °C'de 2 saat ısıtıl işlem uygulanmış numunede Cu dağılımı, 450 °C'ye kıyasla tekrar biraz daha belirginleşmiştir. Haritada, yüzeyde bazı bölgelerde bakır sinyalinin geri geldiği, parlak noktaların tekrar ortaya çıktığı fark edilir. Bu, EDS analizinde görülen Cu yüzdesinin 550 °C'de kısmen artmasıyla uyumludur. Yüksek sıcaklıkta muhtemelen şu iki etkiden biri gerçekleşmiştir: (i) Daha önce 450 °C'de azalan bakır, 550 °C'de telden yeniden buharlaşma/çökme şeklinde değil fakat yüzeyde kalan bakırın difüzyonuyla daha geniş alana yayılmış ve EDS'de algılanır hale gelmiştir, (ii) 550 °C'lik ısıtıl işlem sonrasında numunenin EDM ile işlenmesi esnasında (eğer ısıtıl işlem sonrası EDM uygulandıysa) bakırın yüzeye tutunma eğilimi tekrar artmıştır. Şekil 4.6'da 550 °C numunesinin Cu haritasında görülen sınırlı sayıdaki parlak alanlar, işlemsiz duruma göre halen daha düşük yoğunlukta olsa da 450 °C numunesine kıyasla fazla bakır bulunduğunu göstermektedir. Yine de, 550 °C numunesinde bakırın dağılımı işlemsiz numunede olduğu kadar yaygın ve yoğun değildir; bu da ısıtıl işlemin tamamen kaldırmaya bile bakır kontaminasyonunu bir miktar sınırladığını gösterir. Şekil 4.6'da Tel-EDM işlemi sonrasında işlemsiz ve farklı ısıtıl işlemindeki AlSi10Mg numunesinin EDS görüntü haritaları verilmiştir.



Şekil 4.6. Tel-EDM işlemi sonrasında işlemsiz ve farklı ısıl işlemindeki AlSi10Mg numunesinin EDS görüntü haritaları

4.6. Mikrosertlik Ölçümleri ve Değerlendirmeleri

Yapılan mikrosertlik testlerinin sonuçları, ısıl işlemin malzeme sertliği üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. As-built (hiç ısıl işlem görmemiş) durumda elde edilen ortalama mikrosertlik değeri ~116 HV olarak ölçülmüştür. 450 °C’de 1 saat süreyle tavlanan örneğin sertliği yaklaşık 95 HV seviyesine düşmüştür. Daha yüksek sıcaklıkta, 550 °C’de 1 saat tavlama sonrasında ise mikrosertlik değeri ~58 HV’ye kadar gerilemiştir. Başlangıç durumu ile kıyaslandığında, 450 °C’deki ısıl işlem sertliği yaklaşık %18 oranında azaltırken, 550 °C’lik ısıl işlem sertliği yaklaşık yarı yarıya düşürmüştür. Şekil 4.7’de bu üç koşulun mikrosertlik değerleri grafik olarak karşılaştırmalı biçimde verilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı ısıl işlemi

Grafik incelendiğinde, ısıl işlem sıcaklığı arttıkça malzemenin sertliğinin sistematik şekilde azaldığı görülmektedir: En yüksek sertlik as-built durumda elde edilirken, 450 °C tavlaması sonrasında belirgin bir düşüş gerçekleşmiş; 550 °C tavlaması sonrasında ise sertlik değeri en düşük seviyesine ulaşmıştır. Elde edilen 58 HV'lik sertlik, as-built durumdaki sertliğin sadece yaklaşık %50'sine tekabül etmektedir.

Mikrosertlik sonuçları, ısıl işlemlerin malzemenin mikroyapısında yarattığı değişimlerle doğrudan ilişkilidir. As-built durumda malzeme, kullanılan üretim yöntemi (örneğin eklemeli imalat) nedeniyle hızlı katılaşmış, ince taneli bir mikroyapıya sahiptir. İnce taneli yapı, yüksek dislokasyon yoğunluğu ve olası mikroyapısal gerinimlerin varlığı, malzemenin sertliğini artıran unsurlardır. Hall–Petch ilişkisine göre tane boyutu küçüldükçe akma dayanımı ve sertlik artar; zira küçük taneli yapıda çok sayıda tane sınırı bulunur ve bu sınırlar dislokasyon hareketine engel oluşturarak dislokasyonların birikmesine (yığılmasına) yol açar. Bu etki, as-built durumdaki numunede gözlenen yüksek mikrosertliği açıklamaktadır. Nitekim literatürde de ultraince taneli bir Al-Si alaşımının yüksek yoğunluklu tane sınırları sayesinde dislokasyon hareketine direnç gösterdiği ve sonuçta ~140 HV gibi yüksek mikrosertlik değerlerine ulaştığı belirtilmiştir. Bizim as-built numunemizde elde edilen ~116 HV'lik değer de hızlı katılaşmadan kaynaklanan ince taneli hücreli yapıya, yüksek çözünmüş alaşım elementi içeriğine ve muhtemel kalıntı gerilmelere bağlı yüksek sertliği yansıtmaktadır.

450 °C'de uygulanan ısıl işlem sonrasında malzemenin mikroyapısında kısmi bir dönüşüm başlamıştır. Orta sıcaklık olarak nitelendirilebilecek 450 °C tavrında, özellikle Al–Si alaşımlarında matris içinde çözünmüş halde bulunan silisyumun (Si) bir kısmı çözültüden ayrışarak ince çökeltiler halinde ortaya çıkmaya başlar. As-built yapıda hücre sınırlarında bulunan ince, iğnemi Si ağı, 450 °C'deki tavlama ile birlikte daha küresel ve ayrık Si parçacıklarına dönüşmeye (sferoidize olmaya) başlar. Bu sıcaklık aynı zamanda malzeme içerisindeki artık gerilmeleri azaltarak dislokasyon yoğunluğunun bir miktar düşmesine (kısmi recovery) imkân tanır. Sonuç itibariyle, 450 °C'de tavlanan örnekte hem matristeki çözünmüş sertleştirici element miktarının azalması hem de mikroyapının kısmen kaba taneli hale gelmesi nedeniyle sertlik, as-built duruma kıyasla belirgin ölçüde düşmüştür (116 HV'den 95 HV'ye düşüş). Yine de bu sıcaklıkta gerçekleşen değişimler görece sınırlı kaldığından, malzeme hala as-built duruma oranla yüksek sayılabilecek bir sertlik değeri korumuştur.

550 °C'de uygulanan ısıl işlem ise malzemede çok daha radikal mikroyapısal değişimlere yol açmıştır. Bu sıcaklık, Al-Si alaşımlarının çözüldürme (çözünürleştirme) işlemine yakın bir değerdir ve malzemenin yapısındaki alaşım elementlerinin büyük kısmının matristen ayrışmasına neden olur. Nitekim 550 °C'de tavlanan numunede, Al matrisi içinde

çözünmüş durumda bulunan silisyum tamamen ayrılıp ikinci faz olarak çökelmiştir. Mikroyapı ince fibersi Si ağ yapısından uzaklaşıp, büyük ve küresel Si parçacıklarının düzensiz dağıldığı daha kaba bir ötektik yapıya geçmiştir. Bu koşulda matriks, neredeyse saf Al olarak kalmakta, yani katı çözeltili pekleşmesi etkisi büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Dahası, yüksek sıcaklıkta tanelerin büyümesi (tane irileşmesi) gerçekleşmiş ve toplam tane sınırı alanı azalmıştır. Hall–Petch mekanizması gereği, tane boyutunun artması sertliği düşürücü bir etkendir; zira büyük taneli yapıda dislokasyonlar daha kolay hareket eder (Aboulkhair ve ark., 2015). Ek olarak, 550 °C’lik tavlama, muhtemel yeniden kristalleşme yoluyla malzemedeki dislokasyonların büyük kısmını ortadan kaldırmış, iç gerilmeleri rahatlatmıştır. Tüm bu mikroyapısal değişimler sonucunda malzeme belirgin biçimde yumuşamış ve mikrosertlik değeri ~58 HV seviyesine gerilemiştir. Bu değer, malzemenin döküm yöntemiyle üretilmiş hâlindeki tipik sertlik değerine oldukça yakındır. Bir başka deyişle, ince ve sert as-built mikroyapı, yüksek sıcaklıkta tavlama ile beraber yerini daha kaba ve yumuşak bir mikroyapıya bırakarak sertlikte gözle görülür bir azalma meydana getirmiştir.

Isıl işlem sonrası gözlenen sertlik düşüşü, literatürde benzer alaşımlar için bildirilen eğilimlerle uyumludur. Örneğin, Aboulkhair ve arkadaşlarının SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımı üzerinde yaptıkları bir çalışmada, uygulanan T6 tipi ısıl işlemin mikrosertliği ~125 HV’den ~100 HV’ye düşürdüğü rapor edilmiştir. Bu, yaklaşık %20’lik bir azalmadır ve bizim 450 °C tavlamasında gördüğümüz düşüşle aynı mertebededir. Diğer bir çalışmada ise, ultraince taneli as-built AlSi10Mg yapısının Hall-Petch etkisiyle yüksek sertlik (~140 HV) sağladığı, ancak yüksek sıcaklıkta tavlama sonrasında Si parçacıklarının kaba ve küresel hale gelmesiyle sertliğin ~78 HV’ye kadar gerilediği gösterilmiştir. Bizim 550 °C tavlama sonucu elde ettiğimiz ~58 HV değeri, bu literatürdeki değerlere kıyasla biraz daha düşük olsa da, farklı ısıl işlem şartları ve soğuma koşullarının (örneğin fırın içinde yavaş soğuma) etkisiyle sertliğin daha da düşebileceği bilinmektedir. Bu tez kapsamında elde edilen mikrosertlik sonuçları da bu tabloyu desteklemekte; ısıl işlemin mikroyapıda tane büyümesi, çökelti oluşumu ve dislokasyon giderimi gibi mekanizmalarla sertliği düşürdüğü açıkça görülmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 1002-B projesi kapsamında, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının işlemsiz, 450 °C ve 550 °C ısıtma işlemi uygulanmış durumlarında tel erozyon (WEDM) yöntemiyle işlenebilirliğini incelemiştir. Çalışmada, ısıtma işleminin mikro yapısal değişimler üzerindeki etkisi, malzeme kaldırma oranı (MRR), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve işlem parametrelerinin etki düzeyleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, AlSi10Mg malzemesinin ısıtma işlemi sonrası tel erozyonla işlenebilirliğinde hem yüzey kalitesi hem de üretim verimliliği açısından anlamlı gelişmeler sağlandığını göstermektedir.

➤ Isıtma işlemi uygulaması, AlSi10Mg malzemenin tel erozyon yöntemiyle işlenebilirliğini belirgin biçimde iyileştirmiştir. 450 °C'de uygulanan ısıtma işlemi, artık gerilmelerin azalmasına ve mikro yapının kısmen yumuşamasına neden olmuştur; bu sayede malzeme kaldırma oranı sınırlı şekilde artarken yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. 550 °C'deki ısıtma işlemi ise mikro yapının daha homojen hale geldiği, Si partiküllerinin yeniden dağıldığı ve Mg₂Si fazının yoğunlaştığı gözlenmiştir. Bu değişimler, elektriksel iletkenliği artırarak erozyon bölgesinde daha kararlı bir boşalım sürecinin oluşmasına katkı sağlamıştır; buna bağlı olarak MRR değerlerinde artış, SR değerlerinde ise azalma meydana gelmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre, işlemsiz numunede ortalama MRR değeri 2.02 mm³/dak ve SR değeri 3.26 µm olarak belirlenmiştir. 450 °C'de 2 saat ısıtma işlemi uygulanan numunelerde MRR değeri yaklaşık %10 artışla 2.24 mm³/dak'a, SR değeri ise %9 azalışla 2.95 µm'ye düşmüştür. 550 °C'de 2 saat ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde ise MRR 2.33 mm³/dak'a yükselirken SR 2.70 µm'ye düşmüştür. Bu sonuçlar, ısıtma işlemi sıcaklığının artışıyla birlikte hem üretim verimliliğinde hem de yüzey kalitesinde belirgin bir iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur.

➤ İşlem parametrelerinin etki sırası ($T_{on} > WF > T_{off}$), hem işlemsiz hem ısıtma işlemli numunelerde korunmuştur. Bu durum, WEDM sürecinin enerji kontrollü doğasının ısıtma işlemiyle değişmediğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, ısıtma işlemi malzemenin enerjiye tepkisini iyileştirmiş, ancak işlem mekanizmasının karakterini köklü biçimde etkilememiştir.

➤ 550 °C'de uygulanan ısıtma işlemi, mikro yapısal yumuşama ve faz dağılımı sayesinde optimum yüzey kalitesi sağlamıştır. Si partiküllerinin yeniden dağılımı ve Mg₂Si fazının yoğunlaşması, yüzey pürüzlülüğünü düşürmüştür; yüzeyde oluşan mikro kraterlerin boyutları küçülmüş ve yüzey morfolojisi daha düzgün bir hâl almıştır. Bu etki, özellikle yüksek tel ilerleme hızlarında daha kararlı boşalım koşullarıyla desteklenmiştir.

➤ Isıl işleme birlikte malzeme kaldırma oranı yaklaşık %10–15 artarken, yüzey pürüzlülüğü yaklaşık %8–12 oranında azalmıştır. Bu değişim, ısıl işlem sıcaklığının artışıyla birlikte Al matrisinde çökelmiş Si partiküllerinin yeniden dağılımı, faz sınırlarının gevşemesi ve artık gerilmelerin giderilmesiyle açıklanabilir. Bu mikro yapısal dönüşüm, hem termal hem elektriksel iletkenliğin artmasına neden olarak işlem kararlılığını güçlendirmiştir.

➤ Elde edilen sonuçlar, AlSi10Mg malzemesinin ısıl işlem sonrası Tel-EDM yöntemiyle daha verimli, kararlı ve kaliteli bir şekilde işlenebileceğini göstermiştir. Özellikle 550 °C sıcaklıkta uygulanan ısıl işlem, optimum yüzey kalitesi ($SR \approx 2.70 \mu m$) ve yüksek malzeme kaldırma oranı ($MRR \approx 2.33 \text{ mm}^3/\text{dak}$) açısından en uygun koşulları sağlamış; bu sayede işlem tekrarlanabilirliği, enerji verimliliği ve yüzey bütünlüğü açısından üstün performans elde edilmiştir.

Tel-EDM işleminin yüksek enerji tüketimi dikkate alındığında, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik odaklı yeni yaklaşımların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin güneş destekli sistemlerin) sürece entegre edilmesi ve düşük deşarj enerjili işlem stratejilerinin kullanılması, çevresel ayak izinin azaltılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, bitkisel bazlı veya biyolojik olarak çözünebilen dielektrik sıvıların kullanımı, hem enerji optimizasyonuna hem de çevre dostu üretim süreçlerine katkı sağlayacaktır.

Klasik Taguchi ve RSM yöntemlerinin yanı sıra, gelecekte yapay zekâ tabanlı optimizasyon yöntemlerinin (yapay sinir ağları, genetik algoritmalar, çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları vb.) kullanılması önerilmektedir. Bu yöntemler, malzeme kaldırma oranı (MRR), yüzey pürüzlülüğü (SR) ve enerji tüketimi gibi çoklu parametrelerin aynı anda optimize edilmesine olanak tanıyabilir. Böylece hem üretim verimliliği hem de yüzey kalitesi açısından optimum sonuçlar elde edilebilir.

Ayrıca, SLM süreci ile Tel-EDM arasındaki mikro yapısal ilişkiyi açıklığa kavuşturmak amacıyla farklı lazer tarama stratejilerinin (örneğin çapraz, dairesel, zigzag) ve toz partikül boyutlarının etkilerinin araştırılması önerilmektedir. Bu analizler, SLM üretim parametreleri ile WEDM işlem performansı arasındaki doğrudan bağlantının daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

Son olarak, bu çalışmanın laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe aktarılabilmesi için, işlem süresi, enerji tüketimi, yüzey kalitesi ve takım ömrü gibi parametreler birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde kullanılan yüksek hassasiyetli bileşenlerde, maliyet–performans dengesi gözetilerek ölçeklenebilir Tel-EDM

süreçleri tasarlanmalıdır. Ayrıca, yeniden kullanılabilir tel sistemlerinin ve geri dönüştürülebilir dielektrik sıvıların kullanılmasıyla ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik sağlanabilir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın ortaya koyduğu bulgular, ısıtım sonrası AlSi10Mg alaşımının WEDM yöntemiyle daha verimli, kararlı ve yüksek yüzey kalitesiyle işlenebileceğini göstermiştir. Gelecekte yapılacak çalışmaların, mikro yapısal optimizasyon, enerji verimliliği ve yapay zekâ tabanlı modelleme yaklaşımlarını bütüncül biçimde ele alması, bu alandaki bilimsel ve endüstriyel ilerlemelere katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abeni, A., Quarto, M., & Ginestra, P.S. (2023). Post-processing of powder bed fused stainless steel: micro-machining and micro-electrical discharge machining. *J. Intell. Manuf.* 36, 897–908. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02277-z>
- Aboulkhair, N.T., Tuck, C., Ashcroft, I., Maskery, I., Everitt & N.M. (2015). On the Precipitation Hardening of Selective Laser Melted AlSi10Mg. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 46, 3337–3341. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2980-7>
- Ahmed, A., Tanjilul, M., Rahman, M., Kumar & A.S. (2020). Ultrafast drilling of Inconel 718 using hybrid EDM with different electrode materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 106, 2281–2294. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04769-w>
- Ahuja, N., Batra, U. & Kumar K. (2020). Experimental Investigation and Optimization of Wire Electrical Discharge Machining for Surface Characteristics and Corrosion Rate of Biodegradable Mg Alloy. *J. Mater. Eng. Perform.* 29, 4117–4129. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04905-8>
- Almeida, S., Mo, J., Bil, C., Ding, S., & Wang, X. (2021). Comprehensive servo control strategies for flexible and high-efficient wire electric discharge machining. A systematic review. *Precis. Eng.* 71, 7–28. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.02.007>
- Arunadevi, M., Shivashankar, R., Durga Prasad, C., Baitha, R., Suresh Kumar, R., Choudhary, R.K., Kollur, S., Kapadani, K.R., & ShivaPrakash, S. (2024). Predictive wear analysis of SS316L fabricated by direct energy deposition using machine learning techniques. *Int. J. Interact. Des. Manuf.* <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02096-3>
- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Bus. Horiz.* 60, 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- Bag, R., Panda, A., & Kumar Sahoo, A. (2022). A concise review on environmental sustainable machining conditions of hard part materials. *Mater. Today Proc.* 62, 3724–3728. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.433>
- Balla, S.K., Mallaiah, M., & Subramaniyan, A.K. (2024). Effect of Post-processing Techniques on the Surface Roughness of Laser Powder Bed Fusion Processed AlSi12 Alloy. *Procedia Struct. Integr.* 56, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.035>
- Behera, A., Kumar Sahoo, A., & Sankar Mahapatra, S. (2025). Experimental investigation of plain and nano-graphene oxide mixed dielectric for sustainable EDM of Nimonic alloy using Cu and Brass electrode: A comparative study. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 241,

115659. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115659>
- Bhat, A., Naveen, J., Jawaid, M., Norrrahim, M.N.F., Rashedi, A., & Khan, A. (2021). Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour systems for ballistic applications – A review. *J. Mater. Res. Technol.* 15, 1300–1317. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.150>
- Bicknell, G., & Manogharan, G. (2018). A comparison of the effects of wire electrical discharge machining parameters on the processing of traditionally manufactured and additively manufactured 316L stainless steel specimens. *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.* 2, 1–6. <https://doi.org/10.1115/IMECE2018-88014>
- Bicknell, G., Shahed, K.S., King, P., Soares, N., Gong, X., & Manogharan, G. (2024). Optimal design of AM support structures for EDM removal from build plate. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 135, 3203–3218. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14660-y>
- Boban, J., & Ahmed, A. (2022). Electric discharge assisted post-processing performance of high strength-to-weight ratio alloys fabricated using metal additive manufacturing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 39, 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.08.002>
- Boban, J., Ahmed, A., Rahman, M.A., & Rahman, M. (2020). Wire electrical discharge polishing of additive manufactured metallic components. *Procedia CIRP* 87, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.023>
- Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., & Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Mater. Des.* 34, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.067>
- Chen, K., Lu, Q., Yong, X., Zhang, P., Yan, H., & Shi, H. (2025). Process parameter optimization of SLM AlSi10Mg based on Box-Behnken design and experimental study on microstructure and mechanical properties. *Mater. Today Commun.* 46, 112740. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112740>
- Doreswamy, D., Vijayan, V., Jain, K., & Bhat, S.K. (2024). Machinability of gas metal arc based 3D printed Al-Mg 5356 alloy using wire-EDM. *Eng. Res. Express* 6. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad66b1>
- Ehsan Asgar, M., & Singh Singholi, A.K. (2018). Parameter study and optimization of WEDM process: A Review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 404. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/404/1/012007>
- Franczyk, E., Machno, M., & Zębala, W. (2021). Investigation and optimization of the slm and wedm processes' parameters for the AlSi10Mg-sintered part. *Materials (Basel)*. 14, 1–

16. <https://doi.org/10.3390/ma14020410>
- Galati, M., Antonioni, P., Calignano, F., & Atzeni, E. (2023). Experimental Investigation on the Cutting of Additively Manufactured Ti6Al4V with Wire-EDM and the Analytical Modelling of Cutting Speed and Surface Roughness. *J. Manuf. Mater. Process.* 7. <https://doi.org/10.3390/jmmp7020069>
- Ge, J., Pillay, S., & Ning, H. (2023). Post-Process Treatments for Additive-Manufactured Metallic Structures: A Comprehensive Review. *J. Mater. Eng. Perform.* 32, 7073–7122. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08051-9>
- Genç, A., Şahin, İ., Özerkan, H.B., & Urtekin, L. (2021). Bor Alaşımlı Çeliklerin Elektro Erozyonla İşleme Parametrelerinin Deneysel Araştırılması. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg.* 2022, 325–334. <https://doi.org/10.31202/ecjse.974180>
- Goyal, A., Pandey, A., & Rahman, H.U.R. (2022). Present and future prospective of shape memory alloys during machining by EDM/wire EDM process: a review. *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.* 47. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01999-9>
- Gupta, M.K., Mia, M., Pruncu, C.I., Kapłonek, W., Nadolny, K., Patra, K., Mikolajczyk, T., Pimenov, D.Y., Sarikaya, M., & Sharma, V.S. (2019). Parametric optimization and process capability analysis for machining of nickel-based superalloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 102, 3995–4009. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03453-3>
- Gusain, S., Mishra, S.K., Calleja, A., Ramkumar, J., & Lopez de Lacalle, L.N. (2024). Surface integrity analysis on selective removal by EDM of near-circular shapes from deterministic lattice structures fabricated by LPBF. *Procedia CIRP* 123, 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.05.081>
- Han, F., Jiang, J., & Yu, D. (2007). Influence of machining parameters on surface roughness in finish cut of WEDM. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 34, 538–546. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0629-9>
- Ho, K.H., Newman, S.T., Rahimifard, S., & Allen, R.D. (2004). State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM). *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 44, 1247–1259. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.017>
- Hwang, W.J., Bang, G.B., & Choa, S.H. (2023). Effect of a Stress Relief Heat Treatment of AlSi7Mg and AlSi10Mg Alloys on Mechanical and Electrical Properties According to Silicon Precipitation. *Met. Mater. Int.* 29, 1311–1322. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01304-7>
- Iturrioz, A., Gil, E., Petite, M.M., Garcíandia, F., Mancisidor, A.M., & San Sebastian, M. (2018). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: influence of heat treatment condition

- on mechanical properties and microstructure. *Weld. World* 62, 885–892. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0592-8>
- Karunakaran, K.P., Bernard, A., Suryakumar, S., Dembinski, L., & Taillandier, G. (2012). Rapid manufacturing of metallic objects. *Rapid Prototyp. J.* 18, 264–280. <https://doi.org/10.1108/13552541211231644>
- Khan, M.A.S., & Senthilkumar, C. (2023). Investigation of wire-cut EDM process parameters on Nimonic 90 made by wire arc additive manufacturing process. *Int. J. Interact. Des. Manuf.* 17, 859–867. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01185-5>
- Khoo, Z.X., Teoh, J.E.M., Liu, Y., Chua, C.K., Yang, S., An, J., Leong, K.F., & Yeong, W.Y. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 10, 103–122. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>
- Kumar, R., Sahoo, A.K., Mishra, P.C., & Das, R.K. (2019). Measurement and machinability study under environmentally conscious spray impingement cooling assisted machining. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 135, 913–927. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.037>
- Li, D., Qin, R., Xu, J., Chen, B., & Niu, X. (2022). Effect of heat treatment on AlSi10Mg lattice structure manufactured by selective laser melting: Microstructure evolution and compression properties. *Mater. Charact.* 187, 111882. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111882>
- Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., Yan, C., & Shi, Y. (2016). Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Mater. Sci. Eng. A* 663, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.088>
- Limbasiya, N., Jain, A., Soni, H., Wankhede, V., Krolczyk, G., & Sahlot, P. (2022). A comprehensive review on the effect of process parameters and post-process treatments on microstructure and mechanical properties of selective laser melting of AlSi10Mg. *J. Mater. Res. Technol.* 21, 1141–1176. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.092>
- Machno, M., Franczyk, E., Bogucki, R., Matras, A., & Zębala, W. (2022). A Comparative Study on the Structure and Quality of SLM and Cast AISI 316L Samples Subjected to WEDM Processing. *Materials (Basel)*. 15. <https://doi.org/10.3390/ma15030701>
- Majeed, A., Ahmed, A., Salam, A., & Sheikh, M.Z. (2019). Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *Int. J. Light. Mater. Manuf.* 2, 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.08.001>

- Medvedev, A.E., Maconachie, T., Leary, M., Qian, M., & Brandt, M. (2022). Perspectives on additive manufacturing for dynamic impact applications. *Mater. Des.* 221, 110963. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110963>
- Meena, R.P., Yuvaraj, N., & Vipin, V. (2024). Investigations and Optimization of Cold Metal Transfer-based WAAM Process Parameters for Fabrication of Inconel 718 Samples using Response Surface Methodology. *Arab. J. Sci. Eng.* 49, 15177–15191. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08947-1>
- Mohd Abbas, N., Solomon, D.G., & Fuad Bahari, M. (2007). A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47, 1214–1228. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026>
- Murali Krishnan, R., Ranganathan, R., Saiyathibrahim, A., Velu, R., Jatti, V.S., Mohan, D.G., & Vijayakumar, P. (2025). Achieving multi-response optimization of control parameters for Wire-EDM on additive manufactured AlSi10Mg alloy using Taguchi-grey relational theory. *Eng. Res. Express* 7. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ada225>
- Muthuramalingam, T., & Mohan, B. (2015). A review on influence of electrical process parameters in EDM process. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 15, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.02.009>
- Niaki, M.K., Torabi, S.A., & Nonino, F. (2019). Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *J. Clean. Prod.* 222, 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.019>
- Oniszczyk-Świercz, D., & Świercz, R. (2023). Effects of Wire Electrical Discharge Finishing Cuts on the Surface Integrity of Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy. *Materials (Basel)*. 16. <https://doi.org/10.3390/ma16155476>
- Ozener, O.C., Dursun, G., & Akbulut, G. (2021). Effects of wire-EDM parameters on the surface integrity and mechanical characteristics of additively manufactured Inconel 939. *Mater. Today Proc.* 38, 1861–1865. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.486>
- Padovano, E., Badini, C., Pantarelli, A., Gili, F., & D’Aiuto, F. (2020). A comparative study of the effects of thermal treatments on AlSi10Mg produced by laser powder bed fusion. *J. Alloys Compd.* 831, 154822. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154822>
- Pinkerton, A.J. (2016). [INVITED] Lasers in additive manufacturing. *Opt. Laser Technol.* 78, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.025>
- R, M.K., Ranganathan, R., A, S., Velu, R., Jatti, V.S., & Mohan, D.G. (2024). Multi-response Optimisation of Wire-EDM for SLMed AlSi10Mg using Taguchi-Grey Relational Theory 1–28.

- Roberto, A., & Bineli, R. (2011). Direct Metal Laser Sintering (Dmls): *Technology for Design and Construction of Microreactors*.
- Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M.I.H., & Haq, M.I.U. (2022). Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. *Sustain. Oper. Comput.* 3, 258–274. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.001>
- Routara, B.C., Das, D., Satpathy, M.P., Nanda, B.K., Sahoo, A.K., & Singh, S.S. (2020). Investigation on machining characteristics of T6-Al7075 during EDM with Cu tool in steady and rotary mode. *Mater. Today Proc.* 26, 2143–2150. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.462>
- Saha, S., Maity, S.R., & Dey, S. (2022). Machinability Study of A286 Superalloy for Complex Profile Generation Through Wire Electric Discharge Machining. *Arab. J. Sci. Eng.* 48, 3241–3253. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07028-5>
- Şahin, İ. Baki, Yilan, F., & Urtekin, L. (2023). Optimisation on machining parametres by EDM of TiN coated Ti6Al4V alloys. *Adv. Mater. Process. Technol.* <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2184585>
- Sahu, A.K., & Mahapatra, S.S. (2020). Performance analysis of tool electrode prepared through laser sintering process during electrical discharge machining of titanium. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 106, 1017–1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04675-1>
- Şentürk, E., Alparslan, C., Bayraktar, Ş., Korkmaz, M.E., & Günay, M. (2025). A comprehensive review on sustainability in EDM process of additive manufactured materials. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 245. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116626>
- Shahrubudin, N., Lee, T.C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manuf.* 35, 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- Sheshadri, R., Nagaraj, M., Lakshmikanthan, A., Chandrashekarappa, M.P.G., Pimenov, D.Y., Giasin, K., Prasad, R.V.S., & Wojciechowski, S. (2021). Experimental investigation of selective laser melting parameters for higher surface quality and microhardness properties: taguchi and super ranking concept approaches. *J. Mater. Res. Technol.* 14, 2586–2600. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.144>
- Singh, H., & Garg, R. (2009). Effects of process parameters on material removal rate in WEDM Manufacturing and processing. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 32, 70–74.
- Song, K.Y., Kim, G.H., & Shin, J. (2023). A hybrid manufacturing process for a microgripper using selective laser melting 3D printing and wire EDM. *J. Mech. Sci. Technol.* 37,

- 1931–1937. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0330-z>
- Takata, N., Kodaira, H., Sekizawa, K., Suzuki, A., & Kobashi, M. (2017). Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments. *Mater. Sci. Eng. A* 704, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.029>
- Urtekin, L., Şahin, İ.B., Yılan, F., Kuloğlu, E., & Genç, A. (2024). Investigation and Optimization of Cutting Performance of High Chrome White Cast Iron by Wire Erosion. *Arab. J. Sci. Eng.* 49, 1585–1596. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07930-6>
- Vaidyaa, P., John, J.J., Puviyarasan, M., Prabhu, T.R., & Prasad, N.E. (2021). Wire EDM Parameter Optimization of AlSi10Mg Alloy: Processed by Selective Laser Melting. *Trans. Indian Inst. Met.* 74, 2869–2885. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02344-0>
- Veljković, V.B., Veličković, A. V., Avramović, J.M., & Stamenković, O.S. (2019). Modeling of biodiesel production: Performance comparison of Box–Behnken, face central composite and full factorial design. *Chinese J. Chem. Eng.* 27, 1690–1698. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.08.002>
- Wu, J., Wang, X.Q., Wang, W., Attallah, M.M., & Loretto, M.H. (2016). Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg. *Acta Mater.* 117, 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.012>
- Yılan, F., Ekici, R., & Urtekin, L. (2024). Recent advances in the AlSi10Mg materials fabrication by selective laser melting: process parameters, optimization, low-velocity and ballistic impact responses. *Prog. Addit. Manuf.* <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00856-x>

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Yağmur Yasin SARI
Uyruğu:	T.C
Orcid Numarası:	0009-0006-7817-386X

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite:	Konya Teknik Üniversitesi
Fakülte:	Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Bölümü:	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2023
Yüksek Lisans	
Üniversite:	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü:	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı:	Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mezuniyet Yılı:	2025

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
Sarı, Y. Y., & Urtekin, L. (2024). Savunma sanayinde kullanılan takviye malzemeler: Genel bir inceleme. In <i>Proceedings Book (Vol. 1, pp. 1244–1253)</i> of the <i>4th International Congress on Scientific Research</i> (26–28 April 2024, Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir, Türkiye). IKSAD Publishing House. ISBN 978-625-367-709-1