



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



LPBF yöntemiyle üretilen AlSi10Mg çekme numunelerinin kırılma yüzeylerindeki kusur mekanizmalarının enerji yoğunluğuna bağlı olarak SEM ve EDS ile incelenmesi

Investigation of defect mechanisms on fracture surfaces of LPBF-produced AlSi10Mg tensile specimens depending on energy density using SEM and EDS

Yazar(lar) (Author(s)): Nafel DOGDU¹

ORCID¹: 0000-0001-8172-0832

To cite to this article: Dogdu N., “LPBF Yöntemiyle Üretilen AlSi10Mg Çekme Numunelerinin Kırılma Yüzeylerindeki Kusur Mekanizmalarının Enerji Yoğunluğuna Bağlı Olarak SEM ve EDS ile İncelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290319:1-10 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Dogdu N., “LPBF Yöntemiyle Üretilen AlSi10Mg Çekme Numunelerinin Kırılma Yüzeylerindeki Kusur Mekanizmalarının Enerji Yoğunluğuna Bağlı Olarak SEM ve EDS ile İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290319:1-10 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1777073

LPBF Yöntemiyle Üretilen AlSi10Mg Çekme Numunelerinin Kırılma Yüzeylerindeki Kusur Mekanizmalarının Enerji Yoğunluğuna Bağlı Olarak SEM ve EDS ile İncelenmesi

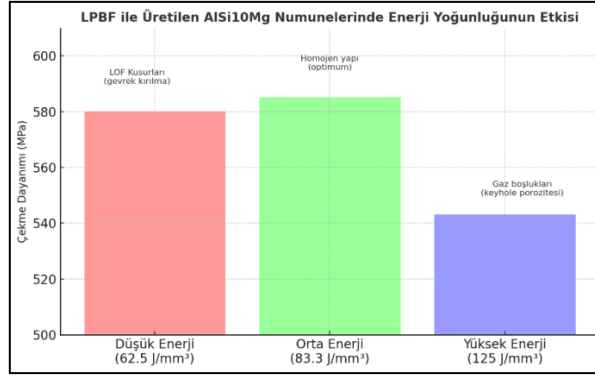
Investigation of Defect Mechanisms on Fracture Surfaces of LPBF-Produced AlSi10Mg Tensile Specimens Depending on Energy Density Using SEM and EDS

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ *TR/EN) Enerji yoğunluğunun kırılma mekanizmasına etkisi araştırıldı. The effect of energy density on fracture mechanisms was studied.*
- ❖ *(TR/EN) LOF, porozite ve oksidasyon SEM/EDS ile belirlendi. LOF, porosity, and oxidation were identified via SEM/EDS.*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

LPBF yöntemiyle farklı enerji yoğunluklarında üretilen AlSi10Mg çekme numunelerinin kırılma yüzeylerindeki kusur mekanizmaları SEM ve EDS analizleriyle incelenmiştir.



Şekil. LPBF yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numunelerinde enerji yoğunluğunun çekme dayanımı ve kusur mekanizmaları üzerindeki etkisi /Figure. Effect of energy density on tensile strength and defect mechanisms of LPBF produced AlSi10Mg specimens

Amaç (Aim)

Enerji yoğunluğu ile kırılma yapısı, porozite ve dayanım ilişkisi incelenmiştir./ Energy density vs. fracture, porosity, and strength is examined.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Üç enerji düzeyinde üretilen numuneler kırılıp SEM ve EDS ile analiz edilmiştir./ Samples at three energy levels were fractured and analyzed using SEM and EDS.

Özgünlük (Originality)

Bu çalışma, enerji yoğunluğunun kırılma ve kusurlara etkisini SEM/EDS ile inceleyen nadir çalışmalardan biridir./ This study is among the few analyzing how energy density affects fracture and defects using SEM/EDS.

Bulgular (Findings)

LOF düşükte, boşluk yüksek yoğunlukta; 585 MPa orta yoğunlukta elde edildi./ LOF at low, pores at high; 585 MPa at medium density.

Sonuç (Conclusion)

En iyi mekanik özellikler orta enerji yoğunluğunda elde edilmiştir./ Optimal performance was achieved at medium energy density

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Yazar, çalışmada etik kurul veya özel izin gerektiren bir durum olmadığını beyan eder. / The author declares that no ethical or special permissions were required for this study.

LPBF Yöntemiyle Üretilen AlSi10Mg Çekme Numunelerinin Kırılma Yüzeylerindeki Kusur Mekanizmalarının Enerji Yoğunluğuna Bağlı Olarak SEM ve EDS ile İncelenmesi

Nafel DOĞDU^{1*}

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Antalya, Türkiye

(Geliş/Received : 02.09.2025 ; Kabul/Accepted : 01.11.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 24.11.2025)

ÖZ

Bu çalışma, Lazer Toz Yatağı Füzyonu (LPBF) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarında enerji yoğunluğunun kırılma davranışı ve mikroyapısal kusur oluşumu üzerindeki etkisini incelemektedir. Üç farklı enerji yoğunluğu seviyesinde üretilen çekme numuneleri, çekme testleri sonrasında Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) yöntemleriyle analiz edilmiştir. Sonuçlar, düşük enerji yoğunluğu koşullarında birleşme eksiklikleri (LOF) ve ergimemiş partiküllerin, yüksek enerji yoğunluğunda ise gaz boşlukları ve oksit kapanımlarının belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Orta enerji yoğunluğu aralığında en homojen mikroyapı, minimum porozite ve en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. Bulgular, enerji yoğunluğu ile mekanik performans arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulunduğunu ve optimum parametre aralığının mikroyapısal kusurları minimize ettiğini ortaya koymuştur. Bu durum, LPBF sürecinde üretim parametrelerinin hassas kontrolünün kırılma davranışının iyileştirilmesi açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: AlSi10Mg, EDS, enerji yoğunluğu, LPBF, SEM.

Investigation of Defect Mechanisms on Fracture Surfaces of LPBF-Produced AlSi10Mg Tensile Specimens Depending on Energy Density Using SEM and EDS

ABSTRACT

This study investigates the effect of energy density on fracture behavior and microstructural defect formation in AlSi10Mg alloys produced by the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) process. Tensile specimens manufactured at three different energy density levels were analyzed after tensile testing using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The results revealed that lack of fusion defects (LOF) and unmelted particles were predominant at low energy density, while gas pores and oxide inclusions increased significantly at high energy density. At the medium energy density range, the most homogeneous microstructure, minimum porosity, and the highest tensile strength were achieved. The findings demonstrated a non-linear relationship between energy density and mechanical performance, showing that the optimum parameter range minimized microstructural defects. This highlights the critical importance of precise control of LPBF process parameters in improving fracture behavior.

Keywords: AlSi10Mg, EDS, energy density, LPBF, SEM.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Lazer Toz Yatağı Füzyonu (LPBF), metal alaşımların yüksek hassasiyetle katmanlı üretimine olanak tanıyan öncü teknolojilerden biridir. Bu yöntem, ince tabakalar hâlinde yayılan metal tozlarının yüksek enerjili lazer ışınıyla seçici olarak ergitilmesi esasına dayanmakta olup yüksek yoğunluk, mekanik dayanım ve yüzey kalitesi gibi üstün özellikler sunmaktadır.

LPBF ile üretimin AlSi10Mg alaşımı üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde araştırılmış olup, özellikle ısı işlemin mikroyapı ve korozyon davranışına üzerine etkisi önemli bulgular sunmaktadır [1]. Ergime havuzu sınırlarının

kontrolü ile süneklik özelliklerinin iyileştirilebileceği gösterilmiş, bu durum AlSi10Mg'nin mekanik performansında belirgin artışlar sağlamıştır [2]. Soğuk hacim şekillendirme koşulları altında farklı test yöntemleriyle yapılan değerlendirmeler, bu tür alaşımların şekillenme davranışlarını ortaya koymuştur [3].

LPBF süreci sırasında kullanılan parametrelerin AlSi10Mg'nin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir [4]. Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg plakalarının MIG kaynağıyla birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ndogdu@akdeniz.edu.tr

kaynak parametrelerinin optimizasyonu ile başarılı birleşimlerin elde edilebildiğini göstermiştir [5]. Hacimsel enerji yoğunluğunun hem çekme özellikleri hem de gözeneklilik gibi mikroyapısal karakteristikler üzerindeki etkisi detaylı olarak değerlendirilmiştir [6].

Porozite, deformasyon ve çatlak ilerlemesi arasındaki etkileşimler, LPBF ile üretilen AlSi10Mg parçalarının yük altındaki davranışlarını anlamada kilit rol oynamaktadır [7]. Süreç parametrelerinin optimizasyonunda istatistiksel yaklaşımlar, hem üretim verimliliğini hem de mekanik kaliteyi artırmak için kullanılmaktadır [8]. Seramik partiküllerle güçlendirilmiş AlSi10Mg kompozitlerinde hem dayanım hem süneklik özellikleri aynı anda iyileştirilebilmiştir [9]. LPBF üretiminde yerel termal geçmişin mikroyapıya etkisi de önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır [10].

Çok malzemeli LPBF üretimlerinde ara yüzey bağlanmaları, difüzyon davranışları ve mekanik uyumluluk gibi konular, mikro düzeyde detaylı olarak analiz edilmiştir [11]. Seramik katkılarla zenginleştirilen LPBF yapıların tane yapısı ve sınır karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalar, bu tür hibrit yapıların kontrolü açısından önemli ipuçları sunmaktadır [12]. LPBF ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımının yorulma davranışı, sürecin tekrarlanabilirliği açısından halen araştırılmaya devam eden önemli bir parametredir [13].

Bu bağlamda, AlSi10Mg'nin LPBF ile üretimi sırasında sıkça karşılaşılan kusurlar ve mikroyapı değişimleri, sürecin geleneksel yaklaşımlarla kıyaslanmasını gerekli kılmaktadır [14]. Üretim parametrelerinin geometrik toleranslar üzerindeki etkisi deneysel olarak doğrulanmış ve optimizasyonla iyileştirilmiştir [15]. Çekme dayanımının artırılması için yapılan deneysel çalışmalar, Taguchi yöntemi gibi istatistiksel analiz tekniklerinin etkili olduğunu göstermiştir [16]. Ayrıca, farklı ısı işlem rejimlerinin yorulma çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [17].

Mikroyapının yönelimi ve ısı işlem gibi faktörlerin, kırılma davranışı üzerindeki etkisi doğrudan deneysel verilerle gösterilmiştir [18]. X-ışını tomografi ile desteklenen analizler, LPBF AlSi10Mg yapılarında çatlak oluşumu ve ilerlemesini gözler önüne sermiştir [19]. İçsel kusurların, mekanik yüklemeye altındaki anizotropik kopma davranışları üzerindeki etkileri ise detaylı olarak rapor edilmiştir [20]. Üretim atmosferinin mikroyapı oluşumu üzerindeki rolü, özellikle argon ve azot ortamlarının karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir [21].

Hücresel yapı oluşumunun enerji yoğunluğu ile ilişkisi de LPBF parametrelerinin kontrol edilmesinde kilit rol oynamaktadır [22]. Katman bazlı yeniden ergitme uygulamaları ile yüzey kalitesi ve mikroyapı özellikleri iyileştirilmiştir [23]. In-situ çekme testleriyle LPBF yapılarının deformasyon ve kırılma davranışları gerçek zamanlı olarak gözlemlenmiştir [24,25]. Silikon modifikasyonu ve tane inceltme işlemlerinin mekanik özelliklere etkisi, LPBF süreç tasarımında dikkate

alınması gereken diğer parametreler arasında yer alır [26].

Eklemeli imalat süreçlerinde maliyet modellemeleri ve süre analizleri, üretim verimliliğinin artırılması açısından önem arz etmektedir [27]. Kullanılan toz partiküllerinin özellikleri ve üretim yöntemleri, nihai ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir [28]. Tel beslemeli WAAM süreçleriyle yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, farklı tel türlerinin optimum üretim parametreleri açısından karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır [29]. Son olarak, trabeküler yapılarda basma ve kayma dayanımı gibi özellikler, LPBF ile üretilen karmaşık biyomedikal yapılar için büyük önem taşımaktadır [30].

Literatürde yapılan birçok çalışmada, LPBF yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarında farklı enerji yoğunluklarının mikro yapı, porozite ve mekanik dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır [6, 13, 17, 20]. Ancak bu çalışmaların çoğu, kırık yüzey morfolojisini yalnızca dolaylı olarak ele almakta, enerji yoğunluğuna bağlı kırılma davranışını doğrudan ilişkilendirmemektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürdeki benzer AlSi10Mg LPBF çalışmalarında rapor edilen tipik porozite türleri ve çekme dayanımı aralıklarıyla karşılaştırıldığında, enerji yoğunluğuna bağlı kırılma morfolojisinin doğrudan analiz edilmesi yönüyle özgün bir katkı sunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Numune Üretimi (Sample Production)

Bu çalışmada incelenen AlSi10Mg alaşımına ait çekme numuneleri, Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM) bünyesinde bulunan Concept Laser M2 CUSING marka LPBF sistemi kullanılarak üretilmiştir. Üretimde kullanılan AlSi10Mg tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Üretim işlemleri argon atmosferinde ve AlSi10Mg tozu 120 °C'de 10 dakika ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Her katman için lazer tarama açısı 1. Numunede 17°, 2. Numunede 29° ve 3. Numunede 67° uygulanmıştır. Sürekli tarama stratejisi ve yatay üretim yönü kullanılmıştır [16]. Numuneler, tabladan çıkarıldıktan sonra yüzeydeki destek izleri temizlenmiş ve numaralandırılarak mekanik testlere hazırlanmıştır.

Toz ticari atomize alüminyum bazlı alaşımlardan elde edilmiş olup, kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir. Toz bileşimi, literatürde belirtilen standartlara uygundur ve özellikle Si oranı (~10 ağırlık, %) alaşımın mekanik performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır [16].

Çizelge 1. AlSi10Mg tozunun kimyasal bileşimi (The chemical composition of the AlSi10Mg feedstock powder) [16]

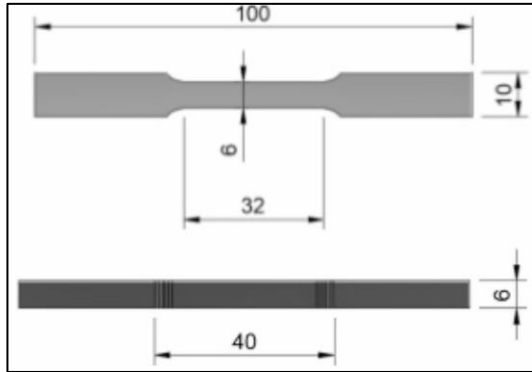
Element	Ağırlık, %
Si	10.21
Mg	0.38
Mn	<0.005
Cu	<0.005
Fe	0.1
Zn	0.0073
Ni	0.0059
Ti	<0.005
Al	Balance(Kalan)
Pb	<0.005

Şekil 1, AlSi10Mg tozunun boyutsal analizini göstermektedir.

Çizelge 2. Üretilen çekme numuneleri için İşleme parametreleri, Çekme dayanımı ve enerji yoğunluğu (Processing parameters, tensile stress, and energy density for the fabricated tensile specimens)

Numune No.	Lazer Gücü (W)	Tarama Mesafesi (mm)	Tarama Hızı (mm/s)	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama, %	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
1	200	0.08	800	0.025	543.055	3.375	125
2	200	0.08	1200	0.025	585.000	4.81	83.33
3	200	0.08	1600	0.025	580.000	3.81	62.5

Bu değerlere bağlı olarak üretilen çekme numunesi Şekil 2.'de gösterildiği gibi ASTM E8 standardına uygun olarak ölçüler, mm cinsinden üretilmiştir.

**Şekil 2.** ASTM E8 standardına uygun çekme testi numunesinin boyutları ve şematik gösterimi (The dimensions and schematic representation of the tensile test specimen prepared in accordance with the ASTM E8 standard) [16]

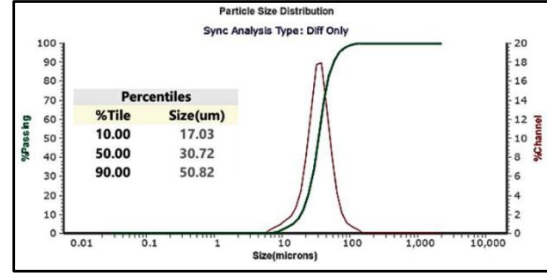
Üretim sonrasında Çekme testleri, 50 kN kapasiteli TENSON WDW-T50 çekme testi cihazı ile 0.5 mm/dak. çene hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri sonrasında kırılan numunelerden alınan parçalar, mikroyapısal analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla SEM ve EDS incelemelerine tabi tutulmuştur.

2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) Analizleri

(Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) Analyses)

Bu analizler İYTE Tümlleşik Araştırma Merkezleri (İYTE TAM) bünyesindeki Malzeme Araştırma Merkezinde (MAM) gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçların, literatürde rapor edilen AlSi10Mg tozunun özellikleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir [4,6,10,28].

**Şekil 1.** Parçacık boyut dağılımı (Particle size distribution)

Deneyler sırasında, 0,10 mm lazer çapı alınmıştır [16]. Üretim sürecinde ve sonrasında kullanılan parametreler Çizelge 2' de gösterilmiştir.

Kırılma yüzeyleri Zeiss EVO MA10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 15kV ivmelenendirme voltajı, ikincil elektron ve geri-saçılan elektron dedektörleri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca SEM cihazına bağlı EDAX enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) kullanılarak kırılma yüzeyleri üzerinde mikrokimyasal analizler gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, aynı cihazla entegre çalışan EDAX EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) sistemi ile kırık yüzeylerdeki mikrokimyasal bileşimler analiz edilmiştir. Bu yöntem, özellikle oksit kaparımları, Si segregasyonu ve mikro boşluk oluşumunun kimyasal karakterizasyonu için kullanılmıştır.

Analizlerde, üç farklı enerji yoğunluğunda üretilen numunelerin kırık yüzeylerinden şu veriler elde edilmiştir:

- Genel görünüm (makro seviye),
- İncelenecek bölgenin yüksek çözünürlüklü SEM görüntüsü,
- Aynı bölgeden alınan EDS spektrumları.

Enerji yoğunluğunun artışıyla birlikte, önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi [6,17], gaz boşlukları ve keyhole tipi porozite oluşumu gözlenmiştir. Düşük enerji yoğunluğunda ise LOF tipi birleşme eksikliklerinin daha baskın olduğu belirlenmiştir [12,14]. Oksitlenmiş bölgeler, genellikle Al ve O elementlerinin lokal konsantrasyonu ile tanımlanmıştır [20].

Bu yöntem sayesinde, üretim parametreleri ile kırık yüzeyde gözlenen kusurlar arasında mikroyapısal düzeyde nedensel ilişkiler kurulması hedeflenmiştir

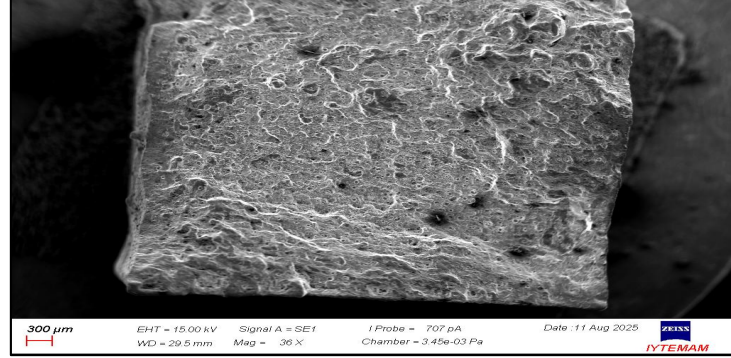
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde üç farklı enerji yoğunluğuna sahip AlSi10Mg numunelerin mikroyapı karakterizasyonu ve çekme sonrası kırılma yüzeylerine ilişkin SEM/EDS analizleri sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, Çekme

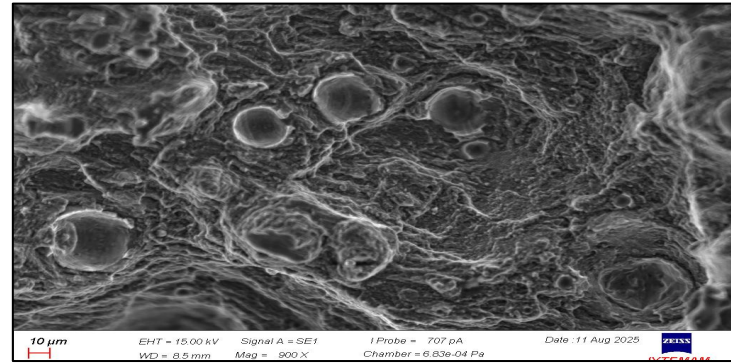
dayanımı, mikroyapısal kusurlar ve üretim parametreleri ile ilişkilendirilmiştir.

3.1. Numune 1 (Sample 1)

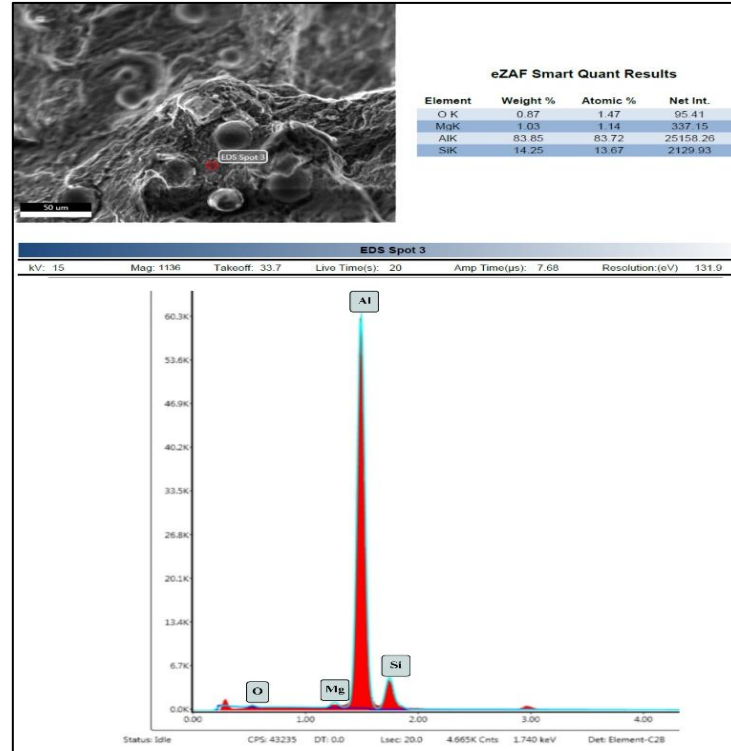
Şekil 3-5’ de kırık numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizi görülmektedir.



Şekil 3. 1 nolu kırık numunenin genel görünüşü (General appearance of fracture sample No. 1)



Şekil 4. 1 nolu kırık numunenin yüksek çözünürlüklü ve büyütülmüş SEM görünümü (High-resolution and magnified SEM image of fracture sample No. 1)



Şekil 5. 1 nolu kırık numunenin EDS analizi (EDS analysis of fracture sample No. 1)

Şekil 3–5’te kırık numunenin genel ve büyütülmüş SEM görüntüleri ile EDS analizi verilmiştir. Yüksek enerji yoğunluğu (125 J/mm^3), derin bir eriyik havuzu oluşumuna neden olmuş ve bu durum gaz kapanımları ile keyhole tipi porozite oluşumunu artırmıştır. SEM görüntülerinde (Şekil 3-4), yapı genel olarak yoğun olsa da küçük çaplı, küresel boşluklar belirgin biçimde izlenmiştir. Bu tür boşluklar, literatürde metal buharının tekrar katılaşarak kapanmasıyla ilişkilendirilmekte ve keyhole dengesizliği olarak tanımlanmaktadır [13,18].

EDS analizlerinde (Şekil 5), Al_2O_3 birikintilerine ve Si zenginleşmelerine rastlanmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklıkta oksijenle temas sonucu oluşan yüzey oksitlenmesiyle ilişkilendirilmiştir. Benzer biçimde, Wang ve ark. [18] ile Wu ve ark. [20] tarafından yapılan çalışmalarda da, oksit kapanımlarının mikro çatlak başlatıcı olarak görev yapabildiği ve kırılma davranışını tetikleyebildiği bildirilmiştir.

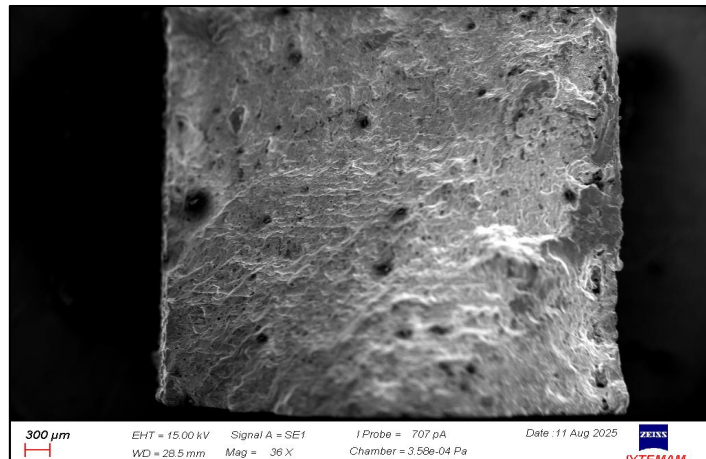
Numune 1, $543,05 \text{ MPa}$ çekme dayanımı ve $\%3,375$ uzama değeriyle Çizelge 2’de gösterildiği üzere orta düzeyde süneklik sergilemiştir. Yüksek enerji yoğunluğu keyhole porozitesini artırarak dayanımı bir miktar düşürmüştür; ancak düşük enerji yoğunluğundaki Numune 3’e kıyasla daha düşük bir uzama göstermiştir.

Dolayısıyla Şekil 3–5’te izlenen kırık yüzey morfolojisi, Çizelge 2’deki çekme ve $\%$ uzama verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, enerji yoğunluğu, dayanım ve süneklik arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir.

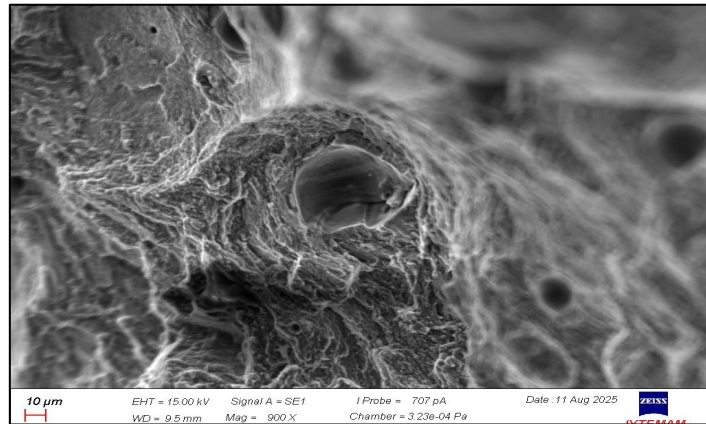
Kırık yüzey değerlendirmesine göre, yüksek enerji yoğunluğu aşırı erimeye ve keyhole tipi poroziteye neden olmuştur. Bu boşluklar, çekme yükü altında çatlak başlatıcı gibi davranarak kırılmanın bu bölgelerden başlamasına yol açmıştır. EDS analizlerinde tespit edilen oksit bölgeleri gevrek kırılma davranışına katkı sağlamıştır. Bu tür oksit kapanımları, LPBF sürecinde yaygın olarak gözlenmekte ve mikro çatlak başlatıcı olarak görev yapabilmektedir [13,18,20]. Kırık yüzeylerde hem dimple yapıları (sünek kırılma göstergesi) hem de klivaj düzlemleri (gevrek kırılma göstergesi) birlikte izlenmiştir. Numune 1’de sünek ve gevrek kırılma bölgeleri karışık bir morfoloji sergilerken, Numune 3’te klivaj düzlemleri daha yoğun görülmüş ve gevrek kırılma daha baskın olmuştur. Bu durum, çekme sonuçları ve uzama değerleriyle uyumludur.

3.2. Numune 2 (Sample 2)

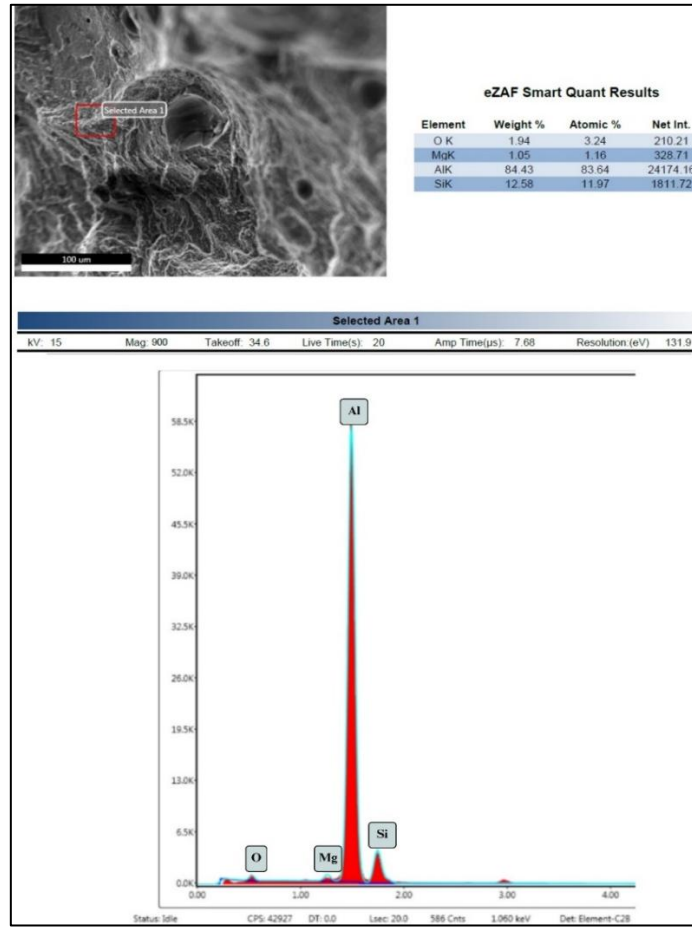
Şekil 6-8’ de kırık numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizi görülmektedir.



Şekil 6. 2 nolu kırık numunenin genel görünüşü (General appearance of fracture sample No. 2)



Şekil 7. 2 nolu kırık numunenin yüksek çözünürlüklü ve büyütülmüş SEM görünümü High-resolution and magnified SEM image of fracture sample No. 2)



Şekil 8. 2 nolu kırık numunenin EDS analizi (EDS analysis of fracture sample No. 2)

Şekil 6–8’de, 2 numaralı kırık numunenin genel ve büyütülmüş SEM görüntüleri ile EDS analizi verilmiştir. Bu numune, homojen mikroyapısı ve yüksek mekanik dayanımı ile öne çıkmaktadır. SEM analizlerinde düzgün tarama izleri, iyi erimiş bölgeler ve sınırlı porozite gözlenmiştir. Bu durum, enerji yoğunluğunun optimum aralıkta ($83,3 \text{ J/mm}^3$) seçilmesiyle doğrudan ilişkilidir [1,4].

EDS analizinde (Şekil 8), yüzeyin genel olarak homojen olduğu, oksidasyonun sınırlı kaldığı ve yalnızca hafif Si zenginleşmelerine rastlandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, argon atmosferinde gerçekleştirilen üretim sırasında oksijen seviyesinin $<0.1\%$ sınırında tutulmasının, oksit kaplanmalarını ve mikroyapısal kusurları büyük ölçüde engellediğini göstermektedir. Benzer şekilde Hyer ve ark. [4] tarafından da optimum enerji yoğunluğu aralığında üretilen AlSi10Mg numunelerinde porozitenin azaldığı ve mikroyapısal bütünlüğün korunduğu rapor edilmiştir.

Numune 2, 585 MPa çekme dayanımı ve $\%4,81$ uzama değeriyle en yüksek mekanik performansı sergilemiştir. Bu durum, gözeneklerin ve oksit kaplanmalarının sınırlı kalmasıyla doğrudan ilişkilidir. Çizelge 2’de de görüldüğü üzere, bu numune diğer numunelere kıyasla

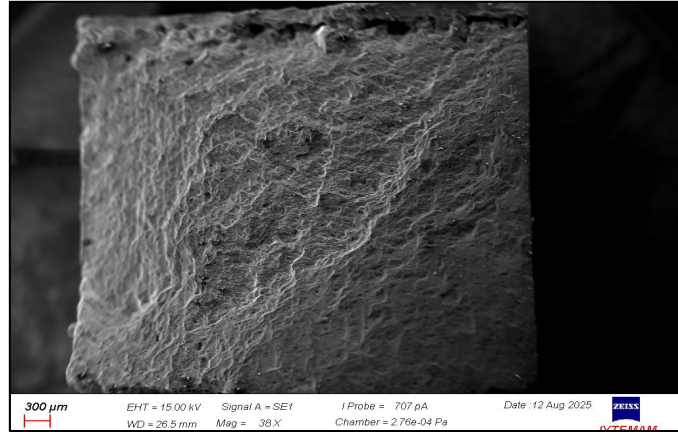
dayanım–süneklik dengesi bakımından en uygun sonucu vermiştir.

Kırık yüzey değerlendirmesi:

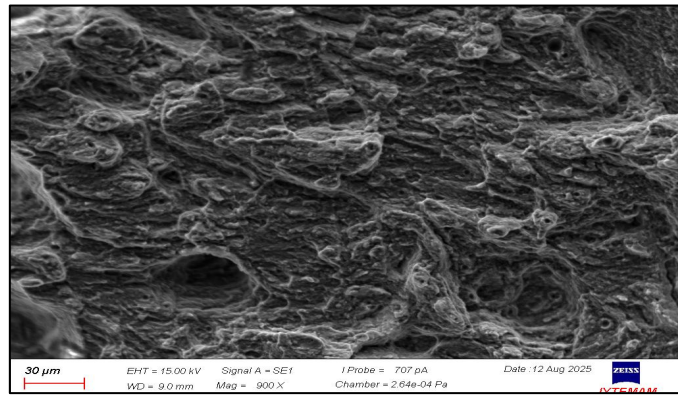
Numune 2’nin kırık yüzeyinde dimple yapılarının baskın olduğu ve tipik sünek kırılma davranışı sergilendiği belirlenmiştir. Mikro gözeneklerin birleşmesiyle oluşan bu yapılar, çatlak ilerlemesini sünek deformasyon mekanizmalarıyla açıklamaktadır. Si segregasyonu ve oksidasyonun minimum seviyede kalması, kırılmanın gevrek bileşenlerden ziyade plastik deformasyon kontrollü bir süreçte gerçekleştiğini göstermektedir. Bu gözlem, Jatti ve ark. [6] tarafından da bildirilen optimum enerji yoğunluğu koşullarında sünek kırılma karakteristiğiyle uyumludur. Buna karşılık, düşük enerji yoğunluğuna sahip Numune 3’te klivaj düzlemlerinin daha yoğun olduğu ve gevrek kırılma eğiliminin belirginleştiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, Şekil 6–8’de gözlenen kırık yüzey morfolojisi, Çizelge 2’deki çekme ve uzama verileriyle birlikte değerlendirildiğinde, Numune 2’nin süneklik açısından en dengeli davranışı sergilediği sonucuna varılmıştır.

3.3. Numune 3

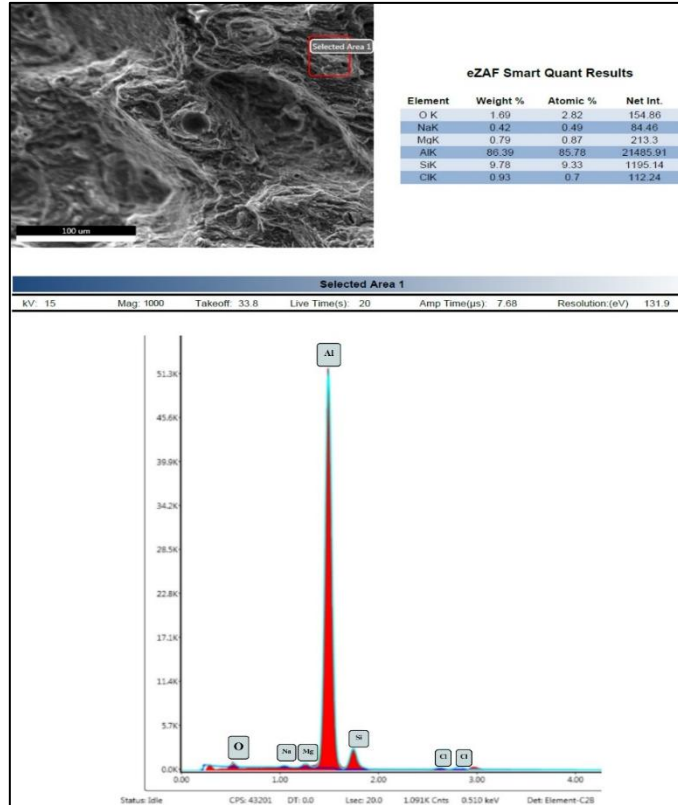
Şekil 9- 11’de kırık numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizi görülmektedir.



Şekil 9. 3 nolu kırık numunenin genel görünüşü (General appearance of fracture sample No. 3)



Şekil 10. 3 nolu kırık numunenin yüksek çözünürlüklü ve büyütülmüş SEM görünümü (High-resolution and magnified SEM image of fracture sample No. 3)



Şekil 11. 3 nolu kırık numunenin EDS analizi (EDS analysis of fracture sample No. 3)

SEM görüntülerinde (Şekil 9 ve 10), lack of fusion (LOF) kaynaklı kusurlar açık biçimde görülmektedir. Özellikle tarama izleri arasında birleşme eksiklikleri, katmanlar arası boşluklar ve ergimemiş toz partikülleri belirgin biçimde izlenmiştir. Düşük enerji yoğunluğu ($62,5 \text{ J/mm}^3$) nedeniyle lazer, metal tozunu yeterli derinlikte ergitememekte ve bu durum LOF kusurlarıyla sonuçlanmaktadır. Katmanlar arası bağ oluşumunun zayıf kalması, kırılma düzlemleri boyunca ayrılmayı kolaylaştırmıştır [13,18].

EDS analizine bakıldığında (Şekil 11), yüksek oksijen içeriği ve bazı bölgelerde silikon zenginleşmeleri tespit edilmiştir. Bu bulgu, yetersiz ergime sırasında toz yüzeyinde kalan oksitlerin birleşmemesi ve kapalı bölgelerde gaz birikimi sonucu oluşan oksidasyonla ilişkilendirilebilir. Benzer şekilde, literatürde oksit kapanımlarının çatlak başlatıcı bölgeler oluşturduğu ve kırılma kırılma davranışına katkı sağladığı belirtilmiştir [18,20,24].

Numune 3, 580 MPa çekme dayanımı ve %3,81 uzama değeri ile dayanım açısından görece yüksek bir sonuç vermiştir. Ancak bu dayanım, yalnızca daha yoğun bölgelerin yük taşınmasıyla açıklanabilir. Süneklik, LOF kusurlarının çatlak başlatıcı rolü nedeniyle belirgin biçimde azalmıştır. Çizelge 2 verileri de bu sonucu desteklemekte olup, düşük enerji yoğunluğunun sünekliği ciddi ölçüde sınırladığı açıkça görülmektedir.

Kırık yüzey değerlendirmesi:

Kırık yüzeylerde hem sünek kırılmanın göstergesi olan dimple yapıları hem de gevrek kırılmayı temsil eden klivaj düzlemleri izlenmiştir. Ancak bu numunede klivaj düzlemleri daha baskın olup, gevrek kırılma davranışı ön plana çıkmıştır. Bu durum, düşük enerji yoğunluğu nedeniyle oluşan LOF kusurlarının sünek deformasyonu sınırlandırdığını ve kırılma mekanizmasını daha gevrek hale getirdiğini göstermektedir.

Kırılma nedeni:

Düşük enerji yoğunluğu, eriyik havuzlarının yeterince birleşmemesine ve katmanlar arası bağlanmanın zayıf kalmasına yol açmıştır. Bu nedenle LOF kusurları oluşmuş, önceden zayıflamış bölgelerden ani ve gevrek kırılma gelişmiştir. SEM görüntülerinde gözlenen keskin kenarlı ve düz kırık yüzeyler ile yoğun klivaj düzlemleri, bu kırılma mekanizmasını açık biçimde doğrulamaktadır. Bu gözlemler, Valim ve ark. [17] ile Wu ve ark. [20] tarafından bildirilen düşük enerji yoğunluğu koşullarında gevrek kırılma eğilimiyle uyum içindedir.

3.4. Kırık Numunelerin Genel Değerlendirmesi (General Evaluation of Broken Samples)

➤ Düşük enerji yoğunluğu ($62,5 \text{ J/mm}^3$) koşullarında, lack of fusion (LOF) kusurları baskın hâle gelmiştir. Bu durum, çekme dayanımı görece yüksek olsa bile (yaklaşık 580 MPa) sünekliğin belirgin biçimde azalmasına (%3,81) neden olmuştur. Kırık yüzeylerde belirgin klivaj düzlemleri ve gevrek kırılma bölgeleri gözlenmiştir.

- Yüksek enerji yoğunluğu (125 J/mm^3) seviyelerinde, keyhole porozitesi ve oksit kapanımları oluşmuştur. Bu kusurlar, çekme dayanımını sınırlamış (543 MPa) ve sünekliği orta düzeyde (%3,375) tutmuştur. Kırık yüzeylerde dimple ve klivaj yapılarının birlikte görülmesi, sünek ve gevrek kırılma mekanizmalarının birlikte etkili olduğunu göstermektedir.
- Orta enerji yoğunluğu ($83,3 \text{ J/mm}^3$) aralığında, eriyik havuzu dengeli bir biçimde oluşmuş, gözenek ve oksit miktarı minimum seviyede kalmıştır. Bu nedenle en yüksek çekme dayanımı (585 MPa) ve en dengeli uzama (%4,81) elde edilmiştir. Kırık yüzeylerde dimple yapılarının baskın olması, tipik sünek kırılma davranışını göstermektedir.

Genel değerlendirme olarak, enerji yoğunluğu ile mekanik davranış arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmüştür. Yetersiz enerji yoğunluğu, LOF kusurlarını artırarak sünekliği düşürürken; aşırı enerji yoğunluğu, keyhole porozitesi ve oksit kapanımlarıyla dayanımı sınırlamaktadır. Optimum enerji yoğunluğu aralığında, gözenek oluşumu ve oksidasyon kontrol altına alınarak en iyi dayanım-süneklik dengesi elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımından üretilen çekme numuneleri üzerinde enerji yoğunluğunun mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Farklı enerji yoğunluğu seviyelerinde üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen SEM ve EDS analizleri, üretim parametrelerinin kırık yüzey morfolojisi, porozite oluşumu ve oksitlenme davranışı üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymuştur.

Elde edilen başlıca bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Enerji yoğunluğu ile mekanik performans arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu belirlenmiştir.
- Düşük enerji yoğunluğu, yeterli ergimenin gerçekleşmemesi nedeniyle lack of fusion (LOF) kusurlarını artırarak; yüksek enerji yoğunluğu ise aşırı erimeye yol açarak keyhole porozitesi ve oksit kapanımları oluşturmuştur. Her iki durumda da mekanik dayanım olumsuz etkilenmiştir.
- Orta enerji yoğunluğu ($83,3 \text{ J/mm}^3$) seviyesinde, eriyik havuzu daha dengeli oluşmuş; gözenek ve oksit miktarı minimum düzeyde kalmış; bu sayede en yüksek çekme dayanımı (585 MPa) ve dengeli süneklik (%4,81) elde edilmiştir.
- SEM/EDS bulguları ile mekanik test sonuçları arasında güçlü bir uyum gözlenmiş, bu da LPBF süreç parametrelerinin mikroyapısal kontrol ve mekanik performans açısından kritik önemini doğrulamıştır.

Literatür Karşılaştırması:

Bu çalışmada elde edilen eğilimler, literatürde rapor edilen sonuçlarla genel olarak uyumludur. Örneğin, Jatti ve ark. [6] tarafından yapılan çalışmada

120–140 J/mm³ aralığında enerji yoğunluğunda keyhole porozitesi artışı gözlenmiş ve bu durum mevcut çalışma bulgularıyla benzerlik göstermiştir. Benzer şekilde, Valim [17], Wang [18] ve Wu [20] tarafından bildirilen çalışmalarda da yüksek enerji yoğunluklarında oksit kapanımları ve gevrek kırılma eğilimleri rapor edilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmada söz konusu oksit kapanımları, porozite türleri ve kırılma yüzey morfolojileri doğrudan çekme ve % uzama değerleriyle ilişkilendirilerek analiz edilmiştir.

Bu yönüyle, mevcut çalışma literatürde sınırlı olarak ele alınan enerji yoğunluğu-mikroyapı-kırılma davranışı ilişkisini deneysel olarak bütüncül biçimde ortaya koyması açısından özgün bir katkı sunmaktadır.

Gelecek Çalışmalar: Gelecekte, farklı lazer parametreleri, tarama stratejileri ve atmosfer koşullarının, porozite türleri, oksit oluşumu ve kırılma mekanizmaları üzerindeki etkilerinin sayısal simülasyon destekli deneysel yöntemlerle daha ayrıntılı olarak incelenmesi önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Numunenin üretilmesindeki katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM), Çekme deneyindeki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Hamit Tekin'e ve İYTE Tümlşik Araştırma Merkezleri (İYTE TAM) bünyesindeki Malzeme Araştırma Merkezi'ne (MAM) gerçekleştirilen test ve analizlerdeki desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZAR KATKILARININ (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Nafel Doğdu: Bu çalışmanın tüm süreçleri (tasarım, deneysel çalışmalar, veri analizi ve makale yazımı) yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cabrini M., Lorenzi S., Testa C., Manfredi D., Lombardi M., Aversa A., Andreatta F., Fedrizzi L., Dekhtyar Y., Sorokins H. and Pastore T., "Effect of heat treatment on microstructure and selective corrosion of LPBF- AlSi10Mg by means of SKPFM and exo-electron emission", *Materials*, 14(19): 5602, (2021).
- [2] Chen H., Patel S., Vlasea M. and Zou Y., "Enhanced tensile ductility of an additively manufactured AlSi10Mg alloy by reducing the density of melt pool boundaries", *Scripta Materialia*, 221: 114954, (2022).
- [3] Graf M., Fritsch S. and Awiszus B., "Determination of forming behaviour of EN AW-6060 by different testing methods under cold bulk forming conditions", *Procedia Manufacturing*, 47: 1512–1519, (2020).
- [4] Hyer H., Le Zhou S., Park G., Gottsfritz G., Benson B., Tolentino B., McWilliams B. Cho K. and Sohn Y., "Understanding the laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9(4): 484–502, (2020).
- [5] Işlak C., Esmer Ünal G., Yılmazoğlu G., Üzel U., Durgut R. and Uğuz A., "Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg plakalarının MIG yöntemiyle birleştirilmesi ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 40(1): 573–586, (2024).
- [6] Jatti V., Saiyathibrahim A., Ramasamy M.K., Jatti A., Suganya Priyadharshini G. and Mohan D.G., "Investigating the effect of volumetric energy density on tensile characteristics of as-built and heat-treated AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion", *Advanced Engineering Materials*, 27(4): 2401924, (2025).
- [7] Johnson Q.C., Laursen C.M., Spear A.D., Carroll J.D. and Noell P.J., "Analysis of the interdependent relationship between porosity, deformation, and crack growth during compression loading of LPBF AlSi10Mg ", *Materials Science and Engineering: A*, 852: 143640, (2022).
- [8] Krasniqi M. and Löffler F., "Comprehensive study on statistical methods for optimization of process parameters and material properties of AlSi10Mg in laser powder bed fusion", *Discover Mechanical Engineering*, 3(1): 42, (2024).
- [9] Liu J. and Shi Y., "SiCp/ AlSi10Mg composites with simultaneously enhanced tensile strength and ductility fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing", *Materials Science and Engineering: A*, 888: 145839, (2023).
- [10] Mertens A., Delahaye J., Dedry O., Vertruyen B., Tchuindjang J.T. and Habraken A.M., "Microstructure and properties of SLM AlSi10Mg : Understanding the influence of the local thermal history", *Procedia Manufacturing*, 47: 1089–1095, (2020).
- [11] Miao H., Yusof F., Ab Karim M.S., Wu B., Raja S., Ibrahim M.Z., Aziz I. and Chen D., "Interfacial microstructure, element diffusion, mechanical properties and metallurgical bonding mechanism of 316L- AlSi10Mg multi-material parts fabricated by laser powder bed fusion", *Journal of Materials Research and Technology*, 26: 8351–8365, (2023).
- [12] Pelevin I.A., Ozherelkov D.Y., Nalivaiko A.Y., Bodyakova A.I., Chernyshikhin S.V., Zotov B.O., Korshunov A.V. and Gromov A.A., " $\text{AlSi10Mg}/\text{AlN}$ interface grain structure after laser powder bed fusion", *Metals*, 12(12): 2152, (2022).
- [13] Raja A., Cheethirala S.R., Gupta P., Vasa N.J. and Jayaganthan R., "A review on the fatigue behaviour of AlSi10Mg alloy fabricated using laser powder bed fusion technique", *Journal of Materials Research and Technology*, 17: 1013–1029, (2022).

- [14] Rasch M., Bartels D., Sun S. and Schmidt M., "AlSi10Mg in powder bed fusion with laser beam: An old and boring material?", *Materials*, 15(16): 5651, (2022).
- [15] Siyambaş Y. and Turgut Y., "Experimental investigation and optimization of the effects of manufacturing parameters on geometric tolerances in additive manufacturing of AlSi10Mg alloy", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134(1-2): 415-429, (2024).
- [16] Toprak İ.B. and Dogdu N., "Optimization of tensile strength of AlSi10Mg material in the powder bed fusion process using the Taguchi method", *Scientific Reports*, 14(1): 31172, (2024).
- [17] Valim D., Avila J., Sarzosa D.F.B., Justiniano C., Jardini A. and Lopes É.S.N., "Fatigue crack propagation and fracture toughness of AlSi10Mg alloy processed by powder bed fusion: effects of post-processing heat treatments", *Progress in Additive Manufacturing*, 10(11): 9607-9620, (2025).
- [18] Wang H., He L., Zhang Q. and Yuan Y., "Influence of Ni contents on microstructure and mechanical performance of AlSi10Mg alloy by selective laser melting", *Materials*, 16(13): 4679, (2023).
- [19] Wu Z., Wu S., Duan Y., Huang K., He W., Du D. and Dong A., "In situ X-ray tomography of fracture behaviour in low-porosity L-PBF AlSi10Mg alloy with laser shock peening", *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1): e2273955, (2023).
- [20] Wu Z., Wu S., Gao X., Lin Y., Xue Y. and Withers P. J., "The role of internal defects on anisotropic tensile failure of L-PBF AlSi10Mg alloys", *Scientific Reports*, 13(1): 14681, (2023).
- [21] Xiao Y., Yang Y., Wu S., Chen J., Wang D. and Song C., "Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion under nitrogen and argon atmosphere", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 35(3): 486-500, (2022).
- [22] Zhang X., Zhang X., Liu W., Jiang A. and Long Y., "Towards understanding formation mechanism of cellular structures in laser powder bed fused AlSi10Mg", *Materials*, 17(9): 2121, (2024).
- [23] Zhou J., Han X., Li H., Liu S. and Yi J., "Investigation of layer-by-layer laser remelting to improve surface quality, microstructure, and mechanical properties of laser powder bed fused AlSi10Mg alloy", *Materials & Design*, 210: 110092, (2021).
- [24] Zhu X., Ma Y., Wu H., Li M. and Lu X., "In-situ tensile testing of fracture and strain in a selective laser melted AlSi10Mg alloy", *Heliyon*, 10(14): e34137, (2024).
- [25] Zhu X., Ma Y., Wu H., Li M. and Lu X., "In-situ tensile testing of fracture and strain in a selective laser melted AlSi10Mg alloy", *Heliyon*, 10(14): e34137, (2024).
- [26] Uludağ M., "Experimental and statistical analysis of effect of si modification and grain refinement on tensile properties of A356 alloy", *Politeknik Dergisi*, 24(4): 1409-1417, (2021).
- [27] Kayacan M. Y. ve Yılmaz N., "DMLS eklemeli imalatla süreç ve maliyet modeli geliştirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 22(3): 763-770, (2019).
- [28] Karakılınç U., Yalçın B. ve Ergene B., "Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatla kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri", *Politeknik Dergisi*, 22(4): 801-810, (2019).
- [29] Harman M., Çetinkaya C., Yılmaz O. ve Bol N., "Comparative process parameter optimization for wire arc additive manufacturing (WAAM) of E120C-GH4 metal cored and ER120S-G solid wire", *Politeknik Dergisi*, 27(5): 2013-2028, (2024).
- [30] Balcı A., Aycan M. F., Usta Y. ve Demir T., "Seçimli lazer ergitme ile Ti6Al4V ELI alaşımından üretilen trabeküler metal yapıların basma ve basma-kayma dayanımlarının incelenmesi", *Politeknik Dergisi*, 24(3): 903-914, (2021).