

Lazer Toz Yataklı Füzyon (LPBF) Sürecinde Gözeneklilik Oluşum Mekanizmalarının Sistemik Değerlendirilmesi ve Mekanik Performans Üzerindeki Etkileri

Nafel Dogdu¹

Özet

Lazer Toz Yataklı Füzyon (LPBF), yüksek hassasiyet ve tasarım serbestliği sayesinde karmaşık metal bileşenlerin üretiminde öne çıkan bir eklemeli imalat yöntemidir. Buna karşın süreç sırasında ortaya çıkan gözeneklilik; yoğunluk, tekrarlanabilirlik ve servis ömrü üzerinde doğrudan etkili olduğundan, endüstriyel uygulamaların güvenilirliğini sınırlayan temel sorunlardan biri olarak görülmektedir. Bu çalışmada LPBF’de gözeneklilik oluşumu, sistemik literatür analizi yaklaşımıyla; hacimsel enerji yoğunluğu (VED) rejimleri, ergitme havuzu faz dinamikleri ve mekanik performans ilişkisi bağlamında bütüncül biçimde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, gözeneklerin çoğunlukla üç ana mekanizma üzerinden geliştiğini göstermektedir: düşük VED koşullarında iz ve katman bağlanmasının yetersiz kalmasına bağlı füzyon eksikliği (LOF) gözenekleri, yüksek VED rejiminde derin buhar çukurunun kararsız çökmesiyle oluşan anahtar deliği (keyhole) gözenekleri ve toz içi gaz kapanımları ile proses atmosferindeki akış düzensizliklerinden kaynaklanan gaz gözenekleri. LOF gözenekleri keskin kenarlı ve düzensiz morfolojileri nedeniyle gerilme yığılmalarını artırarak yorulma çatlaklarının başlatılmasında kritik rol oynarken, keyhole gözenekleri daha küresel yapıda olmalarına rağmen boyutları büyüdüğünde taşıyıcı kesiti azaltarak dayanımı düşürebilmektedir. Gaz kaynaklı gözenekler ise enerji girdisinden bağımsız bir kontrol boyutu sunmakta ve toz kalitesi ile atmosfer yönetiminin önemini açık biçimde ortaya koymaktadır. Sonuç olarak gözenekliliğin etkin biçimde kontrolü, yalnızca parametre ayarıyla sınırlı kalmamalı; enerji rejiminin yönetildiği, ergitme havuzu kararlılığının sağlandığı ve in-situ izleme temelli kalite güvencesiyle desteklenen bütüncül bir süreç optimizasyonu yaklaşımıyla ele alınmalıdır.

1 Öğr. Gör. Dr. Akdeniz üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Antalya, Türkiye
ndogdu@akdeniz.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8172-0832>

1. Giriş

Lazer Toz Yataklı Füzyon (LPBF), yüksek hassasiyetli ve karmaşık metal bileşenlerin üretimine imkân tanıyan en gelişmiş eklemeli imalat teknolojilerinden biridir. Süreç sırasında lazer enerjisinin toz yatağı ile etkileşimi sonucunda oluşan ergitme havuzu; buhar, sıvı ve katı fazların eş zamanlı olarak bulunduğu son derece dinamik ve çok fazlı bir ortamdır. Bu çok fazlı etkileşimin gözenek oluşumunun temel fiziksel kaynağını oluşturduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Literatürde, Bitharas ve ark. [1], LPBF sırasında buhar-sıvı-katı faz geçişlerinin doğrudan gözlemlenebildiğini ve gözenek başlangıcının faz geçiş dinamikleriyle yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Huang ve ark. [2], anahtar deliği dalgalanmalarının kararsız çökmesi sonucu gözenek oluştuğunu gösterirken, Leung ve ark. [3] X-ışını görüntüleme destekli çok-fizikli modelleme ile ergitme havuzundaki akış ve kusur dinamiklerini nicel olarak analiz etmiştir.

LPBF'nin karakteristik özelliği olan yüksek soğuma hızları ve hızlı katılaşma koşulları, denge dışı mikro yapı oluşumuna yol açmaktadır. Ren ve ark. [4], hızlı katılaşma sırasında solüt kapanması ve mikro yapısal heterojenliğin geliştiğini göstermiştir. Gözenek oluşum mekanizmaları ve kontrol yaklaşımları ise kapsamlı biçimde sınıflandırılmıştır [5,6]. Süreç atmosferi ve gaz akışı da porozite üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Avegnon ve ark. [7], gaz akışı bozulmalarının 316L üretiminde gözenek oluşumunu tetikleyebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Wu ve ark. [8] ile Stwora ve ark. [9], süreç parametreleri ile porozite oluşumu arasındaki ilişkiyi deneysel ve teorik yaklaşımlarla incelemiştir. Sıcaklık kaynaklı porozite oluşumu ise alaşım özelinde değerlendirilmiştir [10].

Gözeneklilik yalnızca oluşum anıyla sınırlı değildir; işlem sonrası evrim süreçleri de kritik öneme sahiptir. Schröder ve ark. [11], HIP sonrası yeniden ısıtma sırasında belirli gözenek tiplerinde yeniden büyüme gözlenebileceğini bildirmiştir. Katmanlı üretim süreçlerinde gözenek evrimi, yönlendirilmiş enerji biriktirme çalışmalarında da detaylı biçimde incelenmiştir [12]. Darbeli lazer modunda gözenek oluşum dinamikleri in-situ olarak karakterize edilmiş [13], morfolojik sınıflandırma yaklaşımları geliştirilmiş [14] ve optimize edilmiş enerji yoğunluğunun boşluk morfolojisi üzerindeki kritik rolü gösterilmiştir [15].

Gözenekliliğin öngörülmesi ve kontrolü amacıyla sayısal modelleme ve optimizasyon yaklaşımları geliştirilmiştir. Rafine edilmiş hacimsel enerji yoğunluğu ve FEM tabanlı tahmin modelleri [16], çok ölçekli porozite kontrol çalışmaları [17] ve Bayes temelli optimizasyon yöntemleri [18], süreç parametrelerinin daha sistematik biçimde belirlenmesine katkı

sağlamıştır. Fizik-temelli ergitme havuzu modelleri ile in-situ izleme tabanlı kusur tahmini yaklaşımları gerçek zamanlı kalite kontrol potansiyelini ortaya koymaktadır [19-21]. Ayrıca morfoloji-temelli çok faktörlü optimizasyon çalışmaları [22], özellikle AlSi10Mg gibi mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan alaşımlarda porozite kontrolüne yönelik uygulanabilir sonuçlar sunmuştur.

Gözenekliliğin malzeme performansı üzerindeki etkileri geniş kapsamda değerlendirilmiştir. 316L çelikte hidrojen alımı ve gevrekleşme davranışı [23], AlSi10Mg'de yüzey altı porozite ve yorulma ömrü ilişkisi [24], genel yorulma performansı [25] ve süreç kaynaklı porozitenin mekanik özelliklere etkisi [26] bu kapsamda ele alınmıştır. Özellikle havacılık ve savunma uygulamalarında yorulma yükleri altında çalışan yapısal bileşenlerde, mikron mertebesindeki gözeneklerin dahi servis ömrünü belirleyici hâle gelmesi, porozitenin kontrolünü doğrudan güvenlik meselesi hâline getirmektedir. Biyomedikal Ti alaşımlarında üretilebilirlik ve mekanik özellik porozite ilişkisi de detaylı biçimde incelenmiştir [27]. Bununla birlikte, kontrollü porozitenin implant ve biyomalzeme uygulamalarında fonksiyonel avantaj sağlayabildiği gösterilmiştir [28-31].

Mikroyapı geliştirme ve mekanik özellik optimizasyonuna yönelik çalışmalar da gözeneklilik ile yakından ilişkilidir. Dispersiyon sertleştirme yaklaşımları [32], istatistiksel ve makine öğrenmesi temelli sertlik tahmini [33], Taguchi yöntemi ile çekme dayanımı optimizasyonu [34], saf molibden için sayısal optimizasyon [35] ve boyutsal doğruluk ile termomekanik özelliklerin deneysel-simülasyon karşılaştırmaları [36], süreç-mikroyapı-performans ilişkisinin bütüncül değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Endüstriyel uygulamalar bağlamında topoloji optimizasyonu [37], sağlık ve ilaç alanındaki gelişmeler [38] ve hacimsel kusurların özellik-temelli sınıflandırılması [39], LPBF'de gözenekliliğin yalnızca bir kusur değil, mühendislik tasarımında dikkate alınması gereken kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, eklemeli imalatta kullanılan tozların üretim ve ön-işleme yöntemleri de mikroyapı ve faz dönüşüm davranışı üzerinde belirleyici olabilmektedir. Özellikle mekanik alaşımlama ile modifiye edilmiş toz sistemlerinde faz oluşumu ve dönüşüm karakterinin önemli ölçüde değişebildiği, Zr katkılı NiTi tozlarında R-faz oluşumu ve östenitik dönüşüm davranışı üzerinden gösterilmiştir [40].

Mevcut literatür, LPBF'de gözenekliliğin; enerji yoğunluğu rejimi, faz dönüşüm dinamikleri, gaz akış davranışı ve mikro yapısal evrimin birlikte şekillendirdiği çok ölçekli ve çok-fizikli bir süreç sonucu geliştiğini göstermektedir.

Bu çerçevede LPBF’de gözenekliliğin sistematik olarak incelenmesi; süreç parametrelerini belirleyen araştırmacılar, sayısal model geliştiren akademisyenler, kalite güvence mühendisleri ve kritik sektörlerde sertifikasyon süreçlerini yöneten endüstri profesyonelleri için doğrudan önem taşımaktadır.

Bu çalışma, LPBF’de gözeneklilik türlerini enerji yoğunluğu rejimleriyle ilişkilendirerek; LOF–keyhole–gaz kaynaklı gözeneklerin ayırt edici oluşum koşullarını, karakterizasyon yaklaşımlarını ve mekanik kritiklik düzeylerini tek bir çerçevede birleştirmektedir. Böylece süreç parametre seçimi ve kalite güvencesi için uygulanabilir bir referans haritası sunulmaktadır.

2. Çalışma Metodolojisi ve Analiz Çerçevesi

Bu çalışma, LPBF sürecinde gözeneklilik oluşum mekanizmalarının fiziksel temellerini, süreç parametreleri ile ilişkisini ve performans etkilerini ortaya koymak amacıyla sistematik literatür analizi yaklaşımına dayanmaktadır.

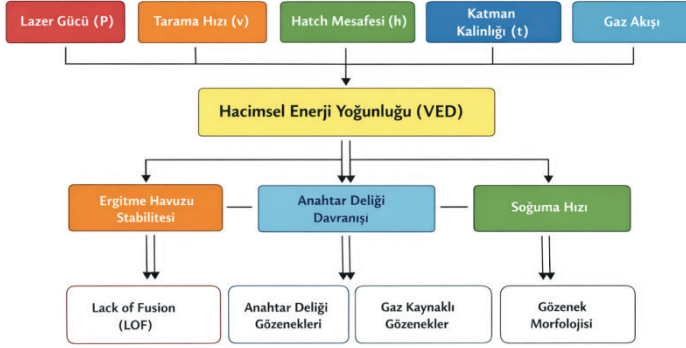
2.1. Süreç Parametre Çerçevesi

LPBF sürecinde gözeneklilik oluşumunu etkileyen temel parametreler lazer gücü (P), tarama hızı (v), hatch mesafesi (h), katman kalınlığı (t) ve gaz akış koşullarıdır. Bu parametrelerin birleşik etkisi genellikle hacimsel enerji yoğunluğu (Volumetric Energy Density, VED) ile tanımlanmaktadır.

$$VED=P/(v \cdot h \cdot t)$$

Enerji yoğunluğu; anahtar deliği oluşumu, eriyik havuzu stabilitesi ve lack-of-fusion kusurlarının gelişimi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Literatürde VED aralığının doğrudan gözenek morfolojisi ve dağılımı ile ilişkili olduğu rapor edilmiştir [5,15,16].

Lazer gücü, tarama hızı, hatch mesafesi ve katman kalınlığının birleşik etkisinin hacimsel enerji yoğunluğu üzerinden ergitme havuzu davranışına ve gözenek oluşumuna nasıl yansıdığı Şekil 1’de kavramsal bir çerçevede gösterilmektedir.



Şekil 1. LPBF sürecinde temel parametreler, enerji yoğunluğu ve gözenek oluşum mekanizmaları arasındaki etkileşim şeması

2.2. Gözenek Karakterizasyon Yöntemleri

LPBF’de oluşan gözeneklerin fiziksel kökenini, morfolojisini ve hacimsel dağılımını belirlemek amacıyla literatürde farklı deneysel ve sayısal karakterizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [1–3,5,6,12,14].

Bu kapsamda yüksek hızlı X-ışını görüntüleme teknikleri ergitme havuzu dinamiklerinin doğrudan gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır [1–3]. İn-situ melt pool izleme sistemleri süreç sırasında ışınım ve termal sinyalleri analiz ederek kusur oluşumunu gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir [13,20]. mikro-CT üç boyutlu analiz yöntemleri gözenek hacmi ve dağılımının nicel belirlenmesini mümkün kılmaktadır [8,12]. SEM morfoloji analizi özellikle kırık yüzey karakterizasyonunda kullanılmaktadır [7,26]. Çok-fizikli modelleme ve FEM tabanlı yaklaşımlar ise gözenek oluşumunun öngörülmesine yönelik sayısal altyapı sunmaktadır [3,16–19].

Bu çalışmada referans alınan karakterizasyon yöntemleri ve sağladıkları temel analiz çıktıları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan Analiz Yöntemleri ve Sağladıkları Bilgiler

Yöntem	Ölçülen Parametre	Amaç
X-ışını görüntüleme	Ergitme havuzu dinamiği	Gözenek başlangıcı
Mikro-CT	3B gözenek hacmi	Yoğunluk analizi
SEM	Morfoloji	Kırık yüzeyi inceleme
FEM modelleme	Isı dağılımı	Gözenek tahmini
İn-situ sensör	Işınım sinyali	Kapalı çevrim kontrol

Bu metodolojik çerçeve doğrultusunda, bir sonraki bölümde gözenek oluşumu enerji rejimlerine göre sınıflandırılarak mekanizmalar sistematik biçimde tartışılmıştır.

3. LPBF’de Gözenek Oluşum Mekanizmalarının Sistematik Değerlendirilmesi

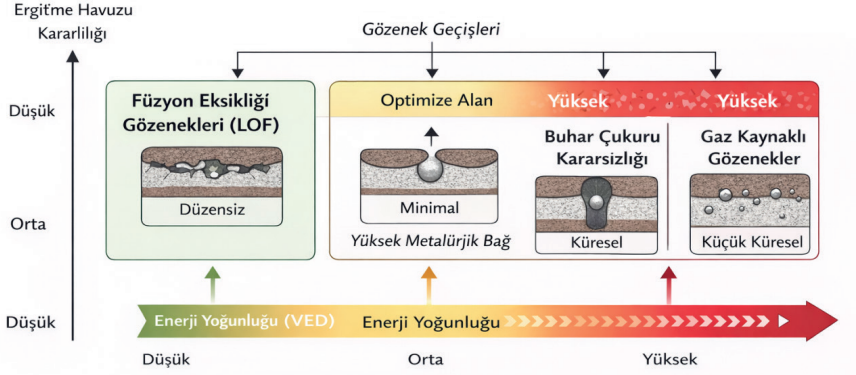
3.1. Enerji Yoğunluğu Rejimine Bağlı Gözenek Oluşum Geçişleri

LPBF sürecinde gözenek oluşumu, büyük ölçüde hacimsel enerji yoğunluğu (VED) ile belirlenen ergitme havuzu kararlılığına bağlıdır. Literatür değerlendirmesi, enerji yoğunluğu rejimindeki değişimin gözenek türlerinde belirgin bir geçişe neden olduğunu göstermektedir [5,6].

Düşük VED koşullarında, ergitme havuzu derinliği ve genişliği azalmakta; komşu izler ve katmanlar arasında yeterli metalürjik bağ oluşmamaktadır. Bu durum füzyon eksikliği (lack-of-fusion, LOF) gözeneklerinin gelişimine yol açmaktadır [9,16]. LOF gözenekleri genellikle düzensiz ve keskin kenarlı morfolojiye sahip olup gerilme yığılması açısından en kritik kusur türü olarak değerlendirilmektedir [24–26].

Enerji yoğunluğunun artmasıyla birlikte ergitme havuzu derinleşmekte ve buharlaşma etkisi belirgin hâle gelmektedir. Yüksek VED rejiminde derin bir buhar çukuru (keyhole) oluşmakta; bu çukurun kararsız çökmesi sonucu küresel boşluklar meydana gelmektedir [1,2]. Bu mekanizma, anahtar deliği (keyhole) gözeneklerinin temel oluşum yoludur. Optimize edilmiş enerji yoğunluğu aralıklarında ise ergitme havuzu daha kararlı davranmakta ve gözenek oluşumu minimize edilmektedir [15].

Dolayısıyla LPBF’de gözenek türleri, yalnızca rastlantısal kusurlar değil; enerji girdisi ile ergitme havuzu dinamikleri arasındaki fiziksel denge durumunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu geçiş davranışı Şekil 2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. LPBF’de düşük, orta ve yüksek hacimsel enerji yoğunluğu (VED) rejimlerinde oluşan gözenek türlerinin (LOF, keyhole ve gaz kaynaklı) ergitme havuzu stabilitesi ile ilişkili geçiş mekanizmasının kavramsal gösterimi.

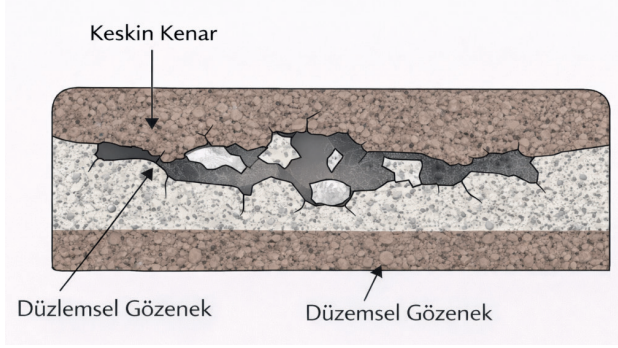
3.2. Füzyon Eksikliği (Lack-of-Fusion) Gözeneklerinin Oluşum Mekanizması

Füzyon eksikliği (LOF) gözenekleri, LPBF sürecinde düşük hacimsel enerji yoğunluğu koşullarında ortaya çıkan en kritik kusur türlerinden biridir. Bu gözenekler, komşu tarama izleri ve katmanlar arasında yeterli metalürjik bağ oluşmaması sonucu gelişmektedir [9,16]. Enerji girdisinin yetersiz olduğu durumlarda ergitme havuzu derinliği azalmakta, iz örtüşmesi sınırlanmakta ve katmanlar arası boşluklar meydana gelmektedir.

Çok-fizikli modelleme ve FEM tabanlı çalışmalar, düşük VED rejiminde ısı girdisinin lokal olarak yetersiz kaldığını ve eriyik metalin önceki katmanla tam birleşemediğini göstermektedir [16,17]. Bu durum, düzensiz ve keskin kenarlı morfolojiye sahip gözeneklerin oluşmasına yol açmaktadır. Nudelis ve Mayr [14] tarafından önerilen morfolojik sınıflandırma yaklaşımı, LOF gözeneklerinin tipik olarak düzlemsel ve uzamış karakter gösterdiğini ortaya koymuştur.

Mekanik açıdan değerlendirildiğinde, LOF gözenekleri gerilme yığılması açısından en kritik kusur türü olarak rapor edilmektedir. Özellikle yorulma yükleri altında, keskin kenarlı yapıları nedeniyle çatlak başlangıç noktası olarak davranmaktadır [24–26]. Bu nedenle düşük enerji yoğunluğu rejimi, yalnızca yoğunluk kaybı değil, aynı zamanda servis ömrü açısından ciddi bir risk oluşturmaktadır.

Şekil 3’te LOF gözenek morfolojisinin şematik temsili sunulmaktadır.



Şekil 3. LOF gözenek morfolojisinin şematik temsili

Şekil 3'de katmanlar arası yetersiz iz örtüşmesi sonucu gelişen düzensiz ve keskin kenarlı düzlemsel boşluk yapıları gösterilmektedir.

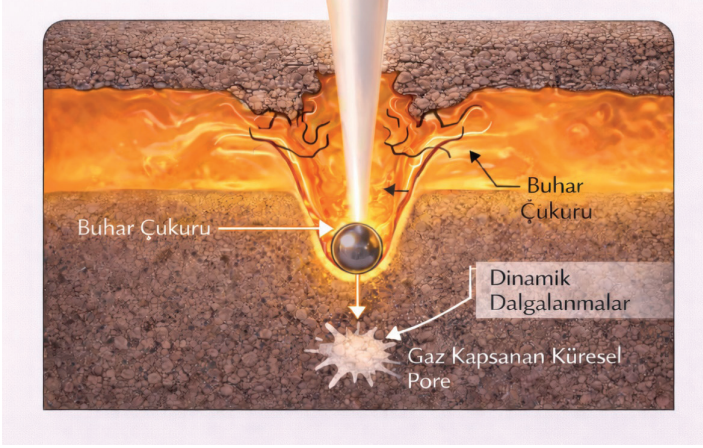
3.3. Anahtar Deliği (Keyhole) Gözenek Oluşum Mekanizması

Anahtar deliği (keyhole) gözenekleri, LPBF sürecinde yüksek hacimsel enerji yoğunluğu (VED) koşullarında ortaya çıkan tipik kusur türlerinden biridir. Enerji girdisinin artmasıyla birlikte lazer-malzeme etkileşimi yoğunlaşmakta ve buharlaşma etkisi belirgin hâle gelmektedir. Yüksek güç yoğunluğu altında eriyik havuzunun merkezinde derin bir buhar çukuru oluşmakta; bu çukurun dinamik kararsızlığı gözenek oluşumunun temel mekanizmasını oluşturmaktadır [1,2].

Bitharas ve ark. [1], buhar-sıvı-katı faz etkileşiminin gerçek zamanlı gözlemlerle anahtar deliği stabilitesini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Huang ve ark. [2], anahtar deliği duvarlarında oluşan dalgalanmaların ani çökme ile sonuçlanabildiğini ve bu çökme sırasında küresel boşlukların hapsoldüğünü ortaya koymuştur. Çok-fizikli simülasyon ve X-ışını destekli çalışmalar ise buhar çukuru derinliği ile gözenek oluşum sıklığı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir [3].

Yüksek enerji yoğunluğu rejiminde oluşan bu gözenekler genellikle küresel morfolojiye sahiptir ve LOF gözeneklerine kıyasla daha düzgün kenarlı yapı gösterir [15]. Ancak hacimsel olarak daha büyük olmaları nedeniyle yapısal bütünlük açısından yine önemli bir risk faktörü oluşturmaktadır. Enerji yoğunluğunun kritik eşik değerin üzerine çıkması, ergitme havuzu stabilitesini azaltmakta ve keyhole çökme olasılığını artırmaktadır.

Şekil 4'te anahtar deliği oluşumu ve kararsız çökme süreci şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. Keyhole çökme mekanizması ve gaz hapsolmesiyle küresel gözenek oluşumunun şematik gösterimi [1-3,15].

Lazer-malzeme etkileşimi ile gelişen buhar çukuru, dinamik dalgalanmalar nedeniyle kararsız hâle gelmekte ve çökme sırasında gaz hapsolmesiyle gözenek oluşmaktadır.

3.4. Gaz Kaynaklı Gözenek Oluşum Mekanizması

Gaz kaynaklı gözenekler, LPBF sürecinde anahtar deliği veya füzyon eksikliği mekanizmalarından farklı olarak, genellikle toz partikülleri içerisinde hapsolmüş gazların veya süreç atmosferindeki akış düzensizliklerinin etkisiyle oluşmaktadır. Bu tür gözenekler çoğunlukla küçük ve küresel morfolojiye sahip olup, eriyik metal içerisinde çözünmüş gazın katılma sırasında dışarı atılamaması sonucu gelişmektedir [7,8].

Avegnon ve ark. [7], gaz akışındaki yerel bozulmaların ergitme havuzu üzerinde türbülans oluşturabildiğini ve bunun da porozite oluşumuna katkı sağlayabileceğini göstermiştir. Wu ve ark. [8] ise hidrid-dehidrid (HDH) Ti-6Al-4V tozlarında partikül içi gaz kapanımlarının baskılanabilirlik ve gözenek oluşumu üzerinde belirleyici rol oynadığını rapor etmiştir. Bu durum, yalnızca enerji yoğunluğunun değil, aynı zamanda toz kalitesi ve proses atmosferinin de porozite kontrolünde kritik parametreler olduğunu göstermektedir.

Gaz kaynaklı gözenekler genellikle daha küçük boyutlu ve daha düzgün yüzeyli olmalarına rağmen, yüksek yoğunluklu uygulamalarda birikimli etki oluşturabilmektedir. Özellikle hidrojen gibi difüzyona açık gazların varlığında, gözenekliliğin hidrojen alımı ve gevrekleşme davranışı üzerinde etkili olabileceği gösterilmiştir [23]. Bu nedenle gaz kaynaklı porozite, tek başına düşük kritik

gibi görünse de, servis koşullarına bağlı olarak performans üzerinde önemli rol oynayabilmektedir.

Bu bağlamda, gaz akışı optimizasyonu, toz ön işleme ve atmosfer kontrolü, LPBF’de gözenekliliğin azaltılmasına yönelik tamamlayıcı stratejiler olarak değerlendirilmektedir.

LPBF’de gözlenen başlıca gözenek türleri, oluşum mekanizması, morfolojik karakteri ve görel mekanik kritiklik seviyesi açısından Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir

Tablo 2. LPBF’de gözlenen gözenek türlerinin oluşum mekanizması, morfolojik karakteri ve görel mekanik kritiklik seviyesinin karşılaştırılması.

Gözenek Türü	Oluşum Nedeni	Tipik Morfoloji	Görel Mekanik Kritiklik
Füzyon Eksikliği (LOF)	Düşük enerji yoğunluğu, yetersiz iz örtüşmesi	Düzensiz, keskin kenarlı, uzamış	Çok yüksek
Anahtar Deliği (Keyhole)	Yüksek enerji yoğunluğu, buhar çukuru kararsızlığı	Küresel, düzgün kenarlı	Orta-Yüksek
Gaz Kaynaklı	Toz içi gaz kapanımı, atmosfer düzensizliği	Küçük, küresel	Düşük-Orta

Gaz kaynaklı gözenekler enerji yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olmamakla birlikte, özellikle düşük yoğunluklu yapı gerektiren uygulamalarda toplam porozite oranını belirgin biçimde etkileyebilmektedir.

3.5. Porozite Türlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi

LPBF sürecinde gözlenen gözenek türleri, yalnızca oluşum mekanizmaları bakımından değil; morfoloji, hacimsel dağılım ve mekanik performans üzerindeki etkileri açısından da belirgin farklılıklar göstermektedir. Literatür bulguları, füzyon eksikliği (LOF), anahtar deliği (keyhole) ve gaz kaynaklı gözeneklerin farklı enerji rejimlerine ve süreç koşullarına karşılık geldiğini ortaya koymaktadır [5,6].

LOF gözenekleri, düşük enerji yoğunluğu rejiminde ortaya çıkmakta ve genellikle düzensiz, uzamış ve keskin kenarlı morfoloji göstermektedir. Bu geometri, yerel gerilme yığılmalarını artırmakta ve özellikle yorulma yükleri altında çatlak başlangıç noktası olarak davranmaktadır [24–26]. Bu nedenle LOF gözenekleri mekanik açıdan en kritik kusur türü olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar deliği gözenekleri ise yüksek enerji yoğunluğu koşullarında buhar çukuru kararsızlığından kaynaklanmakta ve çoğunlukla küresel morfolojiye sahiptir [1–3]. Kenar keskinliğinin LOF'a kıyasla daha düşük olması gerilme yoğunlaşmasını nispeten azaltmakla birlikte, hacimsel büyüklükleri nedeniyle taşıyıcı kesit alanını azaltarak mukavemeti düşürebilmektedir [15].

Gaz kaynaklı gözenekler genellikle küçük ve küresel olup toz içi gaz kapanımları veya süreç atmosferi kaynaklıdır [7,8]. Tekil olarak düşük kritik seviyede kabul edilseler de, yüksek yoğunluklu dağılımlarda birikimli etki oluşturabilmektedir. Ayrıca hidrojen gibi difüzyon gazlarının varlığında gevrekleşme riskini artırabileceği rapor edilmiştir [23].

Bu karşılaştırmalı değerlendirme, LPBF'de gözenekliliğin tek bir kusur tipi olarak ele alınamayacağını; enerji yoğunluğu, ergitme havuzu dinamikleri ve malzeme-atmosfer etkileşiminin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Süreç parametrelerinin optimize edilmesi, yalnızca toplam porozite oranının azaltılmasına değil, aynı zamanda kritik gözenek morfolojilerinin önlenmesine odaklanmalıdır.

Bu bütüncül yaklaşım, LPBF'de kalite güvence stratejilerinin geliştirilmesi ve kritik sektörlerde (havacılık, savunma ve biyomedikal uygulamalar) sertifikasyon süreçlerinin daha güvenilir biçimde yürütülmesi açısından doğrudan önem taşımaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada LPBF sürecinde gözeneklilik oluşum mekanizmaları; hacimsel enerji yoğunluğu rejimleri, ergitme havuzu faz dinamikleri ve mekanik performans ilişkisi bağlamında sistematik olarak değerlendirilmiştir. Literatür temelli analizler, gözenek oluşumunun yalnızca basit bir üretim kusuru değil; lazer enerjisi girdisi, ısı transferi, buharlaşma davranışı ve hızlı katılaşma kinetiğinin eş zamanlı etkileşimi sonucu ortaya çıkan çok-fizikli bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır.

Düşük enerji yoğunluğu koşullarında füzyon eksikliği (LOF) gözeneklerinin baskın olduğu ve keskin kenarlı, düzensiz morfolojileri nedeniyle en kritik gerilme yığılması kaynağını oluşturduğu belirlenmiştir. Bu nedenle LOF gözenekleri, özellikle yorulma kontrollü tasarım gerektiren uygulamalarda birincil risk faktörü olarak değerlendirilmelidir. Yüksek enerji yoğunluğu rejiminde ise anahtar deliği mekanizmasına bağlı küresel gözenekler oluşmakta; bu gözenekler daha düzgün morfolojiye sahip olmakla birlikte, hacimsel büyüklüklerinin artması durumunda taşıyıcı kesit alanını azaltarak mukavemeti düşürebilmektedir. Gaz kaynaklı gözenekler ise çoğunlukla toz kalitesi ve

atmosfer koşulları ile ilişkili olup, yoğunluklarının artması hâlinde malzeme bütünlüğünü zayıflatabilmektedir.

Elde edilen bütüncül değerlendirme, LPBF’de optimum enerji yoğunluğu aralığının yalnızca yüksek yoğunluk elde etmek için değil; aynı zamanda kritik gözenek morfolojilerinin önlenmesi ve gerilme–yorulma davranışının kontrolü açısından belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Süreç parametrelerinin dengeli şekilde ayarlanması, ergitme havuzu kararlılığının sağlanması ve in-situ izleme sistemlerinin entegrasyonu gözenek oluşumunun minimize edilmesinde temel stratejiler olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak LPBF’de gözeneklilik kontrolü, parametrik ayarlamaların ötesinde; enerji rejimi yönetimi, faz dinamiklerinin anlaşılması ve malzeme–atmosfer etkileşiminin birlikte ele alındığı bütüncül bir süreç optimizasyonu yaklaşımı gerektirmektedir. Bu yaklaşım, özellikle havacılık, savunma ve biyomedikal uygulamalar gibi yüksek güvenilirlik gerektiren alanlarda üretim kalitesinin sürdürülebilirliği ve sertifikasyon süreçlerinin güvenilirliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Kaynaklar

- [1] I. Bitharas, N. Parab, C. Zhao, T. Sun, A. D. Rollett, and A. J. Moore, "The interplay between vapour, liquid, and solid phases in laser powder bed fusion," *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, p. 2959, May 2022, doi: 10.1038/s41467-022-30667-z.
- [2] Y. Huang *et al.*, "Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing," *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, p. 1170, Mar. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-28694-x.
- [3] C. L. A. Leung *et al.*, "Quantification of Interdependent Dynamics during Laser Additive Manufacturing Using X-Ray Imaging Informed Multi-Physics and Multiphase Simulation," *Advanced Science*, vol. 9, no. 36, p. 2203546, Dec. 2022, doi: 10.1002/advs.202203546.
- [4] N. Ren *et al.*, "Solute trapping and non-equilibrium microstructure during rapid solidification of additive manufacturing," *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, p. 7990, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-43563-x.
- [5] C. Du *et al.*, "Pore defects in Laser Powder Bed Fusion: Formation mechanism, control method, and perspectives," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 944, p. 169215, May 2023, doi: 10.1016/j.jallcom.2023.169215.
- [6] L. Wang *et al.*, "Porosity defects in additively manufactured metal materials: Formation mechanisms, impact on performance and regulation," *International Materials Reviews*, p. 09506608251371459, Sep. 2025, doi: 10.1177/09506608251371459.
- [7] K. L. M. Avegnon, A. Menendez, J. Liu, J. Soost, T. Houle, and M. P. Sealy, "Porosity formation from disrupted gas flow in laser powder bed fusion of 316 stainless steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 90, pp. 333–340, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.032.
- [8] Z. Wu *et al.*, "Study of printability and porosity formation in laser powder bed fusion built hydride-dehydride (HDH) Ti-6Al-4V," *Additive Manufacturing*, vol. 47, p. 102323, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102323.
- [9] A. Stwora, R. Teimouri, and J. Habel, "Role of Laser Powder Bed Fusion Process Factors in Determining the Porosity Formation in 3D Printing of Stainless Steel 316L: Theoretical Modeling and Experimental Verification," *Materials*, vol. 18, no. 24, p. 5490, Dec. 2025, doi: 10.3390/ma18245490.
- [10] H. Karimialavijeh, W. N. Khan, M. Moradi, M. Proebstle, and E. Martin, "Temperature induced porosity in laser powder bed fusion fabricated A20X alloy," *Manufacturing Letters*, vol. 46, pp. 148–151, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.mfglet.2025.11.007.
- [11] J. Schröder, T. Fritsch, B. Ferrari, M. L. Altmann, G. Bruno, and A. Tonjes, "Laser powder bed fusion: Defect type influences critical porosity re-growth during reheating after hot isostatic pressing," *Journal of Mate-*

- rials Processing Technology*, vol. 340, p. 118839, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2025.118839.
- [12] K. Zhang *et al.*, “Pore evolution mechanisms during directed energy deposition additive manufacturing,” *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, p. 1715, Feb. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-45913-9.
- [13] S. M. H. Hojjatzadeh *et al.*, “In-Situ Characterization of Pore Formation Dynamics in Pulsed Wave Laser Powder Bed Fusion,” *Materials*, vol. 14, no. 11, p. 2936, May 2021, doi: 10.3390/ma14112936.
- [14] N. Nudelis and P. Mayr, “A Novel Classification Method for Pores in Laser Powder Bed Fusion,” *Metals*, vol. 11, no. 12, p. 1912, Nov. 2021, doi: 10.3390/met11121912
- [15] S. Trithepchunlayakoon *et al.*, “The critical role of optimized energy density in controlling void morphology and enhancing mechanical properties of L-PBF Ti-6Al-4V ELI alloy,” *PLoS One*, vol. 20, no. 6, p. e0325276, Jun. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0325276.
- [16] M. A. Mahmood, K. Ishfaq, M. Oane, and F. Liou, “Porosity prediction in LPBF of AISI 316L stainless steel: Refined volumetric energy density and FEM simulation approach,” *Optics & Laser Technology*, vol. 188, p. 113015, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.optlastec.2025.113015.
- [17] A. Qadeer, A. S. Lone, S. S. Akhtar, A. F. M. Arif, A. A. Abubakar, and A. J. Qureshi, “Prediction and control of structured porosity in laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing using multi-scale modeling,” *Materials & Design*, vol. 258, p. 114627, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.114627.
- [18] Y. Chen, D. Gu, K. Shi, Y. Li, and W. Chen, “A novel dual-phase Bayesian estimation and multi-task learning method for process optimization for reducing lack-of-fusion defects during laser powder bed fusion,” *Additive Manufacturing*, vol. 110, p. 104926, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.addma.2025.104926.
- [19] İ. Ülke, O. Yılmaz, and M. Mollamahmutoglu, “DEVELOPMENT OF A PHYSICS-INFORMED MELT POOL MODEL FOR POROSITY PREDICTION IN ADDITIVE MANUFACTURING,” *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 9, no. 3, pp. 488–502, Dec. 2025, doi: 10.46519/ij3dptdi.1789827.
- [20] L. Cao, J. Li, Q. Zhou, W. Cai, B. He, and Y. Zhang, “In-Situ monitoring of porosity based on static and dynamic molten pool features in laser powder bed fusion,” *Optics & Laser Technology*, vol. 187, p. 112872, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.optlastec.2025.112872.
- [21] Z. Zou, K. Zhang, R. Chen, T. Liu, J. Li, and W. Liao, “Defect prediction of localized regions in laser powder bed fusion based on multi-layer

- photodiode image fusion,” *Measurement*, vol. 252, p. 117413, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.117413.
- [22] K. Korobov *et al.*, “MORPHOLOGY-AWARE MULTI-FACTOR OPTIMIZATION OF POROSITY IN ALSI10MG LASER POWDER BED FUSION,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, p. S2588840426000065, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.ijlmm.2026.01.006.
- [23] A. Nabizada, L. Claeys, P. J. Jacques, K. Verbeken, and T. Depover, “The role of porosity on the hydrogen uptake, diffusivity and embrittlement in laser powder bed fusion manufactured 316L,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 215, p. 153766, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.ijhydene.2026.153766.
- [24] C. Van Der Rest, R. A. Manzano Navarrete, A. Simar, and O. Poncelet, “Influence of roughness and subsurface porosity on the fatigue life of AlSi10Mg produced by Laser Powder Bed Fusion,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 944, p. 148885, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.msea.2025.148885.
- [25] M. M. Butt *et al.*, “Fatigue performance in additively manufactured metal alloys,” *Prog Addit Manuf*, vol. 10, no. 4, pp. 1809–1841, Apr. 2025, doi: 10.1007/s40964-024-00738-2.
- [26] W. H. Kan *et al.*, “A critical review on the effects of process-induced porosity on the mechanical properties of alloys fabricated by laser powder bed fusion,” *J Mater Sci*, vol. 57, no. 21, pp. 9818–9865, Jun. 2022, doi: 10.1007/s10853-022-06990-7.
- [27] M. Rehman *et al.*, “Manufacturability study in laser powder bed fusion of biomedical Ti alloys for orthopedic implants: an investigation of mechanical properties, process-induced porosity and surface roughness,” *RPJ*, vol. 29, no. 6, pp. 1299–1323, Jun. 2023, doi: 10.1108/RPJ-02-2022-0042.
- [28] C. N. Kelly *et al.*, “High-strength, porous additively manufactured implants with optimized mechanical osseointegration,” *Biomaterials*, vol. 279, p. 121206, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.121206.
- [29] X. Wang *et al.*, “Additively Manufactured Zn-2Mg Alloy Porous Scaffolds with Customizable Biodegradable Performance and Enhanced Osteogenic Ability,” *Advanced Science*, vol. 11, no. 5, p. 2307329, Feb. 2024, doi: 10.1002/advs.202307329.
- [30] Y. Sun, Z. Yu, Q. Liu, L. Ren, X. Zhao, and J. Wang, “The Anisotropic Osteoinductive Capacity of a Nickel–Titanium Alloy Fabricated Through Laser Powder Bed Fusion,” *IJMS*, vol. 26, no. 10, p. 4640, May 2025, doi: 10.3390/ijms26104640.
- [31] H. Wang *et al.*, “Laser powder bed fusion printed poly-ether-ether-ketone/bioactive glass composite scaffolds with dual-scale pores for enhanced

- osseointegration and bone ingrowth,” *Acta Biomaterialia*, vol. 189, pp. 605–620, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.actbio.2024.09.055.
- [32] G. Wang *et al.*, “Dispersion hardening using amorphous nanoparticles deployed via additive manufacturing,” *Nat Commun*, vol. 16, no. 1, p. 3589, Apr. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-58893-1.
- [33] İ. B. Toprak, “Prediction and optimization of hardness in AlSi10Mg alloy produced by laser powder bed fusion using statistical and machine learning approaches,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 17966, May 2025, doi: 10.1038/s41598-025-03307-x.
- [34] İ. B. Toprak and N. Dogdu, “Optimization of tensile strength of Al-Si10Mg material in the powder bed fusion process using the Taguchi method,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 31172, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-82541-1.
- [35] İ. B. Toprak, N. Dogdu, and M. U. Salamci, “Numerical Optimization of Laser Powder Bed Fusion Process Parameters for High-Precision Manufacturing of Pure Molybdenum,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 10, p. 5485, May 2025, doi: 10.3390/app15105485.
- [36] N. Dogdu, “Experimental and Simulation-Based Assessment of Dimensional Accuracy and Thermomechanical Properties of AlSi10Mg Cubes Produced by LPBF,” *Materials & Design*, vol. 261, p. 115351, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.matdes.2025.115351.
- [37] M. Tok and Y. Fedai, “Topology optimization for manufacturing aircraft bearing brackets via laser powder bed fusion,” *Sādhanā*, vol. 50, no. 3, p. 139, Jul. 2025, doi: 10.1007/s12046-025-02810-1.
- [38] A. Awad, F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, and A. W. Basit, “Advances in powder bed fusion 3D printing in drug delivery and healthcare,” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 174, pp. 406–424, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.addr.2021.04.025.
- [39] A. Poudel *et al.*, “Feature-based volumetric defect classification in metal additive manufacturing,” *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, p. 6369, Oct. 2022, doi: 10.1038/s41467-022-34122-x.
- [40] Ü. Zeybek, “Mechanically alloyed Zr-doped NiTi powders: A study on R-Phase formation and austenitic transformation behavior,” *Canadian Metallurgical Quarterly*, pp. 1–11, Oct. 2025, doi: 10.1080/00084433.2025.2575229