



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE MEKANİK  
PERFORMANSI YÜKSEK BİYOMİMETİK  
HİYERARŞİK YAPILARIN ÜRETİMİ VE  
KARAKTERİZASYONU**

**Yeşim SEÇER KAVASOĞLU**

**Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI  
Doktora Tezi**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
2025**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE MEKANİK PERFORMANSI YÜKSEK  
BİYOMİMETİK HİYERARŞİK YAPILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

(Fabrication and Characterization of Biomimetic Hierarchical Structures With High  
Mechanical Performance By Selective Laser Melting)

DOKTORA TEZİ

Yeşim SEÇER KAVASOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

Erzurum  
Şubat, 2025

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Yeşim SEÇER KAVASOĞLU tarafından hazırlanan “SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE MEKANİK PERFORMANSI YÜKSEK BİYOMİMETİK HİYERARŞİK YAPILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı çalışması 20/02/2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekanik Bilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ayhan ÇELİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Halim KOVACI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Ali Fatih YETİM <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Fatih YILDIZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun  
.../.../.... tarih ve ..... sayılı  
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof. Dr. Alper NUHOĞLU**

**Enstitü Müdürü**

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No: FDK-2022-11443

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Doç. Dr. Halim KOVACI danışmanlığında sunulan “SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE MEKANİK PERFORMANSI YÜKSEK BİYOMİMETİK HİYERARŞİK YAPILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	4	30
Materyal ve Yöntem	11	35
Bulgular	3	20
Tartışma	1	20
Tezin Geneli	4	25

*Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

<b>Tez Yazarı (Öğrenci)</b>	<b>Tez Danışmanı</b>
<b>Yeşim Seçer KAVASOĞLU</b>	<b>Doç. Dr. Halim KOVACI</b>
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

- \* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.
- Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.
- Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca karşılaştığım her türlü zorlukta sabrını ve desteğini göstererek bana rehberlik ve yönlendirmelerde bulunan, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak akademik gelişimime katkı sağlayan çok kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Halim Kovacı'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Daima yol gösterici olan, bilgilerini ve ilgilerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'e, Sayın Prof. Dr. A. Fatih YETİM'e, Sayın Prof. Dr. Fatih YILDIZ'a ve Sayın Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL'a,

Tez çalışmam boyunca destek ve teşviklerini her daim hissettiren değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Yakup UZUN'a, Sayın Doç. Dr. Onur ÇOMAKLI'ya, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yusuf Burak BOZKURT'a,

Tez çalışmam boyunca birlikte çalıştığım kıymetli ekip arkadaşlarım Arş. Gör. Burak ATİK'e, Arş. Gör. Şükran Merve TÜZEMEN'e, deneysel çalışmalarım sırasında ve yapılan analizlerde bana yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yazıcı'ya, Öğr. Gör. Kerem TURALIOĞLU'na, tezin her aşamasında yanımda olan değerli eşim Mekatronik Yüksek Mühendisi Burak KAVASOĞLU'na ve ayrıca emeği geçen bütün hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan, anlayışları ve sabırlarıyla yanımda olan değerli annem Şengül SEÇER başta olmak üzere sevgili ağabeylerim ve ablalarıma teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Yapılan bu çalışmayı FDK-2022-11443 nolu proje kapsamında destekleyen Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)'ne teşekkür ederim.

Yeşim Seçer KAVASOĞLU

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

## SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE MEKANİK PERFORMANSI YÜKSEK BİYOMİMETİK HİYERARŞİK YAPILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Yeşim SEÇER KAVASOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

**Amaç:** Yüksek performanslı malzemeler ve yapılara yönelik taleplerin artması araştırmacıların ilgisini biyomimetik alanına yöneltmiştir. Bu tez kapsamında; çekme, eğilme dayanımı tokluk ve çatlak ilerleme direnci geliştirilmiş yapıların elde edilmesi amacıyla biyomimetik hiyerarşik tabakalı ve gradyen yapılar kullanılmıştır. Biyomimetik hiyerarşik yapı tasarımı ile yapı içerisinde dayanım ve süneklik kombinasyonu davranışı sergileyen üstün yorulma çatlak ilerleme davranışına sahip anizotropik tek malzeme elde edilmesi amaçlanmaktadır.

**Yöntem:** Bu tez kapsamında, geleneksel yöntemlerin aksine yenilikçi bir yöntem olan Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile mekanik özellikleri kontrol edilebilir biyomimetik hiyerarşik yapılar (fonksiyonel yapılar) elde edilmiştir. Öncelikle, çekme ve üç noktadan eğme numuneleri 300–1200 mm/s aralığında değişen tarama hızları ve farklı tarama stratejisi (düz ve chessboard) kullanılarak statik dayanım üzerine etkisi değerlendirilmiştir. İkinci aşamada, farklı tarama hızları (800-1200 mm/s aralığında), tarama stratejisi ve yapı yönelimi kullanılarak statik ve dinamik dayanımı incelenmiştir. Daha sonra, biyomimetik hiyerarşik yapılar oluşturmak amacıyla doğadaki canlılardan faydalanılmış; bu kapsamda, deniz kabuğunun çok katmanlı yapısı ile tabakalı bir yapı, yengeç pençesinin gradyan yapısı ile süreksiz geçişlere sahip gradyen bir yapı tasarlanmıştır. Katmanlar arasında 800 ve 1200 mm/s tarama hızları ve düz ve chessboard stratejileri kullanılarak tabakalı biyomimetik hiyerarşik yapılar elde edilmiştir. Sabit genlikli yükleme durumunda ve değişken aşırı yükleme durumunda çatlak ilerleme davranışı incelenmiştir. Testler sırasındaki çatlak boyu değişimlerinin incelenmesi için, dijital görüntü alma sistemi ile *in situ* olarak kaydedilmiştir. Dijital Görüntü İşleme (Digital Image Correlation-DIC) tekniği ile numunelerin çatlak boyundaki değişimler ve çatlak ucunda oluşan şekil değiştirmeler (deformasyonlar) belirlenmiştir.

**Bulgular:** AISI 316L paslanmaz çeliği numuneleri üzerinde yapılan statik ve dinamik yükleme testleri, üretim parametrelerinin malzeme performansı üzerindeki önemli etkilerini ortaya koymuştur. Tarama hızı artışıyla birlikte malzeme yapısında gözenek ve sertlik değerlerinin arttığı, ancak katmanlar arası bağlanmanın zayıfladığı ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Chessboard stratejisinde ise, daha kontrollü ısı dağılımı sağlamış ve iç gerilmeleri azaltarak malzeme dayanımını iyileştirmiştir. Ayrıca, yumuşak ve sert fazlardan oluşan biyomimetik hiyerarşik yapılar, çatlak ilerlemesini engelleyerek çatlak ilerleme hızını yavaşlatmış ve tek fazlı yapılarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde geliştirmiştir.

**Sonuç:** SLM üretim parametrelerinin malzeme performansı üzerinde önemli etkileri olduğu ve biyomimetik hiyerarşik yapıların yorulma çatlak ilerleme davranışını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu çalışma, literatüre önemli katkılarda bulunmuş ve gelecekteki çalışmalar için yeni araştırma alanları açmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyomimetik hiyerarşik yapı, Gradyen yapı, Tabakalı yapı, Fonsiyonel Malzeme, Seçici Lazer Ergitme (SLM)

Şubat 2025, 162 sayfa

## ABSTRACT

### MASTER'S THESIS

#### FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF BIOMIMETIC HIERARCHICAL STRUCTURES WITH HIGH MECHANICAL PERFORMANCE BY SELECTIVE LASER MELTING

Yeşim SEÇER KAVASOĞLU

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Halim KOVACI

**Purpose:** Today's technological developments, The increasing demand for high performance materials and structures has led researchers to focus their attention on biomimetics. In this thesis, biomimetic hierarchical layered and gradient structures were used to obtain structures with improved tensile, flexural strength, toughness and crack propagation resistance. The biomimetic hierarchical structure design aims to obtain an anisotropic single material with superior fatigue crack propagation behavior that exhibits a combination of strength and ductility behavior within the structure.

**Method:** Biomimetic hierarchical structures (functional structures) with controllable mechanical properties were obtained by Selective Laser Melting (SLM), which is an innovative method in contrast to traditional methods. Firstly, the effect on static strength of tensile and three-point bending specimens was evaluated using scanning speeds ranging from 300-1200 mm/s and different scanning strategies (flat and chessboard). In the second stage, the static and dynamic strength was investigated using different scanning speeds (in the range of 800-1200 mm/s), scanning strategy and structure orientation. Then, living things in nature were utilized to create biomimetic hierarchical structures; in this context, a layered structure was designed with the multilayer structure of the seashell, and a gradient structure with discontinuous transitions was designed with the gradient structure of the crab claw. Layered biomimetic hierarchical structures were obtained by using 800 and 1200 mm/s scanning speeds between layers and straight and chessboard strategies. The crack propagation behavior was investigated under constant amplitude loading and variable overloading. In order to examine the crack length changes during the tests, they were recorded in situ with a digital image acquisition system. Digital Image Correlation (DIC) technique was used to correlate the change in crack length of the specimens with the change in crack length.

**Findings:** Static and dynamic loading tests on AISI 316L stainless steel specimens revealed significant effects of manufacturing parameters on material performance. It was observed that the pore and hardness values in the material structure increased with increasing scanning speed, but interlayer bonding weakened and surface roughness increased. In the Chessboard strategy, it provided more controlled heat dissipation and improved material strength by reducing internal stresses. Furthermore, biomimetic hierarchical structures consisting of soft and hard phases inhibited crack propagation, slowing down the crack propagation rate and significantly improving it compared to single-phase structures.

**Results:** It was determined that SLM manufacturing parameters have significant effects on material performance and biomimetic hierarchical structures positively affect fatigue crack propagation behavior. This study has made significant contributions to the literature and opened new research areas for future studies.

**Keywords:** Biomimetic hierarchical structure, Gradient structure, Layered structure, Functional Material, Selective Laser Melting (SLM)

February 2025, 162 pages

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	11
Biyomimetik ve Yapısal Elemanlar .....	11
Eklemeli Üretim Yöntemi.....	16
Seçici Lazer Ergitme .....	17
Lazer gücünün etkisi .....	22
Tarama hızının etkisi .....	22
Tarama stratejisinin etkisi .....	23
Tabaka kalınlığının etkisi .....	25
SLM kusurları.....	25
Yorulma.....	29
Yorulma analizlerinde kullanılan yaklaşımlar .....	35
Kırılma mekaniği.....	38
Kırılma mekaniği yaklaşımının yorulma çatlak ilerlemesi analizlerinde kullanımı ..	39
Sabit genlikli yorulma çatlak ilerlemesi .....	39
Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi .....	41
MATERYAL VE METOT.....	46
Materyal .....	46
Biyomimetik hiyerarşik modellerin tasarımı.....	47
Çekme ve üç noktadan eğme test numunelerinin hazırlanması .....	48
Yorulma çatlak ilerleme test numunelerinin hazırlanması.....	49
Eklemeli üretim yöntemi ile test parçalarının üretimi ve yüzey temizliği .....	51
Çekme ve üç noktadan eğme testlerinin gerçekleştirilmesi .....	54
Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinin gerçekleştirilmesi .....	55
Yapısal, morfolojik ve mekanik incelemeler .....	56
ARAŞTIRMA BULGULARI .....	58

Sabit Genlikte Yorulma Çatlak İlerlemesi Analizleri .....	87
Değişken Genlikli Yorulma Çatlak İlerleme Analizleri: Çeki Aşırı Yükleme (OL) ....	103
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	118
KAYNAKLAR.....	123
ÖZGEÇMİŞ.....	145



## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Biyomimetik Hiyerarşik Yapılardan Esinlenerek Oluşturulan Yapılar ve Canlılara Ait Literatür Özeti.....	16
<b>Tablo 2.</b> Literatürde Gözlemlenen SLM Kusurları.....	27
<b>Tablo 3.</b> Concept Lazer Firmasına Ait AISI 316L Paslanmaz Çelik Tozuna ve Dövme AISI 316L Paslanmaz Çeliğe Ait Kimyasal Kompozisyonu.....	46
<b>Tablo 4.</b> AISI 316L Paslanmaz Çelik Malzemenin Mekanik Özellikleri.....	46
<b>Tablo 5.</b> Tez Kapsamında Kullanılacak Mekanik Testler İçin Modellere Ait Parametreler ...	53
<b>Tablo 6.</b> Tez Kapsamında Kullanılacak Çatlak İlerlemesi Modellere Ait Parametreler .....	54
<b>Tablo 7.</b> Geleneksel Yöntem Kullanılarak Üretilen Dövme Numunelerin ve Farklı Tarama Hızları ve Stratejileri Kullanılarak Üretilen SLM Numunelerin Ortalama Tane Boyutu, Artık Gerilme, Mikrosertlik, Akma Gerilmesi, Çekme Gerilmesi, Yüzde Uzama, Maksimum Eğme Yüğü .....	82

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Biyomimetik yapısal tasarım öğeleri .....	12
Şekil 2. Canlılara ait hiyerarşik yapıların modellenmesi ve çeşitli biyolojik sınıfları temsil eden yapılar .....	15
Şekil 3. Eklemeli üretim yöntemlerinin sınıflandırılması .....	17
Şekil 4. SLM üretim prensibi ve erimiş havuzda ısı transferinin şematik gösterimi .....	18
Şekil 5. Sıcaklık gradyanı oluşum mekanizması: a) Lazer etkisi ile oluşan deformasyonlar ve b) Farklı tarama vektörü uzunlukları boyunca farklı sıcaklıklar.....	19
Şekil 6. SLM üretim parametreleri.....	20
Şekil 7. Lazer etkisi ile artık gerilme oluşumu: a) Toz tabakasında erime sırasında hacim azalması ve b) Lazer tarama sırasında artık gerilme oluşumu .....	21
Şekil 8. Farklı tarama stratejilerine ait örnekler .....	24
Şekil 9. Eklemeli üretim sırasında a) soğuma (termal büzülme) b) yeni katmanın ısınması (termal genleşme) nedeniyle oluşan gerilmelerin gelişimi. ....	26
Şekil 10. SLM ile üretilen malzemelerde üretim parametreleri ve malzeme üzerindeki etkileri .....	28
Şekil 11. a) Yorulma ile ilgili temel büyüklükler ve tanımlanması (b) Çeki-çeki yükleme, (c) çeki-bası yükleme, (d) rastgele/spektrum yükleme .....	31
Şekil 12. Yorulmanın aşamaları ve kontrol eden faktörler .....	33
Şekil 13. Yorulma çatlak oluşumu ve ilerlemesi.....	34
Şekil 14. Yorulma çizgilerinin oluşumu ve örnek oluşum mekanizması.....	35
Şekil 15. Farklı malzeme grupları için S-N eğrisi ve detaylı bölgeler .....	36
Şekil 16. Yorulma çatlak başlangıcı için şekil değiştirme ömrü yaklaşımı .....	37
Şekil 17. Yorulma çatlak ilerleme eğrisi .....	38
Şekil 18. Düzlem gerilme ve düzlem şekil değişimi .....	39
Şekil 19. Sabit genlikli yükleme altında yorulma çatlak ilerlemesinin oluşumu .....	40
Şekil 20. DGY altında temel çatlak ilerleme modelleri ve analizde kullanılan temel büyüklükler .....	43
Şekil 21. Çatlak kapanma mekanizmaları: a) plastisite, b) oksitlenme, c) pürüzlülük, d) akışkan, e) faz dönüşümü, f) çatlak sapması, g) fiber bağlanması ve h) partikül bağlanması .....	45
Şekil 22. AISI 316L paslanmaz çelik toz özellikleri: a) AISI 316L paslanmaz çelik tozunun morfolojisi ve b) Toz parçacık boyutu dağılımı .....	46
Şekil 23. Tez kapsamında gerçekleştirilecek işlemler.....	47

<b>Şekil 24.</b> Biyomimetik Hiyerarşik model tasarımı .....	48
<b>Şekil 25.</b> Çekme ve üç noktadan eğme testi numunelerinin geometrisi ve boyutları .....	49
<b>Şekil 26.</b> Çentik geometrileri ve yorulma ön çatlak için gerekli boyutlar .....	50
<b>Şekil 27.</b> Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan CT numunesi boyutları .....	51
<b>Şekil 28.</b> L-PBF yöntemi kullanılarak üretilen biyomimetik hiyerarşik modeller ve üretim parametreleri .....	53
<b>Şekil 29.</b> Çekme (soldaki) ve üç noktadan eğme (sağdaki) testleri esnasındaki görüntüler ....	55
<b>Şekil 30.</b> Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan deney düzeneği ve dijital görüntü alma sistemi.....	56
<b>Şekil 31.</b> Farklı parametrelerde üretilen SLM numunelerin ve geleneksel üretilmiş numunelerin çekme testi sonucu gerilme-şekil değişimi eğrisi .....	59
<b>Şekil 32.</b> Farklı lazer tarama hızları ile düz tarama stratejisi kullanılarak üretilen numunelerin gözeneklilik değişimine ait görüntüler: <b>a)</b> 300 mm/s, <b>b)</b> 600 mm/s, <b>c)</b> 800 mm/s, <b>d)</b> 900 mm/s, <b>e)</b> 1000 mm/s ve <b>f)</b> 1200 mm/s .....	61
<b>Şekil 33.</b> Farklı parametrelerde üretilen numunelerin çekme testi sonucu kırılma görüntüleri a) 300 mm/s b) 600 mm/s c) 800 mm/s d)900 mm/s e) 1000 mm/s f) 1200 mm/s g) Dövme üretim .....	62
<b>Şekil 34.</b> Dövme-geleneksel üretim yöntemi ile üretilmiş AISI 316L numunesinin çekme testi sonrası yüzey fraktografisi .....	63
<b>Şekil 35.</b> Farklı lazer tarama hızları ile düz tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş numunelere ait çekme testi sonrası SEM fraktografisi: <b>a)</b> 300 mm/s, <b>b)</b> 600 mm/s, <b>c)</b> 800 mm/s, <b>d)</b> 900 mm/s, <b>e)</b> 1000 mm/s ve <b>f)</b> 1200 mm/s.....	65
<b>Şekil 36.</b> Farklı parametrelerde üretilen numunelerin çekme testi sonucu kırılma görüntüleri a) 300 mm/s b) 600 mm/s c) 800 mm/s d) 900 mm/s e) 1000 mm/s f) 1200 mm/s g) Geleneksel.....	67
<b>Şekil 37.</b> Farklı lazer tarama hızları ile düz tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş SLM numunelerin ve geleneksel numunenin üç noktadan eğme testleri sonrası yük-uzama eğrileri.....	68
<b>Şekil 38.</b> Tüm numunelere ait mekanik özelliklere ait radar grafiği.....	69
<b>Şekil 39.</b> SLM kullanılarak düz tarama stratejisi ile üretilmiş numunelere ait üç noktadan eğme testi sonrası SEM fraktografisi: <b>a)</b> 300 mm/s, <b>b)</b> 600 mm/s, <b>c)</b> 800 mm/s, <b>d)</b> 900 mm/s, <b>e)</b> 1000 mm/s ve <b>f)</b> 1200 mm/s.....	71
<b>Şekil 40.</b> Farklı parametrelerde ve Chessboard (satranç tahtası) stratejisi ile üretilen SLM numunelerin çekme testi sonucu gerilme-şekil değişimi eğrisi .....	75

<b>Şekil 41.</b> Farklı lazer tarama hızları ile chessboard tarama stratejisi kullanılarak üretilen SLM numunelerinin çekme testleri sonrası kırılma görüntüleri: <b>a)</b> 800 mm/s, <b>b)</b> 1000 mm/s ve <b>c)</b> 1200 mm/s .....	76
<b>Şekil 42.</b> Farklı lazer tarama hızları ile chessboard tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş numunelere ve geleneksel yöntemle üretilmiş numuneye ait çekme testi sonrası SEM fraktografisi: <b>a)</b> Geleneksel, <b>b)</b> 800 mm/s, <b>c)</b> 1000 mm/s, <b>d)</b> 1200 mm/s.....	77
<b>Şekil 43.</b> Farklı lazer tarama hızları ile chessboard tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş SLM numunelerin ve geleneksel numunenin üç noktadan eğme testleri sonrası yük-uzama eğrileri .....	78
<b>Şekil 44.</b> SLM kullanılarak chessboard tarama stratejisi ile üretilmiş numunelere ait üç noktadan eğme testi sonrası SEM fraktografisi: <b>a)</b> 800 mm/s, <b>b)</b> 1000 mm/s ve <b>c)</b> 1200 mm/s.....	79
<b>Şekil 45.</b> SLM ve geleneksel yöntem ile üretilmiş numunelerin XRD grafikleri: <b>a)</b> Tüm numuneler, <b>b)</b> Kalınlık boyunca üretilen chessboard stratejisine sahip numuneler, <b>c)</b> Dik üretilmiş düz stratejiye sahip numuneler ve <b>d)</b> Dik üretilmiş chessboard stratejisine sahip numuneler .....	81
<b>Şekil 46.</b> Geleneksel yöntemle üretilen numunenin yüzey SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu .....	84
<b>Şekil 47.</b> Farklı lazer tarama hızları ve stratejileri kullanılarak üretilen numunelerin 3D profilometre görüntüleri: <b>a)</b> D-800 mm/s, <b>b)</b> D-1000 mm/s, <b>c)</b> D1200 mm/s, <b>d)</b> C-800 mm/s, <b>e)</b> C-1000 mm/s ve <b>f)</b> C-1200 mm/s .....	85
<b>Şekil 48.</b> Farklı parametrelerde üretilen numunelerin yüzey SEM ve EDS görüntüleri a) C-800 mm/s b) C-1000 mm/s c) C1200 mm/s d) D-800 mm/s e) D-1000 mm/s f) D-1200 mm/s .....	86
<b>Şekil 49.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile: a) Dik ve düz strateji ile üretilen ve b) Dik ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrisi .....	89
<b>Şekil 50.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile: a) Dik ve düz strateji ile üretilen ve b) Dik ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri.....	89
<b>Şekil 51.</b> Uzunluk boyunca (Dik) üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi görüntüleri: a) Düz strateji 800 mm/s, b) chessboard strateji 800 mm/s, c) düz strateji 1000mm/s, d) chessboard strateji 10000 mm/s, e) düz strateji 1200 mm/s, f) chessboard strateji 1200 mm/s ve g) geleneksel üretim .....	90
<b>Şekil 52.</b> Geleneksel üretim yöntem ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunenin çatlak ilerlemesi sonrası 3D profilometre ve SEM görüntüleri .....	91

<b>Şekil 53.</b> Dik üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi sonucu elde edilen kırık yüzey görüntüleri a) Düz strateji 800 mm/s b) düz strateji 1000 mm/s c) düz strateji 1200 mm/s d) chessboard strateji 800 mm/s e) chessboard strateji 1000 mm/s f) chessboard strateji 1200 mm/s .....	93
<b>Şekil 54.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile: a) Kalınlık ve düz strateji ile üretilen ve b) Kalınlık ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrisi.....	95
<b>Şekil 55.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile a) Kalınlık ve düz strateji ile üretilen ve b) Kalınlık ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri .....	96
<b>Şekil 56.</b> Kalınlık boyunca üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi görüntüleri: a) Düz strateji 800 mm/s, b) chessboard strateji 800 mm/s, c) düz strateji 1000mm/s, d) chessboard strateji 1000 mm/s, e) düz strateji 1200 mm/s ve f) chessboard strateji 1200 mm/s.....	96
<b>Şekil 57.</b> SLM yöntemi ile yatay ve dikey yönde üretimin şematik gösterimi ve gözenek değişimi.....	97
<b>Şekil 58.</b> SLM yöntemi ile kalınlık boyunca üretilmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme sonrası SEM görüntüleri a) YC-800 mm/s b) YC-1000 mm/s ve c) YC-1200 mm/s.....	98
<b>Şekil 59.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile a) Tabakalı ve dik üretim yönünde üretilen ve b) Tabakalı ve kalınlık boyu üretim yönünde üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrisi .....	100
<b>Şekil 60.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile tabakalı üretilen numunelerin çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri .....	101
<b>Şekil 61.</b> Tabakalı bir şekilde SLM ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme sonrası SEM görüntüleri a) Tabakalı Kalınlık-Chessboard üretim b) Tabakalı-Dik-Chessboard üretim c) Tabakalı Dik-düz üretim ve d) Tabakalı- Kalınlık- Düz Üretim .....	102
<b>Şekil 62.</b> Geleneksel ve SLM ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi ömrünün tarama hızı ve tarama stratejisine göre değişimi .....	103
<b>Şekil 63.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile üretilen numunelere ait SGY+OL işlemi sonucu elde edilen çatlak boyu (a)-çevrim sayısı (N) grafikleri .....	108
<b>Şekil 64.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile düz üretilen numunelere ait SGY+OL işlemi sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı (da/dN)-çatlak boyu (a) grafikleri .....	109

<b>Şekil 65.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile yatay üretilen numunelere ait SGY+OL işleminin sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı ( $da/dN$ )-çatlak boyu (a) grafikleri .....	110
<b>Şekil 66.</b> Geleneksel ve SLM yöntemi ile tabakalı olarak üretilen numunelere ait SGY+OL işleminin sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı ( $da/dN$ )-çatlak boyu (a) grafikleri .....	112
<b>Şekil 67.</b> Dijital Görüntü İşleme yöntemi ile SGY+OL yükleme sonrası OL uygulanmadan hemen önce ve sonrasına ait $\epsilon$ -y görüntüleri: a) C-800 numunesi ve b) Tabakalı-Dik-Chessboard Stratejisi ile üretilen numune .....	112
<b>Şekil 68.</b> Geleneksel üretim yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunenin SGY+OL çatlak ilerlemesi sonrası 3D profilometre ve SEM görüntüleri.....	113
<b>Şekil 69.</b> SLM Chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerleme sonrası kırılma yüzey fraktografisi görüntüleri a) C-800 mm/s b) C-1000 mm/s c) C-1200 mm/s d) YC-800 mm/s e) YC-1000 mm/s f) YC-1200 mm/s ...	115
<b>Şekil 70.</b> Tabakalı bir şekilde SLM ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerleme sonrası yüzey fraktografisi görüntüleri a) Tabakalı Kalınlık-Chessboard üretim b) Tabakalı-Dik-Düz üretim Chessboard üretim c) Tabakalı Kalınlık-Düz üretim d) Tabakalı-Dik-Chessboard üretim .....	116
<b>Şekil 71.</b> Geleneksel ve SLM ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerlemesi ömrünün tarama hızı ve tarama stratejisine göre değişimi.....	117

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$\mu$	Mikron
$\sigma$	Normal gerilme
$\varepsilon$	Birim şekil değiştirme
Fe	Demir
g	Gram
W	Watt
J	Joule
kW	Kilowatt
s	Saniye
m	Metre
MPa	Megapaskal
n	Nano
N	Newton
N <sub>2</sub>	Azot
O <sub>2</sub>	Oksijen
°	Derece
$\gamma$	Ostenit
$\delta$	Delta ferrit
Ra	Yüzey pürüzlülüğü
$\tau$	Kayma gerilmesi
$\Theta$	Teta

### Kısaltmalar

3B/3D	Üçboyutlu
A	Genlik oranı
B	Numune kalınlığı
C	Chessboard stratejisi
D	Düz üretim yönelimi
E	enerji yoğunluğu
EPKM	Elasto-Plastik Kırılma Mekaniki
h	Tarama aralığı
L	Numune boyu

LEKM	Lineer Elastik kırılma Mekaniği
LoF	Lack of Fusion-Füzyon eksikliği
L-PBF	Lazer toz yatak füzyonu
P	lazer gücü
R	Gerilme oranı
SLM	Seçici lazer ergitme
t	Katman kalınlığı
v	tarama hızı
W	Numune genişliği
Y	Yatay üretim yönelimi
YC	Yatay yönelim chessboard stratejisi
YD	Yatay yönelim düz tarama stratejisi

## GİRİŞ

Biyomimetik, biyomimikri, biyotaklit ve biyoilham, doğadaki canlılardan ve doğal sistemlerden ilham alarak insan yapımı sistemlerin geliştirilmesiyle ilgili kavramlardır. Bu kavramlar genellikle birbirine yakın anlamlarla kullanılsa da aralarındaki ince farklar bulunmaktadır. Canlıların yapıları, işleyişleri ve evrimsel süreçlerinden ilham alarak, bu özellikleri taklit eden ya da benzer prensiplere dayanan yapılar, malzemeler ve teknolojiler geliştirmeyi amaçlayan disipline **biyomimetik** adı verilmektedir. Biyomimetik tasarım, doğadaki mükemmel işlevsellik ve verimlilikten yararlanarak insan yapımı malzeme ve sistemler geliştirir. **Biyomimikri**, doğadaki çözümleri ve stratejileri inceleyerek, insan yapımı ürünlerin veya sistemlerin tasarımında kullanılmasını ifade eder. Biyomimikri terimi genellikle biyomimetik tasarım sürecini ifade etmek için kullanılır, ancak doğanın sağladığı çözümleri doğrudan taklit etme amacını taşır. **Biyotaklit** terimi, doğada var olan canlıların veya sistemlerin doğrudan taklit edilmesi anlamında kullanılmaktadır. Bu terim, daha çok doğadaki örneklerin birebir kopyalanması veya benzer şekilde yeniden üretilmesi anlamına gelir. **Biyotaklit**, daha dar bir anlam taşır. Burada doğadaki bir özelliğin, canlı yapısının ya da organizmaların doğrudan *kopyalanması* veya *taklit edilmesi* söz konusudur. **Biyoilham**, doğadaki canlılardan ve ekosistemlerden alınan ilhamla, yeni fikirler ve çözümler geliştirilmesini ifade eder. Biyoilham kavramı, doğanın işleyişinden esinlenerek bir tasarım sürecine başlanmasını ve bu süreçte doğrudan taklit yerine, doğadaki çözümlerden faydalanarak yenilikçi sistemler ve teknolojiler tasarlanmasını içerir. Kısaca, bu kavramlar, doğadaki organizmalar ve sistemlerden esinlenerek, daha verimli, sürdürülebilir ve işlevsel tasarımlar geliştirmeyi amaçlayan bir yaklaşımı ifade eder, ancak her biri doğaya yaklaşım biçimi ve uygulama düzeyi bakımından farklılıklar gösterir (Bonderer *et al.*, 2008; Mayer, 2005).

Doğadaki var olan canlıların üstün özelliklerini belli mühendislik uygulamaları kullanarak analiz etmek ve farklı uygulama alanlarında sorunlara sürdürülebilir çözümler elde ederek kullanılabilir hale getirmek amacıyla biyomimetik alanı kullanılmaktadır (Lenau *et al.*, 2018). Mühendislikte biyomimetik kavramı, özellikle mühendislik problemlerini çözmeye veya mühendislik uygulamalarında kullanmak amacıyla biyolojik sistemlerin incelenmesini ve bu sistemlerden elde edilen bilgilerin mühendislik uygulamalarında kullanılmasını içerir. Günümüzde doğadaki canlıların üstün özelliklerinin araştırılması ve kullanılabilir malzeme haline getirilmesi amacıyla pek çok araştırma yapılmıştır (Bonderer *et al.*, 2008; Dimas *et al.*, 2012; Mayer, 2005; Mirkhalaf *et al.*, 2014; Yao *et al.*, 2011). Üstün özelliklere sahip canlılar, doğada karmaşık ve etkili yapıların ortaya çıkmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu canlılar,

genellikle yapı boyunca farklı boyutlarda değişken özellikler sergileyen hiyerarşik düzenlere sahip olup, bu özellikler belirli bir düzen içinde yerleşerek organizmanın çevresine uyum sağlamasını ve hayatta kalmasını mümkün kılar. Hiyerarşik yapılar, bir organizmanın çeşitli yapısal özelliklerinin ve fonksiyonlarının farklı ölçeklerde organize olmasını sağlar. Bu yapılar, makroskopik düzeyden mikroskobik ve hatta nano ölçeklere kadar uzanarak, organizmanın farklı seviyelerinde birbirini tamamlayan işlevsel tasarımlar oluşturur. Biyomimetik hiyerarşik yapılar, özellikle gelişmiş organik yapılarda bulunabilecek mükemmel mekanik, hidrodinamik, optik ve elektriksel özelliklerin çeşitliliği göz önüne alındığında, yeni nesil yapısal malzemelerin tasarımı için önemli bir ilham kaynağı olmaktadır. Özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranı, sertlik, dayanım ve tokluk gibi üstün mekanik özelliklere sahip malzemelerin tasarımı ve üretimi malzeme mühendisliği açısından kritik öneme sahiptir (Roco, 2011). Malzeme mühendisliğinde, bu üstün özelliklere sahip malzemelerin tasarımı, malzemenin bileşimine ve mikro/nano yapısına bağlıdır. Doğadaki organizmaların bu özelliklerinin, içerdikleri yapısal detaylar ve bileşenlerin düzeni sayesinde elde edildiği bilinmektedir. Örneğin, kemiklerin sertliği ve dayanıklılığı, içerdikleri kalsiyum ve fosfat mineralleri ile kollajen liflerinin dengeli bir biçimde düzenlenmesine bağlıdır.

Yapısal biyolojik malzemeler, canlı organizmaların vücutlarında bulunan ve çeşitli işlevlere hizmet eden malzemelerdir. Bu biyolojik malzemelerin sahip olduğu yapılar; koruma (yumuşakça kabuğu ve kemikler), savunma ve saldırganlık (pençeler, dişler ve boynuzlar) gibi işlevlere sahiptirler. Bu yapıların sergilediği özelliklere: Arapayma (*Arapaima gigas*) balığı pullarında mükemmel mekanik özellikler ve üstün esneklik özelliği; örümcek ağları, sedef, karides pençeleri gibi canlılarda mükemmel darbe direnci, *Bauhinia* baklaları ve bazı çiçeklerde hayatta kalma ve üreme için çeşitli şekil değiştirme özelliği ve denizatinın darbeye karşı olağanüstü esneklik sağlama örnek olarak verilebilir (Fu *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2013a; Murphy *et al.*, 2014).

Doğal korunma mekanizmalarından olan boynuzlar; savunma ve saldırma durumunda kullanıldığından dolayı darbeye, eğilmeye ve kesme deformasyonuna karşı yüksek dirence sahiptir. Bir başka örnek verilmesi gerekirse, toynaklar bası yüklerini iskelete aktarıırken yüksek tekrarlı darbe yüklerine maruz kalırlar. Bu nedenle toynak yapısı yerel olarak mukavemet, sertlik, kırılma tokluğu ve darbe sönümlenme gibi değişken mekanik özellikleri aynı anda sergilemektedir. Balık pulları ve sürüngeçerler mineral esaslı koruyucu zırh görevi yapan osteoderm yapısından oluşmaktadır. Timsaha ait osteoderm yapısı incelendiğinde, bu yapının hem dış etkilerden korunma hem de esnekliği sağlayan sütür yapısı (dişler) ve kolajen liflerinden oluşan dört farklı yapısal bölgeden oluştuğu görülmektedir. Bu yapı, iç kısımda

gözenekli bir çekirdek, dış kısımda kemik yapısı ve ventral bölgede lameller-zonal kemik birleşiminden oluşan sandviç benzeri bir hiyerarşiye sahiptir. Bu hiyerarşik yapı, ostederm yapısında dıştan iç kısma doğru uyumlu kademeli bir özellik geçişine sebep olur. Böylece yükün verimli bir şekilde dağılımı ve enerji emilimi/dağılımı sağlanarak yüksek darbe direnci elde edilir (Liu *et al.*, 2017; Sun and Chen, 2013). Chen ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, hidroksiapatit ve kollajen içeren bir kemik yapısı olan timsah kabuğunun, bağ ve lifleri içeren özelliklere sahip gözenekli bir yapı olduğu ve bu yapının da osteodermin ağırlığını azaltarak hareketi kolaylaştırdığı belirtilmiştir. Ayrıca gözenekler etrafında bulunan matris yapısının da yırtıcı hayvanların darbelerine karşı koyan yüksek bir sertlik sağladığı ortaya konmuştur. Timsah kabuğu modelinde yapılan deneyler sonucunda gözenek düzleşmesi, çatlak büyümesini engelleyen kolajen ve mineral köprü kurulması olmak üzere üç temel sertleşme mekanizması gözlemlenmiştir. Bu mekanizmalar sayesinde yük uygulandığında tokluk ve plastisite açısından oldukça yüksek performans elde edilmiştir(Cheng *et al.*, 2014a).

Kaplumbağa kabuklarında bulunan ve sütür adı verilen kemikli bölümler, birbirine kenetlenen zikzak eklemlerle birleşmiş haldedir. Sütürler üç boyutlu (3B/three dimensional-3D) ve organik dokulu komplike yapılar olup, düşük yükler altında neredeyse hiç deformasyona uğramazlar ve yüksek yüklere maruz kaldığında kilitlenerek daha rijit (yüksek mukavemet) hale gelmektedir. Rhee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kaplumbağa kabuğunun gözenekli çekirdeğinin kapalı hücreli köpük benzeri sandviç yapıdan oluştuğunu belirtilmiştir. Bu sandviç yapı sayesinde yük altında sütürlerin, non-linear (doğrusal olmayan) deformasyona uğradığı ve üzerlerine gelen yoğun yük korteksini yüksek bir enerji absorpsiyonu ile karşıladığı gözlemlenmiştir(Rhee *et al.*, 2009).

Karıncayiyen olarak da adlandırılan pangolinler, Afrika ve Asya'da yaşayan Ashby sertlik değerlerine göre en sert biyolojik malzemeler arasında yer alan sert keratin pul yapısına sahip tek memelidir. Doğal esnek yapıda olan ve dermal zırh görevi yapan bu pullar, yırtıcı hayvan tehditleri ile karşı karşıya kaldığı zaman sadece sert ve keskin olan pulları dışa doğru çıkıntı haline getirerek karıncayiyen için koruma ve savunma kalkanı oluştururlar. Bu özelliğe ek olarak pullar; anti-adezyon (yapışmama), yüksek sertlik, dayanım ve aşınma direnci gibi üstün özellikler sergilerler (Liu *et al.*, 2016; Spearman, 1967; Tong *et al.*, 2007a).

Yüksek dayanım ve tokluğa sahip malzemeler oluşturmak uzun zamandır üzerine çalışılan bir konu olmakla birlikte konvansiyonel mühendislik malzemelerinin tasarımında dayanım ve tokluk özelliklerinden birinin tercih edilmesi gerekmektedir. Araştırmacılar, son yıllarda hiyerarşik yeni nesil kompozit malzemeler ile bu önemli sınırlandırmanın üstesinden gelmeye çalışmaktadırlar. Bu durum için doğanın sunduğu en iyi örneklerden biri

yumuşakçaların kabuklarıdır. Yumuşakçaların kabuklarına ait mikroyapılar incelendiğinde, bu canlıların tuğla-harç (brick-mortar) modeli olarak adlandırılan tabakalı ve karmaşık bir hiyerarşik yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu yapı, sert ve yumuşak fazların bir arada bulunması sebebi ile gevrek kırılmayı engeller ve çatlak ilerlemesini durdurur. Bu yapıya ait en önemli davranış; sertlik, mukavemet ve tokluk gibi özelliklerin eşzamanlı olarak gözlemlendiği ilginç bir tasarım sunduğu gerçeğidir (Espinosa *et al.*, 2011b; Gu *et al.*, 2017).

Yumuşakça kabuklarından esinlenerek oluşturulan tuğla-harç modeline sahip bir çalışmada, yumuşak fazların varlığı ile çoklu çatlak oluşumu artırılarak elde edilen kompozitin tokluğunda artış gözlemlenmiştir. Kompozit yapıdan kaynaklı yüksek hasar performansının, çatlak dallanması, çoklu çatlak oluşumu ve bağ köprülenmesinden (bridging of uncracked ligaments) kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bağ köprülenmesi olayında, hasar görmemiş bölgeler hasarlı bölgeleri köprüleyerek malzemenin dayanımını artırmıştır (Li *et al.*, 2021).

Bambu sapları, dıştan içe doğru damar yoğunluğunun azaldığı değişken gradyan/gradyen/gradyent (geçişli/derecelendirilmiş) yapıya sahiptir. Bu yapı sayesinde, aynı anda hem esneklik hem de dayanıklılık sağlanmaktadır (Tan *et al.*, 2011; Habibi *et al.*, 2015). Humboldt kalamar gagası, tamamen organik bir yapıdan oluşan uçtan tabana doğru değişken sertlik gradyeni sergileyen biyolojik bir yapıdır (Miserez *et al.*, 2008). Bu yapı özellikle çatlak ilerleme davranışı açısından oldukça önemli bir hiyerarşidir. Gradyen yapıya bir diğer önemli örnek olarak ise yaklaşık 96 milyon yıl önce ortaya çıkmış yaşayan fosil olarak adlandırılan 'Polypterus senegalus' verilebilir. Bu yapı, kompozit katmanların bir araya geldiği ve yapı içerisinde farklı bölgelerde değişik mekanik özellikler sergileyen bir doğal mühendislik harikası olarak düşünülmektedir. Bu yapı sayesinde dayanım oldukça iyileşirken yapı içerisinde optimize edilmiş enerji dağılımı sağlanmaktadır (Bruet *et al.*, 2008). Gradyen yapılardan esinlenerek tasarım gerçekleştirilen bir çalışmada (Cavaliere, 2008), Ni-W alaşımından elde edilen yapıda çatlak ilerlerken (yumuşak bölgeden serte geçişte) J İntegral analizlerine göre kırılma direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Bir diğer çalışmada, gradyan yapı, malzeme içerisindeki tane boyutunun belli bir ölçek boyunca değişimi ile elde edilmiştir. Bu yapı sayesinde çatlak yayılma davranışının engellendiği ve yapı içerisinde yüksek tokluk sergilendiği gözlemlenmiştir (Wang *et al.*, 2015).

Gradyen yapılar, malzeme içerisinde dayanım ve sünekliğin bir arada olduğu davranış sergileyebilen eşsiz bir hiyerarşiye sahiptir. Gradyen yapıya sahip Ni plakların darbe dayanıklılığı üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada, gradyan yapı sayesinde enerji emilimi ve dayanımın oldukça önemli bir miktarda arttığı gözlemlenmiştir. Gradyen yapı geçiş bölgesinde çatlak başlangıcının ve ilerlemesinin engellendiği ve doğrusal olmayan elastik kırılma mekaniği

(J Integral) tabanlı dinamik R-Eğrisi davranışının belirgin biçimde arttığı gözlemlenmiştir (Lin *et al.*, 2020).

Son zamanlarda, özellikle malzeme araştırmaları alanında hem malzemelerin yapı-özellik ilişkilerini hem de mekanik tepkilerini daha iyi anlamak ve optimize edilmiş performans için biyo-ilhamlı prototipler üretmek amacıyla geleneksel üretim yöntemlerinin yetersiz kalmasından dolayı eklemeli üretim/imalat yöntemlerinin (Additive Manufacturing) diğer adı ile 3B yazdırma/baskı (3D Printing) teknolojilerinin kullanımı tercih edilmeye başlanmıştır (Cheng *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2013b; Song *et al.*, 2013). Lazer toz yatak füzyonu (Laser Powder Bed Fusion/L-PBF) tekniğine dayalı bir eklemeli üretim yöntemi olan Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting/SLM) yöntemi, havacılık (özellikle hafifliğin esas olduğu), otomotiv ve tıbbi uygulamalar (protez, implant ve diğer ekipmanlar) başta olmak üzere pek çok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kaji and Barari, 2015; Salmi *et al.*, 2013a). Literatürde, SLM ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır (Biemond *et al.*, 2013; Dobrzański *et al.*, 2017; Schmidt and Belegatis, 2013). SLM proses parametreleri; malzemelerin mikro yapısı (gözeneklilik, tane boyutu, pürüzlülük vs.) ve böylece de mekanik performansı (sertlik, dayanım, tokluk vs.) üzerinde oldukça etkilidir. SLM sırasında yüksek sıcaklık gradyanları ve hızlı soğutma prosesleri etkin olduğundan dolayı, üretilen parçada mekanik özellikleri etkileyen artık gerilmeler meydana gelmektedir. Malzemenin üretimi sırasında meydana gelen sıcaklık gradyanları, yapı içerisinde mikroyapısal morfolojiyi etkilerken; hızlı soğuma prosesi katılma sırasında oluşan dentritlerin boyutunu etkilemektedir (Ishimoto *et al.*, 2017; Kunze *et al.*, 2015).

Lazer gücü, tarama hızı, tarama stratejisi ve katman kalınlığı gibi eklemeli üretim parametreleri kristalografik yapı oluşumu üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Lazerin katman üzerindeki tarama sırası, uzunluğu, yönü ve ardışık katmanlardaki değişimi; malzeme üzerindeki ısının miktarını değiştirir ve artık gerilme oluşumunu ve miktarını etkiler. SLM parametrelerinden biri olan tarama stratejisi, termal gradyan etki oluşumu ile doğrudan ilişkili olduğundan malzemenin artık gerilme oluşumu, yoğunluğu ve mikro yapısı üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Deneysel bir çalışmada, katmanı 45° tarama açısı ile oluşturulan malzemede %0,3 oranında gözeneklilik gözlemlenirken, 90° tarama açısı ile oluşturulması durumunda %0,1 seviyelerinde bir gözeneklilik gözlemlenmiştir. Bu durumun sebepleri olarak, 45° tarama açısına sahip katmanda tarama vektörlerinin boyunun kısa olması ve artan artık gerilmeler gösterilmektedir (Ali *et al.*, 2018). Bir diğer çalışmada, tarama stratejisinde artan tarama vektör uzunluğu ile gözenekliliğin azalma eğiliminde olduğu sonucuna varılmıştır (Ali *et al.*, 2017). Bir diğer çalışmada ardışık katmanlar arasında 90° (X ve XY) dönüş olup

olmaması durumunda malzemenin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Başka bir çalışmada, 90° tarama açısında (XY) çekme ve yorulma dayanımının diğer yöne kıyasla daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Wan *et al.*, 2019). Mercelis ve Kruth tarafından yapılan bir çalışma sonucunda, üretim sırasında katmanlı satranç tahtası (chessboard) kareleri gibi küçük parçalara ayırmanın düşük gerilmelere sebep olduğu ve ayrıca da X ve Y yönlerinde eşit gerilmeler meydana getirdiği ispatlanmıştır (Mercelis and Kruth, 2006a). SLM ile üretilen Ti6Al4V numunelerde tarama stratejisinin yapı içerisinde artık gerilme oluşumu ve bu durumun mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. 90° tarama açısına sahip numunelerde en düşük artık gerilmenin meydana geldiği ve mekanik özellikler üzerinde tarama stratejisinin doğrudan bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir (Ali *et al.*, 2018)

Lazer toz yatak füzyonu (L-PBF) esaslı üretim yöntemi, alaşım tozu ile lazer enerjisinin etkileşimine dayanan bir üretim sürecidir. Tozun ergitilmesi, lazer enerji yoğunluğuyla belirlenen lazer gücü ve tarama hızının bir fonksiyonudur. Enerji yoğunluğunun gözeneklilik, ergime havuzu morfolojisi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi pek çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır (Cherry *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2010a; Mumtaz *et al.*, 2008; Simchi and Pohl, 2003). Enerji yoğunluğunun etkisi üzerine yapılan bir çalışmada; düşük enerji yoğunluğunun lazer ışınlarının nüfuziyet derinliği için yetersiz olduğu ve tozların yeterince ergitilemediği belirtilmiştir. Mevcut tozların yeterince ergitilmemesi durumunda partiküller arasında boşluklar oluşur ve gözeneklilik artar (Li *et al.*, 2010b). Zheng ve arkadaşları, düşük enerji yoğunluğunda toz partiküllerinin birleştiğini ve bunun sonucunda gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğüne sebebiyet verdiğini ifade etmiştir (Zheng *et al.*, 2021). Ayrıca, Ng ve arkadaşları, düşük enerji yoğunluğunda yetersiz füzyon ve zayıf mekanik özellikler gözlemlendiğini, yüksek enerji yoğunluğunda ise boyutsal hatalara sebebiyet verebilecek buharlaşma ve malzeme hareketliliğine sebep olduğunu ifade etmiştir (Ng *et al.*, 2010). Enerji yoğunluğunda meydana gelen artış, hem eriyik havuzunun genişlik ve derinliğinin büyük olmasına hem de saçılma olayına sebebiyet verir. Saçılma olayının gerçekleşmesi sonucunda, toz partiküllerinde düzensiz ergime meydana gelmektedir. Bu durum yapı kalitesini etkileyen ciddi boşlukların oluşmasına neden olabilmektedir. Yüksek lazer gücü, büyük eriyik havuzu hacmi sağladığından; toz partiküllerini ergitmek için yeterli enerji sağlar ve bu durumun sonucu olarak ara katmanlarda daha iyi bağlanma ve daha az gözenekli bir yapı elde edilmektedir. SLM işlem prosesinde enerji yoğunluğu optimum bir değer olması gerektiği, düşük olması durumunda toplanma (balling) boşluk kusuru, yüksek olması durumunda ise buharlaşmanın meydana gelebileceği ifade edilmektedir (Larimian *et al.*, 2020; Yakout *et al.*, 2018). Ayrıca, yapılan bir diğer çalışmada tarama hızındaki değişimlerin lazer gücünün etkisinin tam tersi olduğu gözlemlenmiştir (Kumar *et al.*, 2019).

Lazer gücü, malzemenin gözenekliliği, tane yapısı ve tane boyutu üzerinde etkili bir parametredir (Parimi *et al.*, 2014). Mahamood ve arkadaşları, değişken lazer gücünün (1,8-3 kW) ve tarama hızının (0,05-0,1 m/s) mikrosertlik üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre; düşük tarama hızı ve yüksek lazer gücü eriyik havuzunun daha büyük olmasına sebebiyet vermiş ve eriyik havuzunun soğuması daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak, yapı içerisinde yumuşak bir faz olan Widmstätten Alpha ( $\alpha$ ) mikroyapısının oluştuğu ve bununla sertliği düşürdüğü ortaya konulmuştur (Mahamood *et al.*, 2015). SLM ile üretilen titanyum alaşımının mikrosertlik özellikleri incelendiği zaman aynı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, çekme deneyi sonucunda; yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü olması durumunda uzama miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Uzamada meydana gelen bu değişikliğin sebebi olarak, içyapıdan kaynaklı olarak  $\alpha$  martenzitleri ve nano  $\beta$  partiküllerinin tane inceltmesinin bütünleşik etkisinden kaynaklandığı gösterilmektedir (Wang *et al.*, 2019a).

SLM işlem parametrelerinden bir diğeri olan tarama hızının, malzemelerin mikro yapısına etkisi incelendiği zaman; düşük tarama hızlarında yapı içerisinde kaba ve hücreli yapıya benzer taneler gözlemlenirken, yüksek tarama hızlarında daha ince ve hücreli-dentritik tane yapısı elde edilmektedir. Bu şekilde bir mikro yapının oluşumu, aşırı soğumanın hızlı bir katılaşmaya sebep olduğu katılaşma teorisi ile açıklanmıştır. Katılaşma teorisinde önemli iki parametre olarak malzemenin sıcaklık gradyanı (G) ve katılaşma hızı (R) gösterilmektedir.  $G \times R$  değeri ne kadar fazla ise soğutma hızı o kadar artar. Yüksek tarama hızlarında soğuma hızı yüksek olur ve bu durum ise ince taneli mikro yapıya sebep olur (Li *et al.*, 2013c; Saeidi, 2016; Spierings *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019b). Tarama hızındaki değişim malzemenin çekme dayanımı üzerinde oldukça etkilidir. Farklı tarama hızlarında elde edilen mikro yapı incelendiği zaman anahtar deliği ve eksik ergime füzyonu (Lack of Fusion-LoF) gibi farklı gözenek yapılarının oluştuğu görülmektedir. Gözenek boyutundaki farklılık çekme yükü etkisi altında farklı kesit alanları sergiler ve böylece hesaplanan nominal gerilmeye kıyasla yerel gerilmeleri artırır. Ayrıca gözeneklerin şekilleri gerilme yığılmasını etkilemektedir. LoF gözeneklerinin keskin bölgelerinde gerilme yığılması meydana gelerek üç eksenli gerilmeler oluşmaktadır. Bu durum sonucunda ise yüksek yerel gerilmeler ve deformasyonlar gözlemlenmektedir. Sonuçta, bu boşlukların birleşimi ile kusurlar büyüyecek ve süneklikte azalma meydana gelerek hasar oluşacaktır (Esmailizadeh *et al.*, 2020).

SLM ile malzeme üretimi sırasındaki inşa yönü (yönelim) yorulma dayanımı üzerinde etkili bir parametredir ve yatay yönde inşa edilen numunelerin mekanik dayanımları diğer inşa yönlerine göre daha yüksektir. Bu durumun sebepleri; doğrusal ve/veya düzlemsel kusurların uygun şekilde yönlendirilmesi, ince mikro yapı ve düzenlenmiş termal gradyanlardır (Afkhami *et*

al., 2019). Malzeme içerisindeki mikro boşluklar/gözenekler yorulma davranışı üzerinde oldukça etkilidir (Li *et al.*, 2017). Malzemede var olan gözenek ve inklüzyonların yakınında biriken/yığılan gerilmeler, çatlak başlatma süresini hızlandıracak ve yorulma ömründe azalma meydana gelecektir. Malzemeler, değişken yüklemeye maruz kaldığı zaman gözenek ve inklüzyonlara yakın bölgelerdeki artık gerilmeler kısmen serbest bırakılır. Böylece her iki yönde yorulma çatlağının başlangıcı ve ilerlemesi kolaylaşır ve yorulma ömründe azalma meydana gelir (Zhang *et al.*, 2021). Yavari ve arkadaşları, SLM kullanılarak üretilen farklı gözeneklere sahip Ti6Al4V numunelerin yorulma davranışını incelemiştir. Çalışma sonucunda, yüksek gözenek yapısına sahip numunelerin yorulma dayanımlarının, düşük gözenek yapısına sahip numunelerinkinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Yüksek gözenekli yapıların yüzey pürüzlülüğündeki artış, yüksek çentik hassasiyetine sebep olur ve yapı içerisinde farklı bölgelerde erken çatlak başlangıcı ve ilerlemesine sebep olur (Yavari *et al.*, 2013). Malzemenin düşük enerji yoğunluğunda üretilmesinden kaynaklı olan yetersiz ergime sebebiyle oluşan boşluklar, yorulma dayanımı üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu nedenle kabul edilebilir yorulma dayanımı için optimum parametrelerin seçilmesi gerekmektedir.

Mühendislik malzemelerinden ve/veya yapılarından ilk sırada beklenen özellik kullanım ömürleri boyunca hasara uğramadan görevlerini/işlevlerini yerine getirmeleridir. Bununla birlikte, bu yapı ve elemanlardan birden fazla özelliği de aynı anda sergilemeleri beklenmektedir. Örneğin, bir malzemenin aynı anda hem yüksek mukavemete sahip olması hem de yüksek darbe dayanımı veya yorulma dayanımı sergilemesi beklenmektedir. Ancak, özellikle metalik malzemeler için bu durum neredeyse imkansızdır. Çünkü, yüksek mukavemet beraberinde yüksek sertlik ve gevrek malzeme davranışını getirmektedir. Hali ile de yüksek mukavemetli malzemeler çoğu zaman gevrek özellikte olduğundan bu malzemelerin yorulma dayanımları istenen seviyelerde olmamaktadır. Mühendislik yapılarının/elemanlarının birden fazla özelliği aynı anda sergileyebilmesi için başvurulan en temel yöntemler ya elemanın mevcut malzeme yerine farklı malzemelerden üretilmesi ya da elemanın (malzemenin) özelliklerinin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesidir. Burada, birinci seçenek olan farklı malzeme kullanımı; yeni malzeme kullanımı ile maliyet artışı veya kompozit malzeme kullanımı ile istenmeyen yapısal kusurlar (delaminasyon, anizotropik davranış vs.) gibi temel problemleri beraberinde getirmektedir. İkinci seçenek olarak karşımıza çıkan mevcut malzemelerin özelliklerinin hacimsel işlemler (haddeleme, aşırı plastik deformasyon vb.) veya yüzey işlemleri (termal, kimyasal, termokimyasal, mekanik, kaplama vb.) gibi ek uygulamalar ile geliştirilmesi ise taban malzeme ve yüzey arasında mekanik uyumsuzluk oluşması, malzemenin gevrek karakter kazanması gibi istenmeyen durumları ortaya çıkarmaktadır. Burada bahsedilen konvansiyonel uygulamalara ek olarak, son yıllarda birden fazla özelliği aynı anda

sergileyebilen malzemelerin üretilmesi için Yüksek Entropili Alaşımlar (High Entropy Alloys- HEA) le ilgili araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Ancak, bu malzemelerde hali hazırda doğrudan kullanıma hazır değillerdir.

Burada bahsedilen eksiklikleri gidermek için, literatür incelemesinden de görüleceği üzere, birden fazla mekanik özelliği aynı anda sergileyebilen (statik dayanım, yorulma dayanımı, darbe direnci vs.), yeni nesil ve özgün mühendislik malzemelerinin tasarımında biyomimetik hiyerarşik yapılardan esinlenilmesi tüm eksiklikleri giderebilecek bir alternatif olabilir. Biyomimetik hiyerarşik yapılardan esinlenerek elde edilen malzemelerin mekanik özelliklerinde büyük değişiklikler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Biyomimetik hiyerarşik yapılardan olan gradyen ve tabakalı yapı ele alındığı zaman; bu yapıların malzemelere yüksek tokluk, yorulma dayanımı ve çatlak ilerleme hızında yavaşlama gibi üstün özellikler sağladığı gözlemlenmiştir. Bunlarla birlikte, günümüzde kullanımı çok önemli seviyelere ulaşan ve her geçen gün gelişen 3B yazdırma (3D printing) veya diğer adı ile eklemeli üretim/imalat yöntemlerinin kullanımı ile biyomimetik hiyerarşik yapıların/malzemelerin üretilmesi mümkündür. Biyomimetik hiyerarşik yapıların karmaşık olması ve üretim hassasiyeti gerektirmesinden dolayı geleneksel üretim yöntemlerinin üretim kapasitesini aşmaktadır. Bu nedenle, yenilikçi üretim yöntemlerinden biri olan Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi özellikle metalik malzemelerin ve yapıların üretimi noktasında öne çıkmaktadır. Bu yöntem ile istenilen hassasiyette (gözeneklilik, pürüzlülük, boyut vs.) üretim gerçekleştirilebilmektedir.

Buraya kadar verilen bilgiler ışığında, bu tez çalışmasında: Seçici Lazer Ergitme (Lazer Toz Yatak Füzyonu/L-PBF) eklemeli imalat teknolojisi ile sadece bir malzeme türü (AISI 316L) kullanılarak gradyen ve tabakalı biyomimetik hiyerarşiye sahip, dayanım-süneklik değiş tokuşuna (strength-ductility trade-off) olanak sağlayan mekanik performansı yüksek malzemeler/yapılar üretilmesi amaçlanmıştır. Böylece, otomotiv, uzay ve havacılık, savunma sanayi ve biyomedikal alanlara başta olmak üzere çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir; statik ve dinamik özellikleri (yorulma, eğilme, tokluk ve çatlak ilerleme) geliştirilmiş biyomimetik hiyerarşik yapıya sahip yeni nesil malzemelerin üretilmesi planlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için öncelikle iki farklı biyomimetik yapıya (gradyen ve tabakalı) sahip numuneler AISI 316L paslanmaz çelik tozlar ile L-PBF yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Gradyen yapıya benzer yapılar elde etmek amacıyla literatürde ilk kez L-PBF üretim parametrelerinden olan lazer tarama hızı kullanılmıştır. Tabakalı hiyerarşi esasına dayalı olan L-PBF üretimlerinde ise, üretilen her tabaka bir öncekine göre farklı tarama hızlarında üretilmiştir. Üst üste farklı tarama açılarında üretilen numunelerde belli tabaka kalınlıkları boyunca değişken mikro yapılar ve bu durumun bir sonucu olarak da değişken mekanik

özellişler elde edilmiştir. Böylece gradyen yapıdaki gibi ani mekanik özellik değişimin aksine kesit boyunca kademeli olarak mekanik özellikleri değişen yapılar elde edilmiştir. Üretimi yapılan bu biyomimetik hiyerarşik yapıların/malzemelerin yapısal ve morfolojik özellikleri XRD, SEM ve 3D (Üç Boyutlu) Profilometre kullanılarak incelenmiştir. Üretilen yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile çekme ve üç noktadan testleri ve mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Biyomimetik hiyerarşik yapıdaki malzemelerin yorulma çatlak ilerlemesi özelliklerinin belirlenmesi için ise hem sabit genlikli hem de değişken genlikli yükler altında testler gerçekleştirilmiştir ve testler esnasında çatlak boyundaki değişimler dijital görüntü işleme metodu ile ölçülmüştür.



## KURAMSAL TEMELLER

### Biyomimetik ve Yapısal Elemanlar

Doğada milyonlarca yıllık evrim sonucu oluşan biyomimetik yapılar, özellikle gelişmiş organik yapılarda bulunabilecek mükemmel mekanik özelliklerin çeşitliliği göz önüne alındığında, yeni nesil yapısal malzemelerin tasarımı için önemli bir ilham kaynağı olmaktadır. Biyomimetik, biyomimesis, biyotaklit ve biyomimikri gibi kavramlar, doğadaki çözümlerden ilham alarak yeni malzeme tasarımları geliştirmeyi amaçlayan benzer yaklaşımlardır. Bu kavramlar, doğanın evrimsel süreçlerinden elde edilen verimlilik ve sürdürülebilirlik ilkelerinin modern mühendislik ve tasarım alanlarına uygulanmasını ifade eder. Biyomimikri, doğadaki çözümleri olduğu gibi taklit ederek, insan yaşamını iyileştirmeye yönelik pratik, doğal ve etkili tasarımlar geliştirmeyi hedefler. Biyotaklit ise, doğadaki belirli bir yapıyı, organizmayı veya süreci doğrudan ve tam olarak kopyalama anlamına gelir. Biyotaklit, doğadaki bir organizmanın ya da yapının özelliklerini, işleyişini ve işlevselliğini tam olarak taklit etmeyi ifade eder. Biyomimikri kavramında ise doğadaki üstün özellikleri doğrudan taklit etmek değil, bu özelliklerin ilham verici yönlerinden faydalanarak yeni ve yaratıcı çözümler üretmektir. Özetle, biyomimikri, doğadaki çözümleri daha genel prensipler ve stratejiler olarak alıp uygularken, biyotaklit doğadaki belirli yapıları veya işlevleri birebir taklit etmeye yönelir. Biyomimikri, doğanın ilham verici süreçlerini kullanırken, biyotaklit, doğanın örneklerini doğrudan kopyalamayı hedefler. Biyomimetik, doğada var olan canlılara ait kavramları ve tasarım ilkelerini öğrenerek, modern malzeme bilimine aktarılmasına öncülük etmektedir. Boyutları nano ölçekten makro ölçeğe kadar uzanan farklı hiyerarşik yapılarda düzenlenmiş canlı organizmalar sert ve/veya yumuşak faz yapısında doğal malzemelerden meydana gelir ve mükemmel fonksiyonel özellikler sergilerler. Hiyerarşik yapı, bir organizmanın yapısal unsurlarının ve geometrisinin, farklı boyut ölçeklerinde değişkenlik göstererek belirli bir düzende organize olmasını ifade etmektedir. Bu tür karmaşık yapılara; sedef, kemik, boynuz, deniz süngeri, örümcek ağı, eklemcamlıların dış iskeletleri gibi pek çok örnek verilebilmektedir. Çeşitli hayvan taksonlarından esinlenerek elde edilen biyolojik yapısal elemanlar temelde lifli, helisel, gradyen, katmanlı, borulu-tübüler, hücresel, sütur ve örtüşen yapılar olmak üzere sekiz tasarım ögesine (Şekil 1) ayrılmaktadır. Bu yapısal elemanlar belirli işlevlerden (eklem hareketi, darbe koruması, savunma, hareket ve vücut desteği) esinlenerek farklı biyolojik malzemelerin mukavemet, sertlik, esneklik, kırılma tokluğu, aşınma direnci, darbe dayanımı ve enerji emilimi/dağılımı gibi özelliklerini geliştirmek amacıyla oluşturulmuştur (Baer *et al.*, 1999; Naleway *et al.*, 2015).



**Şekil 1.** Biyomimetik yapısal tasarım öğeleri(Naleway *et al.*, 2015)

**Lifli Yapılar:** Doğa, insanoğluna nano/mikro boyuta sahip çeşitli ölçeklerde ve farklı dokularda üstün özellikler sergileyen binlerce yapı sunmaktadır. Son zamanlarda, birden fazla boyutta hizalanmış liflerden oluşan doğadaki var olan yapıları taklit ederek yüksek çekme dayanımı ve tokluk değerine sahip yeni malzemelerin tasarlanması/üretilmesi araştırmacıların ilgisini çekmiştir(Naleway *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 1999). Bu yapılar özellikle yüksek çekme dayanımı sergilerken bunun yanı sıra düşük bası dayanımına sahiptir. Kemik, sıçan tendonu, örümcek ağı ve ipek böceği ağı lifli yapılara örnek olarak verilebilir. Örümcek ağları, avcılara karşı doğal koruyucu bir kalkan ve avlara karşı da tuzak olarak kullanılan olağanüstü bir yapıya sahiptir. Örümcek ağları, yüksek miktarda sönümlenme özelliği sergileyerek büyük ve yüksek enerjiye sahip avların neden olduğu kinetik enerjiyi etkili bir şekilde dağıtarak avın kaçmasını engellerler. Bu yapılar özellikle, yüksek mukavemet, tokluk, uzama kabiliyeti ve burulma direnci gibi özellikleri ile dikkat çekmektedirler (Fudge *et al.*, 2004; Kiseleva *et al.*, 2020; Meyers *et al.*, 2008; Porter *et al.*, 2013).

**Helisel/Bouligand Yapılar:** Lif, fibril veya takviye katmanların üst üste periyodik bir sarmal şeklinde 360° döndürülerek istiflenmesi sonucu oluşan yapılardır (Bouligand, 1972). Periyodik sarmal yapı sayesinde düzlem içi izotropi, üstün tokluk ve mukavemet gözlemlenir. Helisel yapıya sahip canlılara örnek olarak; eklem bacaklıların dış iskeleti, balık pulu, yengeç, peygamberdevesi karidesi, akrep ve ıstakoz verilebilir (Barthelat *et al.*, 2013; Libby *et al.*, 2014;

Ribbans *et al.*, 2016; Z. Wang *et al.*, 2007). Bu yapılar olağanüstü bir kırılma ve hasar direnci sergilemektedirler. Helisel yapılar, çatlak sapması/dallanması gibi etkiler sebebi ile yüksekçatlak ilerleme direncine ve yüksek mekanik stabiliteye sahiptirler (Meng *et al.*, 2022)

**Gradyen Yapılar:** Malzeme içerisinde kesit boyunca belli uzunluklarda yumuşak bir geçiş ile farklı mekanik özellikler sağlayabilen (Elastisite Modülü, akma dayanımı vs.) ve bu sayede yapı içerisinde yüksek aşınma direnci, düşük çatlak ilerleme hızı, yüksek tokluk ve ara yüzeyde gerilme giderme gibi üstün özellikler sergileyen yapılardır (P. Y. Chen *et al.*, 2012a; Kim *et al.*, 1997). Katmanlar arasındaki yumuşak geçiş ile karakterize edilen bu yapıya örnek olarak bambu sapları, yengeç pençeleri, diş yapısı ve Humboldt kalamar gagası verilebilir (Bruet *et al.*, 2008; Cribb *et al.*, 2009; Roy & Basu, 2008). Literatür incelemesinde birçok farklı yükleme konfigürasyonunda gradyen yapılarının mekanik ve yapısal özellikleri hakkında çalışmalar mevcuttur (P. Y. Chen *et al.*, 2012a; Giannakopoulos *et al.*, 1995a; Kim *et al.*, 1997). Memeli diş yapısı incelendiği zaman, sert mine ve dentin katmanları arasında gradyen yapıya benzer bir geçiş bariyeri gözlemlenmiştir. Bu ara yüzey yapısı sayesinde değişken Elastisite Modülü (E) ile mineden dentine çatlak ilerlemesine engel olduğu ispatlanmıştır (Bechtle *et al.*, 2010; Imbeni *et al.*, 2005). Gradyen yapı ile malzeme içerisinde sert ve yumuşak faz oluşturulur. Sert faz sayesinde çatlak başlangıcı engellenirken yumuşak faz çatlak yayılmasına karşı bir direnç sergilemektedir. Böylece yapı içerisinde kırılma direnci geliştirilmiş olur (Cao *et al.*, 2020).

**Katmanlı/Tabakalı Yapılar:** Genellikle tabaka-tabaka halinde üretilen ve birden fazla arayüze sahip olan kompozit malzemelerdir. Katmanlı yapı, kırılma direnci ve çatlak ilerleme davranışı gibi performanslarını etkileyen önemli bir yapısal tasarımdır (Askarinejad *et al.*, 2021). Bu yapılara örnek olarak sedef, denizkulağı kabuğu, balık pulları ve deniz süngeri gibi canlılar verilebilir (Baer *et al.*, 1999; Barthelat *et al.*, 2007; P. Y. Chen *et al.*, 2012a; Weaver *et al.*, 2007) Sedef yapısı yaklaşık olarak hacimce %95 aragonit ve %5 biyopolimerden olmak üzere tuğla-harç (brick-mortar) modeli olarak adlandırılan bir yapıya sahiptir. Bu yapı, mükemmel mekanik özellik davranışı sergilemektedir (Ji & Gao, 2004). Sedef içeren denizkulağı kabuğu yapısı, prizmatik kalsit tabakası ve aragonit tabakası olmak üzere iki farklı mikro yapısal katman içermektedir. Kalsit tabakası sayesinde kabuğun dış etkilere karşı dayanımı sağlanırken aragonit tabaka mekanik enerjinin dağılımını sağlamaktadır. Ayrıca sedef yapısı oluşumu sırasında yapı içerisinde meydana gelen tabakalar, çatlak saptırıcı olarak görev yaparak mekanik performansı artırır (Kamat *et al.*, 2000). Sedefteki matris içerisindeki aragonit tabakaları arasında mineral köprüler bulunmaktadır. Bu köprüler sayesinde arayüzey çatlak ilerlemesi durdurularak kendi

içerisinde yayılımı meydana gelmektedir. Ayrıca, sünek organik tabaka sayesinde; uygulanan yük sonucunda oluşan kontrolsüz çatlak büyümesi engellenmektedir (Sumitomo *et al.*, 2008). Mikroskobik seviyedeki anizotropik mineraller tüm yapı boyunca belli seviyelerde sıralandığından, makroskobik seviyede malzeme izotropik davranış sergilemektedir (Luz *et al.*, 2009; Weiner *et al.*, 2000).

Yüksek dayanım ve tokluğa sahip malzemeler oluşturmak uzun zamandır üzerinde çalışılan bir konu olmakla birlikte konvansiyonel mühendislik malzeme tasarımında dayanım veya tokluk özelliklerinden birinin tercih edilmesi gerekmektedir. Araştırmacılar hiyerarşik yeni nesil kompozit malzemelerin tasarımı ile bu sınırlandırmanın üstesinden gelmeye çalışmaktadır. Yumuşakça kabuklarındaki sedef yapısı, milyonlarca yıllık evrim sonucu oluşan ince biyopolimer tabakası ile birbirine bağlanmış mikroskobik seramik tabakalı hiyerarşik bir yapıdır. Sedef yapısının sahip olduğu mekanik özelliklerin araştırılması üzerine birçok deneysel (Barthelat *et al.*, 2007; Kamat *et al.*, 2000) ve teorik çalışma yapılmıştır (Ji and Gao, 2004.; Katti *et al.*, 2001.; Maghsoudi-Ganjeh *et al.*, 2021).

**Hücresel Yapılar:** İçeriğinde yüksek oranda gözenek barındıran köpüksü yapılardır. Bu yapılar, yüksek mukavemet/düşük ağırlık sağlamasının yanı sıra burkulma ve bükülmeye karşı oldukça dayanıklıdır. Hücresel yapılara örnek olarak; kutu kaplumbağası, kirpi tüyleri, kuş kemik yapısı ve Tukan gagası gibi canlılar verilebilir (P. Y. Chen *et al.*, 2009, 2012b; Meyers *et al.*, 2011; Rhee *et al.*, 2009). Özellikle tüylerde görülen bu eşsiz yapı, yalıtım, kamuflaj ve aerodinamik gibi birçok işleve sahip olmasının yanı sıra ağaçlar ve yırtıcılara karşı savunma için vücut zırhı olarak görev yapmaktadır. Tüyler sert ve esnekliğin bir arada olduğu yüksek kırılma direncine sahip bir yapıdır (Lingham-Soliar, 2014).

**Tübüler Yapılar:** Malzeme içerisinde boru şeklinde uzanan birden fazla gözenek diziliminden meydana gelir. Bu yapıya sahip malzemeler; çatlak ilerleme hızını azaltma, sünek kırılma dayanımını artırma, yüksek darbe ve delinme dayanımı gibi üstün özellikler sergilemektedirler (Tombolato *et al.*, 2010). Tübüler yapıya örnek olarak; at toynakları, yengeç dış iskeleti, koçboynuzları ve tatlı su timsahı (Alligator Gar) gibi canlılar verilebilir (P. Y. Chen *et al.*, 2009; Kasapi & Gosline, 1997; Tombolato *et al.*, 2010; W. Yang & McKittrick, 2013).

**Dişli-Geçmeli (Sütür) Yapılar:** Sert dişler ve bu dişlerle uyumlu birbirine geçen ara yüzey tabakasından oluşan yapılardır. Bu yapıya sahip canlılar, herhangi bir saldırıya uğraması durumunda delinmeye ve ezilmeye karşı yüksek mukavemet sergilerler. Bu yapılara örnek olarak; kutu balığı, armadillo osteodermleri ve kırmızı kulaklı kaplumbağa verilebilir (P. Chen, Stokes, *et al.*, n.d.; Krauss *et al.*, 2009.; X. Lin *et al.*, 2014).

**Örtüşen Yapılar:** Üst üste binen esnek yüzeylerin birbiri üzerinde kayarak oluşturduğu sert koruma ve esnek hareket sağlayan mafsallı plak yapısıdır. Bu yapı, darbe, delinme ve tokluk gibi üstün özellikler sağlamaktadır. Bu yapıya örnek olarak; pangolin derisi, balık pulları ve denizati kuyruğu gibi canlılar verilebilir (Browning *et al.*, 2013; Porter *et al.*, 2013; D. Wang *et al.*, 2016a; W. Yang & McKittrick, 2013). Farklı canlılara ait yapısal örnekler Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca, Tablo 1’de biyomimetik hiyerarşik yapılardan esinlenerek oluşturulan yapılar, bu yapıların özellikleri ve ilgili literatür özeti verilmiştir.

## BİYOMİMETİK YAPISAL TASARIM UNSURLARI



**Şekil 2.** Canlılara ait hiyerarşik yapıların modellenmesi ve çeşitli biyolojik sınıfları temsil eden yapılar

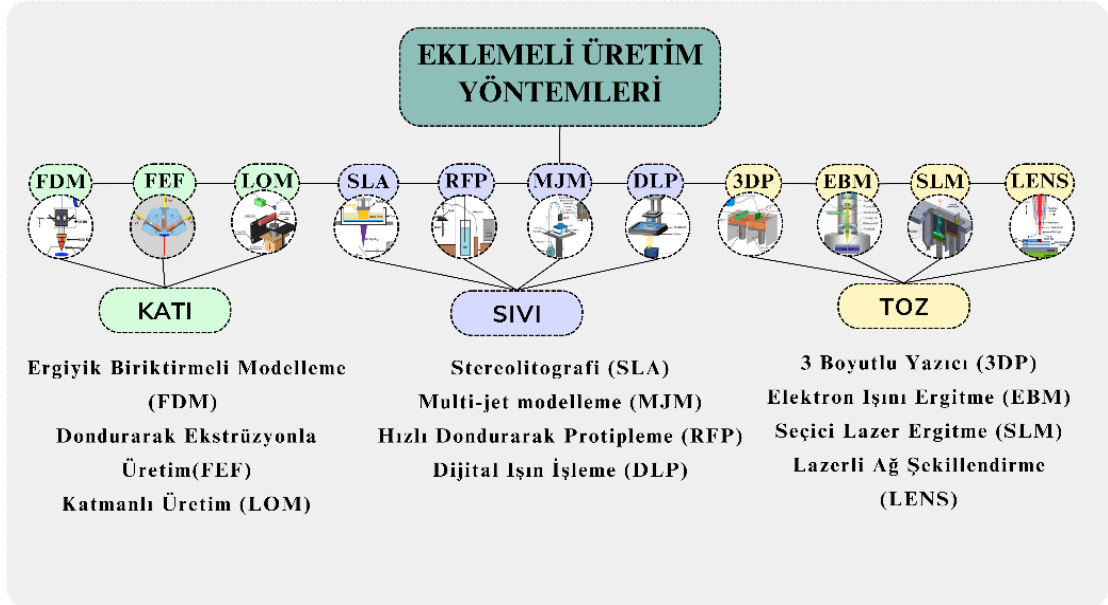
**Tablo 1.** Biyomimetik Hiyerarşik Yapılardan Esinlenerek Oluşturulan Yapılar ve Canlılara Ait Literatür Özeti

Biyomimetik Yapı	Biyomimetik Canlı	Bulgular
Lifli Yapı	Örümcek ipeği Hagfish balçığı Fare tendonu İpek böceği	Çekme dayanımı, tokluk (Fudge <i>et al.</i> , 2004; Porter <i>et al.</i> , 2013)
Helisel Yapı	Odontodactylus Scyllarus dactyl club İstakoz Yengeç, akrep pençesi Arapaima gigas	Tokluk, kırılma direnci, darbe direnci, enerji emilimi, çatlak ilerleme hızında yavaşlama (P. Y. Chen <i>et al.</i> , 2009; J. Liu <i>et al.</i> , 2022; Zimmermann <i>et al.</i> , 2013)
Sütür Yapı	Kafatası (memeli) Kutu Balığı Pangolin Kaplumbağa (kırmızı kulaklı)	Sertlik, dayanım ve aşınma direnci (Gao & Li, 2019; Jaslow & Biewener, 1995a, 1995b; Rhee <i>et al.</i> , 2009; Shahar <i>et al.</i> , 2009)
Tübüler Yapı	Boynuz Pençe Toynak Diş	Enerji sönmleme, darbe direnci, delinme direnci, çatlak ilerleme hızında yavaşlama (Kasapi & Gosline, 1997; Tombolato <i>et al.</i> , 2010)
Örtüşen Yapı	Timsah Kırkayak Köpek balığı derisi Pangolin derisi Denizati	Aşınma direnci, darbe ve ezilme direnci, sertlik, bası dayanımı (Z. Liu, Jiao, <i>et al.</i> , n.d.; Society & 1967, n.d.; Tong <i>et al.</i> , 2007b)( Liu <i>et al.</i> , 2016; Spearman, 1967; Tong <i>et al.</i> , 2007b)
Hücreli Yapı	Tukan Gagası Kırmızı tüyleri Kuş Geyik boynuzu	Burkulma direnci, bükülme dayanımı, yüksek mukavemet/düşük ağırlık (Rhee <i>et al.</i> , 2009; Yang and McKittrick, 2013)
Katmanlı/Tabakalı Yapı	Sedef Kemik Deniz süngeri Arapaima balığı Denizkulağı Balık pulları Böcek dış iskeleti	Sertlik, mukavemet, kırılma tokluğu, çatlak ilerleme hızında yavaşlama (H. D. Espinosa <i>et al.</i> , 2011b; Maghsoudi-Ganjeh <i>et al.</i> , 2021; Munch <i>et al.</i> , 2008)
Gradyen Yapı	Pirana Dişleri Yengeç Pençesi Humboldt Kalamar Gagası Polypterus Senegalus	Tokluk, çatlak ilerleme hızını durdurma, dayanım (Giannakopoulos <i>et al.</i> , 1995b; Kim <i>et al.</i> , 1997)

## Eklmeli Üretim Yöntemi

Doğadaki hiyerarşik yapılar (yapıdaki özelliklerin belli ölçekte değişkenlik göstererek dizilimi) sahip oldukları üstün mekanik özellikler sayesinde yeni nesil malzeme tasarımı ve üretimi açısından büyük ilham kaynağı olmuştur. Fakat doğadaki canlıların mikro/nano boyutlu hiyerarşik karmaşık yapısı geleneksel üretim yöntemlerinin kapasitesini aşmaktadır ve biyomimetik alanının ilerlemesini sınırlamaktadır. Son zamanlarda, eklmeli üretim yöntemlerinin gelişmesi ile bu karmaşık yapıların istenilen boyut, hassasiyet ve işlevlerde üretimi kolaylaşmıştır (Abdulhameed *et al.*, 2019; Bauza *et al.*, 2014; du Plessis *et al.*, 2019).

Eklemeli Üretim/İmalat (Additive Manufacturing) yöntemleri; otomotiv, uzay ve havacılık ve biyomedikal başta olmak üzere farklı endüstriyel alanlarda ve uygulamalarda kullanılmaktadır (Islam *et al.*, 2021; Johnson *et al.*, 2014a; Yasa & Ersoy, 2018; Zindani & Kumar, 2019). Eklemeli üretim; hammadde olarak genellikle sıvı veya katı (toz, tel vs.) kullanılarak, bir enerji kaynağı (UV, lazer, elektron ışını vs.) ile seçilen belli bölgelerin ergitilmesi/katılaşması ile herhangi bir ara şekillendirme işlemine ihtiyaç duyulmadan katmanlar halinde katı parçaların oluşturulması esasına dayanır (Bourell *et al.*, 2017; Brandl *et al.*, 2012; Monzón *et al.*, 2015). American Society for Testing and Materials tarafından (ISO/ASTM 52900:2015) elliden fazla eklemeli üretim yöntemi; Malzeme Püskürtme (Material Jetting), Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion), Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting), Foto-Polimerizasyon (Photopolymerization), Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion) ve Enerji Biriktirme (Energy Deposition) gibi farklı gruplarda kategorize edilmiştir. Ayrıca, bu teknolojileri ayırt etmenin bir diğer yöntemi; hammaddenin sıvı, katı ve toz partikül gibi fiziksel durumuna göre gruplandırılması ve bu hammaddeleri birleştirmek için kullanılan termal, ultraviyole ışık, lazer gibi kullanılan yöntemlere (Şekil 3) göre gruplandırmaktır (Bikas *et al.*, 2016; Huang *et al.*, 2013; Williams *et al.*, 2011).

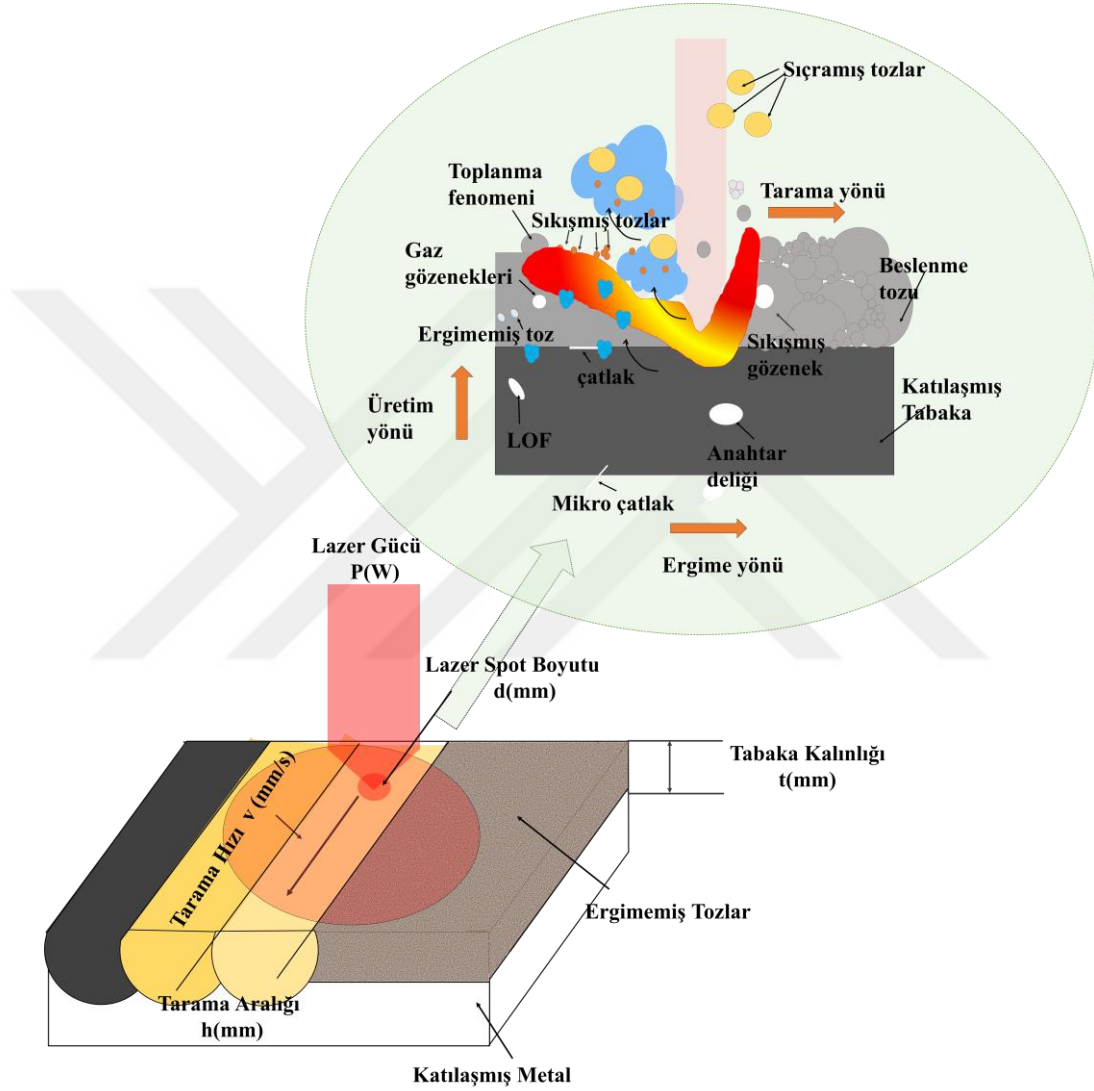


**Şekil 3.** Eklemeli üretim yöntemlerinin sınıflandırılması

### Seçici Lazer Ergitme

Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting-SLM), üretilmek istenen parçanın/geometrinin toz kullanılarak koruyucu bir atmosfer altında katman katman birbiri üzerinde bir lazer kaynağı ile ergitilip katılaşması esasına dayanan ve Lazer Toz Yatak Füzyonu (Laser Powder Bed Fusion/L-PBF) olarak da adlandırılan eklemeli üretim yöntemidir (Şekil 4). Bu yöntem; uzay ve havacılık, enerji, biyomedikal, otomotiv ve diğer pek çok farklı sektörde

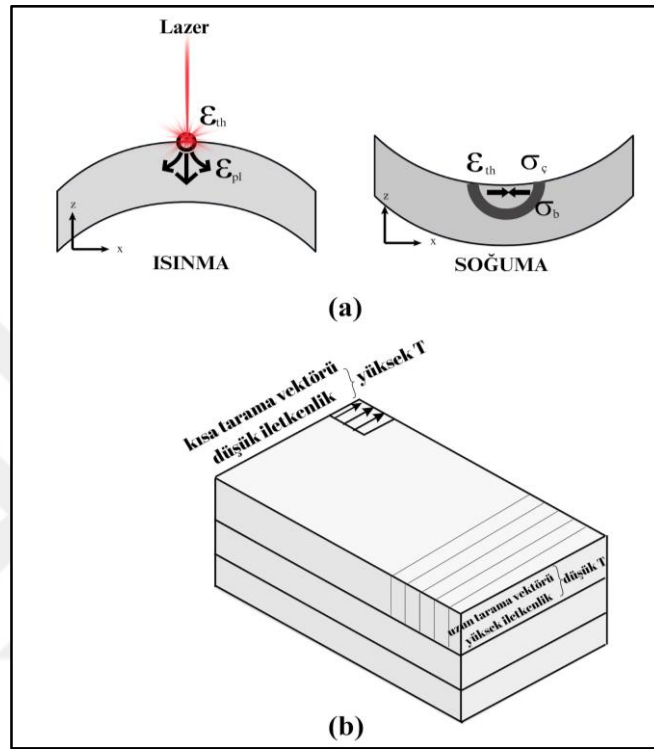
özellikle karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dadbakhsh *et al.*, 2016). Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha hızlı üretim, çok yönlü ve benzersiz tasarımlar, yüksek üretim doğruluk yüzdesi ve üretilen parçalarda; özellikle plastisite, tokluk, mukavemet, sertlik ve elastikiyet gibi mekanik özellikler açısından pek çok üstün özelliğe sahiptir (Kaji & Barari, 2015; Kovacı & Seçer, 2020; Lin *et al.*, 2021; Salmi *et al.*, 2013b).



**Şekil 4.** SLM üretim prensibi ve erimiş havuzda ısı transferinin şematik gösterimi (Yang *et al.*, 2023)

SLM, yüksek sıcaklık gradyanı ve hızlı soğuma prosesi ile denge dışı fazların olduğu bir eklemeli üretim yöntemidir (Kruth *et al.*, 2007). SLM ile üretim sırasında, lazer yüksek sıcaklık ile üst tabakayı ısıtırken alt tabakalara (daha önce katılaşmış) ısı iletimi daha yavaş bir şekilde meydana gelmektedir. Bu değişken ısıl davranış, ısıl gradyanlar meydana getirmektedir. Yüksek sıcaklık ile üst tabakada genişleme gözlemlenirken, komşu tabakaların bu genişlemeyi engellemesi sonucunda elastik ve plastik deformasyonlar meydana gelir. Bu durum esnasında

malzeme eğer akma gerilmesine ulaşırsa, üst tabaka plastik olarak sıkışmaya başlar. Lazer ışın kaynağı uzaklaştıkça ters yönde bir bükülme meydana gelir. Soğuma sırasında ise plastik olarak sıkışan üst katmanlar büzülür ve alt katmanlardan daha kısa hale gelir, bu da lazer ışınına doğru bir eğilme/bükülme açısının oluşmasına yol açar. Bu kısmi eğilme, delaminasyon (katman ayrılması) veya çatlama gibi yapısal bozulmalara yol açabilir (Kruth *et al.*, 2004). Şekil 5'te sıcaklık gradyanının oluşum mekanizması gösterilmiştir.

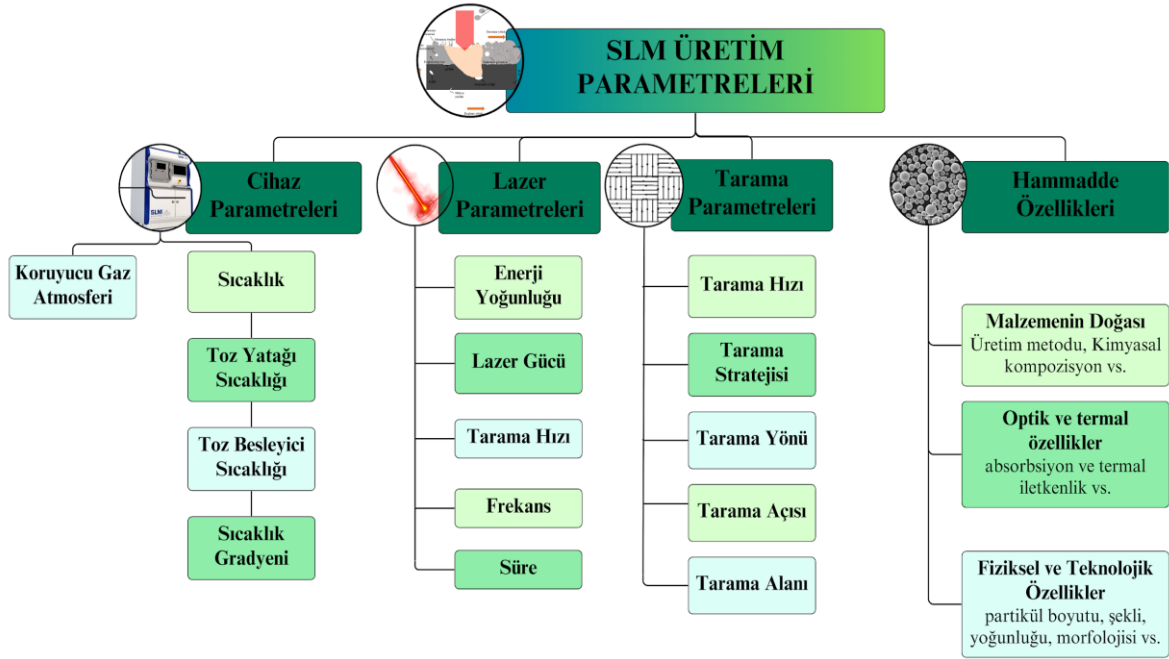


**Şekil 5.** Sıcaklık gradyanı oluşum mekanizması: **a)** Lazer etkisi ile oluşan deformasyonlar ve **b)** Farklı tarama vektörü uzunlukları boyunca farklı sıcaklıklar (Kruth *et al.*, 2004)

SLM ve geleneksel üretim yöntemi kullanılarak üretilen parçaların mikro yapısı, yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik ve mekanik özelliklerinde oldukça büyük farklılık gözlemlenmiştir (Catchpole-Smith *et al.*, 2017; Vastola *et al.*, 2016). SLM yöntemi kullanılarak üretilen numunelerin sahip olduğu ince taneli yapısı ve tane anizotropisinden dolayı yüksek akma dayanımı ve pürüzlülüğe sahip olduğu ortaya konulmuştur (Bartolomeu *et al.*, 2017; Mower and Long, 2016; Murr, 2018). Özellikle tane yapısında meydana gelen bu değişikliğin sebebi, tabaka tabaka ergime işleminden kaynaklı olarak tabakalar arası sıcaklık gradyanı gösterilmektedir (Yasa & Kruth, 2011). SLM ile üretilen numuneler dövme numunelere kıyasla daha yüksek mekanik performans sergilemektedir. SLM numuneleri yüksek çekme mukavemeti ve kopma uzamasına sahiptir (Liverani *et al.*, 2017a).

SLM üretim yönteminde; ergime havuzunun özellikleri, malzemenin metalürjik ve mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Malzemeye ait ergime havuzunun

karakterizasyonu; tabaka katman kalınlığı, tarama hızı, tarama stratejisi, tarama uzaklığı ve toz partikül boyutu gibi üretim parametreleri ve toz özellikleri ile sağlanabilmektedir. Ayrıca, SLM ile üretilen malzemelerin yapısal özellikleri; şekil, boyut, bileşim, toz, lazer odak çapı, lazer gücü, tarama hızı ve tabaka kalınlığı gibi pek çok parametre ile ilişkilidir. Şekil 6’da SLM yöntemine ait üretim parametreleri verilmiştir.



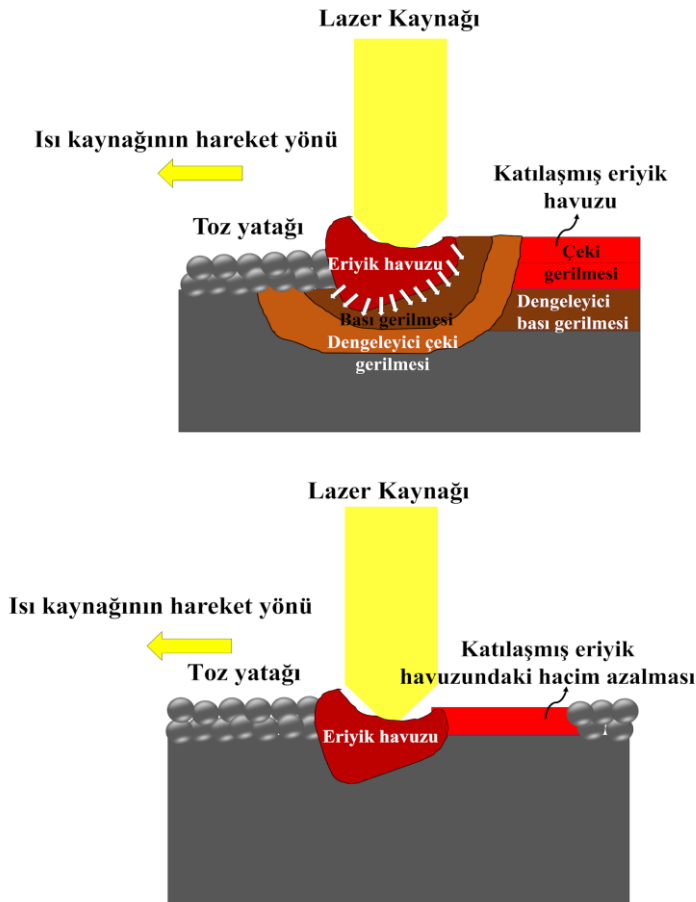
Şekil 6. SLM üretim parametreleri (Sefene, 2022)

Ergime havuzunun karakterizasyonu etkileyen enerji yoğunluğuna ait Denklem 1’de verilmiştir.

$$E = \frac{P}{V \times h \times t} \quad (1)$$

Bu denklemde;  $E$ : enerji yoğunluğunu ( $J/mm^3$ ),  $P$ : lazer gücünü (W),  $V$ : tarama hızını (mm/s),  $h$ : tarama aralığını (mm) ve  $t$ : katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir. Denklemden de görüldüğü üzere enerji yoğunluğu pek çok parametre ile ilişkilidir. Yüksek enerji yoğunluğu ile sıcaklık artar ve tabakalar arasında yüksek sıcaklık gradiyentleri ve yüzey gerilmeleri meydana gelir. Özellikle yüksek enerji yoğunluğunda, eriyik havuzunu çevreleyen malzeme ve ısıdan etkilenen bölge tarafından karşılanması gereken genişleme ve büzülme neden olur ve yapı içerisinde artık/kalıntı gerilmeler artar (Bormann *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2020). Lazer kaynağı, malzemenin üzerinde serili tozu eritmek için tarama yaptığında tozun ısısı artarak genişleme eğilimi göstermektedir. Toz, başlangıç durumunda serbest halde olduğundan dolayı herhangi bir gerilme oluşmadan genişlemektedir. Ancak, sıcaklıktaki artış ile eriyik havuzu oluşur ve alt tabakaya doğru ulaştığında kısmi ergime meydana getirir, eriyik

havuzunun bu bölgesinde olan malzeme yüksek sıcaklığa maruz kaldığından genişlemeye başlar. Daha önce katılaşmış olan alt tabaka genişlemeyi engellediğinden bası gerilmeleri oluşmaya başlar. Bası gerilmelerine maruz kalan ergime havuzu bölgesi, bu gerilmeleri dengelemek için çekme gerilmeleri oluşturur. Lazer ısı kaynağı hareket ettikçe ergime bölgesinden uzaklaşır ve uzaklaşılacak bölgelerde soğuma başlar. Soğuma gerçekleşirken malzemede büzülme meydana gelir ve malzeme bu büzülme sınırlandırarak, katılaşmış eriyik havuzu bölgesinde çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Aynı şekilde, çekme gerilmelerini dengelemek için alt bölgede bası gerilmeleri meydana gelir. İşte bu bölgelerde meydana gelen çeki ve bası gerilmeleri katılaşma gerçekleşse bile yapı içerisinde kalır ve bu durum artık gerilme kavramını oluşturur (Sharma & Kumar, 2019). Soğuma sırasında meydana gelen artık gerilmeler malzemenin yapısal problemlerine sebebiyet vermektedir. Malzeme içerisinde bulunan artık gerilmelerin malzemenin akma dayanımından yüksek olması durumunda, parçanın yapısında bozulmalar meydana gelmektedir (Oliveira *et al.*, 2020). SLM üretim yöntemi ile toz tabakasında ergime sırasında hacim azalması ve lazer tarama sırasında artık gerilme oluşumu Şekil 7’de verilmiştir.



**Şekil 7.** Lazer etkisi ile artık gerilme oluşumu: a) Toz tabakasında erime sırasında hacim azalması ve b) Lazer tarama sırasında artık gerilme oluşumu(Sharma & Kumar, 2019)

### **Lazer gücünün etkisi**

Lazer gücünün azaltılması ile eriyik havuzunun boyutu küçülür ve bu durum yüksek soğutma oranlarına sebep olur. Bunun sonucu olarak ise düşük lazer güçlerinde daha düşük artık gerilmeler meydana gelir (Manvatkar *et al.*, 2015; A. S. Wu *et al.*, 2014; Yadroitsev *et al.*, 2014) Lazer gücünün cihaz üretici firmasının önerdiği değerden düşük olması durumunda eriyik havuzunun yüksek viskozitesi nedeniyle delaminasyon ve füzyon eksikliği davranışı gözlemlenmektedir. Lazer gücünün artması ve beraberinde tarama hızının azalması, enerji yoğunluğunda artış meydana getirir. Bu durum, toz partiküllerinin düzenli bir şekilde ergimesine sebebiyet vermektedir. Ayrıca düzenli ergimeden dolayı yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Lazer gücü özellikle malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça etkili bir parametredir. Lazer gücündeki artış ile pürüzlülük arasında ters bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir (Casalino *et al.*, 2015; Sachdeva *et al.*, 2013). Lazer gücü; parçanın yüzey kalitesi, mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerinde en etkili parametrelerden biridir. Ayrıca, lazer gücünün çok yüksek seçilmesi durumunda yüzey sıcaklığındaki artış ile dross (cüruf) olarak bilinen kaynama olayı meydana gelmektedir. Bu nedenle lazer gücünün özellikle de tarama hızı ile etkileşimli bir şekilde optimum seçilmesi gerekir (Wu *et al.*, 2020).

### **Tarama hızının etkisi**

Tarama hızı, lazer demetinin üretimde kullanılan tozlar üzerindeki hareketi sırasındaki hızını belirtir. Tarama hızının malzeme üzerindeki etkisi lazer gücünün etkisinin tersidir. Düşük tarama hızının daha düşük sıcaklık gradyanlarına sebep olduğu ve böylece düşük artık gerilmeler ve deformasyonlar meydana geldiği gözlemlenmiştir (Brüner *et al.*, 2007; Vasinonta *et al.*, 2007) Tabaka kalınlığındaki artış beraberinde soğuma hızında yavaşlamaya ve sonuç olarak düşük artık gerilmeye sebep olur (Kruth *et al.*, 2012; Van Belle *et al.*, 2013; Zaeh and Branner, 2010). Yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı sonucu erime havuzunda daha düzgün bir enerji aktarımı ve ergimeye sebebiyet verdiği için daha yüksek sertlik meydana gelmektedir (Khorasani *et al.*, 2019). Tarama hızının mekanik özellikler ile etkisini ıslanabilirlik ve Rayleigh kararsızlığı ile ilişkilendirmek mümkündür. Düşük ıslanabilirlik etkisi malzeme içerisinde gözeneklerin oluşumuna sebebiyet vermektedir. Tarama hızındaki artış ile enerji yoğunluğunda düşüş meydana gelmektedir. Bu durum ile ergime havuzundaki sıcaklık değeri düşmektedir ve yüzey gerilimi artmaktadır (termokapiler etki) (Khorasani *et al.*, 2018). Bu durum sertlik ve yoğunluk değerinde azalmaya sebebiyet vermektedir (Khorasani *et al.*, 2019b).

Düşük tarama hızları ile gerçekleştirilen işlemlerde uygulanan yetersiz lazer gücüne bağlı olarak yetersiz ergime ve sonucunda boşluk miktarında artış veya yüksek lazer gücü ve

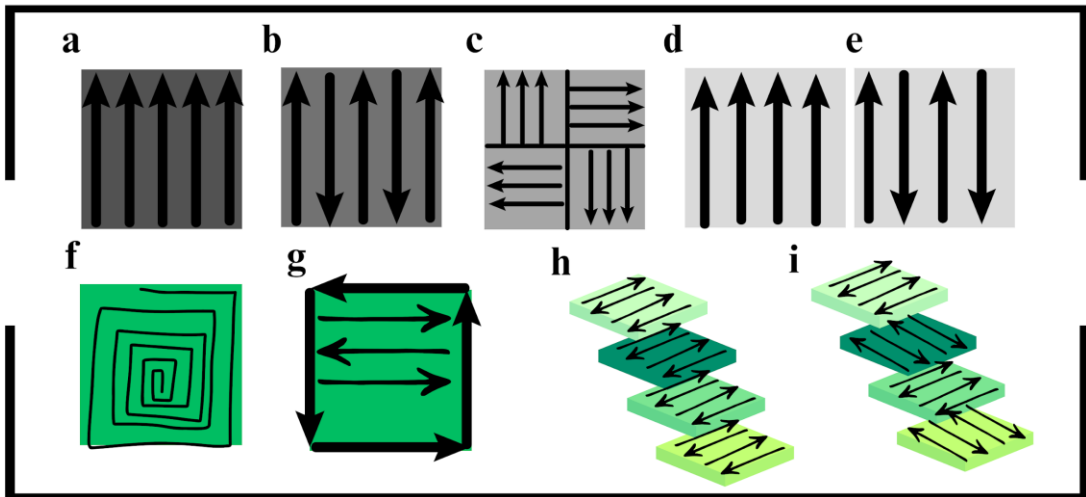
düşük tarama hızları ile buharlaşma ve sonucunda oluşan anahtar deliği hatası ile küresel boşlukların oluşumu söz konusu olabilmektedir. Ayrıca, uygulanan yüksek tarama hızı ve yüksek lazer gücü ile küreselleşme durumunun ortaya çıkması, toz havuzu içerisinde üretim yapan sistemler için toz seriminin zorlaşması ve homojen toz dağılımının engellenmesine sebep olabilmektedir. Enerji aktarımında sadece lazer tarama hızı ve lazer gücü göz önüne alındığında Denklem 1’de verilen, lineer enerji yoğunluğu ifadesi türetilmiş olup bu ifadede yer almayan katman kalınlığı ve bindirme mesafesi nedeni ile lineer enerji yoğunluğu ergime için verilmesi gereken eşik enerji değerini tam anlamı ile ifade edememektedir. Artan lazer hızı ve üretim platformlarındaki kararsız güç aktarımı, parça kalitesinden ödün vermeyi de beraberinde getirmektedir (Lou *et al.*, 2019).

### **Tarama stratejisinin etkisi**

SLM ile üretilen malzemelerde her bir katmanın oluşturulmasında kullanılan lazer yörünge hareketini tanımlamak için tarama stratejisi kavramı kullanılmaktadır. Şekil 8’de farklı tarama stratejilerine ait görseller verilmiştir. Şekil. 8-a’da enerji ışınını hareket yönü her daim aynı ve tek yönlüdür. Tek yönlü üretim stratejisinde lazer ileri hareketi tek yönde gerçekleşirken geri dönüş sırasında lazer kapanımı gerçekleşir. Bu stratejide, lazerin sürekli tarama-durma hareketi yapmasından dolayı enerji dalgalanmaları oluşur ve bu durumda kesikli bir işlem süreci oluşması sebebi ile kararlı bir lazer gücü oluşması zordur. Ayrıca bu yöntemde, lazer kısmen kapalı kaldığından nispeten düşük enerji sarfiyatı oluşurken, aynı zamanda malzeme üretim süresi de artmaktadır. Şekil 8-b’de çift yönlü bir tarama vektörüne sahip ve komşu tarama vektörleri birbirine zıt yönlüdür. Her iki tarama stratejisinde de uzun tarama vektörü olduğundan bu tarama stratejilerinde aşırı birikmiş gerilmeler oluşmaktadır. Bu durum sonucunda ise nispeten kalitesiz yüzeyler elde edilmektedir. Bu durumu engellemek amacıyla Şekil 8-c’de görüldüğü gibi satranç tahtası (Chessboard) modeli kullanılmaktadır. Bu tarama stratejisinde tarama alanı küçük karelere bölünerek kısa tarama vektörleri oluşturulur. Şekil 8-d ve Şekil 8-e’de, Şekil 8-a ve Şekil 8-b’den farklı olarak sadece tarama hareket yönünde değişiklik yapılarak sıcaklık gradyeni değiştirilmiş bir yapı oluşturulur.

Şekil 8-f’de helis tarama stratejisi gösterilmiştir. Bu yöntem ile tarama vektör uzunluğu kısaltılmaktadır. Kontur tarama stratejisi (Şekil 8g), tanımlanmış kontur alanında lazerin sürekli olarak tarama gerçekleştirdiği bir tarama dizisidir. Kontur tarama stratejisinde yeniden ergitme prosesi hâkim olduğundan dolayı bu strateji, malzemenin hem mekanik özellikleri hem de gözenekliliği üzerinde oldukça etkilidir. Kontur ile düşük katılma oranı sayesinde gaz gözenekliliğinin oluşumu engellenir. Üretilen malzemeni mikro yapısını geliştirmek için çift geçişli lazer tarama stratejileri de kullanılmaktadır (Şekil 8-h ve Şekil 8-i)(Jia *et al.*, 2021a).

Tüm bu tarama stratejilerindeki temel farklılık soğutma hızı ve bölgesel ısıl gradyenlerdeki farklılıklardır. Katmanlar arası sıcaklık gradyenindeki değişimin, özellikle malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi önemli derecedir. Uzun tarama mesafesinin olması durumunda, biriken ısı miktarının dağılması için bir sonraki tarama için yeterli süre mevcuttur. Ancak kısa tarama uzunluğunda, bir önceki ısı bölgesinin yayılımı için gerekli süre olmadığından, son taramada başlangıç sıcaklığından yüksek yüzey sıcaklığı meydana gelmektedir (Promopatum & Yao, 2020). Tarama vektörünün kısa olması ve satranç stratejisindeki gibi küçük karelerden oluşması durumunda, ısı dağılımı daha yüksektir ve düşük sıcaklık gradyeni nedeniyle düşük artık gerilmeler oluşur. Bu nedenle satranç tahtası tarama stratejisi, düz tarama stratejisine göre daha iyi mekanik özellikler sergilemektedir (Lu *et al.*, 2015) Tabakalar arası her bir tabakanın bir önceki tabakaya göre belli bir açı ile döndürülmeside malzemenin gözenekliliğini azaltmaktadır ((Amirjan *et al.*, 2019). Bir tabaka üretildikten sonra, diğer tabaka farklı bir yönde yeniden ergitme ile üretildiğinde daha düzgün bir yüzey elde edilmektedir ((Geiger *et al.*, 2016; Geiger *et al.*, 1998). SLM ile üretilen parçalarda üretim esnasından dolayı katmanlı/tabakalı bir morfoloji oluşmaktadır ve bu durum yapı içerisinde anizotropiye sebep olmaktadır. Yapısal anizotropinin sebebi olarak ise biriken dislokasyon ve artık gerilmeler gösterilmektedir (Chen *et al.*, 2011). SLM ile üretilen numunelerde üretim inşa yönü artık gerilme, çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özellikler üzerinde oldukça önem arz etmektedir. İnşa yöneliminin açısız değişimi dikkate alındığında, inşa yönü 45°'den 90°'ye değiştiğinde mukavemet ve yorulma dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kopma uzamasında %50'ye yakın artış gözlemlenmiştir [(Liverani *et al.*, 2017b). SLM ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin inşa yönüne göre değişiminin sebebi üretim esnasında sıcaklık değişim gradyenlerinin ve kristal oryantasyonunun sebep olduğu anizotropik yapıdır (Deng *et al.*, 2018).



Şekil 8. Farklı tarama stratejilerine ait örnekler (Jia *et al.*, 2021b)

## **Tabaka kalınlığının etkisi**

SLM üretim parametrelerinden biri olan katman kalınlığındaki artışın, kalıntı gerilmelerde azalma sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, daha kalın katmanlar kullanıldığında, işlem sırasında malzemeye daha fazla enerji girişi sağlanması ve buna bağlı olarak soğutma oranlarının düşmesiyle açıklanmaktadır. Yüksek soğutma oranları, malzeme üzerinde gerilme birikmesine yol açarken, daha kalın katmanlar bu soğuma sürecini yavaşlatarak kalıntı gerilmelerin azalmasına olanak tanır. Katman kalınlığındaki artışın bileşenin termal davranışı üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Kalın katmanlarda, malzemenin eriyik havuzundaki ısı daha uzun sürede yayılır ve malzemenin çevreye ısı transferi daha yavaş gerçekleşir. Bu durum, daha dengeli bir katılma süreci sağlayarak kalıntı gerilmelerin oluşumunu minimuma indirir(Shipley *et al.*, 2018).

## **SLM kusurları**

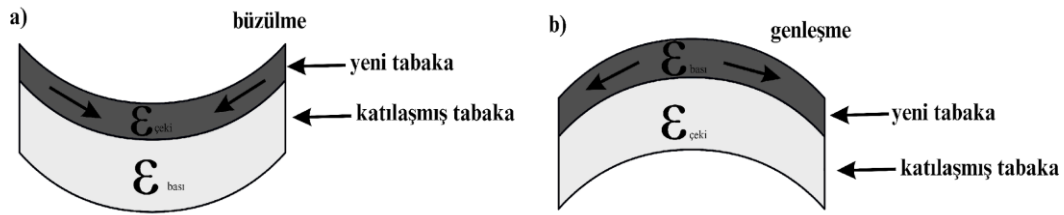
Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı ve toz özelliği gibi SLM işlem parametreleri doğru seçilmediği takdirde malzemede birtakım kusurlar meydana gelmektedir. Yaygın olarak, füzyon eksikliği (Lack of Fusion-LoF), gaz gözenekliliği, anizotropi, kalıntı gerilme oluşumu, denge dışı mikro yapı (martenzitik oluşum), küreselleşme-bilye etkisi, elverişsiz yüzey kalitesi, sıcak yırtılmalar ve balık pulları gibi çeşitli SLM kusurları meydana gelmektedir.

Lazer esaslı üretim sırasında; yüksek enerjili ergitme, hızlı katılma ve yönlü ısı aktarımı gerçekleşir. Bu esnada; hızlı katılma aşamasında eriyik havuzundaki çözülmüş gaz yüzeye kaçamaz ve havuzda sıkışır. Bu durumda, gaz yapı içerisinde hapsolür ve parçanın içerisinde gözenekler meydana gelir. Lazer enerjisinin yüksek olması erime havuzunun sıcaklığını artırarak sıvı metal içerisinde çözünürlüğünü artırır. Böylece gazın eriyik metalde daha fazla birikmesine ve gözenek oluşumuna neden olur. Malzeme buharlaştığında gözenekler küresel şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu durumun tersi olarak, düşük lazer enerjisi, toz partiküllerinin yeterince ergimemesine veya ergimiş metalin toplaşmasına yol açarak düzensiz şekilli keskin çatlak benzeri gözenekler meydana getirmektedir (Gong *et al.*, 2015). SLM numunelerinde hacimce %1'e kadar gaz gözenekleri önemli derecede malzeme özelliklerini etkilemez ve oluşması kaçınılmazdır. Ancak %5 ve üzerine çıkması durumunda sertlik, çekme ve yorulma gibi özellikleri oldukça etkilemektedir(Gong *et al.*, 2015).

LoF kusurları, enerji girişi eksikliğinden kaynaklanarak yeni katmanın bir önceki katmanla yeterli bir şekilde kaynaşmaması sebebiyle meydana gelmektedir. Tozların bir sonraki katmanı oluşturmak için serildiğinde yeterince örtüşmemesi ile oluşan zayıf bağlanma kusurudur. LoF kusurları genellikle ergitilmemiş toz partikülleri beraberinde oluşmaktadır. Bu kusurlar, çentik

etkisine yol açarak gerilme yığılması ile yüzeyde veya yüzeye yakın bir yerde çatlakların başlamasına sebebiyet vermektedir(Kasperovich *et al.*, 2016; Q. C. Liu *et al.*, 2014). Bu nedenle, LoF kusurları yorulma dayanımı üzerinde oldukça büyük öneme sahiptir.

SLM üretim prosesi, Şekil 9’da görüldüğü gibi peş peşe hızlı ısınma/soğuma prosesine sahip olduğundan dolayı yapı içerisinde bir takım iç gerilmeler meydana gelmektedir. Üretim sırasında oluşan sıcaklık gradyeni ve ısınma soğuma döngüleri komşu katmanlarda çeki/bası gerilmeleri oluşturarak artık gerilmelere yol açar (Bartlett & Li, 2019). Bu artık gerilmeler ise malzemelerin mekanik özelliklerini oldukça etkilemektedir.



**Şekil 9.** Eklemeli üretim sırasında a) soğuma (termal büzülme) b) yeni katmanın ısınması (termal genleşme) nedeniyle oluşan gerilmelerin gelişimi (Bartlett & Li, 2019)

Küreleşme kusuru-bilye etkisi (balling effect), eriyik havuzunun yüzey alanının, aynı hacmi içeren bir kürenin yüzey alanından daha büyük hale geldiğinde ortaya çıkan bir olgudur. Bu durum genellikle eriyik havuzunun düşük viskozitesi veya aşırı miktarda erimiş malzeme nedeniyle oluşur ((Agarwala *et al.*, 1995; Kruth *et al.*, 2004). Bu tip kusurlar, genellikle kısmen katılmış üst katmana bağlı olduğundan ve kendine özgü tane yapılarıyla ergimemiş parçacıklardan ayırt edilebilir. Eriyik havuzundaki termal gradyanlar, metalin düşük yüzey geriliminden yüksek yüzey gerilimine doğru akmasıyla termo-kılcal etki yaratır. Bu etki, özellikle eriyik metalin küçük kürelere ayrılmasıyla sonuçlanan keskin çatlak uçlarında daha belirgin hale gelir. Küreselleşme gibi mikro yapısal kusurlar, parçanın yorulma ömrünü ciddi şekilde olumsuz yönde etkilemektedir ((Shipley *et al.*, 2018).

SLM üretim prosesi sonucu oluşan yüksek sıcaklıklar ve gerilmelerden kaynaklı olarak yapı içerisinde sıcak yırtılmalar da meydana gelebilir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda kritik bir hal alan sıcak yırtılma, SLM soğuma sırasında tane sınırlarında meydana gelerek tehlikeli bir hal almaktadır (Gorsse *et al.*, 2017a).

SLM işleminde tozların katman katman katılaştırılması sırasında oluşan çözünen madde konsantrasyonlarındaki farklılıklardan kaynaklı olarak ‘balık pulları’ benzeri yapılar elde edilmektedir. Çökeltilerin oluşumu ve bu çökeltilerin morfolojisindeki çeşitlilikler, balık pullarının ortaya çıkmasının başlıca nedenleridir (Collins *et al.*, 2016). Balık pulları, ısı iletim yönüne dik

olarak meydana gelir (Brandl *et al.*, 2012) ve bu kusur tabakalar arası delaminasyonların oluşumuna sebebiyet vermektedir (Collins *et al.*, 2016).

SLM ile üretilen malzemelerde, lazer enerji yoğunluğunun artması ile tozların tam ergimesi sağlandığından dolayı malzemedeki boşlukların (gözeneklilik) azaldığı gözlemlenmiştir. Malzemeye çok yüksek enerji girişi sağlandığında, metalde buharlaşma çok kolay meydana gelmektedir ve anahtar deliği şeklinde buhar çöküntülerinden oluşan gözenekli yapı meydana gelmektedir. Anahtar deliği gözenekliliğinin önlenmesi için lazer gücünü azaltmak ya da tarama hızını artırmak gerekmektedir [(King *et al.*, 2014). Bu durumunun tersi çok düşük enerji yoğunluğu olması halinde, malzemede hapsedilmiş erimemiş toz parçacıklarından meydana gelen füzyon gözenek yapısı gözlemlenmektedir. Füzyon eksikliği gözenekliliği, eriyik havuzunun boyutu ve tarama stratejisi ile ilişkilidir. Bu nedenle eriyik havuzunun üst üste gelmesiyle elde edilen malzemenin erimesi sonucu belirlenen füzyon sınırı, eriyik havuzunun şekli ve boyutu ile tam anlamıyla belirlenebilmektedir (Tang *et al.*, 2017). Üretim esnasında koruyucu gazın tutulması sonucunda gaz gözenekliliği meydana gelmektedir (DebRoy *et al.*, 2018). Tablo 2’de SLM üretim yönteminden kaynaklanan kusurlar ve bunlar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca, Şekil 10’da SLM yöntemi ile üretilen malzemelerde üretim parametreleri ve bu parametrelere göre yapıda oluşan etkilere ilişkin detaylı bir görsel verilmiştir.

**Tablo 2.** Literatürde Gözlemlenen SLM Kusurları (Singla *et al.*, 2021)

SLM Kusurları	Neden	Çözüm	Önemli Bilgi
<b>Füzyon eksikliği (LoF)</b>	-Hatalı seçilmiş üretim parametreleri sonucu ergime tabaka sınırında yetersiz enerji yoğunluğu	Toz yatağının kalınlığında ve enerji yoğunluğunda optimum parametre seçimi	Yorulma özellikleri ve tabaka delaminasyonları açısından kritiktir
<b>Gaz Gözenekleri</b>	-Toz atomizasyonu sonucu atmosferden gaz sıkışması -Yüksek soğutma ile çözünmüş gaz kalması -Inert gaz hapsolmesi	Tabaka kalınlığının azaltılması Lazer gücünün azaltılması	Düşük yoğunluk ve düşük mekanik özelliklere (çekme ve yorulma dayanımı) sebebiyet vermektedir
<b>Anizotropi</b>	-İnşa yönünden kaynaklı stair-case	Martensitik ayrışma sağlama	SLM ürünlerinin yapısal ve davranışsal homojenliğini etkiler
<b>Kalıntı gerilme birikimi</b>	-Yüksek termal gradyan -Enerji yoğunluğu -Hızlı katılaşma	Uygun proses parametreleri -Üretim sonrası tavlama ve ısıtma işlemi	Gevrek kırılma ve gerilim yoğunlaşma bölgelerinden kaynaklanan çatlak oluşumuna sebebiyet vermektedir
<b>Denge dışı mikroyapı</b>	-Hızlı termal gradyan oluşumu -Soğuma hızı	Seçilen uygun parametreler ile yerinde martensit ayrışımı	Metalurjik özelliklerin homojen olmamasına neden olur

**Tablo 2.** (Devamı)

<b>Küreselleşme kusuru</b>	-Eriyik havuzu kararsızlığı	Enerji yoğunluğunun optimum seçimi	Önemli gerilme yoğunlaşma noktalarıdır. Parçanın yorulma ömrünü ciddi şekilde olumsuz etkilemektedir
<b>Yüzey pürüzlülüğü</b>	-Proses tipi, parametreleri, toz özellikleri, tabaka kalınlığı ve yönelimi.	Optimize edilmiş proses ve tasarım parametreleri ve toz özellikleri	Yüzey kalitesi istenen yerlerde oldukça büyük problem yaratmaktadır
<b>Sıcak Yırtıklar</b>	-Malzemelerdeki gerilmelerin ve yüksek sıcaklığın varlığına verdiği tepkinin sonucu	SLM prosesinde iç gerilim ve yüksek sıcaklık önlenerek	Yüksek sıcaklıklarda çok kritik
<b>Balık pulları</b>	-Tabaka tabaka üretim aşamasında oluşan çözünen madde konsantrasyonları sonucu	Proses parametrelerinin doğru seçimi	Delaminasyona neden olmaktadır



**Şekil 10.** SLM ile üretilen malzemelerde üretim parametreleri ve malzeme üzerindeki etkileri (Sefene, 2022)

## Yorulma

Makine elemanları veya teknolojik uygulamalarda kullanılan sistemlere ait parçalar kullanım ömürleri boyunca korozyon, yorulma, kırılma, darbe, çizilme, aşınma ve sürtünme gibi pek çok değişken etkinin birine ya da birçoğuna birlikte maruz kalırlar ve bunlar sonucunda fonksiyonlarını yitirebilirler. Bu elemanların servis koşulları altında kendilerinden beklenen çalışma fonksiyonlarını yerine getiremez duruma gelmesine ‘**hasar**’ adı verilir. Makine elemanlarına etki eden yükleme tipi, büyüklüğü ve çalışma ortamı gibi çevresel parametreler ve bu elemanların üretimi sırasında gerçekleşen termo-mekanik olaylar, malzemenin kristal yapısı gibi malzemenin içyapısına ait parametrelere göre hasar mekanizmasında değişiklik meydana getirirler (Makhlouf and Aliofkhazraei, 2018). Tekrarlı yükler altında çalışan metalik malzemelerde belli bir yükleme sonucunda oluşan gerilmeler malzemenin statik dayanımdan düşük olmasına rağmen belli bir tekrarlama sonucunda sistemin kullanılamaz duruma gelmesine sebebiyet veren hasar mekanizmasına ‘**yorulma**’ adı verilir (Bannantine 1990; Klesnil and Lukác, 1992; Stephens *et al.*, 2000). Yorulmanın gerçekleşebilmesi için öncelikle sistem yeterli yüksek bir maksimum çekme gerilmesine sahip olması gerekmektedir. Uygulanan gerilmenin geniş değişimi/dalgalanmaya sahip olması ve bu gerilmenin yeterli sayıda tekrarlanması gerekmektedir. Yorulma olayı, ancak bu koşullar altında gerçekleşmektedir. Yorulma hasar mekanizmasının anlaşılması için maksimum gerilme, minimum gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranı gibi temel kavramlar ve büyüklüklerin bilinmesi gerekmektedir. Bu kavramlar ve büyüklükler Şekil 11’de gösterilmiştir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

- **Maksimum Gerilme ( $\sigma_{max}$ ):** Uygulanan gerilmeler arasında mutlak değerce en büyük olan gerilmeyi ifade etmektedir. Çekme gerilmeleri pozitif (+), basma gerilmeleri ise negatif (-) işaret ile belirtilmektedir.
- **Minimum Gerilme ( $\sigma_{min}$ ):** Gerilme çevrimi boyunca sayısal olarak en küçük değere sahip olan gerilmeyi ifade etmektedir.
- **Ortalama Gerilme ( $\sigma_{ort}$ ):** Maksimum ve minimum gerilmelerin aritmetik ortalaması ile hesaplanan gerilmeyi ifade etmektedir.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

**Gerilme Oranı ( $R$ ):** Minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranını ifade etmektedir.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

- **$R = 1$** : Sabit bir gerilme vardır ve çevrim yoktur.
  - **$R = 0$** : Minimum gerilmenin sıfır olduğu ve sadece çekme gerilmesinin olduğu durum.
  - **$0 < R < 1$** : Tüm gerilmelerin pozitif olduğu (çekme gerilmesinin olduğu) durum. Bu durumda ortalama gerilme, gerilme genliğinden büyüktür.
  - **$-1 < R < 0$** : Sistemde hem çekme hem de basma gerilmelerinin bulunduğu durum. Minimum gerilme negatif, maksimum gerilme pozitifdir.
  - **$R = -1$** : Minimum ve maksimum gerilmeler eşit büyüklükte ancak ters işaretlidir. Bu durumda, tam ters yönlerde bir çevrim vardır.
  - **$R < -1$** : Basma gerilmesinin çekme gerilmesinden daha büyük olduğu durum.
- **Gerilme Genliği ( $\sigma_a$ )**: Uygulanan maksimum ve minimum gerilme değerlerinin farkının yarısıdır.

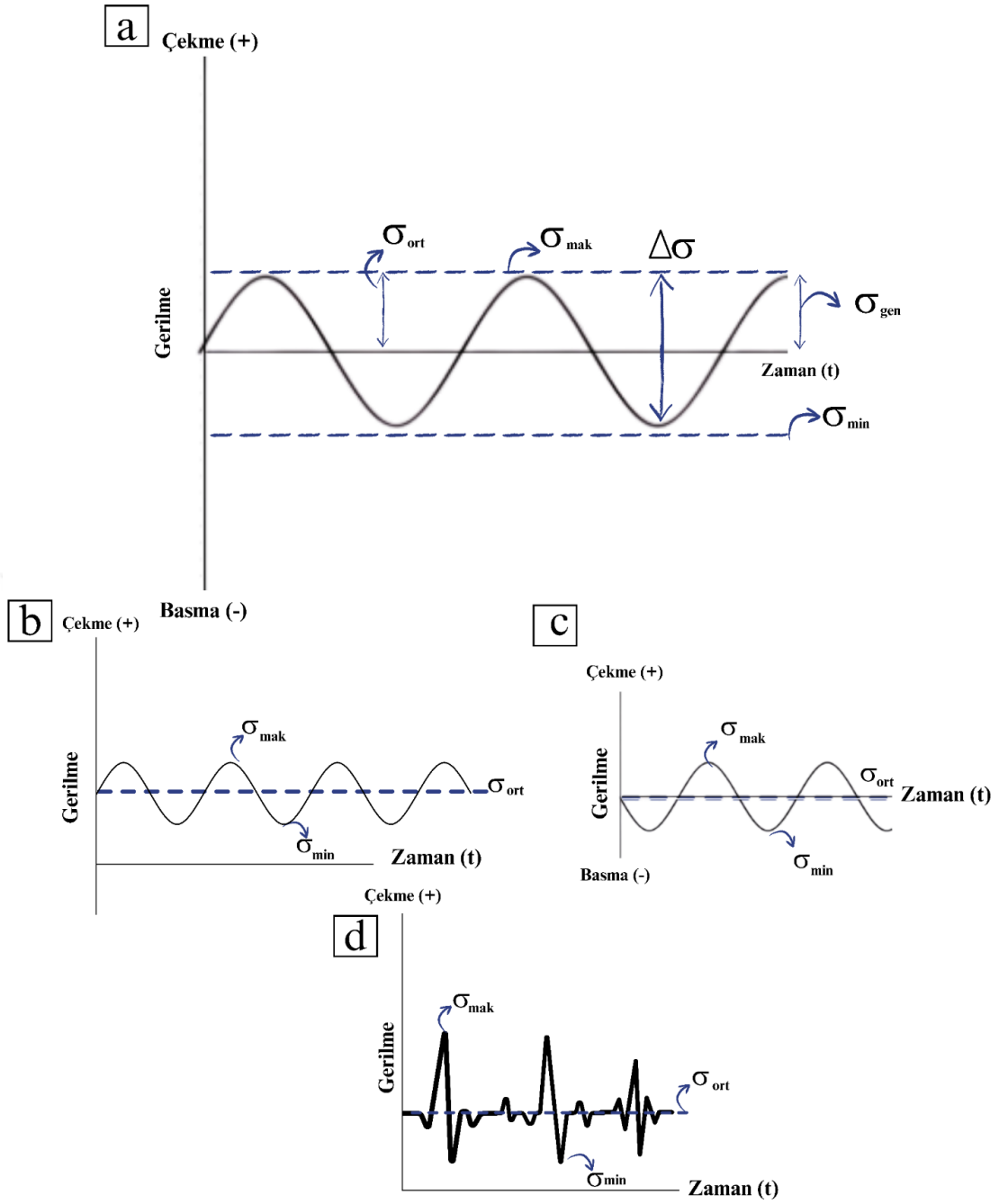
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (4)$$

- **Gerilme Aralığı ( $\Delta\sigma$ )**: Maksimum gerilme ile minimum gerilmenin farkıdır.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (5)$$

- **Genlik Oranı ( $A$ )**: Gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranıdır.

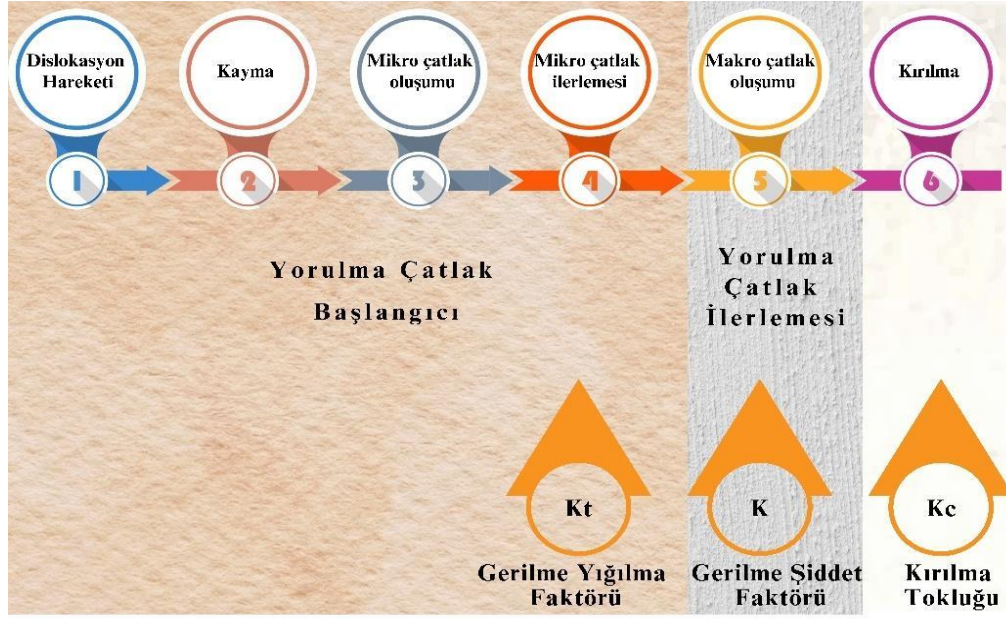
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_{ort}} = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (6)$$



**Şekil 11.** a) Yorulma ile ilgili temel büyüklükler ve tanımlanması (b) Çeki-çeki yükleme, (c) çeki-bası yükleme, (d) rastgele/spektrum yükleme (Kovacı 2016)

Yorulma hasarı, zamanla oluşan ve parçanın lokal olarak belli bir bölgesinde ortaya çıkan geri dönüştürülemez plastik deformasyon olarak tanımlanabilir (Richard & Sander, 2016a). Yorulma olayı; çatlak oluşumu (mikroskobik boyutta), çatlak ilerlemesi (makroskobik boyutta) ve kırılma şeklinde üç aşamalı bir süreçten meydana gelir. Tekrarlı yükleme durumu çevrimsel kayma meydana getirerek plastik deformasyon hareketini başlatmaktadır. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi durumu çevrimsel kayma hareketi ile meydana gelmektedir. Bu nedenle yorulma çatlak oluşumu akma dayanımının altında bir gerilme değerinde oluşmaktadır. Tekrarlı bir yükleme durumunda, öncelikle kayma bantlarında mikro boyutta çatlak oluşumu

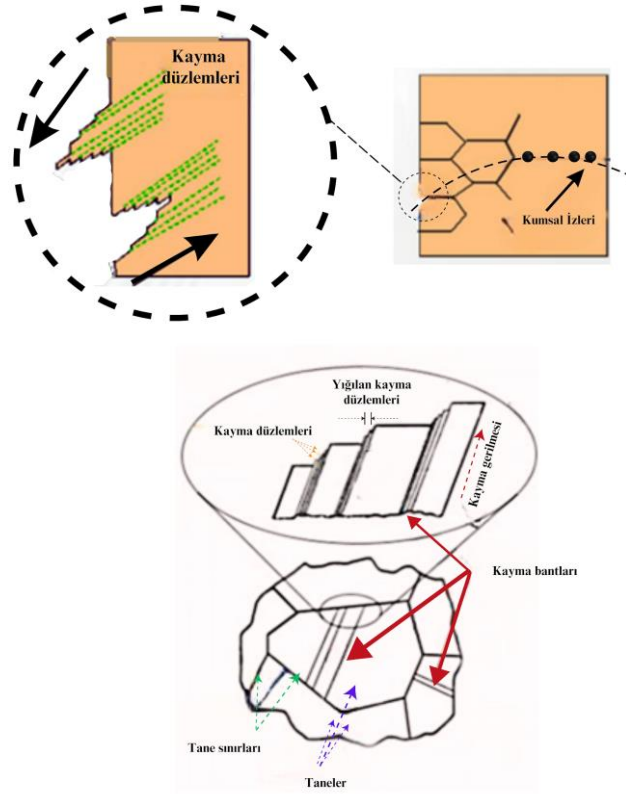
meydana gelmektedir. Bu durumu takiben mikro boyutlu çatlakların birleşimi ile makro boyutlu çatlak ilerlemesi ve malzemenin hasara uğraması yani kırılması gerçekleşir. Bu sürecin tamamına malzemenin **yorulma ömrü** denilmektedir. Metalik malzemelerde yorulma ömrünün oldukça büyük bir kısmını çatlağın oluşumu kapsamaktadır. Yorulma çatlağının başlangıcı kayma, çatlak oluşumu ve mikro çatlak oluşumu evrelerini kapsamaktadır ve gerilme yığılma faktörü ( $K_I$ ) etkili büyüklük olarak tanımlanmaktadır. Gerilme yığılma faktörü, bir malzemede çentik, kesit daralması, delik gibi gerilme artırıcı özelliklerin bulunduğu bölgede oluşan en yüksek gerilmenin, aynı noktada ilgili ortalama gerilmeye olan oranıdır. Çentik veya başka bir yapısal düzensizlik sebebiyle o bölgedeki gerilme miktarı, malzemenin diğer bölgelerine göre daha yüksek olur. Gerilme yığılması faktörü, bu bölgedeki en yüksek gerilmeyi ölçerek, yığılmanın ne kadar fazla olduğunu ifade eder. Mikro çatlaklar sonrasında yerini makro çatlaklara bırakır. Makro çatlak ilerlemesi ile ilgilenen büyüklük gerilme şiddet faktörü ( $K$ ) olarak tanımlanmaktadır. Gerilme şiddet faktörü, çatlak gibi ciddi kusurlar içeren bir malzemede, çatlak ucunda yoğunlaşan gerilmeyi tanımlamak için kullanılan bir faktördür. Çatlak ucundaki bu yoğun gerilme, çatlağın genişlemesine ve ilerlemesine neden olabilir, bu nedenle gerilme şiddet faktörü, çatlağın yayılma eğilimi üzerinde doğrudan etkilidir. Son olarak kırılma/hasar gözlemlenmekte ve aşamada ise kırılma tokluğu ( $K_{Ic}$ ) ifadesi kullanılmaktadır. Kırılma tokluğu, malzemedeki bir çatlağın ilerlemesine karşı gösterilen direnç miktarını ifade eden bir malzeme özelliğidir. Gerilme şiddet faktörü, kritik bir değeri ( $K_{kr}$ ) aştığında, çatlak hızlı bir şekilde yayılır ve kırılma meydana gelir. Bu kritik değere kırılma tokluğu denir ve  $K_I=K_{Ic}$  ifadesi ile gösterilir (Richard & Sander, 2016b). Metalik bir malzemenin yorulma ömrü ile ilgili süreçler/aşamalar Şekil 12’de gösterilmiştir.



**Şekil 12.** Yorulmanın aşamaları ve kontrol eden faktörler (Beden *et al.*, 2009a; Schijve, 2001a)

- Malzemenin üretimi veya kullanımı süresince yapı içerisinde veya tane sınırlarında dislokasyonlar meydana gelmektedir.
- Yönlendirilmiş taneler kritik gerilme değerlerine ulaştığında, dislokasyonlar yönlenerak kayma sistemi üzerinde hareket etmeye başlar. Dislokasyonlar; kalıntı, çözülmüş parçacık ve diğer dislokasyonlar ile karşılaşana kadar hareketine devam eder. Çevrimsel yorulma mekanizması devam ettikçe yeni dislokasyonlar oluşmaya başlar ve engelle karşılaşıp kilitlenen dislokasyonlar tırmanma, kayma, çapraz kayma, jog-king ve döngüsel kayma hareketi ile engelleri aşmaya başlar.
- Düşük enerjili deformasyon yolu olarak bilinen bu durum çevrimsel yükleme boyunca devam etmektedir ve çevrimsel yükleme ile tekrarlanmaktadır. Düşük enerjili deformasyon yolu düşük istifleme enerjisine sahip iki boyutlu ve üç boyutlu olarak meydana gelmektedir ve dislokasyonlar düşük enerjili yolları tercih ettiğinden dolayı kayma bu güzergâhta meydana gelmektedir. Bu durumun sonucu olarak kalıcı kayma bantları meydana gelmektedir.
- Tekrarlı yükleme ile pozitif ve negatif dislokasyonlar tekrarlı bir şekilde oluşmaktadır ve yakın dislokasyonlar tırmanma ve çapraz kayma mekanizmaları ile yok olarak boşluklar meydana getirmektedir. Boşluklar malzeme içerisinde yayılarak tane sınırlarında ve yüzeylerde girintili/çıkıntılı yapılar oluşturmaktadır. Malzemede kristalografik düzlemlerin hareketi 45°'lik bir açı ile meydana gelerek kayma olayını oluşturmaktadır. Bu kusurlar ve girinti/çıkıntılar malzeme içerisinde çatlakların başlangıcına sebebiyet vermektedir (Şekil 13).

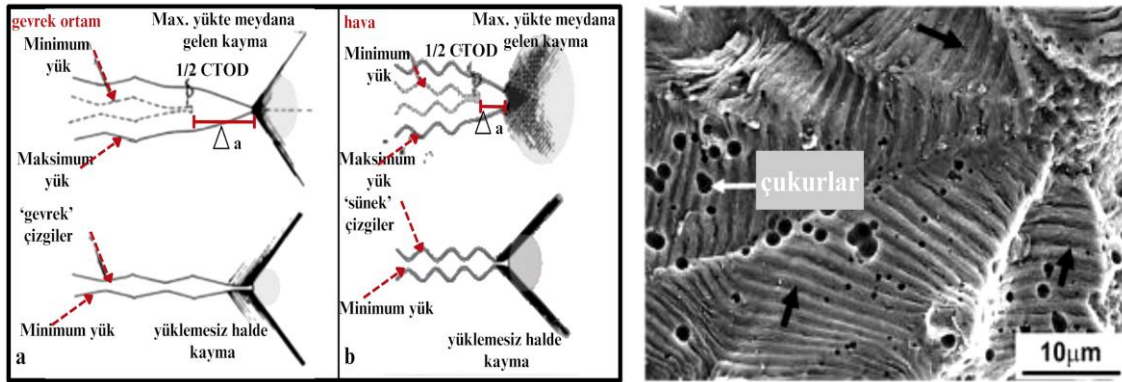
Şekil 12’de gösterilen aşamalardan, yorulma çatlak ilerlemesi aşaması özellikle havacılık uygulamaları için kritik bir öneme sahiptir. Çatlak oluşumu mikro boyutta tamamlandıktan sonra çatlak ilerleme mekanizması devreye girmektedir. Çatlak ilerleme mekanizmasına ait görsel Şekil 13’te verilmiştir.



**Şekil 13.** Yorulma çatlak oluşumu ve ilerlemesi (Yumak, 2021)

Çatlak oluşumu mekanizmasında çatlak ucunda gerilme yığılmaları meydana gelmekte ve birden fazla kayma bandı aktif hale gelmektedir. Çatlak komşu tanelerden ilerleyerek büyümek isterken komşu taneler bu duruma karşı bir direnç meydana getirmektedir. Ayrıca kayma tek bir düzlemde değil, birçok düzlemde gerçekleşeceğinden kayma düzlemi sayısı artmaktadır. Yükleme yönüne dik olarak kayma düzlemi ile hareket ederek çatlak büyüme eğilimi sergilemektedir. Mikro boyutta ilerlemeye devam eden çatlak, çatlak büyümesi için birtakım bariyerlerle karşılaşmaktadır. Bu aşamada çatlak, yorulma izleri ve kumsal izleri gibi karakteristik yorulma izlerini oluşturarak yoluna devam eder (Şekil 14). Yorulma izleri, çevrimsel yükleme durumunda çatlak açılması/kapanması durumunda meydana gelmektedir, Oluşan yorulma izleri, yorulma hasarının olup olmadığı konusunda en önemli kanıtlardan biridir. Ancak bu durum, yorulma izlerinin olmaması durumunda yorulma hasarının gerçekleşmediği anlamına gelmemektedir. Makro boyutta oluşan çatlak ilerlemesi sonucunda, malzemenin artık yükü taşıyamayacak duruma gelmesi durumunda, malzeme aniden kırılarak

hasar meydana gelmektedir. Şekil 14'te yorulma çizgilerinin oluşumu ve bu duruma örnek gösterilmiştir.



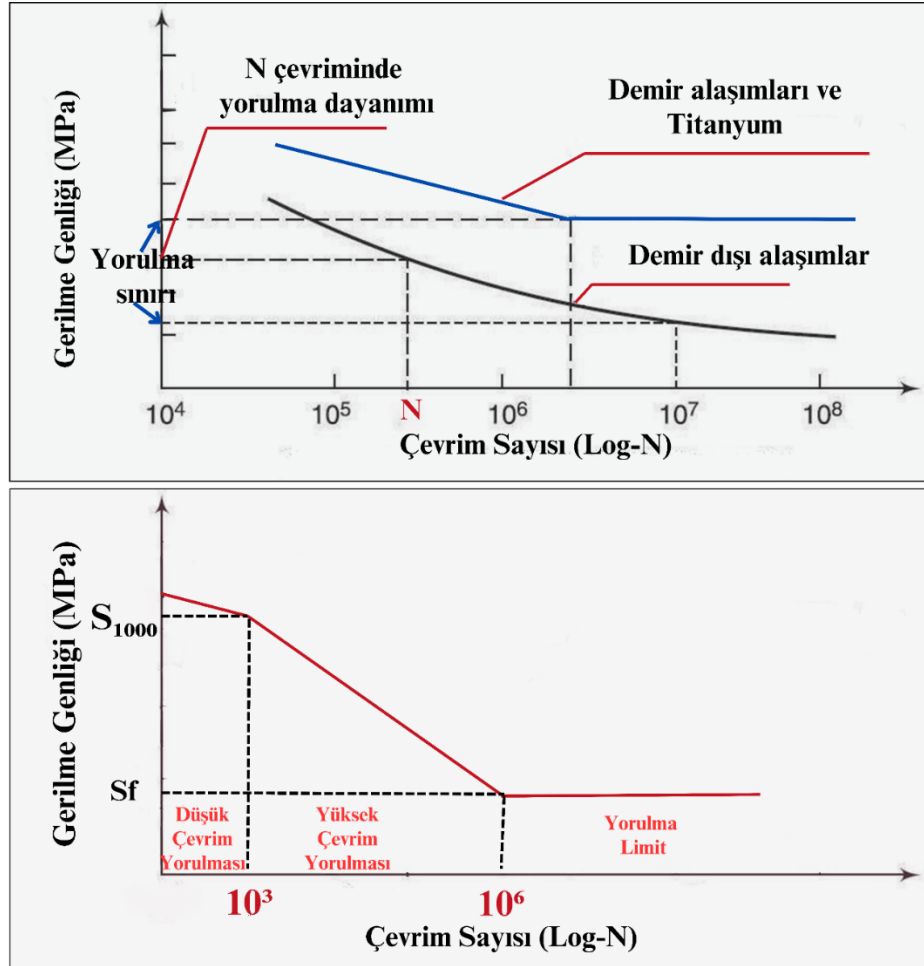
Şekil 14. Yorulma çizgilerinin oluşumu ve örnek oluşum mekanizması (Lynch, 2019)

### Yorulma analizlerinde kullanılan yaklaşımlar

Dişli çarklar, akslar, demiryolu rayları ve uçak kanatları gibi yorulma yükleri altında çalışan parça ve/veya elemanlarda çevrimsel ve belli bir zaman aralığında oluşan gerilmeler akma dayanımından düşük olmasına rağmen hasara sebebiyet vermektedir. Bu nedenle bu tip elemanların tasarımında yorulma hasarı ile ilgili büyüklükler dikkate alınmakta ve bu elemanlarda yorulma analizi; gerilme ömrü (stress life), şekil değiştirme ömrü (strain life) ve kırılma mekaniği (fracture mechanics) yaklaşımları olmak üzere üç farklı yaklaşım ile ele alınmaktadır (Bhaduri, 2018; Lewandowski & Seifi, 2016)

- a) Gerilme Ömrü (Stress Life) Yaklaşımı:** Yorulma hasarı ile ilgili en temel yaklaşım olan gerilme ömrü yaklaşımında, malzemenin kırılıncaya kadar geçen tüm zaman ele alınır. Belli bir frekansta ve sabit genlikli yorulma gerilmesinde malzemenin elastik şekil değişimine uğradığı kabul edilir. Malzemede tekrarlı yükleme durumundaki, ilgili gerilme değerine karşılık gelen çevrim sayısına ne kadar dayanabildiğini hesaplanması amaçlanmaktadır. Yani gerilme ömrü, malzemenin belirli bir yük seviyesinde hasar görmeden ne kadar süre dayanabileceğini göstermek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu değerlendirme, her malzeme için deneysel çalışmalarla elde edilen ve gerilme ile çevrim sayısı (Stress-Number of Cycles/S-N) arasındaki ilişkiyi gösteren grafiklerden yararlanılarak yapılır. Bu grafiğe S-N eğrisi veya Wöhler eğrisi adı verilmektedir. Şekil 15'te farklı malzeme grupları için S-N eğrileri verilmiştir. Wöhler grafiğini oluşturmak için en az 10-12 adet test numunesi kullanılmaktadır. Şekil 15'te görüldüğü üzere X eksenini çevrim sayısını, Y eksenini gerilme genliğini ifade etmektedir. Demir esaslı, çelik ve titanyum gibi hacim merkezli kübik (HMK) malzemelerde belirli bir gerilme genliğinin altındaki

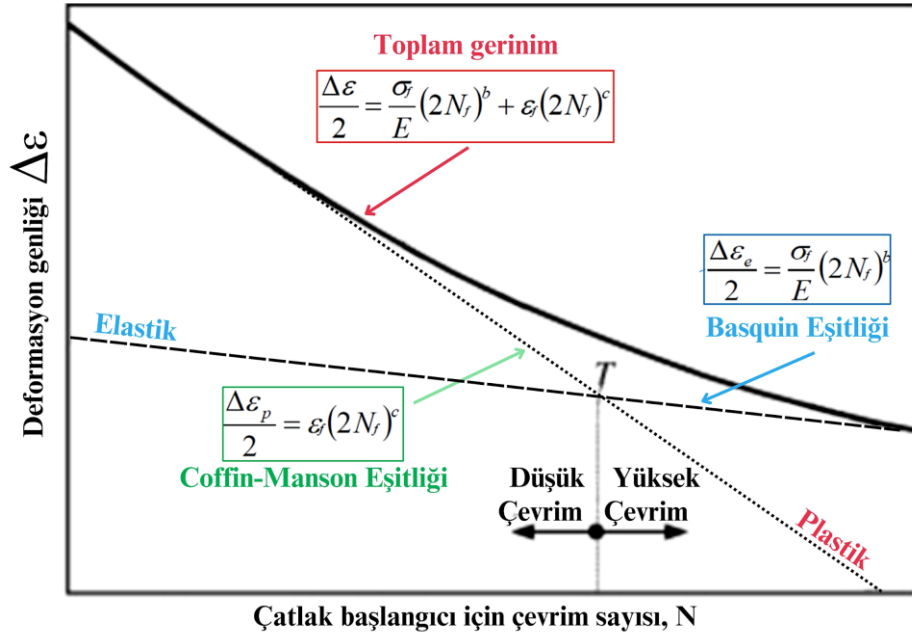
yüklemelerde yorulma hasarı meydana gelmemekte ve bu değere yorulma sınırı adı verilmektedir. Ancak, istif kusur enerjisi, atomsal titreşim ve dislokasyon hareketi gibi malzemeye özgü durumlardan dolayı demir esaslı olmayan yüzey merkezli kübik (YMK) yapıli malzemelerde yorulma sınırı gözlemlenmemektedir. Bu nedenle  $10^7$  çevrime karşılık gelen gerilme genliği değeri yorulma sınırı olarak kabul edilmektedir. S-N eğrisine göre  $10^3$  çevrime karşılık gelen gerilme genliği durumunda hasarın meydana geldiği durum düşük çevrim yorulması şeklinde tanımlanmaktadır. Düşük çevrim yorulmasında, gerilme genliği akma sınırına yakındır. S-N eğrisinde  $10^3$  çevrimden daha yüksek çevrim sayıları ve daha düşük gerilme genliğinin olduğu durumda yüksek çevrim yorulması meydana gelmektedir (Lee, 2005).



Şekil 15. Farklı malzeme grupları için S-N eğrisi ve detaylı bölgeler (Bhat *et al.*, 2011)

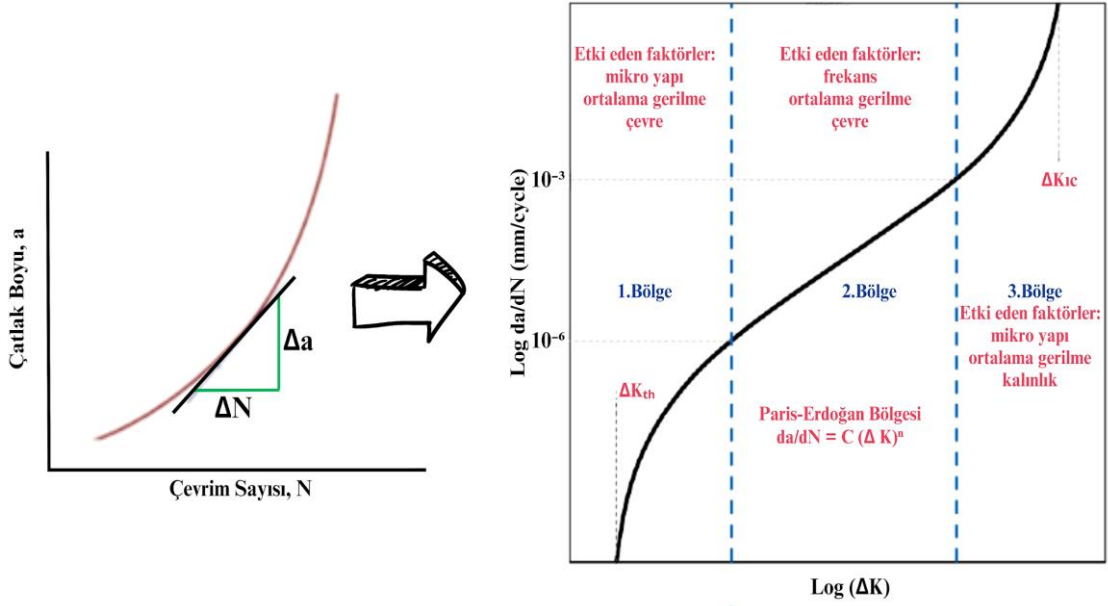
- b) **Şekil Değişirme Ömrü (Strain Life) Yaklaşımı:** Gerilme ve şekil değişimini dikkate alan bu yaklaşım, düşük çevrim yorulmalarında meydana gelen yüksek şekil değişimi ve gerilmeleri incelemektedir. Böylece yorulma ömrü tayini gerçekleştirmektedir. Malzemelerin yorulma çatlak başlangıçlarının belirlenmesinde

kullanılan bu yaklaşımda, malzemedeki elastik ve plastik şekil değişimlerinin tamamı dikkate alınmaktadır. Şekil değiştirme ömrü yaklaşımında, Şekil 16'da verilen  $\varepsilon$ -N grafikleri kullanılmaktadır (Fajdiga and Sraml, 2009).



**Şekil 16.** Yorulma çatlak başlangıcı için şekil değiştirme ömrü yaklaşımı (Fajdiga and Sraml, 2009).

- c) **Kırılma Mekanikliği (Fracture Mechanics) Yaklaşımı:** Bir malzemenin yorulma ömrünün %80'ini çatlak başlangıcı ve ilerlemesi oluşturmaktadır. Düşük çevrimli yorulmada çatlak başlangıcı yorulma ömrünün büyük bir kısmını kapsarken yüksek çevrimli yorulmada bu durum çatlak ilerlemesi için geçerlidir. Kırılma mekanikliği yaklaşımında, malzeme içerisinde belli bir uzunluktaki ilk çatlak boyu belirlendikten sonra, bu çatlağın ilerlemesi ve kırılması aşamaları ile ilgilenilmektedir. Malzemeler başlangıçta belli bir uzunlukta çatlak boyuna sahip olduğu için kırılma mekanikliği yaklaşımında klasik gerilme-şekil değişimi bağlantıları geçersiz olmaktadır ve gerilme şiddet faktörü (K) kullanılmaktadır. Kırılma mekanikliği yaklaşımında Şekil 17'de gösterildiği gibi,  $(a-N)$  veya Paris-Erdoğan  $(da/dN-\Delta K)$  eğrileri ile var olan çatlağın kaç çevrim sonunda kırılacağı tespit edilir (Schijve, 2001a).

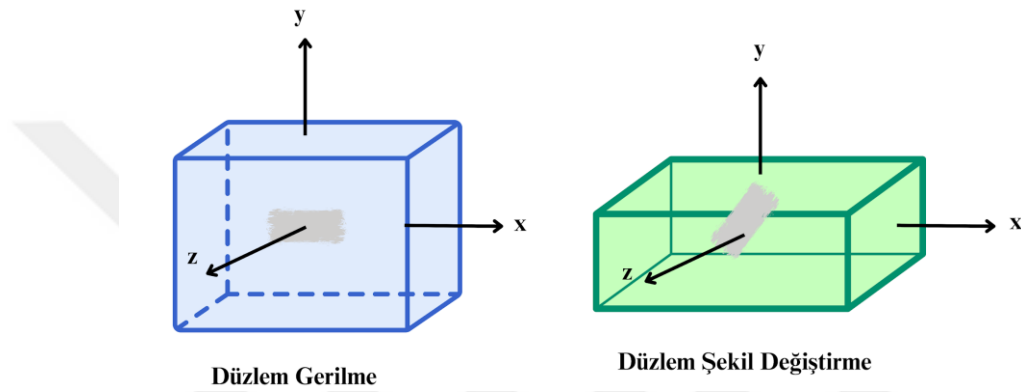


Şekil 17. Yorulma çatlak ilerleme eğrisi (Schijve, 2001a)

### Kırılma mekaniği

Havacılık ve uzay, otomotiv ve tıp gibi pek çok alanda kullanılan malzemelerin kullanım koşulları altında ömrünün belirlenebilmesi için yorulma dayanımının bilinmesi gerekmektedir. Yorulma dayanımının incelenirken malzeme özellikleri, geometrisi ve yükleme gibi parametreler etkilidir. Statik yükleme altında malzemelerin çalışma performansını akma dayanımı ile belirlemek mümkündür. Eğer malzemelere uygulanan kuvvet ve/veya momentler malzemenin akma dayanımının altında ise hasar meydana gelmeden yükleme koşulları altında çalışabilir. Ancak üretim aşamasında, malzemenin yapısında boşluk, gözenek, pürüz ve çatlak gibi kusurlar bulunmaktadır. Tüm bu kusurların varlığı klasik mühendislik yaklaşımlarında hesaba katılamamaktadır ve akma dayanımının altında bir yükleme durumunda malzeme hasara uğramaktadır. Böyle bir durumda, kırılma mekaniği, malzeme dayanımı ve malzemedeki gerilmelerin yanı sıra çatlak varlığını hesaba katarak klasik yaklaşım yöntemlerinden ayrılmaktadır. Kırılma mekaniği lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ve Elasto-plastik kırılma mekaniği (EPKM) olmak üzere iki kategoride incelenmektedir. Eğer çatlak ucu keskin ve çatlak ucu etrafında çok az miktarda plastik deformasyon oluşmuşsa, **Lineer Elastik Kırılma Mekaniği Yöntemi** tercih edilir. Ancak çatlak ucu nispeten daha az keskin ve çatlak ucu etrafında ciddi plastik deformasyonlar mevcutsa, **Elasto-plastik Kırılma Mekaniği Yöntemi** uygulanır (Campbell, 2012). Özellikle gevrek kırılma davranışı sergileyen malzemelerde, LEKM kullanılmaktadır. Çünkü çatlak içeren gevrek malzemelerde, çatlak ilerlemesi esnasında plastik şekil değişimi için yüksek enerji harcanmayıp ani bir kırılma meydana gelmektedir. Ancak, sünek malzemeler de yükleme durumu ve geometrik

özelliklerinden kaynaklı olarak gevrek kırılma davranışı sergileyebilmektedir. Şekil 18’de verilen ince kesitli bir malzeme x ve y yönünde bası veya çeki yüklemesine maruz kalmaktadır. İnce malzemede z yönünde herhangi bir zorlama olmadığı ve  $\sigma_z=0$  gerilme değeri elde edilirken aynı düzlemde bir şekil değişiminin varlığından söz edilmesi mümkündür ( $\epsilon \neq 0$ ). Aynı şekilde Şekil 18’de x ve y yönünde çeki/bası şeklinde gerçekleştirilen yükleme sonucunda kalınlık sebebiyle şekil değişiminin sınırlandırıldığı ( $\epsilon=0$ ) ve gerilmeler oluştuğu ( $\sigma_z \neq 0$ ) söylenebilir. Bu durumda ise, ince kesitli malzemelerde gerilmenin bir düzlemde kaldığı düzlem gerilme, kalın kesitli malzemelerde ise şekil değişiminin bir düzlemde kaldığı düzlem şekil değiştirme hali hâkim olmaktadır (Bannantine *et al.*, 1990)

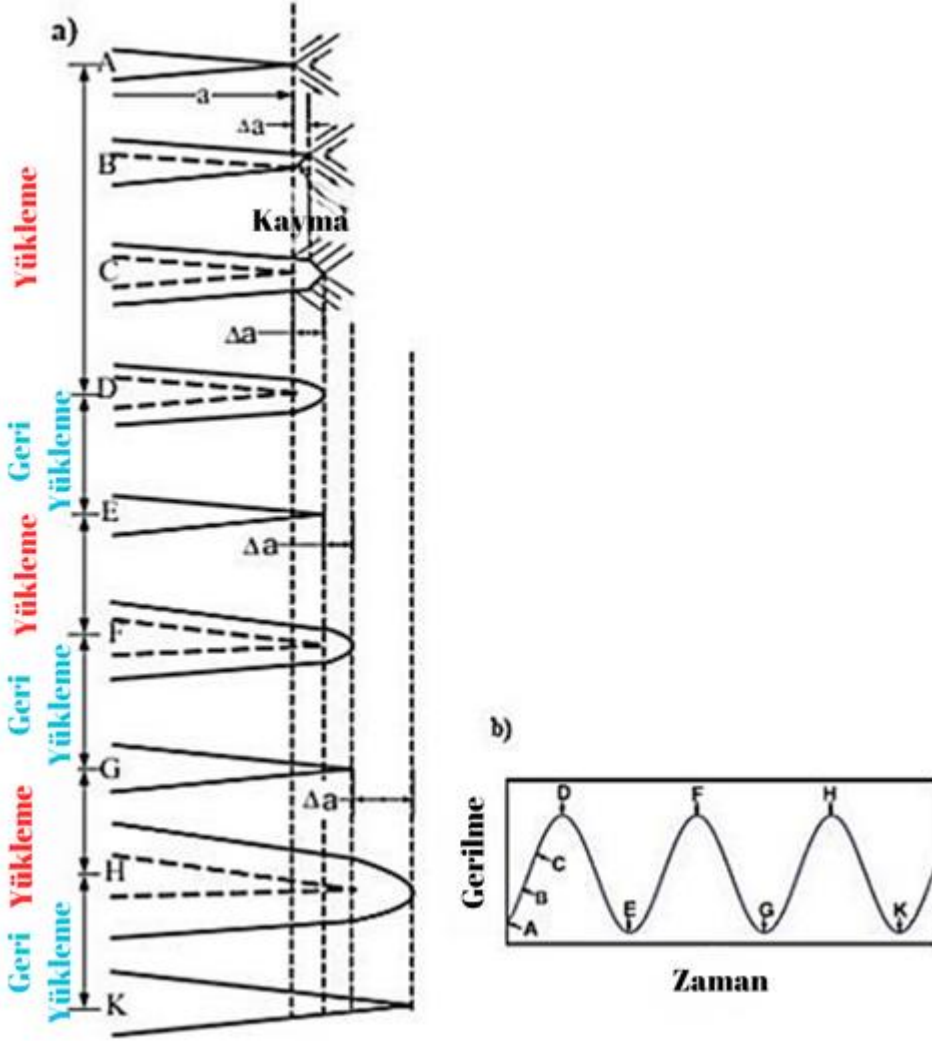


**Şekil 18.** Düzlem gerilme ve düzlem şekil değişimi (Bannantine *et al.*, 1990)

## **Kırılma mekaniği yaklaşımının yorulma çatlak ilerlemesi analizlerinde kullanımı**

### **Sabit genlikli yorulma çatlak ilerlemesi**

Sabit genlikle yükleme tipinde test öncesi yükleme tipinden bağımsız bir değerlendirme gerçekleştirildiğinden test sonuçlarının analiz edilmesi kolaydır. Sabit genlikli yükleme altında, atomik düzlemlerin kayması ile çentik önünde kütleşme şeklinde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Yükleme-geri yükleme aşamasında bu kütleşme yerini  $\Delta a$  kadar çatlak oluşumuna bırakmaktadır. Geri yükleme aşaması tamamlandığında,  $\Delta a$  kadar artış ile çatlak başlangıç noktasına dönmeye çalışır. Böylece Şekil 19’da gösterildiği gibi, birbirini takip eden yüklemegeri yükleme şeklindeki tekrarlı hareketle F, G, H ve K aşamalarını takip ederek çatlak ilerler (Broek, 2012).



Şekil 19. Sabit genlikli yüklemeye altında yorulma çatlak ilerlemesinin oluşumu (Broek, 2012)

Yorulma çatlak ilerlemesi analizinde bir malzemede var olan çatlakın kaç çevrim sonunda kırılacağını Şekil 17'den faydalanarak belirlemek mümkündür. Şekil 17'de verilen Paris-Erdoğan eşitliği (2. Bölge), yorulma çatlak ilerlemesi test sonuçlarını değerlendirmek amacıyla kullanılan bir modeldir. Bu modelde, x eksenini  $\Delta K$  gerilme şiddet faktörü aralığını, y eksenini  $da/dN$  çatlak ilerleme oranını ifade etmektedir. Logaritmik ölçekte çizilen bu grafik yorulma çatlak büyüme/ilerleme miktarını belirtmektedir. Bu model yorulma çatlak ilerlemesini üç kısma ayırmıştır. I. Bölge eşik değer bölgesi, II. Bölge kararlı çatlak ilerlemesi bölgesi ve III. Bölge kararsız çatlak ilerlemesi bölgesi şeklinde yorulma çatlak ilerleme eğrisini oluşturmaktadır. I. Bölge, çatlak başlangıcının oluşumu meydana geldiği,  $10^{-6}$  mm/çevrim ve altında çatlak ilerleme oranına sahiptir. Bu bölgede gerilme şiddet faktörü aralığı ( $\Delta K$ ) eşik gerilme şiddet faktörü aralığı ( $\Delta K_{th}$ ) olarak kabul edilmektedir. Bu değer altında çatlak ilerlemesi gözlemlenmez. Malzemenin tane boyutu, mikro yapısı, ortalama gerilme ve çalışma koşulları gibi parametreler bu bölgede çatlak oluşumu için oldukça belirleyicidir (Beden *et al.*, 2009b).

II. Bölge, lineer-kararlı çatlak ilerlemesinin meydana geldiği  $10^{-6}$ - $10^{-3}$  mm/çevrim seviyesinde çatlak ilerleme oranına sahiptir. Bu bölgeye Paris-Erdoğan Bölgesi de denilmektedir. Bu bölge Paris-Erdoğan eşitliği ile ifade edilmektedir (Denklem 7).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

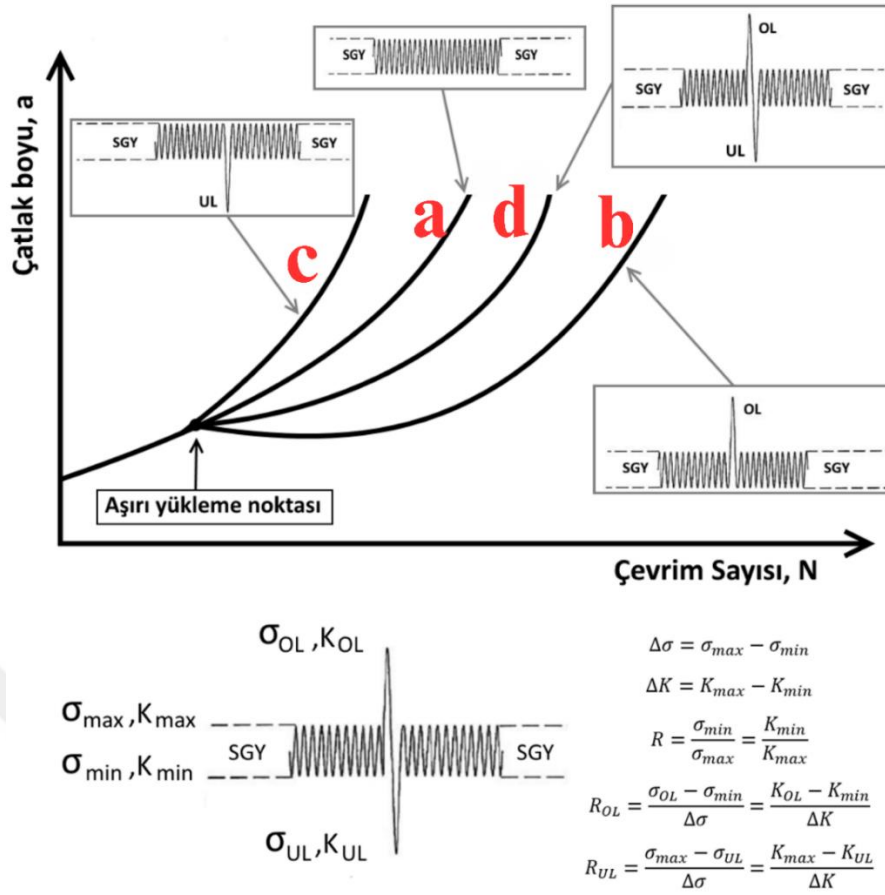
Denklem 7’de  $da/dN$  yorulma çatlak ilerleme hızı, C ve m malzemeye özgü sabitler,  $\Delta K$  ise gerilme şiddet faktörü aralığı olarak tanımlanmaktadır.  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f(g)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$  şeklinde hesaplanmaktadır. Burada;  $f(g)$  malzemenin boyutlarına ve çatlak boyuna bağlı geometrik faktörü,  $\Delta\sigma$  oluşan maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki farkı ve  $a$  ise çatlak boyunu ifade eder. Bu bölgede LEKM geçerli olmakla birlikte  $\log da/dN$ - $\log \Delta K$  doğrusal bir ilişki sergilememektedir. Bu bölgenin sonunda lineerlik bozulur ve çatlak ilerleme davranışı karmaşık bir hal alır.

III. bölge (kararsız çatlak ilerlemesi bölgesi),  $\log da/dN$ - $\log \Delta K$  eğrisinin dikleştiği bölgedir. Malzemede oluşan gerilme değeri oldukça yüksektir ve çatlak önünde yüksek plastik deformasyonlar gözlemlenmektedir. Bu nedenle II. bölgede geçerli olan LEKM formülleri bu bölgede geçerliliğini yitirmekte ve yerini EPKM yaklaşımına bırakmaktadır. Bu bölgede, yüksek çatlak ilerleme hızı meydana gelmekte ve eğri kırılma tokluğu değerine yaklaşmaktadır. Eğri kırılma tokluğu değerine ulaştığında ise kırılma gerçekleşir (Beden *et al.*, 2009b).

### **Değişken genlikli yorulma çatlak ilerlemesi**

Eğer bir parçadaki çatlağın boyu biliniyorsa, bu çatlağın hangi süre/çevrim sayısı sonucunda hasara uğrayacağı da tespit edilebilmektedir. Malzemenin yorulma ömrünün ve yorulma çatlak ilerleme mekanizmasının incelenmesi için standart testlerde sabit genlikli yükleme durumları ele alınmasına rağmen gerçekte kritik makine elemanları veya parçaları, kullanım ömürleri boyunca genellikle sabit genlikli yükler yerine rastgele veya değişken yüklemeler altında çalışmaktadır (Karcı, and Turan, 2009; Skorupa, 1998). Bu tür değişken yüklemeler, çatlak ilerleme hızında belirgin bir şekilde hızlanma veya yavaşlama gibi karakteristik farklılıklara neden olmaktadır (Silva, 2007). Dolayısıyla, yorulma çatlak ilerlemesi davranışı ve ömrünün doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için bu yük değişimlerinin etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Değişken genlikli yükleme durumu; yükün sabit genlikli duruma göre azalması ve artması şeklinde meydana gelmektedir. Değişken genlikli yükleme durumları içerisinde de özellikle yorulma çatlak ilerlemesi esnasında meydana gelebilecek çeki aşırı yüklemesi (overload-OL) ve bası aşırı yüklemesi (underload-UL) durumları, malzemelerin yorulma/yorulma çatlak ilerleme ömrünü büyük ölçüde etkilemektedir. Malzemeye en yüksek yükten daha büyük bir çeki yüklenmesi

durumunda çeki aşırı yüklenmesi (overload-OL), en düşük yükten daha düşük bası yüklemesi yapılması durumunda bası aşırı yüklemesi (underload-UL) gerçekleştirilmiş olur. Aşırı yükleme sonrası çatlak ilerleme davranışının nasıl bir davranış sergileyeceği malzemenin özellikleri, yükleme koşulları ve çalışma şartları ile ilişkilidir. Sabit genlikli yüklemeye sahip metalik malzemelere çeki aşırı yüklemesi uygulanması durumunda çatlak ilerleme ömründe artış ve çatlak ilerleme esnasında bası aşırı yükleme uygulanması ile de çatlak ilerleme ömründe azalış gözlemlenir. Bu nedenle metalik malzemelere uygulanan yükleme tipinin önemi oldukça fazladır. Yorulma çatlak ilerlemesi esnasında sabit genlikli yükleme esnasında OL ve UL'nin çatlak boyu üzerindeki etkisi Şekil 20'de gösterilmiştir. Malzemelerin sabit ve değişken genlikli yorulma çatlak ilerleme davranışının incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Beden *et al.*, 2009b; Chang & Hudson, 1981; Hemmesi *et al.*, 2022; Johnson *et al.*, 2014a, 2014b; Merot *et al.*, 2022) Şekil 20'de sabit ve değişken genlikli yükleme durumları için çatlak ilerleme modelleri gösterilmiştir. Bir malzemeye sabit yük genliği ve sabit ortalama gerilme ile gerçekleşen yükleme durumunda Şekil 20a'daki gibi bir eğri meydana gelecektir. Ancak eğer malzemeye tek çevrim sabit genlik üzerinde bir değişken genlik uygulanırsa Şekil 20b'de verilen eğri geçerli olacaktır. Böylece çatlak ilerleme ömründe artış meydana gelecektir. Bir diğer şekilde, sabit gerilme genliğinin altında tek çevrimlik bir yükleme gerçekleşirse Şekil 20c'de verildiği gibi bir eğri elde edilecektir. Bu durum da çatlak ilerleme ömründe azalma meydana gelecektir. En son olarak malzemeye, sabit genlik halinde çeki yüklemesinin ardından hemen bası yüklemesi uygulanması durumunda Şekil 20d'de verilen eğri geçerli olacaktır. Bu durumda tek çevrim SGY'nin üzerinde gerçekleşen yüklemeden daha az çatlak ilerleme ömrüne sahip ancak diğer şartlara göre yüksek çatlak ilerleme ömrü sergileyecektir (Kovacı 2016).



**Şekil 20.** DGY altında temel çatlak ilerleme modelleri ve analizde kullanılan temel büyüklükler (Kovacı 2016)

Özellikle çeki aşırı yüklemesi (OL) tipi çatlak ilerleme ömründe oldukça etkilidir. Literatürde yapılan çalışmalara göre; OL etkisi ile çatlak ilerleme ömründeki gecikme çatlak ucu körleşmesi, çatlak ucu bası artık gerilmeleri oluşumu ve çatlak kapanması şeklinde üç teori ile açıklanmaktadır.

Çatlak ucu körleşmesi teorisine göre, OL uygulandığında çatlak ucunda bir körleşme meydana gelmekte ve bunun sonucunda çatlak ilerleme hızında bir azalma gözlemlenmektedir. Ancak bu teori, çatlak ilerlemesinde gözlemlenen gecikme davranışını (delayed retardation) tam olarak açıklayamamaktadır. Teori, aşırı yüklemenin uygulanmasıyla çatlak ucunun hemen körleşeceğini ve gecikmenin maksimum seviyeye anında ulaşacağını öne sürmektedir. Buna karşın, deneysel bulgular, çatlak gecikmesinin maksimum düzeyine ulaşmasının aşırı yüklemeden hemen sonra değil, belirli bir yükleme döngüsü sonunda gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum, teorinin çatlak ilerleme gecikmesinin dinamik ve zamana bağlı karakteristiğini açıklamakta yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır (Korsunsky *et al.*, 2009).

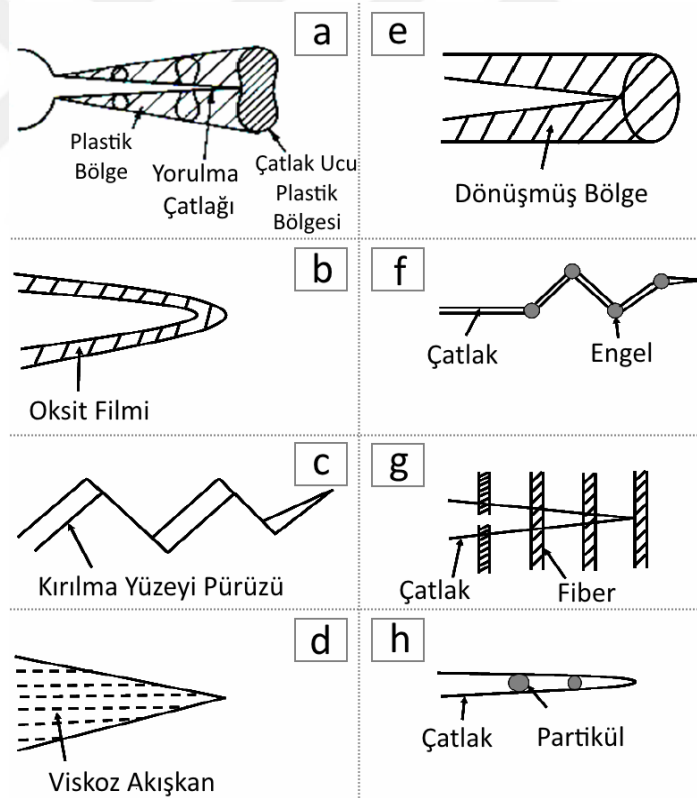
OL sonrasında çatlak ucunda bası artık gerilmelerinin oluştuğunu öne süren teori, bu gerilmelerin çatlak ucundaki efektif gerilme seviyesini düşürdüğünü savunmaktadır. Bu

durumun, çatlak ilerleme hızında bir yavaşlamaya neden olduğu düşünülmektedir. Ancak bu teori de çatlak ilerlemesinde gözlemlenen ertelenmiş gecikme (delayed retardation) olayını açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu teoriye göre, aşırı yüklemeye uygulanır uygulanmaz çatlak ucundaki bası artık gerilmelerinin etkisi hemen devreye girmeli ve gecikmenin maksimum etkisi hızla görülmelidir. Oysa deneyler, çatlak ilerlemesindeki maksimum gecikmenin, aşırı yüklemeden hemen sonra değil, belirli bir yüklemeye döngüsü sonrasında gerçekleştiğini göstermektedir. Bu uyumsuzluk, çatlak ucundaki bası artık gerilmelerinin yanı sıra, mikro yapısal değişimler, plastik deformasyon bölgelerindeki yeniden düzenlemeler ve çatlak ucundaki gerilme alanlarının dinamik evrimi gibi daha karmaşık mekanizmaların sürece dâhil olabileceğini düşündürmektedir (Sun and Sehitoglu, 1992)

Elber tarafından geliştirilen çatlak kapanma teorisi, sabit genlikli yükler altında çatlak ilerlemesinde gözlemlenen gecikme ve hızlanma fenomenlerinin çatlak kapanma etkileriyle ilişkili olduğunu öne sürmektedir. Bu teoriye göre, çatlak kapanma etkileri, çatlağın ilerlemesinde etkili olan efektif gerilme şiddeti faktörü aralığı  $\Delta K_{eff}$  ve çatlak açılma gerilmesi  $\sigma_{op}$  değerlerinde değişimlere yol açmaktadır. Çatlak kapanma teorisi, yük etkileşimi davranışlarını incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır ve diğer teorilerden farklı olarak ertelenmiş çatlak gecikmesini de açıklama yeteneğine sahiptir. Bu teoriye göre, aşırı yüklemeye (OL) uygulandığında, çatlak ucunda oluşan plastik bölge elastik davranış gösteren bir alan tarafından kuşatılır. Bu durum, çatlak ucunda bası yönünde artık gerilmelerin meydana gelmesine neden olur. Ancak bu artık gerilmeler, mevcut çatlağın açılması için gerekli minimum gerilme seviyesini doğrudan etkilemez. Çatlak ilerlemeye başladığında ise bu artık gerilmeler çatlak yüzeylerinde aktif hale gelir. Bunun sonucunda, çatlak ucunda etkili olan yükler azalır ve çatlak ilerlemesi belirgin şekilde yavaşlar, yani çatlak gecikmesi gerçekleşir. Çatlak, aşırı yüklemenin neden olduğu plastik bölge boyunca ilerlerken, çatlak ilerleme hızı giderek azalır ve minimum bir seviyeye ulaşır. Bu süreç, çatlak ucundaki gerilme dağılımlarındaki değişimler ve plastik bölgedeki enerjinin yeniden dağılımı ile ilişkilidir. Bu teori hem çatlak ilerlemesinin dinamik yapısını hem de aşırı yüklemelerin uzun vadeli etkilerini anlamak için önemli bir çerçeve sunmaktadır ((Schijve, 2001b).

Bunlarla birlikte, değişken genlikli yükler altında çatlak ilerlemesi olayının açıklanması için Elber tarafından önerilen çatlak kapanması teorisine/mekanizmasına ilaveten, çatlak ucu kapanmasına sebep olan plastisite etkisi dışında farklı mekanizmaların da bu olaya sebep olduğu düşünülmektedir. Elber tarafından önerilen plastisite etkisi de dahil olmak üzere bu mekanizmalar Şekil 21’de gösterilmiştir ve şu şekildedir: plastisite, oksitlenme, pürüzlülük, akışkan, faz dönüşümü, çatlak sapması, fiber bağlanması ve partikül bağlanması. Oksitlenme

mekanizmasına göre; her bir yorulma çevrimi sonucunda, çatlak ucunda oluşan oksitler yorulma çatlak ilerlemesi için gerekli olan kuvveti azaltarak çatlak kapanmasına neden olmaktadır (Şekil 21-b). Pürüzlülük mekanizmasına göre; tekrarlı yükleme etkisi ile çatlak yüzeyleri birbirleri ile eşleşemezler ve bunun sonucunda ise çekmenin yanı sıra kayma olayı da gerçekleşerek karışık yükleme durumu oluşur. Oluşan bu karışık yükleme durumu ise çatlak kapanmasına sebep olur (Şekil 21-c). Yorulma çatlak ilerlemesi esnasında ortamda viskoz akışkan bulunması durumunda ise bu akışkan, kırılma göstererek ve hidrodinamik etki oluşturarak çatlak kapanmasına sebep olmaktadır (Şekil 21-d). Bir diğer teoriye göre ise, yorulma çatlak ilerlemesi sonucunda çatlak ucunda faz dönüşümleri gerçekleşmekte ve bu durum ise çatlak kapanmasına sebep olmaktadır (Şekil 21-e). Bunlarla birlikte, çatlak ilerleme doğrultusunda çatlak karşısına çıkabilecek boşluk, ikinci faz partikülleri, yabancı partiküller ve fiber benzeri yapılar; çatlak sapması, çatlak dallanması ve çatlak çatallanmasına yol açarak, yorulma çatlak kapanmasına sebep olabilmektedir (Şekil 21-f, Şekil 21-g ve Şekil 21-h) (Kovacı 2016).



**Şekil 21.** Çatlak kapanma mekanizmaları: a) plastisite, b) oksitlenme, c) pürüzlülük, d) akışkan, e) faz dönüşümü, f) çatlak sapması, g) fiber bağlanması ve h) partikül bağlanması (Kovacı 2016)

## MATERYAL VE METOT

### Materyal

Bu tez kapsamında, AISI 316L paslanmaz çelik numuneler üretilmiş ve kullanılmıştır. Çalışmada hem dövme hem de Lazer Toz Yatak 1 Füzyonu (L-PBF/SLM) yöntemi ile malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. SLM üretim yönteminde kullanılacak AISI 316L paslanmaz çelik tozuna ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

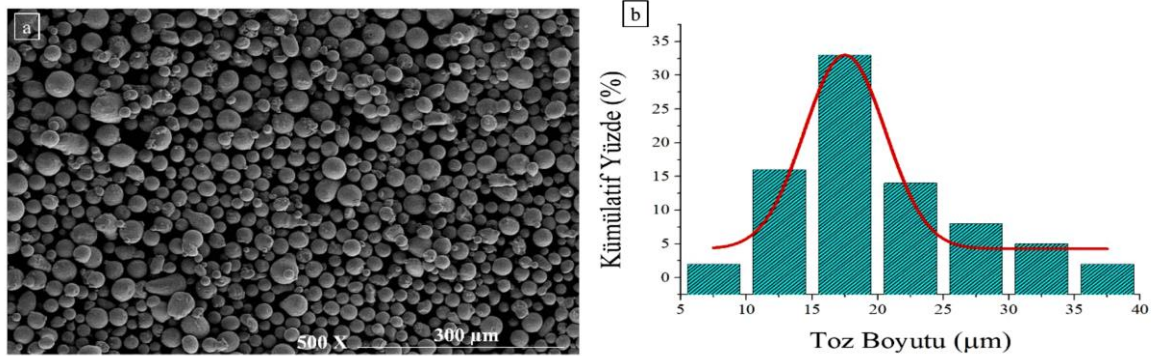
**Tablo 3.** Concept Lazer Firmasına Ait AISI 316L Paslanmaz Çelik Tozuna ve Dövme AISI 316L Paslanmaz Çeliğe Ait Kimyasal Kompozisyonu

Üretim Yöntemi	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	Fe
SLM	16.5-18.5	10-13	2-2.5	0-2	0-1	0-0.045	0-0.03	0-0.03	Bal.
Dövme	16.0-18.0	10.0-14.0	2-3	0-2	0-1	0-0.04	0-0.03	0-0.03	Bal.

**Tablo 4.** AISI 316L Paslanmaz Çelik Malzemenin Mekanik Özellikleri

Akma Dayanımı	470 MPa
Çekme Dayanımı	570 MPa
Sertlik (HV <sub>0,01</sub> )	20 HRC (180 HV)
Young Modülü	200 GPa

Şekil 22'de, L-PBF yöntemi kullanılarak imal edilen AISI 316L paslanmaz çelik numunelerde kullanılan toza ait Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü ve toz parçacık boyutu dağılımı verilmiştir.



**Şekil 22.** AISI 316L paslanmaz çelik toz özellikleri: a) AISI 316L paslanmaz çelik tozunun morfolojisi ve b) Toz parçacık boyutu dağılımı

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen işlemler temel olarak yedi aşamadan oluşmaktadır (Şekil 23).

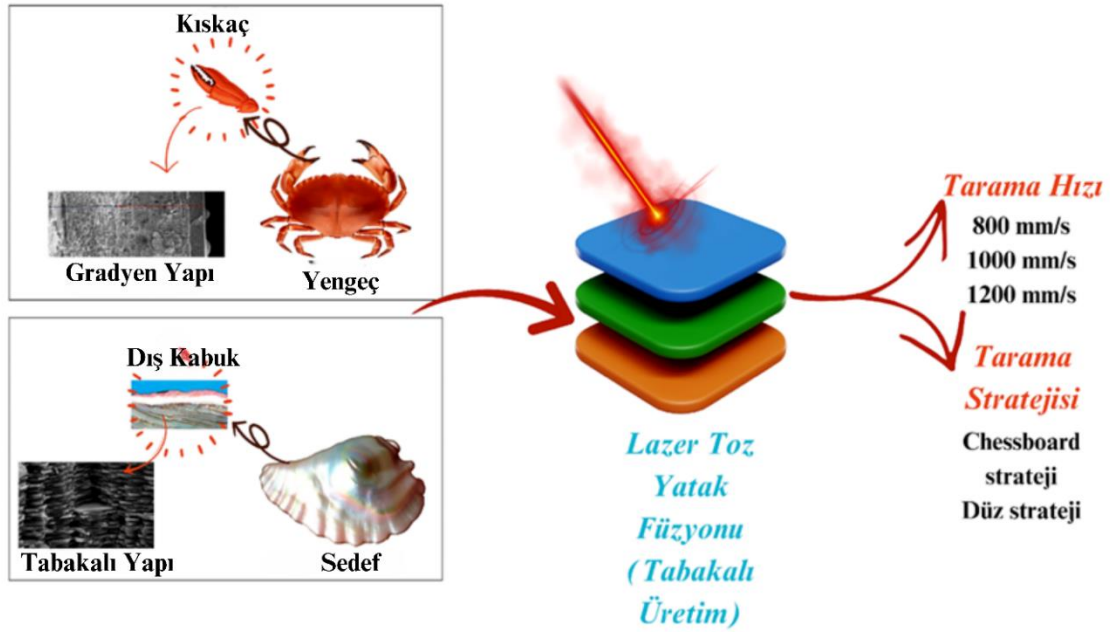
İŞ PAKETİ 1	<b>Biyomimetik Hiyerarşik Modellerin Tasarımı</b>	
İŞ PAKETİ 2	<b>Çekme ve Üç Noktadan Eğme Test Numunelerinin Hazırlanması</b>	
İŞ PAKETİ 3	<b>Yorulma Çatlak İlerlemesi Test Numunelerinin Hazırlanması</b>	
İŞ PAKETİ 4	<b>Eklemeli Üretim Yöntemi ile Test Parçalarının Üretimi</b>	
İŞ PAKETİ 5	<b>Mekanik Testlerin Gerçekleştirilmesi</b>	
İŞ PAKETİ 6	<b>Yapısal, Morfolojik ve Mekanik İncelemeler</b>	
İŞ PAKETİ 7	<b>Görüntü İşleme</b>	

Şekil 23. Tez kapsamında gerçekleştirilecek işlemler

### Biyomimetik hiyerarşik modellerin tasarımı

Çeşitli hayvan taksonlarından esinlenerek elde edilen biyomimetik hiyerarşik yapıların malzemenin tokluk, çekme, yorulma ve yorulma çatlak ilerleme davranışı gibi mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada biyomimetik hiyerarşik yapılardan gradyan ve laminar yapı esas modeller olarak referans alınarak öncelikle Solidworks 2021 SP5.1 yazılımı ile ASTM standartlarına uygun test numunelerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı tamamlanan numuneler üretim aşamasına geçebilmesi amacıyla

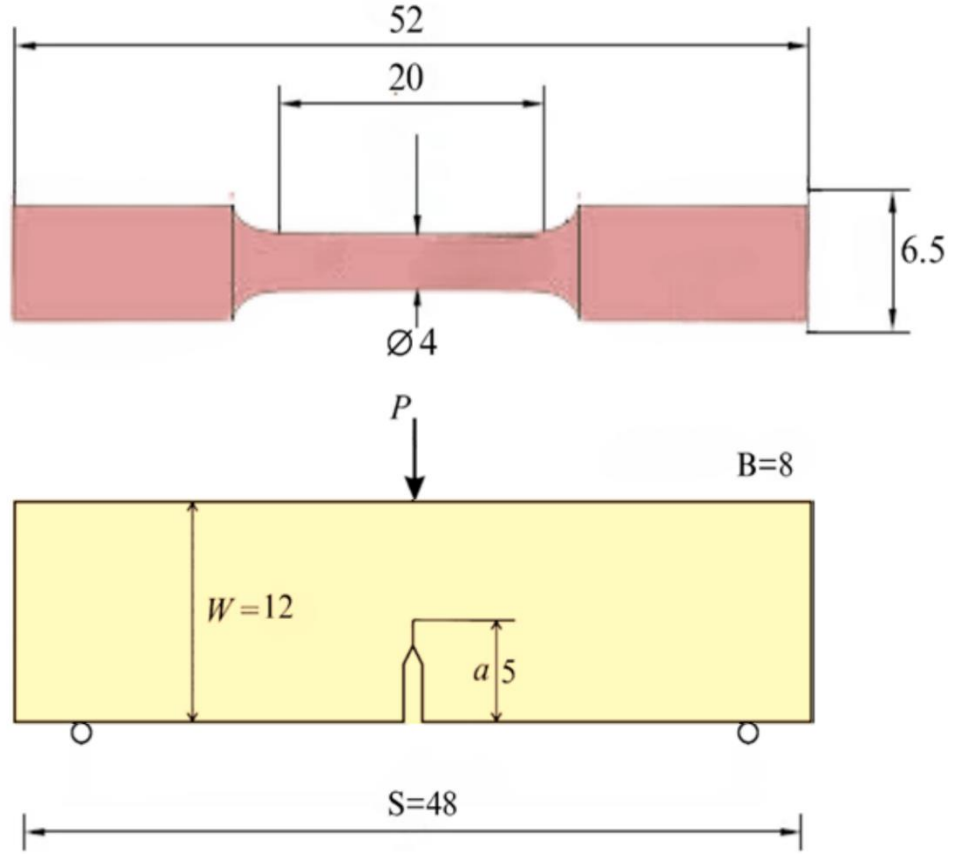
eklemeli imalat cihazında yazdırmaya uygun olacak şekilde (.STL) formatına dönüştürülmüştür. Çalışma kapsamında kullanılan hiyerarşik modellere ve modellemelere ait detaylar Şekil 24’te verilmiştir.



Şekil 24. Biyomimetik Hiyerarşik model tasarımı

#### Çekme ve üç noktadan eğme test numunelerinin hazırlanması

Tez kapsamında, statik yüklemeye altında biyomimetik hiyerarşik modellerin davranışını tanımlamak için çekme ve üç noktadan eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri için ASTM E8, üç noktadan eğme testi için ASTM E290 standartlarına uygun olacak şekilde numune tasarımları gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yapısal tasarımları SolidWorks 2021 SP5.1 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar, üretim aşamasında kullanılmak üzere (.STL) formatına dönüştürülmüştür. Çekme ve üç noktadan eğme test numunelerine ait geometrik detaylar Şekil 25’te verilmiştir (Ölçüler mm’dir).



**Şekil 25.** Çekme ve üç noktadan eğme testi numunelerinin geometrisi ve boyutları

#### **Yorulma çatlak ilerleme test numunelerinin hazırlanması**

Yorulma çatlak ilerleme davranışı tayini için “ASTM E647 (ASTM-E647-13ae1 2013)” standardına uygun bir şekilde tek kenarı çentikli geometriye sahip olan compact tension (CT) numunesi kullanılmıştır. Çatlak ucunda ortaya çıkabilecek düzensizlikler nedeniyle çeki-bası yerine sadece çeki yüklemesi gerçekleştirilmiştir (ASTM-E647-13ae1, 2013). ASTM E647 standardına uygun bir şekilde Solidworks 2021 SP5.1 yazılımı ile tasarımlar gerçekleştirilmiştir. ASTM standartlarına uygun olarak CT numunelerinin tasarımı gerçekleştirilirken burkulma ve çatlak önü eğrilik oluşmaması adına numune kalınlığı (B) ve numune genişliği (W) için birtakım limitler tayin edilmiştir.

**Kalınlık Limiti:** Numunenin kalınlığı (B) ve yükleme noktasından itibaren genişliğe (W) bağlı olarak aşağıdaki limitler içerisinde olmalıdır.

$$\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4} \quad (8)$$

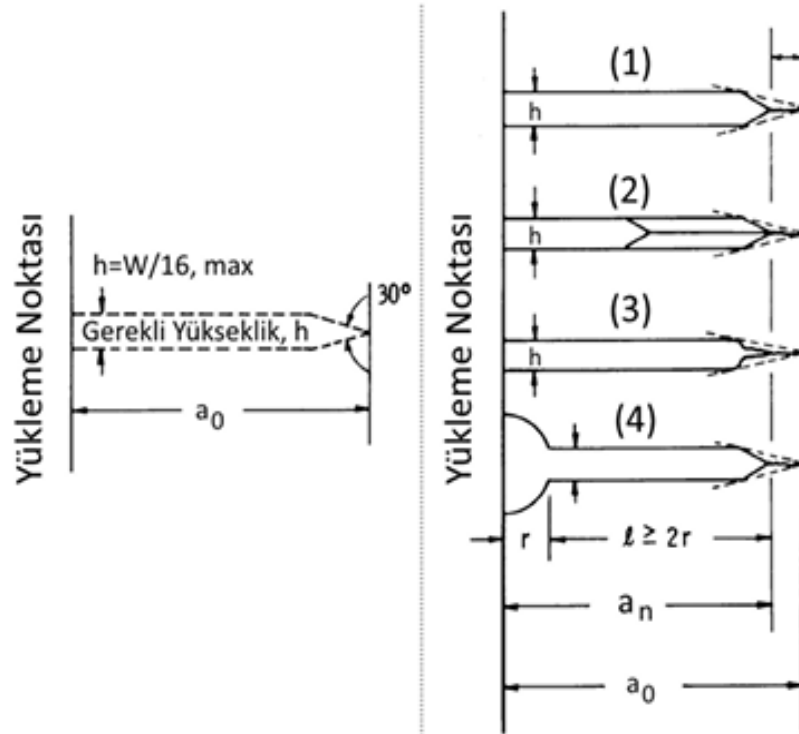
**Elastikiyet Limiti:** Numunenin, çatlak ucundaki plastik deformasyon bölgesi haricinde, geçerli doğru bir sonuç elde edilebilmesi için sabit genlikli yükleme testlerinde tamamen elastik

davranış göstermesi beklenir. Bu sebeple, numunenin çatlaksız kısmının uzunluğu, Denklem 9'da belirtildiği gibi limitleri sağlamalıdır.

$$(W - a) \geq \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot \left(\frac{K_{max}}{\tau_{ak}}\right)^2 \quad (9)$$

Denklem 9'a göre:  $a$  çatlak boyunu,  $(W - a)$  numunenin çentiksiz kısmının uzunluğunu,  $K_{max}$  maksimum gerilme şiddet faktörünü ve  $\tau_{ak}$  akma dayanımını ifade etmektedir.

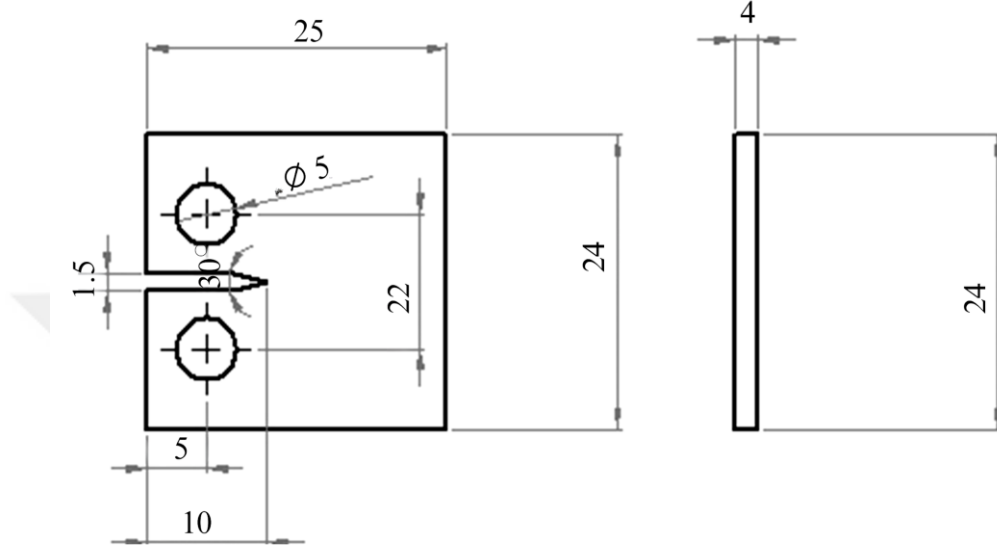
**Numune, Çentik Geometrisi ve Yorulma Ön Çatlağı:** Numune şekli ve boyutunun dikkatli bir şekilde seçilmesi artık gerilmelerin çatlak yayılma davranışını etkileyerek test sonuçlarını açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. Numune boyutlarının küçük bir oranı seçilerek, çatlak büyüme yönüne dik etki eden artık gerilmelerin kalınlık boyunca dağılımının etkisi azaltılabilir. Çatlağın kontrollü bir biçimde ilerlemesi ve belirli bir yönde gelişmesi için ince ve keskin bir çentikle ön çatlak oluşturulması gereklidir. ASTM E-647 standardı, dört farklı çentik geometrisi sunmaktadır. Şekil 26'da çentik geometrileri verilmiştir. Şekil 26'da verilen çentik geometrilerinden herhangi biri seçildikten sonra numunedeki minimum çentik için yük uygulama noktası merkezinden çentik ucuna kadar olan uzaklık,  $a_n \leq 0.2W$  şartını sağlamak zorundadır. Tez kapsamında, Şekil 26'da gösterilen (1) numaralı çatlak geometrisi seçilmiştir.



**Şekil 26.** Çentik geometrileri ve yorulma ön çatlağı için gerekli boyutlar (ASTM-E647-13ae1, 2013)

Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde, test açısından eşit şartlar sağlamak ve hata oranını en aza düşürmek amacıyla çentik ucundan itibaren belli bir uzunlukta ön çatlak açılması

gerekmektedir. Ön çatlak boyu;  $0.1B$ ,  $h$  veya  $1 \text{ mm}$  değerlerinden büyük olan seçilerek belirlenmektedir. Tez kapsamında, numune kalınlığı ( $B$ )  $3 \text{ mm}$  olduğundan;  $0.1B=0.3$ ,  $h=1,5$  ve  $1$  değerleri arasında sayısal olarak en büyük olan değer  $1,5 \text{ mm}$  olduğundan başlangıç çatlak boyu ( $a_0$ )  $1,5 \text{ mm}$  seçilmiştir ve ASTM E647-13 standartına göre diğer ölçüler elde edilmiştir. Çatlak ilerleme testlerinde kullanılan CT numunesine ait geometrik boyutlar Şekil 27’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Ölçüler  $\text{mm}$ ’dir.).



**Şekil 27.** Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan CT numunesi boyutları

### **Eklemeli üretim yöntemi ile test parçalarının üretimi ve yüzey temizliği**

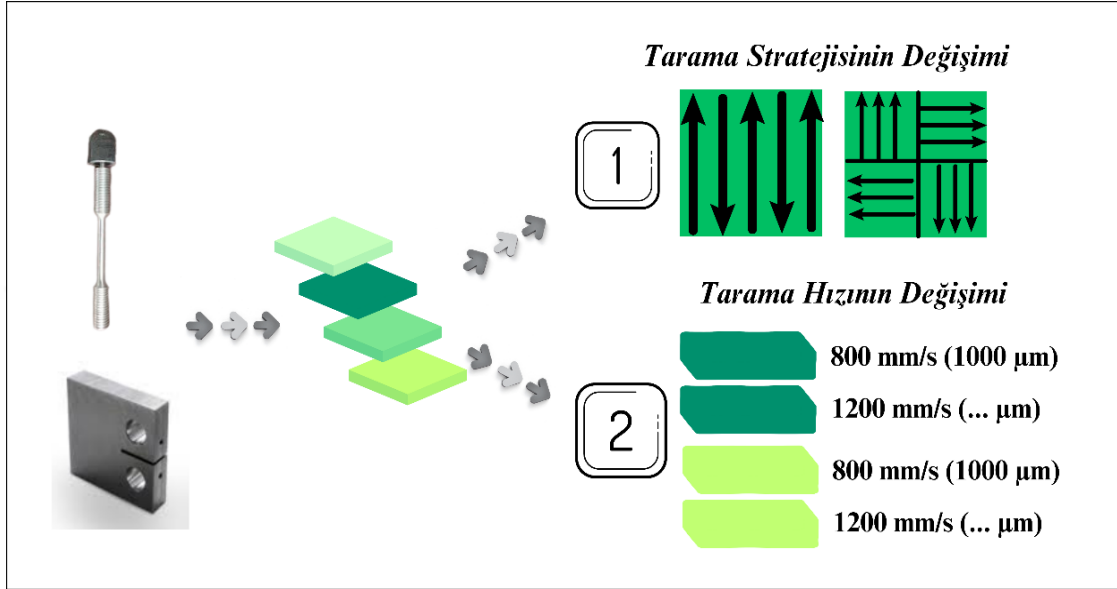
Deney numunelerinin üretimi, Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (YÜTAM) bünyesinde bulunan Consept Lazer MCusing R+ markalı Lazer Toz Yatak Füzyonu (L-PBF/SLM) sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Consept Lazer MCusing R+ cihazı; 100W Neodyum katkılı İtiryum Alüminyum Garnet (Nd: YAG) lazer sistemiyle donatılmış, tarama hızı  $1300 \text{ mm/s}$ , toz katman kalınlığı  $15\text{-}30 \mu\text{m}$ ,  $100 \text{ W}$  lazer gücü ve paralel tarama  $100 \mu\text{m}$ , odak çapı  $50 \mu\text{m}$  üretim parametrelerine sahiptir. Üretimler, şu parametrelerle gerçekleştirilmiştir:  $100 \text{ W}$  lazer gücü,  $80 \mu\text{m}$  tarama mesafesi,  $20 \mu\text{m}$  katman kalınlığı. Bu tez çalışması kapsamında düz ve chessboard olmak üzere iki farklı tarama stratejisi kullanılmıştır. Düz tarama stratejisi için  $63^\circ$  lazer dönüş açısı kullanılırken chessboard stratejisinde  $4 \times 4$  tarama alanına karşılık  $0/90^\circ$  şeklinde tarama vektör açısı seçilmiştir. Üretimler gerçekleştirilirken oksitlenme meydana gelmemesi için ortama azot gazı gönderilmiş ve ortamdaki oksijen seviyesi,  $\%0,3\text{-}\%0,8$  aralığında tutulmuştur. Üretimlerde, burada verilen sabit parametrelere karşılık, biyomimetik modellerin oluşturulması için değişken olarak seçilen parametreler ve üretim stratejileri aşağıda verilmiştir.

Tez kapsamında biyomimetik hiyerarşik yapıların (gradyan ve laminar) oluşturulabilmesi için SLM üretim parametrelerinden olan lazer tarama hızından faydalanılmıştır. L-PBF ile üretimler iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

- İlk aşamada, çekme ve eğme numuneleri yukarıda verilen L-PBF üretim parametreleri sabit olmak üzere, farklı tarama hızları ile (300, 600, 800, 900, 1000 ve 1200 mm/s) üretilmiştir. Ayrıca üretimler, şerit tarama (düz) ve satranç tahtası (chessboard) stratejileri kullanılarak iki farklı strateji ile gerçekleştirilmiştir. Böylece tarama hızının ve stratejisinin etkisi gözlemlenerek tabakalı yapıli numunelerin tasarımı ve üretimine geçilmiştir.
- İkinci aşamada ise malzeme içerisinde kesit boyunca yumuşak geçiş sağlayarak tabakalar arası değişken mekanik özellikler sergileyen gradyan yapıların elde edilmesi için, tabakalar arasında farklı tarama hızları kullanılarak değişken mikro yapı elde edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, gerçekleştirilen literatür araştırması (Esmailizadeh *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2021) ve ilk aşamada üretilen numunelerden elde edilen sonuçlara göre: tarama hızları malzeme içerisinde değişken olacak şekilde 800mm/s ve 1200mm/s olarak seçilmiştir. Birden fazla ara yüzey yapısına sahip laminar yapı elde edilebilmesi için tabakanın kendi içerisinde anizotropisinin değişiminden faydalanılmıştır. Bu durum, tabaka halinde üretilen numunelerin tarama stratejisinde değişiklik yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, laminar yapı elde etmek için düz ve chessboard stratejisi kullanılmıştır ((Mugwagwa *et al.*, 2019). Şekil 28’de üretim modellemesi ve tez kapsamında üretilen numunelere ait görsel verilmiştir. Ayrıca, tez kapsamında üretilen çekme ve eğme numunelerine ait parametreler Tablo 5’te ve yorulma çatlak ilerlemesi numunelerine (CT) ait parametreler Tablo 6’da verilmiştir. Elde edilen tüm numunelerin yüzeyleri ETÜ YÜTAM bünyesinde bulunan kumlama cihazı kullanılarak 6Pa basınçta SiC aşındırıcı tozlarla kumlanmıştır. Kumlama işleminden sonra numuneler ultrasonik banyo içerisinde 5 dakika süre ile etil alkol ile temizlenmiş ve akabinde kurutulmuştur. Bu işlemlerden sonra numuneler, mekanik testlere (çekme, üç noktadan eğme ve yorulma çatlak ilerlemesi) tabii tutulmuştur.

Tez boyunca numuneleri isimlendirmek için kısaltmalar kullanılmıştır. Tarama stratejilerini tanımlamada, düz strateji ile üretilen numuneler için “D” ve chessboard (satranç tahtası) stratejisi ile üretilen numuneler için “C” kısaltması kullanılmıştır. Yatay üretim yönelimi ile üretilen numunelerde “Y” kısaltması kullanılmıştır. “YC” ile belirtilen yatay üretim yöneliminde chessboard stratejisinde üretilen numuneleri tanımlarken “YD” ile belirtilen yatay üretim yöneliminde düz stratejisinde üretilen numunelerin kısaltması olarak kullanılmıştır. Lazer tarama hızını tarif etmek için ise 300, 600, 800, 900, 1000 ve 1200 sayıları kullanılmıştır. Tarama stratejisi ve lazer tarama hızını birlikte ifade etmek için bu kısaltmalar

birlikte kullanılmıştır. Örneğin: C-1200 ifadesi, chessboard tarama stratejisi kullanılarak 1200 mm/s lazer tarama hızı ile üretilen numuneyi tarif etmektedir. Bunlarla birlikte, tez boyunca “geleneksel” olarak adlandırılan numune dövme yöntemi ile üretilmiş AISI 316L paslanmaz çelik malzemeyi tarif ederken, “SLM” veya “L-PBF” adlandırması; Seçici Lazer Ergitme (SLM) veya diğer adı Lazer Toz Yatak Füzyonu (L-PBF) yöntemi ile üretilmiş malzemeyi/numuneyi tarif etmektedir.



Şekil 28. L-PBF yöntemi kullanılarak üretilen biyomimetik hiyerarşik modeller ve üretim parametreleri

Tablo 5. Tez Kapsamında Kullanılacak Mekanik Testler İçin Modellere Ait Parametreler

PARAMETRELER			
Mekanik Test Numunesi	Tarama Hızı (mm/s)	Üretim Şekli	Tarama Stratejisi
Çekme Numunesi	300 mm/s, 600 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Uzunluk boyunca (52mm)	Düz
Eğme Numunesi	300 mm/s, 600 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Uzunluk boyunca (48 mm)	Düz
Eğme Numunesi	300 mm/s, 600 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Uzunluk boyunca (48 mm)	Chessboard
Eğme Numunesi	300 mm/s, 600 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Kalınlık boyunca (12 mm)	Düz
Eğme Numunesi_Tabakalı (Biyomimetik Model)	800 mm/s (1000 µm) 1200 mm/s (500 µm)	Kalınlık boyunca (12 mm)	Düz
Eğme Numunesi_Tabakalı (Biyomimetik Model)	800 mm/s (1000 µm) 1200 mm/s (500 µm)	Kalınlık boyunca (12 mm)	Chessboard

**Tablo 6.** Tez Kapsamında Kullanılacak Çatlak İlerlemesi Modellere Ait Parametreler

PARAMETRELER			
Mekanik Test Numunesi	Tarama Hızı (mm/s)	Üretim Şekli	Tarama Stratejisi
CT Numunesi	800 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Uzunluk boyunca (25 mm)	Düz
CT Numunesi	800 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Uzunluk boyunca (25 mm)	Chessboard
CT Numunesi	800 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Kalınlık boyunca (3mm)	Düz
CT Numunesi	800 mm/s, 1000 mm/s, 1200 mm/s	Kalınlık boyunca (3mm)	Chessboard
CT Numunesi_Tabakalı (Biyomimetik Model)	800 mm/s (9000 µm) 1200 mm/s (2500 µm)	Uzunluk boyunca (25 mm)	Düz
CT Numunesi_Tabakalı (Biyomimetik Model)	800 mm/s (9000 µm) 1200 mm/s (2500 µm)	Uzunluk boyunca (25 mm)	Chessboard
CT Numunesi_Tabakalı (Biyomimetik Model)	800 mm/s (1000 µm) 1200 mm/s (500 µm)	Kalınlık boyunca (3mm)	Düz
CT Numunesi_Tabakalı (Biyomimetik Model)	800 mm/s (1000 µm) 1200 mm/s (500 µm)	Kalınlık boyunca (3mm)	Chessboard

### Çekme ve üç noktadan eğme testlerinin gerçekleştirilmesi

Üretimi tamamlanan tüm numunelerin çekme ve üç noktadan eğme testleri, ETÜ YÜTAM bünyesinde bulunan INSTRON 5982 Ünlversal Mekanik Test Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme ve üç noktadan eğme testleri 1 mm/dk yükleme hızı ile oda sıcaklığında ve kuru ortam havasında gerçekleştirilmiştir. Çekme ve eğme testlerinde her bir numune için en az beş adet test yapılmıştır. Testler esnasındaki örnek görüntüler Şekil 29'da gösterilmiştir.

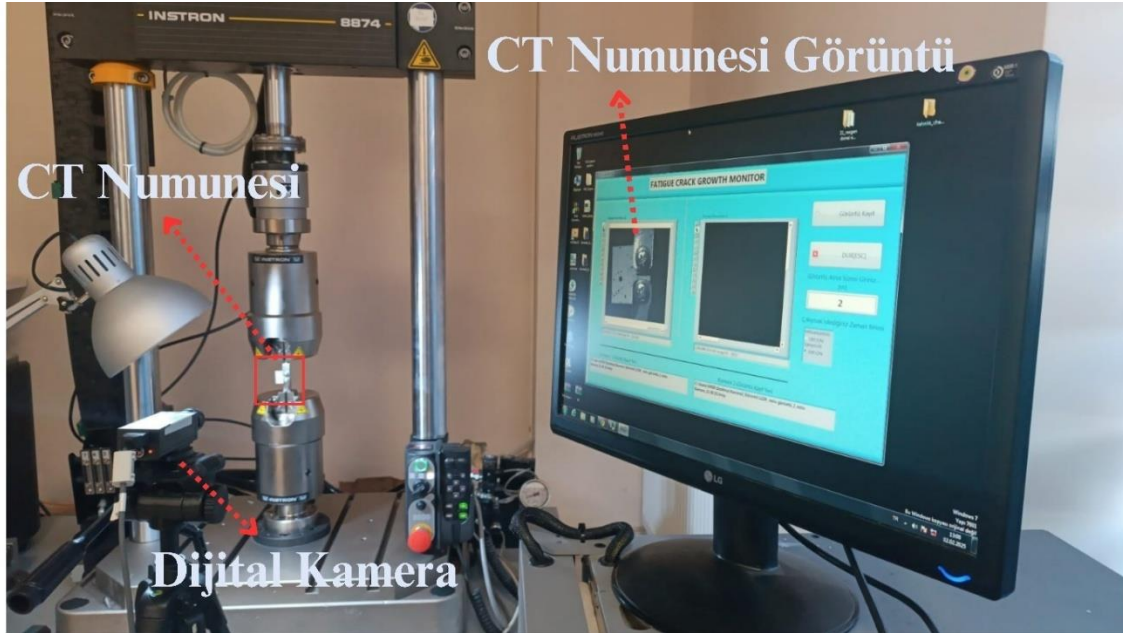


**Şekil 29.** Çekme (soldaki) ve üç noktadan eğme (sağdaki) testleri esnasındaki görüntüler

### **Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinin gerçekleştirilmesi**

Yorulma çatlak ilerleme testlerine başlamadan önce, ASTM E647 standartlarına uygun hazırlanan ve L-PBF (SLM) ile üretimi tamamlanan CT test numunelerine, bu standarda uygun olacak şekilde ön çatlak açılmıştır. Maksimum kuvvet olarak  $F_{max}=2500N$  ve minimum kuvvet olarak  $F_{min}=250 N$  değerleri ile sinüs dalga formu kullanılarak 20Hz frekansta çentik ucunda 1,5 mm uzunluğunda ön çatlak elde edilmiştir. Sabit genlikli yükleme (SGY) testleri için maksimum ve minimum kuvvetler sırası ile  $F_{max}=2500N$  ve  $F_{min}=250 N$  olacak şekilde seçilmiştir. Sinüs dalga formunda bir yükleme gerçekleştirilerek testler 20Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sabit genlikli yükleme davranışının yanı sıra, değişken genlikli yükleme durumunun davranışı da analiz edilmiştir. Numunelerin değişken genlikli yükler altındaki davranışları, tekil çeki aşırı yüklemesi (overload-OL) şartında gerçekleştirilmiştir. Çeki aşırı yüklemesi (OL) testleri için, ön çatlak açılan numuneler, sabit genlikli yükleme testlerinde olduğu gibi  $F_{max}=2500N$  ve  $F_{min}=250 N$  yükleri kullanılarak 6mm çatlak boyu elde edilinceye kadar yorulmaya maruz bırakılmıştır. Bu çatlak boyuna ulaşıldığı anda,  $F_{OL}= 4750N$  değerinde tekil çeki aşırı yükü-OL uygulanmıştır. OL yüklemesinden sonra, yine sabit genlikli yükler ( $F_{max}=2500N$  ve  $F_{min}=250 N$ ) ile numuneler kırılıncaya kadar yorulma çatlak ilerlemesi testlerine devam edilmiştir. OL testleri de sabit genlikli yükleme testlerine benzer şekilde sinüs dalga formu ile 20Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Yorulma çatlak ilerlemesi testleri, ETÜ YÜTAM bünyesindeki INSTRON 8874 servo hidrolik çeki-bası yorulma test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında ve kuru ortam havasında gerçekleştirilmiştir.

Yorulma çatlak ilerlemesi testleri sırasındaki çatlak boyu değişimlerinin incelenmesi için, dijital görüntü alma sistemi kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü monokrom dijital kameralar (SONY XCD-SX910 CCD), C Monut lensler (10, 25 ve 50 mm sabit odaklı), Veri toplama kartları (NI IEEE-1394 FireWire Driver) ve LabVIEW yazılımı ile oluşturulan görüntü toplama yazılımından oluşan bu dijital görüntü alma sistemi ile testler esnasında numunelerin hem ön hem de arka yüzeyleri *in situ* olarak kaydedilmiştir (Kovacı 2016). Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan deney düzeneği ve dijital görüntü alma sistemi Şekil 30'da gösterilmiştir. Sonrasında ise, kaydedilen bu görüntüler, Dijital Görüntü İşleme (Digital Image Correlation-DIC) tekniği ile analiz edilmiş ve numunelerin çatlak boyundaki değişimler ve çatlak ucunda oluşan şekil değiştirmeler (deformasyonlar) belirlenmiştir. DIC analizleri için GOM Correlate 2019 yazılımı kullanılmıştır.



**Şekil 30.** Yorulma çatlak ilerlemesi testlerinde kullanılan deney düzeneği ve dijital görüntü alma sistemi

### **Yapısal, morfolojik ve mekanik incelemeler**

Geleneksel ve eklemeli üretim yöntemleri kullanılarak üretilen numunelerin mikroyapı analizleri ve karakterizasyonu, mekanik testler öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan numunelere ait faz analizi ve artık gerilme ölçümleri için ETÜ (YÜTAM) bünyesinde bulunan GNR marka EXPLORER model X-Işını Kırınımı Difraktometresi (XRD) cihazı kullanılmıştır. XRD ölçümleri,  $\text{CuK}\alpha$  radyasyon kaynağı ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) kullanılarak, 0.0125°/s tarama hızı ile sırasıyla 45 kV ve 40 mA gerilim ve güçte gerçekleştirilmiştir. Artık/Kalıntı gerilme analizleri, aynı XRD sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler,  $\sin^2\omega$  yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, dalga boyu ve yansıma açıları esas

alınarak Bragg kanununa göre düzlemler arası uzaklıklar tespit edilmiş ve bu uzaklıklara karşılık  $\sin^2\omega$  grafikleri çizdirilmiştir. Elde edilen grafiklerin eğimlerinin gerilme değerleri ile doğru orantılı olduğu esasına dayanarak kalıntı gerilme değerleri belirlenmiştir. Burada bahsedilen işlemler XRD sisteminin yazılımı aracılığı ile otomatik olarak elde edilmiştir (Kovacı, 2016; Kovacı *et al.*, 2016b, 2016a).

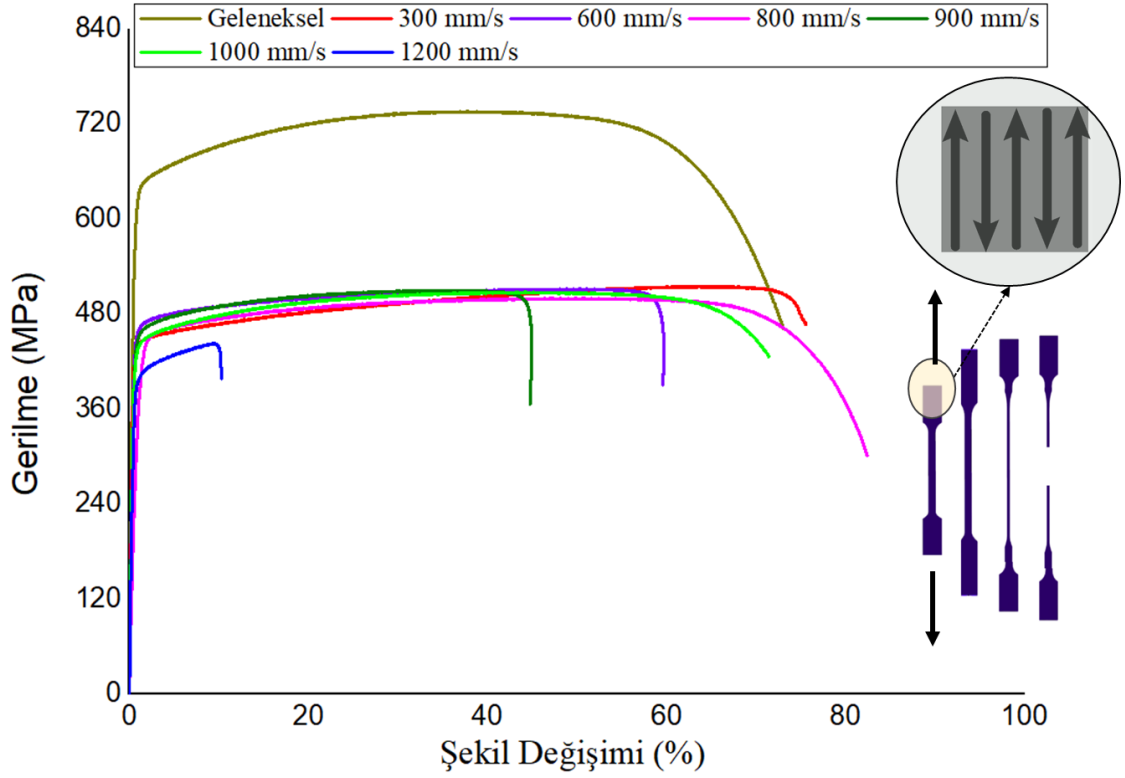
Numunelerin içyapısı, yüzey topografisi, kompozisyonu ve hasar durumunu gözlemek amacıyla, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan ZEISS marka Sigma 300 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Buna ek olarak, buradan bilgileri verilen SEM sisteminde bulunan Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrometresi (EDS, EDAX) detektörü kullanılarak, numunelerin elementel kompozisyonları belirlenmiştir.

Numunelerin yüzey topoğrafyasını ve pürüzlülük değerlerini tayin etmek için ETÜ YÜTAM bünyesindeki 10 Å hassasiyetle ölçüm yapan BRUKER marka Contour GT-KI model 3D (üç boyutlu) profilometre sistemi kullanılmıştır.

Numunelerin yüzeylerine ve kesitlerine ait mikrosertlik değerleri Vickers sertlik ölçme metodu ile ETÜ Mühendislik Fakültesi bünyesinde bulunan SHIMADZU HMV-G marka mikro sertlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Her bir numuneden, 100 gr yük altında 15 saniye bekleme süresi ile ölçüm alınmıştır. Sertlik ölçümleri, her bir numune için en az 10 defa tekrarlanmıştır.

## ARAŞTIRMA BULGULARI

SLM (L-PBF) yönteminde seçilen üretim parametreleri; üretilen parçanın sertliği, dayanımı, yüzey kalitesi ve yoğunluğu gibi fiziksel ve mekanik özellikleri kontrol etmek için temel değişkenler olarak bilinmektedir. Bu değişkenlerden lazer gücü ( $P$ ), tarama hızı ( $v$ ), tarama aralığı ( $h$ ) ve katman kalınlığı ( $t$ ) en etkili üretim parametreleridir. Bu parametreler üretim esnasındaki enerji yoğunluğu veya birim hacim başına toplam enerji girişini etkilemektedir. Denklem 1’de verildiği gibi bu değişkenler ile enerji yoğunluğu arasında ilişki bulunmaktadır. İstenilen mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip parçaların üretimi için bu parametrelerin belli bir optimizasyona ihtiyacı vardır. Bu nedenle bu kısımda farklı tarama hızlarında üretilen numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri tayin edilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik performansı nihai uygulanabilirlik açısından oldukça önemlidir. Bu amaçla, çekme testleri gerçekleştirilmiş ve numunelerden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 31’de gösterilmiştir. Çekme testi artan gerilmeye karşılık olarak çekme numunesinin elastik ve/veya plastik davranış olarak verdiği tepkiyi ölçmektedir. Başlangıçta numune çekme kuvvetine tabii tutulurken elastik olarak uzama davranışı sergiler. Uygulanan kuvvet sonucu artan gerilme ile numune, kalıcı deformasyona uğramaya başlar ve plastik şekil değişimi sergiler. Özellikle elastik şekil değişiminin aşıldığı plastik deformasyonun meydana geldiği nokta (akma dayanımı) gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden elde edilebilmektedir. Şekil 31’de verilen eğrilerin %0,2 şekil değişimine karşılık gelen akma değerleri Tablo 7’de detaylı bir şekilde verilmiştir. Şekil 31 ve Tablo 7’den, en yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olan numunenin geleneksel yöntemle üretilmiş dövme AISI 316L numune olduğu görülmektedir. Eklemeli üretim ile üretilen numuneler, tarama hızındaki değişime bakılmaksızın, geleneksel numuneden daha düşük akma ve çekme dayanımı ve yüzde (%) uzama sergilemişlerdir. Bunun sebebi, eklemeli üretim ile üretilen numunelerin geleneksel yöntemle üretilen numunelere kıyasla çok daha fazla iç yapı kusuru içermesidir (boşluk, gözenek, füzyon eksikliği, ergimemiş partiküller vs.) (Zhang *et al.*, 2017). Bunlarla birlikte, burada bir diğer dikkat çekici nokta artan veya azalan lazer tarama hızları ile akma ve/veya çekme gerilmesi arasında doğrudan doğrusal bir ilişki bulunmamasıdır. Bu durumun sebebi olarak, lazer tarama hızının değişiminden kaynaklı gözeneklilik miktarı ve gözeneklilik boyutunun değişimi gösterilebilir. Gözenek boyutundaki değişim, Marangini ve kılcallık etkisi sonucu ergime havuzunun boyutunun değişimi ile açıklanabilmektedir (Li *et al.*, 2010a).

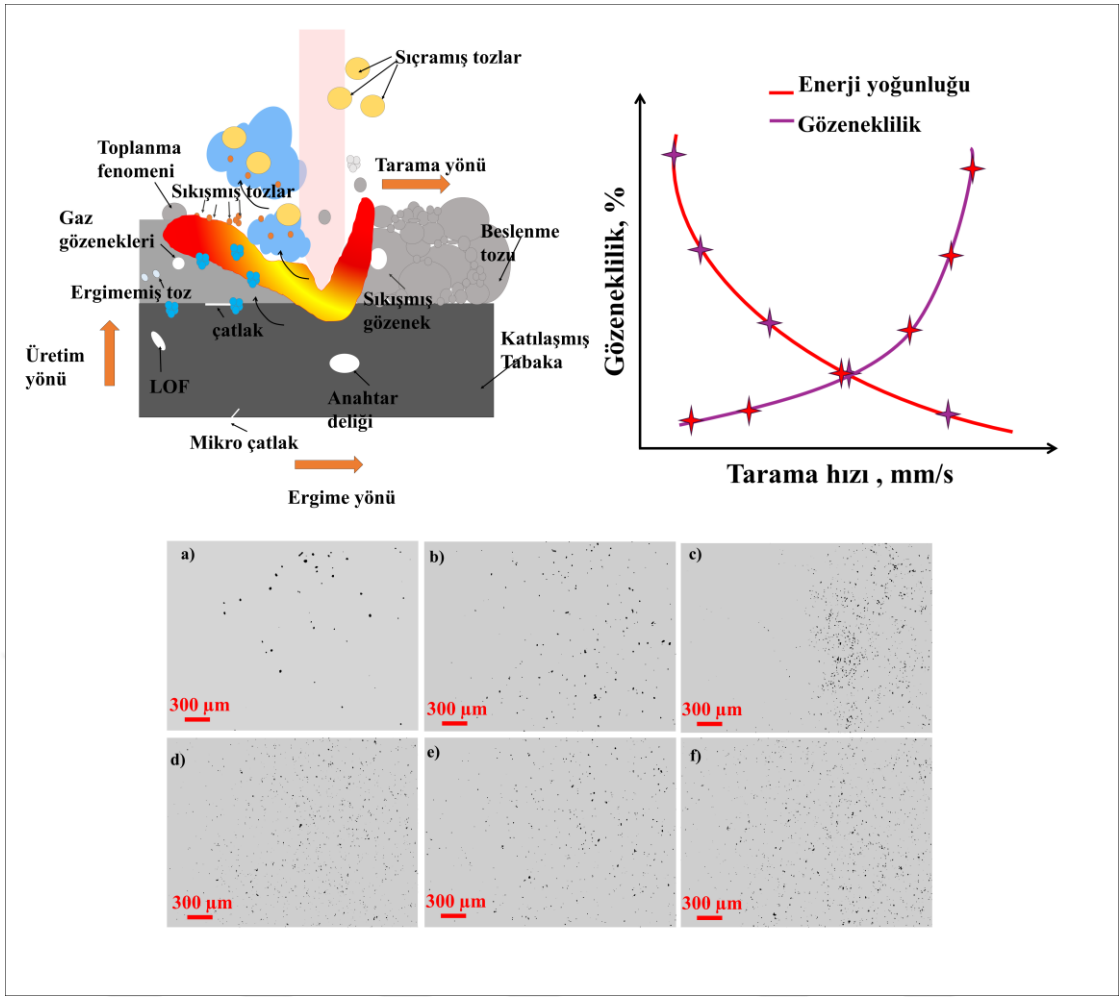


**Şekil 31.** Farklı parametrelerde üretilen SLM numunelerin ve geleneksel üretilmiş numunelerin çekme testi sonucu gerilme-şekil değişimi eğrisi

Şekil 32, tarama hızı ve enerji yoğunluğundaki değişimle malzemenin gözenekliliğinin değişimini ifade etmektedir. Tarama hızındaki artış ile gözeneklilik artmaktadır. Düşük tarama hızlarında ortamda çok yüksek enerji yoğunluğu oluşması sebebi ile nispeten daha düşük derecede gözeneklilik oluşurken, yüksek tarama hızıyla meydana gelen düşük enerji yoğunluğu, gözeneklilik oluşumunu önemli ölçüde artırmaktadır. Tarama hızındaki azalma ile lazer ışını ile birleşen tozlar, enerji miktarını artırmakta ve yüksek ergime seviyeleri oluşturmaktadır. Sonuçta, katılaşmış metalik katmanların birbiri ile örtüşmesi artarak gözenek boyutu azalmaktadır ((Gu & Shen, 2008). Yüksek tarama hızları ergime havuzunda kılcal kararsızlığa sebebiyet vermektedir. Yüksek tarama hızının etkisiyle düşük enerji meydana gelerek yüzey enerjisinde azalma ortaya çıkmaktadır. Böylece ergimiş kısmın küresel bir şekilde birkaç metalik aglomeraya (kümelenmiş yapı) ayrılması ile meydana gelen toplanma (balling) olayı gözlemlenir. Bu durum, hem ergimiş tabaka arasında belli bir gözenek oluşturmakta hem de üretilen yeni tabakanın zayıf bir şekilde düzensiz bağlanmasına neden olmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı, Şekil 31’de görüldüğü gibi tarama hızındaki artış genel olarak çekme dayanımının azalmasına sebebiyet vermiştir. Tabakalar arasındaki zayıf ve düzensiz bağlanma sebebiyle mukavemet oldukça etkilenmiştir. Şekil 32’de verilen tüm numunelere ait gözeneklilik seviyeleri incelendiği zaman, tarama hızındaki artış ile gözenek miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tarama hızındaki artışla birlikte gözenek kümeleri

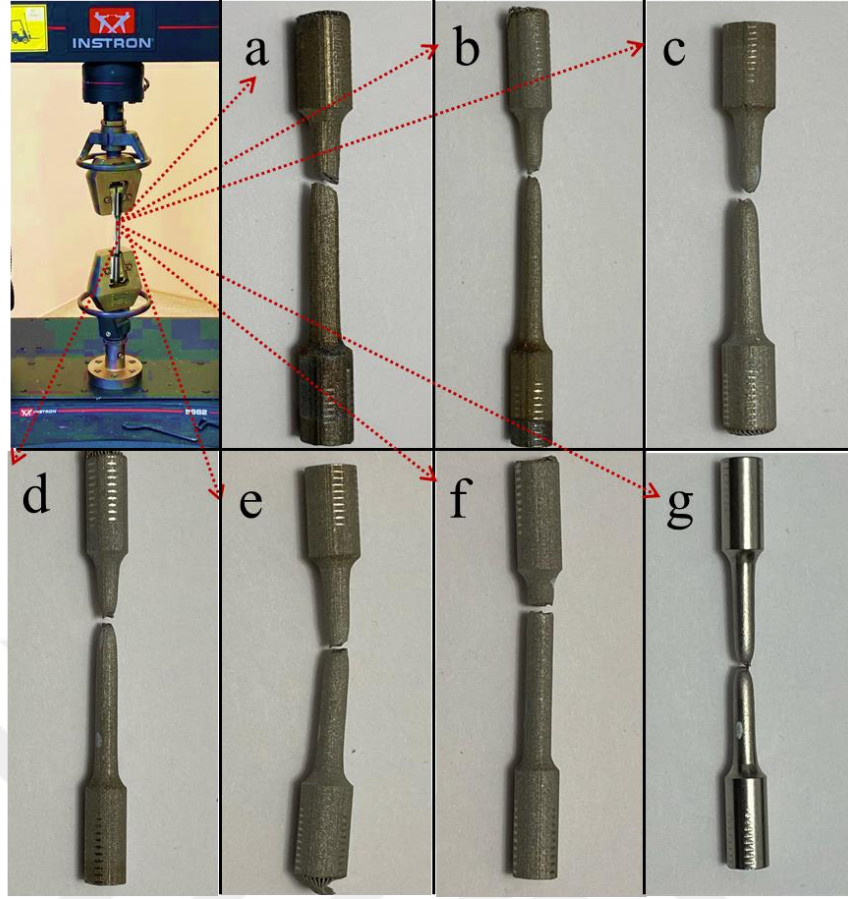
oluştugu, gözenek boyutlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Literatür bu durumu destekler niteliktedir (Das, 2001; D. Gu & Shen, 2008b; R. Li *et al.*, 2010c; Simchi & Pohl, 2003b). Ancak, daha öncede bahsedildiği üzere, eklemeli imalat sonucunda üretim parametreleri her ne kadar optimize edilmönce deelişilsa da malzemelerin yapısında farklı türde birçok iç yapı kusuru oluşmaktadır. Bu sebeple, eklemeli üretim ile üretilen malzemelerin dayanımları ve değişen üretim parametreleri (lazer tarama hızı) arasında doğrudan doğrusal bir ilişki kurulamamaktadır.

SLM üretim yönteminde anahtar deliği (keyhole), füzyon eksikliği (Lack of Fusion-LoF) ve gaz gözenekleri (gas pore) olmak üzere başlıca üç tip gözenek vardır (Gordon *et al.*, 2020). Eriyik havuzunda düşük enerji yoğunluğundan kaynaklı olarak boşlukların dolmaması durumunda füzyon eksikliği gözenekleri meydana gelmektedir. Üretim sırasında, toz yatağı veya buharlaşan malzeme içerisinde hapsolmuş gazlar gözenekliliğe neden olmaktadır. Gaz gözenekleri, füzyon eksikliği gözeneklerine göre daha küçük boyutlu olmakla birlikte Şekil 32’de görüldüğü gibi tarama hızındaki artış ile birlikte yoğunlaşmıştır. Bir diğer gözenek türü olan anahtar deliği gözenek yapısı ise, yüksek enerji yoğunluğunda gözlemlenen eriyik havuzunun çökmesi etkisiyle meydana gelmektedir (Pham *et al.*, 2020; Vecchiato *et al.*, 2020). Tarama hızındaki artışla birlikte yapı içerisinde gözeneklilik seviyesinin artışının yanı sıra homojen şekilde dağılımı da söz konusudur. Şekil 30-c’de verilen 800 mm/s lazer tarama hızının gözenek boyutunun diğer gruplardan farklı olarak kümelenmiş bir gözenek yapısı olduğu tespit edilmiştir.



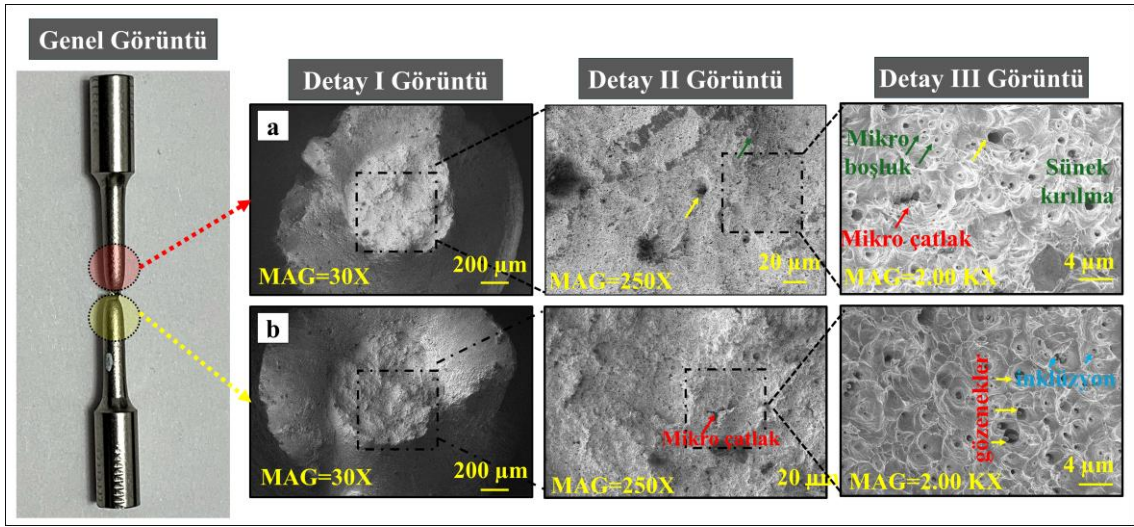
**Şekil 32.** Farklı lazer tarama hızları ile düz tarama stratejisi kullanılarak üretilen numunelerin gözeneklilik değişimine ait görüntüler: **a)** 300 mm/s, **b)** 600 mm/s, **c)** 800 mm/s, **d)** 900 mm/s, **e)** 1000 mm/s ve **f)** 1200 mm/s

Şekil 33'te çekme testi sonrası tüm numunelere ait kırılma görüntüleri verilmiştir. Burada, dövme yöntemi ile üretilmiş numunenin orta kısmından boyun vererek koni-çanak tipi kırılmaya uğradığı anlaşılmaktadır (Şekil 33-g). SLM ile üretilen numunelerde, koni-çanak tipi kırılma göstermesine karşın, kırılma numunelerin orta kısımlarında gerçekleşmemiştir. Bu durum, daha önce de bahsedildiği üzere, ekmele imalat (SLM) ile üretilen numunelerin geleneksel yöntemle üretilen numuneye kıyasla çok daha fazla iç yapı kusuru içermesi sebebi ile açıklanabilir. SLM ile üretilen numunelerde, yapı içerisinde üretimden kaynaklı oluşan boşluk, gözenek ve ergimemiş partikül gibi düzensizlikler, gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Gerilmelerin numunenin diğer kısımlarına göre çok daha yüksek olması ve mikro boşluk gibi yapılarda çatlak büyümesinin çok daha hızlı gelişmesi sebebi ile kırılma bu bölgelerde gerçekleşmektedir. Bunlarla birlikte, SLM ile 1200 mm/s lazer tarama hızı kullanılarak üretilen numune diğer numunelere kıyasla daha düz bir kırılma geometrisine sahiptir. Bunun sebebi ise bu numunenin gözeneklilik miktarının diğer numunelere kıyasla daha fazla olmasıdır (Şekil 32-f).



**Şekil 33.** Farklı parametrelerde üretilen numunelerin çekme testi sonucu kırılma görüntüleri a) 300 mm/s b) 600 mm/s c) 800 mm/s d)900 mm/s e) 1000 mm/s f) 1200 mm/s g) Dövme üretim

Geleneksel yöntemle üretilen numunenin çekme testi sonrası kırılma fraktografisi Şekil 34’te gösterilmiştir. Numune yüzeyinde mikro boşluklar, gözenekler ve çatlaklar gözlemlenmiştir. Malzemenin üretimi sırasında proses parametrelerinden kaynaklı olarak yapı içerisinde ikinci faz partikülleri, gözenekler ve boşluklar gibi kusurlar oluşmaktadır. Çekme testi sırasında çatlak bu süreksizliklerden başlar ve uygulanan yük altında mikro boşlukların çekirdeklenmesi ve büyümesi ile mikro çatlak oluşumu ve akabinde ise makro çatlak oluşumu gözlemlenir. Çekme testi sonrası kırık yüzey görüntüsünde pek çok bölgede rastgele dağılmış eş eksenli sığ çukurlara (dimple) rastlanmıştır ve kırılma yüzeyi mat ve liflidir. Buradan, malzemede hasarın sünek kırılma mekanizması ile gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Malzeme içerisinde meydana gelen sığ mikro çukurlar plastik deformasyon mekanizması üzerinde etki sağlamaktadır. Çukurlardaki deformasyonlar malzemenin plastisitesini artırarak sünekliğe katkı sağlamaktadır (Li *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2017). Bilindiği üzere, sünek kırılma mekanizmasında çatlak oluşumu ve ilerlemesinden esas sorumlu olan kusur boşluklardır. Çatlakların oluşumu ve birleşimi sonucu önemli bir ölçüde kalıcı şekil değişimi meydana gelmektedir. Sünek kırılma yüzeyi mat ve liflidir (Xu *et al.*, 2019)

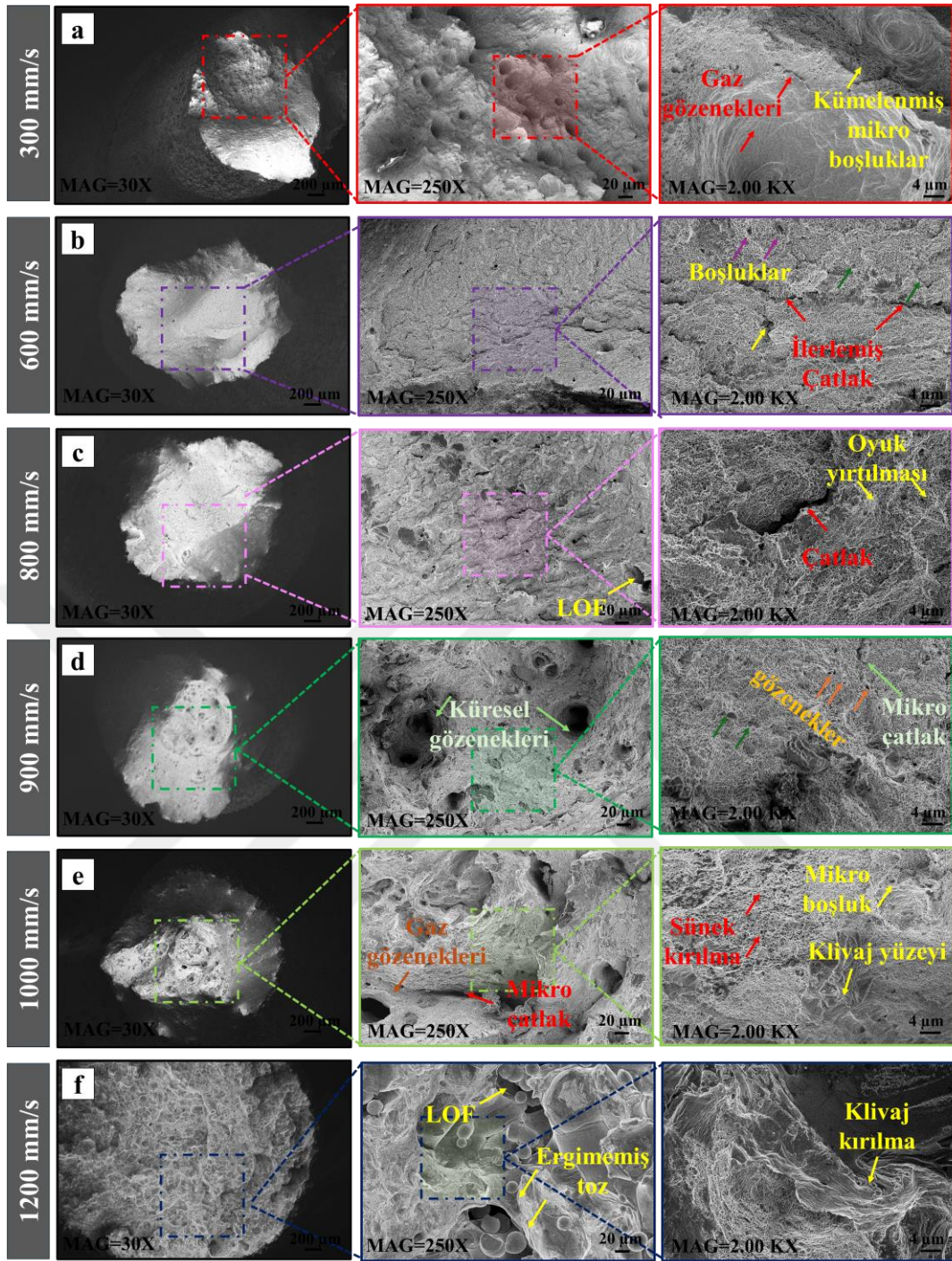


**Şekil 34.** Dövme-geleneksel üretim yöntemi ile üretilmiş AISI 316L numunesinin çekme testi sonrası yüzey fraktografisi

Şekil 35'te çekme testi sonrası SLM ile üretilen numunelere ait kırılma yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 35-a'da diğer üretim parametrelerine kıyasla daha geniş çaplı gözeneklerin gözlemlenmiştir. Bu durumun yüksek enerji yoğunluğunda anahtar deliği gözenekliliğinin oluşumu sebebi ile oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 35-a'da verilen 300 mm/s tarama hızı ile üretilen numunelerde yüksek lazer enerji yoğunluğu sebebiyle tabakalar arası çökmeler gözlemlenmiştir. Bunlarla birlikte, yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle toz istenilen şekilde serilememiş ve tozda kısmi yanmalar gözlemlenmiştir. Bu durum yüzey kalitesini oldukça etkilemiştir. Bu numunenin kırılma yüzey görüntüsü mat ve liflidir ve bunlarla birlikte, yüzeyde birçok mikro boşluk (dimple) oluştuğu görülmektedir (Şekil 35-a). Buradan, bu numunenin (300 mm/s) sünek kırılma davranışı sergilediği anlaşılmaktadır. 600 mm/s, 800 mm/s ve 900 mm/s lazer tarama hızları ile üretilen numunelere ait kırılma yüzey görüntüleri sırasıyla Şekil 35-b, Şekil 35-c ve Şekil 35-d'de verilmiştir. Bu görüntülerden, bu numunelerinde genel olarak sünek kırılma davranışı sergiledikleri anlaşılmaktadır. Yapı içerisinde oldukça fazla sayıda çukur gözlemlenmiştir. Bu durum sünek kırılmanın varlığını göstermektedir. Sünek kırılma, bu nano/mikro boşlukların karşılıklı olarak bir araya gelmesi ile ilişkili olarak meydana gelmektedir. Malzemelerde, mikro boşlukların birleşerek uzun çatlakları oluşturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 35-b ve Şekil 35-c). Şekil 35-c'de sünek kırılma sonucu oluşan oyuk ve oyuk yırtılmaları görülmektedir. Bu oyuklar mikro boşluk ilerlemesi şeklinde meydana gelir. Malzemede kayma deformasyonu sonucu boşluklar oluşmuş ve bu boşluklar birleşene kadar genişlemiştir. Bu boşluklara oyuk denmektedir. Buradan, bahsi geçen bu numunelerde de sünek kırılma mekanizmasının baskın olduğu anlaşılmaktadır.

SLM üretim yönteminde füzyon eksikliği (Lack of Fusion-LoF) ve/veya düşük lazer penetrasyon derinliği nedeniyle ergimemiş bir bölgeyi ifade eden gözenekler meydana

gelmiştir. Bu durum, 100 mm/s ve 1200 mm/s lazer tarama hızları ile üretilen numuneler için özellikle tarama hızındaki artışla birlikte yoğunlaşmıştır (Şekil 35-e ve Şekil 35-f). Tarama hızındaki artış enerji yoğunluğunda (Denklem 1) düşüğe sebebiyet vererek katılaşmış metalik katmanların birbiri ile örtüşmesi azalmaktadır/engellemektedir. Böylece yapı içerisinde gözenek kusurları gözlemlenmektedir. Bu duruma ek olarak, tarama hızındaki artış ile yapı içerisinde yetersiz enerji sebebiyle ergimemiş toz partikülleri gözlemlenmiştir. SLM numunelerindeki bu kusurlar çatlakların başlangıcının ana kaynağı olarak bilinmektedir. Şekil 35-e ve Şekil 35-f'den görüleceği üzere, gevrek kırılmanın varlığını gösteren klivaj yüzeyler gözlemlenmiştir. Ayrıca enerji yoğunluğunun düşük olması sebebiyle gaz gözenekleri yoğun bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca sünekliği destekleyecek şekilde kümelenmiş mikro boşlukların mevcudiyeti gözlemlense de ayrılma şeklinde kırılmanın baskın olduğu bu durum, bu numunelerde hasarın gevrek kırılma şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir.



**Şekil 35.** Farklı lazer tarama hızları ile düz tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş numunelere ait çekme testi sonrası SEM fraktografisi: **a)** 300 mm/s, **b)** 600 mm/s, **c)** 800 mm/s, **d)** 900 mm/s, **e)** 1000 mm/s ve **f)** 1200 mm/s

Tüm numunelerden elde edilen mikrosertlik ölçüm değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Tablo 7’de görüldüğü gibi geleneksel üretim yöntemine göre SLM üretim yönteminin tüm parametrelerinde mikrosertlik değerinde artış gözlemlenmiştir. SLM üretim prosesi gereği, yüksek termal gradyan ve yüksek katılma hızı meydana gelmektedir. Bu durumun sonucu olarak da hüresel yapıya sahip sütunlu taneler oluşmaktadır ((Yasa & Kruth, 2011). Hüresel alt tanelerin ise Molibden (Mo) yönünden zengin olması kristal kafes bozulmalarına sebebiyet

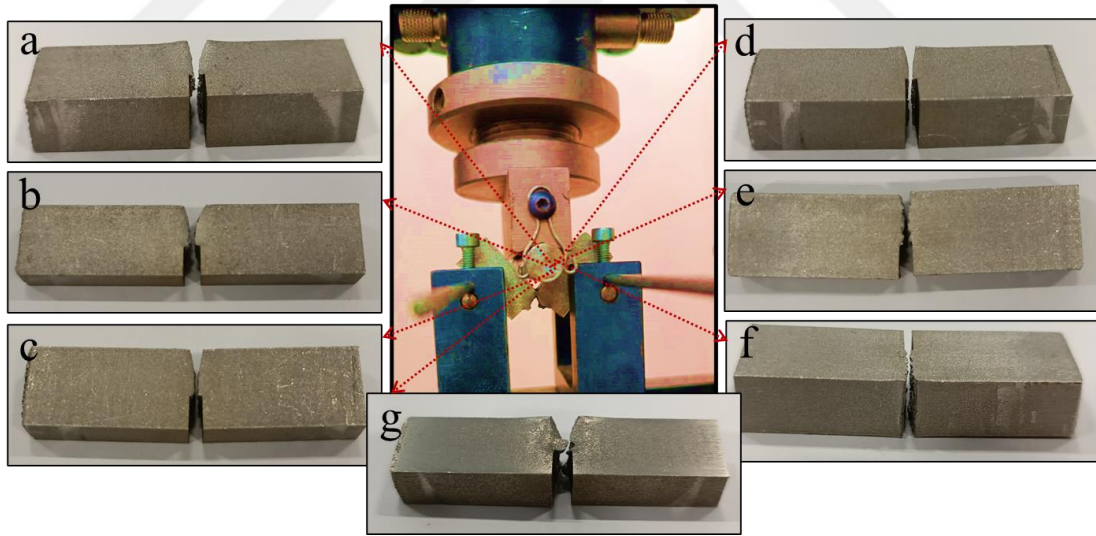
vermektedir. Böylece, yüksek dislokasyon konsantrasyonu meydana gelmekte ve geleneksel üretim yöntemine göre SLM yönteminde sertlik artışı gözlemlenmektedir ((Saeidi *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016). Ayrıca hızlı ısınma/soğuma prosesi içeren SLM esnasında, düşük ısıtma/soğutma oranları ile üretilen geleneksel yöntemle kıyasla yüksek miktarda dislokasyon ağları oluşmaktadır. Bu durum sertlik artışına sebebiyet vermektedir (Tucho *et al.*, 2018).

SLM ile üretilen malzemenin mikro sertlik değeri lazer gücü ve tarama hızına bağlıdır. Tarama hızındaki artış ile malzemenin sertlik değerinde artış meydana gelmiştir. Literatür bu durumu destekler niteliktedir(Praneeth *et al.*, 2023; Z. Sun *et al.*, 2016a; D. Wang *et al.*, 2016b). Ancak bir kısım araştırmacılar ise tarama hızındaki artış ile sertlik değerinin azaldığı yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Cherry *et al.*, 2015b). SLM ile üretilen malzemelerin mikro sertlik değerleri; gözeneklilik, mikro yapı ve oksijen içeriğine göre değişkenlik göstermektedir (Cherry *et al.*, 2015b). Ancak bu durum ile ilgili mikro sertliği en çok etkileyen parametrenin hangisi olduğuna dair kesin bir bilgi bulunmamaktadır. SLM ile üretim gerçekleştirilirken üretim odasında oksijen içeriğinin  $<0,05$  olması ve birkaç tabaka ürettikten sonra ise  $\sim 0,16$ 'da sabitlenmesi gerekmektedir. Yapı içerisinde oksijenin bulunması farklı miktarda inklüzyonlara sebebiyet vererek sertliği etkileyebilmektedir (Z. Sun *et al.*, 2016a). SLM ile üretilen numunelerde yüksek sertlik artışının sebebi olarak iki durumdan bahsedilebilir ((Saeidi *et al.*, 2015). İlk durum malzemeye mukavemet artışı sağlayan büyük gerilmeler biriktiren hücrel alt taneciklerin varlığıdır. İkinci durum ise bahsedilen oksijen inklüzyonlarının varlığıdır. Bu inklüzyonlar dislokasyon hareketini engelleyerek ek mukavemet sağlamaktadır (Tucho *et al.*, 2018).

SLM ile üretilen numunelerde katmanlarda hızlı ergime ve katılma döngüsünü içeren yüksek termal gradyenler meydana gelmektedir. Bu termal gradyenler yapı içerisinde boşluklar, kırılma, çatlama ve delaminasyon gibi hataların meydana gelmesine sebebiyet veren artık/kalıntı gerilmeleri oluşturmaktadır ((Fang *et al.*, 2020; Lott *et al.*, 2011; Z. Sun *et al.*, 2016a). Metal tozu ergitilirken yavaş tarama hızlarında lazer taraması gerçekleştirilirken, birim zamanda ısı iletim ve radyasyon aralığı artmaktadır. Böylece sıvı akışı güçlü olmakta ve ergime havuzuna akış daha kolay meydana gelmektedir. Ayrıca ergime havuzunun boyutu artmaktadır ve katmanlar arası daha güçlü bir füzyon meydana gelmektedir. Aksi durumda, metal tozu tamamen eriyememekte ve akışkanlık düşük olmaktadır. Bu durum ise erimiş havuz kusurlarına sebebiyet vermektedir. Malzemede plastik deformasyonun başlangıç noktası, işte bu kusurlu noktalarda olmaktadır. Malzemede bulunan makro kusurlar ve malzemenin mikro yapısı mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (J. Liu *et al.*, 2022; A. Salmi & Atzeni, 2017). Tablo 7 ve Şekil 38'de detaylı bir şekilde verilen artık gerilme değerlerine göre,

tarama hızındaki artış ile metal tozunun ergimesi için yeterli bir zamanın verilmediği ve katmanlar arası zayıf bağlanmaya sebebiyet veren artık gerilmelerin arttığı gözlemlenmiştir. SLM tarama hızı azaldıkça büyük eriyik havuzunun oluşumu ve akışkanlığın daha etkili olması sebebiyle daha yüksek mekanik özelliklere sebebiyet veren katmanlar arası güçlü bağlar meydana gelmektedir (Larimian *et al.*, 2020).

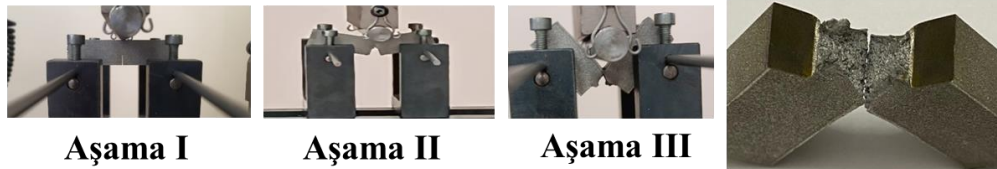
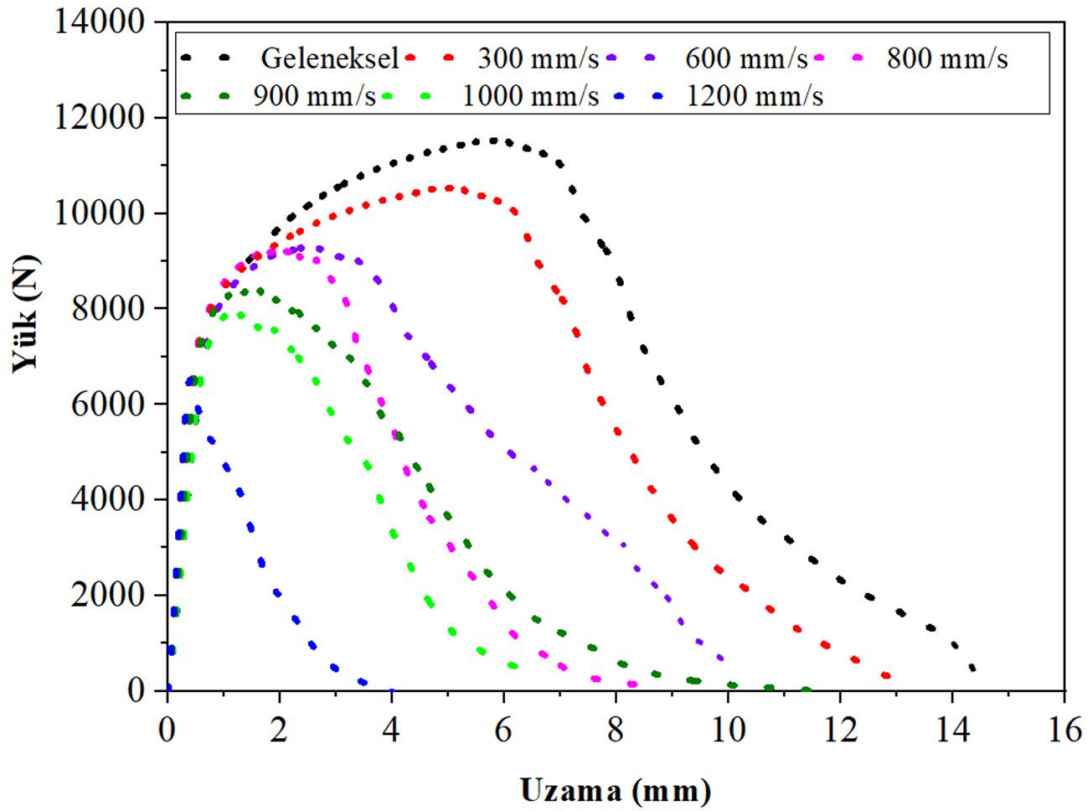
SLM ve geleneksel yöntemle üretilen numuneler ile gerçekleştirilen üç noktadan eğme testleri sonrası kırılma görüntüleri Şekil 36’da testler sonucunda elde edilen yük-uzama eğrileri Şekil 37’de verilmiştir. Yük-uzama eğrilerinde, uygulanan yük ile uzama miktarı kritik değer olan tepe noktasına kadar doğrusal olarak artmıştır. Kritik tepe noktası, çatlakların makro seviyede ilerlemeye başladığı nokta olmakla birlikte, bu noktadan sonra çatlak hızlı bir şekilde yayılmış ve kuvvet değerinde düşüş meydana gelmiştir. Tüm numunelerin deformasyon yolları birbirinden farklı olmakla birlikte tüm numunelerde deformasyon süreci üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada (Aşama I), elastik deformasyon söz konusudur ve bu aşamada mikro çatlak oluşumları gözlemlenir. Aşama II’de, makro çatlaklar oluşmaya başlar ve çatlaklar çoğalır ve genişler. Bu aşamada, akma noktasının aşılar ve artık elastoplastik deformasyon gözlemlenir. Aşama III’te ise malzemede mutlak kırılma gerçekleşir (Tian *et al.*, 2019).



**Şekil 36.** Farklı parametrelerde üretilen numunelerin çekme testi sonucu kırılma görüntüleri a) 300 mm/s b) 600 mm/s c) 800 mm/s d) 900 mm/s e) 1000 mm/s f) 1200 mm/s g) Geleneksel

Şekil 37’deki verilere göre geleneksel yöntem ile üretilen numunelerin maksimum yük değerinin, SLM ile üretilen numunelerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, çekme deneyi sonuçlarında da bahsedildiği üzere, SLM ile üretilen numunelerin geleneksel dövme yöntemi ile üretilen numunelere kıyasla daha fazla yapısal kusur içermesidir. Üç noktadan eğme testi sonrası geleneksel üretilen numunelerde Şekil 37’de görüldüğü gibi 11559,92 N maksimum eğme yükü değeri elde edilmiştir. Test sonuçlarında, en düşük

maksimum yük değeri 1200 mm/s tarama hızında 6551,35 N olarak elde edilirken en yüksek maksimum yük değeri 300 mm/s tarama hızında 10559,92 N olarak elde edilmiştir. Ayrıca, 600, 800, 900 ve 1000 mm/s tarama hızına sahip numunelerde sırasıyla 9295 N, 9200 N, 8407 N ve 7913 N maksimum yük değerleri elde edilmiştir. Tarama hızındaki artışın bir sonucu olarak, ergime bölgesinde daha düşük enerji yoğunluğu aktarılmaktadır. Bu durum ise düşük konsolidasyon kusurlarına sebebiyet vermektedir. Bu bölgeler malzemenin dayanımını oldukça azaltan kusurlardır (Ahmadi *et al.*, 2016; Miranda *et al.*, 2016). Tarama hızının azalması sonucunda yüksek parçacık füzyonu ile enerji yoğunluğunda artış meydana gelmektedir. Böylece hem büyük ergime havuzu hem de düşük gözeneklilik meydana gelerek yapı içerisinde yüksek yoğunluk elde edilmektedir. Bu durumun sonucu olarak yüksek mukavemet elde edilmektedir (Ahmadi *et al.*, 2016).

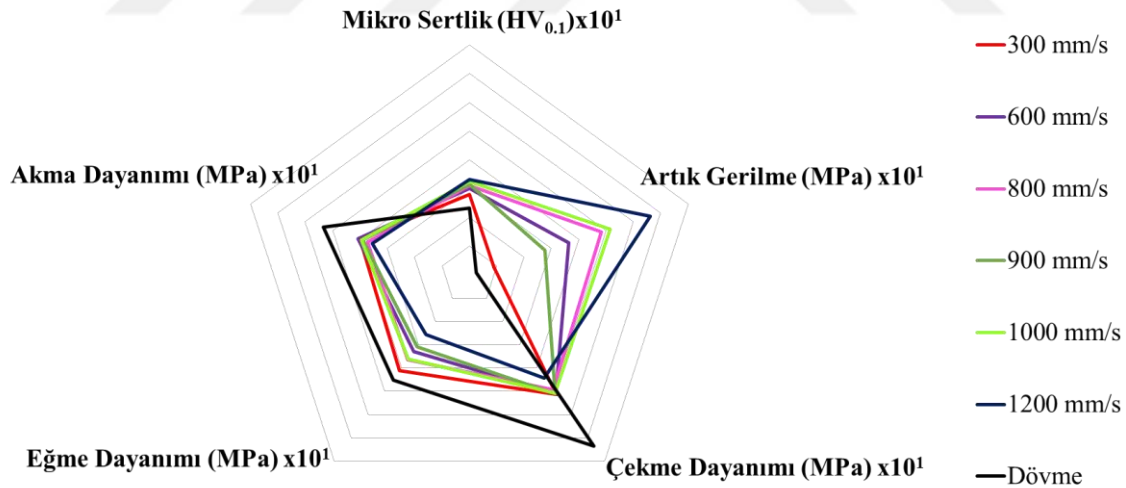


**Şekil 37.** Farklı lazer tarama hızları ile düz tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş SLM numunelerin ve geleneksel numunenin üç noktadan eğme testleri sonrası yük-uzama eğrileri

Üç noktadan eğme testinde uygulanan belli bir yük altında dikdörtgen kesitli numuneye ait gerilme değeri aşağıda verilen denklem aracılığı ile hesaplanmaktadır (Denklem 10).

$$\sigma = \frac{3.F.L}{2.b.d^2} \quad (10)$$

Burada;  $\sigma$  eğilme gerilmesini, F uygulanan yük, L destek açıklığı oranı, b genişlik ve d kalınlığı ifade etmektedir (Jr & Rethwisch, 2020). Bu denklem kullanılarak elde edilen gerilme değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Şekil 35’teki yük değerleri kullanılarak hesaplanan en yüksek maksimum eğilme dayanımı 451,56 MPa değeriyle geleneksel yöntemle üretilen numuneye aittir. SLM üretim yöntemi ile üretilen numuneler arasında en yüksek maksimum eğilme dayanımı (412,49 MPa) değeriyle 300 mm/s ile üretilen numuneden elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı (255,91 MPa) ise 1200 mm/s ile üretilen numuneden elde edilmiştir. Geleneksel üretim yönteminde 14,5 mm şekil değişim-uzama miktarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 37’ye göre tarama hızındaki artış ile şekil değişim-uzama miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. 300 mm/s tarama hızında 13,3 mm uzama gözlemlenirken 1200 mm/s tarama hızında 4 mm’lik düşük bir uzama davranışı gözlemlenmiştir. Ayrıca 1000 mm/s tarama hızında 6,8 mm, 900 mm/s tarama hızında 11,4 mm 800 mm/s tarama hızında 8,3 mm ve 600 mm/s tarama hızında 10,3 mm uzama elde edilmiştir. Elde edilen eğilme dayanımı özellikleri, çekme deneyleri sonucunda elde edilen dayanım özellikleri ile paralellik göstermektedir.

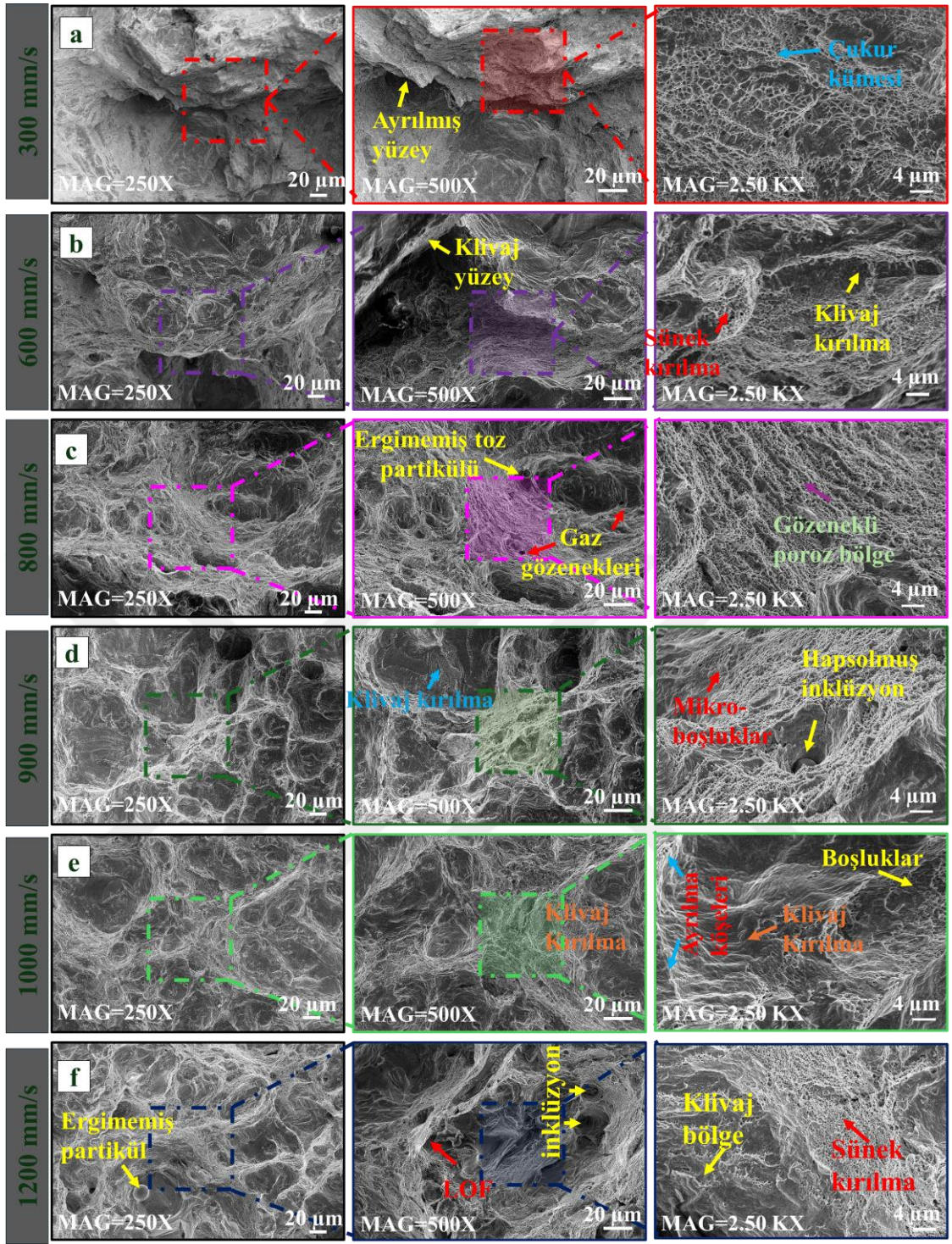


**Şekil 38.** Tüm numunelere ait mekanik özelliklere ait radar grafiği

Şekil 39’da SLM ile üretilen tüm numunelerin üç noktadan eğme testi sonrası elde edilen kırılma fraktografisi verilmiştir. SEM görüntüleri çekme testi sonrası elde edilen görüntüler ile benzer niteliktedir. SLM ile üretilmiş numunelerde iç yapıda ergimemiş toz partikülleri ve eksik ergime enerjisi nedeniyle füzyon eksiklikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, hapsolan gaz partiküllerinin yapıyı terk etmesi sonucu gaz gözeneklerinin varlığından söz etmek mümkündür. Ergimemiş bu toz partikülleri eksik konsolidasyon nedeniyle tabakalar

arası zayıf metalurjik bağlanmaya sebebiyet vererek çatlakların ilerlemesini hızlandırmaktadır. Ayrıca füzyon eksikliği ve gaz gözenekleri gibi SLM üretim yönteminden kaynaklı kusurlar çatlak nükleasyonun başlangıç bölgesi olarak işlev görmektedir. Gözeneklerin etrafında meydana gelen lokal üç eksenli gerilme hali ve gerilme konsantrasyonu nedeniyle çatlak başlayıp ve hızlı ilerlemektedir (Kale *et al.*, 2021).

SEM görüntülerinde ergimemiş toz partiküllerinin varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum, eriyik havuzunun zayıf birleşimi ve toz partiküllerinin örtüşmeyen alanlarda ergimemiş halde kalmasına sebebiyet vermiş olabilir. Şekil 39-a'da sünek kırılmayı işaret eden yüksek oranda süngerimsi bir yapı olan çukur kümeleri gözlemlenmiştir. Tarama hızındaki artış, yerel olarak yayılan bu süngerimsi dokunun azalmasına ve yerini gevrek kırılmanın önemli sembollerinden olan klivaj ayrılmasına bırakmaktadır. Şekil 39-d'de boşluklara hapsolmuş inklüzyonlar, mikro boşluklar ve klivaj ayrılma yüzeyleri gözlemlenmiştir. 900 mm/s tarama hızına sahip numunede sünek kırılmanın da eşlik ettiği klivaj ayrılma yüzeylerinin baskın olduğu gevrek kırılma hakimdir. Şekil 39-e'de yoğun klivaj kırılma köşelerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Kırılma yüzeyinde yok denilecek miktarda rastgele dağıtılmış eş eksenli sığ çukurluklara sahip geniş klivaj kırılma bölgelerinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 39-eve Şekil 39-f'de yüksek deformasyon meydana gelerek derin konkoidal yarıklar oluşmuştur. 1200 mm/s tarama hızında (Şekil 39-f) yüzeyde pek çok ergimemiş toz partikülleri gözlemlenmiştir. Bu durum gevrek kırılma davranışını desteklemektedir. 1200 mm/s tarama hızında üretilen numunenin yüzey görüntüsü, çekme testlerinin sonuçlarını da destekler şekilde, bu numunenin diğer numunelerden daha kırılğan bir davranış sergilediğini işaret etmektedir.



**Şekil 39.** SLM kullanılarak düz tarama stratejisi ile üretilmiş numunelere ait üç noktadan eğme testi sonrası SEM fraktografisi: **a)** 300 mm/s, **b)** 600 mm/s, **c)** 800 mm/s, **d)** 900 mm/s, **e)** 1000 mm/s ve **f)** 1200 mm/s

Bir sonraki bölümde daha detaylı olarak ele alınacak olan 3D profilometre ile ölçülen pürüzlülük değerleri tarama hızındaki değişimden etkilenmiştir. Elde edilen 3D profilometre sonuçlarına göre 1200 mm/s tarama hızında üretilen numunelerde ortalama pürüzlülük değeri (Ra) 5.735  $\mu\text{m}$  olarak ölçülürken, 300 mm/s tarama hızında bu değer 3.020  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Aynı şekilde 600, 800, 900, 1000 mm/s tarama hızları için yüzey pürüzlülük

değeri sırasıyla 3.410  $\mu\text{m}$ , 4.052  $\mu\text{m}$ , 4.098  $\mu\text{m}$  ve 4.103  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Bu durumda tarama hızındaki artış ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığı sonucuna varılmaktadır. Bu durum, yüksek tarama hızında eriyik havuzunun kararsızlığına sebebiyet vermesi ve ıslanma yeteneğinin kötüleşmesine bağlanmaktadır (Ahmadi *et al.*, 2016). SLM üretim yönteminde en önemli parametreler; lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığıdır. Bu parametreler enerji yoğunluğunun değişimini etkilemektedir ((Meier *et al.*, 2008). Tarama hızının azalması enerji yoğunluğunun artışına sebebiyet vererek daha büyük ve kararlı ergime havuzunun yanı sıra üstün bağlanma yeteneğine sahip ergime havuzları oluşturur. Tarama hızının artışı ile proses sırasında katmanlar halinde üretim gerçekleştirilirken alt tabaka yüzey gerilimi nedeniyle ergimiş malzemenin ıslatma yeteneğinde azalmaya sebebiyet verir. Bu durumun sonucu olarak, toplanma olayı (balling phenomenon) gözlemlenir. Ayrıca yüksek tarama hızı eriyik havuzunun kararsızlığına sebep olduğundan eriyik haldeki malzemenin havuzun dışına sıçraması olayı gözlemlenmektedir (Gu and Shen, 2009). Tüm bu durumlardan dolayı artan tarama hızı ile gözlemlenen toplanma ve sıçrama olayları pürüzlülük artışına neden olmaktadır ((Ahmadi *et al.*, 2016). Pürüzlülük değerinin artışına sebebiyet veren bu olgular, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiye sahiptir (Li *et al.*, 2012). Şekil 31’de görüldüğü gibi tarama hızındaki artış çekme dayanımını düşürmüştür. Bu durum, gözenekliliğin artışı ile sonucunda pürüzlülük değerinin artışı ile de ilişkilendirilebilir.

Tez çalışmanın buraya kadar olan bölümünde SLM yöntemi ile farklı tarama hızlarında üretilen numunelerin statik yükleme şartları altındaki davranışı (çekme ve üç noktadan eğme) incelenmiştir. Bu incelemeler için, 300-1200 mm/s’ye kadar değişen tarama hızları kullanılmış ve elde edilen sonuçlar neticesinde:

- Lazer tarama hızının artışı ile malzeme yapısındaki gözeneklerin arttığı ve bu durumun ise malzemenin çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkiye sebep olduğu,
- Lazer tarama hızındaki artış ile büyük gerilmeler biriktiren hücresel alt taneciklerin varlığının artışı ve dislokasyon hareketini engelleyen oksijen inklüzyonlarının artışının sonucu olarak sertlik değerinin arttığı,
- Lazer tarama hızındaki artış ile metal tozunun ergimesi için yeterli zamanın verilmediği ve katmanlar arası zayıf bağlanmaya sebebiyet veren artık/kalıntı gerilmelerin arttığı,
- Lazer tarama hızındaki artış ile füzyon eksikliği ve gaz gözenekleri gibi SLM üretim yönteminden kaynaklı kusurların artışı nedeniyle bu gözeneklerin etrafında meydana gelen lokal üç eksenli gerilme hali ve gerilme konsantrasyonlarının eğilme dayanımını olumsuz etkilediği,

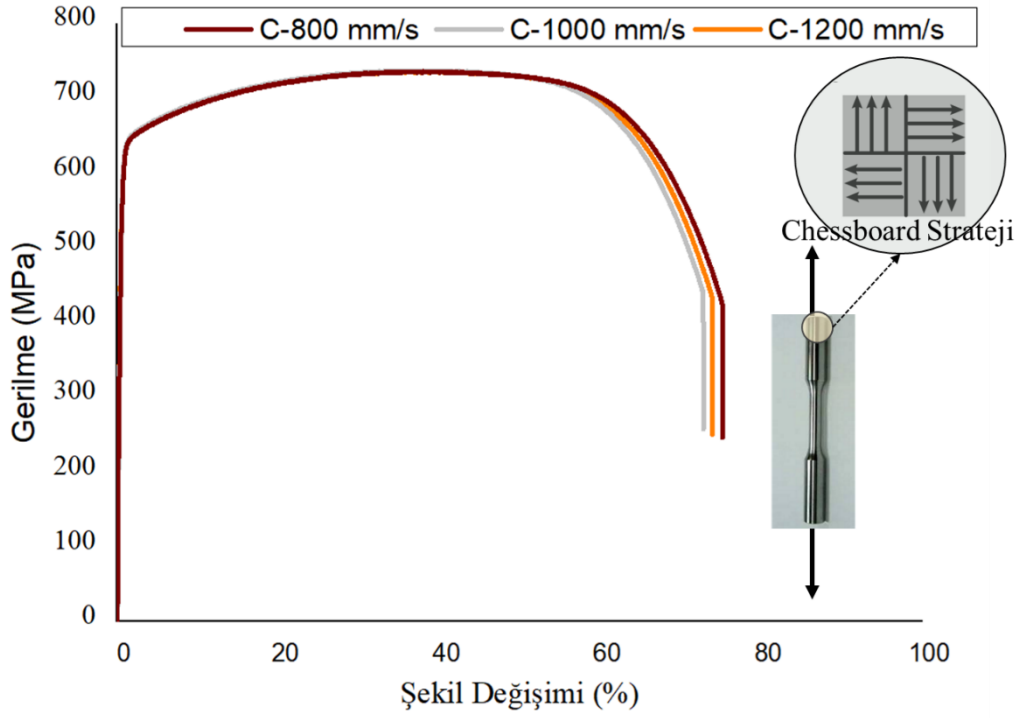
- Lazer tarama hızının artışı ile eriyik havuzunun kararsızlığı ve ıslanma yeteneğinin kötüleşmesi sebebiyle yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde üç farklı tarama hızı seçilerek; tarama hızı, tarama stratejisi ve üretim yönünün etkilerinin incelemesine geçilmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlar neticesinde, biyomimetik hiyerarşik yapı modellemesi için tabakalı üretim yapılmıştır. Biyomimetik hiyerarşik yapı tasarımı gerçekleştirilirken mukavemet ve süneklik kavramlarının her ikisini de içerebilecek bir yapı elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle statik test sonuçlarından da elde edildiği gibi yumuşak faz olarak 800 mm/s sert faz olarak ise 1200 mm/s tarama hızı tercih edilmiştir. Böylece yumuşak faz ile süneklik, sert faz ile dayanım elde edilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 40'ta Chessboard (satranç tahtası) stratejisi ile üretilen farklı tarama hızlarındaki numunelerin çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Genel olarak grafikler incelendiğinde, gerilme ve şekil değişimi açısından çok yakın sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 31'de verilen düz strateji ile üretilmiş numunelerin dayanımlarına göre oldukça yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak, üretim stratejisinin mikro yapı üzerindeki olumlu etkisi gösterilebilmektedir. Düz üretim stratejisi ile üretilen 800 mm/s tarama hızındaki numunenin çekme dayanımı 493,79 MPa iken, chessboard stratejisinde bu değer 735,66 MPa olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde 1000 mm/s tarama hızındaki numunenin çekme dayanımı 207,44 MPa iken, chessboard stratejisinde bu değer 736,88 MPa olarak elde edilmiştir. Son olarak 1200 mm/s tarama hızındaki numunenin çekme dayanımı 442,92 MPa iken, chessboard stratejisinde bu değer 735,65 MPa olarak hesaplanmıştır. Tüm bu sonuçlar (Tablo 7) chessboard tarama stratejisi ile üretilen numunelerde düz strateji ile üretime kıyasla mekanik özelliklerinin geliştiğini göstermektedir. Çekme dayanımının yanı sıra üç noktadan eğme testi sonucunda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Chessboard ve düz tarama stratejisi arasında meydana gelen temel farkların sebebi, soğutma hızı ve lokal ısıl gradyenlerden kaynaklanmaktadır. Yüksek soğutma hızı ve katılma hızına göre düşük ısı gradyeni mikro yapının iyileşmesine sebebiyet vermektedir (Köhnen *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2018). SLM yöntemiyle üretilen metallerin mikro yapısal dönüşümü, bir lazer kaynağının hareketiyle toz yatağının ergitilmesi ve oluşan ısının yapı platformuna iletilmesiyle meydana gelir. Bu işlem, karakteristik olarak uzun bir eriyik havuzunun oluşmasına ve katılmasına yol açar. Katı ve sıvı fazların arayüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı, malzemenin kimyasal bileşimine ek olarak tanelerin şekil ve boyutlarını, katılma sırasında oluşan mikro yapıları, dislokasyon yoğunluğunu ve her bir lazer izi boyunca gelişen kristalografik dokuyu etkiler. Isı gradyeni, eriyik havuzunun geometrisini

ve buna bağlı olarak yerel katılaşma parametrelerini belirler. Bu parametreler arasında ısı gradyanı, katılaşma hızı ve soğuma oranı yer alır ve tümü mikro yapısal özellikleri doğrudan şekillendirir (Collins *et al.*, 2016; Köhnen *et al.*, 2019).

Chessboard stratejisinde tarama alanı birden fazla küçük adalara bölünmektedir. Her ada belli bir yönde hızlı bir ısı dağılımı sağlayan ve böylece düşük gerilmelere sebep olan yapıya sahiptir (Merceland Kruth, 2006b). Ayrıca, chessboard stratejisinde düz tarama stratejisine göre kısa tarama vektörüne sahiptir. Kısa tarama vektörü sayesinde, bitişik iki tarama vektörü arasındaki tarama zaman aralığı azalmaktadır. Böylece bitişik vektörler arasında güçlü bir bağ meydana gelmektedir (Promoppatum & Yao, 2020). Aynı zamanda, 1200 mm/s tarama hızında 800 mm/s tarama hızına kıyasla daha düşük dayanım elde edildiği gözlemlenmiştir. Şekil değişimlerine göre, C-800 mm/s tarama hızındaki numunenin kopma anındaki toplam şekil değişimi %75,17, C-1000 mm/s tarama hızındaki numunenin kopma anındaki toplam şekil değişimi %73,91 ve C-1200 mm/s tarama hızındaki numunenin kopma anındaki toplam şekil değişimi %72,78 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, düz üretim yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile paraleldir ancak düz üretim stratejisine göre oldukça artmış bir şekil değişimi gözlemlenmiştir. Ahmadi ve arkadaşları tarama hızının çekme dayanımı üzerindeki etkisi üzerine gerçekleştirdikleri bir çalışmada (Ahmadi *et al.*, 2016), tarama hızındaki artışın çekme dayanımını azalttığı yönünde bir sonuç elde etmiştir. Bu durumun sebebi olarak, düşük enerji yoğunluğu ve bu durumun sebebi olarak metalurjik bağlanmanın düşük olması gösterilmiştir. Ayrıca düşük tarama hızında eriyik havuzları arasındaki bağlanma iyileşerek mekanik dayanım olumlu yönde etkilenmektedir. Düşük tarama hızlarında daha büyük ergime havuzu oluşur ve bağlanmayı artırır. Bu durumun sonucu olarak mekanik özelliklerde gelişme gözlemlenir. Aynı zamanda, yüksek tarama hızındaki tozda yüksek oksidasyon meydana gelerek daha yoğun boşluk ve ergimemiş bölgelerin oluşumuna sebebiyet vermektedir (Ni *et al.*, 2018).

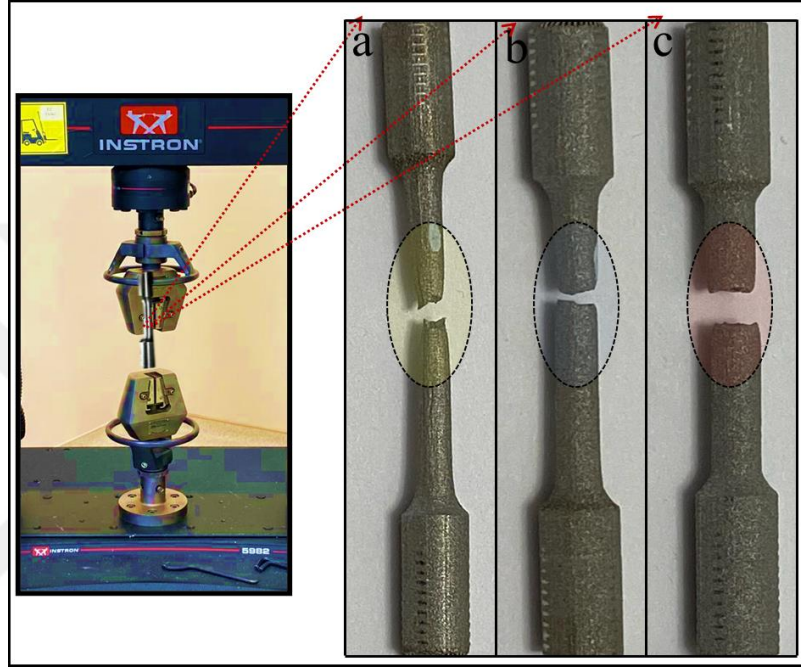


**Şekil 40.** Farklı parametrelerde ve Chessboard (satranç tahtası) stratejisi ile üretilen SLM numunelerin çekme testi sonucu gerilme-şekil değişimi eğrisi

SLM üretim yönteminde ergime havuzu ve çevresinde genleşme/büzülmeden kaynaklı olarak yapı içerisinde artık gerilmeler meydana gelmektedir. SLM yönteminde chessboard stratejisinde oluşturulan her bir ada bir ısı saçılma birimi olarak davranmaktadır. Ancak düz üretim stratejisinde numunenin tüm yüzeyi ısı saçılma birimi olarak dağılır ve saçılma yönü tektir. Bu nedenle chessboard stratejisinde ısı saçılımı daha hızlı ve malzemedeki kusurlar daha az olmakla birlikte artık gerilme düz tarama stratejisinde elde edilene göre düşüktür (L. Wang *et al.*, 2018). Ayrıca tıpkı düz üretim stratejisinde olduğu gibi tarama hızındaki artış ile bası artık gerilmesinde artış meydana gelmiştir. Bu durumun sebebi olarak, metal tozunun ergimesi için yeterli zaman verilmemesi ve katmanlar arası zayıf bağlanma gösterilmektedir.

Şekil 41 ve Şekil 42’de sırasıyla chessboard stratejisi ile üretilen SLM numunelerin çekme testi sonrası kırılma görüntüleri ve SEM fraktografileri gösterilmiştir. Şekil 41’de verilen kırılma şekilleri incelendiği zaman, tarama hızı arttıkça gevrek kırılma eğiliminin baskın olduğu, 800 mm/s tarama hızında boyun verme olayının gözlemlendiği ve bu durumun sünek kırılmaya işaret ettiği görülmektedir. Ayrıca, Şekil 42-a’da verilen geleneksel üretim yöntemi ile üretilen numunelerde kırık yüzeyine ait SEM görüntüsünde oldukça yoğun bir şekilde yayılmış çukurcukların varlığı gözlemlenmiştir. Bu durum geleneksel yöntemle üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunelerin sünek kırılma davranışı sergilediğini açıkça göstermektedir. Tarama hızındaki artış ile birlikte numunenin kırılma yüzeyinde kusurların arttığı dikkat çekmiştir. Ergimemiş toz partikülleri ve füzyon eksiklikleri (LoF) gibi gözenek

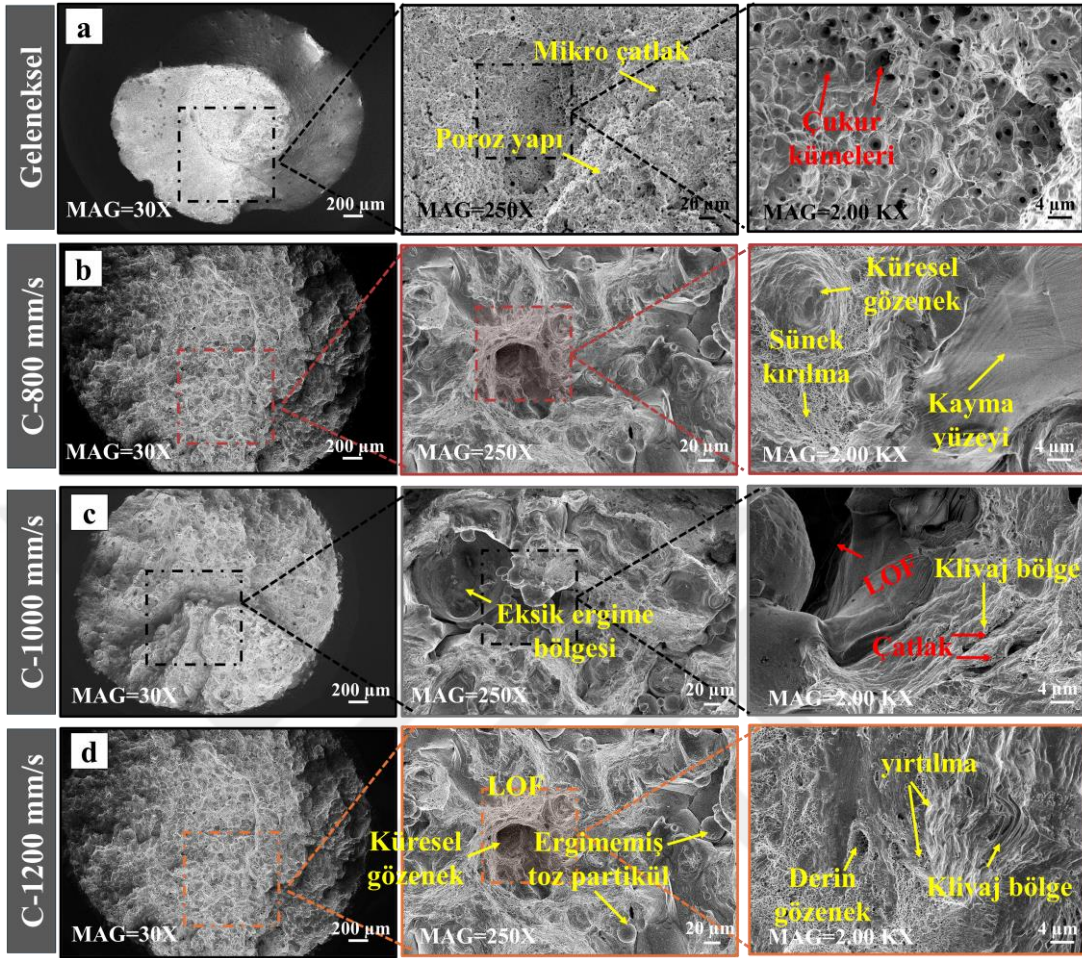
kusurlarının tarama hızındaki artıştan kaynaklı olarak enerji yoğunluğundaki artışla ergimiş bölgelerin örtüşmesindeki azalmadan kaynaklı olarak oluştuğu düşünülmektedir. Bunlarla birlikte, SLM ile üretilen numunelerde kısmen küresel gözenekler gözlemlenmiştir. Bu gözeneklerin gaz gözenekleri olduğu veya füzyon eksikliğinden kaynaklı gözenekler olmadığı düşünülmektedir. Bu gözenekler, lazer taraması sırasında, ergimiş malzemenin yayılmasının yavaşlaması ve/veya erimiş malzemenin alt tabakaya yeterince nüfuz edememesi sonucu oluşmuştur.



**Şekil 41.** Farklı lazer tarama hızları ile chessboard tarama stratejisi kullanılarak üretilen SLM numunelerinin çekme testleri sonrası kırılma görüntüleri: **a)** 800 mm/s, **b)** 1000 mm/s ve **c)** 1200 mm/s

C-800 numunesinde (Şekil 42-b) bölgesel olarak klivaj kırılmalar gözlemlense de yüzeyin genelinde boşlukların birleşimi ile sünek kırılmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir. C-1000 numunesinde (Şekil 42-c) mikro çatlakların varlığı görülmüştür. C-1200 numunesinde (Şekil 42-d), yetersiz enerji yoğunluğundan kaynaklı olarak kırılma yüzeyinde ergimemiş toz partikülleri gözlemlenmiştir. Bu bölgeler dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. C-1200

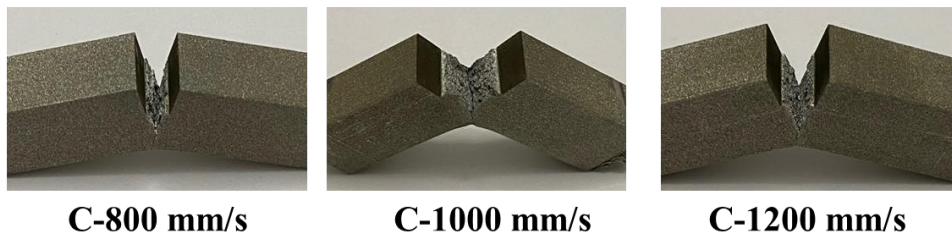
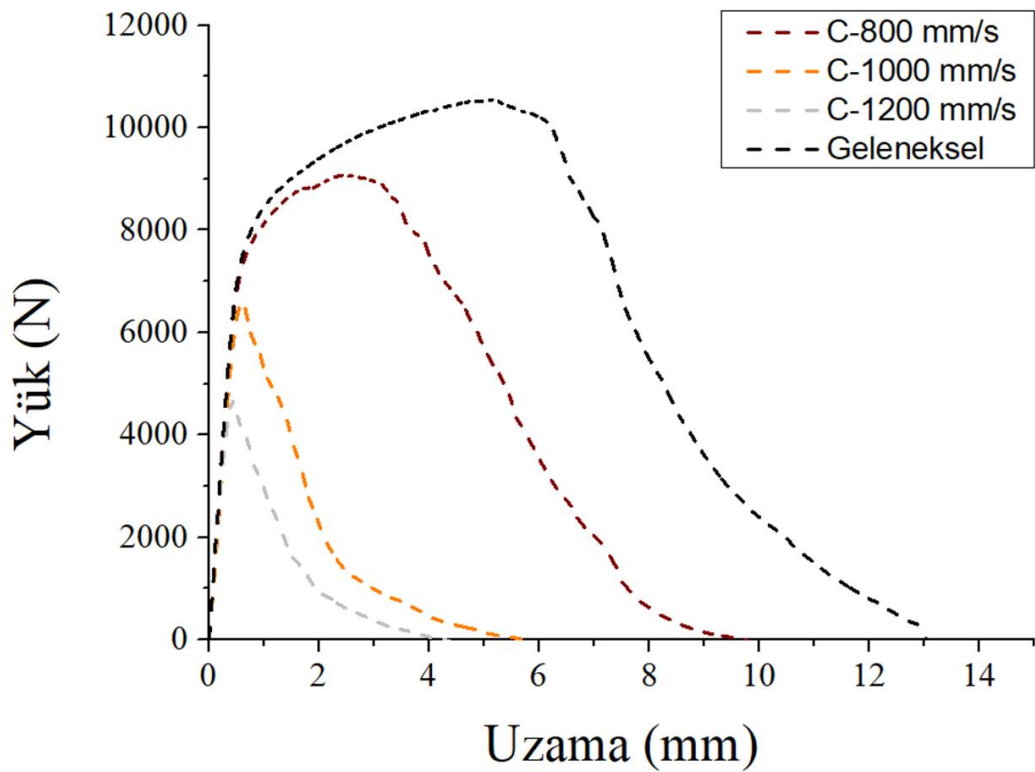
numunesinde derin yırtılma izleri ve klivaj bölgelerinin varlığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Şekil 41-c’de verilen kırılma şeklinin gevrek kırılmaya sahip olması ile paralel niteliktedir.



**Şekil 42.** Farklı lazer tarama hızları ile chessboard tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş numunelere ve geleneksel yöntemle üretilmiş numuneye ait çekme testi sonrası SEM fraktografisi: **a)** Geleneksel, **b)** 800 mm/s, **c)** 1000 mm/s, **d)** 1200 mm/s

Şekil 43’te chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin üç noktadan eğme testi sonrası yük-uzama eğrisi verilmiştir. Şekil 44’te kırılma yüzey görüntüleri verilmiştir. Üç noktadan eğme testleri sonrası elde edilen verilere göre tarama hızı arttıkça 800 mm/s, 100 mm/s ve 1200 mm/s ile üretilen numuneler için sırasıyla 9081,93 MPa, 6593,816 MPa ve 4665,33 MPa şeklinde maksimum yük değerleri elde edilmiştir. Düz üretim stratejisi ile benzer sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi üç noktadan eğme testinde uygulanan belli bir yük altında dikdörtgen kesitli numuneye ait gerilme dayanımı Denklem 10 aracılığıyla hesaplanmaktadır (Callister & Rethwisch, 2000). Şekil 43’ten elde edilen yük değerleri kullanılarak elde edilen en yüksek maksimum eğilme dayanımı 354,762 MPa değeriyle 800 mm/s lazer tarama hızı ile üretilen numuneden elde edilmiştir. Daha sonra; 1000 ve 1200 mm/s tarama hızlarında üretilen numuneler için sırasıyla 257,571 MPa ve 182,239 MPa değerleri elde edilmiştir. Bu durum tarama hızındaki artış ile dayanımın azaldığını

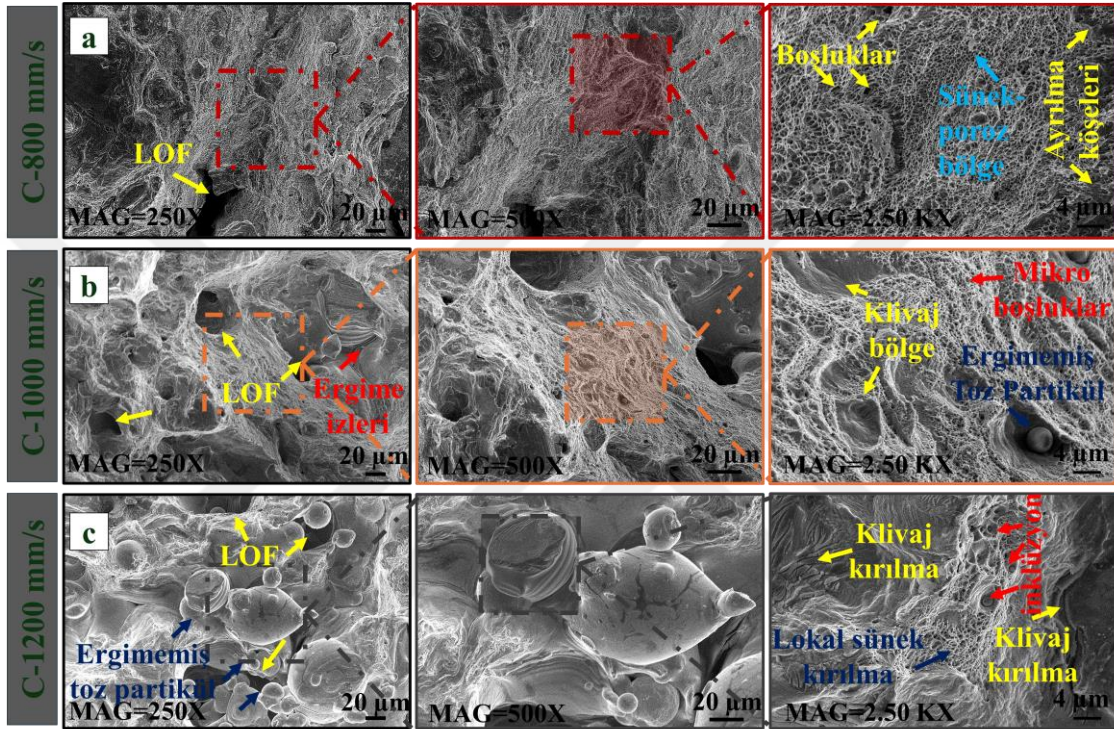
ortaya koymaktadır. Tarama hızındaki artış ile yapı içerisindeki kusurlar artmaktadır. Bir önceki bölümde de ifade edildiği gibi, tarama hızındaki artış enerji yoğunluğunda azalmaya neden olmaktadır. Bu durum lazer ışını ile etkileşen toz partiküllerinin yeterince ergimemesine ve füzyon boşluklarının oluşmasına sebebiyet vermektedir. Aynı zamanda tarama hızının artışı ile yapı içerisinde küresel/küresel olmayan boşluklar oluşturur. Bu durum sonuç olarak yapı içerisinde artan gözenek ve düşük yoğunluğa sebebiyet vermektedir. Tüm bu kusurlar çatlakların başlaması ve ilerlemesi için önemli noktalar. Yapı içerisinde gözenekliliğin sayısı ve yoğunluğunun fazla olması dayanımın düşmesine neden olmaktadır (Viderščak *et al.*, 2024).



**Şekil 43.** Farklı lazer tarama hızları ile chessboard tarama stratejisi kullanılarak üretilmiş SLM numunelerin ve geleneksel numunenin üç noktadan eğme testleri sonrası yük-uzama eğrileri

Ayrıca, Şekil 43'e göre tarama hızındaki artış ile şekil değişim-uzama miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. 800 mm/s tarama hızında 9,77 mm uzama ile en yüksek şekil değişimi elde edilmiştir. Ardından tarama hızındaki artış ile C-1000 ve C1200 mm/s numuneleri için sırasıyla 5,93 mm ve 4,36 mm uzama değerleri elde edilmiştir. Elde edilen dayanım ve uzama

özellikleri çekme dayanımı ile paraleldir. Şekil 44’te verilen kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri incelendiği zaman, tarama hızındaki artış klivaj kırılmayı baskın hale getirmiştir. C-800 mm/s numunesinde poroz bir yapının baskın olduğu bunun da sünek kırılmaya işaret ettiği görülmektedir. Ayrıca yapı içerisinde, dağılmış mikro boşluklar gözlemlenmiştir. Tarama hızındaki artış ile yapıya lokal olarak sünek kırılma görülmesine karşın, genel olarak gevrek kırılma gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapı içerisinde ergimemiş bölgeler ve LoF kusurları artmış ve çukurlar içerisinde ergimemiş toz partikülleri gözlemlenmiştir.



**Şekil 44.** SLM kullanılarak chessboard tarama stratejisi ile üretilmiş numunelere ait üç noktadan eğme testi sonrası SEM fraktografisi: a) 800 mm/s, b) 1000 mm/s ve c) 1200 mm/s

Şekil 45’te geleneksel ve SLM üretim yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunelere ait XRD grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, tüm numune gruplarında; (111), (200) ve (220) düzlemlerinde yaklaşık olarak 43,8°, 50,9° ve 74,8°’de benzer kırınım desenlerinin olduğu görülmektedir. Belirlenen tepe noktaları, AISI 316L paslanmaz çelik için literatür ile uyumludur (Kurzynowski *et al.*, 2018) Yapı içerisindeki Ni ve Cr varlığı yüksek içerikli ostenit fazının ( $\gamma$ ) oluşumuna sebebiyet vermiştir. Tüm gruplarda, ostenit fazın yüksek kırınım tepelerinde gözlemlendiği, delta ferritin ( $\delta$ ) ise daha belirsiz ve düşük kırınım tepelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

XRD grafikleri incelendiğinde, dik doğrultuda üretilmiş SLM numunelerde ve geleneksel yöntemle üretilmiş AISI 316L numunelerde delta ferrit fazı ( $\delta$ ) gözlemlenmiştir. Ayrıca, chessboard stratejisi ile üretilen numunelerde delta ferrit kırınım tepe yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir.

Tarama hızı arttıkça delta ferrit fazı kaybolmaya başlamıştır. Bu durumun sebebinin yüksek soğuma hızı olduğu düşünülmektedir. Tarama hızındaki artış yapının ostenit-ferrit geçişini azaltarak ostenit fazının oluşumuna neden olmaktadır. Yani, hızlı soğuma nedeniyle, delta ferrit fazı ostenit fazına geri dönüşmemiştir. Katılaşma teorisine (GxR) göre sıcaklık gradyanı (G) ve katılaşma hızı (R) ne kadar fazla ise soğutma hızı o kadar artmaktadır. Böylece ostenit dönüşümü artmaktadır (Filimonov *et al.*, 2020). Ayrıca kalınlık boyunca üretilen numunelerde  $\delta$  fazı hiç gözlemlenmemiştir. Bu durum aynı şekilde yüksek soğuma hızlarına atfedilebilir (Elmer *et al.*, 1989) Literatür AISI 316L paslanmaz çelik numunede meydana gelen ostenit ve delta ferrit fazlarının varlığını ispatlar niteliktedir (Elmer *et al.*, 1989; Z. Sun *et al.*, 2016b; Weng *et al.*, 2019).

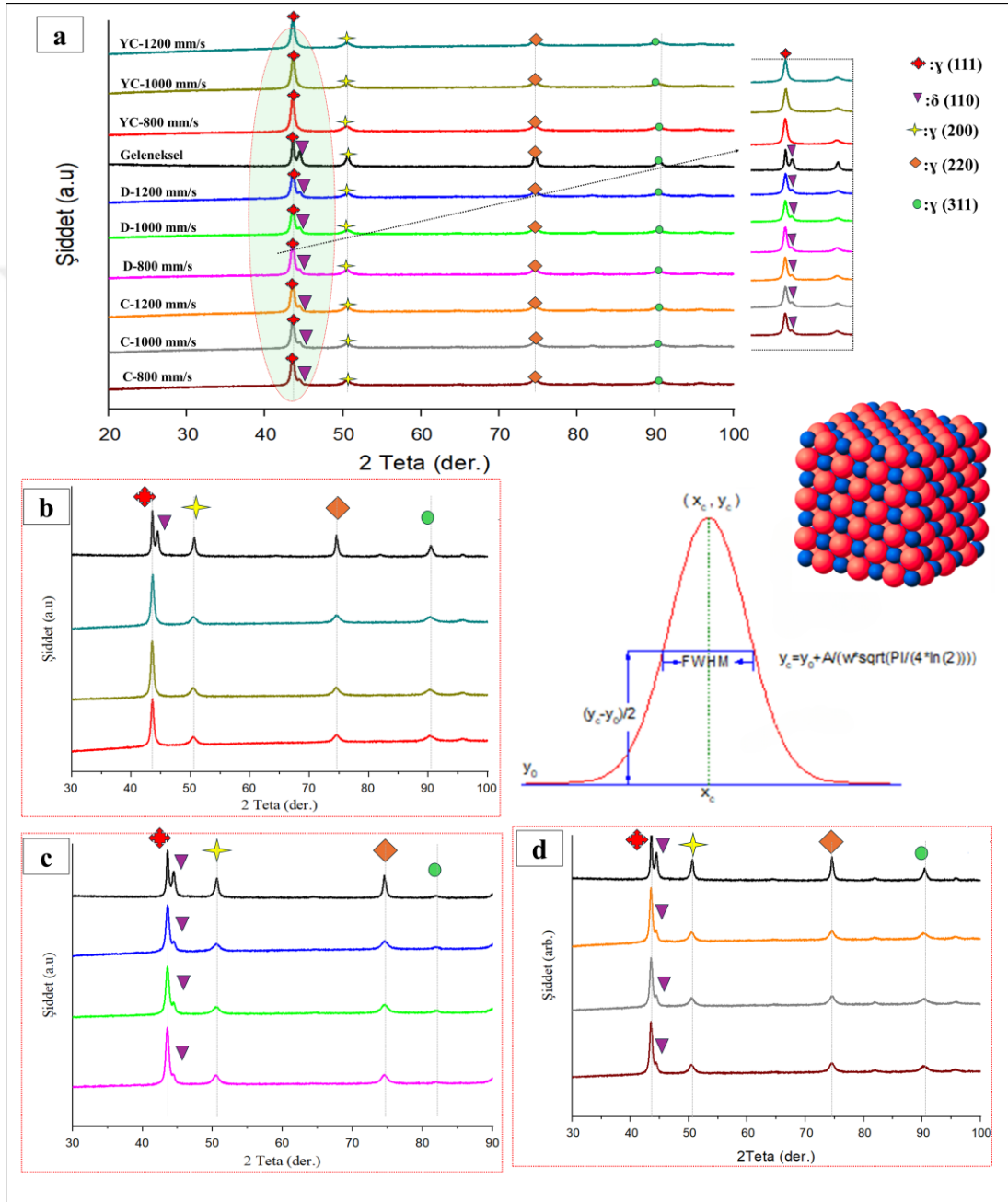
XRD grafiklerinde, SLM ile üretilen her bir grup numune geleneksel yöntemle üretilen numuneyle kıyaslandığı zaman (Şekil 45 b, Şekil 45-c ve Şekil 45-d) kırınım tepelerinde hafif bir genişleme olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, SLM üretim yönteminden kaynaklı olarak tane boyutunun incelenmesi ve yapıdaki artık gerilme varlığına atfedilmektedir (Wang *et al.*, 2019b). SLM ile üretilen numunelerde  $2\theta$  konumu hafifçe sola kayarak daha düşük Bragg açılarında  $\gamma$  fazı gözlemlenmiştir. Bu durum dislokasyon yoğunluğu ve kafes boyutunun bozulması ile yapıda bası artık gerilmelerinin oluşumu ile ilgilidir. Literatür bu durumu destekler niteliktedir ((Ara *et al.*, 2021). Ayrıca, SLM ile üretilen numunelerde geleneksel yöntemle üretilen numunelere kıyasla daha yüksek bası artık gerilmelerinin elde edilmesi de bu durumu desteklemektedir.

Kristalin tane boyutunun hesaplanması için Scherrer denklemi [(Muniz *et al.*, 2016),

$$D = \frac{K\lambda}{B\cos\theta} \quad (11)$$

kullanılmaktadır. Burada K Scherrer sabitidir,  $\lambda$  kullanılan X-ışını demetinin dalga boyu,  $\beta$  tepe noktasının yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) ve  $\theta$  Bragg açısıdır. K değeri kristal şekline, kırınım çizgisi indekslerine ve tozun kristalit boyutlarının dağılımına bağlıdır. Bu denklemde XRD grafiğinde bulunan tüm tepe noktaları için d değerleri hesaplanır ve tüm sonuçların ortalaması alınarak kristal boyutu bulunmaktadır (Tablo 7). Tablo 7’de verildiği üzere Origin Pro 2018 kullanılarak Gauss yöntemine dayalı olarak piklerin yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) belirlenmiştir. Geleneksel yöntem ile üretilen numunelerde 30,10 nm elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda en yüksek tane boyutu 14,14 nm değeri ile D-800 numunesinde elde edilmiştir. C-800 mm/s numunesinde 13,70 nm tane boyutu elde edilmiştir. Aynı şekilde sırasıyla D-1000, D-1200 mm/s tarama hızlarında sırasıyla 14,00 nm ve 13,97 nm elde edilmiştir. Chessboard stratejisinde C-1000 mm/s tane boyutu 13,63 nm iken C-1200 mm/s tarama hızında bu değer 13,25 nm elde edilmiştir. Sonuçlar literatür ile paralellik göstermektedir (Ara *et al.*, 2021). Elde edilen sonuçlara göre SLM üretim yönteminde geleneksel üretim yöntemine göre tane boyutu azalmıştır. Bu durum,

tabaka halinde üretilen SLM numuneleri tabakalar arası sıcaklık gradyanlarına sebebiyet vermektedir. Ayrıca hızlı ısınma/soğuma prosesinden dolayı tane incelmeye meydana gelmektedir. SLM işlem parametrelerinden olan tarama hızındaki artış ile mikro yapıda değişiklik gözlemlenmiştir. Tarama hızındaki artış ile enerji yoğunluğunun azaldığı ve soğuma hızının arttığı bildirilmiştir. Soğuma hızındaki artış ile daha ince mikro yapı elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatür destekler niteliktedir (Leicht *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2013d; Saeidi, 2016).



**Şekil 45.** SLM ve geleneksel yöntem ile üretilmiş numunelerin XRD grafikleri: **a)** Tüm numuneler, **b)** Kalınlık boyunca üretilen chessboard stratejisine sahip numuneler, **c)** Dik üretilmiş düz stratejiye sahip numuneler ve **d)** Dik üretilmiş chessboard stratejisine sahip numuneler

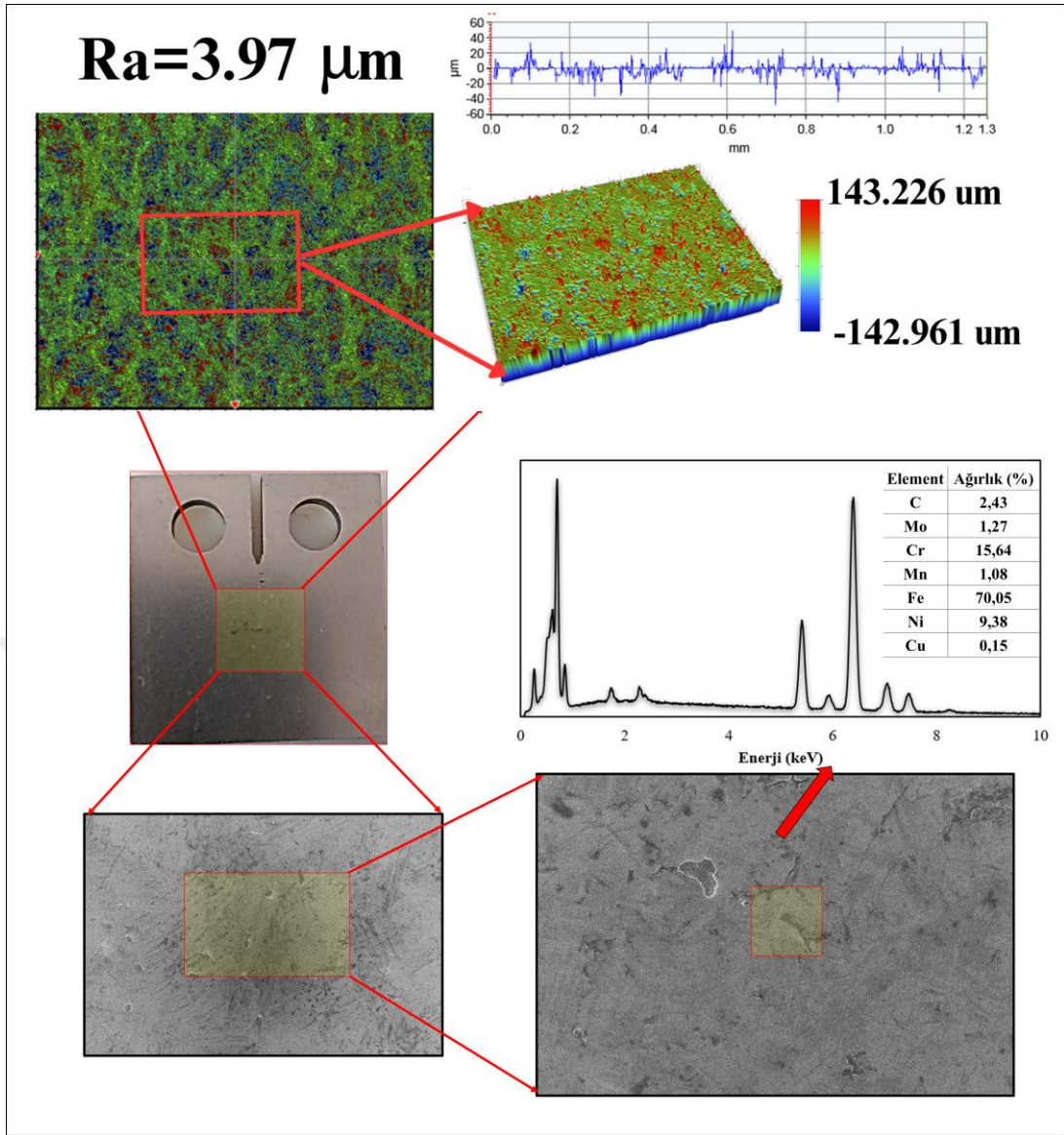
**Tablo 7.** Geleneksel Yöntem Kullanılarak Üretilen Dövme Numunelerin ve Farklı Tarama Hızları ve Stratejileri Kullanılarak Üretilen SLM Numunelerin Ortalama Tane Boyutu, Artık Gerilme, Mikrosertlik, Akma Gerilmesi, Çekme Gerilmesi, Yüzde Uzama, Maksimum Eğme Yüğü

	Numune Adı	Ortalama Tane Boyutu (nm)	Artık Gerilme (MPa)	Mikrosertlik (HV <sub>0.1</sub> )	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Yüzde Uzama (%)	Maksimum Eğme Yüğü (N)	Maksimum Eğme Gerilmesi (MPa)	Eğme Uzaması (mm)
	Dövme	30,10	-32	232	535,133	735,65686	73,92	11559,92	451,56	14,50
Düz	D-300	15,00	-128	288	398,9147	514,67621	75,36	10559,92	412,49	13,30
	D-600	14,82	-96	300	408,2643	511,44003	59,15	9295	363,25	10,30
	D-800	14,14	-161	311	373,4005	493,79120	83,31	9200	360,25	8,30
	D-900	14,16	-99	315	390,6531	509,72409	44,64	8407	328,58	11,40
	D-1000	14,00	-216	325	394,8885	507,44208	72,68	7913	309,58	6,80
	D-1200	13,97	-237	332	355,1318	442,92123	10,75	6551,35	255,91	4,00
Chessboard	C-800	13,70	-130	325	540,7068	736,7880	75,17	9081,93	354,762	11,50
	C-1000	13,63	-185	332	535,1326	735,6655	73,91	6593,816	257,571	5,80
	C-1200	13,25	-207	350	528,4421	735,6568	72,78	4665,33	182,239	4,10

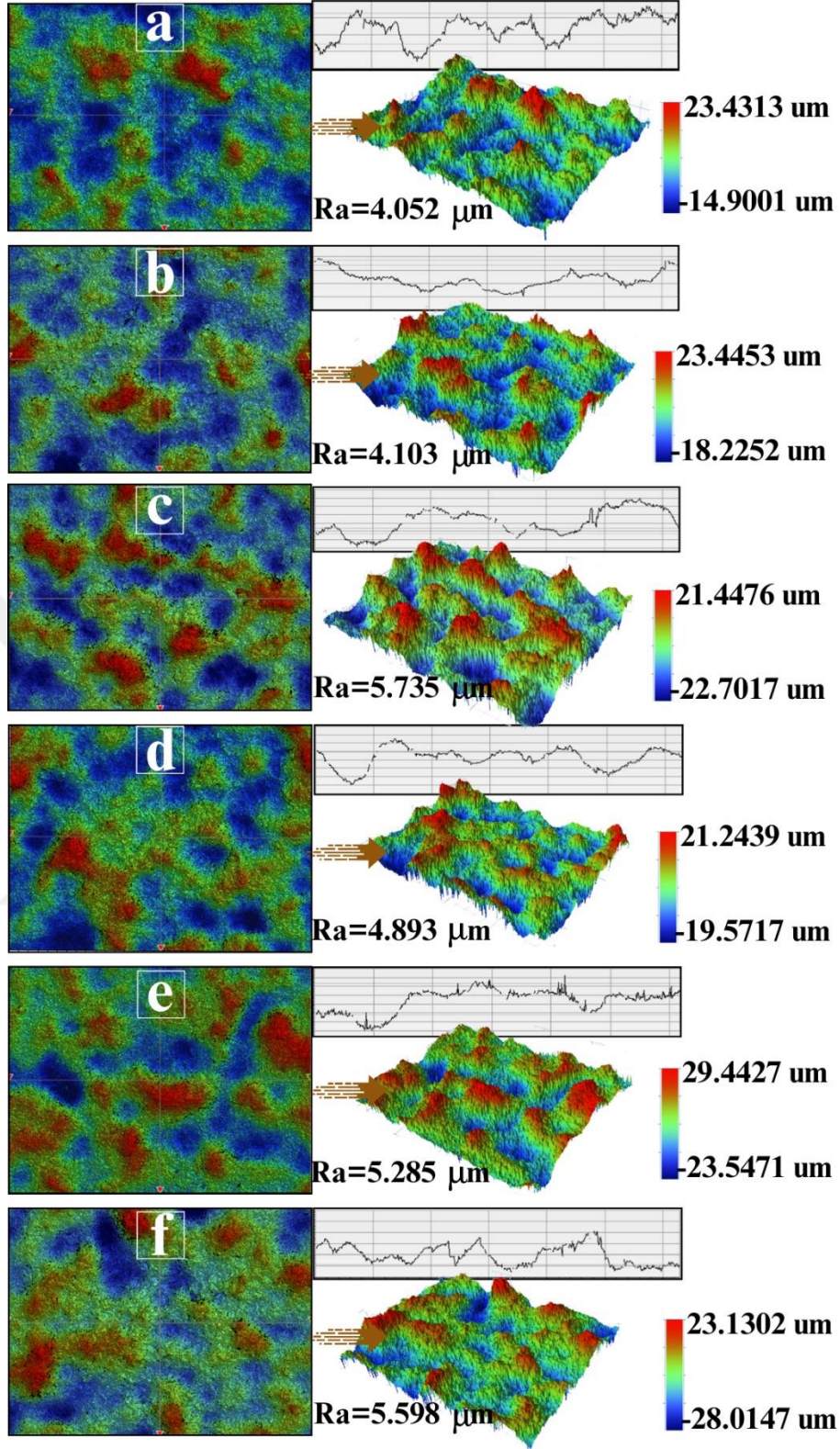
Şekil 47’de farklı tarama hızları (800, 1000 ve 1200 mm/s) ve stratejilerinde (düz ve chessboard) üretilen numunelere ait 3D profilometre görüntüleri verilmiştir. Geleneksel üretim yönteminde (Şekil 46) yüzey pürüzlülüğü 5,49 µm elde edilmiştir. SLM üretim yönteminin parametrelerindeki değişimler yüzey pürüzlülüğünü oldukça etkilemiştir. Elde edilen profilometre sonuçlarına göre, C-1200 numunesinden 5,598 µm değeri ile en yüksek ortalama pürüzlülük (Ra) elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük ise 4,052 µm değeri ile D-800 numunesinden elde edilmiştir. D-1200 numunesinin pürüzlülük değeri ise 5,735 µm olarak ölçülmüştür. Tarama hızındaki artışla birlikte yüzey pürüzlülük değerinin arttığı oldukça açıktır. Düz üretim stratejisine kıyasla chessboard stratejisinde daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Tarama hızındaki artış enerji yoğunluğunu azaltmakta ve kararsız ergime bölgeleri oluşturmaktadır ve böylece, ergime havuzlarının bağlanabilirliği azalmaktadır. Ayrıca bu durum, yüzeyde toplanma olayına sebep olarak yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır (Gu and Shen, 2009b) Lazer tarama sırasında, lokal olarak toz ergitme sırasında önemli sıcaklık gradyanları meydana gelmektedir. Tarama hızının artışı ile Marangoni konveksiyonu artarak sıvı kılcal kararsızlığı meydana gelmektedir. Yani ergimiş sıvı yüzey akışı, düşük yüzey geriliminin olduğu bölgeden yüksek olan bölgeye doğru akış sergilemektedir. Böylece akışın yönü radyal olarak dışarıdan içeriye doğru değişmektedir. Bu durum, kümeleşmiş, büyük küresel ve katılmış bölgelerin oluşumuna neden olmaktadır. Bu sebeplerle de yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmektedir (Gu *et al.*, 2012)

Şekil 46’da geleneksel yöntemle üretilen numuneye ve Şekil 48’de farklı parametrelerde üretilen SLM numunelere ait yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. EDS

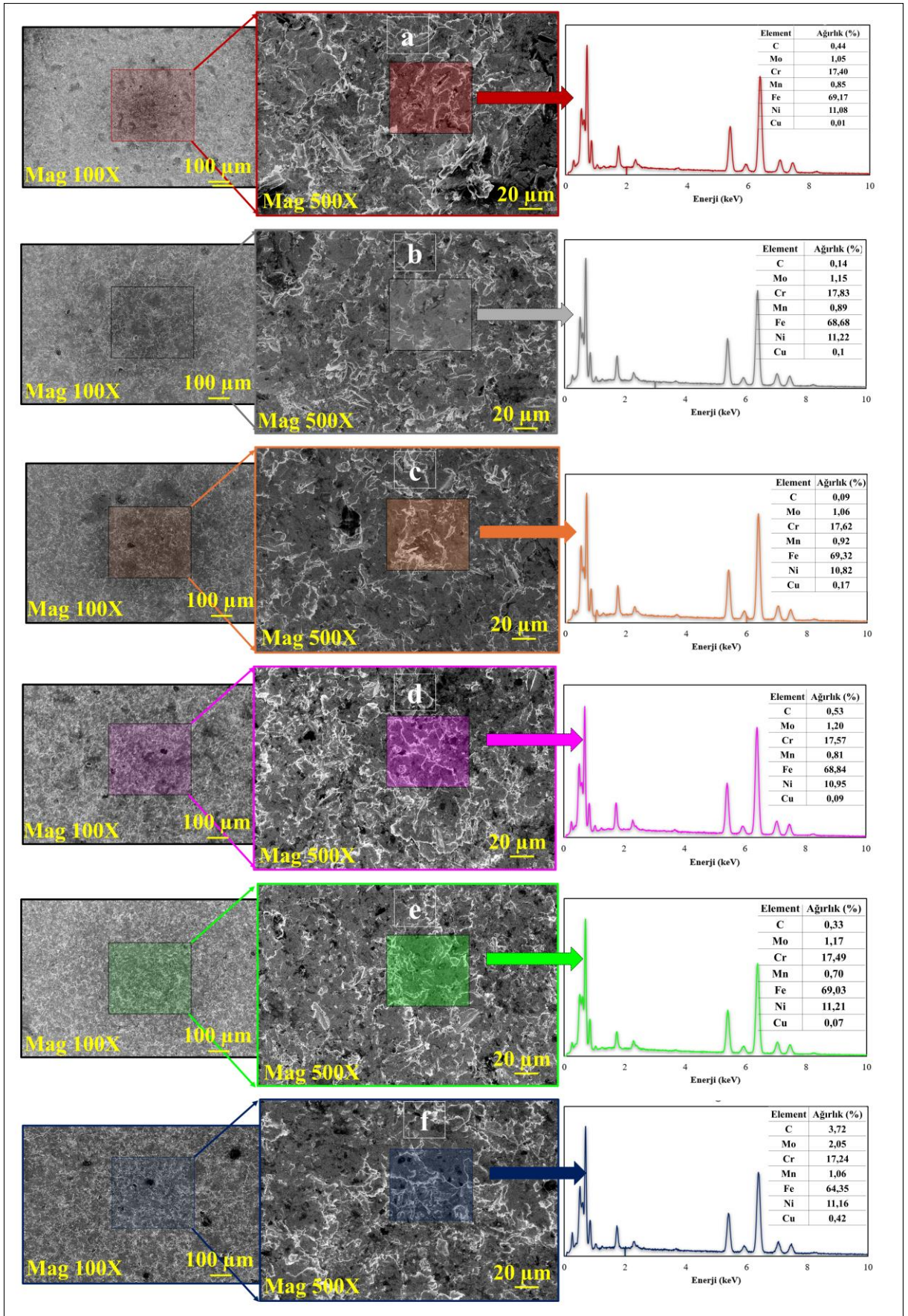
sonuçlarına göre numunelerin yapısında Cr, Mo ve Fe içeriğinin bulunması ve miktarı tek fazlı östenit paslanmaz çelikte ferrit oluşumuna neden olmaktadır (Shahriari *et al.*, 2020). SLM ile üretilen numunelerin (Şekil 48) yüzey kusurları (boşluklar, ergime izleri) geleneksel yöntemle üretilen numuneye (Şekil 46) göre daha belirgindir. Geleneksel üretim yönteminde elde edilen yüzey pürüzlülük değeri SLM ile üretilen numunelerden daha düşüktür. Geleneksel üretim yöntemi ile üretilen numunede yüzey pürüzlülüğü (Ra) 3,97  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. SLM numunelerin hızlı ısınma/soğuma prosesinden kaynaklı olarak yüzey dokusu oldukça değişken bir morfolojiye sahiptir. Şekil 48’de verilen SEM görüntülerinde chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin yüzeylerinin düz stratejiye göre daha karmaşık olduğu görülmektedir ve bu durum ise Şekil 47’de verilen 3D profilometre görüntüleri ile paralellik göstermektedir. Tarama hızının artışı yüzeydeki toplanma olayını (balling) artırmıştır. Bu durum ise daha önce bahsedildiği üzere yetersiz ergime ve saçılmadan kaynaklanmaktadır. SLM yöntemi ile üretilen numunelerde üretim prosesinden kaynaklı olarak yüzeyde saçılma, toplanma, eksik ergime gibi hatalardan kaynaklı olarak yüzey pürüzlülüğü etkilenmektedir. Chessboard stratejisi ile üretilen numunelerde düz strateji ile üretilenlere kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir (Şekil 47). D-800 numunesinde 4,052  $\mu\text{m}$  pürüzlülük değeri elde edilirken C-800 numunesinde 4,893  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. D-1000 numunesinde 4,103  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü elde edilirken C-1000 numunesinde 5,285  $\mu\text{m}$  elde edilmiştir. Aynı şekilde D-1200 numunesinde 5,735  $\mu\text{m}$  pürüzlülük değeri elde edilirken C-1200 numunesinde 5,598  $\mu\text{m}$  elde edilmiştir.



**Şekil 46.** Geleneksel yöntemle üretilen numunenin yüzey SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu



**Şekil 47.** Farklı lazer tarama hızları ve stratejileri kullanılarak üretilen numunelerin 3D profilometre görüntüleri: **a)** D-800 mm/s, **b)** D-1000 mm/s, **c)** D1200 mm/s, **d)** C-800 mm/s, **e)** C-1000 mm/s ve **f)** C-1200 mm/s



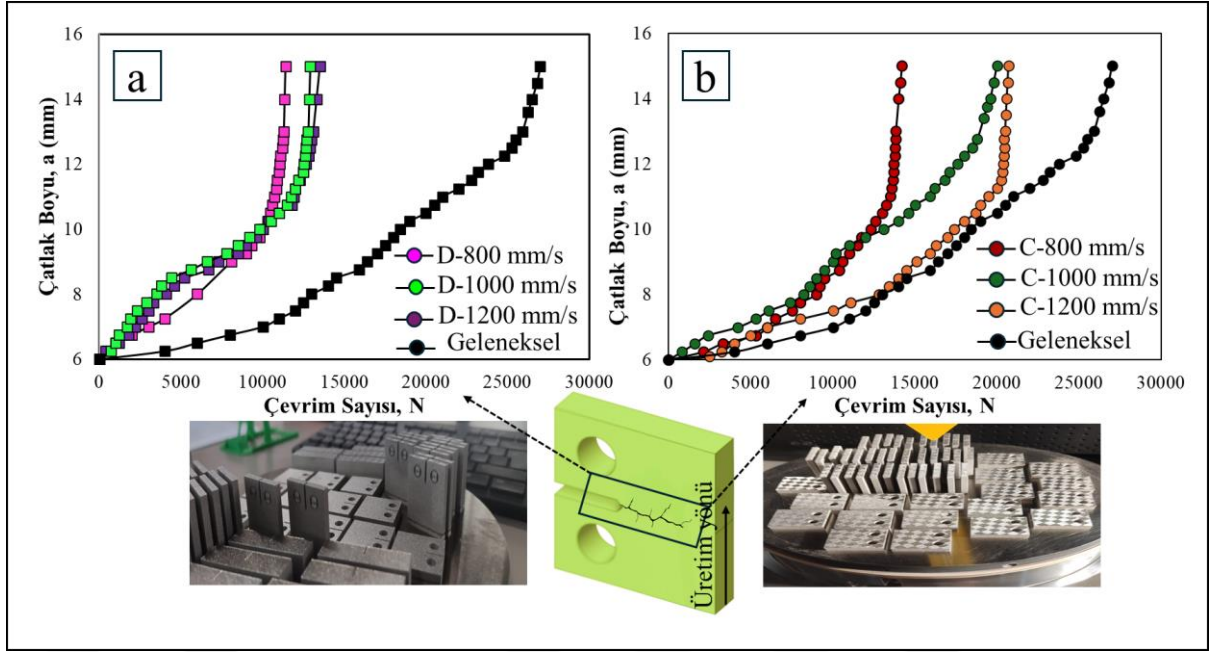
**Şekil 48.** Farklı parametrelerde üretilen numunelerin yüzey SEM ve EDS görüntüleri a) C-800 mm/s b) C-1000 mm/s c) C1200 mm/s d) D-800 mm/s e) D-1000 mm/s f) D-1200 mm/s

## Sabit Genlikte Yorulma Çatlak İlerlemesi Analizleri

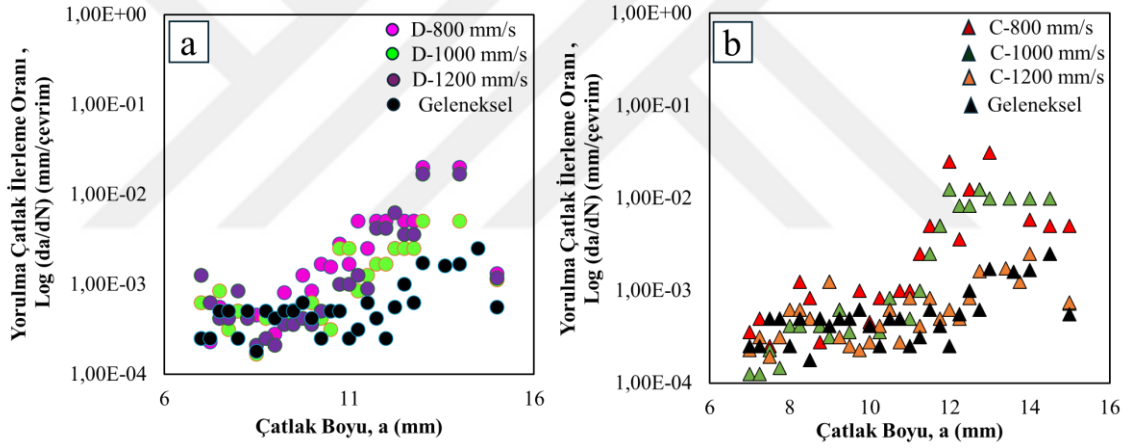
Geleneksel ve dik yönde düz ve chessboard stratejisine sahip SLM numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi eğrileri (a-N) ve çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri sırasıyla Şekil 49 ve Şekil 50’de verilmiştir. Bu şekillerden, yorulma çatlağının başlangıçta yavaş bir şekilde ilerlediği ve belirli bir kritik değere ulaştığında çatlağın hızla yayılmaya başladığı gözlemlenmektedir. Yorulma çatlak ilerlemesi sonucu elde edilen görüntülerin çatlak boyu-çevrim sayısına göre gösterimi Şekil 51’de verilmiştir. SLM işlemi ile ortaya çıkan yüksek soğutma hızları ve yönlü katılma, denge dışı bir mikro yapının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, kısmen kararsız fazların, homojen olmayan bileşimlerin ve çözünmüş elementlerin tutulması gibi etkilerle sonuçlanmaktadır (Gorsse *et al.*, 2017b; Seifi *et al.*, 2016). Bunun yanı sıra, işlem sırasında ergitme havuzunda tam olarak ergimemiş toz parçacıkları ve/veya hapsolmuş gazlar sebebiyle gözeneklilik gibi metalurjik kusurlar meydana gelmektedir (Olakanmi *et al.*, 2015). Buradan, geleneksel yöntem ile SLM üretim yöntemi arasında çatlak ilerleme davranışının değişkenlik göstermesine bu mikro yapı ve gözeneklilik miktarının sebep olduğu anlaşılmaktadır. Geleneksel üretim yönteminde çoğunlukla tek fazlı ostenitik yapı nedeniyle ikinci faz partikülleri gözlemlenmemektedir. Ancak SLM yönteminde nano inklüzyonlar, gözenekler ve kusurlar yapı içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca SLM üretim yönteminde katılma mikro yapısı; taneler arası çatlak başlangıcı ve çatlak dallanması olaylarının gözlemlenebilmesini destekler niteliktedir. Bu nedenlerle, yorulma çatlak ilerleme davranışı iki farklı üretim yönteminde değişkenlik göstermektedir (Zhang *et al.*, 2017). Geleneksel üretim yöntemi ile üretilen numunelerde yorulma ömrü yaklaşık olarak 27.600 çevrim olarak elde edilmiştir. Dik yönde ve düz üretim stratejisinde D-800 mm/s numunesinde 11.095 (%100) çevrim çatlak ilerlemesi ömrü elde edilirken; D-1000 mm/s numunesi 13.008,25 (%117,27) çevrim, D-1200 mm/s numunesi 14.008 (%126,25) çevrim elde edilmiştir. Aynı şekilde Şekil 47-b’de C-800 numunesinde 14.207 (%128,05) çevrim, C-1000 numunesinde 19.798 (%178) çevrim ve C-1200 numunesinde 20.400 (%183) çevrim çatlak ilerleme ömrü elde edilmiştir.

Burada, en düşük çevrime sahip D-800 mm/s numunesinin kırılıncaya kadar olan çevrim sayısı %100 ömür olarak kabul edilmiş ve diğer numunelerin çevrim sayıları buna göre oranlanmıştır. Bu durumda tarama hızındaki artış ile çatlak ilerleme ömründe iyileşmenin gözlemlendiği ifade edilebilir. En yüksek çatlak ilerleme ömrü C-1200 mm/s numunesinden elde edilmiştir. Genel olarak, SLM ile üretilen numunelerde çatlak ilerleme davranışı mikro yapı ve artık gerilmelerdeki değişimlerden etkilenmektedir. Lineer elastik kırılma mekaniği teorisine göre artık gerilme yoğunluk faktörü ( $K_{res}$ ), gerilme yoğunluk faktörü oranı ( $R_{eff} =$

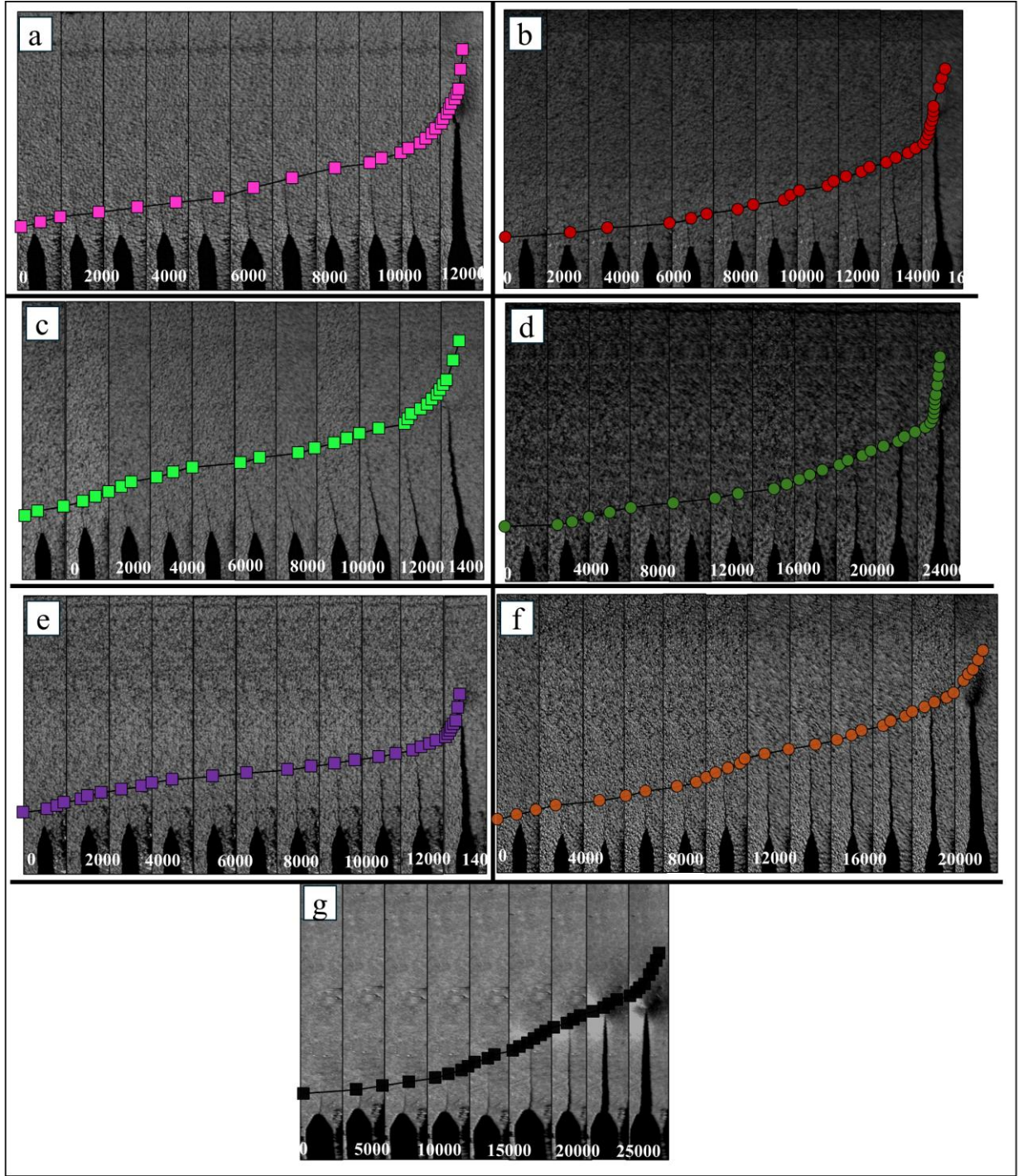
( $K_{\min} + K_{\text{res}}$ )/( $K_{\max} + K_{\text{res}}$ ) ile doğrudan ilişkilidir.  $K_{\max}$  ve  $K_{\min}$  maksimum ve minimum gerilim yoğunluğu faktörleridir (Syed *et al.*, 2019). Burada, pozitif (çeki) artık gerilme yorulma çatlak ilerleme hızını artırırken negatif (bası) bir artık gerilme çatlak ilerleme hızını düşürmektedir [(Syed *et al.*, 2019; Vrancken *et al.*, 2014). Bası artık gerilmelerindeki artış ile negatif bir  $R_{\text{eff}}$  meydana gelerek çatlak kapanmasına neden olmaktadır. Ayrıca, bası artık gerilme artışı ile dislokasyon hareketi engellenerek daha yüksek ömür elde edilmiştir. Bası artık gerilmesi hem çatlak başlangıcını hem de yayılmasını geciktirmektedir. Tablo 7’de verildiği gibi SLM ile üretilen numunelerde bası artık gerilmeleri meydana gelmiştir. Ayrıca tarama hızındaki artışla birlikte bası artık gerilmelerinde artış meydana gelmiştir. Böylece, Şekil 47’de görüldüğü gibi, ömürde artış meydana gelerek 1200 tarama hızında en iyi performans elde edilmiştir. Şekil 49-b’de chessboard stratejisi ile üretilmiş numunelere ait yorulma çatlak ilerlemesi eğrileri verilmiştir. Görüldüğü üzere, düz üretim yöntemine kıyasla daha yüksek ömür elde edilmiştir. 800 mm/s tarama hızında üretilen düz ve chessboard stratejisindeki numuneler kıyaslandığı zaman, C-800 mm/s numunesinde %128,5 ömür artışı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 1000 mm/s tarama hızı ve 1200 mm/s tarama hızındaki numuneler sırasıyla kıyaslandığında, chessboard stratejisinde %152,2 ve %145,63 gelişme gözlemlenmiştir. Tablo 7’de görüldüğü üzere, chessboard üretim stratejisinde düz stratejiye kıyasla bası artık gerilme miktarında bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Aynı şekilde tarama hızındaki artış ile bası artık gerilmesinde artış gözlemlenmiştir. Chessboard stratejisinde tarama çizgisi uzunluğunun kısa olması yapı içerisinde meydana gelen bası artık gerilme miktarını düşürmüştür. Ayrıca chessboard üretim stratejisinde düz üretim yöntemine kıyasla daha yoğun bir doluluk meydana gelmekte ve yapı içerisindeki kusurlar azalmaktadır. Bu durum çatlak ilerleme hızı açısından oldukça önemli bir parametre olan mikro yapı değişimi ile ilişkilidir. Mikro yapı içerisinde üretim kaynaklı boşlukların artışı, ergimemiş partikül, gaz boşlukları ve füzyon eksikliği gibi kusurlar çatlak ilerleme hızını etkileyerek malzemenin ömrünü düşürmektedir. Bu nedenle Şekil 62’de detaylı bir şekilde verilen chessboard stratejisi ile üretilen numunelerde düz üretime göre yüksek ömür artışı gözlemlenmiştir.



Şekil 49. Geleneksel ve SLM yöntemi ile: a) Dik ve düz strateji ile üretilen ve b) Dik ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrisi



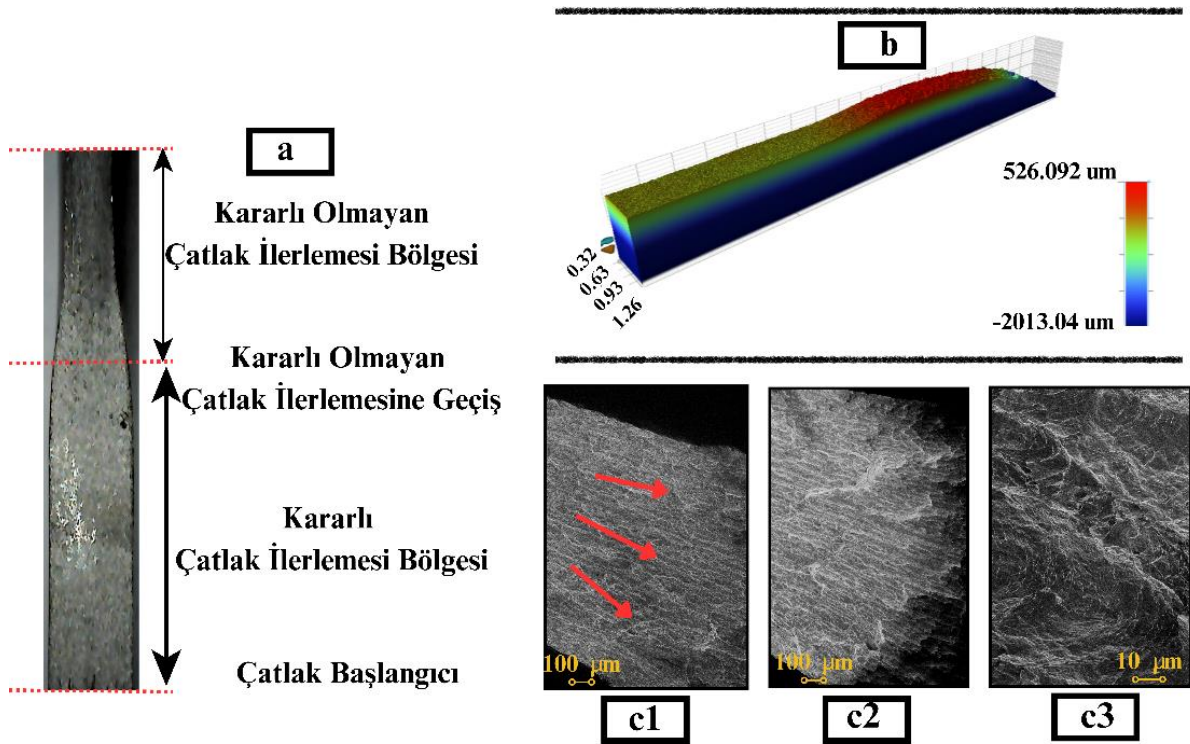
Şekil 50. Geleneksel ve SLM yöntemi ile: a) Dik ve düz strateji ile üretilen ve b) Dik ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri



**Şekil 51.** Uzunluk boyunca (Dik) üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi görüntüleri: a) Düz strateji 800 mm/s, b) chessboard strateji 800 mm/s, c) düz strateji 1000mm/s, d) chessboard strateji 10000 mm/s, e) düz strateji 1200 mm/s, f) chessboard strateji 1200 mm/s ve g) geleneksel üretim

Şekil 52’de geleneksel üretim yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunenin çatlak ilerlemesi sonrası 3D profilometre ve SEM görüntüleri verilmiştir. Çatlak ilerleme davranışı; çatlak başlangıcı, kararlı çatlak ilerleme bölgesi, kararlı olmayan çatlak ilerlemesi ve kırılma şeklinde bölgelere ayrılmıştır (Şekil 52). Çatlak ilerlemeye başladıktan bir süre sonra kararlı bir şekilde ilerleme davranışı sergilemektedir. Bu bölgenin daha açık renkli olduğu görülmektedir (Şekil 52-a). Belli bir çatlak boyuna geldikten sonra çatlak ilerleme hızı

artmaktadır ve kararsız bir şekilde ilerleme davranışı sergilemektedir. Belli bir uzunluktan sonra oldukça hızlı bir şekilde ilerleme gerçekleşir ve numune kırılır. Bu bölge yüksek pürüzlülüğe sahiptir bu nedenle diğer bölgelere kıyasla oldukça koyudur. Daha düşük pürüzlülüğe sahip bölgeler ise açık renkli olarak görülmektedir. Şekil 52 (c1) kararlı çatlak ilerleme bölgesine ait SEM görüntüsünü gösterirken Şekil 52 (c2) kırılma bölgesini göstermektedir. Kırılma yüzeyinin daha detaylı olarak gözlemlenebilmesi için Şekil 52 (c3) SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntülerine göre kırılma yüzeyinin oldukça pürüzlü olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde, klivaj ayrılma bölgeleri ve yorulma çizgilerinin (striation) varlığı gözlemlenmiştir. Detaylı SEM görüntüsünden, transgranüler kırılmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir.

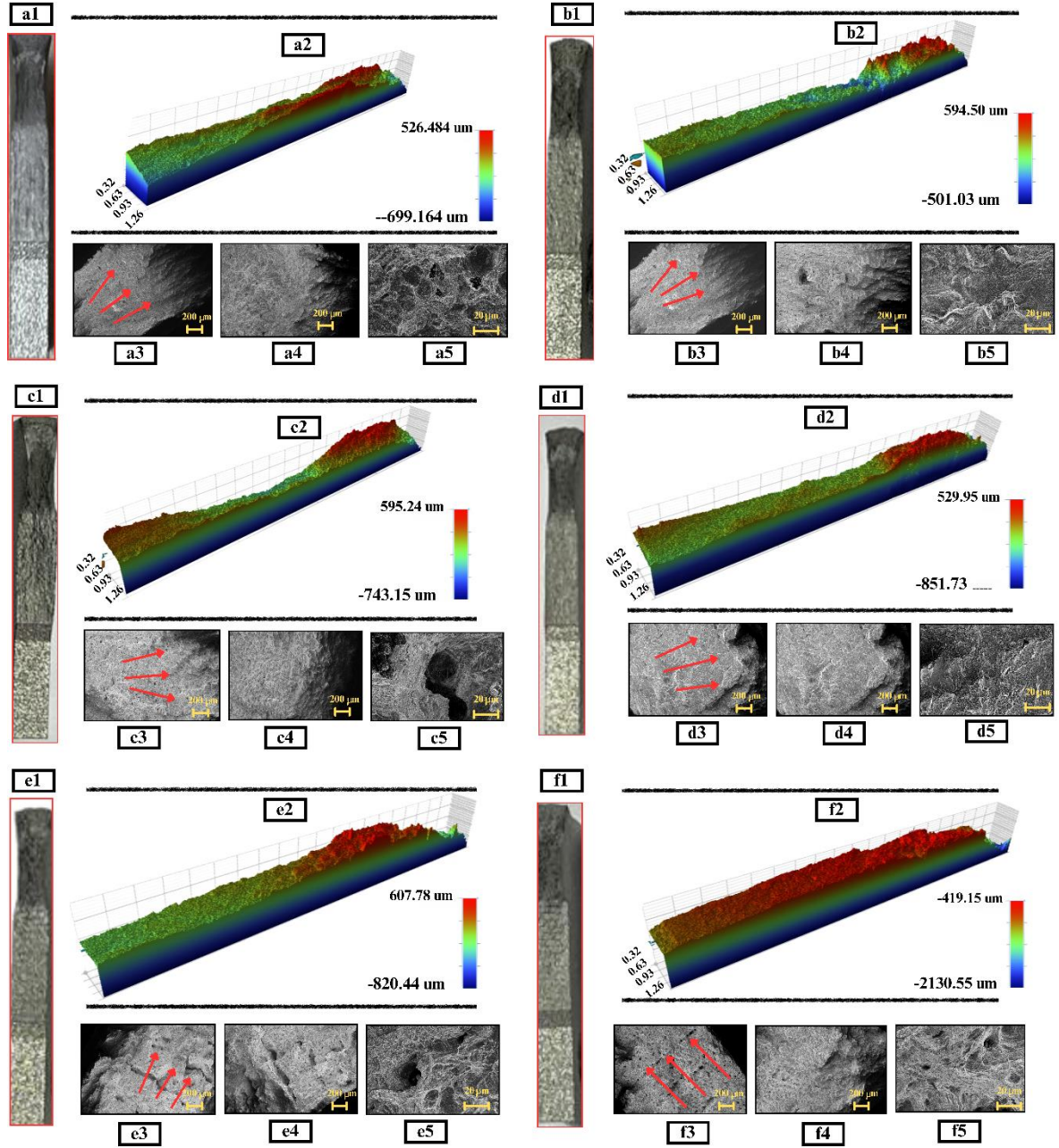


**Şekil 52.** Geleneksel üretim yöntem ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunenin çatlak ilerlemesi sonrası 3D profilometre ve SEM görüntüleri

Şekil 53'te SLM ile dik üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi sonucu elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil içerisinde (1) ile belirtilen görüntü kırılma yüzeyinin genel görüntüsünü, (2) numaralı görüntü yüzey profilini ve (3-4-5) şeklinde belirtilen görüntüler kırılma yüzeyinin detaylı incelenebilmesi için SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 53'te verilen kırılma yüzeyine ait numune görüntüsünde açık bir şekilde çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve kırılması şeklinde üç farklı bölgenin varlığı görülmektedir. Açık renkli olarak verilen çatlak başlangıcı ve ilerleme bölgesinin daha az pürüzlü olduğu, koyu renkli olarak görülen kararsız bölgelerin ise oldukça pürüzlü olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum 3D

profilometre görüntüleri ile desteklenmiştir. Kırılma bölgelerindeki pürüzlerin oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 53'te verilen kırılma morfolojilerinde çatlağın hem ilerleme hem de kırılma bölgelerinde gaz gözenekleri, füzyon eksikliği ve ergimemiş partiküller gözlemlenmiştir. Bu kusurlar, yorulma çatlak ilerlemesi davranışı açısından ömürde azalmaya sebebiyet veren bir durumdur. Ancak SLM üretim prosesinden kaynaklı olarak yapı içerisinde meydana gelen artık gerilmelerin yorulma çatlak ilerleme davranışı üzerindeki etkisi kusurların önüne geçmiştir. Genel olarak, düz üretim yönteminde chessboard stratejisine göre daha fazla kusur varlığı sergilemektedir. Bu durumun, ergime havuzunun örtüşme potansiyeli ve kısa tarama vektörü ile alakalı bir durum olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştır. Ayrıca chessboard üretim stratejisinde düz stratejiye göre daha dolu bir yapı elde edildiği ve bu durum yorulma çatlak ilerleme davranışını geliştirmektedir. Şekil 53-e ve Şekil 53-f'de kırılma morfolojisi yorulma çizgilerine ek olarak ikincil çatlaklardan da oluşmaktadır. Yorulma çizgileri malzemenin çatlak ilerleme hızı hakkında bilgi vermektedir. Yorulma çizgilerinin aralığının sıklığı ne kadar hızlı bir şekilde çatlak ilerleme davranışı sergilediğini gösterir.



**Şekil 53.** Dik üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi sonucu elde edilen kırık yüzey görüntüleri a) Düz strateji 800 mm/s b) düz strateji 1000 mm/s c) düz strateji 1200 mm/s d) chessboard strateji 800 mm/s e) chessboard strateji 1000 mm/s f) chessboard strateji 1200 mm/s

Geleneksel ve kalınlık boyunca düz ve chessboard stratejisi ile üretilen SLM numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi eğrileri (a-N) ve çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu ( $da/dN$ -a) eğrileri sırasıyla Şekil 54 ve Şekil 55'te verilmiştir. Yorulma çatlak ilerlemesi sonucu elde edilen görüntülerin çatlak boyu-çevrim sayısına göre gösterimi Şekil 56'da verilmiştir.

Katman yöneliminin etkisini incelemek amacıyla Şekil 49'da verilen aynı tarama hızı ve stratejisi olmak üzere yatay yönde kalınlık boyunca üretilen numunelerin çatlak ilerleme davranışı incelenmiştir. Dikey olarak üretilen numunelerde yüksek bir en boy oranı mevcutken, kalınlık boyunca yatay üretilen numunelerde oldukça düşük en/boy oranı elde edilmektedir. Bu

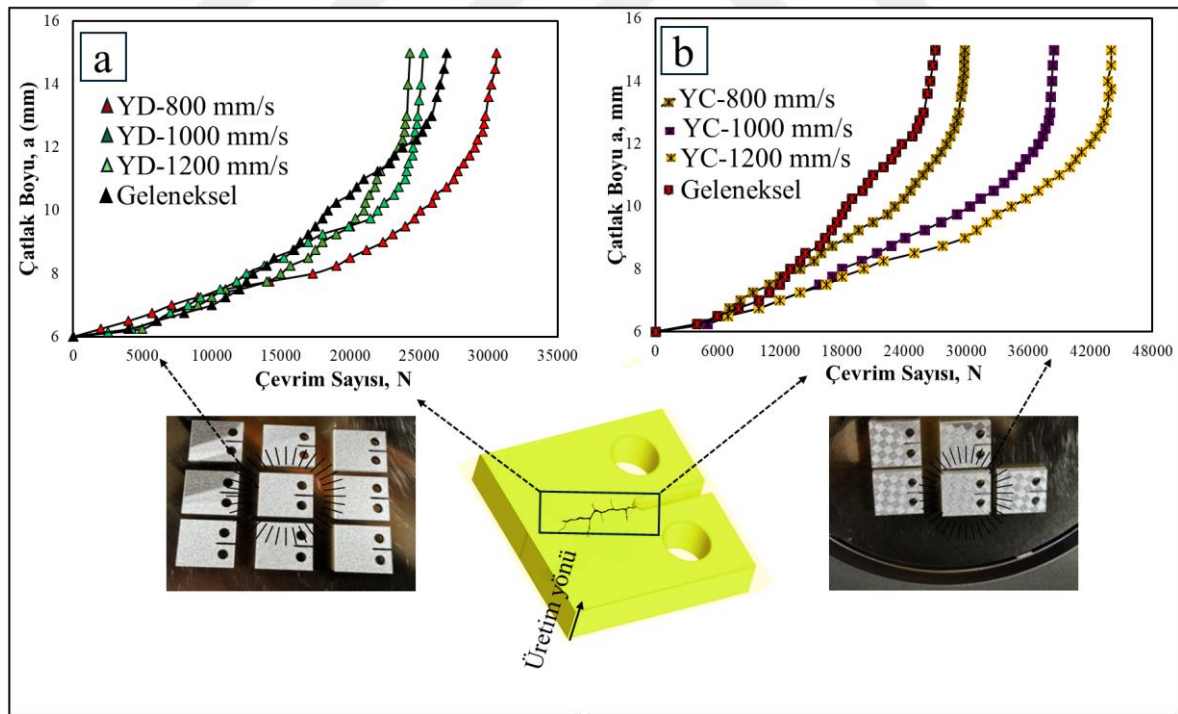
durum SLM üretim kaynaklı oluşan termal geçmişi etkileyerek yapısal değişikliğe sebebiyet vermektedir. Katman yöneliminin yorulma çatlak ilerlemesi davranışı üzerindeki en büyük etkisi gözeneklilik özellikleri olduğu belirtilmiştir. Özellikle füzyon eksikliğinden kaynaklı olarak meydana gelen gözeneklerin boyutları ve şekli çatlak ilerlemesi açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. Füzyon eksikliğinden kaynaklanan gözeneklerin yatay üretilen numunelerde dikey üretilen numunelere göre daha az olduğu literatürde belirtilmiştir (Yadollahi *et al.*, 2017). Katman yönelimi ile meydana gelen boşluklar çevrimsel yüklemeye sonucu büyük gerilim konsantrasyonlarına sebebiyet vermektedir. Ayrıca dikey üretilen numunelerde daha büyük gözenek boyutu elde edilmektedir. Bu durum yorulma çatlak ilerleme ömrünü olumsuz etkilemektedir. Yatay üretilen numunelerin çatlak ilerleme ömrü (Şekil 54), dikey üretilen numunelerden (Şekil 49) daha yüksektir. Bu duruma ek olarak, yatay olarak üretilen numunelerde kalınlık boyunca bir üretim olduğundan dolayı çatlakın katmanlar boyunca karşılaşacağı çatlak durdurma mekanizmalarının daha fazla olduğu düşünülmektedir.

Malzeme içerisindeki gözeneklerin/kusurların yanı sıra tane yönelim veya morfolojisi malzemenin anizotropik davranışını değiştirerek yorulma çatlak ilerlemesi üzerinde etkilidir. Şekil 57 şematik olarak yatay ve dikey üretim yönelimini göstermektedir. Dikey katman yöneliminde tanelerin çatlak ilerleme yönü ile aynı yönde uzamış bir şekilde büyümektedir (Riemer *et al.*, 2014). Bu durum çatlak ilerlerken yatay olarak kalınlık boyunca üretilene kıyasla daha kolay ilerlemesine neden olmaktadır. Yatay katman yöneliminde üretilen numunelerde çatlak ilerlerken farklı tane boyutlu ve daha karmaşık ve yönsüz bir yapı ile karşılaşarak zikzaklı bir ilerleme davranışı sergilediği düşünülmektedir. Ayrıca yatay olarak üretilen numunelerin yapı içerisinde boşluk vs. kusurların daha az olması sebebiyle yatay olarak üretilen numuneler dikey olarak üretilenlere göre daha yoğunluğu yüksektir. Bu durum da yorulma çatlak ilerleme davranışını geliştiren bir olgudur.

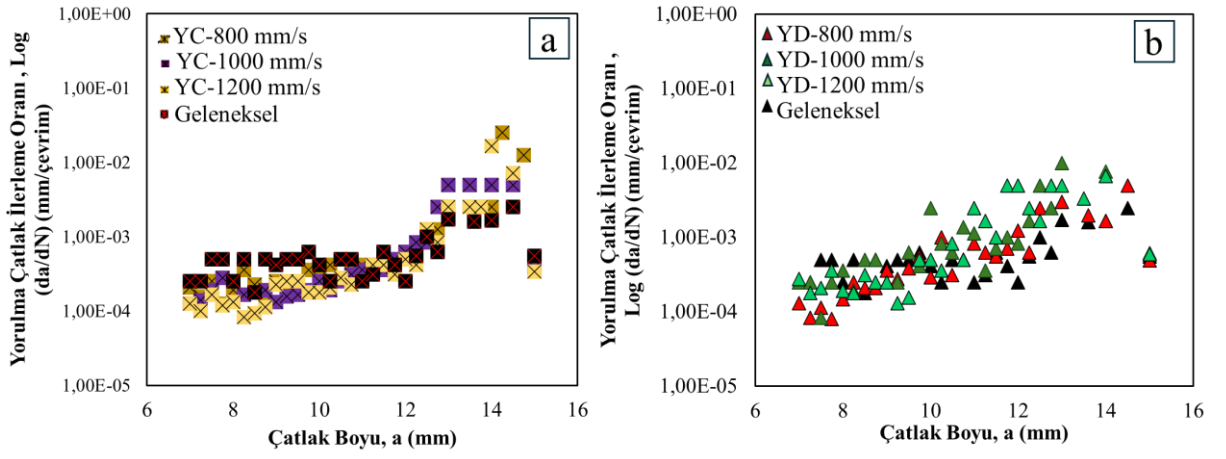
Şekil 54-a'da düz üretim stratejisi ile üretilen numunelerin çatlak boyu (a)-çevrim sayısı (N) grafiği verilmiştir. Şekil 49-a'da verilen dik katman yönelimi ve düz üretim yöntemine göre yorulma çatlak ilerleme ömründe oldukça büyük gelişim gözlemlenmiştir. D-800 mm/s numunesinde 11.095 (%100) çevrim elde edilirken YD-800 mm/s numunesinde 30.604 (%275) çevrim elde edilmiştir. Aynı şekilde D-1000 mm/s numunesinde 13.008 (%100) çevrim elde edilirken YD-1000 mm/s numunesinde 24.336 (%187,08) çevrim elde edilmiştir. Referans numuneye göre (D-800 mm/s) ise YD-1000 mm/s numunesi %219,34 ömür artışı sergilemiştir. D-1200 mm/s numunesi 14.008 (%100) çevrim iken YD-1200 mm/s de çevrim sayısı 25.098 olarak elde edilmiştir. Dik üretim yöntemine kıyasla bu değer %179,17 artmıştır. Yatay katman yöneliminde en yüksek çatlak ilerleme ömrü D-800 mm/s de elde edilmiştir. Bu durum bir

önceki (Şekil 49) üretim ile farklıdır. Yatay katman yöneliminde düz üretim stratejisi kullanıldığı zaman 800 mm/s tarama hızında üstün gelişim sergilemiştir. Bu durum SLM üretim doğası gereği karmaşık mikro yapısı, artık gerilme ve gözeneklilik dağılımı ile meydana gelen anizotropik yapı ile ilişkilidir.

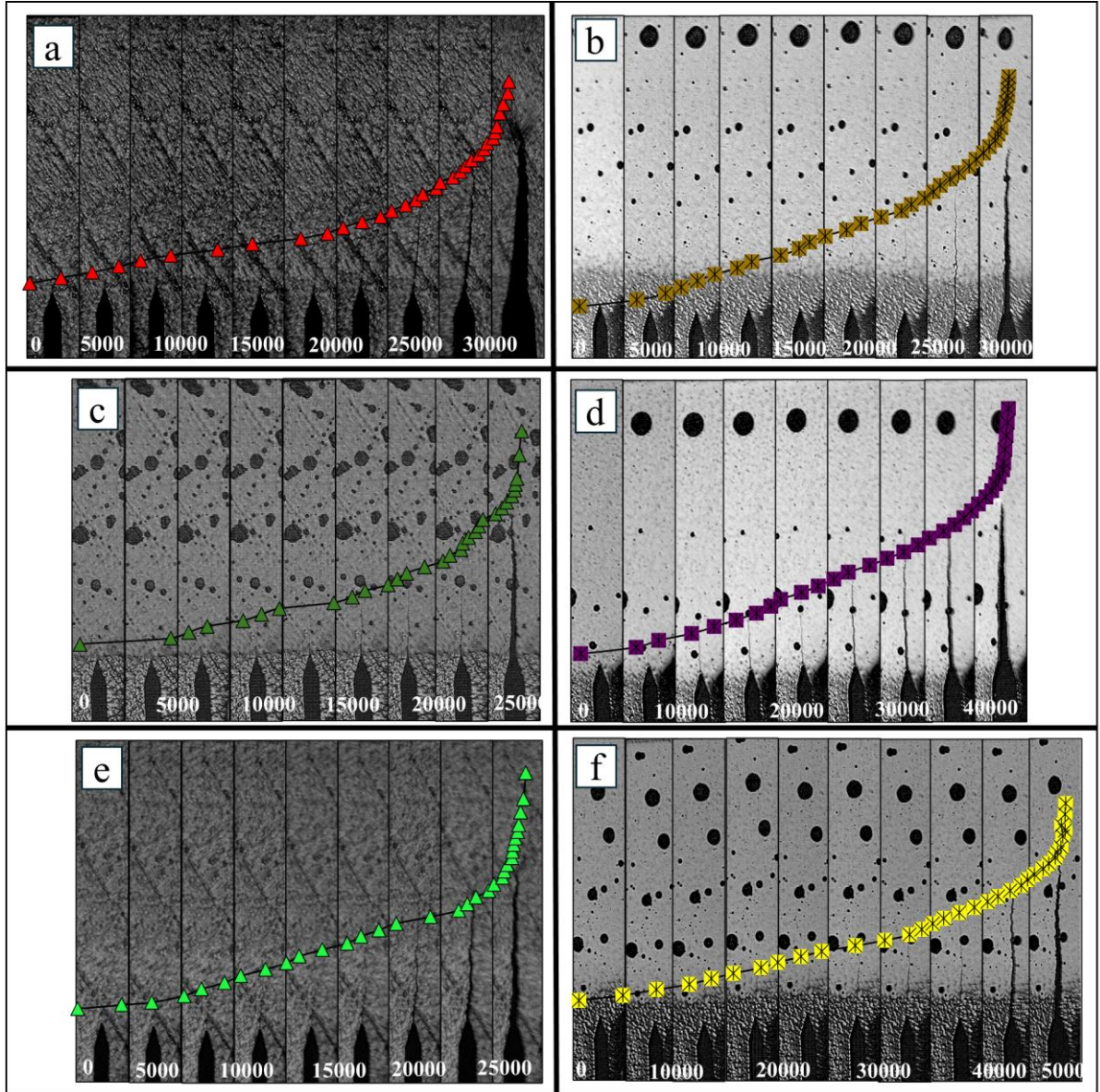
Şekil 54-b’de verilen yatay katman yönelimi ve chessboard tarzı üretim yönteminde düz üretim yöntemine kıyasla yorulma çatlak ilerleme çevrim sayısında artış meydana gelmiştir. Bu durum yapı içerisindeki kusurların, ikinci faz partiküllerin ve özellikle LOF gözeneklerinin daha az olması ile ilişkilendirilmektedir. Yatay katman yönelimi ve chessboard tarama stratejisinde diğer gruplardan farklı olarak tüm tarama hızlarında geleneksel yöntemle göre ömür artışı meydana gelmiştir. Bu durum SLM üretim parametrelerinin uygunluğu ile doğrudan ilişkilidir. Bu parametreler sayesinde yapı içerisindeki boşluk miktarı, termal gradyan ve artık gerilme gibi birçok çatlak ilerleme davranışını etkileyen özellikler istenilen seviyede tutulabilmiştir. YC-1200 mm/s numunesinde 44.030 çevrim sayısı elde edilerek referans numuneye göre yaklaşık olarak %396 gelişim gözlemlenmiştir. Bu durum çatlak ilerleme davranışı açısından oldukça iyi bir sonuçtur. Yatay katman yönelimi ve chessboard stratejisinde kendi içerisinde en düşük ömre sahip YC-800 mm/s numunesi dahi %269 oranında gelişim göstermiştir.



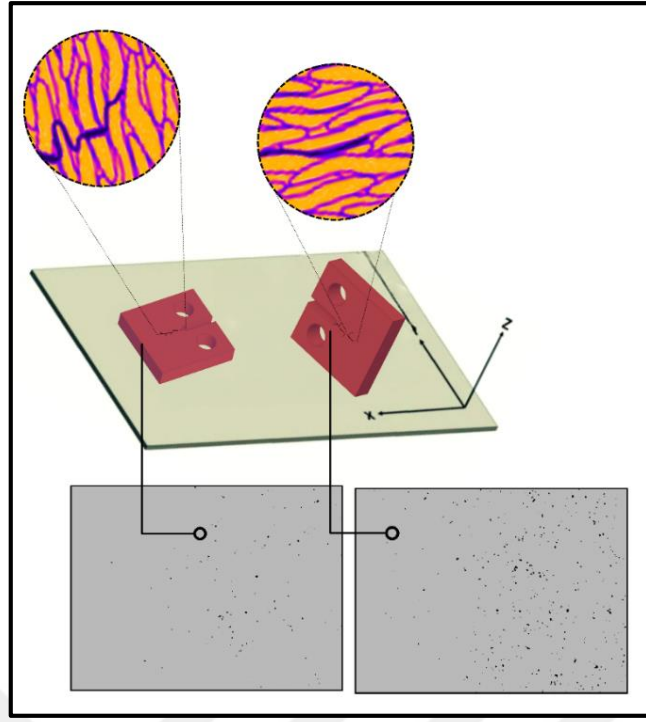
**Şekil 54.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile: a) Kalınlık ve düz strateji ile üretilen ve b) Kalınlık ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrisi



**Şekil 55.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile a) Kalınlık ve düz strateji ile üretilen ve b) Kalınlık ve chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri



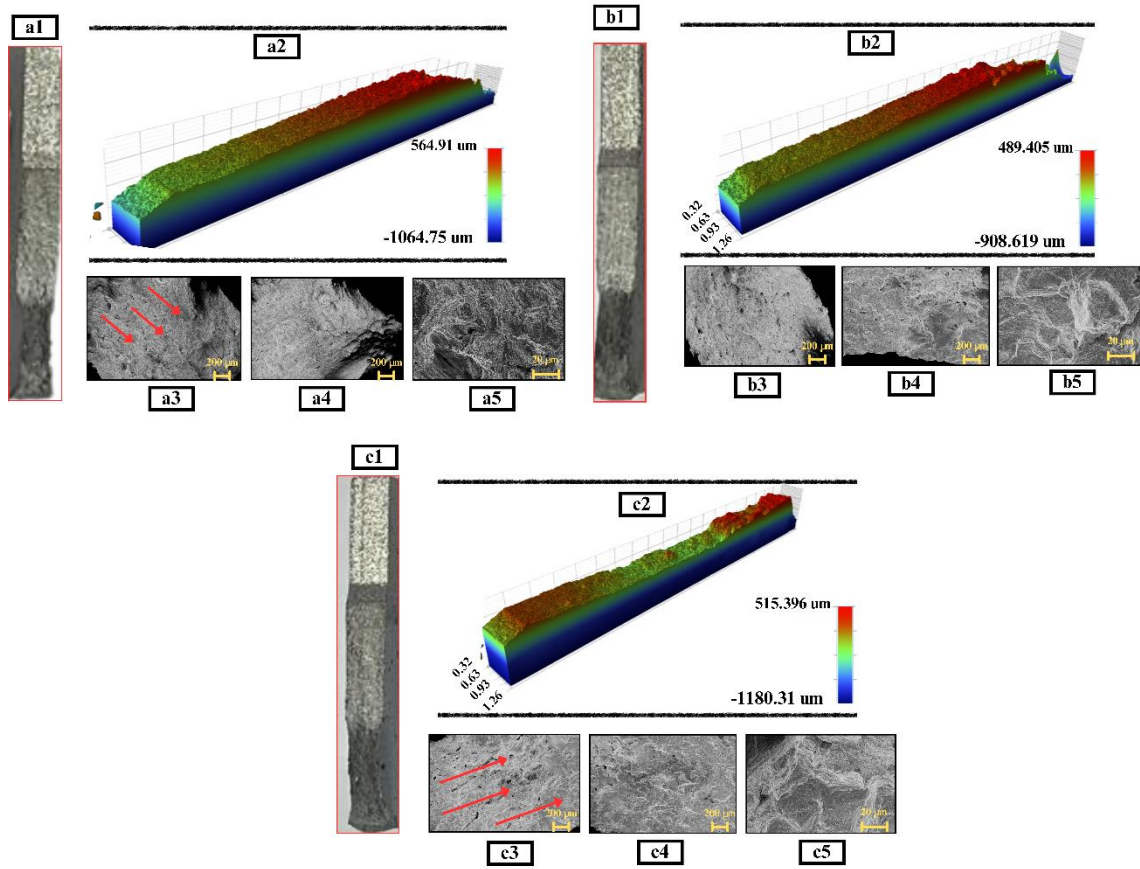
**Şekil 56.** Kalınlık boyunca üretilmiş numunelere ait çatlak ilerlemesi görüntüleri: a) Düz strateji 800 mm/s, b) chessboard strateji 800 mm/s, c) düz strateji 1000mm/s, d) chessboard strateji 1000 mm/s, e) düz strateji 1200 mm/s ve f) chessboard strateji 1200 mm/s



**Şekil 57.** SLM yöntemi ile yatay ve dikey yönde üretimin şematik gösterimi ve gözenek değişimi

SLM yöntemi ile kalınlık boyunca üretilmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme sonrası kırılma fraktografisi Şekil 58’de verilmiştir. Şekil içerisinde (1) ile belirtilen görüntü kırılma yüzeyinin genel görüntüsünü, (2) numaralı görüntü yüzey profilini ve (3-4-5) şeklinde belirtilen görüntüler kırılma yüzeyinin detaylı incelenebilmesi için SEM görüntülerini göstermektedir. SEM görüntülerinde verilen kırmızı oklar çatlak ilerleme yönünü göstermektedir. Çatlak başlangıcına göre çatlak ilerlemesi ve kırılma bölgelerinde pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 58’de (a3), kırılma yüzeyinde yönlenmiş çatlak izleri bulunduğu ve bu durum çatlağın belirli bir doğrultuda ilerlediğini ifade etmektedir. Şekil 58’de (a4-a5), kırılma yüzeylerinde yırtılma sırtları (tear ridges) ve plastik deformasyon izleri gözlemlenmiştir. Ayrıca sünek kırılmayı işaret eden süngerimsi poroz bölgeler mevcuttur. Üretim yönteminden kaynaklı olarak ergimeyen bölge ve mikro boşluklar bulunmaktadır. Şekil 58’de (b3), oldukça fazla mikro boşluk ve yorulma çizgilerinin düzenli bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir (Şekil 58-b5). Ayrıca plastik deformasyon bölgeleri, ikincil çatlaklar ve yorulma sırtları gözlemlenmiştir (Şekil 58-b5). Şekil 58’de (c3), belirgin LoF gözlemlenmiştir. Ancak yapı içerisindeki artık gerilmelerin fazla olması çatlak ilerleme davranışı üzerinde daha baskın olduğu düşünülmektedir. Bu duruma ek olarak, Şekil 58’de (c3), kırık yüzey boyunca düzensiz yönlenmiş çatlak izleri yer almakta olup, çatlağın sık sık yön değiştirdiği anlaşılmaktadır. Bu durum yorulma çatlak ilerleme davranışının diğer numunelere göre daha yüksek olmasını açıklar niteliktedir. Yapı içerisinde gözeneklerin fazla olması yorulma çatlak

ilerlemesi açısından kusurlu bir davranış olmasına rağmen yapı içerisinde meydana gelen artık gerilme bu numune grubu için daha ağır bastığı düşünülmektedir.



**Şekil 58.** SLM yöntemi ile kalınlık boyunca üretilmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme sonrası SEM görüntüleri a) YC-800 mm/s b) YC-1000 mm/s ve c) YC-1200 mm/s

Düz ve chessboard stratejisi ile tabakalı bir şekilde üretilen SLM ve geleneksel numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi eğrileri (a-N) ve çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu ( $da/dN$ -a) eğrileri sırasıyla Şekil 59 ve Şekil 60'ta verilmiştir. Çalışmanın bu kısmında, farklı tarama hızları kullanarak sedef yapısına benzer yumuşak/sert faza benzer bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca yengeç kısıcında olduğu gibi gradyen yapı elde etmek amacıyla farklı üretim stratejileri kullanılmıştır. Bu tez kapsamında tabakalı yapıya sahip numunelerin asıl amacı yapı içerisinde hem dayanım ve sertliği yüksek yapı elde etmek hem de çatlak ilerleme açısından incelendiği zaman sünekliği yüksek üstün yorulma dayanımına sahip malzeme elde etmektir. Yani yüksek mukavemet ve süneklik kompozisyonu oluşturmak hedeflenmiştir. Tez kapsamında ilk grupta statik testler ile sertlik ve elastisite modülü açısından uygun parametreler olarak yumuşak faz 800 mm/s, sert faz ise 1200 mm/s olarak belirlenmiştir. Tabakalardaki yumuşak/sert faz oranı 1/2 olacak şekilde üretim tabaka kalınlıkları seçilmiştir.

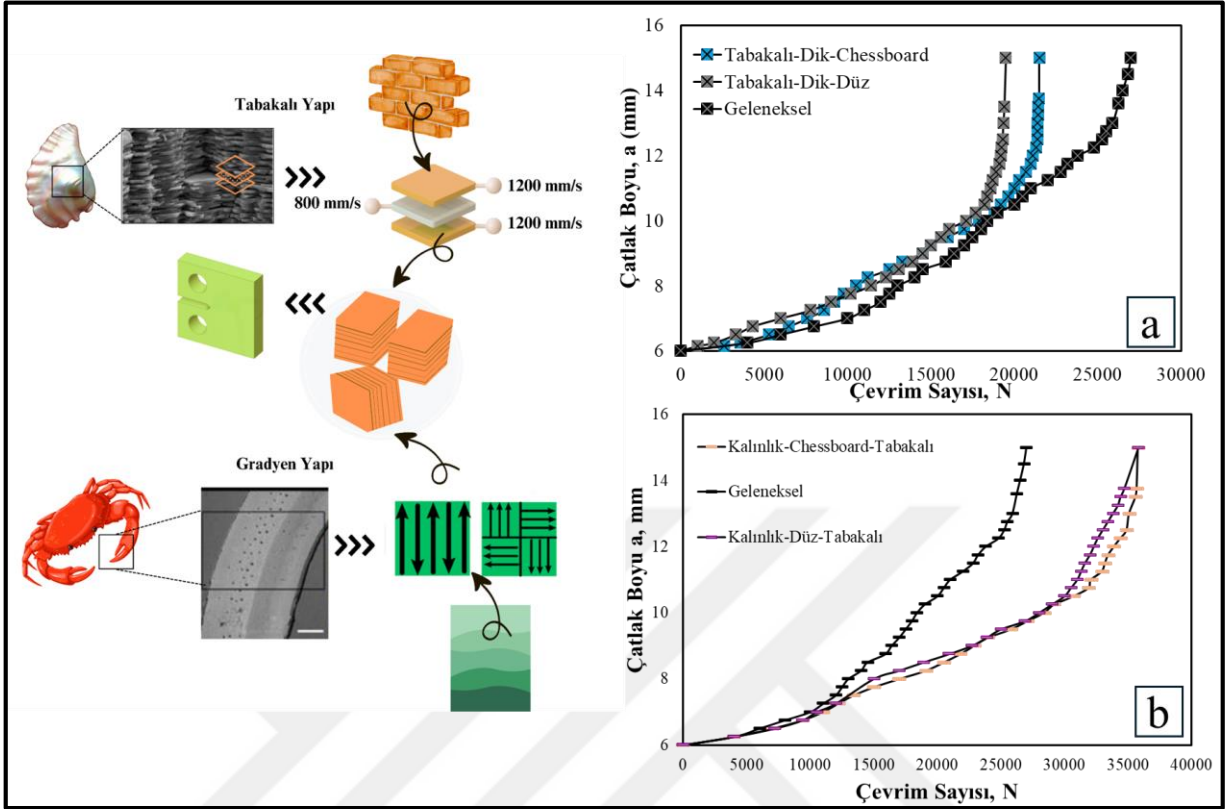
Tabakalı numunelerde hem dik hem de kalınlık boyunca üretilenlerin Chessboard stratejisi yüksek ömür davranışı tespit edilmiştir. Chessboard stratejisinde üretilen numunelerde

yapı içerisinde gözenek gibi kusurların azaldığı düz üretime kıyasla daha yoğun bir yapıya sahip olduğu ve bu durumun bir sonucu olarak da yüksek yorulma çatlak ilerlemesi ömrü sergilemektedir. Chessboard tarama stratejisinde daha önce bahsedildiği gibi küçük adacıklar ısı saçılım merkezleri olarak davranarak hızlı ve düzenli şekilde soğuma gerçekleşir böylece yapı içerisindeki kusurlar düz üretime kıyasla oldukça azalmaktadır. Böylece hem yoğunluk artışı ile mekanik performansa fayda sağlamış hem de çatlağın başlaması ve hızlanmasına yardımcı olabilecek kusurlar en aza indirilmiştir.

Şekil 59-a'da tabakalı dik katman yönelimine ait çatlak ilerlemesi eğrisi verilmiştir. Geleneksel üretim yöntemine kıyasla tabakalı dik yönelimde daha düşük ömür elde edilmiştir. Ancak dik katman yönelimindeki tüm grup numunelere göre (Şekil 47) üstün yorulma çatlak ilerleme davranışı sergilemiştir. Referans numune (D-800 mm/s 11.095 çevrim) ile kıyaslanırsa, tabakalı-dik-düz ve tabakalı-dik-chessboard numunelerinde sırasıyla %110,26 ve %193,78 ömür artışı gözlemlenmiştir. Şekil 54-b'de tabakalı bir şekilde kalınlık katman yönelimindeki numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi eğrisi verilmiştir. Çatlak ilerleme eğrisinden görüldüğü üzere geleneksel üretim yöntemine göre oldukça yüksek ömür elde edilmiştir. Geleneksel üretim yönteminde 27.000 çevrim sayısı elde edilirken kalınlık yönelimde üretilen tabakalı numunelerde yaklaşık 35.800 yorulma çatlak ilerleme ömrü elde edilmiştir.

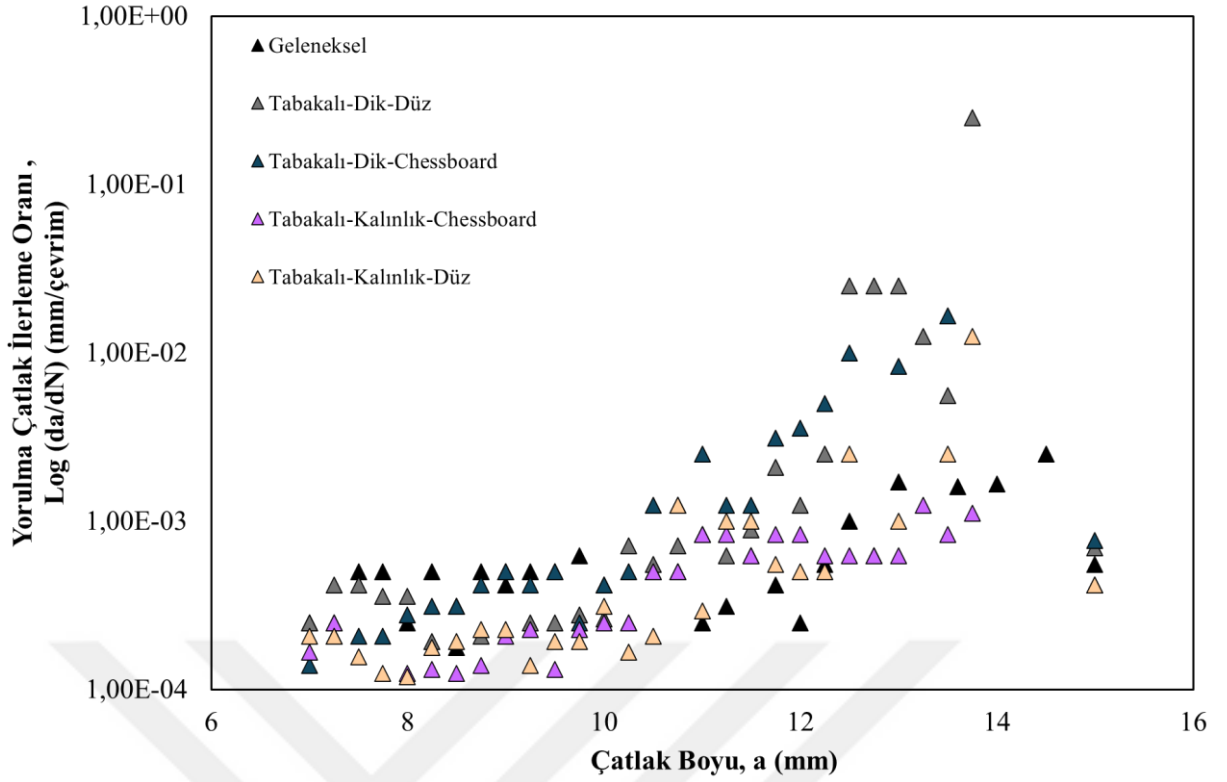
Tabakalı yapıda çatlak ilerlerken değişken fazlara geçerek çatlak ilerleme davranışı diğer grup numunelere göre değişkenlik göstermektedir. Yumuşak/sert faz yapısında, çatlağın ilerlemesi yavaşlatılarak çatlağın yön değişimi/yayılmı meydana gelmektedir. Özellikle tabakalı yapı çatlak saptırma, çatlak dallanması ve bağ köprülenmesine (bridging of uncracked ligaments) neden olduğundan dolayı yorulma çatlak ilerleme ömründe artış meydana getirmektedir [(Li *et al.*, 2021; Weiner *et al.*, 2000). Tabakalı bir yapı ile karşılaşan çatlak tabakayı aşabilmek için tek tabakalı numunelere göre daha fazla enerji harcaması gerekmektedir. Özellikle sert fazın bulunduğu tabakada ilerleyen çatlağın yayılımı ve sapsması gerçekleşerek çatlak enerjisinin büyük bir kısmını harcamaktadır. Bunun yanı sıra, sert faza geçişte çatlak doğrudan ilerleyemez, yön değiştirerek bir sonraki tabakaya yönelir. Bu mekanizma, çatlak enerjisini dağıtarak kırılmayı geciktirir. Böylece yorulma çatlak ilerleme ömründe gelişme sağlanmaktadır. Özellikle yumuşak faz, sabit genlikli yük altında enerji sönmüleme ve deformasyonu yönlendirme açısından kritik bir rol oynar. Yumuşak faz çatlak yönünü değiştirir, çatlağın dallanmasına ve yükün geniş bir alana yayılmasına neden olur. Böylece çatlak ilerleme direncini artırarak tabakalı olmayan numunelere göre üstün hale gelmektedir. Tabakalı yapı sayesinde çatlak, diğer tüm numuneler gibi tek bir düzlemde

ilerleyemez, yön değiştirerek dallanır ve yayılımı zorlaşır. Tabakalı yapı sayesinde kırılma mekanizması kontrollü ve yavaş gerçekleşmektedir.



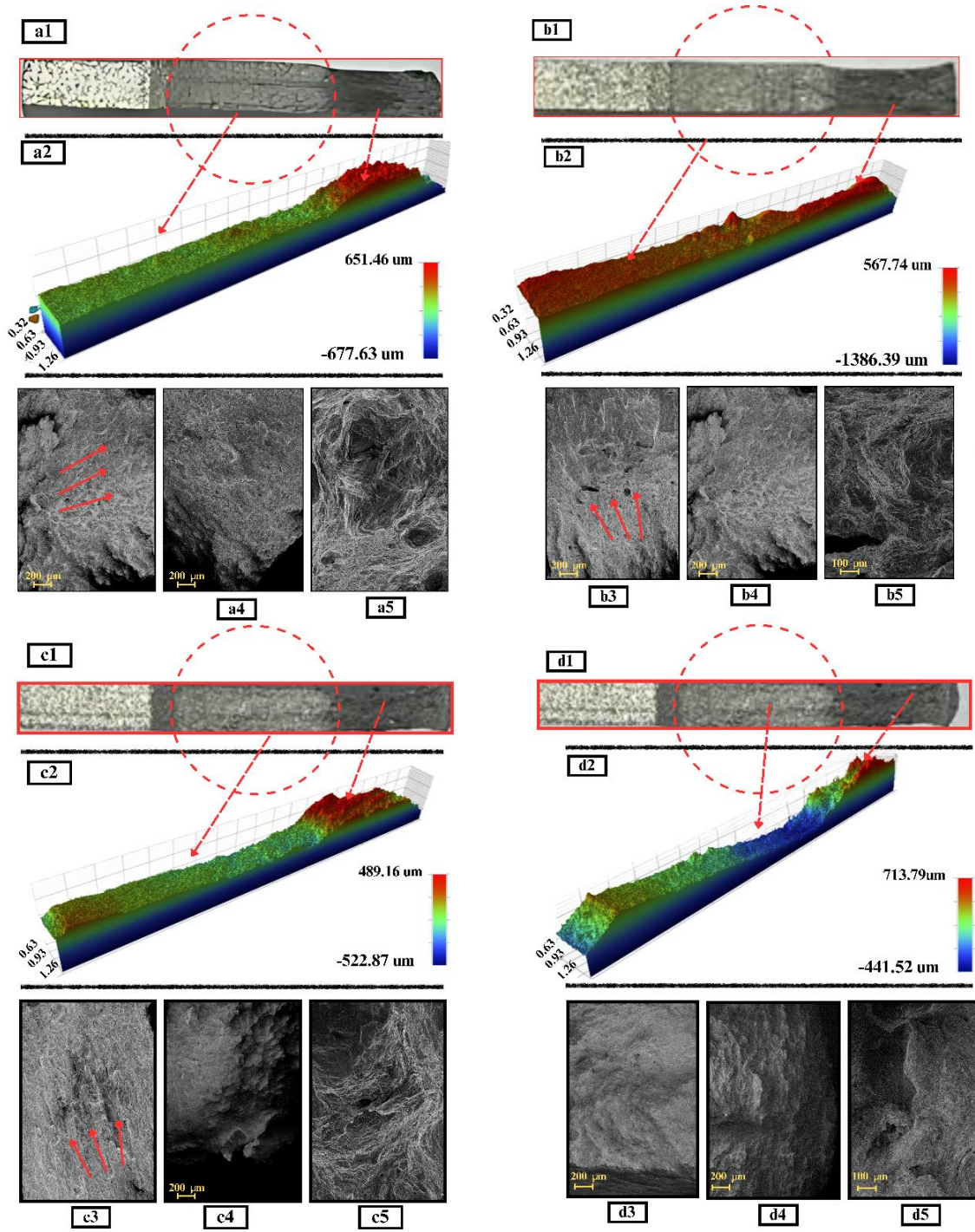
**Şekil 59.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile a) Tabakalı ve dik üretim yönünde üretilen ve b) Tabakalı ve kalınlık boyu üretim yönünde üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme eğrisi

Tabakalı bir şekilde SLM ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme sonrası kırılma fraktografisi incelemek amacıyla 3D profilometre ve SEM görüntüleri Şekil 61’de verilmiştir. Şekil içerisinde (1) ile belirtilen görüntü kırılma yüzeyinin genel görüntüsünü, (2) numaralı görüntü yüzey profilini ve (3-4-5) şeklinde belirtilen görüntüler kırılma yüzeyinin detaylı incelenebilmesi için SEM görüntülerini göstermektedir. SEM görüntülerinde verilen kırmızı okların yönü çatlak ilerleme yönünü göstermektedir. 1 numaralı görüntüde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi bölgeleri daha açık renkte görülürken kırılmanın gerçekleştiği düzensiz çatlak ilerleme bölgesi oldukça koyu renkte olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum yüzeydeki pürüzlerin bu bölgelerde daha da artmasına bağlanabilir. 2 numaralı görselde verilen 3D profilometre görüntüleri bu durumu destekler niteliktedir. Çatlak ilerleme ve kırılma bölgelerde yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle düzensiz çatlak ilerleme bölgesinde daha pürüzlü bir yapı elde edilmiştir.



**Şekil 60.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile tabakalı üretilen numunelerin çatlak ilerleme oranı-çatlak boyu (da/dN-a) eğrileri

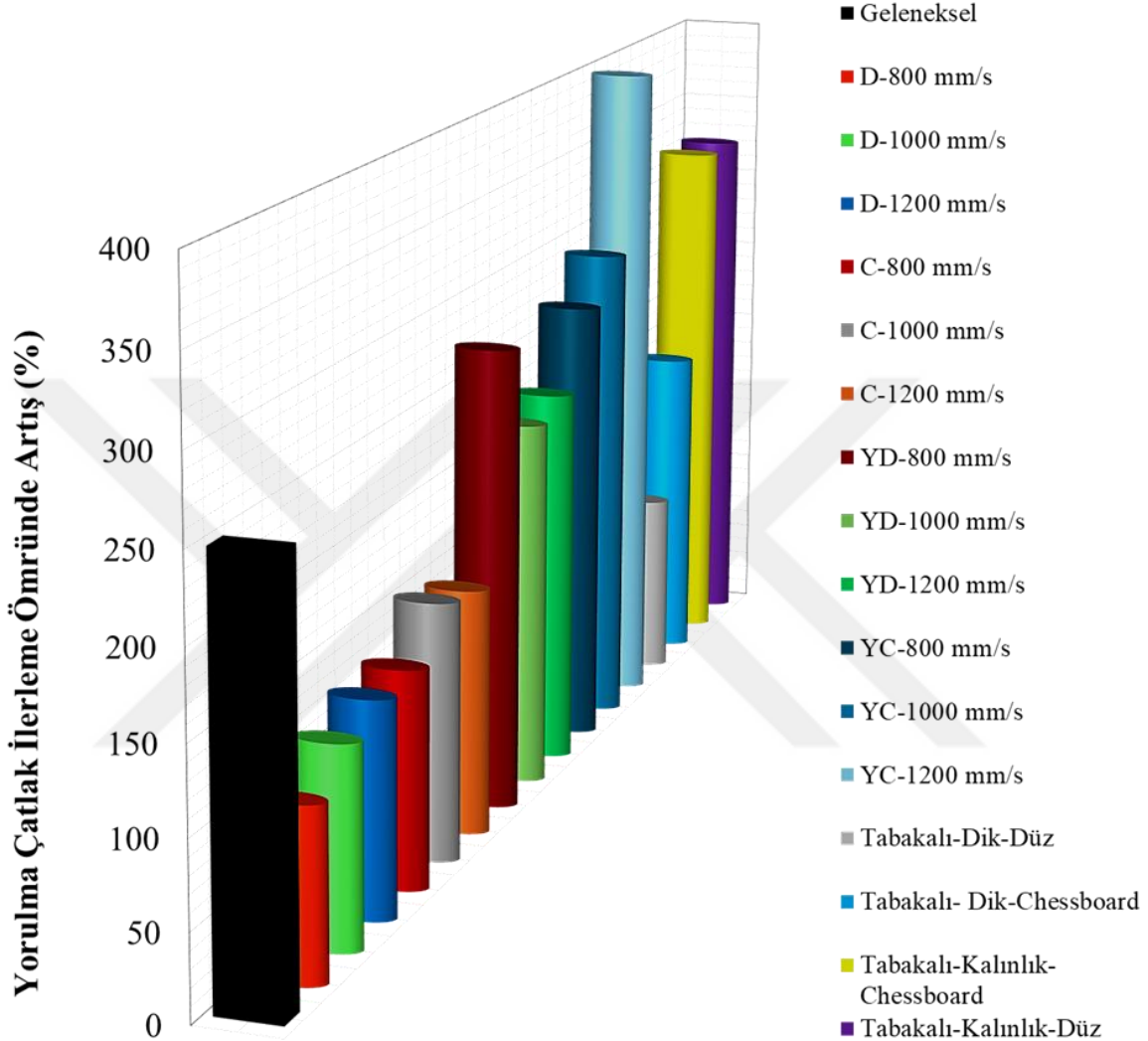
Malzeme içerisinde bulunan boşluk, çatlak vsb kusurlar çevrimsel yükleme ile birleşerek makro boyutlu çatlağın oluşumuna sebep olmaktadır. Şekil 61’de (a4) görüldüğü üzere kusurların oldukça az olduğu yoğunluğu yüksek bir yapı elde edilmiştir. Yapı içerisindeki kusurların neredeyse tamamen giderilebildiği üretim parametrelerinin elde edildiği söylenebilir. Şekil 61’de (a5) verilen SEM görüntüsünde lifli bir yapı ve yorulma çizgileri (striations) görülmektedir. Bu, yorulma çatlağının kademeli bir şekilde yükleme döngüleri boyunca oluştuğunu ifade etmektedir. Lifli poroz yapısı sünek kırılmanın baskın olduğunu gösterir niteliktedir. Ayrıca yapı içerisinde inklüzyonlar ve ayrılma bölgeleri gözlemlenmiştir. Şekil 61-b’de daha fazla gözenek, çatlak ve LoF kusurlarının varlığı bulunmuştur. Şekil 61’de (b2) verilen 3D profilometre görüntüsüne göre yüksek miktarda yükseklik farkı-pürüzlülük elde edilmiştir. Bu durum çatlağın hızlı ve düzensiz yayıldığını göstermektedir. Şekil 61’de (b4) ikincil çatlakların oluştuğu ve yırtılma sırtları gözlemlenmiştir. Şekil 61’de (c2) kırılmanın gerçekleştiği bölgede yüksek pürüzlülük elde edilmiştir. Yapı içerisinde gaz gözeneklerinin varlığı gözlemlenmiştir. Şekil 61’de (c5) yapı içerisinde ikincil çatlakların bulunduğu ve bu çatlakların gerilme yoğunlaşması, kusurlar ve artık gerilmeler sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 61-a ve Şekil 61-d’de verilen SEM görüntülerinde, numunenin diğer numunelere göre daha az boşluk içerdiği gözlemlenmiştir. Şekil 61’de (d5), yorulma izlerinin daha belirsiz olduğu ve sünek kırılmayı işaret eden mikro boşlukların varlığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 61.** Tabakalı bir şekilde SLM ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme sonrası SEM görüntüleri a) Tabakalı Kalınlık-Chessboard üretim b) Tabakalı-Dik-Chessboard üretim c) Tabakalı Dik-düz üretim ve d) Tabakalı- Kalınlık- Düz Üretim

Elde edilen sonuçlar neticesinde, yatay olarak üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi performansının dik üretilen numunelere göre daha iyi olduğu ispatlanmıştır. Malzemenin yoğunluğu, kusurların mevcudiyeti ve artık gerilmeler gibi önemli parametrelerin yorulma çatlak ilerleme davranışı üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir. Şekil 62’de tüm numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi ömrünün tarama hızı ve tarama stratejisine göre değişimi verilmiştir. Chessboard stratejisi ile üretilen numunelerde düz üretime göre daha

düşük çatlak ilerleme hızı gözlemlenmiştir. Kalınlık boyunca üretilen numunelerin sahip olduğu yüksek doluluk oranı, düşük kusurların mevcudiyeti ve artık gerilme sebebiyle oldukça yüksek yorulma çatlak ilerleme ömründe artış meydana getirmiştir. Tabakalı olarak üretilen numunelerde ise tek parametre ile üretilen numunelerin çoğuna göre gelişme gözlemlenmiştir.



**Şekil 62.** Geleneksel ve SLM ile üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerlemesi ömrünün tarama hızı ve tarama stratejisine göre değişimi

### Değişken Genlikli Yorulma Çatlak İlerleme Analizleri: Çeki Aşırı Yükleme (OL)

Geleneksel ve farklı parametrelerde SLM ile üretilen numunelere ait tekil çeki aşırı yüklemesi (overload-OL) sonucu elde edilen a-N grafikleri Şekil 63'te verilmiştir. Elde edilen verilere göre, tüm grup numunelerde OL yüklemesi sonucu yorulma çatlak ilerleme ömründe artış gözlemlenmiştir. OL sonucu çatlak gecikmesi meydana geldiği ve bu durum çatlak ilerleme ömründe artışa sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 63-a'da düz üretilen numunelere ait a-N eğrileri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sabit genlikli yükleme durumunda belirtilen yorulma çatlak ilerlemesi ömrü ile aynı şekilde bir sıralama elde edilmiştir. Dik ve düz üretilen numuneler arasında D-1200 mm/s numunesinde toplam ömür

101.700 çevrim elde edilirken D-800 mm/s numunesinde bu değer 61.679 çevrim olarak bulunmuştur. Sabit genlikli yükleme durumunda D-800 ve D-1200 mm/s numunelerinde sırasıyla 11.095 ve 14.008 çevrim elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığı zaman oldukça yüksek oranlarda yorulma çatlak ilerleme ömrü elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu bölümde ele alınan veriler kendi içerisinde bir kıyaslama yapılabilmesi için SGY+OL yükleme durumu için D-800 numunesi %100 (61.680 ömür) olarak kabul edilmiş ve diğer tüm numuneler bunun ile yüzdesel olarak kıyaslanmıştır. Şekil 63-b'de chessboard stratejisinde üretilen numunelere ait a-N eğrileri verilmiştir. Referans numuneye göre ömür kıyaslandığında, D-1000 ve D-1200 numunesinde sırasıyla %116 %164 gelişme gözlemlenmiştir. Aynı şekilde dik katman yöneliminde chessboard stratejisindeki numunelerin yorulma çatlak ilerleme ömrü en yüksekten düşüğe doğru sırası ile C-1200 mm/s, C-800 mm/s ve C-1000 mm/s şeklindedir. Referans numuneye göre, C-1000 numunesi %11 oranında daha düşük bir ömür davranışı sergilemiştir. Bununla birlikte, C-1200 numunesinde %122 gelişme gözlemlenmiştir. Sabit genlikli yükleme durumu ile her bir numune kendi içinde C-1200 mm/s, C-800 mm/s ve C-1000 mm/s şeklinde kıyaslandığında sırasıyla %369,61, %389,67 ve %117,69 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Özellikle C-800 mm/s numunesinde yorulma çatlak ilerleme ömründeki çok yüksek artış dikkat çekmektedir. Sabit genlikli yükleme durumunda diğer numunelere göre oldukça düşük bir ömür davranışı sergileyen C-800, OL durumunda yorulma ömründe üstün gelişim gözlemlenmiştir. Aynı durum D-800 numunesinde de gözlemlenmiştir. OL yüklemesi durumunda sabit genlikli yüklemeye elde edilen ömür değerinden (11.095) yaklaşık olarak %600 iyileşme davranışı sergilemiştir. Yatay katman yöneliminde düz stratejide numunelerin yorulma çatlak ilerleme ömrü YD-800 mm/s, YD-1200 mm/s ve YD-1000 mm/s şeklinde sıralanırken; chessboard stratejisindeki numunelerin yorulma çatlak ilerleme ömrü en yüksekten düşüğe doğru sırası ile YC-800 mm/s, YC-1000 mm/s ve YC-1200 mm/s şeklindedir. Elde edilen veriler ışığında, her bir grup numune için OL sonrası yorulma çatlak ilerleme ömründe çok yüksek miktarda artış elde edilmiştir. OL etkisi altındaki yükleme durumunda belirgin olarak beş evre meydana gelmektedir. İlk olarak OL öncesi kararlı evre aşamasında, SGY altında istikrarlı bir şekilde çatlak ilerlemesi meydana gelir ve çatlak büyümesinde mikro yapı ve yükleme durumları temel etkindir. İkinci ve üçüncü bölge olarak, anlık hızlanma ve ertelenmiş gecikme evresi denilen OL uygulandıktan sonra çatlak kapanmasının azalması ile çatlak ucu geçici olarak serbest hale gelir. Bu durum, çatlak büyüme oranında ani bir artışa yol açar. Çatlak ucundaki plastik deformasyonun artması, bu hızlanmayı daha da belirgin hale getirir. Üçüncü olarak, OL uygulamasının sebebiyet verdiği bası artık gerilmeleri, çatlak kapanma seviyesini artırarak çatlak büyüme hızında belirgin bir azalmaya yol açar. Bu süreçte, çatlak ilerlemesi önemli ölçüde yavaşlar ve belirli bir minimum büyüme

oranına ulaşır. Bu olgu, aşırı yükleme sonrası yorulma çatlak büyümesinde gecikme etkisi olarak adlandırılır. Son olarak OL sonrası kararlı evre olarak bilinen bölgede, çatlak ucu, aşırı yükleme nedeniyle oluşan plastik bölgeden çıktıkça, çatlak büyüme oranı kademeli olarak stabil hale gelir ve aşırı yükleme uygulanmadan önceki düzeyine geri döner. Bu süreç, yorulma çatlak büyümesinin aşırı yükleme sonrası değişiminin anlaşılması açısından önemlidir. Özellikle, aşırı yükleme sonrası gözlenen gecikme etkisi, çatlakın yorulma ömrünü uzatmada kritik bir faktördür (Li *et al.*, 2018)

Geleneksel ve SLM yöntemi ile üretilen numunelere ait SGY+OL işlemi sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı ( $da/dN$ )-çatlak boyu ( $a$ ) grafikleri Şekil 64, Şekil 65 ve Şekil 66'da verilmiştir. Bu şekillerden, OL yükleme durumunda, çatlak ilerleme hızının sabit genlikli yükleme durumuna göre arttığı görülmektedir. OL uygulandıktan kısa bir süre sonra, çatlak ilerleme hızının minimum değere ulaştığı görülmüştür. Çatlak ilerleme hızı minimum değere ulaştıktan sonra belli bir gecikme periyodu sonunda SGY durumundaki seviyelere çıkmıştır. Ayrıca çatlak ilerleme hızının minimum değere hemen ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum ertelenmiş çatlak gecikme davranışı olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel üretim yöntemi ile üretilen numunede diğer numunelere kıyasla OL uygulandığı anda çatlak ilerleme hızının SGY durumuna göre oldukça fazla arttığı görülmüştür. Grafiklerde kısmi olarak dalgalanmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum mikro yapı ile alakalıdır. Yapı içerisindeki boşluk, çatlak, ergime bölgeleri vs. gibi bölgelerin varlığından dolayı yapı homojen değildir.

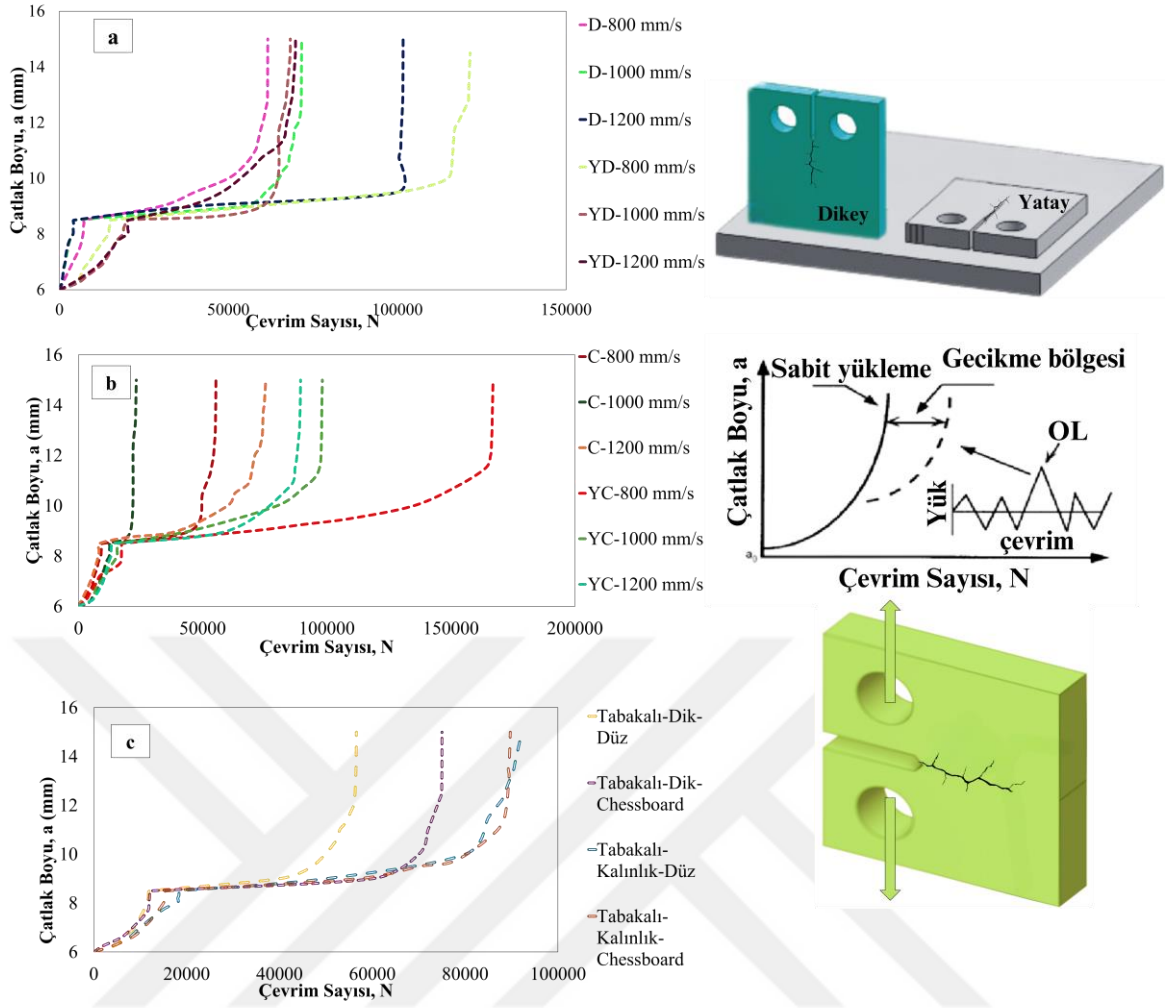
OL yüklemesinin uygulanması, çatlak ucunda çok karmaşık bir gerilme-şekil değiştirme durumuna neden olur, birden fazla mekanizmanın etkileşimi OL mekanizmasını karmaşık hale getirir. Bu durumda çekme aşırı yüklemesinden sonraki gecikmeyi açıklamak için plastisite kaynaklı çatlak kapanması, çatlak ucunun önünde bası artık gerilmeleri oluşması, deformasyon sertleşmesi, çatlak sapması/dallanması ve plastik körelme/yeniden keskinleşme gibi mekanizmalar önerilmektedir (Carlson *et al.*, 1991). Tüm grup numuneler incelendiğinde, sabit genlikli yükleme altında (bir önceki bölümde belirtilen)  $a-N$  eğrilerinin düzgün ve sürekli olduğu, OL uygulamasından sonra ise aşırı yük çatlak ucunu körelttiği ve çatlakın bu çentikten yeniden başlatılması ve yayılması için bir dizi çevrim gerektiği için SGY durumuna göre geciktiğini söylemek doğrudur (Antunes *et al.*, 2016a). Bu durumun sonucu olarak, yorulma çatlak büyüme hızı azalarak çatlak ömründe artış meydana gelmiştir. OL uygulaması ile çatlak ucunda büyük plastik deformasyon, yeniden çekirdeklenme ve bası artık gerilmesi meydana gelmektedir. Böylece ek bir enerji gerekmekte ve çatlak ilerleme hızı yavaşlamaktadır (Salvati *et al.*, 2016)

Şekil 63'te dik üretilen numunelerde yüksek tarama hızlarında meydana gelen çatlak ilerleme ömründeki iyileşme hem yapı içerisindeki artık gerilmeler hem de çatlak kapanması ile desteklenebilmektedir. Aşırı yüklemenin oluşturduğu bası artık gerilmeleri, çatlak kapanma seviyesinin yükselmesine yol açarak, çatlak büyüme oranının belirli bir minimum değere ulaşmasına (Şekil 64) sebep olur. Çatlak ucu, aşırı yükleme sonucu oluşan plastik bölgeden çıktıkça, çatlak büyüme davranışı kademeli olarak sabit genlikli yükleme altındaki orijinal büyüme oranına geri döner (Li *et al.*, 2018b) Tarama hızındaki artışla birlikte yapı içerisinde üretim kaynaklı meydana gelen kusurlar, ergimemiş toz partikülleri gibi kısıtlayıcı etkiler çatlak ucunda çatlak itici kuvvet meydana getirmektedir. Böylece çeki aşırı yüklemesi durumunda yorulma çatlak ilerleme ömrünü artırmaktadır (Antunes *et al.*, 2016b; Zaiken & Ritchie, 1985). Aynı zamanda, dik üretilen numunelerin farklı stratejilerde (düz ve chessboard) üretildiği görülmekte ve tarama stratejisinin yorulma çatlak ilerlemesi ömrü üzerinde oldukça etkili bir parametre olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 63 ve Şekil 71'de görüldüğü üzere, chessboard üretim stratejisi ile üretilen numunelerin ömrü düz ile üretilen numunelerin ömründen daha yüksektir. Bu durum SGY yükleme durumu ile çelişkili haldedir. Düz üretim yönteminde yapı içerisindeki gözenekler çatlak ilerleme ömrü üzerinde faydaya sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Çatlak ilerleme doğrultusunda, çatlağın karşılaşıcağı boşluk ve partiküller çatlak sapması ve çatallanmasına yol açarak yorulma çatlak kapanmasına sebep olur. Düz stratejide chessboard stratejisine göre daha fazla boşluk ve ergimemiş partiküllerin varlığı daha önceki bölümde açıklanmıştır. Bu kusurların yorulma çatlak ilerleme ömründe artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca tarama hızının artışı ile de bu kusurların arttığı ve yüksek tarama hızlarında daha yüksek yorulma çatlak ilerleme ömrü elde edildiği gözlemlenmiştir.

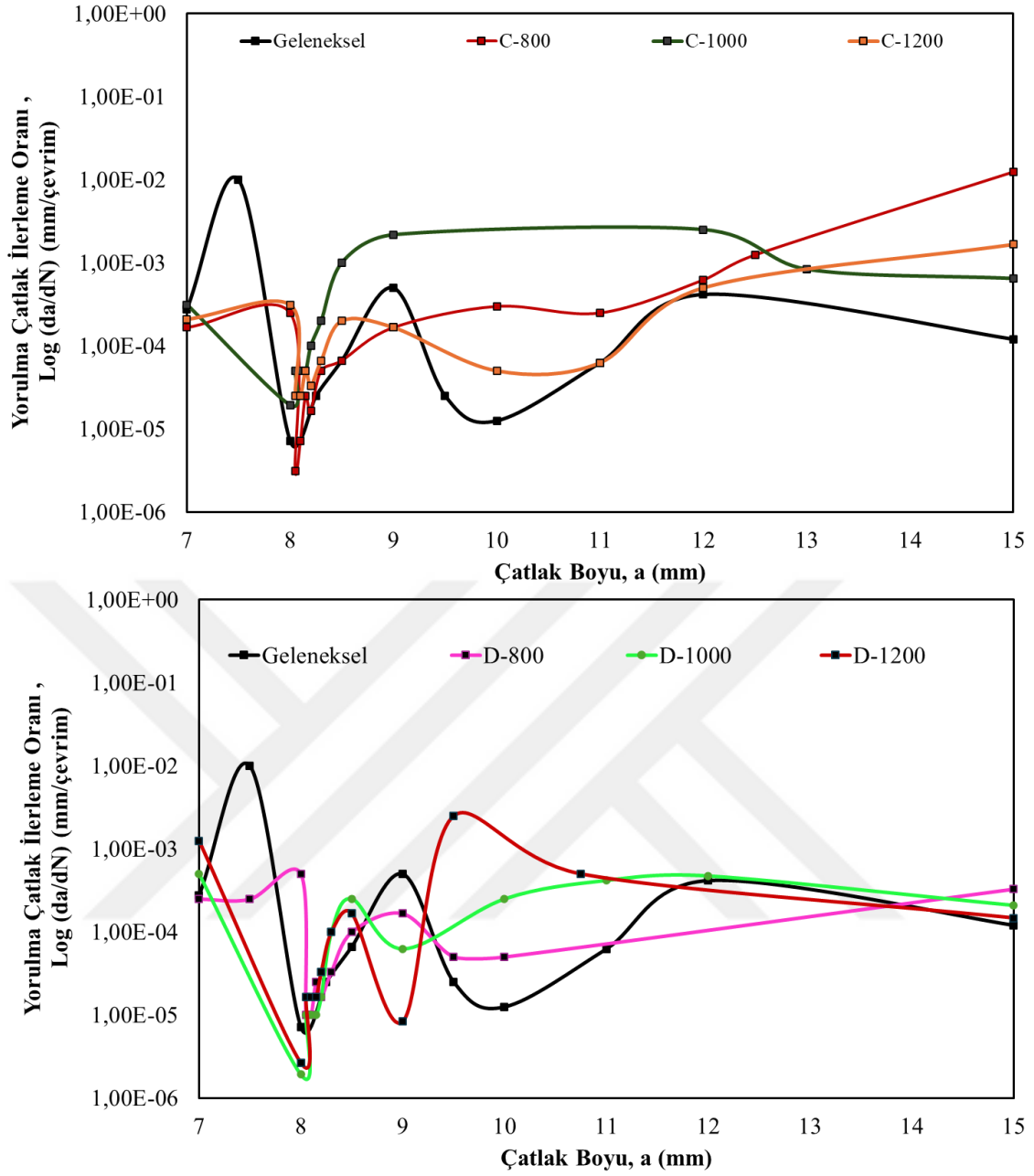
Yatay katman yöneliminde üretilen numunelerde OL uygulanmış çatlak ilerleme ömrü düz üretilen numunelere göre değişkenlik göstermiştir. Referans numunenin %100 (SGY+OL D800) kabul edildiği durumda YD-800 mm/s numunesinin ömrü %197 iken sırasıyla YD-1000 ve YD-1200 mm/s %100,96 ve %113,33 oranındadır. Aynı şekilde YC-800 mm/s ömür %270 iken YC-1000 ve YC-1200 mm/s numunelerinde sırasıyla %159 %45 ömür elde edilmiştir (Şekil 71). Yatay katman yönelimindeki yorulma çatlak ömrü düz katman yönelimine göre farklı değerlendirmek gerekir. Katman yöneliminin çatlak ilerleme davranışı üzerindeki en büyük etkisi sütunlu tanelerin farklı yönelimlerinden kaynaklanmaktadır (Ye *et al.*, 2021). Yatay katman yöneliminde üretilen numunenin çatlak büyüme yönü ile sütunlu tanelerin yönelimi paraleldir. Dik üretilen numunelerde ise çatlak büyüme yönü ile sütunlu tane yönelimi diktir. Çatlak ilerlerken sütunlu tanelerden aynı miktarda ilerlediğini düşünürsek; dik üretilen numunede daha fazla taneden geçerek yol aldığı bilinmektedir. Aynı zamanda yatay üretilen numunelerde paralel sütun tanelerden geçerken sınırlarda dallanma ve yayılma davranışı

sergilemiştir. Tek bir çatlaktan ziyade birkaç farklı yönlenmiş çatlak için gerekli enerji miktarı daha fazla olmaktadır. Böylece yorulma çatlak ilerleme direncinde artış meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, yapı içerisinde tane sınırlarının artışı çatlak ilerlemesi için gerekli enerjinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Hali ile, yatay tane yönelimi için çatlağın ilerleme hızı daha düşük olup ömür artışına sebebiyet vermektedir. Bunun yanı sıra yatay katman yöneliminde üretilen numunelerde çatlak ilerlerken üretim yöntemi kaynaklı katılmış bölge sınırları ile de karşılaşmaktadır. Çatlağın ilerlemesi durumunda malzemenin sadece mikro yapısı değil aynı zamanda üretim yönelimi-ergime havuz sınırları ve şekli oldukça önemlidir. Yatay ve dikey üretim yönünde üretilen numunelerin çatlak düzlemine göre ergime havuz sınırlarını yönlenmesi çatlağın ilerleme davranışı üzerinde oldukça etkilidir (Oliveira de Menezes *et al.*, 2019).

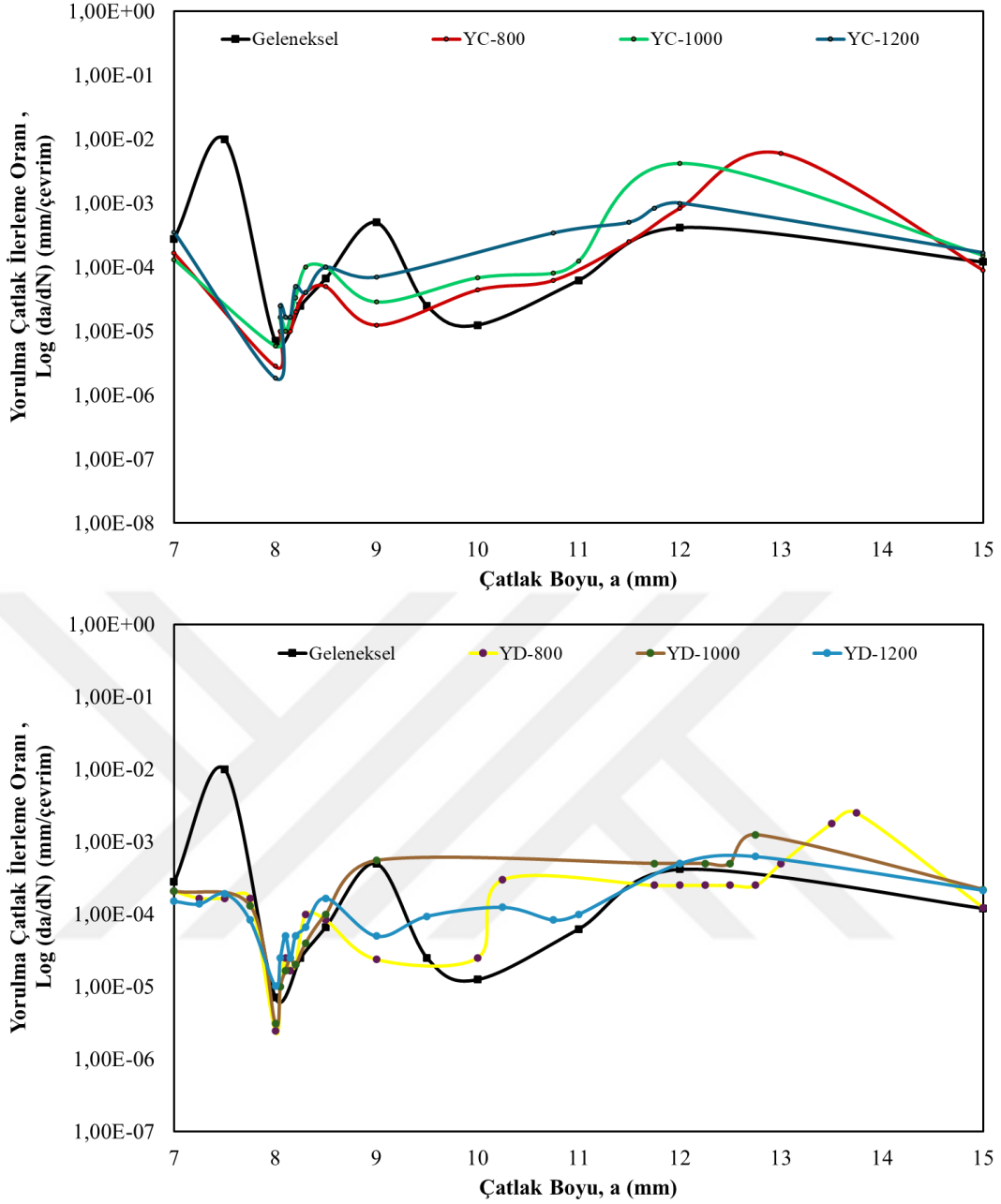
Katılmış ergime bölge sınırları tabakalı bir yapı gibi davranmaktadır. Bu bölgeleri aşmak için az da olsa ekstra enerji sarf etmesi gerekmektedir. Bu durum ömür artışına sebebiyet vermektedir. Şekil 63'te verilen a-N eğrilerinde genel olarak yatay üretilen numunelerin daha yüksek ömür davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere yatay üretilen numunelerin gözenek, boşluk ve çatlak gibi kusurlarının dik üretime kıyasla azaldığı bilinmektedir. OL yüklem durumunda malzemenin mikro yapısı ile doğrudan alakalı olan tane yönelimi ömür açısından daha baskın hale gelmiştir. Ancak sadece düz stratejide üretilen 1000 mm/s ve 1200 mm/s tarama hızlarındaki dik üretilen numunelerde daha yüksek ömür elde edilmiştir. Bu durumun sebebi olarak tarama hızındaki artışla birlikte yapı içerisindeki gözeneklerin artması çatlak ucunda kısıtlayıcı etki oluşturarak çatlak itici kuvvet meydana getirmiştir. Böylece çatlak ilerleme ömründe uzama gözlemlenmiştir. Bu duruma ek olarak OL uygulandığı zaman, çatlak önünde biriken artık gerilmeler çatlak kapanmasına sebep olarak yorulma ömründe artış meydana getirmektedir.



**Şekil 63.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile üretilen numunelere ait SGY+OL işleminin sonucu elde edilen çatlak boyu (a)-çevrim sayısı (N) grafikleri



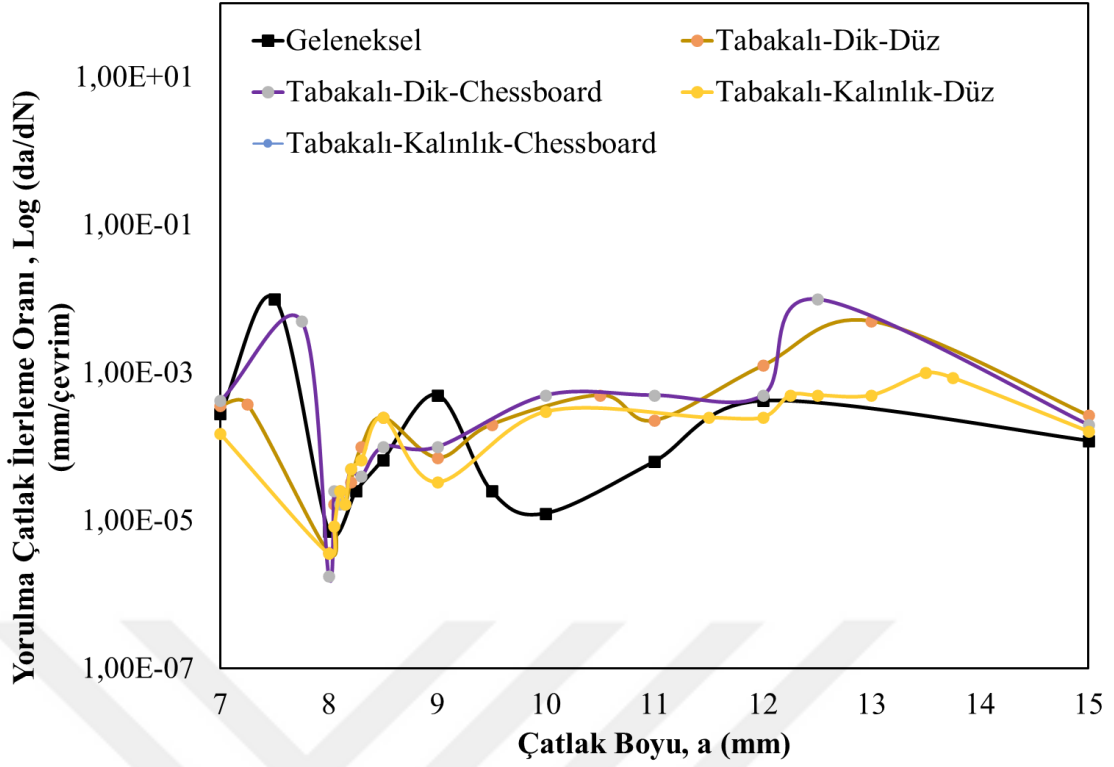
**Şekil 64.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile düz üretilen numunelere ait SGY+OL işlemi sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı (da/dN)-çatlak boyu (a) grafikleri



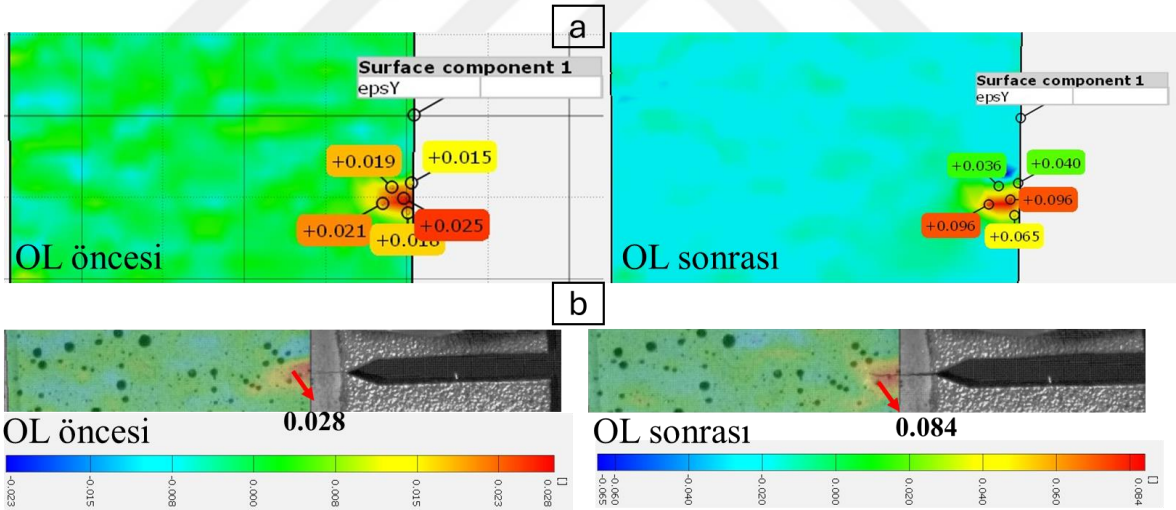
**Şekil 65.** Geleneksel ve SLM yöntemi ile yatay üretilen numunelere ait SGY+OL işleminin sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı (da/dN)-çatlak boyu (a) grafikleri

Şekil 63-c ve Şekil 66'da sırasıyla tabakalı üretilmiş SLM numunelerinin a-N ve da/dN-a eğrileri verilmiştir. Tabakalı üretilen numunelerde kendi arasında bir yorulma çatlak ilerlemesi ömrü sıralaması yapmak gerekirse en yüksek ömürden en düşük ömre doğru kalınlık-düz, kalınlık-chessboard, dik-düz ve dik-chessboard stratejisi şeklinde sıralanmaktadır. Burada diğer gruplardaki numuneler ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Yatay (kalınlık) tabaka yöneliminde üretilen numunelerin OL uygulaması sonrası yorulma çatlak ilerlemesi ömürlerinin tabakalı grupta en iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum mikro yapı ile ilgilidir. Yatay olarak üretilen numunelerde kusurları daha az olması ve malzeme yoğunluğunun fazla olması yorulma çatlak ilerlemesini yavaşlatıcı etki göstermiştir. Ayrıca yatay katman

yönelimine sahip chessboard stratejisindeki numunenin OL sonrası çatlak ilerleme direncinin geleneksel yöntemle göre arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum oldukça etkili bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Tabakalı yapı ile geleneksel üretim yöntemi kıyaslandığında, çatlak ilerlemesinde engellerin varlığı bu durumu etkilediği ifade edilebilir. Tabaka yapısı oluşturulurken mukavemet ve süneklik açısından farklı iki faz belirlenmiştir. Bu fazlardan çatlak ilerlemesinde sürekli olarak farklı bir mikro yapı ile karşılaşmaktadır. 1200 mm/s tarama hızına sahip katmanda ilerlerken daha yumuşak bir faz olduğundan dolayı sünekliğin baskın olduğu bir çatlak ilerlemesi davranışı sergilemiştir. Mikro yapı içerisinde sünek yapıdan kaynaklı olarak çok sayıda mikro boşluklar bulunmaktadır. Bu mikro boşluklar OL davranışı altında kısıtlayıcı etki yaparak çatlak ilerleme hızında yavaşlama meydana getirir. Daha sonra sert faza (800 mm/s) geçişte enerjisinin çoğunu yumuşak-sünek faz arasında harcamış ve çatlak dallanması/yayılması meydana gelmiştir. Sert faz bölgesine geçerken çatlak kendisi için ilerleyebileceği daha kolay bir yol arayarak yön değişimi meydana getirmektedir. Böylece çatlak ilerleme ömründe artış meydana gelmiştir. Çatlak ilerleme doğrultusunda herhangi bir şekilde ikinci faz, ergimemiş partikül ve boşluk gibi yapı ile karşılaştığı zaman çatlak sapması ve dallanması meydana gelmektedir. Böylece yorulma çatlak kapanmasına sebebiyet vermektedir. Bunların yanı sıra, chessboard üretim stratejisine sahip tabakalı yapıların düz stratejiye göre daha iyi olmasının sebebi yapı içerisinde üretim gerçekleştirilirken ergime havuzları ve sınırlarının bağlanması ile alakalıdır. Chessboard üretim stratejisinde sınırlar arası bağlanmanın daha güçlü olduğu ve bu durumda çatlak ilerleme hızını yavaşlatıcı bir etkiye neden olduğu düşünülmektedir. Böylece çatlak ilerleme ömründe üstün artış sergilemiştir. Şekil 67’de SGY+OL yükleme sonrası OL uygulanmadan hemen önce ve sonrasına ait dijital görüntü işleme yöntemi ile  $\varepsilon$ -y görüntüsü verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, OL uygulandıktan hemen sonra çatlak ucundaki değişimin oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum OL uygulanması durumunda çatlak ucunda önemli ölçüde bir plastik deformasyon bölgesi oluştuğunu ispatlar niteliktedir. Bu bölgede meydana gelen plastik bölge sayesinde çatlak ilerleme ömrü gelişmiştir.



Şekil 66. Geleneksel ve SLM yöntemi ile tabakalı olarak üretilen numunelere ait SGY+OL işleminin sonucu elde edilen yorulma çatlak ilerleme oranı (da/dN)-çatlak boyu (a) grafikleri

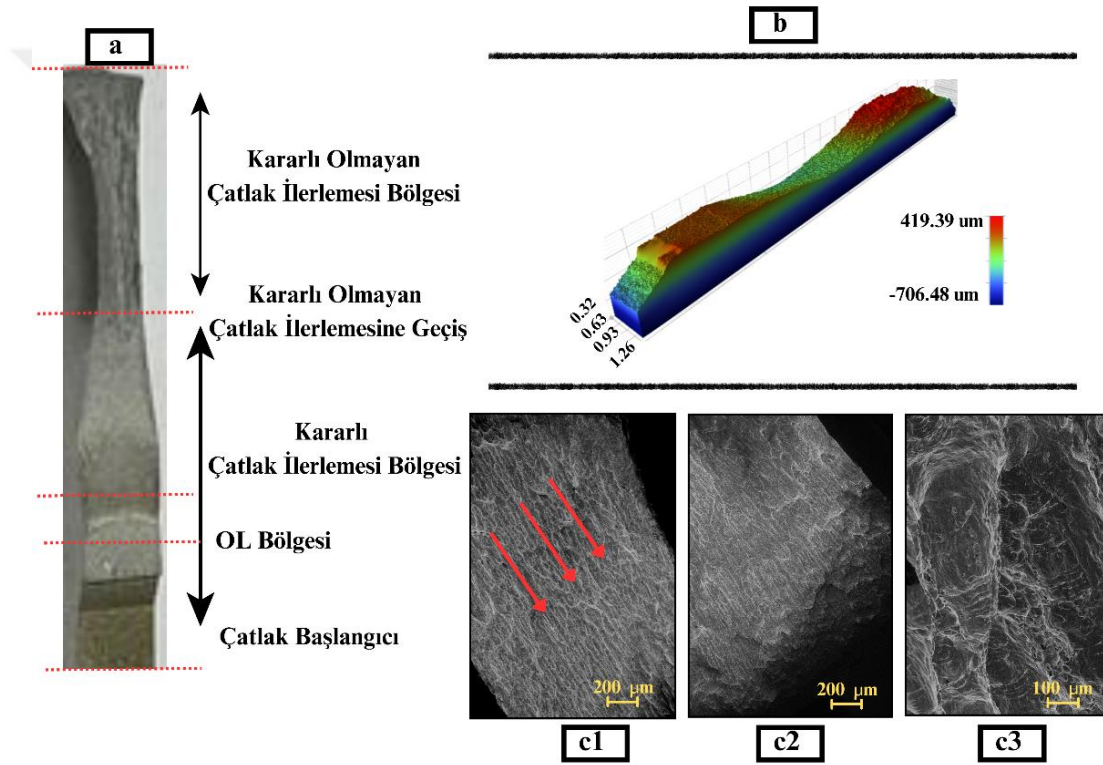


Şekil 67. Dijital Görüntü İşleme yöntemi ile SGY+OL yüklemesi sonrası OL uygulanmadan hemen önce ve sonrasına ait  $\epsilon$ -y görüntüleri: a) C-800 numunesi ve b) Tabakalı-Dik-Chessboard Stratejisi ile üretilen numune

Geleneksel üretim yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunenin çatlak ilerlemesi sonrası 3D profilometre ve SEM görüntüleri Şekil 68’de verilmiştir. SGY+OL yorulma çatlak ilerlemesi Şekil 68-a’da görüldüğü üzere bu numune; çatlak başlangıcı, kararlı çatlak ilerlemesi, OL uygulanan bölge ve çatlak ilerlemesi, kararlı olmayan çatlak ilerlemesi ve sonunda kırılma olmak üzere farklı evrelere sahiptir. Çatlak başlangıcı ve çatlakın kararlı olarak ilerlediği bölge açık renkli olarak görülürken kararsız çatlak ilerleme ve kırılma bölgesi koyu

renkli olarak görülmektedir. Kırmızı okların yönü çatlakın ilerleme yönünü ifade etmektedir. Şekil 68-b’de verilen 3D profilometre görüntüsünde SGY den farklı olarak OL uygulanan bölgede ani bir pürüzlülük artışı meydana gelmiştir. OL uygulandığında yapı içerisinde ani yüklemeye ile çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Şekil 68’de (c1) görüldüğü üzere plastik deformasyon ve yırtılma sırtları gözlemlenmiştir. Transgranüler bir kırılma gözlemlenmiştir.

SLM Chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerleme sonrası kırılma fraktografisi Şekil 69’da verilmiştir. Şekil 69’da detaylandırılan kırılma fraktografisinde (1) ile numaralandırılan genel kırılma düzeyini, (2) nolu görüntü yüzey topografyasını gözlemlenmek amacıyla 3D profilometre ve 3-4 ile belirtilen görüntüler ise mikroskobik boyutta kırılma yüzeyini gösteren SEM görüntülerini içermektedir.

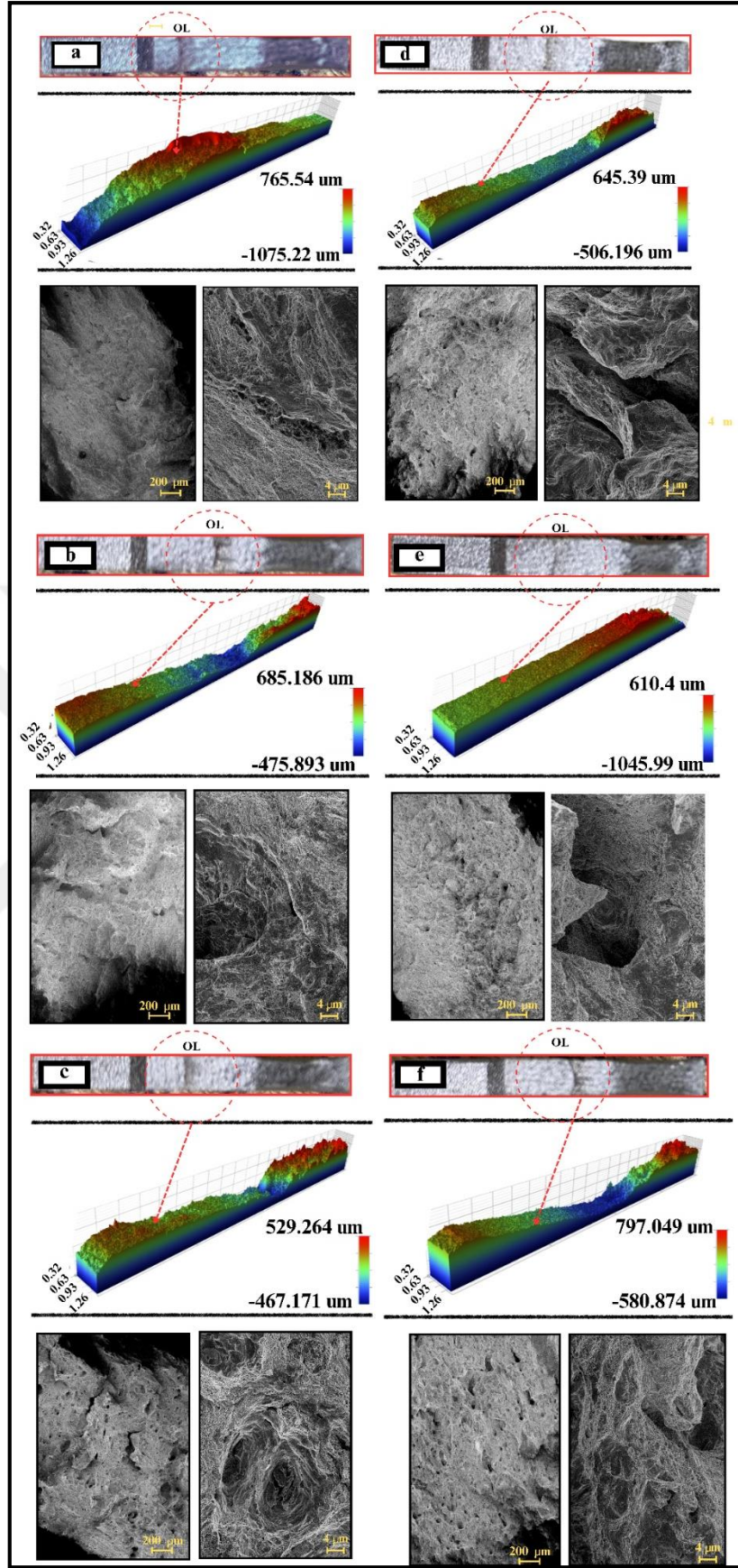


**Şekil 68.** Geleneksel üretim yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik numunenin SGY+OL çatlak ilerlemesi sonrası 3D profilometre ve SEM görüntüleri

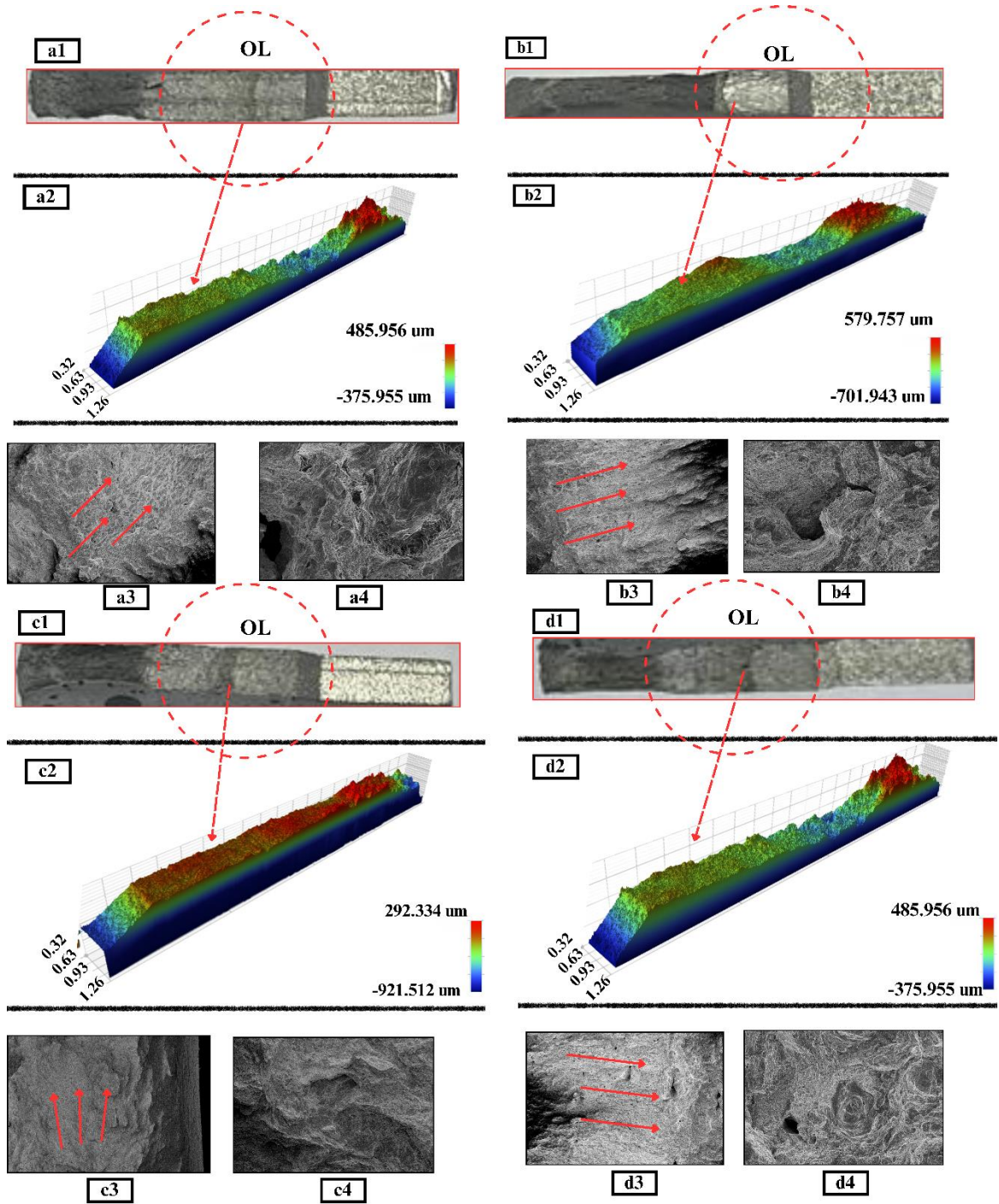
Yorulma çatlak ilerlemesi, genellikle malzemeye uygulanan tekrarlı yüklemeye döngüleriyle şekillenir. Bu süreçte çatlak, her döngüde çok küçük adımlarla büyür ve çatlak yüzeyinde bu ilerlemeyi gösteren karakteristik yorulma izleri (fatigue striations) oluşmaktadır. Bu çizgiler çatlak nasıl ilerlediği konusunda bize bilgi vermektedir. Şekil 68’de neredeyse tüm yüzeylerde az miktarda da olsa yorulma izleri gözlemlenmiştir. OL uygulanmadan önce SGY yüklemesinde olduğu gibi plastik deformasyon, ikincil çizgiler, klivaj ayrılma bölgeleri ve mikro boşluk gibi kusurlar gözlemlenmiştir. Tarama hızının artışı ile yüzeydeki gözenekliliğin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle hem dik hem yatay üretilen numunelerde 1200

mm/s tarama hızında (Şekil 69-c ve Şekil 69-f) boşlukların boyutunun oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum mikro boyutlu gaz gözenekleri ve LoF gibi kusurların çevrimsel test esnasında birleşerek büyük boyutlara dönüştüğü şeklinde yorumlanmaktadır. Çünkü önceki bölümlerde elde edilen SEM görüntülerinde gözenek boyutlarının daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Malzemeye aniden yükleme yapılması sonucu (OL) yapı içerisinde çatlak meydana gelmiştir. OL uygulandığında çatlak ucunda aniden yüksek gerilme meydana gelmektedir. Bu yük, malzemenin yerel kırılma direncini aşarak çatlak meydana getirmiştir. Şekil 68-d ve Şekil 68-e’de OL uygulandığı anda yapıda meydana gelen çatlak açık bir şekilde gösterilmiştir. OL sonrası elde edilen SEM görüntüleri SGY’ye kıyasla daha karmaşık bir yapı sergilemektedir. Görüntülerde pürüzsüz bölgelerin varlığı gözlemlenmiştir. Bu bölgelerin gaz gözenek, boşluk ve çatlak gibi kusurlu bölgelerin olduğu düşünülmektedir. Şekil 69’da (a2) yüksek pürüzlülük gözlemlenmiştir. Şekil 68’de (a3) kümelenmiş boşlukların varlığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yorulma izlerinin belirsiz ve yüzeyin poroz olduğu görülmüştür. Bu durum ani plastik deformasyon etkisi ile çatlağın hızlı bir şekilde ilerlediğini göstermektedir. Şekil 63’te verilen a-N eğrileri bu durumu destekler niteliktedir. Şekil 69’da (b1) verilen genel kırılma görüntüsünde OL uygulandıktan sonra çatlağın birkaç farklı bölgeden ilerlediği gözlemlenmiştir. Şekil 69’da (c3) üretim yönteminden kaynaklı olarak yapıda bulunan gözenek varlığı tespit edilmiştir.

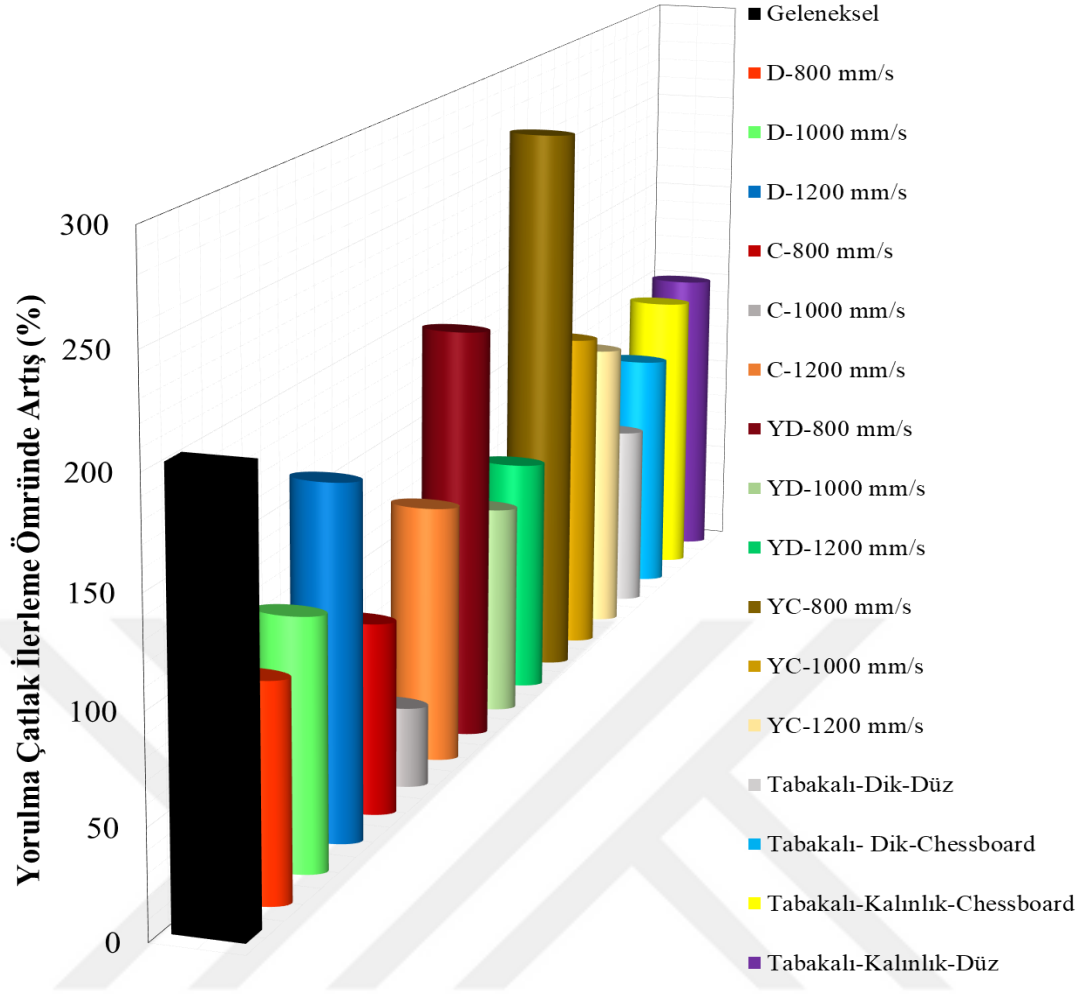
Tabakalı bir şekilde SLM ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerleme sonrası kırılma yüzey fraktografisi görüntüleri Şekil 70’te verilmiştir. Tabakalı üretilen numunelerde kırılma yüzeyleri diğer gruplara göre oldukça karmaşıktır. SEM görüntülerinde transgranüler kırılmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 70-a’da OL uygulanan bölge açık bir şekilde görülmektedir. Bu bölgede yüksek plastik deformasyon meydana gelmiştir. Şekil 70’te (a2) ikincil çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir. Şekil 70’te (a3), yırtılma sırtları (tear ridges) görülmüştür. Tabakalı dik ve düz üretim stratejisindeki numunelerde (Şekil 70-b2) diğerlerine göre yüksek yükselti-çukur farkı elde edilmiştir. OL uygulandıktan sonra ve kırılmanın hızlı bir şekilde gerçekleştiği bölgede oldukça pürüzlü bir yapı elde edilmiştir. Bu durumun sonucu olarak çatlak ilerleme hızının yüksek olduğu yorumunu yapmak yerindedir. Özellikle tabakalı olarak yatay üretim yönünde üretilen numunelerde daha yoğun bir yüzey elde edilmiştir. Bu durum yapı içerisinde boşluk, gözenek ve LoF gibi kusurların en az olduğunu göstermektedir. Tüm numunelere ait yüzeylerde lifli bir yapı elde edilmiştir. Bu sünek kırılmanın meydana geldiğini işaret etmektedir. Yüzeylerde gözlemlenen pürüzler kırılmanın ilerleme hızı ile ilgili bilgi vermektedir.



**Şekil 69.** SLM Chessboard stratejisi ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerleme sonrası kırılma yüzey fraktografisi görüntüleri a) C-800 mm/s b) C-1000 mm/s c) C-1200 mm/s d) YC-800 mm/s e) YC-1000 mm/s f) YC-1200 mm/s



**Şekil 70.** Tabakalı bir şekilde SLM ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerleme sonrası yüzey fraktografisi görüntüleri a) Tabakalı Kalınlık-Chessboard üretim b) Tabakalı-Dik-Düz üretim Chessboard üretim c) Tabakalı Kalınlık-Düz üretim d) Tabakalı-Dik-Chessboard üretim



**Şekil 71.** Geleneksel ve SLM ile üretilen numunelerin SGY+OL yorulma çatlak ilerlemesi ömrünün tarama hızı ve tarama stratejisine göre değişimi

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan SLM ile biyomekanik yapıların üretildiği bu çalışma kapsamında, öncelikle SLM yöntemi ile farklı tarama parametrelerinde üretilen numunelerin statik ve daha sonra da değişken yükleme şartları altındaki davranışları incelenmiştir. İlk olarak statik yükleme durumunda, 300-1200 mm/s'ye kadar değişen tarama hızları kullanılarak biyomimetik yapıların üretimi öncesi üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu aşamada elde edilen sonuçlar neticesinde:

- Üretim tarama hızının artışı ile malzeme yapısındaki gözeneklerin arttığı ve bu durumda malzemenin çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu,
- Üretim tarama hızının artışı ile oluşan hücresel alt taneciklerin büyük gerilmeler biriktirdiği ve dislokasyon hareketini engelleyen oksijen inklüzyonlarının artışının sonucu olarak sertlik değerinin arttığı,
- Tarama hızındaki artış ile metal tozunun ergimesi için yeterli zamanın verilmediği ve katmanlar arası zayıf bağlanmaya sebebiyet veren artık gerilmelerin arttığı,
- SLM prosesi kaynaklı gaz boşlukları ve füzyon eksiklikleri gibi hataların, artan tarama hızlarında daha sık görüldüğü ve bu kusurlar çevresinde oluşan yerel üç eksenli gerilme bölgeleri ve gerilme yığılmalarının malzemenin eğilme dayanımını olumsuz yönde etkilediği,
- Tarama hızındaki artışla birlikte eriyik havuzunun kararsız hale gelmesi ve ıslanabilirliğin bozulması sonucunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna varılmıştır.

Statik testler sonucu elde edilen veriler ışığında üç farklı tarama hızı seçilmiştir. Tarama hızları arasında tercih yapılırken öncelikle üretim sonucu yapı ve yüzey kalitesi dikkate alınarak 300 mm/s ve 600 mm/s tarama hızları tercih edilmemiştir. Tarama hızının düşük olması yüksek enerji yoğunluğu sebep olmuştur. Bu durumda SLM prosesinde toz istenilen şekilde serilememiş ve tozda kısmi yanmalar gözlemlenmiştir. Bu durum yüzey ve yapı kalitesini oldukça etkilemiştir. Elde edilen sonuçlara göre çalışmanın ikinci aşamasında, statik dayanım açısından; tarama hızı, tarama stratejisi ve üretim yönünün etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde biyomimetik hiyerarşik yapı modellemesi olarak tabakalı üretim yapılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

- Chessboard stratejisinde yapı, küçük parçalara ayrılarak her bir adada ısı dağılımı daha kontrollü sağlanmakta, böylece iç gerilmeler azaltılmaktadır. Ayrıca bu

stratejide kullanılan kısa tarama yolları, ardışık tarama çizgileri arasında bağın daha güçlü oluşmasına olanak tanımaktadır. Deneysel veriler, 1200 mm/s hızındaki numunelerin 800 mm/s'ye göre daha düşük mekanik dayanım gösterdiğini ortaya koymuştur.

- Üç nokta eğme testleri sonucunda, Chessboard stratejisi ile üretilen örneklerde tarama hızı arttıkça sırasıyla 9081,93 MPa, 6593,816 MPa ve 4665,33 MPa değerlerinde maksimum yükler elde edilmiştir. Düz tarama stratejisi ile bu sonuçların genel olarak benzerlik gösterdiği görülmüştür.
- Chessboard stratejisinde kısa tarama çizgileri, yapı içindeki bası artık gerilmelerini azaltırken, daha yoğun doluluk sağlayarak kusurları minimize eder. Bu strateji, mikro yapı değişimiyle doğrudan ilişkilidir ve çatlak ilerleme hızını etkileyen boşluk, ergimemiş partikül, gaz boşlukları ve füzyon eksikliği gibi kusurların azalmasını sağlar, böylece malzemenin yorulma çatlak ilerleme ömrünü artırır.
- Geleneksel üretim yöntemine göre SLM yönteminde üretilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı ve bu durumun sebebinin hızlı ısınma/soğuma prosesinden kaynaklı olduğu söylebilir. Ayrıca tarama hızının artışı ve chessboard tarama stratejisinin varlığı yüzey pürüzlülük değerini artırmıştır. Tarama hızının artışı yüzeydeki toplanma olayını (balling), saçılma ve eksik ergime gibi kusurları artırarak yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır.
- Geleneksel ve SLM yönteminin yorulma çatlak ilerleme davranışı değişkenlik göstermiştir. SLM üretim yöntemi ile yapı içerisinde oluşan nano inklüzyonlar, gözenekler ve kusurlar; taneler arası çatlak ilerlemesine, çatlak dallanmasına ve çatlak hızlanmasına sebep olmuştur. Bunun sonucunda ise, SLM ile üretilen numunelerden geleneksel yöntemle üretilen numunelere kıyasla daha düşük ömür elde edilmiştir.
- Yapı içerisinde bulunan bası artık gerilmeleri çatlak başlangıcı ve ilerlemesi üzerinde geciktirici etkiye sahiptir. Tarama hızındaki artış, yapı içerisinde bası artık gerilmelerinin artmasına neden olmuştur. Böylece tarama hızındaki artış ile yorulma çatlak ilerleme ömründe gelişme meydana gelmiştir.
- Chessboard üretim stratejisinde düz üretim stratejisine göre daha yoğun ve doluluğu yüksek bir yapı elde edilmiştir. Bu durum düz üretim yöntemine göre çatlak ilerleme ömründe artışa sebep olmuştur.
- Yatay yapı yöneliminde üretilen numunelerin yorulma çatlak ilerleme ömrü dik yöneline göre daha yüksektir. Bu durum, yapı içerisindeki kusurların, ikinci faz

partiküllerin ve özellikle LOF gözeneklerinin daha az olması ile ilişkilendirilmektedir.

- Tane yönelimi ve morfolojik özellikler, malzemenin anizotropik karakterini etkileyerek çatlak ilerleme davranışında farklılık yaratmıştır. Dikey yönlü üretimde çatlak taneler boyunca ilerlerken daha az dirençle karşılaşmakta, yatay üretimde ise karmaşık tane yapıları çatlak yolunu zorlaştırarak çatlak ilerlemesini yavaşlatmaktadır.
- Tabakalı hiyerarşik yapı tasarımı gerçekleştirilirken deniz kabuğu modeli kullanılarak yapı içerisinde sert-yumuşak faz elde edilmiştir. Aynı zamanda yengeç pençelerinden esinlenerek gradyen yapı modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece yapı içerisinde ani bir özellik geçişinin yerine belli bir kalınlık boyunca düzenli bir özellik geçişi sağlanmıştır.
- Tabakalı yapıda çatlak ilerlerken değişken fazlara geçerek çatlak ilerleme davranışı diğer grup numunelere göre değişkenlik göstermiştir. Yumuşak/sert faz yapısında, çatlağın ilerlemesi yavaşlatılarak çatlağın yön değişimi/yayılmı meydana gelmiştir.
- Tabakalı yapıda çatlak ilerlerken tabakaları geçmek için tek tabakalı numunelere göre daha fazla enerji sağlayarak ömür artışı sergilemiştir. Tabakalı yapı sert ve yumuşak faz diye tanımlanan fazlardan meydana gelmektedir. Çatlak bu fazlar ile karşılaştığında çatlak sapması ve yayılımı sergileyerek çatlak ilerleme hızı yavaşlamış ve yorulma ömrünü iyileştirmiştir.
- Tek çeki aşırı yüklemesi sonucu plastisite kaynaklı çatlak kapanması, bası artık gerilmeleri, gerinim sertleşmesi, çatlak sapması/dallanması ve plastik körelme/yeniden keskinleşme mekanizmaları sonucu çatlak gecikmesi meydana gelmiştir.
- Tarama hızının artışı, ergimemiş toz partikülleri gibi üretim kaynaklı kusurların çatlak ucunda itici kuvvet oluşturmalarına neden olarak SGY+OL durumunda yorulma çatlak ilerleme ömrünü uzatmıştır.
- Katman yönelimi, çatlak ilerleme davranışını belirleyen önemli bir faktördür. Yatay üretimde çatlak büyüme yönü sütunlu tanelerle paralel olup sınır bölgelerinde dallanma ve yayılma davranışı sergiler. Dik üretimde ise çatlak, tanelerle dik açı yaparak daha fazla taneden geçer. Bu farklılık nedeniyle yatay katman yöneliminde yorulma çatlak ilerleme direnci artarken, dik yönelimde çatlak daha kolay ilerlemektedir.
- SLM üretim parametrelerinden katman yönelimi çatlak ilerleme davranışı üzerinde oldukça etkili olmuştur. Yatay üretimde çatlak ilerleme yönü ile tanelerin yönü

paralel olup sınır bölgelerinde dallanma ve yayılma davranışı sergilemiştir. Ancak, dik üretimde çatlak tanelerle dik açı yaparak daha fazla taneden geçmiştir. Böylece yatay numunelerde çatlak ilerleme hızında yavaşlama gözlemlenmiştir.

- Tabakalı yapı oluşturulurken mukavemet ve süneklik açısından farklı iki faz belirlenmiştir, bu da çatlak ilerleme davranışını etkilemektedir. Tabakalı yapı ve geleneksel üretim yöntemi karşılaştırıldığında, SGY+OL çatlak ilerlemesi durumunda çatlak ilerlemesi üzerindeki engellerin etkili olduğu görülmüştür.
- Tabakalı yapıdaki yumuşak faz, sünek yapı nedeniyle mikro boşluklar oluşmuş, çatlak ilerlerken sünekliğin baskın olduğu bir davranış sergilemiştir. Mikro boşluklar, aşırı yükleme (OL) altında kısıtlayıcı etki yaparak çatlak ilerleme hızını yavaşlatmıştır. Sert faza geçişte çatlak, yumuşak-sünek fazda enerjisinin çoğunu harcamış, ardından çatlak dallanması ve yayılması meydana gelmiştir. Sert faz bölgesine geçerken çatlak, daha kolay ilerleyebileceği bir yol arayarak yön değiştirmiş ve bu durum çatlak ilerleme ömrünü artırmıştır.
- OL+SGY durumunda, çatlak ilerleme doğrultusunda ikinci faz, ergimemiş partikül veya boşluk gibi yapılarla karşılaştığında çatlak sapması ve dallanması meydana gelerek yorulma çatlak kapanmasını artırmıştır.
- SGY+ OL durumunda tabakalı chessboard üretim stratejisi, düz stratejiye göre daha yüksek yorulma çatlak ilerleme ömrü sergilemiştir. Chessboard stratejisinde oluşan ergime havuzları ve bunların sınır bölgelerinde sağlanan güçlü bağlanma, çatlağın ilerlemesini zorlaştırarak çatlak büyüme hızını azaltmış ve yorulma ömrünü iyileştirmiştir.
- Biyomimetik hiyerarşik yapılar oluşturulurken yüksek mukavemet ve süneklik kompozisyonun bir arada olduğu anizotropik tabakalardan oluşan tek bir malzeme elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde biyomimetik hiyerarşik yapıların hem SGY yükleme durumunda hem de SGY+OL durumunda çatlak ilerleme hızı üzerinde oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tabakalı yapılar, çatlak ilerlemesi sırasında değişken faz geçişleri sayesinde çatlak yönünü saptırarak dallanma, sapma ve köprülenme mekanizmalarını etkinleştirir; bu sayede çatlak ilerleme direncini artırarak yorulma ömrünü belirgin şekilde uzatan kritik bir tasarım stratejisi olarak öne çıkmaktadır.
- Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında biyomimetik hiyerarşik yapılardan esinlenerek elde edilen yapı tasarımı sayesinde yeni fonksiyonel yapı/malzeme tasarımı gerçekleştirilmiş ve yüksek sertlik, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, çatlak ilerlemesi ve aşırı yükleme durumunda çatlak ilerlemesi açısından mekanik

özellikleri optimum seviyede sergileyebilen kontrol edilebilir malzemeler elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ışığında, SLM üretim parametrelerinin statik ve dinamik yükleme durumunda oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle bu çalışmaya özgünlük katan bir şekilde biyomimetik hiyerarşik yapı tasarımı gerçekleştirilmiş bu yapıların yorulma çatlak ilerleme davranışı üzerinde üstün bir iyileşme etkisi gözlemlenmiştir. Literatüre özgünlüğü ve daha önce hiç çalışılmamış olması ile önemli bir katkı sağlayacak sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında ele alınamayan ancak gerçekleştirilmesi halinde bilimsel literatüre katkı sağlaması beklenen araştırma önerileri aşağıdaki verilmiştir.

- Bu çalışmada sadece AISI 316L paslanmaz çeliği kullanılmıştır. Farklı alaşımların (Ti-6Al-4V, Co-Cr vb.) aynı üretim parametreleriyle karşılaştırmalı olarak incelenmesi, malzeme bağımlı çatlak ilerleme davranışlarını anlamak açısından faydalı olabilir.
- Bu çalışma kapsamında, biyomimetik yapıların üretimi için SLM üretim parametreleri olarak tarama hızı ve tarama stratejisi kullanılmıştır. Diğer üretim parametrelerinden olan katman kalınlığı, lazer gücü ve hatch mesafesi ve üretim stratejilerinden olan kontur, spiral, zig-zag vs. gibi farklı parametreler kullanılarak biyomimetik yapılar üretilebilir.
- Bu çalışmada sadece gradyen ve tabakalı biyomimetik hiyerarşik yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu yapılardan farklı olarak, doğadan bulunan diğer biyomimetik yapılar da SLM ile üretilerek bunların özellikleri incelenebilir.
- Bu çalışmada SLM üretim sonrası numunelere herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. Gelecek çalışmalarda gerilim giderme, tavlama veya HIP (Hot Isostatic Pressing) gibi işlemlerle artık gerilmelerin azaltılması ve boşlukların giderilmesi hedeflenerek mikro yapı ve yorulma ömrü üzerindeki etkiler detaylı bir şekilde incelenebilir.
- Çatlak ilerlemesi analizleri, tekil aşırı yükleme durumu için incelenmiştir. Farklı büyüklükte ve farklı sayıda aşırı yükler uygulanarak plastisite kaynaklı çatlak kapanması, artık gerilme dağılımı ve dallanma mekanizmalarının yorulma ömrü üzerindeki etkileri araştırılabilir. Ayrıca çatlak ilerleme testleri; tekil bası aşırı yüklemesi (UL), OL+UL gibi farklı yükleme durumları için gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., & Mian, S. H. (2019). Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. *Journals.Sagepub.Com* Abdulhameed, A Al-Ahmari, W Ameen, SH Mian *Advances in Mechanical Engineering*, 2019•*journals.Sagepub.Com*, 11(2), 1–27. <https://doi.org/10.1177/1687814018822880>
- Afkhami, S., Dabiri, M., Alavi, S. H., Björk, T., & Salminen, A. (2019). Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 122, 72–83. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2018.12.029>
- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., & Barlow, J. (1995). Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Prototyping Journal*, 1(1), 26–36. <https://doi.org/10.1108/13552549510078113/FULL/PDF>
- Ahmadi, A., Mirzaeifar, R., Moghaddam, N. S., Turabi, A. S., Karaca, H. E., & Elahinia, M. (2016). Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework. *Materials & Design*, 112, 328–338. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.09.043>
- Ali, H., Ghadbeigi, H., & Mumtaz, K. (2018). Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A*, 712, 175–187. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2017.11.103>
- Ali, H., Ma, L., Ghadbeigi, H., & Mumtaz, K. (2017). In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A*, 695, 211–220. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2017.04.033>
- Amin Yavari, S., Wauthle, R., Van Der Stok, J., Riemslog, A. C., Janssen, M., Mulier, M., Kruth, J. P., Schrooten, J., Weinans, H., & Zadpoor, A. A. (2013). Fatigue behavior of porous biomaterials manufactured using selective laser melting. *Materials Science and Engineering: C*, 33(8), 4849–4858. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2013.08.006>
- Amirjan, M., Advanced, H. S.-T. I. J. of, & 2019, undefined. (2019). Effect of scanning strategy and speed on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted IN718 nickel-based superalloy. *SpringerM Amirjan, H SakianiThe International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019•*Springer*, 103(5–8), 1769–1780. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03545-0>
- Antunes, F. V., Castanheira, F. A., & Branco, R. (2016a). A numerical analysis of the mechanisms behind plasticity induced crack closure: Application to variable amplitude loadings. *International Journal of Fatigue*, 89, 43–52. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2015.12.006>
- Antunes, F. V., Castanheira, F. A., & Branco, R. (2016b). A numerical analysis of the mechanisms behind plasticity induced crack closure: Application to variable amplitude loadings. *International Journal of Fatigue*, 89, 43–52. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2015.12.006>
- Ara, I., Azarmi, F., & Tangpong, X. W. (2021). Microstructure Analysis of High-Density 316L Stainless Steel Manufactured by Selective Laser Melting Process. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10(6), 754–767. <https://doi.org/10.1007/S13632-021-00798-8/FIGURES/10>

- Askarinejad, S., Shalchy, F., & Rahbar, N. (2021). Role of interphase layers in mechanical properties of nacreous structures. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109255. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109255>
- ASTM-E647-13ae1, 2013. *ASTM E647-13ae1: Standard...* - Google Akademik. (n.d.). Retrieved March 17, 2025, from [https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as\\_sdt=0%2C5&q=ASTM-E647-13ae1%2C+2013.+ASTM+E647-13ae1%3A+Standard+Test+Method+for+Measurement+of+Fatigue+Crack+Growth+Rates.+ASTM.&btnG=](https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=ASTM-E647-13ae1%2C+2013.+ASTM+E647-13ae1%3A+Standard+Test+Method+for+Measurement+of+Fatigue+Crack+Growth+Rates.+ASTM.&btnG=)
- Baer, E., Hiltner, A., symposia, D. J.-M., & 1999, undefined. (1999). Relationship of hierarchical structure to mechanical properties. *Wiley Online LibraryE Baer, A Hiltner, D JarusMacromolecular Symposia, 1999•Wiley Online Library*, 14(7), 7–61. <https://doi.org/10.1002/masy.19991470106>
- Bannantine, J., Comer, J., Title), J. H.-(No, & 1990, undefined. (n.d.-a). Fundamentals of metal fatigue analysis. *Cir.Nii.Ac.Jp*.
- Bannantine, J., Comer, J., Title), J. H.-(No, & 1990, undefined. (n.d.-b). Fundamentals of metal fatigue analysis. *Cir.Nii.Ac.Jp*. Retrieved March 17, 2025, from <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000794323546112>
- Barthelat, F., Society, M. M.-J. of T. R., & 2013, undefined. (2013). The quest for stiff, strong and tough hybrid materials: an exhaustive exploration. *Royalsocietypublishing.OrgF Barthelat, M MirkhalafJournal of The Royal Society Interface, 2013•royalsocietypublishing.Org*, 10(89). <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0711>
- Barthelat, F., Tang, H., Zavattieri, P. D., Li, C. M., & Espinosa, H. D. (2007). On the mechanics of mother-of-pearl: A key feature in the material hierarchical structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 55(2), 306–337. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2006.07.007>
- Bartlett, J. L., & Li, X. (2019). An overview of residual stresses in metal powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 27, 131–149. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.02.020>
- Bartolomeu, F., Buciumeanu, M., Pinto, E., Alves, N., Carvalho, O., Silva, F. S., & Miranda, G. (2017). 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing*, 16, 81–89. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2017.05.007>
- Bauza, M., Moylan, S., Panas, R., Burke, S., & Martz, H. (2014). *Study of accuracy of parts produced using additive manufacturing*.
- Bechtle, S., Fett, T., Rizzi, G., Habelitz, S., Klocke, A., & Schneider, G. A. (2010). Crack arrest within teeth at the dentinoenamel junction caused by elastic modulus mismatch. *Biomaterials*, 31(14), 4238–4247. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2010.01.127>
- Beden, S. M., Abdullah, S., Ariffin, A. K., Beden, S. M., Abdullah, S., & Ariffin, A. K. (2009a). Review of fatigue crack propagation models for metallic components. *Researchgate.NetSM Beden, S Abdullah, AK AriffinEuropean Journal of Scientific Research*, 2009•researchgate.Net, 28(3), 364–397. [https://www.researchgate.net/profile/Sabah-Beden/publication/242085621\\_Review\\_of\\_Fatigue\\_Crack\\_Propagation\\_Models\\_for\\_Metallic\\_Components/links/54a8122b0cf256bf8bb7de82/Review-of-Fatigue-Crack-Propagation-Models-for-Metallic-Components.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sabah-Beden/publication/242085621_Review_of_Fatigue_Crack_Propagation_Models_for_Metallic_Components/links/54a8122b0cf256bf8bb7de82/Review-of-Fatigue-Crack-Propagation-Models-for-Metallic-Components.pdf)

- Beden, S. M., Abdullah, S., Ariffin, A. K., Beden, S. M., Abdullah, S., & Ariffin, A. K. (2009b). Review of fatigue crack propagation models for metallic components. *Researchgate.NetSM Beden, S Abdullah, AK AriffinEuropean Journal of Scientific Research, 2009*•*researchgate.Net*, 28(3), 364–397.
- Bhaduri, A. (2018). *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*. 264. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3>
- Bhat, S., use, R. P.-A. steel-properties and, & 2011, undefined. (n.d.). Metal fatigue and basic theoretical models: a review. *Books.Google.Com*.
- Biamond, J. E., Hannink, G., Verdonschot, N., & Buma, P. (2013). Bone ingrowth potential of electron beam and selective laser melting produced trabecular-like implant surfaces with and without a biomimetic coating. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 24(3), 745–753. <https://doi.org/10.1007/S10856-012-4836-7>
- Bikas, H., Stavropoulos, P., of, G. C.-T. I. J., & 2016, undefined. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *SpringerH Bikas, P Stavropoulos, G ChryssolourisThe International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016*•*Springer*, 83(1–4), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
- Bonderer, L. J., Studart, A. R., & Gauckler, L. J. (2008). Bioinspired design and assembly of platelet reinforced polymer films. *Science*, 319(5866), 1069–1073. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1148726>
- Bormann, T., Müller, B., Schinhammer, M., Kessler, A., Thalmann, P., & De Wild, M. (2014). Microstructure of selective laser melted nickel–titanium. *Materials Characterization*, 94, 189–202. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2014.05.017>
- Bouligand, Y. (1972). Twisted fibrous arrangements in biological materials and cholesteric mesophases. *Tissue and Cell*, 4(2), 189–217. [https://doi.org/10.1016/S0040-8166\(72\)80042-9](https://doi.org/10.1016/S0040-8166(72)80042-9)
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(2), 659–681. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- Brandl, E., Schoberth, A., & Leyens, C. (2012). Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM). *Materials Science and Engineering: A*, 532, 295–307. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2011.10.095>
- Broek, D. (2012). *The practical use of fracture mechanics*.
- Browning, A., Ortiz, C., & Boyce, M. C. (2013). Mechanics of composite elasmoid fish scale assemblies and their bioinspired analogues. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 19, 75–86. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2012.11.003>
- Bruet, B., Song, J., Boyce, M., materials, C. O.-N., & 2008, undefined. (2008). Materials design principles of ancient fish armour. *Nature.ComBJF Bruet, J Song, MC Boyce, C OrtizNature Materials, 2008*•*nature.Com*. <https://doi.org/10.1038/nmat2231>
- Brüner, F., Lepski, D., & Beyer, E. (2007). Modeling the influence of process parameters and additional heat sources on residual stresses in laser cladding. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(3), 355–373. <https://doi.org/10.1007/S11666-007-9026-7/FIGURES/15>
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2000). *Fundamentals of materials science and engineering*. [https://www.academia.edu/download/60549099/Callister\\_-](https://www.academia.edu/download/60549099/Callister_-)

- Campbell, F. (2012). *Fatigue and fracture: understanding the basics*.
- Cao, R., Yu, Q., Pan, J., Lin, Y., Sweet, A., Li, Y., & Ritchie, R. O. (2020). On the exceptional damage-tolerance of gradient metallic materials. *Materials Today*, 32, 94–107. <https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2019.09.023>
- Carlson, R. L., Kardomateas, G. A., & Bates, P. R. (1991). The effects of overloads in fatigue crack growth. *International Journal of Fatigue*, 13(6), 453–460. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(91\)90479-I](https://doi.org/10.1016/0142-1123(91)90479-I)
- Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., & Ludovico, A. D. (2015). Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics & Laser Technology*, 65, 151–158. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2014.07.021>
- Catchpole-Smith, S., Aboulkhair, N., Parry, L., Tuck, C., Ashcroft, I. A., & Clare, A. (2017). Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys. *Additive Manufacturing*, 15, 113–122. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2017.02.002>
- Cavaliere, P. (2008). Crack tip plasticity in plastically graded Ni–W electrodeposited nanocrystalline alloys. *Computational Materials Science*, 41(4), 440–449. <https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2007.05.007>
- Chang, J., & Hudson, C. (1981). *Methods and models for predicting fatigue crack growth under random loading*.
- Chen, J., Xue, L., & Wang, S. H. (2011). Experimental studies on process-induced morphological characteristics of macro- and microstructures in laser consolidated alloys. *Journal of Materials Science*, 46(17), 5859–5875. <https://doi.org/10.1007/S10853-011-5543-3/FIGURES/11>
- Chen, P. Y., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2012a). Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. *Progress in Materials Science*, 57(8), 1492–1704. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2012.03.001>
- Chen, P. Y., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2012b). Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. *Progress in Materials Science*, 57(8), 1492–1704. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2012.03.001>
- Chen, P. Y., Stokes, A. G., & McKittrick, J. (2009). Comparison of the structure and mechanical properties of bovine femur bone and antler of the North American elk (*Cervus elaphus canadensis*). *Acta Biomaterialia*, 5(2), 693–706. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2008.09.011>
- Cheng, Q., Jiang, L., research, Z. T.-A. of chemical, & 2014, undefined. (2014a). Bioinspired layered materials with superior mechanical performance. *ACS Publications Q Cheng, L Jiang, Z TangAccounts of Chemical Research, 2014•ACS Publications*, 47(4), 1256–1266. <https://doi.org/10.1021/ar400279t>
- Cheng, Q., Jiang, L., research, Z. T.-A. of chemical, & 2014, undefined. (2014b). Bioinspired layered materials with superior mechanical performance. *ACS Publications*, 47(4), 1256–1266. <https://doi.org/10.1021/ar400279t>
- Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., & Sienz, J. (2015a). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *SpringerJA Cherry, HM Davies, S Mehmood, NP Lavery, SGR Brown, J SienzThe International Journal of*

*Advanced Manufacturing Technology*, 2015•Springer, 76(5–8), 869–879.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2>

- Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., & Sienz, J. (2015b). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *Springer*, 76(5–8), 869–879. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2>
- Collins, P. C., Brice, D. A., Samimi, P., Ghamarian, I., & Fraser, H. L. (2016). Microstructural Control of Additively Manufactured Metallic Materials. *Annual Review of Materials Research*, 46, 63–91. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-MATSCI-070115-031816>
- Cribb, B. W., Rathmell, A., Charters, R., Rasch, R., Huang, H., & Tibbetts, I. R. (2009). Structure, composition and properties of naturally occurring non-calcified crustacean cuticle. *Arthropod Structure & Development*, 38(3), 173–178. <https://doi.org/10.1016/J.ASD.2008.11.002>
- Dadbakhsh, S., Vrancken, B., Kruth, J. P., Luyten, J., & Van Humbeeck, J. (2016). Texture and anisotropy in selective laser melting of NiTi alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 650, 225–232. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2015.10.032>
- Das, S. (2001). *On Some Physical Aspects of Process Control in Direct Selective Laser Sintering of Metals Part II*. <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstreams/44409a12-9f12-49a6-86e6-ee89e7eff871/download>
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2017.10.001>
- Deng, D., Peng, R. L., Brodin, H., & Moverare, J. (2018). Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: Sample orientation dependence and effects of post heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*, 713, 294–306. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2017.12.043>
- Dimas, L., biomimetics, M. B.-B. &, & 2012, undefined. (2012). Influence of geometry on mechanical properties of bio-inspired silica-based hierarchical materials. *Iopscience.Iop.OrgLS Dimas, MJ BuehlerBioinspiration & Biomimetics*, 2012•iopscience.Iop.Org, 7, 36024–36034. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/7/3/036024>
- Dobrzański, L. A., Dobrzańska-Danikiewicz, A. D., & Gawęł, T. G. (2017). Computer-aided design and selective laser melting of porous biomimetic materials. *Taylor & FrancisLA Dobrzański, AD Dobrzańska-Danikiewicz, TG GawęłAdvances in Materials and Processing Technologies*, 2017•Taylor & Francis, 3(1), 70–82. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247339>
- du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R., & Bhate, D. (2019). Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 408–427. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.03.033>
- Elmer, J. W., Allen, S. M., & Eagar, T. W. (1989). Microstructural development during solidification of stainless steel alloys. *Metallurgical Transactions A*, 20(10), 2117–2131. <https://doi.org/10.1007/BF02650298/METRICS>
- Esmailizadeh, R., Keshavarzkermani, A., Ali, U., Mahmoodkhani, Y., Behraves, B., Jahed, H., Bonakdar, A., & Toyserkani, E. (2020). Customizing mechanical properties of additively manufactured Hastelloy X parts by adjusting laser scanning speed. *Journal*

- Espinosa, H. D., Juster, A. L., Latourte, F. J., Loh, O. Y., Gregoire, D., & Zavattieri, P. D. (2011a). Tablet-level origin of toughening in abalone shells and translation to synthetic composite materials. *Nature Communications* 2:1, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms1172>
- Espinosa, H. D., Juster, A. L., Latourte, F. J., Loh, O. Y., Gregoire, D., & Zavattieri, P. D. (2011b). Tablet-level origin of toughening in abalone shells and translation to synthetic composite materials. *Nature.ComHD Espinosa, AL Juster, FJ Latourte, OY Loh, D Gregoire, PD ZavattieriNature Communications, 2011•nature.Com.* <https://doi.org/10.1038/ncomms1172>
- Espinosa, H., Rim, J., ... F. B.-P. in M., & 2009, undefined. (n.d.). Merger of structure and material in nacre and bone—Perspectives on de novo biomimetic materials. *ElsevierHD Espinosa, JE Rim, F Barthelat, MJ BuehlerProgress in Materials Science, 2009•Elsevier.* Retrieved March 15, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642509000565>
- Fajdiga, G., & Sraml, M. (2009). Fatigue crack initiation and propagation under cyclic contact loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(9), 1320–1335. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACTMECH.2009.02.005>
- Fang, Z. C., Wu, Z. L., Huang, C. G., & Wu, C. W. (2020). Review on residual stress in selective laser melting additive manufacturing of alloy parts. *Optics & Laser Technology*, 129, 106283. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2020.106283>
- Filimonov, A. M., Rogozin, O. A., Firsov, D. G., Kuzminova, Y. O., Sergeev, S. N., Zhilyaev, A. P., Lerner, M. I., Toropkov, N. E., Simonov, A. P., Binkov, I. I., Okulov, I. V., Akhatov, I. S., & Evlashin, S. A. (2020). Hardening of Additive Manufactured 316L Stainless Steel by Using Bimodal Powder Containing Nanoscale Fraction. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 115, 14(1), 115. <https://doi.org/10.3390/MA14010115>
- Fu, K., Moreno, D., Yang, M., & Wood, K. L. (2014). Bio-Inspired Design: An Overview Investigating Open Questions From the Broader Field of Design-by-Analogy. *Asmedigitalcollection.Asme.Org.* <https://doi.org/10.1115/1.4028289>
- Fudge, D., ... J. G. the R. S. of L., & 2004, undefined. (2004). Molecular design of the  $\alpha$ -keratin composite: Insights from a matrix-free model, hagfish slime threads. *Royalsocietypublishing.OrgDS Fudge, JM GoslineProceedings of the Royal Society of London. Series B, 2004•royalsocietypublishing.Org,* 271(1536), 291–299. <https://doi.org/10.1098/rspb.2003.2591>
- Gao, C., & Li, Y. (2019). Mechanical model of bio-inspired composites with sutural tessellation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 122, 190–204. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2018.09.015>
- Geiger, F., Kunze, K., & Etter, T. (2016). Tailoring the texture of IN738LC processed by selective laser melting (SLM) by specific scanning strategies. *Materials Science and Engineering: A*, 661, 240–246. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.03.036>
- Geiger, M., Roth, S., & Becker, W. (1998). Influence of laser-produced microstructures on the tribological behaviour of ceramics. *Surface and Coatings Technology*, 100–101(1–3), 17–22. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00581-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00581-1)
- Giannakopoulos, A. E., Suresh, S., Finot, M., & Olsson, M. (1995a). Elastoplastic analysis of thermal cycling: layered materials with compositional gradients. *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(4), 1335–1354. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)00360-T](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)00360-T)

- Giannakopoulos, A. E., Suresh, S., Finot, M., & Olsson, M. (1995b). Elastoplastic analysis of thermal cycling: layered materials with compositional gradients. *Acta Metallurgica et Materialia*, 43(4), 1335–1354. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)00360-T](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)00360-T)
- Gong, X., Wang, X., Cole, V., Jones, Z., Cooper, K., & Chou, K. (2015). *Characterization of Microstructure and Mechanical Property of Inconel 718 From Selective Laser Melting*. <https://doi.org/10.1115/MSEC2015-9317>
- Gordon, J. V., Narra, S. P., Cunningham, R. W., Liu, H., Chen, H., Suter, R. M., Beuth, J. L., & Rollett, A. D. (2020). Defect structure process maps for laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 36, 101552. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101552>
- Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M., & Banerjee, R. (2017a). Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18(1), 584–610. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1361305>
- Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M., & Banerjee, R. (2017b). Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 18(1), 584–610. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1361305>
- Gu, D., Hagedorn, Y. C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R. J. S., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta Materialia*, 60(9), 3849–3860. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2012.04.006>
- Gu, D., & Shen, Y. (2008a). Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS. *Applied Surface Science*, 255(5), 1880–1887. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2008.06.118>
- Gu, D., & Shen, Y. (2008b). Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS. *Applied Surface Science*, 255(5), 1880–1887. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2008.06.118>
- Gu, D., & Shen, Y. (2009a). Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*, 30(8), 2903–2910. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2009.01.013>
- Gu, D., & Shen, Y. (2009b). Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*, 30(8), 2903–2910. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2009.01.013>
- Gu, G. X., Libonati, F., Wettermark, S. D., & Buehler, M. J. (2017). Printing nature: Unraveling the role of nacre's mineral bridges. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 76, 135–144. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2017.05.007>
- Habibi, M. K., Samaei, A. T., Gheshlaghi, B., Lu, J., & Lu, Y. (2015). Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: Underlying mechanisms. *Acta Biomaterialia*, 16(1), 178–186. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2015.01.038>
- He, Y., Yuan, K., Li, Y., Zhao, S., Li, D., Research, W. G.-J. of M., & 2024, undefined. (n.d.). Overload-induced anisotropy of fatigue crack growth in laser deposited Ti-6Al-4V alloy. *ElsevierY He, K Yuan, Y Li, S Zhao, D Li, W GuoJournal of Materials Research and Technology, 2024•Elsevier*.
- Hemmes, K., Ellmer, F., Farajian, M., ... I. V.-P. S., & 2022, undefined. (n.d.). On the evaluation of overload effects on the fatigue strength of metallic materials. *ElsevierK*

Hemmesi, F Ellmer, M Farajian, I Varfolomeev, M Luke *Procedia Structural Integrity*, 2022•Elsevier.

- Huang, S., Liu, P., Mokasdar, A., of, L. H.-T. I. journal, & 2013, undefined. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *SpringerSH Huang, P Liu, A Mokasdar, L HouThe International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013•Springer, 67(5–8), 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Imbeni, V., Kruzic, J. J., Marshall, G. W., Marshall, S. J., & Ritchie, R. O. (2005). The dentin–enamel junction and the fracture of human teeth. *Nature Materials* 2005 4:3, 4(3), 229–232. <https://doi.org/10.1038/nmat1323>
- Ishimoto, T., Hagihara, K., Hisamoto, K., Sun, S. H., & Nakano, T. (2017). Crystallographic texture control of beta-type Ti–15Mo–5Zr–3Al alloy by selective laser melting for the development of novel implants with a biocompatible low Young’s modulus. *Scripta Materialia*, 132, 34–38. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2016.12.038>
- Islam, M. K., Hazell, P. J., Escobedo, J. P., & Wang, H. (2021). Biomimetic armour design strategies for additive manufacturing: A review. *Materials & Design*, 205, 109730. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2021.109730>
- Jaslow, C. R., & Biewener, A. A. (1995a). Strain patterns in the horncores, cranial bones and sutures of goats (*Capra hircus*) during impact loading. *Journal of Zoology*, 235(2), 193–210. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7998.1995.TB05137.X>
- Jaslow, C. R., & Biewener, A. A. (1995b). Strain patterns in the horncores, cranial bones and sutures of goats (*Capra hircus*) during impact loading. *Journal of Zoology*, 235(2), 193–210. <https://doi.org/10.1111/J.1469-7998.1995.TB05137.X>
- Ji, B., & Gao, H. (2004). Mechanical properties of nanostructure of biological materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52(9), 1963–1990. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2004.03.006>
- Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., & Wang, H. (2021a). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021 113:9, 113(9), 2413–2435. <https://doi.org/10.1007/S00170-021-06810-3>
- Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., & Wang, H. (2021b). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021 113:9, 113(9), 2413–2435. <https://doi.org/10.1007/S00170-021-06810-3>
- Johnson, A. A., Andrew, ©, & Johnson, A. (2014). *Establishing design characteristics for the development of stab resistant Laser Sintered body armour*.
- Jr, W. C., & Rethwisch, D. (2020). *Materials science and engineering: an introduction*. <https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=dmoTEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA19&dq=Materials+Science+and+Engineering.+John+Wiley+%26+Sons,+Inc.,&ots=O-GrhSyUiZ&sig=iA1oRXaW2VRHnmo4cdpSniBy8xk>
- Kaji, F., & Barari, A. (2015). Evaluation of the Surface Roughness of Additive Manufacturing Parts Based on the Modelling of Cusp Geometry. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 658–663. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2015.06.157>
- Kale, A. B., Alluri, P., Singh, A. K., & Choi, S. H. (2021). The deformation and fracture behavior of 316L SS fabricated by SLM under mini V-bending test. *International Journal of Mechanical Sciences*, 196, 106292. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2021.106292>

- Kamat, S., Su, X., Ballarini, R., & Heuer, A. H. (2000). Structural basis for the fracture toughness of the shell of the conch *Strombus gigas*. *Nature* 2000 405:6790, 405(6790), 1036–1040. <https://doi.org/10.1038/35016535>
- Kasapi, M. A., & Gosline, J. M. (1997). Design Complexity and Fracture Control in the Equine Hoof Wall. *Journal of Experimental Biology*, 200(11), 1639–1659. <https://doi.org/10.1242/JEB.200.11.1639>
- Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., & Requena, G. (2016). Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 105, 160–170. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.05.070>
- Katti, D. R., Katti, K. S., Sopp, J. M., & Sarikaya, M. (2001). 3D finite element modeling of mechanical response in nacre-based hybrid nanocomposites. *Computational and Theoretical Polymer Science*, 11(5), 397–404. [https://doi.org/10.1016/S1089-3156\(01\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S1089-3156(01)00012-5)
- Khorasani, A. M., Gibson, I., Awan, U. S., & Ghaderi, A. (2019a). The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 25, 176–186. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.09.002>
- Khorasani, A. M., Gibson, I., Awan, U. S., & Ghaderi, A. (2019b). The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 25, 176–186. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.09.002>
- Khorasani, A. M., Gibson, I., & Ghaderi, A. R. (2018). Rheological characterization of process parameters influence on surface quality of Ti-6Al-4V parts manufactured by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(9–12), 3761–3775. <https://doi.org/10.1007/S00170-018-2168-6/METRICS>
- Kim, A. S., Suresh, S., & Shih, C. F. (1997). Plasticity effects on fracture normal to interfaces with homogeneous and graded compositions. *International Journal of Solids and Structures*, 34(26), 3415–3432. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(96\)00225-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(96)00225-9)
- King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., Kamath, C., & Rubenchik, A. M. (2014). Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(12), 2915–2925. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2014.06.005>
- Kiseleva, A. P., Krivoshapkin, P. V., & Krivoshapkina, E. F. (2020). Recent Advances in Development of Functional Spider Silk-Based Hybrid Materials. *Frontiers in Chemistry*, 8. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2020.00554/FULL>
- Klesnil, M., & Lukác, P. (1992). *Fatigue of metallic materials*.
- Köhnen, P., Létang, M., Voshage, M., Schleifenbaum, J. H., & Haase, C. (2019). Understanding the process-microstructure correlations for tailoring the mechanical properties of L-PBF produced austenitic advanced high strength steel. *Additive Manufacturing*, 30, 100914. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100914>
- Korsunsky, A. M., Song, X., Belnoue, J., Jun, T., Hofmann, F., De Matos, P. F. P., Nowell, D., Dini, D., Aparicio-Blanco, O., & Walsh, M. J. (2009). Crack tip deformation fields and fatigue crack growth rates in Ti-6Al-4V. *International Journal of Fatigue*, 31(11–12), 1771–1779. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2009.02.043>
- Kovacı, H., (2016). Effects of plasma nitriding, DLC coating and duplex surface treatments on fatigue crack growth behaviour of AISI 4140 steel under overload and underload. PhD thesis, Atatürk University Graduate School of Natural and Applied Sciences.

- Kovacı, H., & Seçer, Y. (2020). Improved tribological performance of AISI 316L stainless steel by a combined surface treatment: Surface texturing by selective laser melting and plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 400, 126178. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2020.126178>
- Kovacı, H., Yetim, A. F., Baran, & Çelik, A. (2016a). Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 2-Variable amplitude loading and load interactions. *Materials Science and Engineering: A*, 672, 265–275. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.07.003>
- Kovacı, H., Yetim, A. F., Baran, O., & Çelik, A. (2016b). Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 1-constant amplitude loading. *Materials Science and Engineering: A*, 672, 257–264. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.07.002>
- Krauss, S., Monsonogo-Ornan, E., ... E. Z.-A., & 2009, undefined. (n.d.). Mechanical function of a complex three-dimensional suture joining the bony elements in the shell of the red-eared slider turtle. *Scholars.Huji.Ac.II*. Retrieved March 15, 2025, from [http://scholars.huji.ac.il/sites/default/files/shaharlab/files/mechanical\\_function\\_of\\_a\\_complex\\_three-dimensional\\_suture\\_joining\\_the\\_bony\\_elements\\_in\\_the\\_shell\\_of\\_the\\_red-eared\\_slider\\_turtle\\_5.pdf](http://scholars.huji.ac.il/sites/default/files/shaharlab/files/mechanical_function_of_a_complex_three-dimensional_suture_joining_the_bony_elements_in_the_shell_of_the_red-eared_slider_turtle_5.pdf)
- Kruth, J. P., Deckers, J., Yasa, E., & Wauthlé, R. (2012). Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(6), 980–991. <https://doi.org/10.1177/0954405412437085>
- Kruth, J. P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., & Lauwers, B. (2004). Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1–3), 616–622. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2003.11.051>
- Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56(2), 730–759. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2007.10.004>
- Kumar, P., Farah, J., Akram, J., Teng, C., ... J. G.-T. I. J., & 2019, undefined. (2019). Influence of laser processing parameters on porosity in Inconel 718 during additive manufacturing. *SpringerP Kumar, J Farah, J Akram, C Teng, J Ginn, M MisraThe International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019•Springer, 103(1–4), 1497–1507. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03655-9>
- Kunze, K., Etter, T., Grässlin, J., & Shklover, V. (2015). Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). *Materials Science and Engineering: A*, 620, 213–222. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2014.10.003>
- Kurzynowski, T., Gruber, K., Stopyra, W., Kuźnicka, B., & Chlebus, E. (2018). Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 718, 64–73. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2018.01.103>
- Larimian, T., Kannan, M., Grzesiak, D., AlMangour, B., & Borkar, T. (2020). Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 770, 138455. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.138455>

- Lee, Y. (2005). *Fatigue testing and analysis: theory and practice*.
- Leicht, A., Rashidi, M., Klement, U., & Hryha, E. (2020). Effect of process parameters on the microstructure, tensile strength and productivity of 316L parts produced by laser powder bed fusion. *Materials Characterization*, 159, 110016. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2019.110016>
- Lenau, T., ... A. M.-, VIII, and B., & 2018, undefined. (2018). Paradigms for biologically inspired design. *Spiedigitallibrary.OrgTA Lenau, AL Metze, T HesselbergBioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication VIII, 2018•spiedigitallibrary.Org*. <https://doi.org/10.1117/12.2296560>
- Lewandowski, J. J., & Seifi, M. (2016). Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annual Review of Materials Research*, 46, 151–186. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-MATSCI-070115-032024>
- Li, F., Li, J., Huang, T., Kou, H., & Zhou, L. (2017). Compression fatigue behavior and failure mechanism of porous titanium for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 65, 814–823. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2016.09.035>
- Li, P., Zhou, J., Li, L., Zhang, T., Gou, Y., Meng, X., A, J. L.-A. P., & 2021, undefined. (2021). Tensile fracture behavior of 316L stainless steel components fabricated with hybrid directed energy deposition and thermal milling manufacturing. *SpringerP Li, J Zhou, L Li, T Zhang, Y Gou, X Meng, J LyuApplied Physics A, 2021•Springer, 127(3)*, 212. <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04381-4>
- Li, Q., Zeng, Q., Shi, L., Zhang, X., Materials, K. Z.-J. of, & 2016, undefined. (2013a). Bio-inspired sensors based on photonic structures of Morpho butterfly wings: a review. *Pubs.Rsc.OrgQ Li, Q Zeng, L Shi, X Zhang, KQ ZhangJournal of Materials Chemistry C, 2016•pubs.Rsc.Org, 00*, 1–3. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- Li, Q., Zeng, Q., Shi, L., Zhang, X., Materials, K. Z.-J. of, & 2016, undefined. (2013b). Bio-inspired sensors based on photonic structures of Morpho butterfly wings: a review. *Pubs.Rsc.OrgQ Li, Q Zeng, L Shi, X Zhang, KQ ZhangJournal of Materials Chemistry C, 2016•pubs.Rsc.Org, 00*, 1–3. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- Li, Q., Zeng, Q., Shi, L., Zhang, X., Materials, K. Z.-J. of, & 2016, undefined. (2013c). Bio-inspired sensors based on photonic structures of Morpho butterfly wings: a review. *Pubs.Rsc.OrgQ Li, Q Zeng, L Shi, X Zhang, KQ ZhangJournal of Materials Chemistry C, 2016•pubs.Rsc.Org, 00*, 1–3. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- Li, Q., Zeng, Q., Shi, L., Zhang, X., Materials, K. Z.-J. of, & 2016, undefined. (2013d). Bio-inspired sensors based on photonic structures of Morpho butterfly wings: a review. *Pubs.Rsc.OrgQ Li, Q Zeng, L Shi, X Zhang, KQ ZhangJournal of Materials Chemistry C, 2016•pubs.Rsc.Org, 00*, 1–3. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Du, M., and, Z. X.-J. of M. E., & 2010, undefined. (2010a). 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting. *SpringerR Li, J Liu, Y Shi, M Du, Z XieJournal of Materials Engineering and Performance, 2010•Springer, 19(5)*, 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9535-2>
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Du, M., and, Z. X.-J. of M. E., & 2010, undefined. (2010b). 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting. *SpringerR Li, J Liu, Y Shi, M Du, Z XieJournal of Materials Engineering and Performance, 2010•Springer, 19(5)*, 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9535-2>
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Du, M., and, Z. X.-J. of M. E., & 2010, undefined. (2010c). 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting. *SpringerR Li, J Liu, Y*

- Shi, M Du, Z Xie *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010•Springer, 19(5), 666–671. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9535-2>
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., of, W. J.-T. I. J., & 2012, undefined. (2012). Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *SpringerR Li, J Liu, Y Shi, L Wang, W Jiang The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012•Springer, 59(9–12), 1025–1035. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3566-1>
- Li, S., Zhang, Y., Qi, L., & Kang, Y. (2018a). Effect of single tensile overload on fatigue crack growth behavior in DP780 dual phase steel. *International Journal of Fatigue*, 106, 49–55. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.09.018>
- Li, S., Zhang, Y., Qi, L., & Kang, Y. (2018b). Effect of single tensile overload on fatigue crack growth behavior in DP780 dual phase steel. *International Journal of Fatigue*, 106, 49–55. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.09.018>
- Libby, E., Azofeifa, D. E., Hernández-Jiménez, M., & Aguilar, C. B. (2014). Light reflection by the cuticle of *C. aurigans* scarabs: a biological broadband reflector of left handed circularly polarized light. *Iopscience.Iop.OrgE Libby, DE Azofeifa, M Hernández-Jiménez, C Barboza-Aguilar, A Solís, I García-Aguilar Journal of Optics*, 2014•iopscience.Iop.Org. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/8/082001>
- Lin, E., Li, Y., Weaver, J. C., Ortiz, C., & Boyce, M. C. (2014). Tunability and enhancement of mechanical behavior with additively manufactured bio-inspired hierarchical suture interfaces. *Journal of Materials Research*, 29(17), 1867–1875. <https://doi.org/10.1557/JMR.2014.175>
- Lin, K., Gu, D., Hu, K., Yang, J., Wang, H., Yuan, L., Shi, X., & Meng, L. (2021). Laser powder bed fusion of bio-inspired honeycomb structures: Effect of twist angle on compressive behaviors. *Thin-Walled Structures*, 159, 107252. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2020.107252>
- Lin, Y., Yu, Q., Pan, J., Duan, F., Ritchie, R. O., & Li, Y. (2020). On the impact toughness of gradient-structured metals. *Acta Materialia*, 193, 125–137. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2020.04.027>
- Lingham-Soliar, T. (2014). Feather structure, biomechanics and biomimetics: The incredible lightness of being. *Journal of Ornithology*, 155(2), 323–336. <https://doi.org/10.1007/S10336-013-1038-0/FIGURES/10>
- Liu, J., Li, S., Fox, K., & Tran, P. (2022). 3D concrete printing of bioinspired Bouligand structure: A study on impact resistance. *Additive Manufacturing*, 50, 102544. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102544>
- Liu, Q. C., Elambasseril, J., Sun, S. J., Leary, M., Brandt, M., & Sharp, P. K. (2014). The Effect of Manufacturing Defects on the Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Specimens Fabricated Using Selective Laser Melting. *Advanced Materials Research*, 891–892, 1519–1524. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.891-892.1519>
- Liu, Z., Meyers, M. A., Zhang, Z., & Ritchie, R. O. (2017). Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications. *Progress in Materials Science*, 88, 467–498. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2017.04.013>
- Liu, Z. Q., Jiao, D., Weng, Z. Y., & Zhang, Z. F. (2016). Structure and mechanical behaviors of protective armored pangolin scales and effects of hydration and orientation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 56, 165–174. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2015.11.013>

- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017a). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 255–263. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2017.05.042>
- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017b). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 255–263. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2017.05.042>
- Lott, P., Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Hinke, C., & Bültmann, J. (2011). Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM). *Physics Procedia*, 12(PART 1), 683–690. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2011.03.085>
- Lou, S., Jiang, X., Sun, W., Zeng, W., Pagani, L., & Scott, P. J. (2019). Characterisation methods for powder bed fusion processed surface topography. *Precision Engineering*, 57, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2018.09.007>
- Lu, Y., Wu, S., Gan, Y., Huang, T., Yang, C., Junjie, L., & Lin, J. (2015). Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy. *Optics & Laser Technology*, 75, 197–206. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2015.07.009>
- Luz, G. A., Mano, J. F., & Luz, G. M. (2009). Biomimetic design of materials and biomaterials. *Researchgate.Net*, 367(1893), 1587–1605. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0007>
- Lynch, S. (2019). A review of underlying reasons for intergranular cracking for a variety of failure modes and materials and examples of case histories. *Engineering Failure Analysis*, 100, 329–350. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.02.027>
- Maghsoudi-Ganjeh, M., Lin, L., Yang, X., Materials, X. Z.-J. of, & 2021, undefined. (123 C.E.). Computational modeling and simulation of bioinspired nacre-like composites. *SpringerM Maghsoudi-Ganjeh, L Lin, X Yang, X ZengJournal of Materials Research*, 2021•Springer, 36(13), 2651–2661. <https://doi.org/10.1557/s43578-021-00124-6>
- Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Akinlabi, S., Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., & Akinlabi, S. (2015). Laser power and scanning speed influence on the mechanical property of laser metal deposited titanium-alloy. *SpringerRM Mahamood, ET Akinlabi, S AkinlabiLasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2015•Springer, 2(1), 43–55. <https://doi.org/10.1007/s40516-014-0003-y>
- Makhlouf, A. S. H., & Aliofkhaezraei, M. (2018). Handbook of Materials Failure Analysis: With Case Studies from the Construction Industries. *Handbook of Materials Failure Analysis: With Case Studies from the Construction Industries*, 1–357. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01329-3>
- Manvatkar, V., De, A., & DebRoy, T. (2015). Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 31(8), 924–930. [https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000701/ASSET/6C25C758-6C71-451E-B096-495B5951DD49/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1179\\_1743284714Y.0000000701-FIG7.JPG](https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000701/ASSET/6C25C758-6C71-451E-B096-495B5951DD49/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1179_1743284714Y.0000000701-FIG7.JPG)
- Mayer, G. (2005). Rigid biological systems as models for synthetic composites. *Science*, 310(5751), 1144–1147. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1116994>

- Meier, H., Werkstofftechnik, C. H.-M. und, & 2008, undefined. (n.d.). Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *CiteseerH Meier, C HaberlandMaterialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2008•Citeseer*. <https://doi.org/10.1002/mawe.200800327>
- Meng, Q., Gao, Y., Shi, X., & Feng, X. Q. (2022). Three-dimensional crack bridging model of biological materials with twisted Bouligand structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 159*, 104729. <https://doi.org/10.1016/J.JMPS.2021.104729>
- Mercelis, P., & Kruth, J. P. (2006a). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal, 12*(5), 254–265. <https://doi.org/10.1108/13552540610707013/FULL/HTML>
- Mercelis, P., & Kruth, J. P. (2006b). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal, 12*(5), 254–265. <https://doi.org/10.1108/13552540610707013/FULL/HTML>
- Merot, P., Morel, F., Pessard, E., Gallegos Mayorga, L., Buttin, P., & Baffie, T. (2022). Fatigue strength and life assessment of L-PBF 316L stainless steel showing process and corrosion related defects. *Engineering Fracture Mechanics, 276*, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108883>
- Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lin, A. Y. M., & Seki, Y. (2008). Biological materials: Structure and mechanical properties. *Progress in Materials Science, 53*(1), 1–206. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2007.05.002>
- Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lopez, M. I., Seki, Y., & Lin, A. Y. M. (2011). Biological materials: A materials science approach. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 4*(5), 626–657. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2010.08.005>
- Miranda, G., Faria, S., Bartolomeu, F., Pinto, E., Madeira, S., Mateus, A., Carreira, P., Alves, N., Silva, F. S., & Carvalho, O. (2016). Predictive models for physical and mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A, 657*, 43–56. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2016.01.028>
- Mirkhalaf, M., Dastjerdi, A., communications, F. B.-N., & 2014, undefined. (2014). Overcoming the brittleness of glass through bio-inspiration and micro-architecture. *Nature.ComM Mirkhalaf, AK Dastjerdi, F BarthelatNature Communications, 2014•nature.Com*. <https://doi.org/10.1038/ncomms4166>
- Miserez, A., Schneberk, T., Sun, C., Zok, F., Science, J. W.-, & 2008, undefined. (2008). The transition from stiff to compliant materials in squid beaks. *Science.Org, 319*(5871), 1816–1819. <https://doi.org/10.1126/science.1154117>
- Monzón, M., Ortega, Z., Martínez, A., of, F. O.-T. international journal, & 2015, undefined. (2015). Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. *SpringerMD Monzón, Z Ortega, A Martínez, F OrtegaThe International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015•Springer, 76*(5–8), 1111–1121. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6334-1>
- Morales, E. V. (2011). *ALLOY STEEL – PROPERTIES AND USE Edited by Eduardo Valencia Morales*. 270. [https://books.google.com/books/about/Alloy\\_Steel.html?hl=tr&id=MSYaDwAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/Alloy_Steel.html?hl=tr&id=MSYaDwAAQBAJ)
- Mower, T. M., & Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A, 651*, 198–213. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2015.10.068>
- Mugwagwa, L., Dimitrov, D., Matope, S., & Yadroitsev, I. (2019). Evaluation of the impact of scanning strategies on residual stresses in selective laser melting. *International Journal*

- of *Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8), 2441–2450.  
<https://doi.org/10.1007/S00170-019-03396-9/METRICS>
- Mumtaz, K. A., Erasenthiran, P., & Hopkinson, N. (2008). High density selective laser melting of Waspaloy®. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1–3), 77–87.  
<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2007.04.117>
- Munch, E., Launey, M. E., Alsem, D. H., Saiz, E., Tomsia, A. P., & Ritchie, R. O. (2008). Tough, bio-inspired hybrid materials. *Science*, 322(5907), 1516–1520.  
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1164865>
- Muniz, F. T. L., Miranda, M. A. R., Morilla Dos Santos, C., & Sasaki, J. M. (2016). The Scherrer equation and the dynamical theory of X-ray diffraction. *Urn:Issn:2053-2733*, 72(3), 385–390. <https://doi.org/10.1107/S205327331600365X>
- Murphy, S., biotechnology, A. A.-N., & 2014, undefined. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature.ComSV Murphy, A AtalaNature Biotechnology, 2014•nature.Com*.  
<https://doi.org/10.1038/nbt.2958>
- Murr, L. E. (2018). A Metallographic Review of 3D Printing/Additive Manufacturing of Metal and Alloy Products and Components. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 7(2), 103–132. <https://doi.org/10.1007/S13632-018-0433-6>
- Naleway, S. E., Porter, M. M., McKittrick, J., Meyers, M. A., Naleway, S. E., McKittrick, J., Meyers, M. A., & Porter, M. M. (2015). Structural design elements in biological materials: application to bioinspiration. *Wiley Online LibrarySE Naleway, MM Porter, J McKittrick, MA MeyersAdvanced Materials, 2015•Wiley Online Library*, 27(37), 5455–5476. <https://doi.org/10.1002/adma.201502403>
- Ng, C., Savalani, M., ... H. M.-V. and physical, & 2010, undefined. (2010). Layer manufacturing of magnesium and its alloy structures for future applications. *Taylor & FrancisCC Ng, MM Savalani, HC Man, I GibsonVirtual and Physical Prototyping, 2010•Taylor & Francis*, 5(1), 13–19. <https://doi.org/10.1080/17452751003718629>
- Ni, X., Kong, D., Wu, W., Zhang, L., Dong, C., He, B., Lu, L., Wu, K., & Zhu, D. (2018). Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting Under Different Scanning Speeds. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(7), 3667–3677. <https://doi.org/10.1007/S11665-018-3446-Z/FIGURES/14>
- Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., & Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401–477.  
<https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2015.03.002>
- Oliveira de Menezes, J. T., Castrodeza, E. M., & Casati, R. (2019). Effect of build orientation on fracture and tensile behavior of A357 Al alloy processed by Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 138392.  
<https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.138392>
- Oliveira, J. P., LaLonde, A. D., & Ma, J. (2020). Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 193, 108762.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.108762>
- Parimi, L. L., Ravi, G., Clark, D., & Attallah, M. M. (2014). Microstructural and texture development in direct laser fabricated IN718. *Materials Characterization*, 89, 102–111.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2013.12.012>
- Pham, M. S., Dovgyy, B., Hooper, P. A., Gourlay, C. M., & Piglione, A. (2020). The role of side-branching in microstructure development in laser powder-bed fusion. *Nature Communications 2020 11:1*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14453-3>

- Porter, M. M., Novitskaya, E., Castro-Ceseña, A. B., Meyers, M. A., & McKittrick, J. (2013). Highly deformable bones: Unusual deformation mechanisms of seahorse armor. *Acta Biomaterialia*, 9(6), 6763–6770. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2013.02.045>
- Praneeth, J., Venkatesh, S., & Krishn, L. S. (2023). Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.12.222>
- Promopattum, P., & Yao, S. C. (2020). Influence of scanning length and energy input on residual stress reduction in metal additive manufacturing: Numerical and experimental studies. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 247–259. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2019.11.020>
- Rhee, H., Horstemeyer, M. F., Hwang, Y., Lim, H., El Kadiri, H., & Trim, W. (2009). A study on the structure and mechanical behavior of the *Terrapene carolina* carapace: A pathway to design bio-inspired synthetic composites. *Materials Science and Engineering: C*, 29(8), 2333–2339. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2009.06.002>
- Ribbans, B., Li, Y., & Tan, T. (2016). A bioinspired study on the interlaminar shear resistance of helicoidal fiber structures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 56, 57–67. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2015.11.004>
- Richard, H. A., & Sander, M. (2016a). Fatigue Crack Growth Under Cyclic Loading with Constant Amplitude. *Solid Mechanics and Its Applications*, 227, 113–151. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32534-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32534-7_4)
- Richard, H. A., & Sander, M. (2016b). Fatigue Crack Growth Under Cyclic Loading with Constant Amplitude. *Solid Mechanics and Its Applications*, 227, 113–151. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32534-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32534-7_4)
- Riemer, A., Leuders, S., Thöne, M., Richard, H. A., Tröster, T., & Niendorf, T. (2014). On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Engineering Fracture Mechanics*, 120, 15–25. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2014.03.008>
- Roco, M. C. (2011). The long view of nanotechnology development: The National Nanotechnology Initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(2), 427–445. <https://doi.org/10.1007/S11051-010-0192-Z/TABLES/7>
- Roy, S., & Basu, B. (2008). Mechanical and tribological characterization of human tooth. *Materials Characterization*, 59(6), 747–756. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2007.06.008>
- Sachdeva, A., Singh, S., & Sharma, V. S. (2013). Investigating surface roughness of parts produced by SLS process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9–12), 1505–1516. <https://doi.org/10.1007/S00170-012-4118-Z/METRICS>
- Saeidi, K. (2016). *Stainless steels fabricated by laser melting: Scaled-down structural hierarchies and microstructural heterogeneities*. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:919300>
- Saeidi, K., Gao, X., Zhong, Y., & Shen, Z. J. (2015). Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 625, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.018>
- Salmi, A., & Atzeni, E. (2017). History of residual stresses during the production phases of AlSi10Mg parts processed by powder bed additive manufacturing technology. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(2), 153–160. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1310439>

- Salmi, M., Paloheimo, K. S., Tuomi, J., Wolff, J., & Mäkitie, A. (2013a). Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, *41*(7), 603–609. <https://doi.org/10.1016/J.JCMS.2012.11.041>
- Salmi, M., Paloheimo, K. S., Tuomi, J., Wolff, J., & Mäkitie, A. (2013b). Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, *41*(7), 603–609. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2012.11.041>
- Salvati, E., O'Connor, S., Sui, T., Nowell, D., & Korsunsky, A. M. (2016). A study of overload effect on fatigue crack propagation using EBSD, FIB–DIC and FEM methods. *Engineering Fracture Mechanics*, *167*, 210–223. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2016.04.034>
- Schijve, J. (2001). *Introduction to fatigue of structures and materials*.
- Schmidt, V., & Belegatis, M. R. (Eds.). (2013). *Laser Technology in Biomimetics*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41341-4>
- Sefene, E. M. (2022). *State-of-the-art of selective... - Google Akademik*. (n.d.). Retrieved March 17, 2025, from [https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as\\_sdt=0%2C5&as\\_vis=1&q=Sefene%2C+E.+M.+%282022%29.+State-of-the-art+of+selective+laser+melting+process%3A+A+comprehensive+review.+Journal+of+Manufacturing+Systems%2C+63%2C+250-274.&btnG=](https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&q=Sefene%2C+E.+M.+%282022%29.+State-of-the-art+of+selective+laser+melting+process%3A+A+comprehensive+review.+Journal+of+Manufacturing+Systems%2C+63%2C+250-274.&btnG=)
- Seifi, M., Salem, A., Beuth, J., Harrysson, O., & Lewandowski, J. J. (2016). Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing. *JOM*, *68*(3), 747–764. <https://doi.org/10.1007/S11837-015-1810-0/FIGURES/14>
- Shahar, R., Krauss, S., Monsonogo-Ornan, E., & Fratzl, P. (2009). Mechanical Function of a Complex Three-dimensional Suture Joining the Bony Elements in the Shell of the Red-eared Slider Turtle. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, *1187*, 1187-KK01-05. <https://doi.org/10.1557/PROC-1187-KK01-05>
- Shahriari, A., Khaksar, L., Nasiri, A., Hadadzadeh, A., Amirkhiz, B. S., & Mohammadi, M. (2020). Microstructure and corrosion behavior of a novel additively manufactured maraging stainless steel. *Electrochimica Acta*, *339*, 135925. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2020.135925>
- Sharma, R., & Kumar, A. (2019). Track-Scale Simulations of Selective Laser Melting to Investigate Development and Mitigation of Thermal Stresses. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, *6*(4), 464–492. <https://doi.org/10.1007/S40516-019-00103-0>
- Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R., O'Donnell, G., & Trimble, D. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *128*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2018.01.003>
- Silva, F. S. (2007). Fatigue crack propagation after overloading and underloading at negative stress ratios. *International Journal of Fatigue*, *29*(9–11), 1757–1771. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2007.03.012>
- Simchi, A., & Pohl, H. (2003a). Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder. *Materials Science and Engineering: A*, *359*(1–2), 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00341-1)
- Simchi, A., & Pohl, H. (2003b). Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder. *Materials Science and Engineering: A*, *359*(1–2), 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00341-1)

- Simson, T., Emmel, A., Dwars, A., Manufacturing, J. B.-A., & 2017, undefined. (n.d.). Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting. *ElsevierT Simson, A Emmel, A Dwars, J BöhmAdditive Manufacturing, 2017•Elsevier*. Retrieved March 15, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417301604>
- Singla, A. K., Banerjee, M., Sharma, A., Singh, J., Bansal, A., Gupta, M. K., Khanna, N., Shahi, A. S., & Goyal, D. K. (2021). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *Journal of Manufacturing Processes, 64*(January), 161–187. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.009>
- Skorupa, M. (1998). LOAD INTERACTION EFFECTS DURING FATIGUE CRACK GROWTH UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING—A LITERATURE REVIEW. PART I: EMPIRICAL TRENDS. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 21*(8), 987–1006. <https://doi.org/10.1046/J.1460-2695.1998.00083.X>
- Smith, B., Schäffer, T., Viani, M., Nature, J. T.-, & 1999, undefined. (1999). Molecular mechanistic origin of the toughness of natural adhesives, fibres and composites. *Nature.ComBL Smith, TE Schäffer, M Viani, JB Thompson, NA Frederick, J Kindt, A Belcher, GD StuckyNature, 1999•nature.Com*.
- Song, Y. M., Xie, Y., Malyarchuk, V., Xiao, J., Jung, I., Choi, K.-J., Liu, Z., Park, H., Lu, C., Kim, R.-H., Li, R., Crozier, K. B., Huang, Y., & Rogers, J. A. (2013). Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature.ComYM Song, Y Xie, V Malyarchuk, J Xiao, I Jung, KJ Choi, Z Liu, H Park, C Lu, RH Kim, R LiNature, 2013•nature.Com*. <https://doi.org/10.1038/nature12083>
- Spearman, R. I. C. (1967). On the nature of the horny scales of the pangolin. *Zoological Journal of the Linnean Society, 46*(310), 267–273. <https://doi.org/10.1111/J.1096-3642.1967.TB00508.X>
- Spierings, A. B., Dawson, K., Uggowitzer, P. J., & Wegener, K. (2018). Influence of SLM scan-speed on microstructure, precipitation of Al3Sc particles and mechanical properties in Sc- and Zr-modified Al-Mg alloys. *Materials & Design, 140*, 134–143. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.11.053>
- Stephens, R., Fatemi, A., Stephens, R., & Fuchs, H. (2000). *Metal fatigue in engineering*.
- Sumitomo, T., Kakisawa, H., ... Y. O.-J. of M., & 2008, undefined. (2008). In situ transmission electron microscopy observation of reversible deformation in nacre organic matrix. *Cambridge.OrgT Sumitomo, H Kakisawa, Y Owaki, Y KagawaJournal of Materials Research, 2008•cambridge.Org*. <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0184>
- Sun, C. Y., & Chen, P. Y. (2013). Structural design and mechanical behavior of alligator (*Alligator mississippiensis*) osteoderms. *Acta Biomaterialia, 9*(11), 9049–9064. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2013.07.016>
- Sun, W., & Sehitoglu, H. (1992). RESIDUAL STRESS FIELDS DURING FATIGUE CRACK GROWTH. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 15*(2), 115–128. <https://doi.org/10.1111/J.1460-2695.1992.TB00042.X>
- Sun, Z., Tan, X., Tor, S. B., & Yeong, W. Y. (2016a). Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. *Materials & Design, 104*, 197–204. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.05.035>
- Sun, Z., Tan, X., Tor, S. B., & Yeong, W. Y. (2016b). Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. *Materials & Design, 104*, 197–204. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.05.035>

- Syed, A. K., Ahmad, B., Guo, H., Machry, T., Eatock, D., Meyer, J., Fitzpatrick, M. E., & Zhang, X. (2019). An experimental study of residual stress and direction-dependence of fatigue crack growth behaviour in as-built and stress-relieved selective-laser-melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering: A*, 755, 246–257. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.04.023>
- Tan, T., Rahbar, N., Allameh, S. M., Kwofie, S., Dissmore, D., Ghavami, K., & Soboyejo, W. O. (2011). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomaterialia*, 7(10), 3796–3803. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2011.06.008>
- Tang, M., Pistorius, P. C., & Beuth, J. L. (2017). Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 14, 39–48. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2016.12.001>
- Tian, C., Li, X., Li, H., Guo, G., Wang, L., & Rong, Y. (2019). The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM). *Materials Science and Engineering: A*, 743, 697–706. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2018.11.138>
- Tombolato, L., Novitskaya, E. E., Chen, P. Y., Sheppard, F. A., & McKittrick, J. (2010). Microstructure, elastic properties and deformation mechanisms of horn keratin. *Acta Biomaterialia*, 6(2), 319–330. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2009.06.033>
- Tong, J., Lü, T.-B., Ma, Y.-H., Wang, H.-K., Ren, L.-Q., & Arnell, R. D. (2007a). Two-body abrasive wear of the surfaces of pangolin scales. *Elsevier*, 4, 77084. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1672652907600171>
- Tong, J., Lü, T.-B., Ma, Y.-H., Wang, H.-K., Ren, L.-Q., & Arnell, R. D. (2007b). Two-body abrasive wear of the surfaces of pangolin scales. *Elsevier*, 4, 77084.
- Tucho, W. M., Lysne, V. H., Austbø, H., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 910–925. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2018.01.098>
- Van Belle, L., Vansteenkiste, G., & Boyer, J. C. (2013). Investigation of Residual Stresses Induced during the Selective Laser Melting Process. *Key Engineering Materials*, 554–557, 1828–1834. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.554-557.1828>
- Vasinonta, A., Beuth, J. L., & Griffith, M. (2007). Process Maps for Predicting Residual Stress and Melt Pool Size in the Laser-Based Fabrication of Thin-Walled Structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(1), 101–109. <https://doi.org/10.1115/1.2335852>
- Vastola, G., Zhang, G., Pei, Q. X., & Zhang, Y. W. (2016). Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling. *Additive Manufacturing*, 12, 231–239. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2016.05.010>
- Vecchiato, F. L., de Winton, H., Hooper, P. A., & Wenman, M. R. (2020). Melt pool microstructure and morphology from single exposures in laser powder bed fusion of 316L stainless steel. *Additive Manufacturing*, 36, 101401. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2020.101401>
- Videršćak, D., Schauerperl, Z., Godec, M., Donik, Č., Paulin, I., Šercer, M., Čatić, A., Alar, Ž., & Pustički, D. (2024). Influence of laser powder bed fusion parameters on microstructure and mechanical properties of Co–Cr dental alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 6218–6226. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2024.05.052>

- Vrancken, B., Cain, V., Knutsen, R., & Van Humbeeck, J. (2014). Residual stress via the contour method in compact tension specimens produced via selective laser melting. *Scripta Materialia*, 87, 29–32. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2014.05.016>
- Wan, H. Y., Zhou, Z. J., Li, C. P., Chen, G. F., & Zhang, G. P. (2019). Effect of scanning strategy on mechanical properties of selective laser melted Inconel 718. *Materials Science and Engineering: A*, 753, 42–48. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.03.007>
- Wang, D., Song, C., Yang, Y., & Bai, Y. (2016a). Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials and Design*, 100, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.111>
- Wang, D., Song, C., Yang, Y., & Bai, Y. (2016b). Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials and Design*, 100, 291–299. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.03.111>
- Wang, L., Jiang, X., Zhu, Y., Ding, Z., Zhu, X., Sun, J., & Yan, B. (2018). Investigation of Performance and Residual Stress Generation of AlSi10Mg Processed by Selective Laser Melting. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 7814039. <https://doi.org/10.1155/2018/7814039>
- Wang, P., Yang, X., & Tian, X. (2015). Fracture behavior of precracked nanocrystalline materials with grain size gradients. *Journal of Materials Research*, 30(5), 709–716. <https://doi.org/10.1557/JMR.2015.18>
- Wang, Z., Li, Y., Zhan, Z., Jewell, S. A., Vukusic, P., & Roberts, N. W. (2007). Circularly polarized colour reflection from helicoidal structures in the beetle *Plusiotis boucardi*. *Iopscience.Iop.OrgSA Jewell, P Vukusic, NW RobertsNew Journal of Physics*, 2007•iopscience.Iop.Org, 9, 99. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/9/4/099>
- Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., & Zhang, W. (2019a). Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Optics & Laser Technology*, 112, 159–167. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2018.11.014>
- Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., & Zhang, W. (2019b). Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Optics & Laser Technology*, 112, 159–167. <https://doi.org/10.1016/J.OPTLASTEC.2018.11.014>
- Weaver, J. C., Aizenberg, J., Fantner, G. E., Kisailus, D., Woesz, A., Allen, P., Fields, K., Porter, M. J., Zok, F. W., Hansma, P. K., Fratzl, P., & Morse, D. E. (2007). Hierarchical assembly of the siliceous skeletal lattice of the hexactinellid sponge *Euplectella aspergillum*. *Journal of Structural Biology*, 158(1), 93–106. <https://doi.org/10.1016/J.JSB.2006.10.027>
- Wei, S., Wang, G., Yu, J., & Rong, Y. (2017). Competitive failure analysis on tensile fracture of laser-deposited material for martensitic stainless steel. *Materials & Design*, 118, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.01.014>
- Weiner, S., Addadi, L., & Wagner, H. D. (2000). Materials design in biology. *Materials Science and Engineering: C*, 11(1), 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0928-4931\(00\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S0928-4931(00)00141-7)
- Weng, F., Gao, S., Jiang, J., Wang, J. J., & Guo, P. (2019). A novel strategy to fabricate thin 316L stainless steel rods by continuous directed energy deposition in Z direction. *Additive Manufacturing*, 27, 474–481. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.03.024>

- Willenborg, J., Engle, R., Title, H. W.-(No, & 1971, undefined. (n.d.). A crack growth retardation model using an effective stress concept. *Cir.Nii.Ac.Jp*.
- Williams, C., Mistree, F., & Rosen, D. (2011). *A functional classification framework for the conceptual design of additive manufacturing technologies*.
- Wu, A. S., Brown, D. W., Kumar, M., Gallegos, G. F., & King, W. E. (2014). An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 45(13), 6260–6270. <https://doi.org/10.1007/S11661-014-2549-X/FIGURES/11>
- Wu, H., Li, J., Wei, Z., & Wei, P. (2020). Effect of processing parameters on forming defects during selective laser melting of AlSi10Mg powder. *Rapid Prototyping Journal*, 26(5), 871–879. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0184/FULL/PDF>
- Xu, Z. W., Liu, A., & Wang, X. S. (2019). The influence of building direction on the fatigue crack propagation behavior of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 767, 138409. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.138409>
- Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., & Bian, L. (2017). Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 94, 218–235. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2016.03.014>
- Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., & Yadroitsava, I. (2014). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution. *Journal of Alloys and Compounds*, 583, 404–409. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2013.08.183>
- Yakout, M., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018). A study of thermal expansion coefficients and microstructure during selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L. *Additive Manufacturing*, 24, 405–418. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.09.035>
- Yang, T., Feng, Z., Qiu, Y., Han, W., & Kong, L. (2023). Selective laser melting of glass with irregular shaped powder. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 7259–7272. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.09.011>
- Yang, W., & McKittrick, J. (2013). Separating the influence of the cortex and foam on the mechanical properties of porcupine quills. *Acta Biomaterialia*, 9(11), 9065–9074. <https://doi.org/10.1016/J.ACTBIO.2013.07.004>
- Yao, H., Fang, H., Wang, X., Reviews, S. Y.-C. S., & 2011, undefined. (2011). Hierarchical assembly of micro-/nano-building blocks: bio-inspired rigid structural functional materials. *Pubs.Rsc.OrgHB Yao, HY Fang, XH Wang, SH YuChemical Society Reviews*, 2011•pubs.Rsc.Org, 40, 3764–3785. <https://doi.org/10.1039/c0cs00121j>
- Yasa, E., & Ersoy, K. (2018). Additive Manufacturing of Polymer Matrix Composites. *Aircraft Technology*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.75628>
- Yasa, E., & Kruth, J. P. (2011). Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering*, 19, 389–395. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.11.130>
- Ye, H., Le, F., Wei, C., Ye, K., Liu, S., & Wang, G. (2021). Fatigue crack growth behavior of Ti-6Al-4V alloy fabricated via laser metal deposition: Effects of building orientation and heat treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 868, 159023. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.159023>

- Yumak, N. (2021). *Ti-15v-3al-3sn-3cr malzemesinin farklı şartlar altındaki yorulma davranışının araştırılması.*
- Zaeh, M. F., & Branner, G. (2010). Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting. *Production Engineering*, 4(1), 35–45. <https://doi.org/10.1007/S11740-009-0192-Y/FIGURES/19>
- Zaikin, E., & Ritchie, R. O. (1985). Effects of microstructure on fatigue crack propagation and crack closure behavior in aluminum alloy 7150. *Materials Science and Engineering*, 70(C), 151–160. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(85\)90276-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(85)90276-9)
- Zhang, M., Sun, C. N., Zhang, X., Goh, P. C., Wei, J., Hardacre, D., & Li, H. (2017). Fatigue and fracture behaviour of laser powder bed fusion stainless steel 316L: Influence of processing parameters. *Materials Science and Engineering: A*, 703, 251–261. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2017.07.071>
- Zhang, W., Hu, Y., Ma, X., Qian, G., Zhang, J., Yang, Z., & Berto, F. (2021). Very-high-cycle fatigue behavior of AlSi10Mg manufactured by selected laser melting: Crystal plasticity modeling. *International Journal of Fatigue*, 145, 106109. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2020.106109>
- Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Zhang, G., Lin, X., & Huang, W. (2021). On the role of energy input in the surface morphology and microstructure during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 392–403. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.01.024>
- Zimmermann, E. A., Gludovatz, B., Schaible, E., Dave, N. K. N., Yang, W., Meyers, M. A., & Ritchie, R. O. (2013). Mechanical adaptability of the Bouligand-type structure in natural dermal armour. *Nature.ComEA Zimmermann, B Gludovatz, E Schaible, NKN Dave, W Yang, MA Meyers, RO RitchieNature Communications, 2013•nature.Com.* <https://doi.org/10.1038/ncomms3634>
- Zindani, D., & Kumar, K. (2019). An insight into additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4), 267–278. <https://doi.org/10.1016/J.IJLMM.2019.08.004>

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
<b>Adı Soyadı</b>	: Yeşim SEÇER KAVASOĞLU
<b>Doğum tarihi</b>	:
<b>Doğum Yeri</b>	:
<b>Uyruğu</b>	:
<b>Adres</b>	:
<b>Tel</b>	:
<b>E-mail</b>	:
<b>ORCID</b>	: 0000-0003-4671-7384
Eğitim	
<b>Lise</b>	: Erzurum Lisesi
<b>Lisans</b>	: Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
<b>Yüksek lisans</b>	: Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
<b>Doktora</b>	: Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yabancı Dil Bilgisi	
<b>İngilizce</b>	: İyi