



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARDA
TERMAL KALINTI GERİLME KARAKTERİZASYONU VE MALZEME
METALURJİK ÖZELLİKLERİYLE İLİŞKİLENDİRİLMESİ**

Akın DAĞKOLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Akın DAĞKOLU
06/10/2022

SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARDA TERMAL
KALINTI GERİLME KARAKTERİZASYONU VE MALZEME METALURJİK
ÖZELLİKLERİYLE İLİŞKİLENDİRİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Akın DAĞKOLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2022

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojileri üzerine yapılan akademik çalışmaların yüksek oranda artmasıyla bu proseslerin endüstriyel, medikal, havacılık uygulamalarında kullanımı da artmaktadır. Topoloji optimizasyonu ve karmaşık tasarımlar ile parça hafifletme çalışmaları, yerinde ve merkezleştirilmiş üretim ile hızlı ve düşük maliyetli parça üretimleri, birden fazla fonksiyona sahip olabilen parçaların tasarlanabilmesi ve hasarlı parçaların tamir olanakları gibi avantajlar da eklemeli imalatın havacılık ve uzay sektöründe kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu tez çalışmasında da havacılık ve uzay uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı ile toz yataklı metal eklemeli imalat metoduyla üretilen parçalarda oluşan termal kalıntı gerilmelerin karakterizasyonu ve malzeme metalurjisiyle olan ilişkisi incelenmiştir. Delik delme ve XRD metotlarıyla üretim yönüne bağlı kalıntı gerilmeler ölçülmüş ve katılma fenomeninin kalıntı gerilme oluşumuna etkileri açıklanmıştır. Mikroyapı ölçümleri ve XRD faz analizleriyle malzeme iç yapısı incelenmiş ve kalıntı gerilmelerin oluşma şekilleriyle ilişkilendirme yapılmıştır. Malzeme iç yapısının %98,7 oranında α' , %1,3 oranında öncül β fazından oluştuğu bulunmuştur. Tanelerin sütunsu yapıda olup üretim yönüne paralel olarak yönlendiği görülmüştür. Gerilim giderme ısıtılmasının malzeme iç yapısına etkisi, ölçülen mikroyapı unsurlarının boyutsal olarak büyümesi ve iğnemsî yapıların kalınlaşması olarak bulunmuştur. Üretime paralel yöndeki kalıntı gerilmeler (143MPa, 1155MPa), kullanılan her iki metotta da üretime dik yöndeki kalıntı gerilmelerin (77MPa, 424MPa) 2-3 katı büyüklüğünde ölçülmüştür.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, Ti6Al4V, kalıntı gerilme
Sayfa Adedi : 58
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

THERMAL RESIDUAL STRESS CHARACTERIZATION OF PARTS PRODUCED BY
SELECTIVE LASER MELTING METHOD AND ITS RELATIONSHIP WITH
MATERIAL METALLURGICAL PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Akın DAĞKOLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2022

ABSTRACT

The use of the additive manufacturing processes in industrial, medical and aerospace applications is increasing with the increasing number of academic studies in this field. Advantages such as weight reduction with topology optimization and complex part designs, agile and low-cost manufacturing with decentralized on-site production, the ability to design parts to have multiple functions, and the possibility of repairing damaged parts has made the use of additive manufacturing in aerospace applications inevitable. In this thesis work, the characterization of the thermal residual stresses and their relationship with the material metallurgy of the L-PBF manufactured Ti-6Al-4V alloy were investigated. Residual stresses related to build direction were measured by hole drilling and XRD methods and the effects of solidification phenomenon on residual stress formation were explained. The internal structure of the material was examined by optical microstructure measurements and XRD phase analysis, and a correlation was made with the formation of residual stresses. It was found that the internal structure of the material consists of 98.7% α' phase and 1.3% prior β phase. It was observed that the grains were in a columnar structure and were oriented parallel to the build direction. The effect of stress relieving heat treatment on the internal structure of the material was found to be the biaxial growth of the measured microstructure elements and the thickening of the acicular structures. The residual stresses, parallel to the build direction (143 MPa, 1155 MPa) were measured 2-3 times of the residual stresses, perpendicular to the build direction (77 MPa, 424 MPa) with both methods used.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, Ti6Al4V, residual stress,

Page Number : 58

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Akademik çalışmalarım süresince tezimin planlanması, yürütülmesi ve yazımı aşamalarında ilgi ve desteği ile her daim yol gösteren tez danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a, hayatımın iyi ve kötü her anında yanımda olan ve bu zorlayıcı süreçte de sevgisi, anlayışı ve bilgi birikimiyle desteğini esirgemeyen sevgili eşim Esin DAĞKOLU'ya, bugün olduğum kişi olmamı sağlayan ve hayatlarını çocuklarına adayan annem Hülya DAĞKOLU ve babam İsmail DAĞKOLU'ya, deneysel çalışmalarımın yürütülmesinde destek olan Büşra ÜNLÜ ve Sertaç ALTINOK'a, çalışmalarımın- "DKTM 2018/05" numaralı araştırma ve geliştirme projesi kapsamında yapılması imkanını sunan Savunma Sanayi Başkanlığı ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii'ne ve TUSAŞ Eklemeli İmalat Ekibine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. MALZEME VE METOTLAR.....	21
3.1. Üretim ve Ardıl İşlemler	21
3.2. Test ve Ölçümler (Deneysel Çalışmalar)	23
4. ÇIKTILAR VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Mekanik Testler	29
4.2. Çekme testleri	29
4.2.1. Yorulma testleri.....	30
4.2.2. Çentik darbe testleri	32
4.3. Metalurjik Ölçümler.....	33
4.3.1. Mikroyapı ölçümleri	33
4.3.2. XRD faz analizleri	40
4.4. Kalıntı Gerilme Ölçümleri	45

	Sayfa
4.4.1. XRD ile kalıntı gerilme ölçümleri	45
4.4.2. Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümleri	48
4.5. Kalıntı Gerilmelerin Malzeme Metalurjisi ile İlişkisi.....	50
4.6. Malzeme Mekanik-Metalurjik Özelliklerinin Üretim Yönüyle İlişkisi	51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
5.1. Sonuçlar	53
5.2. Öneriler	54
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	58

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Test numunelerinin üretim yönüne göre çekme mukavemetleri.	30
Çizelge 4.2. Gerilmelere karşılık gelen yorulma ömür sınırları	31
Çizelge 4.3. Çentik darbe test sonuçları.....	32
Çizelge 4.4. Mikroyapı unsurlarına ait nicel ölçümler	38
Çizelge 4.5. XRD ile XY ve XZ düzlemlerinde ölçülen kalıntı gerilme miktarları	45
Çizelge 4.6. Mekanik özelliklerdeki anizotropi miktarı	51
Çizelge 4.7. XRD ile ölçülen kalıntı gerilmelerdeki anizotropi miktarı.....	52
Çizelge 4.8. Delik delme ile ölçülen kalıntı gerilmelerdeki anizotropi miktarı.....	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal eklemeli imalat metotlarının kategorizasyonu	4
Şekil 2.2. Toz yataklı metal eklemeli imalat sisteminin şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.3. Gerilme-Gerinim Grafikleri a)Dik yönde EBM, b)Dik yönde SLM, c)Yatay yönde EBM, d)Yatay yönde SLM.....	5
Şekil 2.4. a), b), c) EBM ve d), e), f) SLM ile üretilmiş numunelerin; a), d) aydınlık alan; b),e) karanlık alan TEM görüntüleri; c), f) kırınım desenleri.....	6
Şekil 2.5. EBM ve SLM ile üretilmiş Ti-6Al-4V malzemenin XRD desenleri	6
Şekil 2.6. Tek yönlü taramayla üretilen parçanın a)üst, b)yan, c)ön; değişken tarama yönüyle üretilen parçanın d)üst, e)yan, f)ön yüzeylerine ait mikroyapı görüntüleri; c,g)üretim parametreleri ve tarama stratejileri	7
Şekil 2.7. SLM Ti64 parçanın a)Üst, b) Yan yüzeyinin, c)Dövme ile üretilmiş parçanın mikroyapı görüntüleri; SLM Ti64 malzemenin 2 saat d)780°C, e)843°C, f)1015°C'de ısıtılma sonrası mikroyapı görüntüleri.....	8
Şekil 2.8. Üretim yönüne bağlı malzeme mekanik özellikleri.....	9
Şekil 2.9. Ergiyik havuz modeli.....	11
Şekil 2.10. Farklı ısıtılma özelliklerine sahip malzemelerin SLM üretimi sonrası sahip oldukları kalıntı gerilme ve çarpılma miktarları	12
Şekil 2.11. Tarama stratejisine bağlı kalıntı gerilme miktarları.....	13
Şekil 2.12. Lazer tarama stratejileri	14
Şekil 2.13. Tarama stratejilerine göre kalıntı gerilme miktarları.....	14
Şekil 2.14. Kontur metodu ile ölçülmüş kalıntı gerilme sonuçları	15
Şekil 2.15. Lazer tarama hızlarına göre ölçülen kalıntı gerilme miktarları	16
Şekil 2.16. Test numunelerinin üretim oryantasyonları.....	16
Şekil 2.17. 3 farklı üretim yönünde üretilen numunelerin kırılma yüzeyleri ve kontur metodu ile ölçülen kalıntı gerilme profilleri; a)XY, b)XZ, c)ZX yönü	17
Şekil 2.18. Üretim parametreleri aynı numunelere ait, kontur metodu ile dikey yönde ölçülen kalıntı gerilme miktarları.....	18
Şekil 2.19. Kontur metodu ile dikey yönde ölçülmüş ortalama kalıntı gerilme miktarı.	18
Şekil 2.20. Değişken üretim parametrelerine göre XRD ile ölçülen maksimum asal gerilmeler; a)30µm, b)60µm, c)90µm, d)120µm katman kalınlığı	19

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Gerilim giderme ısıtıl işlem profili	23
Şekil 3.2. Numunelerin bölgesel isimlendirmeleri	24
Şekil 3.3. XRD Delik delme metodu ile kalıntı gerilme ölçümü yapılmış numuneler (Krs).....	25
Şekil 3.4. XRD kalıntı gerilme test düzeneği	25
Şekil 3.5. ESPI delik delme kalıntı gerilme test düzeneği	26
Şekil 3.6. Mekanik test numunelerinin üretim tablası üzerindeki konumlandırmaları...	27
Şekil 4.1. Çekme testlerine ait gerilme/gerinim grafikleri, a)Yatay yönde, b)Dikey yönde üretilmiş numuneler	29
Şekil 4.2. Yorulma testlerinden elde edilen üretim yönüne bağlı S-N grafikleri	31
Şekil 4.3. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)	34
Şekil 4.4. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş numuneye ait XY düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)	34
Şekil 4.5. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (200X)	35
Şekil 4.6. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)	36
Şekil 4.7. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış numuneye ait XY düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)	37
Şekil 4.8. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (200X)	37
Şekil 4.9. Krs numunesine ait XZ düzleminde alınmış mikroyapı görüntüsü (100X) .	39
Şekil 4.10. Krs numunesine ait XY düzleminde alınmış mikroyapı görüntüsü (100X)	39
Şekil 4.11. Krs numunesine ait XY düzleminde alınmış mikroyapı görüntüsü (200X)	40
Şekil 4.12. Krs numunesine ait ham XRD ölçüm verileri	41
Şekil 4.13. Krs numunesine ait normalize edilmiş XRD ölçüm verileri	41
Şekil 4.14. Isıtıl işlem uygulanmış (K1) ve uygulanmamış (K2) numuneye ait XRD tepe noktaları ve Ti- α ve Ti- β fazına ait kristal yapı verileri	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Krs numunesinin XY ve XZ düzleminden alınan XRD ölçümlerinin karşılaştırılması	43
Şekil 4.16. Krs numunesinin XZ düzleminden alınmış XRD ölçümüne ait Rietveld analizi sonuçları	44
Şekil 4.17. XRD kalıntı gerilme ölçümüne ait $D\text{-sin}^2\psi$ grafikleri; a,d) $\phi=0$, b,e) $\phi=45$, c,f) $\phi=90$ azimut açılarında; a,b,c)XY düzlemine ait; d,e,f) XZ düzlemine ait.....	46
Şekil 4.18. Krs numunesinde lazer tarama çizgilerinin görüldüğü üretilen son katman (XY düzlemi)	47
Şekil 4.19. XY düzleminden delik delme metodu ile derinliğe bağlı olarak ölçülen kalıntı gerilme miktarları	48
Şekil 4.20. XZ düzleminden delik delme metodu ile derinliğe bağlı olarak ölçülen kalıntı gerilme miktarları	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

ε	Gerinim
θ	Teta, X-ışını geliş açısı
λ	Dalga boyu
σ	Gerilme (çekme/basma)
τ	Gerilme (kesme)
φ	Phi, azimut açısı
Hz	Frekans

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CT	Computed tomography
EBM	Electron Beam Melting (Elektron Demeti Ergitme)
Eİ	Eklemeli imalat
OM	Optik mikroskop
SLE	Seçici Lazer Ergitme
SLM	Selective Laser Melting
XRD	X-Ray Diffraction (X ışını kırınımı)

1. GİRİŞ

Problem durumu / Konunun tanımı

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi, metal malzemeler için toz, tel, plaka, yapısındaki ham maddelerin, polimer malzemeler için ise filament, reçine, granül formundaki ham maddelerin ergitme, sinterleme, yapıştırma gibi metotlar ile birbiri üzerine yığılarak biriktirilmesi esasına dayanan üretim metodu olarak tanımlanmaktadır (ISO/ASTM, 2013). Son yıllarda özellikle havacılık ve uzay alanlarında kullanımı artan metal eklemeli imalat sistemleri, konvansiyonel metotlara göre daha hafif, daha yüksek mekanik özelliklere sahip, daha karmaşık geometrilerde tasarlanan parçaların kullanılabilmesini sağlamaktadır. Metal eklemeli imalat yöntemlerinden yaygın olarak kullanılan seçici lazer ergitme sistemleri, her bir katmanda parça kesit alanını tarayarak ilerleyen bir veya daha fazla lazer ışın kaynağının metal tozunu ergitmesiyle üretim gerçekleştirmektedir.

Bu metotta kullanılan toz boyutu ve katman kalınlığı μm mertebesinde olduğundan geometrik çözünürlük diğer Eİ metotlarından görece yüksek olsa dahi yüzey pürüzlülüğü konvansiyonel metotlara göre daha fazladır (Kumar, 2021). Buna ek olarak, tozların birleştirilmesinde kullanılan yüksek lokalize ısı girdisiyle oluşturulan ergiyik havuzun yüksek hızla soğumasından kaynaklı malzeme içerisinde termal kalıntı gerilmeler oluşmaktadır (Bartlett, 2019). Metodun çalışma prensibinden dolayı ergiyik havuzların üretim tablasına doğru yönelen bir ısı akısıyla soğumasından kaynaklı malzeme mikroyapısı ve buna bağlı olarak mekanik özellikleri de yönelime bağlılık göstermektedir. Eİ ile üretimde yüksek miktarda termal gerilme ve malzeme anizotropisi gösteren Eİ malzemelerinden birisi de Ti-6Al-4V alaşımıdır (Vrancken, 2014). Bu alaşım, konvansiyonel metotlar ile işlenmesinin zorluğu, işleme esnasında yüksek değerlerde hurda talaş oluşturması sebebiyle SLE yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bahsedilen termal kalıntı gerilmeler ve anizotropik mikroyapı, üretim sonrasında, uygulanabilirliğe bağlı olarak ısıtılma işlemleri ile giderilebilmesine karşın ardıl işlemlerin uygulanamadığı veya uygulanması halinde malzeme mekanik özelliklerine olumsuz etki edeceği için tercih edilmediği durumlarda, bu anizotropik malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması, ilgili metoda ve malzemeye göre yapılacak tasarımlar için kritik öneme sahiptir.

Araştırmanın amacı

Yapılan tez çalışmasıyla SLE metodu ile Ti-6Al-4V alaşımından üretilen parçalarda oluşan termal kalıntı gerilmelerin, malzeme mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin karakterize edilmesi ve üretim metodunun doğasından kaynaklanan sebeplerle ilişkilendirilmesi, buna ek olarak ölçüm ve testleri yapılan bu özelliklerdeki anizotropik davranışın sebebinin tanımlanması amaçlanmıştır. Çalışmanın amacına ulaşması için belirlenen hedefler şu şekildedir:

- Termal kalıntı gerilmeleri üretim yönüne bağlı olarak farklı ölçüm teknikleriyle belirlemek.
- Farklı yönlerdeki malzeme mikroyapısını inceleyerek mekanik özelliklere önemli etkisi olan unsurları tanımlayarak ölçümlerini almak.
- Değişen üretim yönlerine göre malzeme faz dağılımını incelemek.
- Yönelime bağlı mekanik özellikleri standartlara uygun test ve metotlar ile belirlemek.
- Malzeme metalurjik özelliklerini ve termal kalıntı gerilme miktarlarını üretim esnasındaki ısınma-soğuma fenomenlerine göre ilişkilendirmek.
- Yönelime bağlı metalurjik özellikler için bir anizotropi faktörü belirlemek.

Tezin içeriği

Yapılan tez çalışması; giriş, literatür özeti, malzeme ve metotlar, sonuçlar ve tartışma ile çıkarımlar bölümlerinden oluşmaktadır. Literatür özeti kısmında; tanımı yapılan problem ve bu konuda yapılan akademik çalışmalara, hedeflenen amaçlara ulaşılması için kullanılan deneysel ve nümerik metotlara dair bilgilere yer verilmiştir. Malzeme ve metot kısmında tez kapsamında gerçekleştirilen tüm deneysel ve nümerik çalışmalarda kullanılan cihazlar, parametreler, metotlar ve kabuller açıklanmıştır. Sonuç ve tartışma bölümünde çalışma kapsamında yapılan test, analiz ve ölçümlerin sonuçları paylaşılarak bu sonuçların tez amacına yönelik olarak açıklanması, ilişkilendirilmesi ve literatür ile karşılaştırılması verilerek tartışılmıştır. Son bölümde ise çalışma sonucunda elde edilen çıkarım ve kazanımlardan bahsedilerek yapılan çalışmayı daha ileriye götürecek önerilerden ve çalışmada eksik görülen yerler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

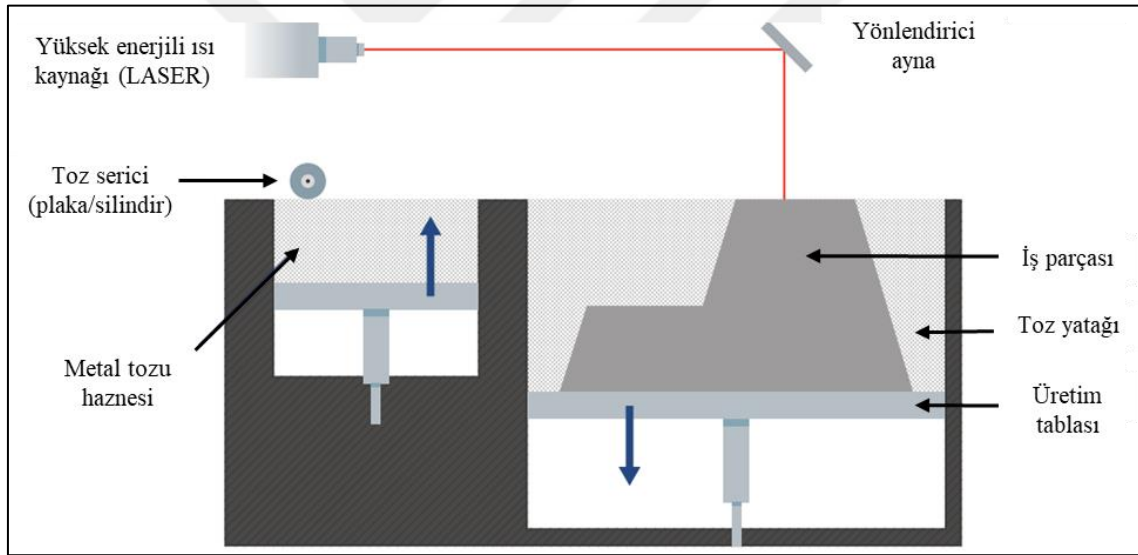
Eklemeli imalat (Eİ), Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) tarafından yapılan tanıma göre, malzemelerin başarılı bir şekilde birleştirilerek 3 boyutlu model verisinde tanımlandığı şekliyle fiziksel parçaların oluşturulması prosesidir (ISO/ASTM, 2013). Eİ teknolojisi, geçtiğimiz yıllarda özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır (Gasman, 2019). Eİ teknolojisinin tercih edilme oranının artmasındaki en önemli unsurlar; konvansiyonel metotlarla üretimi makul veya mümkün olmayan tasarımların üretilebilir hale gelmesiyle daha hafif ve yüksek performansta parçaların tasarlanabilmesi, yenilikçi alaşımların kullanılabilmesi, konvansiyonel metotlarla işlenmesi zor malzemelerin kullanılabilmesi, parça tipi ve ardıl işlem gereksinimine göre üretim tedarik zamanının ve maliyetinin ciddi oranda düşürülebilmesi olarak gösterilebilir (Najmon, 2019). Eİ teknolojileri, uygulama bazında sıralanan avantajlarının yanı sıra Endüstri 4.0 atılımı çerçevesinde akıllı fabrikaların kurulması ve üretim operasyonlarının merkezci yapıdan dağıtılmış yapıya geçmesinde önemli rol oynayarak kullanım alanlarını artırmaktadır.

Eİ teknolojileri, tek aşamalı (Füzyon) ve çok aşamalı (1.Yapıştırma 2. sinterleme/nüfuz ettirme) prosesler olarak ve benzer malzemelerin birleştirilmesi ve benzer olmayan malzemelerin yapıştırılması başlıklarına ayrılmaktadır. Bu ana başlıklardan sonra, kullandıkları malzeme tipi, formu ve dağılımı, malzemeleri birleştirme yöntemi ve bu yöntemde kullandıkları kaynaklara göre de alt kategorilere ayrıştırılmaktadır. Metal eklemeli imalat yönteminin, bahsedilen ayrıştırıcı unsurlara göre tanımlaması Şekil 2.1’de görülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan Eİ metodu da metal tozlarını bir üretim tablası(yatağı) üzerinde lazer ışın kaynağı kullanarak ergitme ile birleştiren seçici lazer ergitme (SLE) yöntemidir. Bu yöntemde toz formundaki ham malzeme üretim tablası üzerine toz serici mekanizması ile belirlenen katman kalınlığına göre serilir. Serilen toz katmanı ve altındaki komşu katmanlar, enerji kaynağı olarak kullanılan lazer ışını veya elektron ışın demeti ile parça kesit alanındaki tarama yolları takip edilerek ergitilir ve takip eden soğuma döngüsü ile parçanın kesiti katı olarak elde edilir. Tozun serilmesi ile başlayan bu döngü, parçanın kesitlere ayrılan her bir katmanı için tekrar edilerek nihai geometrinin üretimi tamamlanır. SLE metodunun çalışma prensibi Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

Malzeme tipi	Metalik		
Füzyon hali	Ergiyik hal		Katı hal
Ham malzeme formu	Filament/tel malzeme	Toz malzeme	Sac malzeme
Malzeme dağıtımı	Nozül ile yığma	Toz yataklı	Sac dizilimi
Temel Eİ prensibi	Malzemenin alt taş üzerine seçmeli yığılması	Malzemenin toz yatağında seçici eritilmesi	Dizilimli sacların birleştirilmesi
Birleştirme kaynağı	Elektron ışını	Ark	Laser
Proses kategorisi	Yönlendirilmiş enerji ile yığma	Toz yatağında eritme	Sac tabakalama

Şekil 2.1. Metal eklemeli imalat metotlarının kategorizasyonu

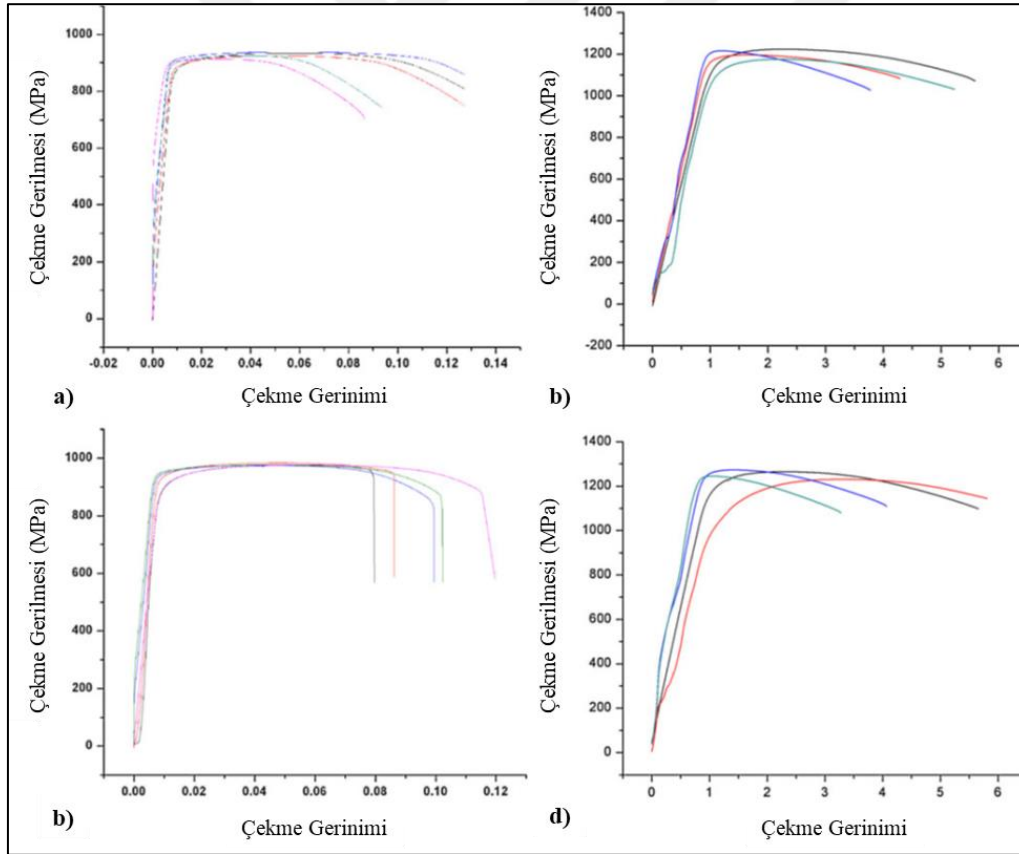


Şekil 2.2. Toz yataklı metal eklemeli imalat sisteminin şematik gösterimi

Enerji kaynağı olarak lazer ışını kullanan sistemler, elektron ışını ile eritme (EBM) metodunda olduğu gibi ara ısıtma döngüsüne sahip olmadıkları için, ergiyik havuzun yüksek hızla soğumasından kaynaklanan mikroyapı değişimleri ve kalıntı gerilme oluşumları proses esnasında giderilememekte/homojenize edilememektedir (Rafi, 2013). SLE sistemleri bu özelliklerinden dolayı üretim yaptıkları malzemelerde üretim yönüne bağlı mekanik-metalurjik özelliklerin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu anizotropik özellikler, bu metotla üretilen parçalarda fazladan güvenlik faktörü kullanılarak tasarım yapılmasına veya tüm analiz ve testlerin yönelime bağlı özelliklere göre yapılmasına ve buna bağlı olarak kaynak ve zaman kullanımının artmasına sebebiyet vermektedir. Bunların dışında, tüm

malzemenin homojen ve izotropik özellik dağılımına ihtiyaç duyulan durumlarda metodun kullanılamamasına sebep olmakta veya ilave ardıl işlemlerin dahil edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

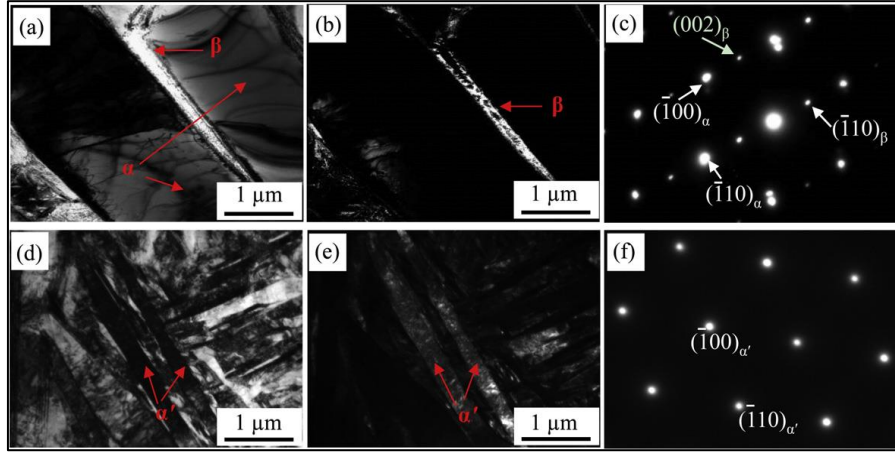
Rafi ve çalışma arkadaşları (Rafi, 2013) gerçekleştirdikleri çalışmada EBM ve SLM metodu ile üretilmiş Ti-6Al-4V malzemelerin üretim yönlerine bağlı metalurjik özelliklerini, çekme dayanımlarını (Şekil 2.3), yüzey sertliklerini ve yorulma ömürlerini incelemişlerdir. SLM metodu ile üretilen numunelerin iç yapısı martenzitik α' ağırlıklı olarak gözlenirken, EBM ile üretilen parçalarda lamel şeklinde α ve β fazları görülmüştür. SLM ile üretilen parçaların yüksek çekme dayanımının martenzitik α' kaynaklı olduğu, EBM ile üretilen parçaların sünekliliğinin fazla olmasının sebebinin ise lamel şeklindeki α fazından kaynaklandığı açıklanmıştır.



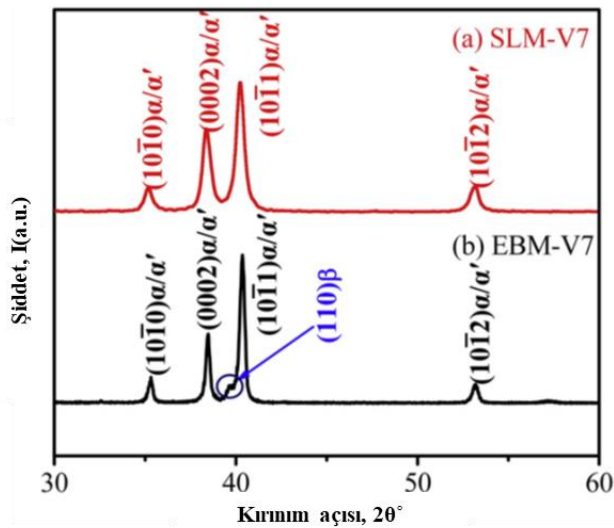
Şekil 2.3. Gerilme-Gerinim Grafikleri a)Dik yönde EBM, b)Dik yönde SLM, c)Yatay yönde EBM, d)Yatay yönde SLM

Zhao ve arkadaşları (Zhao, 2016), çalışmalarında SLM ve EBM metotlarıyla üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Malzeme iç yapısı incelemelerinde geçirimli elektron mikroskobu(TEM), X-ışını kırınımı(XRD),

taramalı elektron mikroskobu(SEM) metotlarını kullanmış, iç yapıdaki süreksizliklerin incelenmesi için bilgisayarlı tomografi(CT) görüntüleri almışlardır. Ayrıca sıcak izostatik presleme(HIP) metodunun malzeme özelliklerine etkisini de incelemişlerdir. Her iki malzemenin iç yapısının da $\alpha+\beta$ fazlarının varlığı TEM ile doğrulanmıştır (Şekil 2.4). SLM malzeme içerisinde, çekme mukavemetini artıran martenzitik α' fazının ağırlıkta olduğu ve XRD faz analizlerinde de SLM metodu ile üretilen numunelerde β fazının oldukça zor gözlemlendiği, EBM numunelerinde α ve β fazlarının (hcp+bcc) rahatlıkla gözlemlendiği bildirilmiştir (Şekil 2.5). Her iki üretim metodu için de dik yönde üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin yatay yönde üretilenlere göre daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Ayrıca HIP işleminin, iç gözenekleri büyük oranda kapatarak her iki malzeme için de yorulma ömrünü artırdığı gözlenmiştir.

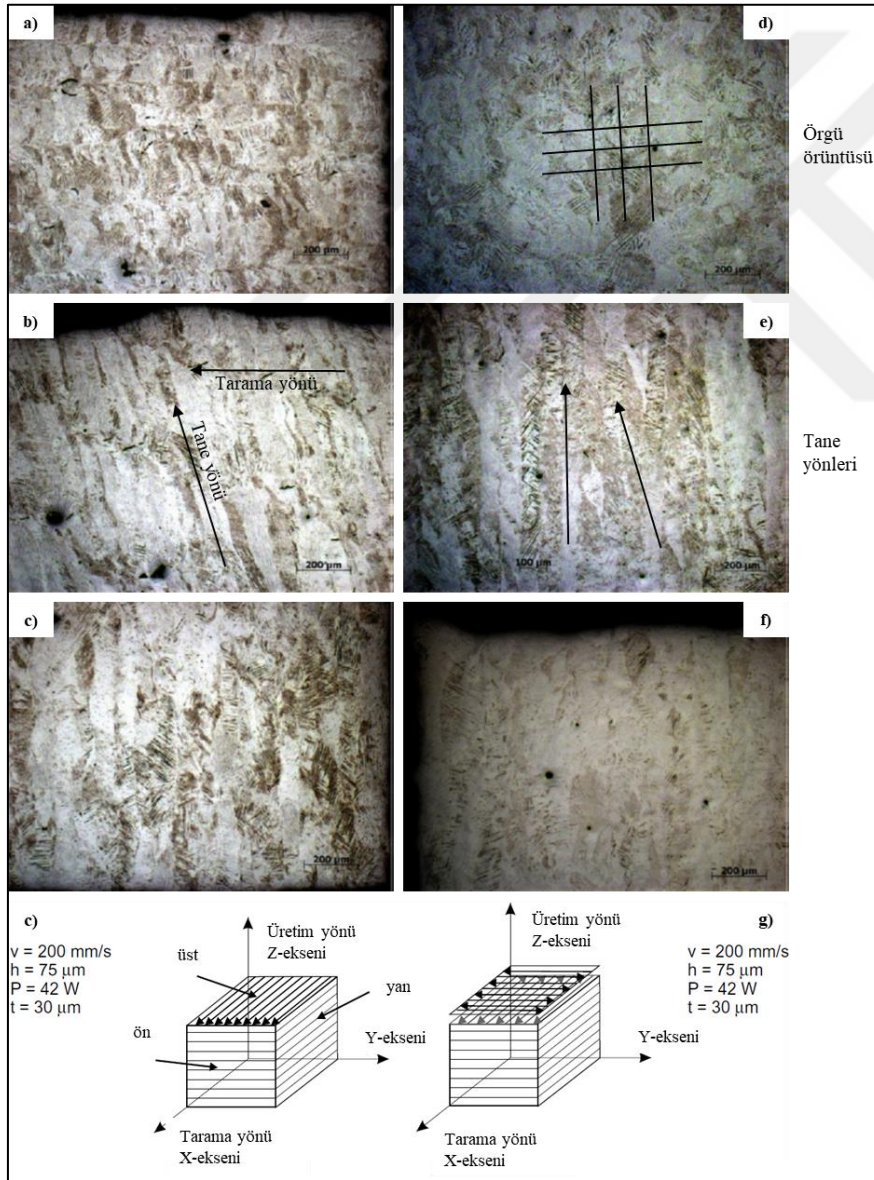


Şekil 2.4. a), b), c) EBM ve d), e), f) SLM ile üretilmiş numunelerin; a), d) aydınlık alan; b),e) karanlık alan TEM görüntüleri; c), f) kırınım desenleri



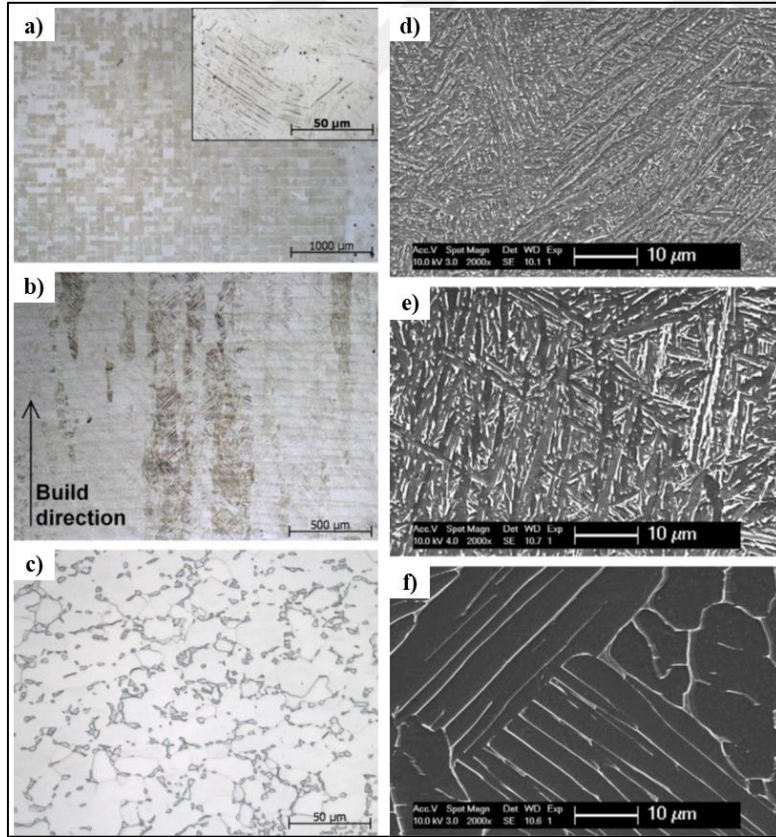
Şekil 2.5. EBM ve SLM ile üretilmiş Ti-6Al-4V malzemenin XRD desenleri

Thijs ve arkadaşlarına ait çalışmada (Thijs, 2010), SLM metodu ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerin üretim parametrelerine göre mikroyapı oluşumları incelenmiştir. Değişken parametreler olarak lazer tarama hızları, lazer tarama stratejileri, tarama adım aralıkları ve enerji yoğunluğu belirlenerek metalurjik özellikler OM, XRD ve enerji ayırmalı X-ışını (EDX) analizleriyle incelenmiştir. XRD analizlerinden elde edilen kristal yapı bilgileri martenzitik α' fazının oluştuğunu gösterirken, tane yapılarının soğuma yönüne (üretim tablasına doğru) ve lazer tarama yönüne (tarama stratejisi) bağlı olarak epitaksiyel olarak uzadığı görülmüştür (Şekil 2.6). EDX analizleri, yüksek enerji girdisi olan numunelerde, çok az miktarda da olsa Ti_3Al çökeltisinin oluşabildiğini göstermiştir.



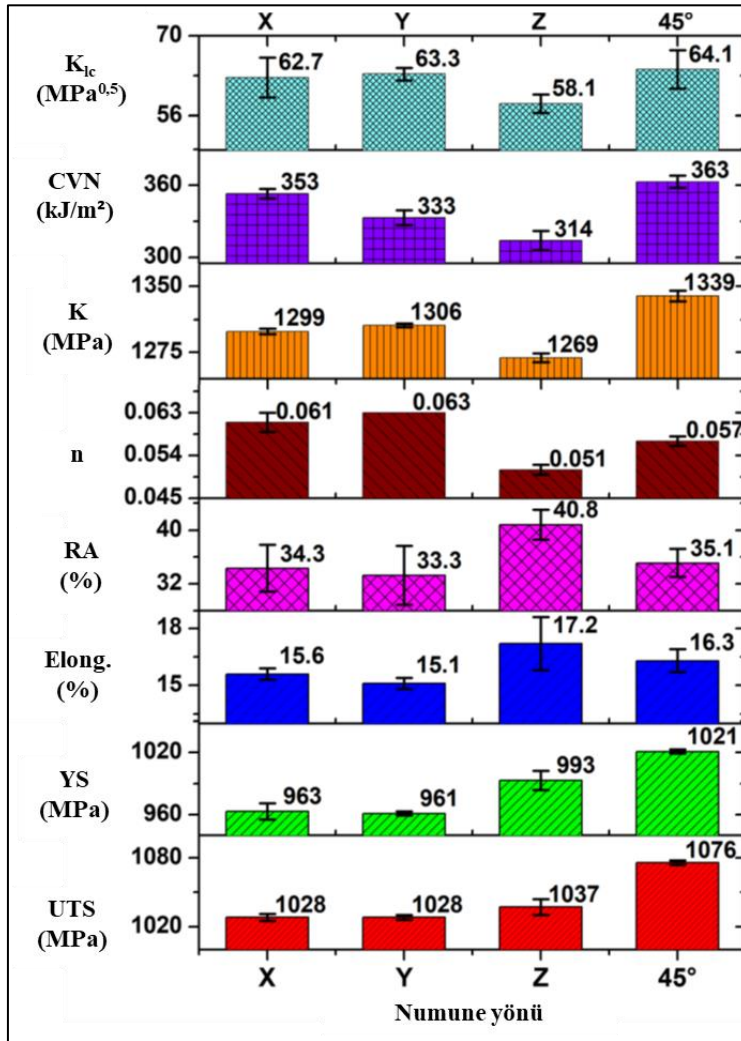
Şekil 2.6. Tek yönlü taramayla üretilen parçanın a)üst, b)yan, c)ön; değişken tarama yönüyle üretilen parçanın d)üst, e)yan, f)ön yüzeylerine ait mikroyapı görüntüleri; c,g)üretim parametreleri ve tarama stratejileri

Vrancken, Thijs, Kruth ve Humbeeck (Vrancken, 2012), yaptıkları çalışmada SLM metodu ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçaların farklı ısıtma işlemleri sonrasındaki mekanik ve metalurjik özelliklerini incelemiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme testleri kullanılırken metalurjik özelliklerin çıkarılması amacıyla SEM, EBSD ve XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Farklı ısıtma işlem parametreleri kullanılarak sıcaklığın etkisi, maruziyet süresinin etkisi ve soğutma hızının etkisi gözlenmiştir. Çalışma sonucunda, mikroyapı unsurlarının boyut değişimlerini etkileyen ana unsur soğutma hızı değil, azami sıcaklık değeri olarak belirlenmiştir. Ancak maruziyet süresinin ve soğutma hızının etkisinin, β dönüşüm sıcaklığına yaklaştıkça arttığı gözlenmiştir. β dönüşüm sıcaklığı üzerine çıkılan ısıtma işlemlerinde SLM prosesine özgü mikroyapının giderildiği, sütun yapısında olan β tanelerinin yarı-eşeksenli forma dönüştüğü belirtilmiştir. Isıtma işlem öncesi ve sonrası malzeme mikroyapı görüntüleri Şekil 2.7’de verilmiştir. Malzeme çekme gerilmesinin sıcaklık artışıyla düştüğü ancak sünekliğinin arttığı bulunmuş, optimum ısıtma işlem parametresi olarak 2 saat 850°C’de bekletme ve fırında soğutmanın uygun olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.7. SLM Ti64 parçanın a)Üst, b) Yan yüzeyinin, c)Dövme ile üretilmiş parçanın mikroyapı görüntüleri; SLM Ti64 malzemenin 2 saat d)780°C, e)843°C, f)1015°C’de ısıtma işlem sonrası mikroyapı görüntüleri

Manikandan ve arkadaşları (Manikandan, 2022) yaptıkları çalışmada SLM ile üretilmiş Ti-6Al-4V malzemenin yönelime bağlı mekanik ve metalurjik özelliklerini incelemiştir. Çekme, mikro sertlik, darbe ve kırılma tokluğu tesleriyle parça mekanik özellikleri çıkarılmış olup bu özelliklerin üretim yönüne göre değiştiği gösterilmiştir (Şekil 2.8). Mekanik özelliklerdeki farklılığın temel sebebi olarak malzeme mikroyapısındaki α ve β tanelerinin soğuma yönüne ve hızına göre şekillenmesinden kaynaklı mukavemetlendirme mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.8. Üretim yönüne bağlı malzeme mekanik özellikleri

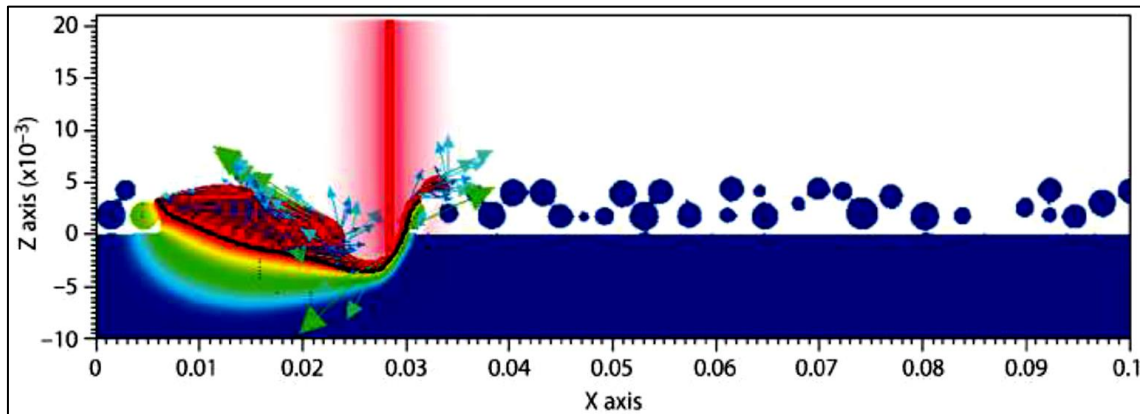
Kalıntı gerilmeler; oluşma mekanizmaları, boyut ölçekleri ve ölçülme metotlarına göre kategorize edilebilmektedir. Boyut ölçeklerine yapılan sınıflandırmada, Tip I gerilmeler makroskopik ölçekte oluşan kalıntı gerilmeler, Tip II gerilmeler tane boyutu ölçeğinde oluşan mikroskopik (tanelerarası) gerilmeler olup, Tip III kalıntı gerilmeler ise atomik seviyede ölçeklenen gerilme tipleridir. Tip II kalıntı gerilmeler, farklı oryantasyonlardaki

komşu tanelerin elastik ve termal özelliklerinin farklı olmasından kaynaklı olarak neredeyse tüm çoklu kristal yapısına sahip malzemelerde gözlenmektedir. İki fazlı bir malzemede makro-gerilmeler fazlar arasında sürekli olarak devam ederken, Tip II ve Tip III gerilmeler sürekli değildir. Metalik malzemelerin ömür değerlendirmelerinde Tip II ve Tip III gerilmeler genellikle önemsiz kabul edilmektedir (Withers, 2001). Malzeme içerisinde kalan bu artık gerilmeler, malzemelerin akma dayanımının daha altında bir gerilmeye maruz kaldıklarında plastik deformasyona uğramalarına sebebiyet vererek ömürlerini düşürebilmekteyken, uygulama ihtiyacına bağlı olarak kasıtlı oluşturulan kalıntı gerilmeler malzeme dayanımını artırıcı etki gösterebilmektedir. Buna örnek olarak yorulma dayanımının artırılması amacıyla, parça dış yüzeylerine uygulanan bilyeli dövme işlemi ile yüzeyde basma gerilmesi oluşturularak çalışma anında uygulanan çekme gerilmesinin basma kalıntı gerilmesi ile nötrlenmesi sağlanabilmektedir (Dieter, 1986).

Malzeme içerisindeki kalıntı gerilmeler, yalnızca elastik gerilmeler olarak kabul edilmektedir. Malzemenin elastik limitinin üzerinde oluşan gerilmeler, plastik deformasyona sebep olarak malzemenin akma gerilmesi değerine kadar kendiliğinden giderilirler. Kalıntı gerilme içeren bir parça üzerinden malzeme kaldırıldığında, işlenen bölgedeki kalıntı gerilmeler giderildiğinden, parça içerisindeki gerilme denge durumu bozularak parçanın deforme olmasına sebebiyet vermektedir (Dieter, 1986). Kalıntı gerilme ihtiva ettiği bilinen parçalarda hasarlı kalıntı gerilme ölçümlerinin çalışma prensibi de bahsedilen gerilme dengesinin bozulmasıyla değişen gerinim ve yer değiştirme miktarlarının ölçülmesine dayanmaktadır. Hasarlı kalıntı gerilme ölçüm metotları; kesi alma (ing.Excision), ikili çentik (ing. Two-groove), ayırma (ing.Splitting), dilme (ing.Slitting), halka çekirdek (ing. Ring-core), delik delme (ing.Hole-drilling), derin delik (ing.Deep hole), katman kaldırma (ing.Layer removal), kontur (ing.Contour), kesitleme (ing.Sectioning) olarak sınıflandırılmıştır. Geniş kullanım alanı ve kolay uygulanabilirlik gibi özellikleri bakımından delik delme metodu, tez kapsamında kullanılan hasarlı tip kalıntı gerilme ölçüm metodu olarak seçilmiştir. Hasarlı gerilme ölçüm metotlarının yanı sıra hasarsız olarak bilinen X-ışını, Synchrotron ve Nötron kırınımı metotları malzeme kristal kafes yapısındaki mesafeleri ölçerek kalıntı gerilme miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu metotlardan X-ışını kırınımı metodunun nüfuziyeti az olduğundan yalnızca yüzeye yakın bir hacimdeki kalıntı gerilmeler ölçülebilmektedir (Schajer, 2018). Bu kısıtlamaya rağmen Synchrotron ve Nötron kırınımı altyapılarının ulaşılabilirliğinin az olması ve kullanım

maliyetlerinin yüksek olması X-ışını metotlarının daha uygulanabilir ve yaygın kullanılmasına sebep olmaktadır.

Kalıntı gerilme oluşum mekanizmalarından birisi de malzemeye uygulanan ısıl girdilerdir. SLE metodu temeline bakıldığında parçaların birleştirilmelerinde kullanılan kaynak teknolojisinin 3 boyutlu geometriyi oluşturmak için kullanılan bir versiyonu olarak tanımlanabilmektedir. Kaynak prosesinde olduğu gibi SLE’de de hedef malzeme ergime sıcaklığının üzerine ısıtılmakta, daha sonra ergiyik havuzun katılaşmasıyla parça oluşmaktadır. Bu hızlı katılaşma sürecinde lokal olarak oluşan büzülme ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) etkileri sebebiyle kalıntı gerilmeler meydana gelmektedir (Vrancken, 2016). SLE metodunda oluşan ergiyik havuz, lazer ısı girdisinin malzeme içerisine yüksek nüfuziyeti ile anahtar deliği formuna benzer bir şekilde oluşmaktadır (Şekil 2.9) (Gusarov, 2007). Isı girdisinin tarama yönüne göre ergiyik havuzun ön kısmında ve katı alt katmanlara doğru, hızlı termal genişmeden kaynaklı basma gerilmeleri oluşmaktadır. Ergiyik havuz sıvı halde olduğundan bir kalıntı gerilme ihtiva etmezken ergiyik havuzun arkasında kalan ve hızlı katılaşan bölgede büzülmeden kaynaklı çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Ergiyik havuzun önünde oluşan basma gerilmeleri ısı girdisinin bu bölgenin üzerinden geçmesiyle giderilmekte ancak çekme gerilmeleri kalıntı gerilme olarak malzeme içerisinde kalmaya devam etmektedir (Brückner, 2007).

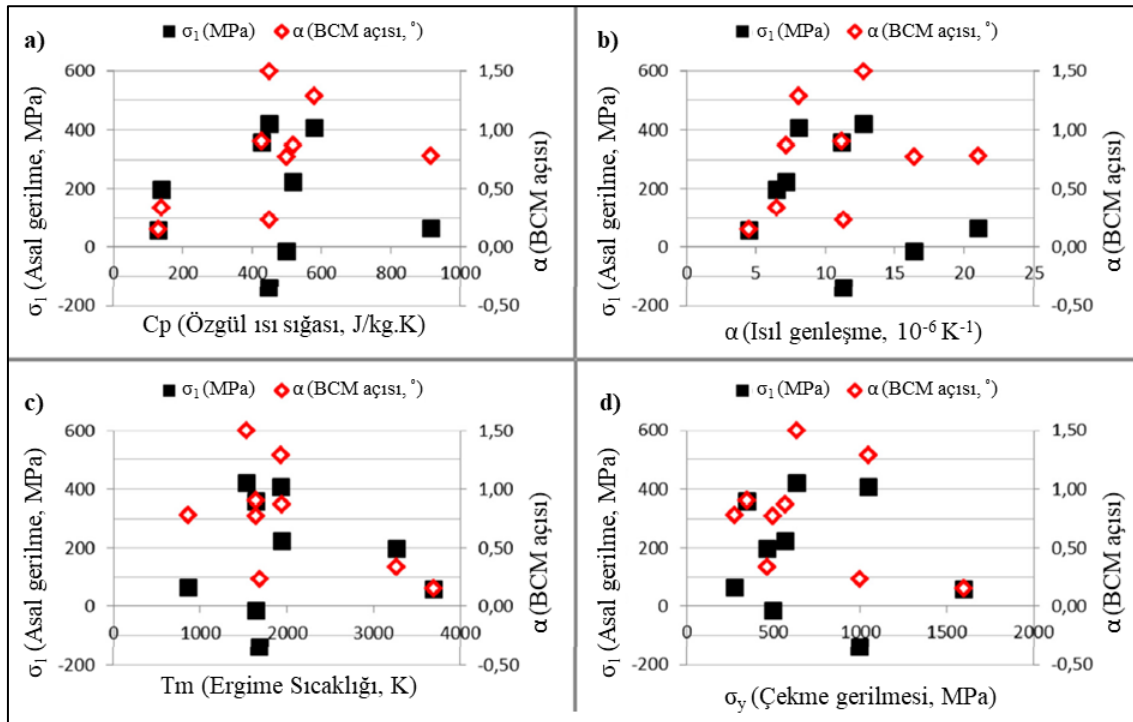


Şekil 2.9. Ergiyik havuz modeli

SLE prosesinde ısı kalıntı gerilme oluşumunu etkileyen parametreler malzeme özelliklerine, proses parametrelerine ve ardıl işlemlere bağlı olarak sınıflandırılabilir. Malzemenin ısı iletkenliği, ısı genişleme oranı, ergime sıcaklığı, soğuruculuğu vb. kalıntı gerilme oluşumunda etken rol oynayan malzeme esaslı parametreler iken, lazer gücü, tarama

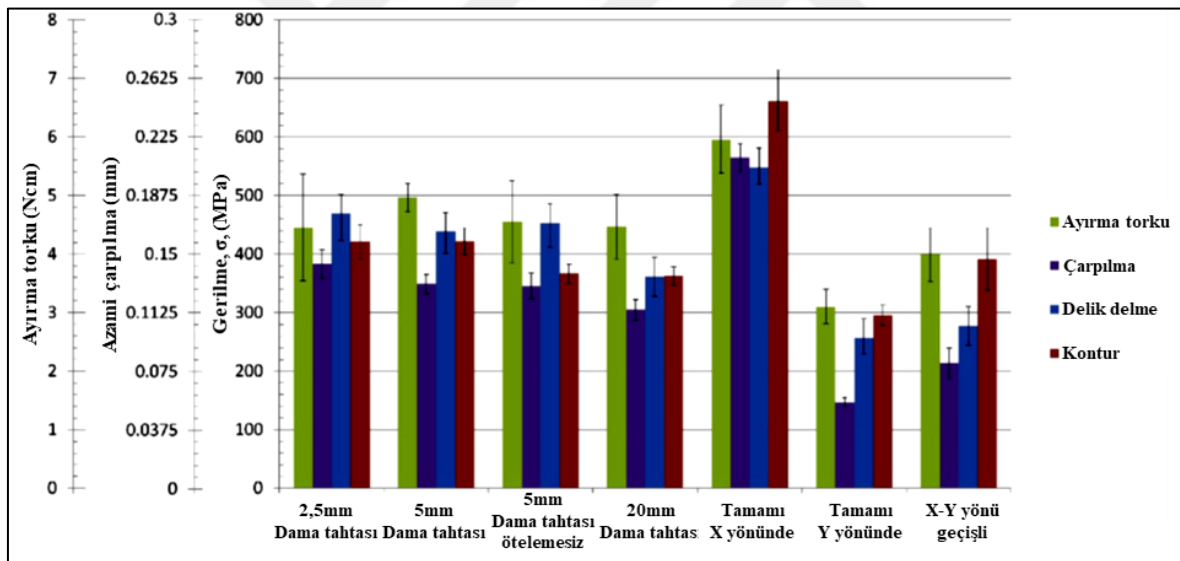
hızı, tarama stratejisi, katman kalınlığı, toz serme hızı, lazer sayısı gibi parametreler ise proses esaslı etken parametreler olarak değerlendirilmektedir.

Vrancken, Wauthle, Kruth ve Humbeeck (Vrancken, 2013) yaptıkları çalışmada; Ti Grade 1, Ti-6Al-4V-ELI, 316L, Maraging18Ni300, Ta, W, Inconel 718, AlSi10Mg ve Hastelloy C-276 alaşımlarının lazer ergitmeli SLE metodu ile üretimlerini gerçekleştirmiş ve farklı malzemelerden üretilen köprü formundaki numunelerin çarpılma miktarlarını ve X-ışını metodu ile kalıntı gerilmelerini ölçmüşlerdir. Ölçüm sonuçlarının malzeme termal özellikleriyle ilişkilendirilmesine çalışılmış ancak teorik olarak beklenen sonuçların deney sonuçlarıyla doğrudan ilişkilendirilemediği görülmüştür. Örnek olarak yüksek termal genişleme katsayısına sahip malzemelerde kalıntı gerilmenin daha fazla oluşması beklenmekteyken, malzemelerin ergime sıcaklığının farklılığı ısı maruziyet süresini etkilediği için bu sebep sonuç ilişkisi kurulamamıştır. (AlSi10Mg alaşımının ısı genişleme katsayısı Ti6Al4V alaşımına göre yüksek olmasına karşın Ti6Al4V alaşımı daha yüksek sıcaklıkta ergitilebilmekte ve daha yüksek kalıntı gerilme miktarına sahip olmaktadır). Farklı malzeme özelliklerine göre ölçülen kalıntı gerilme miktarları ve köprü numunelerin çarpılma açıları Şekil 2.10'da verilmiştir.



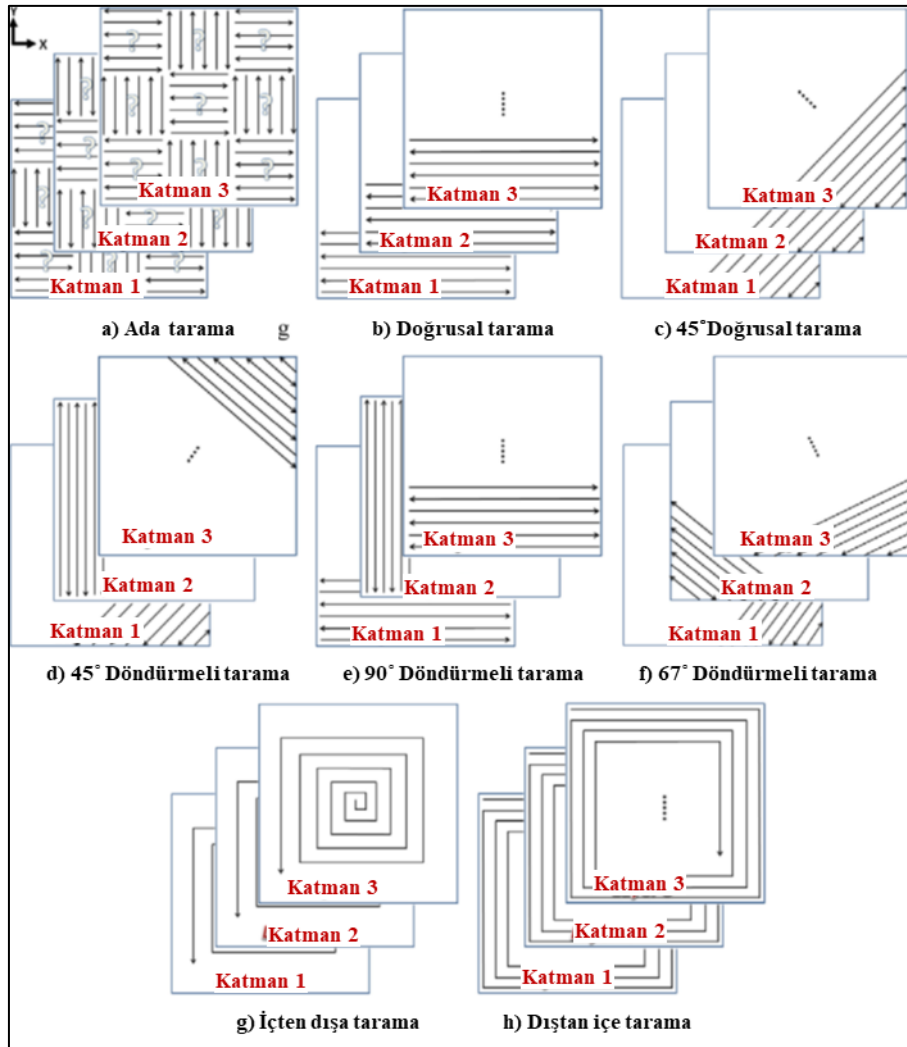
Şekil 2.10. Farklı ısı özelliklere sahip malzemelerin SLM üretimi sonrası sahip oldukları kalıntı gerilme ve çarpılma miktarları

Robinson, Ashton, Fox, Jones ve Sutcliffe (Robinson, 2018) SLE metodu ile üretilmiş CpTi (Ticari saflıkta Titanyum) numunelerinin 4 farklı üretim tarama stratejisine göre kalıntı gerilme miktarlarını incelemişlerdir. Kalıntı gerilmenin ölçülmesi ve karşılaştırılmasında çarpılma miktarının optik lazer yüzey profilometresiyle taranması, delik delme ve kontur metodu kullanılmıştır. Ölçüm metotlarının birbirleriyle karşılaştırılmasıyla sonuçların benzer trendde oldukları görülmüştür. Tarama yönlerinin tek yönlü olduğu numunelerde kalıntı gerilmelerin öncelikli olarak tarama yönlerine paralel olarak oluştuğu belirlenmiş, ancak tarama yönüne dik oluşan kalıntı gerilme miktarlarının da ihmal edilemeyecek miktarda olduğu (paralel yöndeki gerilmenin yarı ölçeğinde) ölçülmüştür. Dama tahtası şeklinde yapılan tarama stratejisinin kalıntı gerilmeyi azaltmada veya homojen hale getirmede etkisinin çok az olduğu tespit edilmiş oluğ katmanlar arası değişen tarama açılarının en düzgün ve en az kalıntı gerilme oluşturduğu görülmüştür. Tarama stratejilerine bağlı olarak farklı metotlarla ölçülen kalıntı gerilme miktarları Şekil 2.11’de görülmektedir.

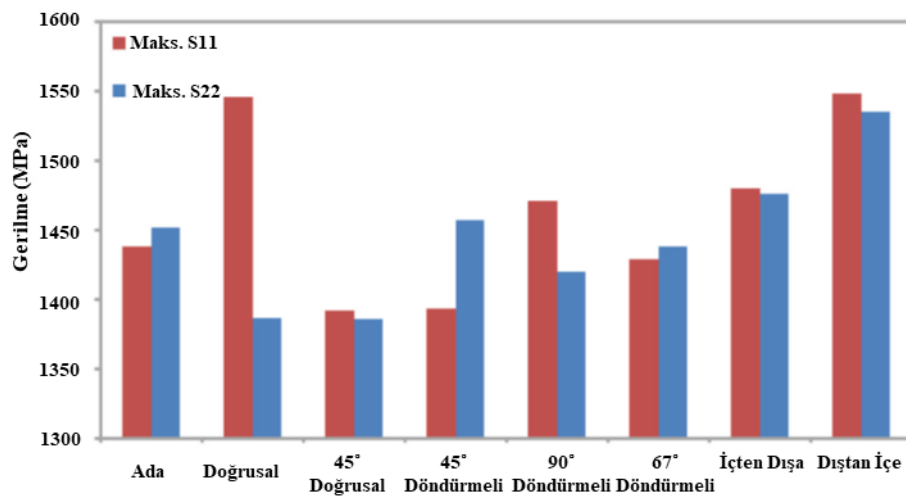


Şekil 2.11. Tarama stratejisine bağlı kalıntı gerilme miktarları

Cheng, Shrestha ve Chou (Cheng, 2016), SLE prosesinin sonlu elemanlar modeli ile simülasyonunu gerçekleştiren çalışmalarında 8 farklı lazer tarama stratejisinin Inconel 718 malzemesiyle üretilen plaka yapılarında oluşturduğu kalıntı gerilme ve çarpılma miktarlarını incelemişlerdir. Gerçekleştirilen nümerik analizler sonucunda, azami kalıntı gerilme oluşumu dıştan içe tarama stratejisinde görülmüş olup yönelime bağlı gerilme farklılığının en fazla gözlemlendiği tarama stratejisi ise tek yönlü tarama olarak bulunmuştur. Tarama stratejilerinin şematik gösterimi ve azami asal gerilme sonuçlarını gösteren grafik sırasıyla Şekil 2.12 ve Şekil 2.13’te verilmiştir.

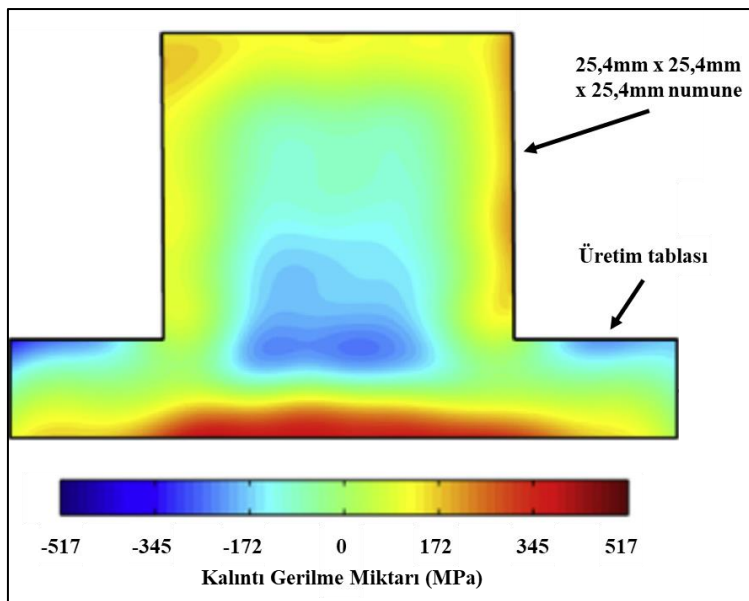


Şekil 2.12. Lazer tarama stratejileri

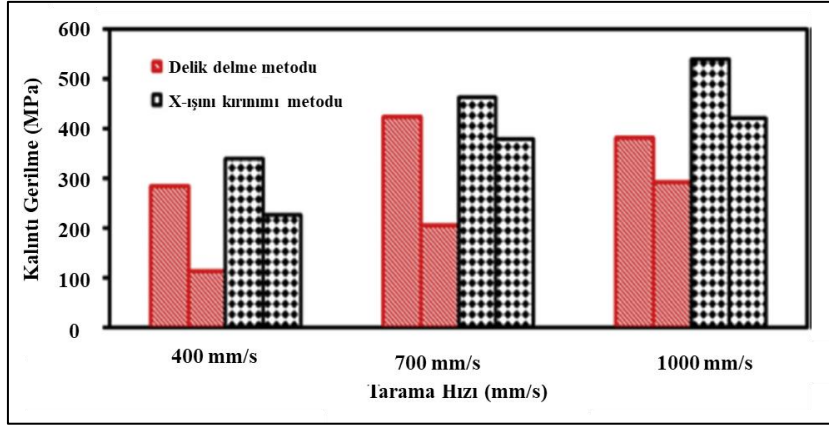


Şekil 2.13. Tarama stratejilerine göre kalıntı gerilme miktarları

Levkulich ve çalışma arkadaşları (Levkulich, 2019), çalışmalarında SLE metodu kullanılarak üretilmiş Ti-6Al-4V numunelerde oluşan kalıntı gerilme ve çarpımları incelemişlerdir. Çalışmada etkisi incelen değişken parametreler; üzerine üretim yapılan tablaların maruz bırakıldıkları ısıl işlemler, numunelerin üretim parametreleri (Lazer gücü ve lazer tarama hızı), numunelerin yükseklikleri ve sarkma açıları olarak belirlenmişken, ölçüm metotlarının birbirleriyle karşılaştırmaları da gerçekleştirilmiştir (X-ışını kırınımı, delik delme, kontur metodu). Tüm ölçüm metotlarında ortak olarak alınan sonuç numunelerin dış yüzeylerinde çekme kalıntı gerilmesi meydana geldiğidir. Buna ek olarak kontur metoduyla yapılan ölçüm sonuçlarında numunelerin çekirdek kısımlarında basma kalıntı gerilmeleri olduğu gözlenmiştir (Şekil 2.14). Tabla alt yüzeylerinden alınan kalıntı gerilme ölçümlerinde X-ışını kırınımı ve delik delme metotlarından elde edilen sonuçlar birbiriyle örtüşürken, numunelerin üst yüzeylerinden alınan sonuçlarda gerilme değerlerinin uyuşmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak da X-ışını kırınımı metodunun delik delme metoduna göre daha yüzeysel bir hacimden veri aldığı ve eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğün fazla olmasının ölçüm sonuçlarına etki edebileceği gösterilmiştir. Proses parametrelerinin kalıntı gerilmeye etkisi incelendiğinde yüksek lazer gücü, düşük tarama hızı ve küçük üretim alanı seçildiğinde kalıntı gerilmelerin daha az miktarda olduğu ölçülmüştür (Şekil 2.15). Üretimde kullanılan tabladaki kalıntı gerilmelerin parça üzerinde oluşacak kalıntı gerilme miktarında etkin rol oynadığı ancak tabla mikroyapısının kalıntı gerilme oluşumuna etkisinin gözlenmediği belirtilmiştir.

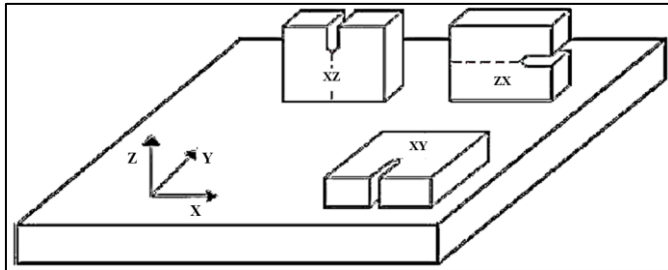


Şekil 2.14. Kontur metodu ile ölçülmüş kalıntı gerilme sonuçları

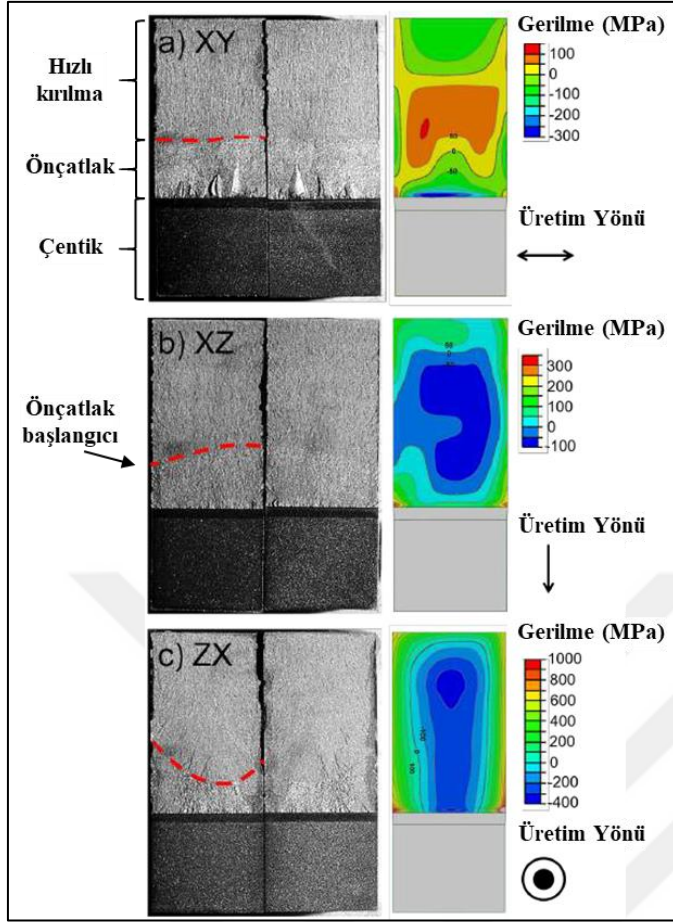


Şekil 2.15. Lazer tarama hızlarına göre ölçülen kalıntı gerilme miktarları

Vrancken, Cain, Knutsen ve Humbeeck (Vrancken, 2014), çalışmalarında 3 farklı üretim oryantasyonunda üretilmiş (Şekil 2.16) Ti-6Al-4V numunelerde kırılma tokluğu testleri gerçekleştirmiş ve çatlak ilerleme düzleminde kesitler alarak kontur metodu ile kalıntı gerilme miktarları ölçülmüştür. Kalıntı gerilme haritalamasının çatlak oluşma ve ilerleme bölgeleriyle eşleştirilmesiyle kalıntı gerilmelerin malzemenin kırılma davranışına etkisi incelenmiştir. XY ve XZ yönünde üretilen numunelerdeki önçatlak bölgelerinin görece daha düz olduğu görülmüş, bunu doğrulayacak şekilde bu bölgelerdeki kalıntı gerilmelerin de akma gerilmesinin çok altında olduğu ölçülmüştür. XY numunesinin sahip olduğu basma gerilmeleri sebebiyle önçatlakların ilerlemesi ve çatlak kapanması fenomeninin önüne geçilmesi için daha yüksek yüklemelere ihtiyaç olduğu gözlenmiştir. ZX numunesinin çentik kenarında, maksimum ve minimum kalıntı gerilmelerin aralığı 1 GPa mertebesinde bulunmuştur. Gerilme değerindeki bu farklılık, çatlak ilerlemesinin kenar kısımlarda daha hızlı, merkez bölgede daha yavaş olmasına ve eğrisel bir önçatlak bölgesi oluşmasına sebep olmaktadır (Şekil 2.17). Sonuç olarak kalıntı gerilmelerin ağırlıklı olarak üretim yönüne paralel olarak oluştuğu ve kalıntı gerilmelerin malzeme mekanik özelliklerine önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür.



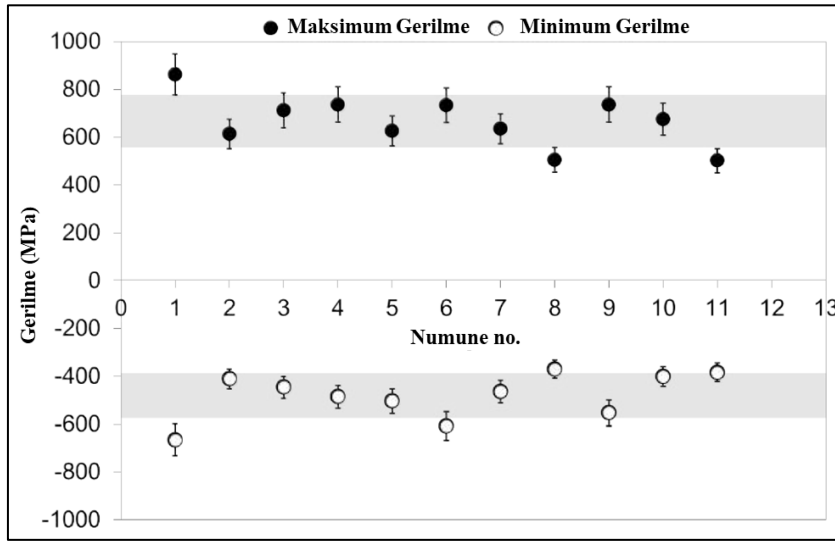
Şekil 2.16. Test numunelerinin üretim oryantasyonları



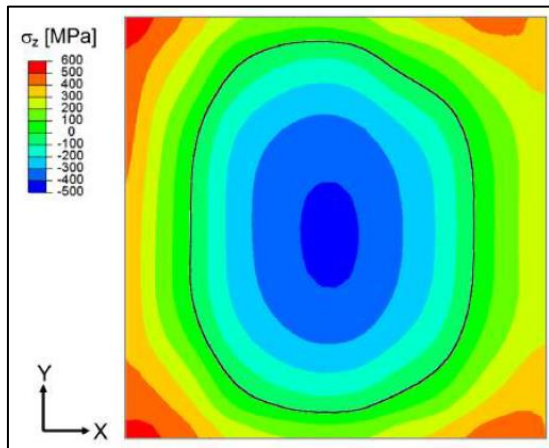
Şekil 2.17. 3 farklı üretim yönünde üretilen numunelere ait kırılma yüzeyleri ve kontur metodu ile ölçülen kalıntı gerilme profilleri; a)XY, b)XZ, c)ZX yönü

Vrancken, gerçekleştirdiği doktora tez çalışmasında (Vrancken, 2016), sabit üretim parametreleriyle farklı tablolarda SLE ile üretilmiş 12 adet Ti-6Al-4V numunenin XRD ve kontur metotlarıyla kalıntı gerilme miktarlarını ölçmüştür. Tüm üretim parametreleri aynı olmasına karşın XRD ile ölçümleri, bazı numuneler için ölçülen minimum gerilme değerinin bir başka numunedeki maksimum gerilme değerinin %57'sine tekabül edebildiğini göstermiştir (Şekil 2.18). Yazar bu farklılığın sebebini üretim esnasında kontrol edilemeyen homojen olmayan toz dağılımından kaynaklanabileceği şeklinde açıklamış ve kalıntı gerilme ölçüm sonuçlarının nicelliği yerine niteliği ve trendlerine yoğunlaşılması gerektiğini önermiştir. Kontur metodu ile yapılan kalıntı gerilme ölçümlerinde ise üretim yönüne paralel (dikey) yönde ölçülen gerilmelerin parça dış kenarlarında çekme karakteristiğinde, parça merkezinde ise basma karakterinde olduğu bulunmuştur (Şekil 2.19). Bunun sebebi olarak da dış kenarlardaki ergiyik havuzların katılaşması esnasında büzüşmenin yatay yönde kısıtlanması olarak verilmiştir. Buna ek olarak XRD ve kontur metodundan alınan verilerin birbirleriyle karşılaştırılmasının doğru olmayacağı tartışılmış, bu çıkarımın sebebi olarak

kontur metodunun Tip I gerilmeleri ölçerken XRD metodunun Tip I ve II gerilmeleri ölçtüğü ve XRD metodunun yüzey nüfuziyet miktarının 15-20 μm mertebesindeyken kontur metodunun hata payının en fazla olduğu bölgenin numune dış kenarları olduğu belirtilmiştir. Ara sonuçlar olarak lazer tarama vektörleri yönündeki kalıntı gerilme miktarlarının tarama yönüne dik olanlara göre daha yüksek olduğu ve tabladan ayrılan kübik numunelerde kalıntı gerilme dağılımının tüm dış yüzeylerde çekme, çekirdek kısmında ise basma karakteristiğinde olduğu çıkarılmıştır.



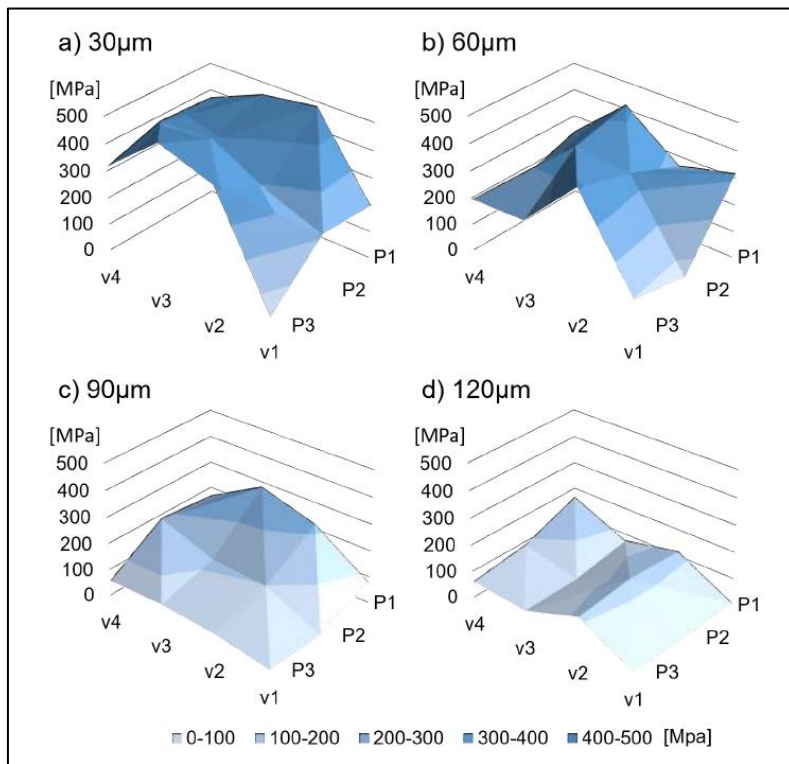
Şekil 2.18. Üretim parametreleri aynı numunelere ait, kontur metodu ile dikey yönde ölçülen kalıntı gerilme miktarları



Şekil 2.19. Kontur metodu ile dikey yönde ölçülmüş ortalama kalıntı gerilme miktarı

Yazar aynı tez çalışmasında (Vrancken, 2016), SLE ile üretilmiş Ti-6Al-4V malzeme için lazer gücü, lazer tarma hızı ve katman kalınlığı parametrelerinin değişimlerine göre termal kalıntı gerilmeleri ve çarpılma miktarlarını incelemiştir. Kalıntı gerilme ölçümlerinde küp

numuneler XRD metodu ile incelenmiş (Şekil 2.20) ve ankastre kiriş geometrisindeki numunelerin çarpılma miktarları ölçülmüştür. Her iki metot ile yapılan çalışmalarda ortak olarak bulunan çıktılar ise; katman kalınlığını artırmanın, parça içerisinde ısı birikimini azalttığından makroskopik kalıntı gerilme miktarını artırdığı, tarama hızının artışının ısıl gradyanları artırdığı, böylelikle kalıntı gerilme miktarının artmasına ve anizotropik hale gelmesine sebep olduğu, lazer gücünün diğer iki değişken parametreye göre etkisinin daha düşük olduğu ancak artan lazer gücünün ısı gradyanını azaltıcı etkisi nedeniyle kalıntı gerilmeyi azalttığıdır.



Şekil 2.20. Değişken üretim parametrelerine göre XRD ile ölçülen maksimum asal gerilmeler; a)30µm, b)60µm, c)90µm, d)120µm katman kalınlığında üretilen numuneler

Bu bölümde SLE metotları ile üretilen metal malzemelerin, Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde yoğunlaşarak, mekanik ve metalurjik özelliklerinin incelendiği akademik çalışmalara yer verilmiştir. Buna ek olarak tez çalışması kapsamında kullanılan metotlara ilişkin literatür bilgisi paylaşılmıştır. Gerçekleştirilen literatür taramasında tez çalışması kapsamında kullanılan malzeme ve üretim metoduna ait oldukça fazla miktarda çalışmaların yapıldığı, prosesin doğasından gelen termal kalıntı gerilme fenomeninin davranış ve oluşma şeklinin ve malzeme özelliklerine etkisinin incelenmeye çalışıldığı görülmüştür. Buna karşın üretim yönlerine bağlı malzeme metalurjik özelliklerinin termal kalıntı gerilmeler ile

ilişkilendirilmesi noktasında literatürün zenginleştirilmesi gerektiği gözlenmiştir. Metalurjik özelliklerin belirlenmesinde, farklı üretim yönlerinde gerçekteştirilen XRD faz analizlerinin malzeme mikroyapısıyla eşleştirilebileceği, mikroyapı görüntülerindeki nicel değerler ve faz dağılımları ile malzeme mekanik özelliklerinin tahmin edilebileceği öngörölmüştür. Buna ek olarak, kalıntı gerilme ölçümlerinin görece daha az yaygın ve daha yüksek maliyetli olması ve bazı metotlarda parça üzerinde hasar oluşturması sebebiyle malzemelerde oluşan kalıntı gerilme miktarlarının/davranışının diğer malzeme metalurjik özellikleri üzerinden yorumlanmasının literatüre katkı sağlayacağı düşünölmüştür. Ayrıca birçok çalışmada kalıntı gerilme ölçümlerinde XRD, kontur metodu ve çarpılma ölçümleri birlikte değerlendirilirken, delik delme metodunun diğer metotlarla karşılaştırılmasının faydalı olacağı da öngörölmüştür.

3. MALZEME VE METOTLAR

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan üretim, ardıl işlem, test, deney, nümerik ve analitik metotlar verilmiştir.

3.1. Üretim ve Ardıl İşlemler

Gerçekleştirilen tez çalışmasında mekanik ve metalurjik özellikleri incelenen malzeme seçici lazer ergitme metodu ile üretilmiş Ti-6Al-4V malzemesidir. Toz yataklı metal eklemeli imalat teknolojilerinden lazer ışın kaynağı kullanılan bu metodun seçilmesinin ana nedeni, seçilen teknolojinin uygulama alanlarının diğer eklemeli imalat metotlarına göre daha yaygın olarak kullanılması ve bu metotla üretilen parçaların mekanik ve metalurjik özelliklerinin proses parametrelerine bağlılığının daha yüksek olmasıdır.

Seçici lazer ergitme metodunda kullanılan malzeme, gaz atomizasyonu ile üretilmiş, 15-45 µm arasında toz boyut dağılımına sahip Ti-6Al-4V malzemedir. Makine üreticisinden alınmış toz malzemeye ait element analizi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Toz malzemeden SLE metodu ile üretilmiş parçaların, makine üreticisi tarafından sağlanan mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Ti6Al4V toza ait element analizi sonuçları

Element	Al	V	O	N	C	H	Fe
	5,5-6,75 wt.-%	3,5-4,5 wt.-%	2000ppm	500ppm	800ppm	150ppm	3000ppm

Çalışmada test ve ölçümleri yapılan tüm numuneler ve parçalar EOS Electro Optical Systems M280 seçici lazer ergitme cihazında üretilmiştir. Bu cihazda ısı kaynağı olarak azami 200W gücünde Ytterbium-fiber lazer kullanılmaktadır. Eklemeli imalat için konvansiyonel üretim parametreleri olarak tanımlanan lazer gücü, lazer tarama hızı, katman kalınlığı ve lazer adım aralığını gösteren baz üretim parametre seti Çizelge 3.3’te gösterilmiştir. Bu baz üretim parametre seti, makine üreticisinin asgari geometrik çarpılma ve asgari iç boşluk oluşturacak malzeme özelliklerine göre geliştirdiği parametre setidir. Üretimlerde kullanılan lazer tarama stratejisi ada tarama olarak belirlenmiş olup tarama yollarının ardışık katmanlar arasındaki dönme açısı 67° olarak seçilmiştir. Tüm üretim prosesi Argon atmosferi altında gerçekleştirilmiş olup numuneler katı titanyum üretim

tablası üzerinde, 4mm yüksekliğinde destek yapılar üzerine inşa edilmiştir (Kalıntı gerilme ölçümü yapılan numune destek yapı olmaksızın tablaya bitişik olarak üretilmiştir). Üretim sonrasında tüm numune ve parçalar tel erozyon metodu ile kesilerek tabladan ayrılmıştır. (Kalıntı gerilme ölçümleri, gerilmelerin kesim esnasında giderilmelerini önlemek amacıyla, numuneler tabladan ayrılmadan önce gerçekleştirilmiştir.)

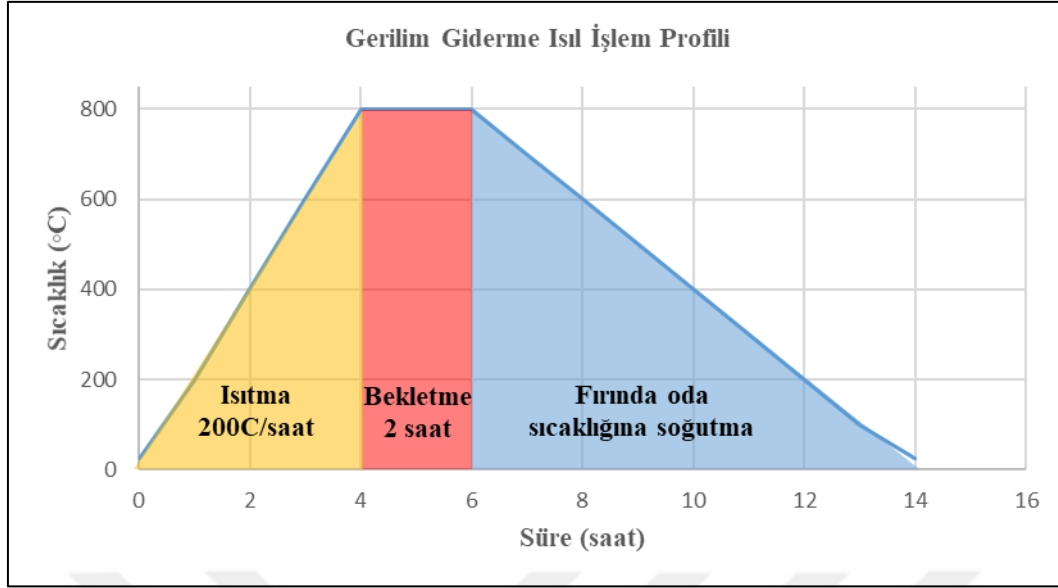
Çizelge 3.2. SLE ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerini gösteren katalog değerleri

	SLE Üretim	Isıl İşlemli
Çekme Dayanımı		
Yatay yönde (XY)	1230 ±50 MPa	1050 ±20 MPa, min. 930 MPa
Dikey yönde (Z)	1200 ±50 MPa	1060 ±20 MPa, min. 930 MPa
Akma Dayanımı		
Yatay yönde (XY)	1060 ±50 MPa	1000 ±20 MPa, min. 860 MPa
Dikey yönde (Z)	1070 ±50 MPa	1000 ±20 MPa, min. 860 MPa
Kopma Uzunluğu		
Yatay yönde (XY)	10 ±2 %	14 ±1 %, min. 10%
Dikey yönde (Z)	11 ±3 %	15 ±1 %, min. 10%
Elastisite Modülü		
Yatay yönde (XY)	110 ±10 GPa	116 ±10 GPa
Dikey yönde (Z)	110 ±10 GPa	114 ±10 GPa
Sertlik	320 ±12 HV5	
Yoğunluk	4,41 g/cm ³	

Çizelge 3.3. Baz üretim parametreleri

Parametre No.	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Adım aralığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
Baz	170	1250	0,1	0,03	45,33

Metalurjik ölçümler için üretilen numunelerde üretim yönünün malzeme iç yapısına etkilerinin herhangi bir bozulma olmadan görülmesi hedeflendiğinden bu numunelere herhangi bir ısıtıl işlem uygulanmamıştır. Buna ek olarak baz üretim parametreleriyle üretilen numunelerde ısıtıl işlemin etkisinin de görülmesi amacıyla gerilim giderme ısıtıl işlemi uygulanmıştır. Bahsedilen ısıtıl işlem ASM 2801 standardına uygun olarak, vakum basıncı 6×10^{-3} mBar seviyesi limit olarak belirlenerek Şekil 3.1’de verilen ısıtılma-soğutılma profiline göre uygulanmıştır.



Şekil 3.1. Gerilim giderme ısııl işlem profili

3.2. Test ve Ölçümler (Deneyisel Çalışmalar)

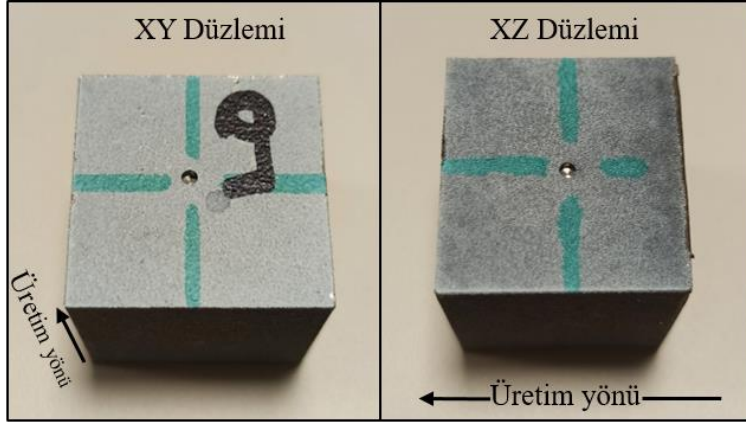
Numunelerin mekanik ve metalurjik özelliklerinin karakterize edilmesi amacıyla mekanik testler, mikroyapı karakterizasyonu ve metalurjik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Metalurjik karakterizasyon faaliyetleri kapsamında optik mikroskop ile görüntülemeler yapılmıştır, X-Işını Kırınım (ing. X-Ray Diffraction, XRD) metodu ile malzemenin faz dağılımı incelenmiştir ve XRD ve delik delme metotlarıyla kalıntı gerilmeler ölçülmüştür. Mekanik testlerde ise çekme testleri, sertlik ölçümleri, darbe testleri ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin üretim yönüne bağlı özelliklerinin tayin edilmesi, numune geometrisine bağlı olarak alınan ölçümlerin numune üzerindeki konumunun bilinir olması amacıyla numune yüzeyleri matris yapıda bölünerek isimlendirilmiştir. Numunelerin ölçüm noktalarına göre bölünme ve isimlendirilme biçimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntülemelerinde, Leica DM6M optik mikroskop kullanılarak, numunelerin matris yapıya bölünen her bir bölgesinden 50x, 100x, 200x ve 500x büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır.



Şekil 3.2. Numunelerin bölgesel isimlendirmeleri

Malzeme faz analizinde kullanılan XRD cihazı Malvern Panalytical X'Pert Pro Multi Purpose Diffractometer'dır. X-Işını kaynağı olarak Cu K α (1.54058 Å) anot kullanılmıştır. Gonyometre yarıçapı 240mm, geometri tipi Bragg-Brentano'dur. XRD ölçüm parametreleri, toplanacak veri miktarı ve çözünürlüğüne göre değiştirilerek farklı konfigürasyonlar oluşturulmuştur. İlk konfigürasyonda göreceli olarak daha geniş bir spektrum düşük detay seviyesinde taranmış olup 10-110° aralığında 2 derece/dak hızında ölçüm yapılmıştır. Daha detaylı ve rafine bir alanı kapsayan konfigürasyonlarda 30-50° ve 30-90° aralığı taranmış ve ölçümler 0,5derece/dak hızında gerçekleştirilmiştir. Faz analizi için kullanılan tüm XRD ölçümleri, numuneler ölçüm hatası oluşturmamak adına bakalitlerinden ayrıldıktan sonra, numunelerin XZ düzlemindeki (üretim yönü) kesitlerinin orta noktalarından alınmıştır (Şekil 3.3)

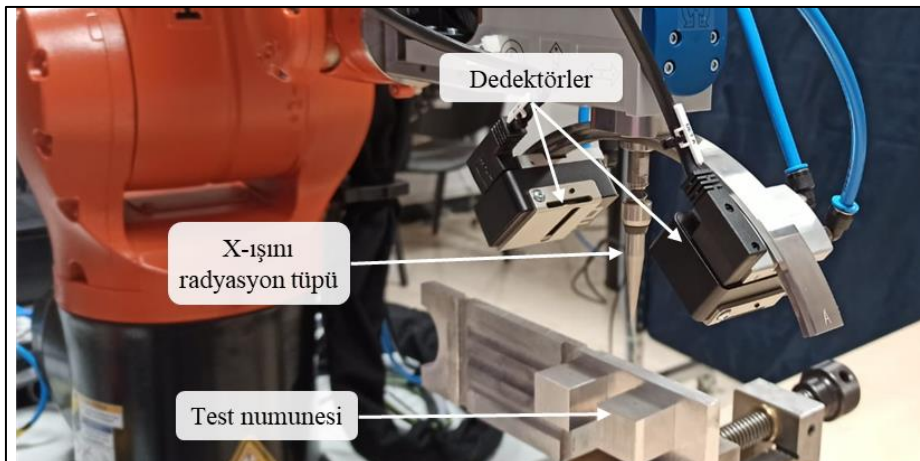


Şekil 3.3. XRD Delik delme metodu ile kalıntı gerilme ölçümü yapılmış numuneler (Krs)

Kalıntı gerilme ölçümlerinde delik delme ve XRD metotları kullanılmıştır. Her iki uygulamada da küp numune üzerinden üretim yönünde (XZ düzlemi) ve üretim yönüne dik (XY düzlemi) yönlerde kalıntı gerilmeler ölçülmüştür. Delik delme metodu ile yapılan ölçümler tahribatlı test grubunda olduğundan, kalıntı gerilme ölçümleri ilk olarak XRD metodu ile gerçekleştirilmiştir. XRD ile kalıntı gerilme ölçümünde Xstress Robot cihazı kullanılmıştır. 30 keV’luk Cu K α radyasyonu ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$) ile $2\theta=148^\circ$ ’de 0, 45 ve 90° olmak üzere 3 farklı azimut açısında ölçümler alınmıştır. Bragg’ın yasası (Denklem 1) uyarınca, bilinen parametreler olan ışın dalga boyu (λ) ve tepe noktası ölçülen kırınım açısı(2θ) ile atomik düzlemler arası mesafe(D)’nin değişimi hesaplanmaktadır. D- $\sin^2\psi$ grafiklerinden ve asal gerinimler ve gerilmeler hesaplanmıştır. XRD kalıntı gerilme test düzeneği Şekil 3.4’te gösterilmiştir.

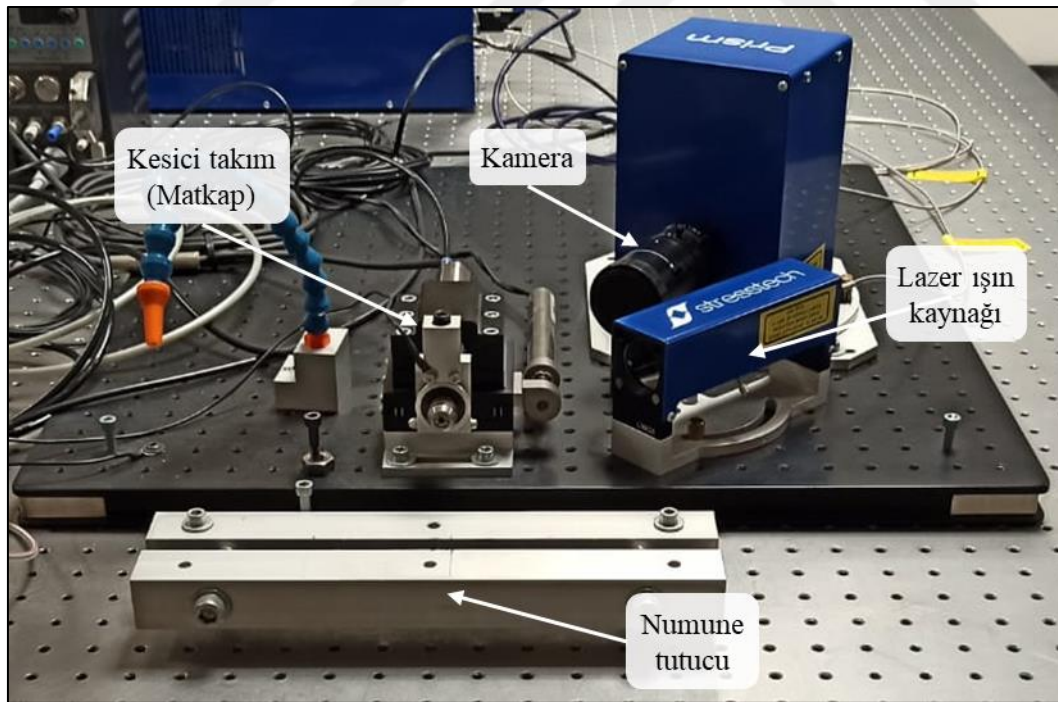
$$D = \lambda / 2 \sin \theta$$

1



Şekil 3.4. XRD kalıntı gerilme test düzeneği

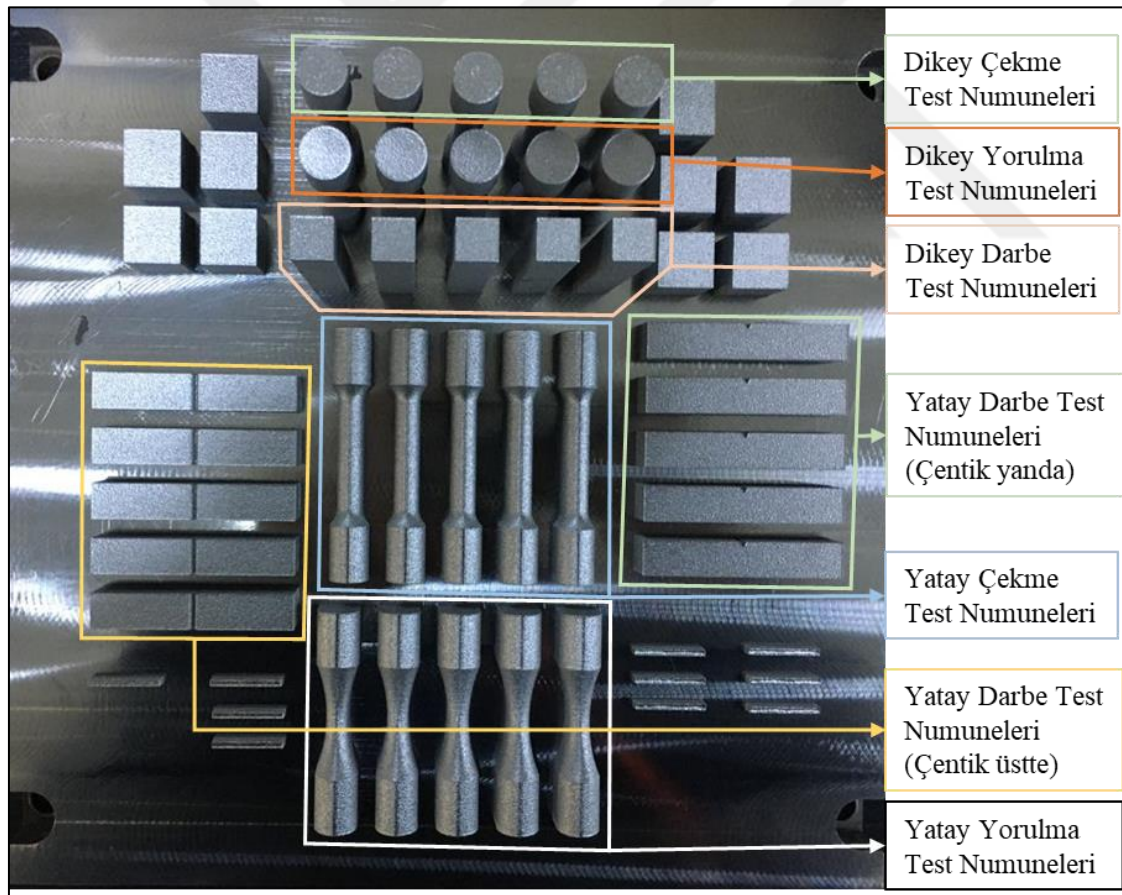
Kalıntı gerilme ölçümlerinde kullanılan bir diğer metot ise delik delme metodudur. Ölçümler, XRD metodu ile ölçüm yapılan yüzeylerin orta noktalarından, Stresstech ESPI (in.electronic speckle pattern interferometry) delik delme kalıntı gerilme ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Delik delme işleminden önce ışık yansımalarını minimize etmek amacıyla görüntüleme yapılacak numune yüzeyleri mat boya ile boyanarak ölçüm için hazırlanmıştır. Numunelerin ölçüm alınan yüzeyleri ve delik bölgeleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu ölçümlerde 1.587 mm çapında ve 1mm derinliğinde delikler delinmiş ve 0,05 mm derinlik aralıklarında 640x480 piksel genişliğinde bir alandan alınan görüntüleme ile kalıntı gerilmeler hesaplanmıştır. ESPI ile ölçüm metodunda, gerinim rozetleri kullanılan delik delme metodundan farklı olarak, gerinimler değil yer değiştirme miktarı ölçülmekte, gerilmeler gerinim hesaplanmaksızın yer değiştirme miktarı üzerinden integral metodu ile hesaplanmaktadır. Yer değiştirmeler alınan optik görüntülerdeki pikseller üzerinden ölçüldüğünden her bir ölçüm için kullanılan referans değerler her bir ölçüm adımında değiştirilerek hata yığılmasının önüne geçilmektedir. ESPI delik delme test düzeneği Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. ESPI delik delme kalıntı gerilme test düzeneği

Numune ve parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme testleri, yorulma testleri, çentik darbe testleri ve sertlik ölçümleri icra edilmiştir. Çekme testleri baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanmış test numuneleriyle,

evrensel test makinesi kullanılarak 0,06 mm/mm/s gerinim hızında gerçekleştirilmiştir. ASTM E8 standardı uyarınca gerçekleştirilen testlerde 5 adet dikey yönde (üretim yönü), 5 adet yatay (üretim yönüne dik) yönde üretilmiş silindirik test numunesi kullanılmıştır. Çentik darbe testleri için baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve gerilim giderme ısıtma işlemi uygulanmış, çentiğin üretim yönüne göre açısı dikkate alınarak 3 farklı yönelimde konumlandırılmış 15 adet numune üretilmiştir. Darbe testleri ASTM E23 standardına uygun olarak Charpy metoduyla Brooks sarkaçlı darbe test düzeneğinde yapılmıştır. Malzeme özelliklerinin detaylı olarak tanımlanması ve ilerdeki çalışmalarda kullanılmak üzere ASTM E466 standardına uygun olarak 5 adet dikey, 5 adet yatay yönde üretilmiş numuneler yorulma testine tabi tutulmuştur. Yorulma testleri Shimadzu EHF-LV020K2-020 cihazı kullanılarak $R=-1$ yükleme oranında tam tersinir olarak 40 Hz hızında yapılmıştır. Mekanik test numunelerinin üretiminin yapıldığı üretim tablasına ait görsel Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Mekanik test numunelerinin üretim tablası üzerindeki konumlandırılmaları



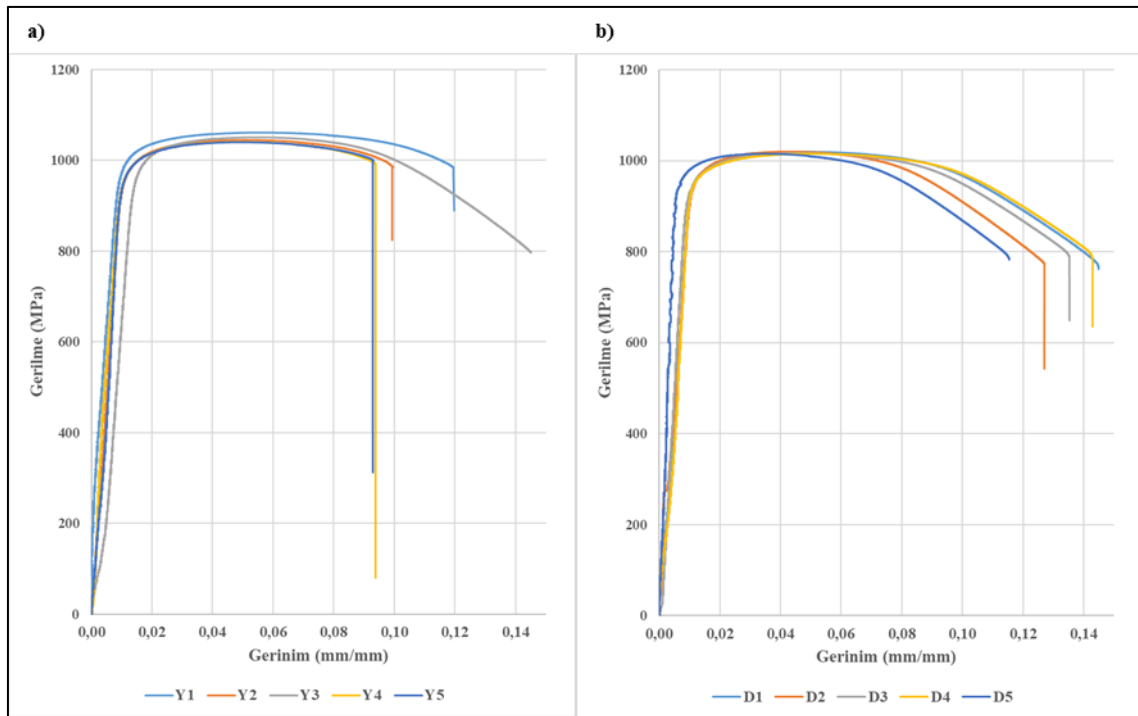
4. ÇIKTILAR VE TARTIŞMA

4.1. Mekanik Testler

Parça mekanik özelliklerinin tayini amacıyla ilgili standartlara göre çekme testleri, darbe testleri, sertlik ölçümleri ve yorulma testleri yapılmıştır. Tüm mekanik testler SLE prosesi ile üretilen malzemelerde karşılaşılan anizotropik özellikler sebebiyle üretim yönüne dik ve paralel olacak şekilde 5'er adet numune ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında malzeme mekanik özelliklerinin tespit edilmesinin sebebi, kullanılan malzemenin literatür verileriyle ve üreticiden sağlanan verilerle uyumluluğun kontrol edilerek diğer metalurjik özelliklerin karşılaştırılabilmesini ve doğru yorumlanabilmesini sağlamaktır. Bu sebepten tüm mekanik testler gerilim giderme ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve numuneler ilgili ASTM test standartlarına göre hazırlanmıştır.

4.2. Çekme testleri

Çekme testleriyle malzemenin akma ve çekme gerilme değerleri belirlenmiştir. Numunelerin gerilme-gerinim grafikleri Şekil 4.1'de görülmektedir. Numune bazında çekme ve akma gerilme değerleri ise Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme testlerine ait gerilme/gerinim grafikleri, a)Yatay yönde, b)Dikey yönde üretilmiş numuneler

Çizelge 4.1. Test numunelerinin üretim yönüne göre çekme mukavemetleri.

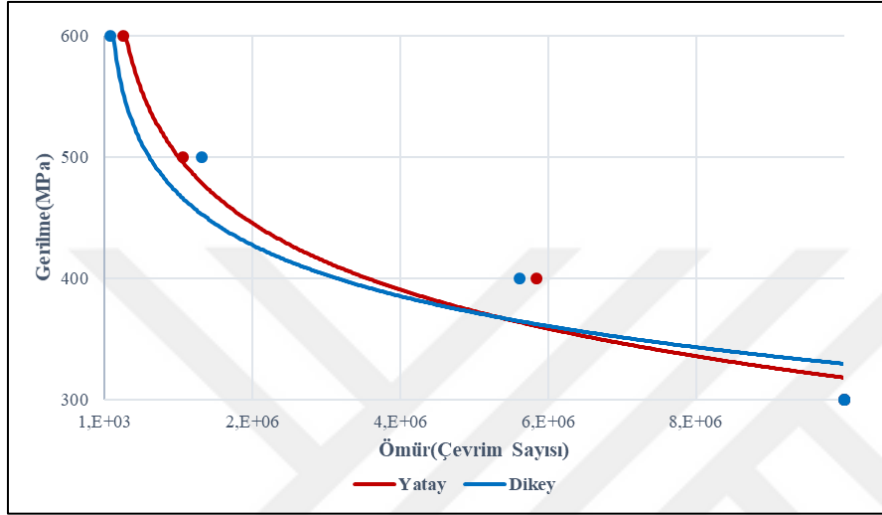
Numune Adı	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
Yatay 1	1061,05	1047,25
Yatay 2	1044,56	
Yatay 3	1050,53	
Yatay 4	1040,26	
Yatay 5	1039,84	
Dikey 1	1019,39	1017,32
Dikey 2	1019,99	
Dikey 3	1016,83	
Dikey 4	1015,21	
Dikey 5	1015,15	

Test sonuçları incelendiğinde, yatay yönde üretilmiş olan test numunelerinin, dikey üretilenlere göre daha yüksek çekme mukavemetine sahip oldukları görülmüştür. Buna ek olarak Şekil 4.1 incelendiğinde, dikey yönde üretilen numunelerin göreceli olarak daha düşük gerinim değerlerinde akmaya uğradıkları görülmüş ve daha kırılkan özellik gösterdikleri çıkarımı yapılmıştır. Ancak çekme testleri yapılan numuneler, test öncesinde gerilim giderme ısıtma işlemine tabi tutuldukları için benzer mekanik özelliklere sahiptir. Isıtma işlemi uygulanmış SLE Ti-6Al-4V parçalarda yönelime bağlı mekanik özellik farkının azaldığı literatürden bilinmektedir (Mierzejewska, 2019). Yine güncel çalışmalar göstermiştir ki; ısıtma işlemi görmemiş parçalar her iki üretim yönünde de daha kırılkan davranışta, daha yüksek akma ve çekme mukavemetinde mekanik özelliklere sahip olmaktadır (Mower, 2016) (Becker, 2018) (Thöne, 2012). Isıtma işlemi uygulanan ve uygulanmayan numunelerin mikroyapısı ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenmiş olup, ısıtma işlemi görmemiş malzemenin mikroyapısının ince ve sütunsu yapıda olmasının, malzemenin daha mukavim olmasını sağladığı görülmüştür.

4.2.1. Yorulma testleri

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen yorulma testleri hem ilgili standart isteri sebebiyle hem de yüzey özelliklerinin etkisinin giderilmesi amacıyla işlenmiş yüzeyli numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yorulma yükleme profilinin de eğilme yerine eksenel yükleme olarak seçilmesinin sebebi de maksimum gerilmelerin yüzeyde oluşmasını engelleyerek yüzey pürüzlülüğünün etkisini minimize etmektir. Yorulma testlerinde kullanılan yükler, test kesitinde 600, 500, 400 ve 300 MPa gerilmeleri oluşturacak şekilde

belirlenmiştir. 300 MPa gerilme değerinde 10^7 çevrime ulaşarak test sonlandırılmış, sonsuz ömür gerilme değerinin güvenilirliğinin artırılması amacıyla her iki yönde üretilen birer numune daha 300MPa gerilmede test edilerek 10^7 çevrime ulaşılmıştır. Yorulma test sonuçlarından elde edilen S-N grafikleri Şekil 4.2’de ve gerilmelere karşılık gelen yorulma ömürleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Yorulma testlerinden elde edilen üretim yönüne bağlı S-N grafikleri

Çizelge 4.2. Gerilmelere karşılık gelen yorulma ömür sınırları

Numune Adı	Gerilme (MPa)	Yorulma Ömür Dayanım Sınırı
Yatay 1	600	255029
Yatay 2	500	1066223
Yatay 3	400	5843216
Yatay 4	300	10000000
Yatay 5	300	10000000
Dikey 1	600	79157
Dikey 2	500	1312223
Dikey 3	400	5618465
Dikey 4	300	10000000
Dikey 5	300	10000000

Yorulma testleri neticesinde, yatay ve dikey yönde üretilen numunelerin birbirine çok yakın gerilme-ömür eğrileri oluşturduğu görülmüştür. Yüzey özelliklerinin birbirine eş olması ve ısıtıl işlem sonrası malzeme iç yapısının birbirine yakınsaması dolayısıyla sonuçların benzer çıkması beklenen bir durumdur (Mower, 2016). Malzeme yorulma davranışının; üretim yönüne, ısıtıl işlem parametrelerine ve numune yüzey özelliklerine göre kendi içerisinde çok

geniş bir kapsamda incelenmesi gereken bir konu olduğu düşünülmektedir. Hem testlerin güvenilirliğini artırmak hem de farklı parametrelerin etkilerini inceleyebilmek adına çalışma kapsamında gerçekleştirilen test miktarından çok daha fazla sayıda yorulma testi icra edilmelidir. Çalışma kapsamında yapılan yorulma testleri temel olarak, kullanılan malzemenin yorulma özelliklerinin literatür verileriyle doğrulanması amacıyla yapılmış olup gelecek çalışmalara ışık tutacak ön bilgiler içermektedir.

4.2.2. Çentik darbe testleri

Çalışmada kullanılan malzemenin üretim yönüne göre enerji sönümleme kabiliyeti çentik darbe testleriyle ölçülmüştür. Çentik darbe testleri doğrudan mühendislik hesaplarında kullanılmadığından, malzeme özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Gerilme yığılması oluşturması amacıyla kullanılan çentik geometrisi sonradan değil, üretim esnasında oluşturulmuştur. Çentiğin üretim yönüne göre konumlanmasına göre 3 farklı tipte numune üretilerek testler gerçekleştirilmiştir. Yatay yönde, çentik yanda ve üstte olacak şekilde 2 tip numune üretilirken, dikey yönde çentiğin üretim yönüne dik olarak olduğu tek tip numune üretilmiştir. Üretim yönlerine göre test sonuçları Çizelge 4.3'te numune bazında verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çentik darbe test sonuçları

Numune Tipi	Numune Adı	Enerji Sönümleme Miktarı (J)	Ortalama Enerji Sönümleme Miktarı (J)
Yatay (Çentik üstte)	ÇD1	34	33,4
	ÇD2	36	
	ÇD3	31	
	ÇD4	30,8	
	ÇD5	35	
Yatay (Çentik yanda)	ÇD6	33,8	34,0
	ÇD7	34	
	ÇD8	38	
	ÇD9	34,2	
	ÇD10	29,8	
Dikey	ÇD11	50	31,0
	ÇD12	37,8	
	ÇD13	17	
	ÇD14	19	
	ÇD15	-	

Test sonuçları incelendiğinde, yatay yöndeki numunelerin dikey numunelere göre daha fazla enerji sönümlendiği ve kendi içerisinde daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Dikey yönde bu özelliğin gerilemesinin sebebinin çekicinin vurma yönü ile katmanlar arası çatlak ilerleme yönünün örtüşmesi olduğu düşünülmektedir. Dikey yöndeki sonuçların daha yüksek miktarda sapmaya sahip olmasının sebebi ise dikey yönde oluşturulan çentiklerde zorunlu olarak kullanılan destek yapıların kaldırılması esnasında, çentik geometrisinde bozulmaların meydana gelmiş olabileceğidir.

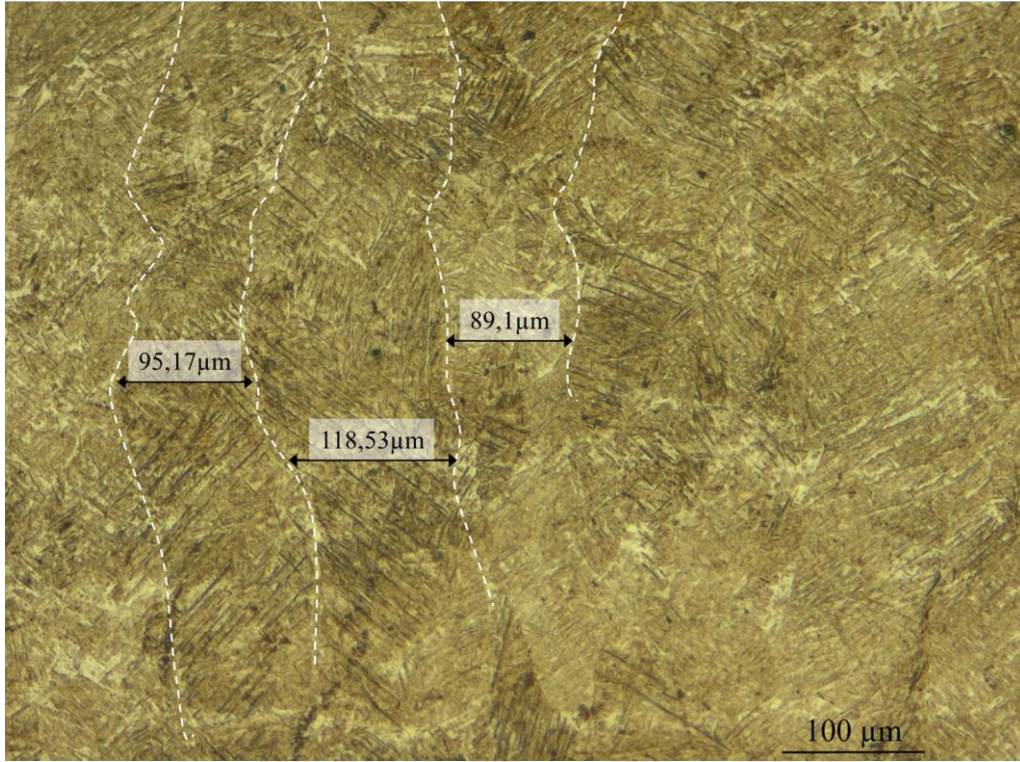
4.3. Metalurjik Ölçümler

Bu bölümde malzeme metalurjik özelliklerinin tayini amacıyla gerçekleştirilmiş olan optik mikroskop ve SEM ile mikroyapı ölçümlerine, X-Işını kırınımı ile faz dağılımı analizlerine, ısı kalıntı gerilmelerin tespiti amacıyla yapılan XRD ve delik delme metotlarına ait ölçüm sonuçları paylaşılmış ve yorumlanmıştır.

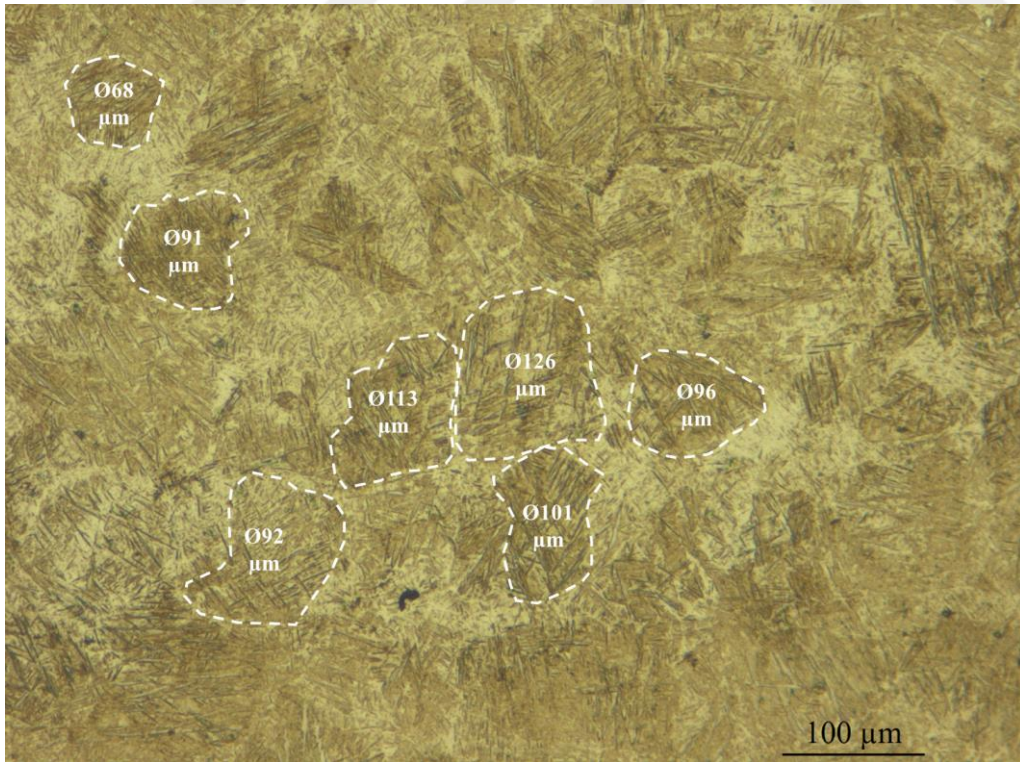
4.3.1. Mikroyapı ölçümleri

Malzeme mikroyapı özelliklerinin görülmesi amacıyla optik ve taramalı elektron mikroskopu ile görüntülemeler yapılmıştır. Mikroyapı görüntülerinin nicel özellik taşıyabilmesi amacıyla, SLE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımına ait ölçümü yapılacak mikroyapı unsurları belirlenmelidir. SLE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısının α' ve β fazlarından oluştuğu literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir. Buna bağlı olarak da Ti-6Al-4V alaşımının mukavemetlendirme mekanizmasında en çok etkisi olan mikroyapı unsurlarının α' fazının kalınlığı ve uzunluğu, β sınırlarının genişliği ve α' fazının koloni boyutları olarak belirlenmiştir (Yang, 2016).

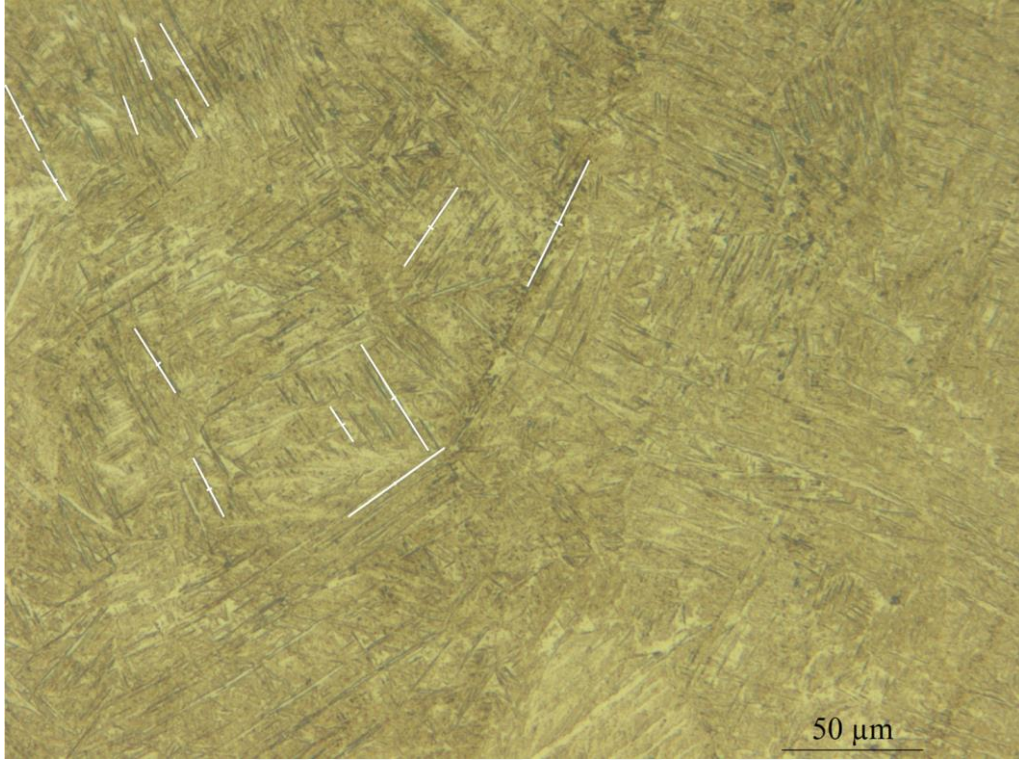
Baz parametreler ile üretimi yapılan küp numunelerin üretim yönüne dik(XZ düzlemi) ve üretim yönüne paralel(XY düzlemi) yönlerinden alınan optik mikroyapı görüntüleri ve nicel mikroyapı unsurlarının boyutları Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinin 2 farklı yönden alınmasının sebebi, tarama yollarının katmanlar arasında döndürülmesinden kaynaklı olarak üretim yönüne dik her iki düzlemde(XZ, YZ) de aynı metalurjik özelliklerin beklenmesidir.



Şekil 4.3. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.4. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş numuneye ait XY düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)

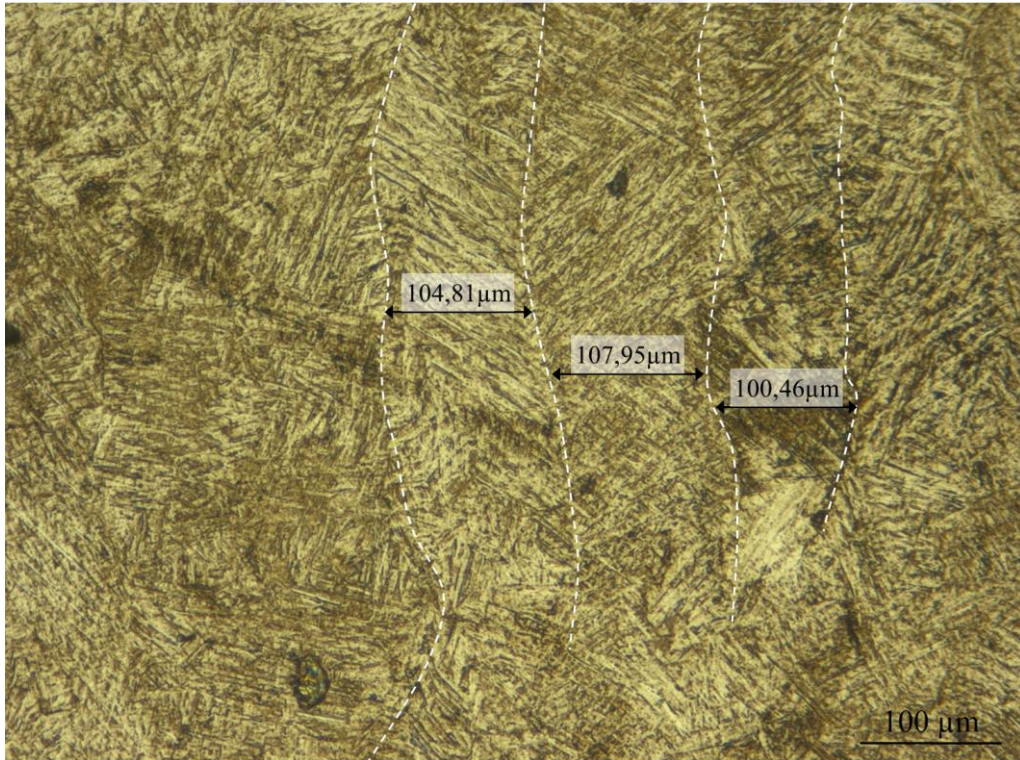


Şekil 4.5. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (200X)

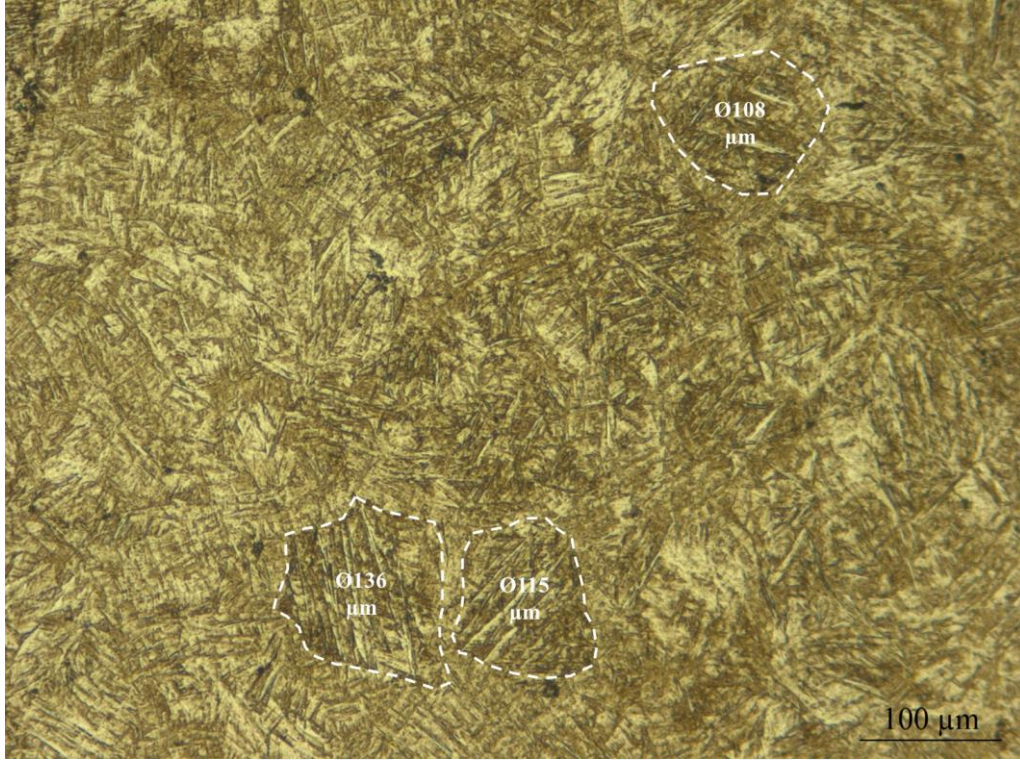
Baz üretim parametreleriyle üretilen ve ısııl ardıl işlem uygulanmamış olan numunelerin mikroyapıları incelendiğinde, SLM metodu ile yapılan üretimlerde beklendiği üzere malzeme mikroyapısı yönelime bağlı farklılıklar göstermektedir. Üretim yönüne paralel olan XZ düzleminde görüldüğü üzere öncül β taneleri üretim yönüne paralel olarak katmanlar boyunca sütunlar şeklinde uzanmaktadır. Yapının genelinde iğnemsî yapıdaki martenzitik α' kolonileri görülmektedir. Nicel ölçümleri yapılan mikroyapı unsurları, malzeme mekanik özelliklerine etkisinin daha fazla olduğu kabul edilen öncül β tanelerinin kalınlıkları, martenzitik α' tanelerine ait kalınlık ve uzunluk ölçüleri, α' kolonilerinin boyutlarıdır (Yang, 2016). β tanelerinin boyutları belirlenirken tane sınırları boyunca üretim yönüne dik yönde alınan ölçümlerin ortalaması alınmış, α' koloni boyutları ise koloni alanına eşit alandaki dairenin çap ölçüsü cinsinden verilmiştir. İğnemsî α' tanelerine ait uzunluk ve kalınlıklar da 200X büyütülmüş görüntüler üzerinden ortalama 30 adet unsurun ölçülmesiyle elde edilmiştir. Ortalama öncül β tane kalınlığı $100\mu\text{m}$, α' kolonilerinin ortalama boyutu $98\mu\text{m}$, ortalama α' uzunluğu $32,8\mu\text{m}$, α' kalınlığı $1,37\mu\text{m}$ olarak ölçülmüş ve α' tanelerinin ortalama en/boy oranı 23,9 olarak hesaplanmıştır.

Buna ek olarak, SLE metodunun getirdiği mikroyapısal özelliklerin ayırt edilebilmesi amacıyla aynı üretim parametreleriyle üretilmiş bir diğer numuneye ısııl işlem uygulanmış

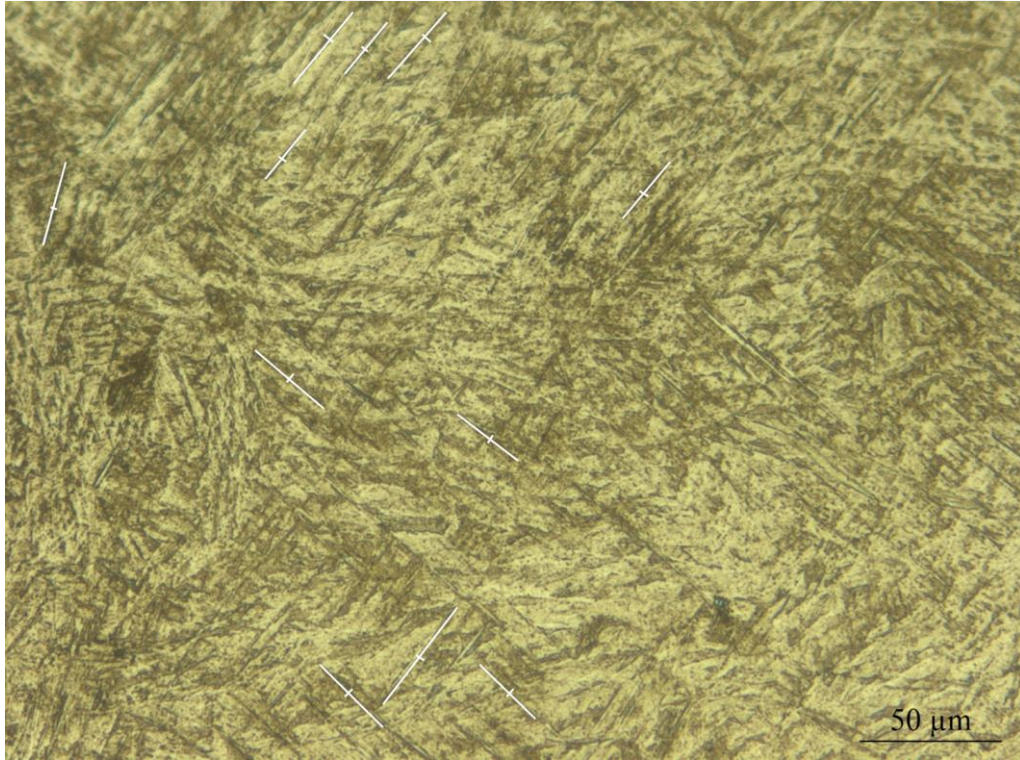
ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Gerilim giderme ısıtıl işlemine tabi tutulmuş numunenin XZ ve XY düzlemlerinden alınan optik mikroskop görüntülerine Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de yer verilmiştir. Isıl işlem sıcaklığı, Ti-6Al-4V malzemesine ait β dönüşüm sıcaklığı olan $\sim 950^{\circ}\text{C}$ ’nin altında, 800°C olarak belirlendiğinden, malzeme iç yapısındaki öncül β tanelerinin formunda eklemeli imalata özgü sütunsu yapıdan uzaklaşma görülmemiştir. Malzeme iç yapısındaki değişiklik; öncül β tane kalınlıklarının az miktarda artması, α' tanelerinin uzunluklarının azalarak artması ve buna bağlı olarak en boy oranının düşmesi olarak gözlenmiştir. Ortalama α' uzunluğu $25,1\mu\text{m}$, kalınlığı $2,49\mu\text{m}$, en/boy oranı 11,4 ortalama öncül β tane genişliği $105\mu\text{m}$ ve ortalama α' koloni boyutu $120\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.6. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmış numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)



Şekil 4.7. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve ısıt işlem uygulanmış numuneye ait XY düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (100X)



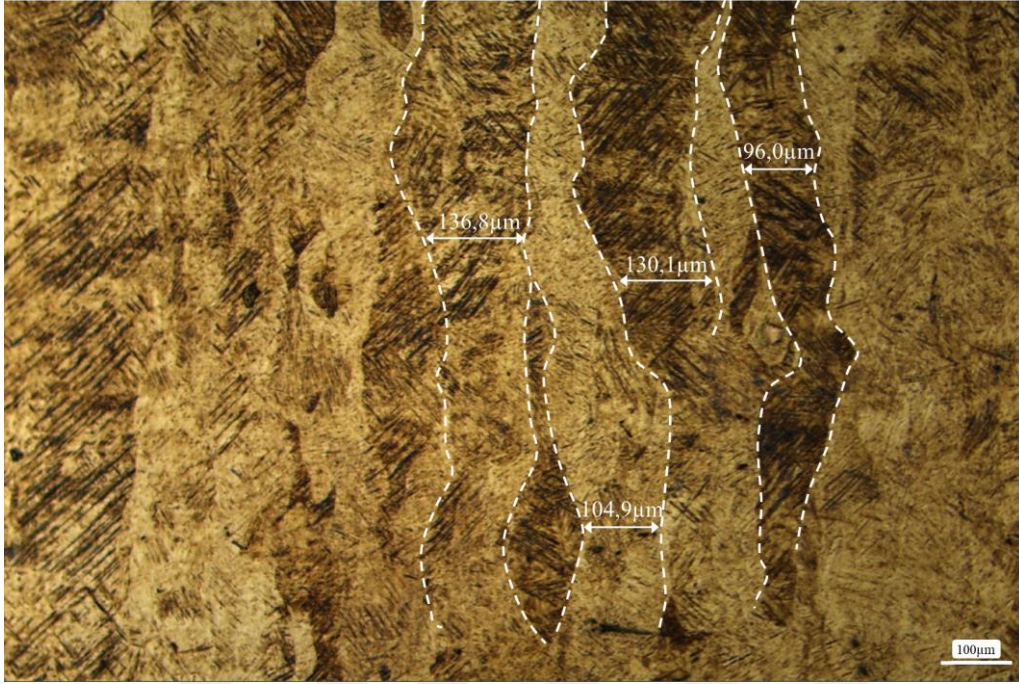
Şekil 4.8. Baz üretim parametreleriyle üretilmiş ve ısıt işlem uygulanmış numuneye ait XZ düzlemindeki mikroyapı görüntüsü (200X)

Üretim esnasında oluşan termal kalıntı gerilmeler ile malzeme mikroyapısı arasında ilişki kurulması amaçlandığından, Krs numunesi üzerindeki mikroyapı incelemeleri, kalıntı gerilme ölçümü yapılan koordinatlara yakın bölgelerde (ilgili yüzeyin merkezi) gerçekleştirilmiştir. Krs numunesi üzerinden üretim yönüne dik(XZ düzlemi) ve üretim yönüne paralel(XY düzlemi) yönlerden alınan optik mikroyapı görüntüleri, üretim yönlerine göre sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.

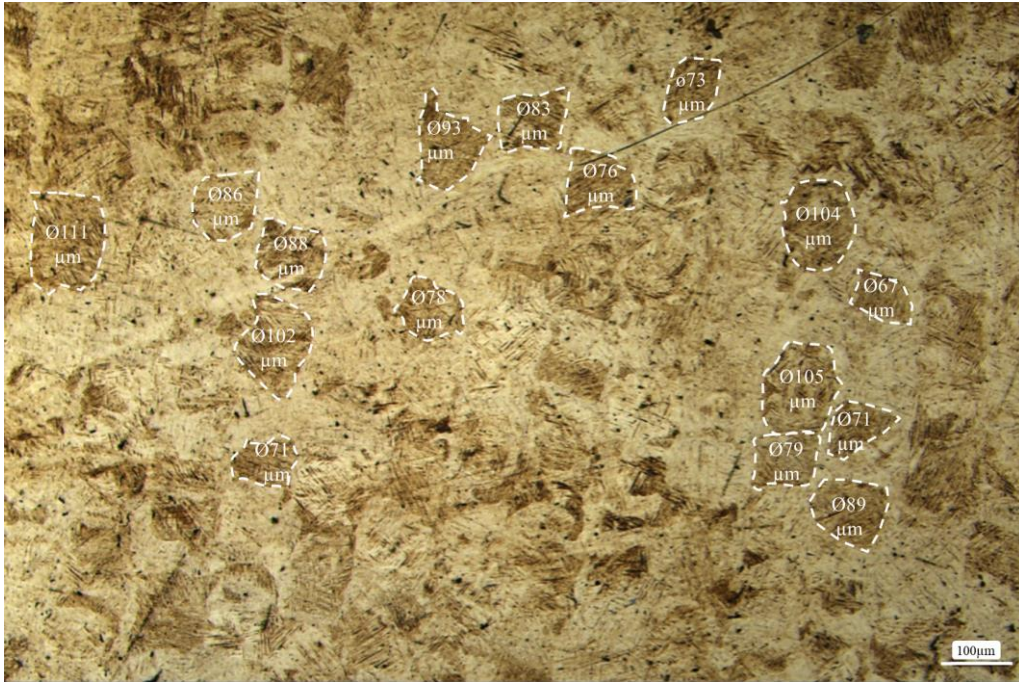
Isıl ardıl işlem uygulanmamış küp numuneye ait mikroyapıyla uyumlu olarak Krs numunesinin mikroyapısı da üretim yönüne paralel olarak uzamış taneler şeklinde gözlenmiştir. Mikroyapı görüntülerinden alınan nicel ölçümlere göre ortalama α' uzunluğu 29,7 μm , kalınlığı 1,9 μm , en/boy oranı 15,8 ortalama öncül β tane genişliği 119,2 μm ve ortalama α' koloni boyutu 86,3 μm olarak ölçülmüştür. Krs ve K2(ısıtıl işlemsiz küp) numunelerinin aynı üretim parametreleriyle üretilip hiç bir ardıl işleme tabi tutulmamalarına rağmen, Krs numunesindeki öncül β tane genişliğinin daha yüksek olması, α' fazının en/boy oranının daha düşük olmasının sebebinin numune boyutundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha büyük boyuttaki Krs numunesinin üretimi esnasında hacimsel ısı girdisi daha fazla olduğundan parça içerisinde ısı birikimi daha fazla olmakta ve parça daha yavaş soğumaktadır. Soğuma hızının görece daha düşük olması da malzeme içerisindeki iğnemsî yapıların kısalıp kalınlaşmasına ve öncül β tanelerinin genişlemesine sebep olmaktadır. Mikroyapıları incelenen numunelere ait nicel ölçüm sonuçları, karşılaştırma kolaylığı için tablolastırılarak Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Mikroyapı unsurlarına ait nicel ölçümler

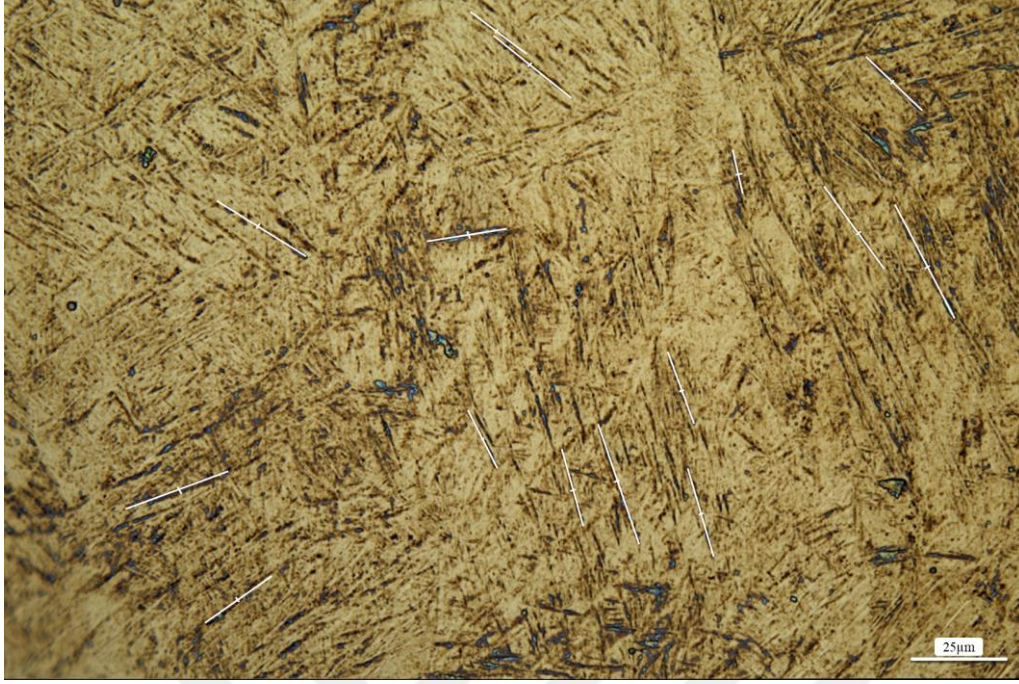
	α' tane uzunluğu, L (μm)	α' tane kalınlığı, t (μm)	α' en/boy oranı, L/t	α' koloni boyutu, $\varnothing$ (μm)	öncül β tane genişliği (μm)
K1 (Eİ+ısıtıl işlem)	25,1	2,49	11,4	120	105
K2 (Eİ)	32,8	1,37	23,9	98	100
Krs (Eİ)	29,7	1,9	15,8	86,3	119,2



Şekil 4.9. Krs numunesine ait XZ düzleminde alınmış mikroyapı görüntüsü (100X)



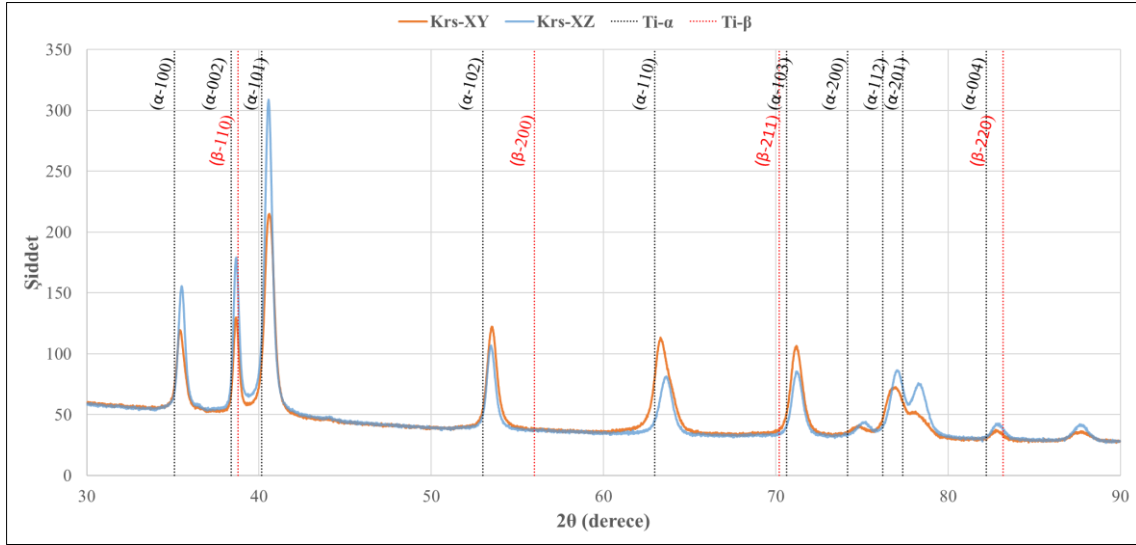
Şekil 4.10. Krs numunesine ait XY düzleminde alınmış mikroyapı görüntüsü (100X)



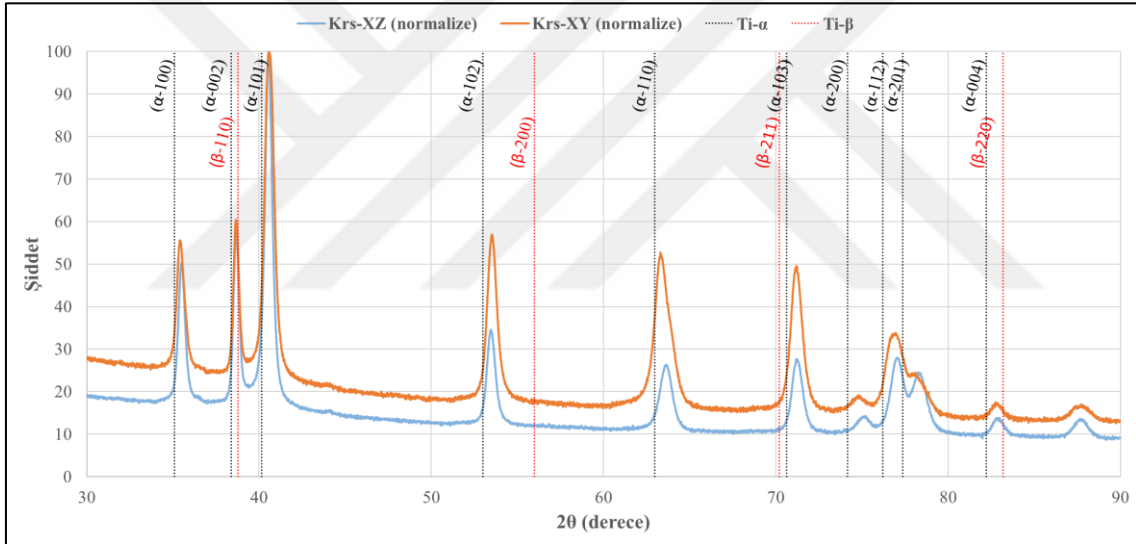
Şekil 4.11. Krs numunesine ait XY düzleminde alınmış mikroyapı görüntüsü (200X)

4.3.2. XRD faz analizleri

Çalışma kapsamında kullanılan malzemenin faz dağılımının incelenmesi ve üretim yönlerine göre oluşan mikroyapı özellikleriyle ilişkilendirilmesi amacıyla XRD metodu ile kristalografik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kalıntı gerilme ölçümlerinin yapıldığı Krs numunesi üzerinden alınan XRD saçınım grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir. XRD ölçümlerinde yansıma şiddeti ihtiyari birim (in. Arbitrary unit) olarak ifade edildiğinden bu şiddet değerlerinin normalize edilerek yorumlanması ve karşılaştırılması daha doğrudur. Bu amaçla 100 birim üzerinden yapılan normalizasyonla ölçüm sonuçlarının birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır ve maksimum tepe noktasına göre normalize edilmiş olan grafikler Şekil 4.13’te verilmiştir.



Şekil 4.12. Krs numunesine ait ham XRD ölçüm verileri



Şekil 4.13. Krs numunesine ait normalize edilmiş XRD ölçüm verileri

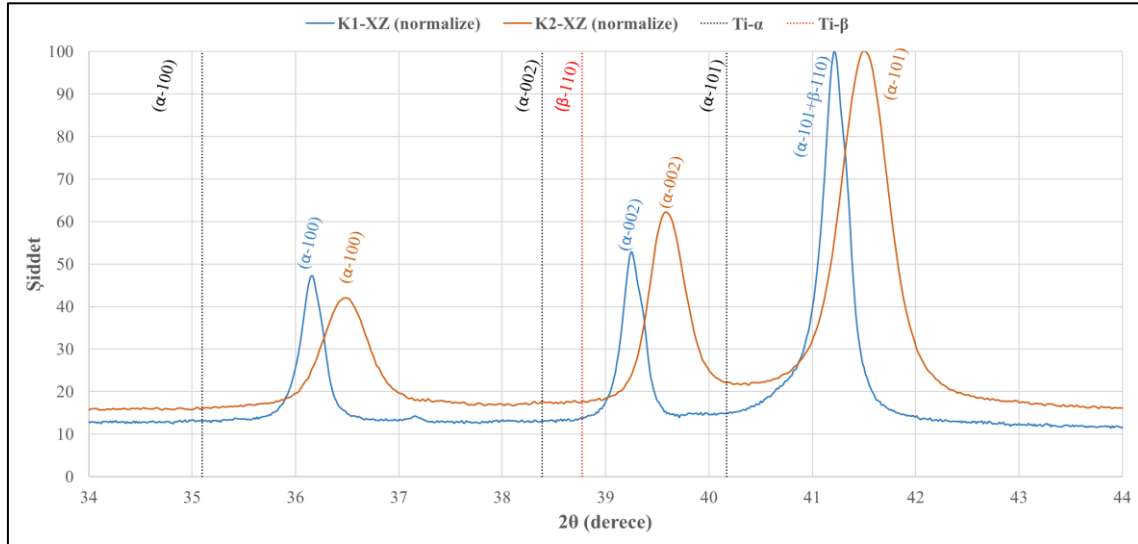
Krs numuneleri üzerinde, üretim yönüne bağlı olarak yapılan XRD analizlerinden elde edilen kırınım desenlerinde, tepe noktalarının bulunduğu 2θ açısı değerleri α fazına ait (100), (002) ve (101) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Ti-6Al-4V, haddelenmiş formda α ve β fazlarını bir arada bulunduran bir alaşım olmasına karşın, SLE prosesinde sıvı fazdan oda sıcaklığına soğuma süresinin çok kısa olmasından dolayı β fazı öncül olarak oluşabilmekte, yapı martenzitik α' fazı dominant bir şekilde oluşmaktadır.

Krs numunesinin XZ düzleminde alınan ölçüm sonuçlarında yalnızca, X ekseninde sağa doğru kaymış (θ değeri artmış) bir şekilde, α fazına ait tepe noktaları görüldüğünden, literatürü (Wang, 2016) doğrulayacak şekilde α' ve α fazının kristal yapısının birbirine çok

yakın olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Tepe noktalarının açı değerlerinin eksenin sağına doğru kaymış olmasının sebebinin yapıdaki α' fazının yoğunluğu olduğu, ısıtılmalı numune üzerinden alınan sonuçlarla da doğrulanmaktadır. Şöyle ki; mikroyapı görüntülerinden de ölçüldüğü gibi martenzitik α' yapısının kalınlığının artarak uzunluklarının azaldığı, α fazına dönüşmeye başladığı bilinmektedir. Bu yargının XRD sonuçlarındaki karşılığı ise ısıtılmalı işlem sonrasında, tepe noktalarının açı değerlerinin ısıtılmalı işlemsiz numuneye göre, 2θ ekseninin soluna doğru kaydığı ancak yine de standart α fazının kristal yapısına karşılık gelen açılara ulaşamadığı olarak bulunmuştur. XRD ölçümlerinin temelini oluşturan Bragg Yasası'na (Denklem 2) göre, 2θ açılarının düşmesi, λ dalga boyunun sabit olduğu düşünüldüğünde, d kristal düzlemleri arasındaki mesafenin artması gerekmektedir. Isıl işlem prosesinde malzemeye ısı girdisinin olması ve malzemenin eklemeli imalat prosesine göre çok daha yavaş soğuması bu mesafenin artmış olacağı kabulüyle uyumludur. Standart α fazının tepe açılarını göstererek, ısıtılmalı ve ısıtılmalı işlemsiz numuneye ait tepe noktalarının 2θ açı karşılıklarını kıyaslayan grafik Şekil 4.14'te verilmiştir.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

2

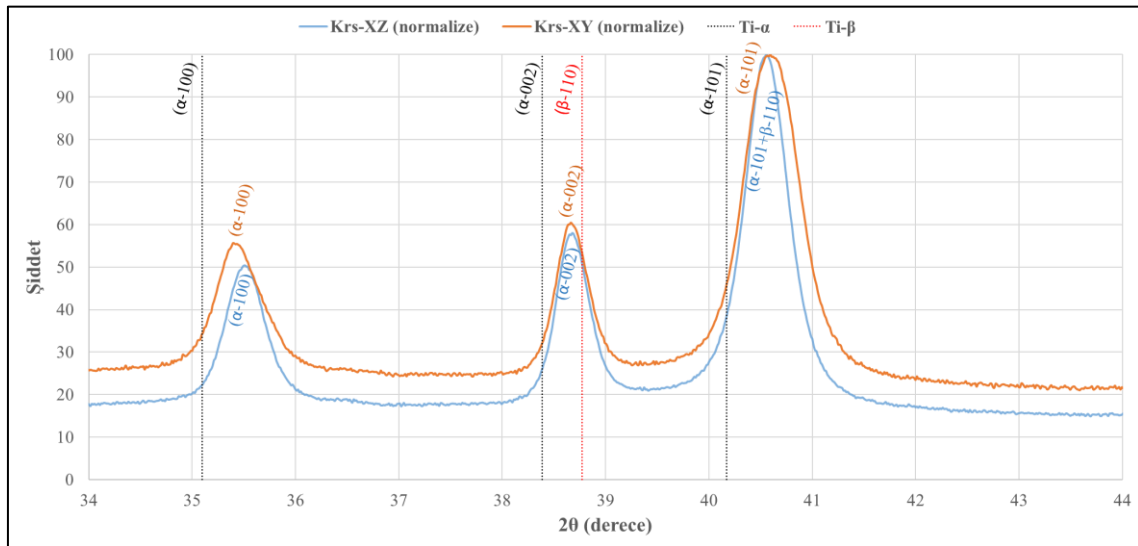


Şekil 4.14. Isıl işlem uygulanmış (K1) ve uygulanmamış (K2) numuneye ait XRD tepe noktaları ve Ti- α ve Ti- β fazına ait kristal yapı verileri

XRD ölçüm sonuçlarından elde edilen tepe noktalarının α' fazına ait olduğu bulunmakla birlikte, XZ düzleminden alınmış olan XRD ölçüm sonuçlarındaki 3. tepe noktasının aynı zamanda az miktardaki β fazının (110) düzleminden gelen yansımaları da içinde

bulundurduğu düşünülmektedir. Bunun sebebi, yönelime bağlı olarak alınan saçının yoğunluklarının (α -002) ve (α -101) düzlemlerindeki şiddetlerinin normalize edilerek karşılaştırıldıklarında oransal olarak birbirinden farklı sonuç vermeleridir. Şöyle ki; K1 ve K2 numunesinin 2. ile 3. tepe noktalarının yoğunluklarının oranları incelendiğinde, tepe noktaları 2-3 arasındaki oran ısıtıl işlem öncesi %62 iken ısıtıl işlem sonrası %55'e düşmüştür. Ölçümler arasında malzeme miktarı değişmediğinden, 2. tepe noktasındaki (α -002) yoğunluğunun oransal olarak düşmesi, 3. tepe noktasındaki (α -101) yoğunluğunun da azalarak, (β -110) yoğunluğunun arttığına işaret etmektedir.

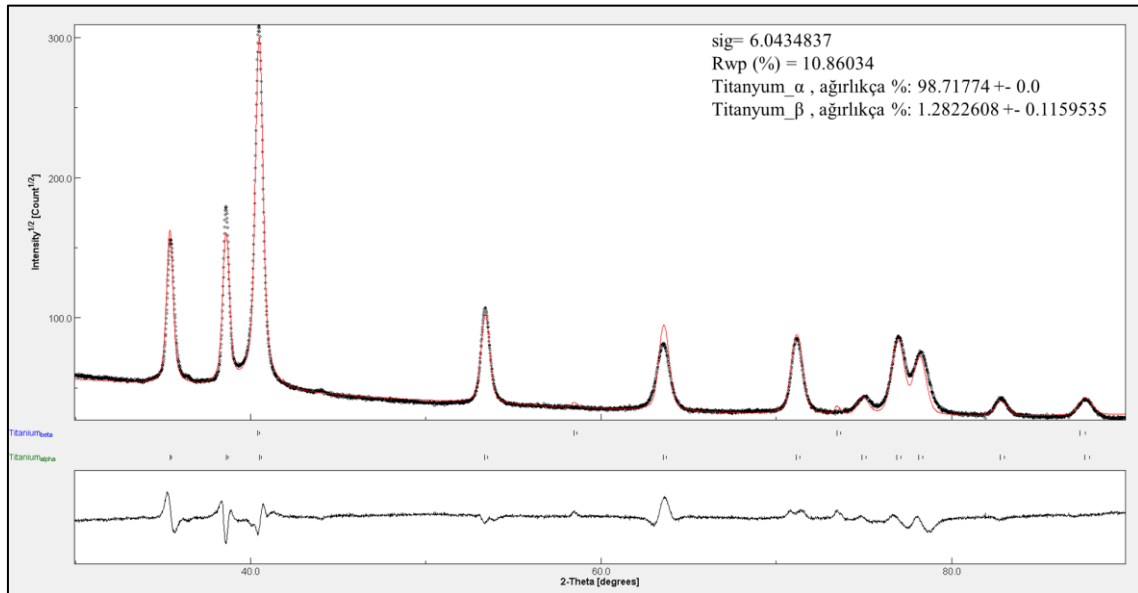
Krs numunesinin XY ve XZ düzleminde alınan ölçümlerdeki yoğunluğu en yüksek tepe noktaları karşılaştırıldığında (Şekil 4.15), XZ düzleminde alınan ölçümlerde yine 3. tepe noktasının çok az miktardaki öncül β fazını içerisinde bulundurduğu düşünülmektedir. Bunu kanıtlayacak şekilde; 1. ve 3. tepe noktalarının oranları XY yönünde %60 iken XZ yönünde %55, 2. ve 3. tepe noktalarının oranları ise XY yönünde %55 iken XZ yönünde %50 olarak ölçülmüştür. Aynı malzemeden alınan ölçümlerde bu oranların yönelime bağlı olarak farklılaşmasının sebebi, eklemeli imalat prosesindeki hızlı soğuma fenomeninin bir sonucu olan, tanelerin soğuma yönünde büyüyerek malzeme mikroyapısında yönelim (in.Texture) oluşturmalarıdır. Mikroyapıdaki bu yönelim önceki başlık altında, mikroskopik görüntülerle de kanıtlanmıştır.



Şekil 4.15. Krs numunesinin XY ve XZ düzleminde alınan XRD ölçümlerinin karşılaştırılması

XRD analizlerinden alınan saçınım grafikleri üzerinde Rietveld analizleri yapılarak malzeme içerisindeki faz dağılımının nicel bir şekilde yüzdesel olarak belirlenmesine

çalışılmıştır. Belirtilen analizlerde, rafine etme işleminden önce yapılması gereken bazı kabuller ve varsayımlar mevcuttur. Öncelikle deneysel bozulmaların göz önünde bulundurulabilmesi için ölçüm yapılan cihaza ait parametreler test merkezinden alınarak analiz yazılımına işlenmiştir ve daha sonra tekil kristal yapıdaki Silisyum kalibrasyon numunesi ile ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları literatürden alınan Silisyum kristal yapı verileriyle analiz edilerek çalışmada kullanılan Ti-6Al-4V malzemenin analizlerindeki deney düzeneğinden kaynaklı hatalar asgari boyuta indirilmeye çalışılmıştır. Bu kalibrasyon işleminin, LaB6 olarak bilinen Lantan heksaborür malzemesi ile yapılması önerilmektedir ancak çalışma kapsamında bu malzemenin elde edilememiş olması sebebiyle Silisyum kullanılmıştır. Analizlerde yapılan diğer kabuller ise malzemelerin yalnızca Ti- α ve Ti- β fazları bulundurduğu ve bu fazlara ait literatürden alınan birim hücre parametreleridir. Gerçekleştirilen Rietveld analizlerinde her iki yöndeki ölçüm sonuçları için aynı varsayımlar ve kabuller yapılmıştır. Krs numunesinin XZ düzleminden alınan ölçümler üzerinde yapılan analizlerde malzeme içerisinde %98,7 oranında α , %1,3 oranında β fazının bulunduğu sonucu elde edilmiştir (Şekil 4.16). XY yönündeki analizlerin rafine edilmesi sonucunda ise yapıda β fazının yüzdesel dağılımı hesaplanamamış, tüm yapıyı α fazının oluşturduğu görülmüştür. Bu sonuçlar mikroyapı incelemelerinde görülen β tanelerinin α koloni sınırlarında üretim yönüne paralel olarak büyümesi ve yönelim(in.Texture) oluşturmasıyla da uyumludur.



Şekil 4.16. Krs numunesinin XZ düzleminden alınmış XRD ölçümüne ait Rietveld analizi sonuçları

4.4. Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Çalışma kapsamında malzeme içerisinde oluşan kalıntı gerilmeler malzeme üretim yönüne ve ölçüm metoduna göre incelenmiştir. Krs numunesi üzerinden XY ve XZ düzlemlerine dik olarak XRD ve delik delme metotlarıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Malzeme içerisindeki kalıntı gerilme miktarları ve oluşma şekilleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş, üretim metodundan kaynaklı soğuma fenomenleriyle ve önceki bölümlerde elde edilen mikroyapı özellikleriyle ilişkilendirmeleri yapılmıştır.

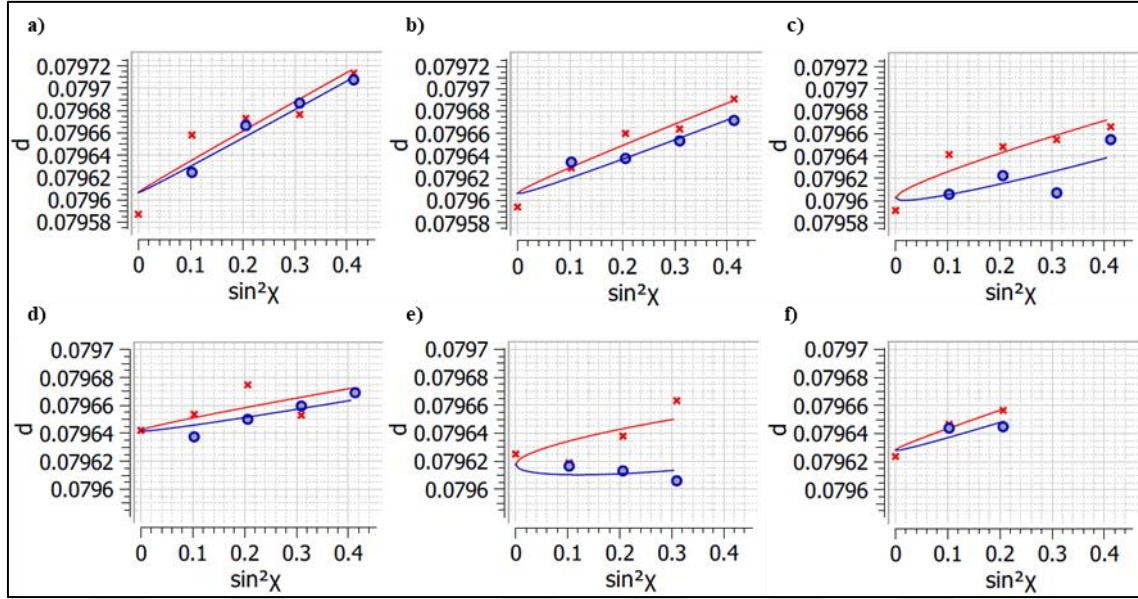
4.4.1. XRD ile kalıntı gerilme ölçümleri

Kalıntı gerilme ölçümlerinde, ilk olarak hasarsız ölçüm metotlarından olan XRD metodu kullanılmıştır. Numunenin XY ve XZ düzlemlerinden, $\phi = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90° 3 farklı istikamet açısında (azimut), 0 ile 0,4 arasında değişen $\sin^2\psi$ değerlerine göre kristal kafes yapısı (in. lattice) mesafesi ölçülmüş, bu değerlere göre gerinimler hesaplanarak Hooke yasası ile gerilme değerleri bulunmuştur. D- $\sin^2\psi$ grafikleri incelendiğinde eğrilerin lineer olmadığı, ψ açısının pozitif ve negatif değerlerinde birbirinden farklı D değerleri ölçüldüğü görülmüştür. Bu fenomen ψ ayrılması olarak adlandırılmakta ve ψ açısının negatif ve pozitif değerleri için 2 farklı eğri çizdirilmesi gerekmekte, bu gereksinim diğer D- $\sin^2\psi$ dağılım tiplerinde (lineer bağlı, eğik çizgili ve salınımlı) görülmemektedir (V. Hauk, 1997). ψ ayrılması gözlenen durumlarda, lineer durumdan farklı olarak ε_{13} ve ε_{23} gerinimlerinin sıfırdan farklı olduğu kabulü yapılmakta ve gerinim hesaplarında kullanılan denklemler farklılaşmaktadır (Anderoglu, 2005). Bu fenomende D- $\sin^2\psi$ grafikleri üretim yönü ve istikamet açılarına göre Şekil 4.17’de paylaşılmıştır.

Farklı azimut açılarında yapılan taramaları sonrasında hesaplanan gerinim ve kalıntı gerilmeler XY ve XZ düzlemleri için Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5. XRD ile XY ve XZ düzlemlerinde ölçülen kalıntı gerilme miktarları

	Asal Gerilmeler			Düzlemsel Gerilmeler			
	σ_{maks} (MPa)	σ_{min} (MPa)	ϕ (σ_{maks}) ($^\circ$)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)	von Mises (MPa)
XY	311,9	154,4	5,4	310,51	155,79	14,76	270,12
XZ	174,1	46,0	60,7	76,68	143,42	54,67	156,26



Şekil 4.17. XRD kalıntı gerilme ölçümüne ait D-sin²ψ grafikleri; a,d)φ=0, b,e)φ=45, c,f)φ=90 azimut açıları; a,b,c)XY düzlemine ait; d,e,f) XZ düzlemine ait

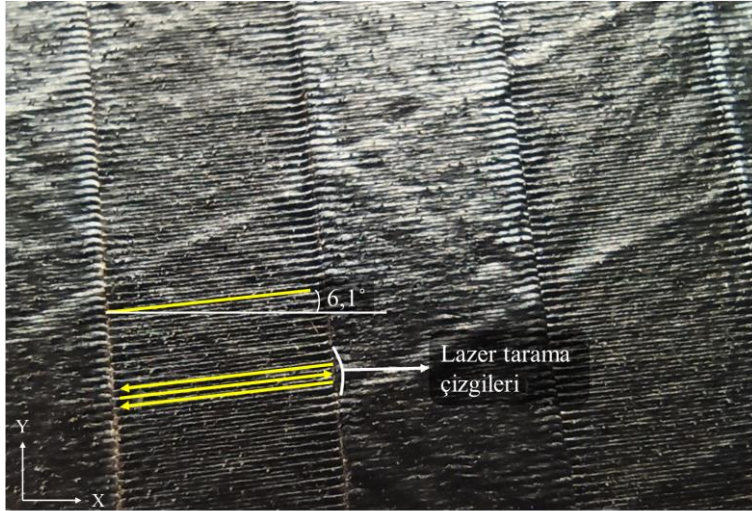
Bilindiği üzere XRD metodu ile yapılan kalıntı gerilme ölçümlerinde X-ışınlarının nüfuziyet derinliği Ti alaşımları için 5-10µm mertebesinde olduğundan elde edilen sonuçlar yüzeysel bir bölgeyi tanımlamaktadır (Withers, 2001). Hesaplanan asal gerilmeler iki boyutlu düzlemsel gerilmelere dönüştürülerek üretim yönünün gerilme oluşumundaki rolünün incelenmesi amaçlanmıştır. Ölçüm derinliğinin çok düşük olması sebebiyle ölçüm düzlemine dik yöndeki gerinimler ve buna bağlı olarak gerilmelerin olmadığı varsayımı yapılmıştır (Vrancken, 2016).

XZ düzleminden alınan ölçümlerde, üretim yönüne paralel olan σ_{yy} gerilmesinin, üretim yönüne dik olan σ_{xx} gerilmesinden yaklaşık 2 kat daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. Üretim yönündeki kalıntı gerilme miktarının daha yüksek çıkmasının sebebi; SLE prosesinde, katı malzeme üzerinde oluşturulan ergiyik havuzun soğuması esnasında büzüşmesi ve etrafındaki tüm katı malzemeye çekme gerilmesi uygulaması, ancak parça kenarında kalan, aynı zamanda ölçümün alındığı bu bölgenin fiziksel olarak sınırlandırılmış olmasından kaynaklı, yüksek oranda kendisinin altındaki katılaşmış bölgeye doğru ısı kaybedebilmesi ve buna bağlı olarak gerilmelerin dikey yönde oluşmasıdır.

Buna ek olarak, bir yetersizlik olarak gösterilebilecek şekilde; XZ düzleminde, $\phi=45^\circ$ ve $\phi=90^\circ$ açılarındaki yapılan ölçümlerde, numunenin üretim tablasındaki konumundan kaynaklı gölgeleme olarak adlandırılan fiziksel bir kısıtlamayla karşılaşmıştır. Üretim tablasının bir kısmı, X-ışını kaynağı ve dedektörü arasına gireceğinden, daha az sayıda ψ açısında ölçüm

yapılmasına sebep olmuştur. Bu durumun ölçüm sonuçlarına etkisi gelecek çalışmalarda incelenmelidir.

XY düzleminden alınan ölçümlerde ise birbirine ve üretim yönüne dik olan, σ_{xx} gerilmesinin σ_{yy} gerilmesinin yaklaşık 2 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Katmanlar arası tarama stratejisinin döndürülerek değiştirildiği üretimlerde bu düzlemdeki gerilmelerin birbirinden çok farklı değerde çıkması beklenmemekle birlikte, XRD metodunun nüfuziyetinin düşük olması sebebiyle yalnızca en son katmana ait bir hacimden ölçüm alınabildiği için bu farklılığın gözlemlendiği düşünülmektedir. Bu düzlemsel gerilme farkının sebebi ise; ergiyik havuzun ilerlediği lazer tarama yönünde, ısı kaybının en fazla ergiyik havuzun arkasında kalan yeni katılmış bölgeye doğru olması ve bunun da tarama yönüne paralel gerilmeleri artırmasıdır. Bu bulgular, literatürde incelenmiş olan çalışmaların sonuçlarını doğrular nitelik ve niceliktedir (Levkulich, 2019). Numunenin üretim yönündeki son katmanı üzerinde görülen lazer tarama yolları da Şekil 4.18’de verilmiştir.

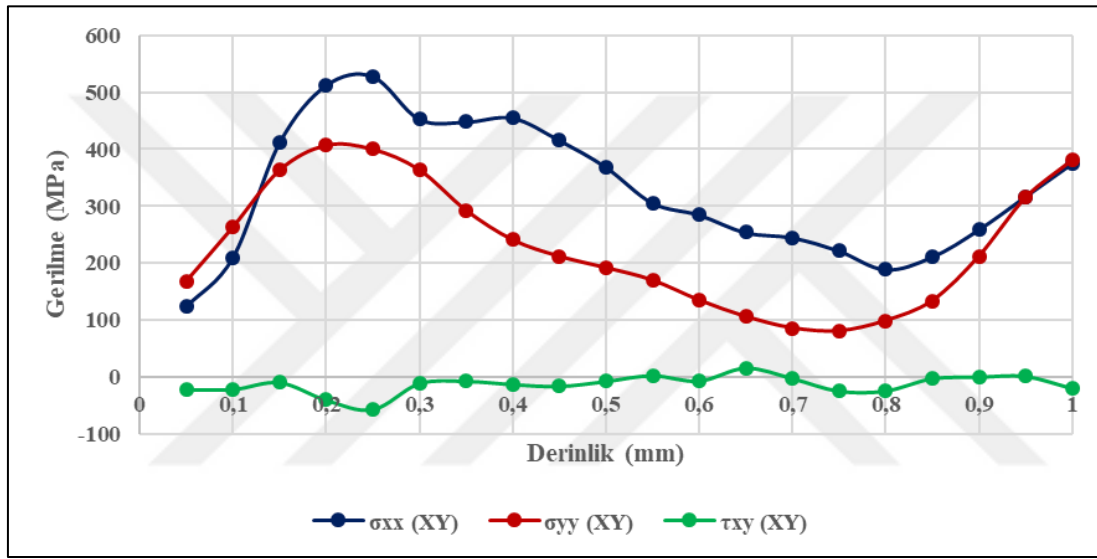


Şekil 4.18. Krs numunesinde lazer tarama çizgilerinin görüldüğü üretilen son katman (XY düzlemi)

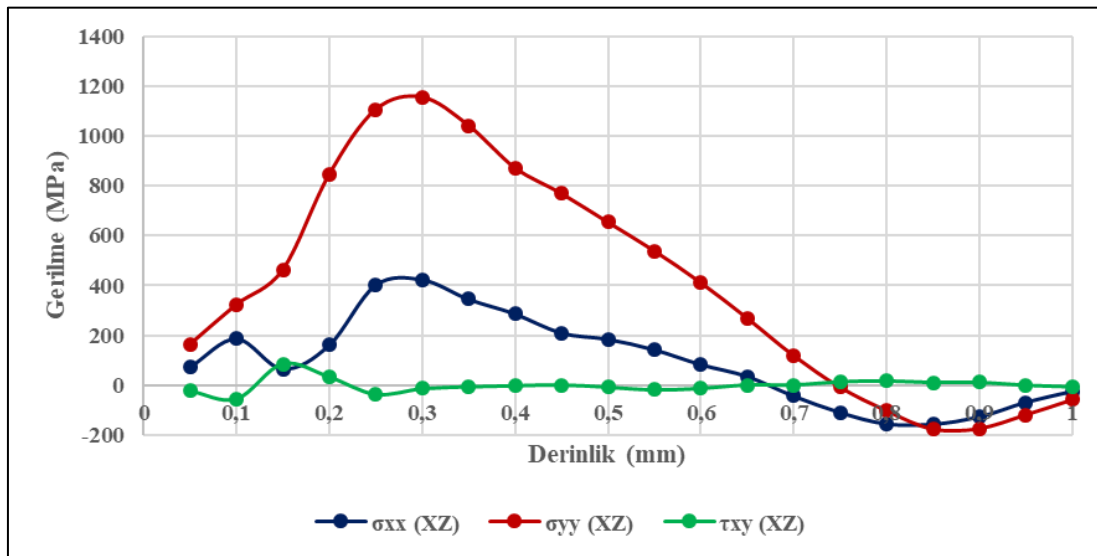
XY ve XZ düzlemlerinde ölçülen kalıntı gerilme miktarları birbirleriyle karşılaştırıldıklarında; XY düzlemindeki kalıntı gerilmelerin XZ yönündekilere göre çok daha yüksek miktarda olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebi; her iki ölçüm de karşılık gelen düzlemlerin orta noktalarından alınmış olup, XZ düzleminin orta noktasında kalan bölge, üzerine üretilen yeni katmanlarda yeniden ısınıp soğuyarak gerilimin giderilmesine sebep olan bir ısıl işleme maruz kalmıştır. Halbuki XY düzlemi parçanın en son üretilen katmanına ait olduğundan buradaki ısı gradyanı azami seviyededir.

4.4.2. Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümleri

SLE prosesinden kaynaklı ısı kalıntı gerilmelerin hacimsel boyutta incelenebilmesi amacıyla delik delme metoduyla kalıntı gerilme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Delik delme metodunda da ölçüm yapılan yönde gerinim ve dolaylı olarak gerilmelerin var olmadığı kabul edilmektedir. Bu varsayıma bağlı olarak XY ve XZ düzlemlerinde, ölçüm derinliğine bağlı olarak hesaplanan kalıntı gerilme miktarları sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.19. XY düzleminde delik delme metodu ile derinliğe bağlı olarak ölçülen kalıntı gerilme miktarları



Şekil 4.20. XZ düzleminde delik delme metodu ile derinliğe bağlı olarak ölçülen kalıntı gerilme miktarları

Her iki yönden alınan ölçümler kendi içerisinde değerlendirildiğinde, gerilmelerin çekme gerilmesi karakteristiğinde olduğu görülmektedir. Delik delme metodu ile yapılan kalıntı gerilme ölçümlerinde doğru verinin elde edilebildiği derinlik, delik çapına göre belirlenmekte olup azami delik derinliği çaptan büyük seçilmemektedir. Bunun sebebi ise hem gerinim ölçerlerle hem de ESPI metoduyla yapılan ölçümler deliğin başladığı yüzeyden veri toplamakta, bu verideki bozulma da derinlik arttıkça çoğalmaktadır (Schajer, 2018).

XZ düzleminden alınan sonuçlar incelendiğinde, üretim yönüne paralel yöndeki σ_{yy} gerilmesinin, üretime dik yöndeki σ_{xx} gerilmelerinden daha yüksek olduğu ve ölçülen maksimum çekme gerilme değerleri karşılaştırıldığında üretim yönündeki gerilmelerin, üretime dik yöndeki gerilmelerin yaklaşık 3 katı değerinde ölçüldüğü görülmüştür. Bu farklılık, üretim metodunun sahip olduğu yönelime bağlı hızlı soğuma fenomeninin bir sonucu olarak karşımıza çıkmakta ve XRD metodu ile ölçülen kalıntı gerilme trendleriyle uyum göstermektedir.

XZ düzleminden alınan ölçüm sonuçlarından, maksimum σ_{yy} gerilmesinin, malzemenin bilinen çekme gerilmesi değerine çok yakın olduğu görülmüştür. Malzeme içerisindeki kalıntı gerilmelerin, malzemenin akma sınırının üzerine çıktıklarında plastik deformasyona sebep oldukları ve bu yüzden kalıntı gerilmelerin elastik gerilmeler olduğu varsayımına (Vrancken, 2016) göre, ölçülen maksimum gerilmenin malzemenin akma gerilme değeri olabileceği çıkarımı yapılabilir.

Malzemenin üst yüzeyi olan XY düzleminden alınan ölçüm sonuçları incelendiğinde, σ_{xx} ve σ_{yy} gerilme büyüklüklerinin birbirinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Farklılığın düşük seviyede olması beklenen bir sonuçtur çünkü, tarama stratejisi katmanlar arasında Z ekseninde döndürülerek değiştirildiğinden lazer tarama yönüne bağlı değişim gözlenememektedir. XRD metodunda bu farklılığın görülebilirken delik delme metodunda görülememesi ise ölçüm hacminin delik delme metodunda çok daha fazla olması, dolayısıyla ergiyik havuz yönlenmesi seviyesindeki yerel sonuçların delik delme metoduyla elde edilmemesidir.

XY ve XZ düzlemlerinde ölçülen gerilmelerin büyüklük olarak birbirleriyle karşılaştırması yapıldığında XY yönündeki gerilmelerin daha düşük olduğu görülmekle beraber, ölçüm metodunun hesaplama yöntemi gereği, ölçüme dik yöndeki gerilmelerin 0 kabul edildiği

unutulmamalıdır. Delik delme metoduyla gerilme değerinin daha doğru hesaplanabilmesi için XY ve XZ yönlerindeki ölçümlerin, sonuçları etkilemeyecek şekilde birbirine daha yakın noktalardan alınması ve böylelikle ölçüme dik yöndeki gerilmelerin, karşılıklı olarak bulunabilmesi önerilmektedir.

4.5. Kalıntı Gerilmelerin Malzeme Metalurjisi ile İlişkisi

Malzeme metalurjik özellikleriyle, kalıntı gerilme miktarları ve oluşma şekilleri birlikte incelendiğinde her iki fenomeni de kontrol eden başlıca etkenin eklemeli imalata özgü soğuma/katılaşma davranışı olduğu görülmüştür. Malzeme mikroyapısı, hızlı soğumanın etkisiyle şekillenen iğnems α kolonileri ve sütunsu öncül β tanelerinden oluşmuş olup kalıntı gerilmeler ise ısı transfer miktarının en fazla olduğu, üretime paralel yönde daha fazladır.

Malzemenin mikroyapısal özellikleri ve faz dağılımları, gerilim giderme ısıtma işlemi ardından yeniden incelendiğinde, ısıtma işlemin mikroyapıya etkisi α' tanelerinin en/boy oranlarının %52 oranında düşürülmesi, α kolonilerinin %20 büyütülmesi ve öncül β tane boyutlarının %5 artırılması olarak karşımıza çıkmaktadır ancak ısıtma işlem sıcaklığı β dönüşüm sıcaklığının altında olduğundan ayırt edici miktarda faz dönüşümü gözlenememiştir. Malzeme iç yapısında, β fazının miktarının ayırt edilecek miktarda arttığı, tanelerin iğnems yapıdan küresel yapıya doğru dönüştüğü gözlenmiş olsaydı, malzemenin β dönüşüm sıcaklığının üzerine ısıtılarak kontrollü bir şekilde yavaşça soğutulduğu ve böylelikle de kalıntı gerilmelerin giderildiği çıkarımı yapılabilirdi. Bu sebeplerden dolayı, termal geçmiş bilinmeyen bir malzemenin iç yapısı incelendiğinde ve bu çalışmada görüldüğü gibi bir morfoloji gözlemlendiğinde, malzemenin kalıntı gerilme içerip içermediği hakkında kesin yorum yapmak doğru olmayacaktır. Malzemenin soğuma hızı ve ısı transfer yönü, malzemeye olan ısı girdisine (üretim parametreleri) ve malzeme fiziksel özelliklerine (ısı iletkenlik, ısı soğurma miktarı vb.) bağlı olduğu kadar malzeme geometrisine de bağlıdır. Kalıntı gerilme-mikroyapı ilişkisinin doğru bir şekilde kurulabilmesi için hem kalıntı gerilme ve faz dağılımı/mikroyapı ölçüm sayılarının artırılması hem de farklı geometrilerde üretilmiş numunelerin de ölçümlere dahil edilmesi gerekmektedir. Böylelikle malzeme faz dağılım oranları için bir eşik değeri hesaplanabilir, mikroyapı unsurlarının boyutları için değeri aralıkları çıkarılabilir ve kalıntı gerilmelerin mevcut olup olmadığına, malzeme metalurjik özelliklerinden karar verilebilir.

4.6. Malzeme Mekanik-Metalurjik Özelliklerinin Üretim Yönüyle İlişkisi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen mekanik testler kullanılan malzemenin literatür ve üretici verileriyle uyumlu olup olmadığını kontrol edebilme amacıyla yapıldığından tüm testler kalıntı gerilme ısıtılma işlemi uygulanmış ve ilgili standartların gereksinimlerine göre hazırlanmış numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan ısıtılma işlemleri de malzeme mekanik davranışının üretim yönüne bağlılığını büyük ölçüde azaltmıştır. Genellikle daha yüksek değerlere sahip olan yatay yöndeki malzeme mekanik özelliklerinin dikey yöndeki mekanik özelliklere bölünmesiyle hesaplanan anizotropi faktörleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Isıl ardıl işlemler malzeme statik dayanımında azalmaya sebep olmasına karşın uzama miktarını artırarak daha sünek bir malzeme davranışı elde edilebilmektedir. En önemlisi, mekanik özelliklerindeki yönelime bağlılığın giderilmesiyle eklemeli imalat ile üretilen parçaların, homojen ve izotropik malzeme özelliklerine göre tasarlanması mümkün olmaktadır.

Çizelge 4.6. Mekanik özelliklerdeki anizotropi miktarı

Mekanik Özellik	Anizotropi Faktörü
Çekme Dayanımı	1,029
Yorulma Ömür Dayanım Sınırı	1,691
Darbe Enerji Sönümlene Miktarı	1,097

Malzeme mikroyapısı, “4.3.1.Mikroyapı ölçümleri” başlığı altında detaylı olarak tartışılmakla birlikte, özet olarak mikroyapı unsurlarının belirgin bir yönlenmeye sahip olduğu belirtilmiştir. Malzeme mikroyapısı XY ve XZ düzlemlerinde birbirinden tamamen farklı yapıda olduğundan bu düzlemlerdeki ölçümler arasında anizotropi faktörü hesaplamaya çalışmak yanıltıcı sonuçlar elde edilmesine sebep olacaktır.

Her iki kalıntı gerilme ölçüm metodu da termal kalıntı gerilmelerin, üretim yönüne göre yüksek miktarda farklılık içerdiğini göstermiştir. XRD metodunda XY ve XZ düzlemlerinden alınan ölçümlerdeki düzlemsel gerilmelerden hesaplanan von Mises gerilmeleri arasında ve XZ düzlemi içerisindeki σ_{xx} - σ_{yy} gerilmeleri oranlanarak anizotropi faktörleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.7). “4.4.1.XRD ile kalıntı gerilme ölçümleri” başlığında tartışıldığı üzere, XY ve XZ düzlemlerinden alınan gerilmeler birbirleriyle karşılaştırılırken XRD metodunun çok kısıtlı bir derinlik ve hacimden veri topladığı ve ölçüm düzleminin normalindeki gerilmeleri ihmal edildiği unutulmamalıdır. Bu sebeplerden ötürü XY ve XZ

düzlemlerindeki von Mises gerilmelerinden hesaplanan anizotropi faktörünün güvenilirliği düşüktür. XZ düzlemindeki gerilmelerdeki anizotropi, soğuma miktarının büyüme yönüne paralel yönde daha fazla meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. XY düzlemindeki anizotropi ise lazer tarama yönündeki gerilmelerin taramaya dik yöndeki gerilmelere göre daha fazla olduğunu ispatlamaktadır.

Çizelge 4.7. XRD ile ölçülen kalıntı gerilmelerdeki anizotropi miktarı

Gerilme Tipleri	Anizotropi Faktörü
XY-XZ, von Mises, ($\sigma_{xy} / \sigma_{xz}$)	1,729
XZ, ($\sigma_{yy} / \sigma_{xx}$)	1,870
XY, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy}$	2,000

Delik delme metodu ile ölçülen kalıntı gerilme miktarları kıyaslandığında, XRD ölçümlerinde bulunduğu gibi XY ve XZ düzlemlerindeki gerilmelerden hesaplanan von Mises gerilme değerleri ve XZ düzlemindeki σ_{xx} - σ_{yy} gerilmeleri arasında bir anizotropi faktörü hesaplanmıştır (Çizelge 4.8). Düzlemler arası von Mises gerilmelerinin karşılaştırılmasında XY düzlemindeki gerilmelerin daha düşük ölçülmesinin sebebi “4.4.2.Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümleri” başlığında tartışıldığı üzere ölçüm düzleminin normalindeki ε_{zz} değerinin ihmal edilmesi ve buna bağlı olarak σ_{zz} gerilmesinin hesaba dahil edilmemesidir. Bu sebepten, von Mises gerilmeleri üzerinden yapılacak anizotropi hesaplamalarının güvenilir sonuç verebilmesi için ölçümlerin birbirlerine daha yakın bölgelerden alınarak ε_{zz} değerlerinin karşılıklı olarak hesaplanması sağlanmalıdır. XZ düzlemindeki gerilmeler arasındaki yüksek anizotropi, gerilmelerin soğuma yönünde daha fazla miktarda mevcut olduğunu göstermektedir. XY düzlemindeki gerilmeler arasındaki anizotropik farkın az olması da katmanlar arası döndürülerek yapılan lazer tarama stratejisinin bir sonucudur.

Çizelge 4.8. Delik delme ile ölçülen kalıntı gerilmelerdeki anizotropi miktarı

Gerilme Tipleri	Anizotropi Faktörü
XY-XZ, von Mises, $\sigma_{xy} / \sigma_{xz}$	0,481
XZ, $\sigma_{yy} / \sigma_{xx}$	2,724
XY, $\sigma_{xx} / \sigma_{yy}$	1,320

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, Ti-6Al-4V alaşımı kullanılarak toz yataklı metal eklemeli imalat metodu ile üretilen parçalardaki termal kalıntı gerilmelerin malzeme metalurjik özellikleriyle ilişkilendirilmesine çalışılmıştır. Bu ilişkilendirmeyi yapabilmek adına üretim yönüne bağlı olarak; malzeme mikroyapıları incelenmiş, XRD ölçümleriyle faz dağılımları çıkarılmış, XRD ve delik delme metotlarıyla kalıntı gerilmeler ölçülmüş ve deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Bunlara ek olarak gerçekleştirilen mekanik testler ile malzeme mekanik mukavemet özellikleri literatür ile doğrulanmıştır. Termal kalıntı gerilmelerin giderilmesinde kullanılan ısı ardıl işlemlerin de malzeme metalurjisine etkisi incelenmiştir.

5.1. Sonuçlar

- Mekanik test sonuçlarına göre malzeme mekanik özelliklerinin makine üreticisinin sağladığı özelliklerle ve literatürden alınan referans özelliklerle yakın değerde bulunduğu görülmüştür.
- Malzeme mikroyapıları incelendiğinde iç yapının martenzitik α' tanelerinden ve sütunsu öncül β tanelerinden oluştuğu görülmüştür. Bunun sebebi toz yataklı metal eklemeli imalat prosesinin özelliklerinden olan, yerel yüksek ısı girdisi sonrası çok hızlı soğuma ile katılaşma fenomenidir.
- Mikroyapıdaki sütunsu yapı ve tanelerin üretim tablasına doğru yönelmesinin sebebi ise ısı transferinin ergiyik havuzdan üretim tablası yönüne gerçekleşmesidir.
- XRD ölçümlerinden elde edilen kırınım desenlerinin Ti- α fazına ait kırınım desenine benzer yapıda olduğu görülmüştür. Ti- β fazına ait tepe noktaları ayırt edilecek miktarda gözlenememiştir.
- XRD ölçümlerinde görülen en yüksek yoğunluktaki ilk 3 tepe noktası normalize edilerek incelendiğinde bu tepe noktalarının şiddet değerlerinin birbirine göre oranları üretim yönüne ve ısı işlem prosesine göre farklılık göstermektedir. Bu oransal farklılıklar ısı işlem sonrası büyüdüğü bilinen ve sütunsu yapısı sebebiyle üretime dik yönde gözlenemeyen β tanelerinden gelen kırınımın (110) düzleminden yansıdığını ve 3. tepe noktası içerisinde olduğunu göstermektedir.
- XRD ile kalıntı gerilme ölçümlerinde üretim yönüne paralel yönde (XZ düzlemi) alınan ölçümlerde, üretim yönüne paralel σ_{yy} gerilmesi 76,7MPa, σ_{xx} gerilmesi ise 143,4MPa

bulunarak anizotropi faktörü 1,87 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, malzeme mikroyapısındaki yönlenmenin de sebebi olan soğuma yönünden kaynaklanmaktadır. Üretim yönüne dik yönde (XY düzlemi) alınan ölçümlerde, lazer tarama yönündeki gerilmelerin taramaya dik yöndeki gerilmelerden fazla olmasından dolayı düzlemsel gerilmelerdeki anizotropi faktörü 2 kat olarak hesaplanmıştır.

- Delik delme ile kalıntı gerilme ölçümlerinde üretim yönüne paralel (XZ düzlemi) alınan ölçümlerde, üretim yönüne paralel σ_{yy} gerilmesinin azami değeri 1155MPa, üretim yönüne dik yöndeki σ_{xx} gerilmesinin azami değeri ise 424MPa olarak bulunmuş ve anizotropi faktörü 2,72 olarak hesaplanmıştır. Üretim yönüne dik yönde (XY düzlemi) alınan ölçümlerde ise azami düzlemsel gerilmeler birbirine yakın değerlerde ölçülmüştür (528MPa, 407MPa). Bu yönde ölçülen kalıntı gerilme miktarının üretim yönüne paralel ölçülen gerilmelerden düşük çıkmasının sebebi düzlemlere dik olan ϵ_{zz} değerinin ölçülememesi ve σ_{zz} 'nin sıfır kabul edilmesidir.

5.2. Öneriler

- Malzeme mikroyapısındaki unsurların nicel hale getirilmesi işlemi görüntü işleme algoritmalarıyla yapılarak kullanıcıya bağlılık ortadan kaldırılabilir ancak Ti-6Al-4V alaşımının karmaşık mikroyapısı, görüntü işleme çalışmalarının, mevcut gelişmişlik düzeyinden daha yüksek seviyeye çıkarılması ve doğrulanması gerektiği göz ardı edilmemelidir.
- Faz dağılımının belirlenmesi için yapılan XRD ölçümlerinin tarama hızlarının mevcut ölçüm hızı olan 0,5°/dk değerinden daha düşük bir hızda yapılarak birbirine yakın açılarda tepe noktalarına sahip α ve β fazlarının daha yüksek çözünürlükte ayrıştırılması denenebilir.
- Hem XRD hem de delik delme metodu ile yapılan kalıntı gerilme ölçümlerinin sayısı artırılarak deneysel sonuçların tutarlılığının ve doğruluğunun artırılması hedeflenebilir ve kullanılan kalıntı gerilme ölçüm metotları ölçüm yönündeki gerilmeleri ölçemediğinden birbirine dik yönde yapılan ölçümlerin, numuneler üzerinde birbirine daha yakın noktalardan alınması sağlanarak bu eksikliğin giderilmesine çalışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Anderoglu, O. (2005). *Residual Stress Measurement Using X-Ray Diffraction*. Texas A&M University.
2. Bartlett, J. L., and Li, X. (2019). An Overview of Residual Stresses in Metal Powder Bed Fusion. *Additive Manufacturing*, 27(January), 131–149.
3. Becker, T. (2018). Selective Laser Melting Produced Ti-6Al-4V: Post-Process Heat Treatments to Achieve Superior Tensile Properties. *Materials*, 11(1), 146.
4. Brückner, F., Lepski, D., and 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.
5. Cheng, B., Shrestha, S., and Chou, K. (2016). Stress and Deformation Evaluations of Scanning Strategy Effect In Selective Laser Melting. *Additive Manufacturing*, 12, 240–251.
6. Dieter, G. E. (1986). Residual Stress. *Mechanical Metallurgy* (pp. 393–418). McGraw-Hill.
7. Gasman, L. (2019). Additive Aerospace Considered as a Business. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* (pp. 327–340). Elsevier.
8. Gusarov, A. V., Yadroitsev, I., Bertrand, P., and Smurov, I. (2007). Heat Transfer Modelling and Stability Analysis of Selective Laser Melting. *Applied Surface Science*, 254(4), 975–979.
9. Hauk, V. (1997). Definition of Macro- and Microstresses and Their Separation. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods* (pp. 129–215). Elsevier.
10. ISO/ASTM. (2013). Additive Manufacturing - General Principles Terminology (ASTM52900). *Rapid Manufacturing Association*, 2021, 10–12.
11. Kumar, S. A., and Prasad, R. V. S. (2021). Chapter 2 - Basic Principles of Additive Manufacturing: Different Additive Manufacturing Technologies. *Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series* (pp. 17–35). Woodhead Publishing.
12. Levkulich, N. C., Semiatin, S. L., Gockel, J. E., Middendorf, J. R., DeWald, A. T., and Klingbeil, N. W. (2019). The Effect of Process Parameters on Residual Stress Evolution and Distortion in the Laser Powder Bed Fusion of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 28, 475–484.
13. Manikandan, P., Kumar, V. A., Pradeep, P. I., Vivek, R., Manwatkar, S. K., Rao, G. S., Murty, S. V. S. N., Sivakumar, D., and Narayanan, P. R. (2022). On the Anisotropy in Room-Temperature Mechanical Properties of Laser Powder Bed Fusion Processed

- Ti6Al4V-ELI Alloy for Aerospace Applications. *Journal of Materials Science*, 57(21), 9599–9618.
14. Mierzejewska, Ż. A., Hudák, R., and Sidun, J. (2019). Mechanical Properties and Microstructure of DMLS Ti6Al4V Alloy Dedicated to Biomedical Applications. *Materials*, 12(1), 176.
 15. Mower, T. M., and Long, M. J. (2016). Mechanical Behavior of Additive Manufactured, Powder-Bed Laser-Fused Materials. *Materials Science and Engineering: A*, 651, 198–213.
 16. Najmon, J. C., Raeisi, S., and Tovar, A. (2019). Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* (pp. 7–31). Elsevier.
 17. Rafi, H. K., Karthik, N. V, Gong, H., Starr, T. L., and Stucker, B. E. (2013). Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872–3883.
 18. Robinson, J., Ashton, I., Fox, P., Jones, E., and Sutcliffe, C. (2018). Determination of the Effect of Scan Strategy on Residual Stress in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, 13–24.
 19. Schajer, G. S., and Whitehead, P. S. (2018). *Nature and Source of Residual Stresses BT - Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses* Springer International Publishing.
 20. Schajer, G. S., and Whitehead, P. S. (2018). *Relaxation Type Residual Stress Measurement Methods BT - Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses* Springer International Publishing.
 21. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, and Kruth, J.-P. (2010). A Study of the Microstructural Evolution During Selective Laser Melting Of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312.
 22. Thöne, M., Leuders, S., Riemer, A., Tröster, T., and Richard, H. A. (2012). Influence of Heat-Treatment of Selective Laser Melting Products-eg Ti6Al4V. *2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
 23. Vrancken, B. (2016). Study of Residual Stresses in Selective Laser Melting. *Studie van thermische spanningen bij het Selectief Laser Smelten*. KU Leuven.
 24. Vrancken, B., Cain, V., Knutsen, R., and Van Humbeeck, J. (2014). Residual Stress Via the Contour Method in Compact Tension Specimens Produced Via Selective Laser Melting. *Scripta Materialia*, 87, 29–32.
 25. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.-P., and Van Humbeeck, J. (2012). Heat Treatment of

- Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177–185.
26. Vrancken, B., Wauthlé, R., Kruth, J.-P., and Van Humbeeck, J. (2013). Study of the Influence of Material Properties on Residual Stress in Selective Laser Melting. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 393–407).
 27. Wang, M., Wu, Y., Lu, S., Chen, T., Zhao, Y., Chen, H., and Tang, Z. (2016). Fabrication and characterization of selective laser melting printed Ti–6Al–4V alloys subjected to heat treatment for customized implants design. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(6), 671–677.
 28. Withers, P., and Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Residual stress. Part 1: Measurement Techniques. *Materials Science and Technology - MATER SCI TECHNOL*, 17, 355–365.
 29. Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., & Zeng, X. (2016). Formation and Control of Martensite in Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting. *Materials & Design*, 108, 308–318.
 30. Zhao, X., Li, S., Zhang, M., Liu, Y., Sercombe, T. B., Wang, S., Hao, Y., Yang, R., & Murr, L. E. (2016). Comparison of the Microstructures and Mechanical Properties of Ti–6Al–4V Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Materials & Design*, 95, 21–31.



GAZİ GELECEKTİR..