



The effects of orientation and heat treatment on 17-4 PH steels produced by additive manufacturing

Uğur Sıtkı Türkyılmaz^{1*}, İbrahim Karaağaç², Mehmet Okan Kabakçı², Barış Çetin¹

¹FNSS Defence Systems Inc., R&D Centre, 06830, Ankara, Türkiye

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06560, Ankara, Türkiye

Highlights:

- The structure orientation has significant effects on mechanical properties and microstructure
- As-built specimens could be formed at a higher angle than Con-A
- Con-A specimens have higher spring-back than as-built specimens

Keywords:

- SLM
- 17-4 PH
- Heat treatment
- Mechanical Properties

Article Info:

Research Article

Received: 19.02.2025

Accepted: 25.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1643116

Correspondence:

Author: Uğur Sıtkı Türkyılmaz
e-mail: ugur.turkyilmaz@fnss.com.tr
phone: +90 543 932 04 12

Graphical/Tabular Abstract

Test specimens with three different structure orientations (XY, YZ and XZ) were manufactured by the SLM method on the EOS M290 device; after that, finish geometries were machined by WEDM and turning operations (Figure A-a,A-b). Condition-A specimens were prepared by heat treatment of 17-4 PH stainless steel material at 1040°C (Figure A-c). The specimens were formed in V-bending dies, and their formability limits were tested (Figure A-d). Visual inspection was carried out to determine the specimens without forming failure (Figure A-e). Finally, the material properties and microstructure were investigated comprehensively (Figure A-f).

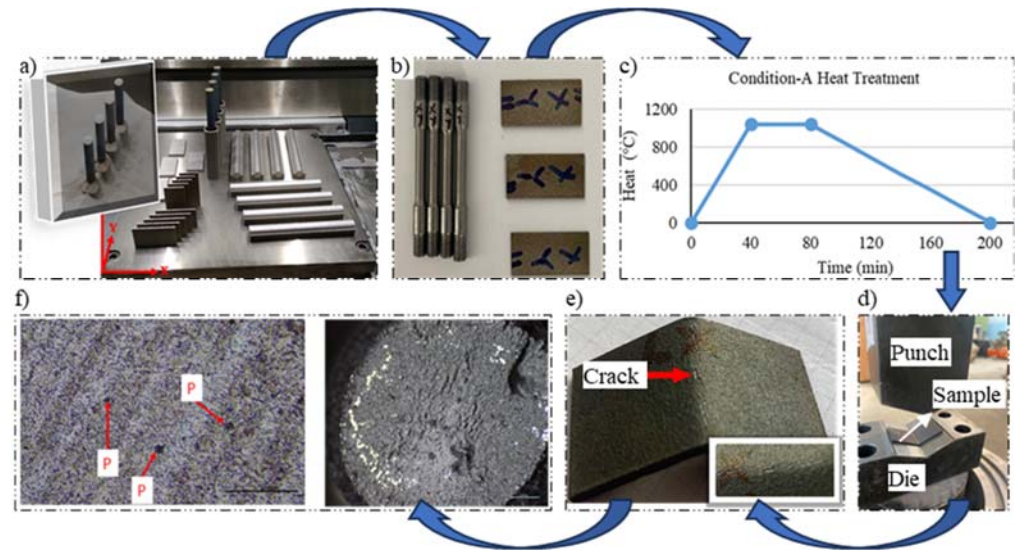


Figure A. The illustration of the experimental study-steps

Purpose: The aim of this study is to experimentally investigate the effects of heat treatment on the deformation strength and microstructure of 17-4 PH material produced in different structural orientations.

Theory and Methods: In this study, sheet-form specimens were produced using SLM in XY, YZ, and XZ orientations. After heat treatment to achieve Con-A, both as-built and Con-A specimens were subjected to V-bending tests at 30°, 45°, and 60° to evaluate bending formability and spring-back behavior.

Results:

Deformability Limit: As-built specimens could be formed at a higher bending angle than Con-A specimens without deformation failure.

Mechanical Properties: As-built specimens reached 988 MPa tensile strength with 12.35% elongation, whereas Con-A specimens demonstrated 1370 MPa yield strength with 7.5% elongation.

Spring-Back: Enhanced mechanical strength in Con-A specimens resulted in notably higher spring-back than as-built specimens.

Conclusion: This study revealed that structure orientation and heat treatment have significant effects on the microstructure, deformation strength and mechanical properties of 17-4 PH material.



Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen 17-4 PH çeliklerde yapı oryantasyonu ve ısıtıl işlemin etkileri

Uğur Sıtkı Türkyılmaz^{1*}, İbrahim Karaağaç², Mehmet Okan Kabakçı², Barış Çetin¹

¹FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., Ar-Ge Merkezi, 06830, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06560, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yapı yönelimi, mekanik özellikler ve mikro yapı üzerinde önemli etkilere sahiptir.
- Yapılmış numuneler, Con-A'dan daha yüksek bir açıda oluşturulabilir.
- Con-A numuneleri, yapılmış numunelere göre daha yüksek geri yaylanma özelliğine sahiptir.

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.02.2025

Kabul: 25.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1643116

Anahtar Kelimeler:

SLM,

17-4 PH,

ısıtıl işlem,

mekanik özellikler

ÖZ

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden Seçici Lazer Ergitme (SLM) teknolojisi kullanılarak üç farklı yapı oryantasyonunda (XY, YZ ve XZ) üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik malzemelere uygulanan ısıtıl işlemin mekanik özelliklere, deformasyon dayanımına ve mikroyapıya etkileri deneysel araştırılmıştır. Sac formda üretilen deney numuneleri çökelme sertleşme ısıtıl işlemine tabi tutularak 17-4 PH malzeme için Kondisyon A (Kon-A) elde edilmiştir. Deneysel çalışmada üretildiği durumdaki ve Kon-A ısıtıl işlemli numunelerin bükme ile deformasyona karşı dayanımları 30°, 45° ve 60° açılı V-bükme kalıplarında incelenmiştir. Kon-A numuneler en fazla 45° açı sınırına kadar kırılmadan şekillendirilebilirken, üretildiği durumda olan numuneler 60° açıda deformasyona dayanarak kırılmadan şekillendirilebilmiştir. En yüksek mekanik özelliklerin hem üretildiği durumdaki hem de Kon-A için YZ yapı oryantasyonunda olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, üretildiği durumdaki numunelerde yüksek oranda bulunan östenitin ısıtıl işlem prosesi ile martenzite dönüşmesinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Üretildiği durumda olan numunelerde ortalama 988 MPa maksimum çekme dayanımı ve %12,35 uzama miktarı gözlemlenirken Kon-A numunelerde ise ortalama 1370 MPa akma dayanımı ve %7,5 uzama gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerdeki artışa bağlı olarak geri esneme değerlerinin de Kon-A numunelerde belirgin bir artış gösterdiği tespit edilmiştir.

The effects of orientation and heat treatment on 17-4 PH steels produced by additive manufacturing

H I G H L I G H T S

- The structure orientation has significant effects on mechanical properties and microstructure
- As-built specimens could be formed at a higher angle than Con-A
- Con-A specimens have higher spring-back than as-built specimens

Article Info

Research Article

Received: 19.02.2025

Accepted: 25.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1643116

Keywords:

SLM,

17-4 PH,

heat treatment,

mechanical properties

ABSTRACT

In this study, the effects of heat treatment on mechanical properties, deformation strength, and microstructure of 17-4 PH stainless steel materials produced in three different structural orientations (XY, YZ and XZ) using Selective Laser Melting (SLM) technology, one of the additive manufacturing methods, were experimentally investigated. Test specimens produced in sheet form were subjected to precipitation hardening heat treatment, and Condition A (Con-A), which produces a martensite phase in the microstructure, was obtained for 17-4 PH material. The experimental study investigated the deformability of As-Built and Con-A specimens against deformation by bending in V-bending dies with 30°, 45° and 60° angles. Con-A specimens could be formed without fracture up to a maximum 45° bending angle, while as-built specimens could be formed without fracture by withstanding deformation at a 60° bending angle. The highest mechanical properties were observed for both As-built and Con-A in the YZ structure orientation. It was observed that this situation was caused by the transformation of austenite, which was seen in high concentrations in the as-built samples, to martensite through the heat treatment process. The as-built specimens showed a maximum tensile strength of 988 MPa and 12.35% elongation, while the Con-A specimens showed a yield strength of 1370 MPa and 7.5% elongation. Depending on the increase in mechanical properties, it was determined that the spring-back values also showed a significant increase in Con-A specimens.

*Sorumlu Yazar / Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *ugur.turkyilmaz@fnss.com.tr, ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr, mokabakci@gazi.edu.tr, cetin.baris@fnss.com.tr / Tel: +90 543 932 04 12

1. Giriş (Introduction)

Eklemeli imalat yöntemi; katman katman malzeme ekleyerek istenilen geometrinin elde edildiği ileri bir üretim teknolojisidir. Eklemeli imalat yönteminin en önemli avantajlarından birisi de üretilen parçanın iç kısım detaylarını da içeren karmaşık geometrilerin elde edilmesine olanak tanımasıdır [1, 2]. Ayrıca eklemeli imalat yöntemi; karmaşık geometriye ve iç detaylara sahip parçaların üretiminde de benzersiz bir esneklik sağlamaktadır. Prototip üretim sürecinde ise parça üretiminin hızlıca tamamlanmasıyla prototip ürün geliştirme süreçlerini hızlandırmaktadır [3, 4]. Eklemeli imalat yöntemi; malzeme israfını da minimize ederek özelleştirilmiş, düşük adetli ve geometrik olarak karmaşık parçalar için maliyet yönünden daha rekabetçi bir üretim yolu sunmakta [5] ve özelleştirilebilir yapıdaki üretim süreci sayesinde bireysel ve spesifik ihtiyaçlara yönelik çözümler oluşturulabilmektedir. Ancak, eklemeli imalat teknolojinin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar; üretim sürecinde kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve kalitesinin geleneksel yöntemlerle üretilen ürünlere kıyasla hala sınırlı olması performans açısından bazı dezavantajlar ortaya koymaktadır [6]. Ayrıca, üretilen parçaların mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi istenen seviyede olmamaktadır [7].

17-4 PH alaşımı; havacılık ve uzay endüstrilerinde destek ve iniş takımı bileşenlerinde, medikal aletlerin yapımında, petrokimya endüstrisinde reaktörlerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşım ayrıca genel mühendislik uygulamalarında, otomotiv ve savunma endüstrilerinde de kullanılmaktadır [8]. 17-4 PH yaşlanabilir çökelme sertleştirme paslanmaz çelik, ferritik ve martensitik mikroyapılarındaki tane içi ve tane sınırı çökmesi sayesinde sertleştirilebilen, yüksek dayanım ve sertlik değerlerine erişebilen bir alaşımdır [9, 10]. 17-4 PH alaşımının kimyasal bileşimi, yaklaşık olarak demir, %15-17 krom, %3-5 nikel ve %3-5 bakır ile karakterize edilmekte ve az miktarda da niyobyum ve tantal içermektedir [11]. Isıl bir işlem sonrası malzemenin mikroyapısı, bakır içeren çökeltiler etrafında gelişen martensitik transformasyon ile daha da artan sertlik ve mukavemet kazanmaktadır. Isıl işlemin çözelti fazı genellikle 1040°C sıcaklıkta uygulanmakta ve bu aşamada hızlı soğutma işlemi yapılmaktadır [12]. Isıl işlemin ikinci aşaması olan yaşlandırma işlemi, genellikle 480°C ila 620°C aralığındaki sıcaklıklarda farklı sertlik ve mukavemet özelliklerini elde etmek için uygulanmaktadır [9]. Yaşlandırma işlemi sonrasında, alaşımın çekme dayanımı yaklaşık 1100 MPa, akma dayanımı da 1000 MPa civarında olmaktadır [13]. Sertlik değerleri ise 33-44 Rockwell sertliği (HRC) aralığında değişkenlik gösterebilmektedir. Yaşlandırma sıcaklığı malzemenin mukavemet özelliklerini etkilemektedir. Daha düşük yaşlandırma sıcaklıkları (örn. 482°C) daha yüksek mukavemet sağlarken, daha yüksek sıcaklıklar (örn. 593°C) daha iyi tokluk sağlamaktadır [14]. 17-4 PH paslanmaz çelik, yüksek krom ve nikel içeriği, pasif bir oksit film tabakası oluşturarak korozyon direncini artırmaktadır [15]. Ayrıca tam sertleştirilmiş durumda veya belirli bir yaşlandırma işlemi sonrasında da bu tabaka daha da artmaktadır [12]. Özellikle klorür iyonlarına yüksek direnç sağlayabilmesinden dolayı deniz suyu ve benzeri korozyon etkilerinin güçlü olduğu ortamlarda tercih edilen bir malzeme olmuştur. Yüksek mukavemetli ve sertleştirilmiş durumuyla 17-4 PH paslanmaz çeliğin işlenmesi zorlu olmakta ve bu durum karbür uçlu kesici takımlar ile işlemeyi gerektirmektedir [9, 16]. Kaynak esnasında uygun ön işlem yapmak ve ardından uygun ısıl işlem uygulamak, kaynak bölgesinin mukavemetini optimize etmek için önemlidir [11, 17]. Malzemenin kaynak işlemleri genellikle gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) veya elektron demeti kaynak (EBW) yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir.

Toz yatağı füzyon (PBF), toz halindeki malzemenin katmanlar halinde ergitilerek birleştirildiği eklemeli imalat teknolojilerinden

birisidir [18]. Bu işlem; Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Elektron Işını Ergitme (EBM) olarak iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. PBF teknolojisi ile özellikle havacılık endüstrisinde, uçak kanat bağlantı elemanları gibi kritik parçaların üretiminde tercih edilmektedir. SLM, yüksek güçlü lazer ışını kullanarak metal tozlarını sıvı faza geçirmekte ve ardışık katmanlar halinde katılaştırmaktadır. Bu proses, karmaşık geometriye sahip mühendislik bileşenlerinin üretiminde yüksek hassasiyet ve detaylı yüzey kalitesi sunmaktadır [19]. EBM yöntemi; elektron ışını kullanarak benzer bir ergitme ve katılaştırma süreci uygulamaktadır. Bu yöntem genellikle daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha hızlı işlem süreleri sağlamakta ancak vakum ortamında çalışmayı gerektirmektedir [20]. Her iki ileri üretim teknolojinin avantajları arasında serbest tasarım olanakları, malzeme kullanım verimliliği ve üstün mekanik özellikler yer alırken; SLM'de yüksek ekipman maliyeti ve uzun işlem süreleri, EBM'de ise vakum şartları ve ekipman maliyetleri dezavantajları oluşturmaktadır [21]. Bükme ile deformasyon işleminde deney parametrelerinin eklemeli imalat ile üretilen parçaların ne kadar dayanabileceğinin tespitinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle büküm açısı ve malzeme kalınlığı, deformasyon dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Zımba uç yarıçapı, sac malzemenin boyutları ve mekanik özellikleri, büküm sıcaklığı, şekillendirme kuvveti, ütüleme süresi ve deformasyon hızı gibi çok sayıda faktörler deformasyon sonrası şekillendirilen parçada oluşan geri esneme açısını etkilemektedir [22, 23]. Bükme işlemlerinde, sac malzemenin iç yüzeyinde basma gerilmeleri ve bükme bölgesinin dış yüzeyinde çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bükme açısı arttıkça, bükme bölgesindeki gerilme miktarı da artmaktadır [24]. Bu durum da deforme edilen parçalarda geri esneme açısını artırmaktadır. Basma ve çekme gerilmelerinin dengede kalması durumunda da sac malzemedeki deformasyon tamamlanmaktadır. Bükme işleminde, kalıp açısının büyümesi ile birlikte bükme momenti artmakta [25] ve daha büyük bükme açısı daha büyük deformasyon alanına sebep olmaktadır [26]. Mevcut literatürde, 17-4 PH paslanmaz çeliğin hem geleneksel hem de eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen formlarında, uygulanan ısıl işlemlerin mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır [9, 10, 12, 19]. Ancak bu çalışmalar genellikle çekme, sertlik ve mikro yapı karakterizasyonuna odaklanmış; bükme gibi karmaşık deformasyon koşulları altında elde edilen mekanik performans ve özellikle üretim yöneliminin (XY, YZ, XZ) etkisiyle ilgili kapsamlı karşılaştırmalı veriler sınırlı kalmıştır [22-26]. Özellikle SLM yöntemiyle farklı yönlerde üretilen 17-4 PH malzemelerin karşılaştırmalı bükme davranışlarına ve yaşlandırma ısıl işleminin bükme deformasyon dayanımı üzerindeki etkisine dair çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Literatürde bu konuda sistematik ve detaylı bir karşılaştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada; başta havacılık, medikal ve savunma sanayi olmak üzere farklı endüstrilerde sıklıkla kullanılan 17-4 PH paslanmaz çelik alaşımının farklı yapı oryantasyonlarında (XY, YZ ve XZ) SLM eklemeli imalat yöntemiyle üretimi sonrası deformasyon dayanımları ve ısıl işlemin deformasyon dayanımına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deformasyon dayanımlarının belirlenmesi sayesinde eklemeli imalat ile üretilen 17-4 PH malzemelerin endüstriyel kullanım sırasında maruz kalabilecekleri çeşitli bükme kuvvetlerine karşı gösterecekleri davranışların tahmin edilmesi için yol göstermesi hedeflenmiştir. Ayrıca, 17-4 PH paslanmaz çeliğine uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkileri de incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

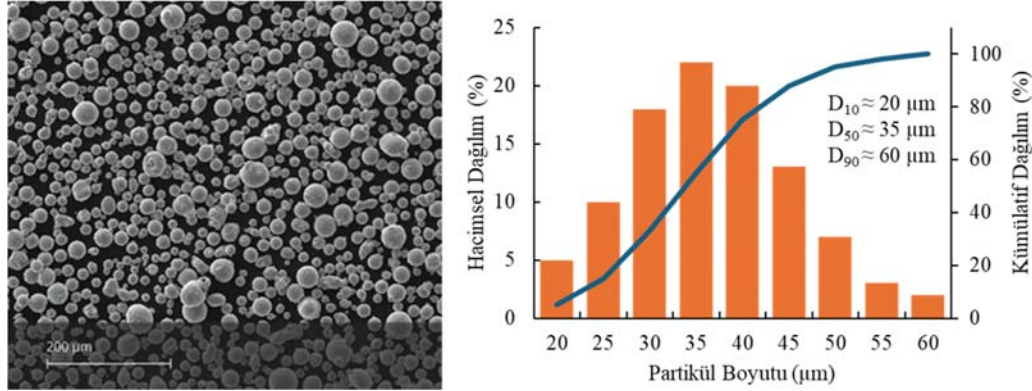
Deneyisel çalışma kapsamında; mekanik özelliklerin karakterizasyonu amacıyla üç farklı yapı oryantasyonunda çekme çubukları ve deformasyon dayanımını tespit etmek amacıyla da dikdörtgen prizma

(40x20x1 mm) numuneleri EOS M290 makinesi kullanılarak üretilmiştir. Üretimde kullanılan toz malzemenin kimyasal bileşimi F899 – 12B (Cerrahi Aletler için İşlenmiş Çelikler) ve A564M – 13 (Sıcak Haddelenmiş ve Soğuk Bitirilmiş Yaşlandırma ile Sertleşen Çelik Çubuklar ve Şekiller) standartlarında temin edilmiş ve toz malzeme boyutları 36-44 μm 'dir. Yapı oryantasyonunun, mekanik özelliklere ve deformasyon dayanımına etkisinin incelenmesi amacıyla deney numuneleri XY, YZ ve XZ olarak 3 farklı düzlemde

eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Çalışma kapsamında yapı yönlendirmesinin etkisini değerlendirmek amacıyla üç grupta hazırlanan deney numuneleri, çekme çubuklarının merkez eksenine dik gelen doğrultular ile ifade edilmiştir. Dikey olarak üretilen numuneler XY düzlemi, X eksenı doğrultusunda yatay olarak üretilen numuneler XZ düzlemi ve Y eksenı doğrultusunda yatay olarak üretilen numuneler YZ düzlemi ile tanımlanmıştır. Lazer ile sinterleme sırasında metal tozları yüksek sıcaklıklarda

Tablo 1. 17-4 PH Toz Malzemenin Kimyasal Bileşenleri (Chemical Composition of 17-4 PH Powder Material)

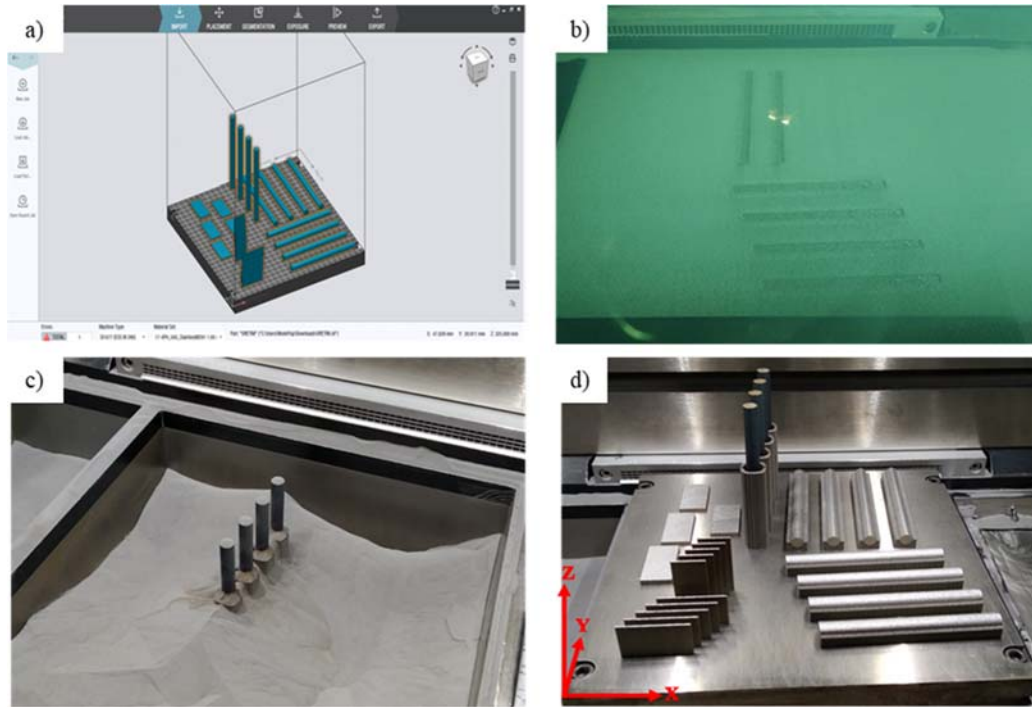
17-4 PH	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	C	P	S	Nb+Ta
%	15 – 17.5	3- 5	3- 5	<1	<1	<0.07	<0.40	<0.30	<0.45



Şekil 1. 17-4 PH tozlarının morfolojisi ve parçacık boyutu dağılımı (Morphology and particle size distribution of 17-4 PH powders)

Tablo 2. Deney numunesi üretiminde kullanılan parametre değerleri (Parameter values of specimen production)

Katman Kalınlığı (mikron)	Lazer Tarama Gücü (W)	Lazer Tarama Hızı (mm/s)	Çizgi Aralığı (mm)
40	180	654	0.11



Şekil 2. Deney Numunelerinin Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretim Adımları a) Üretim plakası CAD görseli b) Yatay numuneler c) Üretimi Tamamlanan Numuneler d) Yapı Oryantasyonunun Gösterimi (Production Steps of Additive Manufactured Specimens a) CAD image of Production plate b) Horizontal specimens c) Completed specimens d) View of Structure Orientation)

ergitilmektedir. Bu süreçte ısı genleşme ve daralma meydana gelmektedir. Yeterli destek yapılarının bulunmadığı durumlarda parça bükülebilir, çatlak oluşabilir veya yerinden kayabilmektedir. Destek yapıları, ısıyı alt katmanlara ileterek bu tür üretim hatalarını önlemektedir. Bu sebeple dik çekme çubukları kafesli bir yapı (Şekil 2-c, 2-d) içinde üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan toz malzemenin kimyasal bileşenleri Tablo 1'de, 17-4 PH tozlarının morfolojisi ve parçacık boyutu dağılımı Şekil 1'de ve deney numunelerinin üretiminde kullanılan proses parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Deney numunelerinin SLM yöntemi ile EOS M290 makinesinde üretim adımları ve yapı oryantasyonu Şekil 2'de verilmiştir.

2.1. Kondisyon-A Isıl İşlemi (Condition-A Heat Treatment)

Çökeltme sertleştirme işlemi, 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin mukavemetini artırmak için yapılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen çökeltme sertleştirme işleminde alaşımın mikro yapısında çökelti parçacıkları oluşmakta ve bu sayede malzemede sertleşme meydana gelmektedir. Genellikle çökeltme sertleştirme işlemi, birkaç farklı sıcaklıkta yapılmakta ve her bir derece malzemeye farklı mekanik özellikler sağlamaktadır. Yapılan deneysel çalışmada numunelere, 17-4 PH paslanmaz çeliğinin çözeltiye alma (solution annealing) sonrası herhangi bir yaşlandırma (aging) işlemine tabi tutulmamış çözelti tavlı hali olan Kondisyon-A ısı işlemi uygulanarak martenzitik yapıların oluşması sağlanmıştır. Deney numunelerine uygulanan çökeltme sertleştirme ısı işlemi, 1040 ± 15 °C'de 30 dakika süreyle gerçekleştirilmiş ve hava soğutma ile yaşlandırılmıştır [27-28]. Isıl işlem sürecinin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.

2.2. Malzeme Karakterizasyon Testleri (Material Characterization Tests)

Eklemeli imalat ile üretilen deney numuneleri, SLM alt plakasından tel erozyon tezgâhı (WEDM) kullanılarak kesilerek ayrılmıştır. Çekme numuneleri ASTM E-8 (Metalik Malzemelerin Çekme Testi için Standart Test Yöntemleri) [29] standardına uygun şekilde tornalanarak hazır hale getirilmiş ve tornalama sonrası herhangi bir yüzey iyileştirme işlemi uygulanmamıştır. Hazırlanan çekme testi numuneleri ve farklı düzlemlere göre üretilmiş ve hazırlanmış numuneler Şekil 4'te verilmiştir.

Eklemeli imalat sürecinde yapı oryantasyonunun ve sonrasında üretilen deney numunelerine uygulanan ısı işlemin malzemenin mekanik özelliklerine etkileri tek eksenli çekme testleri ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Deney numunelerinin mekanik özellikleri, normal oda koşullarında ve deney hızı ISO 6892-1 (Metalik

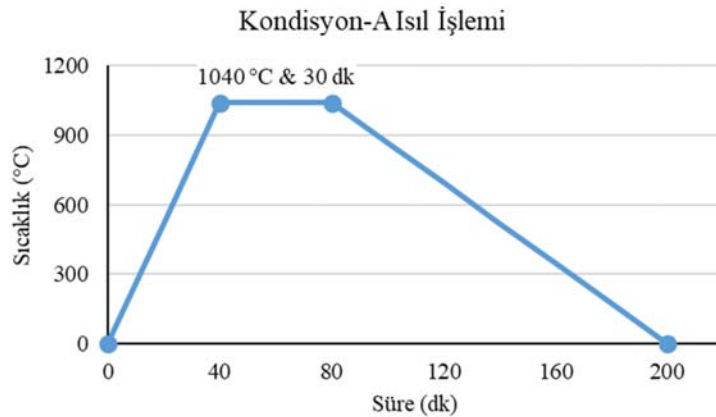
Malzemeler - Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi - Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Methodu) metod A'ya göre $1,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerilme hızında (strain rate) Zwick/Roell Retroline Z250 marka çekme test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Uzama verileri çekme test cihazı çenelerinden alınan ham veriler işlenerek elde edilmiştir. Rockwell sertlik ölçümleri ise 150 kg yük ile emco-TEST cihazında her numunenin üretim düzlemine dik olarak 3 farklı noktadan herhangi bir yüzey iyileştirme işlemi yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin porozite oranları ise Arşimet yöntemi ile teorik özgül ağırlık ve ölçülen özgül ağırlık arasındaki fark hesaplanarak elde edilmiştir. Malzemenin iç yapısında meydana gelen değişimler ise Nikon Eclipse LV150N optik mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, üretilen malzemelerin her birine XStress G2R marka-model difraktometre ile XRD testleri uygulanarak faz analizi elde edilmiştir.

2.3. Bükme İşlemi ve Geri Esnemenin Belirlenmesi (Bending Process and Determination of Spring-Back)

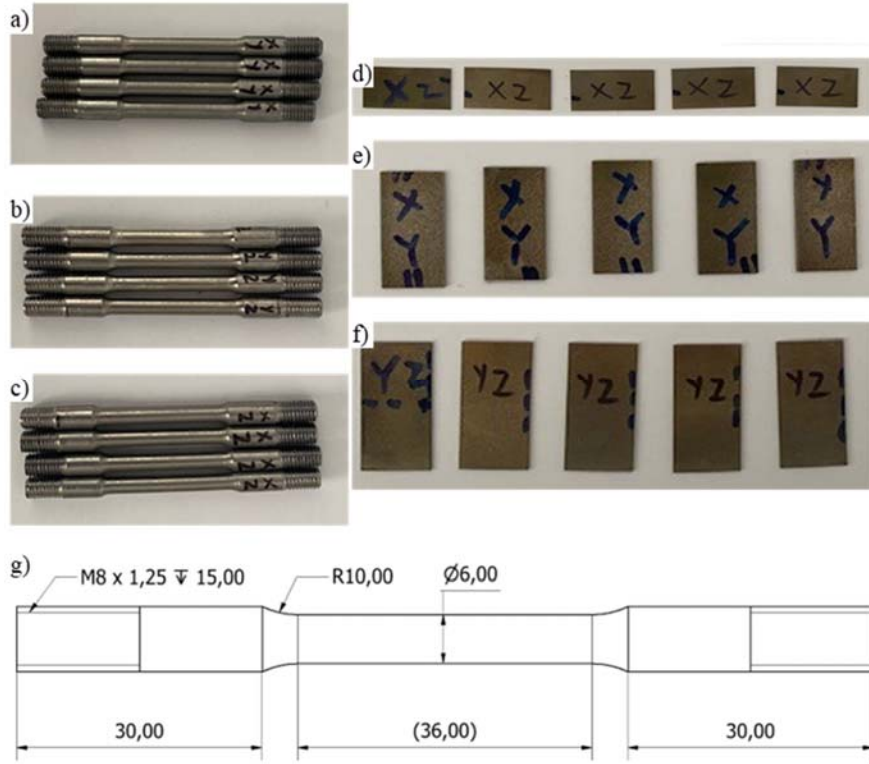
Geri esneme; şekillendirme işleminde yükün kaldırılması sonrasında kalan elastik gerilmeler sebebiyle büküm açısında meydana gelen şekil değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Malzeme üzerindeki yük kaldırıldığında, gerçekleşen şekil değişimi geri doğru açılma şeklinde ise geri esneme, ileri doğru açılma şeklinde ise negatif geri esneme veya ileri esneme olarak adlandırılmaktadır [30].

Yapılan bu çalışma da bilgisayar kontrollü ve kalibrasyonu yapılmış test düzeneği kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada üretildiği durumdaki numuneler uç yarıçapı 0 mm olan zımba ile şekillendirme kusuru olmadan 45° ve 60° açılarında bükülmüştür. Kon-A'ya yaşlandırılan numuneler de uç yarıçapı 0 mm olan zımba ile 15°, 30° ve 45° açılarında şekillendirme kusuru olmadan bükülmüştür. Deneysel çalışma ortamının ve deney düzeneğinde kalıpların görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir.

Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen üretildiği durumda olan numuneler ve Kon-A ısı işlemli numunelerin bükme deformasyonuna dayanımını gözlemlemek amacıyla bükülerek kusuruz şekillendirilen deney numunelerinde geri esneme açılarının ölçümü bilgisayar kontrollü koordinat ölçüm cihazı (Hexagon Global S CMM) kullanılarak yapılmıştır. Deney numuneleri büküm açıları bozulmayacak şekilde bir sac levha malzeme üzerine macun ile yapıştırılarak sabitlenip hazırlanmıştır. Levha üzerine sabitlenen deney numunelerin geri esnemesinde CMM probu ile malzemenin bir yüzeyine 3 noktadan temas edilerek bir düzlem elde edilmiştir. Daha sonra, aynı işlem şekillendirilmiş parçanın diğer yüzeyine uygulanmış ve ikinci düzlem elde edilmiştir. Geri esneme açısı elde edilen iki düzlem arasındaki açıdan kalıp açısının çıkarılmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3. Kondisyon-A Isıl İşlem Süreci (Condition-A heat treatment process)



Şekil 4. Deneysel Çalışma için Hazırlanan Deney Numuneleri a) XY Çekme Çubuğu, b) YZ Çekme Çubuğu, c) XZ Çekme Çubuğu, d) XZ Dikdörtgen Prizmatik, e) XY Dikdörtgen Prizmatik, f) YZ Dikdörtgen Prizmatik Deney Numunesi g) Çekme Çubuğu Ölçüleri (Test Specimens Prepared for Experimental Study a) XY Tension Test Bar, b) YZ Tension Test Bar, c) XZ Tension Test Bar, d) XZ Rectangular Prismatic, e) XY Rectangular Prismatic, f) YZ Rectangular Prismatic Test Specimen g) Tension Bar Dimensions)

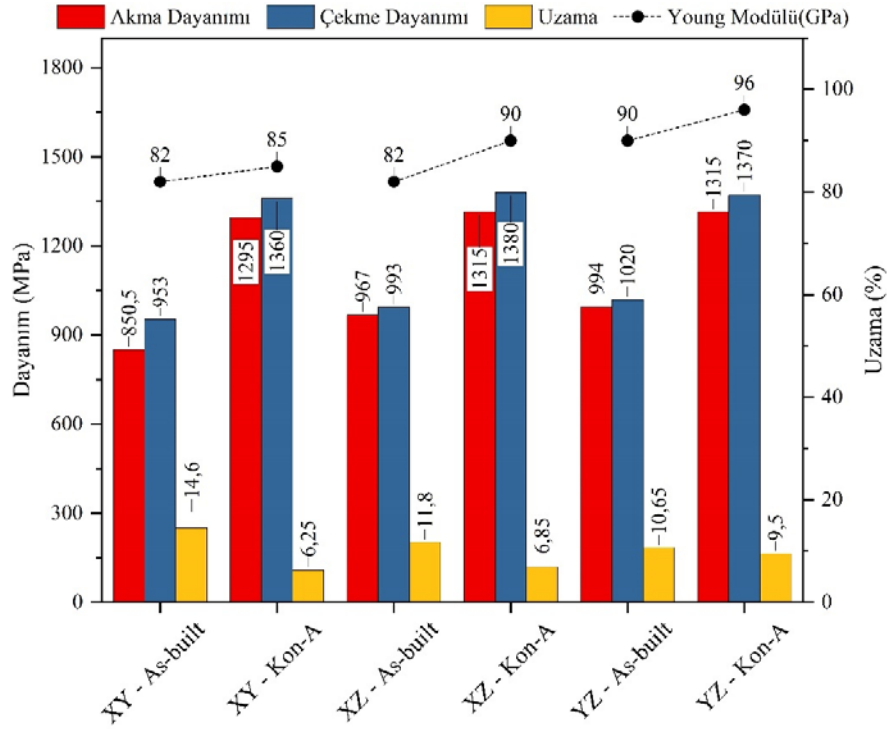


Şekil 5. Deneysel çalışma ortamı ve deney düzeneği kalıpları (Experimental work environment and experimental setup)

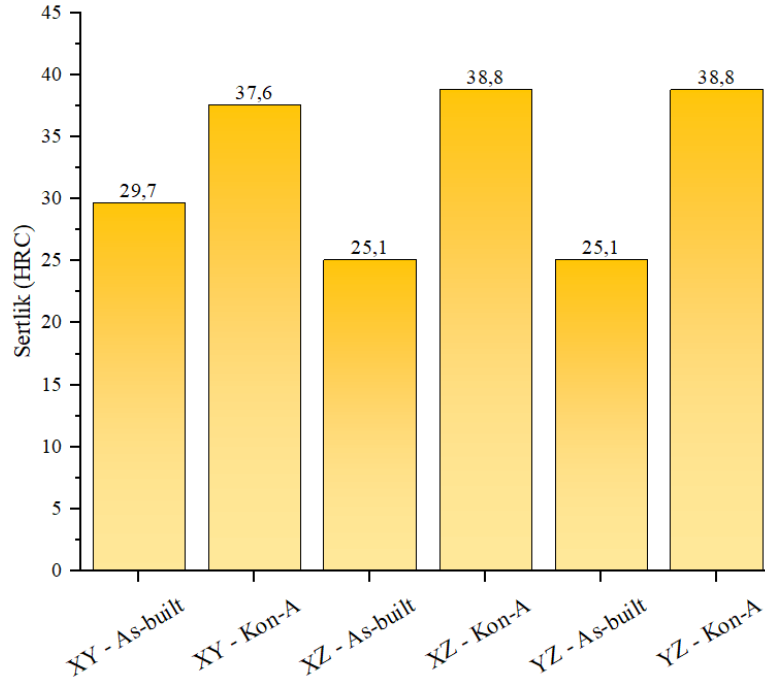
3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu çalışmada, ısıtıl işlemle üretilmiş durumdaki numunelerin ve ısıtıl işlem ile Kon-A'ya dönüştürülen 17-4 PH malzemelerin deformasyon dayanımına, malzemenin mekanik özelliklerine ve mikro yapısına olan etkileri; çekme, sertlik ölçme, V-bükme testleri ve metalurjik incelemeler ile araştırılmıştır. Üç farklı yapı oryantasyonunda üretilen

deney numuneleri iki kısma ayrılmıştır. Birinci grupta üretilmiş durumda olan numuneler diğer grupta ise Kon-A ısıtıl işlemine tabi tutulmuş numuneler olarak sınıflandırılmıştır. Malzemede meydana gelen mekanik değişimlerin belirlenmesi için gerçekleştirilen çekme testi sonuçları üretilmiş durumdaki numuneler ve Kon-A'ya göre ısıtıl işlem uygulanmış numuneler için Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Yapı Oryantasyonlarına Göre Üretildiği Durumda ve Kon-A Numunelerin Çekme Test Sonuçları
(Tensile Test Results of As-built and Con-A Specimens According to Structure Orientations)



Şekil 7. Üretildiği durumda ve Kondisyon A'ya ait Sertlik Ölçüm Değerleri (Hardness Measurement Values for As-built and Condition A)

Isıl işlem ile Kon-A'ya dönüştürülen eklemeli imalat parçalarının sertlik ölçümü her Kon-A numune için ASTM A564 (Sıcak Haddelenmiş ve Soğuk Bitirilmiş Yaşlanma ile Sertleştirilmiş Paslanmaz Çelik Çubuklar ve Şekiller için Standart Özellikler) standardına uygun olarak 3 tekrarlı şekilde gerçekleştirilmiş ve ısıl işlem prosesinin uygulamasında bir hata olmadığı gözlemlenmiştir.

Üretildiği durumda ve Kon-A numunelerin ölçülen sertlik değerleri Şekil 7'de verilmiştir.

Ölçüm sonuçlarından, XY düzleminde SLM yöntemiyle elde edilen ve üretildiği durumda olan numunelerde akma dayanımı 850 MPa ve maksimum çekme dayanımı da 950 MPa, uzama miktarı $14,5 \pm 0,2$

ve sertlik 29,7 HRC olarak ölçülmüştür. Ölçülen mekanik değerlerin literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile %99 oranında benzerlik göstermekte [31-33] ancak bazı çalışmalarda da %5 ile %10 arasında değişen sapmaların olduğu gözlemlenmiştir [34-37]. XZ düzleminde SLM yöntemiyle üretilen ve üretildiği durumdaki numunelerde akma dayanımı 965 ± 10 MPa ve maksimum çekme dayanımı 992 ± 8 MPa, uzama miktarı $\%12 \pm 3$ ve sertlik 25,1 HRC olarak ölçülmüştür. Bulunan değerler literatür ile %95 oranında benzerlik içerdiği [38] ancak literatürde verilen bazı çalışmalar ile de %40-%50 oranında farklılıklar içerdiği gözlemlenmiştir [33-35]. YZ düzleminde SLM yöntemiyle üretilen ve üretildiği durumda olan numunelerde akma dayanımı 965 ± 10 MPa ve maksimum çekme dayanımı 994 ± 6 MPa, uzama miktarı $\%10 \pm 1,5$ ve sertlik 25,1 HRC olarak ölçülmüştür.

Yaşlandırma işlemi sonucunda XY düzleminde üretilen numunelere uygulanan çekme testi sonunda akma dayanımı 1300 ± 10 MPa, maksimum çekme dayanımı 1360 MPa, uzama miktarı $6,3\% \pm 0,5$ ve sertlik de 37,6 HRC olarak ölçülmüştür. XZ düzleminde üretilen numunelerin çekme testi sonucunda akma dayanımı 1315 ± 15 MPa, maksimum çekme dayanımı 1380 ± 10 MPa, uzama miktarı $6,8\% \pm 0,5$ ve sertlik 38,8 HRC olarak ölçülmüştür. YZ düzleminde akma dayanımı 1315 ± 25 MPa ve maksimum çekme dayanımı 1370 ± 30 MPa, uzama miktarı $9,5\% \pm 0,5$ ve sertlik 38,7 HRC olarak ölçülmüştür. XY düzlemi için elde edilen sonuçların literatürde yapılan test sonuçlarıyla benzerlik görülmesine rağmen YZ düzleminde üretilen numuneler için akma ve maksimum çekme dayanım özelliklerinde sapmalar gözlemlenmiştir [39]. Literatürde yapılan çalışmalarda deney numunelerinin genellikle tek XY düzleminde basılan numuneler üzerinde gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Deney numunelerinin mekanik özelliklerinin literatürdeki çalışmalarla benzerlikler gösterirken [40], bazı çalışmalarından ise farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir [41]. Mekanik özelliklerde gözlemlenen %5-10 arasındaki farklılıkların ise ısıtma işlemi sonrası gerçekleştirilen yaşlandırma sürecinde kullanılan parametre farklılığından meydana geldiği düşünülmektedir. Üretildiği haldeki ve ısıtma işlemli numunelerin mekanik özelliklerindeki farklılıklar kırılma yüzeylerinin incelenmesi ile de gözlemlenmiştir. Optik görüntüleme ile üretildiği durumdaki ve ısıtma işlemi tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Çekme testi ve görsel muayene sonucu üretildiği gibi olan numunelerin ısıtma işlemli numunelere göre daha sünek kırılma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Üretildiği durumdaki ve ısıtma işlemli parçalara ait optik görüntüler Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8-b'de bir miktar ergimemiş toz bölgeleri olduğu gözlemlenebilmektedir. Bu durum numunelerde porozite yaratma eğilimi bulunan düşük miktarda eksik ergime (lack of fusion) sorunu olduğunu göstermektedir [42, 43]. Bu bulgu, optik mikroskop incelemelerinde de gözlemlenmiş ve not edilmiştir (Şekil 13). Bu

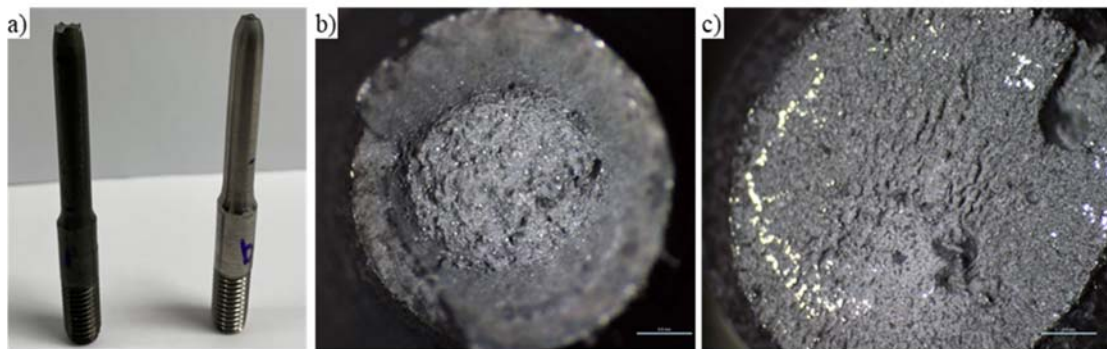
açıdan bakıldığında her ne kadar istenilen mekanik özellik değerleri SLM üretimi ile sağlanmış olsa da imalat parametrelerinde ek optimizasyonlar ile eniyileme çalışmaları yapılabileceği düşünülmektedir.

Bükme deformasyonuna uğrayan malzemelerin üzerindeki yük kaldırıldığında meydana gelen geri esneme davranışını, malzemelerin sahip olduğu artık gerilme miktarı önemli oranda etkilemektedir. Artık gerilmelerin miktarı elastik toparlanmayı artırarak geri esnemeyi artırmaktadır [44-46]. Eklemleri imalat ile üretilen parçaların deformasyon dayanımlarını tespit etmek amacı ile bükme deformasyonuna tabi tutulması sonucunda; üretildiği durumda ve ısıtma işlemli numunelerde meydana gelen geri esneme verilerine ait grafik Şekil 9'da verilmiştir.

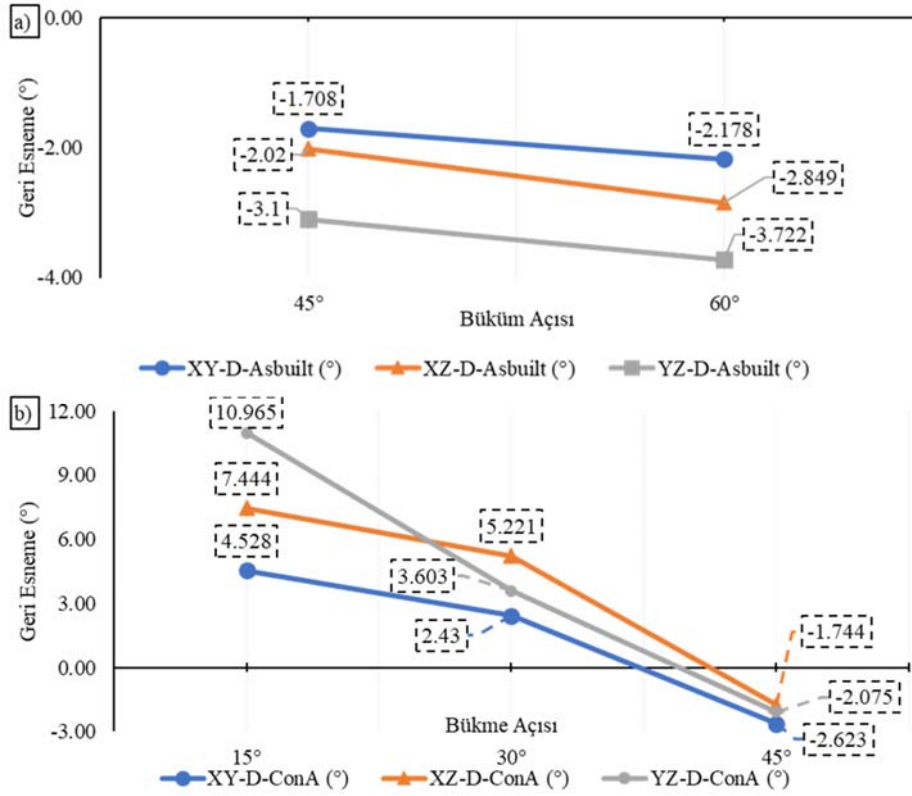
Tüm yapı oryantasyonlarında üretildiği durumdaki numunelerde ve ısıtma işlemli numunelerde bükme deformasyonuna karşı malzemelerin verdiği tepkiler incelenmiştir. Üretildiği durumda olan numunelerin 15° ve 30° gibi düşük büküm açılarında çok yüksek geri esneme davranışı gösterdiği ve bükme işleminin anlamlı bir etki etmediği gözlemlenmiştir. Öte yandan, üretildiği durumda olan numunelerin en fazla 60° açığa kadar çatlama ve kırılma olmadan deforme edilerek şekillendirilebildiği; ısıtma işlemli numunelerin ise en fazla 45° açığa kadar şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Ancak, Kon-A numunelerde 60° ve üzeri açılarda çatlama ve kırılma olduğu belirlenmiştir. Isıtma işleminin malzemenin bükme deformasyonuna karşı dayanım açısından olumsuz etki yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çatlama ve kırılma gibi şekillendirme kusuru olmadan başarılı şekillendirilebilen numunelerde geri esneme olayının gerçekleştiği belirlenmiştir. Geri esneme değerinin kalıp açısındaki artışa bağlı olarak azaldığı ve ileri esnemeye geçtiği tespit edilmiştir. Üretildiği durumdaki numunelerde genellikle ileri esneme gözlemlenmesinin nedeni malzemenin mekanik özelliklerindeki zayıflıktan kaynaklanmaktadır.

Yapı oryantasyonunda da en düşük geri esneme değerinin $2,4^\circ$ ile XY oryantasyonunda Kon-A numunelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. En büyük geri esneme değerlerinin ise $10,96^\circ$ ile YZ oryantasyonunda Kon-A numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir. Üretildiği durumda olan numunelerde 60° üstü kalıp açılarında, ısıtma işlemli numunelerde de 45° üstü kalıp açılarında oluşan deformasyon kusurlarının görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.

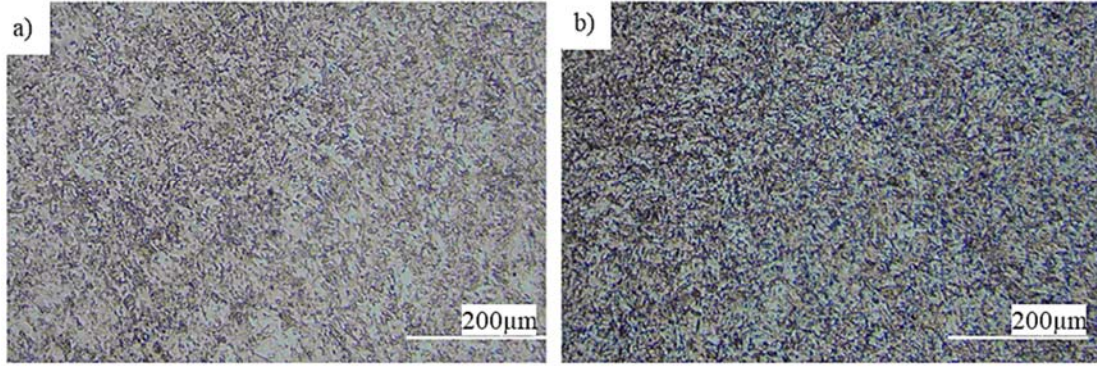
Mikroyapı incelemeleri için deney numunelerinden metalografik hazırlama işlemleri yapılmıştır. İlk aşamada ince numunelere 320 ve 500 grit Silisyum Karbür bazlı zımparalama işlemi uygulanmış, son olarak da 3 mikron elmas solüsyon ile mekanik parlatma işlemi yapılmıştır. Etkin ve uygun dağılayıcıyı ve dağılama süresi ile ilgili de



Şekil 8. Deney numunelerinde kırılma yüzey görüntüleri; a) Optik Görüntüleme Alınan Numuneler, b) Üretildiği durumda Numune, c) Isıtma İşlem Görmüş Numuneler
(Fracture surface images of test specimens; a) Optically Imaging Specimens, b) Specimen in the as-built, c) Heat-Treated Specimens)



Şekil 9. Yapı Oryantasyonuna Göre Geri Esneme Açılırları; a) Üretildiği durumda b) Isıl İşlemlili (Kon-A) (Springback Angles According to Structure Orientation; a) As-built b) Heat Treated (Con-A))

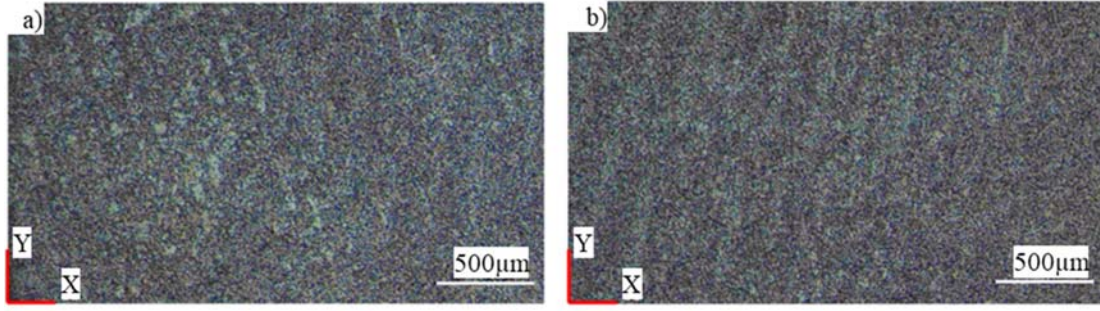


Şekil 11. a) XY düzlemi üretildiği durumda numune optik mikroskop görüntüsü, b) XY düzlemi ısıtıl işlemlili numune optik mikroskop görüntüsü
(a) Optical microscope image of the specimen in the case of XY plane production, b) Optical microscope image of the specimen with heat treatment in the XY plane)

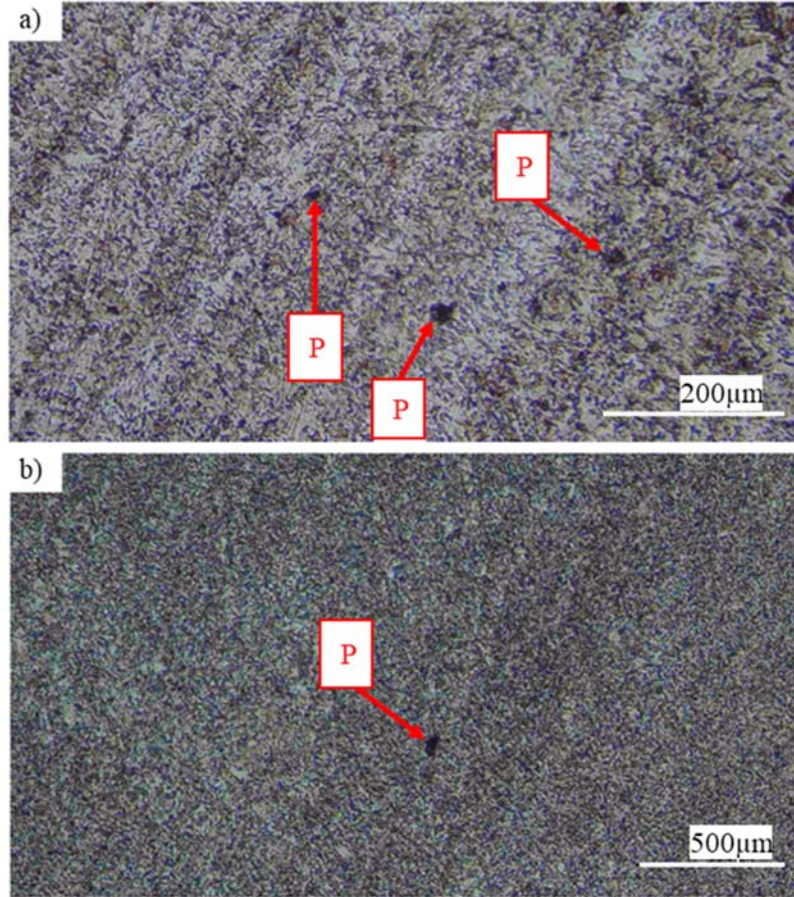
pikral (%4 Pikrik asit ($C_6H_3N_3O_7$) ve Etil alkol(C_2H_5OH)), nital (%2-5 arasında Nitrik asit (HNO_3) ve Metanol (CH_3OH)) ve keller (%2 hidrojen florür (HF), %3-6 hidroklorik asit (HCl), %5-10 nitrik asit (HNO_3) ve geri kalan kısmı distile su) bazlı denemeler yapılmış ve denemeler sonucunda en iyi sonucun pikral dağlayıcı ve 90 saniye dağlama süresi ile elde edildiği tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler mikroyapı analizleri için parlak alan aydınlatması altında optik mikroskopta incelenmiştir.

Numunelerin mikroyapı incelenmesinde içeriğin yoğun bir şekilde martenzit ve kalıntı östenit ihtiva ettiği görülmektedir. Kalıntı östenitin hacimsel oranı tozun özellikleri veya kullanılan koruyucu

gazın çeşidine göre ciddi oranda değişebilmektedir [47, 48]. SLM prosesinde diğer proseslere göre daha yüksek katılaşma ve soğuma hızları nedeniyle yarı kararlı (metastable) östenit fazı daha fazla oluşmakta ve martenzit oluşumu baskılanmaktadır [49]. Hacimsel oran olarak %20'ye kadar kalıntı östenit içeren SLM prosesi ile üretilmiş 17-4 PH malzemeler literatürde verilmiştir [50]. Çalışmada kalıntı östenitin hacim oranı özellikle ısıtıl işlemsiz durum için yüksektir. Bu olgu yüksek büyütmelerde daha belirgin olarak görülmektedir. Isıl işlem sonrası kalıntı östenit miktarı oransal olarak azalmaktadır (Şekil 11). Isıl işlem prosesi, kalıntı östenitin yüksek sıcaklıkta homojenize olmasını ve martenzite dönüşmesini sağlayarak malzemenin mukavemet değerlerini artırmaktadır.



Şekil 12. a) XY düzlemi kalıntı östenit adacıklarında yönelme, b) XY düzlemi kalıntı östenit adacıklarında yönelme (XY plane orientation of residual austenite islands, b) XY plane orientation of residual austenite islands)



Şekil 13. a) XZ düzlemi porozite yapıları, b) XY düzlemi porozite yapıları (a) Porosity structures in the XZ plane, b) Porosity structures in the XY plane)

Ayrıca mikroyapı analizlerinden XY düzlemindeki numunelerde az da olsa bir yönelim olduğu gözlemlenmiştir. Martenzitik yapı için olmasa da kalıntı östenit adacıklarında doku oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 12).

Doku oluşumu malzemeye bir homojenizasyon ısı işlemi uygulanmadığı için ısı işlem sonrası da gözlemlenebilmektedir. Eklemeli imalat proseslerinde taneciklerin yönelimi katılma oranı, sıcaklık dağılımı vb. birçok etkene bağlı olmaktadır. Fakat en baskın etki olarak sıcaklık dağılımının belirli bir yönde olmasının tanecik yapısını da yönlendirdiği, bu durumun da mikroyapıda bir anizotropi oluşturduğu literatürde verilmiştir [51].

SLM yönteminde de tek yönlü uzamış taneciklerin (columnar grains) baskın bir içyapı oluşturduğu gözlemlenmiştir [51]. Ayrıca, mikroyapı incelemelerinde optik mikroskop görüntülerinde porozite olarak değerlendirilen yapılar da gözlemlenmiştir (Şekil 13).

Arşimet yöntemi ile belirlenen porozite oranları XY, YZ ve XZ yapı oryantasyonu için sırasıyla %0,0026; %0,0143 ve %0,028 olarak belirlenmiştir. Porozite yapıları çoğunlukla nodüler (küresel) karakterdedir. Bu tip porozitelerin gerek eksik füzyon gerekse çekinti vb. nedenlerle oluşabildiği literatürde belirtilmiştir. Çalışmada yapılan mikroyapı incelemelerinde porozite yapılarının birbirinden mekânsal olarak bağımsız ve bağlantısız olarak tespit edilmeleri eksik

Tablo 3. XRD sonuçları (XRD results)

Üretildiği durumdaki Numune	Sıra No	Faz	HKL	2 θ	R	Alan
	1	Ferr_1	211	156.4	183.1	447,631.9
	2	Ferr_2	200	106.1	18.9	72,157.6
	3	Aust_1	220	130.0	51.5	47,575.8
	4	Aust_2	200	80.0	26.4	31,816.2
		Faz	HKL	Alan	RA (%)	
	1	Ferr_1 / Aust_1	211 / 220	447,632/47,576	27.4	
	2	Ferr_1 / Aust_2	211 / 200	447,632/31,816	33.0	
	3	Ferr_2 / Aust_1	200 / 220	72,158/47,576	19.5	
	4	Ferr_2 / Aust_2	200 / 200	72,158/31,816	24.0	
Östenit İçeriği: 25.4 $\pm$ 5.0 %						
Kondisyon-A Numune	Sıra No	Faz	HKL	2 θ	R	Alan
	1	Ferr_1	211	156.4	183.1	521,253.8
	2	Ferr_2	200	106.1	18.9	73,990.0
	3	Aust_1	220	130.0	51.5	11,934.4
	4	Aust_2	200	80.0	26.4	27,220.7
		Faz	HKL	Alan	RA (%)	
	1	Ferr_1 / Aust_1	211 / 220	521,254 / 11,934	7.5	
	2	Ferr_1 / Aust_2	211 / 200	521,254 / 27,221	26.6	
	3	Ferr_2 / Aust_1	200 / 220	73,990 / 11,934	5.6	
	4	Ferr_2 / Aust_2	200 / 200	72,158/31,816	24.0	
Östenit İçeriği: 15.7 $\pm$ 8.9 %						

füzyondan kaynaklanmaktadır. Porozite yapılarının maksimum Feret çapı değeri yaklaşık 30 μ m olarak ölçülmüştür. X-Işınlı Difraktometresi (XRD), malzemelerin kristal yapısını incelemek için kullanılan güçlü bir analitik tekniktir. Temel olarak XRD, bir malzemenin atom düzeyindeki yapısını ortaya çıkarmak için X-ışınlarının madde ile etkileşimini kullanmaktadır. Deney numunelerinin XRD analizi ile incelenmesinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen veriler, malzeme içindeki α -demir ve östenit fazlarının varlığını ve dağılımını ortaya koymaktadır. Bilindiği gibi martenzit fazı da yoğun olarak α -demir ile eşdeğer pik değerleri üretmektedir [52]. α -demir/martenzit fazlarının 211, 200 ve östenit fazlarının 220, 200 düzlemleri üzerinde belirgin zirveler gösterdiği gözlemlenmiştir. α -demir ve östenit fazlarının yüzey alanları ve ilgili ayrı fazların yüzey yüzdeleri hesaplanmış ve bunlar, fazların birbirine oranlanması ile belirlenmiştir. Üretildiği durumdaki numunelerde östenit içeriğinin %25,4 $\pm$ %5,0 oranında olduğu tespit edilmiştir. Kon-A numunelerinin XRD incelemesinde, malzemenin ferritik ve östenitik fazlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ferrit fazları için 211 ve 200, östenit fazları için 220 ve 200 düzlemlerinde karakteristik zirveler gözlemlenmiştir. Fazların alan analizine göre, ferrit ve östenit arasında belirli bir faz dağılımı tespit edilmiştir. Özellikle, ferrit ve östenit fazlarının yüzey alanları oranlanarak, östenit içeriğinin %15,7 $\pm$ %8,9 olduğu hesaplanmıştır. XRD testlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. 17-4PH malzemesinin çökelti sertleşmesindeki ana unsurun bakırca zengin çökelti fazlarının (FCC-Cu particles) oluşumu olduğu bilinmektedir [53, 54]. Fakat yaşlandırma işlemi anında oluşan bu çökelti nanometre ebatlarında oluşmaktadır ve bu nedenle standart optik mikroskopi yöntemi ile gözlemlenebilmeleri mümkün değildir [55, 56]. Çökelti fazlarının büyüklüklerinin ve dağılımlarının tespiti için geçirimli elektron mikroskobu incelemeleri (TEM) yapılması

planlanmış ve bu analizler gelecek dönem çalışması olarak kurgulanmıştır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, üç farklı yapı oryantasyonunda SLM yöntemiyle üretilen 17-4 PH Paslanmaz Çelik malzemenin mekanik özelliklerine, mikroyapısına ve deformasyon dayanımına, üretim proses parametreleri ve ısıtılma işleminin etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında farklı yapı oryantasyonlarında (XY, YZ ve XZ) deney numuneleri üretilmiş ve daha sonraki aşamada üretildiği durumda olan ve ısıtılma işlemi ile Kon-A şartına getirilmiş numunelerin mekanik testleri ile çekme, akma dayanımı ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yapı oryantasyonunun mekanik özellikleri belirgin bir şekilde etkilediği mekanik özelliklerindeki farklılıklar ile gözlemlenmiştir. Üretildiği haldeki numunelerde en düşük akma dayanımı XY düzleminde üretilen numunede 850MPa, en yüksek olarak akma dayanımı YZ düzleminde üretilen numunede 1000MPa olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca bu numunelerde en büyük uzama miktarı, XY düzleminde üretilen numunede %14,5 ve en düşük uzama miktarı da XZ düzleminde üretilen numunede %9 olarak gerçekleşmiştir.
- Isıl işlem sonucunda Kon-A'ya dönüştürülen deney numunelerinin mekanik özelliklerinde de belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Kon-A'ya göre ısıtılma işlemi görmüş numunelerde martenzit artışına bağlı olarak mekanik özelliklerinin arttığı bu nedenle en düşük akma dayanımı 1290MPa ile XY düzleminde, en yüksek akma dayanımı 1340 MPa ile YZ düzleminde üretilen numunelerde

gerçekleştirmiştir. Kon-A'ya göre ısıtılma işlem görmüş numunelerde yapılan sertlik ölçüm testlerinde sertlik değeri XY düzleminde 37,6 HRC ve XZ, YZ düzleminde 38,8 HRC olarak ölçülmüştür.

- Mikroyapı analizi sonucunda, deney numunelerinin mikroyapısında baskın olarak martenzit ve kalıntı östenit fazları gözlemlenmiştir. Bu durumun yüksek katılaşma ve soğuma hızlarından dolayı daha fazla yarı kararlı östenit fazının oluşumuna ve martenzit dönüşümünün baskılanmasına yol açtığı tespit edilmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numunelerde yüksek oranda bulunan kalıntı östenit, ısıtılma işlem sonrası martenzite dönüşerek malzemenin mukavemetini artırmaktadır.
- Yapılan XRD analizleri sonucunda, ısıtılma işlem öncesi $25,40 \pm 5,0$ olarak ölçülen kalıntı östenit hacim oranı ısıtılma işlem sonrası ise $15,70 \pm 8,9$ olarak tespit edilmiştir. Kalıntı östenitin hacim oranı yaklaşık %45 oranında azalarak martenzit oranı artmıştır. Ayrıca, kalıntı östenit bölgelerinin uzaysal olarak değişken bir dağılıma sahip olduğu belirlenmiştir.
- Üretildiği durumdaki numunelerde ve daha sonra ısıtılma işlem ile Kon-A'ya dönüştürülen numunelerde deformasyon dayanımında da farklılıklar gözlemlenmiştir. Üretildiği durumda olan numuneler 60° açıya kadar başarılı bir şekilde şekillendirilebilirken, Kon-A numuneler en fazla 45° açıya kadar şekillendirilebilmiştir. V-bükme ile deformasyon sonucu üretildiği durumda olan numunelerde negatif geri esneme en düşük XY düzleminde 45° açıda, en fazla negatif geri esnemenin de YZ düzleminde 60° açıda olduğu tespit edilmiştir. 15° ve 30° kalıp açılarında yapılan V-bükme deformasyonunda Kon-A numunelerde geri esnemenin olduğu ancak 45° 'de ise negatif geri esnemenin olduğu tespit edilmiştir. 15° ve 30° V-bükmelerde ise geri esnemenin en az olduğu düzlemin XY, en fazla olduğu düzleminde YZ olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Er A.O., Aydın O.M., Investigation of mechanical and physical properties of PLA and steel-added PLA filament materials used in melted filament manufacturing method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (2), 1285-1302, 2023.
2. Özbay Kısasöz B., Tütük İ., Koç E., Investigation of wear behavior of PA 12 matrix ceramic reinforced composites produced by selective laser sintering method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (2), 1029-1036, 2023.
3. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, New York, A.B.D., 2015.
4. Kartal Y., Daş M.T., An overview of the evolution of additive manufacturing in sensor and biomaterial production, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (4), 2191-2204, 2023.
5. Thompson M.K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R.I., Gibson I. et al., Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints, CIRP Ann., 65 (2), 737-760, 2016.
6. Bandyopadhyay A., Bose S., Additive Manufacturing, Taylor & Francis, CRC Press 2015.
7. Gebhardt A., Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing, Hanser Publishers, 2012.
8. ASM International, ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams, ASM International, 2025.
9. ASM International, ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, 2024.
10. Viswanathan U.K., Tewari R., Dey G., Precipitation hardening in Monel K500, 17-4 PH stainless steel and 350 Grade Maraging Steel, Trans. Indian Inst. Met., 59, 107-121, 2006.
11. SAE International, AMS 5604: Steel, Corrosion-Resistant, Sheet, Strip, and Plate 16.5Cr - 4.0Ni - 4.0Cu - 0.30Cb Solution Heat Treated, Precipitation Hardenable, 2013.
12. Davis J.R. (Ed.), Stainless Steels, ASM International, 1994.
13. Callister W.D., Materials Science and Engineering: An Introduction, 7. Baskı, John Wiley & Sons, 2007.
14. Hecker S.S., Hecker S.S., Stout M.G., Staudhammer K.P., Smith J.L., Effects of Strain State and Strain Rate on Deformation-Induced Transformation in 304 Stainless Steel: Part I. Magnetic Measurements and Mechanical Behavior, Metall. Trans. A, 13 (4), 619-626, 1982.
15. Abbaschian R., Reed-Hill R.E., Physical Metallurgy Principles, 4. Baskı, Cengage Learning, Stamford, USA, 2009.
16. Oberg E. et al., Machinery's Handbook, 31. Baskı, Industrial Press, Connecticut, USA, 2020.
17. Folkhard E., Welding metallurgy of stainless steels, Springer, Wien, Austria, 2012.
18. Person P., Mohan N.K., Pandey S., Additive Manufacturing: Advanced Materials and Design Techniques, Taylor & Francis, 2023.
19. Jadhav M., Mansoura A., Dehghan S., Barka N. et al., Investigation into the effect of process parameters on density, surface roughness, and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 130, 2547-2562, 2024.
20. Gong H., Rafi K., Gu H., Starr T., Stucker B., Analysis of Defect Generation in Ti-6Al-4V Parts Made Using Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes, Addit. Manuf., 1 (4), 87-98, 2014.
21. Li C., Liu Z.Y., Fang X.Y., Guo Y.B., Residual Stress in Metal Additive Manufacturing, Procedia CIRP, 71, 348-353, 2018.
22. Trzepieciniski T., Lemu H.G., Effect of computational parameters on springback prediction by numerical simulation, Metals, 7(9), 380, 2017.
23. Thipprakmas S., Phanitwong W., Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique, Mater. Des., 32 (8-9), 4430-4436, 2011.
24. Ahmed G.M.S., Ahmed H., Mohiuddin M.V., Sajid S.M.S., Experimental Evaluation of Springback in Mild Steel and its Validation Using LS-DYNA, Procedia Mater. Sci., 6, 1376, 2014.
25. Garcia-Romeu M.L., Ciurana J., Ferrer I., Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work, J. Mater. Process. Technol., 191, 174-177, 2007.
26. Krinninger M., Opritescu D., Golle R., Volk W., Experimental investigation of the influence of punch velocity on the springback behavior and the flat length in free bending, Procedia CIRP, 41, 1066-1071, 2016.
27. ASTM A564/A564M, Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Age-Hardening Stainless Steel Bars and Shapes, 2021.
28. Li Cong et al., Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 17-4PH stainless steel manufactured by laser-powder bed fusion, J. Mater. Res. Technol., 26, 5707-5717, 2023.
29. ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
30. Aydin, K., et al. Increasing of Deformation Strength: Evaluating of Local Heating on Selective Laser-Melted AlSi10Mg, J. Mater. Eng. Perform., 34, 19895-19901, 2025.
31. Hsu T.-H. et al., Microstructure and property of a selective laser melting process induced oxide dispersion strengthened 17-4 PH stainless steel, J. Alloys Compd., 803, 30-41, 2019.
32. Weaver J.S. et al., The effects of particle size distribution on the rheological properties of the powder and the mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel, Addit. Manuf., 39, 101851, 2021.
33. Nalli F., Cortese L., Concli F., Ductile damage assessment of Ti6Al4V, 17-4PH and AlSi10Mg for additive manufacturing, Eng. Fract. Mech., 241, 107395, 2021.
34. Yin D., Gienger, E.B., Croom, B.P. et al. Variability in mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel produced by multiple vendors: insights for qualification. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 128, 3093-3103, 2023.
35. Mower T.M., Long M.J., Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials, Mater. Sci. Eng., A, 651, 198-213, 2016.
36. Burns D.E. et al., Investigating Additively Manufactured 17-4 PH for Structural Applications, J. Mater. Eng. Perform., 28 (8), 4943-4951, 2019.
37. Huang R. et al., Additive manufacturing of 17-4PH stainless steel: Effect of heat treatment on microstructure evolution and strengthening behavior, Mater. Sci. Eng., A, 908, 146770, 2024.

38. Yadollahi A. et al., Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel, *Int. J. Fatigue*, 94, 218-235, 2017.
39. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, SM, Elwany, A, & Bian, L. Mechanical and Microstructural Properties of Selective Laser Melted 17-4 PH Stainless Steel. *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2A: Advanced Manufacturing*, Houston, Texas, USA. November 13–19, 2015. V02AT02A014.
40. Sabooni S. et al., Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties, *Addit. Manuf.*, 46, 102176, 2021.
41. Do Yoo W. et al., Study on the Microstructure and Mechanical Properties of 17-4 PH Stainless Steel Depending on Heat Treatment and Aging Time, *Solid State Phenomena*, 118, 15-20, 2006.
42. Stefania C., and Quirico S., On the Lack of Fusion Porosity in L-PBF Processes, *Procedia CIRP*, 112, 352-357, 2022.
43. Cheng Zhang et al., Characterization of Porosity in Lack of Fusion Pores in Selective Laser Melting Using the Wavefunction, *Mater. Res. Express*, 10, 016501, 2023.
44. Yifeng Li et al., Effect of Mechanical Properties, Microstructure and Residual Stress on the bending Springback Behavior of High-Strength Al–Mg–Si–Cu Alloy Tubes, *J. Mater. Res. Technol.*, 28, 3609-3618, 2024.
45. Min Zhang et al., Residual Stress Analysis and Its Effect on Springback for Multi-Step Pressbrake Bending, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf.*, 237 (12), 1787-1797, 2022.
46. Quang V.D., The Optimization of Rotary Bending Die Process: Criteria for the Metal Sheet Angles and Springback Effects, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15 (1), 20553-20558, 2025.
47. Lawrence E. Murr et al., Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting, *J. Mater. Res. Technol.*, 1 (3), 167-177, 2012.
48. Rafi, H.K., Pal, D., Patil, N. et al. Microstructure and Mechanical Behavior of 17-4 Precipitation Hardenable Steel Processed by Selective Laser Melting, *J. Mater. Eng. Perform*, 23, 4421–4428, 2014.
49. Mahmoudi M. et al., Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel, *Rapid Prototyping J.*, 23 (2), 280-294, 2017.
50. LeBrun T. et al., Effect of retained austenite on subsequent thermal processing and resultant mechanical properties of selective laser melted 17–4 PH stainless steel, *Mater. Des.*, 81, 44-53, 2015.
51. Ponnusamy P. et al., A study of tensile behavior of SLM processed 17-4 PH stainless steel, *Mater. Today Proc.*, 45, 4531-4534, 2021.
52. Cong, Z.H., Jia, N., Sun, X. et al., Stress and Strain Partitioning of Ferrite and Martensite During Deformation, *Metall. Mater. Trans. A.*, 40, 1383–1387, 2009.
53. Hideto Kimura, Precipitation Behavior and 2-step Aging of 17-4PH Stainless Steel, *Tetsu-to-Hagane*, 86 (5), 343-348, 2000.
54. Bing Bai et al., Effect of precipitates on hardening of 17-4PH martensitic stainless steel serviced at 300 °C in nuclear power plant, *Ann. Nucl. Energy*, 154, 108123, 2021.
55. Kun Li et al., Homogenization timing effect on microstructure and precipitation strengthening of 17–4PH stainless steel fabricated by laser powder bed fusion, *Addit. Manuf.*, 52, 102672, 2022.
56. Sabooni S. et al., Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties, *Addit. Manuf.*, 46, 102176, 2021.

