

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DÜŞÜK ERİME SICAKLIĞINA SAHİP METAL ALAŞIMLARI İÇİN ÜÇ
BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI**

Mustafa Kemal GÜLSEREN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2022

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DÜŞÜK ERİME SICAKLIĞINA SAHİP METAL ALAŞIMLARI İÇİN ÜÇ
BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI**

Mustafa Kemal GÜLSEREN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK ERİME SICAKLIĞINA SAHİP METAL ALAŞIMLARI İÇİN ÜÇ
BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI**

Mustafa Kemal GÜLSEREN
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2022

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÜŞÜK ERİME SICAKLIĞINA SAHİP METAL ALAŞIMLARI İÇİN ÜÇ
BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI**

Mustafa Kemal GÜLSEREN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 27/06/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Volkan KOVAN (Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe TEZEL

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZENÇ

ÖZET

DÜŞÜK ERİME SICAKLIĞINA SAHİP METAL ALAŞIMLARI İÇİN ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI

Mustafa Kemal GÜLSEREN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Haziran 2022; 31 sayfa

Eklemeli imalat, dijital ortamdaki modeli, katmanlar halinde malzeme biriktiren üç boyutlu yazıcılar ile fiziksel bir ürüne dönüştüren teknolojidir. Eklemeli imalat sistemleri, üretimde sağladığı tasarım özgürlüğü sayesinde, havacılık ve uzay sektöründe oldukça önem arz etmektedir. Sarf malzemeleri genellikle çelik veya titanyum alaşımları olan bu sektörde, yüksek termal enerji üretebilen ve çevre koşullarını kontrol edebilen üç boyutlu yazıcılar gerekmektedir. Dolayısıyla bu sistemler oldukça yüksek maliyetli olmaktadır.

Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların eklemeli imalatı için daha basit donanımlara sahip ve düşük maliyetli sistemler kullanılabilmektedir. Ergiyik biriktirme tekniği (FDM) ile, düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımlardan, iyi mekanik özelliklere sahip ve iletken ürünler elde etmek mümkündür. Bu çalışmada, bir FDM tipi üç boyutlu yazıcı ile tek süreçte tamamen metal ürünlerin imalatı hedeflenmiştir. Kimyasal bileşimi Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 olan alaşımlardan numuneler üretilmiştir. 3B yazıcıda üretilen ve döküm ile üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Çalışma sonucu elde edilen verilere göre 3B yazıcıda üretilen metal numunelerin yüzey pürüzlülüğünün yöne bağlı olarak büyük oranda değişiklik gösterdiği saptanmıştır. 3B yazıcıda üretilen numunelerin, döküme oranla daha düşük çekme dayanımına sahip olmasına karşın, kopmadan önce daha fazla uzama gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için, 3B yazıcıda üretilen numunelerin, döküm numunelere göre daha yüksek sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Eklemeli imalat, Ergiyik biriktirme tekniği, Rose alaşımı, Wood alaşımı

JÜRİ: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe TEZEL

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZENÇ

ABSTRACT

DESIGNING AND MANUFACTURING OF A THREE DIMENSIONAL PRINTER FOR LOW MELTING TEMPERATURE METAL ALLOYS

Mustafa Kemal GULSEREN

MSc Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Volkan KOVAN

June 2022; 31 pages

Additive manufacturing is the technology that transforms the digital model into a physical product with three-dimensional printers that accumulate material in layers. Additive manufacturing systems are very important in the aerospace industry, thanks to the freedom of design they provide in production. In this sector, where consumables are usually steel or titanium alloys, three-dimensional printers that can produce high thermal energy and control environmental conditions are required. Therefore, these systems are very costly.

For additive manufacturing of low melting temperature alloys, systems with simpler equipment and low cost can be used. With the melt deposition technique (FDM), it is possible to obtain conductive products with good mechanical properties from alloys with low melting temperatures. In this study, it is aimed to manufacture all metal products in a single process with a FDM 3D printer. Samples were produced from alloys with chemical compositions of Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 and Bi50Pb25Sn25. The physical and mechanical properties of the samples produced by 3D printer and casting were examined.

According to the data obtained as a result of the study, it has been determined that the surface roughness of the metal samples produced in the 3D printer varies greatly depending on the direction. It has been observed that although the samples produced in 3D printers have lower tensile strength than casting, they show more elongation before breaking. In addition, for the Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alloy, it was determined that the samples produced in the 3D printer had higher hardness than the cast samples.

KEYWORDS: Additive manufacturing, FDM, Rose's alloy, Wood's alloy

COMMITTEE: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Asst. Prof. Dr. Tugce TEZEL

Asst. Prof. Dr. Murat OZENC

ÖNSÖZ

4. sanayi devrimi ile gerçekleşen teknolojik gelişmeler, geleneksel olmayan imal yöntemlerinin yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır. Günümüzde üç boyutlu yazıcılara ilkokullarda veya son teknolojiye sahip uzay istasyonlarında rastlamak mümkündür. Yediden yetmişe herkesin, evinde, atölyesinde veya garajında, deyim yerindeyse minyatür bir fabrika bulundurabilmesi, eklemeli imalatın sağladığı en önemli avantajdır. Bu tez çalışmasında, Ergiyik biriktirme tekniğinde kullanılabilecek sarf malzemesi çeşitliliğini arttırmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ergiyik biriktirme tekniği ile düşük ergime sıcaklığına sahip Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarından başarılı olarak numuneler elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan makine, yaygın olarak kullanılan ve düşük bütçe gerektiren bir FDM tipi üç boyutlu yazıcıdır. Böylece, FDM tipi 3B yazıcı sahipleri bu çalışmadan faydalanabilir ve yazıcılarından metal ürünler elde edebilir.

Bu çalışmanın gerçekleşebilmesi için gerekli ekipmanlara sahip olmamı sağlayan, lisansüstü öğrenimim boyunca ilgileri ve bilgileri ile beni destekleyen saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Volkan KOVAN'a ve devamlı yüksek motivasyonda kalmamı sağlayan saygıdeğer Dr. Öğr. Üyesi Tuğçe TEZEL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmaya doğrudan katkısı bulunan Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZENÇ ve Arş. Gör. İnan AĞIR'a teşekkür ederim. Başta annem ve başöğretmen Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK olmak üzere, bütün öğretmenlerime, harcadıkları emekleri için minnetlerimi sunarım. Çalışmada kullanılan birçok aleti bana hibe eden, rahmetli dayım Celal AŞÇIOĞLU ve ailesine teşekkürlerimi borç bilirim.

Bu çalışmayı, öğrenim hayatım boyunca benden daha çok mücadele veren, desteklerini bir an bile esirgemeyen sevgili aileme atfediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	2
1.1.1. Toz yatağı füzyonu	2
1.1.2. Doğrudan enerji biriktirme	3
1.1.3. Malzeme ekstrüzyonu tekniği	4
1.2. Döküm Tekniği.....	5
2. KAYNAK TARAMASI	6
3. MATERYAL VE METOT	9
3.1. Materyal.....	9
3.2. Metot	11
3.2.1. Numunelerin üretimi.....	11
3.2.2. Numunelerin karakterizasyonu	13
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	16
4.1. Döküm Parametreleri	16
4.1.1. Filament üretimi.....	16
4.1.2. Döküm numunesi üretimi	17
4.2. 3B Üretim Parametreleri	18
4.3. Yüzey Özellikleri	19
4.4. Mekanik ve Fiziksel Özellikler	20
5. SONUÇLAR	25
6. KAYNAKLAR	27
7. EKLER.....	29
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Düşük Erime Sıcaklığına Sahip Metal Alaşımları İçin Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı ve İmalatı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27/06/2022

Mustafa Kemal GÜLSEREN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ag	: Gümüş
Bi	: Bizmut
Cd	: Kadmiyum
cm ³	: Santimetreküp
Cu	: Bakır
g	: Gram
GPa	: Gigapaskal
HV	: Vickers sertlik değeri
In	: İndiyum
kg	: Kilogram
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
mm ²	: Milimetrekare
MPa	: Megapaskal
Pb	: Kurşun
s	: Saniye
S	: Siemens
Sn	: Kalay
Zn	: Çinko
Ωm	: Ohm metre
°C	: Santigrat derece
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

3B : Üç Boyutlu

ABS : Akrilonitril Bütadien Stiren

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)

CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)

DED : Directed Energy Deposition (Doğrudan Enerji Biriktirme)

FDM : Fused Deposition Modelling (Ergiyik Biriktirme Tekniği)

PBF : Powder Bed Fusion (Toz Yatağı Füzyonu)

PCB : Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)

PETG : Glikol Modifiye Polietilen Tereftalat

PLA : Polilaktik Asit

SLA : Stereolitografi

STL : Standard Tessellation Language (Standart Mozaikleme Dili)

TPU : Termoplastik Poliüretan

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Toz yatağı füzyonu tekniği	3
Şekil 1.2. Doğrudan enerji biriktirme tekniği	4
Şekil 1.3. Malzeme ekstrüzyonu tekniği	4
Şekil 3.1. Bi-Pb-Sn alaışımının 150°C'deki faz diyagramı (Osamura, 1988)	9
Şekil 3.2. Nozuldan çıkan termoplastiğin kesiti a) Çıktığı anda; b) Bir önceki katmana yapıştığı anda.....	10
Şekil 3.3. Y eksenine paralel çekme numunesinin ASTM E8 standartlarına göre boyutları	11
Şekil 3.4. Z eksenine paralel çekme numunesinin boyutları	12
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan Ender 3 FDM tipi üç boyutlu yazıcı	13
Şekil 3.6. Instron 8801 servohidrolik çekme deneyi cihazı	13
Şekil 3.7. a) Mahr Marsurf PS10 pürüzlülük ölçüm cihazı; b) Ölçme probu	14
Şekil 3.8. Z ve Y eksenlerine paralel olan numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümü yönleri	14
Şekil 3.9. Ohaus PA224C analitik terazi	15
Şekil 3.10. HVS-1000BT Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı	15
Şekil 4.1. Filament üretiminde kullanılan kalıp parçaları a) PETG kalıp; b) TPU kalıp	16
Şekil 4.2. Döküm kalıbı	17
Şekil 4.3. Döküm numuneleri a) Bi50Pb25Sn25; b) Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10	17
Şekil 4.4. Y eksenine paralel Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 çekme numunesi.....	18
Şekil 4.5. Z eksenine paralel Bi50Pb25Sn25 çekme numunesi.....	19
Şekil 4.6. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaışımının farklı ölçüm yönlerine göre yüzey pürüzlülüğü değerleri	20
Şekil 4.7. Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaışımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama çekme dayanımı	21
Şekil 4.8. Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaışımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama akma dayanımı.....	21

Şekil 4.9. Çekme testi sonrası numuneler a) Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı numuneleri; b) Bi50Pb25Sn25 alaşımı numuneleri	22
Şekil 4.10. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama elastisite modülü	23
Şekil 4.11. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin üniform uzama değerleri.....	23
Şekil 4.12. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin Mikro Vickers sertlik değerleri.....	24



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Wood ve Rose alaşımlarının kimyasal içeriği ve ergime sıcaklıkları.....	10
Çizelge 4.1. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları için 3B üretim parametreleri	19
Çizelge 4.2. 3B üretim ve döküm ile elde edilen numunelerinin yoğunlukları	24



1. GİRİŞ

Eklemeli imalat yöntemlerinden bir tanesi olan üç boyutlu üretim, dijital modelin katmanlar halinde biriktirilerek fiziksel bir ürüne dönüştürülmesi işlemidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan, modern Bilgisayarlı Sayısal Denetim (CNC) makineleri üç boyutlu modele göre belirlenen bölgelerden talaş kaldırılması ile 3B yazıcıların zıt mantığı ile çalışan sistemlerdir. Sanılanın aksine eklemeli imalat yeni bir teknoloji değildir. İlk robotik üç boyutlu yazıcı Charles Hull tarafından geliştirilmiştir. Stereolitografi (SLA) yöntemi ile çalışan bu yazıcı daha sonra ticari olarak satışa sunulmuştur. SLA yönteminde hammadde olan reçine, ultraviyole ışınların etkisi ile katmanlar halinde kürlenerek, üç boyutlu katı model oluşturulmaktadır. Bu çalışmada tercih edilen üç boyutlu üretim yöntemi ise Ergiyik Biriktirme Tekniğidir (FDM). FDM tipi üç boyutlu üretim işlemi, hammadde olan termoplastiklerin, sıcak uç bölgesinde eritilerek tabla üzerine katmanlar halinde biriktirilmesi işlemidir. FDM yöntemi ile çalışan üç boyutlu yazıcı ise ilk olarak Scott Crump tarafından 1989 yılında geliştirilmiştir. Patentin geçerliliğini yitirmesi, FDM tipi yazıcıların yaygınlaşması için önemli bir etken olmuştur. Çeşitli topluluklar tarafından daha uygun bütçeli ve kendini kopyalayabilen üç boyutlu yazıcı projeleri açık kaynaklı olarak erişime sunulmuştur (Su ve Al'Aref, 2018). Günümüzde bu cihazları kullanmak ve üretmek oldukça kolay olduğundan her yaş grubundan insanların üç boyutlu yazıcı sahibi olması mümkün hale gelmiştir. Prototipleme, hobi, sanat, moda, araştırma, yedek parça, protez gibi birçok amaçla kullanılan üç boyutlu yazıcıların geniş kullanıcı kitlesi bulunmaktadır. Ayrıca 3B yazıcılarda plastik, seramik, metal vb. malzemelerin hammadde olarak kullanımının mümkün olması nedeniyle birçok sektörde önemli bir konuma sahiptir.

Eklemeli imalat yöntemlerinin, geleneksel üretim yöntemlerine göre çeşitli avantajları mevcuttur. Bazı karmaşık tasarımları geleneksel üretim yöntemleri ile elde etmek mümkün değildir. Eklemeli imalat yöntemlerinin en önemli avantajlarından bir tanesi olan tasarım özgürlüğü, karmaşık geometriye sahip modellerin üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi planlanan modelin karmaşıklığı arttıkça üretim masrafı da büyük oranda artmaktadır. Fakat tasarımda artan karmaşıklık, eklemeli imalat sistemleri ile üretim sürecinde oluşan masrafın çok daha az miktarda artmasına sebep olmaktadır. Böylece topoloji optimizasyonu sonucu ortaya çıkan kompleks modelleri 3B yazıcılar ile üretmek daha uygundur. Bu avantaj özellikle ulaşım, havacılık ve uzay sektörlerinde önem arz etmektedir. Ayrıca birkaç parçadan oluşan ve daha sonra montajlanması gereken tasarıma sahip ürünlerin, eklemeli imalat teknikleri ile monte halde üretilebilmesi veya tasarım kısıtlamalarının ortadan kalkması sayesinde tek parçadan oluşan bir modele dönüştürülebilmesi zamandan kazandırır. Eklemeli imalatın bir diğer avantajı üretim sürecindeki aşamaların azaltılmasıdır. Eklemeli imalat yöntemleri ile genellikle ürün tek aşamalı süreç sonucu elde edilir. Eklemeli imalatın avantajlarına karşın dezavantajları da bulunmaktadır. Az miktarda üretilmesi planlanan bir ürün için eklemeli imalat kullanıldığında başlangıç maliyeti ve üretim maliyeti, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha düşük bütçe gerektirse de seri üretim için geleneksel üretim yöntemleri daha ekonomik ve hızlıdır.

Toz yatağı füzyonu (PBF) ve doğrudan enerji biriktirme (DED) metal eklemeli imalat sistemlerinde kullanılan termal enerji kaynakları; lazer ışınları, elektron ışınları veya ark olabilmektedir. Bu yüzden yüksek maliyetli olan bu sistemlere, düşük bütçeli

üreticilerin erişimi kısıtlıdır. Bunların yanında FDM sistemler çok daha düşük maliyetlere sahiptir. Çünkü bu sistemlerde filament biçimindeki malzemeyi eritmek için ısıtıcı dirençler kullanılır. Düşük termal enerji üreten basit rezistansların bulunduğu FDM tipi üç boyutlu yazıcılar, diğer 3B üretim tekniklerine göre çok daha ekonomiktir. Fakat bu sistemlerde yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin üretilmesi mümkün değildir. Ergiyik biriktirme tekniği, günümüzde en yaygın kullanılan üç boyutlu üretim teknolojisidir. Bunun en önemli nedeni bu sistemlerin makul fiyatlarda olmasıdır. FDM sistemlerinin popüler olmasının diğer bir nedeni, çevrimiçi ortamda açık kaynaklı bilgilerden faydalanılarak kişinin kendi yazıcısını üretebilmesidir. Yeni bir 3B yazıcı üretmek için gerekli plastik parçaların, başka bir 3B yazıcıdan elde edilebilmesi sayesinde kendilerini kopyalayabilen sistemlerdir. FDM tipi yazıcıların popüler olarak kullanılmasının bir başka nedeni ise bol sarf malzemesi seçeneği olmasıdır. Hammaddede olarak çoğunlukla akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asit (PLA) gibi termoplastiklerin yanı sıra, ahşap, seramik ve metali içerikli filamentler de kullanılmaktadır. Fakat yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerden ürün elde etmek mümkün değildir. Bunun nedeni, FDM sistemlerdeki ısıtma kaynağının yetersiz olmasıdır. Yaygın kullanılan ekstruderlerde bulunan sıcak ucun ulaşabileceği azami sıcaklık değeri 300°C olarak önerilmektedir. Daha yüksek sıcaklıkların cihazda çeşitli tahribatlara yol açabileceği belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında FDM tipi 3B yazıcıdan düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımlar ile herhangi bir ek işleme gerek kalmaksızın metal numuneler üretilmiştir. Bu numunelere, mekanik özellikleri belirlenmek üzere çekme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Ayrıca 3B üretimin yüzey kalitesine etkisini incelemek üzere yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.

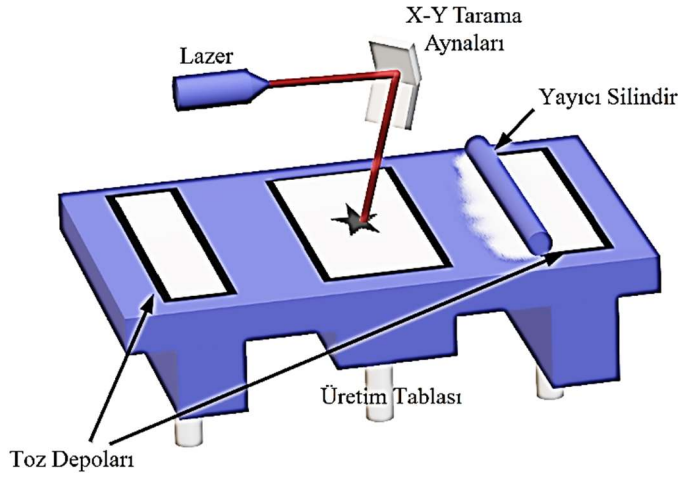
1.1. Metal Eklemeli İmalat Yöntemleri

Günümüzde birçok metal eklemeli imalat yöntemi bulunmaktadır. Eklemeli imalat sistemleri yeni bir üretim yöntemi olmasından dolayı bu imal yöntemleri ile ilgili birçok aktif çalışma bulunmakta ve güncel eklemeli imalat sistemlerinin sayısı zamanla artmaktadır. Metal eklemeli imalat sistemleri; imal sürecine, sarf malzemelerinin biçimine ve kullanılan termal enerji kaynağına göre çeşitlenmektedir. Metal eklemeli imalat yöntemleri genel olarak ergime ve sinterleme süreçli olarak ikiye ayrılmaktadır. Ergime süreçli eklemeli imalat sistemleri ile tek aşamada yüksek doluluk oranına sahip metal ürünler elde etmek mümkündür. Sinterleme süreçli eklemeli imalat yöntemleri ile elde edilen ürünler ilk aşamada birbirine tamamen kaynamamış metal parçacıklarına sahiptir. Bu yöntemi kullanan 3B yazıcıların ürettiği parçalar sinterleme sürecine tabii tutulmalıdır. Ergime süreçli metal eklemeli imalat sistemleri Toz Yatağı Füzyonu (PBF) ve Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan malzeme ekstrüzyonu ise sinterleme süreçli 3B üretim teknikleri arasında yer almaktadır.

1.1.1. Toz yatağı füzyonu

PBF, metallerin eklemeli imalatı için kullanılan en popüler imal yöntemlerinden biridir. Şekil 1.1'de PBF sistemlerin genel olarak çalışma şeması gösterilmiştir. Aynı temel prensiplere sahip, bazı patent özelliklerinden kaçınmak isteyen, farklı malzemeleri işleme kapasitesine sahip ve farklı verimliliklerde birçok PBF tipi 3B yazıcı bulunmaktadır.

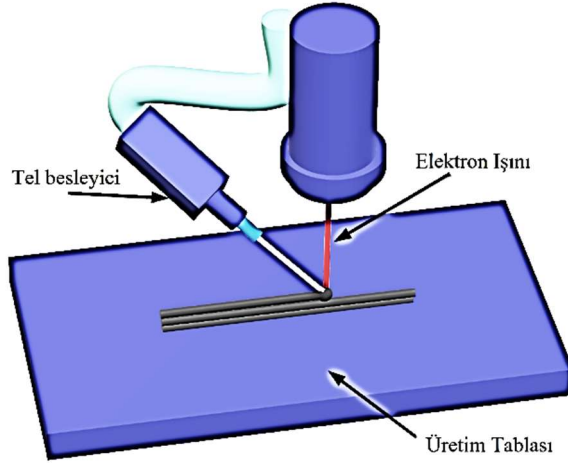
Metal PBF sistemlerinde sarf malzemesi olarak toz metal partikülleri kullanılmaktadır. Termal enerji kaynağı olarak ise lazer ışınları bulunmaktadır. Üretim süreci, nitrojen gazı ile doldurulmuş kapalı hacim içerisinde gerçekleşmektedir. Nitrojen gazı toz malzemenin oksidasyonunu azaltmaktadır. 3B üretim işlemi malzemenin ergime sıcaklığına çok yakın değerlerde gerçekleşmektedir. Kapalı hacim içerisinde toz parçacıkları füzyon öncesinde ısıtmak ve üretim esnasında parçanın sıcaklık dağılımının homojen olmasını sağlamak amacıyla infrared ısıtıcı bulunmaktadır. İlk olarak, metal toz partiküller, yayıcı silindir vasıtası ile üretim tablasına ince bir katman halinde (0.075-0.1 mm kalınlıkta) yayılır. Lazer ışınları, galvanometre yardımıyla yönlendirilir ve tabla üzerindeki parçacıkları, model kesitine uygun olacak şekilde birleştirir. Artakalan toz materyal, füzyonlanan parçacıklara destek görevi görmektedir. Bir katmanın üretimi tamamlandığında, üretim tablası katman kalınlığı kadar aşağı inmektedir. Yayıcı silindir, toz deposu üzerinden toz yatağı doğru yuvarlanarak, yeni toz katmanı yayar. Her bir katman için bu süreçler tekrarlanır (Gibson vd., 2015).



Şekil 1.1. Toz yatağı füzyonu tekniği

1.1.2. Doğrudan enerji biriktirme

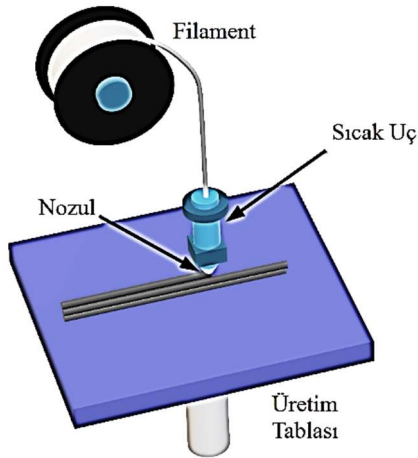
Doğrudan enerji biriktirme tekniğinde termal enerji kaynağı olarak elektron ışınları, lazer veya ark kullanılmaktadır. Aynı şekilde sarf malzemesi tel veya toz biçiminde olabilmektedir. Şekil 1.2’ de tel beslemeli ve elektron ışını ile çalışan DED tipi 3B yazıcı şematik olarak görülmektedir. DED tipi yazıcılarda besleyiciden çıkan metal, termal enerji kaynağı vasıtası ile ergitilip üretim tablası üzerinde biriktirilir. Genellikle büyük ölçekli modeller üretmek için veya yüksek miktarda biriktirme oranı gerektiren projelerde kullanılır. Ayrıca parça tamiri için veya mevcut parçanın modifikasyonunda da DED sistemler tercih edilmektedir (Frazier, 2014).



Şekil 1.2. Doğrudan enerji biriktirme tekniği

1.1.3. Malzeme ekstrüzyonu tekniği

Malzeme ekstrüzyonu tekniğinde sarf malzemesi olarak genellikle filament kullanılmaktadır. Bu sistemlerde termal enerji kaynağı genellikle ısıtıcı rezistanslar bulunmaktadır. Ekstruderden beslenen filament sıcak uç içerisinde bulunan rezistans vasıtası ile ısıtılarak nozula ilerlemektedir. Nozuldan ekstrüde edilen malzeme üretim tablası üzerine biriktirilir. Her bir katmandan sonra üretim tablası veya sıcak uç katman kalınlığı kadar yer değiştirilerek yeni katmanın üretiminde başlar. Termoplastik filamentlerin yanı sıra metal içerikli filamentler de bulunmaktadır. Metal filamentler, bağlayıcı görevi gören termoplastik içeriğe sahiptir. Yüksek dolulukta metal ürünlerin malzeme ekstrüzyonu tekniği ile üretilmesi için, bağlayıcı çözündürme ve sinterleme işlemleri uygulanmaktadır. Bağlayıcı giderme sürecinde, ürün içeriğindeki termoplastik eriyip parçadan ayrılan kadar fırında tutulur. Daha sonra parçada oluşan boşlukların giderilmesi için sinterleme işlemi gerçekleştirir. Şekil 1.3'te filament beslemeli malzeme ekstrüzyonu sistemi şematik olarak gösterilmektedir (Gibson vd., 2015).



Şekil 1.3. Malzeme ekstrüzyonu tekniği

1.2. Döküm Tekniği

Döküm, akışkan halde olan malzemenin, üretilmek istenen modele uygun olarak boşluk içeren kalıplara dökülüp katılaşmasıyla ürünlerin elde edildiği imal yöntemidir. Döküm ile küçük veya büyük hacimli parçaların seri üretimi yapılabilmektedir. Ayrıca neredeyse bütün metallerin dökümü mümkün olduğundan yaygın kullanılan bir geleneksel imal yöntemidir. Döküm kalıpları kapalı veya açık olabilmektedir. Ayrıca kalıplar tek kullanımlık veya kalıcı olabilir. Tek kullanımlık kalıplar kolaylıkla bozulabilen malzemelerden üretilir, böylece döküm sonrası kalıba zarar verilerek ürün elde edilir. Kalıcı kalıplarda ise kalıp genellikle birçok parçanın birleşiminden meydana gelir. Kalıp içerisindeki ürünün çıkartılması için kalıba zarar verilmeden parçalarına ayrılır.

Döküm işleminden önce metal ertilir. Ergiyik metal katılaşma sıcaklığının biraz üzerinde olan ideal döküm sıcaklığına çıkartılır. Daha yüksek sıcaklıkta yapılan döküm işleminde tane irileşmesi, yüksek miktarda gaz çözünmesi ve oksitlenme gibi olumsuzluklar meydana gelmektedir. Sıvı haldeki metal içinde gaz çözünmesi kaçınılmaz olsa da sıcaklık ve basınçla kontrol edilebilmektedir. Yüksek basınçlı ortamda veya yüksek sıcaklıklarda döküm işlemi gerçekleştiğinde, ergiyik metal içerisinde çözünen gaz miktarı artmaktadır. Bu gaz genellikle hava içerisinde bulunan nemi ayrışmasından ortaya çıkmaktadır. İçerisinde yüksek gaz çözünmüş halde bulunan metal, kalıba döküldükten sonra soğuma esnasında bu gazlar ayrılarak malzeme içerisinden kaçmak istemektedir. Ayrılan gazlar katı içerisinde boşluklar meydana getirerek son ürünün mukavemetini önemli ölçüde düşürmektedir. Gaz çözünürlüğünün önüne geçmek için çeşitli katkıların ergiyik metale eklenmesiyle gaz giderme işlemi uygulanabilmektedir. Daha sonra ergiyik metal, kapalı kalıplar için döküm ağzına veya açık kalıplarda direkt kalıp boşluğuna dökülmektedir. Kapalı kalıplarda, akışkan metalin kalıp içerisinde ilerlemesi için yolluklar bulunmaktadır. Yeterli akıcılık sağlandığı takdirde, malzeme kalıp içerisinde tamamen yayılarak üretilmek istenen modelin şeklini almaktadır. Akıcılığı; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, döküm malzemesinin ısılatma kapasitesi ve kalıp tasarımı olmak üzere birçok parametre etkilemektedir. Dökülen metalin kalıpta soğuması esnasında katılaşma meydana gelir. Saf metaller ve ötektik alaşımlar sabit sıcaklıkta katılaşırken, ötektik olmayan alaşımlar belirli bir sıcaklık aralığında katılaşmaktadır (Aran, 2007).

2. KAYNAK TARAMASI

Düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin üretilmesi amacıyla, bizmut esaslı Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları seçilmiştir. Literatürde, sırasıyla Wood ve Rose alaşımları olarak adlandırılan bu malzemelerden FDM yöntemi ile ürünlerin elde edildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışması Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarının FDM tipi 3B yazıcı ile üretimi için gerekli üretim parametrelerinin değerleri içermektedir. Parametrelere değerlerinin belirlenmesi ve malzeme davranışının incelenmesi için çeşitli kaynaklardan faydalanılmıştır.

Kamal vd. (2005), Bi50Sn22.9Pb27.1, Bi50Sn12.5Pb25Cd12.5 ve Bi58Sn42 alaşımlarının mikroyapısı, elektrik direnci, elastisite modülü, iç sürtünmesi, Vickers sertliği ve ergime sıcaklıkları değerlerini tespit edip karşılaştırmışlardır. Testler sonucu, Bi50Sn12.5Pb25Cd12.5 alaşımının elektrik direnci $81,47 \times 10^{-8} \Omega m$, elastisite modülü 16,07 GPa, Vickers sertliği 6,5 kg/mm²; Bi50Sn22.9Pb27.1 alaşımının elektrik direnci $90,52 \times 10^{-8} \Omega m$, elastisite modülü 12,12 GPa, Vickers sertliği 6,59 kg/mm² ve Bi58Sn42 alaşımının elektrik direnci $59,44 \times 10^{-8} \Omega m$, elastisite modülü 22,41 GPa, olduğu tespit edilmiştir. Bi50Sn22.9Pb27.1 ve Bi50Sn12.5Pb25Cd12.5 alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde, matris içerisinde büyüme gösteren Bi, Bi3Pb7 yapılarına rastlanmıştır. Bi50Sn22.9Pb27.1 alaşımının ergime noktası 98,32°C, Bi50Sn12.5Pb25Cd12.5 alaşımının ergime noktası 77,37°C olarak belirlenmiştir. Ayrıca Bi50Sn12.5Pb25Cd12.5 alaşımı içeriğinde bulunan Cd atomlarının matris yapısında değişimlere neden olduğundan dolayı atomik hareketliliği arttırdığı ve rezonans frekansını azaltarak iç sürtünmeye neden olduğu belirtilmiştir. Darot ve Reuschle (1999) Wood metalinin kuvars üzerindeki ıslatma özelliğini doğrudan değerlendirmek için 85°C, 120°C ve 200°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta testler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinden alınan ölçümlere göre, Wood alaşımının sıcaklığı arttıkça viskozitesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Heo vd. (2014) sıvı fazdaki Wood metalinin, soğutulmuş su içerisine dağılma davranışları incelenmiştir. 90°C'deki Wood alaşımı, 6.95 mm çapında ve 9.30 mm çapında deliklerden 2,8 m/s ve 3,1 m/s jet hızında, 21°C sıcaklığındaki su içerisine akıtılıp, dağılma davranışı kamera ile kaydedilmiştir. Deney sonucu, soğuk su içerisinde katı faza geçen metalin geometrik yapısına göre, sıvı metalin aktığı delik çapı ve jet hızı arttıkça, metal parçalarının boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir. Orme (1993) Bi50Pb28Sn22 ve Bi58Sn42 alaşımlarını nano-litre damla ile hızlı katılaşma yöntemi sentezini incelemiştir. Ergiyik metalin bulunduğu bölgeden vakum ortamına damlacıklar püskürtülüp, nitrojen gazı ile katılaşması sağlanarak üretim gerçekleştirilmiştir. Alaşımlar çeşitli frekans aralıklarıyla damlatılmıştır. Bir önceki yüzey üzerine damlatılan metalin, ince bir eriyik kaplamaya sahip alt yüzeye bağlandığı ve sınırların kalktığı belirtilmiştir. Sonuçta, ergiyik metalin hassas kontrollü damlacıklar ile püskürtüldüğü bir üretim yöntemi ispatlanmıştır.

Metallerin eklemeli imalatı genellikle toz yatak teknolojisine sahip üç boyutlu yazıcılarla gerçekleştirilmektedir. Literatürde FDM tekniği ile metal üretimini içeren, sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan metaller genellikle düşük ergime noktasına sahip lehim alaşımları olmaktadır. Literatürde FDM tipi üç boyutlu yazıcılar ile metal üretiminin gerçekleştirildiği çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Lima vd. (2020), FDM tekniği ile Mg62Zn38 alaşımını üretmişlerdir. 420°C'de

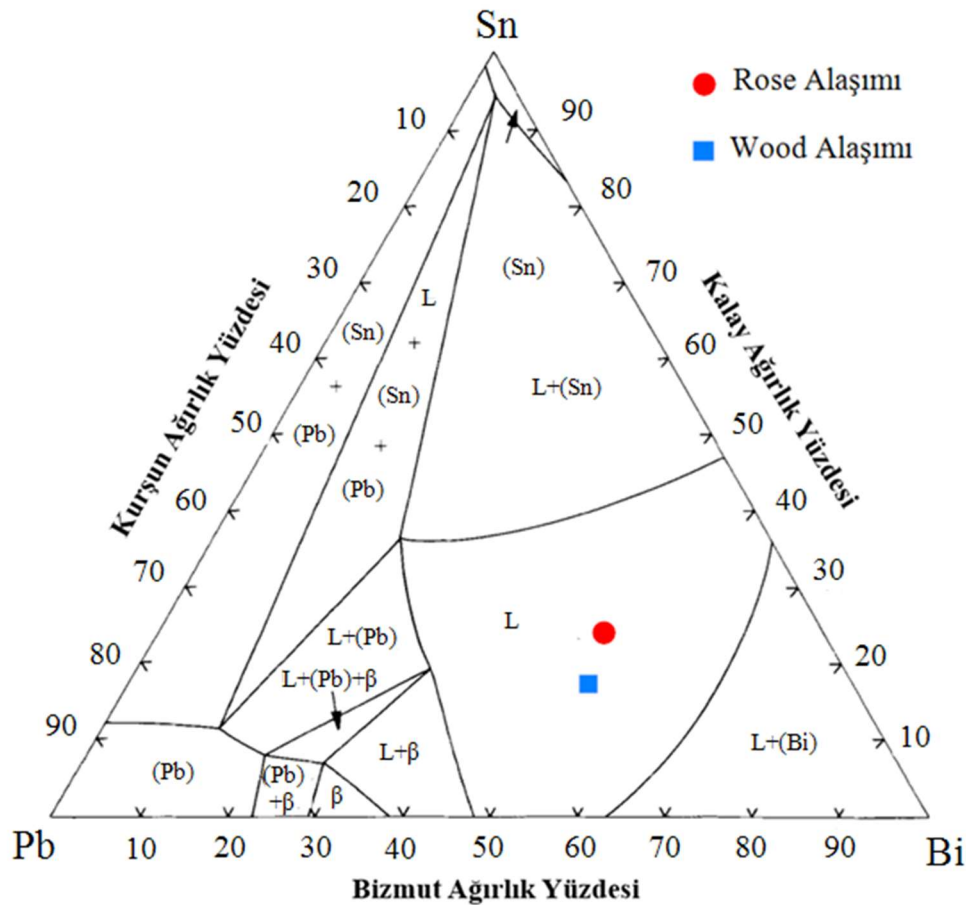
gerçekleşen üretim işlemi, malzeme yarı katı durumda iken biriktirilmiştir. Ekstrude edilen metalde katı olan parçacıkların küresel yapıya sahip olması nozulda tıkanıklık olmamasını sağlamıştır. Sonuç olarak numunelerin elde edilmesiyle, biyolojik olarak parçalanabilen Mg esaslı implantların üretilmesinde önemli bir adım atılmıştır. Sudhan vd. (2020), Bi50Sn50 alaşımını FDM ile üretmişlerdir. Sarf malzemesi elde etmek için alaşım elementleri karıştırılıp fırınlanarak çubuk halinde dökülmüştür. Sertlik değeri 39 HR ölçülen alaşımın FDM tipi 3B üretimi 180°C nozul sıcaklığı ile gerçekleşmiştir. 1 mm/s, 5mm/s ve 7mm/s olmak üzere üç farklı ekstrüzyon hızı değeri için yapılan deneme sonucu 1mm/s ekstrüzyon hızı parametresinde düzgün ve devamlı akış elde edildiği belirtilmiştir. Bulgulara göre hız arttırıldığında üretimde kopukluklar meydana gelmektedir. Warriar ve Kate (2018), PLA malzemeden üretilen kalıplara Sn42Bi58, Sn60Bi40 ve Sn89Sb7.5 alaşımlarını dökerek numuneler elde etmişlerdir. Ardından Sn60Bi40 alaşımından FDM yöntemi ile numune üretmişlerdir. 3B üretim için en ideal parametre değerleri; nozul sıcaklığı 220°C, üretim hızı 1mm/s olacak şekilde belirlenmiştir. 3B üretilen numunenin çekme dayanımı 41,55 MPa iken, döküm ile üretilen numune 62,5 MPa çekme dayanımına sahiptir. Bunun nedeni, 3B üretim ile, döküme göre daha düşük doluluk oranında ürünler elde edilmesinden dolayı olduğu belirtilmiştir. Jabbari ve Abrina (2018), bir başka yarı-katı üretim çalışması gerçekleştirmiştir. Sn85Pb15 ve Pb60Sn40 alaşımları ile hem döküm hem de eklemeli imalat deney numuneleri üretilmiştir. Üretim işlemi için FDM tipi 3B yazıcıya özel bir ekstruder tasarlanmıştır. Sn85Pb15 alaşımının döküm numunesi 41,2 MPa çekme dayanımına ve 11.2 HV0.05 Vickers sertlik değerine sahip olurken, aynı alaşımdan oluşan 3B üretim numunesi 43,8 MPa çekme dayanımına ve 14,4 HV0.05 Vickers sertlik değerine sahiptir. Pb60Sn40 alaşımının döküm numunesi 35,3 MPa çekme dayanımına ve 9,5 HV0.05 Vicker sertlik değerine sahiptir. Aynı alaşımın 3B üretim numunesinin çekme dayanımı 37,1 MPa, Vickers sertlik değeri 12,8 HV0.05'tir. Andersen vd. (2017), FDM tipi yazıcılarda kullanılmak üzere, yüksek iletkenliğe sahip metal filament üretmişlerdir. Çeşitli nozullar ile, Sn70Bi30 ve Sn66i30Ag4 alaşımlarından oluşan üç boyutlu numune üretimi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre bu alaşımların, uzun süre sorunsuz 3B üretimi için paslanmaz çelik nozul kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Gerekli üretim koşullarının sağlanması sonrasında iletkenlik testi için, led lamba devresine 3B FDM tipi yazıcı ile elektronik bağlantılar yapılmıştır. Sn70Bi30 alaşımının iletkenliği $3,8 \times 10^4 \text{ S.cm}^{-1}$, Sn66i30Ag4 alaşımının elektrik iletkenliği $4,3 \times 10^4 \text{ S.cm}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Yuh-Chung vd. (2017), Sn96.5Ag3Cu0.5 ve Sn99Cu0.7Ag0.3 alaşımlarını FDM tipi yazıcı ile üretmişlerdir. Her iki alaşım için de 0.4 mm, 0.6 mm ve 0.8 mm çapa sahip nozullar ile farklı parametrelerde üretim denemeleri gerçekleşmiştir. İdeal üretimin 0.8 mm çapa sahip nozul ile elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca test sonuçlarına göre, iki malzemenin de üretim işlemi sonrası çekme dayanımları oldukça düşmüştür. Hsieh vd. (2016), Sn99.3Cu0.7 ve Sn60Pb40 alaşımlarını tek ve çoklu katman olarak üretmişlerdir. Üretim sıcaklığı 220°C ve 240°C olmuştur. Üretim esnasında, bir önceki katmanın tekrar ısınmasından dolayı tanecik büyümesi gerçekleştiğinden iyi mekanik özellikler elde edilebileceği belirtilmiştir. Tan (2015), Sn96.5Ag3Cu 0.5 alaşımının FDM yöntemi ile üretilebilirliğini test etmiştir. Fakat geleneksel FDM tipi yazıcıların sahip olduğundan farklı olarak özel indüksiyon termal enerji kaynağı ile çalışan bir ekstruder tasarlanmıştır. Özel ekstruder, herhangi bir yazıcıya monte edilmeden, test edilmiştir ve 220°C sıcaklığında üretim gerçekleştiği belirtilmiştir. Jones (2013), tarafından yapılan tez çalışmasında Sn57.98Bi39.9In2.1 alaşımı geliştirilip sarf malzemesi olarak üretilmiştir. Ardından bir led devre bağlantısı üretimi gerçekleşmiştir.

Mireles vd (2012), Bi36Pb32Sn31Ag1, Bi58Sn42, Sn63Pb37, Sn50Pb50, Sn60Bi40 ve Sn96.5Ag3.5 alaşımlarının FDM yöntemi ile üretilmesini test etmiştir. Denemeler sonucu sadece Sn60Bi40 ve Bi58Sn42 malzemeleri ile başarılı sonuç elde edilmiştir. Mireles vd. (2013), daha önceki çalışmasında iyi sonuçlar elde ettiği Sn60Bi40 ve Bi58Sn42 alaşımlarını yenilenen ekstruder tasarımı ile tekrar üretmiştir. Mikroyapısal analiz sonucu, iri taneli yapıların oluşması, ara katmanlar arası bağı arttırdığına ve dolayısıyla mekanik ve elektrik iletkenliği özelliklerini iyileştirdiğine ulaşılmıştır. Sells ve Bowyer (2006), FDM tipi yazıcılarda elektronik devre üretimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada Bi50Pb25Sn12.5Cd12.5 alaşımı kullanılarak, bir robotun elektronik bağlantıları yapılmıştır. Üretim işlemi için yazıcı kullanılmamış, özel tasarlanmış, ısıtıcılı bir el şırıngası ile gerçekleştirilmiştir. Şırınga içerisinde sıvı halde bulunan alaşımın takım yolu, araştırmacının el yordamıyla çizmesi sonucu belirlenmiştir. Çalışmanın amacı, çoğu parçasını kopyalayabilen bir 3B yazıcı elde etmektir. Yazarlar, gelecek çalışmada bu sürecin el vasıtasıyla değil otomasyonla yapılabileceğini belirtmişlerdir. Tseng ve Tanaka (2001), FDM yönteminin temellerini inceleyerek yeni eklemeli imalat yöntemleri geliştirmişlerdir. Üretim işlemi, haznede sıvı halde bulunan metalin, ayarlanabilir nozuldan akması ile gerçekleşmiştir. Ekstrüzyon hızını ayarlamak için nozul üzerinde dönebilen konik bir yapı bulunmaktadır. Böylece tabla üzerine istenilen kalınlıkta ve filament biçiminde malzeme bırakması mümkün olmaktadır. Bir diğer yöntemde, nozul yapısı çizgi şeklinde olan ekstrudere sahip 3B yazıcı kullanılmaktadır. Böylece yazıcı, eksenin bir ucundan diğer ucuna yapacağı tek turda bir düzlemi veya bir katmanın tamamını üretebilmektedir. Rice vd. (2000), yarı katı üç boyutlu üretim süreci için, merkezinde dönen bir çubuk bulunan özel bir ekstruder tasarlamışlardır. 20 mm/s üretim hızı ile 82 mm yükseklikte ve 290 g ağırlığında olan bir numune yalnızca 60 saniye içinde üretilmiştir. Sarf malzemesi olarak Sn85Pb15 alaşımının kullanıldığı bu çalışmada, yarı katı sistem kullanarak daha hızlı üretim yapılabileceği belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Filament olarak kullanılmak üzere, bizmut içeriği yüksek, düşük ergime sıcaklığına sahip metal alaşımlar seçilmiştir. Bunlardan ilki Lipowitz alaşımı olarak da adlandırılan Wood alaşımıdır. Kimyasal içeriği; %50 bizmut, %26,7 kurşun, %13,3 kalay ve %10 kadmiyumdan oluşmaktadır. Genellikle yangın söndürme sistemlerinde ve gaz tanklarında güvenlik elemanı olarak kullanılmaktadır. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı 70°C’de ergimektedir. Çalışmada kullanılan diğer metal ise Rose alaşımıdır. Rose alaşımının kimyasal içeriği %50 bizmut, %25 kurşun ve %25 kalaydan meydana gelmektedir ve alaşım 98°C’de ergimektedir (Çizelge 3.1). Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları lehimleme işlemlerinde, ısı transfer banyolarında, boru bükme işleminde kullanılmaktadır. İki alaşım da Rotometals şirketinden, külçe halinde satın alınmıştır. Şekil 3.1’de bulunan faz diyagramında, iki metalin de 150°C’de sıvı halde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla FDM tipi üç boyutlu yazıcıların hepsi bu metalleri eritmek için yeteri kadar termal enerji üretebilen sıcak uç donanımına sahiptir. Çünkü FDM tipi yazıcılarda sarf malzemesi olarak kullanılan termoplastikler genellikle 190-250 °C sıcaklık aralığında üretilmektedir.

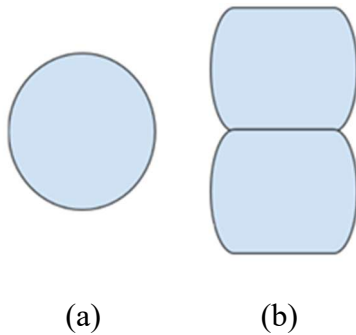


Şekil 3.1. Bi-Pb-Sn alaşımının 150°C’deki faz diyagramı (Osamura, 1988)

Çizelge 3.1. Wood ve Rose alaşımlarının kimyasal içeriği ve ergime sıcaklıkları

	Kimyasal İçerik (%)				Ergime Sıcaklığı (°C)
	Bi	Pb	Sn	Cd	
Wood	50	26,7	13,3	10	70
Rose	50	25	25	-	98

Termoplastiklerin 3B üretimi için, camsı geçiş sıcaklıklarına yakın üretim sıcaklığı değerleri seçilmesi halinde ideal sonuçlar elde edilmektedir. Plastik materyal nozuldan yarı katı halde ekstrüde edilerek, tablanın veya bir önceki katmanın üzerinde biriktirilir. Katman kalınlığı nozul çapından küçük olduğunda, yuvarlak kesite sahip nozuldan ekstrüde edilen malzemenin profilinde değişim gözlenir. Böylece Şekil 3.2’den de görülebileceği gibi katmanlar arası temas alanı artmış olur ve daha sağlam bir son ürün oluşur. Metallerde camsı geçiş sıcaklığının olmamasından dolayı, farklı bir yaklaşım uygulanması gerekmektedir. Literatürde, FDM tipi yazıcılarda ötektik olmayan metal alaşımların sarf malzemesi olarak kullanıldığı birtakım çalışmada, alaşımın katı+sıvı faz bölgesinde ekstrüzyon gerçekleştirilmiştir. Böylece metal tamamen sıvı hale geçmeden nozuldan çıkmıştır. Metal katı+sıvı fazındayken üretimin yapıldığı uygulamalarda sıcaklık kontrolü oldukça önemlidir. Sıcak uç içerisinde elde edilen sıcaklık değeri, faz diyagramındaki solidüs çizgisine yaklaştıkça çözelti içerisindeki katı miktarı artar. Dolayısıyla, içerisindeki katı oranı yüksek olan alaşım, nozulda tıkanma ve aşınma gibi problemlere yol açar. Bu tez çalışmasında kullanılan Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı, ötektik bir alaşım olduğundan, bu yaklaşım ile yola çıkmak mümkün değildir. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımından numune üretilirken, metal, tamamen sıvı hale geçirilerek ekstrüde edilmiştir. Bunun yanında Bi50Pb25Sn25 alaşımı ötektik olmadığından dolayı katı+sıvı karışımı halinde ekstrüde etme işlemi uygulanabilir. Fakat Bi50Pb25Sn25 alaşımında, katı ve sıvı fazların birlikte bulunduğu bölgedeki sıcaklık aralığı dar olduğundan, üretim işlemi için gerekli ideal sıcaklığı elde etmek zordur. Ayrıca metallerin ısıyı iyi iletmesinden dolayı, ortam sıcaklığı, soğutma hızı ve hatta tabla sıcaklığı nozul sıcaklığında dalgalanmaya yol açar. Bu sebeple iki alaşımın numune üretimi de alaşım sıvı fazındayken gerçekleşmiştir.

**Şekil 3.2.** Nozuldan çıkan termoplastiğin kesiti **a)** Çıktığı anda; **b)** Bir önceki katmana yapıştığında

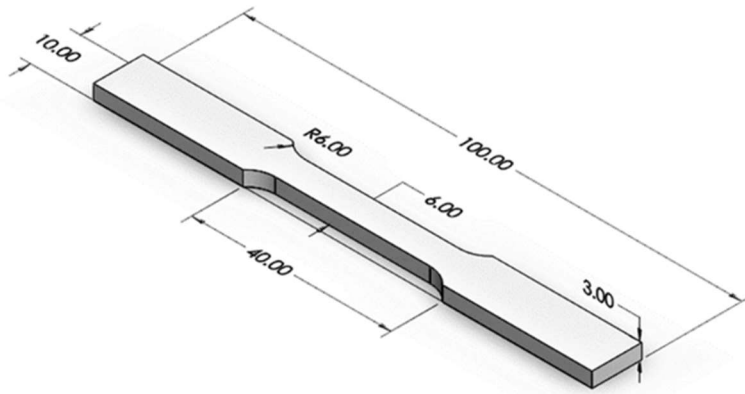
3.2. Metot

Numunelerin üretimi için uygulanan işlemlere bu bölümde değinilmiştir. Ayrıca çalışma boyunca kullanılan cihazların özellikleri detaylı olarak açıklanmaktadır.

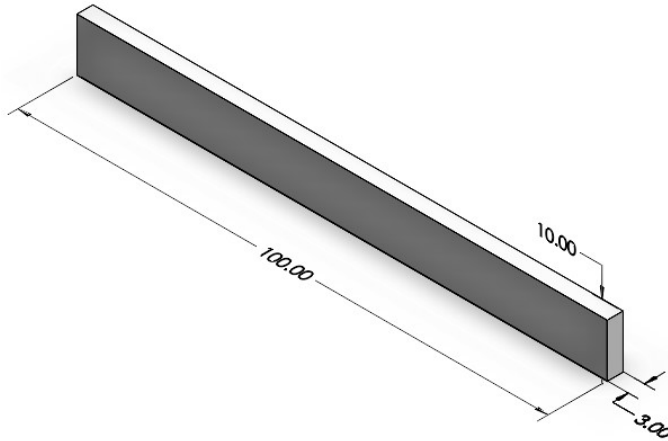
3.2.1. Numunelerin üretimi

Bilgisayar destekli modelleme yazılımı ile oluşturulan tasarımın üretilmesi için ilk olarak STL formatına dönüştürülmesi gerekmektedir. Böylece modelin yüzeyi, çeşitli açılarda yerleştirilen üçgen düzlemlere dönüşmektedir. Bu yapı, modeli yazıcı tarafından daha kolay işlenebilir hale getirir. STL formatındaki model, bir dilimleyici yazılımıyla makine dili olan G-koda çevrilir. Dilimleyici, üretim sıcaklığı, üretim hızı vb. birçok girdi parametrelerini ve her bir eksenin hareket etmesi gereken koordinat noktalarını içeren kodu oluşturur. Daha sonra bu kod yazıcıya yüklenerek, çalıştırılır. Tez çalışmasında 3B üretim için Cura dilimleme yazılımı kullanılmıştır. Cura dilimleme yazılımında, termoplastikler için daha önce belirlenmiş standart parametre değerleri yer almaktadır. Bu değerler çalışmada kullanılan metal alaşımlardan numune üretimi için uygun olmamaktadır. Bu yüzden, Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları için ideal parametrelerin belirlenmesi, birçok farklı değerlerin denenmesi sonucu elde edilmiştir. Deneme sonuçlarında oluşan hatalara göre parametreler değiştirilerek, en başarılı üretim için gereken değerlerin profilleri belirlenmiştir.

Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarını sarf malzemesi olarak kullanmak için filament üretilmiştir. Külçe halinde olan alaşımların, teflon boruya, TPU ve PETG kalıplara dökülmesi ile tel biçimini alması sağlanmıştır. Çekme numunesi üretiminde, ASTM'nin (American Society of Testing Materials) metalik malzemelerin çekme testi için belirlemiş olduğu standartlar esas alınmıştır. ASTM E8 standartına göre, dikdörtgen çekme numunesi boyutlarına uygun CAD tasarımı yapılmış ve STL formatına aktarılmıştır. Numunelerin, yöne bağlı olarak, sahip oldukları mekanik özelliklerin tespiti için Y eksenine paralel (Şekil 3.3) ve Z eksenine paralel (Şekil 3.4) iki çeşit numune üretilmiştir. Bu sayede, katmanlı yapının neden olduğu anizotropinin, yüzey pürüzlülüğüne etkisi de incelenmiştir. Z eksenine paralel olan numunelerin üretiminde, ASTM E8 standartlarındaki çekme numunelerinde bulunan boyunlu yapı yerine, dikdörtgen prizma geometrik yapısına sahip model kullanılmıştır.



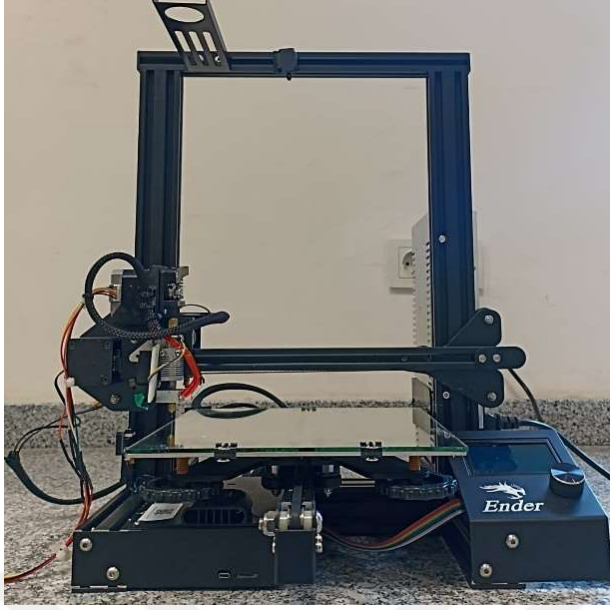
Şekil 3.3. Y eksenine paralel çekme numunesinin ASTM E8 standartlarına göre boyutları



Şekil 3.4. Z eksenine paralel çekme numunesinin boyutları

FDM tekniği ile üretilen numunelerin yanı sıra, Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarından üçer adet döküm çekme numunesi elde edilmiştir. Bunun nedeni, eklemeli imalat ile elde edilen numuneleri, döküm ile elde edilen numunelerle karşılaştırmaktır. Alaşımların dökümü için FDM tipi üç boyutlu yazıcıda kalıp üretilmiştir. Kalıp, eklemeli imalat ile üretilen çekme numuneleriyle aynı boyutlarda ürün elde edecek şekilde tasarlanmıştır. Döküm numunelerinin kalıptan kolayca çıkartılabilmesi için, esnek yapıya sahip TPU filament kullanılmıştır. Çekme testi sonucunda, ortalaması alınmak üzere ve olası hataları tespit edebilmek için her bir kategorideki numuneden üçer adet üretilmiştir.

Eklemeli imalat ile numunelerin üretilmesi için FDM tipi üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. En çok satan, popüler yazıcılardan biri olan Ender 3 FDM tipi üç boyutlu yazıcı temin edilmiştir (Şekil 3.5). Çin asıllı Creality firmasının ürettiği Ender serisi, uygun fiyatına rağmen sahip olduğu özellikleriyle dünyanın birçok bölgesinde kullanılmaktadır. Diğer bütün FDM tipi yazıcılar gibi Ender 3 de termoplastik filamentler için tasarlandığından, fabrika çıkışı halinde düşük ergime sıcaklığından metal ürünler elde etmek için uygun değildir. Bu yüzden yazıcıda değişiklikler yapılmıştır. Yazıcıda yapılan en önemli modifikasyon, Bowden besleme sisteminden, doğrudan besleme sistemine geçilmesidir. Bunun nedeni, üretilen metal filamentlerin Bowden besleme için yeterli uzunlukta ve esneklikte olmamasıdır. Ender 3 FDM tipi yazıcılarda, ekstruder dişlisinden ittirilen filament, Bowden sistemi olarak adlandırılan ve ekstrüderi sıcak uca bağlayan teflon boru içerisinden geçerek sıcak uca ulaşır. Teflon borunun görevi, filamentin ilerlemesi esnasında doğrultusunu korumak ve dış etkenlere karşı filamenti muhafaza etmektir. Fakat doğrudan besleme sisteminde ekstruder, sıcak ucu taşıyan raylı sistem üzerinde bulunduğundan teflon boruya ihtiyaç duyulmamaktadır. Böylece, mevcut ekstruder sistemi, X eksen taşıyıcısında bulunan sıcak uç üzerine monte edilmiştir. Ekstruder motorunun montajı için, adaptör görevi gören ara parça kullanılmıştır. Bu parça, ısıya dayanıklı olması nedeniyle PETG malzemeden FDM tekniği ile üretilmiştir. Bunların dışında Bi50Pb25Sn25 alaşımının üretiminde kullanılmak üzere 1mm çapındaki nozul ve 235x235mm boyutunda ayna tabla Ender 3 FDM tipi yazıcıya entegre edilmiştir.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan Ender 3 FDM tipi üç boyutlu yazıcı

3.2.2. Numunelerin karakterizasyonu

Üç boyutlu üretim tekniği ve döküm ile elde edilen numunelerin çekme deneyi, Pamukkale Üniversitesi Mekanik Araştırma Laboratuvarında bulunan INSTRON 8801 servohidrolik test sistemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarından üretilen numuneler kopana kadar çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Çekme işlemi ASTM E8 standartına uygun, oda sıcaklığında ve dakikada 1 mm uzama ile gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında elde edilen veriler, Instron Bluehill yazılımı yardımı ile kaydedilmiştir.



Şekil 3.6. Instron 8801 servohidrolik çekme deneyi cihazı

Üç boyutlu yazıcıyla üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Akdeniz Üniversitesi Konstrüksiyon Laboratuvarında bulunan, Mahr Marsurf PS10 pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.7). Yüzey pürüzlülüklerini incelemek için üç doğrultuda yüzey profili alınmıştır. Böylece üretim yönlerinin pürüzlülüğe etkisi gözlemlenmektedir. X yönü üretim yönüne paralel, Y yönü üretim yönüne dik ve Z yönü katmanlara dik olacak şekilde belirlenmiştir. Y eksenine paralel olan numunelerin kalınlığı kısa olduğundan katmanlara dik olan Z yönünden yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılamamıştır. Bu yüzden Z yönünden alınan bütün yüzey profilleri, Z eksenine paralel üretilen numunelerden alınmıştır (Şekil 3.8).

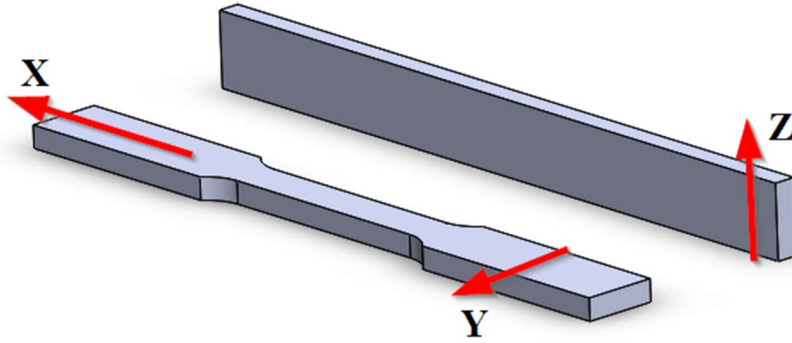


(a)



(b)

Şekil 3.7. a) Mahr Marsurf PS10 pürüzlülük ölçüm cihazı; b) Ölçme probu



Şekil 3.8. Z ve Y eksenlerine paralel olan numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümü yönleri

Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımlarının, üç boyutlu üretilmiş ve döküm numunelerinin yoğunluk ölçümleri, Akdeniz Üniversitesi Konstrüksiyon Laboratuvarında bulunan Ohaus PA224C analitik terazi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Ohaus PA224C analitik terazi

Her iki alaşımın döküm ve 3B üretilmiş numunelerinin sertliği ölçülmüştür. Sertlik ölçümü için Akdeniz Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan HVS-1000BT Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Doğru ölçüm alabilmek için numunelerin yüzeyi sertlik ölçümünden önce parlatılmıştır. Daha sonra cihazda bulunan piramit biçimindeki uç 10gr yük altında metal numunelere baskı yapması sağlanmıştır. Baskı sonrası numune yüzeyinde oluşan izin köşegenleri hizalanmıştır. Cihaz bu köşegenler arası boyutları hesaplayıp mikro sertlik değerlerini sunmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. HVS-1000BT Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

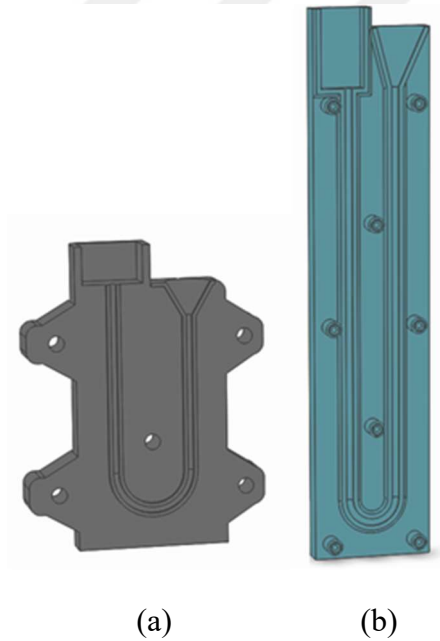
Çalışma sonucu elde edilen test verileri ve gözlemler bu bölümde değerlendirilmiştir. Filament, 3B üretim ve döküm numunelerinin üretim süreçleri ayrı başlıklar altında açıklanmaktadır.

4.1. Döküm Parametreleri

FDM tipi 3B yazıcıda kullanılan filamentler döküm ile üretilmiştir. Ayrıca 3B üretim numuneleri ile karşılaştırılmak üzere döküm numuneleri üretilmiştir. Bu üretim süreçleri ile elde edilen bilgiler aktarılmıştır.

4.1.1. Filament üretimi

Filament beslemeli FDM tipi 3B yazıcı için öncelikle külçe şeklindeki alaşımlar tel haline getirilmiştir. Bunun için ilk olarak 2 mm iç çapa ve 4 mm dış çapa sahip teflon boru kullanılmıştır. Alaşımlar sıvı fazdayken teflon boruya doldurulup soğumaya bırakılmıştır. Boru içerisindeki alaşım, içeriğindeki yüksek bizmut oranı nedeniyle soğuyup katı hale geçtiği esnada genişlemiştir. Bizmut metali sıvı halden katı hale geçerken, diğer birçok maddenin aksine, genişlemektedir (Mudry vd. 2015). Bu nedenle tel şeklini alan filamentler teflon boru çeperine basınç uygulamıştır. Metal filamente hasar vermeden teflon kalıptan çıkarmak oldukça zor olduğundan bir başka yöntem olarak kalıplama kullanılmıştır. Ayrılabilir kalıplar sayesinde alaşım katı hale geçtiğinde genişlese dahi filament kolayca kalıptan çıkartılmıştır. Kalıplar FDM tipi üç boyutlu yazıcılardan TPU ve PETG malzemeler ile üretilmiştir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Filament üretiminde kullanılan kalıp parçaları **a)** PETG kalıp; **b)** TPU kalıp

Başlangıçta, ısıl direnci nedeniyle filament kalıpları için PETG uygun görülmüştür. Yaklaşık 15 cm uzunluğunda çubuklar halinde metal üretmek için, alaşımların döküm sıcaklıkları, ergime sıcaklıklarının 50°C üzerinde olması gerektiği

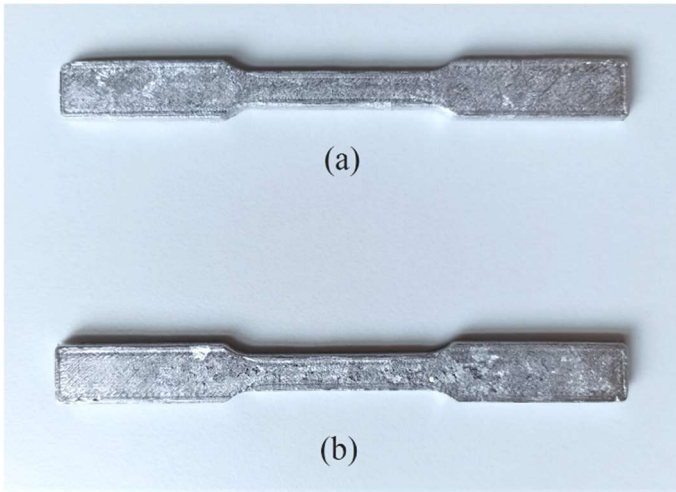
saptanmıştır. Daha düşük sıcaklıklarda döküm işlemi gerçekleştiğinde ergiyik metal kalıbın tamamını dolduramadan katı hale geçtiği için kısa filamentler elde edilmiştir. Bu probleme bir başka çözüm ise kalıbın dökümden önce ısıtılması olmuştur. Fakat yüksek sıcaklıkta döküm ve kalıp ısıtma işlemleri iki parçadan oluşan kalıbın yapısının bozulmasına yol açmıştır. Yaklaşık 7-8 kullanım sonrası döküm esnasında kalıp yüzeylerinde ortaya çıkan sıcaklık farkları nedeniyle kalıp çarpılmıştır. PETG kalıpta oluşan bu hata, kalıp yüzeyleri tamamen birleşemediğinden döküm sonrası çok miktarda çapak ortaya çıkmasına, filament geometrisinin bozulmasına neden olmuştur. Bu yüzden sıkıştırılabilir TPU malzeme ile kalıplamada daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çünkü TPU kalıplarda homojen ısıtma sağlanamamasından dolayı oluşan kalıp bozuklukları, kalıbın esnek yapıya sahip olmasından dolayı telafi edilebilmiştir. Kalıplama ile elde edilen çubuk metal filament yazıcıya beslenerek numuneler üretilmiştir.

4.1.2. Döküm numunesi üretimi

Döküm numuneleri ASTM E8 standartına uygun boyutlarda üretilmiştir. Ergiyik metal Şekil 4.2’de görülen açık kalıba dökülmüştür. Kalıp FDM tipi 3B yazıcıda TPU filamentten üretilmiştir. TPU kalıbın esnekliği sayesinde döküm numuneleri kalıptan kolayca ayrılmıştır. Başlangıçta oksidasyon etkisini azaltmak amacıyla döküm işlemi, alaşımların ergime sıcaklıklarının 20 °C üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fakat alaşım, oda sıcaklığında bulunan kalıp içerisinde yeteri kadar yayılamadan katılaştığı için döküm sıcaklıkları arttırılmıştır. Yaklaşık 120 °C sıcaklığında, sıvı fazdaki Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı oda sıcaklığındaki TPU kalıba dökülmesiyle döküm Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 numuneleri elde edilmiştir (Şekil 4.3a). Bi50Pb25Sn25 alaşımı için ise aynı işlem metal yaklaşık 150 °C’deyken gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3b).



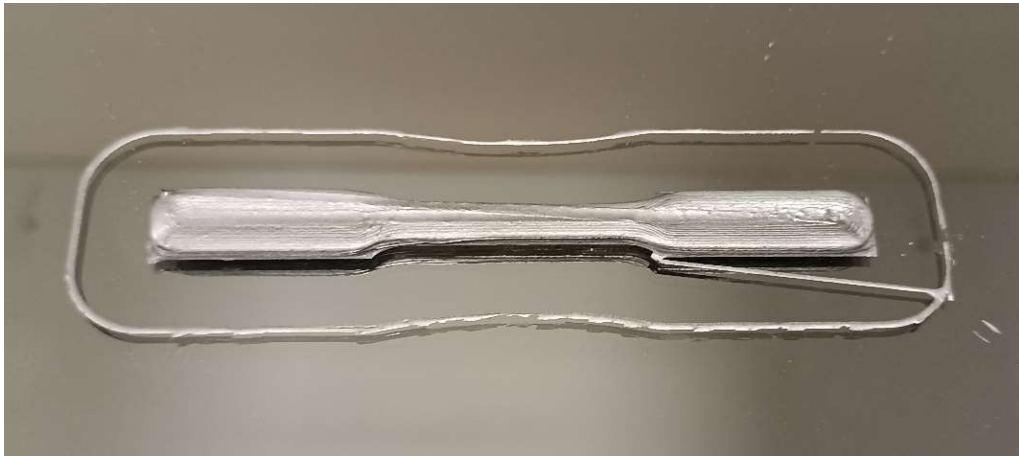
Şekil 4.2. Döküm kalıbı



Şekil 4.3. Döküm numuneleri a) Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10; b) Bi50Pb25Sn25

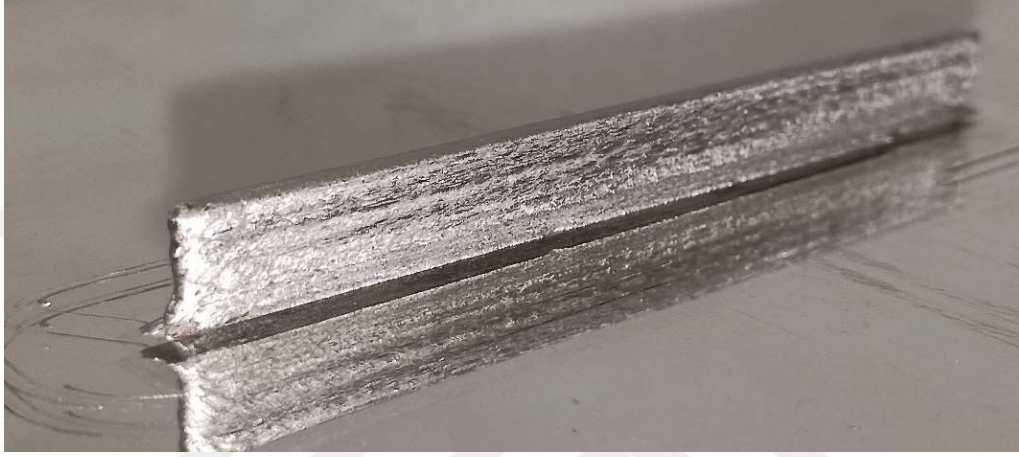
4.2. 3B Üretim Parametreleri

Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için, ilk olarak ergime sıcaklığı olan 70°C nozul sıcaklığında üretim denemesi gerçekleştirilmiştir. Fakat FDM tipi yazıcının fabrika çıkışı yazılımı 70°C nozul sıcaklığında üretime izin vermemiştir. Bu sorun, dilimleme yazılımında, başlangıç G-koduna “M302 S0” satırı eklenerek çözülmüştür. Yapılan düzeltmeden sonra, 70°C nozul sıcaklığında deneme yapılmış ve nozul sıcaklığının malzemenin ekstrüde edilmesi için yeterli olmadığı belirlenmiştir. Nozul sıcaklığı ancak 20°C daha arttırıldığı takdirde, nozul ucundan malzeme akışı gözlenmiştir. Genelde termoplastikler için uygulanan üretim hızı olan 50 mm/s ile yapılan denemede, tabla üzerinde uzak aralıklarla noktalar halinde birikmeler olduğu görülmüştür. Bir sonraki denemede, 90°C nozul sıcaklığı için 50 mm/s üretim hızının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Üretim hızı ve nozul sıcaklığı birbirine bağlantılı iki parametredir. Yüksek hızda üretim işlemi yapılması gerektiğinde nozul sıcaklığını da yükseltmek gerekir. Çünkü yüksek üretim hızlarında sarf malzemesinin, sıcak uça geçirdiği süre azalır ve malzemeye yeterli ısı geçişi sağlanamaz. Bu nedenle sonraki üretim denemelerinde nozul sıcaklığı arttırılmış ve üretim hızı azaltılmıştır. Yeni parametrelerle yapılan bütün denemelerde malzemenin tabla üzerine birikimi aralıklar halinde ve nokta şeklinde olmuştur. Katılaştıran metal yarım küre şeklini almıştır. Bu sorunu gidermek için, malzemenin yüzey enerjisini düşürmek hedeflenmiştir. Fabrika çıkışı halinde pürüzlü yapıya sahip tabla, aynı boyutlarda ayna tabla ile değiştirildiğinde metalin tabla üzerinde daha kolay yayıldığı gözlenmiştir. Ayrıca metalin yüzey enerjisini daha fazla düşürmek için tabla sıcaklığı değerleri, üretilen alaşımın ergime sıcaklığına yakın tutulmuştur. Böylece devamlı akış ve düzgün çizgiler elde edilmiştir. Fakat tabla sıcaklığının metalin ergime sıcaklığına yakın tutulması sıvı fazdaki malzemenin katı hale geçmesi için gereken sürenin uzamasına sebep olmuştur. Üretim esnasında nozuldan çıkan malzemenin soğutulması için kullanılan fanın tam kapasite çalışması bu süreyi kısaltmıştır, fakat yeterli olmamıştır. Ancak katman kalınlığı azaltıldığında, geniş yüzey alanına sahip daha az malzeme biriktirilmesiyle hızlı katılaşma elde edilerek sorunun önüne geçilmiştir. Böylece Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için, 10 mm/s üretim hızında ve 0,08 mm katman kalınlığında, ideal üretim sıcaklığının 125°C olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Y eksenine paralel Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 çekme numunesi

Bi50Pb25Sn25 alaşımı ise, Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımından daha hızlı soğuyabildiği için 0,12 mm katman kalınlığında üretilmiştir. Çalışma esnasında Bi50Pb25Sn25 metalinin, Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 metaline göre çok daha aktif olduğu ve oksitlenmeye yatkın olduğu gözlenmiştir. Bu durum, üretimde sorun çıkmasına neden olmuştur. Filament üretiminde gerçekleşen döküm sürecinde oksitlenen cüruf, 3B yazıcıda nozulun tıkanmasına sebep olmuştur. Bu problem 1 mm çapındaki nozulun kullanılmasıyla çözülmüştür. Böylece Bi50Pb25Sn25 alaşımı için, 10 mm/s üretim hızında ve 0,12 mm katman kalınlığında, ideal üretim sıcaklığının 145°C olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Z eksenine paralel Bi50Pb25Sn25 çekme numunesi

Birbiri ile bağıntılı olan; üretim hızı ve üretim (nozul) sıcaklığı parametrelerinde, iterasyonlar yapılarak başarılı üretimin gerçekleştiği ideal değerler tespit edilmiş ve Çizelge 4.1’de bu değerlere yer verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları için 3B üretim parametreleri

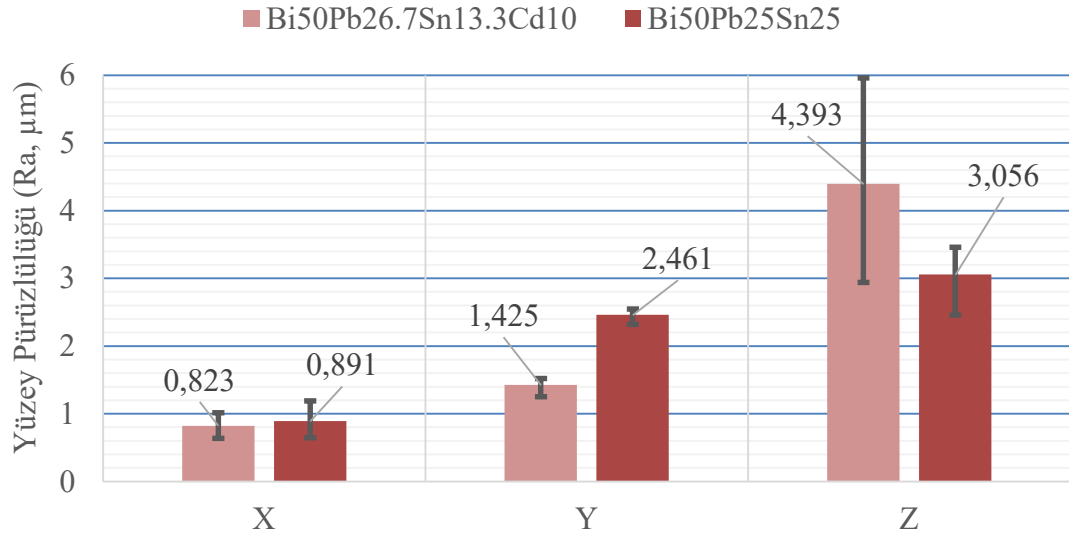
	Katman Kalınlığı (mm)	Üretim Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Nozul Çapı (mm)
Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10	0,08	125	60	0,4
Bi50Pb25Sn25	0,12	145	80	1

4.3. Yüzey Özellikleri

Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarının farklı ölçüm yönlerine göre yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 4.6’da yer almaktadır. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için, Y eksenine paralel numunelerin X yönündeki ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,823 µm olmuştur. Aynı numunelerin Y yönündeki ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,425 µm’dir. Z eksenine paralel numunelerin Z yönündeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ise 4,393 µm ölçülmüştür. Bi50Pb25Sn25 alaşımı için, Y eksenine paralel numunelerin X yönündeki ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,891 µm olmuştur. Aynı numunelerin Y

yönündeki ortalama yüzey pürüzlülüğü $2,461\mu\text{m}$ 'dir. Z eksenine paralel numunelerin Z yönündeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ise $3,056\mu\text{m}$ ölçülmüştür.

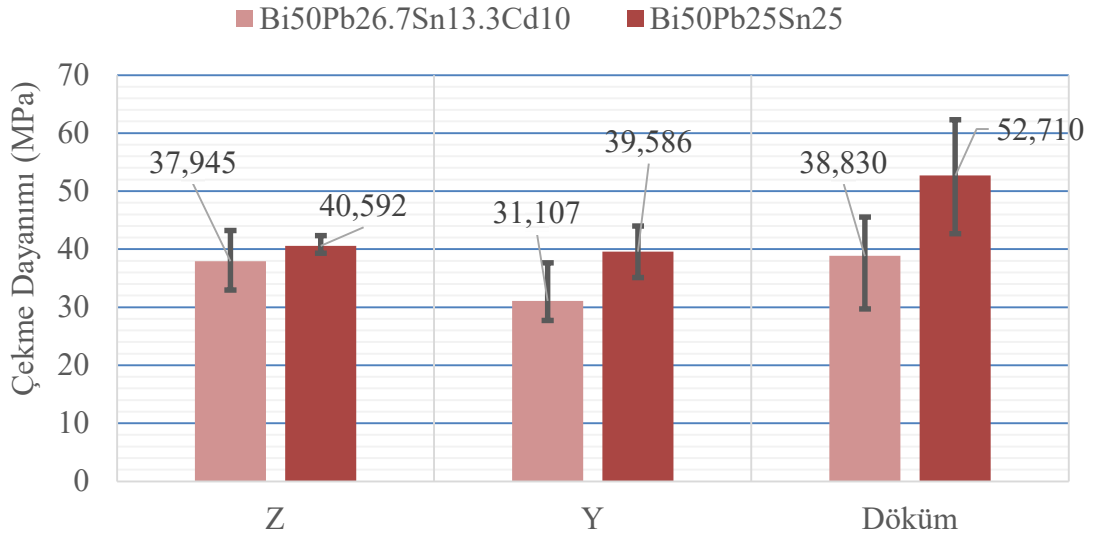
Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarına göre, X yönündeki yüzey pürüzlülüğü iki materyalde de Y ve Z yönündeki değerlere nazaran daha düşük çıkmıştır. Çünkü ölçüm yönü üretim yönü ile paraleldir. Y yönü ise üretim yönüne dik olduğu için daha fazla yüzey pürüzlülüğü tespit edilmiştir. Z yönündeki yüzey pürüzlülüğü, katmanlardan dolayı oluşan merdiven etkisinden kaynaklanmaktadır ve dolayısıyla X ve Y yönlerindeki yüzey pürüzlülüğü değerlerinden çok daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarının farklı ölçüm yönlerine göre yüzey pürüzlülüğü değerleri

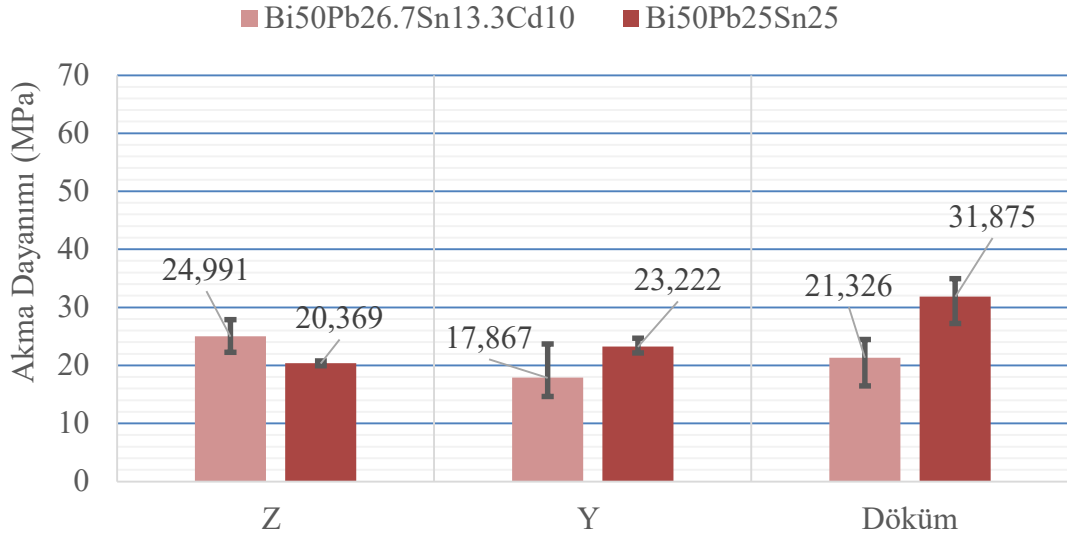
4.4. Mekanik ve Fiziksel Özellikler

Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama çekme dayanımı değerleri Şekil 4.7'de yer almaktadır. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımının sırasıyla Z ve Y yönüne paralel 3B üretim numunelerinin ortalama çekme dayanımı $37,945$ ve $31,107$ MPa olmuştur. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımının döküm numunelerinin ortalama çekme dayanımı ise $38,830$ MPa'dır. Bi50Pb25Sn25 alaşımının sırasıyla Z ve Y yönüne paralel 3B üretim numunelerinin ortalama çekme dayanımı $40,562$ ve $39,586$ MPa olmuştur. Bi50Pb25Sn25 alaşımının döküm numunelerinin ortalama çekme dayanımı ise $52,710$ MPa'dır. Çekme deneyi sonucu Bi50Pb25Sn25 3B üretim numunelerinin çekme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Ayrıca döküm Bi50Pb25Sn25 numuneleri, 3B üretim Bi50Pb25Sn25 numunelerine göre %30 daha fazla ortalama çekme dayanımına sahip olmuştur. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için Z yönüne paralel 3B üretim numuneleri ile döküm numunelerinin ortalama çekme dayanımları birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Y yönüne paralel Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 3B üretim numuneleri ise diğer Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 numunelerden yaklaşık %18 daha düşük ortalama çekme dayanımına sahiptir.



Şekil 4.7. Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama çekme dayanımı

Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama akma dayanımı değerleri Şekil 4.8’de yer almaktadır. Döküm numuneleri ve Y eksenine paralel 3B üretim numuneleri için Bi50Pb25Sn25 alaşımı, Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımından daha yüksek ortalama akma dayanımına sahiptir.



Şekil 4.8. Bi50Pb25Sn25 ve Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama akma dayanımı

Çekme testi sonucu elde edilen verilere göre, döküm ile elde edilen numunelerin ortalama çekme dayanımları, üç boyutlu üretim numunelerinin ortalama çekme dayanımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Döküm ve 3B üretim numunelerinin birbirine yakın doluluk oranına sahip olmalarına karşın mekanik özellikleri arasında oluşan farkın nedeni, 3B üretim numunelerinin yüzeyinde bulunan ve

çentik etkisi yaratabilecek çok sayıda düzensizliklerin olması olabilir. Bu yüzden aynı üretim parametreleriyle elde edilen her üç numunenin test sonucu birbirinden farklı olmaktadır. Ayrıca bir önceki katmanın üzerinde oluşan oksitlenme, katman ile yapacağı bağı etkilemekte ve dolayısıyla çekme dayanımını azaltmaktadır. Bi50Pb25Sn25 alaşımının 3B üretim ve döküm numunelerinin mekanik özellikleri arasında oluşan fark, bu alaşımın oksijen ile reaksiyona yatkın olmasından kaynaklanıyor olabilir. Filament üretimleri esnasında oluşan oksitlenmiş cüruf parçaları 1mm çaptaki nozuldan geçiş yaparak, çekme numuneleri içerisinde birikmektedir. Çekme numuneleri içerisinde bulunan kalıntılar numunelerin mukavemetlerini düşürmektedir.

Şekil 4.9a'da üstte yer alan Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 3B üretim numunesinin ve Şekil 4.9b'de üstte yer alan Bi50Pb25Sn25 3B üretim numunesinin sünek koptuğunu gözlemlenmiştir. Şekil 4.9a'da altta yer alan Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 döküm numunesinin ve Şekil 4.9b'de altta yer alan Bi50Pb25Sn25 döküm numunesinin gevrek yapıya sahip olduğu saptanmıştır. Bu durum ekte yer alan gerilme-uzama grafiklerinden de gözlenebilmektedir. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarından oluşan üç boyutlu üretim numuneleri, döküm numunelere göre daha düşük çekme dayanımına sahip olmasına karşın, kopmadan önce çok daha fazla uzama göstermektedir.



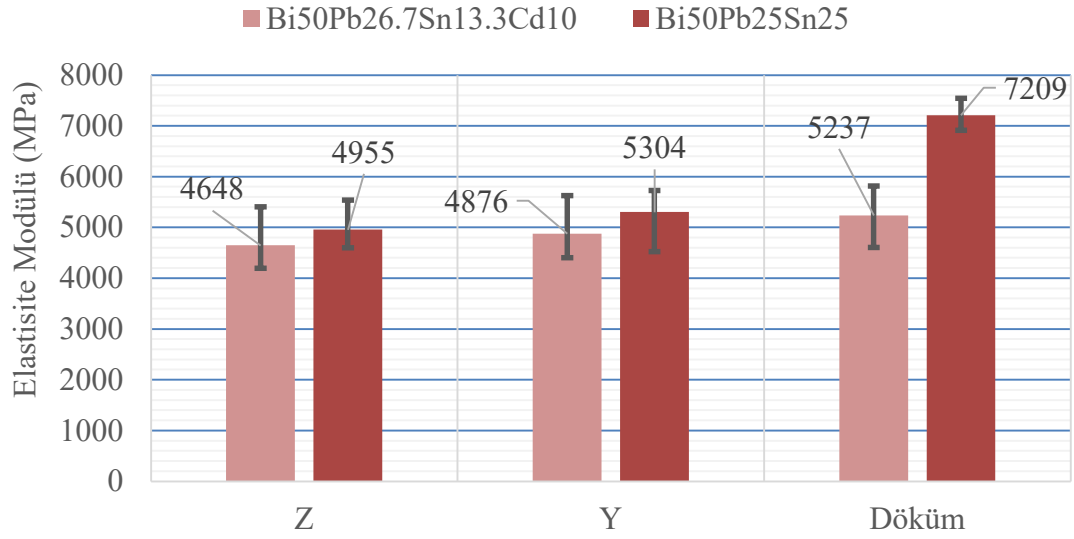
(a)



(b)

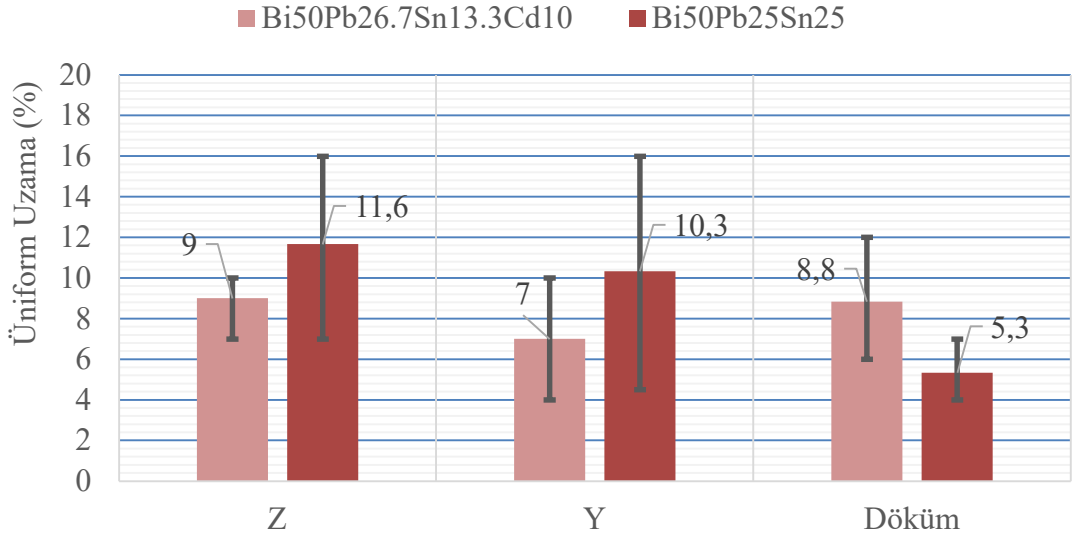
Şekil 4.9. Çekme testi sonrası numuneler a) Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı numuneleri; b) Bi50Pb25Sn25 alaşımı numuneleri

Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımı üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama elastisite modülü değerleri Şekil 4.10'da yer almaktadır



Şekil 4.10. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin ortalama elastisite modülü

Çekme numunelerine uygulanan maksimum yük anında, sahip olduğu uzama miktarları Şekil 4.11’de yer alan üniform uzama grafiğinde verilmiştir. Bi50Pb25Sn25 alaşımları için 3B üretim numuneleri, döküm numunelerinin yaklaşık 2 katı ortalama üniform uzama miktarına sahiptir. 3B üretim numunelerinde Bi50Pb25Sn25 alaşımları Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımlarından daha yüksek ortalama uzama miktarına sahipken, döküm için bu durum tam tersinedir.



Şekil 4.11. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin üniform uzama değerleri

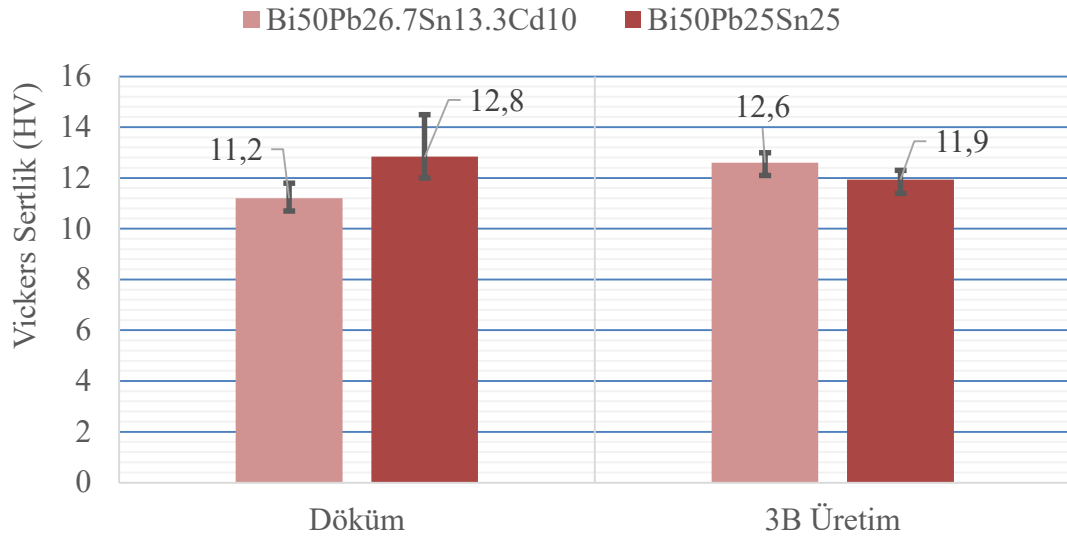
Yoğunluk ölçümleri değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımlarının yoğunluğu, Bi50Pb25Sn25 alaşımlarına göre daha yüksektir. Ayrıca her iki

alaşım için elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 3B yazıcı ile üretilen numunelerin yoğunluğu döküm numunelerinden daha yüksektir.

Çizelge 4.2. 3B üretim ve döküm ile elde edilen numunelerinin yoğunlukları

	Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10	Bi50Pb25Sn25
Döküm	9,6 g/cm ³	9,3 g/cm ³
Üç Boyutlu Üretim	9,7 g/cm ³	9,4 g/cm ³

Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarının, üç boyutlu üretim ve döküm numunelerinin 10 g yük altındaki Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 4.12’de yer almaktadır. Bi50Pb25Sn25 alaşımı için döküm ve üç boyutlu üretim numunelerinin sertlikleri birbirine oldukça yakın olsa da döküm numunelerinin ortalama sertlik değeri, 3B üretilmiş numunelerin ortalama sertliğinden daha yüksektir. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için ise tam tersi durum gözlenmektedir. 3B üretilen Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 numuneleri, döküm numunelerine göre ortalama olarak daha yüksek sertliktedir.



Şekil 4.12. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları 3B üretim ve döküm numunelerinin Vickers sertlik değerleri

5. SONUÇLAR

Metal parçaların üretimi için genellikle geleneksel imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Metal bir parçanın üretiminde eklemeli imalatın kullanılması, ancak parçadan az sayıda üretilecekse veya geleneksel imalat yöntemleriyle üretilemeyecek kadar karmaşıksa avantajlı olmaktadır. Metal eklemeli imalat yöntemleri, seri üretim için henüz yavaş ve yüksek maliyetli olmaktadır. Fakat teknolojinin gelişmesi ile bu dezavantajlar her geçen gün etkisini azaltmaktadır.

FDM tipi eklemeli imalat tekniği, geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan, bunun yanı sıra düşük bütçe gerektiren imal yöntemlerinden biridir. Dolayısıyla bu yöntem ile üretim yapan 3B yazıcılar, geniş kullanıcı kitlesine sahiptir. Bu yüzden, bireyler veya şirketler tarafından tasarlanmış çok sayıda FDM tipi 3B yazıcı bulunmaktadır. Piyasada neredeyse her ihtiyaca veya bütçeye göre bir FDM tipi 3B yazıcı bulmak mümkündür. FDM tipi üç boyutlu yazıcıların bu kadar çeşitli olmasına karşın, yazıcının sarf malzemelerinde özellikle metaller için aynı çeşitlilik bulunmamaktadır. Mekanik özellik, ısıya karşı direnç, esneklik vb. birçok farklı istere göre termoplastikler bulunmaktadır. Genellikle plastik ham madde kullanılsa da seramik, gıda, biyomadde üretebilen yazıcılar da mevcuttur. Fakat metal veya ahşap bir ürün elde etmek için yalnızca 3B yazıcıya sahip olmak yeterli değildir. Plastik bağlayıcıya sahip metal filamentlerden, üç boyutlu üretim süreci sonucu elde edilen ürünü, ancak fırında ısıtılma işlemi tabii tutuktan sonra tamamen metal bir ürüne sahip olunabilmektedir. Son yıllarda literatürde bulunan bazı çalışmalarda düşük ergime sıcaklığına sahip metaller ile tek süreçte tamamen metal ürünler elde edilebileceği kanıtlanmıştır. Henüz düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımlardan oluşan filamentler piyasada bulunmasa da, bu çalışma gibi birçok çalışmanın rehberliği ile metal filamentlerin yaygınlaşması yolunda ilerlemeler kaydedilebileceği düşünülmektedir.

Düşük ergime sıcaklığına sahip metal alaşımları için üç boyutlu yazıcı tasarımı ve imalatı çalışması kapsamında oldukça popüler olan ve düşük bütçe gerektiren FDM tipi 3B yazıcılardan biri üzerinde, minimum değişiklik yapılarak metal parça üretilmiştir. Düşük ergime sıcaklığına sahip Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımlarından 3B üretim sonucu başarılı ürünler elde edilerek, döküm ile elde edilen numunelerle mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve yüzey özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Ötektik veya ötektik olmayan metallerden FDM tipi yazıcı ile üretim yapılabilmektedir. Üretim sürecinde devamlı ve düzgün bir akış elde etmek için metallerin yüzey enerjisinin mümkün olduğunca düşürülmesi gerekmektedir. Sıvı fazda ekstrude edilen metalin düzgün ve devamlı üretilmesi için katman kalınlığı değeri azaltılmalıdır.
- Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 ve Bi50Pb25Sn25 alaşımları için, üç boyutlu üretim ile elde edilen ürünlerin çekme ve akma dayanımları, döküm parçalara göre düşüktür ancak üç boyutlu üretim numuneleri kopmadan önce daha fazla uzamaktadır. Döküm numuneler gevrek koparken, üç boyutlu üretim numuneleri sünek kopmaktadır.
- 3B yazıcı ile üretilen numunelerde yüzey kalitesi sırasıyla; üretim yönüne paralel, üretim yönüne dik ve katmanlara dik yönlerinde azalmaktadır.

- Bi50Pb25Sn25 alaşımı için, döküm yöntemi ile üretilen parçalar, 3B üretilen parçalara göre daha yüksek sertliğe sahipken bu durum Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımı için tam tersidir. Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 alaşımında 3B üretilen numuneler daha yüksek sertliğe sahip olmuştur.
- 3B yazıcı ile üretilen numunelerin yoğunlukları, döküm numunelerinin yoğunluklarından yaklaşık $0,1 \text{ g/cm}^3$ daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Döküm numunelerinin daha düşük yoğunluğa sahip olmasının nedeninin, döküm esnasında alaşım içerisinde gaz çözünmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, ötektik olan ve ötektik olmayan iki alaşımın FDM tipi 3B yazıcı ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Her iki alaşım da sıvı fazındayken ekstrude edilmiştir. Ötektik olmayan alaşımların ekstrüzyonu, alaşım sıvı+katı fazındayken yapılır ise daha iyi akış kontrolü elde edileceği düşünülmektedir. Bu çalışmadan yola çıkarak, düşük ergime sıcaklığına sahip ötektik veya ötektik olmayan neredeyse bütün alaşımların, yeterince düşük katman kalınlığı değeri sağlandığında 3B üretimi gerçekleştirileceği düşünülmektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların 3B üretiminde tabla sıcaklığı önemli rol oynamaktadır. Metallerin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmaları nedeniyle, sıcak uçta bulunan malzeme ile tablada biriken malzeme temas ettiğinde hızlı bir şekilde ısı transferi gerçekleştirmektedir. Bu hızlı ısı transferi 3B üretim sürecini olumsuz etkilemektedir. Biriken metalin yavaş bir şekilde katılaşması için tabla sıcaklığı ve üretim sıcaklığı değerleri birbirine yakın olması gerekmektedir.

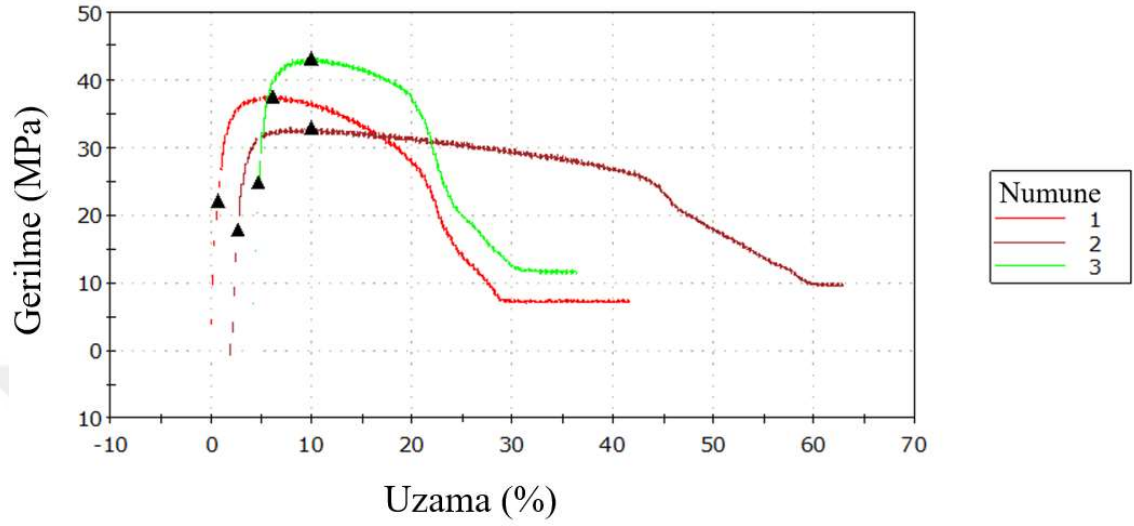
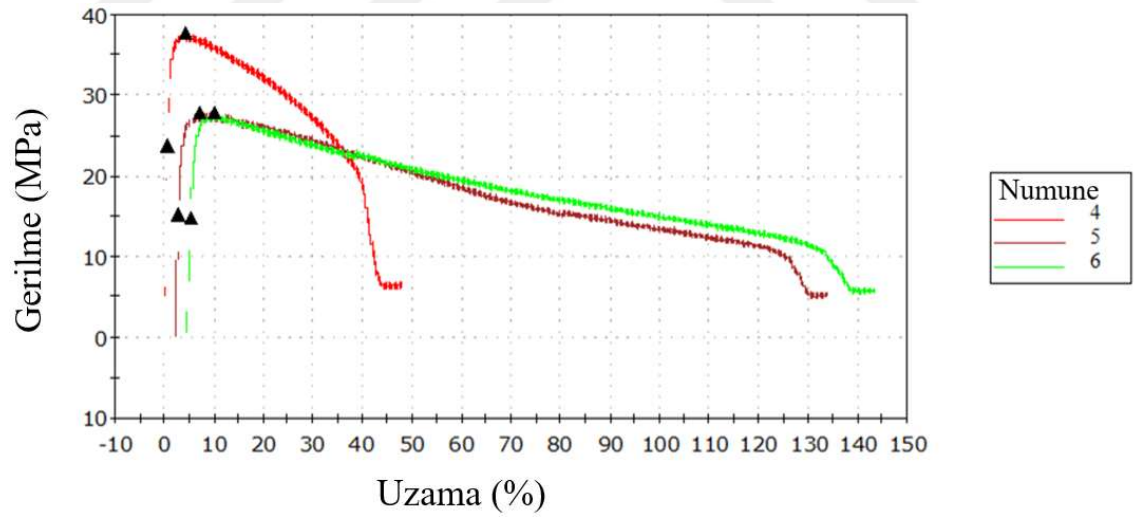
FDM tipi 3B üretimde, tasarımda bulunan destek yapısı modelden kolayca ayrılabilir şekilde bulunmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin, FDM yöntemi ile üretimde kullanılabilecek destek yapılarını modelden ayrılması için talaşlı imalat yöntemlerine başvurulabilir. Ayrıca destek malzemesi olarak başka bir sıcak uç içerisinde ekstrude edilen termoplastikler kullanılabilir. Çift ekstrudere sahip FDM tipi 3B yazıcılarda, düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımların sıvı fazında üretimi için destek malzemesi olarak termoplastiklerin kullanımı, bu üretim yöntemi ile elde edilebilecek modellerin tasarım kısıtlamalarını azaltacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

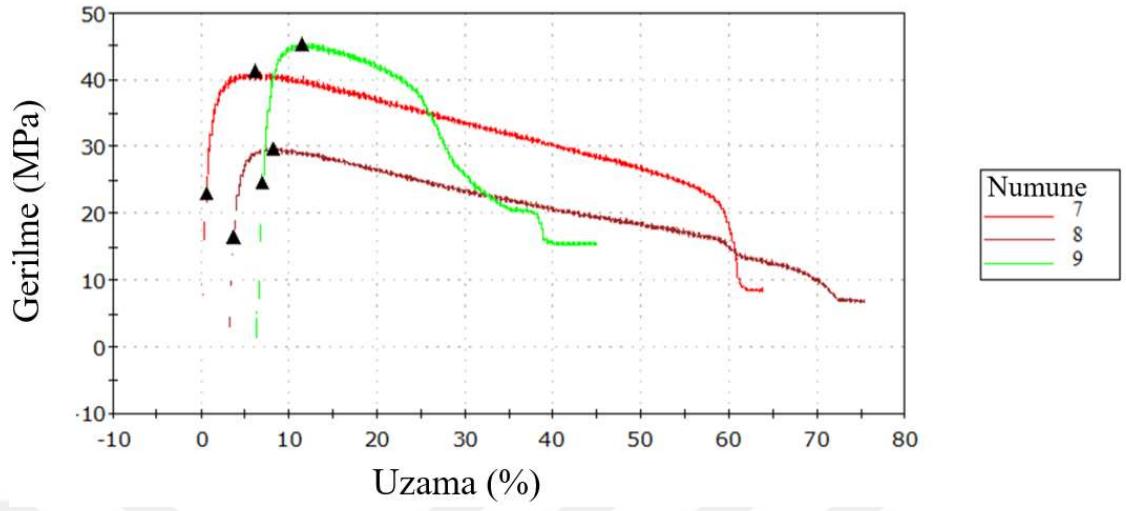
- Andersen, K., Dong, Y., Kim, W.S. 2017. Highly Conductive Three-Dimensional Printing With Low-Melting Metal Alloy Filament. *Advanced Engineering Materials*. 19.
- Aran A. 2007. Döküm Teknolojisi. İmal Usülleri Ders Notları.
- Darot, M., Reuschle T. 1999. Direct Assessment of Wood's Metal Wettability on Quartz. *Pure and Applied Geophysics*, 155(8):119-129.
- Frazier, W.2014. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 23.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Extrusion-Based Systems. Additive Manufacturing Technologies, 147–173.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Powder Bed Fusion Processes. Additive Manufacturing Technologies, 107–145.
- Heo, H., Park, S.D., Bang, In C.B., Jerng, D.W. 2014. Breakup Behavior of Molten Wood's Metal Jet in Subcooled Water. KNS 2014 Fall Meeting, Seul, Güney Kore.
- Hsieh, P., Tsai, C., Liu, B., Wei, W., Wang, A., Luo, R. 2016. 3D printing of low melting temperature alloys by fused deposition modeling. 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1138-1142.
- Jabbari A., Abrina, K. 2018. A metal additive manufacturing method: semi-solid metal extrusion and deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 94.
- Kamal, M., Mazen, S., El-Bediwi, A.B. ve Kashita, E. 2005. Characterization of bismuth–tin–lead and bismuth–tin–lead–cadmium fusible alloys. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 160(8): 369-375.
- Lima, D.D., Caram R., Campo, K., Button, S. 2020. 3D thixo-printing: A novel approachfor additive manufacturing of biodegradable Mg-Zn alloys. *Materials & Design*. 196. 109161
- Mireles, J., Espalin, D., Roberson, D., Zinniel, B., Medina, F., Wicker, R. 2012. Fused deposition modeling of metals. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. 836-845.
- Mireles, J., Kim, H, Lee, In Hwan, Espalin, D., Medina, F., Macdonald, E., Wicker, R. 2013. Development of a Fused Deposition Modeling System for Low Melting Temperature Metal Alloys. *Journal of Electronic Packaging*. 135.
- Mudry, S., Shtablayvi, I., Liudkevych, U., Winczewski, S. 2015. Structure and thermal expansion of liquid bismuth. *Materials Science*. 33(4):767-773.
- Orme, M. 1993. Rapid Solidification Materials Synthesis with Nano-Liter Droplets. *SAE Transactions*, 102, 1876–1881.
- Osamura, K. 1988. The Bi–Pb–Sn (Bismuth-Lead-Tin) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams* 9, 274.

- Jones, R., 2013. Additive Manufacturing of Functional Engineering Components, Phd Thesis, University of Bath, Somerset, İngiltere
- Rice, C., Mendez, P., Brown, S. 2000. Metal solid freeform fabrication using semisolid slurries. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society(JOM)*.52. 31-33.
- Sells, E., Bowyer, A. 2006. Directly incorporating electronics into conventional rapid prototypes. 7th National Conference on Rapid Design, Prototyping & Manufacturing, High Wycombe, İngiltere.
- Su, A., Al'Aref, S. J. 2018. History of 3D Printing. *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, 1–10.
- Sudhan S., Preeth, S., Vikraman, N., Daini M.R., Ranjith R.A. 2020. Experimental Analysis of Low Melting Metal Alloy for Fused Deposition Modelling based Process. *International Journal for Scientific Research & Development*.8, 2.
- Tan W.S. 2015. Proof of concept: Application of induction heating to 3D print low melting point metal alloy, Final Project Summary Report 2015, UNSW Canberra at the Australian Defence Force Academy, Sidney,Avustralya.
- Tseng, A., Tanaka, M. 2001. Advanced Deposition Techniques for Freeform Fabrication of Metal and Ceramic Parts. *Rapid Prototyping Journal*. 7. 6-17.
- Warrier, N., Kate, K.H. 2018. Fused filament fabrication 3D printing with low-melt alloys. *Progress in Additive Manufacturing*. 3
- Yuh-Chung, H., Wang, Y., Hsiu-Hsien.W., 2017. Wiring the Tin–Silver–Copper Alloy by Fused Deposition Modeling, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*.

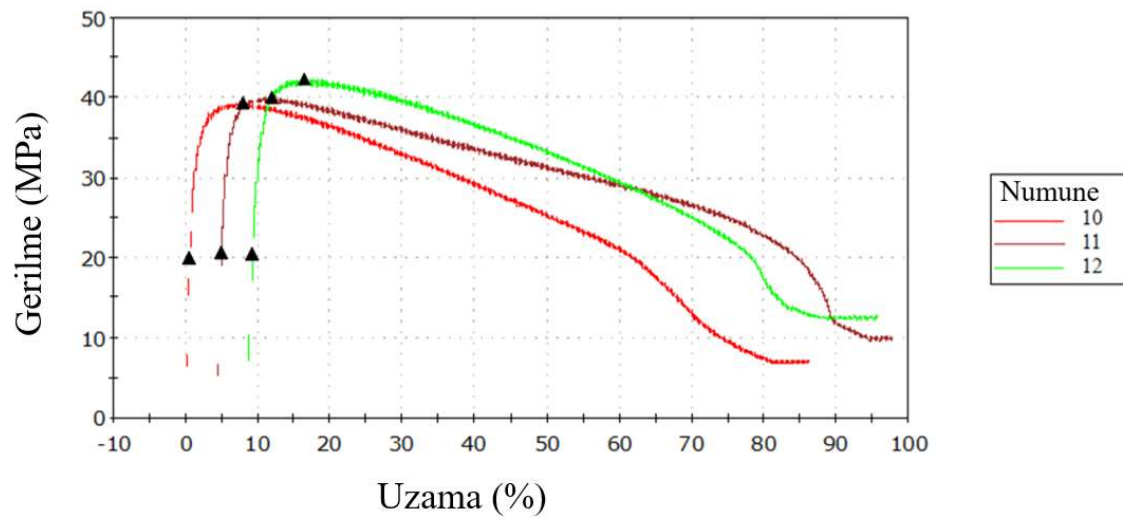
7. EKLER

Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 Z Numunelerinin Gerilme-Uzama Değerleri**Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 Y Numunelerinin Gerilme-Uzama Değerleri**

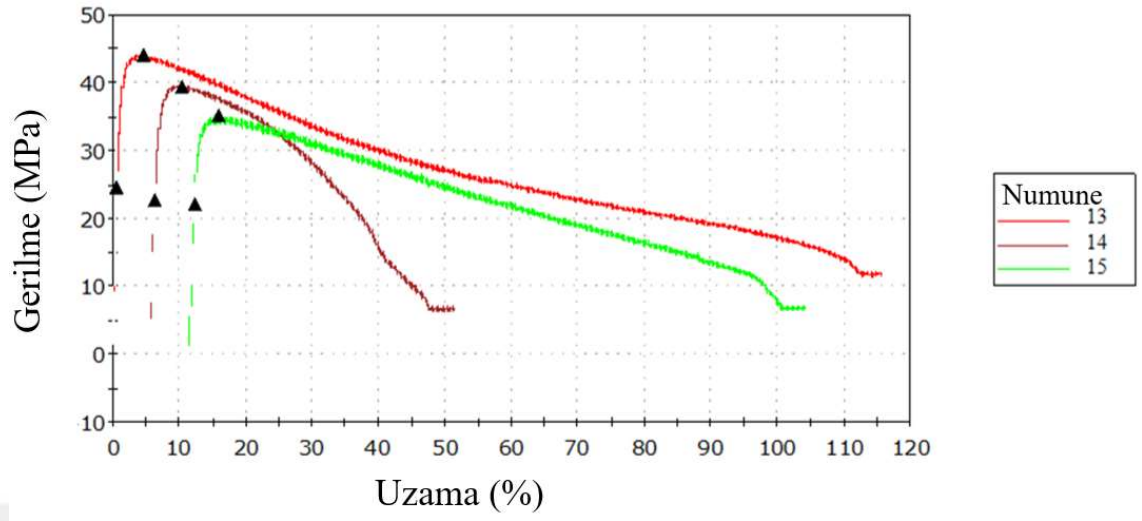
Bi50Pb26.7Sn13.3Cd10 Döküm Numunelerinin Gerilme-Uzama Değerleri



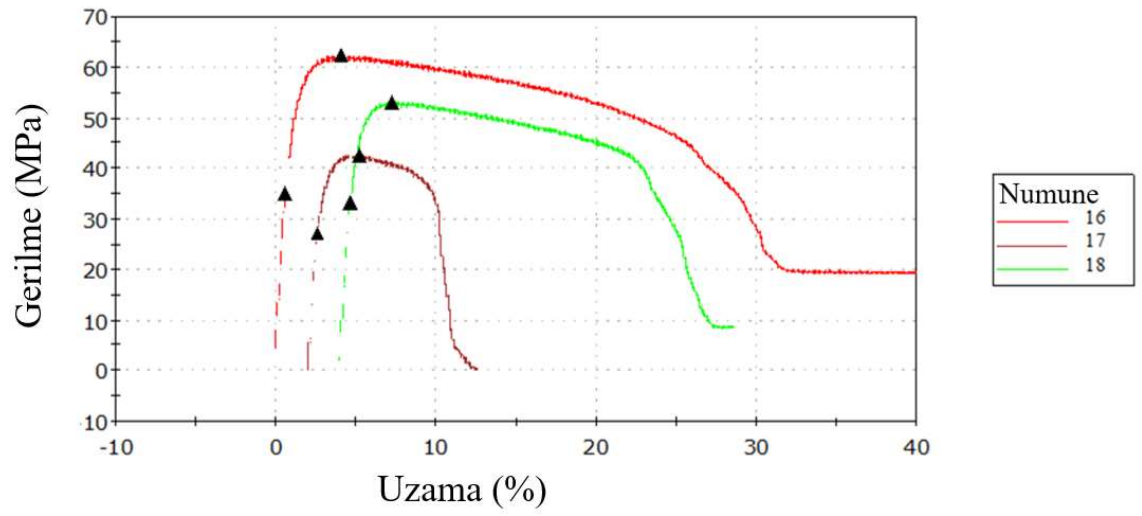
Bi50Pb25Sn25 Z Numunelerinin Gerilme-Uzama Değerleri



Bi50Pb25Sn25 Y Numunelerinin Gerilme-Uzama Değerleri



Bi50Pb25Sn25 Döküm Numunelerinin Gerilme-Uzama Değerleri



ÖZGEÇMİŞ

MUSTAFA KEMAL GÜLSEREN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2018-2022	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2013 -2018	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Gülseren M.K., Kovan V., Tezel T. (2021). Low Melting Alloys For Fused Filament Fabrication. V. International Istanbul Scientific Research Congress, İstanbul, Türkiye, 14 Ağustos 2021, ss.464-467
- 2- Gülseren M.K., Kovan V., Tezel T. (2021). The Use Of Metal Additive Manufacturing in Transplantation Applications. V. International Istanbul Scientific Research Congress, İstanbul, Türkiye, 14 Ağustos 2021, ss.357-363
- 3- Gülseren M.K., Kovan V., Tezel T. (2021). Effects Of Rapid Prototyping On Applications During The Pandemic. V. International Istanbul Scientific Research Congress, İstanbul, Türkiye, 14 Ağustos 2021, ss. 350-356
- 4- Gülseren M.K., Kovan V., Tezel T. (2021). Additive Manufacturing in Automotive Industry. International Conference On Intelligent Robotics, Mechatronics, And Automation Systems, Chennai, Hindistan, 26 – 27 Mart 2021, ss.50

5- Gülseren M.K., Kovan V., Tezel T. (2021). The Benefits of Additive Manufacturing In The Covid-19 Pandemia Process. International Conference On Intelligent Robotics, Mechatronics, And Automation Systems, Chennai, Hindistan, 26 – 27 Mart 2021, ss.69

