T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAKIR ALAŞIMI PARÇALARIN ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİ İLE İMALATINDA PROSES OPTİMİZASYONU

Muhammed Hakan KARAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Ali Serdar VANLI

Temmuz, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAKIR ALAŞIMI PARÇALARIN ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM YÖNTEMİ İLE İMALATINDA PROSES OPTİMİZASYONU

Muhammed Hakan KARAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 18.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali Serdar VANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali Serdar VANLI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Anıl AKDOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Pınar DEMİRCİOĞLU, Üye
Adnan Menderes Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Ali Serdar Vanlı sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Bakır Alaşımı Parçaların Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi İle İmalatında Proses Optimizasyonu" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Hakan KARAŞ

İmza

Bu çalışma, “TÜBİTAK’ın 5230042” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni bilgi ve deneyimleriyle yönlendiren, tez çalışmamda her zaman sabır ve özveriyle destek olan değerli danışmanım Doç. Dr. Ali Serdar VANLI'ya ve bilgi birikimi ile bizleri her zaman destekleyen sayın Prof. Dr. Anıl AKDOĞAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendileri, bu sürecin her aşamasında bana ilham kaynağı olmuş ve akademik gelişimimde önemli bir rol oynamıştır.

Ayrıca, yüksek lisans yolculuğum boyunca desteklerini her zaman hissettiren aileme teşekkürlerimi sunar, bu süreçte kaybettiğim annemi rahmet ve özlemle anarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde emeği geçen tüm paydaşlara da teşekkür ederim.

Saygı ve sevgilerimle,

Muhammed Hakan KARAŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

2 BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLARI 3

2.1 Tarihçe 3

2.2 Bakır ve alaşımlarının genel özellikleri 4

2.2.1 Pirinc alaşımları …… 6

2.2.2 Bronz alaşımları ……..…… 8

2.2.2.1 Kalay bronzları……..… 9

2.2.2.2 Alüminyum bronzları…… 9

2.2.2.3 Nikel bronzları……...… 9

2.2.2.4 Silisyum bronzları…… 10

2.2.3 Bakır-Nikel alaşımları ……...…… 10

2.2.4 Bakır-Kurşun ilişkisi ..…… 11

3 DÖKÜM VE DÖKÜM PROSESİNDE KRİTİK ETKENLER 13

3.1 Döküm..... 13

3.1.1 Dökümde dikkat edilmesi gereken parametreler…… 14

3.1.1.1 Malzeme Seçimi…… 14

3.1.1.2 Kalıp tasarımı ve hazırlığı……15

3.1.1.3 Besleyici…… 16

3.1.1.4 Yolluk…… 16

3.1.1.5 Maça…… 17

3.1.1.6 Tuz maça…… 18

3.2 Basınçlı döküm 19

3.2.1 Alçak basınçlı döküm yöntemi (Low pressure die casting)…… 21

4 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **24**

5 MATERYAL VE METOT **34**

5.1 Alaşım hazırlığı 34

5.2 Döküm süreci ve parametrelerin belirlenmesi.....35

5.3 Döküm sonrası analizler 35

6 DENEYSEL ÇIKTILAR **39**

6.1 Döküm parametresi çıktıları.....39

6.2 Malzeme hurda oranı 39

6.3 Malzeme sertlik oranları 40

6.4 Malzemelerin mikroskop altındaki görüntüsü 41

7 SONUÇ **43**

KAYNAKÇA **44**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **48**

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa
β	Beta
HB	Brinell Sertlik
C^o	Derece
Kg	Kilogram
kN	Kilo Newton
MPa	Mega Pascal
µm	Mikro metre
Mbar	Milibar
Mm	Milimetre
S	Saniye

KISALTMA LİSTESİ

4MS	Four Member State
Al	Alüminyum
B	Bor
Bi	Bizmut
CDA	Copper Development Association
CMM	Control Measurement Machine
Cu	Bakır
Cr	Krom
EDS	Energy-Dispersive Spectroscopy
EDX	Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy
Fe	Demir
HB	Brinell Hardness
LPDC	Low pressure die casting
Mn	Mangan
N	Azot
NaCl	Sodyum Klorür
P	Fosfor
Pb	Kurşun
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
RoHS	Restriction of Hazardous Substence
Sb	Antimon
Se	Selenyum
SEM	Scanning Electron Microscope
Si	Silisyum
TEM	Transmission Electron Microscope
Ti	Titanyum
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
Zn	Çinko

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Bakır-Çinko denge diyagramı üzerinde pirinçlerin mühendislik uygulama sahalarının gösterimi **8**

Şekil 2.2 Bakır-Nikel faz diyagramı **11**

Şekil 2.3 Kurşunun 200-300 derece sıcaklıktaki fiziksel özellikleri **12**

Şekil 3.1 Şekil döküm işleminin grafiği (ASM International 2009) **15**

Şekil 3.2 Flowcast programıyla sıvı metalin kalıbı doldurma görüntüsü **16**

Şekil 3.3 Klasik kum kalıplamada yolluk sistemi **17**

Şekil 3.4 Maça üretim metodları **18**

Şekil 3.5 Ottmar Mergenthaler'in Dizgi Makinesi **20**

Şekil 3.6 Basınçlı döküm yöntemleri **21**

Şekil 3.7 Alçak basınçlı döküm makinesi **22**

Şekil 3.8 Alçak basınçlı dökümde kullanılan tipik basınç eğrisi **23**

Şekil 4.1 (a) Deney düzeneğinin şematik diyagramı, şekildeki numaralar 1: kondüktör, 2: bağlayıcı, 3: grafit elektrot, 4: korindon pota, 5: ergimiş alaşım; (b) Elektrotların farklı yerleştirme yöntemleri: sığ yerleştirme, yarı yerleştirme, tam yerleştirme; (c) Numune test noktası örnekleme haritası **24**

Şekil 4.2 Bizmut içeren Cu-%40Zn alaşımlarının atomize edilmiş tozunun ve tavlanmış tozunun kesitinde SEM-EDS gözlemi **26**

Şekil 4.3 Malzemelerin potansiyel işlenebilirliği için 0-10 arası normalize edilmiş değerlerle polar diyagramlar **27**

Şekil 4.4 Aşınma izi için sürtünme çiftinin SEM mikrografı (a,b) ve pim (c) karakterizasyonu **28**

Şekil 4.5 CW510L malzemesinin tornalanması sırasında (a) TiAIN; (b) TiB2; (c) DLC; (d) elmas kaplamalı karbür uçlarının takım aşınması **30**

Şekil 4.6 Geliştirilmiş alaşım mikroyapıları (a) C6932, (b) geliştirilmiş alaşım, (c) (b) nin büyütülmüş görüntüsü, (d) geliştirilmiş alaşımın SEM görüntüsü **31**

Şekil 4.7 Rheological sıkma döküm ekipmanı **32**

Şekil 4.8 Lantan ilavesinin pirinc alaşımlarının ortalama tane boyutu D ve şekil faktörü F üzerindeki etkisi **33**

Şekil 5.1 NIKON_SMZ800 optik mikroskobu **36**

Şekil 5.2 Time TR 221 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı **37**
Şekil 5.3 Matsuzawa DXT sertlik ölçüm cihazı **38**
Şekil 5.4 Perkin Elmar Lambda 35 UV/VIS spektroskopi cihazı **38**
Şekil 6.1 3. Şarjın gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (%0.02Sb) **41**
Şekil 6.2 Alüminyum, antimon ve bismut mikroyapıları **42**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri **3**

Tablo 2.2 Dünya bakır üretim ve rezervlerinin dağılımı **5**

Tablo 2.3 Bakır alaşım tanımlamaları **6**

Tablo 2.4 Bakır çinko alaşımlarının ergime veya solidüs sıcaklığının artan çinko miktarı ile değişimi **7**

Tablo 2.5 Çevreci pirinç alaşımlarının işlenebilirlik oranı **8**

Tablo 3.1 Farlık döküm yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları **14**

Tablo 4.1 Pirinc alaşımlarının kimyasal kompozisyonları **25**

Tablo 4.2 Yarı sürekli döküm ünitesinde dökülen malzemenin tanımı ve bileşimi (ağırlık yüzdesi olarak) (kalan: Cu) **25**

Tablo 4.3 Çalışma için seçilen pirinc malzemeleri ve bunların kimyasal bileşimi (ağırlık yüzdesi olarak) verilmiştir **27**

Tablo 4.4 Bakır alaşımlarının kompozisyonu CuZn37, CuZn38As, CuZn42 ..... **28**

Tablo 4.5 Deneylerde kullanılan kesici uçların geometrik ölçüleri **29**

Tablo 4.6 Çalışma malzemelerinin termo-mekanik özellikleri **29**

Tablo 4.7 Numunelerin kimyasal bileşimi **31**

Tablo 4.8 İncelenen kurşunsuz silisyumlu pirinclerin, kurşunsuz ana alaşımın ve referans kurşunlu pirincin kimyasal bileşimi (EDX Analizi) **32**

Tablo 4.9 Bu çalışmada kullanılan ikili tuz sistemlerinin kimyasal bileşimi ve liküdüs sıcaklığı (K) **33**

Tablo 5.1 Düşül kurşunlu mastar alaşımın kimyasal analizi **35**

Tablo 5.2 Koordinat ölçüm cihazı (CMM) sonuçları **37**

Tablo 5.3 Tüm şarjların spektral analiz sonuçları **38**

Tablo 6.1 Döküm parametreleri ve kurşun (Pb) oranları **39**

Tablo 6.2 Lavabo bataryası üretim verimliliği **40**

Tablo 6.3 Şarjların brinell sertlik değerleri **40**

Tablo 6.4 Çekme testi sonuçları (ortalama) **41**

ÖZET

Bakır Alaşımı Parçaların Alçak Basınçlı Döküm Yöntemi İle İmalatında Proses Optimizasyonu

Muhammed Hakan KARAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmal Usulleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ali Serdar VANLI

Bakır alaşımları, sahip oldukları kolay şekillendirilebilirlik özellikleri, döküm için tasarlanan karmaşık şekilli parçaların üretimine kolaylık sağlaması ve sağlık açısından bakteri üretimini engelleyip, korozyon dayanımının da iyi olması sebebi ile lavabo bataryası üretiminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, alçak basınçlı döküm yöntemi ile üretilen lavabo bataryaları için çeşitli parametreler üzerine çalışılmış ve mevcutta kullanılan bakır alaşımındaki kurşun malzemesi üzerine alternatifler denenmiştir. Akışkanlık, döküm hataları, mekanik ve mikroyapısal özellikler araştırılmıştır. Ayrıca döküm metodunda önemli bir parameter olan maça için farklı malzeme önerisi üzerine durulmuştur. Literatürde yer alan kurşunsuz ve çevre dostu pirinç alaşımı geliştirmeleri gözden geçirilmiştir. Alüminyum (Al), antimon (Sb) ve bizmut (Bi) gibi alaşım elementleri ilavesinin üretim parçalarının mikro yapısal ve mekanik özelliklerine etkileri bu çalışmada dökülen musluk şarjlarında gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, alüminyum, antimon ve bizmut modifiyeli düşük kurşun içerikli alaşım reçetelerinden, alçak basınçlı döküm yöntemi ile bataryalar üretilmiştir. Batarya şarjlarından en iyi dayanım ve optimum

sertlik değerlerine sahip batarya antimon ilaveli 3. şarjda gözlemlenmiştir. Ayrıca bu şarjda diğer element ilaveli şarjlara göre mikroyapı dağılımı daha iyi sonuç vermiş ve üretim verimliliği %81 ile en iyi çıktıyı sunmuştur. Bu çıktılar ile antimon ilavesinin alüminyum ve bizmut ilavelerine göre batarya dökümünde önemli bir etkisi olduğu ortaya konmuştur. Sonuçlar sadece döküm için değil, dökümü takip eden ilave mekanik prosesler içinde umut vericidir**.**

Anahtar Kelimeler: Düşük kurşunlu bakır alaşımları, Alçak basınçlı döküm, Antimon ilavesi, Döküm yöntemi iyileştirme

ABSTRACT

Process Optimization In The Manufacturing Of Copper Alloy Parts By Low Pressure Die Casting

Muhammed Hakan KARAŞ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali Serdar VANLI

Copper alloys are used in faucet battery production due to their ease of formability, which facilities the manufacturing of complex-shaped parts designed for casting. Additionally, they help prevent bacterial growth for health reasons and exhibit good corrosion resistance. In this study, various parameters affecting the production of faucets using the low-pressure die casting method were investigated, and alternatives to lead in the currently used copper alloy were explored. Fluidity, casting defects, mechanical, and microstructural properties were examined. Furthermore, alternative materials for cores an important parameter in the casting process were also considered. Developments in lead-free and environmentally friendly brass alloys reported in the literature were reviewed. The effects of adding alloying elements such as aluminum (Al) , antimony (Sb), and bismuth (Bi) on the microstructural and mechanical properties of the cast faucet parts were observed. In this study, faucets were produced using low pressure die casting from low-lead alloy recipes modified with aluminum, antimony, and bismuth. The faucet cast with the antimony added 3th alloy showed the best strength and optimal hardness values. Moreover, this batch exhibited better microstructural distribution and the highest production efficiency, reaching 81%. These results demonstrate that the addition of antimony has a significant impact on faucet casting compared to aluminum and

bismuth. The findings are promising not only for the casting process itself but also for the subsequent mechanical processes.

Keywords: Low-lead copper alloys, Low pressure die casting, Antimony addition, İmproving of casting methodology

1
GİRİŞ

Bakır alaşımları, yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci ve kolay şekillendirilebilme özellikleri sayesinde birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakırın insanlık tarihinde kullanılması çok eski çağlara dayanır [1]. Bakır ve kurşun arasındaki ilişkiye baktığımız zaman, bronz malzemelerde yüksek mukavemet ve düşük sürtünme katsayısı gözlemlenirken, alüminyum bronzlarında ise denizcilik ve petrol endüstrisinde kullanılan çeşitli oranlardaki alaşımları bulunmaktadır. Dünya bakır rezervlerinin gün geçtikçe azalması, öte yandan bakıra olan ihtiyacın artış göstermesi, bakır üzerine yapılan araştırmaların önemini arttırmaktadır [1]. Kurşunun ilavesi bize bu süreçte otomat pirinçleri dediğimiz malzemelerin ortaya çıkmasında yardımcı olmuştur. Bu malzemeler genel olarak %4'den az kurşun (Pb) elementi kullanır. Talaşlı imalatta büyük kolaylık sağlamasına rağmen, insan sağlığı için olumsuz etkenler taşıyan kurşunun her geçen gün daha da kullanımının azaltılması beklenmekte ve bu doğrultuda ilgili regülasyonlar yayımlanmaktadır. Düşük kurşunlu bakır alaşımlarının kaliteli alçak basınçlı döküm kabiliyetlerini araştırdığımız ön deneysel çalışmalarımızdan birisinde; % 0.2 kurşun içerikli CW509L (CuZn40), % 0.05 kurşun içerikli CW502L (CuZn15) ve kurşunsuz eser miktarda kurşun içerikli DIN 17665 (CuAl10Ni5Fe4) alaşımlarını Altair Inspire Cast programında bilgisayar destekli dolum ve katılaşma simülasyonlarına tabii tuttuk. Yapılan analiz ve değerlendirmelerde kurşun içeriği düştükçe alaşımın kalıbı doldurma süresinin uzadığı görülmüştür. Yine, yapılan analiz ve değerlendirmelerde kurşun içeriği düştükçe alaşımın katılaşma aralığının daralması ile kalıbın şeklini rahatça alabilmesi için zaman kısıtı oluşmaktadır. Bu da alaşımın döküm kabiliyetinin azalması anlamına gelmektedir. Analizlerde her üç alaşımda da mikroporozite ve soğuk birleşme hataları gözlemlenmiştir. En çok soğuk birleşme hatası eser miktarda kurşun içeren DIN 17665 (CuAl10Ni5Fe4) alaşımında görülmüştür.

Yürüttüğümüz bu ön deneme çalışmalarımız, bakır alaşımlarındaki kurşun oranının, alçak basınçlı döküm parçasının dolum ve katılaşma süreçlerini optimize edebilmek adına önemli bir etken olduğunu doğrulamaktadır. Döküm parçasının erken katılaşması ve erken soğuması, döküm kabiliyetini azaltarak birçok önemli döküm kusurunun oluşmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmadaki başarı kriterlerimiz, bu tür hataların oluşmasını engelleyici çalışmalar yürütmek ve/veya oluşumlarını minimize etmektir. Bu hedeflerle, bu çalışma ile düşük kurşun içerikli bakır alaşımının alçak basınçlı döküm yöntemiyle yüksek kaliteli şekilde üretilebilmesi için yenilikçi kalıp tasarımları gerçekleştirilecek ve proses parametreleri yöntemin gerekliliklerine göre optimize edilecektir. Bu çalışma, kurşunsuz bakır alaşımları ile alçak basınçlı döküm yöntemi kullanılarak lavabo bataryası üretimine odaklanmıştır. Döküm sürecinde alaşımın akıcılığı gibi temel parametreler ile üretim sonrası kalite, parça ıskarta oranları, malzeme mikro yapısı ve sertlik gibi özellikler analiz edilmiştir. Ayrıca, alüminyum, antimon ve bizmut alaşım elementlerinin mikro yapısal ve mekanik etkileri bu çalışma doğrultusunda uygulanacak şarjlarda gözlemlenmiştir. Bu analizler sayesinde, çevre dostu ve verimli pirinç alaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2
BAKIR VE BAKIR ALAŞIMLARI

2.1 Tarihçe

İlk bakır eşyaların M.Ö. 4500 yıllarında yaşamış olan keldanilere ait olduğu anlaşılmıştır. Bakır izabe prosesinde M.Ö. 3500 yıllarında Basra körfezinin kuzeydoğusunda başladığı tahmin edilmektedir. Çin'de M.Ö. 2500 yılında kullanılmaya başlanan bakırın ilk bronz dökümü M.Ö. 2250'de yapılmıştır [1].

Tablo 2.1 Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri [2]

Simgesi	Cu
Sınıfı	Geçiş elementleri
Grup, periyot, blok	11, 4, d
Görünüş	Metalik kahverengi
Kristal Yapısı	Kübik (YMK)
Atom Ağırlığı	63,546 g/mol
Yoğunluğu	8.93 gr/cm^3
Mohs sertliği	3,00
Vickers sertliği	369MPa
Brinell sertliği	874MPa
Ergime Noktası	1083.0 ^{o}C (1356.15 ^{o}K, 1981.4 ^{o}F)
Kaynama Noktası	2567.0 ^{o}C (2840.15 ^{o}K, 4652.6 ^{o}F)
Ergime ısısı	43 k.cal (1 kg'ının ergimesi için gerekli ısı)- 13,26kj/mol
Buharlaşma ısısı	300,4 kj/mol
Isı kapasitesi	24,440 (25 ^{o}C) J/(mol.K)
Elektrik iletme özelliği	%99.95
Elektrik direnci	16,78 nΩ.m(20^{o}C'de)
Isıl iletkenlik	401 W/(m.K)
Isıl genleşme	16,5 mm/(m.K)(25^{o}C'de)
Atom Numarası	29
Atomik yığın	63.546 amu

Kızıl bir renge sahip olan bakır 1B geçiş grubu elementlerindendir. Element numarası 29 olmakla birlikte yüksek elektrik iletkenliğine ve yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir. İnsanlık tarihinde uzun süredir kullanılan gelen bir malzeme olmakla birlikte kalay ile birleşiminden elde edilen bronz malzemesi ise adını bir devre yazdırmayı başarmıştır. Ayrıca bakır, insanoğlunun ilk bulduğu maden olması ile ayrı bir öneme sahiptir. Aktif metal olmadığı için doğada serbest halde bulunabilir.

Bakır, erken dönemlerde avcılık ve tarım araçlarının yanı sıra süs eşyaları ve ticari malların üretiminde kullanılmıştır. Örneğin, kalay ile birleşerek bronz elde edilmiş ve bu malzeme ile silah yapımından ev eşyalarına kadar bir çok ürün bronz çağında üretilmiştir. Zamanla orta çağ döneminde bakır madenciği ve ticareti ön plana çıkmaya başlamış ve yeni teknolojilerin gelişmesine madeni paranın ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştur. Günümüzde ise karşımıza, yenilenebilir enerji teknolojilerinde, elektrikli araçlarda, elektronik sektöründe iletken malzeme olarak vb. bir çok alanda karşımıza çıkmaya devam etmektedir.

2.2 Bakır ve alaşımlarının genel özellikleri

Yüksek elektrik iletkenliğine ve kolay şekillendirilebilir bir yapıya sahip olan bakır için dayanımın arttırılmasında soğuk şekillendirme ve katı çözelti oluşturma yöntemleri bulunmaktadır. Yüksek korozyon dayanımına sahip olan bakır için alaşım olarak bir çok uygulama alanı mevcuttur. Bakır rezervleri olarak ise Amerika kıtasında bulunan Şili, Peru, A.B.D ve Meksika önemli bir yere sahiptir.

Bakır, cevher olarak maden ocaklarından ve yer altı madenlerinden temin edilir. Daha sonra fiziksel işlemler ile konsantre haline gitirilen bakır cevheri, hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemler kullanılarak metalik bakır eldesi sağlanır. Elektrolitik yöntem ile bakır cevheri %99,99 saflıktaki bakır haline getirilebilir. Hidrometalurjik yöntem olarak solvent extraction, pirometalurjik yöntem olarak ise kavurma (roasting) metodu örnek verilebilir. Bu yöntemlerin dışında geri dönüşüm ile de atık bakır'dan tekrar bakır ve alaşımlarının üretimi gerçekleştirilebilir.

Bakır malzemesi içerdiği diğer alaşım elementleri ile birlikte yüksek korozif ortama sahip denizcilik uygulamalarında pervanelerde, petro-kimya endüstrisinde ise

valflerde sıkça karşımıza çıkan malzeme grubudur. Ürünlerin kullanım ömrü tamamlandıktan sonra geri dönüştürülebilir olanlar endüstriyel tesislerde toplanır ve bakır türüne bağlı olarak ayrıştırma işlemi gerçekleştirilir. Ardıdan parça halinde veya bütün olan bakır ve alaşımları parçalara ayrılır ve toz haline getirilmesi sağlanır. Yüksek sıcaklıklardaki fırınlarda ergitme işlemine tabi tutulan bakır saflaştırılır ve istenmeyen elementler içinden arındırılır. Daha sonra tekrar döküm işlemi ile yüksek saflıktaki bakır eldesi gerçekleştirilmiş olunur.

Bakır sektöründe, maden kaynakları ve işleme tesisleri yeterli sayıda olmayan Türkiye – tek izabe tesisimiz Eti Bakır'a aittir ve yıllık kapasitesi yaklaşık 90 kilotondur – ham maddede %72 oranında dışa bağımlıdır. Bu durum Türkiye'nin 2020 yılında 1,5 milyar dolar cari açık vermesine ve ham madde fiyatlarındaki değişimlerden doğrudan etkilenmesine yol açmıştır [3].

Bakır ve alaşımları, tıbbi, endüstriyel ve çevresel uygulamalarda son derece önemli hale gelen benzersiz antimikrobiyal ve biyouyumlu özellikleriyle bilinmektedir. Bakır alaşımlarının yüksek korozyon direnci, zorlu biyolojik ve çevresel koşullarda bile dayanıklılıklarını garanti etmektedir. Ayrıca, bakır iyonları enzimatik ve hücresel süreçlerde hayati bir rol oynayarak biyolojik sistemlerdeki önemlerini artırmaktadır. Bu özellikler, bakır ve alaşımlarının dermatoloji, yara iyileşmesi ve diğer biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır [4].

Tablo 2.2 Dünya bakır üretim ve rezervlerinin dağılımı [1]

Ülke	Bakır Üretimi		Rezervler
	2011	2012	
A.B.D.	1100	1150	39000
Avustralya	958	970	86000
Kanada	566	530	10000
Şili	5260	5370	190000
Çin	1310	1500	30000
Kongo	520	580	80000
Endonezya	543	430	28000
Kazakistan	417	405	12000
Meksika	443	500	38000
Peru	1240	1240	67000
Polonya	427	430	26000
Rusya	713	720	57000
Zambiya	668	675	15000
Diğer Ülkeler	1970	2100	80000
Dünya Toplamı	16100	17000	680000

Tel, bobin ve ısıl iletimin yüksek oranda gerektiği yerlerde kullanılan bakırın endüstriyel olarak uygulamalarda bir çok farklı alaşım türü ve uygulama alanları bulunmaktadır. Bunun temel sebeplerinden biri bakır alaşımlarının kolay şekillendirilebilir olması ve yüksek korozyon dayanımına sahip olmaları denebilir.

Bakır alaşımlarının isimlendirilmesinde CDA (Copper Development Association) tarafından belirtilen kurallar uygulanmaktadır. Alaşım isimlendirilmesinde ilk harf "C" dir. Bu harf alaşımın ana metalinin bakır olduğunu gösterir. Daha sonrasında gelen rakamkar ise alaşımın bileşimini ve özelliklerini tanımlar. C1xxxx ibaresinden başlayıp C7xxxx ibaresine kadar olan bakır alaşımları dövme alaşımlar olarak isimlendirilirken, C8xxxx ve C9xxxx alaşımları döküm alaşımlar olarak nitelendirilmiştir. C11000 Alaşımı genellikle yüksek saflıktaki bakır'ı (%99,99 Cu) temsil etmektedir. Pirinç alaşımı olarak bilinen %70 Cu ve %30 Zn bileşimi ise C26000 ibaresi ile belirtilmektedir.

Tablo 2.3 Bakır alaşım tanımlamaları [5]

Alaşım	Dövme	Döküm
Bakır	C10100-C13000	C80100-C81200
Pirinç	C20500-C28580	C83300-C85800
Kalay Pirinç	C40400-C46400	C83300-C84800
Fosfor Bronz	C50100-C52400	C95200-C91700
Alüminyum Bronz	C60800-C64210	C95200-C95900
Silikon Bronz	C64700-C66100	C68700-C87900
Silikon Kızıl Bronz	C69400-C67900	C87300-C87900
Bakır Nikel	C70100-C72950	C92600-C96900
Nikel Gümüş	C73500-C79900	C97300-C97800

2.2.1 Pirinç alaşımları

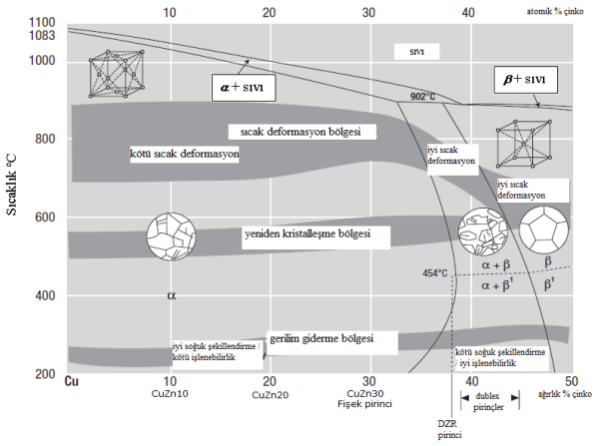
Pirinçler en çok kullanılan döküm alaşımlarından biri olmakla birlikte, kurşun kullanımı bu malzemenin dökümünde sızdırmazlık ve imalatta kolaylık sağlamaktadır. Pirinç malzemesi yaygın olarak boru, vanalar ve sistemlerdeki bağlantı elemanları için kullanılmaktadır. Kırmızı ve sarı pirinç alaşımları da bulunan bu malzemenin kırmızı pirinç ailesinde en bilindik alaşımı C83600 malzemesidir. Ayrıca bu alaşımın içerisinde %5 oranında kurşun bulunmaktadır. Sarı pirincin ise maliyeti kırmızı pirince göre daha az olmakla birlikte çinko oranı ise kırmızı pirince oranla daha fazladır. Genel olarak sarı pirinçte %20-39

aralığında çinko bulunur. Yüksek dayanıma ve iyi korozyon direncine sahip olan pirinçlerin, çinko oranının değişimi ile birlikte malzemenin ergime noktasının düştüğü görülmektedir.

Tablo 2.4 Bakır çinko alaşımlarının ergime veya solidüs sıcaklığının artan çinko miktarı ile değişimi [6]

	% 0 Zn	% 10 Zn	% 20 Zn	% 30 Zn	% 40 Zn	% 60 Zn	% 70 Zn	% 80 Zn	% 90 Zn	% 100 Zn
ERGİME VEYA SOLİDÜS SICAKLIĞI (^{O}C)	1083	1040	995	930	900	880	820	780	580	419

Pirinçlerin bir çok kullanım alanı olmakla birlikte, bu kullanım alanını etkileyen kritik parametre faz yapılarıdır. α pirinçleri daha kolay şekillendirilebilirlik gerektiren uygulamalarda kullanılırken, α+β pirinçleri ise daha mukavemet gerektiren yerlerde tercih edilmektedir. Yüksek mukavemetli pirinçlerin mukavemet arttırma mekanizmaları, katı çözünme ve β/α faz oranının artışıdır. Kurşun oranının da bu sürece dahil edilmesi ile birlikte talaşlı imalat süreci iyileştirilmiş otomat pirinçleri dediğimiz malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bu malzemelerde genel olarak %4'den az Pb elementi kullanılır. Kurşun , pirinç alaşımlarının talaşlı işlenmesinde büyük kolaylık sağlar iken bir yanda da insan sağlığına olan olumsuz etkileri sebebi ile her geçen gün kullanım oranının azaltılması istenmektedir. Alternatif malzeme kullanımı için de araştırmalar yapılmaktadır. Pirinç günümüzde, vazolarda, enstrümanlarda ve dişlilerin üretiminde de karşılaştığımız bir malzemedir. Ek olarak vanalarda da pirinç kullanılmakla birlikte, sağlığa etkisinden dolayı burada kullanılan pirinçlerin kurşun oranına dikkat edilmesi gerekmektedir. Düşük kurşun oranlı pirinçler ise özellikle su tesisatlarında, gıda ile temas halinde olan pirinçlerin uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.1 Bakır-Çinko denge diyagramı üzerinde pirinçlerin mühendislik uygulama sahalarının gösterimi [6]

Sıhhi tesisat sistemlerinde bulunan kurşun oranının azaltılması veya yerine alternatif malzeme araştırmaları ilerleyen süreçlerde bizmut ve selenyumun bu sürece dahil olmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalarda bu malzemelerin kullanımı ile üretilen C89550 pirincinin kurşunlu pirinç olan C36000 serisi malzeme ile benzer özellikte işlenebilirlik kabiliyeti olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca döküm prosesinde de bizmut , kurşuna göre daha düşük ergime sıcaklığı olsa bile selenyum ile özelliklerini iyileştirmekte, ayrıca kurşun gibi bakır içerisinde çözünmemektedir. Yine de kurşunlu pirinçler %100 geri dönüştürülebilir iken bizmut'lu pirinçler için ayrı bir ayrıştırma işlemine ve bunun için yatırıma ihtiyaç vardır.

Tablo 2.5 Çevreci pirinç alaşımlarının işlenebilirlik oranı [6]

ALAŞIM	İŞLENEBİLİRLİK ORANI
C36000	100
C83600	84
C84400	90
C89510	75
C89520	85
C85500	80
C89550 (%0,7 Bi)	75
C89550 (%1,1 Bi)	97

2.2.2 Bronz alaşımları

Bakır ve kalayın karışımından oluşan alaşıma verilen isimdir bronz. Kalay, bronzun mukavemetinin artmasına yardımcı olur. Ayrıca insanoğlunun döktüğü ilk alaşım

olarak da bilinmektedir. Bu alaşımın mikro yapısı pirince göre bakır-kalay difüzyonunun düşük olmasından kaynaklı daha karmaşıktır. Bronz malzemeler genel olarak dayanıklı, korozyon direnci iyi ve bakırdan iyi olmasa da nispeten iyi denebilecek elektrik iletkenliğine sahip malzemelerdir. Pirinç gibi heykellerin üretiminde kullanılabilir ve yüksek korozyon direncine sahip olduğu için bronzlar gemi pervanelerinin üretiminde de sıkça karışımıza çıkmaktadır. Farklı elementlerin eklenmesi ile de farklı bronz türleri ortaya çıkmıştır. Yüksek çekme ve akma dayanımının yanında iyi bir darbe direncine de sahiptirler. İşlenebilirlik açısından da iyi olan bronz, kayışlar ve rulmanların üretiminde de kullanılabilir. Karşımıza en çok heykel yapımında, rulmanlarda ve para yapımında çıkmaktadır.

2.2.2.1 Kalay bronzları

Yaygın kullanılan bakır alaşımlarından biridir. İçeriğinde kalay ve fosfor bulunan bu alaşımın yaygın türlerinde %1,25 ile %10 arasında kalay bulunmaktadır. Fosfor eklenmesi bakırın mekanik özelliklerinin iyileşmesine yardımcı olurken, bu ürün grubu ile elektrik bağlantı elemanları üretilebilmektedir. İçeriğinde %6 kalay içeren bronzlar soğuk işleme ve sıcak işlemeye müsaittir [2].

2.2.2.2 Alüminyum bronzları

Kimyasal bileşimleri dikkate alındığında, bu alaşımlar iki temel sınıfa ayrılır: Birincisi, bakır ve alüminyum içerenler, bunlar başka alaşım elementi barındırmaz ve alfa tipi olarak adlandırılır. İkincisi ise, alüminyuma demir, magnezyum ve nikel gibi farklı alaşım elementlerinin de karıştığı alüminyum alaşımlarıdır.

Alüminyum bronz alaşımları genel olarak içeriğinde %5-14 aralığında Al bulundurur. Alüminyum sayesinde alaşımın dayanımı artarken, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılmasına yardımcı olmaktadır. Gemi pervanelerinin yapımında, uzay ve uçak araçlarının parçalarında ve vanalarda da kullanımı söz konusudur. Ayrıca alüminyum sayesinde döküm prosesinde akıcılık ve karmaşık şekilli parçaların dökümünde kolaylık kazanılmaktadır.

2.2.2.3 Nikel bronzları

Genel olarak %30'a kadar nikel içerebilen alaşımlardır ve en yaygın kullanılan türü %15-30 arasında nikel içerenleridir. Bu alaşımların yüksek korozyon dayanımı olmakla birlikte soğuk şekillendirilmeye uygundurlar. Bakır ve nikel, sıvı ve katı halde tamamen çözünür. İkili alaşımlar, minimum alaşım elementleri içeriğiyle

üretilir. Kompleks alaşımlar, üçlü veya çok bileşenli, sertleştirme için uygundur [7]. Yüksek elektrik dayanımına sahip olan nikel bronzları özellikle 400 C^o kadar olan uygulamalarda kendine yer bulabilir. Ayrıca termal eleman malzemesi olarak da kullanılan bir malzemedir.

2.2.2.4 Silisyum bronzları

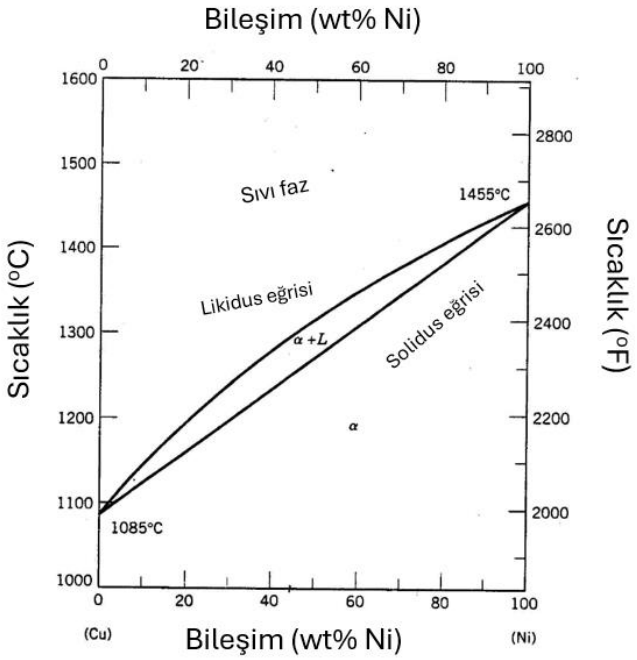
Silisyum, alaşıma mukavemet ve korozyon direnci sağlamakla birlikte bu alaşımlarda genelde diğer alaşım elementleri de kullanılır. Çinko ilavesi bu alaşıma dökülebilirlik için katılmaktadır. Mukavemet ve çalışma sıcaklığı olarak karşılaştırılacak olursa eğer kalay bronzlarından daha iyi özellikler göstereceklerdir. Tel levhalar üretilebilir ve döküm alaşımlarında %5'e kadar silisyum görülebilmektedir. Genel olarak silisyum bronzlarında %1-4 aralığında silisyum kullanılmaktadır.

2.2.3 Bakır – Nikel alaşımları

Temelinde Bakır ve Nikel ağırlıklı malzemeler kullanılan alaşımın korozyon direnci yüksek ve termal iletkenliği de iyi olduğu için endüstriyel ve ticari uygulamalarda yaygın görülen bir malzemedir. Ayrıca bakır-nikel alaşımı manyetik olmadığı için bu alaşımlar elektronik endüstrisinde de tercih edilen ürünlerdir. Deniz suyuna karşı olan dirençleri ise onları gemicilik uygulamalarında kullanmaya teşvik etmektedir.

Cu-%10Ni ve Cu%30Ni alaşımları ısı değiştiricileri ve yoğuşturuculardа en sık kullanılan iki bakır alaşımıdır. Her iki alaşımın yapay ve gerçek deniz suyundaki erezyon-korozyon davranışları birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [8].

Denizcilikte gemi pervanesi yapımında, elektronik endüstride hassas ölçüm cihazlarında ve otomotiv endüstrisinde hidrolik bileşenlerin üretiminde yer alan bakır-nikel alaşımı partikül haline getirilip kullanıldığında ise havacılık sektöründe de türbin motoru bileşenlerinde de kullanılır hale gelmiştir.



Şekil 2.2 Bakır-Nikel faz diyagramı [9]

2.2.4 Bakır-Kurşun ilişkisi

Bakır alaşımlarında kurşunun ilavesi ile elde edilen ürünler düşük sürtünme ve yüksek aşınma direncine sahip olabilir. Bu ürünler aynı zamanda kurşun sayesinde iyi işlenebilir malzemeler haline gelmektedir. Kurşun malzeme olarak insan sağlığına zararlı olduğu için uluslararası kullanımında çeşitli kısıtlamalar bulunmaktadır. Avrupa birliği tarafından uygulanan RoHS (Restriction of Hazardous Substances) regülasyonu elektronik cihazların üretiminde kurşun oranını %0.1'in altında olmasını isterken, California Proposition 65 standardı ise içme sularında sağlığa zararlı etkileri önlemek için kurşun oranını kısıtlamıştır.

Kurşun oranının azaltılması ile ilgili geçmişten günümüze meydana gelen regülasyonlar aşağıdaki gibidir:

- Almanya-Hollanda-İngiltere-Fransa ortaklığında kurulmuş olan 4MS (Four Member State) birliğinin yayımladığı içme suyu ile temas eden ürünlerdeki hijyenik uygunluk taleplerine göre alaşımlardaki kurşun içeriği sınırlandırılması deklarasyonları [10],
- ABD'de çıkan musluk malzemelerinin özellikle armatür grupları için kurşun oranının sınıflandırılmasını şart koşan, <<kurşun içermeyen malzemeler>>yasa [11],

- National Sanitation Foundation; NSF/ANSI 61-2016 – Drinking Water System Components – Health Effects – With Addendum Standardı [12],
- National Sanitation Foundation; NSF/ANSI 372-2016 – Drinking Water System Components – Lead Content Standard [13],
- AB parlamentosu'nun, 2020 tarih ve 2184 sayılı insan tüketiminde kullanılan su kalitesi içeriği başlıklı direktifi [14],
- AB parlamentosu'nun, 2006 yılında yayınladığı uluslararası sürdürülebilirlik regülasyonları doğrultusunda, tehlikeli maddelerin kullanımının kısıtlanmasına ilişkin RoHS (Restriction of Hazardous Substances / Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama) ve REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) regülasyonları [15].

Makine parçaları, bağlantı elemanları, yük taşıyan yataklar ve rulmanların üretiminde kullanılabilir bu alaşımlar. Üretim yöntemi olarak genelde döküm prosesi ve ekstrüzyon veya haddeleme ile üretim süreçleri önümüze çıkmaktadır. Kurşun talaşlı işlenebilirliği etkilemesinin yanında alaşıma akışkanlık kattığı için döküm süreçlerinin kolaylaşmasına da yardımcı olmaktadır.

Kurşun (Pb) yumuşak bir metal olduğu için bu özelliklere iyi uyum sağlar, ancak düşük akma dayanımı ve düşük sertliği nedeniyle uygulama amaçları için Cu ve benzeri sert metallerle alaşımlanması gerekir [16].

Isı iletkenliği (W m^{-1} K)	31
Yoğunluk (Kg m^{-3})	11 140
Özgül ısı (J kg^{-3} K)	147
Elastiklik modülü (MPa)	11 000
Poisson katsayısı	0.46
Isıl genleşme katsayısı (10^{-6} K^{-1})	32.5
0.2% Akma dayanımı (Tavlanmış, MPa)	0.9
Elektrik direnci (μΩm)	0.422

Şekil 2.3 Kurşunun 200-300 derece sıcaklıktaki fiziksel özellikleri [17]

Kurşun, bronz malzemelerde yüksek mukavemet ve düşük sürtünme katsayısı sağlar. Alüminyum bronzlarında ise denizcilik ve petrol endüstrisinde kullanılır. Kalay bronzlarında ise sürgülü yüzeylerde kullanılabilir. Düşük ergime sıcaklığı kaynak edilebilirliği zorlaştırsada, TIG kaynağı ile kontrollü ve temiz bir kaynak yapılabilir.

3
DÖKÜM VE DÖKÜM PROSESİNDE KRİTİK ETKENLER

3.1 Döküm

Döküm, üretim süreçlerinden biridir. Katı bir metalin, füzyon noktasına ulaşana kadar uzun bir süre boyunca aşırı bir sıcaklığa maruz bırakılmasını içerir. Erimiş metal, istenen şekle sahip bir boşluk içeren kalıba dökülür ve katılaşmaya bırakılır[18] .

Döküm süreci öncesi uygun kalıbın hazırlanması, maça ve yolluk gibi parametrelerin belirlenmesi son derece önemli konular olmakla birlikte, döküm esnasında ki katılaşma süresi ve soğutma sıvısının önceden netleştirilmiş olması ayrıca döküm işlemi bittikten ve katılaşma gerçekleştikten sonra parçanın hasar görmeyecek şekilde kalıptan çıkarılıp temizlenmesi, döküm sürecinin her aşamasının dikkat edilmesi gereken önemli bir konu olduğunu göz önüne koymaktadır. Döküm yöntemlerinin bize büyük parçaların tek seferde, küçük parçalarında yüksek adette imal edilebilmesine, maliyetten tasarrufa ve aynı zamanda da malzeme seçiminde geniş bir yelpaze sunması açısından son derece önemlidir.

İnşaat'tan madenciliğe ve otomotivden havacılığa kadar bir çok sektörde kendine yer edinen döküm sektöründe ev aletlerinden, uzay ve uçak gereçlerinin imalatına kadar bir çok parçayı döküm işlemi ile üretebilmektedir. Her parça için aynı döküm prensibi veya her sektör için aynı yöntem kullanılıyor demek, döküm sektörü için doğru bir yaklaşım olmamakla birlikte her parçanın geometrisine ve istenen özelliklerine göre geliştirilmiş bir çok farklı döküm yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler kendi içerisinde bir çok farklı parametreye sahiptir. Kalıp tasarımı, soğutma hızı ve döküm sıcaklığı bunlardan bir kaçıdır. Ayrıca uygun bir döküm sistemi tasarımında kullanlılacak parça geometrisi, beklenen yıllık bazdaki üretim miktarı, kalıptan beklenen kullanım ömrü gibi önemli kritlerde her zaman için yatırım hesaplamalarında göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 3.1 Farklı döküm yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [18]

Döküm Yöntemleri	Avantajları	Dezavantajları
Sıkıştırma döküm	1. İyi yüzey dokusu. 2. İyi bir mikroyapı. 3. Yüksek dayanımlı parçalar. 4. Düşük porozite.	1. Homojenliğe ulaşmada zorluk. 2. Kalıplar belirli bileşenler içindir. Esneklik yoktur. 3.Karmaşık kalıplardır yüksek maliyetlidir.
Kum kalıba döküm	1. Yüksek dizayn esnekliği (boyut ve ağırlık) 2. Yüksek karmaşık şekilli parçalar üretilebilir. 3. Daha geniş malzeme seçeneği. 4. Düşük maliyetli kalıp.	1. Düşük mukavemet. 2. Düşük boyutsal doğruluk. 3. Zayıf yüzey kalitesi.
Kaybolan kalıba döküm	1. Yüksek hassasiyet elde edilebilir. 2. Karmaşık ve kompleks şekiller elde edilebilir. 3. Mükemmel yüzey kalitesi sağlar. 4. Çok az veya hiç işleme gerektirmez.	1. Dökülecek parça boyutu sınırlıdır. 2. Yüksek üretim maliyeti.
Basınçlı döküm	1. İnce cidarlı parçalar dökülebilir. 2. Dar tolerans mümkündür. 3. Mükemmel yüzey kalitesi. 4. Seri üretim için ekonomiktir.	1. Gazlar sıkışabilir ve gözenekliliğe neden olabilir. 2. Döküm boyutu sınırlıdır. 3. Kalıp maliyeti yüksekdir.
Sürekli döküm	1. Kalıp dayanıklıdır. 2. Döküm malzemeleri homojen yoğunluktadır. 3. Daha az emek gerektirir. 4. Üretim verimliliği artar.	1. Kurulum için yüksek sermaye gerekir. 2. Sadece basit şekiller oluşturulabilir 3. Küçük üretimler için uygun değildir.

3.1.1 Dökümde dikkat edilmesi gereken parametreler

3.1.1.1 Malzeme seçimi

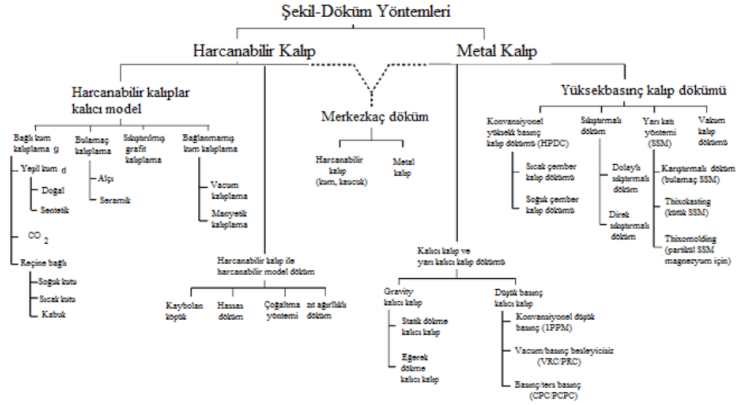
Özellikle dökülecek malzeme ve bu malzeme dökümünde kullanılacak kalıbın malzemesinin seçimi sürecin başlangıcından itibaren tüm süreci etkileyen bir noktadır. Farklı malzeme türlerine göre farklı kalıp türleri olmakla birlikte, istenen sıcaklığa kalıp malzemesinin dayanabiliyor olması kritik öneme sahiptir. Dökülecek malzemenin sahip olduğu akma ve çekme değerleri, malzemeden beklenen mukavemet ve diğer mekanik özellikler dökülecek malzemenin seçiminde önemli rol oynar.

Kalıp malzemesi seçiminde ise yüksek sıcaklarda gerçekleşecek döküm işlemi için uygun ısıl dayanıma sahip kalıbın belirlenmesi, buna bağlı olarak mukavim yapıda ve aşınma direncinin iyi olması bir kalıp malzemesinden beklenen özelliklerdir.

Örneğin Ekstrüzyon kalıplarında hızlı ürün üretebilmek önemlidir. Bir çok alanda kullanılan bu kalıplar sıcak alüminyum üretiminde oksitleyici ortamın ve yüksek basıncın etkisi ile çabuk aşınabilirler. Buna bağlı olarak kalıp malzemesini seçerken yüksek sıcaklıkta iyi aşınma dayanımına sahip kalıp malzemesi seçimi kalıp ömrünün uzamasına önemli etkisi olacaktır.

3.1.1.2 Kalıp tasarımı ve hazırlığı

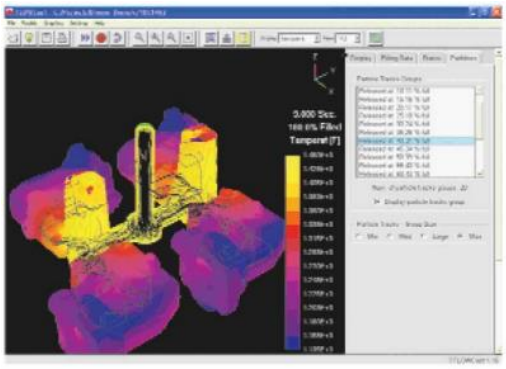
Bir döküm süreci gerçekleşirken ergiyik malzemenin uygun yolluktan geçerek parça üretimine başlaması ve kalıpta uygun besleyicilerin, maçanın ve yolluk sisteminin kullanılması çok önemlidir. Bu sayede parçada istenmeyen çekintiler, boşluklar ve parçada çatlakların oluşmasının önüne geçinilmiş olunur.



Şekil 3.1 Şekil döküm işleminin grafiği (ASM International 2009) [19]

İlk olarak dökülecek parçanın çekme, işleme, kalıptan çıkma eğimi, keskin köşelerin pah kırılması gibi faktörler göz önüne alınarak model geometrisi tasarlanmalıdır [20]. Bir döküm işleminin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için uygun kalıbın hazırlanması önemlidir. Kalıp tipi olarak metal, seramik veya kum kalıp gibi türler olmakla birlikte uygun kalıp boşluğu tasarımı ve yolluk ile besleyicilerin doğru tayini döküm sürecinin doğru bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olacak araçlardır.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte simülasyon programlarıda gelişmiş ve bizlere döküm süreçlerinde daha az maliyetli denemeler ile birlikte uygun kalıp tasarımının gerçekleştirilmesine katkıda bulunmaktadırlar. Bu sayede sıvı metalin hızı, ilk katılaşan nokta, parça kesitinde zamanla meydana gelen ısıl ve şekilsel değişimler ve çekinti oluşuyorsa eğer bu noktaların tespitinin yapılmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede parçada uygun besleyici sisteminin ve yollukların belirlenmesinin maliyet açısından minimize edilmesine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 3.2 Flowcast programıyla sıvı metalin kalıbı doldurma görüntüsü [21]

Döküm endüstrisinde OPTICast yazılımı, kalıplama tasarımı optimizasyonu için ileri düzey simülasyon yetenekleri sağlayarak, katılaşma davranışları, sıcaklık dağılımları ve akış karakteristiklerinin analiz edilmesine olanak tanımakta ve bu sayede süreç verimliliğinin artırılmasına ve kusurların en aza indirilmesine katkı sağlamaktadır [22].

3.1.1.3 Besleyici

Bir dökümün gerçekleşebilmesi için ergiyik döküm sıvısının kalıp içerisine uygun şekilde dökülmesi gerekir. Kalıba türbülans oluşturmayacak şekilde ergiyik malzemeyi doldurmak bu sürecin ilk ve önemli adımlarındandır. Bu işlem gerçekleşirken kalıp içerisinde gaz ve havanın sıkışmaması önemlidir. Bu süreçlerle birlikte besleyici döküm parçada büzülme ve boşlukların oluşumunun önüne geçilmesinde, homojen bir mikroyapı oluşmasında ve parçanın istenen şekilde dökülmesine katkıda bulunmaktadır. Besleyici döküm parçanın en son katılaşacağı yere eklenmelidir ki parça dökülürken en son dökümün bitiminde parçada bir çekme olmasın. Ayrıca bir besleyicinin iyi bir ısı yalıtımına sahip olması beklenir ki bu sayede erimiş metalin hızlı katılaşmasının önüne geçmiş olunur.

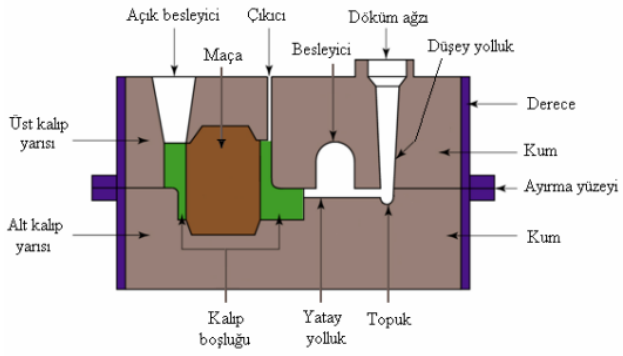
3.1.1.4 Yolluk

Yolluk sistemleri; ergimiş plastik malzemenin hazneden kalıp boşluğuna ulaşması sırasındaki sistemin bütünü olarak tanımlanabilir. Yolluk sistemlerinin şekli ölçüleri ve kalıpla olan bağlantısı kalıp doldurma sürecini ve dolayısıyla ortaya çıkan ürünün kalitesini büyük oranda etkilemektedir [23].

Yolluk sayesinde curufların kalıp içine sürüklenmesi önlenir. Soğuma sürecinin dengeli gerçekleşmesine yardımcı olur ve ergiyik malzemenin akışında çalkantıların oluşmamasına dikkat edilecek şekilde tasarlanır. Yolluk sisteminin

hesaplanmasında parça hacminin hesaplanması gerekir. Basınçlı döküm yöntemlerinde yolluk girişi kalıp boşluğunun eksiksiz dolumu ve ergimiş malzemeyi kalıp boşluğuna hasar vermeyecek şekilde iletimini sağlamak için yolluk tasarımını, basınçlı döküm süreçlerinde olabildiğince keskin yön değişimleri vermeden ve yolluk kanalları kısa olacak şekilde tasarlanır.

İnce cidarlı parçalarda yolluk kanalının kalınlığı, döküm kalıbı duvar kalınlığından %50 oranında daha büyük tutulmalı ayrıca yolluk genişliği de yolluk derinliğinin 3-5 katı kadar olmalı ayrıca yolluk girişinin kalınlığı ise döküm parçasının ölçülerine göre 0.5-1.5 mm arasında olmalı ve yalnızca çok özel ya da ağırlığı yüksek parçalarda artırılmalıdır. Giriş kısmının derinliği akış karakteristiği, döküm sonrası kesme ve son bitirme işlemlerinin başarılı olarak gerçekleşmesi için uygun değerler içinde olmalıdır [24].



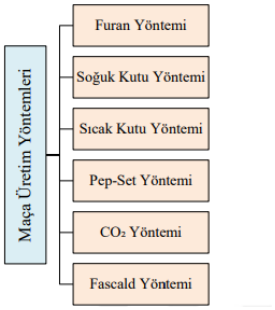
Şekil 3.3 Klasik kum kalıplamada yolluk sistemi [25]

3.1.1.5 Maça

Döküm parça için kalıp görevi gören maça, tek kullanımlıktır ve alçak basınçlı döküm yönteminde karşımıza kum esaslı, soğuk kutu (cold-box) ve sıcak kutu (hot-box) gibi türler ile çıkmaktadır. İngilizce de "core" olarak yani çekirdek anlamı ile karşımıza çıkan maça, döküm parçanın iç kısmının boş çıkmasına yardımcı olmaktadır.

Geleneksel maça üretiminde, eğer yağ bazlı bağlayıcılar tercih ediliyorsa, kürleme süreci sırasında acrolein gazı açığa çıkar ve bu da rahatsız edici, boğucu bir kokunun oluşmasına neden olur. Günümüzde geliştirilen modern bağlayıcı sistemler ise fenol-formaldehit, üre-formaldehit, furfuril alkol (furan), poliüretanlar ve çeşitli aminler gibi sentetik reçineler içermektedir. Bu tür bağlayıcılar, kimyasal

reaksiyonla veya ısı etkisiyle sertleşebilir. Sertleşen maçalar, döküm öncesinde yüzey kaplama amacıyla alkol ve grafit içeren karışımlarla püskürtme yoluyla kaplanır [26].



Şekil 3.4 Maça üretim metodları [26]

Soğuk kutu yönteminde, fenol-formaldehit reçinesi ve amin katalizörleri kullanılırken, sıcak kutu yönteminde kum, fenol-formaldehit veya üre-formaldehit reçineleri ile karıştırılır. Kum maçaların kullanımı motor bloklarının üretimi, egzoz manifold imalatı ve türbin kanatlarının yapısal bileşenlerinin üretiminde kullanılan bir malzemedir. Bu malzemenin her ne kadar bir çok kullanım alanı bulunsa da kum maça kullanımında döküm parça yüzey kalitesi pürüzlü çıkabilmektedir. Bu durum nihai parçanın özelliklerini ve görünümünü olumsuz etkileyebilir. Ayrıca döküm sonrasında parçanın kalıptan çıkarılmasının büyük önem arz ettiği durumlarda eğer bu durum istenen şekilde gerçekleşmez ise zaman ve maliyet açısından büyük kayıplara sebep olabilir. Hem çevresel etkileri hem de geri kazanılabilirliği açısından son zamanlarda karşımıza tuz maça araştırmaları çıkmaktadır.

3.1.1.6 Tuz maça

Tuzdan üretilen ve basınçlı su ile kolayca çözünebilen kaybolan maça türüdür. Bu maça türü 1970 ve sonrası dönemlerde karşımıza çıkmaktadır. 1990 yıllarında dizel motor pistonlarının üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Kum maçaya göre aşındırıcı etkisi olmaması, kolay temizlenebilir ve çevreye olumsuz etkisinin olmaması ilerleyen yıllarda daha çok karşımıza çıkması ön görülen bir maça türü olması beklenmektedir. Geri dönüştürülebilir olmaları ve çevreci olmaları kum maça'ya göre tuz maça'yı öne çıkarmaktadır. Bu çalışma için araştırma yapılmış lakin detaylı denemeler gerçekleştirmek için uygun bütçe bulunmadığından ilerlenmemiştir.

Tuz maça kullanımının bazı avantajları:

1. Döküm sonrası kolay temizlenebilir olması,
2. Tasarımda daha esnek düşünebilme kolaylığı sağlaması,
3. Döküm sonrası işlem süreçlerini minimize etmesi,
4. Piston döküm ve düşük basınçlı döküm için uygundur.
5. Döküm bileşenlerini korumak için kalıntı bırakmaz.
6. Emisyonsuz işleme, döküm ve tuz yıkama sırasında gaz tahliyesi yoktur.
7. Daha az aşınma vardır ve bu nedenle tesis mühendisliği için bakım maliyetleri azdır.

Dezavantajları:

1. Kurulum maliyetinin yüksek olması,
2. Bakım gerektiren parça sayısının fazla olması,
3. Enerji ihtiyacının fazla olması,
4. Artan soğutma etkisi sonucunda tezgah ömrü araştırılması gerekir.
5. Yüksek sıcaklıklarda dayanım sağlayamamak.

Tuz maça üretim süreçleri için birden fazla yaklaşım bulunmaktadır. Basınçlı döküm, yüksek basınçlı sıkıştırma ve shooting'tir.

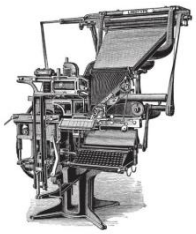
Tuz maçaların basınçlı döküm ile üretiminde, ergiyik malzemenin basınç altında kalıba enjekte edilmesi ve kalıptaki şekli alması işlemidir. Yüksek basnıçlı sıkıştırma yönteminde, bu metotta çok hafif nemlendirilmiş tuz bileşiği bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak sıkıştırılır ve maça elde edilir [27].

Shooting yönteminde ise, bu metotla üretilen maçalarda porozite miktarı yüksektir ve eğme-katlama mukavemetleri basınçlı sıkıştırma metoduna göre 2-3 kat daha düşüktür [27].

3.2 Basınçlı döküm

Eriyik haldeki metalin yüksek hız ve basınç altında kalıba enjekte edilmesi ile üretim gerçekleştirilen döküm yöntemidir. Kalıp kapalı bir alandadır ve kalıp içerisinde bulunan hava, kanallar yardımı ile atılır. Bakır ve alüminyum gibi metaller sıklıkla dökülmekle birlikte bu metot da yüksek hızda ve iyi yüzey kalitesinde kısa sürelerde yüksek adetli üretimler yapılması hedeflenmektedir.

Basınçlı dökümün tarihçesi 19. yüzyılın ikinci çeyreğine uzanır. 1838 yılında ilk basınçlı döküm makinesi icat edildiği halde, ilk patent elle çalıştırılan döküm baskı makinesi için Sturges adına, ancak 1849 yılında verildi. 1885 yılında Ottmar Mergenthaler dizgi makinesi icadıyla popülerlik kazandı. Aynı dizgi makinesinin çeşitleri bugün hala baskı endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Basınçlı döküm parçalar bugün hemen her alanda kullanılmasına rağmen üretimin başında yalnız baskı endüstrisi ile sınırlıydı [28].



Şekil 3.5 Ottmar Mergenthaler'in Dizgi Makinesi [28]

Avantajları:

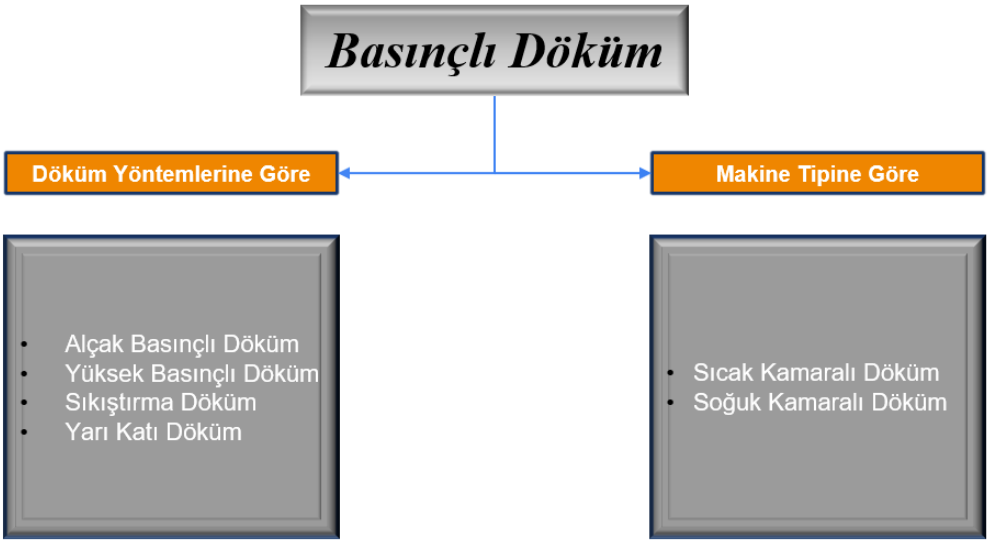
- Seri parça üretimi için ideal bir yöntemdir. Çok kısa sürede yüzlerce parça üretilebilir.
- Yüzey kalitesi iyi ince cidarlı parça üretimine olanak sağlar.
- Kalıplar tekrar ve tekrar kullanılabilirdir.
- Alüminyum dökümü için verimli ve yaygın bir metod'dur.
- Parça yüzeyinde ekstra işlem ihtiyacı diğer yöntemlere göre daha azdır.

Dezavantajları:

- Döküm için tasarlanacak parça boyutunun ve ağırlığının limitleri vardır.
- Kalıp tasarım sürecinde uygun yolluk, besleyici ve diğer bileşenlerin tasarımı kritik öneme sahiptir. Kalıp hatası sonucunda yüzlerce ürün fire verilebilir.
- Gerekli olan ilk yatırım maliyeti yüksek bir metod'dur.
- Kullanılabilecek alaşım malzemesi limitlidir.

Basınçlı döküm prosesinde kalıbın sıcaklığı, uygulanan basınç ve ergimiş metalin sıcaklığı gibi bir çok parametre bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kalıbın ilk sıcaklığı ile piston hızının, döküm kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı üzerine önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir [29]. Döküm yöntemi ve makine tipine göre ayrı sınıflandırmaları bulunan basınçlı döküm, alüminyum malzemelerin dökümünde genel olarak soğuk kamaralı döküm makineleri ile karşımıza çıkmaktadır. Basınçlı döküm metotları kendi içinde aşağıdaki şekil 3.6'da ki gibi sınıflandırıldığını söyleyebiliriz.

Basınçlı döküm proseslerinde, gaz sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu, porozite oluşumunun önlenmesi ve proses verimliliğinin artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Farklı gaz atma sistemleri üzerinde yapılan çalışmalar, bu sistemlerin porozite seviyelerini düşürmede ve döküm hata oranlarını azaltmada etkili olduğunu göstermektedir [30].



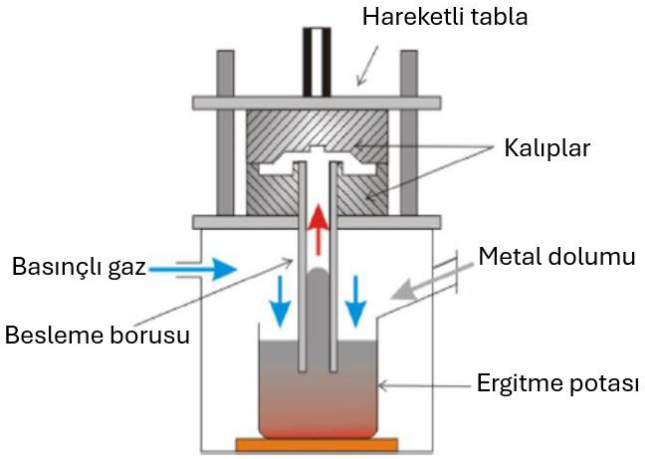
Şekil 3.6 Basınçlı döküm yöntemleri

3.2.1 Alçak basınçlı döküm yöntemi (Low pressure die casting)

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, sıvı metalin genel olarak 0,1 ile 1,0 bar aralığındaki bir basınç ile kalıba enjekte edildiği döküm yöntemidir. Jant üretimlerinde sıklıkla karşımıza çıkan bir metotdur.

Çoğu alçak basınçlı döküm radyal simetrik tasarım olarak sınırlandırılmıştır ancak simetrik olmayan parçalar geniş ölçüde üretilebilmektedir. Neredeyse tüm otomotiv jantları bu prosesle üretilmektedir [31].

Sıcaklık ve hız gibi parametrelerin kritik olduğu döküm yönteminde aynı zamanda iyi hazırlanmış bir kalıp sayesinde daha uzun ömürlü ve sağlıklı üretimler gerçekleştirilebilir. Basınçlı döküm süreci olduğu için döküm ile kalıp arasında gerçekleşen ısı transferine de dikkat edilmelidir. Çünkü döküm işleminde ki akışın dağılımı ve kalıp sıcaklık dağılımı iyi bir şekilde yönlendirilmezse istenen verimlilikte ve doğru ölçülerde parça üretiminde sorunlar meydana gelebilir.



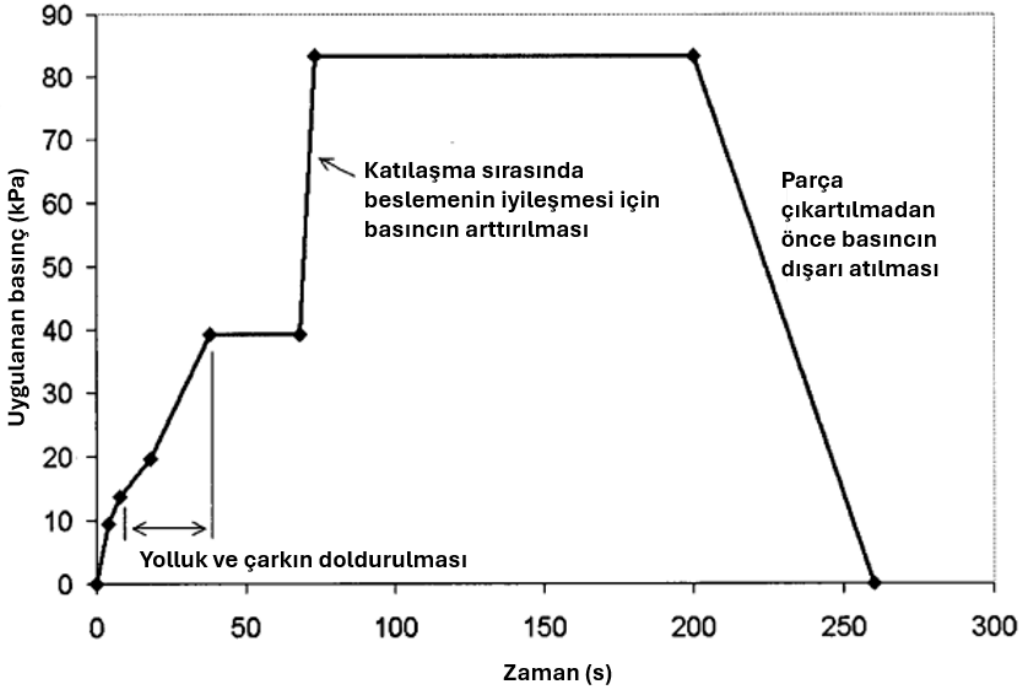
Şekil 3.7 Alçak basınçlı döküm makinesi [32]

Sistemin ilk başlangıç noktası ergimiş metalin potaya doldurulmasıdır. Daha sonra ergimiş metal, kuru hava veya nispeten düşük basınçlı (genellikle 600 ila 1000 mbar) bir inert gaz (özellikle nitrojen gazları) ile yükseltilir. Ergimiş metal, döküm kapısından kalıp boşluğuna dolar. Kalıp boşluğu ergimiş metalle dolana kadar basınç artar. Katılaşma süresi parçanın geometrisine ve kalıp boşluğunun dolma hızına bağlıdır [32].

Alçak basınçlı döküm yöntemine kalıp ile ergimiş metal arasındaki ısı dengesinin sağlanması ve kalıbın hasar görmemesi için seramik kaplama yapılabilir. Ayrıca tasarımı da bir hayli efor gerektiren bir süreç olduğu için alçak basınçlı döküm sisteminin kendisi de yüksek sermaye gerektirir. Burada bu prosesin kullanılabilir olmasında ki en büyük etken üretilen parçaların seri halde aynı kalıptan çok kısa sürede çok fazla ürün elde edilebiliyor olmasıdır. Bakır, çinko, alüminyum ve magnezyum gibi alaşımların dökümünde sıkça karşımıza çıkan bir yöntemdir. Ancak uygun alaşımı seçerken yine de sadece malzeme türü değil aynı zamanda, malzemenin akıcılığı, soğutma esnasındaki büzülme oranı ve ağırlığının malzeme maliyetine oranı gibi değerlere de bakılması gerekmektedir.

Isıl işlem görmüş haliyle (A356-T6) AlSi7Mg0.3 olarak bilinen A356 alüminyum alaşımı, iyi dökülebilirlik, işlenebilirlik, kaynaklanabilirlik ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv sektöründe direksiyon mafsalları gibi yük taşıyan bileşenlerin üretiminde alçak basınçlı döküm yöntemi kullanılarak parçaların üretimi gerçekleşmektedir [33].

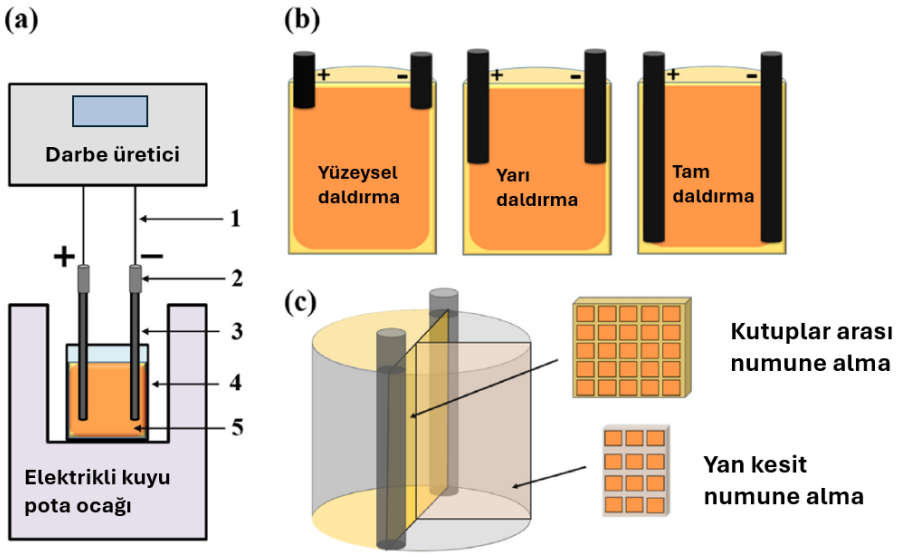
Geleneksel döküm yöntemine göre daha iyi ürünler sunan alçak basınçlı döküm yönteminde çok ince kesitli ve kaliteli parçalar başarılı bir şekilde üretilebilirken otomasyona da uygun olan bir sistemdir. Alçak basınçlı döküm yönteminde metalik malzemenin ergitme işlemleri vakum altında ve açık atmosferde farklı yöntemlerle ergitilebilmektedir. Bu proseste ki önemli adımlardan biri de sıvı metalin sisteme nasıl verileceğidir. Yapılan çalışmalar da en uygun sıvı akışının alttan bağlantılı yapılması ile elde edildiği tespit edilmiştir [34]. Diğer bir önemli konu ise sıvı metalin sarsıntı oluşmadan akıcı bir şekilde kalıba dolabilmesidir. Bu durum aynı zamanda parça kalitesini etkileyen önemli bir parametredir. Genel olarak yapılan araştırmalarda sade bir sistemin kurulup kolayca sıvı akışının sağlandığı sistemlerde metal akışının daha iyi olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 3.8 Alçak basınçlı dökümde kullanılan tipik basınç eğrisi [35]

4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Baoyu Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kurşun ve bizmutun pirinçten ayrılması süreçleri için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Ayırma işlemi için pirinç ergitme esnasında elektriksel iletkenlik özelliğinden yararlanılarak darbeli akım ile yapılmıştır işlemler. Deneyler 10kg ergitilmiş metal üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda ise kurşun ve bizmutun ayrışarak belli bir bölgede biriktiği gözlemlenmiştir. Darbeli akımın bu süreçte geri kazanım süresini azalttığı ve çevre dostu bir yöntem olmasının yanında enerji tasarrufu sağlaması ön görülmektedir [36].



Şekil 4.1 (a) Deney düzeneğinin şematik diyagramı, şekildeki numaralar 1: kondüktör, 2: bağlayıcı, 3: grafit elektrot, 4: korindon pota, 5: ergimiş alaşım; (b) Elektrotların farklı yerleştirme yöntemleri: sığ yerleştirme, yarı yerleştirme, tam yerleştirme; (c) Numune test noktası örnekleme haritası [36]

Chih-Chun Hsieh ve arkadaşları, pirinc alaşımına %1,52Pb, %0,5Bi, %1Bi ve %1,5Bi eklenmesiyle elde edilen mikroyapısal değişimler incelenmiştir. Pirince

%1,52Pb eklenmesiyle , mikroyapının windmanstatten yapısından ağsı yapılara dönüştüğü gözlemlenmiştir. Gravite döküm kullanılan metot da %0,5 ve %1 oranlarında Bi kullanımında mikroyapıda iğnemsi windmanstatten yapısı görülür iken, %1,5Bi ilaveli ürün de levha benzeri bir windmanstatten gözlemlenmiştir. Pb partikülleri ağsı alfa (α) fazı içinde yer alırken, Bi partikülleri α/α veya alfa(α)/beta(β) tane sınırlarında çökelmiştir [37].

Tablo 4.1 Pirinc alaşımlarının kimyasal kompozisyonları [37]

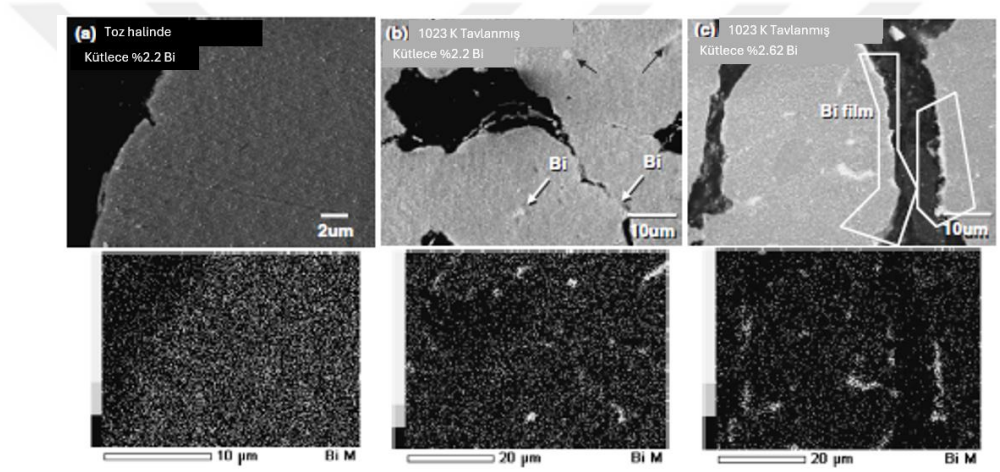
Malzemeler	Element(wt%)						
	Cu	Zn	Pb	Bi	Al	Fe	Sn
HPb59-1	60.11	37.42	1.57	0.01	0.613	0.149	0.336
0.5%Bi-pirinc	60.71	37.91	0.098	0.5	0.629	0.0253	0.184
1%Bi-pirinc	60.3	37.94	0.138	1	0.581	0.0168	0.138
1.5%Bi-pirinc	60.	37.6	0.06	1.5	0.648	0.13	0.183

D. Empl ise arkadaşları ile birlikte yaptığı çalışmada Cu-Ni-Sn alaşımlarına eklenen Pb, oda sıcaklığında mekanik dayanım ve işlenebilirlik sağlamakla birlikte kurşunun ergime sıcaklığı üzerine çıkıldığında bu alaşımlar önemli ölçüde süneklik kaybı yaşar. Bu çalışmada CuNi9Sn6Pb1 alaşımına eklenen küçük miktarlardaki Al,Mn,Zn,B ve P eklemenlerinin bu sıcaklıktaki çekme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Özellikle B ve P elementlerinin ilavesinin alaşımın çekme özelliklerinde belirgin iyileştirmeler ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Bu intermetalik parçacıklar kurşun inklüzyonlarını kapiler pinning ve mekanik kalkanlama yoluyla stabilize ederek alaşımın sünekliğini koruduğu önerilmektedir [38].

Tablo 4.2 Yarı sürekli döküm ünitesinde dökülen malzemenin tanımı ve bileşimi (ağırlık yüzdesi olarak) (kalan: Cu) [38]

		Ni	Sn	Pb	Al	Mn	Zr	B	P	Fe	Co
A1	CuNi9Sn6	8.91	6.23			0.002					0.004
A2	CuNi9Sn6Pb1	9.23	6.08	1.03		0.009					0.004
B1	CuNi9Sn6Pb1 + 0.5 Al	8.81	6.10	1.00	0.515	0.002					0.005
B2	CuNi9Sn6Pb1 + 0.5 Mn	8.96	5.98	0.97		0.474					0.005
B3	CuNi9Sn6Pb1 + 0.25 Zr	8.92	6.30	1.00		0.002	0.25*			0.008	0.005
B4	CuNi9Sn6Pb1 + 0.3 B	8.1	6.10	0.96	0.020	0.002		0.325		0.016	0.180
B5	CuNi9Sn6Pb1 + 0.5 P	8.92	6.26	1.00		0.002			0.478		0.004
C1	CuNi9Sn6Pb1 + 0.03 B	9.48	6.25	0.89		0.003		0.020			
C2	CuNi9Sn6Pb1 + 0.1 P	9.17	6.30	0.92		0.0027			0.075		

Hisashi Imai ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın amacı, kurşunsuz işlenebilirliği yüksek pirinc alaşımı üretebilmektir. Bizmut ve grafit partikülleri, pirinc alaşımlarının uzama ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Cu-%40Zn pirinc tozuna %0-3.23 oranında bizmut eklenmiş ve tozlar hızlı katılaştırma yöntemi ile üretilmiştir. %2.2 ve üzerinde bizmut ilavesi durumunda parçada büyük bizmut adacıkları oluşumundan kaynaklı uzamanın azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte grafit ilavesi ile birlikte uzamada iyileşme ve işlenebilirliğe olumlu katkısı olduğu ortaya çıkmıştır. %2.2 bizmut ve %0.5 grafit içeren pirinc alaşımının geleneksel kurşunlu pirincler kadar iyi işlenebilirlik göstermiştir. Bu çalışma, özellikle kurşunsuz pirinc alaşımlarının geliştirilmesi ve çevre dostu malzeme tasarımı açısından önemli bulgular sunmaktadır [39].



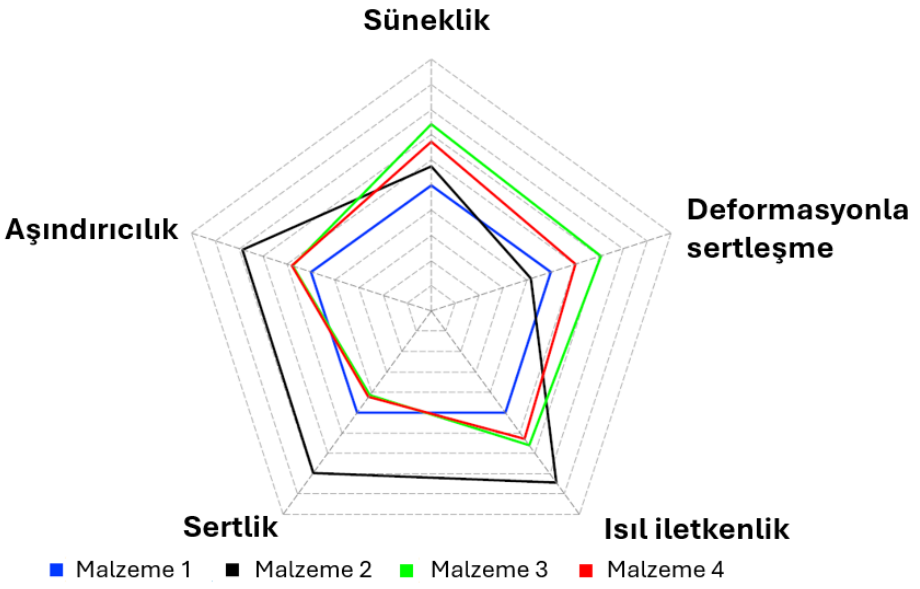
Şekil 4.2 Bizmut içeren Cu-%40Zn alaşımlarının atomize edilmiş tozunun ve tavlanmış tozunun kesitinde SEM-EDS gözlemi[39]

J. Johansson ve arkadaşlarıda kurşun ve pirinc ilişkisi üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Kurşun malzemesinin pirinc alaşımlarında işlenebilirliğe olumlu etkisi olduğu bilindik bir süreçtir. Ancak kurşun'un çevresel etkilerinden dolayı ve sağlık sorunlarına sebep olmasından ötürü kurşun miktarının azaltılmasına yönelik araştırmalar önem kazanmaktadır. Bu çalışmada düşük kurşunlu pirinc alaşımlarının, geleneksel kurşunlu pirinclere kıyasla yeterince kötü olmadığı ve sürdürülebilir üretim açısından uygun olabileceği bu çalışmada belirtilmiştir. Ayrıca gelecek çalışmalarda alaşım performansının iyileştirilmesi için alternatif alaşım elementlerinin araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu deneyde 4 farklı oranlara sahip pirinc alaşımı test edilmiştir [40]

Tablo 4.3 Çalışma için seçilen pirinc malzemeleri ve bunların kimyasal bileşimi (ağırlık yüzdesi olarak) verilmiştir [40].

	EN12167	Cu	Zn	Pb	Si	P	Sn	Mn	Fe
Malzeme 1	CW614N	58.2	Bal.	2.81	-	-	0.17	-	0.20
Malzeme 2	CW724R	75.9	Bal.	0.05	3.16	0.05	-	-	0.03
Malzeme 3	-	59.2	Bal.	0.02	-	-	0.03	1.03	0.09
Malzeme 4	-	59.1	Bal.	0.16	0.13	-	0.41	0.71	0.58

Yapılan deneyler sonucunda malzeme 1'in en iyi işlenebilirlik özelliklerine sahip olduğu ve malzeme 4 için Fe4Si inklüzyonlarının işlenebilirliği olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme 2 ise yapılan denemeler sonucunda yüksek dayanım ile nispeten iyi bir işlenebilirliği birleştirmekte ve düşük kurşun içeriği sayesinde geleneksel yüksek kurşun içeren işlenebilir alaşımlar için uygun bir alternatif sunmaktadır. Bu bulguların ileride çevresel sürdürülebilir malzeme araştırmalarına katkı sağlaması ön görülmektedir [40].

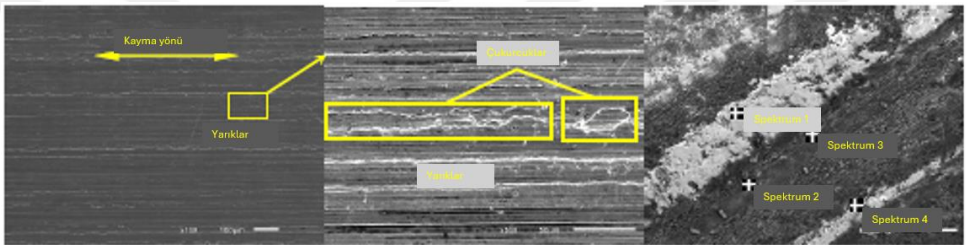


Şekil 4.3 Malzemelerin potansiyel işlenebilirliği için 0-10 arası normalize edilmiş değerlerle polar diyagramlar [40]

Lin Liu arkadaşları ile birlikte bu çalışmada, %64Cu ve %36Zn içeren kurşunsuz pirinc alaşımı ile 100Cr6 arasındaki kayma tribolojik davranışı ve bu durumun tane incelmesine etkisi incelenmiştir. Kayma deneyi insitu holografi mikroskobu ve radyoizotop tekniği kullanılarak gerçekleştirilen bir tribometre ile yapılmıştır.

Tribolojik testin ardından, sürtünme yüzeyleri, mikrografi, kimya ve mikro yapıyı nicel olarak belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile karakterize edilmiştir [41].

Yağlama koşulları altında, kurşunsuz pirinc ilk aşamada sürtünme katsayısında bir azalma eğilimi göstermiş ve 460 ile 1480 çevrimde yüksek aşınma oranı göstermiştir. Bunun sebebi, sürekli dislokasyon birikimlerinin döküntü parçacıkları oluşturmasıdır. Kayma testinde ise, deformasyon sertleşmesi ve iyileşme süreçleri arasındaki denge sebebi ile parça dinamik stabilite aşamasına geçer ve gerçek zamanlı aşınma oranı sabit kalır. Pirinc yüzey tabaksındaki aşınma şiddetli kayma plastik deformasyonu oluşturur. Bu durum çatlak ve boşluk oluşumuna sebep olmaktadır [41].



Şekil 4.4 Aşınma izi için sürtünme çiftinin SEM mikrografı (a,b) ve pim (c) karakterizasyonu [41]

Magdalena Susanne Müller ve arkadaşları bu çalışmada çevreye ve sağlığa etkilerinden dolayı kurşunlu pirinc alaşımları yerine kurşunsuz pirinc alaşımları araştırmışlardır. Kurşunun talaş kaldırmaya olan etkisi bilindik bir konu olmakla birlikte bu çalışmada kurşunsuz pirincler otomatik kesme işlemlerinde daha uzun ve dolaşık talaş oluşturmuş. Bu durum önemli zorluklara yol açmıştır. Bu sorun da ele alınarak yüksek basınçlı kesme sıvısı, talaş kırıcı geometriler ve her iki faktörün birleşik etkisi farklı ilerleme hızlarında incelenmiştir [42].

Tablo 4.4 Bakır alaşımlarının kompozisyonu CuZn37, CuZn38As, CuZn42 [42]

Malzeme	Cu	Zn	Pb	Sn	P	Fe	Ni	As
CuZn37	64.3	35.67	0.034	-	-	0.099	0.0015	-
CuZn38As	63.2	36.6	0.04	0.01	-	0.07	0.01	0.02
CuZn42	56.73	42.36	0.086	-	0.011	0.256	0.266	-

CuZn37, CuZn38As ve CuZn42 malzemeleri bu süreçte kullanılmıştır. Malzemelere çeşitli kesme sıvısı basınç seviyeleri ve ilerleme hızlarında radyal

kesme işlemleri uygulanmıştır. Kesme kuvvetleri ve talaş analizleri yapılmış, ancak kesme sıvısı basınç seviyesinin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak talaş kırıcı geometri kullanımı ve ilerleme hızının arttırılması incelenen alaşımlarda talaş kırılabilirliğini daha çok arttırmıştır [42].

Tablo 4.5 Deneylerde kullanılan kesici uçların geometrik ölçüleri [42]

Takım	Kesme yüzeyi	Kesici kenar yarıçapı r [μm]	Serbestlik açısı α [°]	Kama açısı β [°]	Kesme açısı γ [°]	Pürüzlülük Ra [μm]	Pürüzlülük Rz [μm]
CB #1	Talaş kırıcı	3.6	7.1	67.6	15.3	0.5	2.2
CB #2	Talaş kırıcı	5.5	7.0	67.0	16.0	0.7	3.5
CB #3	Talaş kırıcı	4.3	7.0	66.9	16.1	0.5	2.8
F #1	Düz	12.3	7.7	68.7	13.7	0.6	3.4
F #2	Düz	13.0	7.4	69.1	13.5	1.0	4.1
F #3	Düz	12.0	7.5	69.1	13.4	0.5	2.8

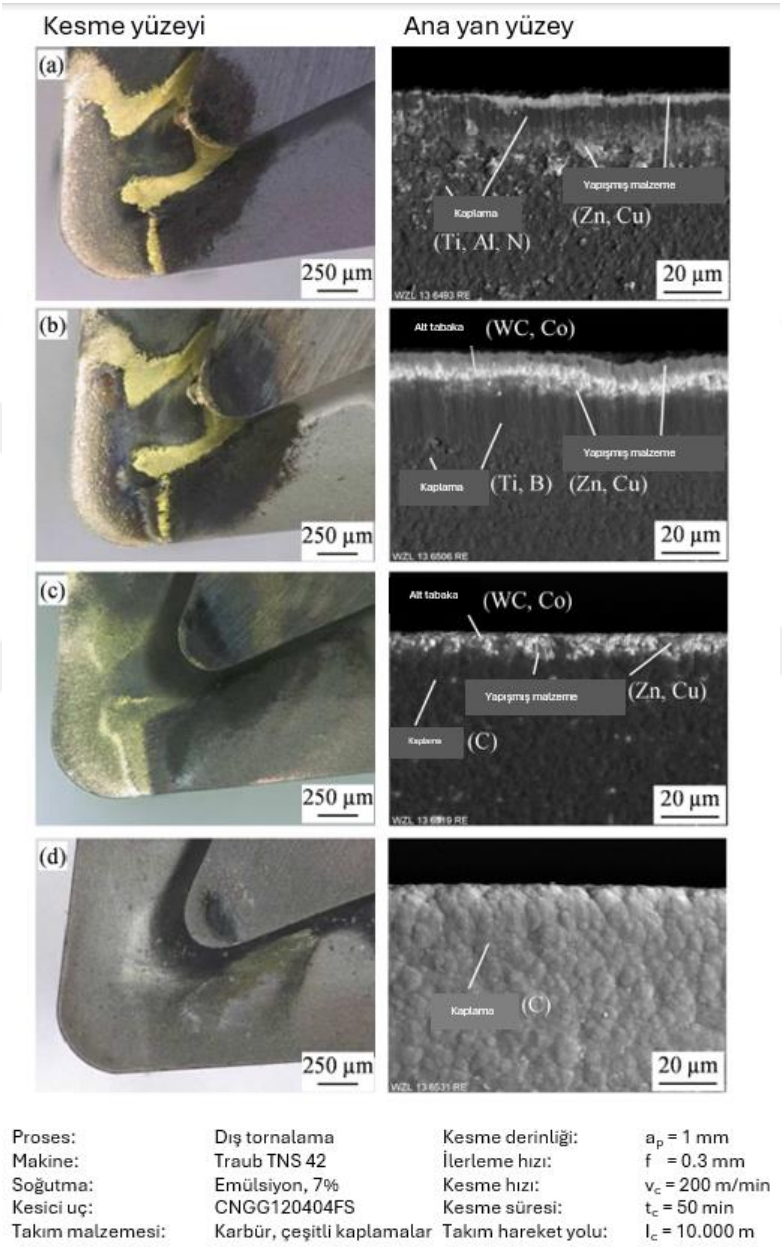
Christoph Nobel ve arkadaşları bu çalışmada, kurşunsuz pirinc alaşımları için dış tornalama işlemi sırasında, mikroyapı ve alaşım elementi olarak silisyumun talaş oluşumu, kesme kuvvetleri, takım sıcaklıkları ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelemiştir. Bu verilerden yararlanılarak yüksek performanslı kesme işlemleri için iyileştirme yaklaşımları araştırılmıştır. TiB2, DLC ve elmas gibi çeşitli takım kaplamalarının aşındırıcı ve yapışkan takım aşınması üzerine etkileri incelenmiştir [43].

Tablo 4.6 Çalışma malzemelerinin termo-mekanik özellikleri [43]

Malzeme	Çekme dayanımı R_m / MPa	Akma dayanımı $R_{p0.2}$ / MPa	Sertlik / HB	Kopmada uzama / %	Isıl iletkenlik λ / (W/mK)
CW724R	654	400	210	21	35
CW508L	385	268	135	41	120
CW511L	392	313	126	22	114
CW510L (A)	478	310	134	26	113
CW510L (W)	484	315	157	29	139
CW614N	456	324	154	26	123

Kurşunlu pirinc olan CW614N ile karşılaştırıldığında kurşunsuz pirinclerde daha uzun talaş oluştuğu ve yüksek kesme kuvvetleri ile daha fazla aşındırıcı ve yapışkan takım aşınmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek oranda sünek fcc α fazı içeren pirinc alaşımlarında (örneğin: CW511L) gözlemlenmiştir. Silisyum alaşımlı pirinc alaşımlarında CW724R malzemesi daha iyi talaş kırılması ve

işlenebilirlik özelliği göstermesine rağmen β fazı yoğunluğu sebebi ile yüksek yan aşınmaya sebep olmuştur. Ek olarak takım iyileştirmesinde elmas benzeri karbon (DLC) PVD kaplama ve elmas CVD kaplama kullanılarak, TiAIN ve TiB2 PVD kaplamalarına ve kaplamasız karbürlere kıyasla daha iyi takım özelliği göstermiştir [43].



Şekil 4.5 CW510L malzemesinin tornalanması sırasında (a) TiAIN; (b) TiB2; (c) DLC; (d) elmas kaplamalı karbür uçlarının takım aşınması [43]

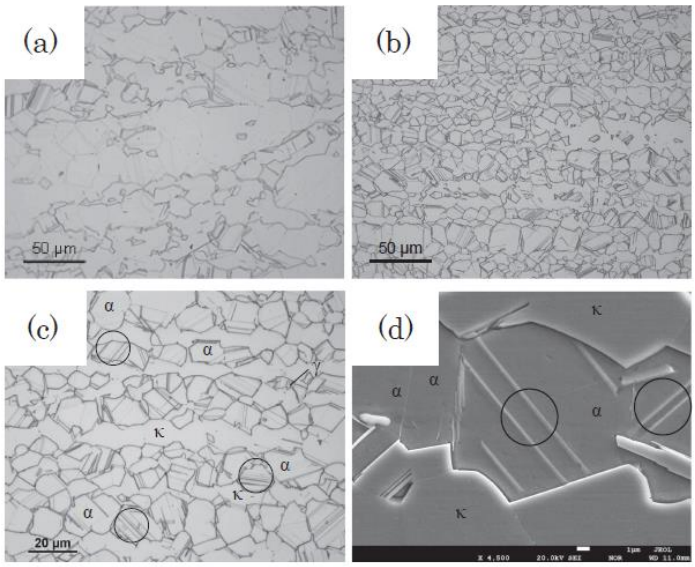
Koichi Suzaki ve arkadaşları, Amerika Birleşik Devletlerinde içme sularına kurşunun etkisini limitleyen bakır alaşımlarının kurşunsuzlaştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca aynı durum Avrupa'da otomotiv, elektronik ve

elektrik alanlarında kullanılan bakır alaşımları içinde geçerlidir. Bu kapsamda CuSiZn malzemesini optimize ederek kurşunsuz, yüksek mukavetmeli ve işlenebilirliği iyi bir bakır alaşımı üzerine denemeler gerçekleştirilmiştir [44].

Tablo 4.7 Numunelerin kimyasal bileşimi [44]

	Cu	Zn	Si	P	Pb
C6932	75.5	Rem.	3.0	0.09	<0.01
C3771	59.8	Rem.	<0.01	<0.01	1.73

Geliştirilen alaşım 650 Mpa çekme mukavemetine ve %43 uzamaya sahip kurşunsuz, işlenebilir bir bakır alaşımıdır. Bu özellikler %76,3Cu3,2Si0,2SnZn alaşımının tavlanması ve tane boyutunun 8 µm'ye kontrol edilmesiyle elde edilebilir. C6932 alaşımındaki Si oranı %3'den %3,2'ye arttırılması ve alaşımın 550 C°'de 2 saat tavlanması ile alaşımın mukavemeti artmakta, süneklikte bozunma olmamakta ve tance inceltme etkisinin güçlendiği görülmektedir. Geliştirilen kurşunsuz bakır alaşımında %40 oranında κ fazı bulunmaktadır. α fazı içerisine doğrusal olarak çökelmiş κ fazının talaşlı işlenebilirliğin iyileştirilmesi üzerine önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir [44].



Şekil 4.6 Geliştirilmiş alaşım mikroyapıları (a) C6932, (b) geliştirilmiş alaşım, (c) (b) nin büyütülmüş görüntüsü, (d) geliştirilmiş alaşımın SEM görüntüsü [44]

Mohamed A. Taha ve arkadaşlarının amacı kurşunsuz pirinc üretiminde %1-4 aralığında silisyum kullanımın meydana getirdiği etkileri araştırmaktır. Cu60Zn40 ve Cu80Zn20 şeklinde kurşunsuz ana alaşımlar hazırlanmıştır. Değerlendirme

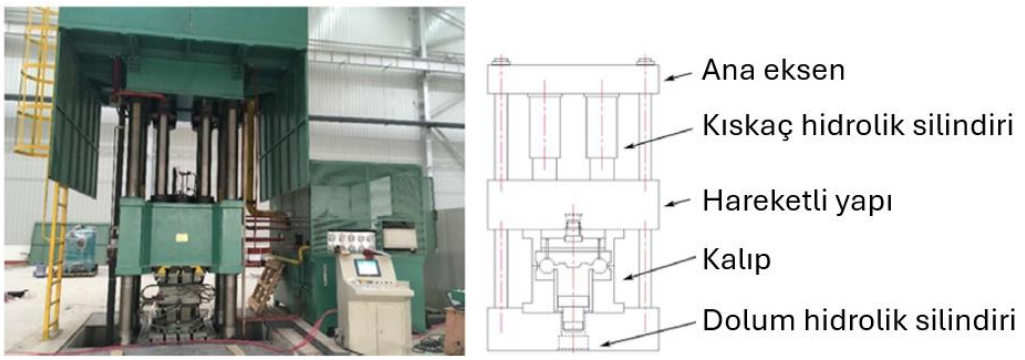
kriteri olarak, işlenebilirlik, kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş tipi test edilmiştir [45].

Tablo 4.8 İncelenen kurşunsuz silisyumlu pirinclerin, kurşunsuz ana alaşımın ve referans kurşunlu pirincin kimyasal bileşimi (EDX Analizi) [45]

Element	Cu	Pb	Fe	Si	Al	S	Sn	Zn
Alaşım 1 (1% Si)	60.2	0.005	0.032	1.11	0.445	0.003	0.001	Kalan
Alaşım 2 (2% Si)	60.1	0.003	0.127	1.92	0.55	0.009	0.001	Kalan
Alaşım 3 (3% Si)	60.4	0.003	0.081	2.89	0.489	0.005	0.013	Kalan
Alaşım 4 (4% Si)	60.2	0.003	0.074	3.94	0.498	0.004	0.001	Kalan
Ana alaşım 60Cu/40Zn	60.92	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		0.0052	Kalan
Referans Kurşunlu Pirinc Alaşımı (C37700)	Kalan	1947	0.217	0.002	0.047		0.195	39.5

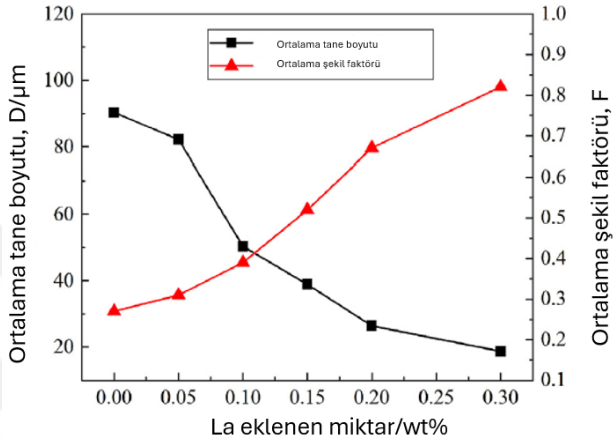
%1 silisyum içeren ve maksimum mukavemet gösteren alaşımlarda en yüksek kesme kuvveti ile karşılaşılmıştır. Ayrıca istenmeyen sürekli talaş tipi gözlemlenmiştir. Takım aşınması ve işlenen yüzey pürüzlülüğü en düşük seviyededir. Silisyum içeriğinin %4'e çıkarılması ile birlikte takım aşınmasında %140, yüzey pürüzlülüğünde %25 artış ve talaş tipi kesikli duruma geçmiş olmakla birlikte kesme kuvveti %50 azalmıştır. %1 silisyum oranında β fazının oluşumunun kesme kuvvetini etkilediği düşünülmektedir [45].

Wenjing Gao arkadaşları ile birlikte bu çalışmada lantan ilavesi ile birlikte dökülen pirinc alaşımların mikroyapı incelemesi yapılmış ve sertliği incelemiştir. Metalografik inceleme, taramalı elektron mikroskobu ile inceleme, X-ışını spektroskopisi ve X-ışını difraksiyonu ile incelemeler yapılmış. Ayrıca sertlik testi gerçekleştirilmiştir [46].



Şekil 4.7 Rheological sıkma döküm ekipmanı [46]

Lantan içeriğinin %0.30'a arttırıldığı döküm parçada sertliğin %20.4 oranında (108'den 130 HBW'ye) arttığı görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinde ise lantan ilavesinin α fazını inceltiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin, lantan zenginleştirmesinin katı-sıvı arayüzünde yarattığı konstitüsyonel soğuma ve heterojen nükleasyondur. Bu sayede tane sınırı sayısı artmaktadır ve pirinc alaşımının sertliğini artış gözlemlenmiş olunur. Geleneksel kum döküm pirinc alaşımlarına kıyasla sertliği 25 HBW artmıştır [46].



Şekil 4.8 Lantan ilavesinin pirinc alaşımlarının ortalama tane boyutu D ve şekil faktörü F üzerindeki etkisi [46]

Jun ve arkadaşları bu çalışmada yüksek basınçlı döküm yöntemine uygun olacak şekilde tuz maça araştırması gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda NaCI-Na2CO3, KCI-NaCI ve K2CO3-Na2CO3 tuzlarının dayanımları incelenmiştir. Üretilen tuz numunelerin dayanımı 4 nokta eğme testine tabi tutulmuştur. En yüksek dayanım NaCI-70mol%Na2CO3 bileşiminde yaklaşık 30 MPa olarak gözlemlenmiştir. Bu değer kum maçaların dayanımının yaklaşık 5 katıdır. NaCI-Na2CO3 ve KCI-K2CO3 malzemelerinde ki dayanıklılık artışının sebebi birincil parçacıkların ötektik yapıda olmasında kaynaklandığı düşünülmektedir [47].

Tablo 4.9 Bu çalışmada kullanılan ikili tuz sistemlerinin kimyasal bileşimi ve likūdüs sıcaklığı (K) [47]

İkinci iyonik tuzun bileşimi x/mol%	0	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	93	100
$NaCl-Na_2CO_3$	1074	1070	1056	1038	1003	971	933	948	986	1026	1069	1100	-	1131
$KCl-K_2CO_3$	1043	-	-	1013	976	938	927	983	1021	1069	1108	1141	-	1174
KCl-NaCl	1043	-	-	1016	989	965	-	930	-	978	-	-	1054	1074
K_2CO_3 - Na_2CO_3	1174	-	-	1138	1093	1056	1018	992	980	1001	1040	1086	-	1131

5
MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, lavabo bataryası üretimi için kurşunsuz bakır alaşımlarının alçak basınçlı döküm (LPDC) yöntemi ile üretim süreçleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar üç ana başlık altında gerçekleştirilmiştir. Alaşım hazırlığı, döküm parametrelerinin optimizasyonu ve döküm sonrası analizler. Döküm süreci sırasında alaşımın akışkanlığı, üretim sonrası kalite, parça red oranları, malzeme mikroyapısı ve sertliği gibi temel parametreler analiz edilmiştir. Ayrıca, bu çalışma doğrultusunda şarjlarda uygulanacak alüminyum, antimon ve bizmut alaşım elementlerinin mikroyapısal ve mekanik etkileri incelenmiştir. Bu analizler, çevre dostu ve verimli pirinc alaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

5.1 Alaşım hazırlığı

Pirinç alaşımları, esas olarak bakır ve çinkodan oluşan metal alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, yüksek korozyon direnci sergiler. Pirinç, bakıra çinko eklenmesiyle oluşan sarı alaşımlar için kullanılan genel bir terimdir. Çinkoya ek olarak, pirinçte kalay, kurşun, nikel, manganez, demir, antimon ve fosfor gibi diğer elementler de bulunabilir. Kurşun genellikle alaşıma %1-3 oranında eklenir. Pirinç alaşımlarına kurşun eklenmesi, dökülebilirlik ve işlenebilirlik özelliklerini arttırır.

Bu çalışmada, düşük basınçlı döküm yöntemi ile üretilen düşük kurşunlu lavabo bataryalarına antimon(Sb), bizmut(Bi) ve alüminyum(Al) elementleri eklenmiştir. Amaç, akışkanlık özelliklerini iyileştirerek kusursuz bir kalıp dolumu sağlamaktır. Bu doğrultuda, üç farklı alaşımlama elementinin iki farklı seviyede eklenmesiyle altı farklı alaşım oluşturulmuştur. Bu altı farklı şarj kompozisyonu, ana alaşıma % oranında modifiye edici alaşım elementleri olarak eklenmiş ve modifikasyon süreçleri aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir.

1. Şarj: %0.4 Al katkılı alaşım hazırlanmıştır.
2. Şarj: %0.8 Al içerecek şekilde Al miktarı arttırılmıştır.
3. Şarj: %0.8 Al alaşımına %0.02Sb eklenmiştir.
4. Şarj: Sb miktarı %0.04'e çıkarılmıştır.
5. Şarj: %0.5 Bi eklenmiştir.
6. Şarj: %1 Bi içerecek şekilde Bi oranı artırılmıştır.

Her şarj için bileşimler, bir fırında ergitilmiş ve karıştırılmıştır. Yüksek saflıktaki bakır (%99.99Cu) temel malzeme olarak kullanılmıştır. Ticari düşük kurşun içerikli ana alaşımın kimyasal analizi Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Düşük kurşunlu mastar alaşımın kimyasal analizi [48]

%Al	%Cu	%Zn	%Sn	%Fe	%Ni	%Mn	%Si	%Pb	%Modifiye edici alaşım
0.3-0.9	58-63	Geri kalan	0-0.5	0-0.3	0-0.2	0-0.05	0-0.05	0-0.19	Her şarj için farklı

5.2 Döküm süreci ve parametrelerin belirlenmesi

Döküm süreçleri, alçak basınçlı döküm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, döküm parametrelerinin etkisini gözlemlemek amacıyla farklı basınç, sıcaklık ve dolum süresi kombinasyonları test edilmiştir. Kullanılan temel döküm parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Fırın sıcaklığı: 1005-1015 C^{o}
- Grafit havuz sıcaklığı: 30-34 C^{o}
- Döküm basıncı: 550-600 mbar
- Dolum süresi: 4.5-7 s
- Kalıp sıcaklığı: 135-136 C^{o}

5.3 Döküm sonrası analizler

Döküm tamamlandıktan sonra numuneler üzerinde kalite kontrol testleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek kaliteli parçalarda, hurdaya neden olan çekme boşlukları, gaz gözenekleri, sıcak yırtılma, soğuk birleşim ve eksik dolum gibi kusurlar bulunmamalıdır. Çalışmaların başarı kriterleri arasında, üretilen parçaların

belirlenen nominal boyutlar içinde ve yüksek hassasiyetli boyutsal/geometrik toleranslarla elde edilmesi yer almaktadır. Döküm parçalarının nominal boyutlara ve toleranslara uygun üretilmesi kritik öneme sahiptir. Boyutsal ve geometrik sapmalar, hedeflenen parçaların elde edilmesini engelleyecektir. Karmaşık geometrilere ve dar boyutsal toleranslara sahip bir ürünün geleneksel basınçlı döküm yöntemiyle üretilmesi, hassas kontrol yöntemleri zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, düşük kurşun içerikli alaşım ve düşük basınçlı döküm tekniği kullanılarak üretilen parçalarda bu başarı kriterini sağlamaktadır. Bu bağlamda, üretilen parçalar üzerinde aşağıdaki testler ve analizler gerçekleştirilmiştir.

- **Hurda oranı belirlenmesi:** Dökümden elde edilen her bir parça incelenmiş ve eksik dolum, çatlak veya yüzey kusurları gibi hatalar, aydınlatmalı kontrol tezgahlarında görsel olarak denetlenmiştir. En iyi hurda oranı, %19 ile 3. şarj numunesinden elde edilmiştir.
- **Mikroyapı analizi:** Numunelerden alınan kesitler ile optik mikroskop altında mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Alaşım içindeki faz dağılımları ve tanelerin boyutları belirlenmiştir. Bu süreçte, NIKON_SMZ800 optik mikroskobu kullanılmıştır. Cihazın fotoğrafı şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 NIKON_SMZ800 optik mikroskobu

- **Boyutsal ve geometrik kontrol:** Dökümden elde edilen her bir parça, koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılarak boyutsal ve geometrik kontrollerden geçirilmiştir. 3. Şarj numunesinden üretilen lavabo bataryaları üzerinde gerçekleştirilen boyutsal ve geometrik kontroller, örnek olarak Tablo 5.2'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Koordinat ölçüm cihazı (CMM) sonuçları

	Kritik ölçüm değerleri	Ölçüm sonuçları
1	M24X1-6H	Ok
2	Min 3.5 mm	3.78 mm
3	4.5±0.1 mm	4.56 mm
4	M37X1.5-6H	Ok
5	Ø34+0.1 mm	34.08 mm
6	Ø32.2+0.1 mm	32.27 mm
7	6.3+0.2/-0.1 mm	6.38 mm
8	5.1+0.2 mm	5.22 mm
9	M8-6H	Ok
10	4.5+0.5 mm	4.62 mm
11	Ø24.6±0.2 mm	24.61 mm
12	Ø16.5±0.2 mm	16.53 mm
13	1.4±0.2 mm	1.58 mm
14	51.5+0.1 mm	51.54 mm
15	31.1+0.1 mm	31.11 mm
16	1±0.1X15°±1°	Ok
17	Ø41+0.2	41.12
18	2±0.1 mm	2.10 mm
19	6+0.5 mm	6.36 mm
20	(98°)	98°
21	(26°)	26°
22	Ø48 mm	48.27 mm
23	1±0.145°	Ok
24	R_a=1.6 µm	1.13 µm
25	Min. 1.5 µm	1.74 µm

Ayrıca yüzey pürüzlülüğü Time TR 221 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüş ve 1,6µm'lik tasarım değerinin altında olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının fotoğrafı Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2 Time TR 221 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

- **Mekanik testler:** Sertlik testleri, Brinell sertlik test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Antimon, bizmut ve alüminyum elementlerinin mekanik dayanım üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 5.3'te gösterilen Matsuzawa DXT sertlik ölçüm cihazından yararlanılmıştır.



Şekil 5.3 Matsuzawa DXT sertlik ölçüm cihazı

- **Kimyasal Analizler:** Alaşım bileşiminin doğruluğunu kontrol etmek için spektral analiz yapılmıştır. Bu analiz için, spektral analiz cihazı olarak Perkin Elmar Lambda 35 UV/VIS spektrofotometresi kullanılmıştır. Cihazın görseli şekil 5.4'te gösterilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen veriler tablo 5.3'te sunulmuştur.



Şekil 5.4 Perkin Elmar Lambda 35 UV/VIS spektroskopi cihazı

Tüm örnekler için kimyasal analiz içerikleri, tablo 5.4'te ki gibidir.

Tablo 5.3 Tüm şarjların spektral analiz sonuçları

Şarj numarası	%Cu	%Pb	%Zn	%Ni	%Mn	%Fe	%Al	%Si	%Bi	%Modifiye edici
1	61.96	0.190	37.18	0.002	<0.001	0.033	0.486	0.009	<0.003	0.4 Al
2	62.83	0.194	36.17	0.003	<0.001	0.036	0.727	0.010	<0.003	0.8 Al
3	61.96	0.190	37.18	0.002	<0.001	0.033	0.586	0.009	<0.003	0.02 Sb
4	61.89	0.194	37.26	0.002	<0.001	0.035	0.557	0.009	<0.003	0.04 Sb
5	62.76	0.197	35.95	0.001	<0.001	0.033	0.533	0.008	0.483	0.5 Bi
6	61.95	0.283	36.22	0.001	<0.001	0.035	0.516	0.009	0.968	1 Bi

Döküm parametreleri ve alaşım elementlerinin parça üzerindeki etkileri, elde edilen sonuçlarda gözlemlenmiştir. Özellikle, antimonun çekme oluşumunu azaltmadaki etkisi ve kurşunsuz alaşım üretimi için çevresel açıdan olumlu etkisi değerlendirilmiştir. Tüm yükler için uygulanan optimal döküm parametreleri ve deneysel sonuçlar, bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

6
DENEYSEL ÇIKTILAR

6.1 Döküm parametresi çıktıları

Alçak basınçlı döküm yöntemi kullanılarak yapılan musluk bataryası üretim deneylerinde, ergime sıcaklığı alüminyumdan bizmuta doğru kademeli olarak artmıştır ve döküm sonrası dolum süresi azalmıştır. Aynı kalıp sıcaklıklarında yapılan kimyasal analizler, en düşük kurşun içeriğinin 1. ve 3. şarj'da gözlemlendiğini gösterdi.

Tablo 6.1 Döküm parametreleri ve kurşun (Pb) oranları

Şarjlar	Fırın sıcaklığı (C°)	Grafit havuz sıcaklığı (C°)	Döküm basıncı (mBar)	Dolum zamanı (s)	Kalıp sıcaklığı (C°)	Kurşun oranı (%Pb)
1. Sample	1005	30	550	7.0	135	0.190
2. Sample	1010	34	550	7.0	136	0.194
3. Sample	1010	30	525	7.0	135	0.190
4. Sample	1010	30	550	7.0	135	0.194
5. Sample	1015	30	600	4.5	135	0.197
6. Sample	1015	30	600	4.5	135	0.247

6.2 Malzeme hurda oranı

Döküm işleminin ardından, batarya örnekleri çeşitli mekanik işlemlerden geçti. Bu işlemler sırasında, ilgili örneklerde hurda durumları meydana geldi. Üretilen her yük, bir kesme işlemine tabi tutuldu, ancak 5. ve 6. örneklerde kesme işlemi uygulanmadı. Mekanik işleme, zımparalama ve cilalama işlemleri yapıldı, ardından kaplama işlemi gerçekleştirildi. Tüm işlemleden sonra, hurda tablosu şu şekildedir: En iyi hurda-üretim oranına sahip şarj, antimon etkisinin gözlemlendiği 3. lavabo bataryasıdır.

Tablo 6.2 Lavabo bataryası üretim verimliliği

Şarjlar	Üretim adedi	Hurda miktarı	Üretim verimliliği (%)
1. Şarj	100	68	32
2. Şarj	100	53	47
3. Şarj	100	19	81
4. Şarj	100	44	56
5. Şarj	100	56	44
6. Şarj	100	50	50

6.3 Malzeme sertlik oranları

Örneklerin sertlik ölçümleri, üretim parametreleri ve kimyasal bileşimlerine göre değişiklik göstermiştir. Alüminyum örneklerde sertlik değeri 88-97 brinell sertlik (HB) aralığında değişirken, antimon örneklerinde 86-90 HB arasında brinell sertlik değeri elde edilmiştir. Bizmut örneklerinde ise, diğer örneklere kıyasla sertlikte belirgin bir azalma gözlemlenmiş ve ISO 6506-1:2014 [49] standardına göre ölçüm sonuçları 74-79 HB arasında olmuştur. Ayrıca, akma ve çekme dayanımı için, BS EN ISO 6892-1:2019 [50] standardına göre 6 şarj'dan üretilen örnekler üzerinde çekme testleri yapılmış ve 5kN test makinesi ile 15 mm/dk gerilme hızında test gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre, en iyi akma ve çekme dayanıklılığına sahip batarya yükü yine antimon örneği olan 3. şarj'da gözlemlenmiştir. Örneklerin brinell sertlik değerleri tablo 6.3'te sunulmuştur. Tüm örnekler sertlik testlerine tabi tutulmuş ve elde edilen sertlik değeri aralıkları tabloda verilmiştir.

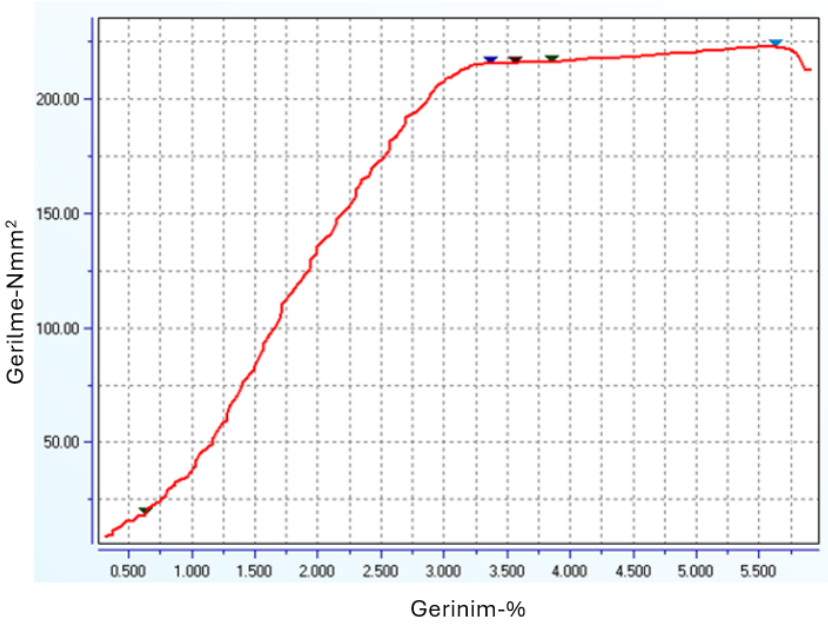
Tablo 6.3 Şarjların brinell sertlik değerleri

Şarjlar	Kurşun oranı (%Pb)	Brinell sertliği (HB)
1. Şarj	0.190	88-90
2. Şarj	0.194	94-97
3. Şarj	0.190	88-90
4. Şarj	0.194	86-90
5. Şarj	0.197	77-79
6. Şarj	0.247	74-77

Tüm yüklerden rastgele seçilen beş döküm, 10kN kapasiteli bir Matest marka evrensel test makinesinde çekme testine tabi tutulmuştur. Örneklerin ortalama çekme ve akma değerleri tablo 6.4'te sunulmuştur. %0.02 antimon (Sb) içeren 3.şarj, en iyi çekme ve akma dayanıklılığı değerlerini göstermiştir. 3. Şarj için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.4 Çekme testi sonuçları (ortalama)

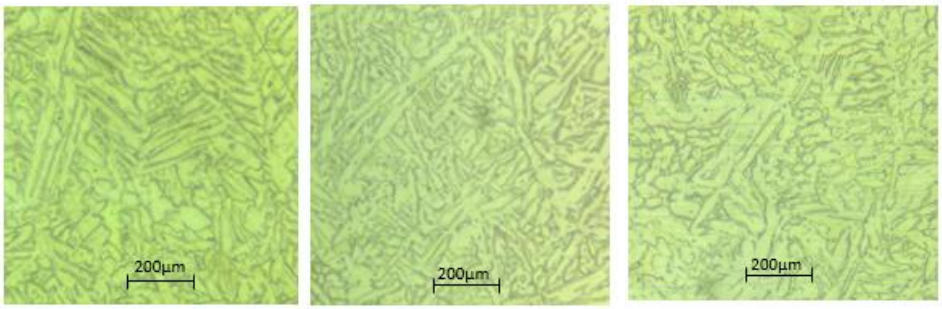
Şarjlar	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)
1. Şarj	218.11	174.92
2. Şarj	196.20	135.01
3. Şarj	222.98	215.49
4. Şarj	190.39	162.62
5. Şarj	153.47	147.82
6. Şarj	142.16	137.84



Şekil 6.1 3. Şarjın gerilme-birim şekil değiştirme grafiği (%0.02Sb)

6.4 Malzemelerin mikroskop altındaki görüntüsü

Üretilen lavabo şarjlarından kesitler alındı ve bu parçalarda optik mikroskop altında inceleme gerçekleştirilmiştir. Bu inceleme, alaşım içindeki faz dağılımları ve tane boyutlarının belirlenmesini sağladı. Mikroskop altında incelenen alüminyum, antimon ve bizmut alaşımı örneklerinin mikroyapı görüntüleri şekil 6.2'de gösterilmektedir.



A) Alüminyum (1. Şarj) B) Antimon (3. Şarj) C) Bismut (6. Şarj)

Şekil 6.2 Alüminyum, antimon ve bismut mikroyapıları

Antimon içeren örneklerin mikroyapısı, homojen ve ince taneli yapısıyla, döküm sürecinde yüksek kaliteli ürünlerin üretimini sağladı ve düşük atık oranına katkıda bulundu. Bu homojen yapı, malzemenin dayanımını ve dayanıklılığını artırarak, çeşitli uygulamalarda uzun ömürlü performans sergileme potansiyelini göstermektedir. Sertlik testi sonuçları, 88-90 HB aralığında ve en iyi akma dayanımına sahip olup, %81 üretim verimliliği ile bu parçanın üretilebilirliğini desteklemektedir.

Öte yandan, bizmut eklenmesi, alaşımın işlenebilirlik açısından azalan kurşun eklenmesine dayanabileceğini göstermiş olsa da, döküm sonrası mekanik dayanımının antimon içeren örnekler kadar iyi olmadığını ortaya koymuştur. Katılaşma süreci tamamlandıktan sonra kalıp açıldığında, özellikle riser bölgesinde, pabuç bölgelerinde gözlemlenen çatlaklar ve bizmut içeren parçaların mikroyapı görüntüleri, düzensiz ve homojen olmayan bir dağılım sergileyerek bu sonuçları desteklemiştir.

Alüminyum eklenen örneklerde daha sıkı bir mikroyapı ve daha yüksek dayanım gözlemlenmiştir; ancak bu parçalarda bazı kırılganlığa yol açmıştır. Sonuç olarak, alüminyum eklenmesinin üretim verimliliğine antimon eklenmesi kadar katkı sağlamadığı sonucuna varılmıştır.

7
SONUÇ

Bu çalışmada, alçak basınçlı döküm yöntemi kullanılarak düşük kurşunlu bakır alaşımlarının üretilebilirliği üzerine yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır. Bu çalışma, ülkemiz sanayisinin mevcut ve gelecekteki düzenlemelere uyum sağlamasına, artan dış talebe yanıt vermesine ve iç sanayimizde insan ve çevre sağlığına daha az zarar veren ürünler üretme yeteneği kazanmasına olanak tanıması açısından önemlidir. Ayrıca, ihracat fırsatlarını artırarak ülkemizin sanayisine ve ekonomisine katkıda bulunmaktadır.

Çalışmalar düşük kurşunlu çevre dostu alaşımların lavabo bataryalarının üretiminde kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu şekilde, ülkemizde zorunlu hale gelecek olan uluslararası düzenlemelerin gereksinimlerini karşılamak için bu sektör adına önemli bir adım atılmıştır.

Özellikle antimon, döküm performansına olan olumlu etkisi ile öne çıkmıştır. Akışkanlığı artırmış ve önemli ölçüde çekme oluşumunu azaltmıştır. Bu da parçaların yüzey kalitesini iyileştirmiş ve düşük atık oranı sağlamıştır. Antimon içeren örneklerde gözlemlenen homojen mikroyapı dağılımı, bunların kurşunsuz alaşımlar için etkili bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Alaşıma bizmut eklenmesi, döküm yeteneğini olumlu etkilememiştir. Ancak, düşük sertlik değeri ile işlenebilirlik üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Kurşun elementinin azaltılmasından kaynaklanan işlenebilirlik kaybı telafi edilmiştir. Döküm sonrası mekanik özellikler açısından ise antimon ilaveli şarjlara kıyasla daha kötü performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen bulgular, kurşunsuz bakır alaşımlarının çevre dostu ve insan sağlığı için güvenli alternatifler olabileceğini göstermektedir. Özellikle, antimonun döküm performansına etkisi ve döküm sonrası mekanik ve mikroyapısal özellikleri, gelecekteki araştırmalara ve kurşunsuz alaşımların geliştirilmesine önemli katkılarda bulunması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

[1] Hasan Kokes, “Oksitli Bakır Cevherlerinden Hidrometalurjik Yöntemle Bakır Sülfat Kristallerinin Üretimi”, İTÜ, Haziran 2013

[2] Baris Unlu, “Yüksek İletken Bakır Alaşımlarının Üretilmesi ve Elektrik Kontak Performanslarının İncelenmesi”, Bolu İzzet Baysal Üniversitesi, Nisan 2024

[3] “Bakır ve Bakır Alaşımları İmalat Sanayi”, İstanbul Sanayi Odası, Ekim 2022

[4] Juri J. Hostynek, Horward I. Maibach, “Copper and the Skin”, Dermatology; Clinical & Basic Science Series, 2006

[5] Volkan Karakurt, “Yeni Nesil Yüksek Performanslı CuNiSiCo Alaşımının İncelenmesi”, Karabük Üniversitesi, Ocak 2024

[6] Mustafa Ecevit Duzman, “Kurşunlu Pirinçlerin Sürekli Dökümünde Döküm Özelliklerinin İyileştirilmesi” , Yıldız Teknik Üniversitesi, 2010

[7] Luca Collini, “Copper Alloys-Early Applications and Current Performance-Enhancing Processes”, Intech, February 2012

[8] Mehmet Gavgalı, Yaşar Totik , Anne Nevile, “Yapay Deniz Suyunda Farklı Hızlarda Cu-%10 Ni Alaşımının Erezyon-Korozyon Davranışı”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4 Temmuz 2001

[9] https://www.metalurjik.com/bakir-nikel-faz-diyagrami

[10] European Commission Joint Research Center (JRC). Positive List of Metallic Materials in Contact with Drinking Water; European Commission: Brussels, Belgium, 2020; Annex 1A_4. Available online: https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-02/Annex%201A_4%20MS%20Scheme%20and%20Positive%20List%20of%20Metallic%20Materials%20in%20Contact%20with%20Drinking%20Water.pdf

[11] New Hampshire Department of Environmental Service. Lead Remediation Guide; New Hampshire Department of Environmental Service: Concord, NH, USA, 2019. Available online: https://www.des.nh.gov/sites/g/files/ehbemt341/files/documents/lead-remediation-guide.pdf

[12] NSF/ANSI 61. Drinking Water System Components – Health Effects; NSF International: Ann Arbor, MI, USA, 2020; Standard Number: NSF/ANSI 61. Available online: https://d2evkimvhatqav.cloudfront.net/documents/NSF-ANSI_61_watemarked.pdf?v=1594929800

[13] NSF International. NSF/ANSI 372-2016: Drinking Water System Components – Lead Content; NSF International: Ann Arbor, MI, USA, 2016. Available online: https://webstore.ansi.org/preview-

pages/NSF/preview_NSF+ANSI+372-2016.pdf?srsltid=AfmBOortHIIAzEtUD-795pdgVMQsUTIs-9Ztu6UrHj1pK4_EI1hKVjAn

[14] European Union. Directive (EU) 2020/2184 on the Quality of Water Intended for Human Consumption; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2020. Available online: https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184/body#:~:text=The%20objectives%20of%20this%20Directive,water%20intended%20for%20human%20consumption

[15] European Parliament and Council. Regulation (EC) No 1907/2016 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals (REACH). Official Journal of the European Union 2006, L396, 1-849. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006R1907

[16] Muthuchamy Ayyapan, Narendra Kumar Uttamchand, Raja Annamalai Arunjunai Rajan, " Mechanical and Wear Properties of Copper-Lead Alloy Prepared by Powder Metallurgy Processing Technique", Journal of Chemical Thecnology and Metallurgy, June 2016

[17] Mario Merola, "Theoretical Evaluation of the Physical Properties of Copper-Lead Rheocast Alloys", Politecnico di Torino, 5 February 1996

[18] Adekunle A. Adeleke, Makanjuola Oki, Ikechukwu K. Anyim, Peter P. Ikubanni, Adeolu A. Adediran, Ayokunle A. Balogun, Thomas A. Orhadahwe, Peter O. Omoniyi, Adebayo S. Olabisi, Esther T. Akinlabi, "Recent Development in Casting Technology: A Pragmatic Review", Revue des Composites et des Materiaux Avances, 32(2), 91-102, April 2022

[19] Mustafa Akar, "Döküm Hataları ve Önlenmesi için Tasarım Yöntemleri", Pamukkale Üniversitesi, Ocak 2018

[20] Mahzar Ümit Büyükfırat, "Sıfır Altı Isıl İşlem ile Ekstürzyon Kalıplarının Isıl İşlem Süreçlerinin Kısaltılması ve PVD Kaplama ile Kalıp Ömrünün Uzatılması", İstanbul Teknik Üniversitesi, Temmuz 2019

[21] Sinan Kaya, "Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünde Aşılayıcı ve Döküm Sıcaklığının Akıcılık Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Bayburt Üniversitesi, Ağustos 2019

[22] Murat Çolak, "OPTICast Yazılımı ile Döküm Endüstrisinde Kalıplama Tasarımı Optimizasyonu Uygulaması", Bayburt Üniversitesi, Nisan 2020

[23] Turgut Öztürk, Arif Özkan, "Sıcak ve Soğuk Yolluk Sistemlerinin Karşılaştırılması", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2015

[24] Murat Koru, Orhan Serçe, "Yüksek Basınçlı Döküm Prosesinde, Farklı Yolluk Tipi ve Vakum Uygulamasının Simülasyonu", SDU International Thecnologic Science, Aralık 2014

[25] Erman Ergen, "Disamatik Kalıplamada Yolluk Sistemi ve Kalıp Gözlerinin Doldurulmasının Araştırılması", Yıldız Teknik Üniversitesi, 2008

[26] Onur Şahin, "Dökümhane Maça Üretiminde Ortaya Çıkan Kimyasal Maddeler ve Bu Maddelerin Kontrolü", Üsküdar Üniversitesi, 2020

[27] Cihan Çantaş, "Alüminyum Döküm için Geri Dönüştürülebilir Maça Tasarımı ve Süreç Optimizasyonu", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Nisan 2018

[28] Yüsein Ali, "Yarı Katı Döküm Yöntemi ile Alüminyum Alaşımından Sızdırmazlık Parçası Üretimi", Yıldız Teknik Üniversitesi, 2022

[29] Sevinç Zafer Mutlu, "Basınçlı Döküm Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği", Gazi Üniversitesi, 2019

[30] Aykut Doğan, "Alüminyum Alaşımlarının Yüksek Basınçlı Döküm Prosesi ile Üretiminde Farklı Gaz Atma Sistemlerinin Porozite ve Proses Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi", Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2019

[31] Gazican Özkan, "Alüminyum Dökümünde, Kokil Döküm Yöntemiyle Üretilen Parçaların Alçak Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilmesi", Dokuz Eylül Üniversitesi, Ocak 2018

[32] Eren Bozkurt, "Investigation of Cooling Design Systems in Low Pressure Casting", Dokuz Eylül Üniversitesi, September 2019

[33] Filipe Monteiro, Gonçalo Soares, Rui Madureira, Rui Pedro Silva, Jose Silva, Rui Amaral, Rui Neto, Ana Reis, Antonio Esteves "Development of the Low-Pressure Die Casting Process for an Aluminium Alloy Part", MDPI-Materials,17(12), Article 2835, June 2024

[34] Hasan Hasırcı, "Advantages of Produce by Low Pressure Casting", Gazi Üniversitesi, December 2017

[35] Ainsley Elizabeth Miller, "Investigation of Erosive-Corrosive Wear In The Low Pressure Die Casting of Aluminum A356", The University of British Columbia, April 2005

[36] Baoyu Zhang, Xiaoshan Huang, Xinfang Zhang, Baozhong Ma, Chenyang Wang, "Purification of Cu-Zn melt based on the migration behavior of lead and bismuth under pulsed electric current", University of Science and Technology Beijing, 2023

[37] Chih-Chun Hsieh, Jia-Siang Wang, Paxon Ti-Yuan Wu, Weite Wu, "Microstructural Development of Brass Alloys with Various Bi and Pb Additions", National Chung Hsing University, 6 May 2013

[38] D. Empl, V. Laporte, E. Vincent, N. Dewobroto, A. Mortensen,"Improvement of elevated temperature mechanical properties of Cu-Ni-Sn-Pb alloys", Ecole Polytechnique Federale de Lausanne,2010

[39] Hisashi Imai, Li Shufeng, Haruhiko Atsumi, Yoshiharu Kosaka, Akimichi Kojima, Katsuyoshi Kondoh, "Development of lead-free machinable brass with bismuth and graphite particles by powder metallurgy process", Osaka University, 2010

[40] J. Johansson, H. Persson, J.-E. Stahl, J.-M. Zhou, V. Bushlya, F. Schultheiss, "Machinability Evaluation of Low-Lead Brass Alloys", Lund University, 2019

[41] Lin Liu, Zhichen Zhang, Martin Dienwiebel, " The running-in tribological behaviour of Pb-free brass and its effect on microstructural evolution", Changzhou University, Karlsruhe Institute for Technology, Fraunhofer Institute for Mechanics of Materials IWM

[42] Magdalena Susanne Müller, Kilian Brans, Markus Meurer, Knut Sorby, Thomas Bergs, ”The Effect of High-Pressure Cutting Fluid Supply On the Chip Breakability of Lead-Free Brass Alloys”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023

[43] Christoph Nobel, Fritz Klocke, Dieter Lung, Sebastian Wolf, “Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys”, RWTH Aachen University, 2014

[44] Koichi Suzaki, Hiroki Goto, Keiichiro Oishi, “ Development of Lead-Free High-Strenght Copper Alloys”, Sambo Departmnet Group, Mitsubishi Shindoh Co. , 2020

[45] Mohamed A. Taha, Nahed A. El-Mahallawy, Rawia M. Hammouda, Tarek M. Moussa, Mohammed H. Gheith, “Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties”, Ain Shams University, Banha University, 2012

[46] Wenjing Gao, Shuming Xing, Ying Wang, “Effect of Lanthanum Addition on Microstructure and Hardness of Brass Alloys Produced by Rheological Squeeze Casting”, Beijing Jiaotong University, Zhengzhou University of Technology, 2021

[47] Jun Yaokawa, Daisuke Miura, Koichi Anzai, Youji Yamada, Hiroshi Yoshii, “Strength of Salt Core Composed of Alkali Carbonate and Alkali Chloride Mixtures Made by Casting Technique”, Tohoku University, Yamaha Motor Co. Ltd. 2007

[48] SARBAK. Ingot Alloys. Available online: https://www.sarbak.com.tr/urunler/Kulce

[49] ISO 6506-1. Metallic materials – Hardness test – Part 1: Test method for Brinell hardness; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014. Available online: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:6506:-1:ed-3:v1:en

[50] ISO 6892-1. Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2019. Available online: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:6892:-1:ed-3:v1:en

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

[1] Ali Serdar VANLI, Muhammed Hakan KARAS, “Material and Process Modification to Improve Manufacturability of Low-Lead Copper Alloys by Low-Pressure Die Casting Method”, Yildiz Technical University, MDPI Metals, Article, 15 February 2025