



**BERİLYUM EKLENTİSİNİN ALÜMİNYUM BRONZ
CuAl10Ni5Fe4'ÜN MİKRO YAPISI VE AŞINMA
DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ**

**2025
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**BERİLYUM EKLENTİSİNİN ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN
MİKRO YAPISI VE AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ**

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Mayıs 2025**

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK tarafından hazırlanan “BERİLYUM EKLENTİSİNİN ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN MİKRO YAPISI VE AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsmail ESEN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/05/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İsmail ESEN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mehmet Akif KOÇ (SUBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BERİLYUM EKLENTİSİNİN ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN MİKRO YAPISI VE AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİ

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. İsmail ESEN
Mayıs 2025, 43 sayfa

Bu çalışmada, berilyum eklentisinin alüminyum bronz cual10ni5fe4'ün mikro yapısı ve aşınma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Numunelerin oluşturulmasına yönelik döküm tekniği Sağlam Metal Sanayi ve Ticaret Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde gerçekleştirildi. Ergitme işleminde 10 kg kapasiteli 5M marka orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Biri berilyum içermeyen, diğeri %0,2 berilyum içeren iki ayrı yük oluşturuldu. Dökümler 1230°C sıcaklıkta gerçekleştirildi. Aşınma testleri, kuru bir ortamda ileri geri hareket eden bir aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Sisteme uygulanan kuvvet 30 Newton, kayma hızı saniyede 0,1 metre ve kaymanın gerçekleştiği toplam mesafe 10000 metre idi. Aşınma süreci boyunca sürtünme kuvveti, tribometre koluna bir yük hücresi takılarak ölçüldü ve elde edilen veriler anında bilgisayarda saklandı. Mikroyapılarda yumuşak α fazında iğne benzeri yapıların yoğun bir dağılımı tespit edildi, ancak β fazında berilyum

eklendiğinde gözle görülür bir değişiklik görülmedi. Ayrıca κ fazı α fazına orantılı olarak dağıtılır. CuAl10Ni5Fe4 örneğinin sertliği 212,77 HB'de ölçölmüştür. Ancak %0,2 Be eklendiğinde sertlik değeri 237,79 HB'ye çıkmıştır. Aşınma testinde %0,2 berilyum katkılı alaşımın 10000 metreden sonra en az ağırlık kaybı sağlayan en iyi malzeme olduğu belirlendi. Bu malzemenin 10000 metreden sonraki ağırlık kaybı ise $3,54 \times 10^{-6}$ gr. Aşınma sırasındaki sürtünme katsayılarının paralel olduğu ve en düşük değere sahip malzemenin 0,0584 değeriyle CuAl10Ni5Fe4- 0,20%Be olduğu göröldü.

Anahtar Sözcükler: CuAl10Ni5Fe4, Berilyum, Aşınma, Sertlik, Mikroyapı

Bilim Kodu : 91518

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECT OF BERYLLIUM ADDITION ON MICROSTRUCTURE AND WEAR BEHAVIOR OF TO ALUMINUM BRONZE CUAL10NI5FE4

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İsmail ESEN

May 2025, 43 pages

In this study, the effect of beryllium addition on the microstructure and wear behavior of aluminum bronze cual10ni5fe4 was investigated. The casting technique for creating the samples was carried out at the Sağlam Metal Industry and Trade Research and Development Center. The melting process employed a 5M brand medium frequency induction furnace with a capacity of 10 kg. Two separate charges were formed, one without any beryllium and the other with 0.2% beryllium. The castings were performed at a temperature of 1230°C. Wear tests were conducted utilizing a reciprocating wear test instrument in a dry environment. The force applied to the system was 30 Newtons, the speed at which sliding occurred was 0.1 meters per second, and the total distance over which sliding occurred was 10000 meters. The friction force throughout the wear process was measured by attaching a load cell to the tribometer arm, and the resulting data was immediately stored on the computer.

In the microstructures, a dense distribution of needle-like structures was detected in the soft α phase, although the β phase showed no visible change when beryllium was added. In addition, the κ phase is distributed proportionally to the α phase. The hardness of the Nickel Aluminum Bronze sample was measured at 212.77 HB. However, when 0.2% Be was added, the hardness value jumped to 237.79 HB. In the wear test, it was determined that the 0.2% beryllium added alloy was the best material providing the least weight loss after 10000 meters. The weight loss of this material after 10000 meters is 3.54×10^{-6} g. It was observed that the friction coefficients during wear were parallel and the material with the lowest value was Nickel Aluminum Bronze - 0.20%Be with a value of 0.0584.

Keywords: CuAl10Ni5Fe4, Beryllium, Wear, Hardness, Microstructure.

Science Code : 91518

TEŞEKKÜR

Bu tezin planlanması, geçişi, ortaya çıkmadı ve oluőumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve deneyiminden yararlanan, rehberliği ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller çerçevesinde őekillendiren sevgili hocam Prof. Dr. İsmail ESEN'e sonsuz teőekkürlerimi sunmak isterim. Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI'ya tüm çalıőmalarım yürütülmesinde bilgilerinden yararlanmamda maddi ve manevi yardımlarından dolayı teşekkür etmek isterim.

Bu süreçte yanımda olan sevgili aileme teşekkür etmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
BAKIR	4
2.1. BAKIRIN GELİŞİMİ.....	4
2.2. BAKIRDAN BRONZA EVRİM.....	5
2.3. BRONZUN GELİŞİMİ	7
2.4. BRONZUN NİKEL ALÜMİNYUM BRONZUNA (NAB) EVRİMİ.....	8
BÖLÜM 3	10
ALÜMİNYUM BRONZU	10
3.1. ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4	10
3.2. ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN AŞINMA DAVRANIŞI.....	11
3.3. ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	13
3.4. CUAL10NI5FE4'ÜN İNTERMETALİK ÖZELLİKLERİ VE MİKRO YAPISI	14

	<u>Sayfa</u>
3.5. CUAL10NI5FE4ÜN KİMYASAL BİLEŞİMİ	15
3.6. BERİLYUM	17
3.7. BERİLYUM ELEMENTİNİN ETKİSİ	18
BÖLÜM 4	20
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
4.1. MALZEMELERİN ÜRETİMİ.....	20
4.2. XRF	23
4.3. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR	23
4.4. SERTLİK TESTİ.....	23
4.5. AŞINMA TESTİ	24
BÖLÜM 5	27
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	27
5.1 XRF SONUÇLARI	27
5.2. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU SONUÇLARI	27
5.3. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI.....	30
5.4. AŞINMA TEST SONUÇLARI.....	30
BÖLÜM 6	34
GENEL SONUÇLAR	34
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4. 1. Döküm işlemlerinde kullanılacak külçelerin hazırlanması: a) Ergitme işlemi, b) Döküm işlemi.....	20
Şekil 4. 2. Döküm işlerinde kullanılan 10 kg kapasiteli orta frekanslı indüksiyon ocağı.	21
Şekil 4. 3. Döküm işlerinde kullanılan hammaddeler a) Önceden hazırlanmış nikel alüminyum bronz külçe b) Bakır berilyum ön alaşımı.....	22
Şekil 4. 4. Döküm işlerinde kullanılan yerçekimi kalıbı.....	22
Şekil 4. 5. Brinell sertlik ölçüm prosedürü.	24
Şekil 4. 6. İleri-Geri Aşınma Testi.....	25
Şekil 4. 7. Taramalı elektron mikroskopunun (SEM) konfigürasyonu.....	26
Şekil 5. 1. (a) İşlenmiş CuAl10Ni5Fe4 numunesinin 20X ve (b) 50X mikro yapı görüntüleri.	28
Şekil 5. 2. (a) İşlenmiş CuAl10Ni5Fe4-0.2 Be numunesinin 20X ve (b) 50X mikro yapı görüntüleri.	29
Şekil 5. 3. Numunelerin sertlik ölçüm sonucu	30
Şekil 5. 4. CuAl10Ni5Fe4 ve CuAl10Ni5Fe4- 0.20%Be'nin aşınma sonrası ağırlık kaybı grafiği.	31
Şekil 5. 5. CuAl10Ni5Fe4 ve CuAl10Ni5Fe4- 0.20%Be'nin sürtünme katsayısı grafiği.	31
Şekil 5. 6. (a) CuAl10Ni5Fe4 (500X) ve (b) CuAl10Ni5Fe4-0,2% Be (500X) aşınma mekanizması görüntüleri.	33

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 5. 1. Çalışmalarda Hammadde olarak Kullanılan Külçenin Kimyasal Analizi
(% Ağırlık). 27

Çizelge 5. 2.Çalışmada Kullanılan Alaşımların Kimyasal Bileşimleri..... 27



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Cu	: bakır
Fe	: demir
Ni	: nikel
Al	: alüminyum
Ar	: argon
Be	: berilyum
Li	: lityum
H ₂	: hidrojen
ρ	: birim kütle
σ	: normal gerilim

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
DIN	: Alman Endüstri Normu
EN	: Avrupa Normu
TS	: Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Nikel alüminyum bronz (NAB), toplu olarak istenen mekanik ve korozyona dayanıklı özelliklerine katkıda bulunan önemli miktarda alüminyum, nikel ve genellikle demir içeren özel bir bakır bazlı alaşımdır. Tipik olarak, NAB alaşımları yaklaşık %9-12 alüminyum, %5-6 nikel ve %5'e kadar demir ile manganez gibi diğer elementlerin eser miktarlarını içerir [1,2]. Bu benzersiz bileşim, NAB'nin özellikle deniz ortamlarında yüksek mukavemet, tokluk ve korozyona karşı mükemmel direnç kombinasyonunu sergilemesini sağlar ve bu da onu gemi pervaneleri, valfler ve pompa bileşenleri gibi uygulamalar için ideal bir seçim haline getirir [3–5].

NAB'nin mikro yapısı karmaşıktır ve performans özelliklerinde önemli bir rol oynar. Alaşım genellikle bakır açısından zengin bir α fazı, tutulan martensitik bir β fazı ve mekanik özelliklerine ve korozyon direncine katkıda bulunan çeşitli alüminyum açısından zengin κ fazlarından oluşur. Alüminyumun varlığı alaşımın mukavemetini artırır ve genel ve lokal korozyona karşı direncini iyileştirirken, nikel mikro yapıyı stabilize eder ve korozyon direncini daha da artırır [2,6,7]. Ek olarak, ısıl işlem ve işleme koşulları NAB'nin mikro yapısal evrimini önemli ölçüde etkileyebilir ve bu da mekanik özelliklerini ve korozyon davranışını etkiler [4,8].

Özetle, nikel alüminyum bronz, yüksek mukavemeti, mükemmel korozyon direnci ve karmaşık mikro yapısıyla karakterize edilen çok yönlü ve sağlam bir alaşımdır ve bu da onu çeşitli deniz uygulamaları için tercih edilen bir malzeme haline getirir. Performansı, bileşimi, mikro yapısal özellikleri ve çevre koşullarından etkilenir ve bu da NAB'nin mühendislik uygulamalarında etkili kullanımında bu faktörlerin anlaşılmasının önemini vurgular.

Nikel-alüminyum bronz (NAB) berilyum eklenmesi, aşınma özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir ve özellikle deniz ortamlarında olmak üzere çeşitli uygulamalarda performansını artırabilir. Genellikle alüminyum, nikel ve demirden oluşan bakır bazlı bir alaşım olan NAB, mükemmel korozyon direnci ve mekanik özellikleriyle bilinir. Bu alaşıma berilyum eklenmesi, aşındırıcı koşullara maruz kalan bileşenler için çok önemli olan aşınma direncini daha da iyileştirebilir.

Berilyum bronz alaşımları, aşınma dirençlerine katkıda bulunan yüksek mukavemetleri ve sertlikleri ile tanınır [9]. Berilyum eklenmesi, alaşımın mikro yapısını iyileştirerek gelişmiş mekanik özelliklere yol açabilir. Bu, deniz mühendisliği ve havacılık bileşenleri gibi aşınma direncinin kritik olduğu uygulamalarda özellikle önemlidir [3,8]. Berilyum eklenmiş NAB'deki aşınma mekanizmaları, alaşımın tribolojik performansını artıran koruyucu bir oksit tabakasının oluşumuna atfedilebilir [10]. Bu oksit tabakası yalnızca sürtünmeyi azaltmakla kalmaz, aynı zamanda aşındırıcı parçacıklara karşı bir bariyer sağlayarak aşınmayı da hafifletir.

Ayrıca, NAB'nin tribolojik özellikleri berilyumun varlığından önemli ölçüde etkilenebilir. Çalışmalar, alüminyum bronzlarının aşınma oranının berilyumun eklenmesiyle değişen mikro yapısal özelliklerinden etkilenebileceğini göstermiştir [11,12]. Berilyum eklenmesinden kaynaklanan iyileştirilmiş sertlik ve mukavemet, yüksek yük koşullarında aşınmaya direnmeye yardımcı olur ve bu alaşımları zorlu ortamlarla karşılaştıkları gemi pervaneleri ve su altı bağlantı elemanlarındaki uygulamalar için uygun hale getirir [13,14].

Ek olarak, NAB'deki berilyum ve diğer alaşım elementleri arasındaki etkileşim, aşınma direncini artıran sinerjik etkilere yol açabilir. Örneğin, berilyumla birlikte alüminyum ve nikelin varlığı, alaşımın mekanik özelliklerini optimize ederek kayan temas koşulları altında daha iyi performansa yol açabilir [15,16]. Berilyum eklenmiş NAB'nin aşınma davranışının, berilyumun bir alaşım elementi olarak etkinliğini vurgulayarak, geleneksel alüminyum bronzlarına kıyasla daha düşük aşınma oranları sergilediği gösterilmiştir [12,17].

Sonuç olarak, nikel-alüminyum bronza berilyum eklenmesi aşınma direncini önemli ölçüde artırarak onu yüksek dayanıklılık ve korozyon direnci gerektiren uygulamalar için değerli bir malzeme haline getirir. Mekanik özelliklerdeki iyileştirmeler ve koruyucu oksit tabakalarının oluşumu, bu alaşımların üstün tribolojik performansına katkıda bulunan temel faktörlerdir.

Bu çalışma, berilyum ilavesinin nikel alüminyum bronzunun mikro yapısı, sertliği ve aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. %0,2 berilyum katkılı $CuAl10Ni5Fe4$ alaşımı, yerçekimi kalıp döküm işlemi kullanılarak üretilmiştir. Metalografik prosedürler, mikro yapısal analiz, kimyasal analiz, sertlik testi ve üretilen malzemelerin aşınma özellikleri dahil olmak üzere alaşımın karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2

BAKIR

2.1. BAKIRIN GELİŞİMİ

Bakır ve alaşımlarının geliştirilmesi, çeşitli endüstrilerde geliştirilmiş mekanik özelliklere, korozyon direncine ve özel uygulamalara duyulan ihtiyaçtan önemli ölçüde etkilenmiştir. $CuAl_8Fe_5Ni_4Zn_4Sn_1$ alaşımı ile örneklendirilen kurşunsuz bakır alaşımlarına doğru son dönemdeki geçiş, bu alandaki devam eden yeniliği sergilemektedir. Bu yeni alaşım yalnızca düzenleyici talepleri karşılamakla kalmayıp aynı zamanda döküm, sıcak ekstrüzyon ve soğuk çekme gibi gelişmiş üretim süreçleri aracılığıyla gelişmiş mukavemet ve süneklik göstererek geleneksel bakır alaşımlarına uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır [18,19]. Alaşım kombinasyonlarının keşfi, henüz keşfedilmemiş birçok potansiyel fayda olduğu için kritik bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir [19].

Mekanik özelliklere ek olarak, bakır alaşımlarının elektrokimyasal davranışı, özellikle anodize işlemlerinde dikkat çekmiştir. Çalışmalar, Al-Cu alaşımlarının anodizasyonunun, alt tabakanın korozyon direncini artırabilen bakır türlerini içeren anod filmlerin oluşumuna yol açtığını göstermiştir [20–22]. Anodizasyon sırasında bakır iyonlarının göçü, anodik filmlerin genel performansını etkileyebilecek alaşımın mikro yapısından etkilenir [21,22]. Bu davranış, üstün özelliklere sahip malzemeler geliştirmede bakır ve diğer alaşım elementleri arasındaki etkileşimlerin anlaşılmasının önemini vurgular.

Üstelik bakırın antibakteriyel özellikleri, biyomedikal alaşımlara dahil edilmesiyle ilgili araştırmaları teşvik etmiştir. Titanyum bazlı alaşımlara bakır eklenmesinin antibakteriyel etkinliklerini artırdığı ve bunları tıbbi cihazlardaki uygulamalar için uygun hale getirdiği gösterilmiştir [23]. Bu, özellikle implantlar ve cerrahi aletlerle ilişkili enfeksiyonlara ilişkin artan endişeler bağlamında önemlidir. Bakteriyel büyümeyi engelleme yeteneği de dahil olmak üzere bakırın benzersiz özellikleri, onu yeni biyomedikal malzemelerin tasarımında değerli bir bileşen olarak konumlandırır [24].

Bakır alaşımlarının çok yönlülüğü, havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi yüksek performanslı ortamlardaki uygulamalarına kadar uzanır. Bakır alaşımlarını çelikle birleştiren bimetalik yatak malzemelerinin geliştirilmesi, yüksek stres ve aşınmaya maruz kalan bileşenlerin dayanıklılığını ve ömrünü artırmaya yönelik devam eden çabaları göstermektedir [25]. Ek olarak, makine öğrenimindeki ilerlemeler, yüksek mukavemet ve elektriksel iletkenlik gibi hedeflenen özelliklere sahip yeni bakır alaşımlarının keşfini hızlandırmak için kullanılmaktadır; bu özellikler yüksek hızlı trenler gibi modern uygulamalar için çok önemlidir [24,26].

Özetle, bakır ve alaşımlarının geliştirilmesi, mekanik iyileştirme, elektrokimyasal davranış, antibakteriyel özellikler ve gelişmiş endüstrilerde yenilikçi uygulamaları kapsayan çok yönlü bir yaklaşımla karakterize edilir. Devam eden araştırma ve geliştirme çabaları, çevre standartlarına uyumu sağlarken çeşitli sektörlerin değişen taleplerini karşılamak için çok önemlidir.

2.2. BAKIRDAN BRONZA EVRİM

Bakırdan bronza doğru evrim, metalurjide önemli bir teknolojik ilerlemeyi temsil eder ve saf bakır kullanımından bakır alaşımlarının, özellikle de esas olarak bakır ve kalaydan oluşan bronzun geliştirilmesine geçişi işaret eder. Bu geçiş yalnızca malzemede bir değişiklik değil, aynı zamanda eski toplumlardaki daha geniş sosyo-ekonomik ve teknolojik dönüşümleri yansıtır.

Bakır, insanlar tarafından kullanılan ilk metallere biriydi ve kullanımına dair kanıtlar, erken madencilik ve eritme faaliyetlerinin belgelendiği Doğu Anadolu ve Sina Yarımadası gibi bölgelerde MÖ 8000'e kadar uzanıyordu [27]. Bakırın ilk kullanımı, genellikle soğuk çekiçle şekillendirilen basit aletlerin ve süs eşyalarının üretimiyle karakterize edildi. Ancak toplumlar ilerledikçe, özellikle mekanik özellikleri açısından saf bakırın sınırlamaları belirginleşti. MÖ 3500 civarında bronz oluşturmak için bakıra kalayın eklenmesi, metalurjide önemli bir anı işaret etti. Bronz, bakıra kıyasla artan sertlik, iyileştirilmiş döküm kabiliyeti ve daha iyi korozyon direnci gibi üstün nitelikler sunuyordu [28].

Bronz metalurjisinin yayılması, ticaret ağları ve kültürel alışverişlerle yakından bağlantılıdır. Örneğin, MÖ 2800 civarında Sümer'de kalay bronzunun ortaya çıkması, bronz üretimi için gerekli olan bakır ve kalay alışverişini kolaylaştıran ticaret yollarının önemini vurgular [28]. Akdeniz bölgesinde, arkeolojik kanıtlar, bronz kullanımının Bronz Çağı'nda yaygınlaştığını ve bronz eserlerin %8-15 kalay bileşimi sergilediği İber Yarımadası gibi alanlarda önemli gelişmeler kaydedildiğini göstermektedir [29]. Demir Çağı'nda fırın tasarımındaki teknolojik ilerlemeler de alaşımlama süreci üzerinde daha iyi kontrol sağladığı için bronz üretiminin artmasına katkıda bulunmuştur [29].

Dahası, bronz eserlerin mikro yapısal analizi, bu malzemeleri zaman içinde etkileyen korozyon süreçlerine ilişkin içgörüler ortaya koymuştur. Çalışmalar, bronzun korozyonunun genellikle kalayın oksidasyonundan kaynaklandığını ve bunun daha önce oksitlenmiş bakırın yeniden birikmesine yol açabileceğini göstermiştir; bu, arkeolojik bağlamlarda sıklıkla gözlemlenen bir olgudur [30,31]. Korozyona ilişkin bu anlayış, çevresel faktörlerin neden olduğu hasarı azaltmayı amaçlayan koruma stratejilerine bilgi sağladığı için bronz eserlerin korunması açısından hayati önem taşımaktadır [32].

Bakırdan bronz geçiş, daha karmaşık toplumsal yapıların gelişimi ve uzmanlaşmış zanaatların yükselişi de dahil olmak üzere daha geniş toplumsal değişimleri de yansıtır. Bronz alet ve silahların üretimi, tarım ve savaşta ilerlemeleri kolaylaştırarak medeniyetlerin büyümesine katkıda bulunmuştur [33]. Toplumlar daha tabakalı hale

geldikçe, bronz eserlere olan talep artmış, döküm tekniklerinde yeniliklere ve kurşun ve arsenik gibi çeşitli alaşım elementlerinin tanıtılmasına yol açmış ve bu da bronzun özelliklerini daha da artırmıştır [34].

Sonuç olarak, bakırdan bronz evrim, teknolojik, ekonomik ve sosyal boyutları kapsayan çok yönlü bir süreçtir. Geçiş yalnızca malzeme özelliklerini iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda ticaret ve kültürel değişim yoluyla eski medeniyetleri ve etkileşimlerini şekillendirmede kritik bir rol oynamıştır.

2.3. BRONZUN GELİŞİMİ

Bronz Çağı'nda bronzun gelişimi, çeşitli bölgelerdeki toplumları dönüştüren önemli bir teknolojik ilerlemeyi temsil eder. Bu dönüşüm yalnızca yeni malzemelerin keşfinin bir sonucu değildi, aynı zamanda toplumsal yapılar, ticaret ağları ve kültürel alışverişlerle derinlemesine iç içe geçmişti.

Bronz metalurjisinin ortaya çıkışı, bakırın kalay ile alaşımlanmasına kadar uzanıyor ve bu da seleflerinden hem daha güçlü hem de daha dayanıklı bir malzemeyle sonuçlanıyordu. Bu teknolojik yenilik tekdüze değildi; aksine, farklı bölgelerde önemli ölçüde değişiyordu. Örneğin, Güney Kafkasya'da bakır bazlı metalurjinin geri dönüşümü yaygındı ve bu, metal işçileri arasında malzeme özellikleri ve alaşım bileşimleri konusunda gelişmiş bir anlayışa işaret ediyordu [35]. Benzer şekilde, Anadolu'da antimon içeren alaşımların kullanımı, yerel kaynaklardan ve toplulukların sosyal örgütlenmesinden etkilenen metalurji uygulamalarının çeşitliliğini sergiliyor [36]. Anadolu'nun yaylalarında polimetalik kaynakların varlığı, teknoloji ve toplum arasındaki dinamik etkileşimi yansıtan çeşitli alaşımlarla deney yapmayı kolaylaştırdı [36].

Ayrıca, Güney Ege'deki "Minoanlaşma" kavramı, kültürel etkilerin teknolojik uygulamaları nasıl şekillendirdiğini vurgular. Çözgü ağırlıklı tezgah gibi yeni dokuma teknolojilerinin benimsenmesi, Girit maddi kültürünün yayılmasıyla aynı zamana denk geldi ve teknolojik ilerlemelerin genellikle sosyal ve kültürel alışverişlerle nasıl eşlik ettiğini gösterdi [37]. Bu olgu, zanaatkarların bölgeler arasında teknikleri

paylaşmasıyla metalurjik bilgi ve uygulamaların yayılmasında sosyal ağların önemini vurgular [38].

Güneydoğu Asya'da, bronz teknolojisinin kökenleri benzer şekilde sosyal yapılar ve ticaretle bağlantılıdır. Arkeolojik kanıtlar, bakır bazlı teknolojinin yayılmasının sosyal hiyerarşilerin yükselişi ve karmaşık toplumların ortaya çıkışıyla ilişkili olduğunu göstermektedir [39]. Bronz üretimi için gereken gelişmiş metalurjik bilgi, bu topluluklar içinde yüksek düzeyde beceri ve organizasyon olduğunu gösterir ve bu topluluklar muhtemelen malzeme ve fikir alışverişini kolaylaştıran kapsamlı ticaret ağlarına dahil olmuşlardır [40].

Bronz metalurjisindeki teknolojik ilerlemeler savaş ve toplumsal örgütlenme açısından da önemli sonuçlar doğurdu. Oklar gibi bronz silahların üretimi yalnızca malzemenin dayanıklılığını yansıtmakla kalmaz, aynı zamanda toplumlar içindeki çatışma ve güç dinamiklerinin evrimleşen doğasını da gösterir [40]. Bu, Bronz Çağı'nda teknoloji, kültür ve toplumsal yapı arasındaki karmaşık ilişkileri ortaya koyan çeşitli arkeolojik alanlardan elde edilen kanıtlarla daha da desteklenmektedir [41].

Sonuç olarak, Bronz Çağı'nda bronzun gelişimi, teknolojik yenilik, toplumsal örgütlenme ve kültürel değişimden etkilenen çok yönlü bir süreçti. Bu faktörler arasındaki etkileşim, metalurjik bilgi ve uygulamaların yayılmasını kolaylaştırarak farklı bölgelerdeki toplumlarda önemli dönüşümlere yol açtı.

2.4. BRONZUN NİKEL ALÜMİNYUM BRONZUNA (NAB) EVRİMİ

Bronzun nikel alüminyum bronza (NAB) evrimi, özellikle deniz uygulamaları bağlamında, malzeme biliminde önemli bir ilerlemeyi temsil eder. Esas olarak bakır ve kalaydan oluşan geleneksel bronzdan nikel alüminyum bronza geçiş, alaşımın mekanik özelliklerini ve korozyon direncini artıran alüminyum, nikel ve genellikle demirin dahil edilmesini içerir.

Nikel alüminyum bronz, nikel ve demirin eklenmesinin alaşımın performansını iyileştirmede önemli bir rol oynadığı ikili bir bakır-alüminyum sisteminden türetilir.

NAB'nin tipik bileşimi, yaklaşık %9-12 alüminyum, %4-5 nikel ve değişen miktarlarda demir içerir ve bunlar, özellikle deniz ortamlarında yüksek mukavemet ve mükemmel korozyon direnci gibi istenen özelliklerine katkıda bulunur [2,4,12]. Alüminyumun dahil edilmesi yalnızca mukavemeti artırmakla kalmaz, aynı zamanda alaşımın korozyona karşı direncini de artırır ve döküm ve sıcak çalışma özelliklerini iyileştirir [2,42]. Bu, NAB'ı özellikle deniz suyuna ve mekanik strese maruz kalmanın yaygın olduğu deniz pervaneleri, valfleri ve pompa kanatlarındaki uygulamalar için uygun hale getirir [4,11,43].

Nikel alüminyum bronzunun mikro yapısal özellikleri karmaşıktır ve tipik olarak yumuşak, bakır açısından zengin bir α fazı ve sert, martensitik bir β fazı ile birlikte birkaç intermetalik κ fazından oluşan bir dubleks yapı sergiler [12,44]. Bu mikro yapısal özellikler, alaşımın mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilen çözelti tavlama ve söndürme gibi çeşitli termal işlemlerle özelleştirilebilir [45,46]. Mikro yapıyı manipüle etme yeteneği, NAB'nin zorlu uygulamalardaki performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir, çünkü yalnızca mukavemeti ve sünekliği değil aynı zamanda korozyon direncini de etkiler [42,47].

Dahası, NAB'nin korozyon davranışı, mikro yapısı ve deniz suyuna maruz kaldığında koruyucu oksit tabakalarının oluşumundan etkilenir. Bu pasif film, lokalize korozyona karşı bir dereceye kadar koruma sağlar, ancak belirli koşullar altında bozulmaya ve çukurlaşma korozyonuna yol açabilir [1,8]. Alaşımın aşındırıcı ortamlardaki performansı araştırmanın odak noktası olmuştur ve çalışmalar demir ve nikel gibi elementlerin eklenmesinin korozyon yorulma performansını artırabileceğini ve NAB'ı deniz uygulamaları için tercih edilen bir seçenek haline getirebileceğini göstermektedir [4,43,46].

Özetle, geleneksel bronzdan nikel alüminyum bronza doğru evrim, yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve elverişli döküm özelliklerini birleştiren bir malzemeye sonuçlanmıştır. Bu evrim, deniz ortamlarının zorlu koşullarına dayanabilen bileşenlerin geliştirilmesini sağlamış ve böylece bronz alaşımlarının modern mühendislikte uygulanabilirliğini genişletmiştir.

BÖLÜM 3

ALÜMİNYUM BRONZU

3.1. ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4

Alüminyum bronz $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$, alaşım elementleri olarak alüminyum, nikel ve demir içeren bakır bazlı bir alaşımdır. Mükemmel mekanik özellikleri, yüksek korozyon direnci ve iyi aşınma direnci ile bilinir [44,48,49]. $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ 'e benzer olan nikel alüminyum bronz $Cu-9Al-4Fe-4Ni-1Mn$ 'nin mikro yapısal evrimi ve mekanik davranışı, tel ark katkılı imalat (WAAM) yoluyla incelenmiştir [50]. Çalışma, alaşımın mikro yapısının işlem parametrelerini ayarlayarak kontrol edilebileceğini ve ortaya çıkan malzemenin iyi çekme özellikleri sergilediğini bulmuştur. Başka bir çalışma, ısıl işlem döngülerinin tel ark katkılı üretilen nikel alüminyum bronzun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve ısıl işlemin alaşımın mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabileceği bulunmuştur [51].

$CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ alüminyum bronz, tribolojik uygulamalarda $CuSn_{14}$ kalay bronzunun yerine kullanılmıştır [49]. Diğer bakır alaşımlarına kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi korozyon direncine ve daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu bulunmuştur [44]. Toz bronza %5 ağırlık oranında kalay içeren mekanik alaşımlı bakır bazlı granüllerin eklenmesi, standart antifriksiyon kalay ve alüminyum bronzlarına kıyasla üstün mekanik ve triboteknik özelliklere sahip antifriksiyon kompozit malzemelerin üretilmesine olanak sağlamıştır [48].

$CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ alüminyum bronzunun 30CrMnSiA çeliğine karşı tribolojik özellikleri incelendi ve bronzun önceki korozyon işleminin tribolojik performansını iyileştirdiği bulundu [52]. Alüminyum bronz ayrıca mükemmel sürtünme özelliği ve yüksek yük kapasitesi nedeniyle yüksek alaşımlı östenitik çeliğin soğuk şekillendirilmesi için bir

takım malzemesi olarak da araştırıldı [53]. Ancak, alüminyum bronzunun şiddetli aşındırıcı aşınma nedeniyle ağır yük suyla yağlanan itme yataklarının itme yakalarının işlenmesi için uygun olmadığı gözlemlendi[54].

Alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4, tel-ark katkılı imalat ve lazer kaplama gibi çeşitli katkılı imalat süreçlerinde, gelişmiş mekanik özelliklere sahip karmaşık parçalar üretmek için kullanılmıştır [50,51,53]. Tel-ark katkılı imalat yoluyla üretilen nikel alüminyum bronz/paslanmaz çelik hibrit parçaların arayüz karakterizasyonu ve beklentileri araştırılmış ve iki malzeme arasındaki arayüz bağının hibrit parçaların mekanik özelliklerini geliştirmek için optimize edilebileceği bulunmuştur [55].

Özetle, alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4, mükemmel mekanik özelliklere, yüksek korozyon direncine ve iyi aşınma direncine sahip bakır bazlı bir alaşımdır. Katkılı imalat süreçleri yoluyla üretilebilir ve çeşitli tribolojik uygulamalarda kullanılmıştır. Alaşımın mikro yapısı ve mekanik özellikleri, ısıl işlem ve alaşım elementlerinin eklenmesi yoluyla kontrol edilebilir ve geliştirilebilir. Ancak alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ü bir malzeme olarak seçerken, belirli yüksek yük veya aşındırıcı aşınma uygulamaları için uygun olmayabileceğinden, özel uygulama ve çalışma koşullarını dikkate almak önemlidir.

3.2. ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN AŞINMA DAVRANIŞI

Aşınma davranışı, özellikle sürtünme ve temasın söz konusu olduğu uygulamalarda, malzemelerin performansını değerlendirirken önemli bir husustur. Alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4 durumunda, aşınma özelliklerini ve davranışını araştırmak için birkaç çalışma yürütülmüştür. Equey ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [56] alaşım mikro yapısının ve yüzey pürüzlülüğünün bakır bazlı yatak alaşımlarının aşınma ve sürtünme davranışındaki rolü incelenmiştir. Bu çalışma kurşunlu ve kurşunsuz kalay bronzlarına odaklanmış olsa da, bakır bazlı alaşımlarda aşınma davranışını etkileyebilecek faktörlere ilişkin içgörüler sağlar.

Freiße ve arkadaşları [53] lazerle kaplanmış alüminyum bronzunun kuru kayması üzerinde araştırmalar yürütmüştür. Çalışmaları, alüminyum bronz tozunun lazer

kaplamalarının, sınır yağlama koşulları altında plazma transfer ark kaplamalarına kıyasla daha yüksek aşınma direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu, alüminyum bronzunun aşınma davranışının belirli kaplama teknikleriyle iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Chen ve diğerleri [17] bakır gömülü kendi kendini yağlayan yatak malzemelerinin tribolojik özelliklerini inceledi. Alüminyum bronz yatak malzemelerinin aşınma mekanizmasının esas olarak taşlama aşınması, oksidasyon aşınması ve yapışma aşınması olduğunu buldular. Bu, alüminyum bronzun çalışma koşullarına bağlı olarak birden fazla aşınma mekanizması yaşayabileceğini gösterir.

Morales ve diğerleri [10] gaz basıncının termal sprey yoluyla biriktirilen Cu-Al kaplamaların mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı. Bulguları, alüminyum bronzun aşınma davranışının yumuşak ve sert fazlar arasındaki orandan etkilenebileceğini göstermektedir. Daha yüksek bir oran yapışma aşınmasına neden olma eğilimindeyken, daha düşük bir oran aşındırıcı aşınmaya neden olma eğilimindedir.

Paul [57] alüminyum kaplamaların fretting aşınma davranışını inceledi. Bu çalışma, özellikle alüminyum bronzdan ziyade alüminyum kaplamalara odaklanmış olsa da, alüminyum bazlı malzemelerin aşınma davranışına ilişkin içgörüler sağlar.

Ding ve diğerleri [58] alüminyum bronz şaftlar ve çelik yataklar dahil olmak üzere, çalışma koşullarının, yatak sürtünme çiftlerinin sürtünme özellikleri, aşınma davranışları ve sıkışma sınırı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırdı. Bu çalışma, yatak uygulamalarında alüminyum bronzun aşınma davranışına ilişkin içgörüler sağlar.

Daehn & Breslin [59] alüminyum metal bileşenler içeren kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışını ele aldı. Bu çalışma, özellikle alüminyum bronz odaklanmasa da, alüminyum bazlı kompozitlerin aşınma davranışına ilişkin içgörüler sağlar.

Tan ve diğeri [11] önceki korozyon işleminden sonra nikel-alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün 30CrMnSiA çeliğine karşı tribolojik özelliklerini inceledi. Bu çalışma, korozyon varlığında nikel-alüminyum bronzun aşınma davranışına ilişkin içgörüler sağlar.

Kulaklı ve ark. [44] kobalt ve titanyum ilavelerinin nikel içeren alüminyum bronzlarının korozyon ve aşınma direnci üzerindeki etkisini araştırdı. Bulguları, CuAl10Ni5Fe4 alüminyum bronzlarının diğer bakır alaşımlarına kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi korozyon direncine ve daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermektedir.

Miguel ve ark. [60] plazma termal püskürtme ile elde edilen bronz kompozit kaplamaların tribolojik davranışını inceledi. Bulguları, alüminyum bronz kaplamaların yüksek sertlik, mukavemet ve düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve bunları aşınma önleyici kaplamalar olarak endüstriyel uygulamalar için uygun hale getirdiğini göstermektedir.

Genel olarak, alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün aşınma davranışı, alaşım mikro yapısı, yüzey pürüzlülüğü, kaplama teknikleri, çalışma koşulları, korozyon ve diğer elementlerin varlığı gibi faktörlerden etkilenebilir. Bu faktörleri anlamak, alüminyum bronzunun çeşitli uygulamalarda aşınma performansını optimize etmek için çok önemlidir.

3.3. ALÜMİNYUM BRONZ CUAL10NI5FE4'ÜN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4, üstün mekanik özellikleri ve çeşitli çevresel faktörlere karşı direnci nedeniyle yaygın olarak kullanılan bakır bazlı bir alaşımdır. Deniz ortamlarında yüksek mukavemeti, oksidasyon ve korozyon direnci, aşınma direnci, kavitasyon direnci ve darbe direnci ile bilinir [14,15]. CuAl10Ni5Fe4 dahil olmak üzere alüminyum bronzları, yüksek mekanik mukavemet ve aşınma direncinin gerekli olduğu denizcilik, petrol ve gaz ve havacılık gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılır [14].

Alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün mekanik özellikleri, alaşımın bileşimi ve kullanılan üretim yöntemleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Nikel, demir ve alüminyum gibi alaşım elementlerinin eklenmesi, sertlik ve mukavemet dahil olmak üzere alüminyum bronzunun mekanik özelliklerini artırabilir [61]. Alüminyum bronzunun mikro yapısı da mekanik özelliklerini etkileyebilir ve bu mikro yapı, kullanılan üretim yöntemlerine ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişebilir [62].

Isıl işlem süreçleri alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün mekanik özellikleri üzerinde etkili olabilir. Farklı ısıl işlem süreçleri alaşımın mikro yapısında ve tribolojik özelliklerinde değişikliklere yol açabilir [63]. Ek olarak, kobalt ve titanyum gibi belirli elementlerin eklenmesi alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün korozyon ve aşınma direncini iyileştirebilir [44].

Sürtünme ve aşınma özellikleri de dahil olmak üzere tribolojik özellikler alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4 için önemli hususlardır. Çalışmalar alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün iyi tribolojik özellikler sergilediğini ve bu sayede yatak yatakları ve tribolojik bileşenler gibi uygulamalar için uygun hale geldiğini göstermiştir [49]. Ancak, alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün kuru kayma koşulları altında aşınmaya maruz kalabileceğini belirtmekte fayda vardır [64].

Özetle, alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4 üstün mekanik özelliklere, oksidasyon ve korozyon direncine, aşınma direncine, kavitasyon direncine ve darbe direncine sahip bakır bazlı bir alaşımdır. Alüminyum bronz CuAl10Ni5Fe4'ün mekanik özellikleri, kompozisyon, mikro yapı, üretim yöntemleri ve ısıl işlem süreçleri gibi faktörlerden etkilenebilir. Genellikle yüksek mekanik mukavemet ve aşınma direncine sahip malzemeler gerektiren endüstrilerde kullanılır.

3.4. CUAL10NI5FE4'ÜN İNTERMETALİK ÖZELLİKLERİ VE MİKRO YAPISI

CuAl10Ni5Fe4, mikro yapısı, özellikleri ve uygulamaları için kapsamlı bir şekilde incelenen bir nikel alüminyum bronz alaşımıdır [44,48,62,63,65]. Alaşım, yüksek sıcaklıklarda iyi korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci ile bilinir ve bu da onu

korozyon ve aşınmaya karşı direncin önemli olduğu uygulamalar için arzu edilen bir malzeme haline getirir [44].

CuAl10Ni5Fe4'ün mikro yapısı, kullanılan ısıtım süreçlerine ve döküm yöntemlerine bağlı olarak değişebilir [62,63]. Yaseen ve diğerleri, farklı ısıtım süreçlerinin CuAl10Ni5Fe4'ün tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı ve ısıtım sürecinin alaşımın tribolojik özellikleri üzerinde bir etkisi olduğunu buldu [63]. Rögner, mikro dökümle üretilen CuAl10Ni5Fe4'ten yapılmış mikro çekme numunelerinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini inceledi ve nominal olarak benzer ısıtım parametreleriyle bile mikro yapıda önemli değişiklikler gözlemledi[62].

Mekanik ve fiziksel özellikler açısından, CuAl10Ni5Fe4'ün uygun akış gerilimi ve mekanik özellikler sergilediği bulunmuştur [65]. Bu özellikler, CuAl10Ni5Fe4'ten yapılmış bileşenleri tasarlarken dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Ayrıca, CuAl10Ni5Fe4, mekanik ve triboteknik özellikleri açısından diğer bronz alaşımlarıyla karşılaştırılmıştır [48]. Smirnov ve Shalunov, %5 ağırlık oranında kalay içeren toz bronzla mekanik olarak alaşımlanmış bakır bazlı granüllerin eklenmesini araştırmış ve CuAl10Ni5Fe4 içeren ortaya çıkan kompozit malzemenin, standart antifriksiyon kalay ve alüminyum bronzlarına kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmiş mekanik ve triboteknik özellikler sergilediğini bulmuştur [48].

Özetle, CuAl10Ni5Fe4, mikro yapısı, mekanik özellikleri, korozyon direnci ve aşınma direnci açısından kapsamlı bir şekilde incelenen bir nikel alüminyum bronz alaşımıdır. Alaşımın özellikleri, ısıtım süreçleri ve döküm yöntemlerinden etkilenebilir. İyi tribolojik özelliklere sahip olduğu ve korozyon ve aşınmaya karşı direnç gerektiren uygulamalar için arzu edilen bir malzeme olduğu bulunmuştur. Ek olarak, CuAl10Ni5Fe4'ün belirli kompozit malzemelerde iyileştirilmiş mekanik ve triboteknik özellikler sergilediği gösterilmiştir [44,48,62,63,65].

3.5. CUAL10NI5FE4'ÜN KİMYASAL BİLEŞİMİ

CuAl10Ni5Fe4, bakır (Cu), alüminyum (Al), nikel (Ni) ve demirden (Fe) oluşan bir kompozit malzemedir. CuAl10Ni5Fe4'ün kimyasal bileşimi, çeşitli uygulamalar için

belirli mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Üretim açısından, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ farklı yöntemlerle üretilebilir. Straub ve ark. [66] tarafından yapılan bir çalışmada, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ numunelerinin doğrudan son şekle mikro kalıplandığı belirtilirken, Rögner ve ark. [62] tarafından yapılan başka bir çalışmada, mikro döküm yoluyla $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ 'ten yapılmış mikro çekme numunelerinin üretimi tartışılmıştır. Bu üretim süreçleri, işlem parametrelerine ve kimyasal bileşim toleranslarına bağlı olarak ince taneli veya iri taneli yapılar olasılığı ile malzemenin mikro yapısında değişikliklere neden olabilir. $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ 'e belirli elementlerin eklenmesi de özelliklerini etkileyebilir. Örneğin, kobalt (Co) ve titanyum (Ti) dahil edilmesinin, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ alaşımının tane boyutunu azaltmada ve mekanik özelliklerini, korozyon direncini ve aşınma direncini iyileştirmede oldukça etkili olduğu bulunmuştur [44]. Bu, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ 'ün kimyasal bileşiminin, istenen uygulamaya göre belirli özellikleri geliştirmek için değiştirilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ kompozit birikintilerindeki kalıntı gerilmeler araştırılmıştır [67]. Çalışma, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ kompozit birikintisinin yüksek kalıntı gerilmeler sergilediğini ve Cu matrisinde maksimum çekme kalıntı gerilmesinin 651 MPa'ya ulaştığını bulmuştur. Bu bilgi, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ bileşiminin malzemenin kalıntı gerilme davranışını etkileyebileceğini göstermektedir. Performans açısından, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$, sürtünme önleyici kompozit malzemelerin geliştirilmesinde kullanılmıştır [48]. $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ toz bronzuna mekanik alaşımlı bakır bazlı granüllerin eklenmesi, standart antifriksiyon kalay ve alüminyum bronzlarına kıyasla iyileştirilmiş mekanik ve triboteknik özelliklerle sonuçlandı. Bu, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ 'ün mekanik ve tribolojik özellikler açısından gelişmiş performans sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Özetle, $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$, bakır, alüminyum, nikel ve demirin belirli bir kimyasal bileşimine sahip kompozit bir malzemedir. Üretim süreci, mikro yapıda değişikliklere neden olabilen mikro kalıplama veya mikro döküm içerebilir. Kobalt ve titanyum gibi elementlerin eklenmesi, mekanik özelliklerini, korozyon direncini ve aşınma direncini iyileştirebilir. $CuAl_{10}Ni_5Fe_4$ ayrıca belirli kompozit tortularda yüksek kalıntı gerilmeler sergiler. Ek olarak, iyileştirilmiş mekanik ve triboteknik özelliklere sahip antifriksiyon kompozit malzemelerin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

3.6. BERİLYUM

Berilyum, sertlik, korozyon direnci ve iletkenlik gibi benzersiz nitelikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan hafif bir metaldir [68]. Ancak, berilyuma maruz kalma, duyarlılık ve kronik berilyum hastalığı (CBD) gelişimi dahil olmak üzere olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir [69]. Kronik berilyum hastalığı, berilyuma karşı hücre aracılı bir bağışıklık tepkisi ile karakterize edilen mesleki bir akciğer hastalığıdır [69].

Epidemiyolojik çalışmalar, berilyuma mesleki maruziyet ile kanser riski arasındaki ilişkiyi araştırmak için yürütülmüştür. Bu çalışmaların sistematik bir incelemesi, berilyuma maruz kalan işçiler arasında akciğer kanseri riskinin arttığına dair kanıtlar bulmuştur [70]. Ancak, berilyum maruziyeti ile kanserojenlik arasındaki ilişki bilim camiasında hala tartışılmaktadır ve daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır [71].

Amerika Birleşik Devletleri'nde berilyuma maruz kalan işçi sayısının 134.000 kadar yüksek olduğu tahmin ediliyor ve nükleer silah geri kazanım sahalarındaki inşaat işçileri özellikle risk altında [72]. Berilyuma mesleki maruziyet, seramik, imalat ve nükleer tesisler dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde meydana gelebilir [73]. İşçileri maruziyetten korumak için İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi (OSHA), imalat tesislerinden ve yakma tesislerinden havaya salınan berilyumu düzenler [74].

Tıbbi gözetim, berilyum duyarlılığını ve hastalığını belirlemede önemli bir rol oynar. Berilyum kan lenfosit çoğalma testinin (BeLPT) tıbbi gözetimde kullanılmasının, düşük maruziyet seviyelerinde berilyum duyarlılığını etkili bir şekilde belirlediği ve daha fazla müdahaleye ihtiyaç olup olmadığını belirlemeye yardımcı olabileceği gösterilmiştir [75]. Berilyuma duyarlılık, berilyum doğada her yerde bulunduğu ve yaygın malzemelerde bulunduğu için mesleki olarak maruz kalmayan kişilerde de meydana gelebilir [76].

Berilyum duyarlılığından kronik berilyum hastalığına doğru ilerleme iyi anlaşılmamıştır, ancak berilyum duyarlılığı olan bireylerin yaklaşık %50'sinde ilk klinik değerlendirmeleri sırasında kronik berilyum hastalığı vardır [77]. İlerleme oranı,

biyelsel faktörlere ve berilyum maruziyetinin düzeyine bağlı olarak değişebilir. Tanı açısından, berilyum lenfosit proliferasyon testi (BeLPT) genellikle mesleki duyarlılığı ve hastalığı değerlendirmek için kullanılır [78]. Diğer tanı yöntemleri arasında akciğer fonksiyonunun değerlendirilmesi ve akciğer tutulumunun değerlendirilmesi için görüntüleme çalışmalarının yapılması yer alır [79]. Kronik berilyum hastalığını, tedavi ve yönetim yaklaşımları farklı olabileceğinden, sarkoidoz gibi diğer rahatsızlıklardan ayırmak önemlidir [80].

Sonuç olarak, berilyum maruziyeti, duyarlılaşma ve kronik berilyum hastalığının gelişimi de dahil olmak üzere olumsuz sağlık etkilerine yol açabilir. Berilyuma mesleki maruziyet çeşitli endüstrilerde bir endişe kaynağıdır ve tıbbi gözetim berilyum duyarlılığını ve hastalığını belirlemede ve yönetmede önemli bir rol oynar. Berilyum maruziyeti ile kanser riski arasındaki korelasyonu ve duyarlılıktan kronik berilyum hastalığına ilerlemeyi daha iyi anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

3.7. BERİLYUM ELEMENTİNİN ETKİSİ

Berilyum elementinin alüminyum bronzlarının mikro yapıları üzerindeki etkileri çeşitli araştırma makalelerinde incelenmiştir. Berilyumun, mekanik özellikleri, korozyon davranışı, tribolojik özellikleri ve mikro yapısı dahil olmak üzere alüminyum bronzlarının yapısı ve özellikleri üzerinde bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bir alışma, alkali bir ortamda alüminyum bronz alaşımının korozyon davranışını incelemiş ve kondenser suyunun pH değişiminin ve alüminyum bronz alaşımının korozyon davranışının amino bazlı katkı maddelerinin varlığından etkilendiğini bulmuştur of aluminum bronze alloy were influenced by the presence of amino-based additives [61]. Başka bir çalışma, nikel-alüminyum-bronz/Al₂O₃ yüzey nano kompozitlerinin korozyon davranışını incelemiş ve nano boyutlu Al₂O₃ eklenmesinin alaşımın mikro yapısını, sertliğini ve korozyon direncini iyileştirdiğini bulmuştur [81]. Bu alışmalar, berilyum gibi belirli elementlerin eklenmesinin alüminyum bronzlarının korozyon davranışını etkileyebileceğini düşündürmektedir. Alüminyum bronzlarının mikro yapısı da berilyumun varlığından etkilenebilir. Bir çalışmada, termal ve termo akustik işlemden sonra berilyum bronzunun faz bileşimi, yapısı ve özellikleri incelenmiş ve işlem koşullarının alaşımın mukavemetini ve elastikiyetini

artırabileceği bulunmuştur [82]. Başka bir çalışmada, 20CrNiMo/berilyum bronz tribolojik çiftlerinin tribolojik davranışı incelenmiş ve malzemenin mikro/nano yapı işlenmesinin tribolojik özelliklerini optimize edebileceği bulunmuştur [83]. Bu çalışmalar, alüminyum bronzlarının mikro yapısının ve özelliklerinin berilyum eklenmesi ve çeşitli işlem süreçleri yoluyla değiştirilebileceğini göstermektedir. Dahası, berilyumun varlığı alüminyum bronzlarının mekanik özelliklerini etkileyebilir. Bir çalışmada, QB2.0 ve C17200 alaşımlarının mekanik özellikleri ve mikro yapıları karşılaştırılmış ve yaşlanma sıcaklığının alaşımların mekanik özelliklerini etkileyebileceği bulunmuştur [84]. Başka bir çalışmada, arayüz mukavemetinin Be/2024Al kompozitlerinin mekanik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş ve arayüz mukavemetinin kompozitlerin mekanik davranışını etkilediği bulunmuştur [85]. Bu çalışmalar, berilyum ilavesinin alüminyum bronzlarının mekanik özellikleri üzerinde bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Özetle, alüminyum bronzlarına berilyum ilavesinin mikro yapıları üzerinde çeşitli etkileri olabilir. Alaşımların korozyon davranışını, tribolojik özelliklerini ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. Alüminyum bronzlarının mikro yapısı ve özellikleri, berilyum ilavesi ve çeşitli işlem süreçleri yoluyla değiştirilebilir. Bu bulgular, berilyumun alüminyum bronzlarının mikro yapıları üzerindeki etkilerine ilişkin içgörüler sağlar.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, berilyum ilavesinin nikel alüminyum bronzunun mikro yapısı, sertliği ve aşınma direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, %0,2 berilyum ilaveli $CuAl_{10}Ni_5Fe_3$ alaşımı kalıcı kalıp döküm yöntemi ile hazırlanmıştır. Mikro yapı incelemeleri yapılmış ve sertlik ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. MALZEMELERİN ÜRETİMİ

Numunelerin üretimi için döküm çalışmaları Sağlam Metal Sanayi ve Ticaret Ar-Ge Merkezi'nde gerçekleştirildi. Döküm işlemlerinde hammadde olarak kullanılmak üzere nikel alüminyum bronz külçesi üretim koşulları altında önceden hazırlandı. Üretim koşulları altında üretilen külçeler hammadde olarak kullanıldı ve deneylerde kullanılacak malzemeler laboratuvar koşullarında üretildi. Döküm numunelerinde kullanılan külçe, saf bakır hurdası, saf alüminyum, demir ve nikel kullanılarak yerçekimi kalıp döküm yöntemi ile üretildi. Ergitme işlemi 300 kg kapasiteli bir indüksiyon ocağında gerçekleştirildi. Ergitme ve döküm işlemlerinin görselleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



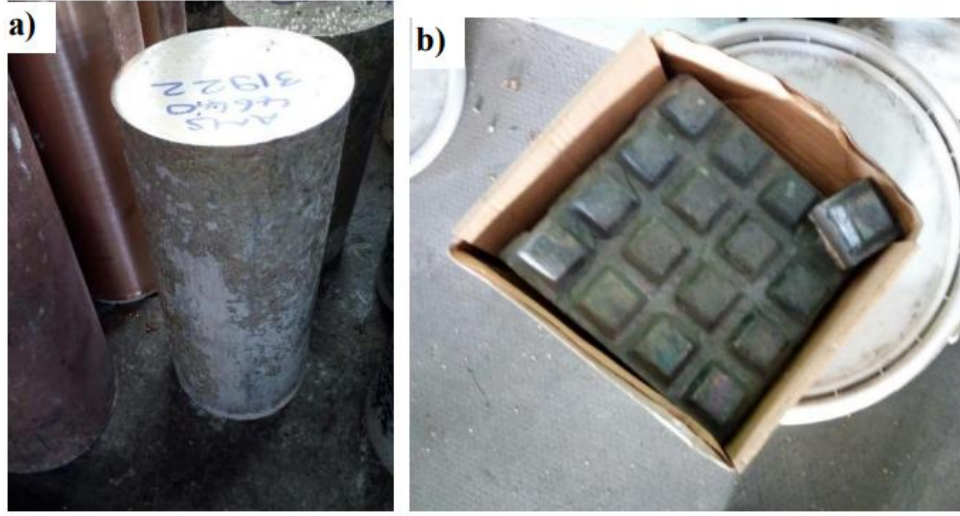
Şekil 4. 1. Döküm işlemlerinde kullanılacak külçelerin hazırlanması: a) Ergitme işlemi, b) Döküm işlemi.

Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin dökümleri laboratuvar koşullarında ve açık atmosferde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar Sağlam Metal Ar-Ge merkezi döküm laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi için 10 kg kapasiteli 5M marka orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Döküm çalışmalarında kullanılan ocağın görseli Şekil 4.2'de verilmiştir.



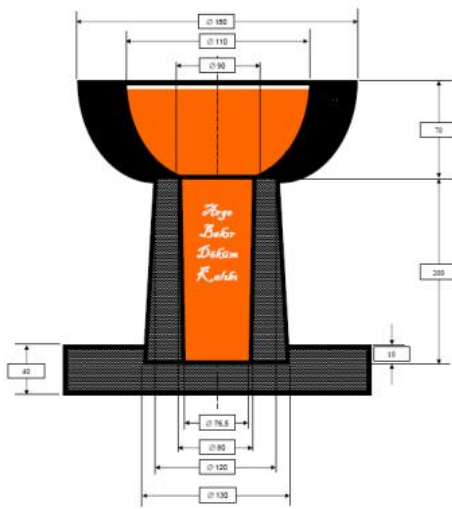
Şekil 4. 2. Döküm işlerinde kullanılan 10 kg kapasiteli orta frekanslı indüksiyon ocağı.

Eritme işlemi için daha önce üretilmiş nikel alüminyum bronz külçesi kesildi ve kullanıldı. Sıvı metalde oksijensizleştirme için CuLi ön alaşımı kullanıldı ve berilyum ilavesi için %30 bakır berilyum ön alaşımı kullanıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılan külçe ve ön alaşımın fotoğrafları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Döküm işlerinde kullanılan hammaddeler a) Önceden hazırlanmış nikel alüminyum bronz külçe b) Bakır berilyum ön alaşımı.

Nikel alüminyum bronz eritildikten sonra, gaz giderme için bakır lityum ön alaşımı kullanıldı. Biri berilyum içermeyen ve biri %0,20 berilyum içeren iki farklı şarj hazırlandı ve %30 bakır berilyum ön alaşımı eritmenin son aşamasında sıvı metale eklendi ve döküm başladı. Dökümler 1230°C'de gerçekleştirildi. Şekil 4.4'te tasarımı ve fotoğrafı verilen kalıcı bir kalıp döküm işinde kullanıldı.



Şekil 4. 4. Döküm işlerinde kullanılan yerçekimi kalıbı

4.2. XRF

Endüstriyel bağlamda döküm amaçlı özel olarak üretilen külçenin kimyasal bileşimi, döküm tesisinde Oxford marka optik emisyon spektrometresi kullanılarak değerlendirildi.

4.3. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Sentezlenen CuAl10Ni5Fe4 ve $\text{CuAl10Ni5Fe4-0.2\% Ti}$ alaşımlarının yüzey görüntüleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM-Metalografi Laboratuvarı'nda Nikon ters metalurjik optik mikroskobu kullanılarak alındı. Mikro yapı yüzey görüntülemesi için 10 mm kalınlığındaki numuneler kesildi. Kesilen numuneler epoksi kalıplara yerleştirildi ve yüzeyleri 320 ila 2500 grit arasında değişen zımpara kağıtları ile parlatıldı. Zımparalanan yüzeyler daha sonra 3 μm saf sulu alümina çözeltisi kullanan bir parlatma keçesi kullanılarak parlatıldı. Aşındırma yönteminde 5 g FeCl_3 , 50 ml HCl ve 100 ml damıtılmış sudan oluşan bir pikral aşındırıcı kullanıldı.

4.4. SERTLİK TESTİ

Sentezlenen CuAl10Ni5Fe4 ve $\text{CuAl10Ni5Fe4-0,2\% Be}$ alaşımlarının sertlik ölçümleri Numunelerin sertliği, bir Brinell sertlik test cihazında 187,5 N yük ve 2,5 mm çapında bir bilye kullanılarak değerlendirildi. Ölçüm için 10 mm kalınlığında numuneler üretildi. Hazırlanan her numunede sertlik testleri beş kez gerçekleştirildi ve ortalama Brinell sertlik değerleri, girintilerin çapları ölçülerek belirlendi. Şekil 4.5, Brinell sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinden örnek bir resim sunmaktadır.



Şekil 4. 5. Brinell sertlik ölçüm prosedürü.

4.5. AŞINMA TESTİ

Tribolojik nitelikleri belirlemek için aşınma ve sürtünme karakteristikleri analiz edildi. Aşındırılacak yüzeyler 1200 µm tane büyüklüğüne kadar zımpara kağıdı ile parlatıldı. Etanol ile temizlenen numunelerin ağırlıkları daha sonra 0,1 mg hassasiyetli bir Precisa terazisi kullanılarak ölçüldü. Aşınma çalışmaları kuru koşullar altında ileri geri hareket eden bir aşınma test ünitesi ile gerçekleştirildi (Şekil 4.6). Uygulanan kuvvet 30 N, kayma hızı 0,1 m/s ve kümülatif kayma mesafesi 1000 m idi. Aşındırıcı uç malzemesi olarak AISI 52100 sınıfı yüksek sertlikte çelik bilye kullanıldı. Aşınma kalıntılarını ortadan kaldırmak için numune yüzeyi rutin olarak 200 metre aralıklarla etanol ile yıkandı. Etanol ile temizlenen numunelerin ağırlık ölçümleri hassas teraziler kullanılarak yapıldı ve ardından tekrar aşınma testine tabi tutuldu. Mesafeye karşılık gelen ağırlık kayıpları, aşınma öncesi değerden aşınma sonrası değer çıkarılmasıyla belirlendi. Kütle kaybı verileri, denklem (1) kullanılarak belirli bir aşınma oranına dönüştürüldü.

$$\text{Spesifik Aşınma Oranı} \left(\frac{\text{g}}{\text{Nm}} \right) = \frac{\text{Aşınma Ağırlık Kaybı (g)}}{\text{Uygulanan Yük (N)} \times \text{Kayma Mesafesi (m)}} \quad (1)$$

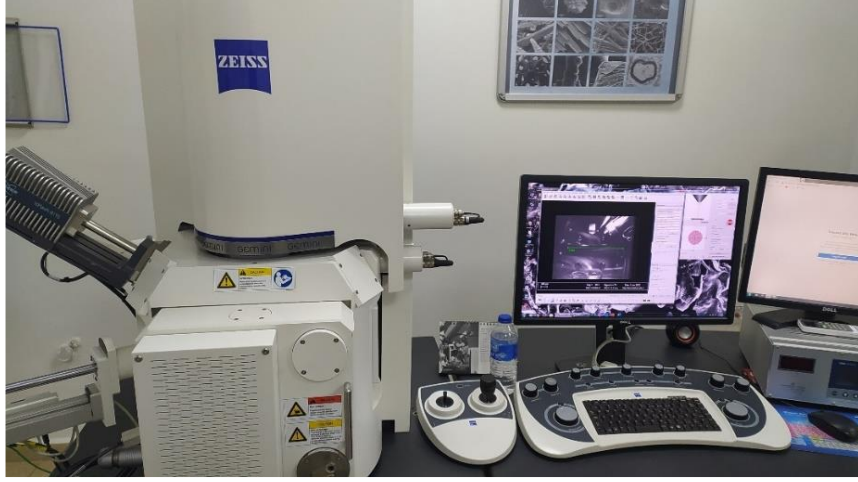
Sürtünme katsayısı, Coulomb'un sürtünme yasasına uygun olarak aşağıda gösterilen denklem (2) kullanılarak belirlendi. Denklemde, F_S sürtünme kuvvetini, F_N test yükünü ve μ sürtünme katsayısını ifade eder.

$$\mu = \frac{F_S}{F_N} \quad (2)$$

Sürtünme kuvveti, aşınma süreci sırasında tribometre koluna bir yük hücresi takılarak ölçüldü ve veriler daha sonra bilgisayara kaydedildi. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılan mikro yüzey incelemeleri, Karabük Üniversitesi Demir ve Çelik Enstitüsü'ndeki MARGEM-Metalografi Laboratuvarı'nda Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM kullanılarak gerçekleştirildi. Korozyon sonrası oksit tabakalarını daha ayrıntılı olarak analiz etmek için $CuAl10Ni5Fe4$ ve $CuAl10Ni5Fe4-0,2\% Be$ alaşımları üzerinde taramalı elektron mikroskobu deneyleri gerçekleştirildi. Şekil 4.7, SEM incelemeleri için kullanılan taramalı elektron mikroskobunun düzenini göstermektedir.



Şekil 4. 6. İleri-Geri Aşınma Testi



Şekil 4. 7. Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) konfigürasyonu.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 XRF SONUÇLARI

Bu çalışmada hammadde olarak kullanılan külçenin ve üretilen alaşımın kimyasal analizleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5. 1. Çalışmalarda hammadde olarak kullanılan külçenin kimyasal analizi (% ağırlık).

Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Si
80,85	10	4,92	3,53	0,665	0,0924

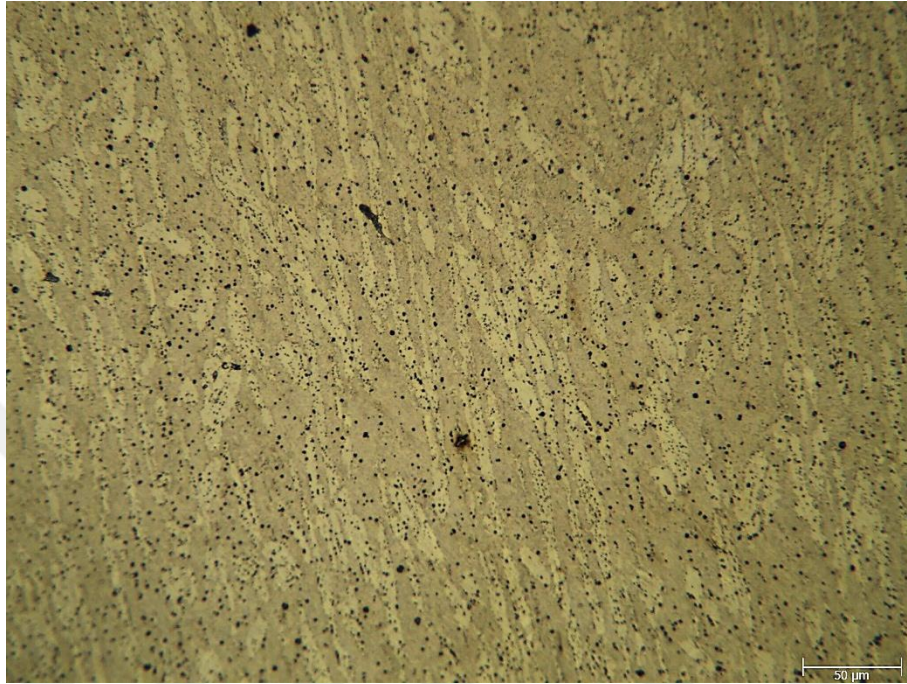
Çizelge 5. 2.Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri.

Sample	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Si
CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄ -0,2 Be	73,13	9,42	4,47	3,48	0,683	0,19

5.2. MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU SONUÇLARI

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2, CuAl₁₀Ni₅Fe₄ ve CuAl₁₀Ni₅Fe₄-0.2 Be örneklerinin 20x ve 50x büyütmeli optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. CuAl₁₀Ni₅Fe₄ alaşımının ve %0,2 Be ilaveli CuAl₁₀Ni₅Fe₄ alaşımının mikro yapı görüntülerine bakıldığında, Be ilavesiyle faz miktarlarında bir artış olduğu görülebilir. Alaşımın mikro yapısı genellikle üç ana bileşenden oluşur: bakır açısından zengin bir katı çözelti olan α fazı, belirgin bir metalik bileşik olan κ fazı ve taneler arasında koyu lekeler olarak görülen β fazı [6]. Mikro yapılardaki görünür beyaz alanlar bakır açısından zengin α fazı olarak adlandırılırken, taneler arasındaki siyah boşluklar artık β fazı olarak adlandırılır. κ fazı, çok az çözeltiye sahip yapılar olarak bulunmuştur. Alfa granülleri, metalik kompleksler içeriyordu.

Although the β phase did not show any noticeable alteration when beryllium was added, a concentrated distribution of needle-like structures was detected in the soft α phase. Additionally, the κ phase was dispersed in proportion to the α phase.

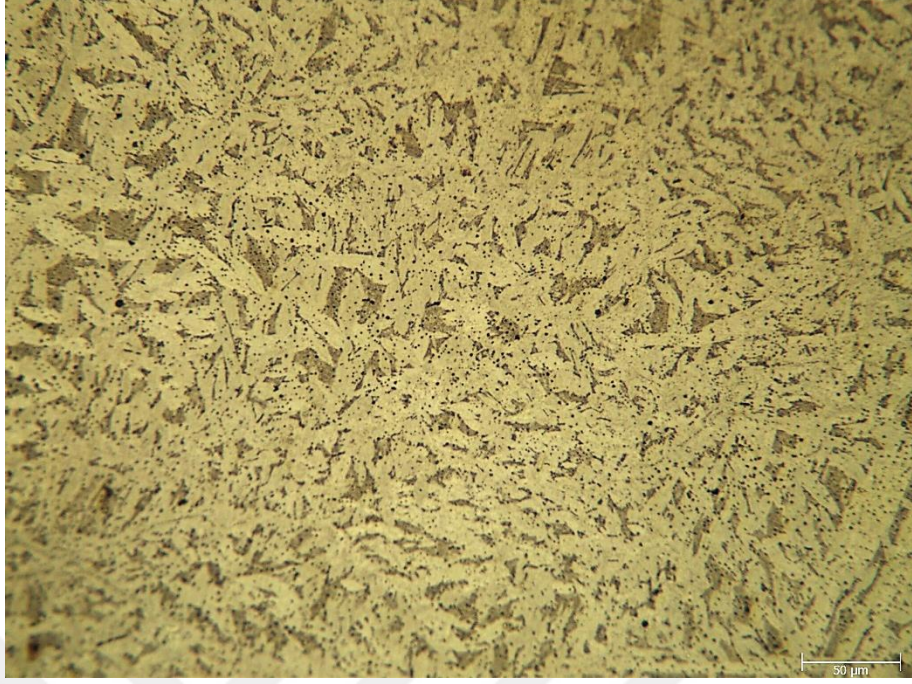


(a)

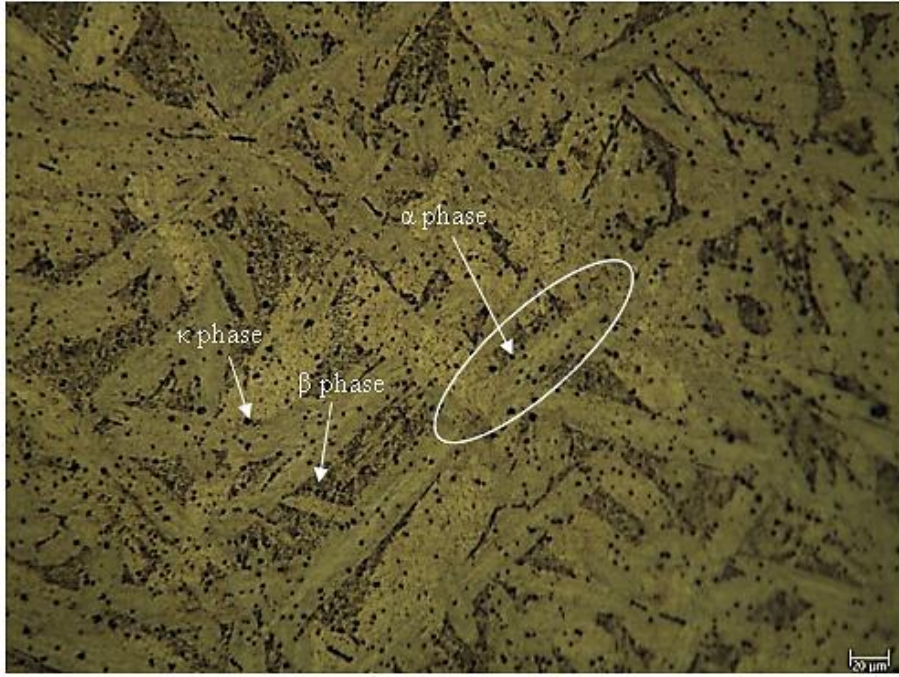


(b)

Şekil 5. 1. (a) İşlenmiş CuAl10Ni5Fe4 numunesinin 20X ve (b) 50X mikro yapı görüntüleri.



(a)

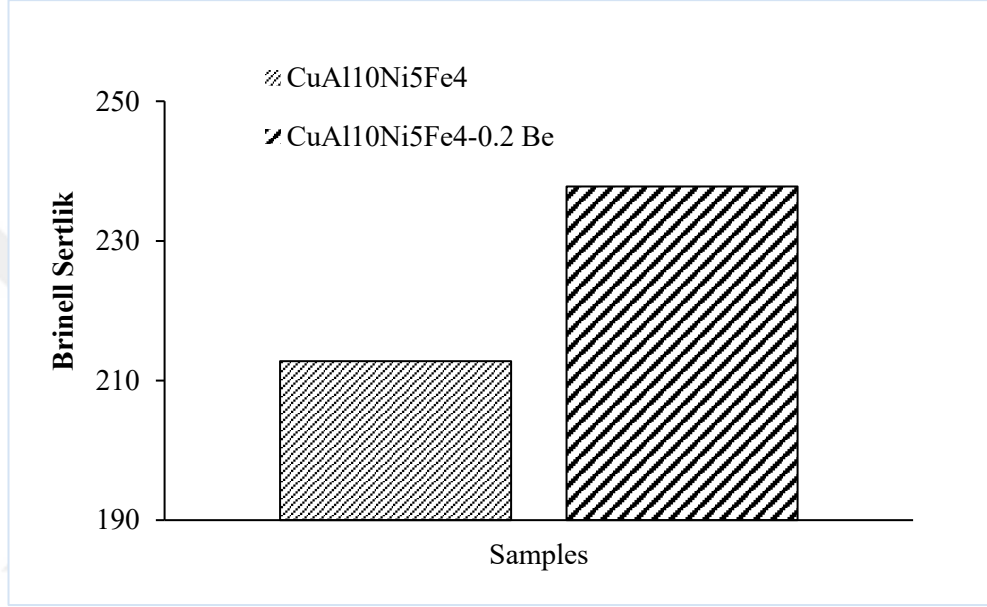


(b)

Şekil 5. 2. (a) İşlenmiş CuAl10Ni5Fe4-0.2 Be numunesinin 20X ve (b) 50X mikro yapı görüntüleri.

5.3. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI

Şekil 5.3'te CuAl10Ni5Fe4 ve CuAl10Ni5Fe4-0.2 Be numunelerinin Brinell sertlik değerleri verilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere %0 Be numunesinin ortalama sertlik değeri 212,77 HB iken, %0,2 Be ilavesiyle bu değer 237,79 HB'ye çıkmıştır.

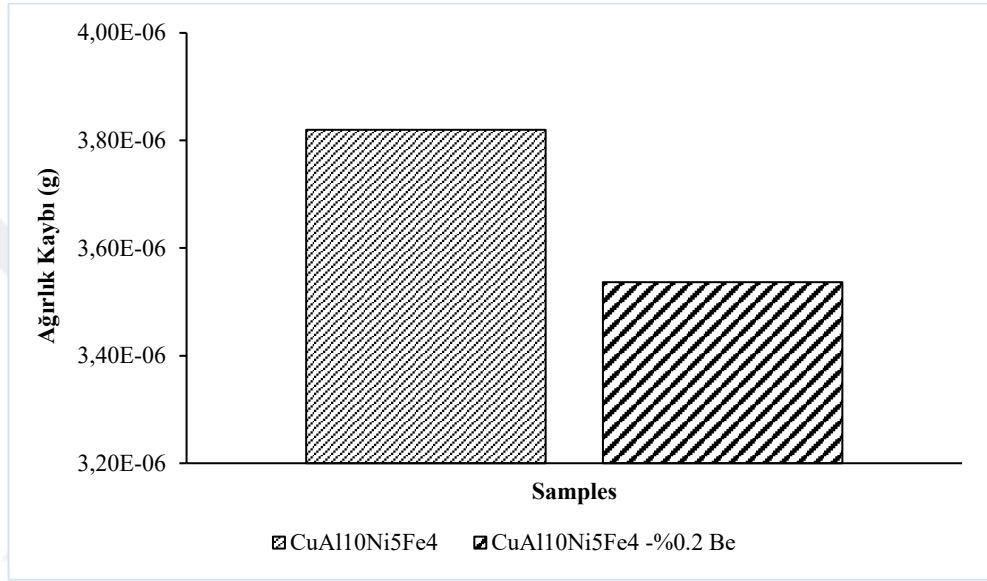


Şekil 5. 3. Numunelerin sertlik ölçüm sonucu

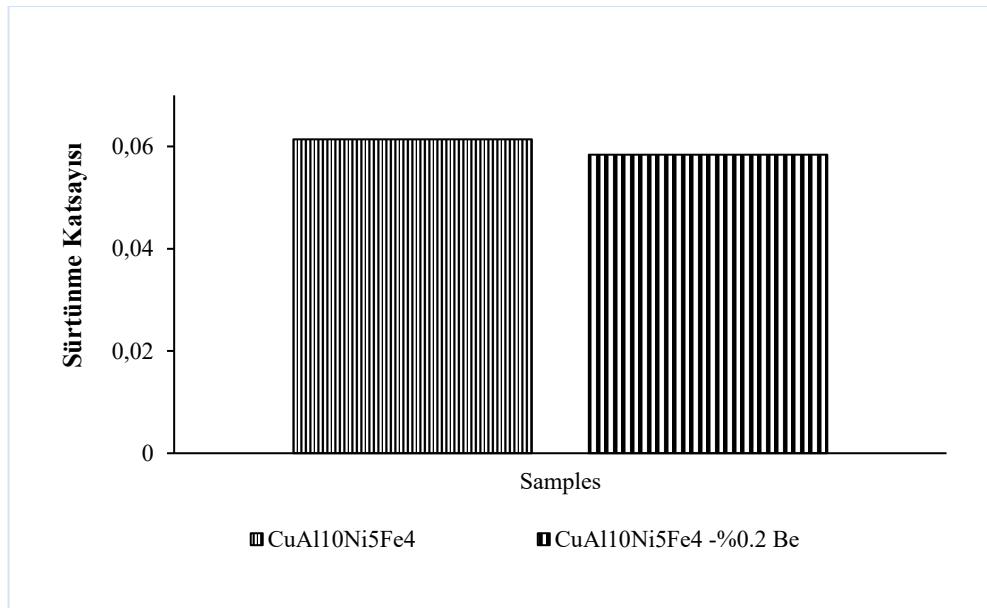
5.4. AŞINMA TEST SONUÇLARI

Şekil 5.4 kayma mesafesine bağlı olarak ağırlık kaybı grafiğini, Şekil 5.5 ise aşınma süreci boyunca kaydedilen sürtünme katsayılarının grafiğini göstermektedir. Aşınma direnci berilyum ilavesiyle artmıştır. Aşınma sonuçları sertlik sonuçlarını desteklemektedir ve sonuçlarda paralellik vardır. %0,2 berilyum ilaveli alaşımın 10000 metreden sonra en az ağırlık kaybını sağlayan en iyi malzeme olduğu belirlenmiştir. Bu malzemenin 10000 metreden sonraki ağırlık kaybı $3,54 \times 10^{-6}$ g'dır. Bu sonuçlara göre aşınma esnasında sürtünme katsayılarının paralel olduğu ve en düşük değere sahip malzemenin 0,0584 değeriyle CuAl10Ni5Fe4- 0,20%Be olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısındaki sürekli artış aşınma özelliklerine ve temas yüzeylerinin durumuna bağlanabilir. Basitçe söylemek gerekirse, alaşımların yüzeylerinde aşınma meydana geldiğinde sıyrılan parçacıkların bir kısmı tekrar

birikebilir. Bu birikim daha sonra kayma sırasında harekete karşı direnç üretir. Sürtünme katsayısındaki artış, aşınma süreci boyunca yaşanan deformasyona ve yapıştırıcı bağın artan mukavemetine atfedilebilir. Ayrıca CuAl10Ni5Fe4 'ün sertliğinde bir azalma ve bunun sonucunda aşınma izinin genişliğinde önemli bir artış olduğu gözlemlendi. Aşınmaya maruz kalan yüzeyler arasındaki temas alanının artırılması, sürtünme katsayısında buna karşılık gelen bir artışa yol açtı.



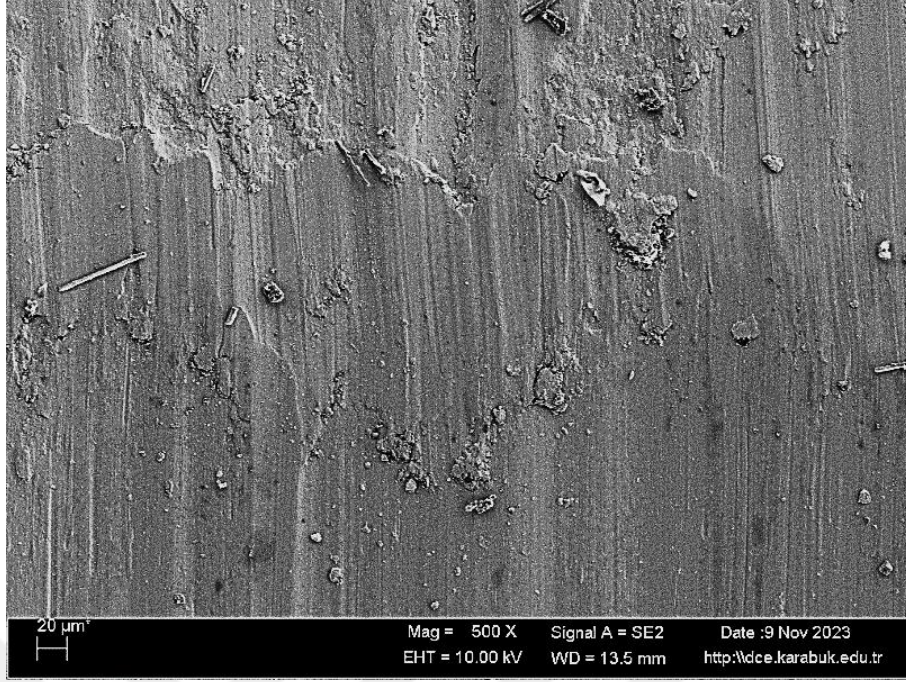
Şekil 5. 4. CuAl10Ni5Fe4 ve $\text{CuAl10Ni5Fe4-0.20\%Be}$ 'nin aşınma sonrası ağırlık kaybı grafiği.



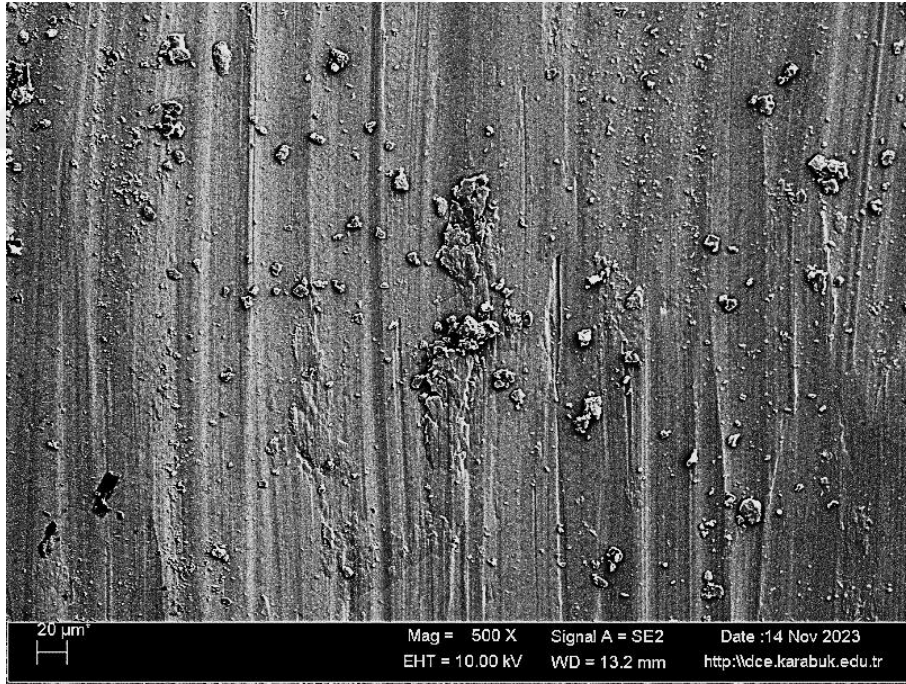
Şekil 5. 5. CuAl10Ni5Fe4 ve $\text{CuAl10Ni5Fe4-0.20\%Be}$ 'nin sürtünme katsayısı grafiği.

CuAl10Ni5Fe4 ve CuAl10Ni5Fe4- 0.20%Be'nin aşınma mekanizması SEM görüntüleri Şekil 5.6'da verilmiştir. SEM görüntüleri, görülen baskın aşınma mekanizmalarının aşındırıcı ve yapışkan aşınma tipleri olduğunu ortaya koymaktadır. Berilyum kullanımının CuAl10Ni5Fe4'e kıyasla aşınma izlerinin derinliğini ve sıklığını azalttığı belirlenmiştir. Aşınma mikrograflarına dayanarak, aşınma izi etrafında plastik deformasyondan kaynaklanan tortuların olduğu açıktır. Bu tortular aşındırıcı aşınma nedeniyle keskin hatlı kazıma şeklini alır. Ayrıca, aşındırıcı yüzey ile matris arasındaki yapışkan bağlantıların, önemli derecede deforme olma ve yük taşıma kabiliyetleri nedeniyle deney sırasında kırıldığı ve malzeme yüzeyine yapıştığı belirlenmiştir.





(a)



(b)

Şekil 5. 6. (a) CuAl10Ni5Fe4 (500X) ve (b) CuAl10Ni5Fe4-0,2% Be (500X) aşınma mekanizması görüntüleri.

BÖLÜM 6

GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, yerçekimi kalıp döküm yöntemi ile üretilen CuAl10Ni5Fe4 ve CuAl10Ni5Fe4-0.2% Be (berilyum) alaşımlarının faz morfolojileri, sertlik testi ve aşınma özellikleri incelenmiştir. İncelemelerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Berilyum eklendiğinde β fazı gözle görülür bir değişim göstermese de, yumuşak α fazında iğne benzeri yapıların yoğun bir dağılımı tespit edilmiştir. Ayrıca, κ fazı α fazına orantılı olarak dağılmıştır.
- CuAl10Ni5Fe4 numunesinin sertlik değeri 212,77 iken, %0,2 Be ilavesiyle bu değer 237,79'a yükselmiştir.
- %0,2 berilyum ilaveli alaşımın 10000 metreden sonra en az ağırlık kaybını sağlayan en iyi malzeme olduğu belirlenmiştir. Bu malzemenin 10000 metre sonraki ağırlık kaybı 3.54×10^{-6} g'dır.
- Aşınma sırasında sürtünme katsayılarının paralel olduğu ve en düşük değere sahip malzemenin 0.0584 değeriyle CuAl10Ni5Fe4- 0.20%Be olduğu görülmüştür.

REFERENCES

1. Iannuzzi, M., Vasanth, K., and Frankel, G., "Unusual Correlation between SKPFM and Corrosion of Nickel Aluminum Bronzes", *Journal Of The Electrochemical Society*, 164: C488–C497 (2017).
2. Zhao, X., Qi, Y., Wang, J., Peng, T., Zhang, Z., and Li, K., "Effect of Weld and Surface Defects on the Corrosion Behavior of Nickel Aluminum Bronze in 3.5% NaCl Solution", *Metals*, 10: 1227 (2020).
3. Thossatheppitak, B., Suranuntchai, S., Uthaisangsuk, V., Manonukul, A., and Mungsantisuk, P., "Microstructure Evolution of Nickel Aluminum Bronze Alloy during Compression at Elevated Temperatures", *Advanced Materials Research*, 893: 365–370 (2014).
4. Fang, J., Song, G., Liu, W., and Li, Q., "Microstructure Evolution of As-Cast Nickel Aluminum Bronze under Electropulsing", *Key Engineering Materials*, 861: 28–34 (2020).
5. Munro, C., Vo, P., and Guerreiro, B., "Preliminary Development of Cold Spray Procedures for Nickel Aluminum Bronze Casting Repair", *Materials Science Forum*, 1016: 971–977 (2021).
6. Wu, Z., Hu, Q., Qin, Z., Zhang, Y., Xia, D.-H., and Hu, W., "Effect of plastic deformation on mechanical properties and corrosion resistance of nickel-aluminum bronze", *Anti-Corrosion Methods And Materials*, 68 (6): 473–480 (2021).
7. Böhm, J., Linhardt, P., Strobl, S., Haubner, R., and Biezma, M., "Microstructure of a Heat Treated Nickel-Aluminum Bronze and Its Corrosion Behavior in Simulated Fresh and Sea Water", *Materials Performance And Characterization*, 5: 689–700 (2016).
8. Zhang, B. -B, Wang, J. -Z, Yuan, J. -Y, and Yan, F. -Y, "Tribocorrosion behavior of nickel aluminum bronze in seawater: Identification of corrosion-wear components and effect of pH", *Materials And Corrosion*, 69: (2017).
9. Liu, D., Wang, Q., Yuan, W., and Mi, X., "A Comparative Study on the Friction and Wear Properties of Three Different Copper Alloys", *Materials Science Forum*, 913: 205–211 (2018).
10. Morales, Piamba, and Olaya, "Influence of Gas Pressure on the Mechanical and Tribological Properties of Cu-Al Coatings Deposited via Thermal Spray", *Coatings*, 9: 722 (2019).

11. Tan, Z., Guo, Q., Zhai, W., and Zhao, Z., "Tribological Characteristics of Nickel-Aluminium Bronze CuAl10Ni5Fe4 against 30CrMnSiA Steel after the Prior Corrosion Treatment", *Applied Mechanics And Materials*, 201–202: 73–77 (2012).
12. Ding, Y., Zhao, R., Qin, Z., Wu, Z., Wang, L., Lei, L., and Lu, W., "Evolution of the Corrosion Product Film on Nickel-Aluminum Bronze and Its Corrosion Behavior in 3.5 wt % NaCl Solution", *Materials*, 12: 209 (2019).
13. Khazaei, B. and Keshavarz, S., "Nickel-aluminum-bronze/Al₂O₃ surface nanocomposite produced by friction-stir processing: Corrosion properties and microstructure", *Materials And Corrosion*, 68: (2017).
14. Dias, A., Rodrigues, G., Mendonça, C., and Silva, G., "Analysis of the densification of a composite obtained by sintering process of aluminum bronze powders with different carbides", *REM - International Engineering Journal*, 72: 461–467 (2019).
15. Dias, A., Silva, A., Rodrigues, C., Melo, M. D. L., Rodrigues, G., and Silva, G., "Effect of High Energy Milling Time of the Aluminum Bronze Alloy Obtained by Powder Metallurgy with Niobium Carbide Addition", *Materials Research*, 20: (2017).
16. Li, W. and Liu, Y., "Effect of Ce on Wear Behavior of Plasma Spray Welded Novel Aluminum Bronze Coatings", *Advanced Materials Research*, 418–420: 831–834 (2011).
17. Chen, C., Yang, Q., Chen, Q., Wang, Y., Xu, D., Li, H., Xiliang, Z., Harvey, C., and Liu, J., "Tribological properties of copper-embedded self-lubricating bearing materials", *Industrial Lubrication And Tribology*, 74: (2022).
18. Reetz, B. and Dr. Münch, T., "A New Lead-Free Copper Alloy CuAl8Fe5Ni4Zn4Sn1 for Plain Bearings and Its Strengthening Mechanisms", *Metals*, 14: 697 (2024).
19. Reetz, B. and Dr. Münch, T., "The New Lead-Free Copper Alloy CuAl8Fe5Ni4Zn4Sn1 for Plain Bearings and Its Strengthening Mechanisms", (2024).
20. Páez, M., Skeldon, P., Thompson, G., Sáez, M., Bustos, O., and Monsalve, A., "Porous Anodic Film Formation on an Al-3.5 wt % Cu Alloy", *Revista De Metalurgia*, 147: (2003).
21. Zhou, X., Thompson, G., Habazaki, H., Páez, M., Shimizu, K., Skeldon, P., and Wood, G., "Morphological Development of Oxygen Bubbles in Anodic Alumina", *Journal Of The Electrochemical Society*, 147: 1747–1750 (2000).
22. Zhou, X., Thompson, G., Robinson, J., and Skeldon, P., "X-Ray Absorption Spectroscopy Study of the Incorporated Copper Species in Anodic Alumina Films

- Formed on an Al2 wt % Cu Alloy", *Journal Of The Electrochemical Society - J ELECTROCHEM SOC*, 152: (2005).
23. Li, H., Qiu, K., Zhou, F., Li, L., and Zheng, Y., "Design and development of novel antibacterial Ti-Ni-Cu shape memory alloys for biomedical application", *Scientific Reports*, 6: 37475 (2016).
 24. Li, R., Kang, H., Chen, Z., Fan, G.-H., Zou, C., Wang, W., Zhang, S., Lu, Y., Jie, J. C., Cao, Z., Lu, Y., and Wang, T., "A promising structure for fabricating high strength and high electrical conductivity copper alloys", *Scientific Reports*, 6: 20799 (2016).
 25. Wang, Q., Zheng, Q., and Li, D., "Development of Copper Alloy-Steel Bimetallic Bearing Materials and Manufacturing Technology", *Materials Science Forum*, 993: 374–383 (2020).
 26. Changsheng, W., Fu, H., Jiang, L., Xue, D., and Xie, J., "A property-oriented design strategy for high performance copper alloys via machine learning", *Npj Computational Materials*, 5: (2019).
 27. Chen, L., "A Novel Method of Archaeological Bronze Identification - Electromagnetic Signatures vs Chemical Composition", *International Journal Of Archaeology*, 9: 17 (2021).
 28. Chen, L., "Sumerian Arsenic Copper and Tin Bronze Metallurgy (5300-1500 BC): The Archaeological and Cuneiform Textual Evidence", *Archaeological Discovery*, 09: 185–197 (2021).
 29. Bottaini, C., Silva, A., Covita, D., Moutinho, L., and Veloso, J., "Energy dispersive X-ray fluorescence analysis of archeological metal artifacts from the Final Bronze Age", *X-Ray Spectrometry*, 41: (2012).
 30. Valério, P., Monge Soares, A. M., Fátima Araújo, M., Silva, R. J. C., Porfírio, E., and Serra, M., "Arsenical copper and bronze in Middle Bronze Age burial sites of southern Portugal: the first bronzes in Southwestern Iberia", *Journal Of Archaeological Science*, 42: 68–80 (2014).
 31. Valério, P., Silva, R. J. C., Araújo, M., Soares, A., and Braz Fernandes, F., "Microstructural Signatures of Bronze Archaeological Artifacts from the Southwestern Iberian Peninsula", *Materials Science Forum*, 636–637: 597–604 (2010).
 32. Gençer, G., "The Importance of Corrosion Protection of Metal-Containing Historical Artifacts and Common Methods Used for Preservation", *International Journal Of Environment And Geoinformatics*, 8: 514–520 (2021).
 33. Tanasi, D., Hassam, S., and Vianello, A., "The Emergence of Copper-Based Metallurgy in the Maltese Archipelago: an archaeometric perspective", *STAR: Science & Technology Of Archaeological Research*, 5: 1–11 (2019).

34. Duda, M., Oszejca, M., and Lasocha, W., "Non-invasive surface analysis of ancient bronze arrowheads with scanning electron microscopy and X-ray powder diffractometry", *Surface And Interface Analysis*, 54: (2022).
35. Ho, J. and Erb-Satullo, N., "Spatial investigation of technological choice and recycling in copper-base metallurgy of the South Caucasus", *Archaeometry*, 63: (2021).
36. Dardeniz, G., "Why did the use of antimony-bearing alloys in Bronze Age Anatolia fall dormant after the Early Bronze Age?: A Case from Resuloğlu (Çorum, Turkey)", *PLOS ONE*, 15: e0234563 (2020).
37. Cutler, †Joanne, "ARACHNE'S WEB: WOMEN, WEAVING AND NETWORKS OF KNOWLEDGE IN THE BRONZE AGE SOUTHERN AEGEAN", *The Annual Of The British School At Athens*, 114: 1–14 (2019).
38. SOFAER, J., "Pots, houses and metal: technological relations at the Bronze Age tell at Százhalombatta, Hungary", *Oxford Journal Of Archaeology*, 25: 127–147 (2006).
39. Ciarla, R., "The Origins of the Bronze Age in Mainland Southeast Asia", (2022).
40. González, L. and Fontijn, E., "Unveiling the Legacy of Bronze Age Arrow Weapons in Southeast Asia: Function, Technology, and Cultural Significance", *Jurnal Ilmu Pendidikan Dan Humaniora*, 12: 31–42 (2023).
41. Boulanger, C., Puaud, S., Ly, V., Glémarec, L., Heng, S., and Forestier, H., "Fishbone artefacts from the Samrong Sen site, Cambodia, cast new light on Bronze Age networking between inland and coastal communities", *International Journal Of Osteoarchaeology*, 31: (2020).
42. Nascimento, M., Santos, G., Teram, R., Torres dos Santos, V., Silva, M., and Couto, A., "Effects of Thermal Variables of Solidification on the Microstructure, Hardness, and Microhardness of Cu-Al-Ni-Fe Alloys", *Materials*, 12: 1267 (2019).
43. Anantapong, J., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., and Manonukul, A., "Effect of hot working on microstructure evolution of as-cast Nickel Aluminum Bronze alloy", *Materials & Design*, 60: 233–243 (2014).
44. Kulakli, A., Şeşen, F., Çitrak, T., and ÖZEREN, T., "EFFECT OF COBALT AND TITANIUM ADDITIONS ON CORROSION AND WEAR RESISTANCE OF NICKEL CONTAINING ALUMINUM BRONZES", (2020).
45. Doğan, Z. E., Kahrıman, F., and Atapek, Ş. H., "Microstructural and Thermal Characterization of Aluminum Bronzes", *Kocaeli Journal Of Science And Engineering*, 1 (1): 6–10 (2018).

46. Ocejjo, I., Biezma, M., and Linhardt, P., "Corrosion evaluation of welded nickel aluminum bronze and manganese aluminum bronze in synthetic sea water", *Materials And Corrosion*, 73: (2022).
47. Qin, Z., Zhang, Q., Luo, Q., Wu, Z., Shen, B., Lei, L., and Hu, W., "Microstructure design to improve the corrosion and cavitation corrosion resistance of a nickel-aluminum bronze", *Corrosion Science*, 139: (2018).
48. Smirnov, V. and Shalunov, E., "Antifriction powder bronzes with mechanically alloyed copper-based granules", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 709: 033030 (2020).
49. Çakir, E. and Tunay, R. F., "Tribological Properties of the Journal Bearings Used in Tamping Unit of Railways Tamping Machines", *Tehnički Vjesnik*, 28 (3): 873–879 (2021).
50. Chalasani, D., Hadadzadeh, A., Shalchi Amirkhiz, B., Ram, G. D., and Mohammadi, M., "Microstructural evolution and mechanical behavior of nickel aluminum bronze Cu-9Al-4Fe-4Ni-1Mn fabricated through wire-arc additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, 30: 100872 (2019).
51. Chalasani, D., Shalchi Amirkhiz, B., Lloyd, A., Ram, G. D., and Mohammadi, M., "Wire-arc additive manufactured nickel aluminum bronze with enhanced mechanical properties using heat treatments cycles", *Additive Manufacturing*, 36: 101510 (2020).
52. Tan, E., "Severe Plastic Deformation of Age Hardenable Aluminum Alloys", *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, (2012).
53. Freiße, H., Langebeck, A., Koehler, H., Seefeld, T., and Vollertsen, F., "Investigations on dry sliding of laser clad aluminum bronze", *Manufacturing Review*, 3: 13 (2016).
54. Liang, X. and Yang, Z., "Experimental study on the influence of friction pair material hardness on the tribological behaviors of water lubricated thrust bearings", *Industrial Lubrication And Tribology*, ahead-of-print: (2021).
55. Chalasani, D., Shakerin, S., Ram, G. D., and Mohammadi, M., "Wire-arc additive manufacturing of nickel aluminum bronze/stainless steel hybrid parts – Interfacial characterization, prospects, and problems", *Materialia*, 13: 100834 (2020).
56. Equey, S., Houriet, A., and Mischler, S., "Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys", *Wear*, 273: 9–16 (2011).
57. Paul, D., "Fretting wear behavior of aluminum coatings", *Experimental And Theoretical NANOTECHNOLOGY*, 257–267 (2023).
58. Ding, N., Li, H., Zhong, N., Xin, Q., and Jiang, D., "Study on the tribological properties and fault mechanisms of copper-based alloy journal bearing under

- different working conditions", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal Of Mechanical Engineering Science*, 236: 095440622110250 (2021).
59. Daehn, G. and Breslin, M., "Co-continuous composite materials for friction and braking applications", *JOM*, 58: 87–91 (2006).
60. Miguel, J. M., Vizcaino, S., Lorenzana, C., Cinca, N., and Guilemany, J. M., "Tribological Behavior of Bronze Composite Coatings Obtained by Plasma Thermal Spraying", *Tribology Letters*, 42: 263–273 (2011).
61. Asgari, M., Foratirad, H., Golabadi, M., Karimi, M., and Gholami, M. G., "Investigation of the corrosion behavior of aluminum bronze alloy in alkaline environment", *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 52: 511–519 (2021).
62. Rögner, J., Lang, K.-H., Baumeister, G., and Schulze, V., "Microstructure and mechanical properties of micro tensile specimens made of CuAl10Ni5Fe4 produced by micro casting", *Microsystem Technologies*, 17: 301–311 (2011).
63. Yaseen, M., Mansoor, M., Ansari, H., Hussain, S., and Khan, S., "Effect of Heat Treatment on Tribological Characteristics of CuAl10Ni5Fe4 Nickel Aluminum Bronze", *Key Engineering Materials*, 778: 61–67 (2018).
64. Atapek, S., Aktaş, G., Polat, S., and Pisarek, B., "Tribological Characterization of Al-bronzes Used as Mold Materials", *Archives Of Foundry Engineering*, 17: (2017).
65. Spittel, M. and Spittel, T., "Flow stress, mechanical and physical properties of CuAl10Ni5Fe4: Subvolume C: Metal Forming Data - Volume 2: Materials - Group VIII:Advanced Materials and Technologies - Landolt-Börnstein New Series", 347–350 (2016).
66. Straub, T., Berwind, M., Kennerknecht, T., Lapusta, Y., and Eberl, C., "Small-Scale Multiaxial Setup for Damage Detection Into the Very High Cycle Fatigue Regime", *Experimental Mechanics*, 55: (2015).
67. Zhang, X., Rebelo Kornmeier, J., Hofmann, M., Langebeck, A., Alameddin, S., Alessio, R., Fritzen, F., Bunn, J., and Cabeza, S., "Residual stresses in Cu matrix composite surface deposits after laser melt injection", *Strain*, e12457 (2023).
68. Middleton, D. and Kowalski, P., "Advances in Identifying Beryllium Sensitization and Disease", *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 7: 115–24 (2010).
69. Tinkle, S., Antonini, J., Rich, B., Roberts, J., Salmen, R., Depree, K., and Adkins, E., "Skin as a Route of Exposure and Sensitization in Chronic Beryllium Disease", *Environmental Health Perspectives*, 111: 1202–8 (2003).

70. Boffetta, P., Fryzek, J., and Mandel, J., "Occupational exposure to beryllium and cancer risk: A review of the epidemiologic evidence", *Critical Reviews In Toxicology*, 42: 107–18 (2012).
71. Strupp, C., "Beryllium Metal II. A Review of the Available Toxicity Data", *The Annals Of Occupational Hygiene*, 55: 43–56 (2011).
72. Kreiss, K., Day, G., and Schuler, C., "Beryllium: A Modern Industrial Hazard *", *Annual Review Of Public Health*, 28: 259–77 (2007).
73. Henneberger, P., Goe, S., Miller, W., Doney, B., and Groce, D., "Industries in the United States with Airborne Beryllium Exposure and Estimates of the Number of Current Workers Potentially Exposed", *Journal Of Occupational And Environmental Hygiene*, 1: 648–59 (2004).
74. Willis, H. and Florig, K., "Potential Exposures and Risks from Beryllium-Containing Products", *Risk Analysis : An Official Publication Of The Society For Risk Analysis*, 22: 1019–33 (2002).
75. Hines, S., Pacheco, K., and Maier, L., "The role of lymphocyte proliferation tests in assessing occupational sensitization and disease", *Current Opinion In Allergy And Clinical Immunology*, 12: 102–10 (2012).
76. Donovan, E., Kolanz, M., Galbraith, D., Chapman, P., and Paustenbach, D., "Performance of the beryllium blood lymphocyte proliferation test based on a long-term occupational surveillance program", *International Archives Of Occupational And Environmental Health*, 81: 165–78 (2007).
77. Newman, L., Mroz, M., Balkissoon, R., and Maier, L., "Beryllium Sensitization Progresses to Chronic Beryllium Disease: A Longitudinal Study of Disease Risk", *American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine*, 171: 54–60 (2005).
78. Barna, B., Culver, D., Yen-Lieberman, B., Dweik, R., and Thomassen, M. J., "Clinical Application of Beryllium Lymphocyte Proliferation Testing", *Clinical And Diagnostic Laboratory Immunology*, 10: 990–4 (2003).
79. Jamoussi, A., Merhabene, T., Mlika, M., Neji, H., Mezni, F., Khelil, J., and Besbes, M., "Interstitial pneumonia in a glassblower: Think to chronic beryllium disease!", *Pan African Medical Journal*, 31: (2018).
80. Müller-Quernheim, J., Gaede, K., Fireman, E., and Zissel, G., "Diagnoses of chronic beryllium disease within cohorts of sarcoidosis patients", *The European Respiratory Journal : Official Journal Of The European Society For Clinical Respiratory Physiology*, 27: 1190–5 (2006).
81. Sepehrnia, R., Ebrahimi, A., Abbasi, S., and Yazdipour, A., "The effect of harmonic vibration with a frequency below the resonant range on the mechanical

properties of AA-5083-H321 aluminum alloy GMAW welded parts", *Materials Science And Engineering: A*, 736: (2018).

82. Lenina, V., Vorob'eva, G., Remshev, E., and Rasulov, Z., "Phase Composition, Structure, and Properties of Beryllium Bronze after Thermal and Thermoacoustic Treatment", *Russian Engineering Research*, 41: 1049–1053 (2021).
83. He, X., Ye, L., Deng, Y., and Guo, X., "Effect of the oxidation reaction interface on the accelerated corrosion behaviour of Al–Mg–Si alloy", *Corrosion Engineering, Science And Technology*, 57: 1–12 (2022).
84. Wang, Z., Li, J., Zhang, Y., Lv, C., Li, T., Zhang, J., Hui, S., Peng, L., Huang, G., Xie, H., and Mi, X., "Comparison of the Mechanical Properties and Microstructures of QB2.0 and C17200 Alloys", *Materials*, 15: 2570 (2022).
85. Kuang, Z., Xia, Y., Chen, G., Sun, D., Ju, B., Look, J., Yang, W., and Wu, G., "Effect of Interfacial Strength on Mechanical Behavior of Be/2024Al Composites by Pressure Infiltration", *Materials*, 16: 752 (2023).

ÖZGEÇMİŞ

Abdalkadir Amir Emhimmid ALZALOUK, 2006'dan 2009'a kadar lise diplomasını 80'lik bir notla aldı. 2009'dan 2013'e kadar Gharyan'daki Ağır Makine Yüksek Enstitüsü'nden 70'lik bir notla ağır makine mekaniği konusunda uzmanlaşarak lisans derecesi aldı.

