

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

ÖNSÖZ

“Aşırı Plastik Deformasyon ve Yaşlandırma İşlemlerinin Al 2024 Alaşımının Mikroyapı, Mekanik ve Tribolojik Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Bu tez çalışması 2568 – CAS program kodlu ve 121N772 proje numaralı TÜBİTAK – Çin Bilimler Akademisi (CAS) İkili İş Birliği Programı kapsamında yürütülen “Tane Boyutu ve Nano Çökelti Üzerinden Yüksek Mukavemetli Dövme Al Alaşımlarının Servis Performanslarının Optimize Edilmesi” (Optimizing the Service Behaviors of Typical High-Strength Wrought Al Alloys by Adjusting the Grain Size and Nano Precipitates) başlıklı proje kapsamında desteklenmiştir.

Al 2024 alaşımı sahip olduğu üstün mekanik özellikleri sayesinde yaygın olarak havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak alaşımın mukavemetinin ve aşınma direncinin çeşitli termo-mekanik prosesler ile geliştirilmesi için yapılan çalışmalar devam etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında da Al 2024 alaşımına aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanallı açıl basma (EKAB) ve ilave yapay yaşlandırma ısı işlemleri içeren prosesler uygulanarak; tane incelmesi ve çökelti oluşumları aracılığıyla homojen bir mikroyapı ve gelişmiş mekanik özelliklerinin elde edilmesinin yanı sıra alaşımın mevcut aşınma direncinin de artırılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK’e şükranlarımı sunarım. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tez çalışmama büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ’a, Dr. Öğr. Üyesi Harun YANAR’a ve Dr. Öğr. Üyesi Yaşar SERT’e teşekkür ederim. Ortak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışmam sürecinde daima yardımcı olan arkadaşlarım Arş. Gör. Sadun KARABIYIK’a ve Arş. Gör. Muhammet UZUN’a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca ilgi, alaka ve desteklerini üzerimden esirgemeyen sevgili aileme minnettarlığımı sunarım.

Melih USTALAR
Trabzon, 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Aşırı Plastik Deformasyon ve Yaşlandırma İşlemlerinin Al 2024 Alaşımının Mikroyapı, Mekanik ve Tribolojik Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20/08/2024

Melih USTALAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yaşlandırılabilir Dövme Al Alaşımları.....	2
1.2.1. Al 2024 Alaşımı.....	4
1.3. Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemi Olarak Eş Kanallı Açısal Basma	5
1.3.1. EKAB İşleminin Yaşlandırılabilir Al 2024 Alaşımına Uygulanması	9
1.4. Al Alaşımlarının Aşırı Plastik Deformasyon Sonrası Tribolojik Özellikleri	11
1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	12
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	14
2.1. Deney Malzemesi	14
2.2. Al 2024 Alaşımına Uygulanan EKAB ve Yaşlandırma Prosesleri.....	14
2.3. Mikroyapısal İncelemeler	15
2.4. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	16
2.4.1. Sertlik Ölçümleri	16
2.4.2. Çekme Deneyleri	16
2.5. Tribolojik İncelemeler	17
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	20
3.1. EKAB ve Yaşlandırma Isıl İşlem Parametreleri Üzerine Gerçekleştirilen Öncü Çalışmalar	20
3.2. Öncü EKAB ve Yaşlandırma Isıl İşlemi Çalışmaların Değerlendirilmesi	23
3.3. Belirlenen Prosesler İçin Yapılan Çalışmalar	24
3.3.1. Mikroyapısal İnceleme Sonuçları	24
3.3.2. Mekanik İnceleme Sonuçları	29
3.3.3. Tribolojik İnceleme Sonuçları	32

4. GENEL SONUÇLAR	58
5. ÖNERİLER	60
6. KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON VE YAŞLANDIRMA İŞLEMLERİNİN AL 2024 ALAŞIMININ MİKROYAPI, MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Melih USTALAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gençğa PÜRÇEK
2024, 67 Sayfa

Bu çalışmada; Al 2024 alaşımına eş kanallı açısal basma (EKAB) ve yaşlandırma ısıt işlemlerinden oluşan farklı prosesler uygulandı. Bu kapsamda Al 2024 alaşımına uygulanabilecek optimum prosesler belirlendi. Alaşımın tane incelmesi ve çökelti oluşumu sonucu sahip olduğu yeni mikroyapısının yanı sıra mekanik ve tribolojik özellikleri sistematik bir biçimde incelendi. Çalışma kapsamında 200 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen EKAB işleminin alaşımın tane boyutunu yaklaşık 5 µm seviyesine kadar incelttiği belirlendi. Ayrıca EKAB sonrası alaşımın mevcut mukavemet ve sertlik değerleri sırasıyla 365 MPa ve 164 Hv değerlerinden 540 MPa ve 220 Hv seviyelerine yükseldi. Buna karşın süneklik değerinde % 16'dan % 5 seviyesine bir azalma görüldü. EKAB sonrası uygun yapay yaşlandırma sıcaklığının 100 °C olduğu ve bu sıcaklıkta alaşımın sahip olduğu sertlik değerini 850 saat boyunca koruyabildiği tespit edildi. Belirlenen proseslerin kuru ortamda sürtünme ve aşınma testleri gerçekleştirildi. En düşük aşınma direncinin EKAB uygulanan koşulda ortaya çıkmasına rağmen yaşlandırma ısıt işlemleri ile alaşımın aşınma direncinin arttığı tespit edildi. Aşınma yüzeylerinde etkin aşınma mekanizması olarak adezyon görülmesinin yanı sıra abrazyon, delaminasyon ve oksidasyon etkileri de gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Al 2024 Alaşımı, Aşırı Plastik Deformasyon, Eş Kanallı Açısal Basma (EKAB), Yaşlandırma, Triboloji

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SEVERE PLASTIC DEFORMATION AND AGING PROCESSES ON THE MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AL 2024 ALLOY

Melih USTALAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Gençğa PÜRÇEK
2024, 67 Pages

In this study, different processes consisting of equal channel angular pressing (ECAP) and aging heat treatments were applied to Al 2024 alloy. In this context, the optimum processes that can be applied to Al 2024 alloy were determined. The new microstructure of the alloy as a result of grain refinement and precipitate formation as well as its mechanical and tribological properties were systematically investigated. Within the scope of the study, it was determined that the ECAP process carried out at a temperature of 200 °C refines the grain size of the alloy to approximately 5 μm . In addition, after ECAP, the strength and hardness values of the alloy increased from 365 MPa and 164 Hv to 540 MPa and 220 Hv, respectively. On the other hand, the ductility value decreased from 16% to 5%. It was determined that the appropriate artificial aging temperature after ECAP was 100 °C and at this temperature, the alloy could maintain its hardness value for 850 hours. Friction and wear tests were carried out in dry environment for all processes. Although the lowest wear resistance was found in the ECAP condition, the wear resistance of the alloy was found to increase with aging treatments. Although the dominant wear mechanism was determined as adhesion on the wear surfaces, abrasion, delamination and oxidation effects were also observed on the surfaces.

Key Words: Al 2024 Alloy, Severe Plastic Deformation, Equal Channel Angular Pressing (ECAP), Aging, Tribology

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	EKAB işlemini gösteren şematik resim (Tong vd., 2010).....	6
Şekil 2.	Farklı kalıp kesit geometrilerini gösteren şematik resimler: (a) keskin köşeli EKAB kalıbı ve (b) dış köşe yuvarlatması mevcut EKAB kalıbı.....	7
Şekil 3.	EKAB kalıbının kesit görüntüsü ve EKAB işleminde yaygın olarak kullanılan rotaları gösteren şematik görsel (Shaban vd., 2023).....	8
Şekil 4.	Farklı rotalarda ve paso sayılarında EKAB uygulanan bir malzemenin içyapısındaki kayma düzlemlerinde meydana gelen değişimler (Tong vd., 2010).....	8
Şekil 5.	Alaşımına uygulanması ön görülen proses adımlarını gösteren proses haritası.....	15
Şekil 6.	EKAB işlemi uygulanmış numune üzerinden çıkarılan TEM, EBSD, XRD, sertlik ve çekme numunelerinin şekil ve konumları.....	17
Şekil 7.	Sürtünme ve aşınma testlerinin gerçekleştirildiği modüler test sistemi (Tribometre).....	18
Şekil 8.	EKAB işlemi uygulanmış numune üzerinden çıkarılan sürtünme ve aşınma test numunelerinin şekil ve konumları.....	19
Şekil 9.	Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen öncü EKAB deneyleri sonucu numunelerin görüntüleri: a) 150 °C, b) 175 °C, c) 200 °C.....	21
Şekil 10.	Farklı sıcaklık ve hızlarda gerçekleştirilen ikinci paso EKAB deneyleri sonucu numunelerin görüntüleri: a) 200 °C, 0,5 mm/s, b) 200 °C, 0,25 mm/s, c) 210 °C’de 0,5 mm/s.....	22
Şekil 11.	Alaşımın EKAB işlemi sonrası 100, 150 ve 200 °C sıcaklıklardaki sertlik karakteristikleri.....	23
Şekil 12.	Belirlenen optimum prosesleri gösteren proses haritası.....	24
Şekil 13.	Proses - 2 koşulu için farklı büyütme ölçeklerindeki TEM resimleri.....	25
Şekil 14.	Proses - 3 koşulu için farklı büyütme ölçeklerindeki TEM resimleri.....	26
Şekil 15.	Proses - 4 koşulu için farklı büyütme ölçeklerindeki TEM resimleri.....	27
Şekil 16.	Tüm prosesler için XRD desenleri.....	28
Şekil 17.	Alaşımın içyapılarına ait EBSD görüntüleri: a) Proses 2, b) Proses 3, c) Proses 4.....	28
Şekil 18.	Alaşımın EKAB işlemi sonrası 100 °C sıcaklıktaki sertlik karakteristiği.....	30
Şekil 19.	Tüm prosesler için gerilme - % uzama eğrileri.....	31
Şekil 20.	Tüm prosesler için mekanik özellikleri gösteren eğriler.....	32
Şekil 21.	3 N yük altında sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler.....	34

Şekil 22.	5 N yük altında sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler	35
Şekil 23.	10 N yük altında sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler	36
Şekil 24.	Proses – 1 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler	37
Şekil 25.	Proses – 2 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler	38
Şekil 26.	Proses – 3 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler	39
Şekil 27.	Proses – 4 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler	40
Şekil 28.	Ortalama sürtünme katsayılarını gösteren bar grafikleri.....	41
Şekil 29.	Kütle kayıplarını gösteren bar grafikleri	43
Şekil 30.	Hacim kayıplarını gösteren bar grafikleri	43
Şekil 31.	3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a-c) Proses - 1, (d-f) Proses - 2, (g-i) Proses - 3 ve (i-k) Proses - 4.	46
Şekil 32.	3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses – 4.....	47
Şekil 33.	3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses – 4.....	48
Şekil 34.	5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a-c) Proses - 1, (d-f) Proses - 2, (g-i) Proses - 3 ve (i-k) Proses - 4.	50
Şekil 35.	5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses – 4.....	51
Şekil 36.	5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses – 4.....	52
Şekil 37.	10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a-c) Proses - 1, (d-f) Proses - 2, (g-i) Proses - 3 ve (i-k) Proses - 4.	54
Şekil 38.	10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses – 4.....	55
Şekil 39.	10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses – 4.....	56

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Dövme Al alaşım serilerine ait alaşım elementleri ve ısıtım işlem kabiliyetleri (Siddesh Kumar vd., 2022).....	3
Tablo 2.	Tez çalışması kapsamında kullanılan Al 2024 alaşımının kimyasal bileşimi	14
Tablo 3.	Al 2024 alaşımının tüm proses koşullarına ait mekanik özellikler tablosu.....	34
Tablo 4.	Al 2024 alaşımına ait tüm koşulların 3, 5 ve 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme aşınma testlerinde ölçülen ortalama sürtünme katsayıları.....	41
Tablo 5.	Al 2024 alaşımına ait tüm koşulların 3, 5 ve 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme aşınma testlerinde ölçülen kütle ve hacim kayıpları	42
Tablo 6.	3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin EDS analizleri	47
Tablo 7.	3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4	48
Tablo 8.	3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4.....	49
Tablo 9.	5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin EDS analizleri	51
Tablo 10.	5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4	52
Tablo 11.	5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4.....	53
Tablo 12.	10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin EDS analizleri	55
Tablo 13.	10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4	56
Tablo 14.	10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4.....	57

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde havacılık, otomotiv ve demir yolu taşımacılığı gibi hızla gelişen sektörler yüksek dayanım değerlerine sahip düşük ağırlıklı tasarımlar ortaya koyma konusunda yeni bir rekabet ortamı oluşturmaktadır. Bu noktada, yüksek dayanım ve tokluk, hafiflik, düşük yoğunluk ve kolay şekillendirilebilme gibi özellikleri ile Al alaşımları vazgeçilemez konumlarını korumaktadırlar (Deschamps vd., 2009; Dolan & Robinson, 2004; Williams & Starke, 2003; Xiao vd., 2016). Farklı uygulama alanlarında pek çok tasarım ölçütünü karşılayabilen Al alaşımları, sahip oldukları nihai forma göre döküm ya da dövme alüminyum alaşımları olmak üzere temelde iki ana gruba ayrılmaktadır (Ozturk vd., 2010). Dökme Al alaşımları döküm işleminden sonra doğrudan kullanılabilmekteyken dövme Al alaşımları ise döküm işleminden sonra sıcak ya da soğuk olarak hadde veya ekstrüzyon işlemleri ile şekillendirilirler. Döküm yöntemiyle üretilen ve/veya dökümden sonra dövme yöntemleriyle nihai şekli verilen bu alaşımlar kendi içlerinde de ısıtma işlem uygulanabilirliğine göre ısıtma işlem uygulanabilen ya da uygulanamayan alaşımlar olarak alt gruplara ayrılmaktadır (Qu vd., 2022).

Çalışma koşullarında metalik malzemelerin çalışma ömürlerini etkileyen üç etken vardır (Liu vd., 2017; Pang vd., 2013). Bunlar malzemenin mukavemet-süneklik uyumu, homojen bir mikroyapıya sahip olunup olunmaması ve içyapıda mevcut olabilecek kusurlardır (Liu vd., 2017). Bu noktada daha homojen ve daha az kusur içeren bir mikroyapının daha iyi bir çalışma performansı göstereceği bilinmektedir (Liu vd., 2017; Pang vd., 2013). Buna karşın çalışma ortamlarında darbeli ve titreşimli yüklere maruz kalan Al alaşımı parçalarda meydana gelen yaygın hasar mekanizmalarından biride aşınma hasarıdır. Al alaşımından imal edilen parçaların çalışma koşullarında güvenli biçimde çalışabilmesi için ortaya çıkan aşınma hasarlarını engellemek ya da alaşımın aşınma dayanımını artırmak büyük önem taşımaktadır (Xinming vd., 2015).

Malzemelerin sahip olduğu yüksek dayanım değerlerinin aşınma direncini de artıracak bilinmektedir. Ancak son yıllarda aşınma dayanımının malzemenin sertliği ile paralel şekilde artmadığını gösteren çalışmalar yapılmıştır (Gao vd., 2012; Liu vd., 2017; Pang vd., 2013). Yani Al alaşımlarının aşınma direnci sadece alaşımın dayanım değerlerine

bağlı değil ayrıca deformasyon sertleştirmesi kabiliyeti ile hasar mekanizmalarına da bağlıdır (Gao vd., 2012; Y.-S. Kim vd., 2009; Liu vd., 2017). Şöyle ki, Al alaşımlarının servis performansları sadece dayanım artışıyla artırılmazken iyi bir mukavemet-süneklik uyumuna da ihtiyaç vardır. Yaşlandırılabilir Al alaşımları için bu uyum ise ana matris içerisinde nano ölçekli çökelti oluşturmak ve alaşımların tane boyutunun inceltilmesi olmak üzere iki temel mekanizma aracılığıyla gerçekleştirilebilir (Li vd., 2019; W. Sun vd., 2019).

Geleneksel yöntemlere alternatif bir mukavemet artırıcı mekanizma olan plastik deformasyon yöntemleri ile malzemenin nispeten daha ince tane boyutlarına sahip olmasını sağlanarak mukavemet değerlerini artırmaktadır. Fakat dövme, haddeleme ya da ekstrüzyon gibi plastik deformasyon yöntemlerinin sağladığı mekanik ve mikroyapısal iyileşmelerin sınırlı kalması ile birlikte son yıllarda malzemelerin tane boyutunu mikron altı düzeye kadar indirebilen yeni yöntemler uygulanmaya başlanmıştır (Huang vd., 2004; W. J. Kim vd., 2002; Stolyarov vd., 2001). Bunlar malzemeye aşırı oranda deformasyon uygulayarak tane inceltmeye dayalı aşırı plastik deformasyon yöntemleridir. Aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemlerinin başlıcaları ise eş kanallı açıl basma/presleme (EKAB/P), çok yönlü dövme (ÇYD), tekrarlı ekstrüzyon (TE), yüksek basınç altında burma (YBB) ve birikimli bağ haddesi (BBH) gibi yöntemlerdir (Torre vd., 2004). Bu aşırı plastik deformasyon yöntemleri geleneksel metotlara alternatif olarak denenmiş ve üstün mekanik özelliklerin bu yöntemler sonrasında elde edilebildiği belirlenmiştir (Zhao vd., 2004). Söz konusu yöntemler ile ince taneli içyapıya sahip Al alaşımları elde edilmiş ve alaşımların mukavemetinde tane inceltmesi mekanizmasına dayandırılan bir iyileşme gözlemlenmiştir (Horita vd., 2000).

Bu tez çalışması kapsamında, Al 2024 alaşımına aşırı plastik deformasyon ve yaşlandırma ısı işlemlerinin ardışık şekilde uygulanması sonucu alaşımların içyapısında ince taneli ve nano ölçekli çökeltilere sahip bir yapı oluşturarak mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Yaşlandırılabilir Dövme Al Alaşımları

Dövme Al alaşımları döküm sonrası soğuk veya sıcak şekillendirme, ekstrüzyon, dövme ya da haddeleme gibi yöntemlere maruz bırakılarak şekillendirilen alaşımlardır. Bu alaşımların isimlendirilmesinde dört basamaklı bir sistem kullanılmaktadır. İlk basamak ana alaşım elementini belirtirken, ikinci basamak alaşımların safsızlık sınırını ve son iki basamak ise alaşımların saflık seviyesini gösterir.

Tablo 1. Dövme Al alaşımlarına ait alaşım elementleri ve ısıtma işlem kabiliyetleri
(Siddesh Kumar vd., 2022)

Alaşımlar Serisi	Alaşımlar Elementleri	Isıtma İşlem Uygulanabilirliği
1xxx	Saf Al	Hayır
2xxx	Al - Cu - Mg	Evet
3xxx	Al - Mn	Hayır
4xxx	Al - Si	Hayır
5xxx	Al - Mg	Hayır
6xxx	Al - Mg - Si	Evet
7xxx	Al - Zn - Mg	Evet
8xxx	Al - Li	Evet

Dövme Al alaşımları arasında, 2xxx serisi (Al-Cu-Mg), 6xxx serisi (Al-Mg-Si) ve 7xxx serisi (Al-Zn-Mg) alaşımları yaygın şekilde ısıtma işlem uygulamalarıyla mekanik özellikleri iyileştirilebilen alaşım sınıflarındandır (Qu vd., 2022). Üç alaşım serisi için dayanım değerleri, ana matrislerinin yapıları, yaşlandırma ısıtma işlemleri ve ikincil fazların morfolojileri birbirinden farklı olmasına rağmen ikincil fazların çökelti süreci benzerlik göstermektedir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte ikincil fazların çökeltme süreci Guinier–Preston–Bagaryatsky (GPB) bölgelerinin çekirdeklenmesi ve çökeltmesini, oluşan GPB bölgelerinin yarı kararlı bir faza dönüşmesi ve son olarak yarı kararlı fazların büyümesi ve irileşmesi ile kararlı bir faza dönüşmesini içerir (Dumitraschkewitz vd., 2018; S. C. Wang & Starink, 2005; Yan vd., 2016; Z. Zhang vd., 2020). 2xxx, 6xxx ve 7xxx yaşlandırılabilir Al alaşımlar serileri için yaşlandırma işlemi boyunca oluşan çökelti dizilimleri sırasıyla GPB $\rightarrow S'' \rightarrow S' \rightarrow S$ (Al_2CuMg), GPB $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ (Mg_2Si), GPB $\rightarrow \eta' \rightarrow \eta$ ($MgZn_2$) şeklindedir (S. C. Wang & Starink, 2005; Z. Zhang vd., 2020). Burada GPB bölgeleri çözünen atomların ayrışma bölgeleridir. Pik yaşlanma durumu öncesi ana matrisle uyumlu GPB bölgeleri ana çökeltiyken, pik yaşlanma durumunda ana çökelti S' , β' , ve η' olur. Aşırı yaşlandırma durumunda ise S , β ve η ana matrisle bağdaşık olmayan kararlı çökeltilerdir. Kısmi yaşlanma durumunun çökelti küresel şekilli GPB bölgeleri iken aşırı yaşlanma halinde 2xxx serisi Al alaşımlarında iğne şeklindeki S , 6xxx serisinde çubuk şeklindeki β ve 7xxx serisinde ise disk şeklindeki η çökeltileridir (Andersen vd., 2018; Dumitraschkewitz vd., 2018; Gang Sha & Cerezo, 2004). Pek çok ticari ve mühendislik uygulamasında yaygın şekilde yer alan 2xxx serisi alaşım sınıfına ait 2024 alaşımı ise en sert

ve dayanım değerleri en yüksek olanlardan birisidir. Çökelme sertleşmesine uygunluğu, yaşlandırma işlemi sonrası gelişen mekanik özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Ana alaşım elementi olarak yaklaşık % 4,5 Cu ve % 1,5 Mg elementlerini içermektedirler. Magnezyumun Al - Cu alaşımlarına eklenmesi ile çökelti sertleştirilmesi hızlanır ve yoğunlaşır. Yüksek dayanım ise magnezyum içeriğinin % 0,5'ten %1,5 seviyesine çıkarılmasıyla sağlanır. Söz konusu bu elementler alaşımın yaşlandırılabilirlik özelliklerini geliştirmektedir (Reis vd., 2012).

1.2.1. Al 2024 Alaşımı

Al-Cu-Mg esaslı alaşımlardan olan Al 2024 alaşımı sahip olduğu yüksek dayanım değerleri nedeniyle havacılık uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Alaşım çözündürme, su verme ve yaşlandırma işlemleri sonrasında GPB bölgeleri $\rightarrow S'' \rightarrow S' \rightarrow S$ (Al_2CuMg) şeklinde çökelti dizilimi olduğu bilinmektedir (Buha vd., 2007; S. C. Wang & Starink, 2007). Pik yaşlandırma koşulunda meydana gelen S' fazı ise bu alaşımların ana mukavemet artırıcı mekanizmasıdır (Chen vd., 2021; Dumitraschkewitz vd., 2018; L. Sun vd., 2021). Ayrıca Al 2024 alaşımına uygulanan aşırı yaşlandırma ısısal işlemi pik yaşlandırma öncesinde (GPB bölgeleri) ve pik yaşlandırma durumlarında görülen (S') çökeltilerin boyutunun büyümesine, bu çökeltilerin ana matris ile bağdaşıklıklarının ortadan kalkmasına ve iğne biçimindeki S çökeltilerine dönüşmesine neden olmaktadır ki bu dönüşüm alaşımın dayanım değerlerini düşürmektedir (Dumitraschkewitz vd., 2018). Alaşımın sertlik ve mukavemet artışının matristeki çökeltilerin çeşidine ve dağılımına bağlı olduğu belirlenmiştir (B. Gong vd., 2023). Ayrıca çözündürme, su verme ve ardından aşırı yaşlandırma işlemleri uygulanmış Al 2024 alaşımının içyapısında genel olarak T fazı dispersoidleri ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) yaygın şekilde bulunmaktadır. Çözeltiye alınmış durumda mikroyapıda görülen iri ve köşeli bir şekle sahip olan T fazı dispersoidleri içyapıda katılaşma sırasında meydana gelmektedir (B. Gong vd., 2023). Yapılan çalışmalarda genellikle $495^\circ C$ ile $505^\circ C$ arasında çözeltiye alınan Al 2024 alaşımının yapay yaşlandırma ısısal işlemi ile sertlik ve mukavemetinin artırıldığı fakat süneklik değerinde bir miktar kayıp olduğu gözlenmiştir (B. S. Gong vd., 2022; Qu vd., 2022). Öyle ki literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yaşlandırma ısısal işleminin Al 2024 alaşımının mukavemet değerlerini iyileştirmekle birlikte süneklik değerlerini düşürdüğü birçok çalışmada tespit edilmiştir (Afzal & Ahmad, 2013; Reis vd., 2012). Bu noktada da artan dayanım değerleri için alaşımın

içyapısında bulunan alaşım elementlerinin yaşlandırma ısı işlemi sırasında içyapıda çöktürmeler oluşturmaları ve bu çöktürmelerin dislokasyon hareketlerini engellemesi temel mekanizma olarak belirlenmiştir (Jackson, 1983).

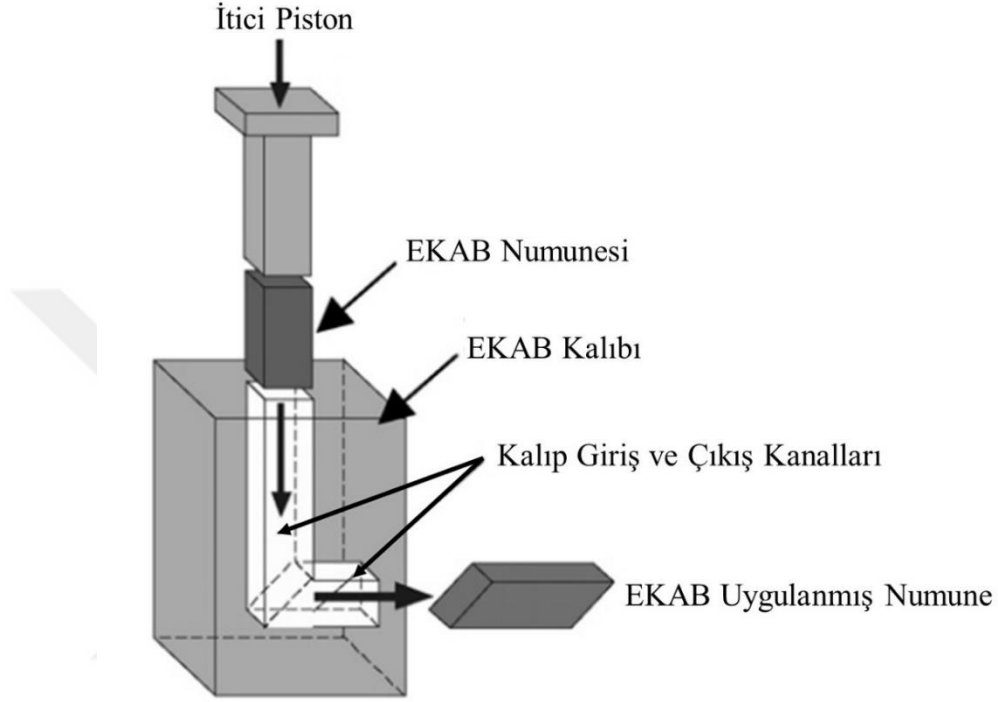
Al 2024 alaşımı üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda ısı işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak alaşımın çöktürme oluşumunun kontrol edilebileceği, buna bağlı olarak mekanik özelliklerinde kayda değer iyileştirmeler sağlanabileceği belirlenmiştir (Aboudeif, 2010; Feng vd., 2010; Palmerin vd., 2009; S. Wang vd., 2006; S. C. Wang & Starink, 2007). Yaşlandırma karakteristiğini detaylandıran bir çalışmada ise kısmi, pik ve aşırı yaşlandırma koşullarında alaşımının dayanım ve süneklik değerleri birbiriyle kıyaslanmıştır. Bu noktada, pik ve aşırı yaşlandırma koşullarının alaşımın kısmi yaşlanma durumuna göre süneklik değerini kademeli olarak düşürdüğü fakat pik yaşlandırma durumunda üstün dayanım değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir (B. S. Gong vd., 2022).

1.3. Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemi Olarak Eş Kanallı Açısal Basma

Aşırı plastik deformasyon yöntemleri, malzemeye aşırı miktarda deformasyon uygulanması sonucu mikron altı boyut ve geniş açılı tane sınırlarına sahip alt taneli bir içyapı oluşturulması amacıyla uygulanan yöntemlerdir (Zhao vd., 2004). Malzemeye kütleli olarak aşırı plastik deformasyon uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi malzemenin deformasyon önce sahip olduğu boyutlarını deformasyon sonrasında da koruması şartı ile sağlanabilir. Bu boyutsal kararlılığın sağlanması durumunda ise aşırı plastik deformasyon tekrarlı şekilde uygulanabilir. Yaygın şekilde kullanılan aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin arasında eş kanallı açısal basma (EKAB) tek paso uygulanması halinde bile sağladığı üstün özellikler sayesinde aşırı plastik deformasyon yöntemleri arasındaki popüler konumunu korumaktadır. Ayrıca EKAB, çeşitli yapısal parçalarda kullanılma potansiyeli olan malzemelere uygulanabilmesi, yüksek mukavemet özelliklerinin elde edilebilmesi ve homojen bir mikroyapı oluşturabilmesi ile ön plana çıkmaktadır.

Eş kanallı açısal basma (EKAB) ilk olarak 1980'li yıllarda uygulanmaya başlanmış olup günümüzde hala kullanılmakta olan en yaygın aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden birisidir (Segal, 1995). İlk geliştirildiği süreçte malzemelere basit kayma mekanizması yoluyla deformasyon uygulamak ve etkilerini sayısal yöntemlerle incelemek olsa da ilerleyen yıllarda EKAB bir tane inceltme yöntemi (mikron altı boyutta ultra ince taneler) olarak Valiev ve arkadaşları tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Valiev &

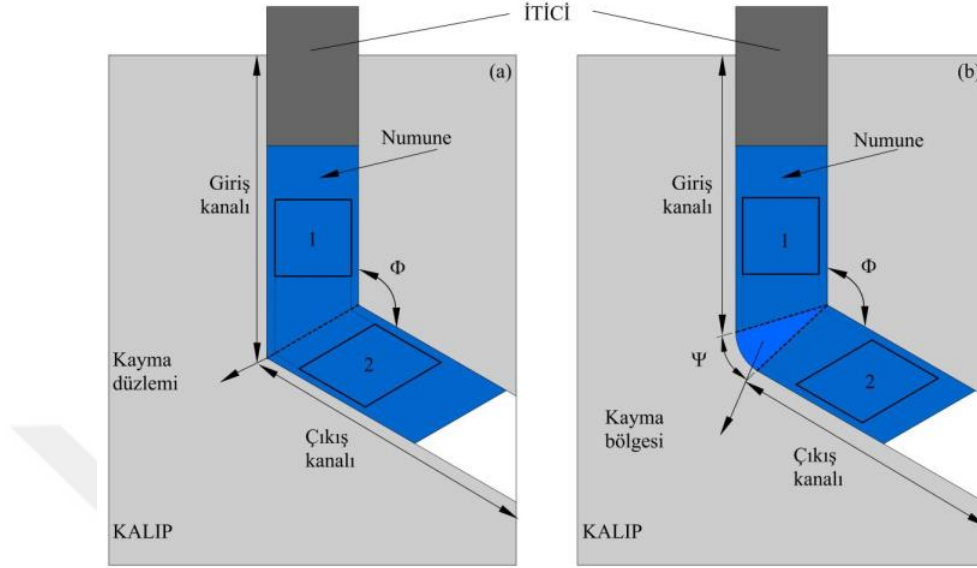
Langdon, 2006). Tarihsel süreçte EKAB titanyum ve alaşımları (Purcek vd., 2009), Al ve alaşımları (Saray & Purcek, 2009), bakır ve alaşımları (Vinogradov vd., 2002) gibi pek çok saf metal ve alaşımlara uygulanabilmektedir. EKAB işleminin uygulanmasına ait şematik gösterim Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. EKAB işlemini gösteren şematik resim (Tong vd., 2010)

Şematik resmi Şekil 2’de verilen EKAB kalıbı, eş kanal geometrilerine sahip doğrusal iki kanalın aralarında (Φ) kalıp iç köşe açısı ve (Ψ) kalıp dış köşe yuvarlatma açısı oluşturacak şekilde birleşmesiyle oluşan bir geometriye sahiptir. EKAB, kalıbın kanal geometrisine uygun şekilde üretilerek giriş kanalına yerleştirilen numunenin, bir itici piston yardımıyla çıkış kanalının sonuna kadar itilmesiyle gerçekleştirilen bir aşırı plastik deformasyon yöntemidir. Kalıbın giriş ve çıkış kanalları aynı boyutsal geometrilere sahip oldukları için EKAB işlemine tabi tutulan numunede boyutsal bir değişim olmaz ve EKAB tekrarlı biçimde uygulanabilir. Kanallar arasındaki açılar sayesinde, EKAB işlemine tabi tutulan numunede basit kayma mekanizması aracılığıyla oluşan plastik deformasyonun seviyesi değişiklik gösterir. EKAB işleminin kaç paso olarak uygulandığı ve EKAB kalıbının kanal açılarına bağlı olarak oluşan eşdeğer birim şekil değişimi ϵ_N aşağıdaki denklem aracılığıyla belirlenir (Iwahashi vd., 1996). Denklemdaki N değeri uygulanan paso

sayısını göstermektedir. Ayrıca farklı kalıp kesit geometrilerini gösteren şematik resimler Şekil 2’de gösterilmiştir.

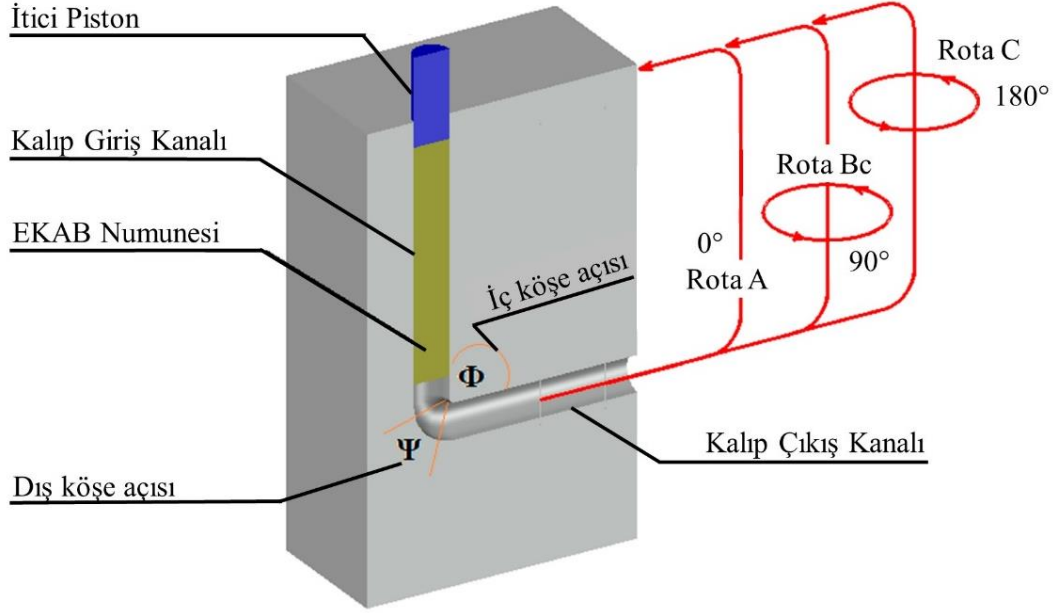


Şekil 2. Farklı kalıp kesit geometrilerini gösteren şematik resimler: (a) keskin köşeli EKAB kalıbı ve (b) dış köşe yuvarlatması mevcut EKAB kalıbı

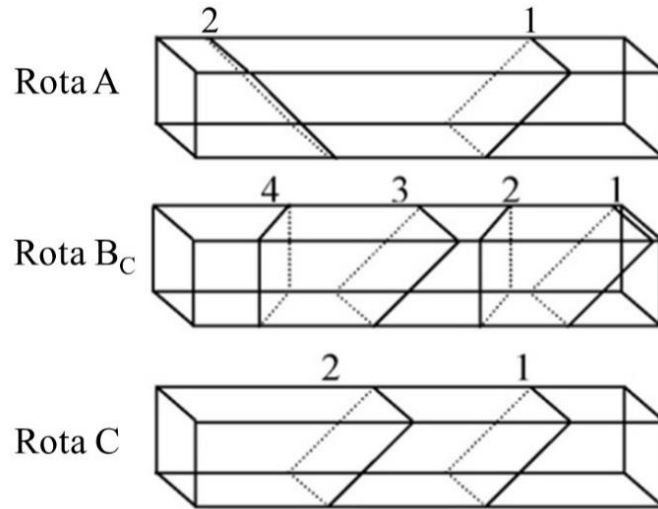
$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

EKAB işlemi sonucunda elde edilen mikroyapısal değişimler ve yönlenmelerde, uygulanan deformasyonun yönünün de önemi vardır. Birden çok paso şeklinde uygulanacak EKAB işleminde numunenin her defasında kalıba giriş yönü değiştirilerek deformasyonun farklı düzlemlerde uygulanması sağlanabilir. Pasolar arasındaki bu yön değişimleri EKAB rotaları olarak adlandırılır. Farklı rotalarda oluşan farklı kayma düzlemleri, malzemenin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir (Gholinia vd., 2000). EKAB işleminde A, B ve C olarak adlandırılan üç adet temel rota mevcuttur (Furukawa vd., 1998). Rota A’ da numune her pasoda aynı yönde basma işlemine tabi tutulurken, rota B’de numune her bir paso sonrası 90° döndürülerek kalıba yeniden yerleştirilir ve deformasyon gerçekleştirilir. Eğer ki numune ikinci paso EKAB uygulaması sonrasında 90° döndürüldüğünde ilk konumuna geliyorsa bu rota B_A, sürekli aynı yönde 90° döndürülüyorsa bu rota B_C’dir. C rotasında ise numune her paso sonrası 180° döndürülerek kalıba konulur ve deformasyon işlemi gerçekleştirilir. EKAB kalıbının kesit görüntüsü ve rotaların yönleri

Şekil 3'te, farklı rotaların ve paso sayılarının malzemenin içyapısında meydana getirdiği kayma düzlemleri ise Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. EKAB kalıbının kesit görüntüsü ve EKAB işleminde yaygın olarak kullanılan rotaları gösteren şematik görsel (Shaban vd., 2023)



Şekil 4. Farklı rotalarda ve paso sayılarında EKAB uygulanan bir malzemenin içyapısındaki kayma düzlemlerinde meydana gelen değişimler (Tong vd., 2010)

1.3.1. EKAB İşleminin Yaşlandırılabilir Al 2024 Alaşımına Uygulanması

Literatürde pek çok çalışmada Al 2024 alaşımına farklı sıcaklık ve rotalarda EKAB işlemleri uygulanarak tane boyutu incelmeye dayalı olarak dayanım değerlerini artırılması amaçlanmıştır. Bir çalışmada Al 2024 alaşımı 400 °C sıcaklıkta 1 saat çözündürme işlemi sonrası fırında soğutulularak homojenize edildiği, ardından oda sıcaklığında B_C rotasında 3 paso EKAB işlemine tabi tutulduğu ve tane boyutunu 1 µm seviyesinin altına indirebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Söz konusu proses sonucu ile alaşımın akma dayanımı 180 MPa'dan 420 MPa'a kadar kayda değer biçimde bir artış göstermiştir (Z. Horita vd., 2001). Başka bir çalışmada, 500 °C'de 40 dakika çözeltiye alındıktan sonra su verilmiş Al 2024 alaşımına oda sıcaklığında ardışık pasolarda EKAB işlemi uygulanması amaçlanmış fakat B_C rotasının ikinci pasosunda meydana gelen ciddi kırıklardan dolayı EKAB tek paso olarak gerçekleştirilmiştir. Ardından çözündürülmüş durumda akma ve çekme dayanımları sırasıyla 181 ve 393 MPa olan alaşım, tek paso EKAB sonrası 72 saat doğal yaşlandırma ve 70 °C'de 70 saat ile 100 °C'de 25 saat yapay yaşlandırma ısıl işlemlerine tabi tutulmuştur. Farklı ısıl işlemler sonucunda alaşım sırasıyla 575, 595 ve 610 MPa akma, 608, 647 ve 670 MPa çekme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Tek paso EKAB işlemi ile alaşımın sertliği 85 Hv seviyesinden 170 Hv seviyesine çıkmış ve bu artışın artan dislokasyon yoğunluğu ile oluşmuş olabileceği ifade edilmiştir. EKAB sonrası doğal yaşlandırmanın yanı sıra 70 °C ve 100 °C'de yapılan yapay yaşlandırma işlemleri kıyaslanmıştır. Bir saatlik doğal yaşlandırmanın alaşımın sertliğini 190 Hv değerine yükseltip sabit kaldığı, 70 °C'de yapılan yaşlandırmanın sertliği ancak 70 saatte 200 Hv seviyesine çıkarabildiği buna karşın 100 °C'de yapılan yaşlandırmanın sertlik değerini 25 saatte 212 Hv değerine yükseltebildiği tespit edilmiştir. 100 °C'deki bu artış, yapıda oluşan Al₂CuMg fazının dislokasyon hareketini engellemesi ile alaşımın sertliğini artırmasına dayandırılarak açıklanmıştır (Goodarzy vd., 2014). Ayrıca bu sonuç Kim ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları ile de uyumludur. 500 °C'de 12 saat süre ile çözündürüldükten sonra su verilen Al 2024 alaşımı 90° iç ve 30° dış köşe yuvarlatma açılara sahip EKAB kalıbında 160 °C sıcaklıkta 1 paso EKAB işlemine tabi tutulmuştur. B_C rotasında uygulanmak istenen ikinci paso EKAB işlemi numune yüzeyinde ciddi çatlaklara neden olmuş ve EKAB tek paso olarak gerçekleştirilebilmiştir. Öncesinde 3 günlük doğal yaşlandırmaya bırakılmış tek paso EKAB uygulanan numunelerinin optimum yaşlandırma sıcaklık ve süresinin belirlenebilmesi için 175 °C ve 100 °C olarak iki farklı sıcaklık belirlenmiştir. EKAB sonrası

190 Hv olan sertliğin 100 °C’de 30 saat süre ile yaşlandırma işlemi sonrası yaklaşık 206 Hv değerine ulaştığı rapor edilmiştir. Öte yandan çok yakın bir sertlik değerine 175 °C’de 2 saat içerisinde ulaşılmıştır fakat sonrasında sertlik değeri artan süre ile birlikte kademeli şekilde düşmüştür. EKAB işleminin alaşımın mukavemet değerleri üzerinde de oldukça etkili olduğu ve akma dayanımının tek paso EKAB işleminden sonra 330 MPa seviyesinden 566 MPa seviyesine yükseldiği fakat sünekliğinin %28 seviyesinden %10 seviyesine düştüğü belirtilmiştir. 100 °C’de yapılan yapay yaşlandırma ile alaşımın 30 saate kadar akma dayanımı değerini 630 MPa seviyesinde koruduğu ifade edilmiştir (W. J. Kim vd., 2003). Tek paso EKAB işleminin uygulandığı başka bir çalışmada 195 °C’de 1 saat süre ile çözeltiye alıp su verilen Al 2024 alaşımına oda sıcaklığında ve 120° kanal açısına sahip EKAB kalıbında 1 paso EKAB işlemi uygulanmıştır. Söz konusu EKAB işleminin alaşımın 190 °C’deki pik yaşlanma süresini 11,5 saatten 1 saate düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca alaşımın sertliği 100 Hv seviyesinden 150 Hv seviyelerine kadar yükselmiş, EKAB işlemi sonrası 1 saat süre ile uygulanan yaşlandırma işlemi sonrasında ise sertlik değeri 195 Hv olarak rapor edilmiştir (Kotan vd., 2013). Benzer bir çalışmada tamamen aynı parametreler ile uygulanan EKAB işlemi sonrası EKAB uygulanmış ve EKAB işleminin ardından pik yaşlandırılmış Al 2024 alaşımı 80 ile 200 °C arasında değişen farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. EKAB sonrası uygulanan yaşlandırma işleminde maksimum sertlik değeri 120 °C’de 586 saat süre ile yaşlandırılmış numunede yaklaşık 200 Hv olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada tek paso EKAB işlemi uygulanmış Al 2024 alaşımının ister EKAB isterse de EKAB sonrası pik yaşlandırma durumunda artmış olan mekanik özelliklerini koruyabildiği ve 120 °C altındaki servis sıcaklıklarında güvenli şekilde kullanılabileceğini tespit edilmiştir (Tan vd., 2016).

Nihai olarak EKAB işleminin ilk pasosu malzemenin mekanik özellikleri ve nihai tane boyutu üzerine en büyük etkiye sahiptir (Valiev & Langdon, 2006). Diğer yandan yüksek açılı tane sınırına sahip homojen şekilde dağılmış taneli bir yapı elde etmek için ise tekrarlı pasolarda EKAB uygulanması ana yöntemdir (Zenji Horita vd., 2001). Dayanım artırıcı mekanizma sadece tane inceltme yöntemi aracılığıyla sağlanabiliyorsa EKAB işleminin ardışık pasolar şeklinde uygulanması elzemdir (Valiev & Langdon, 2006). Ancak Al 2024 gibi yaşlandırılabilir alaşımlarda EKAB sonrası uygulanan yaşlandırma ısı işlemleri ince taneli bir mikroyapının ve bu taneler içerisinde de nano çökeltilerin oluşmasını sağlayabilir. Nitekim çözeltiye alma, EKAB ve EKAB sonrası yaşlandırma işlemleri ve bunların

kombinasyonları olan prosesler tek ya da ardışık pasolu EKAB işlemi uygulamalarında kullanılmıştır (W. J. Kim vd., 2003; Qiao vd., 2009).

1.4. Al Alaşımlarının Aşırı Plastik Deformasyon Sonrası Tribolojik Özellikleri

Al alaşımlarına uygulanan aşırı plastik deformasyon işlemleri sonrası sınırlı sayıda da olsa sürtünme ve aşınma testleri uygulanmıştır. Bir çalışmada saf Al alaşımı 8 paso birikimli bağ haddesi (BBH) işlemine tabi tutulmuş ve ultra ince taneli yeni bir mikroyapının alaşımın sertlik ve mukavemetini artırdığı belirlenmiştir. Ancak kuru ortamda gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda proses edilmiş alaşımın başlangıç durumuna göre daha düşük aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Bu durum BBH işlemi sonrası alaşımın düşük deformasyon sertleşmesi kabiliyeti ve sahip olduğu mikroyapısı ile ilişkilendirilmiştir (Eizadjou vd., 2009). Saf Al alaşımına aynı prosesin uygulandığı bir başka çalışmada da BBH işleminin alaşımın aşınma direncini düşürdüğü ve bunun düşük deformasyon sertleşmesi kabiliyetinin yanı sıra alaşımın kararsız ve yüksek enerjili tane sınırlarına sahip olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ultra ince taneli yapının gösterdiği etkin aşınma mekanizmasının da delaminasyon olduğu belirlenmiştir (Talachi vd., 2011). Aşırı plastik deformasyon yöntemi olarak B_C rotasında 8 paso EKAB uygulanan Al 1050 alaşımı ile oda sıcaklığında ve kuru ortamda sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. EKAB sonrası alaşımın sürtünme katsayısında bir değişim meydana gelmezken aşınma dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Etkin aşınma mekanizması olarak oksidatif aşınma görüldüğü bildirilmiştir (C. T. Wang vd., 2011a). Aynı çalışma grubu tarafından Al 1050 alaşımına 7 paso olarak uygulanan YBB işlemi sonrasında da alaşımın sürtünme katsayısında bir değişim elde edilmezken aşınma direncinin düştüğü tespit edilmiştir. Aşınma direncindeki bu düşüş alaşımın aşırı plastik deformasyon sonrası düşen deformasyon sertleşmesi kabiliyetine dayandırılmıştır (C. T. Wang vd., 2011b). Al 6061 alaşımının kullanıldığı bir çalışmada, 315 °C sıcaklıkta 7 paso olarak uygulanan BBH işlemi sonucunda alaşımın aşınma direncinin düştüğü belirlenmiştir. Başlangıç koşuluna göre artan mukavemet değerlerinin aksine azalan aşınma direnci kararsız tane sınırlarının karakteristikleri ile ilişkilendirilmiştir (Y. S. Kim vd., 2004). Bir başka çalışmada Al alaşımı içerisinde % 2, 3 ve 5 şeklinde artan Cu oranı ve 1’den 9 pasoya kadar artan EKAB paso sayısının farklı yük ve yol şartlarında kütle kaybı ve aşınma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Sırasıyla % 2, 3 ve 5 şeklinde artan Cu oranına sahip alaşımların 1’den 9’a

kadar artan paso sayısında EKAB işlemine tabi tutulmuşlardır. En yüksek sertlik değerinin en yüksek Cu oranı içeren alaşıma ait olduğu ve artan Cu oranı ve EKAB paso sayısının kütle kaybını azalttığı belirlenmiştir. Yapı içerisinde homojen şekilde dağılmış θ fazının, Al matrisinin dayanımını artırdığı, bu artışın malzemenin sertlik değerini de artırarak aşınma direncini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Aşınma mekanizması olarak adezyon ile delaminasyon etkisinin görüldüğü, artan kayma mesafesi ile abrazyon etkilerinin ortaya çıktığı fakat hiçbir koşulda oksijen tespit edilemediği için oksidasyonun mevcut olmadığı sonuçlarına ulaşılmıştır (Abd El Aal vd., 2010). Ana alaşım elementi bakır olan bir başka 2xxx serisi alaşımlarından Al 2014 alaşımı kullanılarak yapılan bir çalışmada 495 °C’de yapılan çözündürme işleminden sonra alaşım pik yaşlandırma noktasına karşılık gelen 195 °C’de 5 saat yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Ardından iç köşe açısı 90° ve dış köşe yuvarlatma açısı 30° olan EKAB kalıbında A ve B_C rotalarında üçer paso EKAB işlemi gerçekleştirilmiş ve farklı rotalarının alaşımın tribolojik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Testler 10 N ve 30 N yüklerde, 2000 m kayma mesafesinde, pin-on-disk tipi bir cihazda gerçekleştirilmiştir. Düşük yükte aşınma mekanizması adezif, yüksek yükte ise delaminasyon ve tutma-bırakma (stick-slip) olarak belirlenmiştir. EKAB rotasının ciddi bir fark oluşturmadığı fakat proses edilmiş örneklerin başlangıç durumuna göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir (S. P. Divya vd., 2018). Aynı çalışma grubu tarafından yine Al 2014 alaşımı üzerine yapılan bir başka çalışmada aynı koşullarda fakat rota C kullanılarak yapılmış EKAB işlemi sonucu aşınma davranışı incelenmiş, EKAB işleminin hacim kaybını ve sürtünme katsayısını azalttığı ve başlangıç durumuna göre aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir (S. Divya vd., 2018)

Bu çalışmalar irdelendiğinde Al alaşımlarına aşırı plastik deformasyon sonrası aşınma dirençlerinin azaldığı ve sürtünme katsayılarında belirgin bir değişim oluşturmadığı görülmektedir. Bu durum ise genel olarak düşen deformasyon sertleşmesi kabiliyetine ve kararsız durumunda olan tane sınırlarının varlığına dayandırılarak açıklanmıştır.

1.5. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Al 2024 alaşımı sahip olduğu dayanım ve sertlik özellikleri ile uçaklar ve hızlı trenler, gibi pek çok mühendislik ve ticari uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu sebeple alaşımın servis performanslarının optimize edilmesi çalışma koşullarında güvenli çalışabilmesi için elzemdir.

Al 2024 alaşımının sahip olduğu dayanım değerlerinin artırılmasını amaçlayan pek çok alışma Hall–Petch eşitliğine dayandırılan tane inceltme yöntemleri ile malzemenin dayanım değerlerini artırmaya çalışmıştır. Bu kapsamda uygulanan aşırı plastik deformasyon yöntemlerinin arasında ise EKAB işlemi ile tek pasoda dahi tane incelmesi sağlayarak yüksek mukavemet artışı elde edilebildiği için yaygın biçimde kullanılmaktadır. Fakat EKAB işleminde gerçekleştirilen deformasyonun zor oluşu pek çok çalışmada ardışık pasoların uygulanmasına engel olmuş, deformasyon sıcaklığını ya da rotasını değiştirmek bir çözüm olarak öne sürülmüştür. Malzemelerin dayanım değerlerini artırmada deformasyon yöntemlerine ek olarak yaşlandırma ısııl işlemleri de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Yaşlandırılabilir dövme Al alaşımları arasında yer alan Al 2024 alaşımına pek çok çalışmada ısııl işlemler uygulanarak dayanım değerleri artırılabilmiştir (El Garchani vd., 2023). Yaşlandırma ısııl işlemi sonucu yapı içerisinde meydana gelen ikincil fazların çökelme süreçleri tanımlanmış, yaşlandırma süreci içerisinde meydana gelen iğne biçimindeki S' çökeltilerin ana mukavemet artıcı mekanizma olduğu, bu çökelti formunun alaşımın pik yaşlandırma koşulunda meydana geldiği ve bunun dislokasyonların hareketini engelleyerek dayanımı artırdığı tespit edilmiştir. Yaşlandırma sürecinin uzamasıyla S' çökeltilerinin yerini tamamıyla aynı parametrelere sahip S fazına bıraktığı, bu fazın ise alaşımın dayanımını düşürdüğü belirlenmiştir. Tüm incelemeler ile birlikte sınırlı sayıdaki alışmalar Al 2024 alaşımının servis koşullarında meydana gelen aşınma hasarlarının önüne geçmek adına optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu durum ise literatürde bir eksiklik olarak göze çarpmakta ve önerilen çalışmada detaylı tribolojik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında Al 2024 alaşımı için;

- Optimum EKAB ve ilave yapay yaşlandırma ısııl işlemlerinin belirlenmesi ve kombine etkilerinin incelenmesi,
- Tane incelmesi yöntemine dayalı olarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesi,
- Uzun süreli yaşlandırılabilirdiği optimum sıcaklığın belirlenerek yaşlanma karakteristiğinin ortaya çıkarılması,
- EKAB sonrası yapay yaşlandırma ısııl işlemi ile alaşımın sahip olduğu çökeltilerin mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerine etkilerinin incelenmesi,
- Optimum parametreler sonucu alaşımın aşınma dayanımının iyileştirilmesi ve yaygın aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amaçlarıyla mikroyapısal, mekanik ve tribolojik analizler gerçekleştirilecektir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deney Malzemesi

Tez çalışması kapsamında kullanılan Al 2024 alaşımı ticari olarak T351 (sıcak haddeleme sonrası doğal yaşlandırılmaya bırakılmış) formunda plaka biçiminde temin edilmiştir. Söz konusu alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 2’de verilmiştir.

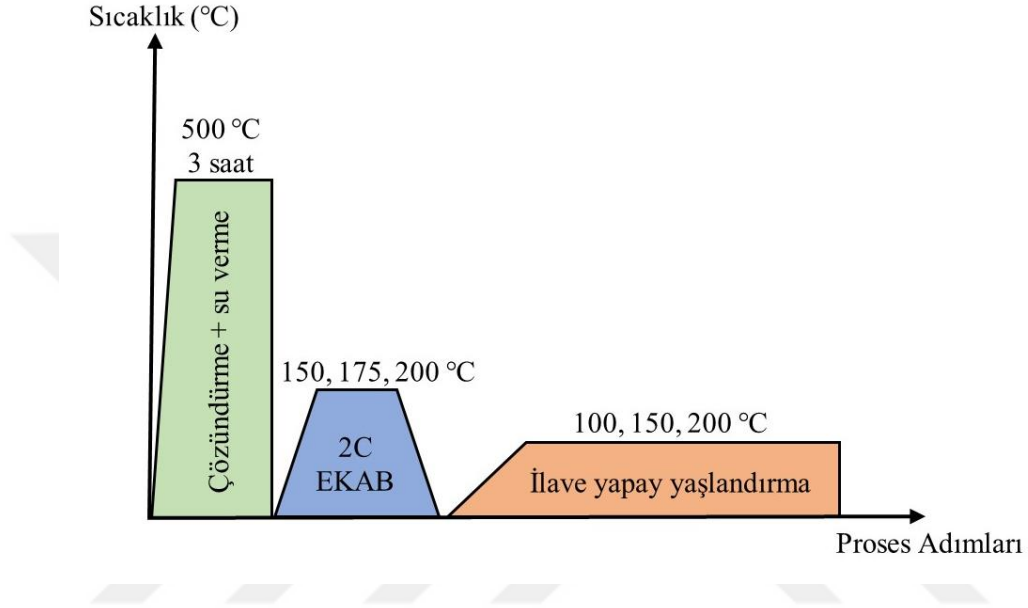
Tablo 2. Tez çalışması kapsamında kullanılan Al 2024 alaşımının kimyasal bileşimi

Durum	Elementlerin Ağırlık Oranı (%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V
Standart Bileşim	0,00	0,00	3,80	0,30	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aralığı	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Analiz Sonucu	0,50	0,50	4,90	0,90	1,80	0,10	0,05	0,25	0,15	0,05	0,05

2.2. Al 2024 Alaşımına Uygulanan EKAB ve Yaşlandırma Prosesleri

Tez çalışması kapsamında Al 2024 alaşımına uygulanması ön görülen proses adımlarına ait şematik Şekil 5’te tanımlandı. Bu kapsamda, ticari olarak haddelenmiş formda tedarik edilen Al 2024 alaşımı plakasından 13 mm x 13 mm x 130 mm boyutlarında kare kesitli EKAB numuneleri tel-erozyon cihazı ile üretildi. Numuneler ilk olarak çözündürme ısı işlemine tabi tutuldu. Çözündürme işlemi sonrası hızla su verilen numuneler aşırı doymuş katı çözelti formuna getirildi. Aşırı plastik deformasyon öncesi numunelerin yüzeyleri sırasıyla 200 ve 600 grit zımparalarla zımparalandı. Hazırlanan numuneler, iç köşe açısı 90° ve dış köşe yuvarlatma açısı 0° olan kalıpta, farklı sıcaklıklarda EKAB işlemlerine tabi tutularak aşırı plastik deformasyonun başarı ile uygulanabileceği uygun sıcaklığın belirlenmesi amaçlandı. Her bir EKAB işlemi öncesinde numunelerin yüzeyleri, kalıbın çıkış kanalı ve duvarları katı bir yağlayıcı olan molibden disülfid (MoS_2) ile yağlandı ve oluşabilecek sürtünme etkileri azaltılmaya ve deformasyon homojensizlikleri de önlenmeye çalışıldı. EKAB işlemi homojen bir mikroyapı oluşturabilmek adına C rotasında (numune ilk pasodan sonra 180° döndürülerek kalıba yerleştirilir) 2 paso olarak uygulanmaya çalışıldı. Ön görülen proses kapsamında başarılı şekilde gerçekleştirilebilen EKAB işlem

parametreleri (sıcaklık ve deformasyon hızı) belirlendi. Ardından alaşıma EKAB sonrası farklı sıcaklıkta yaşlandırma ısıl işlemleri uygulandı. Alaşımın sertlik karakteristiği elde edilerek, sahip olduğu sertlik değerini uzun süreli şekilde koruyabildiği sıcaklık belirlendi. Tüm optimizasyon çalışmaları sonrasında optimum proses adımları tanımlanarak alaşımın mikroyapı, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine incelemeler gerçekleştirildi.



Şekil 5. Alaşımına uygulanması ön görülen proses adımlarını gösteren proses haritası

2.3. Mikroyapısal İncelemeler

Tez çalışması kapsamında belirlenen optimum detaylı mikroyapısal analizleri geçirimli elektron mikroskobu (TEM), elektron gerisaçılım difraksiyonu (EBSD) ve X-ışını difraktometresi (XRD) incelemeleri kullanılarak gerçekleştirildi. Tüm incelemeler için EKAB numunesinden üretilen 13 mm x 13 mm x 3 mm boyutlarında numuneler kullanıldı.

İleri düzey mikroyapısal incelemeleri gerçekleştirmek için 200 kV'da çalışan FEI Tecnai F20 model geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanıldı. TEM incelemeleri için kullanılan ince folyolar hassas su jeti kullanılarak üretildi.

Alaşımın tüm durumlarının tane boyutu ve tane sınırı yönlenmesi incelemeleri EBSD kullanılarak ayrıntılı bir biçimde incelendi. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda EKAB numunesinden elde edilen EBSD örneği, hassas bir biçimde zımparalandı ve parlatıldı. Elde edilen ham veriler bir bilgisayar programı yardımıyla işlendi ve alaşımın sahip olduğu ortalama tane boyutu belirlendi.

Al 2024 alaşımının ısıı işlem koşullarına baēlı olarak yapısında ortaya çıkan fazların ve çökeltilerin tayini için farklı koşullarda detaylı XRD alışmaları yapıldı. XRD analizleri 20° - 90° Bragg açısı aralıēında ve 1°/dk tarama hızında gerçekleştirildi.

2.4. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Tanımlanan optimum proses koşullarına sertlik ve çekme testleri uygulandı. Vickers sertlik deneyleri ile alaşıma ait mikro sertlik deēerleri, çekme testleri ile akma ve çekme gerilemeleri ve süneklik deēerleri belirlendi.

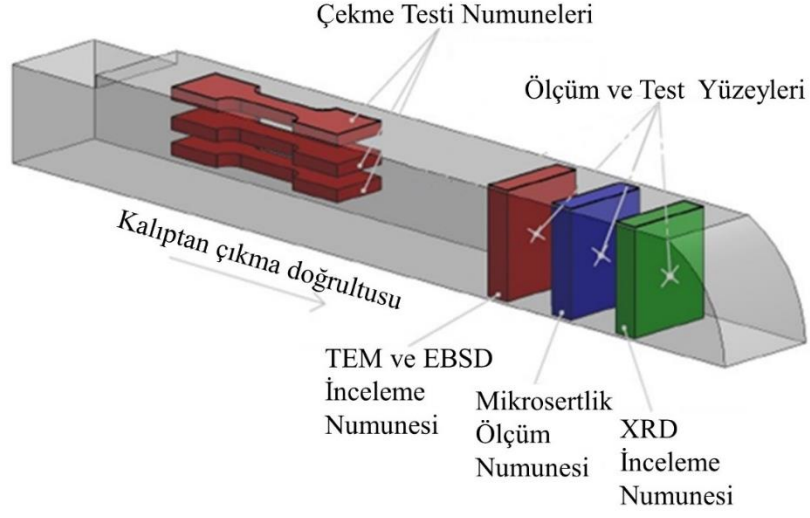
2.4.1. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri EKAB uygulanmış numuneden üretilen 13 mm x 13 mm x 3 mm boyutlarında örnekler ile Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Sertlik deēerleri 0,5 kg yük ve 15 s bekleme süresinde gerçekleştirilen 10 farklı ölçümün aritmetik ortalaması alınarak hesaplandı.

2.4.2. Çekme Deneyleri

Çekme deneyleri için 1,5 mm x 3 mm x 26 mm boyutlarındaki örnekler EKAB uygulanmış numuneden tel-erozyon cihazı ile üretildi. Örnekler oda sıcaklıēında ve $5,4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 'lik deformasyon hızında çekme testlerine tabi tutularak gerilme – uzama (%) eērileri çizildi ve bu eērilerden yararlanılarak her bir proses adımı için alaşımın temel mukavemet ve süneklik deēerleri belirlendi. Test sonuçlarının doērulanabilirliēi için her bir şarta ait üçer adet çekme deneyi gerçekleştirildi.

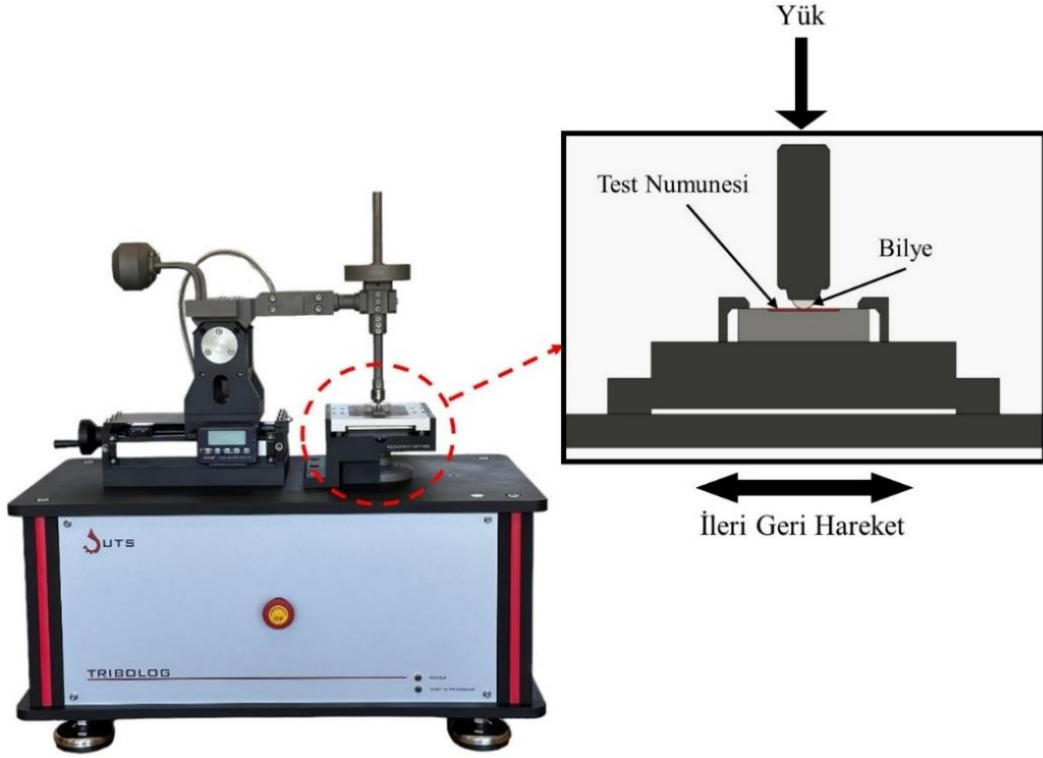
Tüm mikroyapısal incelemeler ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan numunelerin EKAB numunesi üzerindeki yerleşimleri ve alındıkları bölgeler şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. EKAB işlemi uygulanmış numune üzerinden çıkarılan TEM, EBSD, XRD, sertlik ve çekme numunelerinin şekil ve konumları

2.5. Tribolojik İncelemeler

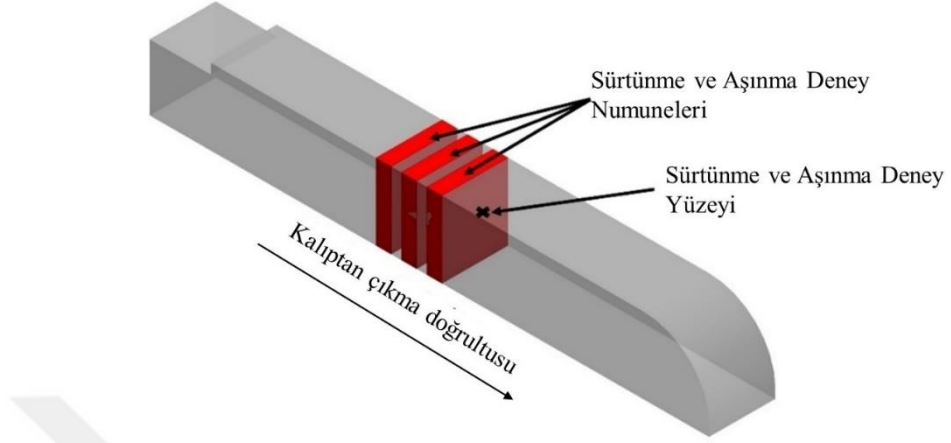
Farklı proses adımlarına tabi tutulmuş numunelerin aşınma davranışlarını incelemek için sürtünme ve aşınma deneyleri şematik resmi Şekil 7’de gösterilen modüler bir tribometrede (UTS Tribolog, Türkiye) ASTM G133 standartlarına göre ileri-geri (lineer) hareket yapan bir modül üzerinde gerçekleştirildi.



Şekil 7. Sürtünme ve aşınma testlerinin gerçekleştirildiği modüler test sistemi (Tribometre)

Sürtünme ve aşınma deneyleri için optimum proses adımlarında işlem görmüş numuneler EKAB numunesinden tel-erozyon cihazı ile üretildi. Sürtünme aşınma deney örneklerinin EKAB numunesi üzerinden alındığı bölgeleri gösteren şematik Şekil 8’de verildi. Numuneler aşınma deneyleri öncesinde sırasıyla 320, 600, 800 ve 1200 grit zımparalar ile zımparalandı ve yüzey pürüzlülükleri ortalama $0,15 \mu\text{m}$ değerine getirildi. Yüzeyleri hazırlanmış numuneler her bir test öncesinde ve sonrasında etanol içerisinde ultrasonik olarak temizlendi ve hassasiyeti $\pm 0,01 \text{ mg}$ olan hassas terazi ile tartıldı. İki ölçüm arasındaki fark aşınma deneyleri sonrasında kütle kaybının belirlenmesinde kullanıldı. Sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında aşındırıcı yüzey olarak sertliği 58-62 RSD-C olan 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş 6 mm çapında bilyeler kullanıldı. Sürtünme ve aşınma deneyleri oda sıcaklığında ve 3, 5 ve 10 N yük altında, 2 Hz frekansta, 0,032 m/s hızda, 8 mm strokta ve 50 m kayma mesafesine karşılık gelen 3124 çevrimde gerçekleştirildi. Söz konusu deneylerin doğruluğu için deneyler en az üçer kez tekrarlandı. Bu deneyler sonucunda her bir yük ve proses adımı için elde edilen sürtünme katsayısının artan çevrim sayısına göre değişimi, ortalama sürtünme katsayıları, kütle ve hacim kayıpları belirlendi.

Sürtünme ve aşınma deneyleri sonrasında, aşınma mekanizmalarının belirlenebilmesi için aşınma yüzeyleri SEM/EDS ile incelendi.

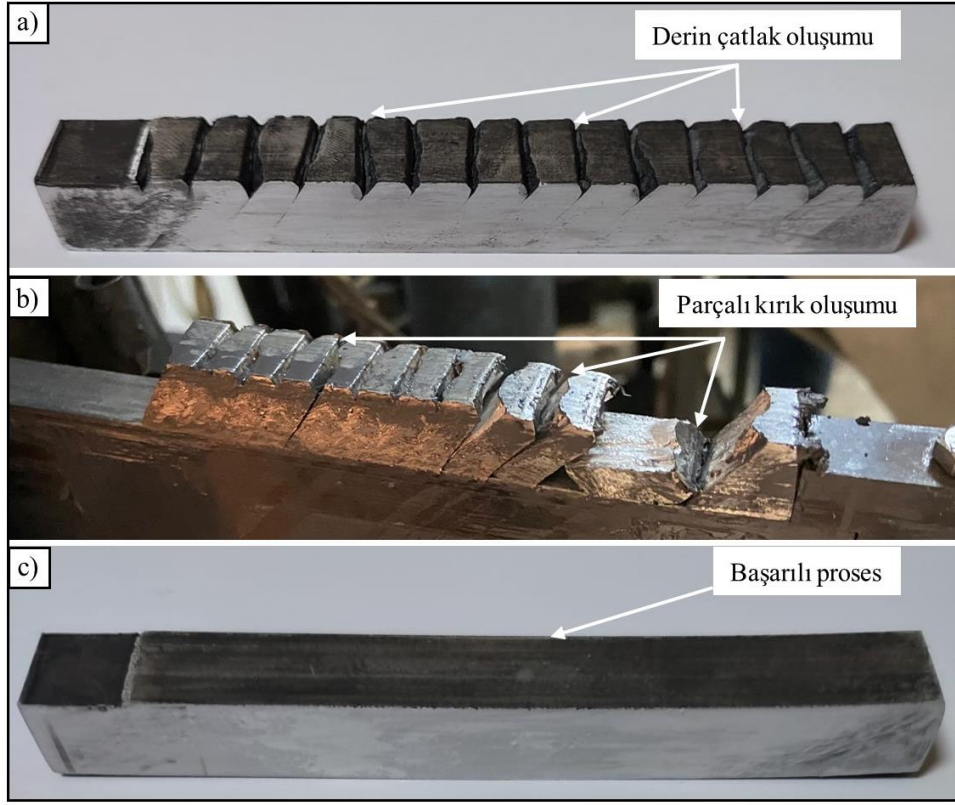


Şekil 8. EKAB işlemi uygulanmış numune üzerinden çıkarılan sürtünme ve aşınma test numunelerinin şekil ve konumla

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. EKAB ve Yaşlandırma Isıl İşlem Parametreleri Üzerine Gerçekleştirilen Öncü Çalışmalar

Tanımlanan proses kapsamında 500 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle çözündürülerek su verilen Al 2024 alaşımı sırasıyla 150, 175 ve 200 °C sıcaklıklarda EKAB işlemlerine tabi tutulmuştur. Su verme işlemi sonrası gevrek bir yapıya sahip alaşıma 150 ve 175 °C sıcaklıklarda uygulanan EKAB işlemleri sonucu numune yüzeylerinde çok derin çatlaklar ile birlikte kırıklar meydana gelmiş, aşırı plastik deformasyon işlemleri başarısızlıkla sonuçlanmıştır. 200 °C’de uygulanan EKAB işleminde ise numune yüzeyinde herhangi bir kırık ya da çatlak oluşmaksızın proses başarı ile gerçekleştirilebilmiştir. Öncü ilk paso aşırı plastik deformasyon çalışmaları sonucunda elde edilen EKAB numunelerine ait görüntüler Şekil 9’da paylaşılmıştır.



Şekil 9. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen öncü EKAB deneyleri sonucu numunelerin görüntüleri: a) 150 °C, b) 175 °C, c) 200 °C

Eş eksenli bir tane yapısının oluşturulması için C rotasında aynı şartlarda, ikinci paso EKAB denemeleri gerçekleştirilmiş fakat yüzeyde oluşan derin çatlaklar ve kırıklardan dolayı aynı şartlardaki ikinci paso denemeleri başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Çatlak ve kırık oluşumları maksimum kayma gerilmesi oluşturacak şekilde 45° açıda meydana gelmiştir. Ayrıca alaşımın ilk paso sonrası içyapısında artan dislokasyon yoğunluğu ve yaklaşık %35 oranında artan sertliği ikinci paso EKAB uygulamasının başarısız olmasına sebep olmuştur. EKAB işlemi için hidrolik pistonunun ilerleme hızını azaltmak ya da EKAB kalıbının sıcaklığını bir miktar artırmak gibi çözümler çatlak ve/veya kırık oluşumlarını engellemede yetersiz kalmıştır. İkinci paso için gerçekleştirilen EKAB işlemlerine ait numunelerin görüntüleri ise Şekil 10'da paylaşılmıştır.

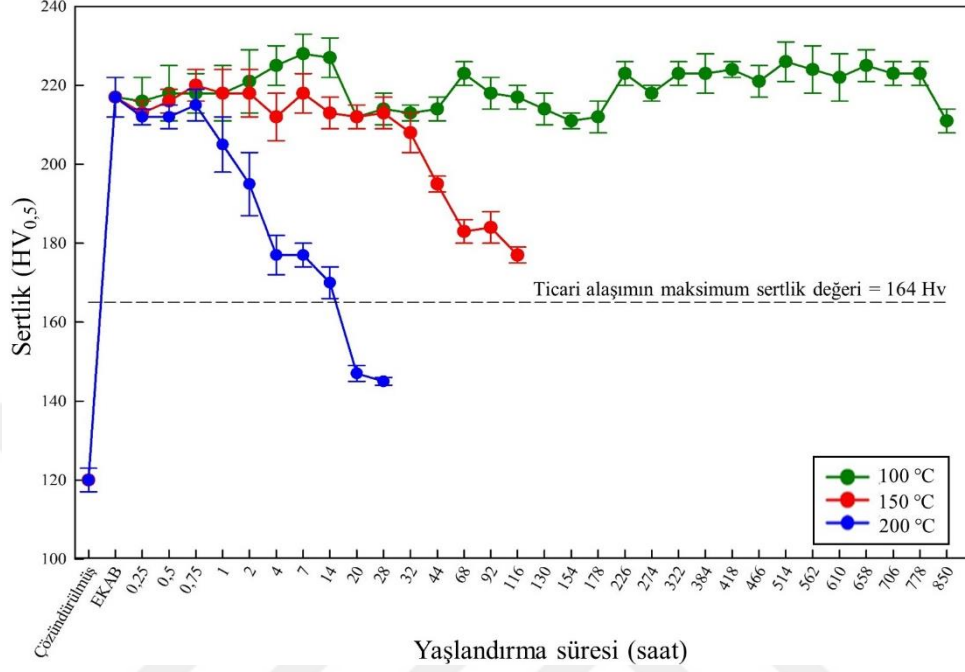


Şekil 10. Farklı sıcaklık ve hızlarda gerçekleştirilen ikinci paso EKAB deneyleri sonucu numunelerin görüntüleri: a) 200 °C, 0,5 mm/s, b) 200 °C, 0,25 mm/s, c) 210 °C’de 0,5 mm/s

Öncü aşırı plastik deformasyon çalışmaları sonucunda, Al 2024 alaşımının başarılı şekilde EKAB işlemine tabi tutulabildiği şartın 200 °C sıcaklıkta ve 0,5 mm/s piston ilerleme hızında tek paso olarak gerçekleştirebildiği belirlenmiştir.

EKAB sonrası yapay yaşlandırma ısıtma işlemi için 100, 150 ve 200 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık ön görülmüş ve tek paso EKAB işlemi sonrası alaşımın sertlik değerine ait karakteristiğinin, ısıtma işlem sıcaklığına ve süresine bağlı değişimi elde edilmiştir. EKAB uygulanmış numunenin 150 ve 200 °C sıcaklıktaki yaşlandırma karakteristikleri incelendiğinde sertlik seviyelerinin kısa bir yaşlandırma süresi sonunda aşırı yaşlanma durumuna geçtiği böylece ya ticari alaşımın sertlik seviyesine ya da daha düşük seviyelere düştüğü belirlenmiştir. Fakat 100 °C’de 850 saat boyunca gerçekleştirilen yapay yaşlandırma ısıtma işlemi boyunca sertlik değerinin EKAB işlemi sonrası bir miktar arttığı ve saçılmalı bir değişim göstererek bu değerini uzun bir süre koruyabildiği tespit edilmiştir. Al

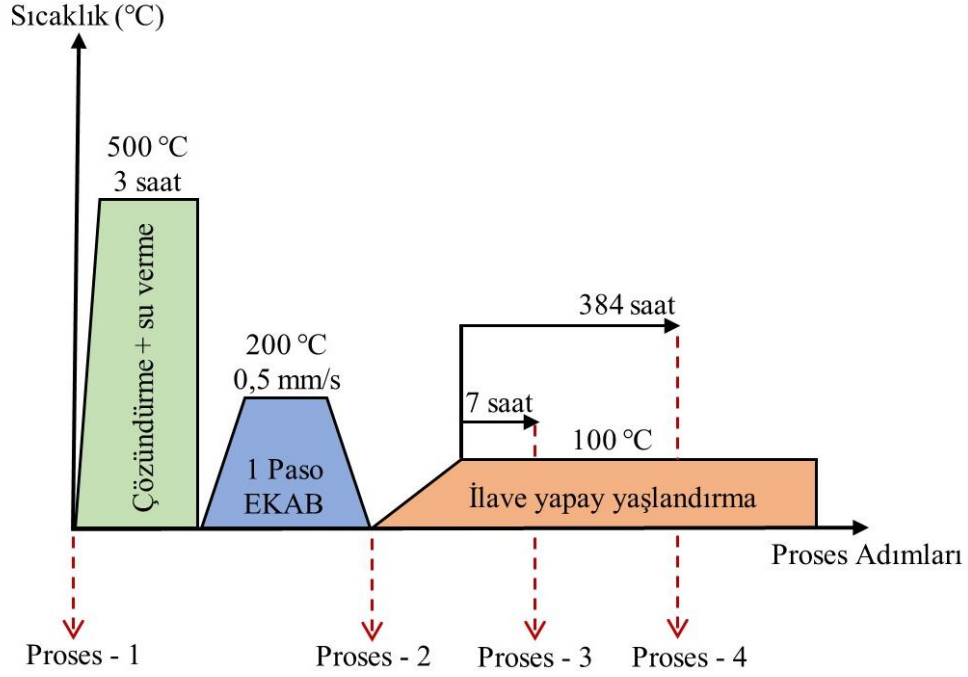
2024 alaşımlarının EKAB sonrası farklı sıcaklıklarda ortaya çıkan yaşlandırma karakteristiğini gösteren eğriler Şekil 11’de paylaşılmıştır.



Şekil 11. Alaşımların EKAB işlemi sonrası 100, 150 ve 200 °C sıcaklıklardaki sertlik karakteristikleri

3.2. Öncü EKAB ve Yaşlandırma Isıl İşlemi Çalışmaların Değerlendirilmesi

Tez kapsamında mikroyapı, mekanik ve tribolojik incelemelerinin yapılacağı proses adımlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen öncü çalışmalar sonucunda, Al 2024 alaşımlarının çözündürme ısısal işlemi sonrası su verildiği koşulda başarılı şekilde EKAB işlemine tabi tutulabildiği parametrenin 200 °C kalıp sıcaklığında ve 0,5 mm/s piston ilerleme hızında olduğu belirlendi. EKAB işlemi sonrasında farklı sıcaklıklarda uygulanan yapay yaşlandırma ısısal işlemleri sonucunda ise alaşımların 100 °C’de 850 saat boyunca gerçekleştirilen sertlik taramasında EKAB sonrası sahip olduğu yüksek sertlik seviyesini koruyabildiği tespit edildi. Öncü çalışmalar sonucunda mikroyapı, mekanik ve tribolojik incelemelerin gerçekleştirileceği dört farklı proses adımı belirlendi ve proses haritasının şematik resmi Şekil 12’de verildi.



Şekil 12. Belirlenen optimum prosesleri gösteren proses haritası

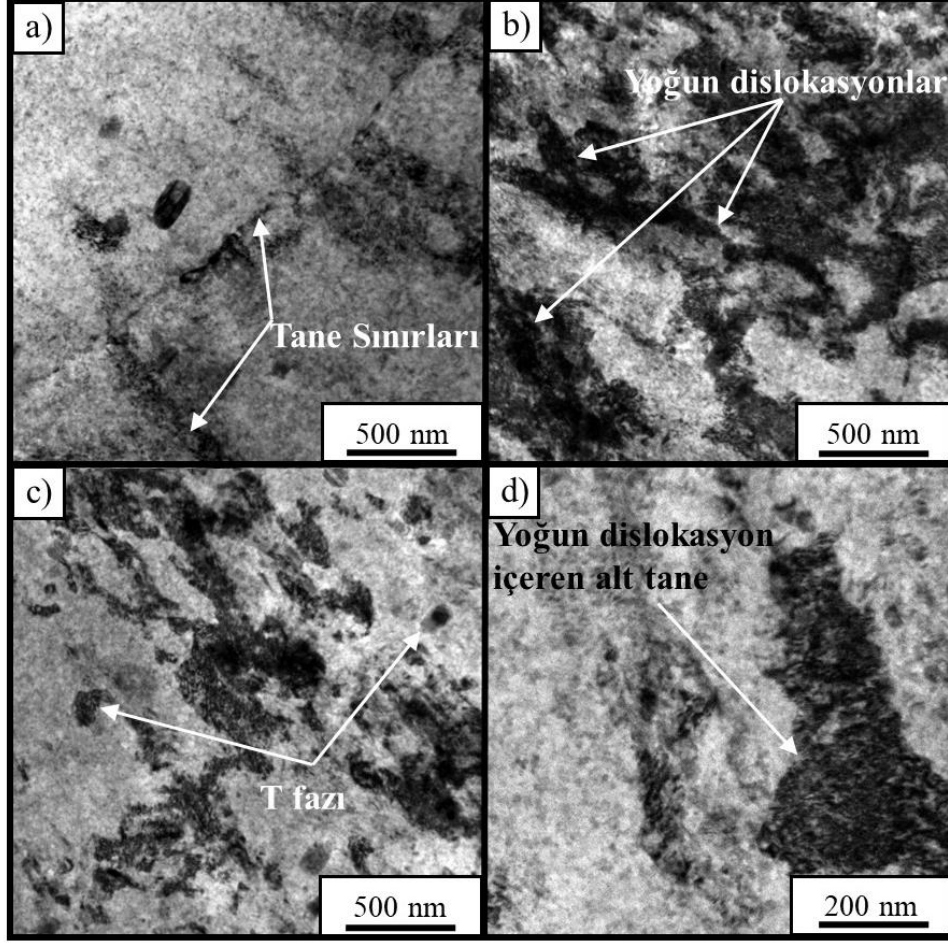
Al 2024 alaşımının ticari koşulu Proses – 1, çözündürme ve su verme sonrası 200 °C’de tek paso EKAB uygulanan koşul Proses – 2, EKAB sonrası 100 °C sıcaklıkta yapılan 7 saatlik pik yaşlandırma Proses – 3 ve alaşımın 384 saatlik uzun süreli termal kararlılığını koruduğu nokta ise Proses – 4 olarak belirlendi.

3.3. Belirlenen Prosesler İçin Yapılan Çalışmalar

3.3.1. Mikroyapısal İnceleme Sonuçları

Ticari koşulda temin edilen Al 2024 – T351 alaşımının çözündürme ve su verme işlemleri sonrası 200 °C sıcaklıkta tek paso EKAB işlemine tabi tutulduğu Proses – 2 koşulunda alaşımın sahip olduğu içyapıya ait TEM görüntüleri Şekil 13’te verilmiştir. Yapıya bakıldığında tek paso sıcak deformasyon sonrasında tane içlerinde ve özellikle tane sınırlarında yoğun dislokasyon bölgelerin oluştuğu ve yapı geneline dağılmış T fazlarının varlığı dikkati çekerken, yaşlanma ürünü olan ikincil fazlar ilgili TEM resimlerinde görülememektedir. Bu durum EKAB işleminin 200 °C’de gerçekleştirilmesi ve oluşturulan deformasyon ile ikincil fazların bu aşamada yapıya çökmesinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca söz konusu ikincil fazların, yaşlanmanın başlangıç evresinde olması sebebiyle

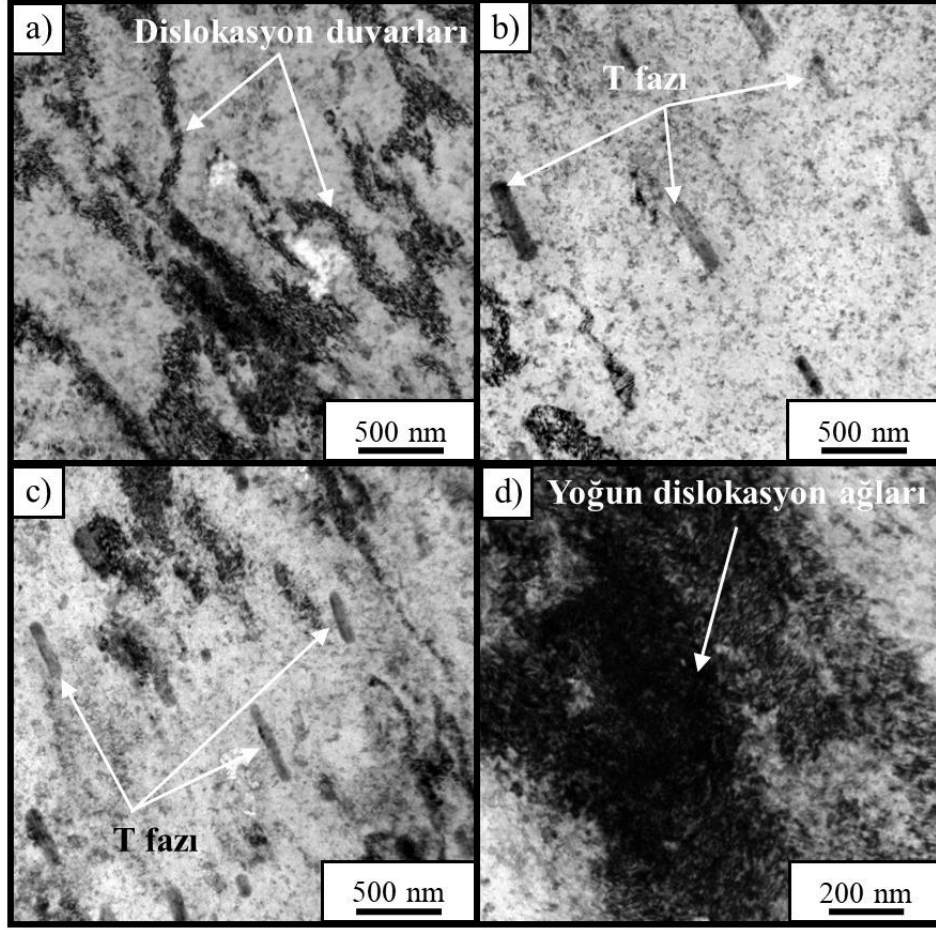
yoğunlukla GPB bölgelerinde oluşması da net bir görüntünün oluşmasını engellemiş olabilir (Gür vd., 2013).



Şekil 13. Proses - 2 koşulu için farklı büyütmelerdeki TEM resimleri

TEM resimleri Şekil 14'te verilen Proses – 3 kapsamında, EKAB sonrası uygulanan 7 saat yaşlandırma işlemi sonrasında da benzer mikroyapının korunduğu ve ilave yaşlandırma işlemiyle deformasyon sonrası olduğu düşünülen yoğun GPB bölgelerinin S' çökeltilerine dönüştüğü düşünülmektedir. Bu yarı kararlı Al_2CuMg fazının doğal yaşlandırılmış formda ve pik sertlik değerinde piyasaya sunulan ticari durumdaki alaşımın içyapısında ortalama 400 nm uzunlukta iğne biçiminde olduğu bilinmektedir (Qu vd., 2022). Aşırı plastik deformasyon işlemi sonrası yaşlandırılan Al 2024 alaşımında ise bu fazların boyutunun ortalama 30-40 nm değerine kadar düştüğü bazı çalışmalar tarafından ortaya konulmuştur (Kotan vd., 2013). Söz konusu bu ikincil fazların boyutsal küçülmesi, yapıdaki dislokasyonlara bağlı oluşan alt tanelerin bu çökeltilerin boyutunu kontrol etmesiyle

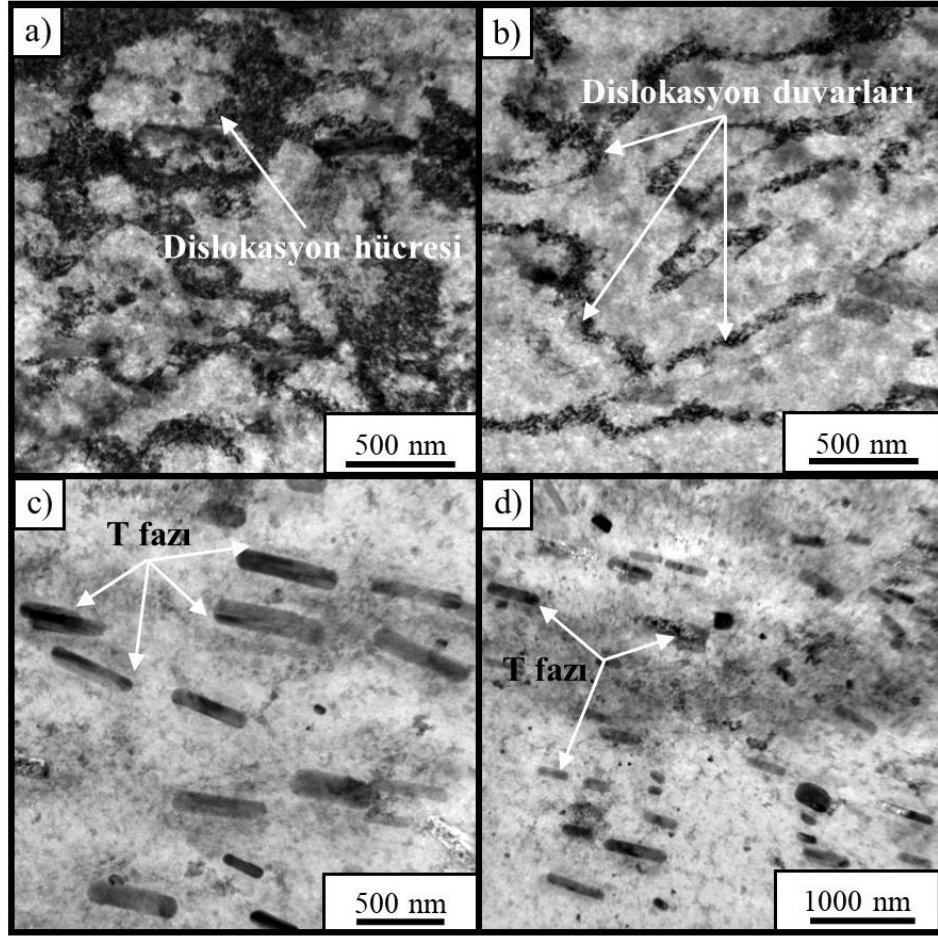
ilişkilendirilmiştir (W. J. Kim vd., 2003; Kotan vd., 2013). Ayrıca, yapıda artan bu dislokasyon yoğunluğunun, EKAB işlemi sonrasında yapılan ilave yaşlandırma işlemi sırasında oluşan ikincil fazların yoğunluğunu da artırdığı düşünülmektedir. Nitekim bazı çalışmalarda dislokasyonca yoğun bölgelerin ikincil fazlar için çekirdeklenme bölgelerini oluşturduğunu ifade edilmektedir (Cheng vd., 2007).



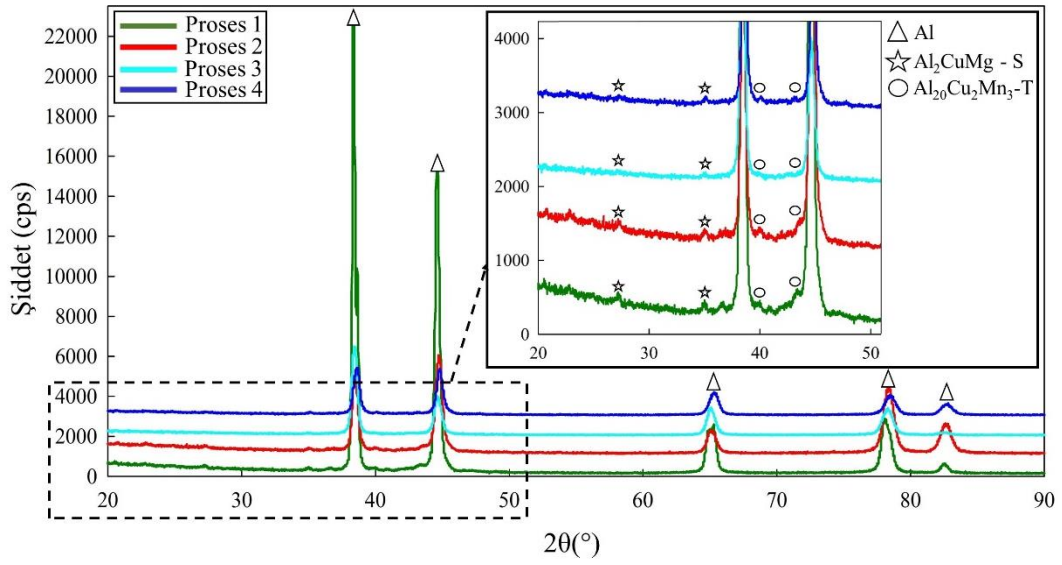
Şekil 14. Proses - 3 koşulu için farklı büyütmelerdeki TEM resimleri

Öte yandan, Proses – 4 kapsamında deforme edilmiş yapı 100 °C’de 384 saat boyunca ilave yaşlandırıldığında ise yapı genelinde dislokasyon yoğunluğunun önemli oranda azaldığı ve dislokasyonların belirli bölgelerde birikerek dislokasyon duvarları oluşturduğu Şekil 15’te görülmektedir. Yapı genelinde hala görülebilir çökelti oluşumlarının gözlenmemesi S’ çökeltilerinin yapıda hala yoğunluğunu korumasıyla ilişkilendirilebilir. Nitekim aynı şartlarda alınan XRD sonuçları da bu durumu doğrular niteliktedir. Alaşımın XRD desenine Şekil 16’da paylaşılmıştır. Ticari alaşımın XRD pik grafiğine bakıldığında S

çöktelerine karşılık gelen noktalarda pik şiddetinin oldukça düşük olması yapıda GPB ve S' çöktelerinin varlığını ifade etmektedir. 200 °C'de uygulanan deformasyon ve ardından yapılan farklı sürelerdeki ilave yaşlandırma işlemleri sonrasında da aynı noktalarda oluşan S çökteli formuna ait pik şiddetlerinin değişmediği net bir biçimde görülebilmektedir. Bu durum aslında deformasyon sonrası (Şekil 13) veya farklı sürelerde yapılan ilave yaşlandırmalar (Şekil 14 ve 15) sonrası alaşımın yapısında var olan çöktelerin aynı formda olduğunu kanıtlar niteliktedir.

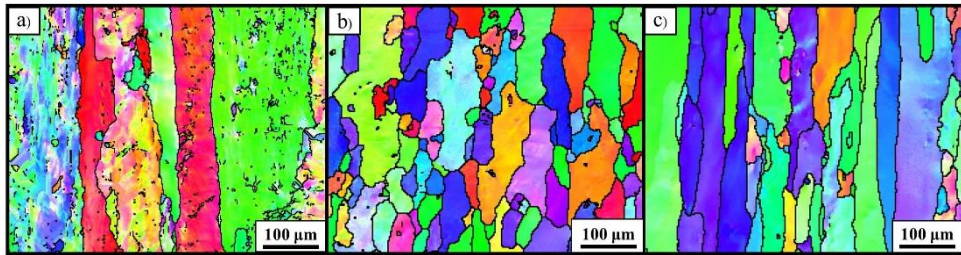


Şekil 15. Proses - 4 koşulu için farklı büyütme ölçeklerindeki TEM resimleri



Şekil 16. Tüm prosesler için XRD desenleri

Öte yandan, ilgili alaşımın tane boyutunun ve yapısının belirlenmesi için TEM görüntülerinin alındığı noktalarda EBSD çalışmaları yapılmış ve EBSD görüntüleri Şekil 17’de paylaşılmıştır. Genel olarak bakıldığında EKAB işlemi sonrasında deformasyon doğrultusunda yönelmiş bir mikroyapının ortaya çıktığı ve yaşlandırma işlemleri sonrasında da benzer yapının korunduğu görülmektedir. EKAB sonrası alaşımın ortalama tane boyutunun $4,9\ \mu\text{m}$ ve ardından uygulanan yaşlandırma işlemleri ile sırasıyla $22,4$ ve $41,2\ \mu\text{m}$ olduğu EBSD çalışmaları ile belirlenmiştir.



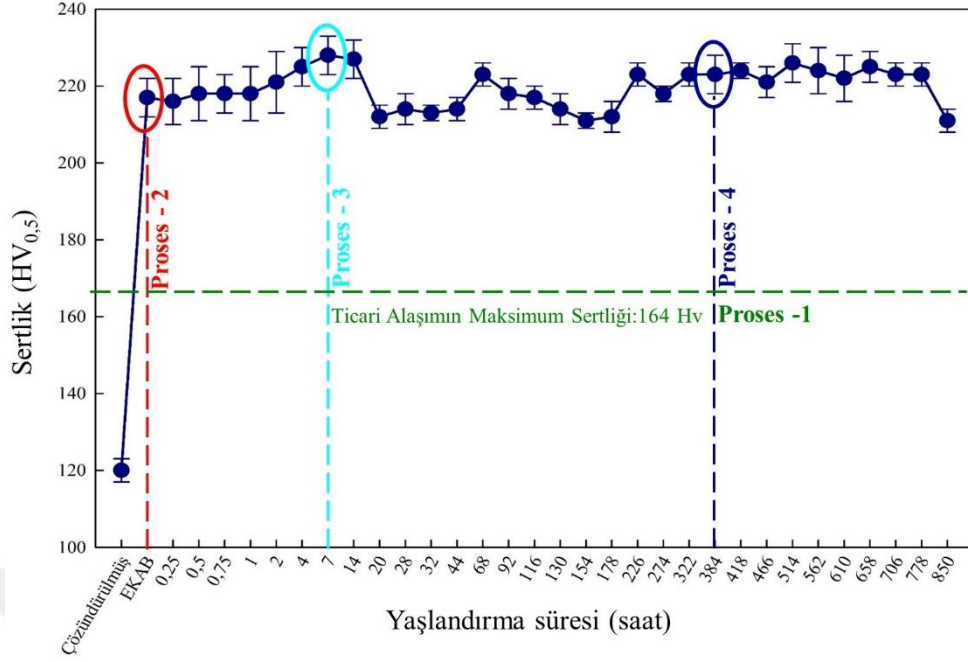
Şekil 17. Alaşımın içyapılarına ait EBSD görüntüleri: a) Proses 2, b) Proses 3, c) Proses 4

3.3.2. Mekanik İnceleme Sonuçları

Al 2024 alaşımına EKAB ve EKAB sonrası 100 °C sıcaklıkta uygulanan yaşlandırma ısıtıl işlemi sonucu elde edilen sertlik karakteristiğine ait eğri Şekil 18’de görülmektedir. Ticari koşulda (sıcak haddeleme sonrası doğal yaşlandırma) 164 Hv sertliğine sahip alaşımın sertliği, çözündürme ve su verme ısıtıl işlemleri ile 120 Hv sertlik değerine gerilemiştir. 200 °C’de uygulanan tek paso EKAB sonucu alaşımın sertlik değeri ticari Proses – 1 durumuna kıyasla yaklaşık % 35 artarak 218 Hv değerine ulaşmıştır. Sertlik değerinde görülen bu ciddi artışın yapıdaki dislokasyon oranındaki artış ve eş zamanlı çökelti oluşumuna bağlı olduğu söylenebilir (Şekil 13).

Ardından deforme edilmiş bu alaşımdan çıkarılan numuneler 100 °C sıcaklık seviyesinde yaşlandırmaya devam edilmiş ve alaşımın sertlik değerinde herhangi bir değişimin ortaya çıkıp çıkmayacağı kontrol edilmiştir. Genel olarak bakıldığında, alaşımın 100 °C’de yapılan yaşlandırma işleminde sertlik değerinin 7 saat sonunda 225 Hv olan pik değerine kadar yükseldiği, daha uzun sürelerde yaşlandırma işlemine devam edildiğinde ise genel olarak 210 - 225 Hv aralığında salınımlı bir değişim sergilediği görülmüştür. 100 °C’de maksimum 850 saat olarak uygulanan yaşlandırma işlemi sonunda da alaşımın hala 210 Hv ortalama sertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum tek paso olarak deforme edilen alaşımın 100 °C’de bir miktar daha yaşlanma davranışı gösterdiği ardından bu sıcaklıkta sertlik değerini çok uzun süre koruyabildiğini göstermiştir.

Deformasyon sonrası elde edilen sertlik değerinin uzun süreli yaşlandırma işlemlerine rağmen sınırlı oranda değişmesi yapıdaki çökelti formlarıyla ilişkilendirilebilir (Şekil 15) (G. Sha vd., 2011). Nitekim deformasyon sırasında yapıda oluştuğu düşünülen erken yaşlandırma evresi ürünü GPB bölgeleri ve S'' çökeltilerinin uygulanan ilave yaşlandırma işlemleri sırasında S' çökeltilerine dönüştüğü, yeni oluşan bu çökeltilerin ise yapıyla bağdaşık çökeltiler olması sebebiyle sertlik değerinde belirgin bir değişimin ortaya çıkmadığı düşünülmektedir (L. Sun vd., 2021).

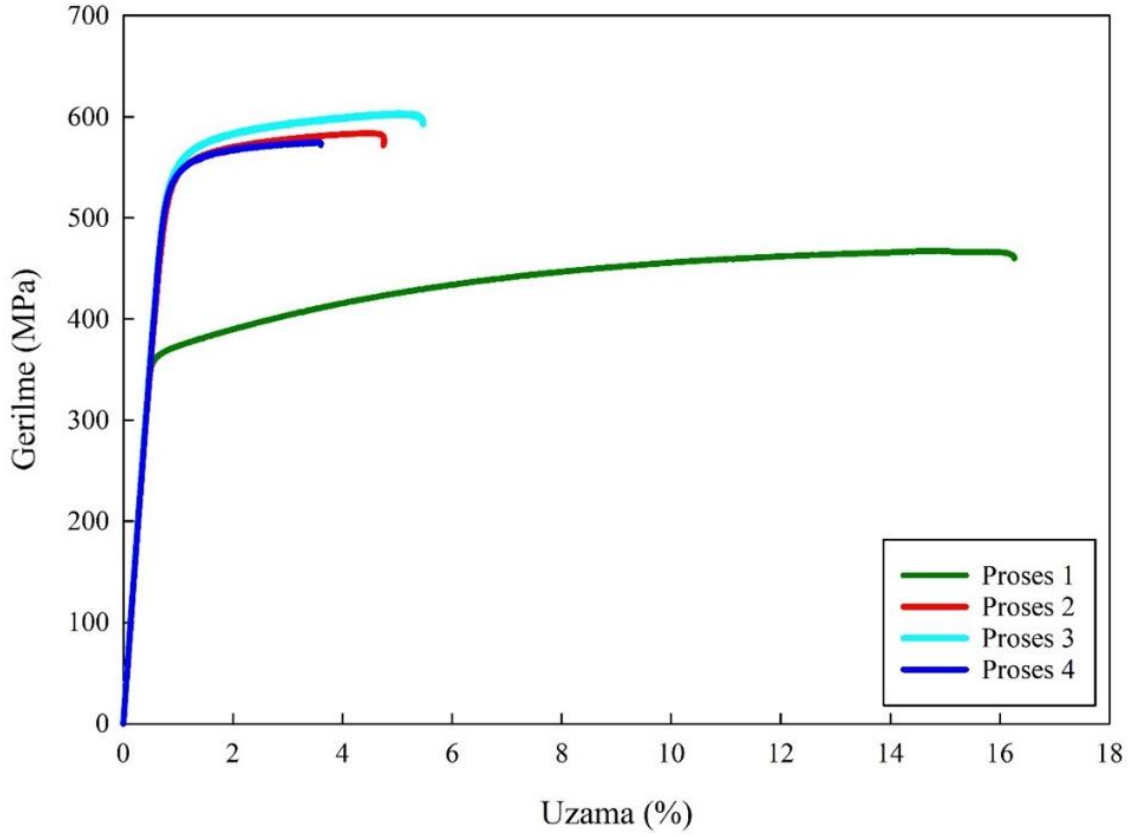


Şekil 18. Alaşımın EKAB işlemi sonrası 100 °C sıcaklıktaki sertlik karakteristiği

Al 2024 alaşımına uygulanan dört farklı proses kapsamında her bir proses için çekme testleri uygulanmış ve sonuçlardan elde edilen gerilme - % uzama eğrileri Şekil 19'da verilmiştir. Eğrilerden elde edilen akma ve çekme gerilmeleri ile kopma uzaması verileri ve sertlik değerleri Tablo 3'te ve ayrıca Şekil 20'de verilmiştir. Proses -1 durumuna kıyasla alaşıma uygulanan tek paso EKAB işleminin akma dayanımında yaklaşık % 50 oranında artış sağlamış fakat süneklik değerini %16'dan %4 seviyesine düşürmüştür. Alaşımın maksimum sertlik değerine sahip olduğu Proses - 3 koşulu ise maksimum akma ve çekme gerilmesi sonuçlarını vermiştir. Uzun süreli yaşlandırma adımı olan Proses - 4 ile EKAB koşulu ile neredeyse aynı mekanik değerlere sahiptir.

Ticari alaşıma kıyasla dayanım özelliklerinde görülen bu ciddi farklılık alaşımın yapısındaki yüksek dislokasyon yoğunluğu (Şekil 13) ve ince ve yapıyla bağdaşık çökelti formlarının oluşturulmasıyla ilişkilendirilebilir. Ticari alaşımın yapısında boyutları 200-500 nm arasında değişen iğnemsî S' çökeltilerinin olduğu bilinirken Proses - 2 kapsamında uygulanan aşırı plastik deformasyon sonrası iğnemsî formdan ziyade daha küçük boyutlu (40-50 nm) S' çökeltilerinin olduğu ifade edilmektedir. Daha küçük boyutlu ve yapı genelinde dislokasyonların yoğun olduğu bölgelerde çekirdeklenecek olduğu düşünülen bu çökeltilerin alaşımın mukavemet kazanmasında önemli bir etkiye sahip olmuş olabilir (Kotan vd., 2013). Aşırı plastik deformasyon sonrası 100 °C'de 7 ve 384 saat olarak

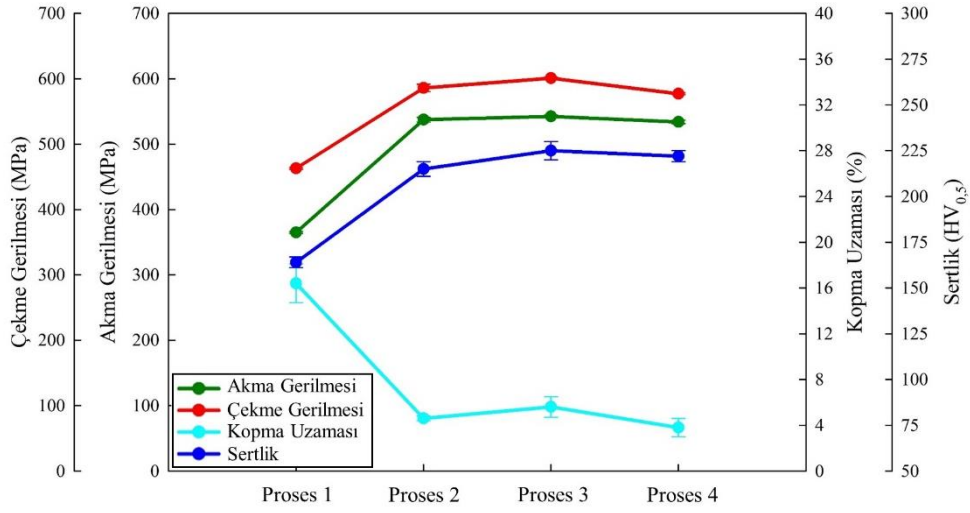
uygulanan yaşlandırma işlemleri sonrasında da sertlik değerlerinde olduğu gibi (şekil 18) alaşımın mukavemet değerinin pek değişmediği dikkati çekmektedir (şekil 19). Süneklik değerlerinde görülen oldukça küçük farklılığın, yaşlandırma etkisiyle yapıdaki çökelti formlarının oransal değişmesiyle ilişkili olabileceği düşünölmektedir.



şekil 19. Tüm prosesler için gerilme - % uzama eğrileri

Tablo 3.A1 2024 alaşımının tüm proses koşullarına ait mekanik özellikler tablosu

Sonuçlar Koşullar	Mekanik Özellikler			
	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (HV _{0,5})
Proses – 1	365,0 ± 1,4	463,0 ± 1,4	16,4± 1,7	164,0 ± 3,0
Proses - 2	537,5 ± 3,5	586,0 ± 5,6	4,6 ± 0,2	218,0 ± 4,0
Proses - 3	542,5 ± 2,1	601,0 ± 1,4	5,6 ± 0,9	225,0 ± 5,0
Proses - 4	534,0 ± 2,8	577,0 ± 1,4	3,8 ± 0,8	222,0 ± 3,0



Şekil 20. Tüm prosesler için mekanik özellikleri gösteren eğriler

3.3.3. Tribolojik İnceleme Sonuçları

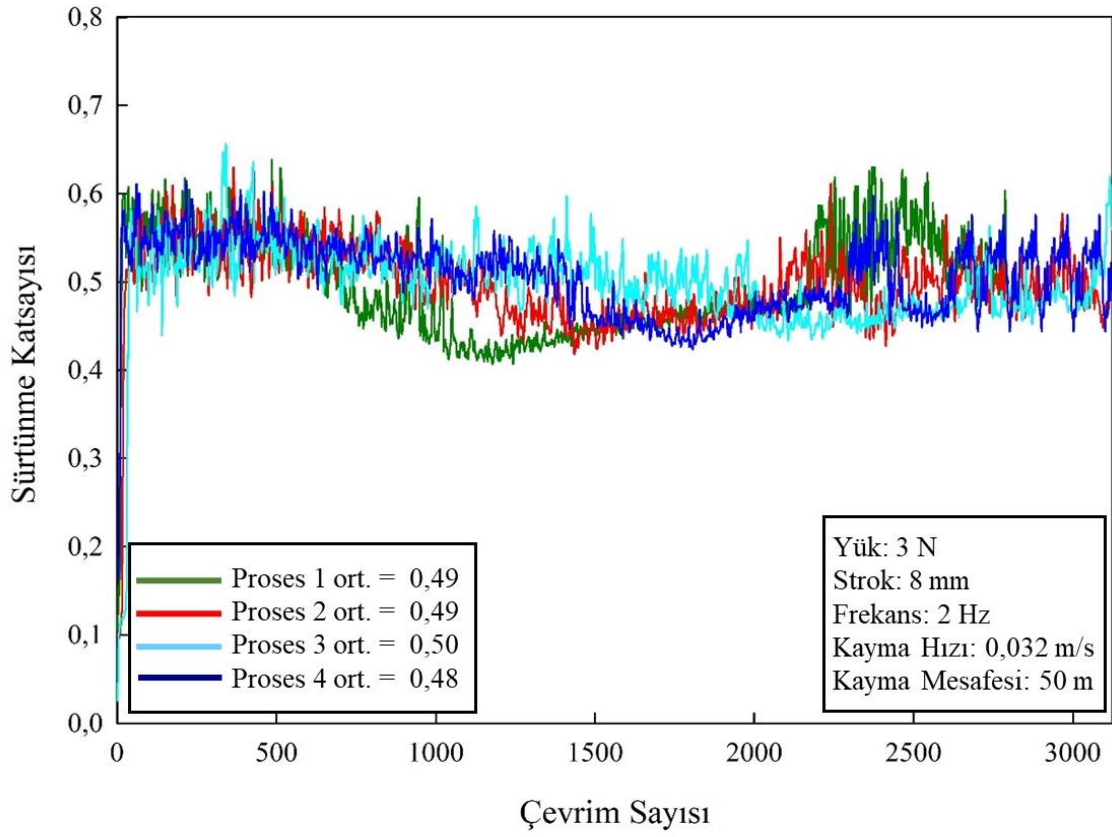
Al 2024 alaşımına ait dört farklı proses koşulu üç farklı yük altında sürtünme ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Tüm testler aynı çevrim sayısı ve karşılık gelen kayma mesafesinde, sabit hız ve frekansta gerçekleştirilmiştir. Kuru ortamda gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayılarının çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 21 - 23'te verilmiştir.

Söz konusu bu eğrilerden, tüm proseslerin sürtünme katsayılarının deneyin başında ani bir şekilde artarak bir tepe noktasına ulaştığı ve ardından ilerleyen çevrim sayılarının boyunca başlangıç durumuna göre nispeten daha kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. İlk hareket

anında deney numunesinin yüzeyi aşındırıcı bilye ile arasında oluşan küçük temas yüzey alanından kaynaklanan yüksek basınç maruz kalmaktadır. Bu yüksek basınç etkisi sonucunda yüzeyde aşırı plastik deformasyon meydana gelerek adezyon etkisi ve malzeme transferine sebep olur (Kapoor & Franklin, 2000; Pürçek vd., 2002; Rigney, 2000). İlerleyen çevrim sayılarında deney numunesi ile aşındırıcı bilye arasındaki temas yüzey alanı artarak sabit bir hale gelmekte ve yüzeyde meydana gelen basınç azalmaktadır. Bununla birlikte, yüzeyde meydana gelen basınç kararlı duruma geldikçe sürtünme katsayısı da nispeten daha kararlı bir saçılım sergilemektedir. Bu aşamada da, deney boyunca yüzeyden kopan parçacıklar numune ile aşındırıcı bilye arasına girerek sürtünme katsayısının dalgalı biçimde değişmesine sebep olmaktadır (Clarke & Sarkar, 1979; Dey vd., 2009; Lee vd., 1987).

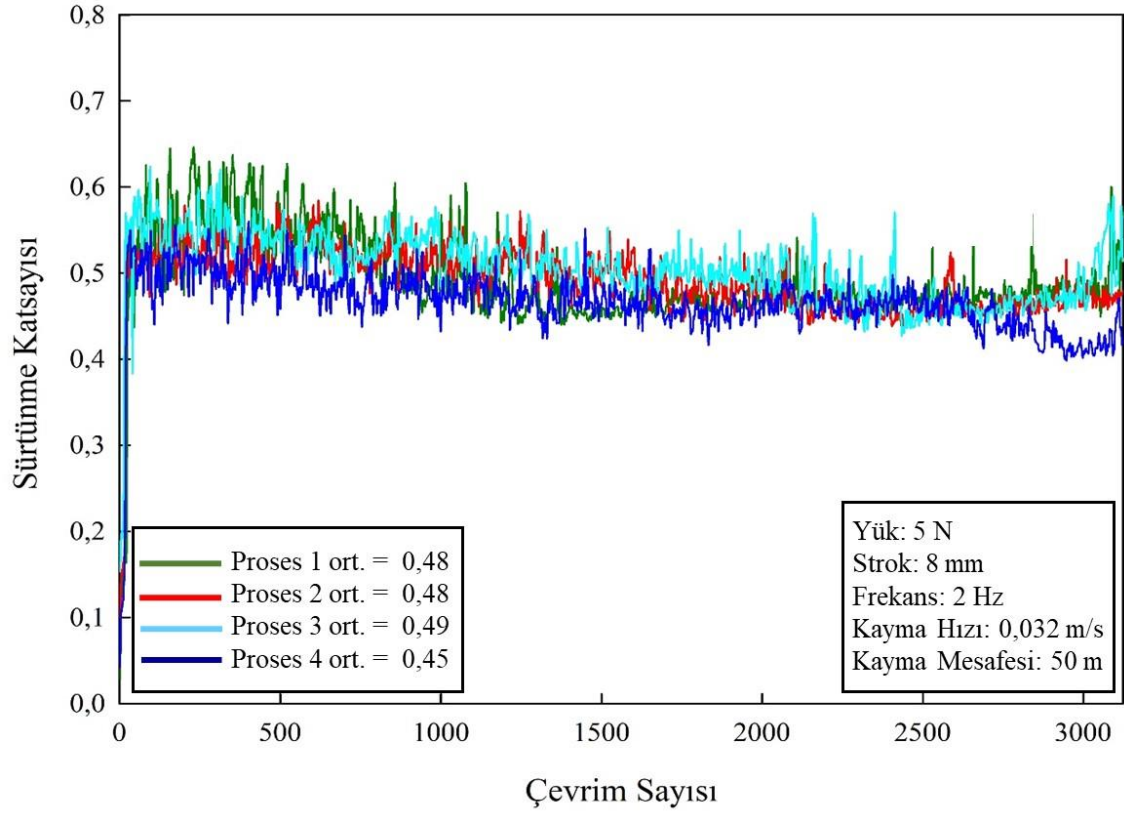
Grafikler incelendiğinde tek paso EKAB işleminin aşımın sürtünme katsayısı üzerinde belirgin bir değişiklik oluşturmadığı, pik yaşlandırma koşulunun ise tüm yüklerde en yüksek sürtünme katsayısı değerini verdiği fakat aşımın uzun süreli yaşlandırılması ile ortalama sürtünme katsayısında bir düşüş olduğu görülmektedir.

3 N yük altında gerçekleştirilen deneylerde, dört farklı proses adımına ait ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde (Şekil 21), sürtünme katsayılarının ortalama değerleri 0,48 ile 0,50 arasında değişmektedir. Uygulanan farklı prosesler başlangıç koşulu olan Proses – 1’e göre sürtünme katsayısı üzerinde kayda değer bir değişim oluşturmamıştır. Tüm prosesler için düşük yükte gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma testleri boyunca aşım yüksek genlikli saçılımlar sergilemiştir.



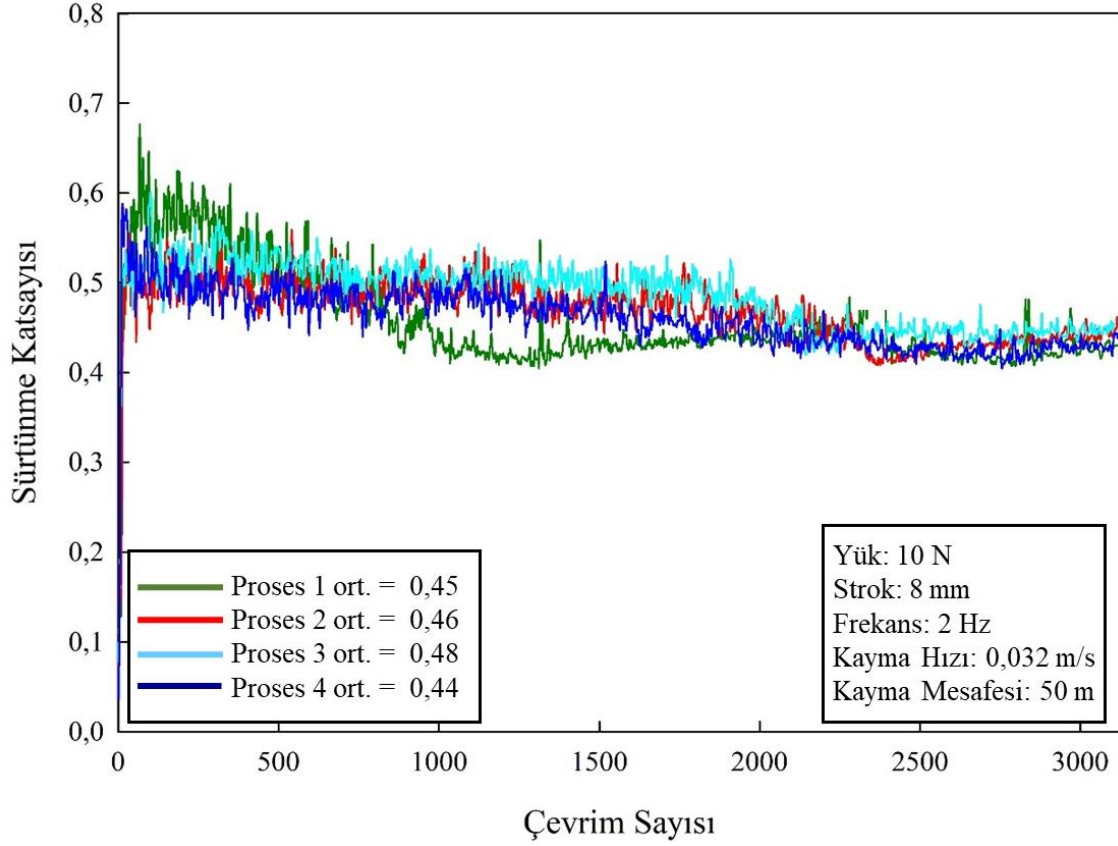
Şekil 21. 3 N yük altında sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

5 N yük altında gerçekleştirilen deneylere ait sürtünme katsayısı – çevrim sayısı grafikleri Şekil 22’de verilmiştir. Testin ilk ve son kısımlarında meydana gelen saçılımların haricinde, sürtünme katsayısının kararlı bir hareket sergilediği görülmektedir. Uygulanan farklı prosesler alaşımın sürtünme katsayısında neredeyse fark oluşturmamış ve sürtünme katsayıları 0,45 ile 0,49 arasında değişmiştir.



Şekil 22. 5 N yük altında sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

10 N yük altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 23'te verilmiştir. Sürtünme katsayısında sadece deneyin başında yüzeylerin birbirine alışma sürecinde bir miktar saçılım olduğu ardından deney boyunca proses adımlarının oldukça kararlı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Ortalama sürtünme katsayıları 0,44 ile 0,48 arasında değişim göstermektedir.



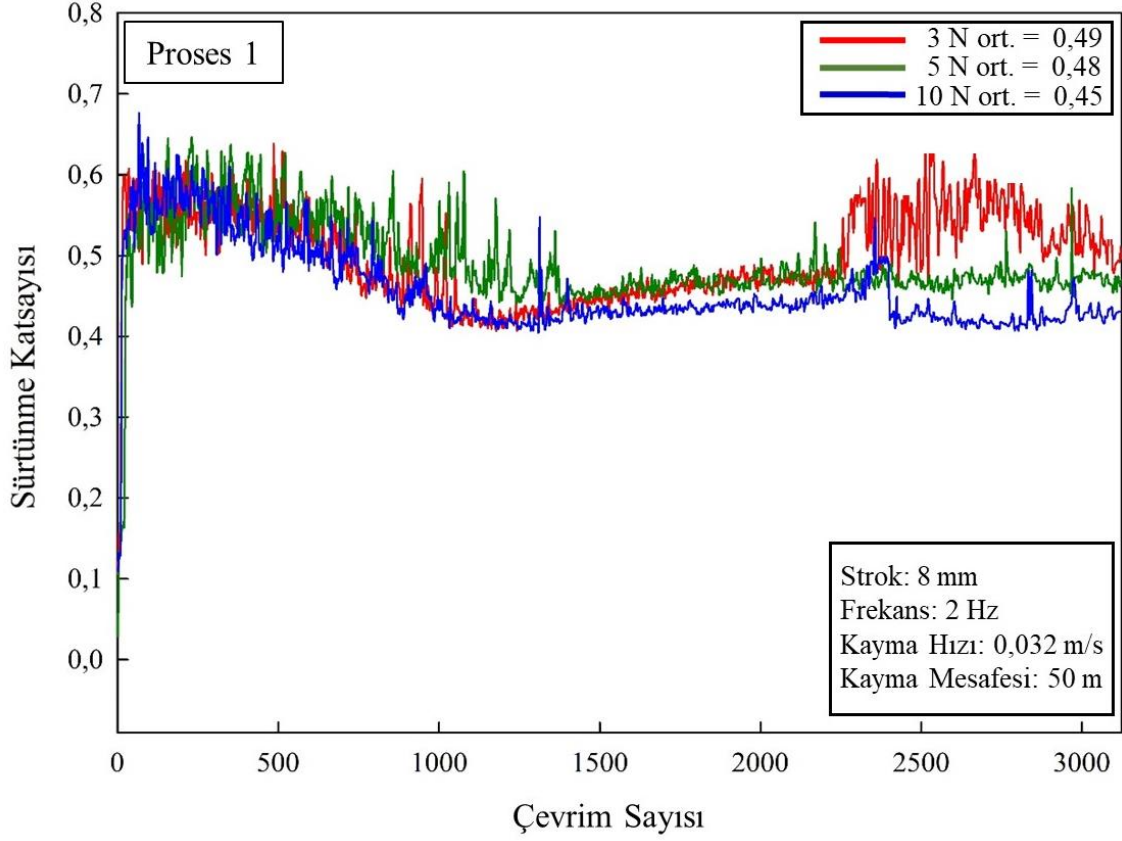
Şekil 23. 10 N yük altında sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

Aynı proses adımı için farklı yüklerin etkisini incelemek amacıyla oluşturulan sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 24-27’de verilmiştir.

Tüm sürtünme katsayısı – çevrim sayısı grafiklerinde uygulanan proseslerden bağımsız olarak en yüksek genlikli saçılımların en düşük yük altında gerçekleştirilen testlerde meydana geldiği ve artan yük ile birlikte bu saçılımların azalarak kararlı bir davranış sergilediği görülmektedir.

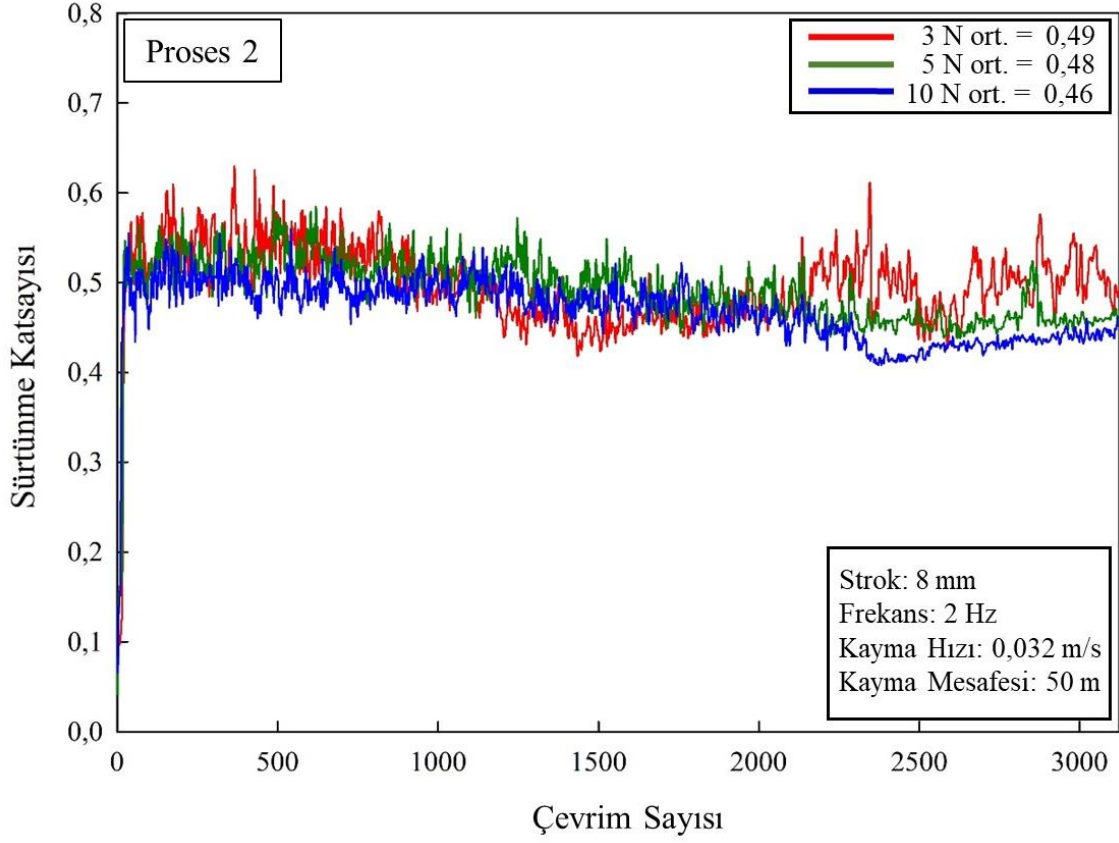
Proses – 1 koşuluna ait üç farklı yükte gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait grafikler Şekil 24’te paylaşılmıştır. Alaşımın her üç yükte de testin başlangıç aşamasında sürtünme katsayısının ani bir artış gösterdiği fakat rodaj döneminden sonraki yaklaşık bin çevrim boyunca kararlı bir davranış sergilediği görülmüştür. Deneyin son aşamasında dalgalı değişimlerin meydana geldiği ve bunun düşük yükte daha fazla olduğu görülmektedir. Proses – 1 koşulunun tüm deneyler boyunca sürtünme katsayısı değerleri 0,45 ile 0,49 arasında değişmekte olup, uygulanan yükün sürtünme katsayısı üzerinde bariz

bir etkisinin olmadığı fakat artan yük ile birlikte sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir.



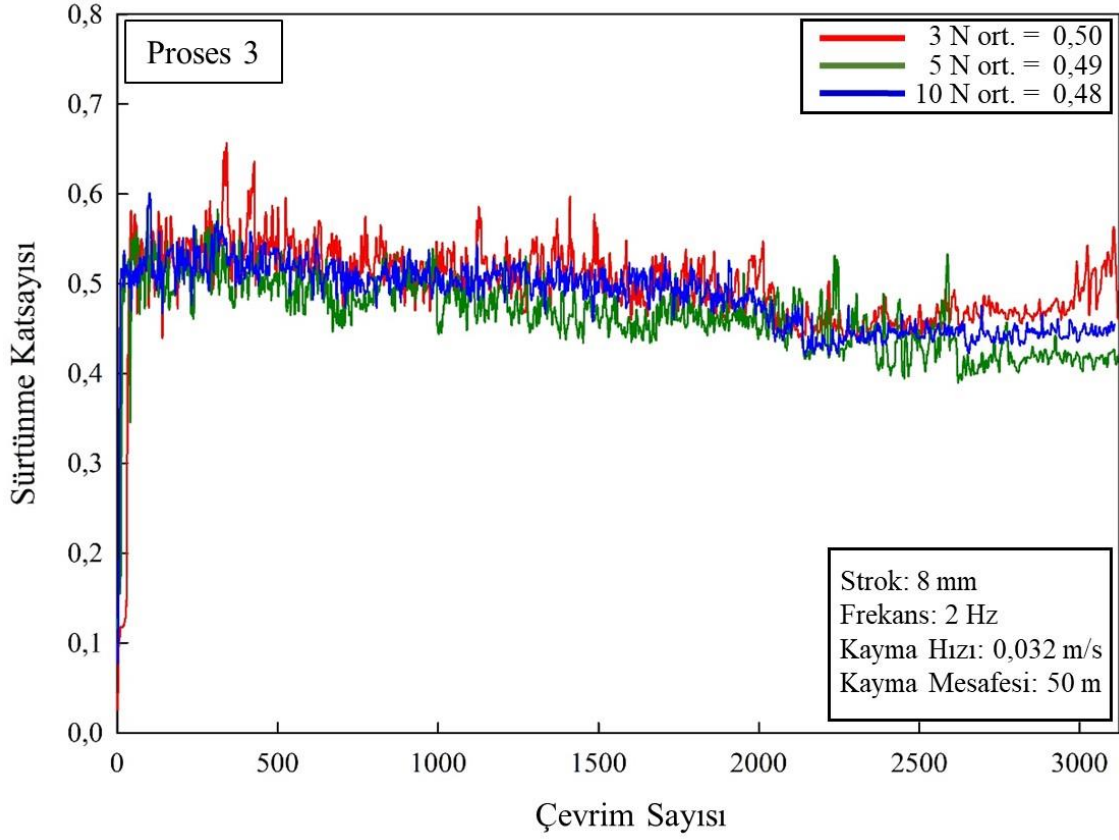
Şekil 24. Proses – 1 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

Proses – 2 kapsamında ticari durumdaki Al 2024 alaşımına 200 °C sıcaklıkta uygulanan tek paso EKAB işleminin alaşımın sürtünme katsayısı değerlerinde belirgin bir fark oluşturmadığı fakat sürtünme katsayısının Proses – 1 adımına kıyasla testin başlangıcından yaklaşık iki bin çevrim sayısına kadar olan kısmında homojen bir saçılım sergilediği Şekil 25’te görülmektedir. Testin sonunda meydana gelen saçılımlar neredeyse Proses – 1 ile aynı olup (Şekil 24), düşük yükte yüksek saçılım oluşma trendi devam etmiştir. Proses – 2 adımı da artan yükün sürtünme katsayısını azalttığı, genel olarak sürtünme katsayılarının 0,46 ile 0,49 arasında değiştiği tespit edilmiştir.



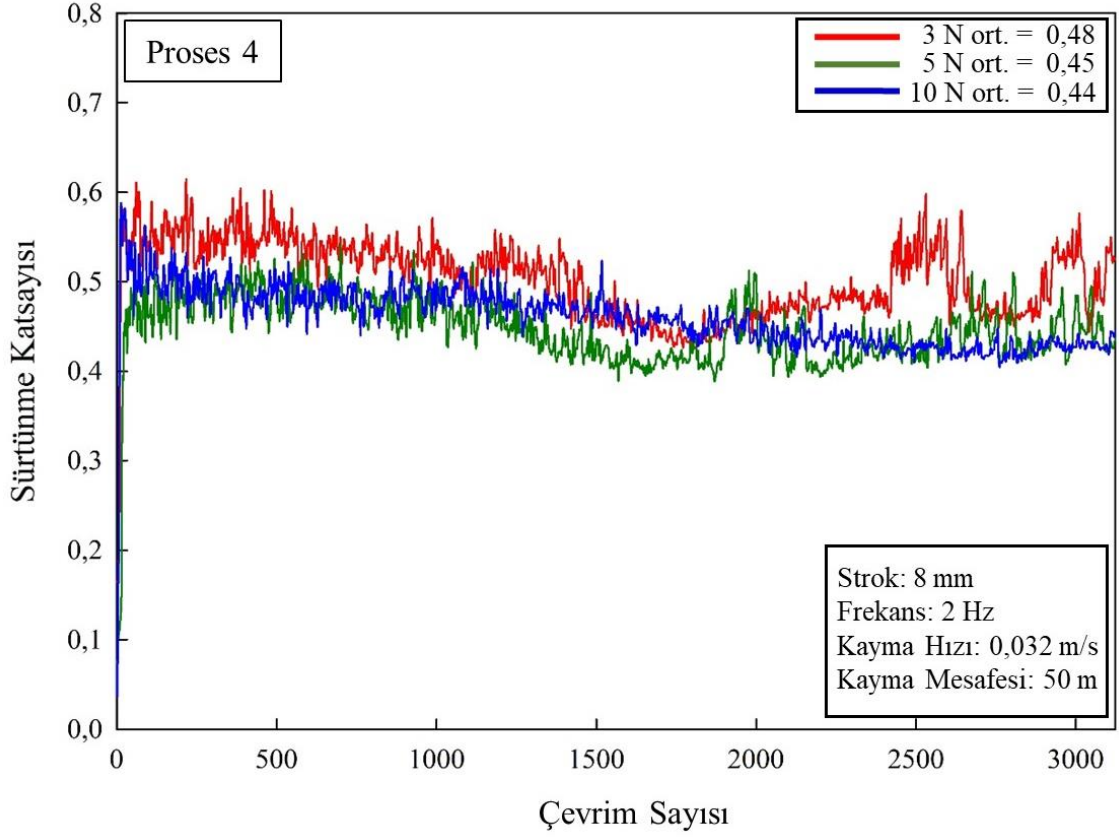
Şekil 25. Proses – 2 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

Proses – 3 koşulunun üç farklı yükteki ortalama sürtünme katsayısını gösteren eğriler Şekil 26’da verilmiştir. Tüm aynı proses adımıyla farklı yüklerde gerçekleştirilen kuru sürtünme testleri arasında en homojen saçılımın bu koşulda (EKAB sonrası 100 °C sıcaklıkta 7 saatlik pik yaşlandırma) meydana geldiği görülmektedir. Testin son bölümünde düşük yükte gerçekleştirilen sürtünme katsayısında belirgin bir dalgalanma meydana gelerek sürtünme katsayısını artırırken tüm sürtünme katsayıları 0,48 ile 0,50 arasında değişkenlik göstermiştir.



Şekil 26. Proses – 3 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

Proses – 4 adımı için üç farklı yükte gerçekleştirilen deneylerine ait sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler incelendiğinde ise testin başlangıcından itibaren 3 N yükün daha yüksek bir sürtünme katsayısına sahip olduğu aynı zamanda büyük genlikli saçılımlar sergilediği görülmektedir. 10 N yüke ait eğri incelendiğinde ise testin başından sonuna kadar kararlı bir saçılım sergilediği, fakat üç yük arasında en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu görülmektedir. EKAB sonrası uzun süreli yaşlandırma koşulunda da uygulanan yüklerin sürtünme katsayısında belirgin bir fark oluşturmadığı, en düşük yükte en yüksek, en yüksek yükte ise en düşük olmak üzere 0,44 ile 0,48 arasında değişen sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir.

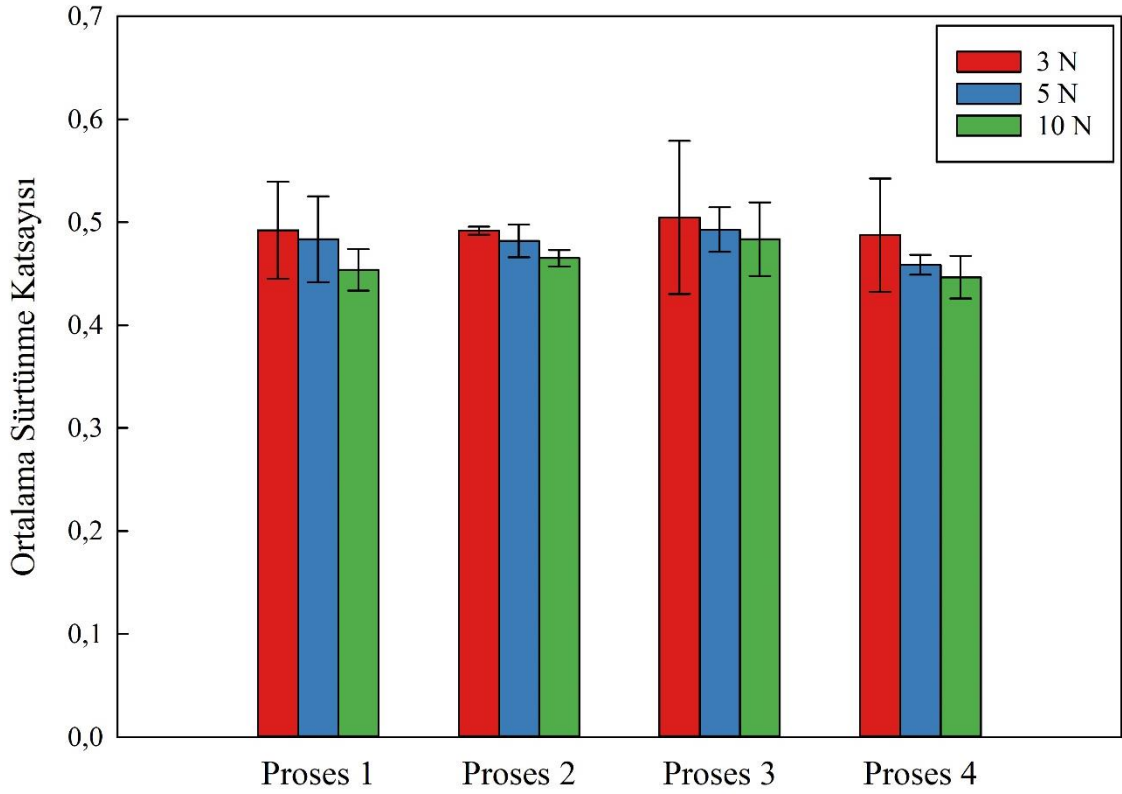


Şekil 27. Proses – 4 koşulunda 3, 5 ve 10 N yük altındaki sürtünme katsayılarının artan çevrim sayısına göre değişimini gösteren eğriler

Dört farklı proses adımı için üç farklı yüke gerçekleştirilen sürtünme aşınma testleri sonucu elde edilen ortalama sürtünme katsayılarını veren bar grafikleri Şekil 28’de paylaşılmıştır. Her bir proses adımı için ortalama sürtünme katsayıları 0,44 ile 0,50 arasında değişkenlik göstermekte olup ne uygulanan yükler ne de farklı prosesler sürtünme katsayıları üzerinde belirgin bir fark oluşturmamaktadır. Fakat tüm proses adımlarında artan yükün kademeli biçimde ortalama sürtünme katsayısını azalttığı göze çarpmaktadır. Bu gerçek temas alanındaki artıştan kaynaklanmış olabilir (Rigney, 2000).

Tablo 4.Al 2024 alaşıma ait tüm koşulların 3, 5 ve 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme aşınma testlerinde ölçülen ortalama sürtünme katsayıları

Sonuçlar Koşullar	Ortalama Sürtünme Katsayıları		
	Yük (N)		
	3	5	10
Proses – 1	0,49 ± 0,04	0,48 ± 0,04	0,45 ± 0,02
Proses - 2	0,49 ± 0,01	0,48 ± 0,02	0,46 ± 0,01
Proses - 3	0,50 ± 0,07	0,49 ± 0,02	0,48 ± 0,03
Proses - 4	0,48 ± 0,05	0,45 ± 0,01	0,44 ± 0,02



Şekil 28.Ortalama sürtünme katsayılarını gösteren bar grafikleri

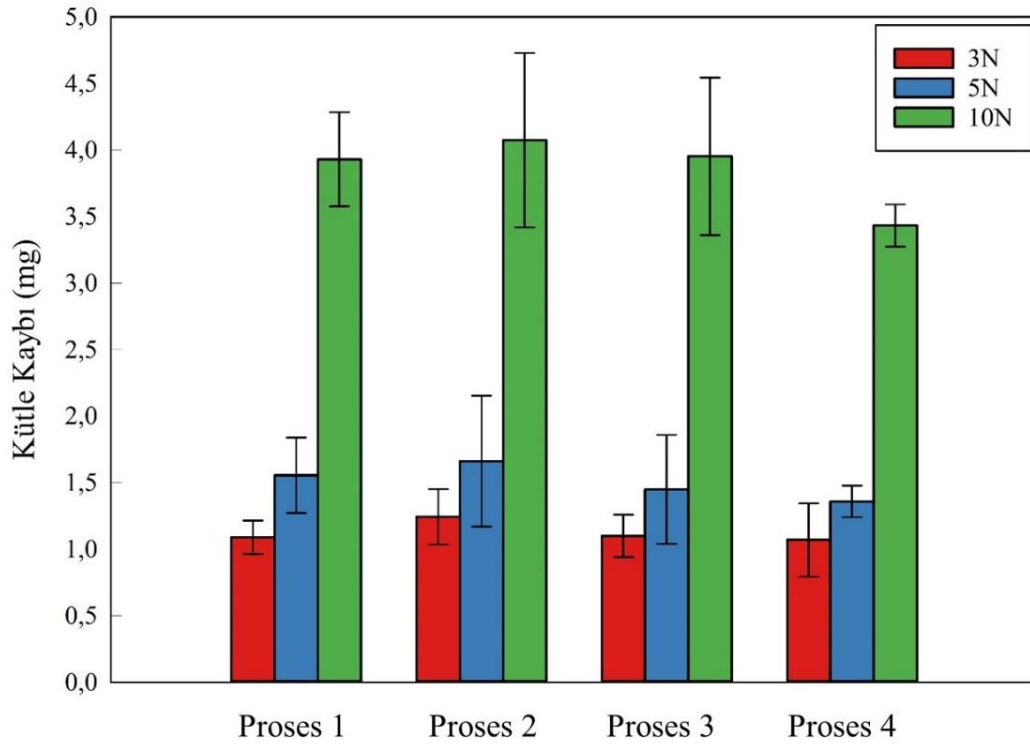
Sürtünme aşınma testleri boyunca, sabit hız ve çevrim sayısında, farklı proses adımları ve yüklere ait kütle ve hacim kayıplarını gösteren bar grafikleri sırasıyla Şekil 29 ve 30’da paylaşılmıştır. Farklı yükler altında proses adımlarının kütle kaybı değişimlerini gösteren bar grafikleri incelendiğinde, kütle ve hacim kayıplarının her bir proses adımı için artan yük

ile birlikte arttığı görülmektedir. Hem kütle kaybı hem de hacim kaybı eğrilerine göre alaşımın en düşük aşınma direnci sergilediği koşul tek paso EKAB uygulanmış Proses – 2 olmuştur. Archard eşitliğine (Zhou vd., 2008) göre aşınma oranı malzemenin sertliği ile ters orantılıdır. Fakat burada sertliği artan malzemenin aşınma direnci düşmüştür. EKAB sonrası alaşımın sertlik değerinde meydana gelen % 30'luk artışa rağmen aşınma direncinin azalması sürtünme aşınma testi boyunca meydana gelen aşınma parçacıklarının yüzeye tekrar yapışmaması ya da sıvanamamış olmasından kaynaklanmış olabilir (Savaşkan & Alemdağ, 2010; J. Zhang & Alpas, 1993). Öyle ki, Al alaşımlarına uygulanan aşırı plastik deformasyon işlemlerinin alaşımın aşınma direncini azalttığına dair pek çok çalışma mevcuttur ve Al alaşımının EKAB işlemi sonrası aşınma direncinin azalması kararsız ve yüksek enerjili tane sınırlarının oluşması ve deformasyon sertleşmesi kapasitesinin azalmasına dayandırılmıştır (Eizadjou vd., 2009; Talachi vd., 2011; C.T. Wang vd., 2011; S. Divya vd., 2018; Cetlin vd., 2010)

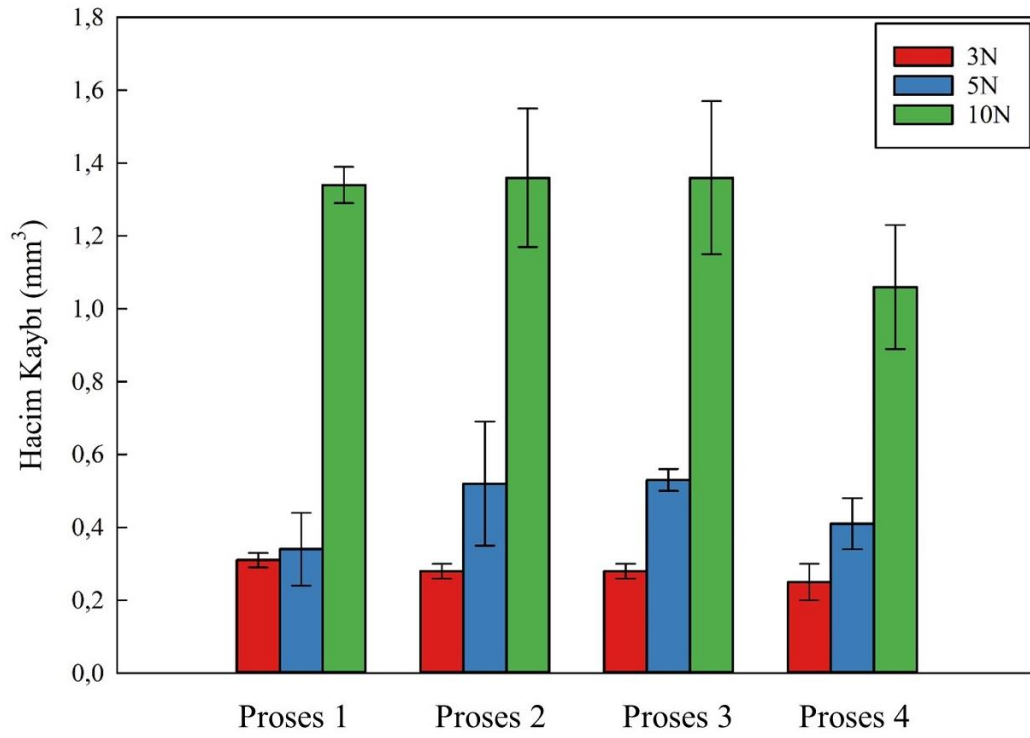
Ardışık proses adımlarında uygulanan yaşlandırma ısı işlemlerinin etkisiyle kütle kaybında bir azalma ve aşınma direncinde bir artış meydana gelmiştir. Proses – 4 koşulu üç farklı yük taramasında da alaşımın en yüksek aşınma direnci gösterdiği adımdır. Bu durum uzun süreli yaşlandırma ile alt taneli ve homojen bir içyapının elde edilebilmesi, iç gerilmelerin ve dislokasyonların azalmasından kaynaklanmış olabilir (S. P. Divya vd., 2018; Gao vd., 2012; Kotan vd., 2013).

Tablo 5. Al 2024 alaşımına ait tüm koşulların 3, 5 ve 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme aşınma testlerinde ölçülen kütle ve hacim kayıpları

Sonuçlar Koşullar	Yüke Göre Ortalama Kütle ve Hacim Kayıpları					
	Kütle Kaybı (mg)			Hacim Kaybı (mm ³)		
	3 N	5 N	10 N	3 N	5 N	10 N
Proses - 1	1,09±0,12	1,55±0,28	3,93±0,35	0,31±0,02	0,34±0,10	1,34±0,05
Proses - 2	1,24±0,20	1,66±0,49	4,07±0,65	0,28±0,02	0,52±0,17	1,36±0,19
Proses - 3	1,10±0,16	1,44±0,40	3,95±0,59	0,28±0,02	0,53±0,03	1,36±0,21
Proses - 4	1,07±0,27	1,36±0,11	3,43±0,15	0,25±0,05	0,41±0,07	1,06±0,17



Şekil 29. Kütle kayıplarını gösteren bar grafikleri



Şekil 30. Hacim kayıplarını gösteren bar grafikleri

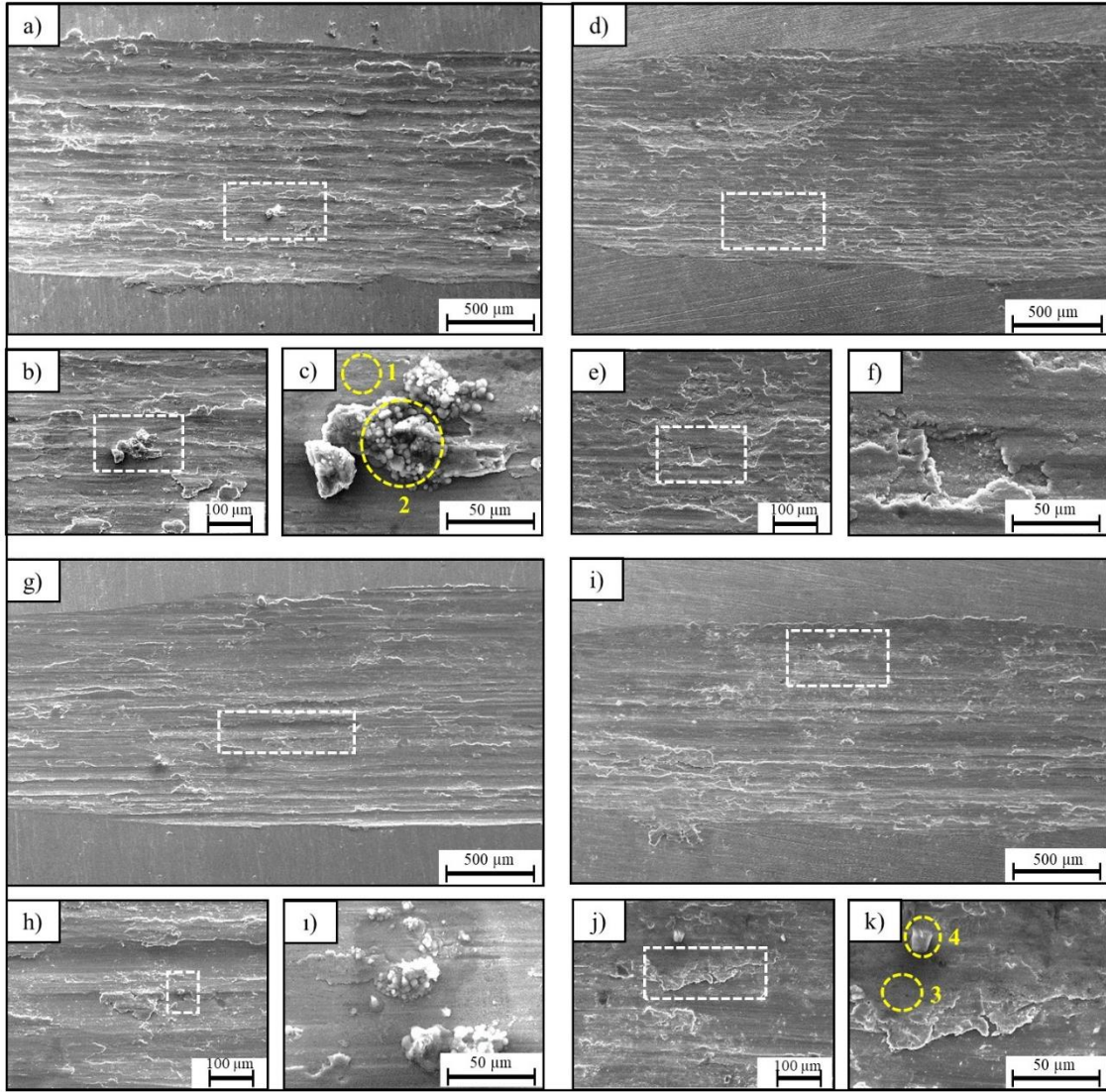
Al 2024 alaşımının dört farklı proses adımı için u farklı yük altında gerçekleştirilen sürtünme – aşınma testleri sonucu meydana gelen etkin aşınma mekanizmalarının belirlenmesi için numune yüzeyleri, aşındırıcı bilyeler ve aşınma parçacıkları SEM ile incelenmiş, belirli noktalarda EDS analizinden yararlanılmıştır. Dört farklı proses adımı için 3 N yük altında elde edilen aşınma yüzeyleri şekil 31’de, 5 N yük altında elde edilen aşınma yüzeyleri şekil 34’te ve 10 N yük altında elde edilen aşınma yüzeyleri ise şekil 37’de gösterilmiştir. İlgili SEM görüntülerine ait EDS analiz sonuçları ise sırasıyla Tablo 6, 9 ve 12’de paylaşılmıştır. Sürtünme aşınma testlerinde kullanılan bilyelerin yüzeylerine ait SEM görüntüleri şekil 32, 35 ve 38’de verilmiştir. Söz konusu yüzeylerin EDS sonuçları ise sırasıyla Tablo 7, 10 ve 13’te sunulmuştur. Ayrıca sürtünme ve aşınma testleri boyunca oluşan aşınma parçacıklarına ait SEM görüntüleri şekil 33, 36 ve 39’da ve EDS analizleri ise Tablo 8, 11 ve 14’te paylaşılmıştır.

Genel olarak aşınma deneyleri sonrasında yüzeylerde geniş adezyon tabakaları ve bu tabakaların kayma sırasında parçalanması ile meydana gelen delaminasyon (yüzeyden pulcuklar halinde kopmalar) bölgelerinin bulunduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan alaşımın söz konusu yüzeylerinde kalın ve ince çiziklerin yanı sıra oksidasyon tabakaları da grlmştir. Aşınma yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen EDS analizlerine göre yüzeylerde yoğunlukla alüminyum ve alaşımın diğer bileşenleri ile birlikte oksijen bulunduğu, kısmi olarak aşındırıcı bilyeden yüzeye demirin sıvandığı tespit edilmiştir. Bu etkin aşınma mekanizması olan adezyon sonucu meydana gelen yüzeyler arası malzeme transferi ile bilyenin de aşınarak malzeme yüzeyine sıvandığını kanıtlamaktadır (Tablo 6, 9 ve 12) (Torabian vd., 1994). Ayrıca bilye yüzeylerinde de adezyon tabakaları görülmektedir (şekil 32, 35 ve 38). Bu bulgu aşınma testi boyunca alaşımların yüzeylerinden kopan aşınma parçacıklarının ilk olarak aşındırıcı bilyenin yüzeyine sonrasında da geri dönüp tekrardan numune yüzeyine yapıştığını doğrulamaktadır (Dey vd., 2009). Bilye yüzeylerindeki sıvama tabakalarından alınan EDS sonuçlarında ise alaşımın sahip olduğu kimyasal bileşime yakın sonuçlar tespit edilmesi parçacıkların yüzeyler arasında transfer edildiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca bu adezyon katmanlarında da kısmi oranda oksijen bulunmaktadır (Tablo 7, 10 ve 13). Yüzeylerde oluşan oksidasyon tabakaları delamine olmuş parçaların yüzeye tekrar sıvanması ve deney sırasında oluşan sürtünme ısısının etkisiyle oksit oluşumunun meydana gelmesinden kaynaklanabilir (Wilson & Alpas, 1999; Xu vd., 2007). Oksitlenerek parçalanan bazı parçacıkların aşınma deneyi sırasında meydana gelen plastik deformasyon ile ufalanarak aşınma yolu üzerinde bulunması ise aşınma yüzeyinde yer yer görülen

çiziklerin oluşmasına sebep olmuştur. Bu durumun EDS sonuçlarında görülen oksijen konsantrasyonunun varlığı ile uyumlu olduğu görülmüştür (Tablo 6, 9 ve 12). Yük artışı ile birlikte aşınma izlerinin genişlediği görülmektedir. Bu genişleme yük arttıkça aşındırıcı bilyenin daha geniş bir batma alanı oluşturmamasından kaynaklanmaktadır (Şekil 37). Bu durum ölçülen hacim ve kütle kaybı değerleri ile doğrulanmaktadır (Şekil 29 ve 30). Ayrıca artan yük sonucu yüzeylerde sıvama mekanizmasının arttığı da görülmektedir (Şekil 37).

Genel olarak alaşımın en sünük olduğu koşul olan Proses – 1’e ait SEM görüntülerinde sıvama tabakaları yaygın şekilde gözükmemektedir. Tek paso EKAB uygulaması sonrası en düşük aşınma direncinin sergilendiği Proses – 2 koşuluna ait görsellerde abrazyon aşınma sonucu kalın ve ince çiziklerin yanı sıra yüzeyden ayrılmalar mevcuttur. Alaşımın en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu Proses – 3 koşulu derin oyuklar ve çiziklerin yanı sıra adezyon tabakalarından oluşmaktadır. Alaşımın termal kararlılığını uzun süre koruyabildiği Proses – 4 koşulunda ise sıvama tabakalarının yanı sıra oksit katmanları da görülmektedir.

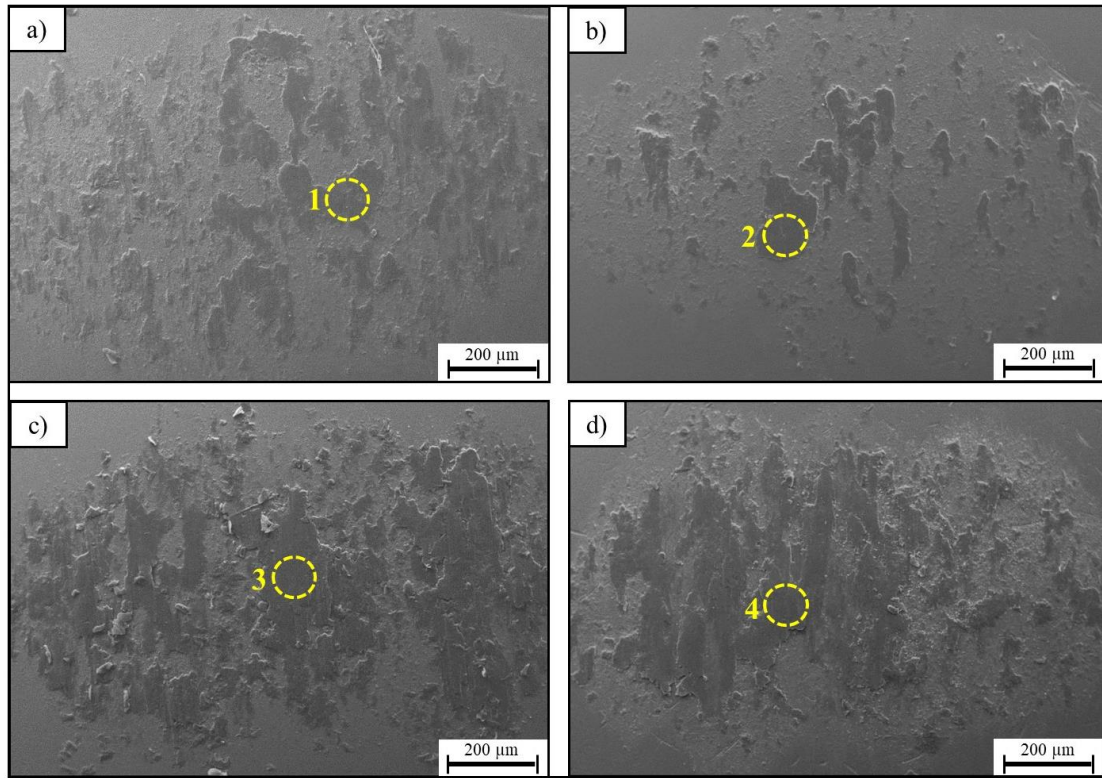
Aşınma sırasında yüzeylerden kopan parçacıklar genellikle irili ufaklı yapılarda ve yassı biçiminde görülürken (Şekil 33, 36 ve 39), yapılan EDS analizleri sonucu aşındırıcı bilyeler üzerinden alınan EDS analizleri ile benzer kimyasal bileşimlere sahip oldukları belirlenmiştir (Tablo 8, 11 ve 14).



Şekil 31. 3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a-c) Proses - 1, (d-f) Proses - 2, (g-i) Proses - 3 ve (i-k) Proses - 4.

Tablo 6. 3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin EDS analizleri

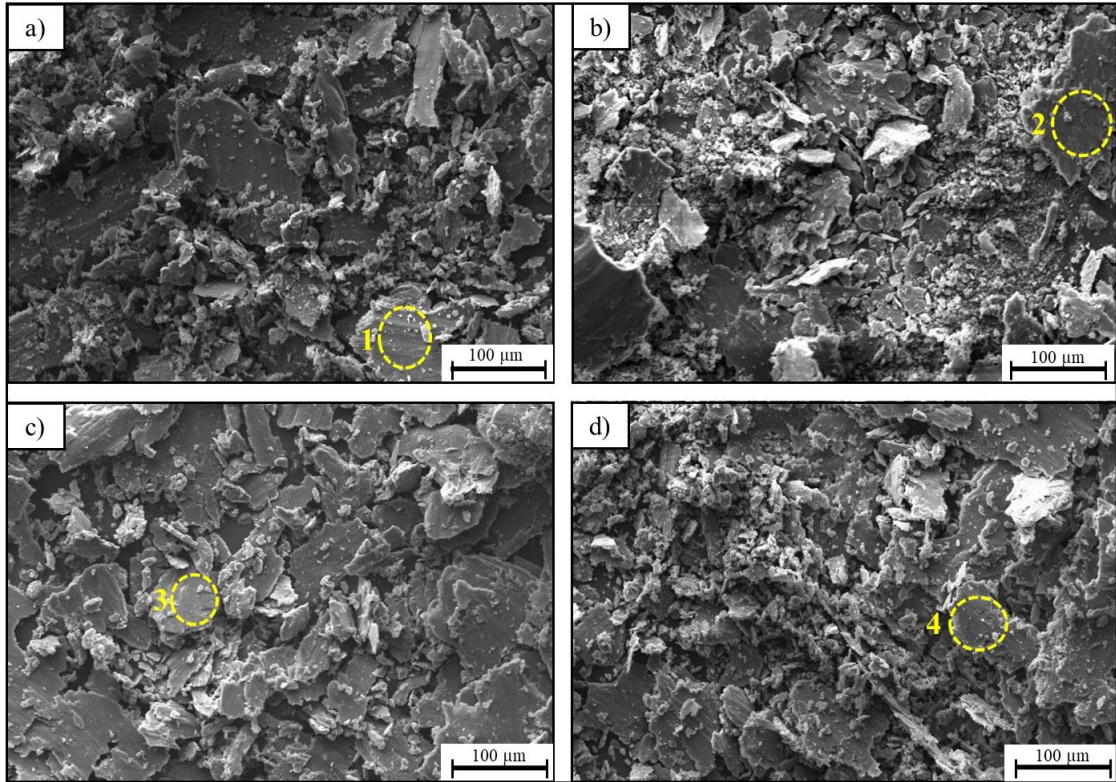
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	89,13	37,01	65,34	66,30
Cu	3,74	1,91	3,76	4,05
Mg	2,28	1,48	1,93	2,48
Fe	0,74	0,65	1,17	0,72
Mn + Zn + Si	2,19	2,29	3,95	2,32
O	1,92	56,66	23,85	24,13



Şekil 32. 3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses - 4

Tablo 7. 3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4

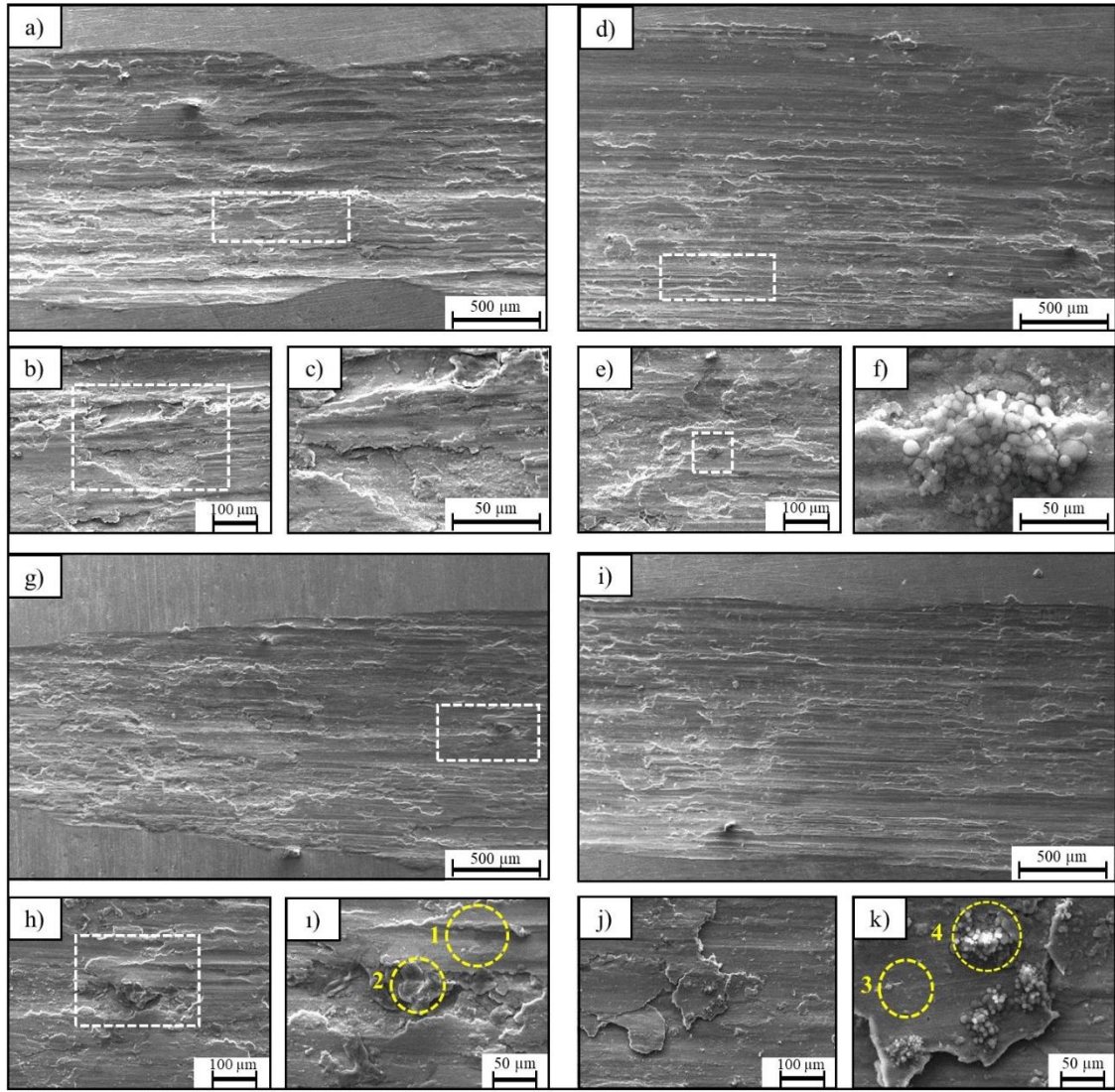
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	58,55	62,47	75,87	77,78
Cu	5,63	4,00	4,47	4,90
Mg	2,36	2,20	2,16	2,42
Fe + Cr	21,71	16,47	4,64	4,01
Mn + Zn + Si	1,98	1,00	1,20	1,17
O	9,77	13,86	11,66	9,72



Şekil 33. 3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses - 4

Tablo 8. 3 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4

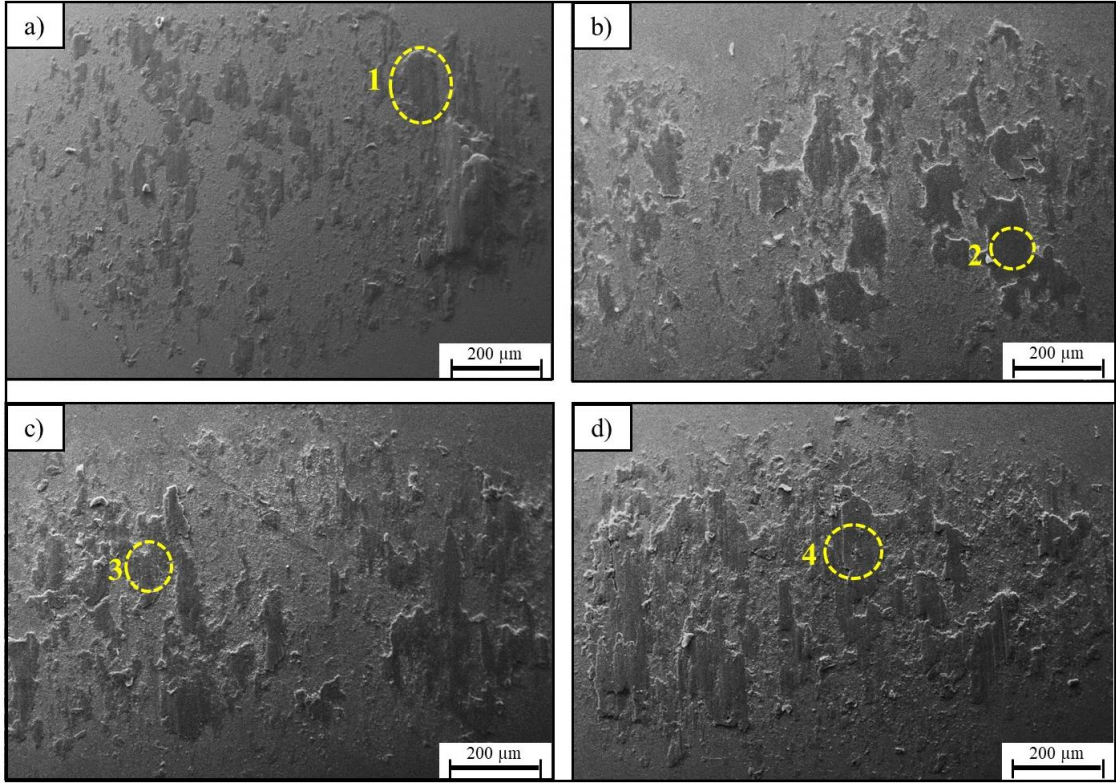
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	88,10	88,04	85,74	85,38
Cu	5,45	4,75	4,77	6,07
Mg	2,59	2,34	2,50	2,36
Fe + Cr	1,04	1,35	1,38	1,84
Mn + Zn + Si	1,25	1,07	0,97	1,04
O	1,57	2,45	4,64	3,31



Şekil 34. 5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a-c) Proses - 1, (d-f) Proses - 2, (g-i) Proses - 3 ve (i-k) Proses - 4.

Tablo 9. 5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin EDS analizleri

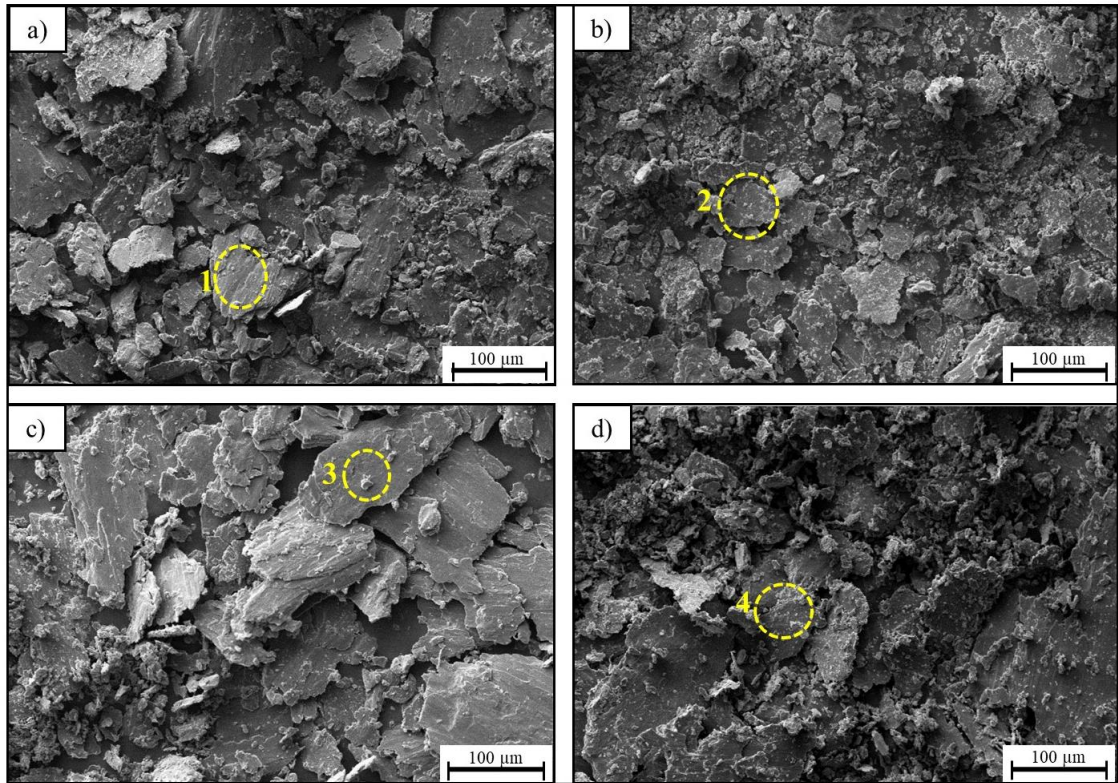
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	71,10	46,67	85,11	41,30
Cu	3,70	4,79	6,34	1,79
Mg	2,06	2,50	2,49	1,77
Fe	0,56	1,81	0,67	0,58
Mn + Zn + Si	2,16	6,93	2,47	2,43
O	20,42	37,30	2,92	52,13



Şekil 35. 5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses - 4

Tablo 10. 5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4

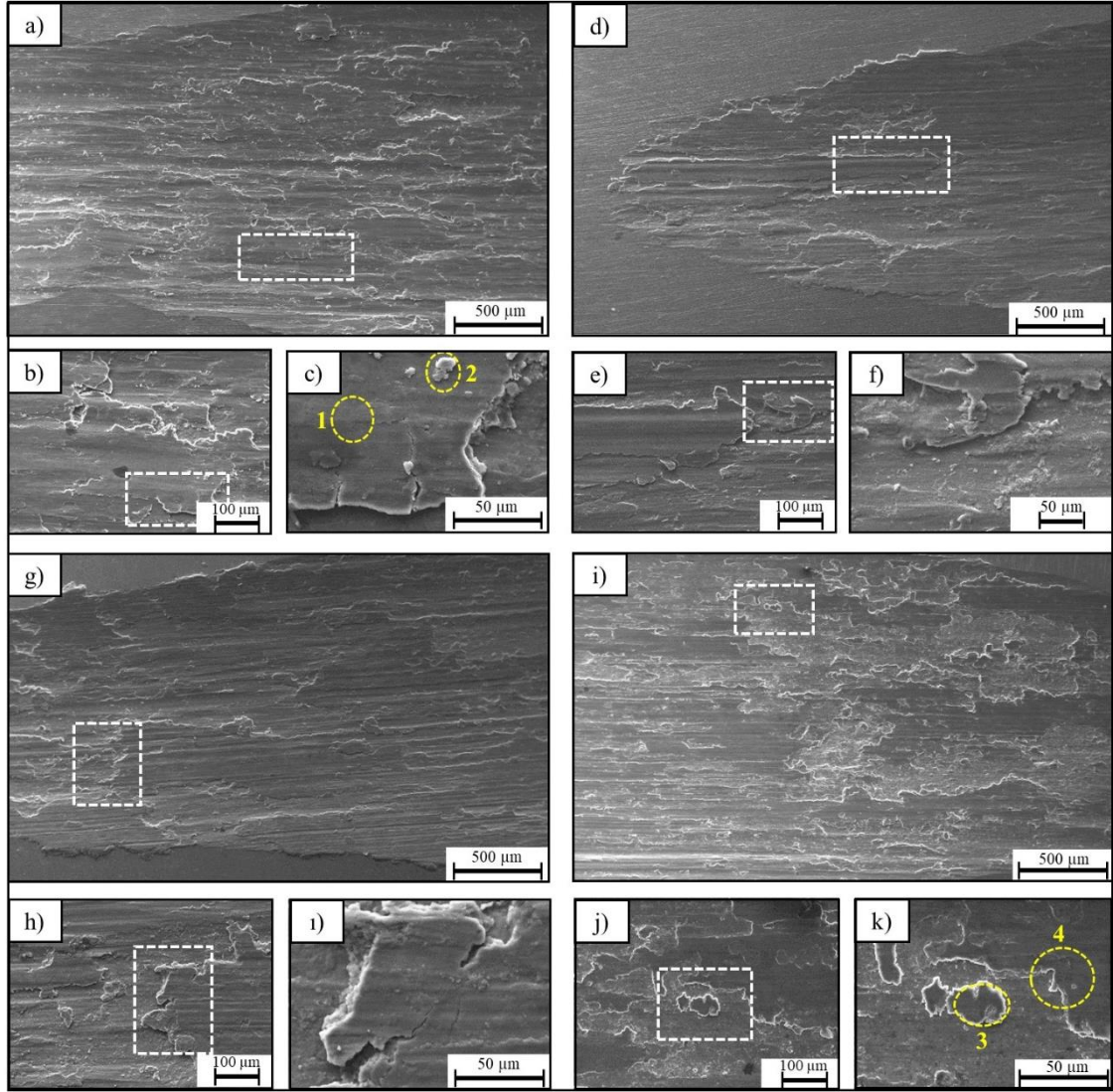
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	56,19	66,92	59,82	70,20
Cu	3,29	5,64	4,52	4,67
Mg	2,01	2,23	1,72	2,36
Fe + Cr	19,87	9,74	16,07	7,71
Mn + Zn + Si	0,7	1,4	1,19	1,13
O	17,94	14,07	16,68	13,93



Şekil 36. 5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses - 4

Tablo 11. 5 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4

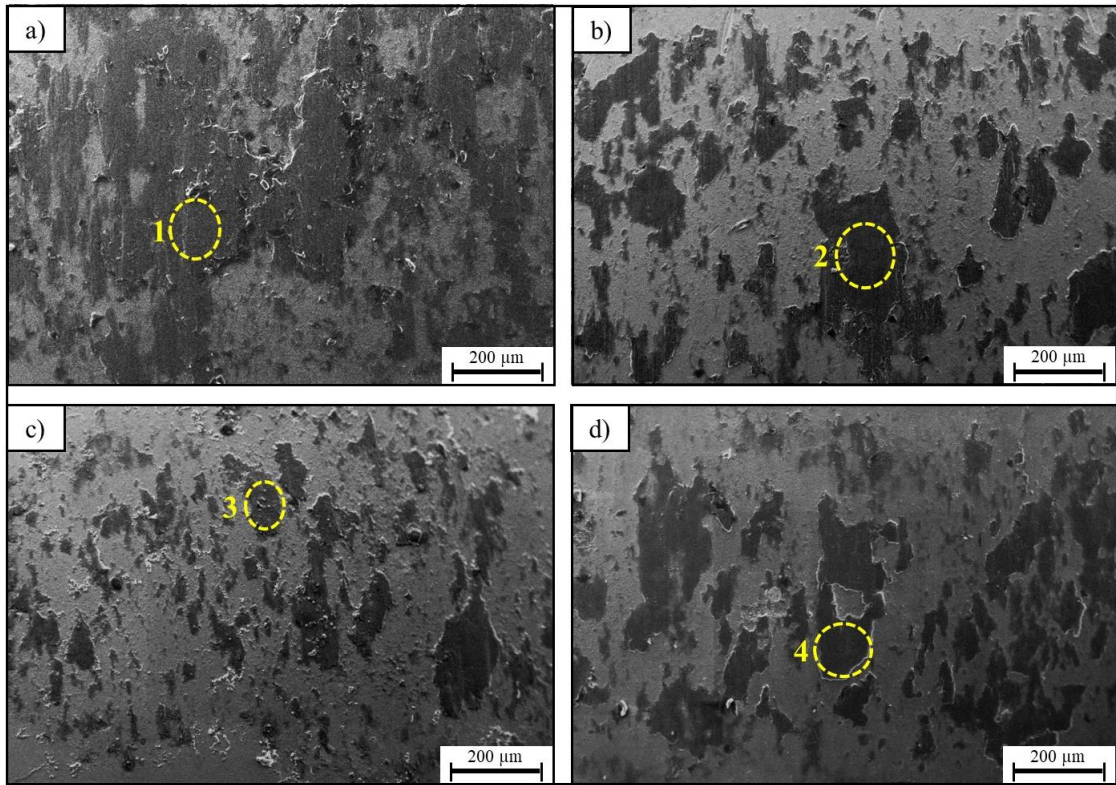
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	80,67	71,38	83,30	81,13
Cu	5,10	4,82	5,09	5,68
Mg	2,23	1,96	2,05	2,17
Fe + Cr	0,94	1,18	1,18	1,59
Mn + Zn + Si	0,86	0,68	0,95	0,92
O	10,20	19,98	7,43	8,51



Şekil 37. 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a-c) Proses - 1, (d-f) Proses - 2, (g-i) Proses - 3 ve (i-k) Proses - 4.

Tablo 12. 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait numune yüzeylerinin EDS analizleri

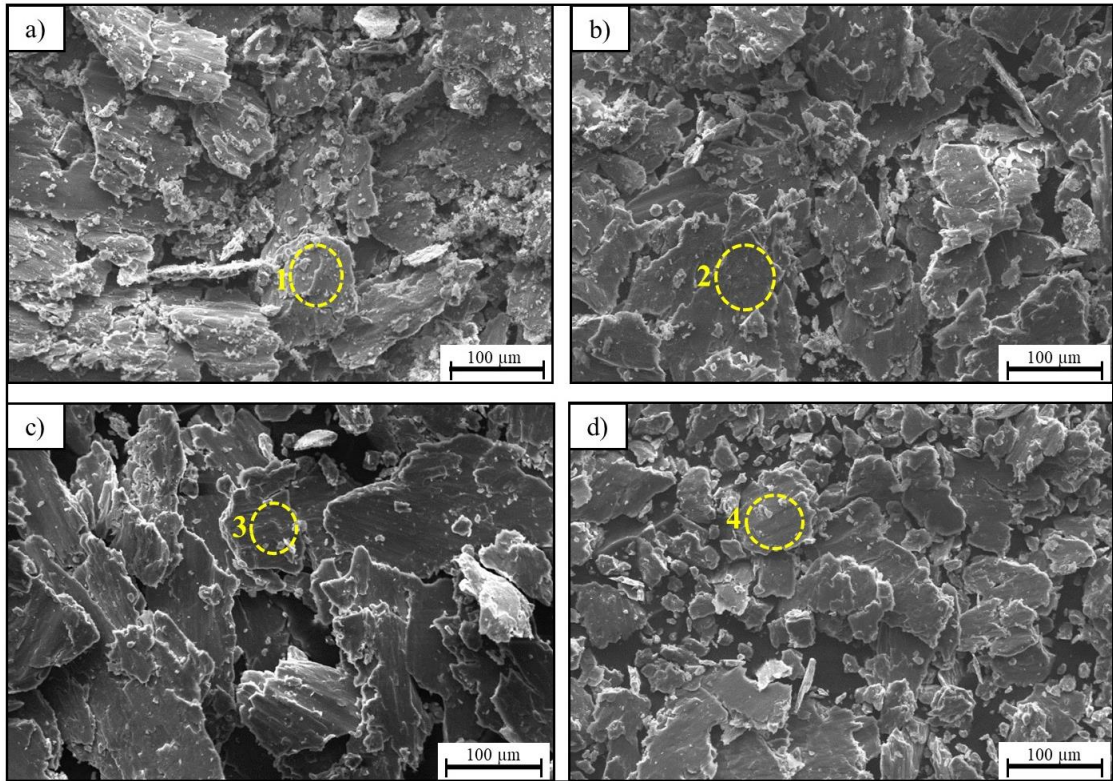
Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	79,36	80,05	75,68	56,98
Cu	4,54	4,52	3,72	3,31
Mg	2,40	2,51	2,24	1,93
Fe	0,70	0,53	0,69	0,72
Mn + Zn + Si	1,72	1,62	1,16	0,97
O	11,28	10,77	16,51	36,09



Şekil 38. 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses - 4

Tablo 13. 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine ait bilye yüzeylerinin EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses - 4

Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	37,81	55,21	57,83	53,06
Cu	9,15	5,63	4,52	5,48
Mg	2,83	1,92	2,01	2,62
Fe + Cr	28,85	15,68	19,11	20,40
Mn + Zn + Si	3,13	1,65	1,96	2,22
O	18,23	19,91	14,57	16,22



Şekil 39. 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneylerine sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri: a) Proses - 1, b) Proses - 2, c) Proses - 3 ve d) Proses - 4

Tablo 14. 10 N yük altında gerçekleştirilen sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında meydana gelen aşınma parçacıklarının EDS analizleri: 1) Proses - 1, 2) Proses - 2, 3) Proses - 3 ve 4) Proses – 4

Elementler	EDS Alınan Noktalar			
	1	2	3	4
	Yüzde Ağırlık			
Al	85,59	83,01	84,64	75,73
Cu	5,01	4,95	5,14	4,73
Mg	2,42	2,43	2,39	2,32
Fe + Cr	0,64	0,61	1,05	0,73
Mn + Zn + Si	1,68	1,43	1,46	1,71
O	4,66	7,57	5,32	14,78

4. GENEL SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında Al 2024 alaşımı ticari olarak temin edilmiş, eş kanallı açısall basma ve farklı sürelerde yaşlandırma ısıll işlemine tabi tutulmuştur. Alaşımlın ticari durumu Proses -1, tek paso EKAB uygulanmış koşulu Proses – 2, EKAB sonrası 100 °C’de 7 saatlik pik yaşlandırma koşulu Proses – 3 ve 384 saatlik uzun süreli termal kararlılığını koruduğu koşul ise Proses – 4 olarak tanımlanmıştır. Proses adımlarının mikroyapı analizleri geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile gerçekleştirilmiş, alt tane oluşumları ve tane yönlenmeleri ise elektron geri saçılım difraksiyonu (ESBD) yöntemi ile incelenmiştir. Ardından alaşımlın değışen mikroyapısı ve sahip olduğu nano ölçekli çökeltilerin mekanik özellikleri üzerine etkileri sertlik ve çekme deneyleri ile araştırılmıştır. Uygulanan proseslerin alaşımlın tribolojik özellikleri üzerine etkilerini tespit etmek adına sürtünme aşınma testleri gerçekleştirilerek tribolojik özellik incelemeleri yapılmış ve etkin aşınma mekanizmaları SEM/EDS ile tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen genel sonuçlar ise aşağıda sırasıyla özetlenmiştir.

1. Ticari halde (sıcak haddeleme sonrası doğal yaşlandırılmış) ısıll işlemi ile tedarik edilen ve iri taneli alaşımlın tane boyutu 200 °C sıcaklıkta uygulanan tek paso sıcak EKAB işlemi ile yaklaşık 5 µm seviyesine indirilerek ince taneli bir mikroyapı elde edilmiştir.
2. Aşırı plastik deformasyon uygulaması ile alaşımlın Proses – 1 adımında (ticari durum) 365 MPa ve 164 Hv olan akma dayanımı ve sertlik değeri sırasıyla yaklaşık 540 MPa ve 218 Hv seviyesine yükseltilmiştir.
3. Uygulanan aşırı plastik deformasyon (Proses – 2) alaşımlın süneklik değeri % 16 seviyelerinden % 5 seviyelerine düşürmüştür.
4. Alaşımlın aşırı plastik deformasyon sonrası özellikler açısından en uygun yaşlandırma sıcaklığının 100 °C olduğu belirlenmiştir. EKAB işlemi sonrası 218 Hv seviyesine ulaşan sertliğinin bu sıcaklıkta gerçekleştirilen 7 saatlik yaşlandırma ısıll işlemi sonucu pik nokta olan 225 Hv seviyesine çıktığı ve 850 saatlik yaşlandırma süresi boyunca da yaklaşık olarak sahip olduğu sertlik değeri koruduğu gözlenmiştir.
5. Sürtünme ve aşınma testleri sonucunda alaşıma uygulanan dört farklı prosesin ortalama sürtünme katsayısı üzerinde belirgin bir değışime sebep olmadığı, genel

olarak yük artışı ile birlikte ortalama sürtünme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir.

6. Sonuçlar aşınma direncine göre incelendiğinde, sertlik ve mukavemetin en çok arttığı Proses – 2 koşulu en düşük aşınma direnci sergilemiştir. Buna karşın Proses – 4 kapsamında uygulanan uzun süreli yapay yaşlandırma ısı işlemi ile alaşımın aşınma direncinde başlangıç seviyesine göre artış meydana gelmiştir.
7. Tüm prosesler için etkin aşınma mekanizmasının sıvama ve karşılıklı malzeme transferine dayanan adezyon aşınması olduğu, ancak süreç içerisinde abrazif, oksidatif ve delaminasyon tipi aşınma mekanizmalarının da etkili olduğu tespit edilmiştir.



5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmanın tamamlanmasının ardından bazı öneriler sunulmuştur. Bu öneriler;

- Alaşımın havacılık ve savunma sanayi gibi uygulama alanları dikkate alındığında incelenen koşullardaki yorulma davranışlarının belirlenmesi faydalı olabilir.
- Daha detaylı tribolojik incelemelerin gerçekleştirilebilmesi için optimum yük altında çevrim sayısı, kayma mesafesi ve strok değerleri sabit tutulup değişken frekans değerlerinde testler gerçekleştirilerek aşımın sahip olduğu mikroyapının sürtünme ve aşınma davranışları üzerine etkileri incelenebilir.
- Çalışma koşullarını daha iyi temsil etmesi açısından oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklık bölgelerinde de tribolojik testler gerçekleştirilebilir.
- Optimum proseslerin aşırı plastik deformasyon ve tane incelmeye dayalı şekillendirilebilirlik davranışları incelenebilir, şeklinde sıralanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abd El Aal, M. I., El Mahallawy, N., Shehata, F. A., Abd El Hameed, M., Yoon, E. Y., & Kim, H. S. (2010). Wear properties of ECAP-processed ultrafine grained Al–Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 527(16), 3726-3732.
- Aboudeif, Y. (2010). Precipitation Kinetics in Supersaturated Al-2.0 at% Cu-1.0 at% Mg Alloy. *Materials Transactions*, 51(2), 317-320.
- Afzal, N., & Ahmad, R. (2013). Microstructural Features and Mechanical Properties of Artificially Aged AA2024. *Strength of Materials*, 45, 684.
- Andersen, S., Marioara, C., Friis, J., Wenner, S., & Holmestad, R. (2018). Precipitates in aluminium alloys. *Advances in Physics: X*, 3, 790-813.
- Buha, J., Lumley, R. N., Crosky, A. G., & Hono, K. (2007). Secondary precipitation in an Al–Mg–Si–Cu alloy. *Acta Materialia*, 55(9), 3015-3024.
- Chen, X., Marioara, C. D., Andersen, S. J., Friis, J., Lervik, A., Holmestad, R., & Kobayashi, E. (2021). Precipitation processes and structural evolutions of various GPB zones and two types of S phases in a cold-rolled Al-Mg-Cu alloy. *Materials & Design*, 199, 109425.
- Cheng, S., Zhao, Y. H., Zhu, Y. T., & Ma, E. (2007). Optimizing the strength and ductility of fine structured 2024 Al alloy by nano-precipitation. *Acta Materialia*, 55(17), 5822-5832.
- Clarke, J., & Sarkar, A. D. (1979). Wear characteristics of as-cast binary aluminium-silicon alloys. *Wear*, 54(1), 7-16.
- Deschamps, A., Texier, G., Ringeval, S., & Delfaut-Durut, L. (2009). Influence of cooling rate on the precipitation microstructure in a medium strength Al–Zn–Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 501(1), 133-139.
- Dey, S. K., Perry, T. A., & Alpas, A. T. (2009). Micromechanisms of low load wear in an Al–18.5% Si alloy. *Wear*, 267(1), 515-524.
- Divya, S., Govindaraj, Y., J.N, B., Srinivasan, S. A., Murugan, N., & Ravisankar, B. (2018). Investigation on wear and corrosion behavior of equal channel angular pressed aluminium 2014 alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 314, 012024.
- Divya, S. P., Nagaraj, M., Kesavamoorthy, M., Srinivasan, S. A., & Ravisankar, B. (2018). Investigation on the Effect of ECAP Routes on the Wear Behavior of AA2014. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(1), 67-77.
- Dolan, G. P., & Robinson, J. S. (2004). Residual stress reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 aluminium alloys using quench factor analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 346-351.

- Dumitraschkewitz, P., Gerstl, S., Stephenson, L., Uggowitzer, P., & Pogatscher, S. (2018). Clustering in Age-Hardenable Aluminum Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 20.
- Eizadjou, M., Manesh, H., & Janghorban, K. (2009). Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grains (UFGs) aluminum strips produced by ARB process. *Journal of Alloys and Compounds*, 474, 406-415.
- El Garchani, F. E., Lgaz, H., Kaya, S., Lee, H.-S., Ibrahim, S. M., Chafiq, M., Kabiri, M. R. (2023). Effects of heat treatment on the corrosion behavior and mechanical properties of aluminum alloy 2024. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1355-1363.
- Feng, Z., Yang, Y., Huang, B., Han, M., Luo, X., & Ru, J. (2010). Precipitation process along dislocations in Al–Cu–Mg alloy during artificial aging. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 528, 706-714.
- Furukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (1998). The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 257(2), 328-332.
- Gao, N., Wang, C., Wood, R., & Langdon, T. (2012). Tribological properties of ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation. *Journal of Materials Science*, 47, 4779-4797.
- Gholinia, A., Prangnell, P. B., & Markushev, M. V. (2000). The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAP. *Acta Materialia*, 48(5), 1115-1130.
- Gong, B., Zhang, Z., Duan, Q., Hou, J.-P., Li, R., Wang, X., . . . Zhang, Z. (2023). Effect of Aging on Impact Toughness and Fracture Behavior of Three Wrought Aluminum Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 25.
- Gong, B. S., Zhang, Z. J., Qu, Z., Hou, J. P., Yang, H. J., Shao, X. H., & Zhang, Z. F. (2022). Effect of aging state on fatigue property of wrought aluminum alloys. *International Journal of Fatigue*, 156, 106682.
- Goodarzy, M. H., Arabi, H., Boutorabi, M. A., Seyedein, S. H., & Hasani Najafabadi, S. H. (2014). The effects of room temperature ECAP and subsequent aging on mechanical properties of 2024 Al alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 753-759.
- Gür, C. H., Tan, G., & Kalay, Y. (2013). Homogenization of ECAPed Al 2024 Alloy through Age Hardening. *Materials Science and Engineering A*, 559, 601-606.
- Horita, Z., Fujinami, T., & Langdon, T. G. (2001). The potential for scaling ECAP: effect of sample size on grain refinement and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 318(1), 34-41.

- Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., & Langdon, T. (2000). Equal-Channel Angular Pressing of Commercial Aluminum Alloys: Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31, 691-701.
- Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (2001). Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(3), 288-292.
- Huang, W. H., Yu, C. Y., Kao, P. W., & Chang, C. P. (2004). The effect of strain path and temperature on the microstructure developed in copper processed by ECAE. *Materials Science and Engineering: A*, 366(2), 221-228.
- Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (1996). Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials. *Scripta Materialia*, 35(2), 143-146.
- Jackson, P. J. (1983). The role of cross-slip in the plastic deformation of crystals. *Materials Science and Engineering*, 57(1), 39-47.
- Kapoor, A., & Franklin, F. J. (2000). Tribological layers and the wear of ductile materials. *Wear*, 245(1), 204-215.
- Kim, W. J., An, C. W., Kim, Y. S., & Hong, S. I. (2002). Mechanical properties and microstructures of an AZ61 Mg Alloy produced by equal channel angular pressing. *Scripta Materialia*, 47(1), 39-44.
- Kim, W. J., Chung, C. S., Ma, D. S., Hong, S. I., & Kim, H. K. (2003). Optimization of strength and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging. *Scripta Materialia*, 49(4), 333-338.
- Kim, Y.-S., Yu, H., & Shin, D. (2009). Low sliding-wear resistance of ultrafine-grained Al alloys and steel having undergone severe plastic deformation. *International Journal of Materials Research*, 100, 871-874.
- Kim, Y. S., Ha, J. S., & Kim, W. J. (2004). Dry Sliding Wear Characteristics of Severely Deformed 6061 Aluminum and AZ61 Magnesium Alloys. *Materials Science Forum*, 449-452, 597-600.
- Kotan, G., Tan, E., Kalay, Y. E., & Gür, C. H. (2013). Homogenization of ECAPed Al 2024 alloy through age-hardening. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 601-606.
- Lee, P. P., Savaskan, T., & Laufer, E. (1987). Wear resistance and microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu alloys. *Wear*, 117(1), 79-89.
- Li, H., Chen, P., Wang, Z., Zhu, F., Song, R., & Zheng, Z. (2019). Tensile properties, microstructures and fracture behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu alloy during ageing after solution treating and cold-rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 742, 798-812.

- Liu, R., Tian, Y. Z., Zhang, Z. J., Zhang, P., & Zhang, Z. F. (2017). Fatigue strength plateau induced by microstructure inhomogeneity. *Materials Science and Engineering: A*, 702, 259-264.
- Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., & Picu, R. C. (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Materials & Design*, 31(2), 972-975.
- Palmerin, J., Dorantes-Rosales, H., Hirata, V., Castro, N., Velázquez, J., & Morales-Ramirez, A. (2009). Hardening Behavior in Aged Al4%Cu0.3%Mg Alloys with 0.5 and 2%Ag Additions. *Materials Transactions*, 50, 2785-2789.
- Pang, J. C., Li, S. X., Wang, Z. G., & Zhang, Z. F. (2013). General relation between tensile strength and fatigue strength of metallic materials. *Materials Science and Engineering: A*, 564, 331-341.
- Purcek, G., Saray, O., Kul, O., Karaman, I., Yapici, G. G., Haouaoui, M., & Maier, H. J. (2009). Mechanical and wear properties of ultrafine-grained pure Ti produced by multi-pass equal-channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 517(1), 97-104.
- Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T., & Murphy, S. (2002). Dry sliding friction and wear properties of zinc-based alloys. *Wear*, 252(11), 894-901.
- Qiao, X. G., Starink, M. J., & Gao, N. (2009). Hardness inhomogeneity and local strengthening mechanisms of an Al1050 aluminium alloy after one pass of equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*, 513-514, 52-58.
- Qu, Z., Zhang, Z. J., Yan, J. X., Zhang, P., Gong, B. S., Lu, S. L., . . . Langdon, T. G. (2022). Examining the effect of the aging state on strength and plasticity of wrought aluminum alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 122, 54-67.
- Reis, D., Couto, A., Jr, N. I., Hirschmann, A., Zepka, S., & Neto, C. (2012). Effect of Artificial Aging on the Mechanical Properties of an Aerospace Aluminum Alloy 2024. *Defect and Diffusion Forum*, 326-328, 193-198.
- Rigney, D. A. (2000). Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear*, 245(1), 1-9.
- Saray, O., & Purcek, G. (2009). Microstructural evolution and mechanical properties of Al–40wt.%Zn alloy processed by equal-channel angular extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2488-2498.
- Savaşkan, T., & Alemdağ, Y. (2010). Effect of nickel additions on the mechanical and sliding wear properties of Al–40Zn–3Cu alloy. *Wear*, 268(3), 565-570.
- Segal, V. M. (1995). Materials processing by simple shear. *Materials Science and Engineering: A*, 197(2), 157-164.
- Sha, G., & Cerezo, A. (2004). Early-stage precipitation in Al–Zn–Mg–Cu alloy (7050). *Acta Materialia*, 52(15), 4503-4516.

- Sha, G., Marceau, R. K. W., Gao, X., Muddle, B. C., & Ringer, S. P. (2011). Nanostructure of aluminium alloy 2024: Segregation, clustering and precipitation processes. *Acta Materialia*, 59(4), 1659-1670.
- Shaban, M., Alateyah, A. I., Alsharekh, M. F., Alawad, M. O., BaQais, A., Kamel, M., Salem, H. G. (2023). Influence of ECAP Parameters on the Structural, Electrochemical and Mechanical Behavior of ZK30: A Combination of Experimental and Machine Learning Approaches. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(2).
- Siddesh Kumar, N. M., Dhruthi, Pramod, G. K., Samrat, P., & Sadashiva, M. (2022). A Critical Review on Heat Treatment of Aluminium Alloys. *Materials Today: Proceedings*, 58, 71-79.
- Stolyarov, V. V., Zhu, Y. T., Lowe, T. C., & Valiev, R. Z. (2001). Microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP and cold extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 303(1), 82-89.
- Sun, L., Guo, Y., Chen, L., & Zhao, G. (2021). Effects of solution and aging treatments on the microstructure and mechanical properties of cold rolled 2024 Al alloy sheet. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1126-1142.
- Sun, W., Zhu, Y., Marceau, R., Wang, L., Zhang, Q., Gao, X., & Hutchinson, C. (2019). Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity. *Science*, 363, 972-975.
- Talachi, A. K., Eizadjou, M., Manesh, H. D., & Janghorban, K. (2011). Wear characteristics of severely deformed aluminum sheets by accumulative roll bonding (ARB) process. *Materials Characterization*, 62(1), 12-21.
- Tan, G., Kalay, Y. E., & Gür, C. H. (2016). Long-term thermal stability of Equal Channel Angular Pressed 2024 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 677, 307-315.
- Tong, L. B., Zheng, M. Y., Hu, X. S., Wu, K., Xu, S. W., Kamado, S., & Kojima, Y. (2010). Influence of ECAP routes on microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Ca alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(16), 4250-4256.
- Torabian, H., Pathak, J. P., & Tiwari, S. N. (1994). Wear characteristics of Al-Si alloys. *Wear*, 172(1), 49-58.
- Torre, F., Lapovok, R., Sandlin, J., Thomson, P., Davies, C. H. J., & Pereloma, E. (2004). Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1-16 passes. *Acta Materialia*, 52, 4819-4832.
- Valiev, R. Z., & Langdon, T. G. (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*, 51(7), 881-981.
- Vinogradov, A., Patlan, V., Suzuki, Y., Kitagawa, K., & Kopylov, V. I. (2002). Structure and properties of ultra-fine grain Cu–Cr–Zr alloy produced by equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 50(7), 1639-1651.

- Wang, C. T., Gao, N., Wood, R. J. K., & Langdon, T. G. (2011a). Wear behavior of an aluminum alloy processed by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 46(1), 123-130.
- Wang, C. T., Gao, N., Wood, R. J. K., & Langdon, T. G. (2011b). Wear Behaviour of Al-1050 Alloy Processed by Severe Plastic Deformation. *Materials Science Forum*, 667-669, 1101-1106.
- Wang, S., Starink, M., & Gao, N. (2006). Precipitation hardening in Al–Cu–Mg alloys revisited. *Scripta Materialia*, 54, 287-291.
- Wang, S. C., & Starink, M. J. (2005). Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al–Cu–Mg–(Li) based alloys. *International Materials Reviews*, 50(4), 193-215.
- Wang, S. C., & Starink, M. J. (2007). Two types of S phase precipitates in Al–Cu–Mg alloys. *Acta Materialia*, 55(3), 933-941.
- Williams, J. C., & Starke, E. A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems11The Golden Jubilee Issue—Selected topics in Materials Science and Engineering: Past, Present and Future, edited by S. Suresh. *Acta Materialia*, 51(19), 5775-5799.
- Wilson, S., & Alpas, A. T. (1999). Thermal effects on mild wear transitions in dry sliding of an aluminum alloy. *Wear*, 225-229, 440-449.
- Xiao, T., Deng, Y., Ye, L., Lin, H., Shan, C., & Qian, P. (2016). Effect of three-stage homogenization on mechanical properties and stress corrosion cracking of Al-Zn-Mg-Zr alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 675, 280-288.
- Xinming, Z., Yunlai, D., & Yong, Z. (2015). Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials. *Acta Metallurgica Sinica -Chinese Edition-*, 51, 257-271.
- Xu, C., Yang, Y. F., Wang, H., & Jiang, Q.-C. (2007). Effects of modification and heat-treatment on the abrasive wear behavior of hypereutectic Al–Si alloys. *Journal of Materials Science*, 42, 6331-6338.
- Yan, L., Li, Z., Zhang, Y.-a., Xiong, B., Li, X., Liu, H., . . . Yan, H. (2016). Pre-aging on early-age behavior and bake hardening response of an Al-0.90Mg-0.80Si-0.64Zn-0.23Cu alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(4), 398-403.
- Zhang, J., & Alpas, A. T. (1993). Delamination wear in ductile materials containing second phase particles. *Materials Science and Engineering: A*, 160(1), 25-35.
- Zhang, Z., Yu, J., & He, D. (2020). Effect of contact solid solution treatment on peak aging of Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6940-6943.

Zhao, Y. H., Liao, X. Z., Jin, Z., Valiev, R. Z., & Zhu, Y. T. (2004). Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing. *Acta Materialia*, 52(15), 4589-4599.

Zhou, L., Liu, G., Han, Z., & Lu, K. (2008). Grain size effect on wear resistance of a nanostructured AISI52100 steel. *Scripta Materialia*, 58(6), 445-448.



ÖZGEÇMİŞ

Melih USTALAR 2014 yılında Trabzon Affan Kitapçıoğlu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini aldı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmekte olan Melih USTALAR iyi derecede İngilizce bilmektedir. Ayrıca yüksek lisans tezi kapsamında yayımlanan iki adet uluslararası bildirisi bulunmaktadır.

Yüksek lisans tezi kapsamındaki yayınları:

1. Demirtaş M., Yanar H., Uzun M., Ustalar M., & Pürçek, G. (2023). Strengthening Al 2024 Alloy via Equal Channel Angular Pressing and Subsequent Aging. *The 5th International Conference of Materials and Engineering Technology*, s. 419. Trabzon.
2. Pürçek G., Yanar H., Demirtaş M., Ustalar M., & Uzun M., (2024). Friction and Wear Behaviour of Fine-Grained and Aged Al 2024 Alloy. *15th International Conference on Tribology*, Bucharest.