

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON (EKAE) YÖNTEMİ UYGULANMIŞ  
Al<sub>20</sub>Zn-2Cu ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yakup HEYAL

EYLÜL 2024  
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON (EKAE) YÖNTEMİ UYGULANMIŞ**  
**Al<sub>20</sub>Zn-2Cu ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Yakup HEYAL**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**  
**"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 08 / 2024**

**Tezin Savunma Tarihi : 13 / 09 / 2024**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Murat AYDIN**

**Trabzon 2024**

## ÖNSÖZ

“Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon EKAE Yöntemi Uygulanmış Al<sub>20</sub>ZnCu Alaşımının Yorulma Davranışının İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat AYDIN’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarına katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Recep GÜMRÜK’e, Sayın Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI’ya, Sayın Prof. Dr. Şükrü ÖZŞAHİN’e ve FDK-2021-9468 proje kodu ile “Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon EKAE Yöntemiyle Üretilen Al<sub>20</sub>ZnCu Alaşımının Yorulma Davranışının İncelenmesi” adlı proje kapsamında destek sağlayan K.T.Ü. BAP yetkililerine teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem ve (merhum) babama, bu çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Semra HEYAL’e ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Yakup HEYAL  
Trabzon 2024

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon (EKAE) Yöntemi Uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu Alaşımının Yorulma Davranışının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Murat AYDIN‘ın 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. 13/09/2024

Yakup HEYAL

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                 | <u>Sayfa No</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                      | III             |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....                                                                       | IV              |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                | V               |
| ÖZET .....                                                                                      | VII             |
| SUMMARY .....                                                                                   | VIII            |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                           | IX              |
| TABLolar DİZİNİ.....                                                                            | XIII            |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                           | XV              |
| 1. GENEL BİLGİLER .....                                                                         | 1               |
| 1.1. Giriş.....                                                                                 | 1               |
| 1.2. Alüminyum-Çinko Alaşımlarının Denge Diyagramları .....                                     | 3               |
| 1.2.1. İkili Alüminyum-Çinko Alaşımlarının Denge Diyagramları.....                              | 3               |
| 1.2.2. Üçlü Alüminyum-Çinko-Bakır Alaşımlarının Denge<br>Diyagramları .....                     | 4               |
| 1.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri.....                                | 5               |
| 1.4. Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon (EKAE) Yöntemi .....                                          | 8               |
| 1.4.1. EKAE Yönteminin Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların<br>Mekanik Özelliklerine Etkisi ..... | 10              |
| 1.5. Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri.....                                | 12              |
| 1.6. EKAE Yönteminin Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yorulma<br>Özelliklerine Etkisi.....    | 13              |
| 1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....                                                   | 14              |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....                                                                      | 17              |
| 2.1. Alaşımların Üretimi.....                                                                   | 17              |
| 2.2. EKAE Deneyleri.....                                                                        | 18              |
| 2.3. Metalografik İncelemeler .....                                                             | 22              |
| 2.4. Mekanik Deneyler .....                                                                     | 22              |
| 2.4.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri .....                                                  | 22              |
| 2.4.2. Yorulma Deneyleri.....                                                                   | 24              |
| 3. BULGULAR.....                                                                                | 28              |
| 3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri .....                                                     | 28              |
| 3.2. Alaşımların İçyapısı .....                                                                 | 28              |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....                                        | 42 |
| 3.3.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....                    | 42 |
| 3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular .....                                   | 46 |
| 3.4. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu.....                         | 48 |
| 3.5. Yorulma Numunelerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular..... | 57 |
| 4. TARTIŞMA .....                                                                         | 73 |
| 5. SONUÇLAR.....                                                                          | 80 |
| 6. ÖNERİLER.....                                                                          | 83 |
| 7. KAYNAKLAR .....                                                                        | 84 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                                  |    |



## Doktora Tezi

### ÖZET

## EŞ KANALDA AÇISAL EKSTRÜZYON (EKAE) YÖNTEMİ UYGULANMIŞ $Al_{20}Zn-2Cu$ ALAŞIMININ YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Yakup HEYAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Murat AYDIN  
2024, 90 Sayfa

Bu çalışmada,  $Al_{20}Zn-(\%1-5)Cu$  alaşımları kokil döküm yöntemiyle üretildi. Mekanik özellikler bakımından en iyi performansı %2 Cu içeren alaşım sergilediğinden, optimum bakır oranı %2 olarak belirlendi.  $Al_{20}Zn-2Cu$  alaşımına aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanalda açısallı ekstrüzyon (EKAE) yöntemi uygulandı. Alaşımın farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanmış durumdaki yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışları ayrıntılı bir biçimde incelendi. EKAE işlemiyle ortaya çıkan yapısal değişimlere, deformasyon sertleşmesi mekanizmasının etkinliğine ve döküm boşluklarının (porozite) büyük oranda giderilmesine bağlı olarak söz konusu alaşımın mekanik özellikleriyle yorulma performansında önemli iyileşmeler görüldü. Şöyle ki; 3 paso EKAE sonrası yorulma dayanım sınırında yaklaşık olarak %59, darbe dayanımında ise %62'lik yüksek oranda artışlar elde edildi. Ayrıca, paso sayısı ve proses rotası gibi EKAE parametrelerinin bu alaşımın başta yorulma olmak üzere yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Yapılan incelemeler sonucunda, (EKAE) işleminin alaşımın porozite içeren tipik dendritik döküm yapısını tamamen ortadan kaldırdığı, bunun yerine rota-A'da ince ve şerit gibi uzamış, rota-B<sub>C</sub>'de ise daha iri taneli ve birbiri içerisine geçmiş bileşenlerden oluşan bir yapının ortaya çıktığı belirlendi. Bu yapısal değişimlere bağlı olarak alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin artan paso sayısı ile arttığı ve rota-B<sub>C</sub>'de rota-A'ya göre daha yüksek değerlere ulaşıldığı görüldü. Ayrıca, alaşımın yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışları arasındaki ilişkiler detaylı bir şekilde incelendi. Bu incelemeler sonucunda yorulma özelliklerinin en çok da darbe dayanımıyla ilişkili olduğu belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Eş kanalda açısallı ekstrüzyon (EKAE), Zn-Al-Cu alaşımları, Yorulma

PhD Thesis

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOR OF Al<sub>20</sub>Zn-2Cu ALLOY PROCESSED  
BY EQUAL CHANNEL ANGULAR EXTRUSION (ECAE)

Yakup HEYAL

Karadeniz Technical University  
Institute of Science  
Department of Mechanical Engineering  
Advisor: Prof. Dr. Murat AYDIN  
2024, 90 Pages

In this study, Al<sub>20</sub>Zn-(1-5)%Cu alloys were produced by permanent mold casting. Since the alloy containing 2% Cu exhibited the best mechanical performance, the optimal copper ratio was determined to be 2%. The equal channel angular extrusion (ECAE) method, which is one of the severe plastic deformation techniques, was applied to the Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alloy. The microstructure and mechanical properties of the alloy, as well as its fatigue behavior under various routes and number of passes of the ECAE process, were investigated in detail. Significant improvements in the mechanical properties and fatigue performance of the alloy were observed, attributed to the structural changes arising from the ECAE process, the effectiveness of the strain hardening mechanism, and the substantial reduction of casting defects (porosity). Specifically, after three passes of ECAE, an approximate increase of 59% in fatigue strength limit and 62% in impact toughness was achieved. Furthermore, the effects of ECAE parameters such as the number of passes and process routes on the structural and mechanical properties, especially fatigue behaviour of the alloy were investigated. The examinations revealed that the ECAE process completely eliminated the typical dendritic casting structure containing porosity and resulted in a microstructure consisting of fine and ribbon-like elongated grains in route-A, whereas route-B<sub>C</sub> exhibited a coarser and more intermingled structure. It was observed that the fatigue strength and fatigue life of the alloy increased with the number of passes due to the structural changes, and the values were higher in route-B<sub>C</sub> compared to route-A. In addition, the relationships between the structure and mechanical properties of the alloy and its fatigue behavior were studied in detail. As a result of these investigations, it was determined that the fatigue properties are most closely related to impact toughness.

**Keywords:** Equal Channel Angular Extrusion (ECAE), Zn-Al-Cu alloys, Fatigue.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|           |                                                                                                                                                                                              |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.  | İkili alüminyum-çinko alaşımı denge diyagramı (Aydın, 2001).....                                                                                                                             | 3  |
| Şekil 2.  | 350°C sıcaklığındaki üçlü Al-Zn-Cu alaşım sisteminin izotermal kesiti.....                                                                                                                   | 5  |
| Şekil 3.  | EKAE kalıbı ve yöntemin şematik gösterimi .....                                                                                                                                              | 9  |
| Şekil 4.  | Literatüre geçmiş başlıca EKAE rotaları .....                                                                                                                                                | 10 |
| Şekil 5.  | Kokil kalıbın şekil ve boyutları.....                                                                                                                                                        | 17 |
| Şekil 6.  | Üretilen külçelerden metalografi (1), sertlik (2), çekme (3,4) ve yorulma deney numunelerinin (5,6,7,8) alındığı bölgeleri gösteren şematik resim. a) Önden görünüş, b) Üstten görünüş ..... | 18 |
| Şekil 7.  | EKAE kalıbının montaj sonrası izometrik görünüşü .....                                                                                                                                       | 19 |
| Şekil 8.  | EKAE kalıbını oluşturan ana parçaların montaj öncesi izometrik görünüşü.....                                                                                                                 | 19 |
| Şekil 9.  | EKAE kalıp çekirdeğinin şekli ve boyutlarını gösteren iki görünüşü .....                                                                                                                     | 20 |
| Şekil 10. | Kalıp gövdeleri ve 90° açılı çekirdekten oluşan EKAE deney kalıbının fotoğrafı.....                                                                                                          | 21 |
| Şekil 11. | EKAE deney setinin fotoğrafı.....                                                                                                                                                            | 21 |
| Şekil 12. | Talaşlı imalat ile üretilen (a) darbe, (b) çekme ve (c) sertlik deneyi numunelerinin şekil ve boyutları .....                                                                                | 23 |
| Şekil 13. | EKAE işlemi uygulanmış numunelerden çıkarılan yorulma, çekme ve darbe deney numunelerinin şematik görünümü .....                                                                             | 24 |
| Şekil 14. | Dönel eğmeli yorulma deney makinesinin a) Genel görünüşü, b) Ana elemanlarının şematik resmi .....                                                                                           | 25 |
| Şekil 15. | Yorulma deney makinesinin numune bağlantı bölümünün detaylı görünüşü.....                                                                                                                    | 25 |
| Şekil 16. | Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutları .....                                                                                                                                           | 27 |
| Şekil 17. | Al <sub>20</sub> Zn-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı .....                                                                                                                         | 29 |
| Şekil 18. | Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı .....                                                                                                                         | 29 |
| Şekil 19. | Al <sub>20</sub> Zn-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı .....                                                                                                                         | 30 |
| Şekil 20. | Al <sub>20</sub> Zn-4Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı .....                                                                                                                         | 30 |
| Şekil 21. | Al <sub>20</sub> Zn-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı .....                                                                                                                         | 31 |
| Şekil 22. | Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapı detayı.....                                                                                                                     | 31 |
| Şekil 23. | Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapı detayı.....                                                                                                                     | 32 |
| Şekil 24. | EKAE deney numunesinin ekstrüzyon yönü ve yüzeylerinin şematik gösterimi .....                                                                                                               | 32 |
| Şekil 25. | Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının 1 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi) .....                                                                                         | 33 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 26. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının 1 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi) .....                                      | 33 |
| Şekil 27. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-A ile 2 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi).....                            | 35 |
| Şekil 28. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-A ile 2 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi).....                            | 35 |
| Şekil 29. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-A ile 3 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi).....                            | 36 |
| Şekil 30. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-A ile 3 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi).....                            | 36 |
| Şekil 31. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-A ile 4 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi).....                            | 37 |
| Şekil 32. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-A ile 4 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi).....                            | 37 |
| Şekil 33. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi).....               | 39 |
| Şekil 34. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi).....               | 39 |
| Şekil 35. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-B <sub>C</sub> ile 3 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi).....               | 40 |
| Şekil 36. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-B <sub>C</sub> ile 3 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi).....               | 40 |
| Şekil 37. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-B <sub>C</sub> ile 4 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi).....               | 41 |
| Şekil 38. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının Rota-B <sub>C</sub> ile 4 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi).....               | 41 |
| Şekil 39. Al <sub>20</sub> Zn-Cu alaşımlarının gerilme-uzama ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) diyagramı .....                                                | 43 |
| Şekil 40. Dökülmüş ve EKAİ işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımlarının gerilme-uzama ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) diyagramı.....             | 44 |
| Şekil 41. EKAİ işlemi uygulanan Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımasının rota ve paso sayısına göre sertlik değişimi grafiği .....                        | 45 |
| Şekil 42. Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarına ait gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri.....                                                     | 47 |
| Şekil 43. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait dökülmüş ve EKAİ uygulanmış durumdaki gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri .....                      | 48 |
| Şekil 44. Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin bakır oranına göre değişimi .....       | 49 |
| Şekil 45. Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma dayanımı, darbe dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin bakır oranına göre değişimi ..... | 50 |
| Şekil 46. Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma ömrü, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin bakır oranına göre değişimi .....           | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 47. Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma ömrü, darbe dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin bakır oranına göre değişimi .....                                                                      | 51 |
| Şekil 48. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının yorulma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi .....                                                                                         | 52 |
| Şekil 49. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının yorulma dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi .....                                                                                         | 52 |
| Şekil 50. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının yorulma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi .....                                                                                          | 53 |
| Şekil 51. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının yorulma ömrü ve çekme dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi .....                                                                                             | 53 |
| Şekil 52. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının yorulma ömrü ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi .....                                                                                             | 54 |
| Şekil 53. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının yorulma ömrü ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi .....                                                                                              | 54 |
| Şekil 54. Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarına ait log N – log $\sigma$ eğrileri .....                                                                                                                            | 56 |
| Şekil 55. Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının dökülmüş ve EKAE uygulanmış durumdaki log N – log $\sigma$ eğrileri .....                                                                                                 | 56 |
| Şekil 56. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....                                    | 59 |
| Şekil 57. 128 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....                         | 59 |
| Şekil 58. 128 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....              | 60 |
| Şekil 59. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 3 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....              | 60 |
| Şekil 60. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı ..... | 61 |
| Şekil 61. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 3 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı ..... | 61 |
| Şekil 62. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren optik fotoğraf .....                     | 62 |
| Şekil 63. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren SEM fotoğrafı .....                                   | 63 |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 64. | 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki $\alpha$ fazına ait noktasal EDS analizi .....                                                                                                                                                                                         | 63 |
| Şekil 65. | 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki $\alpha+\eta$ fazına ait noktasal EDS analizi .....                                                                                                                                                                                    | 64 |
| Şekil 66. | 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki T' fazına ait noktasal EDS analizi .....                                                                                                                                                                                               | 64 |
| Şekil 67. | 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımı dik kesitinin a) SEM görüntüsü, b) Al (yeşil), Zn (mavi) ve Cu (kırmızı) elementlerinin dağılım haritası, c) Al elementinin dağılım haritası, d) Cu elementinin dağılım haritası, e) Zn elementinin dağılım haritası.....                                     | 65 |
| Şekil 68. | 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımına ait numunenin kırılma yüzeyinin dik kesitinin detayını gösteren SEM fotoğrafı .....                                                                                                                                                                         | 66 |
| Şekil 69. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımına ait kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren SEM fotoğrafı .....                                                                                                                                                          | 67 |
| Şekil 70. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımında yorulma sonucunda kırılma yüzeyinin dik kesitinin detaylı içyapısını gösteren SEM fotoğrafı.....                                                                                                                        | 67 |
| Şekil 71. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki $\alpha$ fazına ait noktasal EDS analizi.....                                                                                                                                                       | 68 |
| Şekil 72. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki $\alpha+\eta$ fazına ait noktasal EDS analizi .....                                                                                                                                                 | 68 |
| Şekil 73. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki T' fazına ait noktasal EDS analizi .....                                                                                                                                                            | 69 |
| Şekil 74. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B <sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımı dik kesitinin a) SEM görüntüsü, b) Al (yeşil), Zn (mavi) ve Cu (kırmızı) elementlerinin dağılım haritası, c) Al elementinin dağılım haritası, d) Cu elementinin dağılım haritası, e) Zn elementinin dağılım haritası ..... | 70 |
| Şekil 75. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı .....                                                                                                                                                                              | 71 |
| Şekil 76. | 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyinde oluşan duraklama çizgilerini gösteren SEM fotoğrafı .....                                                                                                                                                          | 72 |

## TABLÖLAR DİZİNİ

### Sayfa No

|           |                                                                                                                                                                    |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1.  | İkili alüminyum-çinko alaşımlarında ortaya çıkan önemli faz dönüşümleri .....                                                                                      | 4  |
| Tablo 2.  | Üçlü Al-Zn-Cu alaşımlarında gerçekleşen katı hal dönüşümleri .....                                                                                                 | 5  |
| Tablo 3.  | Alaşımların kimyasal bileşimi .....                                                                                                                                | 28 |
| Tablo 4.  | Döküm yöntemi ile üretilen Al <sub>20</sub> Zn-Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri .....             | 42 |
| Tablo 5.  | Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımlarının dökülmüş ve EKAЕ uygulanmış durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri ..... | 44 |
| Tablo 6.  | Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımlarının dökülmüş ve EKAЕ uygulanmış durumdaki sertlik değerleri .....                                                                | 45 |
| Tablo 7.  | Dökülmüş durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarından yorulma deneyi sonucunda elde edilen gerilme - çevrim sayısı değerleri .....                        | 46 |
| Tablo 8.  | Dökülmüş ve EKAЕ uygulanmış durumdaki Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımlarının yorulma deneyi sonucunda elde edilen gerilme - çevrim sayısı değerleri .....           | 47 |
| Tablo 9.  | Döküm yöntemi ile üretilen Al <sub>20</sub> Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri .....                                  | 57 |
| Tablo 10. | Döküm yöntemi ve EKAЕ ile üretilen Al <sub>20</sub> Zn-2Cu alaşımlarının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri .....                               | 57 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|               |                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| BSD           | : Brinell sertlik değeri                                            |
| c             | : Korelasyon katsayısı                                              |
| ECAE          | : Equal channel angular extrusion (eş kanalda açısall ekstrüzyon)   |
| ECAP          | : Equal channel angular pressing (eş kanalda açısall basma)         |
| EKAE          | : Eş kanalda açısall ekstrüzyon                                     |
| Meğ           | : Eğme momenti                                                      |
| Nf            | : Çevrim sayısı                                                     |
| P             | : Örneğe uygulanan yük                                              |
| SEM           | : Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskopy)       |
| SPD           | : Severe plastic deformation (aşırı plastik deformasyon)            |
| Weğ           | : Eğme için mukavemet momenti                                       |
| YMK           | : Yüzey merkezli kübik                                              |
| $\sigma$      | : Gerilme genliğı                                                   |
| $\sigma_{eğ}$ | : Eğme gerilmesi                                                    |
| $\psi$        | : L formundaki kanalın dış köşe açısı                               |
| $\Phi$        | : L formundaki eş kesitli giriş ve çıkış kanalları arasındaki açısı |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Alüminyum-çinko (Zn-Al) esaslı alaşımlar 1930'lu yıllarda geliştirilmeye başlanmış olup son yıllarda malzeme mühendisliğindeki hızlı ilerlemelere paralel olarak, birçok mühendislik alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Savaşkan, 1980; Savaşkan & Murphy, 1987; Zhu & Goodwin, 1993). O tarihten günümüze kadar birçok farklı kimyasal bileşim oranlarına sahip alüminyum-çinko bazlı alaşım geliştirilmiş ve bu alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Savaşkan, 1980; Zhu & Goodwin, 1994; Durman, 1993). Zn-Al bazlı alaşımların geniş bir kullanım alanına sahip olmasının başlıca nedeni, demir dışı bazı metallere oranla çeşitli avantajlara sahip olmalarıdır (Savaşkan, 1980; Savaşkan & Murphy, 1987; Gervais & Loong, 1984). Bu alaşımların sağladığı avantajlar arasında ideal döküm özellikleri ve düşük ergime noktası, hafiflik, uzun kullanım ömrü, ısıtılma uygunluk, döküm sonrasında gereksinim duyulan azami ek işlem, yüksek özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve iyi aşınma performansı ile birlikte alaşım elementlerinin kolay ve düşük maliyetle temin edilebilmesi, dolayısıyla ekonomik olmaları öne çıkmaktadır (Savaşkan & Murphy, 1987; Gervais & Loong, 1984). Bu avantajlar sayesinde alüminyum-çinko bazlı alaşımlar, genel olarak inşaat makineleri, şanzımanlar, torna tezgahları, taş kırma makineleri ve madencilikteki düşük hızda çalışan araçların kaymalı yatakları, hidrolik kaldırma silindirleri, su pompaları, matbaa makineleri, kapı kolu üretimi ve süs eşyaları gibi birçok mühendislik dalında kullanılmaktadır (Gervais & Loong, 1984; Barnhurst, 1984). Bununla birlikte, özellikle döküm halindeki bu alaşımların kullanımını sınırlayan bazı faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler arasında, mukavemet, darbe dayanımı ve süneklik gibi mekanik özelliklerin belirli uygulamalar için yeterli seviyede olmaması, çalışma sıcaklıklarının kısıtlı olması ve boyutsal stabilite sorunları sayılabilir (Gervais & Loong, 1984; Barnhurst, 1984). Ayrıca, geleneksel yöntemlerle üretilen Zn-Al bazlı alaşımların yorulma performansı, özellikle hareketli sistemlerin tasarımında yetersiz kalmaktadır. Bu durum, bu alaşımlardan üretilen parçalar ve makineler için tasarımda önemli bir eksiklik oluşturmaktadır. Ayrıca, kullanım alanlarının genişlemesini kısıtlayarak, bu alaşımların kullanımının büyük ölçüde kaymalı yatak üretimiyle sınırlı kalmasına yol açmaktadır. Bu

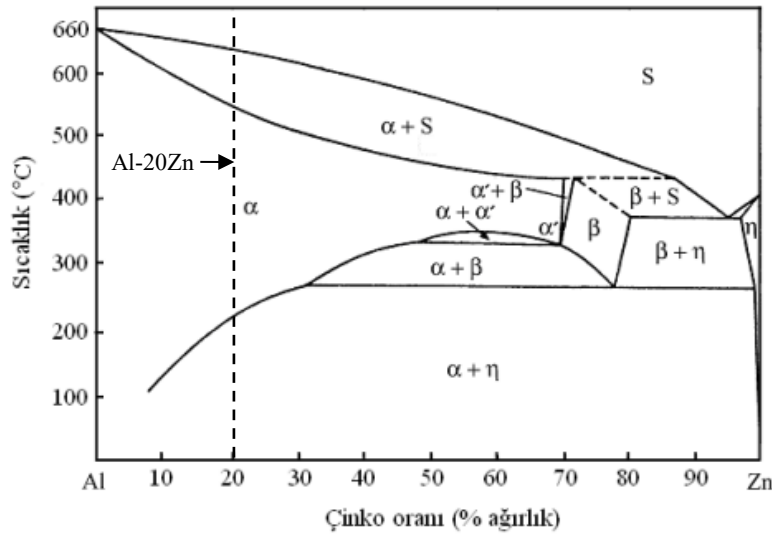
nedenle söz konusu alaşımların çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilebilmeleri ve kullanım alanlarının genişletilebilmesi için bu olumsuzlukların giderilmesi ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu tür olumsuzlukların giderilmesi amacıyla, günümüze kadar bu alaşımlar üzerinde yoğun araştırmalar gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar devam etmektedir (Savaşkan, 1980; Savaşkan & Murphy, 1987; Zhu & Goodwin, 1993; Zhu & Goodwin, 1994; Durman, 1993; Aydın, 2001; Presnyakov vd., 1961; Gervais, 1987; Skenazi vd., 1983; Perry, 1988; Savaşkan & Murphy, 1990; Murphy, 1980; Goodwin & Ponikvar, 1989; Turhal & Savaşkan, 1997; Erdöl, 1994). Bu bağlamda; alaşım elementi katma, ısıtılma işlemi, farklı üretim teknikleri uygulama gibi yollarla bu alaşımların mekanik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmış ve kısmen başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Aydın, 2001; Presnyakov vd., 1961; Gervais, 1987; Skenazi vd., 1983; Perry, 1988; Savaşkan & Murphy, 1990; Murphy, 1980; Goodwin & Ponikvar, 1989; Turhal & Savaşkan, 1997; Erdöl, 1994). Ek olarak, bu alaşımların çeşitli ortamlardaki yorulma davranışları incelenmiş ve kimyasal bileşim ile çevresel koşulların alaşımların yorulma performansı üzerindeki etkileri belirlenmiştir (Ruiz & Elices, 1997; Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Savaşkan & Aydın, 2004; Çay & Kurnaz, 2005). Bakır katkısıyla söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler elde edilmiş olsa da, Cu katkılı alaşımların mekanik özellikleri ve özellikle yorulma performansı, hâlâ bazı uygulamalarda yeterli düzeyde değildir. Isıl işlemin bu alaşımların mekanik özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı daha önce yapılan çalışmalarla (Aydın, 2001; Presnyakov vd., 1961; Gervais, 1987; Skenazi vd., 1983; Perry, 1988; Savaşkan & Murphy, 1990; Murphy, 1980; Goodwin & Ponikvar, 1989; Turhal & Savaşkan, 1997; Erdöl, 1994) belirlendiği için alaşım elementi katkısına ilave olarak farklı bir üretim yöntemi uygulama gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda, aşırı plastik deformasyon yöntemleri arasında yer alan eş kanalda açılmalı ekstrüzyon (EKAE) tekniği ile özellikle yüksek alüminyum içeren bazı ikili alaşımların (Al-40Zn, Al-20Zn) yorulma performansının artırılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve dikkat çekici sonuçlar elde edilmiştir (Saray & Purcek, 2009; Heyal, 2011; Aydın, 2012). Ancak, bu yöntemin Cu katkılı Al-Zn alaşımlarının yorulma davranışları üzerindeki etkileri henüz araştırılmamıştır. Çeşitli metal ve alaşımlar üzerinde başarılı bir şekilde uygulanan bu yöntemle, söz konusu alaşımların yorulma performansının önemli ölçüde iyileşmesi ve dolayısıyla kullanım alanlarının genişlemesi beklenmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre ikili alaşımlar içerisinde en üstün mekanik

özellikleri ve en iyi yorulma performansını sergileyen Al-20Zn alaşımına farklı oranlarda (%1-5) katılan bakırın etkisi incelenecektir. Bunun sonucunda optimum kimyasal bileşime (Cu oranına) sahip alaşım belirlenerek EKAE yönteminin söz konusu alaşımın mekanik özellikleri ve özellikle de yorulma davranışı üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

## 1.2. Alüminyum-Çinko Alaşımlarının Denge Diyagramları

### 1.2.1. İkili Alüminyum-Çinko Alaşımlarının Denge Diyagramları

İkili alüminyum-çinko alaşımlarına ait denge diyagramı Şekil 1'de verilmiştir (Presenyakov vd., 1961). Bu diyagramda,  $\alpha$  fazının alüminyumca zengin ve  $\eta$  fazının ise çinkoca zengin bölgelerini göstermektedir. Çinko, alüminyum içinde %83 oranına kadar çözünerek yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip üç farklı faz bölgesi oluşturur:  $\alpha$ ,  $\alpha'$  ve  $\beta$ . Bu fazların her birinin hızlı bir şekilde soğuması, aşırı doymuş katı çözelti elde edilmesine yol açar ve sonrasında uygulanan yaşılandırma işlemi sırasında bir dizi geçiş fazı oluşmaktadır (Zhu & Goodwin, 1994; Gervais, 1987; Skenazi vd., 1983).



Şekil 1. İkili alüminyum-çinko alaşımı denge diyagramı (Aydın, 2001).

İkili alüminyum-çinko alaşımı faz diyagramında 382°C sıcaklığında ve %95 Zn içeren oranda ötektik dönüşüm ortaya çıkmaktadır. Bu dönüşüm, yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip  $\beta$  fazı ile sıkı düzenli hegzonal yapıya sahip  $\eta$  fazlarını içeren bir mikro yapı oluşturur. Ayrıca, sıcaklık düştükçe alüminyumun  $\eta$  fazı içindeki çözünürlüğü

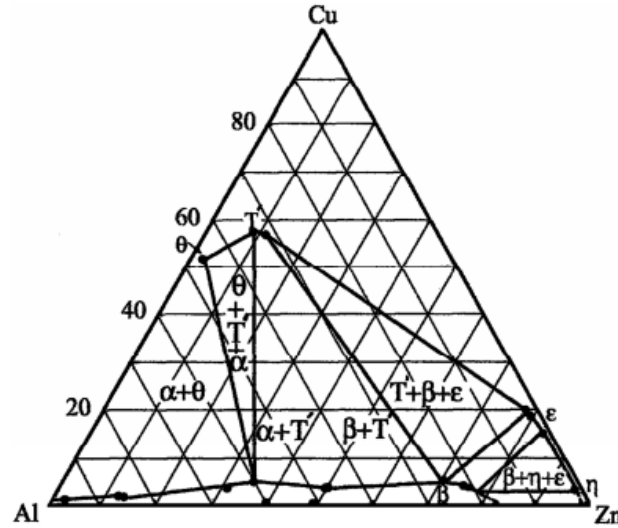
azalmaktadır; 20°C'de bu çözünürlük %0,05 Al seviyesine düşmektedir. Bu diyagramda yer alan  $\beta$  fazı, 276°C sıcaklıkta %22 Al içeriği ile meydana gelen ötektoid dönüşüm sonucunda  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşmektedir. İkili alüminyum-çinko alaşım sisteminde kimyasal bileşim ve sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşen önemli reaksiyonlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. İkili alüminyum-çinko alaşım sisteminde ortaya çıkan önemli faz dönüşümleri (Savaşkan, 1980; Perry, 1988; Savaşkan & Murphy, 1990).

| Dönüşüm     | Dönüşüm formülü                                      | Dönüşüm noktası     |               |
|-------------|------------------------------------------------------|---------------------|---------------|
|             |                                                      | Alüminyum oranı (%) | Sıcaklık (°C) |
| Ötektik     | $S \rightleftharpoons \beta + \eta$                  | 5                   | 382           |
| Ötektoid    | $\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$             | 22                  | 276           |
| Peritektik  | $\alpha + S \rightleftharpoons \beta$                | 28                  | 443           |
| Monotektoid | $\alpha / \alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$ | 40                  | 340           |

### 1.2.2. Üçlü Alüminyum-Çinko-Bakır Alaşımlarının Denge Diyagramları

Üçlü alüminyum-çinko-bakır alaşımının faz diyagramı henüz tamamen oluşturulmamış olmakla birlikte, düşük bakır içeriğine sahip kısmı Murphy (1990) tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Al-Zn-Cu sisteminin 350°C'deki izotermal kesiti Şekil 2'de ve bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri ise Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu tabloda bulunan  $\alpha$  fazı alüminyumca zengin,  $\eta$  fazı çinkoca zengin olup,  $\varepsilon$  (CuZn<sub>4</sub>),  $\theta$  (CuAl<sub>12</sub>) ve T' (Al<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>Zn) sembolleri ise Cu içeren intermetalik bileşiklerini temsil etmektedir (Savaşkan, 1980; Savaşkan & Murphy, 1990). Daha önceki araştırmalar,  $\varepsilon$  fazının yarı kararlı (metastabil) olduğu,  $\theta$  ve T' fazlarının ise kararlı bir yapı sergilediğini ortaya koymuştur (Savaşkan & Murphy, 1990; Murphy, 1980).



Şekil 2. 350°C sıcaklığındaki üçlü Al-Zn-Cu alaşım sisteminin izotermal kesiti (Savaşkan, 1980; Savaşkan & Murphy, 1990).

Tablo 2. Üçlü Al-Zn-Cu alaşım sisteminde gerçekleşen katı hal dönüşümleri (Savaşkan & Murphy, 1990).

| Dönüşüm                                             | Dönüşüm Sıcaklığı (°C) |
|-----------------------------------------------------|------------------------|
| $T' + \beta \rightleftharpoons \alpha + \epsilon$   | 288                    |
| $\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$            | 275                    |
| $\beta + \epsilon \rightleftharpoons \alpha + \eta$ | 276                    |
| $\alpha + \epsilon \rightleftharpoons T' + \eta$    | 268                    |

### 1.3. Alüminyum-Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Alüminyum-çinko bazlı alaşımlar incelendiğinde, bu alaşımların pek çok demir dışı metal ve dökme demire göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Goodwin & Ponikvar, 1989). Bu alaşımların akma sınırı ve çekme mukavemeti ile sertlik değerlerinin sıcaklık arttıkça azaldığı, kopma uzaması değerinin ise arttığı gözlenmiştir (Gervais, 1987). Alüminyum-çinko bazlı alaşımlar, mukavemet, darbe dayanımı ve süneklik gibi özelliklerde birçok metal ve alaşımdan daha yüksek değerlere sahip olmalarına rağmen, bazı mühendislik uygulamaları için bu özelliklerin yeterli olmadığı bilinmektedir (Aydın, 2001). Bu durum, bu alaşımların büyük ölçüde kaymalı yatakların üretimiyle sınırlı kalmasına neden olmakta ve söz konusu alaşımlardan üretilen

parçalar ile makine elemanlarının tasarımında önemli bir eksiklik olarak kendini göstermekte, böylece kullanım alanlarının genişlemesine engel olmaktadır. Bu nedenle söz konusu alaşımların çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilebilmeleri ve kullanım alanlarının genişletilebilmesi için bu olumsuzlukların giderilmesi ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, alaşım elementi ekleme ve ısıtma işlemleri (yaşlandırma vb.) gibi yöntemlerle bu alaşımların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiş ve kısmen başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Aydın, 2001; Turhal & Savaşkan, 1997; Erdöl, 1994). Bu kapsamda yapılan çalışmalarda farklı kimyasal bileşimlere sahip (Zn-27Al, Zn-40Al vb.) ikili alaşımlara bakır (Cu), magnezyum (Mg), silisyum (Si) gibi alaşım elementleri katılmış ve özellikle Cu katkısıyla mekanik özelliklerde önemli iyileşmeler sağlanmıştır (Şenaslan, 2016; Hacıosmanoğlu vd., 2023). Cu katkısıyla sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerinde ortaya çıkan iyileşme, katı çözelti sertleştirme mekanizmasına ve  $T$ ,  $\theta$  ve  $\varepsilon$  gibi intermetalik fazların oluşumuna dayandırılarak açıklanmıştır (Hacıosmanoğlu vd., 2023; Carpenter & Garwood, 1967; Demirtas, 2017; Pürçek vd., 2016; Demirtas vd., 2015). Bu çalışmalar neticesinde, alüminyum-çinko alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerini artırmak için uygulanabilecek en uygun metodun alaşım elementi katkısı olduğu ortaya konulmuştur (Turhal & Savaşkan, 1997; Erdöl, 1994). Ayrıca, bu alaşımların sertlik ve çekme dayanımının, alüminyum oranının artışı ile belirgin bir şekilde yükseldiği tespit edilmiştir (Gervais & Loong, 1984; Aydın, 2001; Aydın, 1995; Aydın vd. 1997). Alüminyum oranındaki artış ile bu alaşımların sertlik ve mukavemetinde gözlemlenen bu artış, katı çözelti sertleşmesi mekanizması ile ilişkilendirilerek açıklanmıştır (Zhu & Murphy, 1986). Diğer yandan, daha önce de ifade edildiği gibi, bakır katkısının bu alaşımların mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bir çalışmada, üçlü alüminyum-çinko-bakır alaşımlarının, ikili alüminyum-çinko alaşımlarına kıyasla daha yüksek sertlik ve çekme dayanımına sahip olduğu ortaya konmuştur (Aydın, 2001). Özellikle %2 oranına kadar bakır eklenmesi, ikili alaşımların mukavemetini, korozyon direncini, aşınma ve sürünme dayanımını önemli ölçüde artırırken, aynı zamanda boyutsal kararsızlık sorunlarına yol açabilmektedir (Savaşkan vd., 1988; Murphy, 1980; Savaşkan & Murphy, 1983). % 2'nin üzerindeki bakır ilavesinin sözü edilen alaşımların mukavemetini artırmamakla birlikte, aksine azalttığı gözlemlenmiştir (Savaşkan & Murphy, 1983). Bu yüzden, bakır oranının % 3'ün altında tutulması önerilmektedir (Savaşkan vd., 1988; Murphy, 1980).

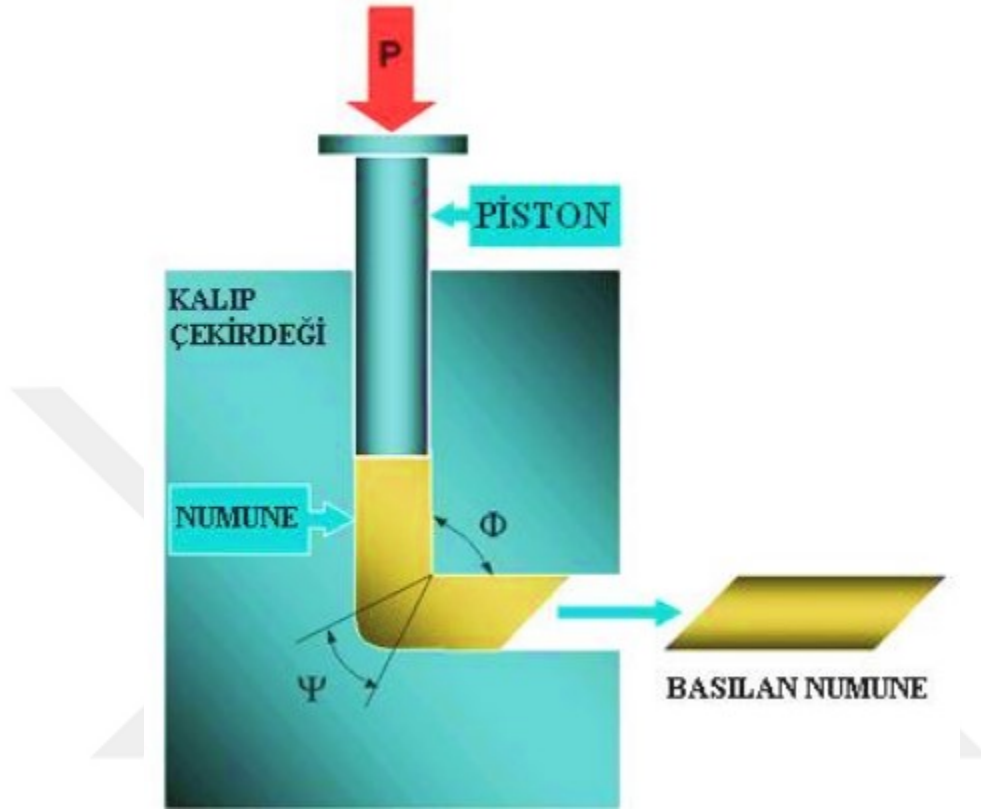
Alüminyum-çinko alaşımların düşük ergime sıcaklığına ve geniş katılaşma aralığına sahip olması, döküm sonucunda içyapıda gözeneklerin (porozite, mikro boşluk) oluşmasına neden olmaktadır (Durman, 1993; Barnhurst vd., 1983). Bu durum, mekanik özellikler üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu nedenle, döküm sırasında katılaşmayı etkileyen döküm ve kalıp sıcaklığı ile katılaşma hızı gibi faktörlerin kontrol edilmesi yoluyla gözeneklerin oluşumunun önlenmesi veya en aza indirilmesine yönelik bir çalışmada, alüminyum-çinko bazlı alaşımların katılaşma esnasındaki ortalama soğuma hızının, döküm ve kalıp sıcaklıkları arttıkça azaldığı, bu sıcaklıklar düştüğünde ise arttığı ortaya konulmuştur (Turhal, 2001). Ayrıca, bu çalışmada döküm halindeki alüminyum-çinko alaşımlarında farklı oranlarda gözenek oluşumunun gözlemlendiği ve bu gözeneklerin özellikle külçenin merkezinde ve üst bölgelerinde yoğunlaştığı belirtilmektedir (Turhal, 2001). Bunun yanı sıra, monotektoid esaslı alaşımlarda, ötektoid esaslı alaşımlara kıyasla daha fazla gözenek oluştuğu saptanmış olup bu durumun monotektoid alaşımların katılaşma aralığının daha geniş olmasından kaynaklandığı bilinmektedir (Turhal & Savaşkan, 1997; Turhal, 2001). Gözenek oranı arttıkça, alüminyum-çinko esaslı alaşımların sertliği, çekme mukavemeti, kopma uzaması ve darbe enerjisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, gözenek oranının bu alaşımların çekme dayanımı, kopma uzaması ve kırılma enerjisi üzerindeki etkisinin, sertlik üzerindeki etkisinden daha fazla olduğu öne sürülmektedir (Turhal & Savaşkan, 1997; Turhal, 2001). Alüminyum-çinko bazlı alaşımların katılaşma sürecindeki soğuma hızı arttıkça, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve kırılma enerjisi değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Bu durumun, büyük ölçüde alaşımlardaki gözenek oranının artan soğuma hızıyla birlikte azalmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir (Turhal, 2001).

Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilen olumlu ilerlemelere rağmen, söz konusu alaşımların özellikle döküm halinde mukavemet, süneklik, darbe dayanımı, yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri hâlâ bazı mühendislik uygulamalarında beklentileri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Isıl işlemin bu alaşımların mekanik özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı daha önce yapılan çalışmalarla (Şenaslan, 2016; Carpenter & Garwood, 1967) belirlendiği için alaşım elementi katkısına ilave olarak yeni nesil üretim yöntemlerinin uygulanması kaçınılmaz hale gelmektedir. Yeni geliştirilen aşırı plastik şekil verme metotlarından biri olan Eş Kanalda Açısız Ekstrüzyon (EKAE) yöntemiyle sözü edilen alaşımın mekanik özelliklerinde yapısal değişimlere bağlı olarak çok önemli iyileşmeler elde edileceği düşünülmektedir.

#### 1.4. Eş Kanalda Açısal Ekstrüzyon (EKAE) Yöntemi

Günümüzde gelişmiş ülkelerde, olağanüstü özelliklere sahip malzemelerin üretilmesinde en çok başvurulan yöntemler arasında aşırı plastik deformasyon (severe plastic deformation - SPD) teknikleri yer almaktadır. Bu sayede geleneksel malzemelere kıyasla birçok avantaj sunan ultra ince taneli (ultrafine grained) malzemeler üretilmekte ve bu alanda yoğun araştırmalar devam etmektedir (Valiev vd., 2000; Fukawa vd., 2001; Valiev, 2003). Son yıllarda, aşırı plastik deformasyon yöntemi olan EKAE ile süper ince taneli malzemelerin üstün mekanik özelliklerle üretilmesi etkili bir süreç haline gelmiştir. Yapılan bir araştırmada, bu yöntemle üretilen süper ince taneli malzemelerin optimum tane boyutu aralığında hem yüksek mukavemet hem de iyi süneklik değeri sergileyebildiği ortaya konulmuştur (Zhu vd., 2004). Malzemelerin hem mukavemet hem de süneklik değerlerinin birlikte artırılması genellikle nadir bir durumdur. Ancak bu yöntem sayesinde darbe dayanımı ve yorulma performansı gibi diğer mekanik özelliklerin de önemli ölçüde geliştirildiği gözlemlenmiştir (Ma vd., 2005; Höppel vd., 2006). Başka bir araştırmada, aşırı plastik deformasyon teknikleri arasında, eş kanalda açısal ekstrüzyon (equal channel angular extrusion - ECAE) yönteminin en önde gelen ve en etkili plastik deformasyon yöntemi olarak belirlendiği ifade edilmiştir (Segal, 2004). Eş kanalda açısal basma (ECAP) veya eş kanalda açısal ekstrüzyon (EKAE) olarak bilinen bu yöntem, dünya çapında birçok araştırmacı çeşitli metal ve alaşımlara uygulamış ve mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler sağlamıştır (Zhang vd., 2005; Iwahashi vd., 1998). Bu yöntemin temel prensibi, malzemelerin aşırı şekil değiştirmeye tabi tutulması yoluyla tane inceltmesi ve dolayısıyla mekanik davranışlarının dikkate değer şekilde geliştirilmesidir (Hanlon vd., 2003; Vinogradov vd., 2003). Bu yöntemde katı malzeme, L şeklinde eş kesite sahip ve aralarında belirli bir açı olan iki kanal içeren bir kalıp (EKAE kalıbı) aracılığıyla işlenmektedir. Örnek bir ekstrüzyon kalıbının şematik resmi Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu yöntemde, özdeş giriş ve çıkış kanallarına sahip olan kalıptan giriş kanalından giren numune, iki kanal arasında ilerlerken basit kayma mekanizmasıyla yüksek oranda plastik şekil değiştirme sürecine tabi tutulmakta ve bu sayede tane boyutunun inceltmesi sağlanmaktadır. Bu teknik, örneğin kesitinde belirgin bir değişiklik meydana getirmediği için haddeleme ve ekstrüzyon gibi geleneksel plastik deformasyon yöntemlerinden ayrılmaktadır. Bu yöntemde, aynı numune ardışık olarak işlenerek, kesitinde herhangi bir değişiklik olmaksızın şekil değiştirme oranı önemli ölçüde artırılabilir. Ayrıca,

ardışık olarak uygulanan geçişlerde proses rotası (processing route) değiştirilerek malzemenin yapısı ve mekanik özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir.

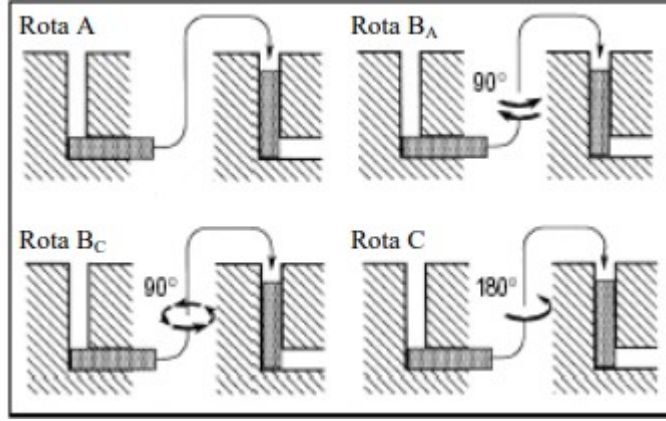


Şekil 3. EKAE kalıbı ve yöntemin şematik gösterimi

Bugüne kadar gerçekleştirilen araştırmalarda dört ana EKAE rotası tanımlanmıştır (Meyers & Chawla, 1999) (Şekil 4). Bunlar;

1. rota-A (Numune, her geçişte aynı yönde kalıp kanalına yerleştirilmektedir.),
2. rota-B<sub>A</sub> (Numune, her geçişte önceki yönüne göre  $\pm 90^\circ$  döndürülerek kalıp kanalına yerleştirilmektedir.),
3. rota-B<sub>C</sub> (Numune, bir önceki yönüne göre sürekli olarak  $+90^\circ$  döndürülerek kalıp kanalına yerleştirilmektedir.),
4. rota-C (Numune, her geçişte sürekli olarak aynı yönde  $180^\circ$  döndürülerek kalıp kanalına yerleştirilmektedir.)

Öte yandan son yıllarda, yukarıda bahsedilen rotalardan birkaçının birlikte kullanıldığı yeni rotalar da geliştirilmiştir (Karaman vd., 2004).



Şekil 4. Literatüre geçmiş başlıca EKAE rotaları (Furukawa vd., 2001).

#### 1.4.1. EKAE Yönteminin Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özelliklerine Etkisi

Literatür çalışmaları, EKAE yönteminin birçok malzemeye uygulandığını ve bu malzemelerden oldukça başarılı sonuçlar alındığını ortaya koymaktadır. (Demirtas vd., 2017; Pürçek vd., 2016; Demirtas vd., 2015). Bu tekniğin en önemli avantajlarından biri, süper ince taneli hale getirilen malzemenin hem dayanımını hem de sünekliğini aynı anda iyileştirilebilmesidir (Furukawa vd., 2001; Cisar vd., 2003; Valiev vd., 2002). Geleneksel üretim yöntemleriyle bu özelliği malzemelerde sağlamak neredeyse mümkün değildir. Bu noktada bilinen ilke, mukavemet ile süneklik değerinin birbirine zıt olarak değişimidir. Yani, bir malzemenin mukavemet değerleri artırıldığında süneklik değerleri azalır; süneklik değerleri arttığında ise mukavemet değerleri düşer. Bu yeni yöntem sayesinde, malzemelerin mukavemet ve süneklik değerleri bazen ikisi birlikte artırılabilir; ayrıca, özellikle güç deformasyona uğrayan gevrek malzemelerin şekillendirilebilirliği de önemli derecede iyileştirilebilmektedir. Örneğin, Ti ve Mg esaslı alaşımlara, yüksek sıcaklıklarda bu teknik uygulandığında söz konusu alaşımların mukavemetleri büyük oranda artarken, süneklikleri de önemli ölçüde iyileşmiştir (Kim vd., 2002; Agnew vd., 2004). Bir çalışmada, EKAE yöntemi kullanılarak üretilen nano yapıli malzemelerin genellikle porozite içermediği ve bu özelliğin yüksek mukavemet ile iyi süneklik değerlerinin sağlanmasına yardımcı olduğu saptanmıştır (Zhu vd., 2004). Başka bir çalışmada, EKAE ile üretilen bazı malzemelerde yüksek mukavemet ve yüksek sünekliğin mükemmel kombinasyonu gözlemlenmiştir (Valiev, 2003). Bu eşsiz özelliklerin, havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları gibi ileri düzey yapısal uygulamalar için son derece cazip olduğu

vurgulanmaktadır (Saray & Purcek, 2009). Ancak, bu kombinasyonu oluşturan mekanizmalar, birkaç sınırlı açıklama dışında henüz tamamen aydınlatılmamıştır (Saray & Purcek, 2009). Bu mekanizmaları anlamak amacıyla EKAE yöntemi çeşitli metal ve alaşımlar üzerinde uygulanmaya devam etmektedir (Saray & Purcek, 2009).

EKAE yöntemi, döküm halinde bulunan bazı alüminyum-çinko alaşımlarına uygulanmış ve bu alaşımlarda mukavemet ile süneklik değerlerinde kayda değer iyileşmeler sağlanmıştır (Purcek vd., 2004; Purcek vd., 2005; Purcek vd., 2007). Ötektik (Purcek vd., 2004) ve ötektoid (Demirtas & Purcek, 2019) bileşimlerindeki çinkoca zengin bazı alüminyum-çinko alaşımları, ticari ZA-8 (Demirtas & Purcek, 2019), ZA-12 (Purcek, 2005) ve ZA-27 (Purcek vd., 2005) alaşımlarına EKAE yöntemi başarıyla uygulanmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, EKAE uygulanan alaşımların oda sıcaklığındaki süneklik ve mukavemet değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir; ancak, mukavemet değerlerindeki artışın, süneklik değerlerindeki artışa göre daha sınırlı olduğu görülmüştür (Demirtas & Purcek, 2019). EKAE yöntemi uygulanan ZA-8 alaşımında, mukavemet ve süneklik değerlerindeki iyileşmelere paralel olarak aşınma direncinin de önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir (Demirtas & Purcek, 2019). İkili ZnAl60 alaşımı kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, dört geçiş EKAE işlemi sonucunda döküm kaynaklı mikro gözeneklerin (porozite) büyük oranda ortadan kaldırıldığı ve mikro yapının tamamen değiştiği gözlemlenmiştir (Saray & Purcek, 2009). Bu durum, dendritik döküm yapısının tamamen giderildiği ve bunun yerine ince şeritler görünümünde uzayan alüminyumca zengin  $\alpha$  taneleri ile çinkoca zengin ötektik fazlar içeren bir yapı oluştuğunu göstermektedir (Saray & Purcek, 2009). Benzer bulgular, başka bir çalışmada da üçlü Al-40Zn-2Cu alaşımında elde edilmiştir (Purcek vd., 2009). Alaşımların mukavemet ve süneklik değerlerinde EKAE ile elde edilen ciddi iyileşmeler, bu yapısal değişimlere atfedilmiştir. Ayrıca, işlem parametreleri olarak rota ve paso sayısının, bu alaşımların iç yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, paso sayısının artmasıyla mekanik özelliklerin iyileştiği ve bu özelliklerin artırılmasında bazı durumlar dışında rota-A'nın rota-B<sub>C</sub>'ye kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir (Saray & Purcek, 2009; Purcek vd., 2009).

### 1.5. Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri

Tekrarlı gerilmelere maruz kalan makine parçaları ve yapı elemanlarında, işlevsel kullanım sırasında ortaya çıkan hasarların %80 veya daha fazlasının yorulma nedeniyle olduğu bilinmektedir (Perry, 1988; Sines & Waisman, 1959; Swanson, 1974). Bu durum, tekrarlı gerilme altında çalışan bileşenlerin tasarımında yorulmanın göz önünde bulundurulmasının gerekliliğini net bir şekilde göstermektedir. Ancak, alüminyum-çinko esaslı alaşımların yorulma özellikleri konusunda literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Farklı döküm koşullarında bazı ticari ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri verilmiş, ancak yorulma eğrileri belirlenmemiştir (Savaşkan & Murphy, 1990). Bu veriler, alüminyum oranı artırıldıkça belirtilen alaşımların yorulma dayanımının yükseldiğini ve döküm yönteminin bu alaşımların yorulma davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Goodwin & Ponikvar, 1989). Örneğin, basınçlı dökümle üretilen ZA-8 alaşımının yorulma dayanımının, kokil dökümle üretilen ZA-8 alaşımının değerinin neredeyse iki katı olduğu, ayrıca kum döküm yöntemi ile üretilen ZA-27 alaşımının basınçlı döküm ile üretilen ZA-27 alaşımından daha yüksek bir yorulma dayanımı gösterdiği ifade edilmiştir (Goodwin & Ponikvar, 1989). Kokil döküm yöntemi ile üretilen alüminyum-çinko bazlı alaşımlarda, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımlara kıyasla daha fazla mikro boşluk (gözenek) olduğu tespit edilmiştir (Ashrafizadeh vd., 1987). Bu gözenekler, yorulma çatlaklarının gelişiminde önemli bir rol oynamakta ve alaşımların yorulma performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Ruiz & Elices, 1997).

İkili Zn-Al alaşımlarının yorulma performansını iyileştirmek için alaşım elementi katma yoluna gidilmiştir. Bu bağlamda, kokil dökümle üretilen bazı ikili Zn-Al ve üçlü Zn-Al-Cu alaşımların hava, tuzlu su ve HCl çözeltisi gibi çeşitli ortam faktörleri altındaki yorulma özellikleri araştırılmıştır (Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Savaşkan & Aydın, 2004; Çay & Kurnaz, 2005). Bu araştırmalara göre, alaşımların yorulma davranışları üzerinde iki faktörün (kimyasal bileşim ve deney ortamı) belirgin bir etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Özellikle, ikili alüminyum-çinko alaşımlarında artan alüminyum oranı ile yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin yükseldiği ve Cu katkısının bu alaşımların yorulma performansını geliştirdiği tespit edilmiştir (Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Savaşkan & Aydın, 2004; Çay & Kurnaz, 2005). Yorulma dayanım değerinin genelde artan alüminyum oranı ile yükseldiği; buna karşın yorulma

ömrü değerinin belli bir gerilmenin üstündeki değerde doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Aydın, 2001). Bu alaşımlarda Cu ilavesinin yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü artırdığı, fakat Cu miktarının %2 oranını geçmesi halinde bu alaşımların yorulma davranışının olumsuz yönde değişim sergilediği belirlenmiştir. Alaşım elementinin katkısının, yorulma performansındaki iyileşmenin genel olarak söz konusu alaşımların sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerindeki artışlarla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Aydın, 2001). Ayrıca, tuzlu su ve asit HCl çözeltisi gibi korozyif ortamların söz konusu alaşımların yorulma performansını olumsuz etkilediği ve bu olumsuzluğun özellikle asit ortamında daha belirgin şekilde ortaya çıktığı belirlenmiştir (Aydın, 2001). Tüm bu veriler ışığında, belirtilen alaşımların farklı ortamlardaki mukavemet değerleri ile kimyasal bileşimleri arasındaki ilişkileri ve yorulma dayanımı ile yorulma ömrü arasında bir matematiksel ilişki geliştirilmiş ve bu ilişkiler kullanıma sunulmuştur (Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Savaşkan & Aydın, 2004; Çay & Kurnaz, 2005). Döküm yöntemi ile üretilen alüminyum-çinko alaşımlarının mukavemetinin ve sünekliğinin beklenen seviyede olmaması nedeniyle, alaşım elementi ekleme ve ısıtma işlemi gibi geleneksel yöntemlerle bu alaşımların yorulma performansını artırma çabaları sırasında, yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinde beklenen seviyede bir iyileşme sağlanamamıştır. Bu sebeple, yeni tekniklerle üretim yapılarak alaşımın tekrar yapılandırılması yoluyla sağlanan iyileştirmelerin mukavemetin ve sünekliğin gelişmesine, yorulma performansında da kayda değer artışlara etkisi olacağı öngörülmektedir.

#### **1.6. EKAE Yönteminin Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerine Etkisi**

Literatür incelemeleri, EKAE yöntemiyle üretilen süper ince taneli malzemelerin yorulma davranışlarının kapsamlı bir şekilde araştırılmadığını göstermektedir (Chung vd., 2002; Patlan vd., 2001). Bazı araştırmacılar belirli malzemeleri incelemiş ve bu tekniğin malzemelerin yorulma davranışına olan etkilerini anlamaya çalışmış, ancak yorulma mekanizmaları tam olarak açıklanamamıştır (Purcek vd., 2004; Chung vd., 2002; Patlan vd., 2001; Vinogradov & Hashimoto, 2003). Yapılan literatür taramaları sonucunda bu yöntemin bazı malzemelerin yorulma davranışlarını olumlu yönde etkilediği (Chung vd., 2002; Patlan vd., 2001; Vinogradov & Hashimoto, 2003; Kim vd., 2003), bazı malzemelerde ise etkisinin sınırlı kaldığı (Patlan vd., 2001) ve hatta bazı durumlarda

yorulma performansını olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Vinogradov vd., 2003; Mughrabi vd., 2004). Bu durumun malzemelerin mikro yapıları ve bu mikro yapılara bağlı olarak ortaya çıkan sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi temel mekanik özellikleriyle ilişkili olduğu belirlenmiştir (Purcek vd., 2004; Mughrabi vd., 2004). Zn-Al alaşımlarının yorulma performansını iyileştirmek için EKAE yöntemi bazı ikili alaşımlara (Al-20Zn, Al-40Zn) başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2013; Aydın & Heyal, 2012). Bu çalışmalar sonucunda EKAE yöntemiyle alaşımların mukavemet ve süneklik değerlerinin birlikte artırılmasına ve özellikle de toklukta sağlanan artışa paralel olarak yorulma dayanım sınırı değerlerinde % 80' lere varan artışlar elde edilmiştir (Heyal, 2011). Mekanik özellikler ve özellikle de yorulma performansındaki bu olağan üstü artış EKAE yöntemi sonrası ortaya çıkan yapısal değişimlere dayandırılarak açıklanmıştır. Tüm bu bilgiler doğrultusunda, EKAE sonrası meydana gelen yapısal değişimlerin sonuçları itibarıyla mukavemet ve süneklik değerlerinde sağlanan iyileşmenin, Cu katkılı Al-20Zn alaşımlarının yorulma performansını da önemli ölçüde artıracığı öngörülmektedir.

### **1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı**

Alüminyum-çinko bazlı alaşımlarda geleneksel üretim yöntemleriyle elde edilen mekanik özellikler, özellikle yorulma dayanımı açısından bazı uygulamalarda yeterli değildir. Bu durum, ekonomik, hafif ve kolayca temin edilebilen bu alaşımların diğer malzemelere göre sahip olduğu pek çok avantajın kullanımını kısıtlayan bir etken olarak görülmektedir. Bu kapsamda, ilgili alaşımların yeni nesil mühendislik tasarımlarında değerlendirilebilmesinde mekanik özelliklerin, özellikle de yorulma özelliklerinin iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu bağlamda alaşım elementi katma, ısıtma işlem ve benzeri geleneksel yöntemler uygulanmış, özellikle bakır katkısıyla sözü edilen alaşımların mekanik özelliklerinde önemli bir iyileşme sağlanmış ancak ısıtma işlemin çok fazla etkili olmadığı görülmüştür (Şenaslan, 2016; Purcek vd., 2009; Savaşkan & Aydın, 2004; Turhal & Savaşkan, 1997). Örneğin, bakır katkısının monotektoid esaslı (Zn-40Al) alaşımların gerek mekanik özellikleri gerekse yorulma davranışlarını büyük ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir (Presnyakov vd., 1961; Gervais, 1987; Skenazi vd., 1983; Carpenter & Garwood, 1967; Demirtas vd., 2017). Tüm bu çalışmalar sonucunda kaydedilen olumlu gelişmelere rağmen, bahsedilen alaşımların mekanik özellikleri, özellikle mukavemet,

süneklik, darbe dayanımı ve özellikle yorulma performansı, hâlâ bazı mühendislik uygulamaları açısından beklentileri karşılayamamaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek için yüksek oranda alüminyum içeren (Al-20Zn, Al-40Zn) bazı ikili alaşımlara EKAE işlemi uygulanmış ve yorulma performansında olağanüstü iyileşmeler elde edilmiştir. Öte yandan yapılan literatür araştırmaları (Çay & Kurnaz, 2005; Saray & Purcek, 2009), yüksek oranda alüminyum içeren alaşımların daha iyi mekanik özellikler ve buna bağlı olarak daha üstün yorulma performansı sergilediğini göstermiş olmasına rağmen yüksek oranda alüminyum içeren alaşımlarda (Al-20Zn gibi) bakır katkısının yorulma davranışına etkisi hemen hemen hiç incelenmemiştir. Ayrıca, literatürde bakır katkılı alaşımların EKAE uygulanmış durumdaki yorulma davranışına ilişkin herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır. Cu katkısının yüksek alüminyum içeren ( $\% \text{Al} \geq \% 80$ ) alaşımların mekanik özellikleri ve yorulma davranışları üzerindeki etkisi ile birlikte, EKAE yöntemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımının yorulma performansının henüz araştırılmamış olması, bu çalışma ile birlikte literatüre özgün bir araştırma bilgisi kazandıracığı düşünülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, bakır katkısının ve EKAE yönteminin, ikili alaşımlarda en iyi mekanik özellikleri gösteren Al-20Zn alaşımının yorulma davranışına etkisi incelenecektir. EKAE yöntemiyle sözü edilen alaşımdaki yapısal değişimlere bağlı olarak mekanik özelliklerinde ve özellikle de yorulma performansında büyük oranda iyileşme elde edileceği öngörülmektedir. Geleneksel mukavemet artırma yöntemleriyle malzemelerin mukavemet ve süneklik değerlerini birlikte artırmak veya süneklik değerlerini düşürmeden mukavemet değerlerini artırmak mümkün değildir. Bu nedenle bu çalışmada, EKAE yöntemi uygulanarak yeniden yapılandırılan Cu katkılı Al-20Zn alaşımının yapı ve mekanik özellikleri ve özellikle de yorulma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Cu katkısının Al-20Zn alaşımının mekanik özellikleriyle yorulma davranışına etkisi ortaya konulacak ve en iyi performansı gösteren optimum kimyasal bileşime (Cu oranına) sahip alaşım belirlenecektir. Söz konusu alaşım EKAE yöntemiyle yeniden yapılandırılacak ve elde edilen bu yapısal değişimin alaşımın yorulma özellikleri üzerindeki etkileri incelenerek yorulma mekanizmaları aydınlatılmaya çalışılacaktır. Ayrıca, EKAE rotası ve paso sayısı gibi proses parametrelerinin alaşımın yorulma davranışları üzerindeki etkileri araştırılarak en uygun işlem parametreleri belirlenecektir. Bu yapılırken, yorulma özelliklerindeki değişimleri ortaya çıkaran temel yapısal ve mekanik özellikler de araştırılacaktır. Böylece EKAE yöntemiyle üretilen alaşımın yapısı, mekanik özellikleri ve yorulma davranışları ile işlem parametreleri arasındaki ilişkiler

ortaya konularak uygulayıcılara veri olarak sunulacaktır. Bütün bu incelemeler sonucunda optimum kimyasal bileşim ve en uygun proses parametreleri belirlenmiş olacaktır. Bu durum, kolay ve ekonomik bir şekilde tedarik edilebilen bu alaşımların zayıf sünekliği, mukavemeti ve düşük yorulma performansları gibi sınırlamaları nedeniyle kullanım alanlarının genişlemesine olanak tanıyacak ve böylece geleneksel mühendislik malzemeleri için alternatif bir malzeme olarak sunulmalarını sağlayacaktır. Şöyle ki; bakır katkısı ve özellikle EKAE yöntemi uygulanmış alaşımın yorulma performansında elde edilecek olan önemli iyileşme, kullanım alanı genelde kaymalı yatak üretimiyle sınırlı kalan Zn-Al esaslı alaşımların çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımını kısıtlayıcı faktörlerin ortadan kaldırılmasına ve kullanımının yaygınlaştırılmasına önemli bir katkı sağlayacaktır.

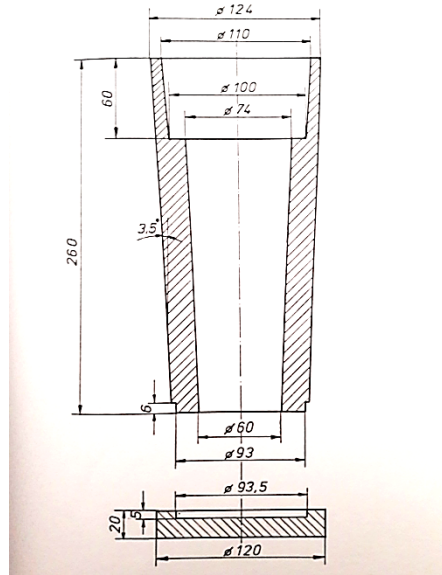
Bu çalışmada, eş kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yöntemi kullanılarak optimum bakır oranına sahip Al20Zn-Cu alaşımının yeniden yapılandırılması ve bu sayede alaşımın yorulma performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

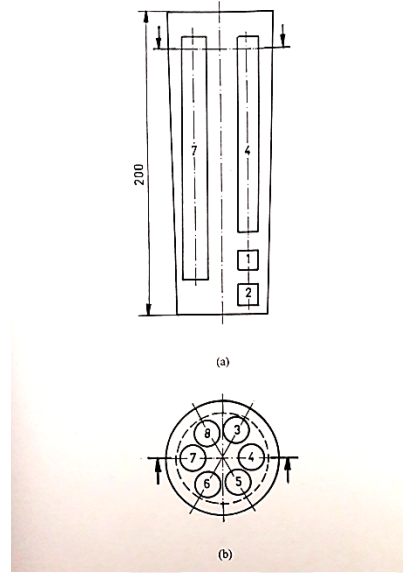
### 2.1. Alaşımların Üretimi

Bu çalışmada Al20Zn ikili alaşımına farklı oranlarda (%1-5) bakır (Cu) ilave edilerek Al-Zn-Cu üçlü alaşımları metal kalıba (kokil) döküm tekniğiyle üretildi. Alaşımların dökümünde yüksek saflığa sahip çinko (%99,9), alüminyum (%99,8) ve bakır (elektrolitik) kullanılmıştır. Döküm işlemi, elektrikli bir pota fırınında ergitme işlemi ile gerçekleştirildi. Elde edilen ergitilmiş alaşımlar, 680°C'den oda sıcaklığına ulaşan kokil kalıba döküldü. Bu kalıbın şekli ve boyutları Şekil 5'te gösterilmiştir. Külçelerin çekme boşluğu içeren yaklaşık 60 mm uzunluğundaki üst kısımları kesilerek atıldı. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon yöntemi kullanılarak belirlendi. Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarına ait her bir külçeden talaşlı imalat yöntemiyle birer adet metalografi, ikişer adet sertlik, üçer adet çekme ve darbe, 30'ar adet yorulma örneği hazırlandı. Optimum kimyasal bileşim (Cu oranı) belirlendikten sonra, optimum kimyasal bileşime sahip alaşımdan EKAE deneyleri için yeterli miktarda numune, kokil döküm ve talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak üretildi.

Söz konusu numunelerin külçenin hangi bölgelerinden alındıkları Şekil 6'da şematik olarak gösterilmiştir.



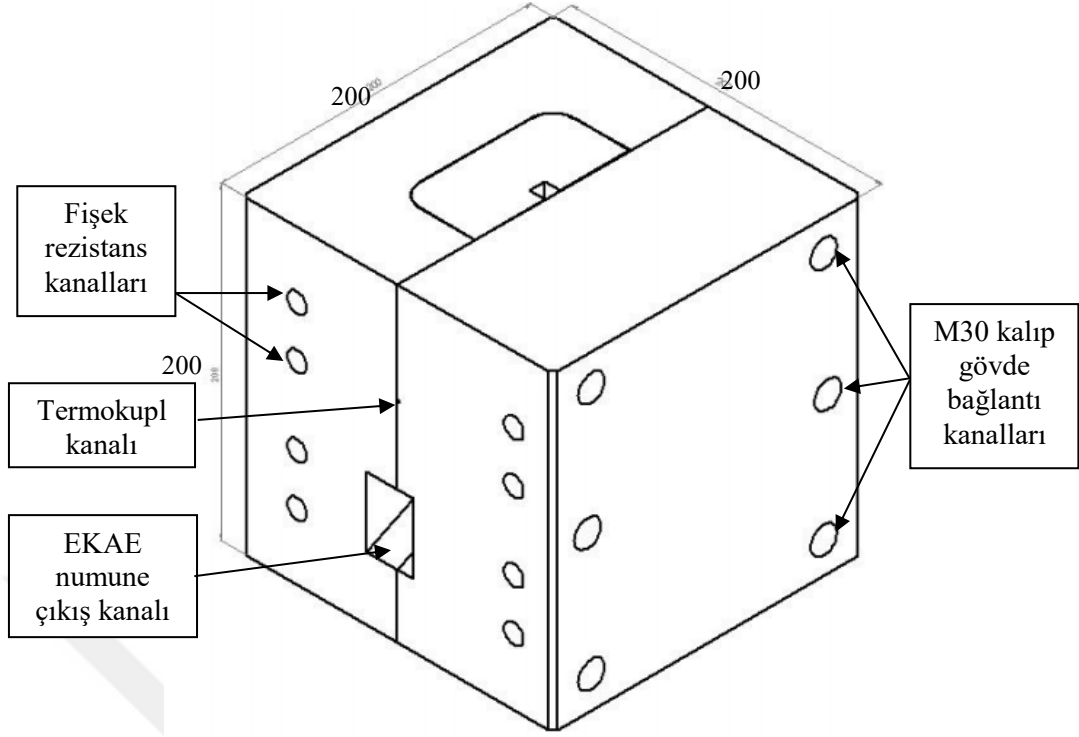
Şekil 5. Kokil kalıbın şekil ve boyutları



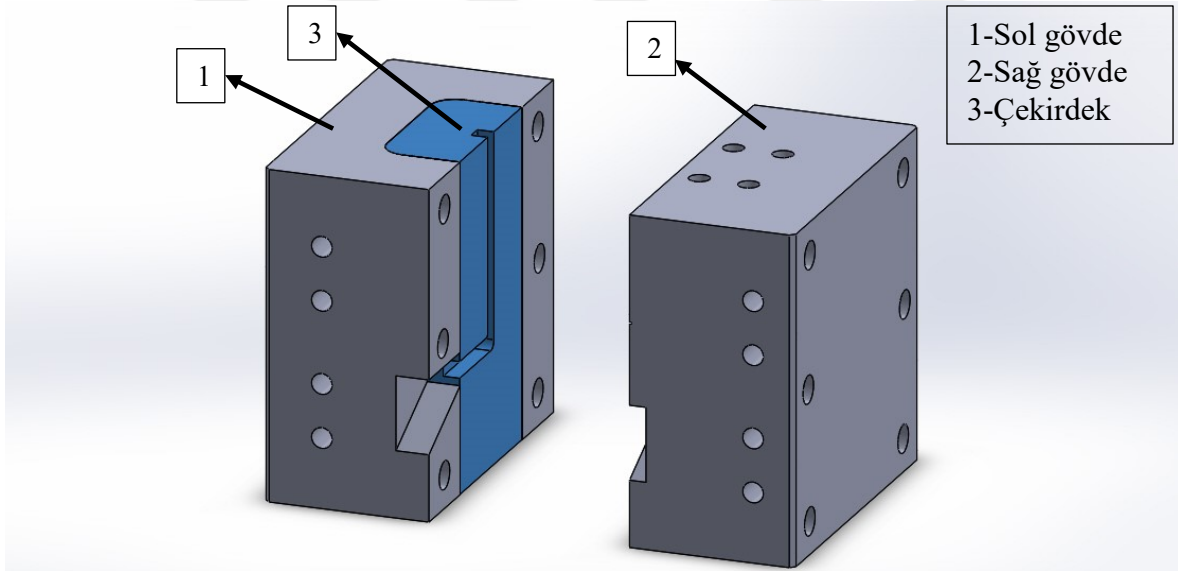
Şekil 6. Üretilen külçelerden metalografi (1), sertlik (2), çekme (3,4) ve yorulma deney numunelerinin (5,6,7,8) alındığı bölgeleri gösteren şematik resim. a) Önden görünüş, b) Üstten görünüş

## 2.2. EKAE Deneyleri

EKAE deneyleri için özel olarak tasarlanıp üretilen bir deney seti kullanıldı; bu set kalıp çekirdeği, kalıp gövdesi ve ısıtıcının yanı sıra diğer elemanları içermektedir. EKAE deney kalıbı sıcak iş takım çeliğinden (1.2344 - X40CrMoV5-1 - AISI H13) imal edilmiş olup; sağ gövde, sol gövde ve çekirdek içeren üç ana parçadan oluşmaktadır. Dış boyutları 200x200x200 mm olan EKAE kalıbının montaj sonrası ve ana parçaların detayını gösteren montaj öncesi izometrik görünüşleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Gövdelerin her birinin ölçüsü 100x200x200 mm'dir. Kalıp üzerinde, kalıbı istenilen sıcaklığa ısıtmak için Ø13x200mm ölçüsünde 8 adet ısıtıcı fişek rezistans kanalı ile sıcaklığı ölçmek ve istenilen değerde sabitleyebilmek için Ø5x100mm ölçüsünde 2 adet K tipi termokupl kanalı yer almaktadır.



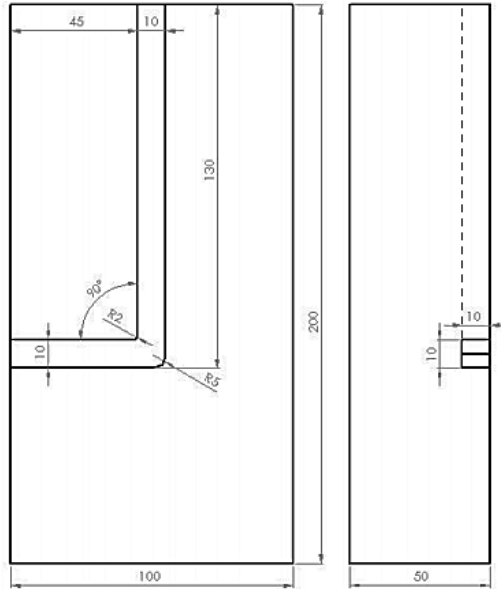
Şekil 7. EKAЕ kalıbının montaj sonrası izometrik görünüşü



Şekil 8. EKAЕ kalıbını oluşturan ana parçaların montaj öncesi izometrik görünüşü

EKAЕ kalıp çekirdeğinin şekli ve boyutlarını detaylı bir şekilde gösteren iki görünüşü Şekil 9’da verilmiştir. Söz konusu şekilde verilen 90° iç açılı L formda kanala sahip 50x100x200 mm boyutlarındaki çekirdek, Şekil 8’de görüldüğü gibi sol gövde içine yerleştirilmektedir. Deney esnasında oluşabilecek olumsuz durumlarda (numune sıkışması,

kanal profilinin bozulması, çekirdeğin 10x10 mm kanal kısmının deforme olması vb.) çekirdeğin tamir edilebilmesi ve farklı kanal açılara sahip çekirdek kullanılarak deney yapılabilmesi için bu bölüm, gövdeden bağımsız kolaylıkla değiştirilebilen bir parça olarak tasarlanmıştır.

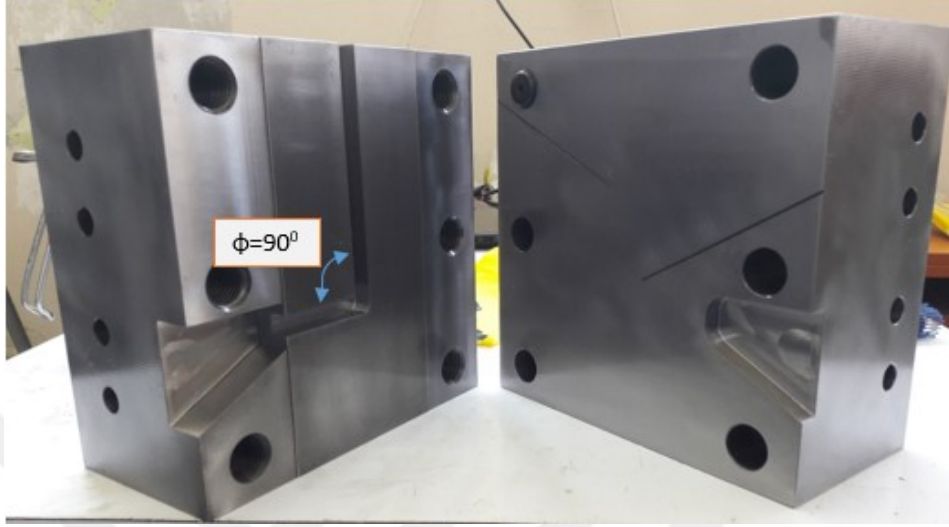


Şekil 9. EKAЕ kalıp çekirdeğinin şekli ve boyutlarını gösteren iki görünüşü

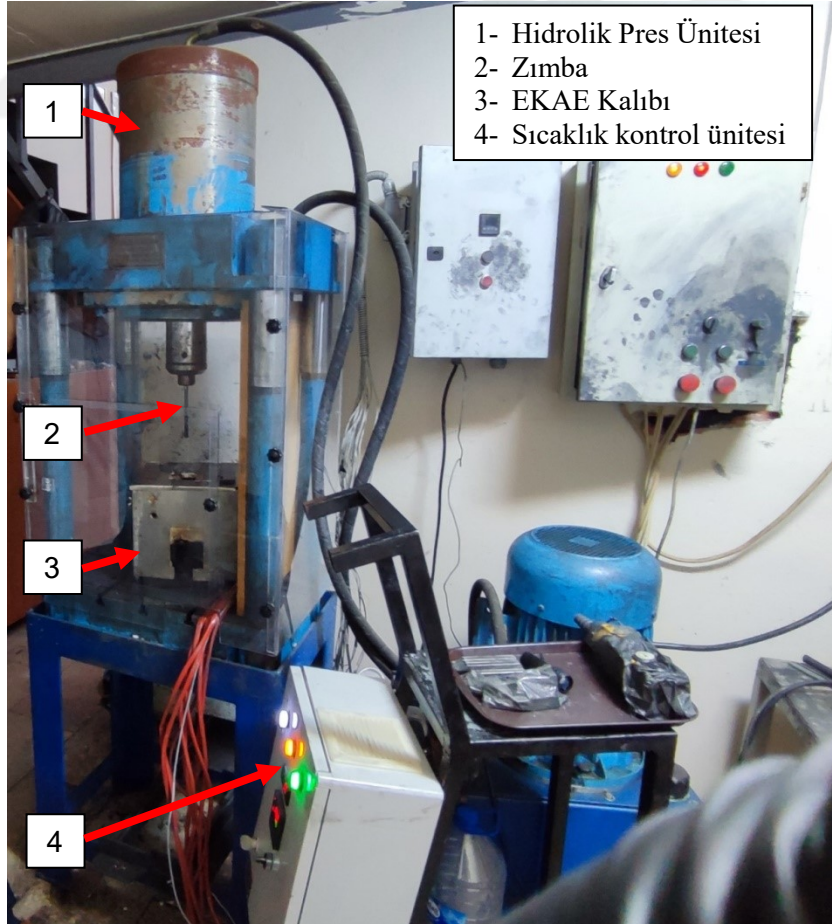
Çekirdek bölümü, kalıbın merkezinde yer almakta olup iki dış gövdenin 6 adet M30 cıvata bağlantısı ile gövdeler arasına sıkıştırılmaktadır. EKAЕ deneyinde kullanılacak zımba, çekirdekteki kanal ile uyumlu olup kesiti 10x10 mm'dir. Zımbanın deney esnasında maruz kalacağı eğme kuvvetlerinin etkisiyle kırılmaması için numune kanal boyu kısa tutulmaya çalışılmış olup 130 mm olarak belirlenmiştir.

İlgili parametrelere göre tasarlanıp üretilen ve ısıl işlem sonrası sertlik değeri 52 HRC civarında olan üç parçalı EKAE deney kalıbının montaj öncesi fotoğrafı Şekil 10’da verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılabacağı üzere, kalıp gövdesi içinde giriş kanalına komşu olarak yerleştirilmiş iki termokupl kanalı bulunmaktadır. Bu kanallara yerleştirilen termokupllar ve sıcaklık kontrol ünitesi ile kalıp sıcaklığı, deney süresince sürekli olarak ölçülmekte ve istenen seviyede tutulabilmektedir. Deney süresince proses sıcaklığının sabit kalabilmesini sağlamak yani muhtemel sıcaklık düşüşlerinin engellenmek amacıyla EKAE deney kalıbının etrafı 25 mm kalınlığında seramik elyaf battaniyeden oluşan ısı yalıtım malzemesiyle kaplanmıştır. Söz konusu izolasyon malzemesinin dağılmadan sabit kalması ve kalıba sıkıca bağlanması için kalıbın çevresi boyunca paslanmaz çelik malzemeden

yapılan muhafaza sacı kullanılmıştır. Kalıp, zımba, sıcaklık kontrol ünitesi ve hidrolik pres gibi ana bölümlerden oluşan EKAЕ deney setinin fotoğrafı Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 10. Kalıp gövdeleri ve 90° açılı çekirdekten oluşan EKAЕ deney kalıbının fotoğrafı



Şekil 11. EKAЕ deney setinin fotoğrafı

EKAE deneyleri için optimum kimyasal bileşime sahip alaşımdan yeterli miktarda numune, kokil döküm ve talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak üretildi. EKAE deneylerinde, paso sayısı arttıkça numune boyu kısılacığından mekanik deneylerde (çekme, sertlik, yorulma, darbe) kullanılacak numune ölçüleri dikkate alınarak numune boyutları 10x10x120 mm olarak belirlendi. EKAE deney numunelerinin yüzeylerinde herhangi bir çatlama veya kırılma oluşmaması için proses işlemleri  $130 \pm 5$  °C sıcaklıkta yapıldı. Her geçiş öncesinde, oluşacak sürtünmeyi azaltmak ve ekipmanları korumak amacıyla kalıbın kanalları ve numune yüzeyi MoS<sub>2</sub> yağ ile yüzeylerde ince bir tabaka oluşturacak şekilde yağlandı. Ayrıca, EKAE numuneleri her paso öncesinde kalıp içinde ısı dengelinin sağlanabilmesi için 5 dakika süreyle bekletildi. Hazırlanan EKAE numuneleri, 1000 kN kapasiteli, hareketli piston mekanizması ve manuel hız kontrolü olan bir hidrolik pres kullanılarak, 1 mm/s sabit hızda, rota-A ve rota-B<sub>C</sub> ile 4 paso işlem uygulanmıştır. Diğer çalışmalarda uygulandığı gibi, EKAE deneylerinde numuneler, rota-A'da tüm aşamada aynı yönde, rota-B<sub>C</sub>'de tüm proses boyunca her defasında bir öncekine göre +90° döndürülerek kalıba yerleştirilmiştir.

### 2.3. Metalografik İncelemeler

İçyapı incelemeleri kapsamında, döküm halindeki Al<sub>20</sub>Zn-(%1-5)Cu alaşımlarından ve EKAE işlemi görmüş Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımından alınan numuneler, standart metalografi yöntemiyle hazırlandı. Bu numuneler, 100 ml saf su ve 3,4 gr NaOH'dan oluşturulan bir dağlama ayırıcı ile dağlandı. Ayrıca, yorulma deneyleri sonucunda kırılmış numunelere ait kırık yüzeylerin dik görünüşüne ait kesitlerini incelenmek amacıyla metalografi numuneleri de benzer şekilde hazırlandı. Numunelerin içyapıları laboratuvarında bulunan optik mikroskop ve elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı bir şekilde incelendi.

### 2.4. Mekanik Deneyler

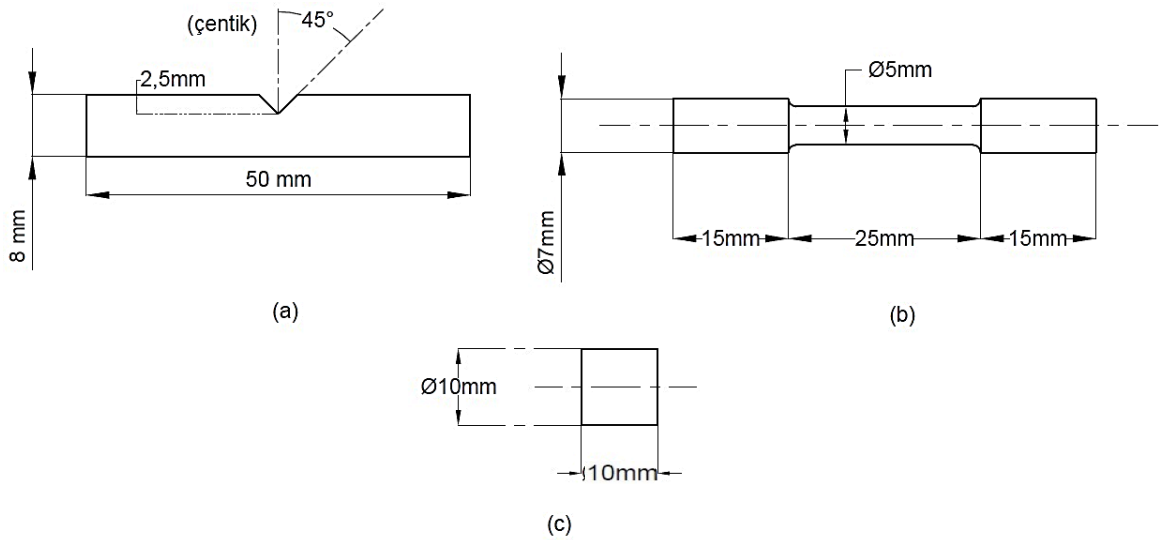
#### 2.4.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri

Çekme testleri için, alaşımlardan çapı 5 mm ve uzunluğu 25 mm olan numuneler, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak talaşlı imalat yöntemiyle hazırlandı. Bu

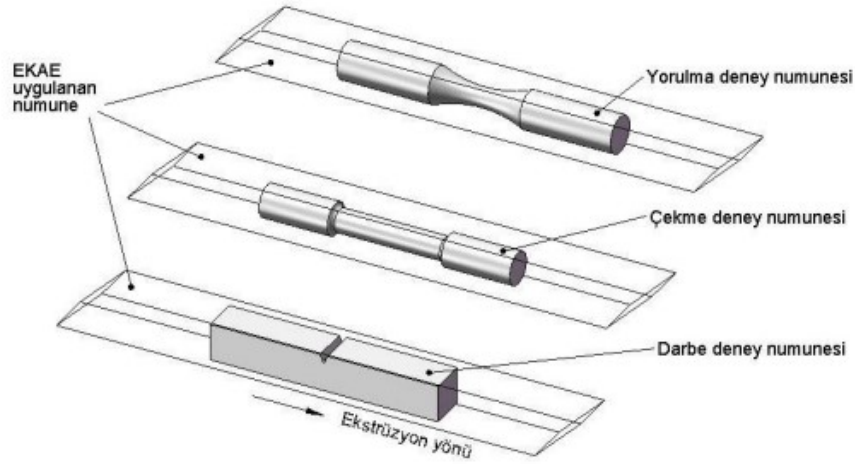
numuneler, üniversal bir çekme deneyi makinesinde 0,25 mm/s çene hızında test edildi. Her bir alaşım için üç numune teste tabi tutuldu. Alaşımların çekme mukavemeti, akma dayanımı ve kopma uzaması, bu numunelerden elde edilen verilerin ortalamasıyla belirlendi. Sertlik deneyleri TS EN ISO 6506-1 standardına uygun numuneler hazırlanarak gerçekleştirildi. Gerek dökülmüş gerekse EKAE uygulanmış durumdaki numuneler talaşlı işlemlerle birbirine paralel yüzeyler elde edilecek şekilde işlenip parlatmaya tabi tutuldu. Sertlik ölçümü, Brinell tekniğiyle 31,25 kg'lık bir yük ve 2,5 mm çapındaki çelik bilye uç kullanıldı. Sertlik değeri, beş farklı noktadan elde edilen ölçümlerin ortalaması alınarak belirlendi.

Darbe testleri, alaşımlardan talaşlı imalatla 8 x 8 x 50 mm<sup>3</sup> boyutlarında TS EN ISO 14556 standardına uygun numuneler üretildi. Numunenin ortasında, standartlara uygun olarak derinliği 2,5 mm ve 45° açı ile açılmış bir kanal oluşturuldu. Bu kanalın uç kısmı ise 0,25 mm yarıçapında şekillendirildi. Darbe testleri, 500 kg.cm ( $\pm 0.5$  kg.cm) darbe enerjisi kapasitesine sahip bir deney setinde gerçekleştirilmiş olup, her alaşım için üç deney örneği kullanılmıştır. Ölçülen verilerin ortalaması ile her bir durumdaki darbe dayanımı değerleri tespit edildi.

Üretilen çekme, sertlik ve darbe testine tabi tutulacak numunelerin şekil ve boyutları Şekil 12'de, EKAE işlemiyle numunelerden üretilen yorulma, çekme ve darbe deney numunelerinin şematik görünümü ise Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 12. Talaşlı imalat ile üretilen (a) darbe, (b) çekme ve (c) sertlik deneyi numunelerinin şekil ve boyutları



Şekil 13. EKAİ işlemi uygulanmış numunelerden çıkarılan yorulma, çekme ve darbe deney numunelerinin şematik görünümü

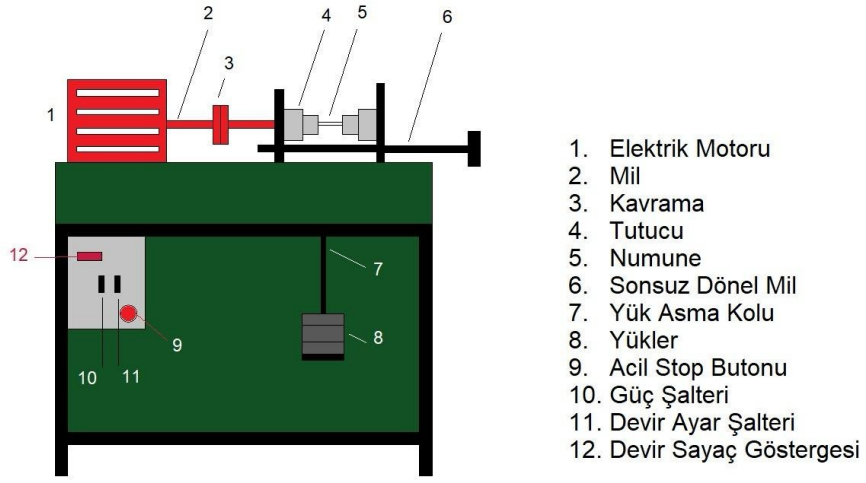
#### 2.4.2. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri laboratuvarında mevcut bulunan dönel eğmeli bir yorulma deney makinesi kullanılarak gerçekleştirildi. Söz konusu deney makinesinin genel görünüşü Şekil 14-a'daki fotoğrafta, ana elemanları ise Şekil 14-b'deki şematik resimde verilmiştir. Bu deney makinesi, 2 kW gücünde bir elektrik motoru ile birlikte iki adet mil, millerin yataklamasında kullanılan iki ana yatak, yük askı kolu, kavrama, numune tutucuları, otomatik kontrol sistemi, komparatör ve devir sayacı gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Yorulma deney makinesinin numune bağlantı kısmının ayrıntılarını gösteren fotoğraf Şekil 15'te sunulmaktadır.

Deney makinesi, dönme hareketinin yanı sıra açısal hareket serbestliğini de sağlamak amacıyla özel bir yataklama sistemi ile tasarlanmıştır. Motor ile deney düzeneği mili arasında bağlantıyı sağlayan özel bir kardan kavraması, sisteme hem açısal hem de eksenel hareket serbestliği kazandırmaktadır. Ayrıca, deney sisteminin eksenel hareketini sağlamak için sonsuz vida mekanizması kullanılmış ve motor, hareketli bir tabla üzerine konumlandırılmıştır. Deney örneğinin kırıldığı andaki çevrim sayısını ölçebilmek ve numune kırıldığında sistemin otomatik durmasını sağlamak amacıyla, elektronik devir sayacı ve anahtar entegre edilmiştir. Deney makinesinde iki farklı devir (1500 ve 3000 d/d) sayısı ve çeşitli boyutlarda numunelerle deney yapmaya olanak tanıyacak şekilde özellikler bulunmaktadır.

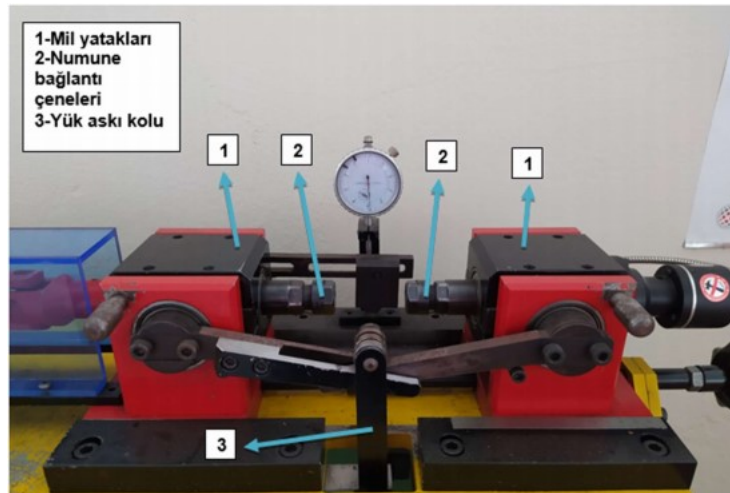


(a)



(b)

Şekil 14. Dönel eğmeli yorulma deney makinesinin a) Genel görünüşü, b) Ana elemanlarının şematik resmi



Şekil 15. Yorulma deney makinesinin numune bağlantı bölümünün detaylı görünüşü

Yorulma deneyleri, talaşlı yöntemle yüzeyleri hassas bir şekilde hazırlanmış ASTM E606 standardına uygun numunelerle gerçekleştirildi. Söz konusu numune, iki ucundan yorulma makinesinin numune tutucu çenelerine sıkı bir şekilde bağlanmaktadır. Yük uygulama alanına kütle asılarak manuel olarak veya otomatik yük sistemiyle örneğe eğme gerilmesi uygulanmaktadır. Bu durumda, yükleme kolları arasında sabit bir eğme momenti oluşur. Bu moment, numunenin orta noktasında maksimum eğme gerilmesi oluşturur. Temelde, elektrik motoru ile sürekli döndürülen yorulma örneğinde, yüzeydeki her nokta ortalama gerilmenin sıfır olduğu bir sinüzoidal dalgalanma gösteren maksimum çekme ve basma gerilmeleri altında kalmaktadır. Numunenin en dar kesitinde ortaya çıkan maksimum eğme gerilmesi, aşağıdaki formül (1) ile hesaplanabilir. Yapılan analizlerde, ilgili deney makinesinde uygulanan yük P ile numunenin en dar kesitindeki maksimum eğme gerilmesi ( $\sigma_{eğ}$ ) arasında, bu deney düzeneği için aşağıda verilen formül (3) ile ifade edilen bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yük askı koluna farklı ağırlıklar asılarak farklı gerilmeler elde edilmesi sonucunda her bir gerilme değerine karşılık gelen çevrim sayısı elde edilmektedir. Başlangıçta uygulanan gerilmeler gerilme-çevrim sayısı diyagramının düşey eksenindeki değerleri, deney sonucunda elde edilen çevrim sayısı değerleri ise yatay eksenindeki noktaları oluşturmaktadır.

$$\sigma_{eğ} = M_{eğ} / W_{eğ} \quad (1)$$

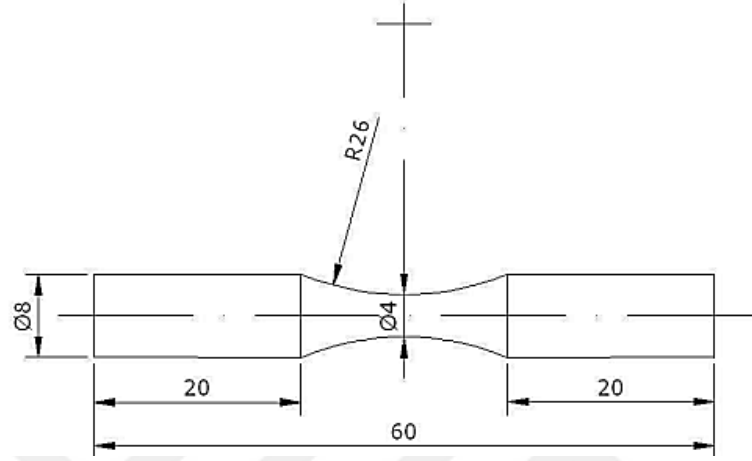
$$\sigma_{eğ} = P.l / (\pi d^3 / 32) \quad (2)$$

$$\sigma_{eğ} = 18,6.P \quad (3)$$

Yukarıda belirtilen denklem kümesinde, P asılan ağırlığı [N] cinsinden,  $\sigma_{eğ}$  eğilme gerilmesini [MPa] cinsinden,  $M_{eğ}$  eğme momentini,  $W_{eğ}$  ise eğme mukavemet momentini göstermektedir. Belirtilen denklem setinde, numune çapı  $d=4$  mm olarak belirlenmiş ve moment kolu  $l=117$  mm olarak sabit bir değer kabul edilmiştir.

Yorulma deneyleri, farklı oranlarda bakır (%1-5) içeren dökülmüş durumdaki alaşımlardan ve EKAE uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımından alınan numuneler kullanılarak gerçekleştirildi. Talaşlı işleme ile yüzeyleri hassas bir biçimde hazırlanan ve Şekil 16'da görülen şematik resmi sunulan bu numuneler, farklı gerilmeler altında yorulma testine tabi tutulmuştur. Döküm halindeki numunelerle gerçekleştirilen yorulma deneyleri 78 - 237 MPa aralığında, EKAE işlenmiş numunelerle yapılan deneyler ise 110 – 257 MPa

değişen gerilme değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir gerilme değeri için her alışımdan beş deneme numunesi kullanılmıştır. Deneylerin sonunda numunelerin kırılıncaya kadar ki çevrim sayısı değerleri belirlendi. Bu veriler kullanılarak gerek dökülmüş gerekse EKAE uygulanmış durumdaki gerilme çevrim sayısı eğrileri (Wöhler diyagramları) elde edildi.



Şekil 16. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutları

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

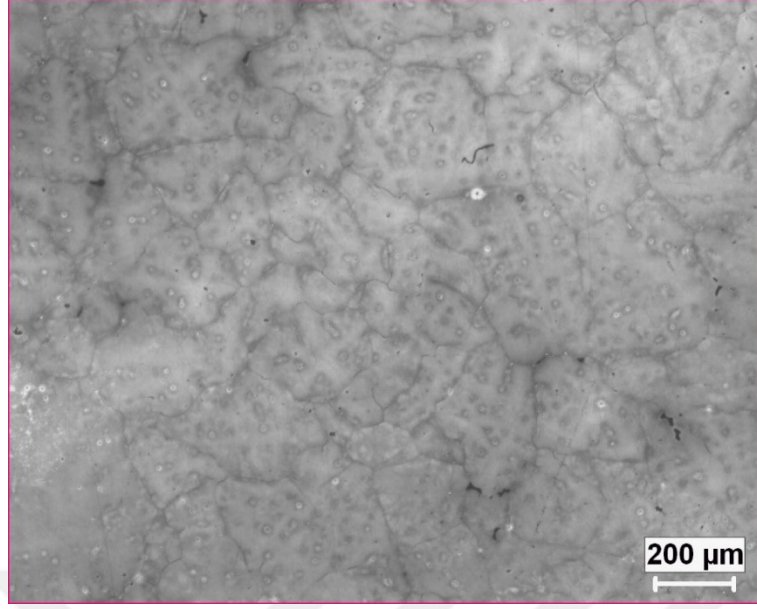
Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri, Tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Alaşımların kimyasal bileşimi

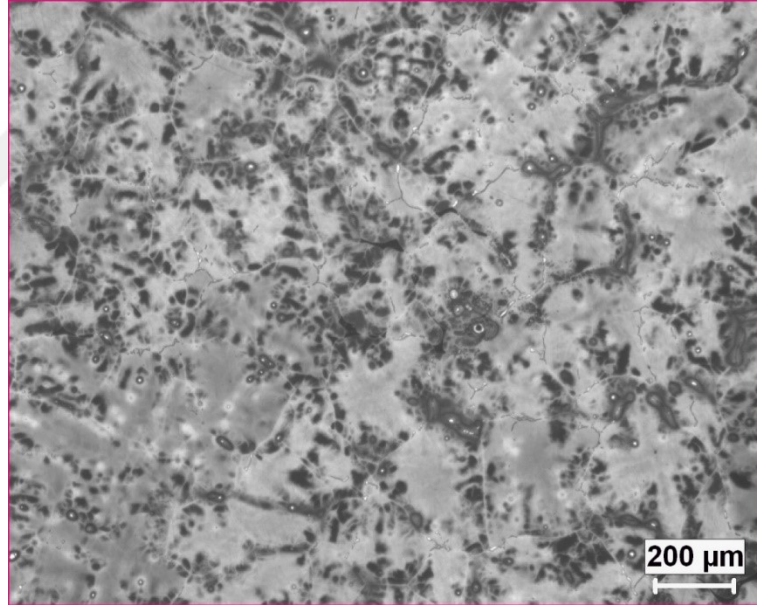
| Alaşım     | Kimyasal bileşim (% ağırlık) |      |     |
|------------|------------------------------|------|-----|
|            | Zn                           | Al   | Cu  |
| Al20Zn-1Cu | 19,4                         | 79,5 | 1,1 |
| Al20Zn-2Cu | 18,8                         | 79,1 | 2,1 |
| Al20Zn-3Cu | 19,0                         | 78,0 | 3,0 |
| Al20Zn-4Cu | 18,3                         | 77,6 | 4,1 |
| Al20Zn-5Cu | 18,0                         | 76,8 | 5,2 |

#### 3.2. Alaşımların İç Yapısı

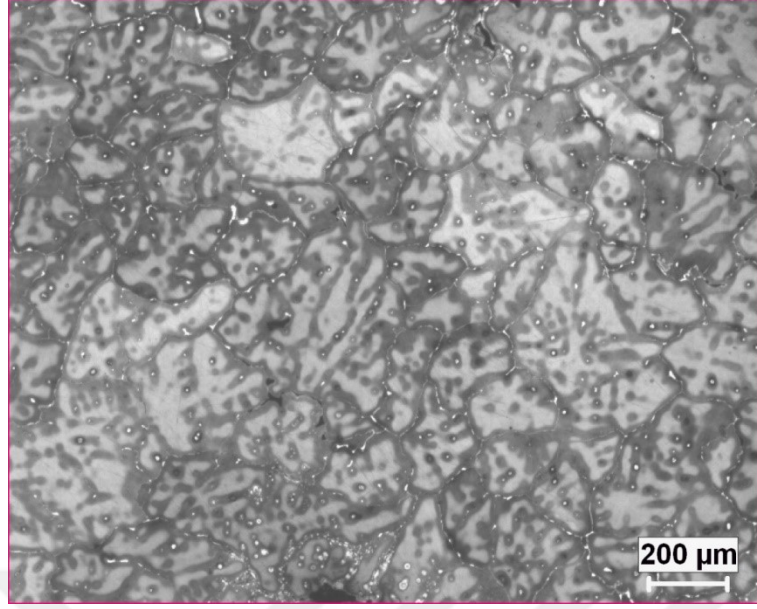
Al20Zn-(%1-5 Cu) alaşımlarının döküm iç yapıları, sırasıyla Şekil 17-21'de gösterilmektedir. Bu görseller, alaşımların genel olarak geniş  $\alpha$  tanelerinden oluşan tipik bir dendritik döküm yapısı sergilediğini ve dendritler arası bölgelerde çinkoca zengin  $\alpha+\eta$  ötektoid lamellerinin oluştuğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle %2 bakır içeren alaşımların içyapısında net bir biçimde ortaya çıkmıştır, Şekil 18. Önceki araştırmalarda, bu alaşımlarda alüminyum oranının belirli bir eşik değeri aştığında, dendritik yapının taneli bir yapıya dönüşme eğilimi gösterdiği belirtilmiştir (Savaşkan & Murphy, 1990). Bu durum, alaşımlara ait içyapı fotoğraflarında (Şekil 17-21) belirgin bir şekilde gözlemlenmemekle birlikte, yüksek büyütmelemlerde çekilen Al-20Zn-2Cu alaşımlarının detaylı içyapısını gösteren fotoğrafta tane sınırları ve parçacık görünümlü bakırca zengin fazlar net bir biçimde görülmektedir, Şekil 22. Öte yandan, %2 oranının üzerindeki Cu katkısıyla tane sınırlarındaki belirginliğin gittikçe azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, bu alaşımların karakteristik bir özelliği olan mikro gözeneklerin (porozite, döküm boşluğu) varlığı, (Chung vd., 2002) Şekil 23'teki Al-20Zn-2Cu alaşımlarının detaylı içyapısını gösteren fotoğrafta görülmektedir.



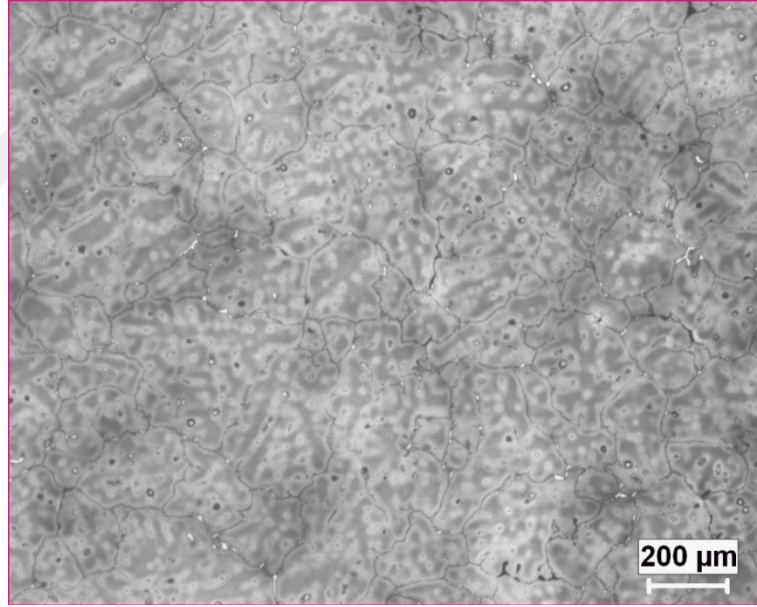
Şekil 17. Al<sub>20</sub>Zn-1Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapısı



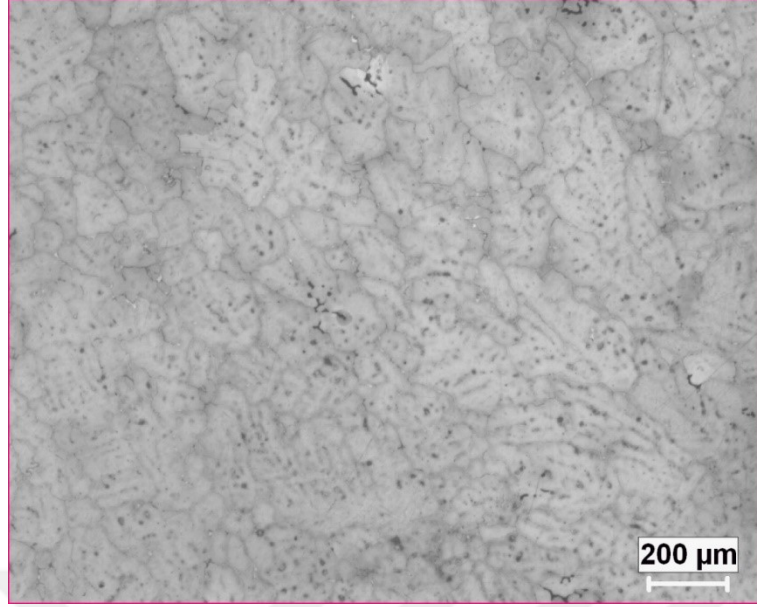
Şekil 18. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapısı



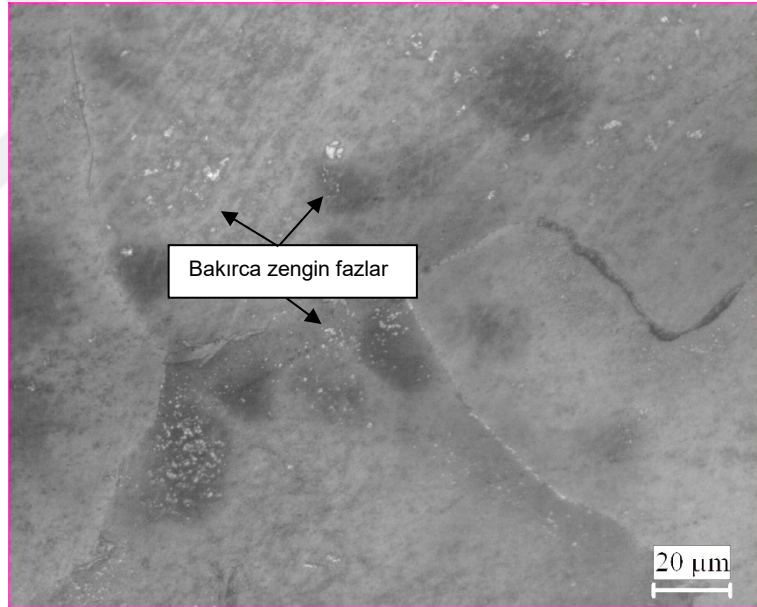
Şekil 19. Al20Zn-3Cu alaşımasının dökülmüş durumdaki içyapısı



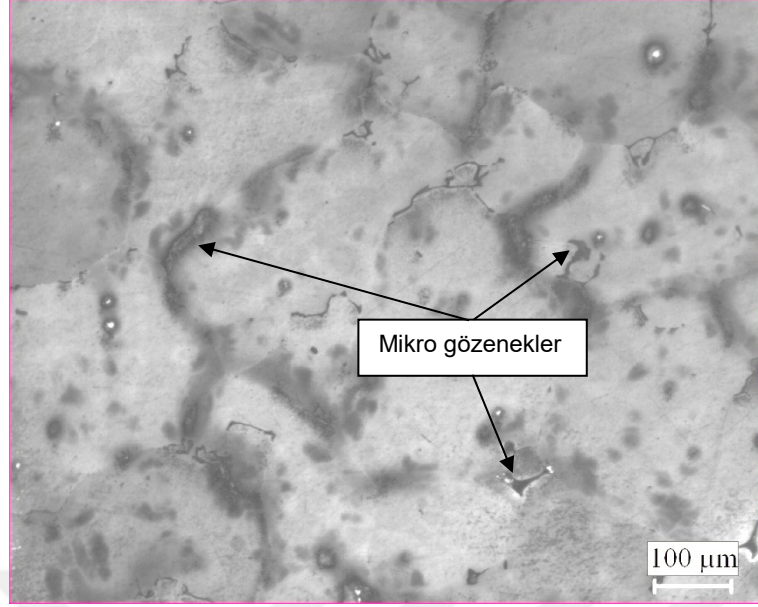
Şekil 20. Al20Zn-4Cu alaşımasının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 21. Al20Zn-5Cu alaşımasının dökülmüş durumdaki içyapısı

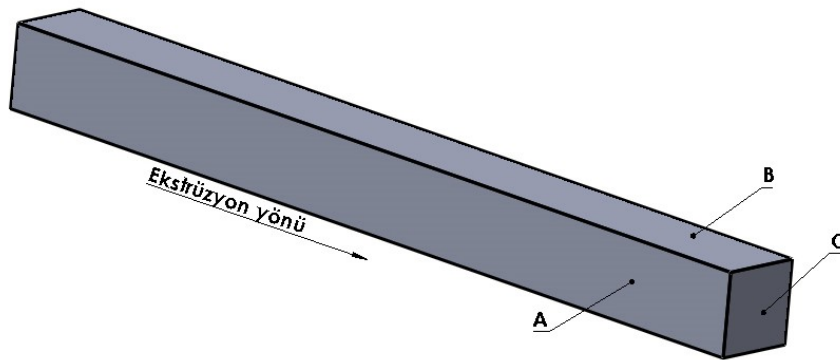


Şekil 22. Al20Zn-2Cu alaşımasının dökülmüş durumdaki içyapı detayı

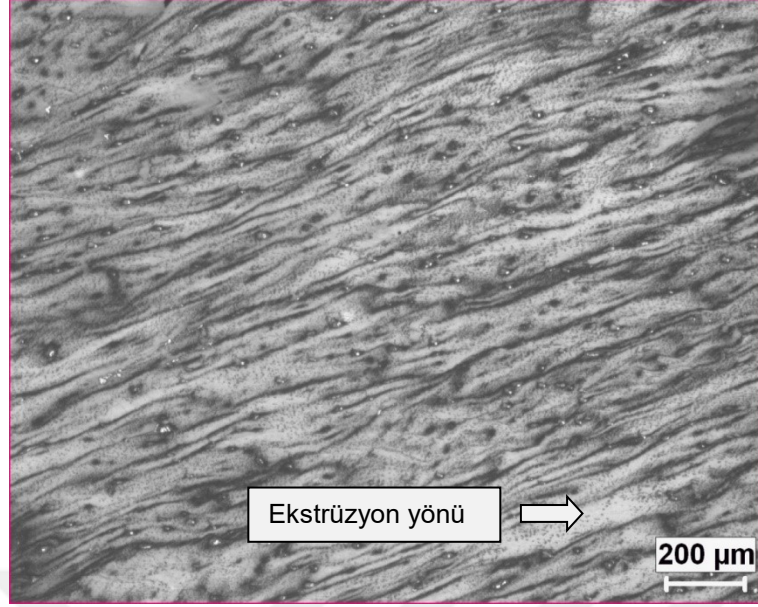


Şekil 23. Al20Zn-2Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapı detayı

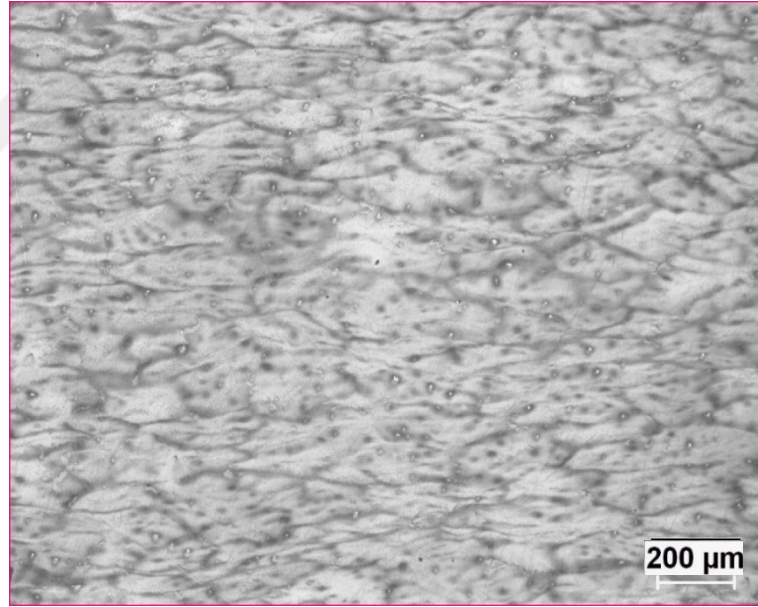
EKAE işlemi sonrası oluşan içyapı görüntüleri, numunelerin A (ekstrüzyon yönü) ve C (ekstrüzyon yönüne dik kesit) yüzeyinden elde edilmiştir. EKAE numunesinin ekstrüzyon yönü ve yüzeyleri Şekil 24’de şematik olarak gösterilmiştir. EKAE işlemi sonrası alaşım içyapılarının dökülmüş durumdakilere göre önemli ölçüde değişime uğradığı gözlemlendi. 1 paso EKAE işlemi uygulanan Al20Zn-2Cu alaşımlarının A ve C yüzeylerine ait içyapı fotoğrafları Şekil 25 ve 26’da verilmiştir. Şekil 25’teki fotoğraftan, döküm halinde bulunan dendritik görünümün giderildiği, yerine ekstrüzyon yönüyle belli bir açı yapan hizalanmış (uzayan) tanelerden oluşan yeni bir içyapının yer aldığı gözlemlenmektedir. Şekil 26’daki fotoğrafta ise dendritik yapının yerini eş eksenli ince taneli bir yapının aldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 24. EKAE deney numunesinin ekstrüzyon yönü ve yüzeylerinin şematik gösterimi



Şekil 25. Al20Zn-2Cu alaşıımının 1 paso EKAİ işleml uygulannış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)

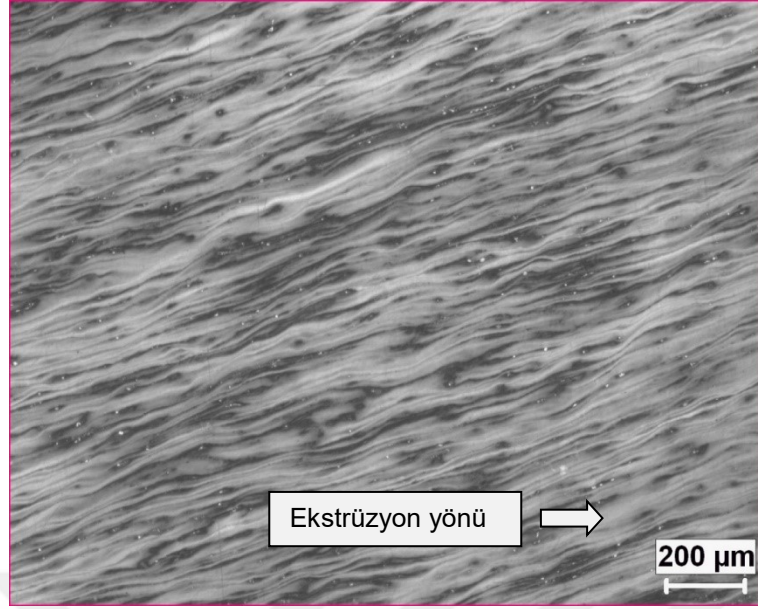


Şekil 26. Al20Zn-2Cu alaşıımının 1 paso EKAİ işleml uygulannış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)

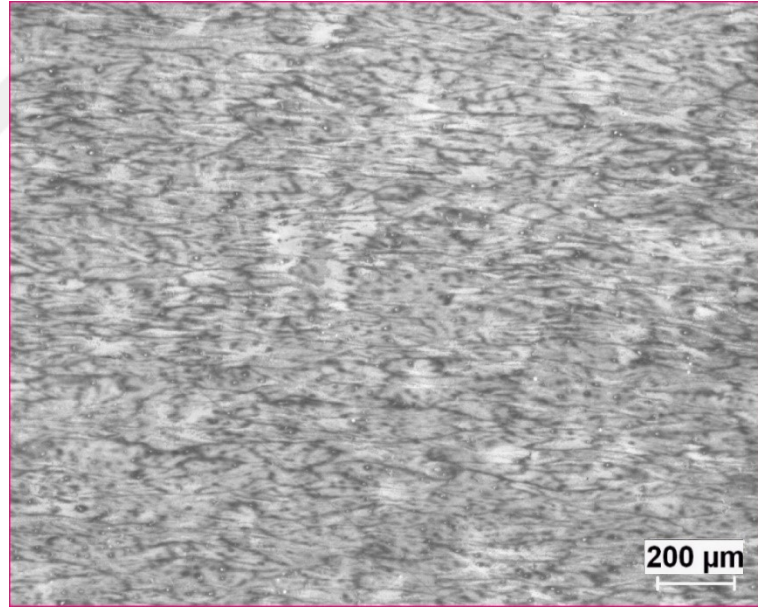
Al20Zn-2Cu alaşıımının 2 paso ve Rota-A ile EKAİ uygulannış durumdaki oluşun içyapıları gösteren fotoğraflar Şekil 27 (A yüzeyi) ve Şekil 28 (C yüzeyi) 'de verilmiştir. 2 paso sonrası dentritik yapının tamamen kaybolduğı, 1 pasoya göre oluşun iç yapının daha da inceliş uzadığı ve alüminyumca zengin  $\alpha$  ile çinkoca zengin  $\alpha+\eta$  fazlarını içeren, daha küçük bir (eğim) açığı sahip içyapının oluştuğı görölmektedir., Şekil 27. Şekil 28'deki

fotoğraftan ise, 1 pasodakiyle kıyaslandığında daha ince tanelere sahip içyapının yer aldığı gözlenmektedir. Rota-A ile 3 paso ve 4 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapılar sırasıyla Şekil 29,30 ve Şekil 31,32’de verilmiştir. Bu fotoğraflardan, artan paso sayısı ile yapıdaki incelmenin arttığı ve eğim açısının azaldığı ve sonuç olarak, rota-A ile 4 paso EKAE işlemi sonrasında tane yapısının daha da inceldiği, uzadığı ve yönlenme (eğim) açısının azalarak ekstrüzyon doğrultusuna daha da yaklaştığı gözlemlenen bir iç yapının oluştuğu belirlenmiştir, Şekil 31.

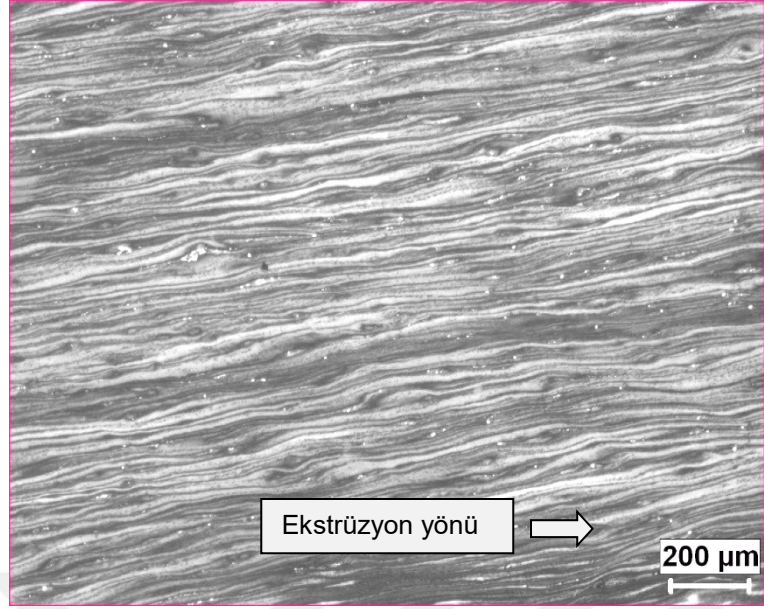




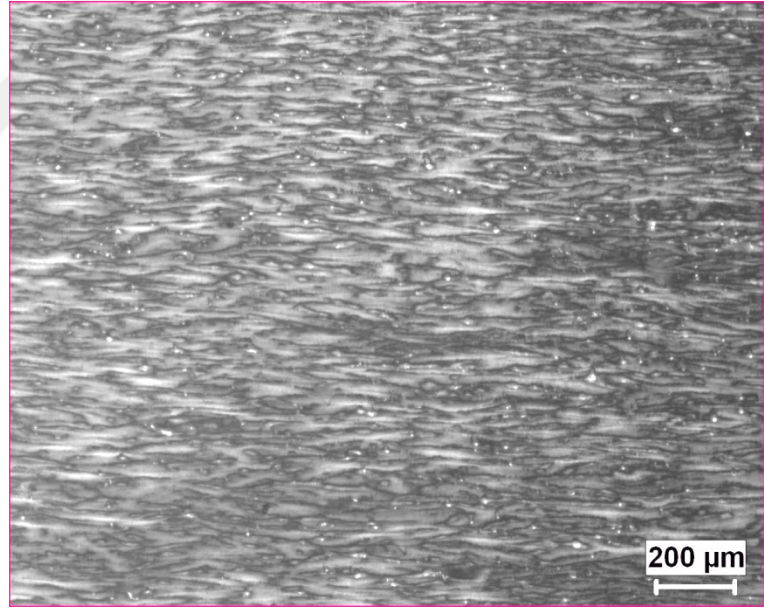
Şekil 27. Al20Zn-2Cu alaşımlının Rota-A ile 2 paso EKAЕ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)



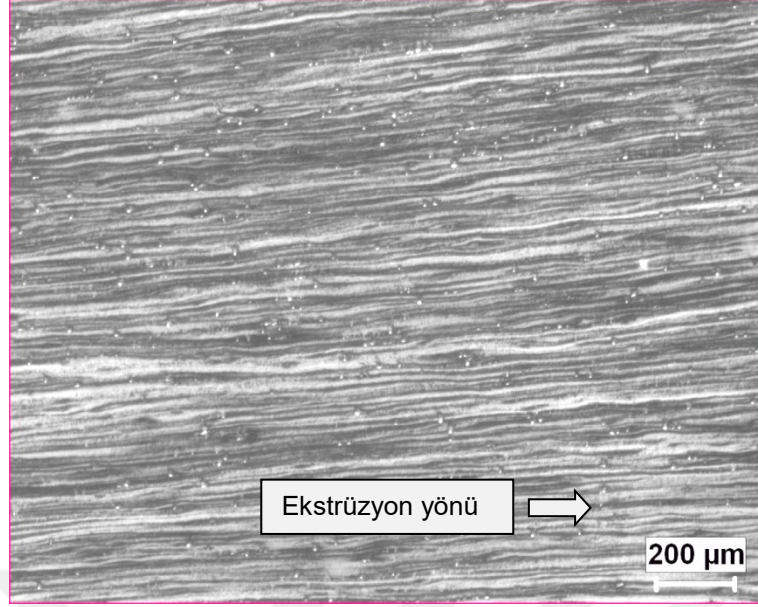
Şekil 28. Al20Zn-2Cu alaşımlının Rota-A ile 2 paso EKAЕ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)



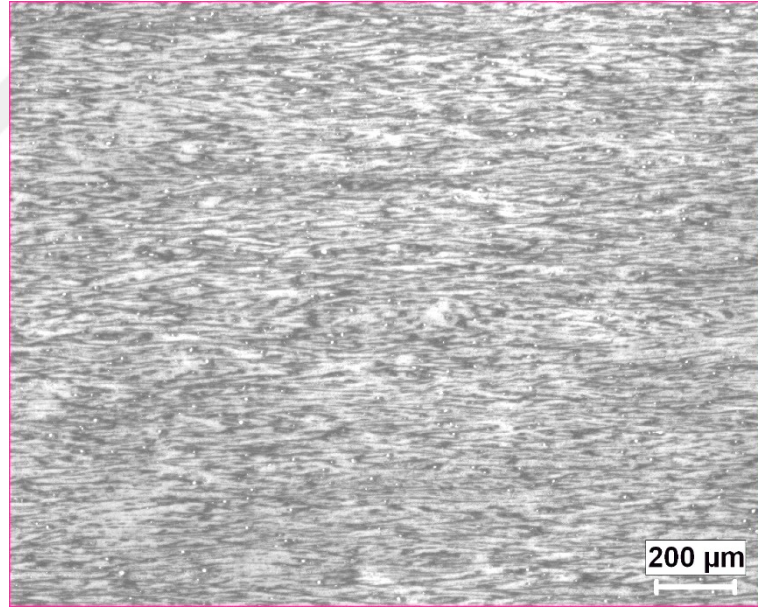
Şekil 29. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşıımının Rota-A ile 3 paso EKAЕ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)



Şekil 30. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşıımının Rota-A ile 3 paso EKAЕ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)



Şekil 31. Al20Zn-2Cu alaşımlarının Rota-A ile 4 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)



Şekil 32. Al20Zn-2Cu alaşımlarının Rota-A ile 4 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)

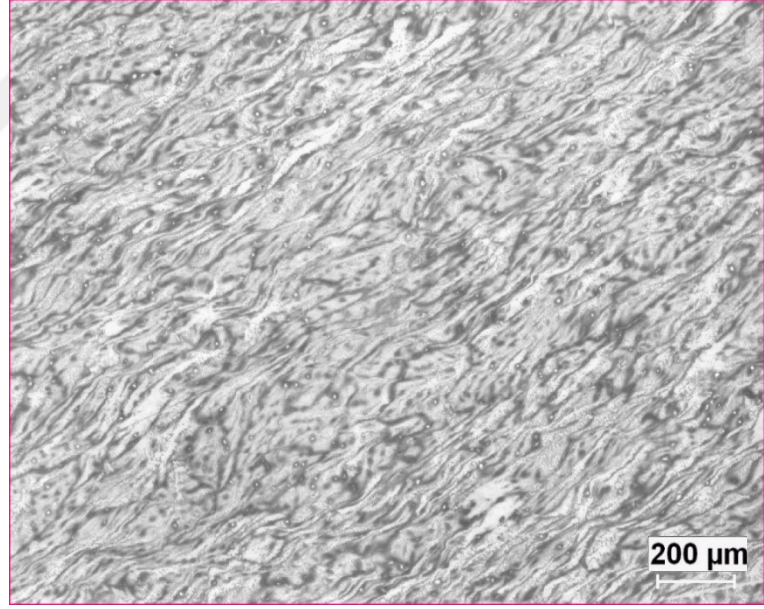
Al20Zn-2Cu alaşımlarının Rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAİ işlemi uygulanmış durumdaki içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 33 (A yüzeyi) ve Şekil 34 (C yüzeyi) 'te verilmiştir. Şekil 27'de verilen içyapıya (2 paso Rota-A sonrası) benzer şekilde, Rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso sonrası ortaya çıkan içyapının ekstrüzyon doğrultusuyla belli bir açı yapacak şekilde uzamış alüminyumca zengin  $\alpha$  ve çinkoca zengin  $\alpha+\eta$  bileşenlerini içerdiği görülmektedir,

Şekil33. Rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso ve 4 paso EKAE uygulanmış olan numunelerin içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 35,36 ve Şekil 37,38’de verilmiştir. Bu fotoğraflardan, Rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso işlem sonucunda nispeten daha iri taneler içeren ve yönlenmenin değiştiği bir içyapı gözlenirken, 4 paso sonrasında, nispeten eş eksenli büyük tanelerden oluşan, birbirine geçmiş karmaşık bileşenlerden oluşan ve tane sınırlarının belirsiz olduğu bir içyapı gözlemlenmektedir.

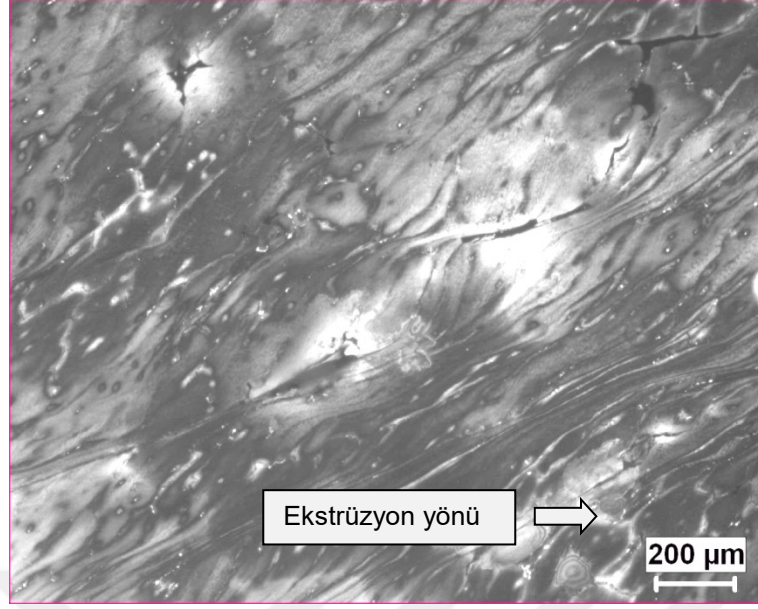




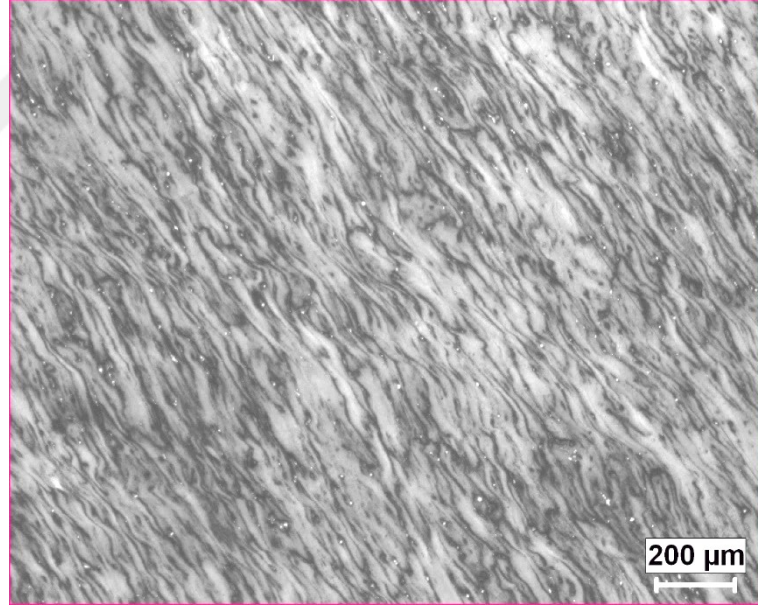
Şekil 33. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımasının Rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAЕ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)



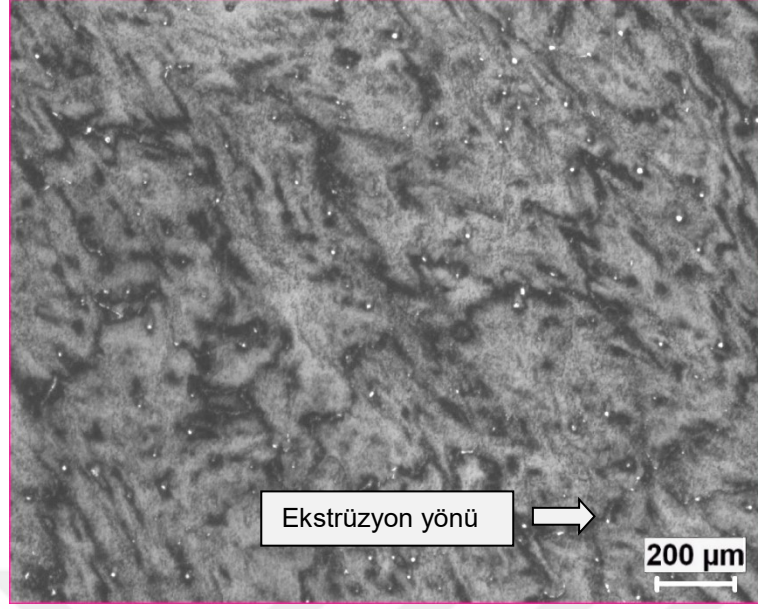
Şekil 34. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımasının Rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAЕ işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)



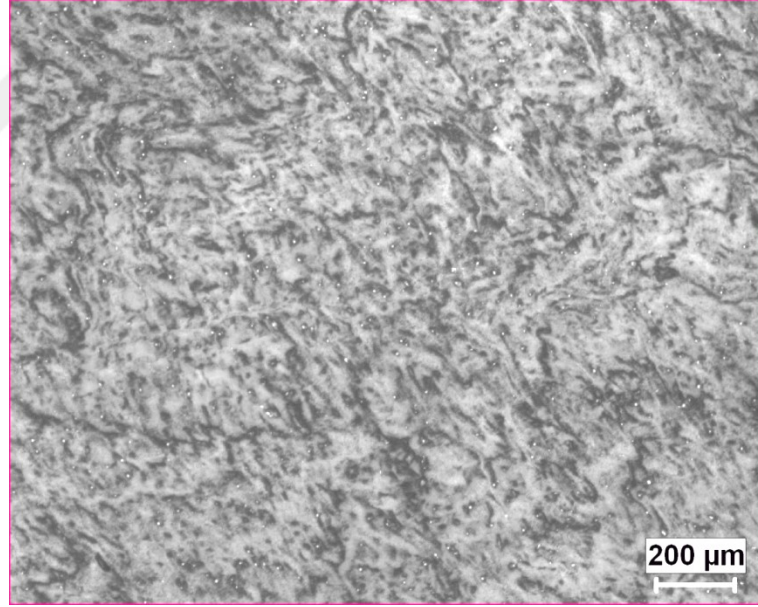
Şekil 35. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımasının Rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)



Şekil 36. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımasının Rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)



Şekil 37. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlarının Rota-B<sub>C</sub> ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (A yüzeyi)



Şekil 38. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlarının Rota-B<sub>C</sub> ile 4 paso EKAE işlemi uygulanmış durumdaki içyapısı (C yüzeyi)

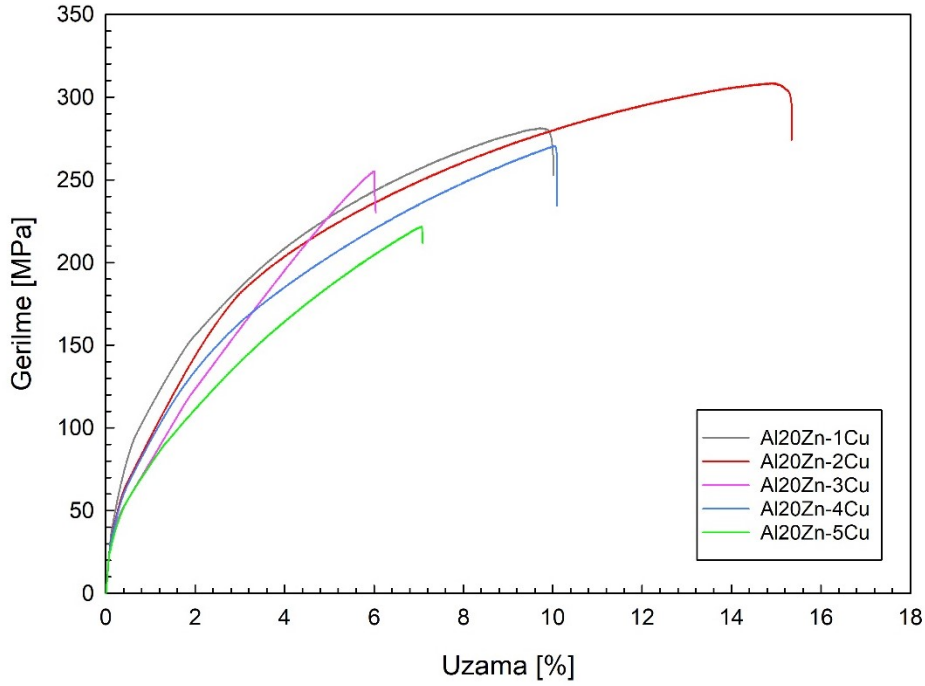
### 3.3. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

#### 3.3.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Alaşımların mekanik deneyler sonucunda belirlenen sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu tablodan, dökülmüş durumdaki alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direncini %2 Cu içeren alaşımın sergilediği görülmektedir. Ayrıca, alaşımların mekanik özelliklerinin genel anlamda bakır katkısıyla iyileştiği ancak, bakır oranının %2'yi aşması durumunda sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerinin az da olsa düştüğü görülmektedir. Dökülmüş durumdaki Al20Zn-Cu alaşımlarından çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 39'da verilmiştir. Bu eğrilerden söz konusu alaşımların doğası gereği gevrek bir davranış sergilediği ancak, en yüksek mukavemet değerine sahip olan Al20Zn-2Cu alaşımının aynı zamanda en yüksek kopma uzaması değerine sahip olduğu yani diğer alaşımlarla karşılaştırıldığında daha sünek bir davranış sergilediği söylenebilir.

Tablo 4. Döküm yöntemi ile üretilen Al20Zn-Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri

| Malzeme    | Sertlik (BSD) | Çekme Dayanımı (MPa) | Akma Dayanımı (MPa) | Kopma Uzaması (%) | Darbe Direnci (J) |
|------------|---------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Al20Zn-1Cu | 108           | 284                  | 191                 | 10,1              | 2,50              |
| Al20Zn-2Cu | 113           | 308                  | 230                 | 15,3              | 3,27              |
| Al20Zn-3Cu | 109           | 251                  | 172                 | 6,1               | 3,05              |
| Al20Zn-4Cu | 107           | 259                  | 151                 | 10,1              | 0,77              |
| Al20Zn-5Cu | 101           | 244                  | 163                 | 7,1               | 0,63              |



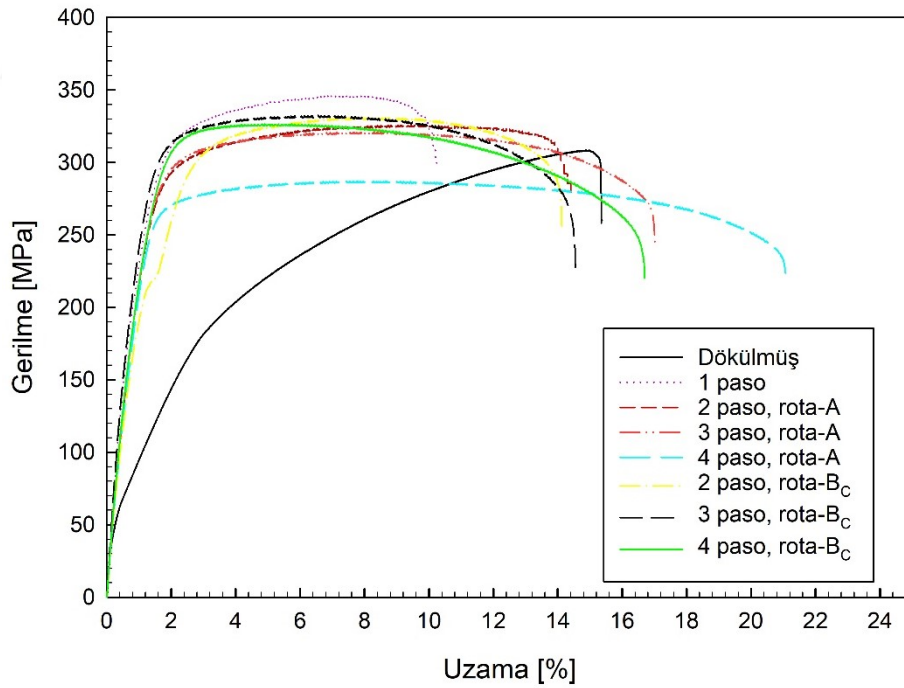
Şekil 39. Al20Zn-Cu alaşımlarının gerilme-uzama ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) diyagramı

Yapılan deneyler sonucunda, en üstün mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenen Al20Zn-2Cu alaşımına Rota-A ve Rota-B<sub>C</sub> ile 4 paso EKAE işlemi uygulandı. Al20Zn-2Cu alaşımının döküm ve EKAE işlemiyle ulaşılan sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Döküm durumu ile karşılaştırıldığında, 1 paso EKAE işlemiyle birlikte sertliğin, çekme dayanımının, akma sınırının ve darbe direncinin arttığı gözlemlenirken, kopma uzamasında ise küçük bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Rota-A ile 2 paso ve sonrası EKAE işlemiyle sertlik ve mukavemet değerlerinin az da olsa düştüğü, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin ise arttığı gözlemlendi. Rota-B<sub>C</sub> de ise ilerleyen pasolarda Rota-A ile kıyaslandığında genel olarak daha yüksek sertlik ve mukavemet değerleri elde edilirken süneklik ve tokluk değerlerinin yaklaşık sabit kaldığı görüldü. En yüksek sertlik değeri 2 paso Rota-B<sub>C</sub>, en yüksek çekme dayanımı 1 paso, en yüksek akma sınırı 3 paso Rota-B<sub>C</sub>, en yüksek kopma uzaması 4 paso Rota-A ve en yüksek darbe direnci 3 paso Rota-A işlemi sonucunda elde edildi. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen verilerden yararlanılarak çizilen gerek dökülmüş gerekse EKAE işlemi uygulanmış durumdaki Al20Zn-2Cu alaşımına ait gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 40'ta verilmiştir. Bu eğrilerden söz konusu alaşımların genelde gevrek bir davranış sergilediği ancak, 4 paso Rota-A işlemi sonrası

alaşımın en yüksek kopma uzaması değerine sahip olduğu yani nispeten sünek bir davranış sergilediği görülmektedir.

Tablo 5. Al20Zn-2Cu alaşımının dökülmüş ve EKAE uygulanmış durumdaki sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri

| EKAE rotası         | Paso sayısı | Sertlik (BSD) | Çekme dayanımı (MPa) | Akma dayanımı (MPa) | Kopma Uzaması (%) | Darbe Direnci (J) |
|---------------------|-------------|---------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Rota-A              | 0           | 113           | 308                  | 230                 | 15,3              | 3,27              |
|                     | 1           | 115           | 346                  | 253                 | 10,6              | 3,97              |
|                     | 2           | 106           | 326                  | 257                 | 14,5              | 7,62              |
|                     | 3           | 103           | 321                  | 260                 | 17,1              | 8,57              |
| Rota-B <sub>C</sub> | 4           | 100           | 287                  | 249                 | 21,2              | -                 |
|                     | 2           | 117           | 331                  | 210                 | 14,1              | 6,26              |
|                     | 3           | 112           | 332                  | 272                 | 16,6              | 6,92              |
|                     | 4           | 106           | 326                  | 264                 | 16,7              | -                 |

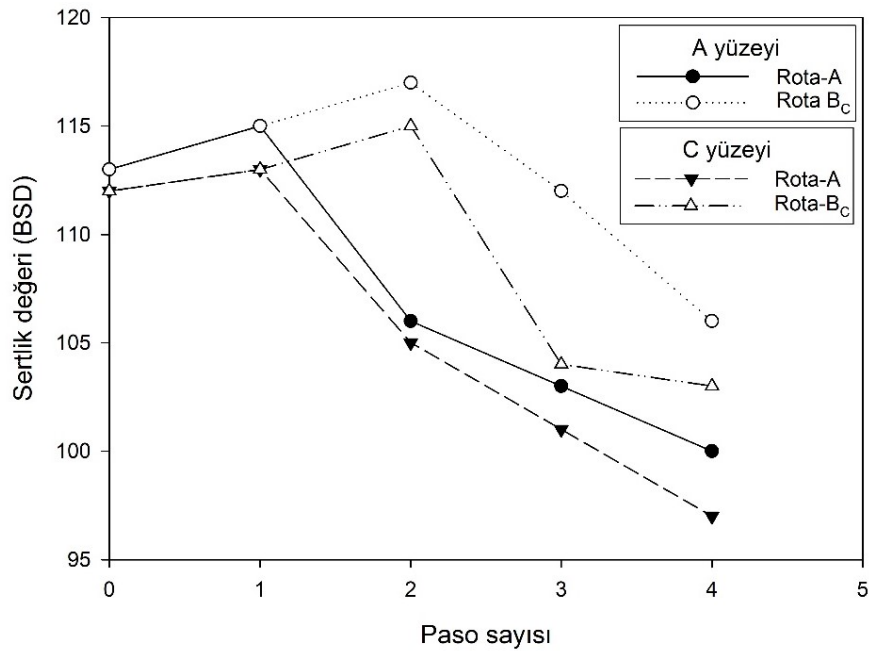


Şekil 40. Dökülmüş ve EKAE işlemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımlarının gerilme-uzama ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) diyagramı

Dökülmüş ve EKAE işlemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımına ait sertlik değerleri Tablo 6’da, bu tablodaki veriler kullanılarak çizilen rota ve paso sayısına göre sertlik değişimi grafiği Şekil 41’de verilmiştir. EKAE işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, A (ekstrüzyon yönü) yüzeyinden elde edilen değerlerin C (dik kesit) yüzeyinden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu belirlendi. Rota-Bc’de 2 paso sonrası sertlik değerinin arttığı ancak ilerleyen pasolarda düştüğü, Rota-A’da ise artan paso sayısı ile sertliğin sürekli düştüğü görülmektedir.

Tablo 6. Al20Zn-2Cu alaşımının dökülmüş ve EKAE uygulanmış durumdaki sertlik değerleri

| EKAE rotası         | Paso sayısı | Sertlik (BSD)              |                      |
|---------------------|-------------|----------------------------|----------------------|
|                     |             | A yüzeyi (Ekstrüzyon yönü) | C yüzeyi (Dik kesit) |
|                     | 0           | 113                        | 112                  |
|                     | 1           | 115                        | 113                  |
| Rota-A              | 2           | 106                        | 105                  |
|                     | 3           | 103                        | 101                  |
|                     | 4           | 100                        | 97                   |
| Rota-B <sub>C</sub> | 2           | 117                        | 115                  |
|                     | 3           | 112                        | 104                  |
|                     | 4           | 106                        | 103                  |



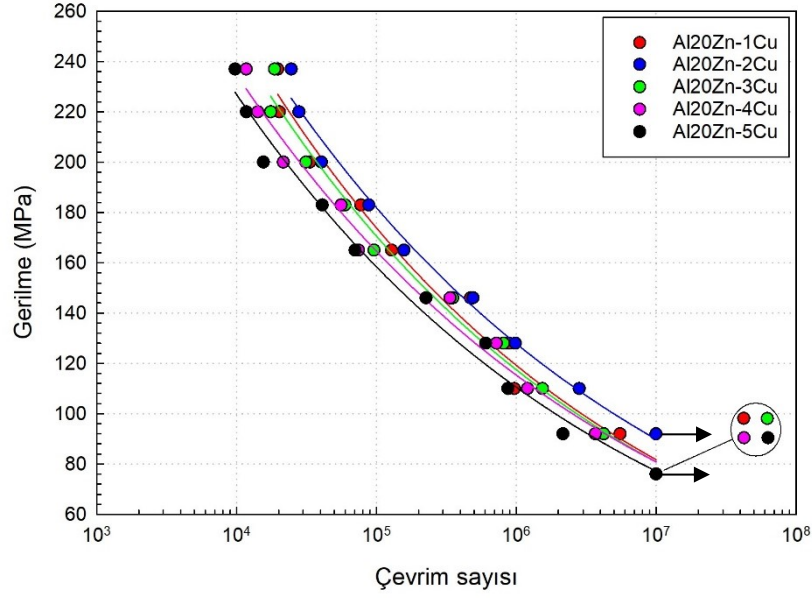
Şekil 41. EKAE işlemi uygulanan Al20Zn-2Cu alaşımının rota ve paso sayısına göre sertlik değişimi grafiği

### 3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Döküm halindeki Al20Zn-(%1-5 Cu) alaşımlarından üretilen numunelerle 76 MPa ile 237 MPa arasında değişen gerilmelerde gerçekleştirilen yorulma deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur. Bu tabloda, uygulanan gerilme değerleri ile numunelerin kırılıncaya kadar geçen çevrim sayıları yer almaktadır. Tablodaki verilerden faydalanılarak oluşturulan gerilme(S) - çevrim sayısı(N) grafiği Şekil 42'de gösterilmektedir. Bu eğrilerden, uygulanan gerilme düştükçe çevrim sayısı değerlerinin arttığı ve alaşımlar içerisinde en iyi yorulma performansını Al20Zn-2Cu alaşımının sergilediği görülmektedir. Ayrıca, gerek tablodan gerekse S-N eğrilerinden 76 MPa 'lık gerilme değerinde alaşımların tamamına ait numunelerin kırılmadığı yani bu değer yorulma dayanım sınırı olarak kabul edilebileceği belirlenmiştir. En üstün mekanik özellikleri sergileyen Al20Zn-2Cu alaşımında ise söz konusu değer 92 MPa yani diğer alaşımlara oranla %21 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 7. Dökülmüş durumdaki Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarından yorulma deneyi sonucunda elde edilen gerilme - çevrim sayısı değerleri

| Gerilme (MPa) | Alaşımlar ve Çevrim Sayıları |                 |                 |                 |                 |
|---------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|               | Al20Zn-1Cu                   | Al20Zn-2Cu      | Al20Zn-3Cu      | Al20Zn-4Cu      | Al20Zn-5Cu      |
| 76            | 10 <sup>7</sup>              | -               | 10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup> |
| 92            | 5524250                      | 10 <sup>7</sup> | 4225410         | 3680355         | 2857435         |
| 110           | 970872                       | 2826133         | 940010          | 905100          | 872597          |
| 128           | 886610                       | 905650          | 811180          | 821660          | 806420          |
| 146           | 471360                       | 490445          | 352238          | 337060          | 216427          |
| 165           | 128328                       | 157418          | 96085           | 74540           | 85380           |
| 183           | 77432                        | 88060           | 59665           | 55970           | 49990           |
| 200           | 33497                        | 40410           | 31375           | 21617           | 18555           |
| 220           | 20215                        | 27925           | 17540           | 14200           | 12770           |
| 237           | 19730                        | 24630           | 18740           | 11720           | 9770            |

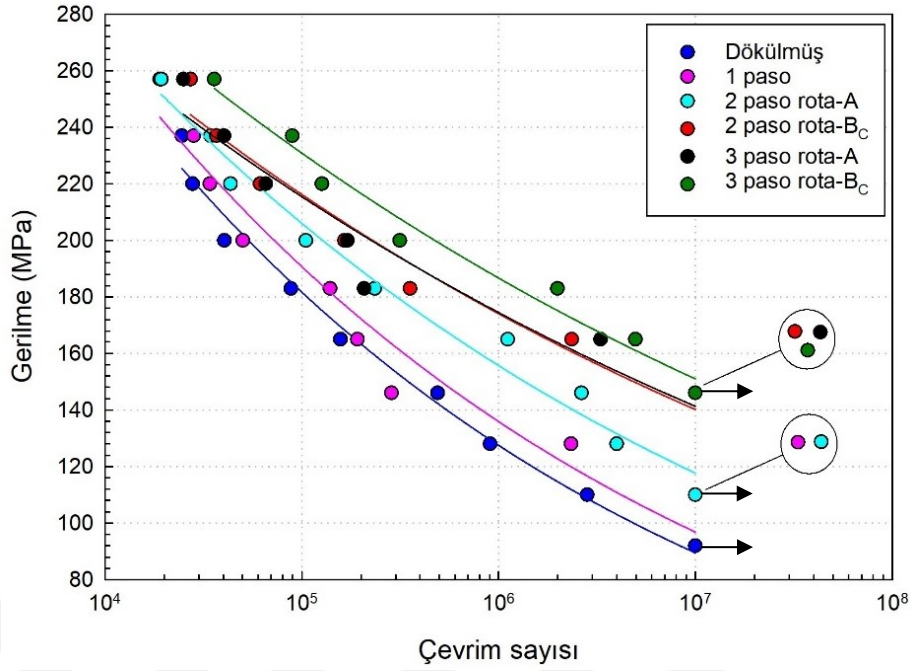


Şekil 42. Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarına ait gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri

En iyi yorulma performansını gösteren Al20Zn-2Cu alaşımına farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulandıktan sonra, 110 MPa ile 257 MPa arasında değişen gerilmelerde gerçekleştirilen yorulma deneylerinde ortaya çıkan sonuçlar Tablo 8'de sunulmuştur. Bu veriler kullanılarak çizilen S-N eğrileri ise Şekil 43'te verilmiştir.

Tablo 8. Dökülmüş ve EKAE uygulanmış durumdaki Al20Zn-2Cu alaşımının yorulma deneyi sonucunda elde edilen gerilme - çevrim sayısı değerleri

| Gerilme (MPa) | Çevrim Sayısı   |                 |                 |                             |                 |                              |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|------------------------------|
|               | Dökülmüş        | EKAE Uygulanmış |                 |                             |                 |                              |
|               | Zn80Al-2Cu      | I Paso          | II Paso Rota A  | II Paso Rota B <sub>c</sub> | III Paso Rota A | III Paso Rota B <sub>c</sub> |
| 92            | 10 <sup>7</sup> | -               | -               | -                           | -               | -                            |
| 110           | 2826133         | 10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup> | -                           | -               | -                            |
| 128           | 905650          | 2340040         | 2986910         | -                           | -               | -                            |
| 146           | 490445          | 286050          | 1639475         | 10 <sup>7</sup>             | 10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup>              |
| 165           | 157418          | 191780          | 1515190         | 2357940                     | 3297520         | 3767260                      |
| 183           | 88060           | 139350          | 435075          | 355165                      | 207410          | 1593210                      |
| 200           | 40410           | 50280           | 105090          | 164840                      | 170590          | 115150                       |
| 220           | 27925           | 34150           | 43510           | 61550                       | 65650           | 76570                        |
| 237           | 24630           | 28290           | 30430           | 36910                       | 40270           | 49670                        |
| 257           | -               | 9020            | 19350           | 27230                       | 25090           | 35940                        |



Şekil 43. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımına ait dökülmüş ve EKAE uygulanmış durumdaki gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri

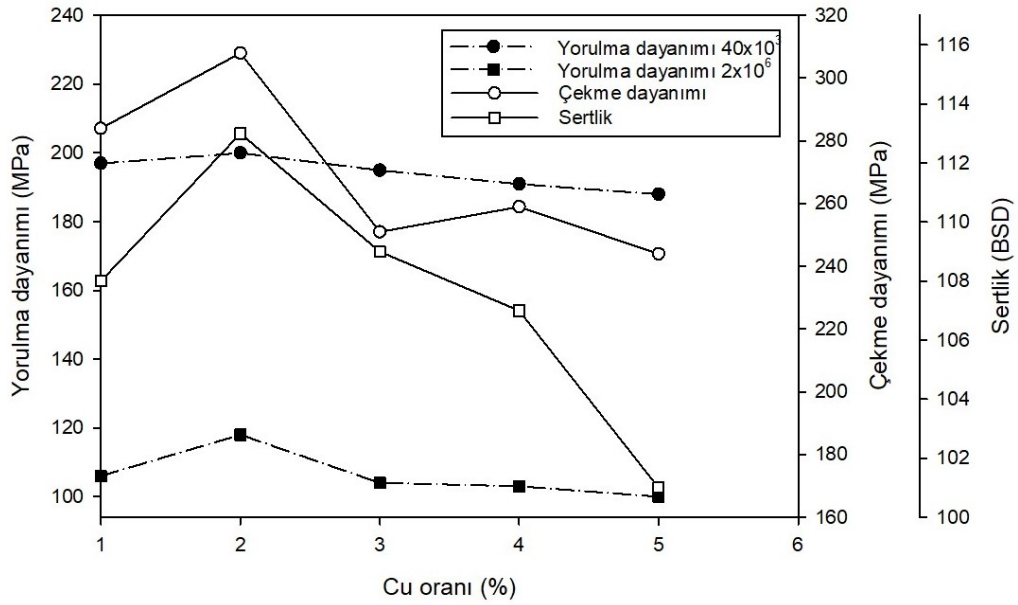
Tablo 8'deki veriler ve Şekil 43'teki grafiklere göre, EKAE işlemi Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle, bu alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri, uygulanan farklı rota ve paso sayıları ile yapılan EKAE işlemiyle büyük ölçüde yükselmiştir. Döküm halinde bu alaşımın yorulma dayanım sınırı 92 MPa iken, farklı rota ve paso sayıları kullanılarak uygulanan EKAE işlemi sonucunda bu değer 146 MPa'ya çıkmıştır. Yorulma dayanım sınırındaki bu artış %59 gibi oldukça yüksek bir oranı temsil etmektedir.

Gerçekleştirilen EKAE ve yorulma deneyleri sonucunda en uzun yorulma ömrü ile en yüksek yorulma dayanım değeri, rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso işlem sonucunda elde edilmiştir (Şekil 43). Diğer bir deyişle, EKAE işlem rotaları arasında yapılan karşılaştırmada, rota-B<sub>C</sub>'nin rota-A'ya kıyasla daha yüksek yorulma performansı gösterdiği belirlenmiştir.

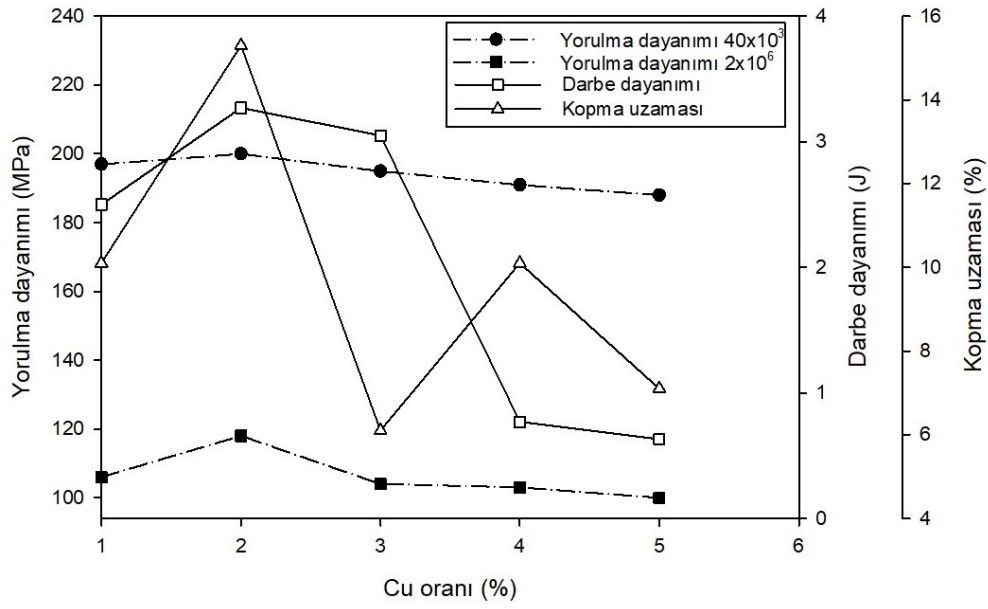
### 3.4. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu

Bakır katkısının dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-(%1-5 Cu) alaşımlarının yorulma özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin bakır

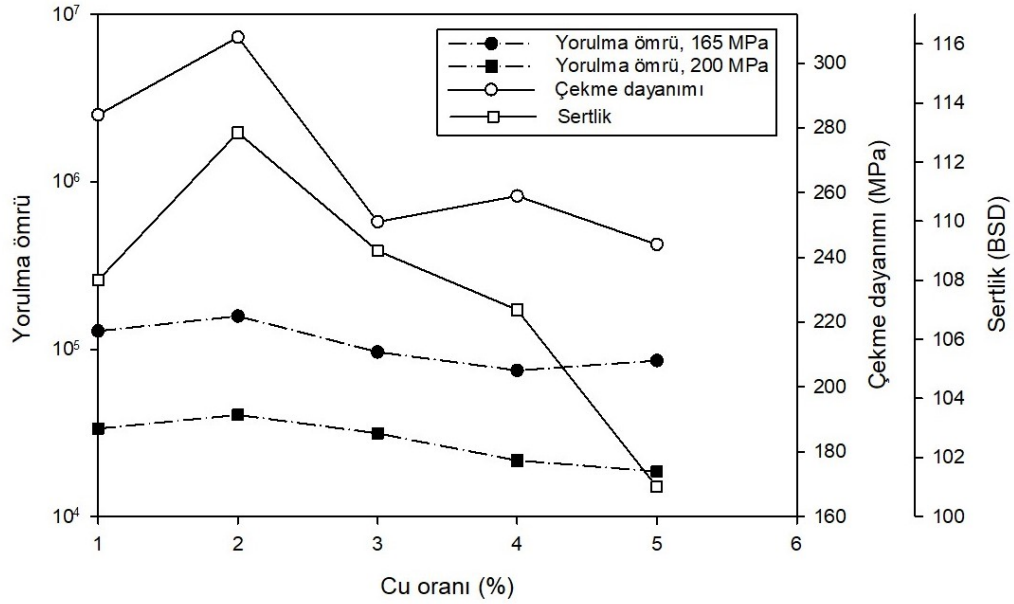
oranına bağılı olarak değişimini gösteren grafikler oluşturulmuştur, şekil 44-47. Alaşımların yorulma davranışları ile mekanik özellikleri arasındaki bağlantıyı ortaya koymak amacıyla, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri bu grafiklere farklı bir eksende eklenmiştir. şekil 44 ve 45, Al20Zn-(%1-5 Cu) alaşımlarının düşük ( $N_f \leq 40 \times 10^3$ ) ve yüksek ( $N_f \geq 2 \times 10^6$ ) evrim sayıları için elde edilen yorulma dayanımı değerlerini; şekil 46 ve 47 ise farklı gerilme seviyeleri (165 ve 200 MPa) altında yorulma ömrü değerlerinin bakır oranına bağılı değişimini göstermektedir. Bu grafiklerden (şekil 44-47) açıkça görüldüğü gibi, %2 bakır içeren alaşım, en yüksek yorulma dayanımı ve en uzun yorulma ömrü değerlerine ulaşmıştır. Yine bu grafiklerden, dökülmüş durumdaki alaşımlar içerisinde en yüksek çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımını değerlerinin %2 oranında Cu içeren alaşımdan elde edildiği görülmektedir. Gerek mekanik özellikler gerekse yorulma davranışı dikkate alındığında en iyi performansı %2 Cu içeren alaşım (Al20Zn-2Cu) sergilediğinden, optimum bakır oranı %2 olarak belirlendi.



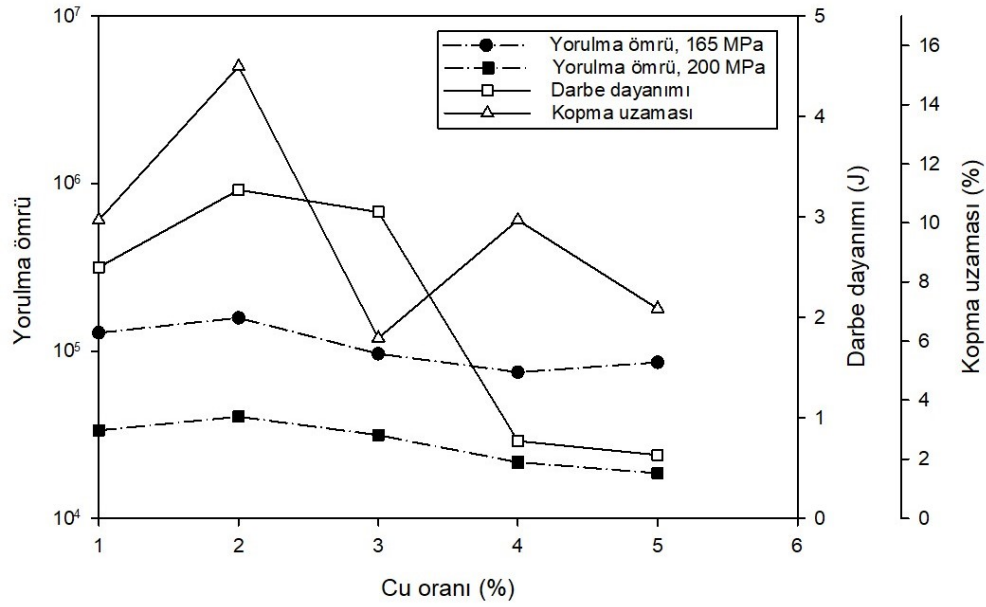
şekil 44. Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin bakır oranına göre değişimi



Şekil 45. Al<sub>20</sub>Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma dayanımı, darbe dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin bakır oranına göre değişimi



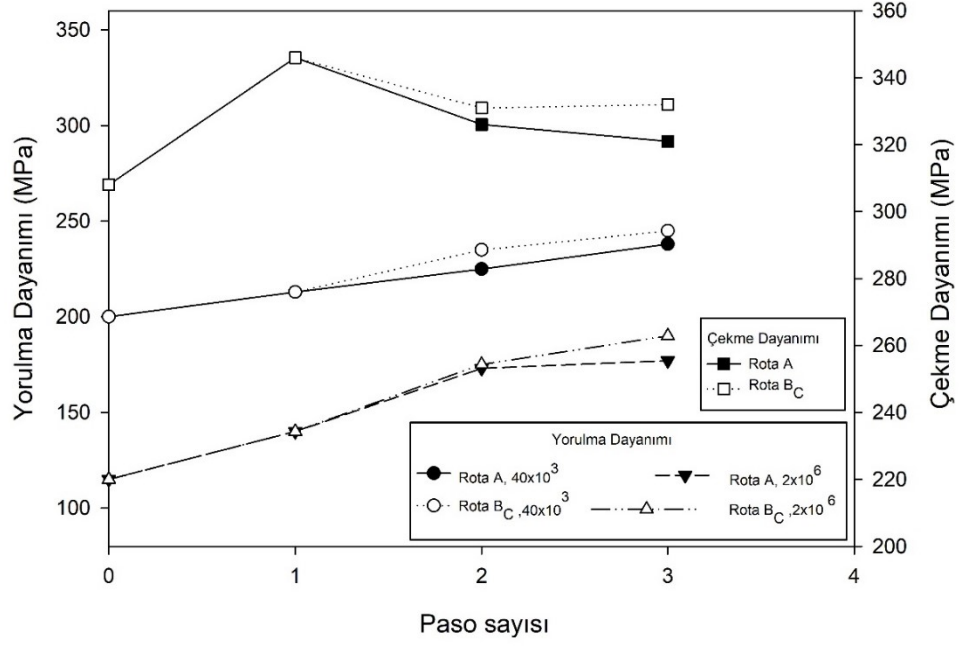
Şekil 46. Al<sub>20</sub>Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma ömrü, çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin bakır oranına göre değişimi



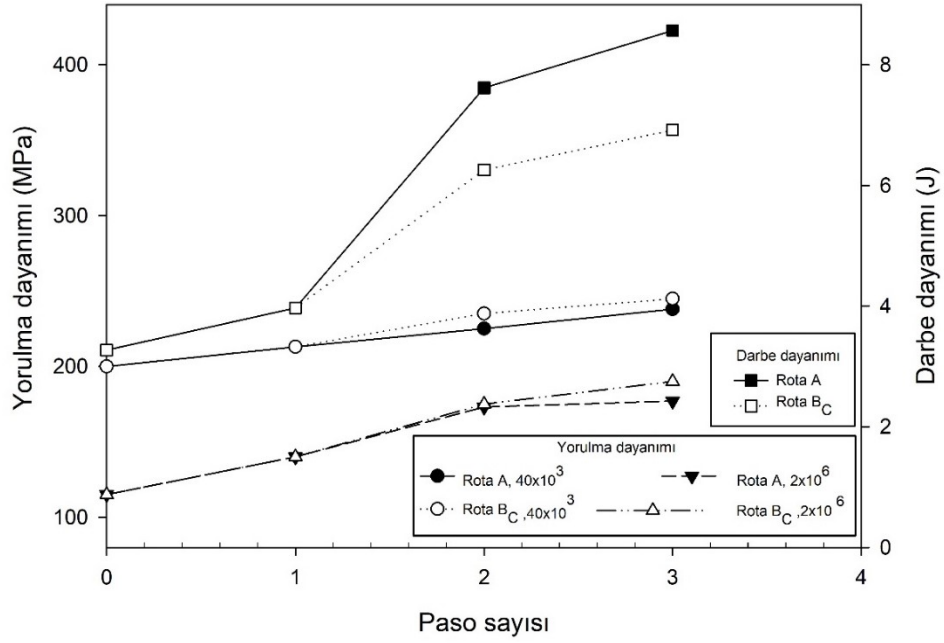
Şekil 47. Al<sub>20</sub>Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının yorulma ömrü, darbe dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin bakır oranına göre değişimi

EKAE parametrelerinin Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, yorulma deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak alaşımların yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin EKAE rotası ve paso sayısına göre değişimlerini gösteren grafikler çizildi, Şekil 48-53. EKAE uygulanmış durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma davranışları ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkileri ortaya koyabilmek için, bu grafiklere çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımı eksenleri de eklendi. Şekil 48-50, söz konusu alaşımdan rota-A ve rota-B<sub>C</sub> de, düşük ( $N_f \leq 40 \times 10^3$ ) ve yüksek ( $N_f \geq 2 \times 10^6$ ) çevrim sayısında elde edilen yorulma dayanımı, Şekil 51-53 ise, farklı gerilme seviyelerinde (165 ve 200 MPa) elde edilen yorulma ömrü değerlerinin paso sayısına bağlı değişimini göstermektedir. Bu grafiklerde (Şekil 48-53), belirtilen alaşımın yorulma özelliklerinin uygulanan EKAE rotası ve paso sayısına göre değiştiği açıkça gözlemlenmektedir. Örneğin, EKAE işlemi uygulanmış alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri, artan paso sayısı ile belirgin bir şekilde yükselmiş ve en yüksek değerlerin 3 paso EKAE işlemi sonrasında elde edildiği belirlenmiştir. Buna ilave olarak, rota-B<sub>C</sub> 'de rota-A'ya oranla daha yüksek değerlerin elde edildiği gözlemlendi. Ayrıca bu grafiklerden, söz konusu alaşımın çekme dayanımının 1 paso işlem sonrası belirgin şekilde arttığı ve ilerleyen pasolarda azaldığı, darbe dayanımının artan paso

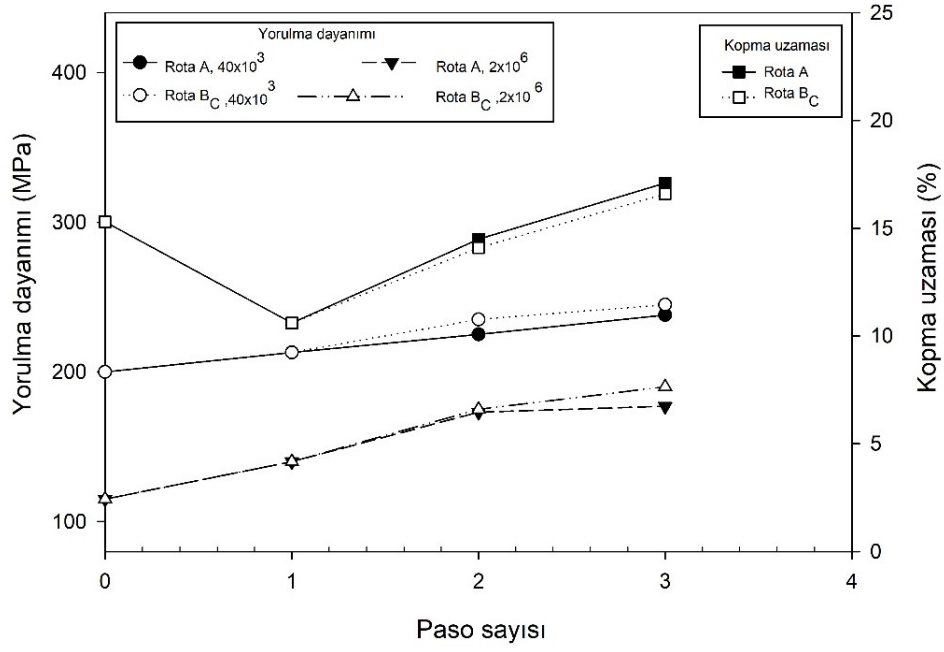
sayısıyla sürekli olarak arttığı, kopma uzaması değerlerinin ise 1 paso işlem sonrası bir miktar azaldığı ancak sonraki pasolarda arttığı görüldü.



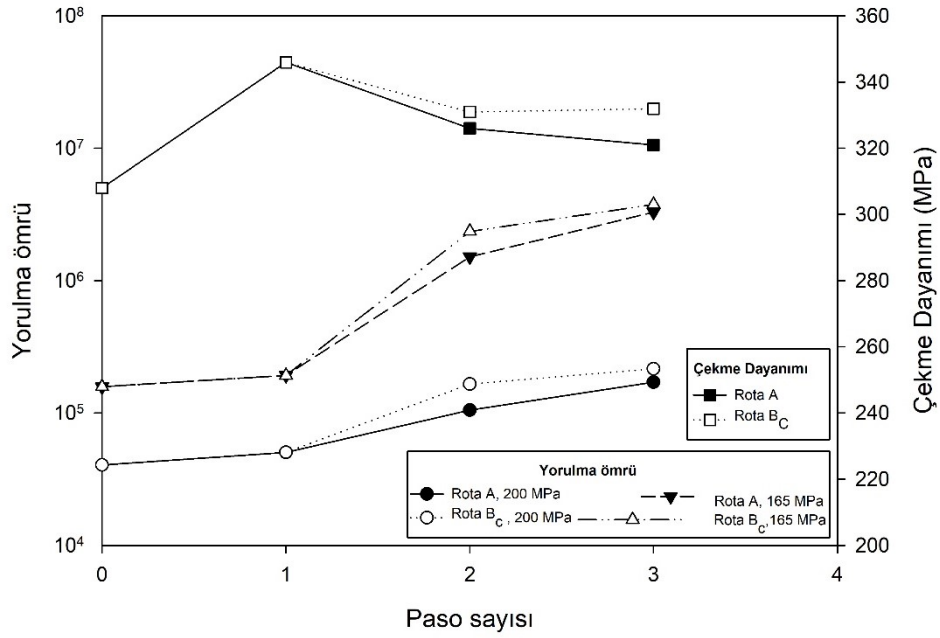
Şekil 48. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi



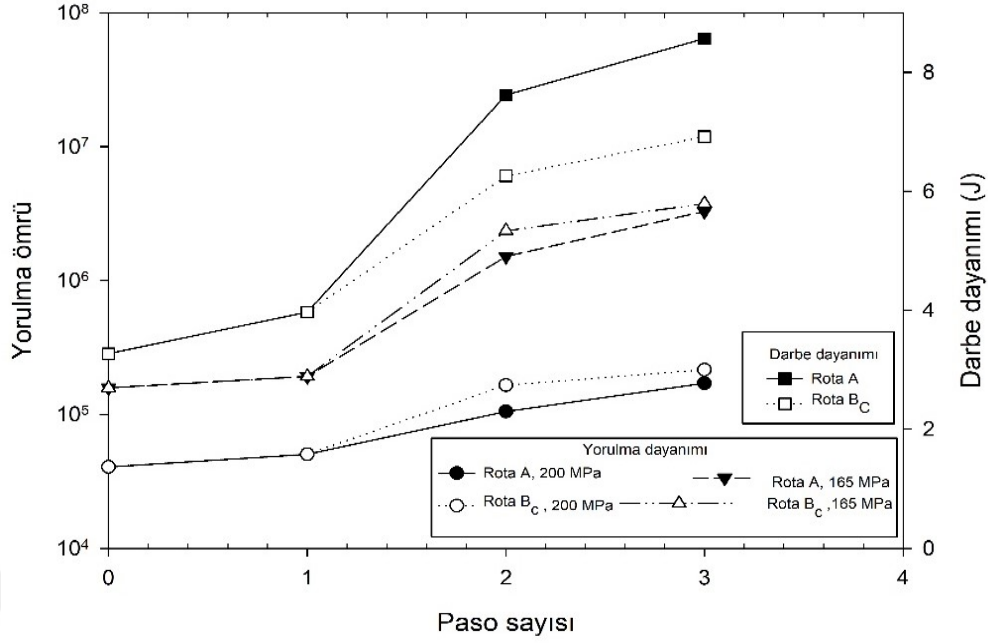
Şekil 49. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma dayanımı ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi



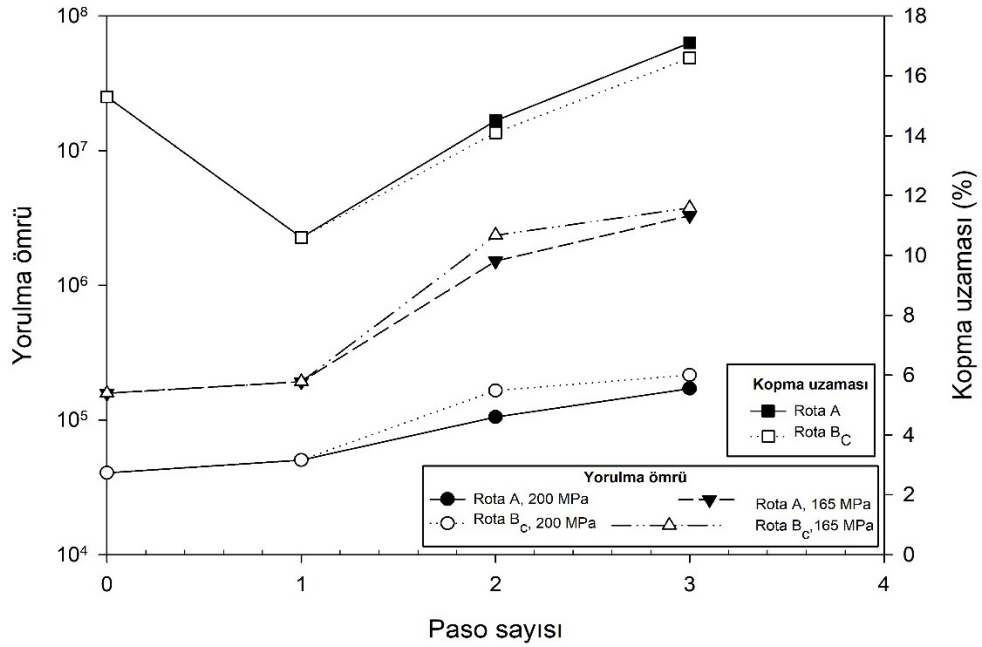
Şekil 50. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi



Şekil 51. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma ömrü ve çekme dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi



Şekil 52. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma ömrü ve darbe dayanımı değerlerinin paso sayısına göre değişimi



Şekil 53. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma ömrü ve kopma uzaması değerlerinin paso sayısına göre değişimi

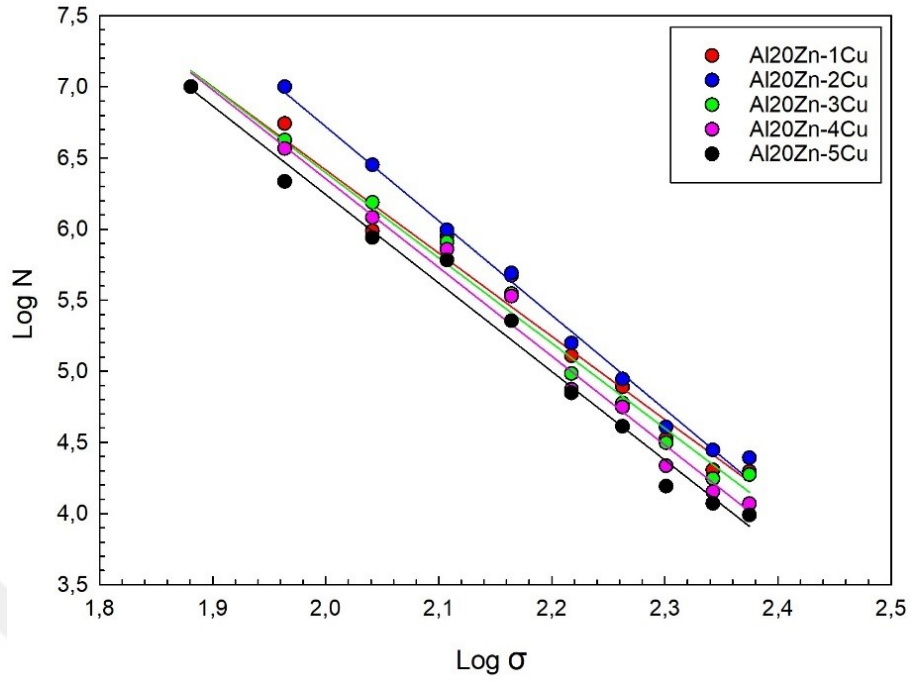
Uzun ömürlü yorulma koşullarında, ortalama gerilmenin sıfır olduğu durumlarda malzemelerin yorulma dayanımı ile yorulma ömrü arasında aşağıdaki formül ile ifade edilen Basquin bağıntısının geçerli olduğu bilinmektedir (Patlan vd., 2001).

$$N = A \sigma^{-k} \quad (4)$$

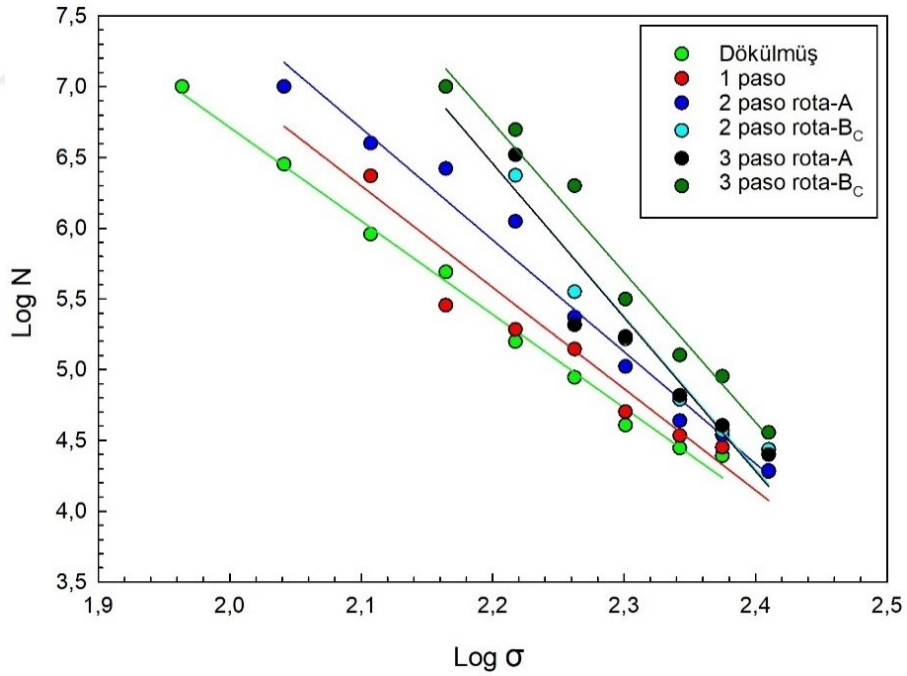
Burada  $\sigma$ , gerilme genliğini; N, örneğin kırılmasına kadar dayanabildiği çevrim sayısını yani yorulma ömrünü; k ve A ise malzeme ile ilgili sabitleri temsil etmektedir. Bu bağıntının logaritması alındığında, söz konusu bağıntı,

$$\log N = -k \log \sigma + \log A \quad (5)$$

formuna dönüşür. Eğer Basquin bağıntısı bir malzeme için geçerliyse,  $\log N$ 'nin  $\log \sigma$ 'ya göre değişiminin lineer bir ilişki göstermesi ve bu doğrunun eğiminin k olması gerekmektedir (Nagarjuna vd., 1997). Dökülmüş durumdaki ikili ve üçlü Zn-Al esaslı alaşımlar (Aydın, 2001; Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Savaşkan & Aydın, 2004) ile EKAE uygulanmış durumdaki bazı ikili alaşımların (Heyal, 2011; Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2013; Aydın & Heyal, 2012) yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği daha önce yapılan çalışmalarda belirlenmişti. Bu çalışmada, döküm halindeki Al20Zn-(%1-5 Cu) alaşımları ile EKAE işlemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımının yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan yorulma ömrü ( $\log N$ ) - gerilme genliği ( $\log \sigma$ ) grafikleri sırasıyla Şekil 54 ve 55'te görülmektedir. En küçük kareler yöntemi ile elde edilen bu doğrunun korelasyon katsayıları (c) 1'e oldukça yakın olduğundan, hem döküm durumunda hem de farklı rota ve paso sayılarında EKAE uygulanan alaşımların yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 54. Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarına ait log N – log  $\sigma$  eğrileri



Şekil 55. Al20Zn-2Cu alaşımlarının dökülmüş ve EKAЕ uygulanmış durumdaki log N – log  $\sigma$  eğrileri

Dökülmüş durumdaki Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımları ve EKAЕ uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımlarının k ve A sabitleri ile c (korelasyon katsayısı) değerleri belirlenmiş ve

dökülmüş durumdaki alaşımlar için söz konusu değerler Tablo 9’da, EKAE uygulanmış alaşım için ise Tablo 10’da verilmiştir. Tablo 10’dan EKAE işlemi sonucunda k ve A sabitlerinin artan paso sayısı ile genel olarak arttığı görülmektedir.

Tablo 9. Döküm yöntemi ile üretilen Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri

| Alaşım     | k     | A    | c    |
|------------|-------|------|------|
| Al20Zn-1Cu | 18,11 | 5,85 | 0,98 |
| Al20Zn-2Cu | 19,88 | 6,63 | 0,99 |
| Al20Zn-3Cu | 18,39 | 5,99 | 0,99 |
| Al20Zn-4Cu | 18,84 | 6,24 | 0,98 |
| Al20Zn-5Cu | 18,67 | 6,23 | 0,99 |

Tablo 10. Döküm yöntemi ve EKAE ile üretilen Al20Zn-2Cu alaşımının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı c değerleri

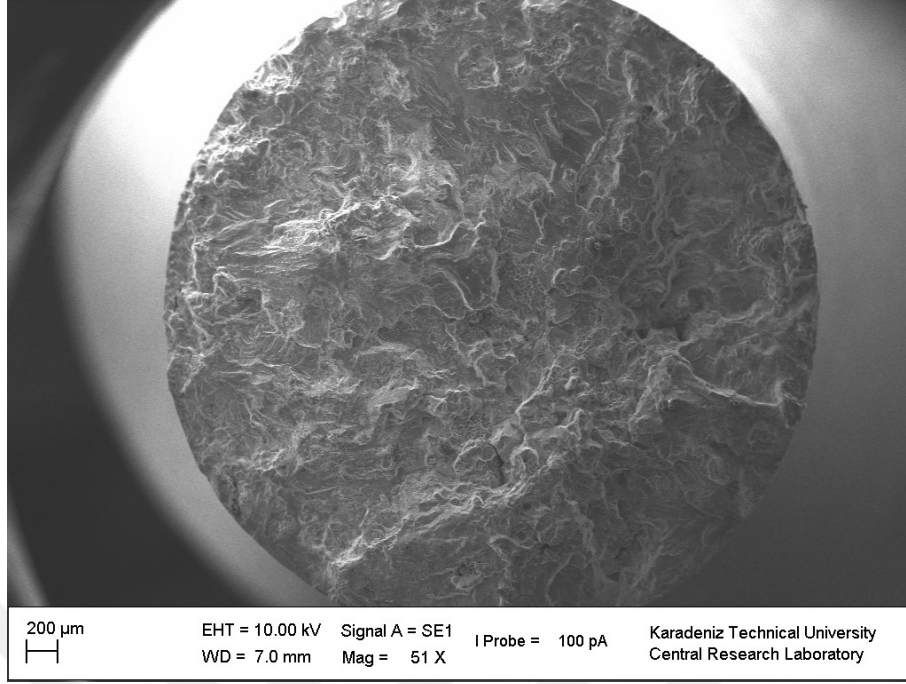
| EKAE rotası         | Paso sayısı | k     | A     | c    |
|---------------------|-------------|-------|-------|------|
| -                   | Dökülmüş    | 19,92 | 6,61  | 0,99 |
| -                   | 1           | 21,36 | 7,17  | 0,97 |
| Rota A              | 2           | 23,31 | 7,91  | 0,98 |
|                     | 3           | 30,39 | 10,88 | 0,96 |
| Rota B <sub>C</sub> | 2           | 30,23 | 10,81 | 0,98 |
|                     | 3           | 30,07 | 10,60 | 0,98 |

### 3.5. Yorulma Numunelerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

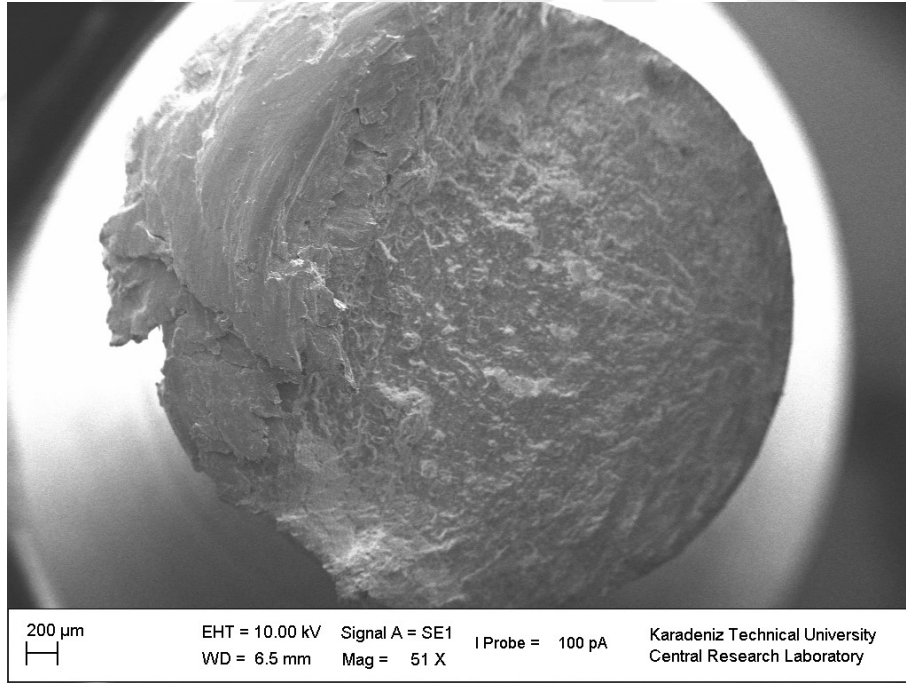
Dökülmüş ve EKAE uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımına ait yorulma numunelerinin kırık yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 56-62’de verilmiştir. Şekil 56, 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al20Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafını, Şekil 62 ise bu numuneye ait kırılma yüzeyinin detayını göstermektedir. Şekil 57’de, 128 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 paso EKAE işlemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımına ait numunenin, Şekil 58 ise aynı gerilme değerinde rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış alaşıma ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı verilmiştir. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 3 paso, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso ve rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso EKAE işlemi uygulanmış numunelerin kırılma yüzeyi fotoğrafları ise

Şekil 59, 60 ve 61’de verilmiştir. Dökülmüş durumdaki yorulma numunesinden elde edilen fotoğraftan (Şekil 56) görüldüğü gibi, kırılma yüzeyi oldukça kaba ve pürüzlü olup bol miktarda porozite içermektedir. Farklı rota ve paso sayılarında EKAE işlemi uygulanan alaşımlara ait yorulma numunelerinden, dökülmüş durumdakine göre daha pürüzsüz ve çok düşük miktarda porozite içeren bir kırılma yüzeyi elde edilmiştir (Şekil 57-61). Ayrıca Şekil 57-61’deki fotoğraflardan, ilerleyen pasolar sonrası çok daha pürüzsüz ve tipik yorulma kırılması görünümünü andıran yüzeylerin ortaya çıktığı görülmektedir.

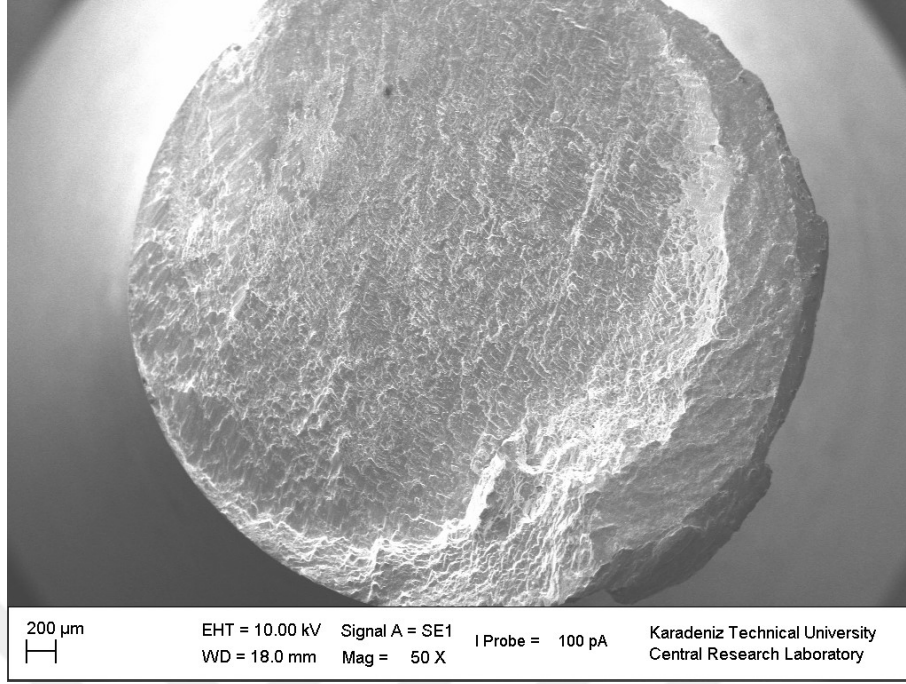




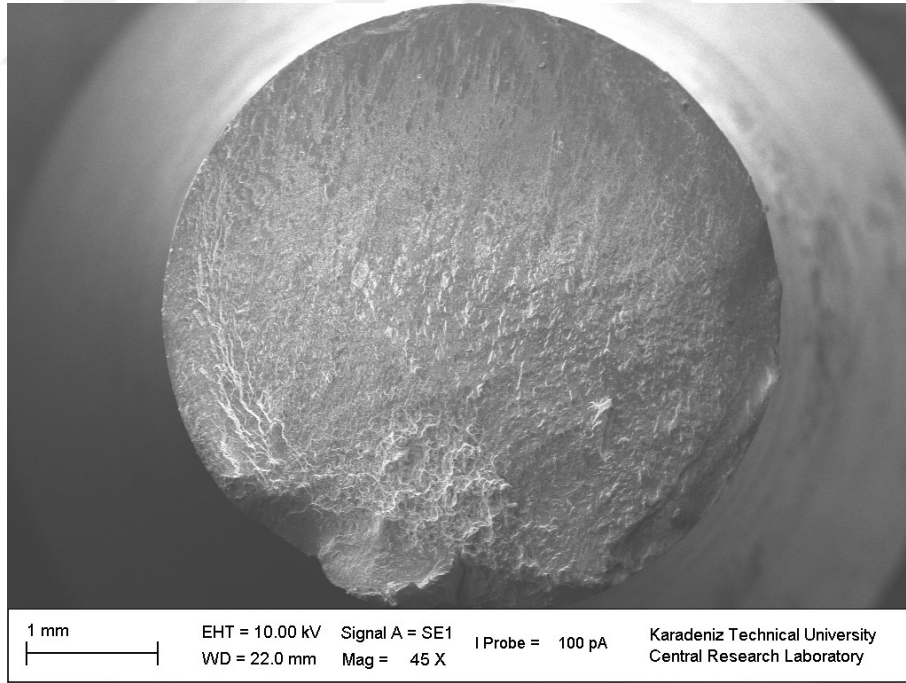
Şekil 56. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



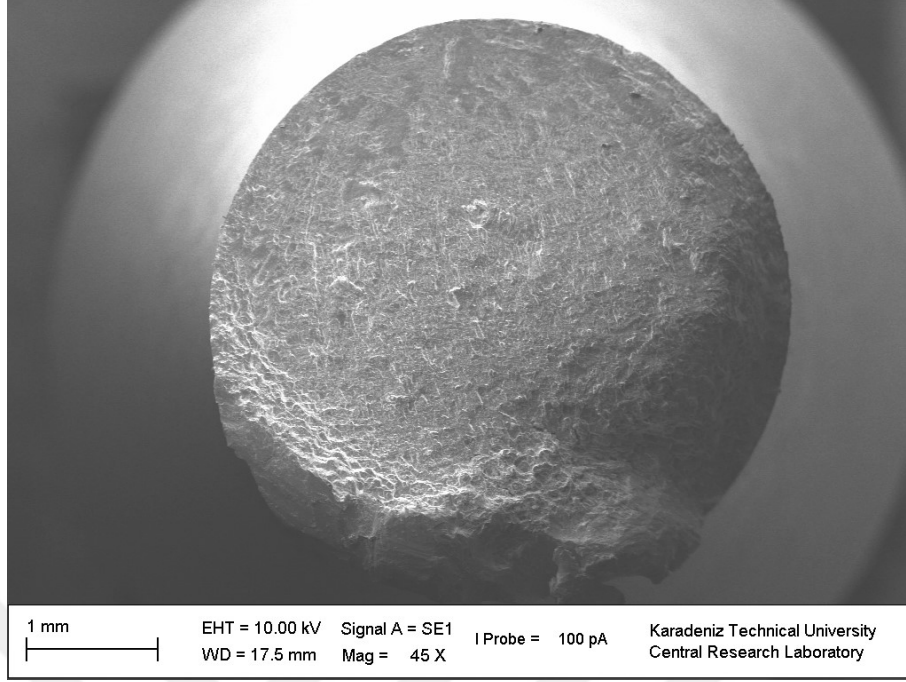
Şekil 57. 128 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 paso EKAE işlemi uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



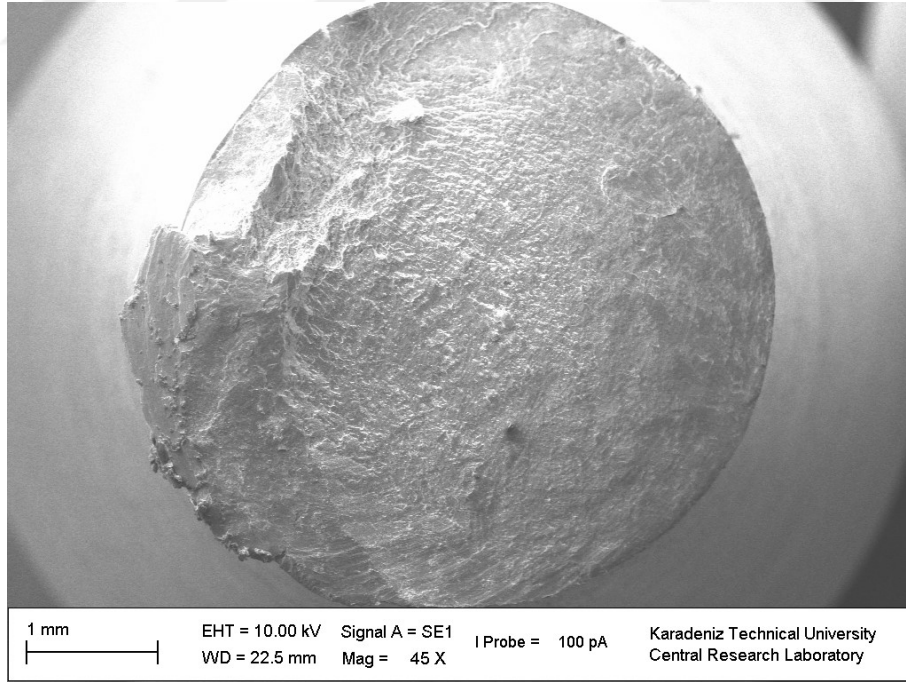
Şekil 58. 128 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAIE işlemleri uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımlına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



Şekil 59. 165 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 3 paso EKAIE işlemleri uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımlına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı

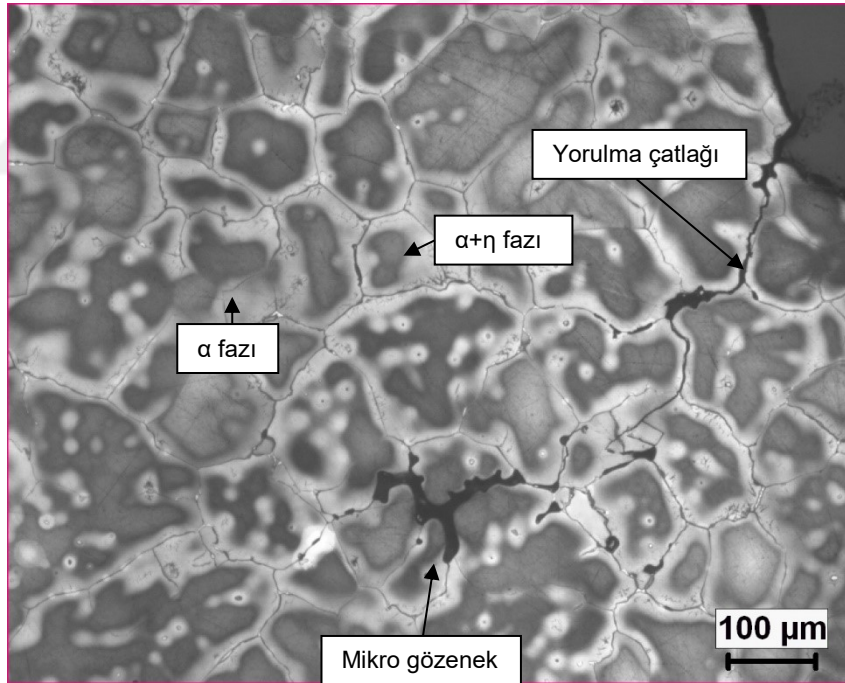


Şekil 60. 165 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAIE işlemleri uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlarına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı

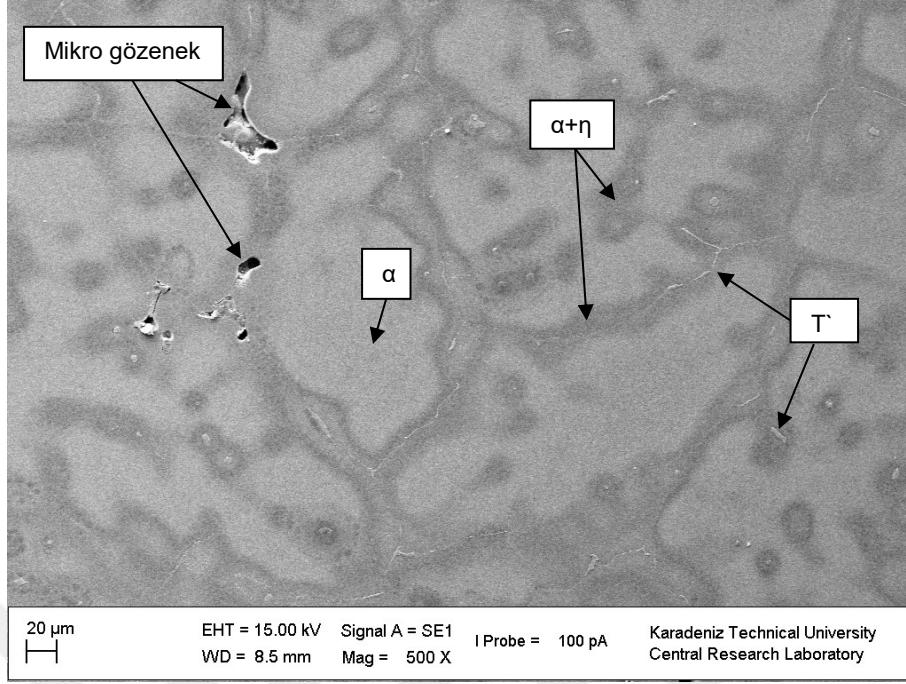


Şekil 61. 165 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso EKAIE işlemleri uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlarına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı

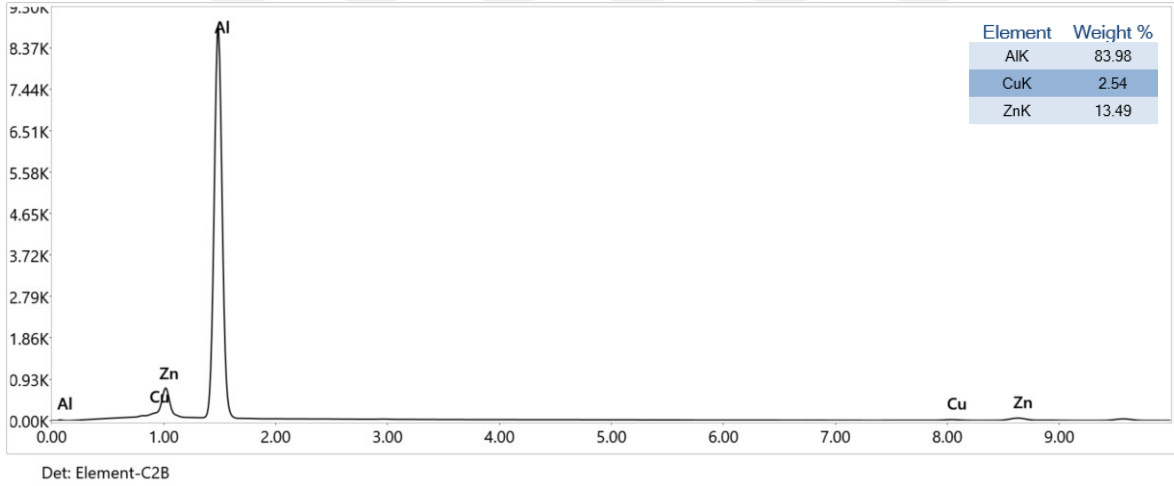
110 MPa gerilme değeriinde yapılan yorulma deneyinde, dökülmüş durumdaki Al20Zn-2Cu alaşıma ait numunenin kırılma yüzeyinin dik kesitinin optik görüntüsü Şekil 62’de, SEM fotoğrafı ise Şekil 63’te verilmiştir. Şekil 62’deki fotoğraftan, dökülmüş durumdaki yorulma numunesinde yorulma çatlağının yüzeyde başladığı ve tane sınırları boyunca iç kısımlara doğru ilerlediği görülmektedir. Bu fotoğraftan ayrıca döküm sırasında ortaya çıkan mikro boşluklar ve gözenekler (porozite) belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Söz konusu porozitelerin yorulma çatlaklarıyla ilişkisi Şekil 62’de verilen dik kesitin detayını gösteren SEM fotoğrafında (Şekil 68) görülmektedir. Şekil 63’teki SEM fotoğrafı ise  $\alpha$ ,  $\alpha+\eta$  faz bölgeleri ile tane sınırlarında biriken T’ fazı ve ayrıca döküm sırasında oluşan mikro gözenekleri net bir biçimde göstermektedir.  $\alpha$ ,  $\alpha+\eta$  ve T’ fazlarına ait noktasal EDS analizleri sırasıyla Şekil 64-66’da, dökülmüş durumdaki Al20Zn-2Cu alaışının SEM görüntüsü ile Al, Zn, Cu element dağılım haritaları ise Şekil 67’de verilmiştir.



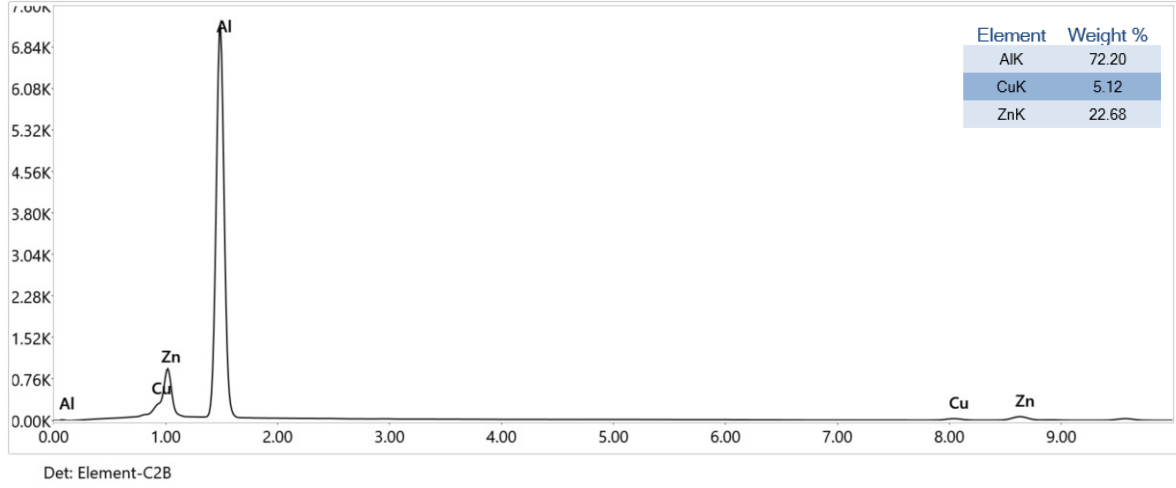
Şekil 62. 110 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al20Zn-2Cu alaışına ait numunenin kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren optik fotoğraf



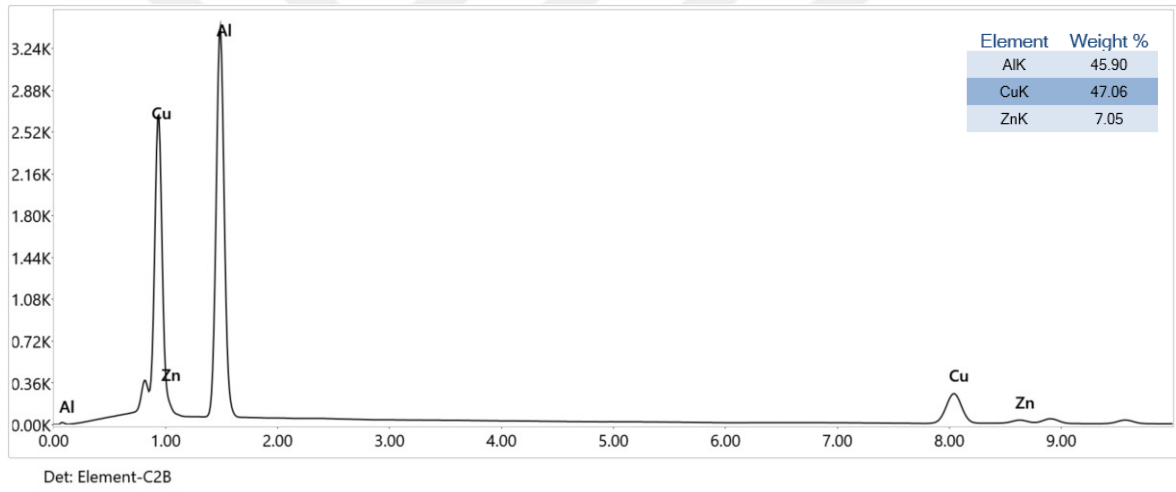
Şekil 63. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren SEM fotoğrafı



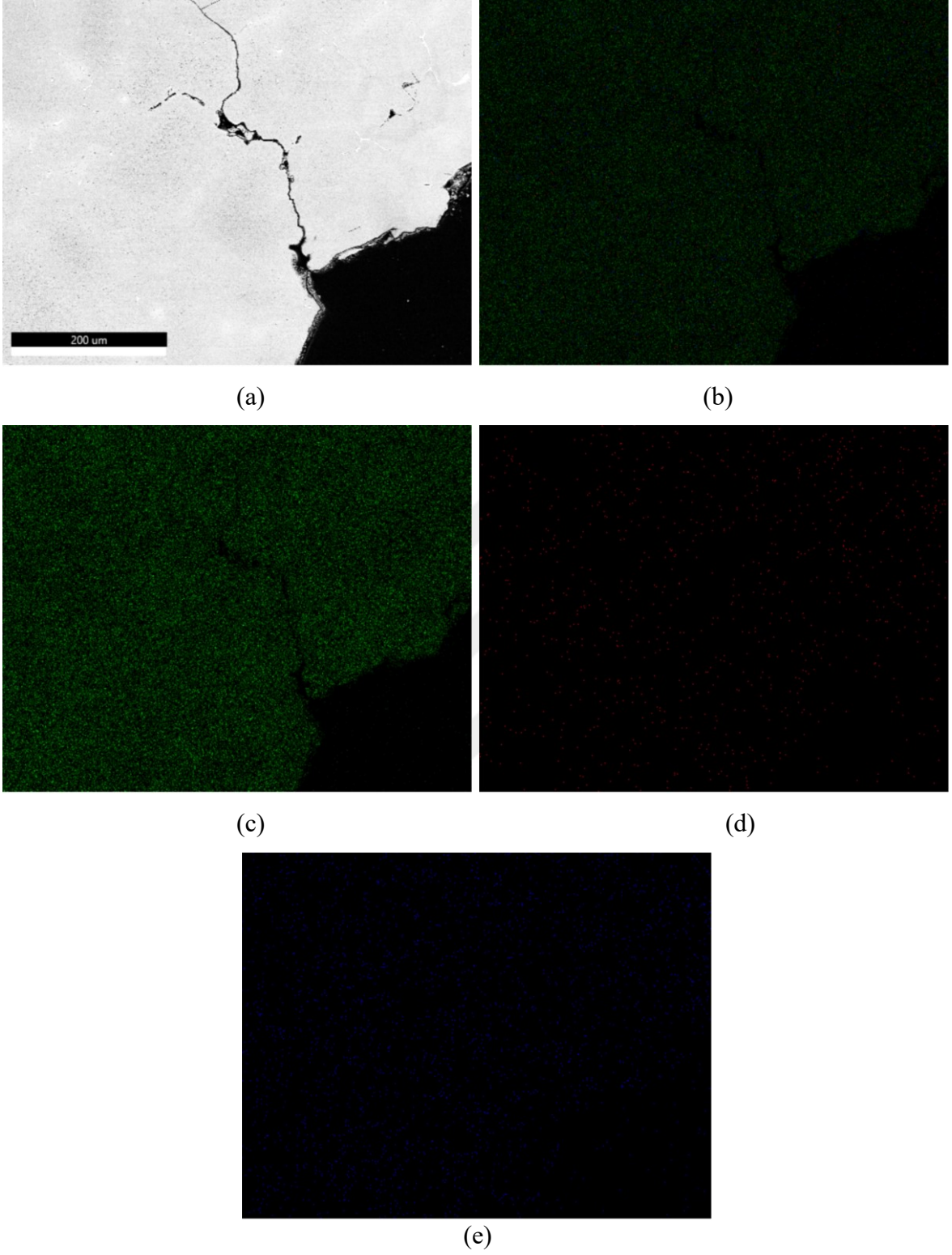
Şekil 64. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyindeki α fazına ait noktasal EDS analizi



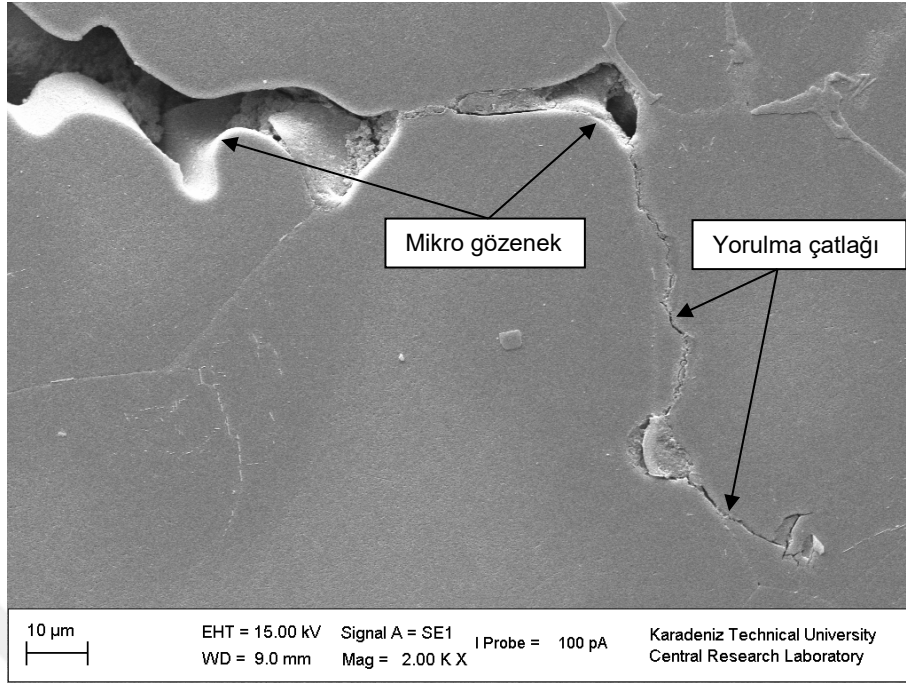
Şekil 65. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyindeki  $\alpha+\eta$  fazına ait noktasal EDS analizi



Şekil 66. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyindeki T' fazına ait noktasal EDS analizi

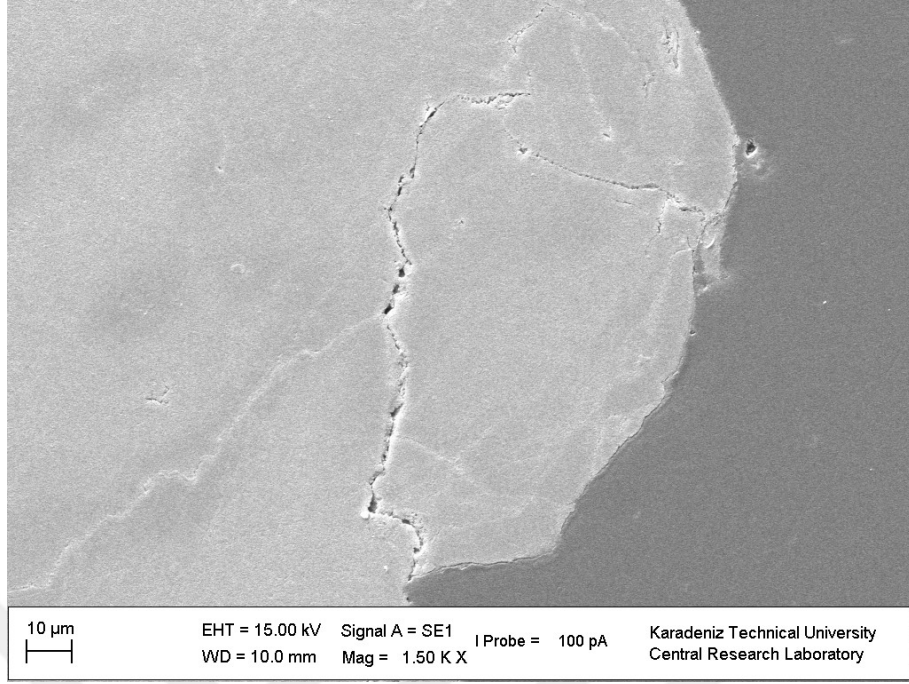


Şekil 67. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının dik kesitinin a) SEM görüntüsü, b) Al (yeşil), Zn (mavi) ve Cu (kırmızı) elementlerinin dağılım haritası, c) Al elementinin dağılım haritası, d) Cu elementinin dağılım haritası, e) Zn elementinin dağılım haritası

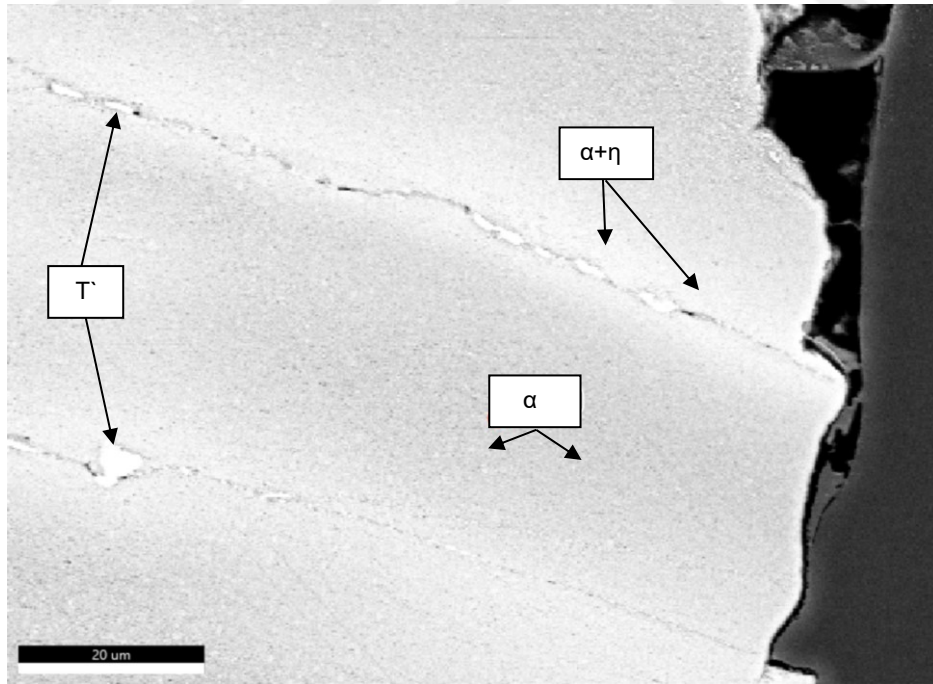


Şekil 68. 110 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Al20Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin dik kesitinin detayını gösteren SEM fotoğrafı

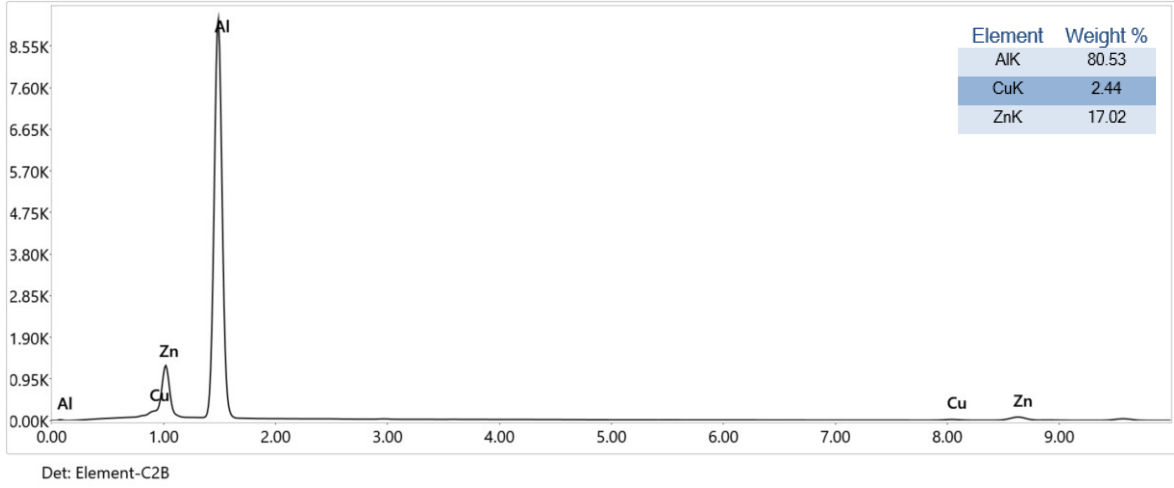
165 MPa gerilme değeri altında yapılan yorulma deneyinde, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAЕ uygulanan Al20Zn-2Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren SEM fotoğrafı Şekil 69'da, bahsedilen dik kesitin detayı ise Şekil 70'te verilmiştir. Şekil 69'daki fotoğraftan dökülmüş durumdakine benzer şekilde yorulma çatlaklarının yüzeyde başladığı ve iç bölgelere doğru ilerlediği, Şekil 70'teki fotoğraftan ise söz konusu çatlakların  $\alpha+\eta$  taneleri içerisinde (boyunca) iç kısımlara doğru ilerlediği görülmektedir. Şekil 70'teki fazların noktasal EDS analizleri Şekil 71-73'te verilmiştir. Bu EDS analizleri sonucunda Şekil 70'teki fotoğrafta görülen gri bölgelerin  $\alpha$ , beyaz bölgelerin  $\alpha+\eta$  ve parçacıkların ise T' fazı olduğu belirlenmiştir. Literatürde ilgili yapısal incelemelere benzer şekilde, söz konusu fazların tespit edildiği çalışmalar mevcuttur (Savaşkan vd., 2001; Bektaşoğlu & Savaşkan, 2005; Savaşkan & Tan, 2013). Ayrıca Şekil 74'te rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAЕ işlemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımının SEM görüntüsü ve Al, Zn, Cu elementlerinin dağılım haritaları verilmiştir.



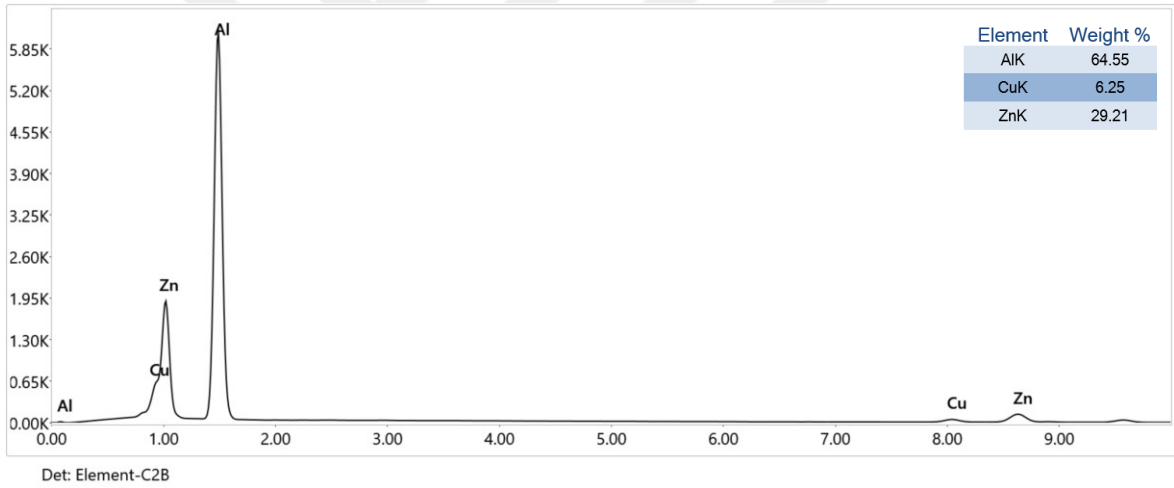
Şekil 69. 165 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAIE işlemleri uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlına ait kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren SEM fotoğrafı



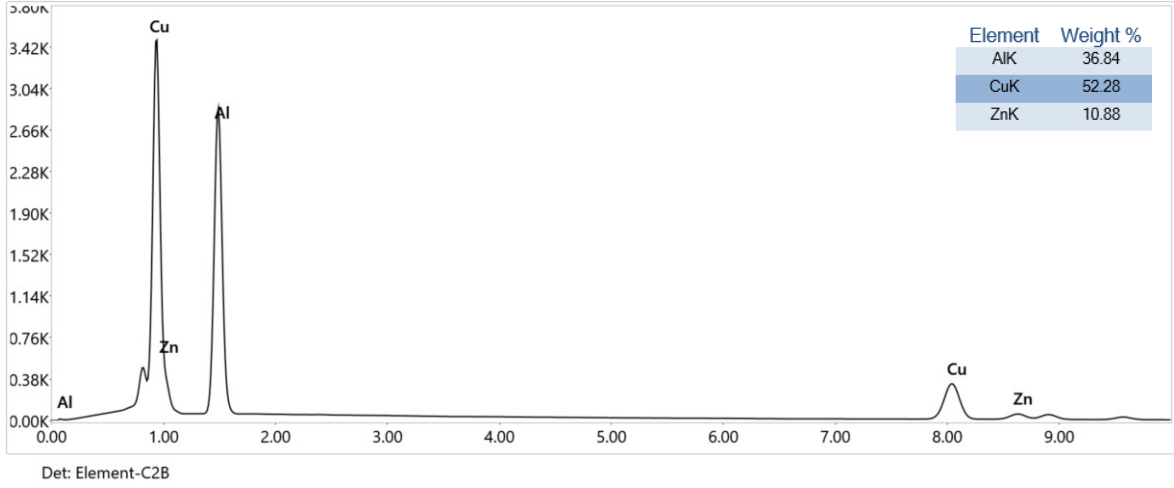
Şekil 70. 165 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAIE işlemleri uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımlında yorulma sonucunda kırılma yüzeyinin dik kesitinin detaylı içyapısını gösteren SEM fotoğrafı



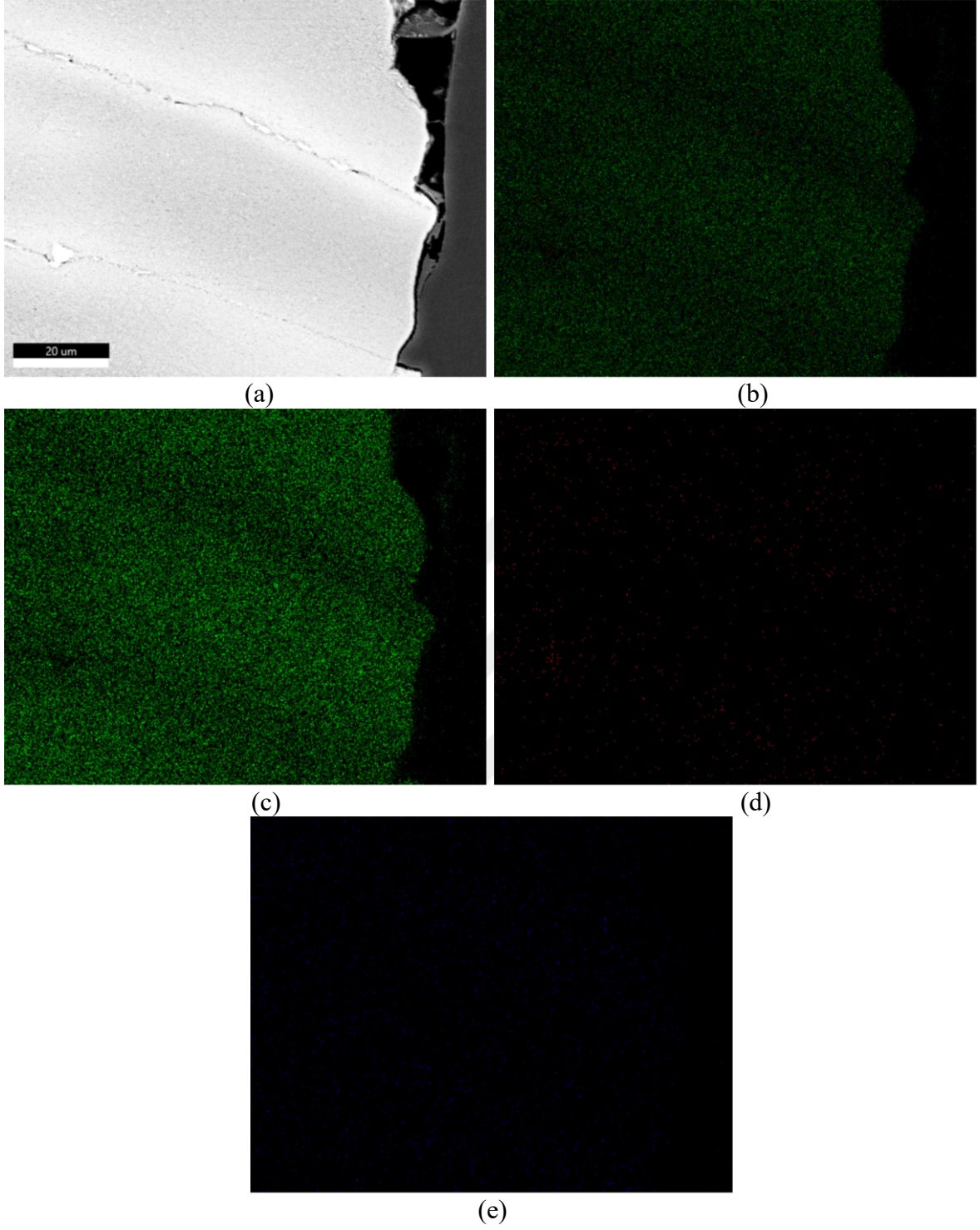
Şekil 71. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki  $\alpha$  fazına ait noktasal EDS analizi



Şekil 72. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaışımının kırılma yüzeyindeki  $\alpha+\eta$  fazına ait noktasal EDS analizi

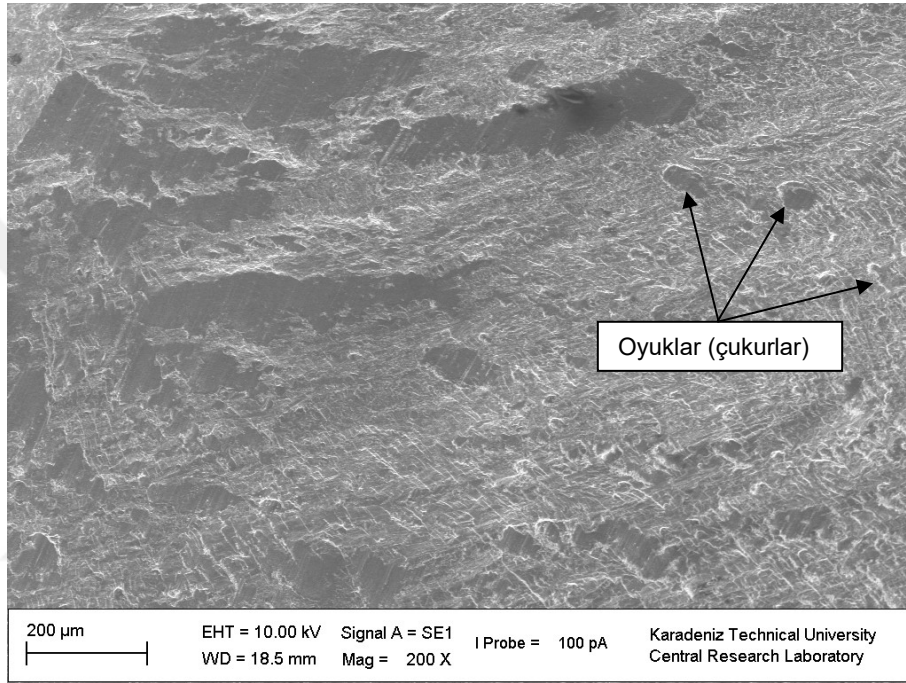


Şekil 73. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-B<sub>C</sub> ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyindeki T' fazına ait noktasal EDS analizi

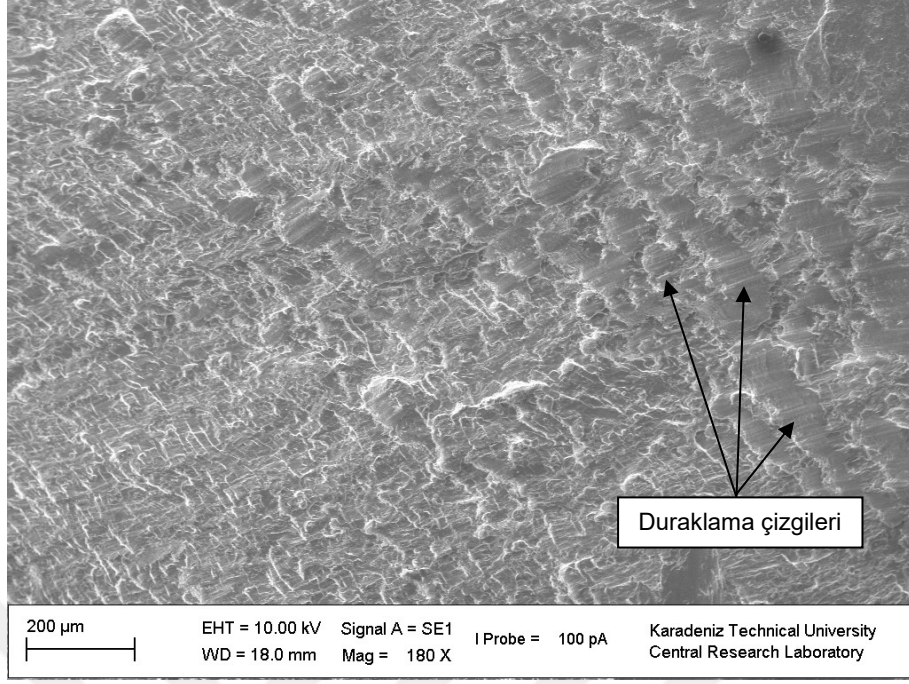


Şekil 74. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota- $B_C$  ile 2 paso EKAİ işlemi uygulanmış  $\text{Al}_{20}\text{Zn-2Cu}$  alaşımı dik kesitinin a) SEM görüntüsü, b) Al (yeşil), Zn (mavi) ve Cu (kırmızı) elementlerinin dağılım haritası, c) Al elementinin dağılım haritası, d) Cu elementinin dağılım haritası, e) Zn elementinin dağılım haritası.

165 MPa gerilme değeriinde gerçekleştirilen yorulma deneyinde, rota-A ile 2 paso EKAE uygulanan Al20Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyini gösteren SEM görüntüleri Şekil 75 ve 76'da yer almaktadır. Şekil 75'teki fotoğraf, sünek kırılmanın tipik bir özelliği olarak oyuklar (ukurlar) içerirken, bu durum dökülmüş halden EKAE işleminin sonrası sünek kırılma moduna geçişi göstermektedir. Şekil 76'daki görüntüde ise yorulma nedeniyle oluşan duraklama çizgileri görülmektedir.



Şekil 75. 165 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işleminin uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



Şekil 76. 165 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, rota-A ile 2 paso EKAE işlemi uygulanmış Al20Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyinde oluşan duraklama çizgilerini gösteren SEM fotoğrafı

#### 4. TARTIŞMA

Bu çalışmada Al-20Zn alaşımına %1-5 aralığında bakır (Cu) elementi ilavesi ile bir dizi Zn-Al esaslı alaşım kokil döküm yöntemiyle üretildi. Söz konusu alaşımların içyapıları, mekanik özellikleri ve yorulma davranışları kapsamlı bir şekilde incelendi. Bakır katkısıyla mekanik özellikler ve yorulma davranışında belirgin bir iyileşme görüldü. Bu iyileşme büyük oranda, bakır ilavesiyle ortaya çıkan katı çözelti sertleştirmesinden kaynaklanmaktadır. Önceki araştırmalar, bakır katkısının alüminyum-çinko alaşımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuş ve bu etkinin katı çözelti sertleştirmesi mekanizması ile açıklandığı ifade edilmiştir (Savaşkan & Murphy, 1990; Turhal & Savaşkan, 1997; Savaşkan vd., 1988). Fakat, Al-20Zn alaşımına eklenen bakır oranının %2'yi geçmesi durumunda, bu alaşımların sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması, darbe dayanımı, yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin azaldığı görüldü. Şöyle ki; alüminyumun en fazla %1 oranına kadar bakır çözebildiği bilinmektedir (Lyman, 1973). Alüminyum-çinko-bakır alaşımlarında, bakır oranı belirli bir seviyenin üzerine çıktığında, dendritler arası bölgelerde çinko ve bakır açısından zengin T',  $\theta$  ve  $\epsilon$  gibi intermetalik fazların oluştuğu gözlemlenmektedir (Savaşkan & Murphy, 1990; Murphy, 1980). Bakır oranının büyük bir bölümü bu bileşiklerin oluşumu için harcandığından, bakır oranının artması katı çözelti sertleştirmesi mekanizmasının etkisini azaltabileceği düşünülmektedir. Literatürde de (Murphy, 1980) belirtildiği gibi bu alaşımların mukavemet değerlerinin, belirli bir orana kadar artan bakır katkısıyla artması ve bu değerin üzerindeki bakır katkısıyla düşmesi bu görüşü doğrulamaktadır. Nitekim, dökülmüş durumdaki alaşımlar içerisinde en üstün mekanik özellikleri Al20Zn-2Cu alaşımının sergilediği belirlenmiştir. Şöyle ki; en düşük mekanik özellik değerlerini sergileyen alaşımlarla kıyaslandığında söz konusu alaşımdan sertlikte %11, çekme dayanımında %21, akma sınırında %34, kopma uzamasında %10, darbe dayanımında %80 daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu nedenle, bakır katkısıyla mekanik özelliklerde ortaya çıkan değişimler dikkate alındığında %2'lik Cu oranı Al20Zn alaşımı için optimum değer olarak belirlenmiştir. Ayrıca, en iyi yorulma performansını da söz konusu bileşime sahip olan alaşım (Al20Zn-2Cu) sergilemiştir. %2'nin üzerindeki Cu katkısının yukarıda da ele alındığı gibi mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ve özellikle de darbe direncini dramatik bir şekilde düşürdüğü görülmüştür. Bu durumun, daha önce

açıklandığı gibi artan bakır oranıyla katı çözelti sertleştirmesi mekanizmasının etkisinin azalmasından ve buna ilave olarak bakırca zengin fazların miktarının artmasıyla ortaya çıkan gevreklikten kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak yüksek oranlarda ilave edilen bakır mekanik özellikleri olumsuz etkilediği için bakır katkısının %2 ile sınırlı kalması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Literatürde bu tespiti doğrulayan çalışmalar mevcuttur (Aydın, 2001; Hacıosmanoğlu vd., 2023; Purcek vd., 2009; Turhal & Savaşkan, 1997).

Optimum kimyasal bileşime sahip Al20Zn-2Cu alaşımına EKAE işlemi uygulanması sonucunda çekme dayanımı, akma sınırı ve kopma uzaması gibi mekanik özelliklerinde ortaya çıkan belirgin iyileşmenin esasen EKAE ile ortaya çıkan yapısal değişimlerden, deformasyon sertleşmesi mekanizmasının etkinliğinden ve döküm boşluklarının (porozite) büyük oranda giderilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Söz konusu alaşımın dökülmüş durumda yüksek oranda porozite içeren tipik dendritik döküm içyapısı sergilediği gözlenmiştir (Şekil 18). Bu alaşıma ait kırılma yüzeyinin dik kesitini gösteren Şekil 62'deki fotoğrafta ise yorulma çatlağı ve mikro gözenekler belirgin bir şekilde görülmektedir. Döküm sırasında oluşan bu gözenekler malzemenin mekanik/yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir. 1 paso EKAE işleminin ardından, döküm yapısına kıyasla porozitelerin azaldığı, dendritik yapının kaybolduğu ve ince taneli daha homojen bir içyapının elde edildiği görülmüştür. Özellikle mikro gözeneklerin ortadan kaldırılması üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada, EKAE işlemi ile döküm yapısındaki gözeneklerin azaldığı ve artan paso sayısı ile birlikte tamamen yok olduğu ifade edilmektedir (Mckenzie vd., 2003). 1 paso işlem sonrası porozitelerin büyük oranda giderilmiş olması, alaşımın mukavemet ve süneklik değerlerinde önemli seviyede artışların elde edilmesini sağlamıştır. Nitekim, porozitelerin giderilmesiyle mukavemet değerlerinde kayda değer artışlar sağlandığı bazı araştırmalarla bildirilmiştir (Hung vd., 2005; Purcek vd., 2010). Ayrıca, EKAE işlemiyle ortaya çıkan deformasyon sertleşmesi mekanizması ve tane incelmesi mukavemet değerlerindeki artışı desteklemektedir. Öte yandan EKAE ile ortaya çıkan yapısal değişimler de mekanik özelliklerdeki iyileşmeye katkı sağlamıştır. Nitekim, Şekil 25'teki fotoğraftan görüldüğü gibi, 1 geçiş EKAE işlemi sonrasında tipik dendritik döküm yapısı tamamen ortadan kalkmakta ve bunun yerine ekstrüzyon yönünde belirli bir açı oluşturacak şekilde hizalanmış (şerit gibi uzamış) ince taneli bir yapı (alüminyumca zengin  $\alpha$  ve çinkoca zengin  $\alpha+\eta$  fazları) ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, Rota-A kullanılarak uygulanan EKAE işlemiyle, ilerleyen pasolarda ortaya çıkan aşırı plastik deformasyon

sonucunda artan paso sayısı ile orantılı olarak tane yapısındaki incelmeye ve uzamanın arttığı, eğim açısının ekstrüzyon yönüne daha da yaklaşan bileşenlerden oluşan bir iç yapının ortaya çıktığı görülmektedir. (Şekil 27, 29, 31). Literatürde, benzer içyapı dönüşümlerinin mekanik/yorulma özellikleri üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koyan çalışmalar mevcuttur (Saray & Purcek, 2009; Aydın, 2012). Nitekim yapılan bir çalışmada, rota-A'da şerit benzeri ince ve uzamış fazları içeren mikro yapının oluşması ve söz konusu mikro yapının, deformasyon kaynaklı homojenleşme nedeniyle ortaya çıkan yumuşamayı dengeleyici etkisinden dolayı, çok pasolu EKAE sonrası sertlik ve mukavemetin önemli ölçüde artmasına katkı sağladığı ileri sürülmektedir (Hung vd., 2005; Purcek vd., 2010). Ayrıca, EKAE işlemi sonrasında meydana gelen bu yapısal değişimler, mukavemet ve süneklik değerlerinin birlikte artırılmasını, porozitesiz bir iç yapının oluşumunu ve deformasyon yumuşaması etkisini sağlamış; bu sayede darbe dayanımında %122 gibi olağanüstü bir artış elde edilmiştir (Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2013; Aydın & Heyal, 2012).

Paso sayısı ve EKAE rotası gibi parametrelerin, Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Şöyle ki; söz konusu alaşımın sertlik ve çekme dayanımının 1 paso EKAE işlemi sonucunda, yukarıda detaylı bir şekilde açıklanan mekanizmalarla (tane yapısının incelmeye, porozitelerin ortadan kalkması ve deformasyon sertleşmesi) önemli oranda artarken, ilerleyen pasolarda ise düşüş eğilimi gösterdiği görüldü. Söz konusu düşüşün ilerleyen pasolarda ortaya çıkan elastik toparlanmadan (deformasyon yumuşaması) kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu yumuşama, her bir paso EKAE işlemi sonucunda deformasyon ve sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşen homojenizasyon nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bahsedilen mekanizma, daha önceki çalışmalarda sistematik bir şekilde incelenmiş ve detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Saray & Purcek, 2009; Purcek vd., 2004; Purcek vd., 2010). Kopma uzamasının 1 paso sonucunda deformasyon sertleşmesi mekanizmasına bağlı olarak ani bir düşüş göstermesi, ilerleyen pasolarda ise deformasyon yumuşaması etkisiyle sürekli olarak artması ve ayrıca rota A ile 3 paso EKAE işlemi sonrası, dökülmüş duruma göre darbe dayanımında %62'lik yüksek bir artış oranı elde edilmiş olması bu tespiti doğrulamaktadır. Öte yandan, ilerleyen pasolarda özellikle de rota A'da, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerindeki belirgin artışın, aşırı plastik deformasyon sonucu meydana gelen şerit benzeri (ip gibi uzamış) bir iç yapının etkisiyle sağlandığı düşünülmektedir. Nitekim, benzer bir çalışmada (Aydın, 2012) dökülmüş durumda içyapıda bulunan  $\alpha$  dentritlerinin EKAE işlemi sonrası uzayıp

incelmesinin, ekstrüzyon yönünde uygulanan gerilme ile daha fazla uzama elde edilmesine yani sünekliğin yüksek oranda artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Ayrıca EKAE sonrası ortaya çıkan deformasyon yumuşamasının deformasyon sertleşmesi mekanizmasını dengeleyici etki yapmasının süneklikteki bu yüksek artış oranını desteklediği ileri sürülmektedir (Aydın, 2012; Hung vd., 2005; Purcek vd., 2010). Paso sayısı gibi proses rotası da yapı ve mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Şöyle ki; rota- B<sub>C</sub>'de rota-A'dakinden farklı olarak yaklaşık eş eksenli iri tanelerden oluşan bir içyapının ortaya çıkması, 4 paso EKAE işlemi sonrasında rota-Bc de rota-A ya göre daha yüksek sertlik ve mukavemet ile daha düşük süneklik değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. Bu sayede, uygulanan EKAE işlemiyle değişen rota ve paso sayılarının, farklı mekanik özelliklerin elde edilmesini sağladığı söylenebilir. Yukarıda detaylı bir şekilde ele alındığı gibi EKAE işlemiyle ortaya çıkan yapısal değişimlerin bu sonucu doğurduğu literatürde bazı araştırmacılar tarafından da rapor edilmektedir (Saray & Purcek, 2009; Aydın, 2012; Hung vd., 2005; Purcek vd., 2010).

Yorulma deneylerinden elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda dökülmüş durumdaki alaşımlar içerisinde en iyi yorulma performansını Al20Zn-2Cu alaşımının sergilediği ve bu alaşıma uygulanan EKAE işleminin, söz konusu alaşımın yorulma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü. Yorulma mekanizması çatlak oluşumu ve ilerlemesi şeklinde gerçekleştiği için, alaşımın mukavemet ve sünekliğindeki artış, çatlak oluşumu için gereken gerilme seviyesini yükseltir. Bu gerilme seviyesindeki artış, çatlağın daha geç oluşmasına ve dolayısıyla alaşımın yorulma dayanımının artmasına katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Meyers & Chawla, 1999). Diğer bir yandan, çatlak oluşumu için harcanan yorulma ömrü, alaşımın toplam yorulma ömrünün büyük bir kısmını oluşturduğundan (Meyers & Chawla, 1999; Dieter, 1976) çatlak oluşumunun geciktirilmesi alaşımın yorulma ömrünü artıracaktır. Sünekliğin artışı, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyen bir rol oynar (Esin, 1981; Ashby & Jones, 1980). EKAE işlemi sonrasında bu alaşımın yorulma performansındaki kayda değer iyileşme, öncelikle EKAE'nin alaşımda meydana getirdiği yapısal değişimlere ve mukavemetin artışına bağlı olarak açıklanabilir. Şöyle ki, EKAE sonrası alaşımın dentritik döküm yapısının kaybolarak yerine incelmış bir içyapının oluşması ve tipik döküm yapısında bulunan gözeneklerin büyük oranda giderilmiş olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda da bu faktörlerin alaşımların yorulma performansı üzerindeki etkileri vurgulanmıştır (Patlan vd., 2001; Estrin & Vinogradov, 2010). Zn-Al alaşımlarının döküm

sonrası içyapısında yüksek oranda gözenek bulunduğu (Turhal & Savaşkan, 1997), bunun da alaşımların mekanik özelliklerini ve özellikle yorulma performansını olumsuz etkilediği bilinmektedir (Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Turhal & Savaşkan, 1997). Şekil 62 ve 68'de açıkça görülen içyapıdaki bu gözenekler, gerilme yığılmasına yol açarak çatlak oluşumu ve ilerlemesini hızlandırır, bu da yorulma performansını olumsuz etkiler (Savaşkan vd., 2001; Savaşkan & Aydın, 2004). 110 MPa gerilme altında yapılan yorulma deneyi sonucunda, dökülmüş Al20Zn-2Cu alaşımının kırılma yüzeyinin dik kesitinde (Şekil 62) ve bu kesitin detayında (Şekil 68) oluşan çatlaklar, fotoğraflarda açıkça görülmektedir. Bu olumsuzluğun giderilmesinde EKAE işleminin oldukça etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir (Purcek ve ark., 2009). Yorulma performansındaki bu önemli iyileşme, EKAE işlemiyle hem mukavemetin hem de sünekliğin birlikte artırılmasına bağlanmaktadır. Nitekim, bazı araştırmacılar (Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2013; Estrin & Vinogradov, 2010), yüksek mukavemet ve sünekliğin olumlu bir kombinasyonunun yorulma performansını büyük ölçüde iyileştirdiğini öne sürmektedir. Ayrıca, yapılan bir başka çalışmada, aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan EKAE işleminin içyapıda dislokasyon yoğunluğunu artırdığı ve bunun da yorulma performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir (Patlan vd., 2001).

Yorulma deneylerinden elde edilen verilerle yapılan korelasyon analizleri, bakır içeriği ve EKAE parametrelerinin (örneğin rota ve paso sayısı) alaşımların yorulma özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bakır katkısının yorulma davranışı üzerindeki etkisi bakır katkısıyla sertlik, mukavemet gibi mekanik özelliklerde ortaya çıkan değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. Yapılan incelemeler sonucunda, dökülmüş alaşımlarda bakır oranının artışıyla birlikte yorulma dayanımı ve ömrü, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, bakır içeriğinin %2'yi aşması durumunda bu özelliklerin genel olarak azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir, Şekil 44-47. Yani alaşımların dökülmüş durumdaki yorulma davranışı mekanik özelliklerle doğrudan ilişkilidir. Öte yandan, çok pasolu EKAE işlemiyle dökülmüş durumdaki Al20Zn-2Cu alaşımının gerek yorulma dayanımı gerek yorulma ömrü değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Bu durum, EKAE ile ortaya çıkan ve daha önce detaylı olarak açıklanan yapısal değişimlerden kaynaklanmaktadır. Örneğin, rota-A yönteminde paso sayısının artışı ile birlikte tane boyutunun küçüldüğü ve uzunlamasına incelenmiş tanelerin yatay eksenle oluşturduğu açının (eğim açısı) azaldığı, yani ekstrüzyon doğrultusuna daha yakın bir

konumda olduğu gözlemlenmiştir. Yapıda ve mekanik özelliklerde gözlenen değişimlere ek olarak, paso sayısının artması ile birlikte eğim açısının azalmasının da yorulma performansındaki iyileşmeler üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Şöyle ki, yorulma çatlakları kuvvet eksenine 45°'lik açı yapan doğrultudaki kayma bantları üzerinde ortaya çıktığından (Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2012) eğim açısının azalmasının yorulma çatlaklarının oluşumunu geciktirdiği düşünülmektedir. Deformasyon sertleşmesi etkisi sonucunda belirgin bir şekilde artan akma dayanımı, elastik deformasyon bölgesinin genişlemesine yol açmıştır. Bu genişlemenin, çatlak oluşumunu geciktirdiği ve dolayısıyla alaşımların yorulma performansında önemli iyileşmeler sağladığı düşünülmektedir. EKAE parametrelerinin Al20Zn-2Cu alaışımının yorulma özellikleri üzerindeki etkilerini gösteren Şekil 48-53'teki grafiklerden de görüldüğü gibi, söz konusu alaışımın yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin artan paso sayısı ile belirgin bir şekilde arttığı ve bu artışın rota-B<sub>C</sub> 'de rota-A'ya göre daha dikkat çekici olduğu belirlenmiştir. Bu durumun daha önce de açıklandığı gibi, rota- B<sub>C</sub>'de rota-A'dakinden farklı olarak yaklaşık eş eksenli iri tanelerden oluşan bir içyapının ortaya çıkmasıyla, daha yüksek sertlik ve mukavemet ile daha düşük süneklik değerlerinin elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bu grafiklerden, söz konusu alaışımın 1 paso EKAE işlem sonrası çekme dayanımının belirgin şekilde arttığı ve ilerleyen pasolarda bir miktar azaldığı, kopma uzaması değerlerinin 1 pasoda bir miktar azaldığı ancak sonraki pasolarda sürekli olarak arttığı, darbe dayanımının ise artan paso sayısı ile sürekli olarak belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu veriler doğrultusunda, Al20Zn-2Cu alaışımının çok pasolu EKAE işlemi sonrasında elde edilen yorulma özellikleri ile diğer mekanik özellikleri arasındaki değişimlerin karşılaştırılması sonucunda, yorulma performansının en fazla darbe dayanımına bağlı olduğu sonucuna ulaşılabilir. Nitekim literatürde bu tespiti doğrulayan çalışmalar mevcuttur (Aydın, 2012; Höppel vd., 2006; Aydın & Heyal, 2013; Aydın & Heyal, 2012).

Bu çalışmada incelenen Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki ve Al20Zn-2Cu alaışımının hem dökülmüş hem de EKAE uygulanmış hallerindeki yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak, yorulma ömrü (log N) ve gerilme genliği (log  $\sigma$ ) arasındaki ilişkiler grafikte sunulmuştur (Şekil 54-55). En küçük kareler yöntemiyle elde edilen doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1'e oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, hem dökülmüş hem de EKAE uygulanmış durumdaki bu alaşımların yorulma davranışlarının Basquin bağıntısı ile açıklanabileceğini

göstermektedir. Literatürde dökülmüş durumdaki ikili ve üçlü Zn-Al esaslı alaşımlar (Aydın, 2001; Savaşkan vd., 2001; Aydın & Savaşkan, 2004; Savaşkan & Aydın, 2004) ile EKAE uygulanmış durumdaki bazı ikili alaşımların (Heyal, 2011; Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2013; Aydın & Heyal, 2012) yorulma davranışının Basquin bağıntısına uygunluğu ile ilgili benzer bulgular elde edilmiştir.

Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımına ait dökülmüş durumda yapılan yorulma deneylerinden elde edilen kırılma yüzeyine ait fotoğraf incelendiğinde, yüzeyin oldukça kaba ve pürüzlü olduğu, ayrıca bol miktarda porozite içerdiği gözlemlenmiştir (Şekil 56). Bu durum, gevrek kırılmanın karakteristik özelliği olan yüksek orandaki döküm boşluklarının (porozite) birleşiminden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, farklı rota ve paso sayılarıyla gerçekleştirilen EKAE işlemi sonrası yapılan yorulma deneylerinde elde edilen kırılma yüzeylerinin çok daha pürüzsüz ve porozitesiz olduğu belirlenmiştir (Şekil 57-61). Önceki detaylı açıklamalara dayanarak, EKAE işleminin döküm yapısındaki poroziteleri büyük ölçüde azaltarak yorulma performansını önemli derecede iyileştirdiği öngörülmektedir. Bu bulguyu destekleyen literatürde mevcut çalışmalar bulunmaktadır (Aydın, 2012; Aydın & Heyal, 2013). Bu incelemeler, EKAE işleminin dökülmüş durumda gözlemlenen yorulma kırılmasının doğal karakteristiğini değiştirerek, kırılma modunu gevrek kırılmadan kısmen sünek kırılma moduna dönüştürdüğü sonucunu ortaya koymaktadır. Bu durum, Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının hem kırılma yüzeylerinin genel görünüşlerini (Şekil 56-61), hem de kırılma yüzeyinin detayını (Şekil 75) gösteren SEM fotoğraflarında gözlenmiştir. Ayrıca, gerek dökülmüş (Şekil 62,68) gerekse EKAE uygulanmış (Şekil 69,70) durumda yorulma çatlağının yüzeyde başladığı ve iç kısımlara doğru tane sınırları boyunca (taneler arası) ilerlediği görülmüştür. Her iki durum için yapılan EDS analizleri (dökülmüş durumda Şekil 63-67, EKAE uygulanmış durumda Şekil 70-74) yorulma çatlaklarının tane sınırları boyunca ilerlediği tespitini doğrulamaktadır. Bununla birlikte, literatürde (Saray & Purcek, 2009; Demirtas vd., 2017; Höppel vd., 2006; Purcek vd., 2004; Purcek vd., 2009; Aydın & Heyal, 2012), EKAE işleminin ikili Zn-Al alaşımlarında kırılma modunu değiştirdiğini yani tane içi kırılmaya dönüştürdüğünü rapor eden çalışmalar mevcuttur. Literatürle ortaya çıkan bu uyumsuzluğun bu çalışmada, literatürde incelenen bileşimlerden farklı olarak bakır içeren üçlü Zn-Al-Cu alaşımı çalışılmasından, şöyle ki; alaşımdaki bakırın tane sınırlarında bakırca zengin gevrek fazların birikmesine neden olması ve bu bölgeleri gevrekleştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 70).

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Al<sub>20</sub>Zn alaşımına %1-5 aralığında bakır (Cu) elementi eklenerek çeşitli Zn-Al-Cu alaşımları kokil döküm yöntemi ile üretilmiştir. Bu alaşımların iç yapısı, mekanik özellikleri ve yorulma davranışları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Optimum kimyasal bileşime sahip alaşım olarak Al<sub>20</sub>Zn-2Cu belirlenmiştir. Bu alaşıma EKAE işlemi başarıyla uygulanmış ve bu işlem sonucunda alaşımın mukavemet, süneklik değerlerinde ve yorulma performansında önemli iyileşmeler sağlanmıştır. Elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. En iyi mekanik özellikleri ve en üstün yorulma performansını Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımı sergilediğinden, %2 Cu ilaveli söz konusu alaşım optimum kimyasal bileşime sahip alaşım olarak belirlenmiştir. Şöyle ki, en düşük mekanik özellik değerlerini sergileyen alaşımlarla kıyaslandığında sözü edilen alaşımdan yorulma dayanım sınırında %18, sertlikte %11, çekme dayanımında %21, akma sınırında %34, kopma uzamasında %10, darbe dayanımında %80 daha yüksek değerler elde edilmiştir. Yüksek oranlarda ilave edilen bakır mekanik özellikleri olumsuz etkilediği için bakır katkısının %2 ile sınırlı kalması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.
2. Al<sub>20</sub>Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının genelde geniş  $\alpha$  tanelerinden oluşan tipik bir dendritik döküm yapısı sergilediği ve dendritler arası bölgelerde çinkoca zengin  $\alpha+\eta$  ötektoid lamellerinin oluştuğu görülmüştür. Bu durum, özellikle %2 bakır içeren alaşımın içyapısında net bir biçimde gözlenmiştir. Öte yandan, %2 oranının üzerindeki Cu katkısıyla tane sınırlarındaki belirginliğin gittikçe azaldığı belirlenmiştir.
3. EKAE işlemi sonrası, Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının mikro gözenekli dentritik döküm yapısının ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Bu değişimle birlikte, rota-A kullanıldığında, incelmış ve şerit benzeri uzamış fazlar (alüminyumca zengin  $\alpha$  ve çinkoca zengin  $\alpha+\eta$ ) oluşurken; rota-B<sub>C</sub> uygulandığında ise yaklaşık eş eksenli tane yapısına sahip karışık mikro bileşenler ile tane sınırlarının belirgin olmadığı bir iç yapı ortaya çıkmıştır.
4. EKAE işleminin sonucunda meydana gelen yapısal değişimlere bağlı olarak, dökülmüş Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının mukavemet ve süneklik değerlerinde anlamlı

artışlar sağlanmıştır. Şöyle ki; dökülmüş duruma göre, çekme dayanımında 1 paso işlem sonunda %12'lik, akma dayanımında rota-B<sub>C</sub> ile 3 paso işlem sonunda %18'lik, kopma uzamasında rota-A ile 4 paso işlem sonunda %5,9'luk, darbe dayanımında ise rota-A ile 3 paso işlem sonunda %62'lik oldukça yüksek bir artışın ortaya çıktığı belirlenmiştir.

5. EKAE işlemi uygulanan Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının rota ve paso sayısına göre en yüksek sertlik değeri, ekstrüzyon yönündeki yüzeyde (A yüzeyinde) ve 2 paso rota-B<sub>C</sub>'de elde edilmiştir.
6. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının yorulma performansının çok pasolu EKAE işlemiyle önemli ölçüde iyileştiği ve 3 paso EKAE işlemi sonucunda sözü edilen alaşımın dökülmüş duruma göre yorulma dayanım sınırındaki artışın yaklaşık %59 gibi yüksek bir orana ulaştığı görülmüştür.
7. EKAE işlemiyle alaşımın mekanik özellikleri ve buna bağlı olarak yorulma performansında elde edilen önemli iyileşme EKAE ile ortaya çıkan yapısal değişimlere, deformasyon sertleşmesi mekanizmasının etkinliğine ve döküm boşluklarının (porozite) büyük oranda giderilmesine dayandırılarak açıklanabilir.
8. EKAE uygulanmış durumdaki Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının mekanik özellikleri ve yorulma performansı uygulanan paso sayısına ve işlem rotasına bağlı olarak değişir. Yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri artan paso sayısı ile genelde artar. Yapılan EKAE ve yorulma deneyleri sonucunda en uzun yorulma ömrü ve en yüksek yorulma dayanım değerleri rota-B<sub>C</sub> kullanılarak elde edilmiştir. Başka bir ifadeyle, yorulma performansı açısından uygulanan EKAE işlem rotaları karşılaştırıldığında, rota- B<sub>C</sub>'de rota-A'ya oranla daha yüksek değerlere ulaşılmıştır.
9. Al<sub>20</sub>Zn-2Cu alaşımının farklı rota ve paso sayılarında uygulanan EKAE işlemi sonrasında elde edilen yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerleri, mekanik özelliklere bağlı olarak değişiklik göstermektedir; ancak, bu değerlerin en fazla darbe dayanımı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.
10. Gerek dökülmüş gerekse EKAE işlemi uygulanmış durumdaki alaşımların uzun ömürlü yorulma davranışları Basquin bağıntısı ile ilişkilidir.
11. Çok pasolu EKAE işleminin, dökülmüş durumdaki alaşımın doğal yorulma kırılma karakteristiğini değiştirerek, gevrek kırılma modundan kısmen sünek kırılma moduna dönüştürdüğü sonucuna varılabilir.

12. Yorulma deneyleri sonucunda dökülmüş durumdaki Al20Zn-(%1-5)Cu alaşımlarının genelde kaba ve pürüzlü, EKAE işlemi uygulanmış durumdaki Al20Zn-2Cu alaşımının ise duraklama çizgileri içeren daha düzgün ve pürüzsüz kırılma yüzeyleri sergilediği gözlenmiştir.
13. Gerek dökülmüş gerekse EKAE uygulanmış durumda yorulma çatlaklarının yüzeyde başladığı ve iç kısımlara doğru tane sınırları boyunca (taneler arası) ilerlediği gözlenmiştir.



## 6. ÖNERİLER

- Daha yüksek paso sayıları kullanılarak yapılan EKAE işleminin alaşımın yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- EKAE işleminin bir parametresi olan proses sıcaklığının, alaşımın yorulma performansı üzerindeki etkileri incelenebilir.
- EKAE sonrası farklı mekanik (haddeleme gibi) ve ısıt işlemlerin (homojenizasyon gibi) mekanik özellikler ile yorulma davranışı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Silisyum katkısının EKAE uygulanmış durumdaki gerek ikili (Al-Zn) gerekse üçlü (Al-Zn-Cu) alaşımların yorulma davranışı üzerindeki etkileri incelenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Savaşkan, T., (1980). *The Structure and Properties of Zinc-Aluminium Based Bearing Alloys*. The University of Aston, Ph.D. Thesis, Birmingham.
- Savaşkan, T. & Murphy, S., (1987). Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25-Al Based Alloys. *Wear*, 116, 211-224.
- Zhu, Y.H. & Goodwin, F.E., (1993). Influence of Rare Earth Element Additions on Phase Transformations in the Zn-27%Al Alloy. *J. Mater. Res.*, 18(12), 3043-3049.
- Zhu, Y.H. & Goodwin, F.E., (1994). Microstructures of Thermomechanically Trated Eutectoid Zn-Al Alloys. *Journal of Materials Science and Technology*, 10, 121-126.
- Durman, M., (1993). Alüminyum-çinko Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi. 5. *Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Kitabı: I*, s. 177-191, Denizli.
- Gervais, E., & Loong, C.A., (1984). New ZA Alloys in Die Casting. *11th International Pressure Die Casting Conference*, 1-25, Lyon.
- Barnhurst, R.J., (1984). Zinc and Zinc Alloys. *Proc. Conference on Materials Engineering*, 87-96, University of Leeds.
- Aydın, M., (2001). *Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A. & Chernyakova, V.V., (1961). Phase Diagram Of The Al Zn System. *Russ J. Phys. Chem.*, 35(6), 632-633.
- Gervais, E., (1987). ZA Alloys-A Challenge to the Metals Industry. *CIM Bulletin*, 80(900), 67-142.
- Skenazi, A.F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B. & Meeus, M., (1983). Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys. *MEtall*, 37(9), 898-902.
- Perry, C.C., (1988). *Fatigue Testing in Materials Laboratory Courses*. USA:Fatigue Dynamics Inc.
- Savaşkan, T. & Murphy, S., (1990). Decomposition of Zn-Al-Alloys on Quench-Aging. *Materials Science and Technology*, 6, 695-703.
- Murphy, S., (1980). Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System. *Zeitschrift Für Metallkunde*, 71, 96-102.

- Goodwin, E. & Ponikvar, A.L., (1989). *Engineering Properties of Zinc Alloys*. Third Edition, International Lead Zinc Research Org. Inc.
- Turhal, M.Ş. & Savaşkan, T., (1997). Alüminyum-çinko Alaşımları İçin Mukavemet Artırma Yöntemleri. *Mühendis ve Makine*, 38(450), 32-38.
- Erdöl, M.Ş., (1994). *Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımlarda Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Ruiz, J. & Elices, M., (1997). The Role of Environmental Exposure in The Fatigue Behaviour of An Aluminium Alloy. *Corrosion Science*, 39(12), 2117-2141.
- Savaşkan, T., Aydın, M. & Odabaşoğlu, H.A., (2001). Fatigue Behaviour of Zn-Al Casting Alloys. *Materials Science and Technology*, Vol. 17, 681-685.
- Aydın, M., & Savaşkan, T., (2004). Fatigue properties of zinc-aluminium alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions. *International Journal of Fatigue*, 26, 103-110.
- Savaşkan, T. & Aydın, M., (2004). Fatigue behaviour of monotectoid-based Zn-Al-Cu alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions. *Materials Characterization*, 52, 269-278.
- Çay, F., & Kurnaz, S.C., (2005). Hot tensile and fatigue behaviour of zinc-aluminum alloys produced by gravity and squeeze casting. *Materials and Design*, 26, 479-485.
- Saray, O. & Purcek, G., (2009). Microstructural evolution and mechanical properties of Al-40 wt. %Zn alloy processed by equal-channel angular extrusion. *J. Mater. Process. Technol.* 209, 2488-2498.
- Heyal, Y., (2011). *Eş Kanalda Açısız Ekstrüzyon Yönteminin Alüminyum-çinko Alaşımlarının Yorulma Özelliklerine Etkisi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Aydın, M., (2012). High-cycle fatigue behavior of severe plastically deformed binary Zn-60Al alloy by equal-channel angular extrusion. *Journal Of Materials Processing Technology*, 212(8), 1780-1789.
- Şenaslan, F., (2016). *Yaşlandırma süresinin Zn-27Al-1Cu alaşımının yapı ve mekanik özelliklerine etkisi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Hacıosmanoğlu, M., Tellioğlu, M., & Hekimoğlu A. P., (2023). Effect of Strontium on the Microstructure, Mechanical, and Tribological Properties of the Zn-40Al-2Cu Alloy. *International Journal Of Metalcasting*, 17(4), 3133-3142.
- Carpenter, G.J.C. & Garwood, R. D., (1967). The Ageing of a Quenched Aluminium-22,5% Zinc Alloy. *Metal Science Journal*, 1, 202-211.

- Demirtas M., Atli K. C., Yanar, H., & Purcek, G., (2017). Enhancing the Damping Behavior of Dilute Zn-0.3Al Alloy by Equal Channel Angular Pressing. *Metallurgical And Materials Transactions A-Physical Metallurgy And Materials Science*, 6, 2868-2876.
- Pürçek G., Yanar H., Demirtas M., Alemdağ Y., Shangina D. V., & Dobatkin S. V., (2016). Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr alloy by combining multi-route ECAP and aging. *Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing*, 649, 114-122.
- Demirtas, M., Pürçek G., Yanar H., Zhang Z. J., & Zhang Z. F., (2015). Achieving room temperature superplasticity in Zn-5Al alloy at high strain rates by equal-channel angular extrusion. *Journal Of Alloys And Compounds*, 623, 213-218.
- Aydın, M., (1995). *Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Aydın, M., Küçükömeroğlu, T. & Savaşkan, T., (1997). Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 38(444), 40-45.
- Zhu, Y.H. & Murphy, S., (1986). A General Rule of Decomposition Reaction in SuperSaturated Zn-Al Based Alloys. *Chin J. Met. Sci. Tech.*, 2, 105-116.
- Savaşkan, T., Torul, O. & Çuvalcı, H., (1988). Alüminyum-çinko Alaşımlarının İç yapı ve Mekanik Özelliklerinin incelenmesi, 5. *Metallurji Kongresi, Bildiriler Kitabı II*, 784-798. Ankara.
- Murphy, S., (1980). Solid Phase Reactions in the Low Copper Part of the Al-Cu-Zn System. *Z. Metalkunde*, 71, 96-102.
- Savaşkan, T. & Murphy, S., (1983). Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys. *Z. Metalkunde*, 74, 993-999.
- Barnhurst, R.J., Gervais, E., & Boyles, F.D., (1983). Gravity Casting of Zinc-Aluminium Alloys – Solidification Behaviour of ZA-8, ZA-12 and ZA-27. *AFS Transactions*, 81, 569-575.
- Turhal, M.Ş., (2001). *Soğuma Hızının Alüminyum-çinko Esaslı Alaşımların Yapı ve Özelliklerine Etkisi*. K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., & Alexandrov, I.V., (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 45, 103-189.
- Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T.G., (2001). Review: Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, 36, 2835-2843.
- Valiev, R.Z., (2003). Recent development of SPD processing for fabrication of bulk nanostructured materials. *Materials Science Forum*, 426-432, 237-244.

- Zhu, Y.T., Lowe, T.C., & Langdon, T.G., (2004). Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation. *Scr. Mater.*, 51, 825- 830.
- Ma, A., Suzuki, K., Nishida, Y., Saito, N., Shigematsu, I., Takagi, M., Watazu, A., & Imura, T., (2005). Impact toughness of an ultrafine-grained Al-11 mass%Si alloy processed by rotary-die equal-channel angular pressing. *Acta Mater.*, 53, 211-220.
- Höppel, H.W., Kautz, M., Xu, C., Murashkin, M., Langdon, T.G., Valiev, R.Z., & Mughrabi, H., (2006). An overview: fatigue behavior of ultrafinegrained metals and alloys. *Int. J. Fatigue*, 28, 1001-1010.
- Segal, V.M., (2004). Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). *Mater. Sci. Eng. A*, A 386, 269-276.
- Zhang, Z.F., Wu, S.D., Li, Y.J., Liu, S.M., & Wang, Z.G., (2005). Cyclic deformation and fatigue properties of Al-0.7 wt.% Cu alloy produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A*, A 412, 279-286.
- Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T.G., (1998). The process of grain refinement in equal-channel angular pressing. *Acta Materialia*, 46(9), 3317-3331.
- Hanlon, T., Kwon, Y.N., & Suresh, S., (2003). Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals. *Scripta Materialia*, 49(7), 675-680.
- Vinogradov, A., Hashimoto, S., & Kopylov, V.I., (2003). Enhanced strength and fatigue life of ultra-fine grain Fe-36Ni Invar alloy. *Materials Science and Engineering A*, A 355, 277-285.
- Meyers, M.A., & Chawla, K.K., (1999). *Mechanical Behaviour of Materials*, USA:Printice-Hall Inc.
- Karaman, I., Robertson, J., Im, T.T., Mathaudhu, S.N., Luo, Z.P., & Hartwig, K.T., (2004). The effect of temperature and extrusion speed on the consolidation of zirconiumbased metallic glass powder using equal-channel angular extrusion. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35A-1, 247-256.
- Cisar, L., Yoshida, Y., Kamado, S., Kojima, Y., & Watanabe, F., (2003). Development of high strength and ductile magnesium alloys for automobile applications. *Materials Science Forum*, 419-422, 249-254.
- Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Zhu, Y.T., & Lowe, T.C., (2002). Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. *Journal of Materials Research*, 17-1, 5-8.
- 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, 39-44.

- Agnew, S.R., Horton, J.A., Lillo, T.M., & Brown, D.W., (2004). Enhanced ductility in strongly textured magnesium produced by equal channel angular processing. *Scripta Materialia*, 50, 377-381.
- Valiev, R.Z., (2003). Paradoxes of severe plastic deformation. *Adv. Eng. Mater.*, 5, 296-300.
- Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I., & Ooi, P.H., (2004). Processing of eutectic Zn-5% Al alloy by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 279-287.
- Purcek, G., Altan, B.S., Miskioglu, I., & Patil, A., (2005). Mechanical Properties of severely deformed ZA-27 alloy using equal channel angular extrusion. *Materials Science and Technology*, 21(9), 1044-1048.
- Purcek, G., Karaman, I., Yapici, G.G., Maharbi, M.A., Kucukomeroglu T., & Saray, O., (2007). Enhancement in mechanical behavior and wear resistance of severe plastically deformed two-phase Zn-Al alloys. *Int. J. Mat. Res.(formerly Z. Metallkd.)*, 98(4), 332-338.
- Frukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T.G., (1998). The sharing characteristics associated with equal-channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng. A.*, 257, 328-332.
- Demirtas, M., & Purcek, G., (2019). Room Temperature Superplasticity in Fine/Ultrafine Grained Materials Subjected to Severe Plastic Deformation. *Materials Transactions*, 60(7), 1159-1167.
- Purcek, G., (2005). Improvement of mechanical properties for Zn-Al alloys using equalchannel angular pressing. *J. Mater. Process. Technol.*, 169, 242-248.
- Purcek, G., Saray, O., Kahraman, I., & Haouaoui, M., (2009). Microstructural evolution and mechanical response of equal-channel angular extrusion- processed Al-40Zn-2Cu alloy. *Metallurgical and Materials Transactions*, 40A, 2772-2783.
- Sines, G., & Waisman, J.L., (1959). *Metal Fatigue*. New York:Mc Graw Hill Book Company Inc.
- Swanson, S.R., (1974). *Handbook of Fatigue Testing*. USA:ASTM Special Technical Publication 566.
- Ashrafizadeh, F., Young, J.M., & Kondic, V., (1987). Solidification Structures and Mechanical Properties of Zn-27 Al Alloy Cast in Metal Moulds. *Materials Science and Technology*, 27, 665-770.
- Chung, C.S., Kim, J.K., Kim, H.K., & Kim, W.J., (2002). Improvement of high-cycle fatigue life in a 6061 Al alloy produced by equal channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A.*, 337, 39-44.

- Patlan, V., Vinogradov, A., Higashi, K., & Kitagawa, K., (2001). Overview of fatigue properties of fine grain 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering A*, 300, 171-182.
- Vinogradov, A., & Hashimoto, S., (2003). Fatigue of severely deformed metals. *Advanced Engineering Materials*, 5, 351-358.
- Kim, H.K., Choi, M.I., Chung, C.S., & Shin, D.H., (2003). Fatigue properties of ultrafine grained low carbon steel produced by equal channel angular pressing. *Material Science and Engineering A*, 340A, 243-250.
- Vinogradov, A., Washikita, A., Kitagawa, K., & Kopylov, V.I., (2003). Fatigue life of AlMg-Sc alloys produced by equal-channel angular pressing. *Material Science and Engineering A*, 340, 318-326.
- Mughrabi, H., Höppel, H.W., & Kautz, M., (2004). Fatigue and microstructure of ultrafinegrained metals produced by severe plastic deformation. *Scripta Materialia*, 51, 807-812.
- Aydın M., & Heyal Y., (2013). Effect of equal channel angular pressing on microstructural and mechanical properties of as cast Al-20 wt-%Zn alloy. *Materials Science And Technology*, 29(6), 679-688.
- Aydın M., & Heyal Y., (2012). Mechanical Properties Of Equal-Channel Angular Extrusion-Processed Al-20Zn Alloy. *Materials And Manufacturing Processes*, 445, 195-200.
- Savaşkan T., & Aydın, M., (2004). Fatigue behaviour of monotectoid-based Zn-Al-Cu alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions”, *Materials Characterization*, 52, 269-278.
- Turhal, M.Ş., & Savaşkan, T., (1997). Relationships between secondary dendrite arm spacing and mechanical properties of Zn-40Al-Cu alloys. *J. Mater. Sci.*, 38, 2639-46.
- Nagarjuna, S., Srinivas, M., Balasubramanian, K., & Sormat, D.S., (1997). Effect of Alloying Content on High Cycle Fatigue Behaviour of Cu-Ti Alloys. *Int. J. Fatigue*, 19(1), 51-57.
- McKenzie, P.W.C., Lapovok, R., Wells, P., & Raviprasad, K., (2003). Removal of porosity in cast aluminum alloys by equal channel angular extrusion. *Mater. Sci. Forum* 426-432, 297-302.
- Hung, P.C., Sun, P.L., Yu, C.Y., Kao P.W., & Chang, C.P., (2005). Inhomogeneous tensile deformation in ultrafine-grained aluminum. *Scr. Mater.*, 53, 647-652.
- Purcek, G., Aydın, M., Saray, O., & Kucukomeroglu, T., (2010). Enhancement of tensile ductility of severe plastically deformed two-phase Zn-12Al alloy by equal channel angular extrusion. *Mater. Sci. Forum* 633-634, 437-447.

- Estrin, Y., & Vinogradov, A., (2010). Fatigue behavior of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation. *Int. J. Fatigue*, 32, 897-907.
- Dieter, G.E., (1976). *Mechanical Metallurgy*. New York:McGraw-Hill Book Company Second Edition.
- Esin, A., (1981). *Properties of Materials for Mechanical Design*. Gaziantep:Middle East Technical University Corp.
- Ashby, M.F., & Jones, D.R.H., (1980). *Engineering Materials*. U.K.:Pergamon Press, First Edition.
- Lyman, T., (1973). American Society for Metals Handbook, Metallography, Structure and Phase Diagrams. Ohio:Metals Park, vol.8.
- Bektaşoğlu, A., & Savaşkan, T., (2005). Zn-60Al-(1-5) Cu Alaşımlarının Kuru Sürtünme Durumundaki Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makine*, 46(544), 31-39.
- Savaşkan, T., & Tan, H. O., (2013). Fatigue behaviour of Al-25Zn-3Cu alloy. *Materials Science and Technology*, 30(8), 938-943.

## ÖZGEÇMİŞ

Yakup HEYAL, Trabzon Fatih Lisesi'nden (YDA) mezun oldu. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini, 2011 yılında da Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan yüksek lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisans tezini KTÜ BAP birimi tarafından 2008.112.003.7 kodlu BAP- 01 programı kapsamında desteklenen temel araştırma projesinde tez öğrencisi olarak tamamladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora programına başladı. Doktora tez çalışmalarını, KTÜ BAP birimi tarafından FDK-2021-9468 proje kodlu BAP-06 lisans üstü tez projesi ile desteklenen araştırma projesinde tez öğrencisi olarak tamamladı. Orta derecede İngilizce bilen Yakup HEYAL, 2013 yılından beri Karadeniz Teknik Üniversitesi Arsin Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.