

Ö.TUNÇ, 2020

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AA6082 MALZEMESİNİN DÖVME PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZKAN TUNÇ

Temmuz 2020



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AA 6082 MALZEMESİNİN DÖVME PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZKAN TUNÇ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi İlyas KACAR

Temmuz 2020

Özkan TUNÇ tarafından Dr. Öğr. Üyesi İlyas KACAR danışmanlığında hazırlanan “AA 6082 Malzemesinin Dövme Performansının incelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman KILIÇ, Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi / Makine Mühendisliği, Kırşehir

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ŞAHİN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi / Makine Mühendisliği

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İlyas KACAR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Doç. Dr. Murat BARUT**  
**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

  
Özkan TUNÇ

## ÖZET

### AA 6082 MALZEMESİNİN DÖVME PERFORMANSININ İNCELENMESİ

TUNÇ, Özkan

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İlyas KACAR

Temmuz 2020, 124 sayfa

6000 serisi alüminyum alaşımları, fiyat ve performans açısından alüminyum alaşımları içerisinde en iyi özelliklere sahip bir alaşım serisidir. Bu özellikleri nedeni ile de havacılık ve otomotiv sanayinde çelik emsallerine alternatif olmaktadır. Bu çalışmada AA6082 serisi alüminyum alaşımının mekanik ve termomekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapay yaşlandırmanın etkileri araştırılmıştır. Yapılan işlemlerin mikro yapıya olan etkileri belirlenmiştir. Sonuçta da, en uygun yapay yaşlandırma koşulları tespit edilmiştir. Bu değerler otomotiv sektöründe kullanılan rot başının yorulma, sıcak dövme simülasyonlarında kullanılmıştır. Sıcak dövme simülasyonunu doğrulamak üzere deneysel yorulma ve sıcak dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Rotun çalışma ömrü, dövme işlemi için pres kuvvet gereksinimi, çapak oranı, işlem süresi, gerilme değerlendirilmesi sunulmuştur.

*Anahtar sözcükler:* AA6082 Al alaşımları, yapay yaşlandırma, dövme, yorulma, havacılık, otomotiv

## SUMMARY

### INVESTIGATION ON FORGING PERFORMANCE OF AA 6082

TUNÇ, Özkan

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Advisor : Assit. Prof. Dr. İlyas KACAR

July 2020, 124 page

6000 series aluminum alloys are the best among other aluminum alloys in terms of price and performance. Due to these features, it is an alternative to steel materials used in the aviation and automotive industries. In this study, mechanical and thermomechanical properties of AA6082 series aluminum alloy are determined. The effects of artificial aging have been investigated. The effects on the microstructure are determined. As a result, the best artificial aging conditions have been determined. These values are used in fatigue and hot forging simulations of the rod arm used in the automotive industry. Experimental fatigue and hot forging process are performed for validations. Service life of the rod, pressing force requirement for forging, burr ratio, processing time, and stress are evaluated.

**Keywords:** AA6082 Al alloys, artificial aging, hot forging, fatigue, aviation, automotive

## ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmamda, AA6082 alüminyum alaşımının yapay yaşlandırmanın mekanik ve termomekanik özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Hazırlanan deney numuneleri laboratuvar ortamında farklı sıcaklık, solüsyona alma, çözeltiye alma parametrelerinde yapay yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney numuneleri sırası ile çekme, sertlik, mikro yapı, S-N curve, charpy-impact (çentik darbe), jump testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar bilgisayar destekli yazılımlara yüklenerek, rot başı gövdesi üzerinde DEFORM yazılımı ile sıcak dövme simülasyonu, ANSYS yazılımı ile de ürünün temel fonksiyon testleri gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak AA6082 alaşımının çelik malzemelere göre kıyaslamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre AA6082 alüminyumun alaşımında mukavemet, korozyon, birim deformasyonunun çelikten %10 a kadar daha iyi olduğu görülmüştür.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi İlyas KACAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak yanımda olan hayat arkadaşım Tülay TUNÇ'a ithaf ediyorum.

Bu çalışmaya FEB 2018/14-BAGEP numaralı proje ile finansal destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmaya finansal ve teknik destek sağlayan Ditaş Doğan Yedek Parça İmalat ve Teknik A.Ş. ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|  |       |
|--|-------|
| ÖZET .....   | iv    |
| SUMMARY .....  | v     |
| ÖN SÖZ .....   | vi    |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....  | x     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....  | xiv   |
| FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ .....                                  | xvii  |
| SİMGE VE KISALTMALAR .....   | xviii |
| BÖLÜM I GİRİŞ .....  | 1     |
| 1.1 Tarihçe .....  | 1     |
| 1.2 Alüminyum Üretimi.....   | 3     |
| 1.2.1 Birincil Al üretim metodu.....                                     | 3     |
| 1.2.2 İkincil Al üretim metodu .....                                     | 4     |
| 1.2.3 Dünyada alüminyum üretimi .....                                    | 5     |
| 1.3 Alüminyumun Genel Özellikleri ve Uygulama Alanları .....             | 7     |
| 1.4 Alüminyum Alaşımları .....   | 8     |
| 1.4.1 1xxx serisi alüminyum.....   | 9     |
| 1.4.2 2xxx serisi alüminyum.....   | 9     |
| 1.4.3 3xxx serisi alüminyum.....   | 10    |
| 1.4.4 4xxx serisi alüminyum.....   | 10    |
| 1.4.5 5xxx serisi alüminyum.....   | 10    |
| 1.4.6 6xxx serisi alüminyum.....   | 10    |
| 1.4.7 7xxx serisi alüminyum.....   | 11    |
| 1.4.8 8xxx serisi alüminyum.....   | 11    |
| 1.5 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri.....                          | 11    |
| 1.5.1 Alüminyumlarda çökelme sertleştirme ısıl işlemi .....              | 13    |
| 1.6 6082 Al Alaşımlarının Mekanik ve Termo Mekanik Özellikleri .....     | 16    |
| 1.7 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Plastik Şekil Verme Yöntemleri..... | 18    |
| 1.7.1 Alüminyumun dövülmesi .....  | 19    |

|  |    |
|--|----|
| 1.7.2 Haddeleme prosesi ile alüminyum sac üretimi .....        | 19 |
| 1.7.3 Alüminyumun ekstrüzyonu .....                            | 19 |
| BÖLÜM II LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                            | 20 |
| BÖLÜM III MATERYALveMETOT                                      | 23 |
| 3.1 Deneyler.....  | 23 |
| 3.1.1 Kimyasal analiz .....                                    | 23 |
| 3.2 Yapay Yaşlandırma Deneyleri.....                           | 24 |
| 3.2.1 Yapay yaşlandırma deney numunelerinin hazırlanması ..... | 24 |
| 3.2.2 Yapay yaşlandırma deneylerinin gerçekleştirilmesi .....  | 26 |
| 3.3 Çekme Deneyi.....  | 29 |
| 3.4 Sertlik Ölçümü.....  | 30 |
| 3.5 Sıçrama (jump) Deneyinin Yapılışı ve Hesaplaması.....      | 31 |
| 3.5.1 Deformasyon oranı hassasiyeti ( <i>m</i> ) değişimi..... | 31 |
| 3.6 Çentik-Darbe Deneyi .....                                  | 33 |
| 3.7 Yorulma (Ömür) Deneyi.....                                 | 35 |
| 3.9 Mikro Yapı İncelemesi .....                                | 37 |
| BÖLÜM IV BULGULAR .....  | 40 |
| 4.1 Çekme Deney Sonuçları .....                                | 40 |
| 4.1.1 AA6082 T0 çekme deneyi .....                             | 40 |
| 4.1.2 500 °C’de solüsyona alınan numunelerin çekme deneyi..... | 40 |
| 4.1.3 175°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi.....             | 44 |
| 4.1.4 185°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi.....             | 47 |
| 4.1.5 195°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi sonuçları .....  | 51 |
| 4.1.6 220°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi.....             | 55 |
| 4.2 Çekme Deneyi Sonuçları Değerlendirme .....                 | 57 |
| 4.3 Sertlik Ölçümü.....  | 59 |
| 4.3.1 AA6082 T0 sertlik sonuçları .....                        | 60 |
| 4.3.2 500° C solüsyona sertlik sonuçları .....                 | 60 |
| 4.3.3 175° C’de yapay yaşlandırma sertlik sonuçları .....      | 62 |
| 4.3.4 185° C yapay yaşlandırmanın sertlik sonuçları .....      | 63 |
| 4.3.5 195° C’de yapay yaşlandırmanın sertlik sonuçları .....   | 65 |
| 4.3.6 220° C’de yapay yaşlandırmanın sertlik sonuçları .....   | 66 |
| 4.4 Sertlik Ölçüm Sonuçları Değerlendirme.....                 | 68 |
| 4.5 Çentik Darbe Deney Sonuçları .....                         | 69 |

|  |            |
|--|------------|
| 4.5.1 AA6082 T0 çentik darbe deney sonuçları .....   | 69         |
| 4.5.2 %2 polimerli ortam numuneleri .....  | 70         |
| 4.5.3 %3 polimerli ortam numuneleri .....  | 71         |
| 4.5.4 %4 polimerli ortam numuneleri .....  | 72         |
| 4.5.5 %5 polimerli ortam numuneleri .....  | 72         |
| 4.5.6 %6 polimerli ortam numuneleri .....  | 73         |
| 4.5.7 %7 polimerli ortam numuneleri .....  | 74         |
| 4.5.8 %8 polimerli ortam numuneleri .....  | 75         |
| 4.5.9 500°C de 2 saat solüsyona alma 185°C havada soğutma .....  | 76         |
| 4.5.10 Çentik-darbe enerjisi ve sertlik kıyaslamaları .....  | 77         |
| 4.5.11 Çentik darbe deneyi sonuçların değerlendirilmesi .....  | 78         |
| 4.6 Yorulma Deneyi Sonuçları .....   | 79         |
| 4.7 Sıçrama Deney Sonuçları .....  | 80         |
| 4.8 AA6082 Mikro Yapı Görünümleri .....  | 82         |
| 4.8.1 AA6082 T0 mikro yapı görünümleri .....   | 83         |
| 4.8.2 175° de yaşlandırılan numuneler .....  | 83         |
| 4.8.3 185° de yaşlandırılan numuneler .....  | 84         |
| 4.8.4. 195° de yaşlandırılan numuneler .....   | 85         |
| 4.8.5 175°C-185°C-195°C-220°C yapay yaşlandırılan numunelerin %50 polimerli soğutma ortamının etkisi ..... | 86         |
| <b>BÖLÜM V SONLU ELEMEN SİMÜLASYONLARI .....</b>   | <b>88</b>  |
| 5.1 Sıcak Dövme Simülasyonu .....  | 88         |
| 5.1.2 Sıcak dövme süreç tasarımı ve analiz sonuçları .....   | 93         |
| 5.1.3 Sıcak dövme analiz sonuçlarının değerlendirilmesi .....  | 100        |
| 5.2 Yorulma Simülasyonu .....  | 104        |
| <b>BÖLÜM VI TARTIŞMA .....</b>   | <b>108</b> |
| <b>BÖLÜM VII SONUÇLAR .....</b>  | <b>112</b> |
| 7.1 Müteakip Çalışmalar ve Öneriler .....  | 113        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>   | <b>115</b> |
| <b>ÖZ GEÇMİŞ .....</b>   | <b>123</b> |
| <b>TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER .....</b>  | <b>124</b> |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 1.1. Alüminyumun kullanım ömürleri ve geri kazanma oranları (Özer vd., 2003) .....    | 5  |
| Çizelge 1.2. Türkiye’de alüminyum rezervi ve işletebilirliği (MTA, 2018) .....                | 6  |
| Çizelge 1.3. Saf alüminyumun özellikleri (Car, 2011) .....                                    | 7  |
| Çizelge 1.4. T temper kodları alt basamakları(Kaufman, 2000) .....                            | 13 |
| Çizelge 1.5. H temper kodlarının alt basamakları (Kaufman, 2000) .....                        | 13 |
| Çizelge 1.6. Al-Mg-Si alaşımlarının mekanik özellikleri (Aluminum Federation, 1983) .....     | 18 |
| Çizelge 3.1. AA6082 alaşımının kimyasal içeriği .....   | 23 |
| Çizelge 3.2. Çekme numunesi parametrik boyutları (ASTM B557 M 02A).....                       | 24 |
| Çizelge 3.3. Çözelti şartları.....  | 26 |
| Çizelge 3.4. Çözelti sonrası soğutma şartları.....  | 26 |
| Çizelge 3.5. Soğutma sonrası yapay yaşlandırma şartları .....                                 | 26 |
| Çizelge 3.6. Yapay yaşlandırma sonrası soğutma şartları .....                                 | 26 |
| Çizelge 3.7. Yapılan deneylerin kodları .....   | 27 |
| Çizelge 3.8. Parlatma esnasında takip edilen yöntem ve kullanılan malzemeler .....            | 39 |
| Çizelge 4.1. AA6082 T0 çekme deney sonuçları (D.No.0).....                                    | 40 |
| Çizelge 4.2. 500° C’de 4 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.1).....  | 41 |
| Çizelge 4.3.500° C’de 6 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.2) .....  | 41 |
| Çizelge 4.4. 500° C’de 8 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.3).....  | 41 |
| Çizelge 4.5. 500° C’de 10 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.4)..... | 42 |
| Çizelge 4.6. 500° C’de 4 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.5) .....   | 43 |
| Çizelge 4.7. 500° C’de 6 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.6) .....   | 43 |
| Çizelge 4.8. 500° C’de 8 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.7).....    | 43 |
| Çizelge 4.9. 500° C’de 10 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş                 |    |

|   |    |
|---|----|
| (D.No.8).....   | 44 |
| Çizelge 4.10. 500° C’de 2 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapayyaşlandırması (D.No.9) .....                     | 45 |
| Çizelge 4.11. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.10) .....                     | 45 |
| Çizelge 4.12. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup suda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.11).....                        | 45 |
| Çizelge 4.13. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.12).....  | 46 |
| Çizelge 4.14. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.12).....  | 46 |
| Çizelge 4.15. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.14) .....                     | 47 |
| Çizelge 4.16. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup suda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.15).....                        | 48 |
| Çizelge 4.17. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.16) ..... | 48 |
| Çizelge 4.18. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.17) ..... | 48 |
| Çizelge 4.19. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.18).....                      | 49 |
| Çizelge 4.20. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.19) .....                     | 49 |
| Çizelge 4.21. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş   |    |

|   |    |
|---|----|
| numunelerin 185° C'de 8 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.20) .....   | 50 |
| Çizelge 4.22. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.21) .....                    | 50 |
| Çizelge 4.23. 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.22) .....                     | 51 |
| Çizelge 4.24. 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.23) .....                     | 51 |
| Çizelge 4.25. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.24) .....                     | 52 |
| Çizelge 4.26. 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.27) .....                     | 52 |
| Çizelge 4.27. 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 8 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.28) .....                     | 52 |
| Çizelge 4.28. 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.29) .....                    | 53 |
| Çizelge 4.29. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.25).....  | 54 |
| Çizelge 4.30. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.26) ..... | 54 |
| Çizelge 4.31. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C'de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.30).....                     | 55 |
| Çizelge 4.32. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C'de 10 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.31)..... | 55 |
| Çizelge 4.33. 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş   |    |

|   |     |
|---|-----|
| numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.32).....   | 56  |
| Çizelge 4.34. 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.33)..... | 56  |
| Çizelge 4.35. AA6082 farklı koşullardaki ortalama çekme sonuçları .....   | 57  |
| Çizelge 4.36. AA6082 T0 sertlik sonuçları (D.No.0).....   | 60  |
| Çizelge 4.37. 500°C’de solüsyona alma .....   | 60  |
| Çizelge 4.38. 500°C’de 2 saat suda soğutma ve 175°C’de yapay yaşlandırma .....  | 62  |
| Çizelge 4.40. 500°C’de 2 saat suda soğutma ve 185° C’de yapay yaşlandırma .....   | 63  |
| Çizelge 4.41. 500°C’de 2 saat suda soğutma 195° C’de yapay yaşlandırma .....  | 65  |
| Çizelge 4.42. 500°C’de 2 saat suda soğutma 220° C’de yapay yaşlandırma .....  | 67  |
| Çizelge 4.43. AA6082 farklı koşullar ortalama sertlik sonuçları .....   | 68  |
| Çizelge 4.44. AA6082 T0 Çentik darbe deneyi sonuçları (D.No.0).....   | 69  |
| Çizelge 4.45. 185°C’de 4 saat %2 polimerli ortam (D.No.34).....   | 70  |
| Çizelge 4.46. %3 polimerli ortam (D.No.35) .....  | 71  |
| Çizelge 4.47. %4 polimerli ortam (D.No.36) .....  | 72  |
| Çizelge 4.48. %5 polimerli ortam (D.No.37) .....  | 73  |
| Çizelge 4.49. %6 polimerli ortam (D.No.38) .....  | 73  |
| Çizelge 4.50. %7 polimerli ortam (D.No.39) .....  | 74  |
| Çizelge 4.51. %8 polimerli ortam (D.No.40) .....  | 75  |
| Çizelge 4.52. AA6082 hava da soğutma durumu (D.No.18).....  | 76  |
| Çizelge 4.53. Çentik darbe enerjisi .....   | 78  |
| Çizelge 4.54. 185°C 4 saat S-N değerleri .....  | 80  |
| Çizelge 4.55. AA6082 sıçrama deneyi sonuçları (D. No. 0) .....  | 81  |
| Çizelge 5.1. Elde edilen dövme sonuçları.....   | 100 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1. Al periyodik tablo gösterimi (Eroğlu ve Şahiner, 2018) .....  | 1  |
| Şekil 1.2. Alüminyum üretim akış diyagramı .....   | 3  |
| Şekil 1.3. Birincil alüminyum üretim şeması .....  | 4  |
| Şekil 1.4. Alüminyumun geri dönüşümü .....   | 4  |
| Şekil 1.5. Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılımı (USGS Mineral Commodity<br>Summaries, 2018).....                    | 6  |
| Şekil 1.6. Al kristal yapısı (Sançar, 2015) .....  | 7  |
| Şekil 1.7. Alüminyum işlem aşamaları için isimlendirme yöntemi .....   | 9  |
| Şekil 1.8. Sıcaklığın bağlı olarak alaşım katkılarının Al içerisindeki çözünürlüğü<br>(Altenpohl, 1999) .....              | 11 |
| Şekil 1.9. Dövme Al alaşımlarında ısıl işlem durumları ve tez kapsamında çalışılacak olan<br>alaşım serisi, AA6082 .....   | 12 |
| Şekil 1.10. Çekirdeklenmiş bir katı çözeltide bileşimin farklılık göstermesi .....   | 14 |
| Şekil 1.11. Difüzyon sırasında atomların hareketi (Higgins, 2006) .....  | 15 |
| Şekil 1.12. Mg <sub>2</sub> Si faz diyagramı üzerinde çökeltme sertleştirme safhaları .....                                | 15 |
| Şekil 3.1. AA6082 Alaşımın içerdiği elementler.....  | 23 |
| Şekil 3.2. Alüminyum malzemelerin yaşlandırma işlemi şematik gösterimi .....   | 24 |
| Şekil 3.3. Çekme (ASTM B557 M 02A) (a) ,Yorulma (ASTM E606-92) (b) ve V çentik<br>(ISO 148-1) numunesi boyutları (c) ..... | 25 |
| Şekil 3.4. Yapay yaşlanma tasarımı ve şematik olarak gösterimi .....   | 27 |
| Şekil 3.5. Deformasyon ölçüm sistemi (ekstansometre).....  | 30 |
| Şekil 3.6. Numunelerden sertlik okumalarının yapıldığı noktalar .....  | 31 |
| Şekil 3.7. Farklı hızlarda çekme deneyi (a), Sıçrama testi deneyi (b) (Kılıç, 2016) .....                                  | 32 |
| Şekil 3.8. Sıçrama testi .....   | 32 |
| Şekil 3.9. Normal ve kararlı deformasyon oranı hassasiyetinin belirlenmesi .....   | 33 |
| Şekil 3.10. Charpy V çentik numunesi boyutları (ISO 148-1) .....   | 34 |
| Şekil 3.11. ISO 148-1'e göre V çentikli numunenin tezgâha bağlama şekli .....  | 35 |
| Şekil 3.12. Yorulma numunesi boyutları (ASTM E606-92) .....  | 36 |



|   |    |
|---|----|
| Şekil 3.13. Yorulma test cihazı ve çalışma prensibi .....   | 36 |
| Şekil 3.14. Zımpara kâğıtları yapıştırılmış diskler .....   | 37 |
| Şekil 4.1. 500°C de solüsyona alınmış ve havada soğutulmuş numunelerin çekme deneyleri grafiği .....              | 42 |
| Şekil 4.2. 500°C de solüsyona alınmış ve suda soğutulmuş numunelerin çekme grafikleri .....                       | 44 |
| Şekil 4.3. 175°C de yapay yaşlandırılmış farklı koşuldaki numunelerin çekme grafikleri .....                      | 47 |
| Şekil 4.4. AA6082 185°C yapay yaşlandırılmış farklı koşullardaki numunelerin çekme deneyleri sonuç grafiği .....  | 49 |
| Şekil 4.5. 185°C yapay yaşlandırılmış ve havada soğutulmuş numunelerin çekme grafikleri .....                     | 50 |
| Şekil 4.6. 195°C yapay yaşlandırılmış ve havada soğutulmuş numunelerin çekme grafikleri .....                     | 53 |
| Şekil 4.7. AA6082 195°C yapay yaşlandırılmış farklı koşullardaki numunelerin çekme deneyleri sonuç grafiği .....  | 54 |
| Şekil 4.8. AA6082 220° C yapay yaşlandırılmış ve farklı durumdaki numunelerin çekme deneyleri sonuç grafiği ..... | 56 |
| Şekil 4.9. AA6082'ye uygulanan farklı yaşlandırma şartlarında elde edilen çekme mukavemeti değerleri .....        | 58 |
| Şekil 4.10. AA6082'ye uygulanan farklı yaşlandırma şartlarında maksimum şekil değiştirme değerleri.....           | 59 |
| Şekil 4.11. AA6082 T0 numunelerin sertlik dağılım grafiği .....   | 60 |
| Şekil 4.12. 500°C'de solüsyona alınan numunelerin sertlik dağılımları .....                                       | 62 |
| Şekil 4.13. AA6082 175°C numunelerin sertlik sonuç grafiği .....  | 63 |
| Şekil 4.14. AA6082 185°C numunelerin sertlik sonuç grafiği .....  | 64 |
| Şekil 4.15. AA6082 195°C numunelerin sertlik sonuç grafiği .....  | 66 |
| Şekil 4.16. AA6082 220°C numunelerin sertlik sonuç grafiği .....  | 68 |
| Şekil 4.17. AA6082 farklı koşullar ortalama sertlik sonuç grafiği .....   | 69 |
| Şekil 4.18. Çentik darbe deneyi numunelerin sertlik sonuç grafiği .....   | 77 |
| Şekil 4.19. Çentik darbe enerjisi hapsedme yetenekleri .....  | 79 |
| Şekil 4.20. Çentik darbe sarkaç açısı, enerji ve sertlik kıyaslamaları.....                                       | 79 |
| Şekil 4.21. AA6082 185°C 4 saat S-N grafiği .....   | 80 |
| Şekil 4.22. AA6082 T0 sıçrama deneyi sonuç grafiği (D. No. 0) .....   | 81 |
| Şekil 4.23. Sıçrama deneyi curve fitting sonuç grafiği .....  | 82 |
| Şekil 5.1. Dişi erkek kalıp boyutları ve malzeme özellikleri (a) Alt kalıp (Dış ebat                              |    |

|  |     |
|--|-----|
| 150x180x50mm) (b) Üst kalıp (Dış ebat 150x180x50mm).....   | 89  |
| Şekil 5.2. Sıcak dövme işleminin (a) kalıpları (b) sonlu eleman modeli ve başlangıç şartları (c) .....                                     | 90  |
| Şekil 5.3. İş parçası (a) ve malzeme özellikleri (b) .....   | 90  |
| Şekil 5.4. Malzemenin gerilme şekil değiştirme dasetası .....  | 92  |
| Şekil 5.5. Deform sürünme modelleri.....   | 92  |
| Şekil 5.6. Dövülen malzemenin hacim, ağırlık ve yüzey alanı.....   | 93  |
| Şekil 5.7. Parçanın ön görülen çapaklı katı modeli .....   | 94  |
| Şekil 5.8. Dövülecek parçanın en büyük kesti alanı .....   | 95  |
| Şekil 5.9. Parçanın çapaklı hacmi .....  | 96  |
| Şekil 5.10. 300°C (a) 325°C (b) sıcak dövme analiz sonucu.....   | 97  |
| Şekil 5.11. 350°C (a) ve 375°C (b) sıcak dövme analiz sonucu.....  | 97  |
| Şekil 5.12. 400°C (a) ve 425°C (b) Sıcak dövme analiz sonucu .....   | 98  |
| Şekil 5.13. 450°C (a) ve 475°C (b) Sıcak dövme analiz sonucu .....   | 99  |
| Şekil 5.14. 500°C(a) ve 525°C(b) Sıcak dövme analiz sonucu .....   | 99  |
| Şekil 5.15. Tonaj-sıcaklık grafiği .....   | 101 |
| Şekil 5.16. Birim şekil değiştirme-sıcaklık grafiği .....  | 101 |
| Şekil 5.17. Gerilme-sıcaklık grafiği.....  | 102 |
| Şekil 5.18. Başlangıç kütük sıcaklığı-iç sıcaklık .....  | 102 |
| Şekil 5.19. Parça modelinin birer mm'lik düzlemleri .....  | 103 |
| Şekil 5.20. Parça ve hammaddenin hacim dağılımı.....   | 104 |
| Şekil 5.21. Parça, kütük ve ön şeklin hacim dağılımı .....   | 104 |
| Şekil 5.22. Yorulma analizi için (a) sabit genlikte simetrik tam ters yükleme ve Soderberg düzeltme kriteri(b) .....                       | 105 |
| Şekil 5.23. Yorulma analizi için tanımlanan malzeme özellikleri.....   | 105 |
| Şekil 5.24. Yorulma analizi için kullanılan sonlu eleman modeli ve uygulanan yük ve sınır şartları .....                                   | 106 |
| Şekil 5.25. Yorulma analizi neticesinde elde edilen (a) emniyet katsayısı (b) ömür çözüm sonuçları.....                                    | 106 |
| Şekil 5.26. Yorulma analizi neticesinde elde edilen gerime çözüm sonuçları (a) biaxiality göstergesi, Eşdeğer alternatif gerilme (b) ..... | 107 |
| Şekil 5.27. Fatigue sensitivity diyagramı.....   | 107 |

## FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Fotoğraf 1.1. Pittsburgh Reduction Company (Pittsburgh Reduction Co., 1905).....                                     | 3  |
| Fotoğraf 1.2. Boksit cevherinin görseli (MTA, 2018).....   | 5  |
| Fotoğraf 3.1. Shimadzu Autograph 100 kN mekanik çekme cihazı.....  | 30 |
| Fotoğraf 3.2. Çentik darbe test cihazı.....  | 34 |
| Fotoğraf 3.3. Kalıplanmış numune örneği (şekilde parlatılmış hali görülmektedir).....                                | 37 |
| Fotoğraf 3.4. Struers Labopol-5 marka otomatik parlatma cihazı (a) ve Olympus (BX-51) marka optik mikroskop (b)..... | 38 |
| Fotoğraf 4.1. AA6082 T0 çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyleri.....   | 70 |
| Fotoğraf 4.2. %2 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 71 |
| Fotoğraf 4.3. %3 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 71 |
| Fotoğraf 4.4. %4 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 72 |
| Fotoğraf 4.5. %5 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 73 |
| Fotoğraf 4.6. %6 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 74 |
| Fotoğraf 4.7. %7 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 75 |
| Fotoğraf 4.8. %8 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri.....   | 75 |
| Fotoğraf 4.9. AA6082 Hava da soğutulmuş numunelerin çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyleri.....               | 76 |
| Fotoğraf 4.10. Çentik darbe deneyi sonrası numunelerin gevrek/sünek kırılma yüzeyleri.....                           | 76 |
| Fotoğraf 4.11. AA6082 T0 mikro yapı görünümleri.....   | 83 |
| Fotoğraf 4.12. 175°C’de 2, 4 ve 6 saat boyunca yaşlandırma.....  | 84 |
| Fotoğraf 4.13. 175°C’de 10 saat boyunca yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma.....                                    | 84 |
| Fotoğraf 4.14. 185°C’de 2, 4 ve 6 saat boyunca yaşlandırma.....  | 84 |
| Fotoğraf 4.15. 185°C’de 10 saat boyunca yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma.....                                    | 85 |
| Fotoğraf 4.16. 195°C’de 2, 4 ve 6 saat boyunca yaşlandırma.....  | 85 |
| Fotoğraf 4.17. 195°C’de 10 saat boyunca yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma.....                                    | 86 |
| Fotoğraf 4.18. 175°C 2 saat boyunca ve 185°C 4 saat boyunca yapay yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma.....          | 86 |
| Fotoğraf 4.19. 195°C 6 saat boyunca ve 220°C 10 saat boyunca yapay yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma.....         | 87 |
| Fotoğraf 5.1. Kalıp malzemesi (a) ve kalıp davranışı (b).....  | 89 |
| Fotoğraf 5.2. Seçilen malzeme modeli.....  | 91 |

## SİMGE VE KISALTMALAR

| Simgeler            | Açıklama   |
|---------------------|--|
| $^{\circ}$          | Derece   |
| $\Omega$            | Ohm  |
| %                   | Yüzde  |
| $\mu$               | Mikro  |
| $\beta$             | Beta fazı  |
| $\alpha$            | Alfa fazı  |
| $\bar{\sigma}$      | Eşdeğer akma gerilmesi                             |
| $\varepsilon$       | Plastik şekil değiştirme                           |
| $\bar{\varepsilon}$ | Eşdeğer plastik şekil değiştirme                   |
| $\dot{\varepsilon}$ | Eşdeğer plastik şekil değiştirme hızı              |
| $c$                 | Dayanım katsayısı                                  |
| $n$                 | Pekleşme üssü                                      |
| $m$                 | Şekil değiştirme hızına duyarlılık üssü            |
| $y$                 | Başlangıç akma noktası                             |
| $E$                 | Darbe enerjisi                                     |
| $W$                 | Çekiç kütlesi                                      |
| $g$                 | Yer çekimi ivmesi                                  |
| $R$                 | Sarkaç kolunun uzunluğunu                          |
| $L$                 | Tezgâhtaki sürtünme nedeni ile oluşan kayıp enerji |
| $w$                 | Çapak genişliği                                    |
| $h$                 | Çapak kalınlığı                                    |
| $A$                 | Dövülecek olan iş parçasının yüzey alanıdır        |
| $V$                 | Dövülecek olan iş parçasının hacmi                 |
| $l$                 | Kütük boy  |

| <b>Kısaltmalar</b>             | <b>Açıklama</b>                                      |
|--------------------------------|--|
| AA                             | Alüminyum Alaşımı                                    |
| AISI                           | Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü                     |
| Al                             | Alüminyum  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Alüminyum Oksit                                      |
| AlCl <sub>3</sub>              | Alüminyum Klorür                                     |
| Astm                           | Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu |
| B                              | Bor  |
| Bi                             | Bizmut   |
| C                              | Santigrat  |
| Cm                             | Santimetre   |
| Cm <sup>3</sup>                | Santimetre Küp                                       |
| Co                             | Karbon Mono Oksit                                    |
| Co <sub>2</sub>                | Karbon Di Oksit                                      |
| Cr                             | Krom   |
| Cu                             | Bakır  |
| Dak                            | Dakika   |
| En                             | İngiliz Standart                                     |
| Fe                             | Demir  |
| F <sub>2</sub>                 | Florür   |
| G                              | Gram   |
| Gpa                            | Giga Pascal  |
| H                              | Saat   |
| Hb                             | Brinel Sertlik Skalası                               |
| H <sub>2</sub> O               | Su   |
| Hf                             | Hidro Flor   |
| Hrb                            | Rockwel B Sertlik Skalası                            |
| Hre                            | Rockwel E Sertlik Skalası                            |
| Hv                             | Vickers Sertlik Skalası                              |
| Hz                             | Hertz  |
| J                              | Joule  |
| K                              | Kelvin   |
| Kj                             | Kilo Joule   |

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Kn                  | Kilo Newton             |
| Mg                  | Magnezyum               |
| Mg <sub>2</sub> Si  | Magnezyum Di Silicon    |
| Mm                  | Milimetre               |
| Mn                  | Mangan                  |
| Mole                | Mol                     |
| Mpa                 | Mega Pascal             |
| Mta                 | Maden Tetik Arama       |
| O <sub>2</sub>      | Oksijen                 |
| N                   | Newton                  |
| Na                  | Sodyum                  |
| NaAlCl <sub>2</sub> | Sodyum Alüminyum Klorür |
| Naoh                | Sodyum Hidroksit        |
| Pa                  | Pascal                  |
| Pb                  | Kurşun                  |
| Si                  | Silisyum                |
| St                  | Çelik                   |
| Ti                  | Titanyum                |
| V                   | Vanadyum                |
| Zn                  | Çinko                   |
| Zr                  | Zirkonyum               |

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Alüminyumun (Al) yüzde 99,9 saflıkta üretilebilmesi nedeni ile diğer metal üretim teknolojilerinden ayrı olarak değerlendirilmektedir (Car, 2011). Oksijen (O<sub>2</sub>) ve silisyumdan (Si) sonra doğada en fazla bulunan elementtir. Alüminyumun periyodik tablodaki yeri ve periyodik tablo özellikleri Şekil 1.1’de verilmektedir. Alüminyum yer kabuğunun % 8 ini bileşikler oluşturmuş metaller ile birlikte diğer metallerden daha fazla bulunmaktadır. 19. yüzyılın ortalarına gelindiğinde ancak endüstriyel ölçekte metal olarak üretilebilmiştir. Bunun nedeni Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alüminyum oksit) in çok kararlı bir yapısı olmasından kaynaklanmaktadır. Zira bu bileşiğin indirgenmesi için yüksek enerjiye ihtiyaç vardır (Weissbach, 1967).

|                                |      |                          |                                     |
|--------------------------------|------|--------------------------|-------------------------------------|
| Atom Numarası                  | 13   | Atom ağırlığı            | 26,98                               |
| Kaynama noktası, °C            | 2519 | Yükseltgenme basamakları | +3,+2,+1                            |
| Ergime Noktası, °C             | 660  | Sembolü                  | Al                                  |
| Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,70 | Elektron dizilimi        | [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> |
|                                |      | Elementin adı            | Alüminyum                           |

Şekil 1.1. Al periyodik tablo gösterimi (Eroğlu ve Şahiner, 2018)

### 1.1 Tarihçe

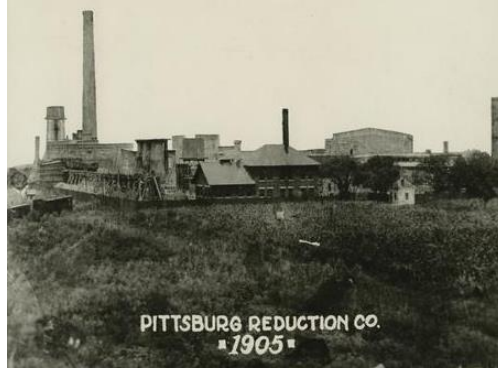
18. yüzyılın ortalarında Andreas Sigmund Margraff, metalin oksijen ile bileşiği olan alüminyum oksiti (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-alümina) bulmuştur. Bilimsel olarak alüminadan ilk Al eldesi, Sir Humphry Davy tarafından 18. yüzyılda yapıldığı bilinmektedir.

Sir Humphry Davy, şunda alüminyum olarak adlandırılan ismi ilk kullanan kişidir. 1825 yılına gelindiğinde ise Hans Christian Oersted, saf Al elde etmiş, parlaklık ve renk açısından değerlendirdiğinde kalaya benzediğini görmüştür. Bundan dolayı “kalaya benzeyen metal” olarak tanımlamıştır. Oersted çalışmalarını burada bırakmış ve tüm çalışmalarını Alman kimyacı olan Friedrich Wöhler’e devretmiştir. Wöhler, Oersted dan

aldığı çalışmaları kullanarak daha büyük Al parçası üretmeyi başarmıştır. Al' un mekanik ve termo mekanik gibi bazı temel fiziksel ve kimyasal özelliklerini tanımlayabilmiştir. Wöhler' in çalışmaları Al üretiminin önündeki birçok engelin aşılmasını sağlamıştır. Wöhlerin çalışmaları sayesinde endüstriyel ölçekte Al üretiminin önünü açmıştır. Robert Wilhem Bunsen, sodyum alüminyum klorür'den ( $\text{NaAlCl}_2$ ) elektroliz yoluyla Al eldesini 1854 yılında başarabilmiştir. Aynı yıl Bunsen' den habersiz bir şekilde Fransız kimyacı Henri Ettiene Saint-Claire Deville de uygulamalı Al elektroliz yöntemini geliştirmiştir. Deville de Wöhler gibi başlangıç malzemesi olarak alüminyum klorürü ( $\text{AlCl}_3$ ) kullanmıştır. İndirgeyici olarak o dönemde ekonomik ve bulunabilirlik açısından daha uygun olan sodyumu (Na) tercih etmiştir. Bu yöntemi kullanarak endüstriyel anlamda Al üretim maliyetini azaltabilmiştir. 1886 yılına gelindiğinde ise Charles Martin Hall ve Paul Louis Toussaint Hèroult birbirlerinden habersiz olarak endüstriyel Al üretim teknolojisini geliştirmişlerdir. 21. yüzyılda Hall-Hèroult yöntemi olarak halen kullanılan bu metotta, ergimiş olan kriyolit in içerisine daldırılan alüminanın üzerinden güçlü bir elektrik akımı geçirilmesiyle sıvı alüminyum, elektrolit in altında biriktirilmektedir. 1886 yılı endüstriyel olarak Al endüstrisinin başlangıç yılı olarak sayılmaktadır. Dinamonun keşfi ile yüksek elektrik akımı uygulamayı kolaylaştırmıştır. Bu gelişmeye paralel olarak K. J. Bayer, kendi adı ile anılan boksitten alümina üretme yöntemini geliştirmiştir. Bu gelişme alüminyum endüstriyel üretiminin önünü açmıştır. Bu gelişmelerden sadece iki yıl sonra, 1888'de İsviçre'nin Neuhausen kentinde Hèroult patentiyle ve yine aynı yıllarda Amerika'nın Pittsburgh kentinde Fotoğraf 1.1'de verilen elektroliz binaları inşa edilmiştir. Bu tarih Al üretiminde dönüm noktası olarak bilinmektedir. 1905'li yıllarda ise Betts üç tabaka olarak elektrolizin temel ilkeleri üzerine çalışmalar yapmış ve bazı ilkeleri ortaya koymuştur. Ardından Al üzerine ısıl işlem çalışmalarına 1905'te Claessen ve 1906'da Wilm başlamışlardır. 1926 yılında ise Söderberg, günümüzde hala kullanımda olan, kendiliğinden pişebilen anotlarla elektroliz hücresinin ilk uygulaması üzerine çalışmıştır. 1932 yılında ise Gadeu tarafından büyük ölçekli olarak Al'nin elektrolitik rafinasyonuna ilişkin çalışmalar yapmıştır.

Ticari boyutta birincil Al üretiminin tamamına yakını günümüzde elektroliz hücrelerinde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan en yaygın olanı Hall-Heroult elektroliz yöntemidir (Weissbach, 1967).





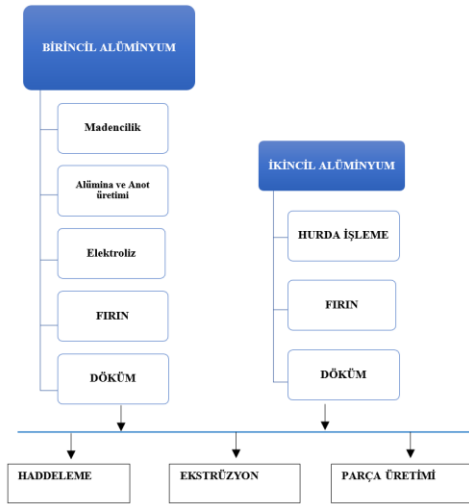
**Fotoğraf 1.1.** Pittsburgh Reduction Company (Pittsburgh Reduction Co., 1905)

## 1.2 Alüminyum Üretimi

Günümüzde alüminyum üretimi iki şekilde gerçekleştirilmektedir.

Birincil alüminyum üretimi: Madenden çıkarılan boksit cevheri kullanılarak üretilen alüminyumdur.

İkincil alüminyum üretimi: Alüminyum hurdaların kullanılması ile üretilen alüminyum.

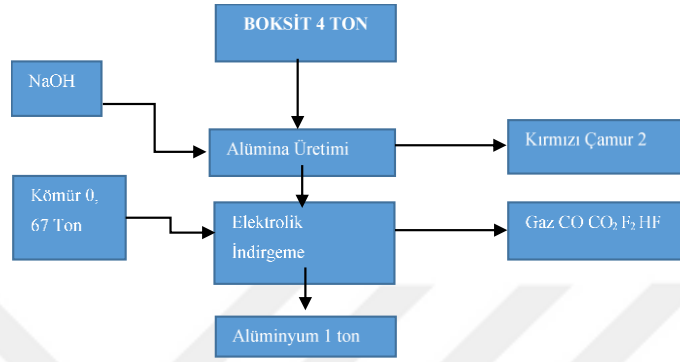


**Şekil 1.2.** Alüminyum üretim akış diyagramı

### 1.2.1 Birincil Al üretim metodu

Birincil üretim, birbirlerini izleyen temel dört aşamadan oluşmaktadır.

1. Boksit cevheri kullanılarak alümina üretimi
2. Alüminadan elektroliz yönetimi ile sıvı alüminyum üretimi
3. Sıvı alüminyumun alaşımlandırılarak kütük dökümü,
4. Kütüklerden haddeleme, ekstrüzyon, döküm veya dövme yöntemleri ile yapısal parça eldesi (Özer vd., 2003).



**Şekil 1.3.** Birincil alüminyum üretim şeması

### 1.2.2 İkincil Al üretim metodu

Hurda alüminyumun geri dönüşümü ilkesine dayanmakta olup Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 1.4.** Alüminyumun geri dönüşümü

Geri dönüşme sayısına göre kullanım alanları Çizelge 1.1'de verilmiştir (Özer vd., 2003)

**Çizelge 1.1.** Alüminyumun kullanım ömürleri ve geri kazanma oranları (Özer vd., 2003)

| Alüminyumun Kullanım Ömürleri ve Geri Kazanma Oranları |                        |                        |           |
|--|------------------------|------------------------|-----------|
| Kullanım Alanı   | Kullanım Ömrü<br>(Yıl) | Geri Kazanma Oranı (%) |           |
|  |                        | 25 yıl Önce            | Günümüzde |
| Yeni Hurda   | 0                      | 100                    | 100       |
| Otomotiv   | 10-30                  | 50                     | 95        |
| Yapı   | 30-50                  | 70                     | 85        |

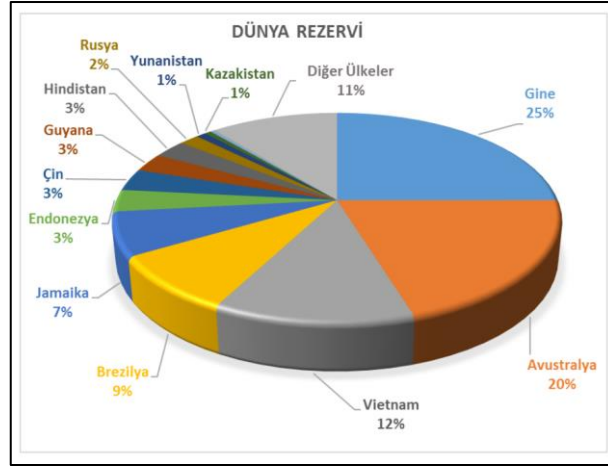
### 1.2.3 Dünyada alüminyum üretimi

Boksit rezervinin toplamı 55 ila 75 milyar ton arasında olduğu bilinmektedir. 30 milyar tonu işlenebilecek türdedir. Boksit rezervi açısından dünyanın en zengin ülkesi Gine'dir. Gine'nin ardından sırasıyla Avustralya, Vietnam, Brezilya ve Jamaika gelmektedir. Dünyadaki boksit rezervinin %73'ünü bu beş ülke oluşturmaktadır. Endonezya, Çin, Guyana, Hindistan ve Rusya yüksek miktarda rezerve sahip diğer ülkeler arasında yer almaktadır (Eroğlu ve Şahiner, 2018). Fotoğraf 1.2'de boksit cevherinin görseli verilmektedir.



**Fotoğraf 1.2.** Boksit cevherinin görseli (MTA, 2018)

Dünyadaki boksit rezervi dağılımı Şekil 1.5'te verilmiştir.



**Şekil 1.5.** Dünya işletilebilir boksit rezervi dağılımı (USGS Mineral Commodity Summaries, 2018)

### 1.2.3.1. Türkiye’de alüminyum üretimi

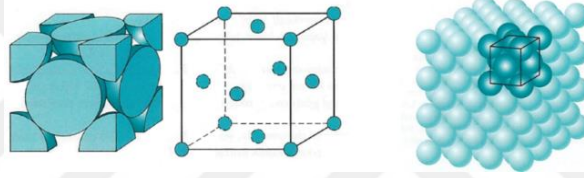
1940’lı yıllarda Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTA) tarafından başlatılan ülkemizdeki boksit arama çalışmaları sonucunda, ülkemiz için çeşitli rezerv toplamınının 422 milyon ton olduğu saptanmıştır. İşletilebilir rezervin ise 63 milyon tona yakın olduğu Çizelge 1.2’den anlaşılmaktadır. Konya Seydişehir ve Antalya Akseki Türkiye’nin en büyük boksit rezervlerine sahiptir. Bu bölgelerde bulunan toplam rezerv ise 36,5 milyon ton olmasına rağmen işlenebilir rezerv 31 milyon tondur.

**Çizelge 1.2.** Türkiye’de alüminyum rezervi ve işletebilirliği (MTA, 2018)

| BÖLGE                | BOKSİT REZERVİ (bin ton) |          |         |               | Cevher Tipi         |
|----------------------|--------------------------|----------|---------|---------------|---------------------|
|                      | Görünür                  | Muh.+Müm | Toplam  | İşletilebilir |                     |
| Seydişehir-Akseki    | 35.251                   | 1.253    | 36.504  | 31.000        | Böhmitik            |
| Muğla-Milas-Yatağan  | 9.400                    | 11.200   | 20.600  | 17.500        | Diasporitik         |
| Tufanbeyli-Saimbeyli | 5.500                    | 6.000    | 11.500  | 9.800         | Diasporitik         |
| Zonguldak-Kokaksu    | 5.900                    | 3.400    | 9.300   | 5.000         | Böhmitik            |
| Yalvaç-Şarkikaraağaç | 0                        | 115.600  | 115.600 | 0             | Demirli-Diasporitik |
| İslahiye-Payas       | 0                        | 215.500  | 215.500 | 0             | Demirli-Diasporitik |
| Bolkardağı-Mersin    | 0                        | 3.900    | 3.900   | 0             | Diasporitik         |
| Alanya               | 1.300                    | 7.700    | 9.000   | 0             | Diasporitik         |
| Toplam               | 57.351                   | 364.553  | 421.904 | 63.300        |                     |

### 1.3 Alüminyumun Genel Özellikleri ve Uygulama Alanları

Demir ve demir alaşımlarından sonra sektörde kullanım oranı en yüksek olan ikinci metalin Al olduğu bilinmektedir. Çubuk, boru, profil gibi ekstrüzyon ürünlerinin yanı sıra folyo ve levha, gibi yassı ürünler, döküm ürünleri şeklinde endüstriyel olarak üretilmektedir. İnsanlığın var oluşundan bugüne kadar kullanılan tunç, bakır ve demir, gibi metaller ile karşılaştığımızda, günümüzden sadece 115 yıl öncesine kadar endüstriyel olarak kullanılan alüminyum, 21. yüzyılda artık yaşantımızın her alanında kullanılan bir malzeme haline gelmiştir (Turbaloğlu, 2008). Mühendislik yapılarında çelikten sonra kullanımı en fazla olan malzemeler arasındadır (Eker, 2008). Kristallografik yapısı yüzey merkezli kübik olup Şekil 1.6’da kristal yapısı şematik olarak gösterilmektedir



Şekil 1.6. Al kristal yapısı (Sançar, 2015)

Elektronları arasındaki çekme kuvvetinin yüksek olmasından ötürü çeliğe göre hafif, yarıcı özelliği olmayan, manyetik olmayan ve plastik şekil verilebilen alüminyumun saf haldeki özellikleri Çizelge 1.3’de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Saf alüminyumun özellikleri (Car, 2011)

|                          |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| Yoğunluk                 | 2,69 g/cm <sup>3</sup>     |
| Ergime Noktası           | 660,25°C                   |
| Kaynama Noktası          | 2467°C                     |
| Elektriksel İletkenlik   | 0,377X10 <sup>6</sup> /cmΩ |
| Isısal İletkenlik        | 2,37 W/cmK                 |
| Buhar Basıncı            | 2,42 10 <sup>-0.6</sup> Pa |
| Rijitlik Modülü          | 26 GPa                     |
| Hacimsel Elastite Modülü | 76 GPa                     |
| Young Modülü             | 70 GPa                     |
| Molar Hacim              | 9,99 cm <sup>3</sup> /mole |
| Buharlaşma Entalpisi     | 293,7 kJ/mole              |
| Optik yansımaya          | 71%                        |

Bakırın özgül ağırlığı  $8.93 \text{ gr/cm}^3$ , demirin özgül ağırlığı  $7.87 \text{ gr/cm}^3$  ve çinkonun özgül ağırlığı  $7.14 \text{ gr/cm}^3$  iken Al'un özgül ağırlığı ise  $2.69 \text{ gr/cm}^3$  olup bunların üçte biri kadardır. Özgül ağırlığındaki bu durumdan dolayı uzay ve uçak sanayisi başta olmak üzere otomotiv ve gemicilik endüstrilerinde, her geçen gün ilgi çekmeye devam etmektedir. Al malzemeler kullanılarak üretilen ulaşım araçlarının daha hafif olmalarından dolayı daha az enerji tüketmeleri ve daha yüksek menzil olanağı mevcuttur (Car, 2011). Otomotiv endüstrisindeki araçlarda Al malzemelerin kullanımı ile araç ağırlıkları ve zararlı gaz salınımları ciddi oranda azalmıştır.

Al yüzeyinde doğal olarak bulunan oksit filminden dolayı korozyona olan dayanımı çeliklere göre yüksektir. Yüksek dayanım özelliğini çelik malzemelerin aksine eksi sıcaklıklarda bile koruyabilmektedir. Al metali, tuzlu su atmosfer, kimyasal sistem veya petrokimyasal ortamlara karşı mükemmel korozyon direncinden dolayı gemicilik, inşaat, kimya sanayi için en önemli malzemeler arasındadır (Car, 2011; Davis, J.R., 1993). Dünya alüminyum rezervlerini % 25'lik oranla birinci sırada inşaat sektörü, % 24'lük oranla ulaşım özellikle otomotiv sektörü tüketmektedir (Kılıç, 2016).

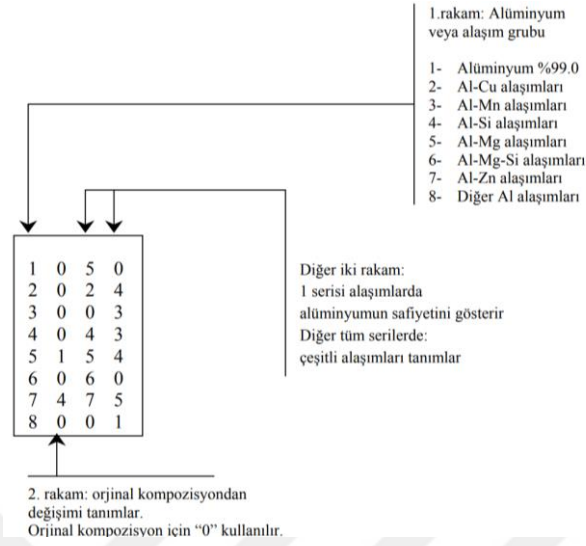
#### **1.4 Alüminyum Alaşımları**

Alüminyum saf halde bile tercih edilebilir özelliklere sahip olmasının yanı sıra, alaşımlandırılarak ve/veya ısıtılarak işlem uygulanarak emsalsiz özellikler kazandırılması mümkündür. Al alaşımları; dövme ve döküm olarak temel iki gruba ayrılmaktadır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti yüksek olup şekil vermesi kolaydır. Al ve alaşımlarının büyük bir kısmına ısıtılarak işlem uygulanabilmektedir. Alaşımların dayanımlarının, yapı çeliği olan St37 ye ulaştığı görülmüştür. Bundan dolayı farklı sektörlerde çok farklı ihtiyaçlara cevap verebilmektedir. Al alaşımlarının adlandırılmasın temel iki isimlendirme yöntemi vardır.

1. Numerik olarak sınıflandırma
2. Alfa numerik olarak sınıflandırma

En önemli kodlama sistemleri olan; Ulusal Standart Enstitüsü (ANSI) tarafından adapte edilen Amerikan Alüminyum Birliği (AA), ve Alman Standart Enstitüsü (DIN) İngiliz Standart Enstitüsü (BSI) nümerik olarak sınıflandırma metodunu kullanmışlardır (Mario

vd, 1992, Brescia ve Edimet 2000). Burada anlamlı biçimde düzenlenmiş rakamlar kullanılmaktadır. AA birliğine göre, Al dövme alaşımları Şekil 1.7’de gösterildiği gibi dört harfle sınıflandırılmaktadır.



**Şekil 1.7.** Alüminyum işlem alaşımları için isimlendirme yöntemi (Conserva Mario, vd. 1992)

#### 1.4.1 1xxx serisi alüminyum

% 99 ve üzeri saflıkta alüminyum oranına sahip olup korozyon direnci, iletkenlikleri mükemmeldir. Mekanik özellikleri diğer alaşımlara göre daha düşüktür. Isıl işlemlerle mukavemette belli oranda artışlar elde edilebilmektedir. Özellikle kimya endüstrisinde ve elektrik endüstrisinde kullanılmaktadır. Bazı 1xxx serisi alüminyum alaşımlarına 1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350 örnek olarak verilebilmektedir.

#### 1.4.2 2xxx serisi alüminyum

Bakır (Cu) ve Magnezyum(Mg) katkısı içeren alaşımlardır. Çökeltmede asıl etken Cu, Mg ve Mn elementleridir. Günümüzde en çok kullanılan Al-Cu-Mg alaşımlarından biri olduğu bilinmektedir. Mukavemetin yüksek olması alaşımın içerisindeki Mg içeriğini % 0,5’den % 1,5’e çıkarmakla elde edilmiştir (Altenpohl, 1998; Öz, 2007). Bazı 2xxx serisi alüminyum alaşımlarına 2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 2010, 2030, 2060, 2240, 2420 örnek olarak verilebilmektedir.

### **1.4.3 3xxx serisi alüminyum**

Esas katkı elementi mangan (Mn) olup kaynak edilebilirliği ve deforme edilebilirliği mükemmeldir. Çok iyi korozyon direncine olduğu bilinmektedir. Bu seri alaşımlarına genellikle ısıtım işlemi uygulanmamaktadır. Kimyasal kaplar, içecek kutuları, endüstriyel çatı imalatında kullanılmaktadır. Bazı 3xxx serisi alüminyum alaşımlarına 3003, 3004, 3105, 3830, 3850, 3900 örnek olarak verilebilmektedir.

### **1.4.4 4xxx serisi alüminyum**

Esas katkı elementi silisyum (Si) olup ergime noktası, kaynak ve lehimleme işlemleri için düşürülmüştür. Döküm esnasında da Si elementi akıcılığı artırmakta ve kompleks ürünlerin boşluksuz dökülebilmesine olanak sağlamıştır (Altenpohl, 1998; Öz, 2007). Bazı 4xxx serisi alüminyum alaşımlarına 4032, 4043, 4145, 4643 örnek olarak verilebilmektedir.

### **1.4.5 5xxx serisi alüminyum**

Esas katkı elementi magnezyum (Mg) olup Mg oranı arttıkça süneklik azalırken sertlik ve mukavemet artmaktadır. Kimyasal kompozisyonda Mg ilavesi, deformasyon sertleşme hızını artırmaktadır. Kaynak edilebilirliği iyi bir Al serisidir. Kimyasallara ve deniz suyuna karşı korozyon direnci yüksek bir alaşımdır. Deniz suyuna direncinden dolayı gemi sanayiinde çokça kullanıma sahiptir. Bazı 5xxx serisi alüminyum alaşımlarına 5005, 5049, 5052, 5083, 5754 örnek olarak verilebilmektedir.

### **1.4.6 6xxx serisi alüminyum**

Esas katkı elementleri Mg ve Si olup  $Mg_2Si$  çökeltisi oluşturmaktadır. EN AW6082 alaşımı 2000'li yılların başlarında otomotiv sektöründe plastik şekil verilerek üretilen araç süspansiyon sistemi elemanları için kullanılmıştır. EN AW6082 alaşımı 6 serisi içerisinde mukavemet ve korozyon direncine açısından en yüksek değere sahip olanıdır (Zvinys ve ark., 2012).



#### 1.4.7 7xxx serisi alüminyum

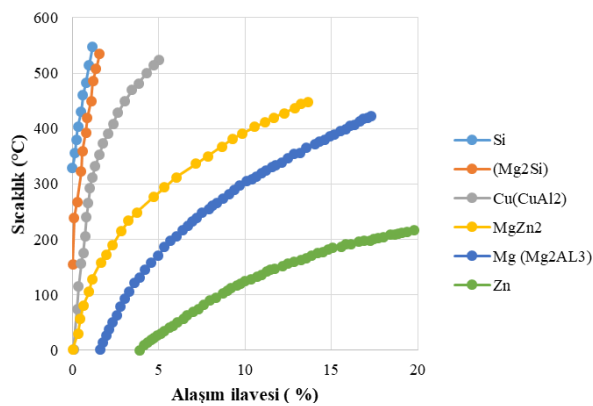
Esas katkı elementi çinkodur (Zn). Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımları olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Mukavemetinin diğer alaşımlardan yüksek olmasından dolayı, uçak yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bazı 7xxx serisi alüminyum alaşımlarına 7075, 7050, 7049, 7100, 7110 örnek olarak verilebilmektedir (Altenpohl, 1998; Öz, 2007).

#### 1.4.8 8xxx serisi alüminyum

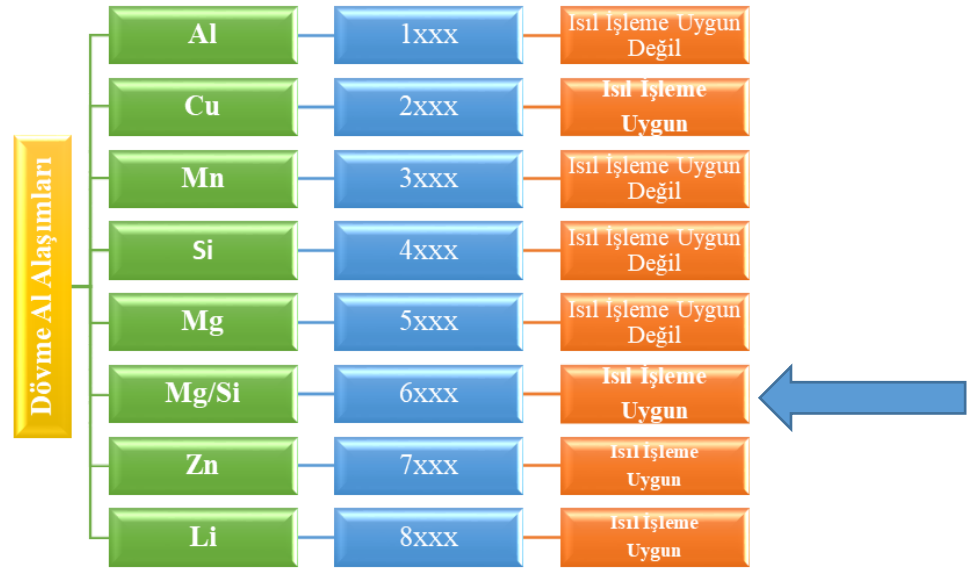
Esas alaşım elementi lityum (Li) olup, kalay (Sn) eklentisi de yapılabilir. Demir (Fe) ve nikel (Ni), elektriksel iletkenlikten önemli bir kayıp vermeden dayanımı arttırmaktadır. Özellikle havacılık uygulamalarında, uçak ve uzay yapısal parçalarında kullanılmaya başlanmıştır. Yorulma direnci ve tokluk açısından diğer serilerden daha iyidir. Üretim maliyeti açısından en pahalı seri olarak bilinmektedir. Bazı 8xxx serisi alüminyum alaşımlarına 8006, 8111, 8079, 8500, 8510, 8520 örnek olarak verilebilmektedir.

### 1.5 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Alüminyum alaşımlarının özellikleri sertleştirme ve yaşlandırmayla iyileştirebilmektedir. Tavlama ise denge dışı içyapı oluşumlarını ve süneklilik azalmasına sebebiyet veren iç yapısal kusurları yok etmek için uygulanmaktadır (Oğuz, 1990). Şekil 1.8’de sıcaklığa bağlı olarak Al içerisine katılabilecek alaşım miktarları gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Sıcaklığın bağlı olarak alaşım katkılarının Al içerisindeki çözünürlüğü (Altenpohl, 1999)



**Şekil 1.9.** Dövme Al alaşımlarında ısıl işlem durumları ve tez kapsamında çalışılacak olan alaşım serisi, AA6082

Şekil 1.9’da ısıl işlem durumlarına göre dövme alaşımları şematik olarak gösterilmiştir. Alüminyum alaşımlarının temel temper durumlarını, üretimden sonra uygulanan mekanik ve ısıl işlemler belirlemektedir. Dört temel temper durumu mevcuttur (Kaufman, 2000).

**F:**Fabrikada üretildiği haliyle, belirli bir özellik elde etmek amacıyla ısıl işlem ya da deformasyon sertleştirilmesi uygulanmayan dövme ve döküm alüminyum alaşımları.

**O:** Üretimden sonra dayanımı düşürmek ve işlenebilirlik kabiliyetini artırmak için tavlama işlemi uygulanan dövme alüminyum alaşımları.

**H:**Deformasyon sertleştirilmesi uygulanarak dayanımı artırılan alüminyum alaşımları.

**W:** Sadece çözeltiye alma işlemi uygulanarak kendiliğinden yaşlanan alüminyum alaşımları olup W harfinden sonra doğal yaşlandırma süresi belirtilebilir (Örn. W ½ h).

**T:** Çökeltme sertleştirilmesi uygulanmış, ek soğuk şekillendirilme uygulanan yada uygulanmayan alüminyum alaşımlarını simgeler.

Çizelge 1.4’de T için ve Çizelge1.5’de de H işlemleri için alt işlemler verilmiştir.

**Çizelge 1.4.** T temper kodları alt basamakları(Kaufman, 2000)

| <b>Kod</b> | <b>İşlem Basamakları</b>  |
|------------|---|
| T0         | Tavlı, rekristallize olmuş hali   |
| T1         | Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, doğal yaşlandırma                      |
| T2         | Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, soğuk şekillendirme, doğal yaşlandırma |
| T3         | Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme, doğal yaşlandırma                      |
| T4         | Çözeltiye alma, doğal yaşlandırma   |
| T5         | Sıcak şekillendirme sonrası soğutma, yapay yaşlandırma                      |
| T6         | Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma   |
| T7         | Çözeltiye alma, aşırı yaşlandırma   |
| T8         | Çözeltiye alma, soğuk şekillendirme, yapay yaşlandırma                      |
| T9         | Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma, soğuk şekillendirme                      |

**Çizelge1.5.** H temper kodlarının alt basamakları (Kaufman, 2000)

| <b>Kod</b> | <b>İşlem Basamakları</b>                          |
|------------|---|
| H1         | Deformasyon sertleştirme                          |
| H2         | Deformasyon sertleştirme, kısmi tavlama           |
| H3         | Deformasyon sertleştirme, stabilize etme          |
| H4         | Deformasyon sertleştirme, vernikleme ya da boyama |

Bu çalışma kapsamında AA6082 T0 seri alüminyum alaşımı incelenmiştir.

### **1.5.1 Alüminyumlarda çökeltme sertleştirme ısı işlemleri**

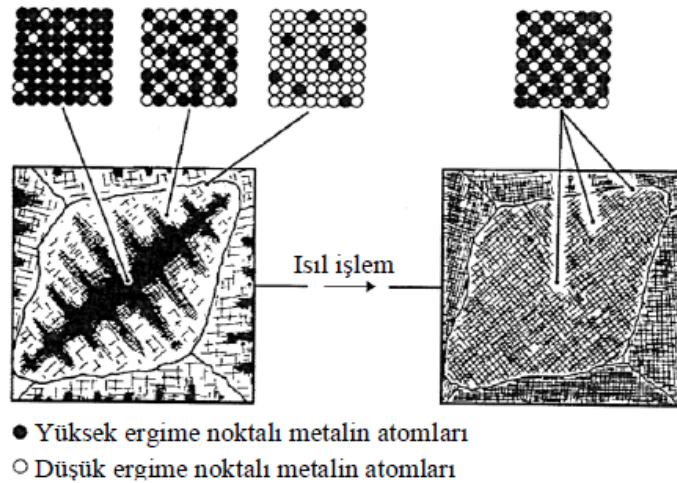
1906 yılında alman araştırmacı Alfred Wilm; düşük miktarlardaki magnezyum, silisyum ve bakır elementi içeren bazı alüminyum alaşımlarının çökeltme sertleşmesini ve mekanik özelliklerini araştırmış bu amaçla belli sıcaklıklara kadar ısıtıp sonra su içerisine daldırmıştır. Bunu “alüminyuma su verme işlemi” olarak adlandırmıştır. Gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarda su verilen numunelerin oda sıcaklığında birkaç gün bekletilmesiyle dayanımlarının kendiliğinden kayda değer oranda arttığını tespit etmiştir. O dönemdeki imkân ve koşullarda bu olay adlandırılmamış ve daha sonrasında “yaşlandırma” olarak adlandırılmıştır (Guo, 2017).

Alüminyum malzemelerde yaşlandırma işlemi çökeltme sertleşmesi olarak da bilinmektedir. Alüminyum malzemeler yapay ve doğal olmak üzere iki ana grup

üzerinden yaşlandırma işlemi yapılmaktadır. Bir alaşıma çökeltme sertleştirilmesi uygulanabilmesi için; azalan sıcaklıkla birlikte azalan katı ergiyebilirlik göstermesi, sıcaklık düşürüldüğünde oluşan çökeltilerin sert ve kırılğan, matrisin ise nispeten yumuşak ve sünek olması, alaşımın su vermeye uygun olması ve çökeltilerin matris yapısı ile uyumlu olması gerekmektedir. Çökeltme sertleştirilmesi ısı işlemi, alüminyum alaşımlarına yumuşak ve daha sünek matriste ince sert çökeltilerin üniform dağılımını sağlamak için uygulanmaktadır. Al-%4 Cu alaşımı, çökeltme sertleştirilmesi ile dayanımı artırılabilen alüminyum alaşımlarının klasik bir örneği olarak gösterilmektedir.

Bazı metaller sıvı halde iken birbirleri içinde tamamen çözünürler ve katılaşma sonrasında da çözülmüş halde kalırlar. Oluşan bu karışıma “katı çözelti” adı verilir. Katılaşma sırasında kristaller her iki metalin atomlarından oluşur. Kaçınılmaz olarak metallerden birinin ergime noktası diğerinden daha yüksek olacaktır ve bu yüzden daha çabuk katılaşmaya başlayacaktır.

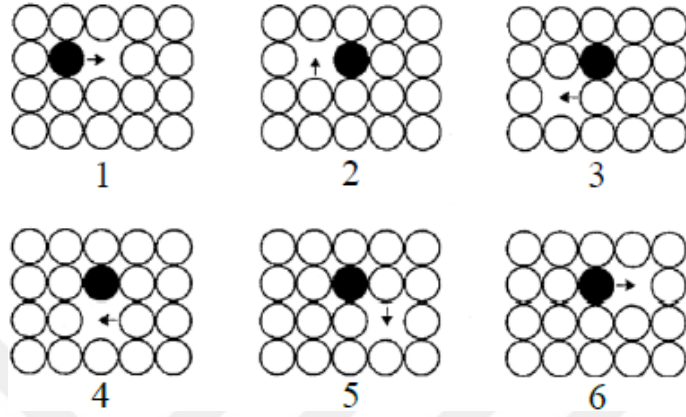
Sonuç olarak katılaşma sonrası oluşan tanelerin merkezleri yüksek ergime sıcaklığına sahip metalce daha zengin olur. Çevresindeki kollar ise düşük ergime sıcaklığına sahip metalce daha zengindir (Şekil 1.10). “Çekirdeklenme” olarak adlandırılan bu etki döküm halindeki tüm katı çözeltilerde görülmektedir. Döküm sonrası gerçekleştirilecek ısı işlemleri ile bu etki giderilebilir (Higgins, 2006).



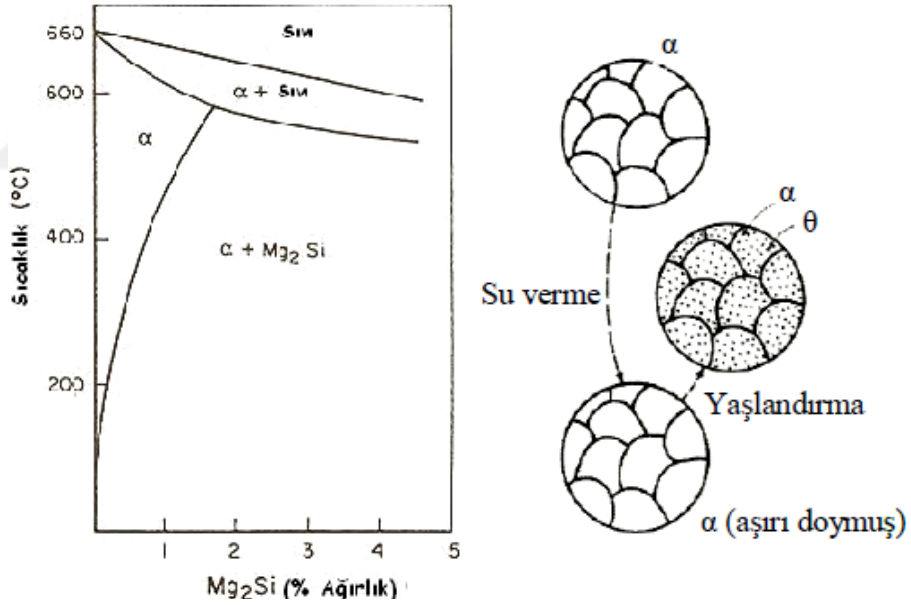
**Şekil 1.10.** Çekirdeklenmiş bir katı çözeltilde bileşimin farklılık göstermesi (Higgins, 2006)

Bir katı çözelti yeteri kadar ısıtıldığında, termal olarak aktive edilen atomlar kristal yapısının içerisinde hareket ederek yer değiştirmeye başlar ve yapının bileşimi her yerinde daha

homojen bir hale gelmektedir. “Difüzyon” olarak adlandırılan bu olay Şekil 1.11’de gösterilen bir dizi hareketle gerçekleşmektedir. Şekilde siyah renkle gösterilen çözülmüş atom, ilk olarak kafes yapısında bulunan yanındaki boş atom yerine doğru hareket eder ve sonrasında şekilde gösterilen beş hareket tamamlanarak tekrarlanır.



Şekil 1.11. Difüzyon sırasında atomların hareketi (Higgins, 2006)



Şekil 1.12. Mg<sub>2</sub>Si faz diyagramı üzerinde çökelme sertleştirme safhaları (Askeland, 1998)

Çökelme sertleştirme ısıl işlemi üç aşamadan oluşmaktadır. Bu oluşumlar şematik olarak Şekil 1.12’de Mg<sub>2</sub>Si faz diyagramında gösterilmektedir (Askeland, 1998).

1. Çözeltiye alma: Alaşım, tek faz ( $\alpha$ ) bölgesine kadar ısıtılarak  $\theta$  çökeltileri katı çözeltili içerisinde homojen olarak çözünene kadar bekletilir.

2. Su verme: Çözeltiye alma aşamasından sonra tek fazlı çözelti ikincil fazların çökmesine izin verilmeden hızla soğutularak aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisi elde edilir. Atomların çekirdeklenme oluşturmak üzere difüzyonu için yeterli zamanı olmadığından  $\theta$  fazı oluşmaz.
3. Yaşlandırma: Son olarak kararsız haldeki aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisi, oda sıcaklığında (doğal yaşlandırma) ya da oda sıcaklığının üstünde, solvüs sıcaklığının altında (yapay yaşlandırma) belirli sürelerde bekletilerek içerisinde çözünmüş halde bulunan  $\theta$  fazı kararlı bir faz halinde çökeler.

Yaşlandırma ısı işleminin başlangıç safhasında dengesiz çökelti olan GP-1, GP-2 ve  $\theta'$  fazlarının boyutu büyümektedir. Alaşımın dayanımı yaşlandırma süresi ile artmaktadır. Bu çökelti varlıklarını korudukları sürece alaşım yaşlandırma şartları içerisinde dengeli  $\theta$  fazı ise çökeldiğinde alaşımın dayanımı düşmeye başlamaktadır. Zaman arttıkça  $\theta$  taneleri daha da büyümekte, sayıları azalmakta ve “aşırı yaşlanma” oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta difüzyon hızlı gerçekleşmekte ve çökelti çabuk oluşmakta ve böylece dayanım, daha kısa sürede pik değere ulaşmaktadır. Ancak düşük sıcaklıklardaki yaşlandırmalarda ulaşılan maksimum dayanım daha yüksek olmakta ve üstelik ve elde edilen bu yüksek dayanım uzun süre korunabilmektedir. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda sıcaklık-zaman hesaplamalarındaki küçük hatalar etkili olamamaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklardaki yaşlandırmalarda parçanın yüzeyi ve merkezi arasındaki sıcaklık farkı daha az olacağından daha üniform mekanik özellikler elde edilmektedir (Askeland, 1998). Eğer soğutma çok yavaş gerçekleştirilirse, çözeltiye alma sonrası çözünmüş halde bulunan ikincil fazlar kaba parçacıklar halinde tekrardan çökeltmekte ve malzemenin mekanik özellikleri düşüş göstermektedir. Tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde oluşan çökelti alaşımın şekillendirilebilme kabiliyetini azaltmakta ve taneler arası korozyon dayanımını da düşürmektedir (Tan, 2011).

## 1.6 6082 Al Alaşımlarının Mekanik ve Termo Mekanik Özellikleri

Alaşımın ana bileşenleri Mg ve Si olup, bu elementler mikro yapıda  $Mg_2Si$  fazı oluşturmakta ve ısı işlem uygulamalarında da intermetalik olarak katı çökelti oluşturmaktadır. Böylece alaşım dengelenmiş olarak nitelendirilmektedir. Ayrıca serbest halde Mg ve Si elementleri bulunmaktadır. Si'un bir kısmı intermetalik olarak Al-Fe-Si fazlarını oluşturmaktadır. Serbest veya fazla Mg ise ekstrüzyon edilebilirliği olumsuz

etkilemektedir. Mikro yapıdaki Fe, Mn ve Cr gibi elementler düzenleyici olarak bulunur. Zn ve Cu ise hem korozyon direncini hem de yapının mukavemetini artırmaktadır. İletkenlerde Ti ve vanadyumu (V) almak için bor, tane boyutunu kontrol etmek için de Zr veya Ti bulunmaktadır. Malzemenin talaşlı imalatta işlenmesini kolaylaştırmak için kurşun veya bizmut ilave edilmektedir (Mondolfo, 1976).

Si oranı % 0,2-1,2 arasında, Mg oranı ise % 0,35-0,9 aralığındadır. En önemli kirlilik elementi Fe olup standartlarda alt ve üst limitler belirlenmiştir. Bazı standartlarda ise sadece üst oran için sınırlandırma verilmiştir. 6xxx için kirlilik elementlerinden olan titanyum (Ti) ile Zn'nun miktarının genelde binde bir ve binde iki oranının altında olması belirtilmekle birlikte bazı standartlarda ise toplamı binde on beş'in altında olması gerektiği belirtilmiştir. Kirlilik elementlerinden Cu ve Cr miktarlarının, ağırlığın % 0,15 ile %0,25'in altında olması istenirken, Mn miktarının binde bir ile binde altı arasında olması öngörülmüştür (Turbalıoğlu, 2008).

Bu seri üç temel uygulama alanı mevcuttur.

- Mukavemet gereksinimin ön planda uygulamalar ki kimyasal kompozisyonunda Mg ve Si elementleri ana aktörlerdir.
- Çekme kabiliyetinin yüksek olması gereken uygulamalar. Si elementi ana aktördür.
- Yüksek anodizasyon yeteneği olan alaşım gereksinimlerinde ise Mg içerikleri ön plana çıkartılmaktadır. Mg<sub>2</sub>Si fazındaki Si oranı orta seviyededir. Kirlilik oluşturabilecek elementlerin çok düşük olması gerekmektedir.

Mg ve Si ilavesi ile kafes parametrelerini kontrol etmek için de kullanılmaktadır. Mn, Cu, Zn ve Cr ise çok düşük miktarlarda olduğundan ölçülebilir bir etkisi olmamaktadır. Alaşımlardaki kompozisyon dağılımının çoğunda Mg ve Si elementleri dışındaki bileşenlerin toplam oranı %1'den oldukça düşüktür. Bundan dolayı Al alaşımının özellikleri saf alüminyumunkinden farklı değildir. Alaşımın mekanik ve termo mekanik özellikleri saf alüminyum ile karşılaştırıldığında farklar yok denilecek kadar az olduğu görülmektedir (Aluminum Federation, 1983). AA6082, kıvılcıma en dayanıklı Al alaşımı olarak ta bilinmektedir. Alaşıma berilyum (Be) ilave edilerek bu dayanım daha da artırılabilir (Brenner, 1976). Yüksek oranda Al ile hazırlanmış olan alaşımlarla

yapılan testlerde parlatma ve eloksal sonrasında %85'e yakın oranda ışığı yansıttığı görülmüştür.

AA6082 alaşımının, endüstride en çok kullanılan 6xxx serisi alaşımlarla birlikte kıyaslamalı olarak mekanik özellikleri Çizelge 1.6'da verilmektedir.

**Çizelge 1.6.** Al-Mg-Si alaşımlarının mekanik özellikleri (Aluminum Federation, 1983)

| Alaşım Tipi | Temper durumu | %0,2 Akma Dayanımı (MPa) | Çekme Dayanımı (MPa) | Uzama (%) | Aşınma Dayanımı (MPa) | Yorulma Dayanımı $50 \times 10^6$ çevrim (MPa) | Sertlik Brinell | Elastiklik Modülü (GPa) |
|-------------|---------------|--------------------------|----------------------|-----------|-----------------------|--|-----------------|-------------------------|
| 6061        | T4            | 125                      | 215                  | 18        | 165                   | 95   | 60-70           | 69                      |
|             | T6            | 265                      | 305                  | 11        | 205                   | 95   | 90-10           | 69                      |
| 6063        | T4            | 90                       | 155                  | 47        | 131                   | 79   | 48              | 69                      |
|             | T6            | 180                      | 210                  | 8         | 155                   | 85   | 75              | 69                      |
| 6082        | T4            | 130                      | 225                  | 16        | 178                   | 106  | 60-70           | 69                      |
|             | T6            | 270                      | 310                  | 9         | 218                   | 124  | 90-100          | 69                      |

### 1.7 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi yöntemler plastik şekil verme yöntemleri olarak bilinmektedir. Metallerde akma kuvvetinin üzerinde dışarıdan kuvvet uygulanarak gerçekleştirilen bu işlem Al alaşımlarında daha az kuvvetlerle yapılabilmektedir. Plastik şekil değiştirme sırasında metallerde sık görülen çatlak oluşumu, kırılma durumu Al alaşımlarında rastlanmamaktadır (Çapan, 2010).

Plastik şekil değiştirme işlemi malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde ise bu duruma "sıcak şekillendirme" denilmektedir. Ergime sıcaklığının %30'unun altında yapılan deformasyonlara ise "soğuk şekillendirme" denmektedir. Bu iki bölge arasında yapılan deformasyonlara ise "ılık şekillendirme" denmektedir. Artan sıcaklıklarda akma sınırının azalması ve sünekliğin artmasından dolayı, büyük şekil değişimleri gerçekleştirilebilir. Bu durumdaki kuvvet gereksinimi soğuk şekillendirmeye göre daha düşüktür. Al alaşımların yüksek korozyon direnci, sıcak şekillendirme esnasında da kendini korumaktadır. Bu durum da metallere göre avantaj sağlamaktadır.



Soğuk şekillendirme yapılması durumunda pekleşme meydana geldiği için süneklikte azalma olmaktadır. Soğuk şekillendirilen alaşımda yüzey pürüzlülükleri, mekanik değerleri, tolerans değerleri sıcak şekillendirmeye göre daha yüksektir. Üretilmek istenilen parça geometrisine bağlı olarak bu işlemler birkaç adımdan oluşabilmekte bu da maliyet dezavantajını ortaya çıkarmaktadır.

### **1.7.1 Alüminyumun dövülmesi**

Dövme, pres ve çekiç gibi tezgahlarında, soğuk, ılık veya sıcak olarak kapalı veya açık kalıplarda gerçekleştirilebilmektedir. Al alaşımlarının kapalı kalıpta dövülmesinde, çoğunlukla iki veya bazı özel durumlarda daha fazla parçadan oluşan kalıplar kullanılmaktadır. İki kalıp arasında alınan kütük, kalıp içerisine oyulmuş olan parça geometrisine sahip bir boşluğu doldurmaya zorlanır ve malzeme akarak kalıbın boşluğunu geometrisini doldurmaktadır. Açık kalıplarda basit şişirme ve ezme işlemleri uygulanmaktadır. Dövme işlemi kullanılarak üretilen parçalar, tane yapısında ve mekanik özelliklerde iyileşmelere neden olmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe direksiyon, jant ve süspansiyon sistem parçaları, fren kompresörlerinin biyel kolları dövme ile üretilmektedir.

### **1.7.2 Haddeme prosesi ile alüminyum sac üretimi**

Malzemenin kendi ekseninde dönen iki silindirin arasından geçirilerek iki silindir arasındaki boşluğa kadar indirilmesine haddeme denilmektedir. Haddeme uygulaması sıcak ve soğuk olarak gerçekleştirilebilmektedir. Soğuk haddeme daha çok yassı ürün gruplarının elde edilmesinde diğer kesitlerde ise sıcak haddeme metodu kullanılmaktadır.

### **1.7.3 Alüminyumun ekstrüzyonu**

Al alaşımlarının ekstrüzyonu yöntemi ile dolu çubuklar, endüstriyel tüpler dikiş olmayan borular ve farklı kesit geometrisine sahip profiller üretilmektedir.

## BÖLÜM II

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Alüminyum özellikle artan emisyon şartlarından dolayı da otomotiv endüstrisinin bir parçası haline gelmiştir. AA6082 gibi kolay bulunabilen bir endüstriyel malzeme olması, sektörü de daha ekonomik hale getirmektedir. Özellikle süspansiyon sistemlerinde, araç şasisinde, motorda vb. birçok alanda kullanıldığı ve kullanım oranının da giderek arttığı görülmektedir. Havacılık sanayinde ise uçuş kontrol sistemlerinde, fren gövdelerinde kullanıldığı bilinmektedir. Çalışma kapsamında AA6082 T0 (ISO: AlSi<sub>1</sub>MgMn) alüminyum alaşımı incelenmiş olup bu alaşımın sıcak şekillendirilebilirliği konusunda literatürde az sayıda çalışma mevcuttur. AA6082 ile ilgili mevcut çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Ülkemizde otomotiv sanayisinin yanında savunma sanayinde özellikle hava savunma sanayinde alüminyum alaşımlı malzemelerin kullanımı 21. yüzyılda giderek artmıştır (Başer 2013). Gün geçtikçe de hem proses iyileştirmesi hem de yapısal parça olarak kullanım alanını genişlediği görülmektedir. Yeni bir proses tasarımı konusunda Gökçil (2015) mikro yapıda kaba tane elde etmeksizin homojen bir kesit elde edebilmek için dövme işlemine bir tavlama ve yaşlandırma prosesi tasarlayarak, otomotiv süspansiyon sistem parçalarında denemeler ve homojen tane dağılımı elde etmişlerdir. Ayrıca doğrudan dökümhaneden gelen kütüklerin, ekstrüzyon yapılmadan rot başının dövülebilirliğinin mümkün olduğu ve böylece homojen bir içyapının yanı sıra, bertaraf edilen ara işlemler neticesinde de daha ekonomik bir proses ortaya çıkartıldığı görülmüştür (Birold vd., 2014).

Yapay yaşlandırmaya çok elverişli olan AA6082 alaşımının 500 °C ön ısıtma, 160 °C yapay yaşlandırma değerlerinin en uygun yaşlandırma parametresi olduğu sunulmuştur (Zviny vd., 2012). 540 °C sıcaklıkta 15 dakika değerinin çözeltiye alma parametresi olarak en iyi olduğu tespit edilmiştir (Sürmen vd., 2016). Soğutma ortamı olarak suda soğutmanın yapıya daha fazla sertlik verdiği bunun da Mg<sub>2</sub>Si fazının oluşturduğu katı çökeltiler sayesinde olduğu gözlemlenmiştir (Mrówka - Nowotnik ve Sieniawski, 2005). T6 temperinde ise şekillendirebilirlik imkanının azaldığı rapor edilmiştir (Torca vd., 2010). T6 temperi eğer çözeltiye alınmadan yaşlandırma yapılırsa mekanik

özelliklerin kötüleştiği bunun sebebinin de tane irileşmesi olduğu, çözelti sonrasında ise 220°C üzerindeki sıcaklıklarda yapılan yaşlandırmanın olumlu etkilerinin olduğu su ortamında su vermenin tane çarpımlarına yol açtığı bildirilmiştir. Mekanik özelliklerin zaman ve sıcaklık ile değişimini veren kullanışlı grafikler sunulmuştur (Prabhukhot ve Prasad, 2015). Ardışık dövme işleminde, alaşımda pekleşme gözlemlenmiştir (Naser vd., 2014).

Hızlı soğutma işlemlerinin tane boyutunun küçük kalmasını sağladığı mukavemeti arttırdığı görülmüştür. Çözeltiye alma süresinin artması ile önce mukavemette düşme sonra artma gözlenmiştir. Bekleme süresinin artmasının yapıyı homojenleştirdiği unutulmamalıdır. Bu da gerilmede azalma yaparken deforme edilebilirliği büyük oranda artırmaktadır (Shao vd. 2020; Birol vd. 2017; Kumar vd. 2015). Çözeltiye alma esnasında bekleme süresinin artması fazların matris içerisinde çözündürme miktarını artırmaktadır.

AA6082 alaşımının soğuk dövülebilirliğinin kötü olduğu, çatlak oluşumu gözlemlendiği görülmüştür (Bouquerel vd. 2015). 160°C'ye kadar artan sıcaklıklarda deforme edilebilirlik artmaktadır ancak mukavemet özellikleri zayıf kalmaktadır (Chang vd. 2019). Deforme edilebilirliğin artışın da tane toparlanmaları etkendir (Kumar vd. 2017).

Ilık işlem ile %159 a kadar akma mukavemetinde artış gözlemlenmiştir (Krolo, 2019). Artan sıcaklıklarda yapılan ısıtma işlemde ise yaşlanma dolayısı ile mukavemet artışı gözlemlenmektedir. Öyle ki, 550°C'de 1,5 süreyle çözdürüp suda soğutarak 3 defa eş kanallı açısız presleme uygulayıp 100°C'de 30 saat bekleyerek 427MPa çekme mukavemetine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu durum yapıyı gevrekleştirdiği için hem deforme edilebilirliği azaltmakta hem de gevrekleştirdiği için darbe enerjisini emme kabiliyetini azaltmaktadır (Kvackaj vd., 2009). Bu nedenle soğuk deformasyon yerine uygun sıcaklıklarda yaşlandırıp kullanmak çok büyük avantaj sağlayacaktır. Zira AA 6082 yaşlandırmaya çok müsaittir.

Mikro yapıda ise Si ve Mg<sub>2</sub>Si in yapıyı güçlendirmede veya zayıflatmada mikro yapı açısından ana etken oldukları görülmüştür (Cabibbo vd., 2005). Artan sıcaklıklarda dislokasyon sayısını azaltmaktadır. Ana etmen β' (Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>) fazı olup 300 dereceye kadar oluştuğu daha sonra β' (Mg<sub>1.8</sub>Si) ve β (Mg<sub>2</sub>Si) ö döndüğü ve mukavemeti düşürdüğü gözlenmiştir. β' fazı çokça dislokasyon içermektedir (Xu vd. 2020; Kumar vd. 2019).

Bir tür basma işlemi olan eş kanallı açılmal pres (ECAP) işlemi mukavemeti artırmaktadır (Dadbakhsh, 2010).

Deformasyon hızına gelince, duyarlı olduğu, yüksek hızlarda akma ve çekme mukavemetinin arttığı, katı çökeltilerin arttığı ve bunların da kırılmaya sebebiyet verdiği tespit edilmiştir (Yibo vd., 2013).

Yukarıda yapılan izahâtlardan anlaşılmaktadır ki AA6082 alaşımı özellikle otomotiv ve havacılıkta genişleyen bir yelpazede yapısal parça malzemesi olarak yer almaya devam etmektedir. İçerisindeki fazları nedeni ile yaşlandırmaya müsait olup farklı kullanım alanlarının gereksinimlerine göre farklı parametreler uygulanmıştır. Biz bu çalışmada AA6082 serisi alüminyum alaşımının mekanik ve termomekanik özelliklerini belirleyip, yapay yaşlandırmanın etkileri araştırdık. Yapılan işlemlerin mikroyapıya olan etkileri belirlenmiştir. Sonuçta da, en uygun yapay yaşlandırma koşulları tespit edilmiştir. Bu değerler otomotiv sektöründe kullanılan rotbaşının yorulma, sıcak dövme simülasyonlarında kullanılmıştır. Sıcak dövme simülasyonunu doğrulamak üzere deneysel yorulma ve sıcak dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Rotun çalışma ömrü, dövme işlemi için pres kuvvet gereksinimi, çapak oranı, işlem süresi, gerilme değerlendirmesi sunulmuştur.

## BÖLÜM III

### MATERYAL ve METOT

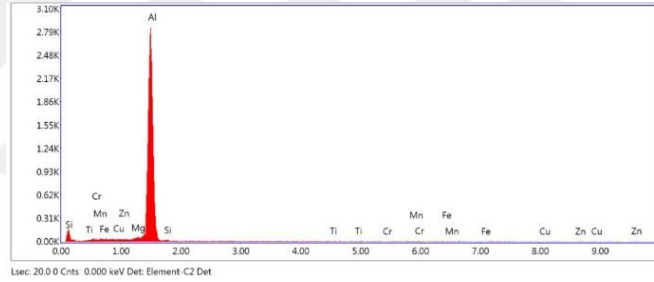
Çalışmamız iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İzlenen yöntemler ve bulgular detaylı olarak ilerleyen sayfalarda verilmiştir.

1. Aşama: Deneyle
2. Aşama: Simülasyon ve Optimizasyon

### 3.1 Deneyle

#### 3.1.1 Kimyasal analiz

EDx analizleri neticesinde alaşımdaki element dağılımı Şekil 3.1.'deki gibi tespit edilmiştir. Bu elementlerin ağırlıkça yüzde miktarları ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.



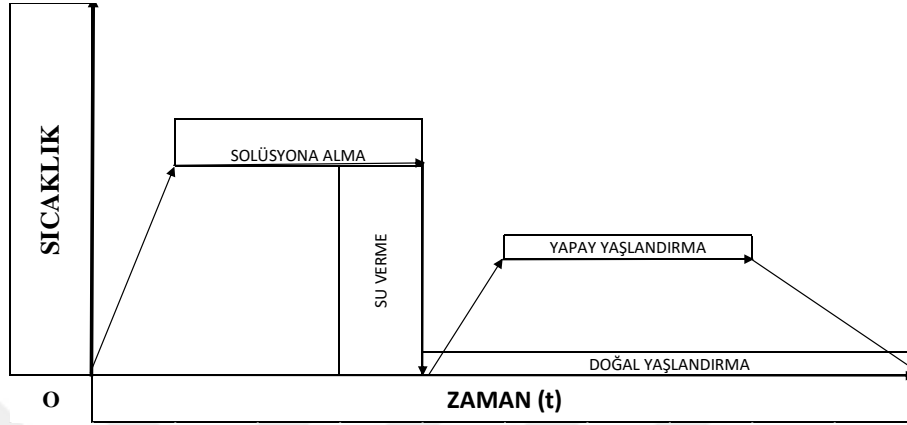
Şekil 3.1. AA6082 Alaşımın içerdiği elementler

Çizelge 3.1. AA6082 alaşımının kimyasal içeriği

| Element | Ağırlık (%) | Atomik (%) | Net Int. | Hata (%) | K (oram) | Z      | R      | A      | F      |
|---------|-------------|------------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| MgK     | 1.35        | 1.56       | 20.91    | 14.24    | 0.0122   | 1.0518 | 0.9859 | 0.8301 | 1.0329 |
| AlK     | 89.54       | 93.50      | 1332.92  | 2.95     | 0.8147   | 1.0119 | 0.9934 | 0.8976 | 1.0017 |
| SiK     | 1.14        | 1.14       | 8.63     | 29.75    | 0.0056   | 1.0331 | 1.0003 | 0.4749 | 1.0024 |
| TiK     | 0.48        | 0.28       | 2.29     | 63.71    | 0.0042   | 0.8769 | 1.0414 | 0.9614 | 1.0462 |
| CrK     | 0.79        | 0.43       | 2.68     | 65.85    | 0.0072   | 0.8653 | 1.0467 | 0.9833 | 1.0714 |
| MnK     | 1.07        | 0.55       | 3.01     | 63.15    | 0.0097   | 0.8453 | 1.0482 | 0.9901 | 1.0845 |
| FeK     | 1.05        | 0.53       | 2.50     | 62.17    | 0.0099   | 0.8565 | 1.0488 | 0.9940 | 1.1021 |
| CuK     | 2.34        | 1.04       | 2.77     | 64.11    | 0.0218   | 0.8121 | 1.0431 | 1.0004 | 1.1446 |
| ZnK     | 2.25        | 0.97       | 1.96     | 64.49    | 0.0209   | 0.8062 | 1.0385 | 1.0016 | 1.1512 |

### 3.2 Yapay Yaşlandırma Deneyleri

Çalışmamızda yapay yaşlandırma gerçekleştirilmiştir. Alüminyum malzemeler için genel olarak uygulanan yapay yaşlandırma işlemi şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

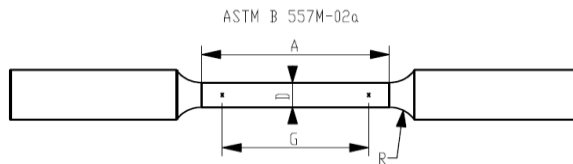


Şekil 3.2. Alüminyum malzemelerin yaşlandırma işlemi şematik gösterimi

#### 3.2.1 Yapay yaşlandırma deney numunelerinin hazırlanması

Yapay yaşlandırma işlemi uygulanacak olan alüminyum malzeme daha sonrasında çekme, yorulma ve çentik darbe deneylerine uygun olacak şekilde sırasıyla ASTM B557 M 02A, ASTM E606-92 ve ISO 148-1’e uygun olarak hazırlanmıştır. Çizelge 3.2’de numunenin parametrik ölçüleri verilmiştir. Çekme deneyi için ASTM B557 M 02A’ya uygun geyç çapı 6 mm’lik numuneler üretilmiş ve denemelerimiz bunun üzerinden devam etmiştir.

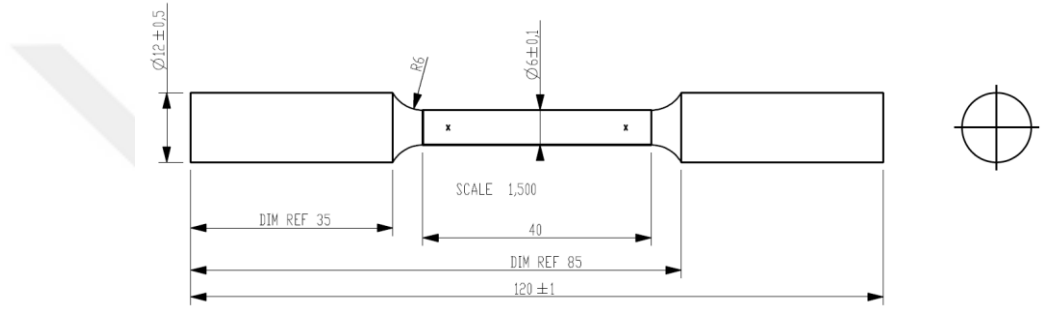
Çizelge 3.2. Çekme numunesi parametrik boyutları (ASTM B557 M 02A)



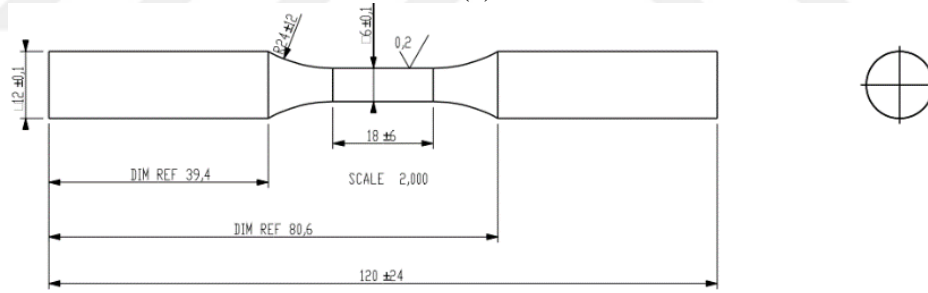
| NOMINAL DIAMETER                          | DIMENSIONS,mm     |                                  |            |            |
|---|-------------------|----------------------------------|------------|------------|
|   | STANDART SPECIMEN | SMALL-SIZE SPECIMENS TO STANDARD |            |            |
|   | 12.5              | 9                                | 6          | 4          |
| G-GAGE LENGTH                             | 62.50±0.10        | 45.00±0.09                       | 30.00±0.06 | 20.00±0.04 |
| D-DIAMETER ( NOTE 1)                      | 12.50±0.25        | 9.00±0.10                        | 6.00±0.10  | 4.00±0.05  |
| R- RADIUS OF FILLET,MIN                   | 9                 | 8                                | 6          | 4          |
| A-LENGTH of REDUCED SECTION,MIN ( NOTE 2) | 75                | 54                               | 36         | 24         |

Dairesel kesitli AA6082 çubuklardan  $\text{Ø}25$  mm'lik ve 125 mm'lik uzunluğunda kesilerek iki ucuna punta açma işlemi gerçekleştirildi. Numuneler bilgisayar destekli tornalarda talaş kaldırma yöntemi ile işlenmiştir. İşleme esnasında kesmeden kaynaklı ısınmaları yok etmek için bor yağı sıvısı ile soğutma işlemi yapılmıştır. Yüzeyde mikro çatlakların oluşmaması için tezgâh devri artırılmıştır. Elde edilen numuneler daha sonrasında 800, 1000, 1200'lük zımparalar ile parlatılmış arkasında keçe ile son parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Numunenin boyutları Şekil 3.3'de verilmiştir. Yapılan çalışmanın istatistiksel bir veri oluşturabilmesi için deneysel üçer tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

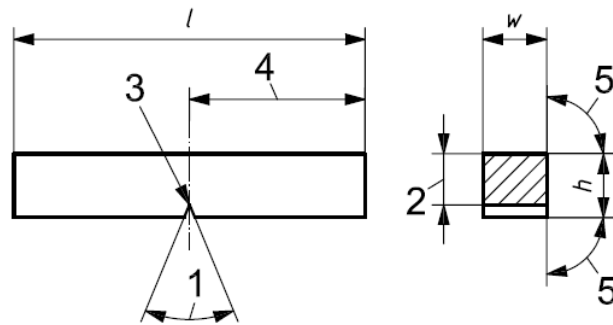
ASTM B557M\_02A SAYFA 7 6 mm LİK ÇEKME TEST NUMUNESİ



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3. Çekme (ASTM B557 M 02A) (a), Yorulma (ASTM E606-92) (b) ve V çentik (ISO 148-1) numunesi boyutları (c)

### 3.2.2 Yapay yaşlandırma deneylerinin gerçekleştirilmesi

AA6082 alaşımından 6 mm çaplı hazırlanmış numunelere solüsyona alma işlemi Çizelge 3.3’de uygulanmıştır. Çözelti sonrası soğutma şartları Çizelge 3.4’de gösterilmektedir. Sürenin sonunda, numuneler su verme için farklı soğutma koşulları için 5-10 saniye içinde aktarılmıştır. Yapay yaşlandırma şartları

Çizelge 3.5’te verilmiştir. Soğutma sıvısının hacmi 1 m<sup>3</sup> olup böylece ısı mümkün olduğu kadar hızlıca atılabilmektedir. Su verme işleminden sonra alüminyum malzemelere yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yapay yaşlandırma işlemi sonrasında soğutma ortamları Çizelge 3.6’da verilmiştir. Kullanılan polimer malzeme, Petrofer© firmasından tedarik edilen indüksiyon ile yüzey sertleştirme işleminde kullanılan bir polimerdir (Petrofer, ISOMAX Serisi).

**Çizelge 3.3.** Çözelti şartları

| Sıcaklık (°C) | Süre (h)       |
|---------------|----------------|
| 500           | 2, 4, 6, 8, 10 |

**Çizelge 3.4.** Çözelti sonrası soğutma şartları

| Soğutma ortamı | Sıcaklık (°C) |
|----------------|---------------|
| Hava           | Oda Sıcaklığı |
| Su             | Oda Sıcaklığı |
| Polimer25%+ su | Oda Sıcaklığı |
| Polimer50%+ su | Oda Sıcaklığı |
| Polimer75%+ su | Oda Sıcaklığı |

**Çizelge 3.5.** Soğutma sonrası yapay yaşlandırma şartları

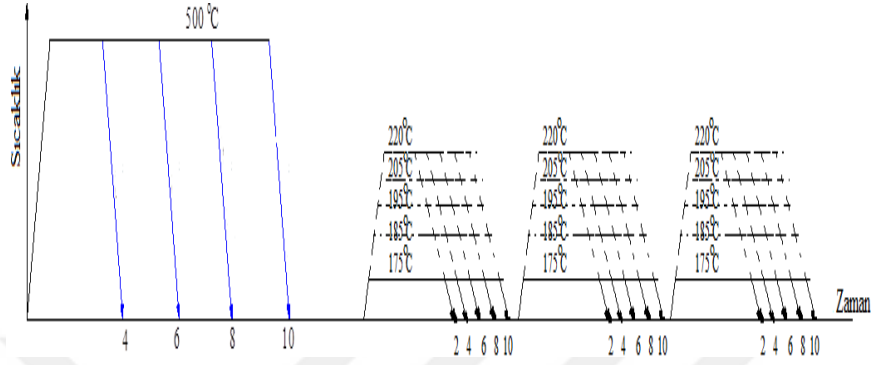
| Sıcaklık (°C)           | Süre (h)       |
|-------------------------|----------------|
| 175, 185, 195, 205, 220 | 2, 4, 6, 8, 10 |

**Çizelge 3.6.** Yapay yaşlandırma sonrası soğutma şartları

| Ortam             |
|-------------------|
| Su, hava, polimer |



Uygulanan yapay yaşlandırma tasarımı Şekil 3.4'te detaylandırılarak gösterilmiştir. Tüm bu işlemlerden sonra numuneler çekme deneyi, sertlik ölçümü, mikro yapı, jump testi, charpy-impact (çentik darbe) deneyleri sırası ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda optimum koşullar tespit edilmiştir.



**Şekil 3.4.** Yapay yaşlanma tasarımı ve şematik olarak gösterimi

Yapay yaşlandırma işlem sırası aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- 1- Numunelerin hazırlanması
- 2- Solüsyona alma
- 3- Su verme
- 4- Yapay yaşlandırma
- 5- Su verme

Tez boyunca deneylerde kullanılan ve parametreler Çizelge 3.7.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Yapılan deneylerin kodları

| <b>Deney No</b> | <b>AÇIKLAMA</b>  |
|-----------------|--|
| D.No.0          | T0 durumu  |
| D.No.1          | 500° C'de 4 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş  |
| D.No.2          | 500° C'de 6 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş  |
| D.No.3          | 500° C'de 8 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş  |
| D.No.4          | 500° C'de 10 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş |

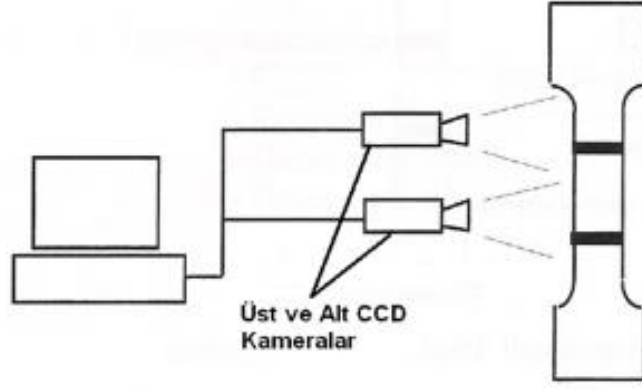
**Çizelge 3.7 (Devam)**

|         |   |
|---------|---|
| D.No.5  | 500° C'de 4 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş   |
| D.No.6  | 500° C'de 6 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş   |
| D.No.7  | 500° C'de 8 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş   |
| D.No.8  | 500° C'de 10 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş  |
| D.No.9  | 500° C'de 2 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C'de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                   |
| D.No.10 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C'de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.11 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C'de 2 saat tutulup suda soğutularak yapay yaşlandırması                       |
| D.No.12 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C'de 2 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.13 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C'de 2 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.14 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.15 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 4 saat tutulup suda soğutularak yapay yaşlandırması                       |
| D.No.16 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 4 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.17 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 4 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.18 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.19 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.20 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 8 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.21 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                    |
| D.No.22 | 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.23 | 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.24 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |
| D.No.25 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.26 | 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.27 | 545° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C'de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                     |

| <b>Çizelge 3.7 (Devam)</b> |  |
|----------------------------|--|
| D.No.28                    | 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 8 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                        |
| D.No.29                    | 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                       |
| D.No.30                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması                       |
| D.No.31                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması   |
| D.No.32                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması   |
| D.No.33                    | 500° C’de 2 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması |
| D.No.34                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %2 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |
| D.No.35                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %3 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |
| D.No.36                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %4 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |
| D.No.37                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %5 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |
| D.No.38                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %6 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |
| D.No.39                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %7 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |
| D.No.40                    | 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %8 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması     |

### 3.3 Çekme Deneyi

Çekme testleri Shimadzu Autograph 100 kN mekanik çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneyler esnasında malzemelerdeki deformasyonların ölçümü için video tip deformasyon ölçer kullanılmıştır. Bu sistem, çekme deneyi uygulanacak numunelerin yüzeylerine çizilen çizgilerin deney öncesinde iki çizgi arası mesafe yer değiştirme miktarını %0,1 hassasiyetle belirleyebilen kameralar ve bir de yazılımdan oluşmaktadır. Böylece mekanik temaslı deformasyon ölçerlere göre daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Şekil 3.5’de deformasyon ölçüm sistemi ve Fotoğraf 3.1’de de deney tezgâhı görülmektedir. Sistem, iki ayrı kameranın kadrıajları içerisinde kalan ölçüm çizgilerinin deney süresince (numune uzadıkça) yaptığı hareketin ölçmesi esasına dayanmaktadır. Çekme hızı 8mm/dak olarak alınmıştır.



**Şekil 3.5.** Deformasyon ölçüm sistemi (ekstansometre)



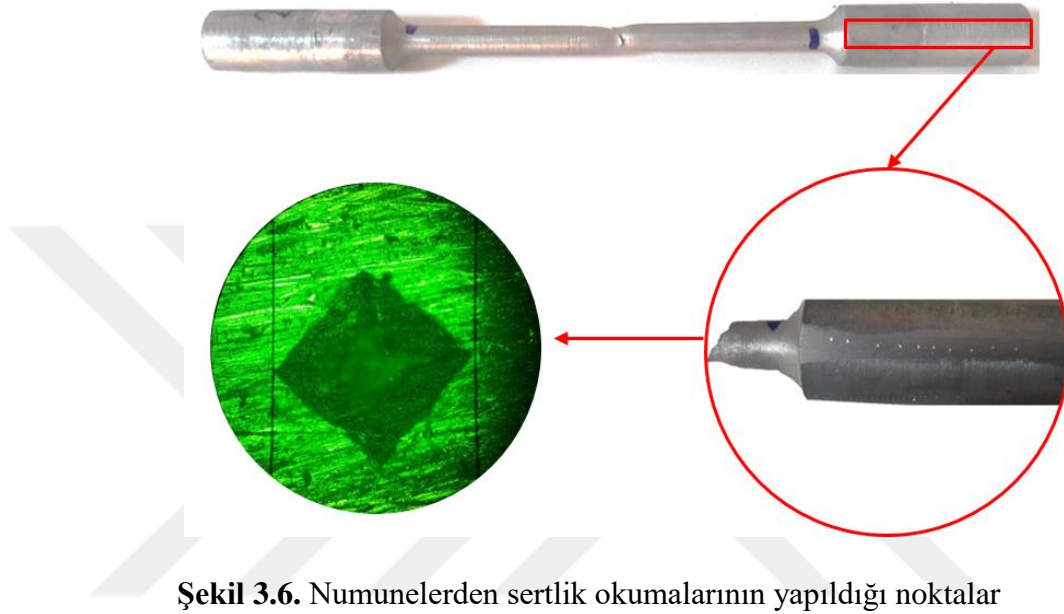
**Fotoğraf 3.1.** Shimadzu Autograph 100 kN mekanik çekme cihazı

### 3.4 Sertlik Ölçümü

Üretimi gerçekleştirilen yapısal elemanların gelen sipariş şartnamelerine göre belirli özelliklerde olmaları beklenmektedir. Bu özelliklerin en başında da malzemelerin sertlik değerleridir. Birbirlerine göre izafi çalışan ve çalışma esnasında yüzeylerde önemli oranda sürtünme oluşan bu sistemlerde aşınma durumu kaçınılmaz olmaktadır. Bundan dolayı üretimi gerçekleştirilen sistemlerin çalışacağı ortam ve taşıyacağı yüke bağlı olarak yüzey sertliklerinin belirli değerlerde olması gerekmektedir. Bu anlamda sertlik deneyi birçok kademedeki yaygın olarak kullanılan test yöntemidir. Malzemelerine gerek şekillendirme

sonrası gerekse de uygulanan ısıt işlemler neticesinde oluşan yüzey sertliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada numunelerin Vickers sertlik yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri 15 saniye boyunca 5 kg yük uygulanması sureti ile yapıldı. ASTM E92 standardı kullanılmıştır. Numunelerden sertlik okumalarının yapıldığı bölgeler Şekil 3.6’da gösterilmektedir.

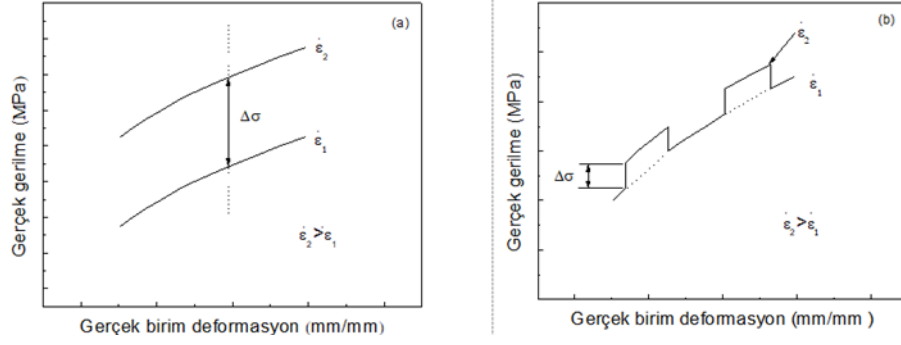


Şekil 3.6. Numunelerden sertlik okumalarının yapıldığı noktalar

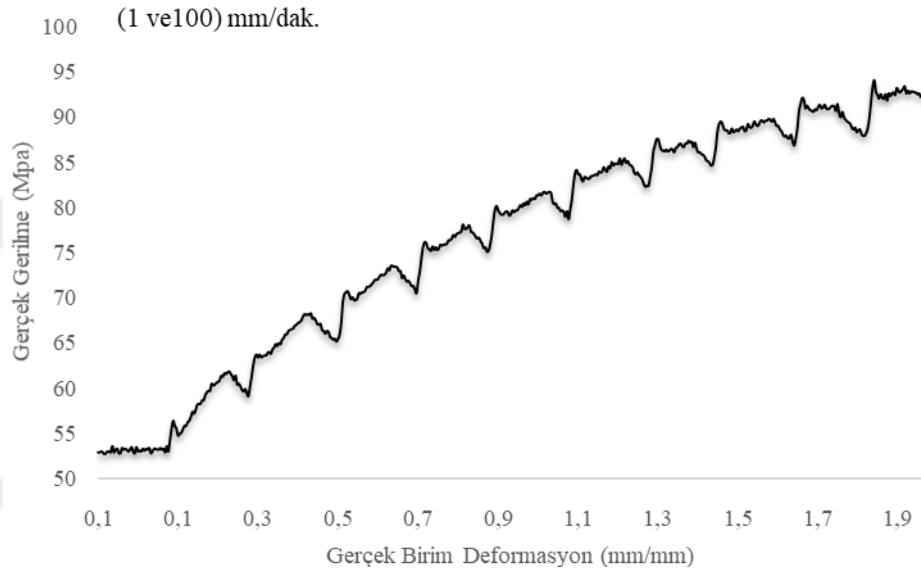
### 3.5 Sıçrama (jump) Deneyinin Yapılışı ve Hesaplaması

#### 3.5.1 Deformasyon oranı hassasiyeti ( $m$ ) değişimi

Deformasyon oranı hassasiyetinin de, malzemede toplam deformasyon miktarına etkisi vardır. Deneysel çalışmalar sonucunda yüksek deformasyon oranı hassasiyetine sahip malzemelerin hasara uğramadan önce büyük miktarda deformasyon gösterdiği gözlemlenmiştir. Deformasyon oranı hassasiyeti iki farklı yöntemle bulunmaktadır. Birinci yöntemde iki numuneye iki farklı hız uygulanarak, ikinci yöntemde ise aynı numuneye ardışık farklı hızlar (sıçrama testi) uygulanarak elde edilmektedir. Yaygın olarak kullanılan yöntem sıçrama testi yöntemidir. Bunlara ait grafikler Şekil 3.7 (a-b)’ de görülmektedir (Kılıç, 2016). 1 ve 100 mm/dak hızları tekrarlı olarak EN AW 6082 alaşımına uygulanmış ve Şekil 3.8’deki grafik elde edilmiştir.

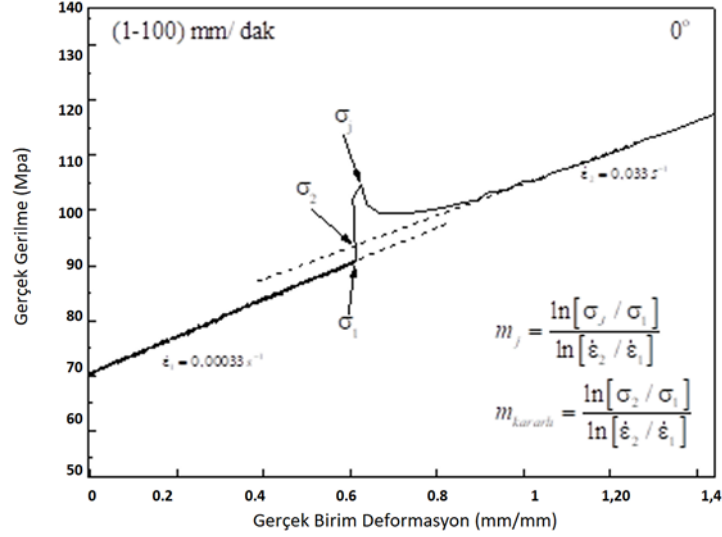


**Şekil 3.7.** Farklı hızlarda çekme deneyi (a), Sıçrama testi deneyi (b) (Kılıç, 2016)



**Şekil 3.8.** Sıçrama testi

Burada yapılan sıçrama testiyle bulunan deformasyon oranı hassasiyetinin belirlenmesinde yine iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi normal şekillendirme oranı hassasiyetidir. Gerilme-birim deformasyon eğrisinde pik noktasının maksimum olduğu nokta dikkate alınmaktadır. İkinci yöntemde ise kararlı deformasyon oranı hassasiyetidir. Bu yöntemde ise Şekil 3.9'da kesikli çizgi ile gösterilen paralel doğrular çizilerek gerilme-birim deformasyon noktaları tespit edilmektedir. Bu iki farklı hesaplama yönteminden, literatürde en çok kararlı olan yöntem tercih edilmektedir.



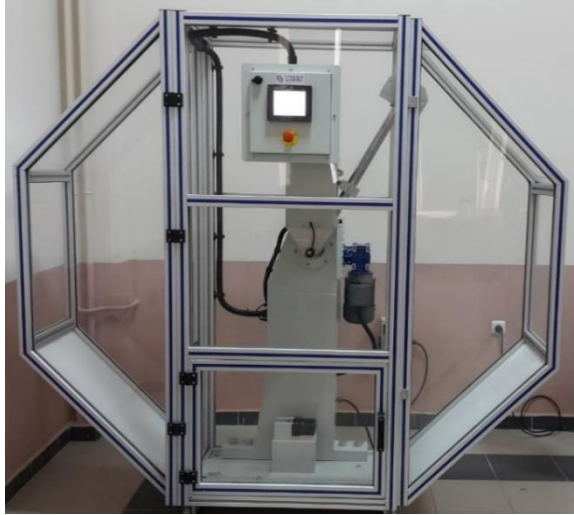
**Şekil 3.9.** Normal ve kararlı deformasyon oranı hassasiyetinin belirlenmesi

### 3.6 Çentik-Darbe Deneyi

Amaç malzemenin yapısında oluşacak gerilme yığılmasını suni olarak canlandırmak sureti ile dinamik zorlanmalar karşısında enerji tutma kabiliyetini, çatlak ilerlemeye karşı direncini tayin etmektir. Darbe test cihazı görseli Fotoğraf 3.2’de gösterilmiştir.

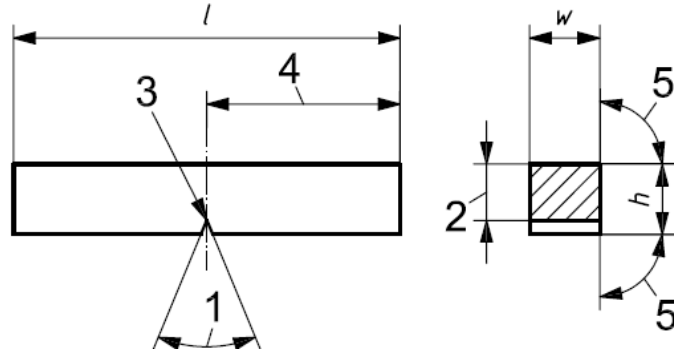
Darbe deneylerinde kullanılan numunelere genellikle “V” yada “U” şekilde çentikler açılmaktadır. Çentikli bir numune kuvvet altında zorlandığında, çentiğin bulunduğu bölgede çentik yüzeyine dik bir gerilme dağılımı meydana gelmektedir. Numunenin kırılabilmesi için bu dik gerilmenin, tane içindeki veya tane sınırındaki atomic bağlardan daha fazla olması gerekmektedir. Yapıda plastik şekil değiştirme olmaksızın aniden kırılma meydana gelirse “gevrek kırılma” olarak adlandırılmaktadır.

Bu durumda kırılmanın gerçekleştiği yüzey, düz bir ayrılma göstermiştir. Ayrılma yüzeyleri parıltılı ve taneli görünümündedir. Sünek hasarlarda, numune kırılmadan önce plastik şekil değiştirme meydana gelmektedir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal gerilmelere ilaveten, çekme eksenini ile 45° açıda maksimum kayma gerilmesi de oluşmaktadır. Kayma gerilmesi, kayma dayanımı değerini aştığı anda elastik şekil değiştirme sona ermekte ve plastik şekil değiştirme başlamaktadır. Bu durumda plastik şekil değiştirmeyi müteakiben hasar meydana gelmektedir. Buna sünek kırılma denilmektedir. Kırılma yüzeyi, girintili, çıkıntılı ve liflidir.



**Fotoğraf 3.2.** Çentik darbe test cihazı

ISO 148-1 normuna uygun olarak Şekil 3.10’da gösterilen “ $l$ ” boyu 55 mm olacak “ $h$ ,  $w$ ” ölçüleri ise 10 x 10 mm olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır.



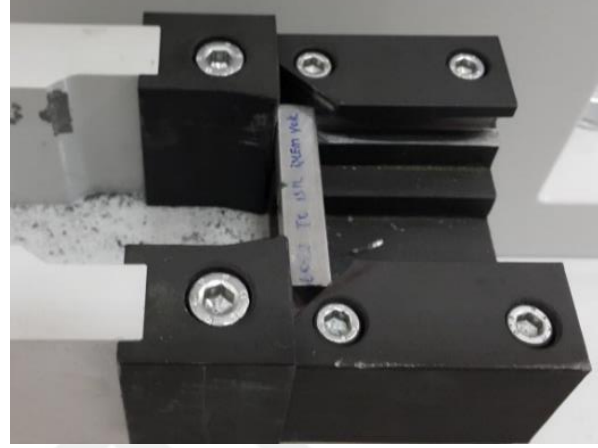
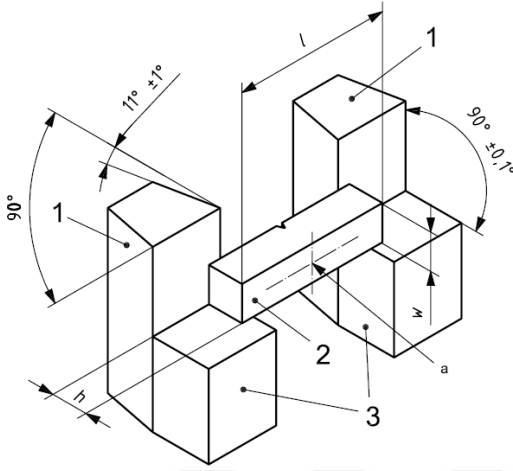
**Şekil 3.10.** Charpy V çentik numunesi boyutları (ISO 148-1)

Şekil 3.10’da gösterilen 1, 2, 3, 4, 5 parametreleri aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- 1: Çentiğin açısını göstermektedir. Numunelerde  $45^{\circ} \pm 2^{\circ}$  lik açılmıştır.
- 2: Çentiğin derinliğinin yüksekliğinden çıkarılması ile kalan ölçüdür. Numunelerde bu ölçü  $8 \pm 0,075$  mm dir.
- 3: Çentiğin dibinde oluşan radyus ölçüsüdür. Numunelerde bu ölçü  $0,25 \pm 0,025$  mm olarak alınmıştır.
- 4: Çentiğin numune üzerinde nereye açıldığını göstermektedir. Numuneler simetrik olarak çentik açılmıştır, bu ölçü  $27,5 \pm 0,42$  mm dir.
- 5: Çentik yüzeylerinin açısını tarif etmektedir. Numunelerde  $90^{\circ} \pm 2^{\circ}$  olarak hazırlanmıştır.



Yaşlandırma deneyinden elde edilen optimum deney koşullarındaki (500°C'de 2 saat solüsyona alınıp 185°C de 4 saat hava da soğutma) numuneler teste tabi tutulmuştur. Polimer-su karışımından oluşan sıvının çekme ve çentik darbe üzerine etkilerini araştırmak için %1, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8 lik derişimle soğutma ortamlarında soğutulmuştur. Daha sonra numuneler darbe testine tabi tutulmuştur. Zira sektörde hem ekonomi hem de mikro yapıda kirlenmelerin oluşmaması için bu aralık dışına çıkılmamaktadır.



**Şekil 3.11.** ISO 148-1'e göre V çentikli numenin tezgâha bağlama şekli

Çentik darbe deneyinde enerjinin hesaplanmasında Denklem (3.1) kullanılmıştır.

$$E = WgR(\cos \beta - \cos \alpha) - L \quad (3.1)$$

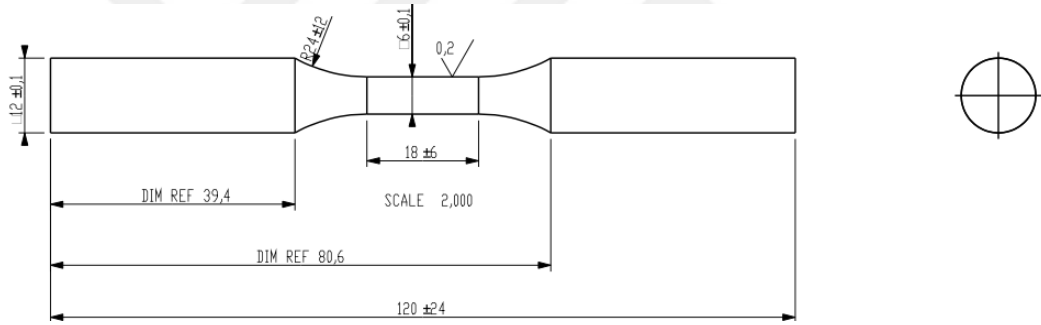
Burada  $E$  (joule) darbe enerjisini,  $W$  (kg) çekicinin kütlesini,  $g$  ( $\frac{m}{s^2}$ ) yer çekim ivmesini,  $R$  (m) sarkaç kolunun uzunluğunu,  $\cos(\beta)$  (derece) çekicinin başlangıç pozisyonunun açısını,  $\cos(\alpha)$  (derece) çekicinin çarpma sonrası çıktığı noktanın açısını ve  $L$  (joule) ise tezgâhtaki sürtünme nedeni ile oluşan kayıp enerjiyi göstermektedir.

### 3.7 Yorulma (Ömür) Deneyi

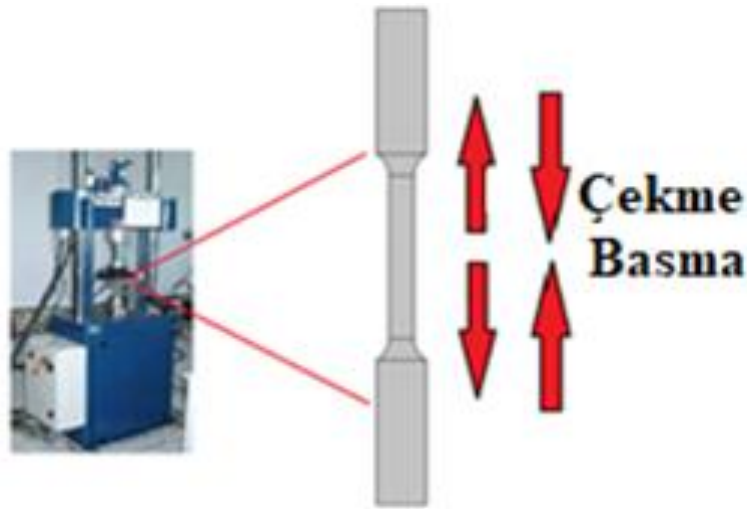
Parçaların dinamik çalışma ortamlarındaki dayanımlarının ve davranışlarının belirlenmesinde kullanılan en yaygın test yöntemlerinden bir diğeri ise parça ve/veya montaj sistemlerinin birlikte gösterdiği yorulma dayanımlarıdır. Otomotiv-havacılık alanında kullanılacak yapısal parçaların kullanılacağı yere göre değişen miktarlarda yorulma

dayanımını sağlaması gerekmektedir. Bu parçalarda yüklenici konumunda olan firmaların üretim kademelerini baştan sona dikkatli ve kontrollü olarak izlemesi gerekmektedir. Otomotiv yapısal parçalarından biri olan rot başının kullanım yerindeki çalışma ömrünü tespit edebilmek amacıyla Wöhler eğrisi elde edilmiş ve değerler sonlu elemanlar yorulma analizlerinde kullanılmıştır.

Şekil 3.12’de ise yorulma deney numunesinin boyutları verilmiştir. Yorulma numuneleri ASTM E606-92 standardına göre hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler “çekme” ve “basma” yönde farklı yüklemelere maruz bırakılarak B10 güvenilirlik ömre göre test edilmiştir. Numunelerin yorulma test cihazına kolayca bağlanabilmesi için uç kısımlarına standartta uygun olarak diş açılmıştır. Açılan dişlerden hareket etmemesi için ucuna kontra somun takılarak sabitlemeler artırılmıştır. Şekil 3.13’de ise yorulma deneyinin yapıldığı cihaz gösterilmiştir. Test cihazında numuneler sinüs dalgası uygulanarak test edilmiştir.



Şekil 3.12. Yorulma numunesi boyutları (ASTM E606-92)



Şekil 3.13. Yorulma test cihazı ve çalışma prensibi

### 3.9 Mikro Yapı İncelemesi

AA6082 alaşımının sertlik ve çekme testleri yapıldıktan sonra numuneler mikro yapı testleri için soğutmalı testerede kesilmiştir. Kesilen numuneler 1 e 10 oranında sertleştirici+reçine karışımına sahip epoksi ile kalıplanmıştır. Fotoğraf 3.3'de kalıplanmış numuneler gösterilmiştir.



**Fotoğraf 3.3.** Kalıplanmış numune örneği (şekilde parlatılmış hali görülmektedir)

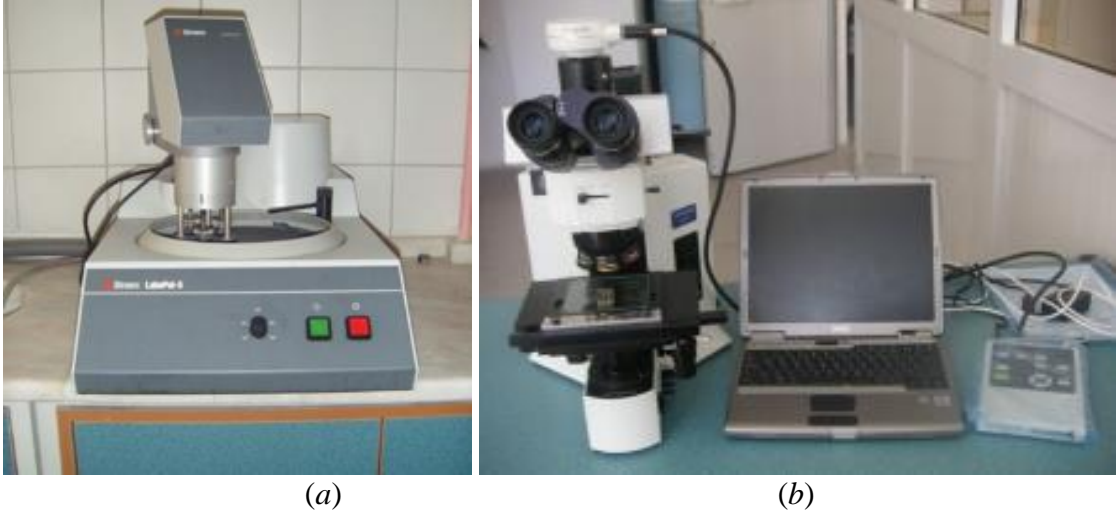
Kalıplanan numuneler sırasıyla;

1. Zımparalama
2. Parlatma
3. Dağlama

işlemlerine tabi tutulmuştur. Şekil 3.14'de zımparalanma ve parlatma işleminde kullanılan zımpara kâğıtları ve Fotoğraf 3.4'de ise bu işelmin yapıldığı Struers Labopol-5 marka otomatik parlatma cihazı ve Olympus (BX-51) marka optik mikroskopun fotoğrafları verilmiştir.



**Şekil 3.14.** Zımpara kâğıtları yapıştırılmış diskler





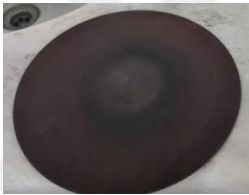

**Fotoğraf 3.4.** Struers Labopol-5 marka otomatik parlatma cihazı (a) Olympus (BX-51) marka optik mikroskop (b)

Zımparalanma işleminde silisyum karbür (SiC) taneleri ile manyetit tozu bulunan zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Kalıptan çıkarılan malzemeler kaba taneden ince taneye doğru sırasıyla 320, 500, 1200, 2400 ve 4000 gride kadar zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama işlemi yaparken su ile soğutma yapılarak numunelerin ısınması sonucu oluşabilecek herhangi bir yapı değişikliğinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Cihazda numune bastırma miktarı ve dönme hızı ayarlanabilmektedir.

Zımparalama işlemi bittikten sonra parlatma işlemine geçilmiştir. Parlatma amacıyla uygun parlatma kumaşları yerleştirilmiş ve aşama aşama parlatma gerçekleştirilmiştir. Her aşama için farklı kumaş ve farklı solüsyon kullanılmıştır. Parlatma esnasında su kullanılmaz ancak pastayı ıslatmak için su yerine kimyasal yapıyı etkilemeyecek çeşitlik sıvılar kullanılmaktadır. Her bir aşamada farklı tane büyüklüğündeki (büyükten küçüğe) süspansiyonlar kullanılmıştır. Parlatmada kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$  tane büyüklüğüne sahip alümina pasta süspansiyonlardır.

Parlatmada dönme devri zımparalamaya göre daha düşük olacaktır. Ayrıca her aşama için de farklı süreler uygulanmaktadır. Mesela; ilk keçe 5 dakika süreyle son keçe 10-15 dakika süreyle uygulanmıştır. Parlatma esnasında takip edilen yöntem ve kullanılan malzemeler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Parlatma esnasında takip edilen yöntem ve kullanılan malzemeler

| Keçeler  | Pasta   | Süspansiyon hazırlamada pastayla birlikte kullanılan sıvılar                         |
|--|---|--|
|   |   | Saf su   |
| (a) Parlatma keçesi.   | (b) 3 µm tane büyüklüğüne sahip parlatma pastası                                    |  |
|   |   | Saf su   |
| (c) 1 mikronluk parlatma keçesi (ayrı keçe)  | (d) 1 µm tane büyüklüğüne sahip parlatma pastası                                    |  |
|  |  |  |
| (e) 0,25 mikronluk parlatma keçesi (ayrı keçe)                                     | (f) 0,25 µm tane büyüklüğüne sahip parlatma pastası                                 | (g) Süspansiyon hazırlamada pastayla birlikte kullanılan sıvılar                     |

Parlatma işlemi biten numunelerin mikro yapılarının fotoğraflarının optik mikroskopta çekilebilmesi için uygun dağlayıcılar ile dağlanması gerekmektedir. Bu işlemde uygun dağlayıcının belirlenmesinin yanı sıra dağlama süresi de çok önemlidir. Dağlamalar için modifiye “%1 HF + %99 saf su” karışımından oluşan Keller isimli reaktif madde kullanılmıştır. Dağlama 4 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı görüntüleri, X5-X100 büyütmeli merceklere sahip Olympus BX-51 optik mikroskobu ile çekilmiştir. Cihazın binocular kısmında da 10 büyütme olduğundan toplam büyütme için lens değerlerinin 10 katı alınmalıdır. Çekilen fotoğraflar mikro yapı analiz kısmında verilmiştir. X5, X10 ve X20 lensleri kullanılarak alınan mikrograflarda, büyütme miktarının azlığı nedeniyle taneler görülemediği. Fakat X100 lens kullanıldığında da aşırı fazla büyütme nedeni ile ne yazık ki bir adet tane görüntü çerçevesine sığmayacak kadar büyük kalmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada mikrograf görüntüsü için X50 büyütmeli lens seçilmiştir.

## BÖLÜM IV

### BULGULAR

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen değerler verilmiştir.

#### 4.1 Çekme Deney Sonuçları

Çekme deneyleri için üçer adet ASTM B557 M 02A'a uygun olarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numuneleri farklı solüsyona alma sıcaklıkları ve farklı koşullarda yapay yaşlandırma işlemleri uygulanmıştır. Solüsyona alma ve yapay yaşlandırma işlemlerinden sonra çekme deneyleri uygulanmıştır.

##### 4.1.1 AA6082 T0 çekme deneyi

Yaşlandırma işlemine başlamadan önce, kıyaslama yapabilmek için T0'daki koşullarda çekme testi uygulanmıştır. AA6082 T0 çekme deneyi sonuçları Çizelge 4.1'da verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** AA6082 T0 çekme deney sonuçları (D.No.0)

| D. No.   | Çekme Mukavemeti (MPa) |
|----------|------------------------|
| D.No.0-A | 165                    |
| D.No.0-B | 170                    |
| D.No.0-C | 161                    |
| D.No.0-D | 168                    |
| D.No.0-E | 162                    |
| D.No.0-F | 171                    |
| D.No.0-G | 164                    |
| D.No.0-H | 170                    |

##### 4.1.2 500 °C'de solüsyona alınan numunelerin çekme deneyi

500 °C de solüsyona alınan ve 4, 6, 8, 10 saat beklendikten sonra havada ve suda soğutulan numunelere çekme testleri yapılmıştır ve sonuçlar çizelgeler ile gösterilmiştir. Çekme deney sonuçları gerçek gerilme ve birim deformasyon grafikleri çizilmiş ve

değerlendirilme yapılmıştır. Çizelge 4.2’de 500°C 4 saat bekletilen ve sonra havada soğutulan numunelerin çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Çizelge 4.1’deki T0 temperli duruma göre %27 ye yakın bir artış olduğu yapılan testler neticesinde ortaya çıkmıştır.

**Çizelge 4.2.** 500° C’de 4 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.1)

| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.1-A | 500                          | 4                   | Hava           | 188                |
| D.No.1-B | 500                          | 4                   | Hava           | 183                |
| D.No.1-C | 500                          | 4                   | Hava           | 202                |
| D.No.1-D | 500                          | 4                   | Hava           | 238                |
| D.No.1-E | 500                          | 4                   | Hava           | 222                |
| D.No.1-F | 500                          | 4                   | Hava           | 231                |

**Çizelge 4.3.**500° C’de 6 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.2)

| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.2-A | 500                          | 6                   | Hava           | 197                |
| D.No.2-B | 500                          | 6                   | Hava           | 200                |
| D.No.2-C | 500                          | 6                   | Hava           | 186                |

Çizelge 4.3’de 500°C de solüsyona alınıp 6 saat bekletildikten sonra havada bekletilerek soğutulan numunelerin çekme sonuçları verilmiştir. Alüminyumun yapay yaşlandırma işlemi yapılmadan önceki durumuna göre Çizelge 4.1’deki T0 temperli duruma göre %17 ye yakın bir artış olduğu yapılan testler neticesinde ortaya çıkmıştır.

**Çizelge 4.4.** 500° C’de 8 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.3)

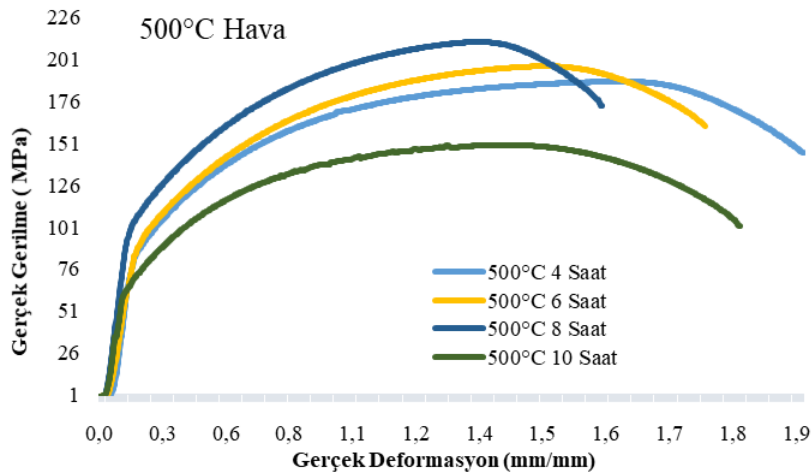
| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.3-A | 500                          | 8                   | Hava           | 211                |
| D.No.3-B | 500                          | 8                   | Hava           | 212                |
| D.No.3-C | 500                          | 8                   | Hava           | 230                |

Çizelge 4.4’de 500°C de solüsyona alınıp 8 saat bekletildikten sonra havada bekletilerek soğutulan numunelerin çekme sonuçları verilmiştir. Alüminyumun yapay yaşlandırma işlemi yapılmadan önceki durumuna göre Çizelge 4.1’deki T0 temperli duruma göre %31 e yakın bir artış olduğu yapılan testler neticesinde ortaya çıkmıştır.

**Çizelge 4.5.** 500° C’de 10 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.4)

| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.4-A | 500                          | 10                  | Hava           | 141                |
| D.No.4-B | 500                          | 10                  | Hava           | 149                |
| D.No.4-C | 500                          | 10                  | Hava           | 150                |
| D.No.4-D | 500                          | 10                  | Hava           | 154                |
| D.No.4-E | 500                          | 10                  | Hava           | 145                |
| D.No.4-F | 500                          | 10                  | Hava           | 146                |

Çizelge 4.5’de 500°C de solüsyona alınıp 10 saat bekletildikten sonra havada bekletilerek soğutulan numunelerin çekme sonuçları verilmiştir. Alüminyumun yapay yaşlandırma işlemi yapılmadan önceki durumuna göre Çizelge 4.1’deki T0 temperli duruma göre %-11 e yakın bir azalma olduğu yapılan testler neticesinde ortaya çıkmıştır. Burada azalmanın meydana gelmesi malzemenin aşırı yaşlandırma olduğunu göstermektedir. Bunun ana nedeni olarak tane irileşirmesi olduğu düşünülmektedir. Mikro yapı incelemesinde detaylı olarak bakılacaktır.



**Şekil 4.1.** 500°C de solüsyona alınmış ve havada soğutulmuş numunelerin çekme deneyleri grafiği



Şekil 4.1’de 500°C de solüsyona alınmış ve hava ortamında soğumaya bırakılmış numunelerin gerçek gerilme ve gerçek deformasyon grafikleri verilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere gerilme-deformasyon açısından en iyi sonuç 8 saatlik bekleme süresinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.6’da 500 °C de solüsyona alınan ve 4 saat beklendikten sonra suda soğutulan numunelere ait çekme sonuçları çizelgeler ile gösterilmiştir.

**Çizelge 4.6.** 500° C’de 4 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.5)

| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.5-A | 500                          | 4                   | Su             | 241                |
| D.No.5-B | 500                          | 4                   | Su             | 235                |
| D.No.5-C | 500                          | 4                   | Su             | 238                |

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %43 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.7.** 500° C’de 6 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.6)

| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.6-A | 500                          | 6                   | Su             | 238                |
| D.No.6-B | 500                          | 6                   | Su             | 250                |
| D.No.6-C | 500                          | 6                   | Su             | 245                |

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %47 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.8.** 500° C’de 8 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.7)

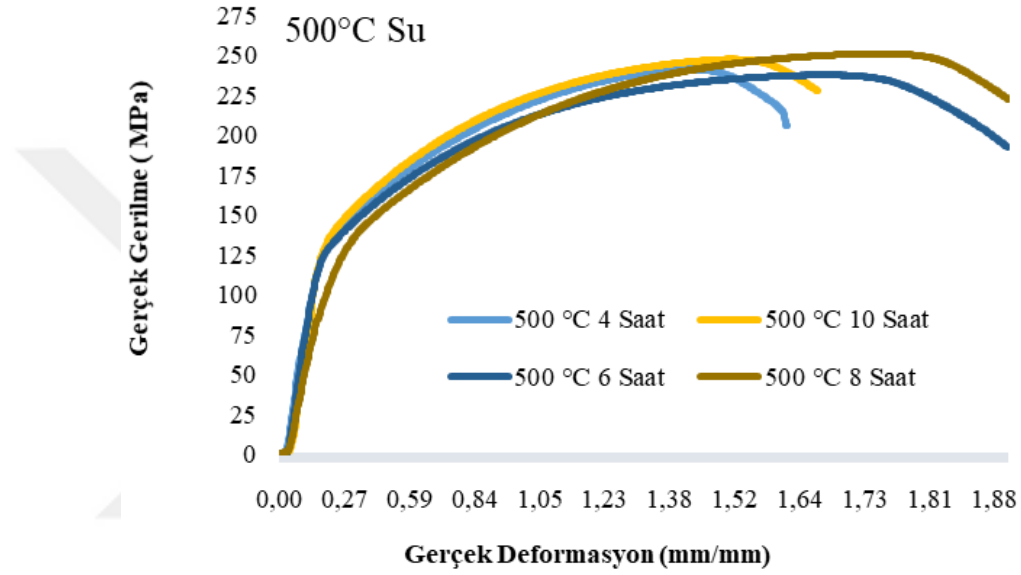
| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.7-A | 500                          | 8                   | Su             | 251                |
| D.No.7-B | 500                          | 8                   | Su             | 243                |
| D.No.7-C | 500                          | 8                   | Su             | 233                |

Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %46’ya yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.9.** 500° C’de 10 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş (D.No.8)

| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| D.No.8-A | 500                          | 10                  | Su             | 247                |
| D.No.8-B | 500                          | 10                  | Su             | 260                |
| D.No.8-C | 500                          | 10                  | Su             | 238                |

Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %49 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.2.** 500°C de solüsyona alınmış ve suda soğutulmuş numunelerin çekme grafikleri

Şekil 4.2’den görüleceği üzere pekleşme açısından en iyi sonuç 10 saatte elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak ani soğumaya bağlı olarak tanelerin dislokasyon hareketlerinin azalmasıdır. 6 saatlik sürede ise deforme edilebilirliğinin en fazla olduğu görülmektedir.

#### 4.1.3 175°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi

500°C’de 2 saat beklemek suretiyle solüsyona alınan ve sonrada havada/suda soğutulan numunelerin 175 °C’de yapay yaşlandırılan numunelere ait çekme deneyi sonuçları çizelgeler ile gösterilmiştir.

**Çizelge 4.10.** 500° C’de 2 saat beklenip havada soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.9)

| D.No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.9-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava           | 222                |
| D.No.9-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava           | 222                |
| D.No.9-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava           | 210                |

Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %31 değerinde bir artış olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.11.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.10)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.10-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 268                |
| D.No.10-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 284                |
| D.No.10-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 260                |

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %63 değerinde bir artış olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.12.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup suda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.11)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.11-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 232                |
| D.No.11-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 229                |
| D.No.11-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 234                |

Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %39 değerinde bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumun gerçekleşmesinin sebebi olarak; malzemenin ani

soğutulmasından dolayı mikro yapıda ani çökelmelerin yapay yaşlandırma işleminde tamamen çözülmemesi ve malzeme içerisinde empüriteler düşülmüştür.

**Çizelge 4.13.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.12)

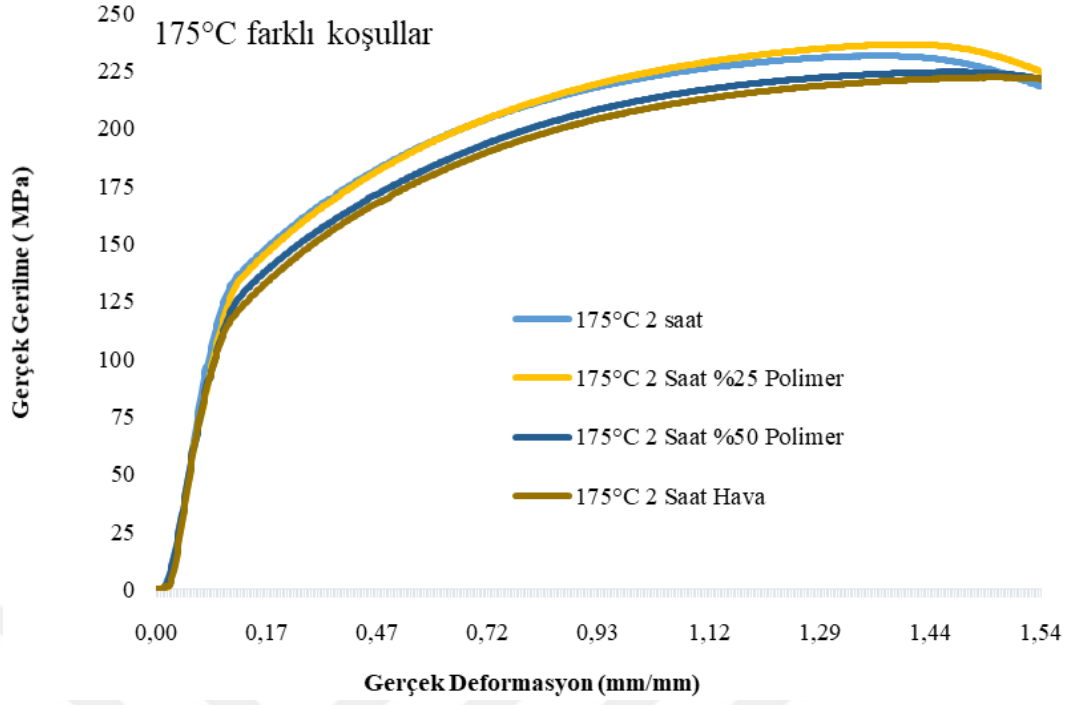
| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.12-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 236                |
| D.No.12-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 234                |
| D.No.12-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 221                |

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %38 değerinde bir artış olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.14.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 175° C’de 2 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.12)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.13-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer +%50 su | 224                |
| D.No.13-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer +%50 su | 218                |
| D.No.13-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer +%50 su | 209                |

Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %30 değerinde bir artış olduğu görülmektedir. Polimer oranının artırılması çekme testini sonuçlarını kötü olarak etkilemiştir. Düşünüşün sebebinin artan polimer derişimi olduğu görülmüş olup sebebinin artan polimer miktarının mikro yapıda kusur oluşturduğu düşünülmüştür. Bundan dolayı polimer katkısının düşürülmesi gerektiği kanaatine varılmıştır.



**Şekil 4.3.** 175°C de yapay yaşlandırılmış farklı koşuldaki numunelerin çekme grafikleri

500°C de 2 saat solüsyona almadan sonra su verme ve daha sonrasında 175°C’de 2 saat yapay yaşlandırıp havada soğutmanın en optimum olduğu Şekil 4.3’de görülmektedir.

#### 4.1.4 185°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi

185 °C yapay yaşlandırılan numunelere çekme deneyi uygulanmış ve sonuçlar çizelgeler ile gösterilmiştir.

**Çizelge 4.15.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.14)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.14-A | 500                          | 2                   | 185                              | 2                            | Hava           | 379                |
| D.No.14-B | 500                          | 2                   | 185                              | 2                            | Hava           | 388                |

Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %131 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.16.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup suda soğutulularak yapay yaşlandırması (D.No.15)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.15-A | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su             | 248                |
| D.No.15-B | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su             | 233                |
| D.No.15-C | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su             | 266                |

Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %45 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.17.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutulularak yapay yaşlandırması (D.No.16)

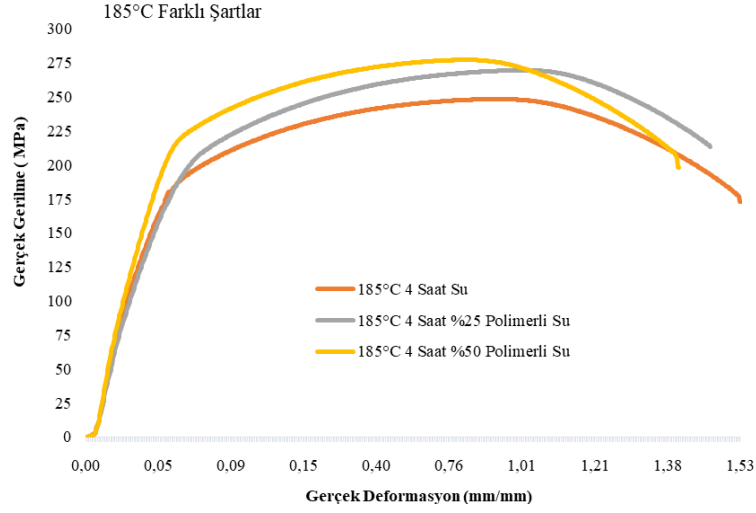
| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.16-A | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 Polimer +%75 su | 270                |
| D.No.16-B | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 polimer +%75 su | 280                |
| D.No.16-C | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 polimer +%75 su | 267                |

Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %67 e yakın bir artış olduğu görülmüştür. ,

**Çizelge 4.18.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutulularak yapay yaşlandırması (D.No.17)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu – (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|
| D.No.17-A | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %50 polimer +%50 su | 277                  |
| D.No.17-B | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %50 polimer +%50 su | 267                  |
| D.No.17-C | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %50 polimer +%50 su | 276                  |

Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %63 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.4.** AA6082 185°C yapay yaşlandırılmış farklı koşullardaki numunelerin çekme deneyleri sonuç grafiği

Şekil 4.4.'den anlaşılacağı üzere en iyi sonuçlara %50 polimerli su ortamında soğutulan numuneler ile ulaşılmıştır. Bu durumun nedeni su ortamında soğutulan alüminyum malzemenin ani soğumaya bağlı olarak tane irileşmesine fırsat verilmediği ön görülmektedir.

**Çizelge 4.19.** 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.18)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.18-A | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Hava           | 394                |
| D.No.18-B | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Hava           | 417                |

Çizelge 4.19 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %144 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.20.** 500° C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C'de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.19)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.19-A | 500                          | 2                   | 185                              | 6                            | Hava           | 408                |
| D.No.19-B | 500                          | 2                   | 185                              | 6                            | Hava           | 390                |
| D.No.19-C | 500                          | 2                   | 185                              | 6                            | Hava           | 399                |

Çizelge 4.20ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %140 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.21.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 8 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.20)

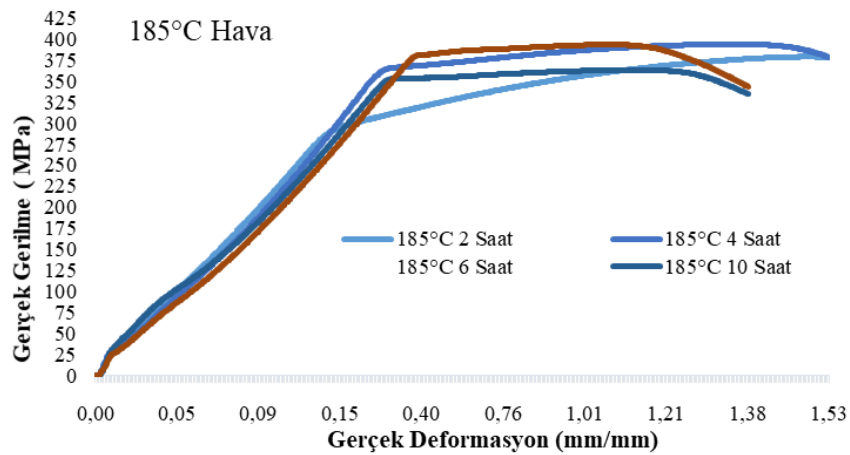
| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.20-A | 500                          | 2                   | 185                              | 8                            | Hava           | 393                |
| D.No.20-B | 500                          | 2                   | 185                              | 8                            | Hava           | 392                |
| D.No.20-C | 500                          | 2                   | 185                              | 8                            | Hava           | 389                |

Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %135 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.22.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.21)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.21-A | 500                          | 2                   | 185                              | 10                           | Hava           | 363                |
| D.No.21-B | 500                          | 2                   | 185                              | 10                           | Hava           | 357                |
| D.No.21-C | 500                          | 2                   | 185                              | 10                           | Hava           | 398                |

Çizelge 4.22 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %124 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.5.** 185°C yapay yaşlandırılmış ve havada soğutulmuş numunelerin çekme grafikleri



Yaşlandırma süresinin en ideal sonuçlarının, 500°C de 4 saat solüsyona almadan sonra su verme ve daha sonrasında 185°C’de 4 saat yapay yaşlandırıp havada soğutma ile elde edildiği Şekil 4.5’de görülmektedir. Grafiğin elastik bölgesinde 45°’e yakın bir eğime sahip olduğu görülmektedir. Bu durum alaşımın yapay yaşlandırma sonrası sertlik değerine bağlı olarak gevrek davranış yerine sünek davranış sergilenmesindedir. Malzeme elastik limit bölgesinden çıktıktan sonra sünekliğini kaybedip pekleşmeye başlayarak ani kopma sergilemektedir.

#### 4.1.5 195°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi sonuçları

195 °C’de yapay yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonuçları çizelgelerde gösterilmiştir.

**Çizelge 4.23.** 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 2 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.22)

| D. No.     | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|------------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.22-A  | 545                          | 2                   | 195                              | 2                            | Su             | 381                |
| D.No.22-B  | 545                          | 2                   | 195                              | 2                            | Su             | 390                |
| D.No.22 -C | 545                          | 2                   | 195                              | 2                            | Su             | 386                |

Çizelge 4.23 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %132 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.24.** 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.23)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.23-A | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su             | 394                |
| D.No.23-B | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su             | 374                |
| D.No.23-C | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su             | 406                |

Çizelge 4.24 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %135 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.25.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.24)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.24-A | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su             | 264                |
| D.No.24-B | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su             | 272                |
| D.No.24-C | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su             | 234                |

Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %154 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.26.** 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 6 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.27)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.27-A | 545                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su             | 363                |
| D.No.27-B | 545                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su             | 352                |
| D.No.27-C | 545                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su             | 381                |

Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %120 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.27.** 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 8 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.28)

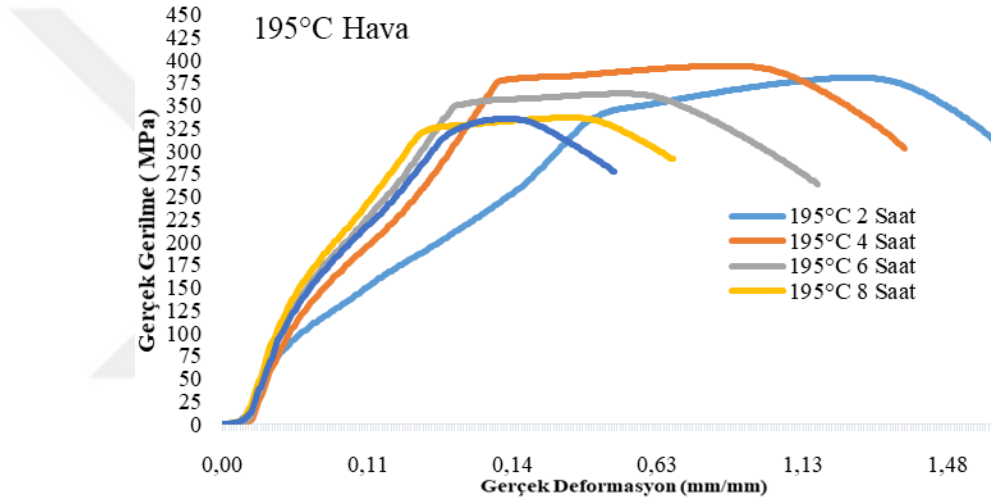
| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.28-A | 545                          | 2                   | 195                              | 8                            | Su             | 337                |
| D.No.28-B | 545                          | 2                   | 195                              | 8                            | Su             | 340                |
| D.No.28-C | 545                          | 2                   | 195                              | 8                            | Su             | 347                |

Çizelge 4.27 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %105 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.28.** 545° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 10 saat tutulup havada soğutulularak yapay yaşlandırması (D.No.29)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C ) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C ) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.29-A | 545                           | 2                   | 195                               | 10                           | Su             | 335                |
| D.No.29-B | 545                           | 2                   | 195                               | 10                           | Su             | 354                |
| D.No.29-C | 545                           | 2                   | 195                               | 10                           | Su             | 345                |

Çizelge 4.28 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %107 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.6.** 195°C yapay yaşlandırılmış ve havada soğutulmuş numunelerin çekme grafikleri

En iyi sonuçların 500°C de 4 saat solüsyona almadan sonra su verme ve daha sonrasında 195°C 4 saat yapay yaşlandırıp havada soğutma ile elde edildiği Şekil 4.6’da görülmektedir. Grafiğin elastik bölgesinde 45°’e yakın bir eğimle gidildiği görülmektedir. Bu durum malzemenin yapay yaşlandırma sonrası sertlik değerine bağlı olarak gevrek davranış yerine sünek davranış sergilenmesindedir. Malzeme elastik limit bölgesinden çıktıktan sonra sünekliğini kayıp pekleşmeye başlayarak ani kopma göstermiştir.

**Çizelge 4.29.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 6 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.25)

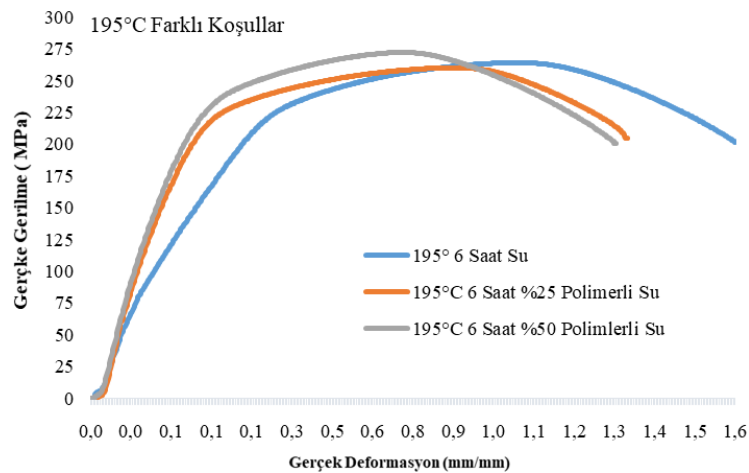
| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.25-A | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %25 polimer +%75 su | 260                |
| D.No.25-B | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %25 polimer +%75 su | 268                |
| D.No.25-C | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %25 polimer +%75 su | 268                |

Çizelge 4.29 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %59 e yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.30.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 195° C’de 6 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.26)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.26-A | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %50 polimer +%50 su | 272                |
| D.No.26-B | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %50 polimer +%50 su | 280                |
| D.No.26-C | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %50 polimer +%50 su | 252                |

Çizelge 4.30 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %61 değerine yakın bir artış olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.7.** AA6082 195°C yapay yaşlandırılmış farklı koşullardaki numunelerin çekme deneyleri sonuç grafiği

En ideal yaşlandırma şartlarının 500°C’de 4 saat solüsyona almadan sonra su verme ve daha sonrasında 195°C’de 6 saat yapay yaşlandırıp %50 polimerli suda soğutulmasından elde edildiği Şekil 4.7’ den görülmektedir.

#### 4.1.6 220°C yapay yaşlandırmanın çekme deneyi

220 °C’de yapay yaşlandırılan numunelerin çekme deneyi sonuçları çizelgelerde gösterilmiştir.

**Çizelge 4.31.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.30)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi ( h ) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.30-A | 500                          | 2                     | 220                              | 10                           | Su             | 153                |
| D.No.30-B | 500                          | 2                     | 220                              | 10                           | Su             | 164                |
| D.No.30-C | 500                          | 2                     | 220                              | 10                           | Su             | 150                |

Çizelge 4.31 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %6 değerine yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.32.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %25 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.31)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi ( h ) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.31-A | 500                          | 2                     | 220                              | 10                           | %25 polimer +%75 su | 159                |
| D.No.31-B | 500                          | 2                     | 220                              | 10                           | %25 polimer +%75 su | 148                |
| D.No.31-C | 500                          | 2                     | 220                              | 10                           | %25 polimer +%75 su | 153                |

Çizelge 4.32 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %8 değerine yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.33.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.32)

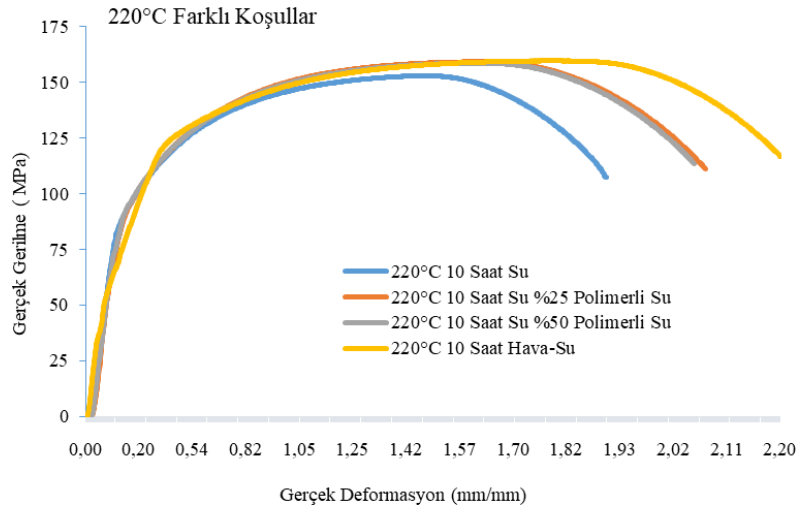
| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|
| D.No.32-A | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %50 polimer +%75 su | 159                |
| D.No.32-B | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %50 polimer +%75 su | 148                |
| D.No.32-C | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %50 polimer +%75 su | 143                |

Çizelge 4.33 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %-10 değerine yakın bir artış olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.34.** 500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 220° C’de 10 saat tutulup %50 polimer katkılı sıvıda soğutularak yapay yaşlandırması (D.No.33)

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Çekme Sonucu (MPa) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| D.No.33-A | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava           | 160                |
| D.No.33-B | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava           | 154                |
| D.No.33-C | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava           | 150                |

Çizelge 4.34 ve Çizelge 4.1 kıyaslandığında %-7 değerine yakın bir artış olduğu görülmüştür.



**Şekil 4.8.** AA6082 220° C yapay yaşlandırılmış ve farklı durumdaki numunelerin çekme deneyleri sonuç grafiği

Yaşlandırma şartları arasında en ideal sonuçların 500°C’de 4 saat solüsyona almadan sonra su verme ve daha sonrasında 220°C’de 10 saat yapay yaşlandırıp suda soğutmadan elde edildiği Şekil 4.8’den görülmektedir.

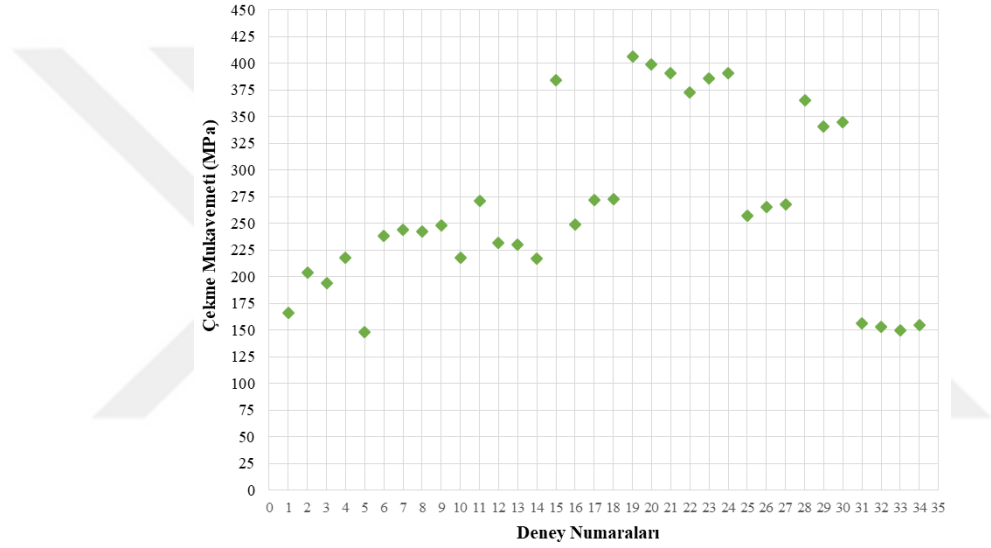
#### 4.2 Çekme Deneyi Sonuçları Değerlendirme

ASTM B557 M 02A standardına uygun olarak üçer adet hazırlanan numuneler farklı koşullarda solüsyona alınmış ve daha sonrasında yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Sonrasında her numune çekme deneyleri gerçekleştirilmiş, çizelgeler ve grafiklerle bu çekme sonuç değerleri verilmiştir. Çizelge 4.35’de bu tüm koşullar bir arada verilmiştir. Şekil 4.9’da da bu değerler grafik olarak verilmiştir. Bu değerlendirme gösteriyor ki çeliğe kıyasla **en ideal çekme ve sertlik değeri 185°C 4 saat** koşulunda elde edilmiştir.

**Çizelge 4.35.** AA6082 farklı koşullardaki ortalama çekme sonuçları

| D. No.         | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Ortalama Çekme Sonucu (MPa) |
|----------------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------------------|
| D.No.0         | -                            | -                   | -                                | -                            | -              | 166                         |
| D.No.1         | 500                          | 4                   | -                                | -                            | Hava           | 204                         |
| D.No.2         | 500                          | 6                   | -                                | -                            | Hava           | 194                         |
| D.No.3         | 500                          | 8                   | -                                | -                            | Hava           | 218                         |
| D.No.4         | 500                          | 10                  | -                                | -                            | Hava           | 148                         |
| D.No.5         | 500                          | 4                   |                                  |                              | Su             | 238                         |
| D.No.6         | 500                          | 6                   |                                  |                              | Su             | 244                         |
| D.No.7         | 500                          | 8                   |                                  |                              | Su             | 242                         |
| D.No.8         | 500                          | 10                  |                                  |                              | Su             | 248                         |
| D.No.9         | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava           | 218                         |
| D.No.10        | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 271                         |
| D.No.11        | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Su             | 232                         |
| D.No.12        | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer    | 230                         |
| D.No.13        | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer    | 217                         |
| D.No.14        | 500                          | 2                   | 185                              | 2                            | Hava           | 384                         |
| D.No.15        | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su             | 249                         |
| D.No.16        | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 Polimer    | 272                         |
| D.No.17        | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %50 polimer    | 273                         |
| <b>D.No.18</b> | <b>500</b>                   | <b>2</b>            | <b>185</b>                       | <b>4</b>                     | <b>Hava</b>    | <b>406</b>                  |
| D.No.19        | 500                          | 2                   | 185                              | 6                            | Hava           | 399                         |
| D.No.20        | 500                          | 2                   | 185                              | 8                            | Hava           | 391                         |
| D.No.21        | 500                          | 2                   | 185                              | 10                           | Hava           | 373                         |
| D.No.22        | 545                          | 2                   | 195                              | 2                            | Su             | 386                         |

| Çizelge 4.35 ( Devam) |     |   |     |    |             |     |
|-----------------------|-----|---|-----|----|-------------|-----|
| D.No.23               | 545 | 2 | 195 | 4  | Su          | 391 |
| D.No.24               | 500 | 2 | 195 | 6  | Su          | 257 |
| D.No.25               | 500 | 2 | 195 | 6  | %25 polimer | 265 |
| D.No.26               | 500 | 2 | 195 | 6  | %50 polimer | 268 |
| D.No.27               | 545 | 2 | 195 | 6  | Su          | 365 |
| D.No.28               | 545 | 2 | 195 | 8  | Su          | 341 |
| D.No.29               | 545 | 2 | 195 | 10 | Su          | 345 |
| D.No.30               | 500 | 2 | 220 | 10 | Su          | 156 |
| D.No.31               | 500 | 2 | 220 | 10 | %25 polimer | 153 |
| D.No.32               | 500 | 2 | 220 | 10 | %50 polimer | 150 |
| D.No.33               | 500 | 2 | 220 | 10 | Hava        | 155 |

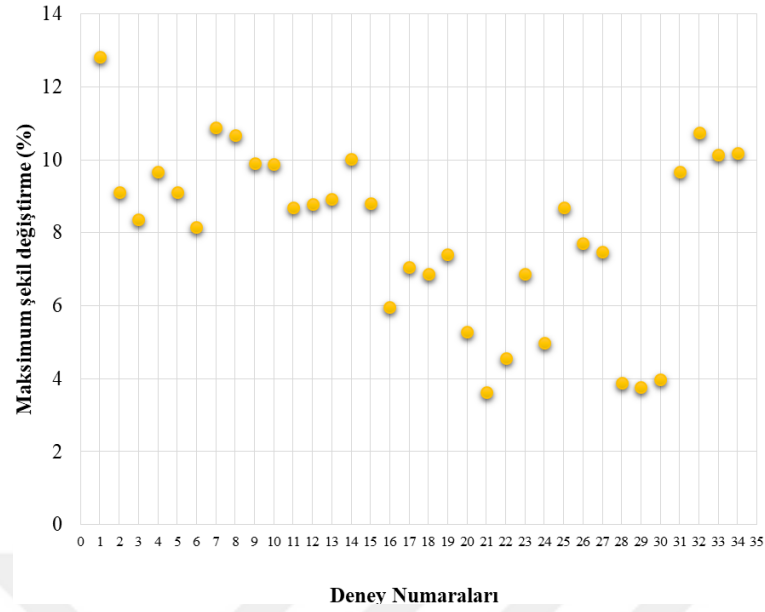


**Şekil 4.9.** AA6082'ye uygulanan farklı yaşlandırma şartlarında elde edilen çekme mukavemeti değerleri

Şekil 4.9' dan da anlaşıldığı üzere en yüksek çekme gerilmesi 18 numaralı numunede görülmüştür. 185°C 4 saat hava ortamında elde edilmiştir. Lakin 195°C değerinin de ayrıca 185°C koşuluna yakın bir değere sahip olduğu görülmektedir. Proses şartları ve enerji verimlilikler bir arada kıyaslandığında 185°C derece koşulunun enerji verimliliği açısından %14 e yakın daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Grafik üç kategoride incelenebilmektedir. Bunlar 150 MPa altındaki değerler, 150 MPa ile 300 MPa arasındaki değerler ve 300 MPa üzerindeki değerler olarak sınıflandırılabilir. Bu duruma bakıldığında ise 300 MPa üzerinde olan numuneler 35 adet çekme deneyinin %29 unu oluşturmaktadır.





**Şekil 4.10.** AA6082'ye uygulanan farklı yaşlandırma şartlarında maksimum şekil değıştirme değeri

Şekil 4.10.'dan da anlaşıldığı üzere çekme deneyi sonucunda en fazla birim deformasyon yapay yaşlandırma işlemi uygulanmayan AA6082 T0 durumunda görülmektedir. Çekme deneyinde en yüksek değeri deney no 18 numaralı numune ise %7,42 deformasyona sahip olmaktadır.

Şekil 4.10'daki grafiğe bakıldığında maksimum uzama üç kategoride incelenebilmektedir. Bunlar %6 ve altındaki değeri, %6 ile %12 arasındaki değeri ve %12 üzerinde olan değeri olarak sınıflandırılabilir. Birim deformasyon miktarının fazla olması malzemenin sünek davranış, az olması malzemenin gevrek davranış olarak yorumlanmaktadır. Değeri yüksekliği deforme edilebilirliğin yüksek olduğunu da göstermektedir.

### 4.3 Sertlik Ölçümü

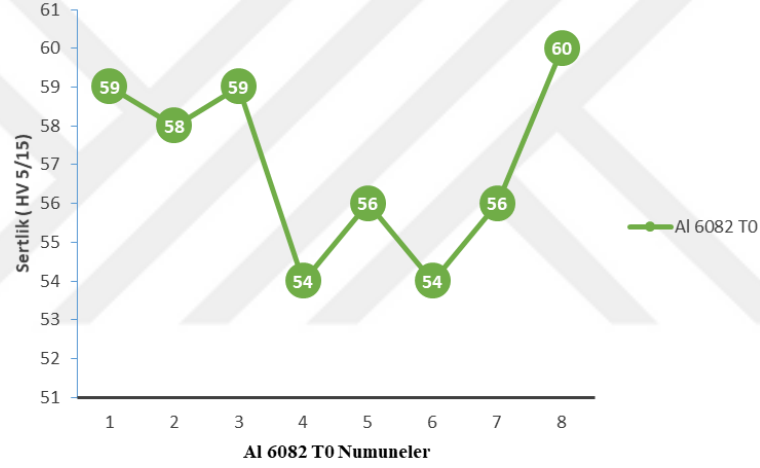
Alaşımın yapay yaşlandırma yapılmadan önceki hallerinin sertlik dağılımları ASTM E 92'ye uygun olacak şekilde hazırlanan her numunenin 10 farklı noktasında HV 5/15 (15 saniye süresince 5 kg yükleme) parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. 10 farklı sertlik değeri ortalamaları alınarak çizelgeler olarak verilmiştir.

### 4.3.1 AA6082 T0 sertlik sonuçları

Alaşıma yaşlandırma işlemi uygulanmadan T0 koşullundaki numunelerin sertlik değerleri Çizelge 4.36’da verilmiştir. Şekil 4.11’da ise sertlik dağılımı gösterilmiştir.

**Çizelge 4.36.** AA6082 T0 sertlik sonuçları (D.No.0)

| D. No.   | ORTALAMA SERTLİK | D. No.   | ORTALAMA SERTLİK |
|----------|------------------|----------|------------------|
| D.No.0-A | 59               | D.No.0-E | 56               |
| D.No.0-B | 58               | D.No.0-F | 54               |
| D.No.0-C | 59               | D.No.0-G | 56               |
| D.No.0-D | 54               | D.No.0-H | 60               |



**Şekil 4.11.** AA6082 T0 numunelerin sertlik dağılım grafiği

### 4.3.2 500° C solüsyona sertlik sonuçları

500°C’de solüsyona alınan su ve havada soğutulan numunelere çekme deneyi uygulanmış ve sonrasında sertlikleri ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.37.’de verilmiştir.

**Çizelge 4.37.** 500°C’de solüsyona alma

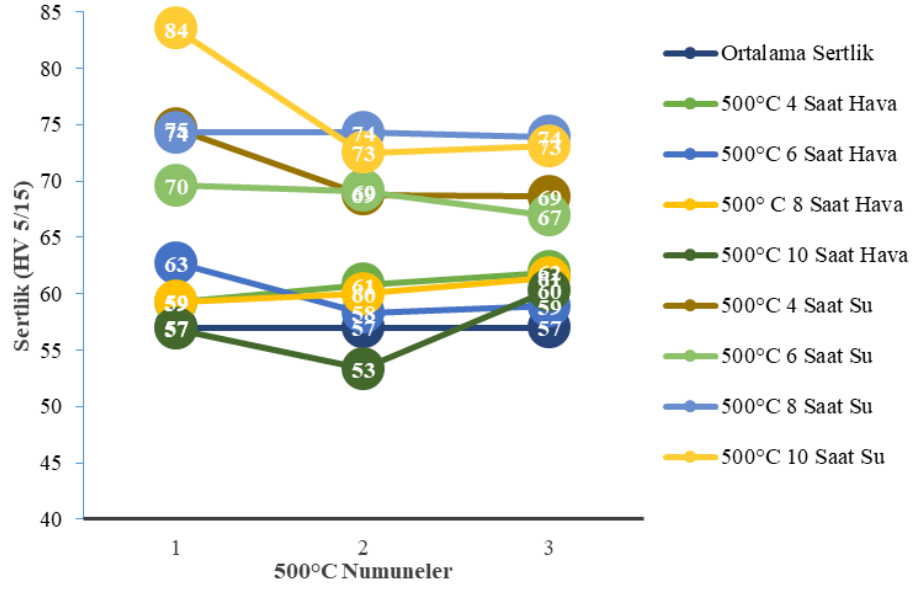
| D. No.   | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Ortalama Sertlik |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------|------------------|
| D.No.1-A | 500                          | 4                   | Hava           | 59,2             |
| D.No.1-B | 500                          | 4                   | Hava           | 60,8             |
| D.No.1-C | 500                          | 4                   | Hava           | 61,9             |

| Çizelge 4.37 ( Devam) |     |    |      |      |
|-----------------------|-----|----|------|------|
| D.No.2-B              | 500 | 6  | Hava | 58,3 |
| D.No.2-C              | 500 | 6  | Hava | 58,9 |
| D.No.3-A              | 500 | 8  | Hava | 59,3 |
| D.No.3-B              | 500 | 8  | Hava | 60,0 |
| D.No.3-C              | 500 | 8  | Hava | 61,4 |
| D.No.4-A              | 500 | 10 | Hava | 56,9 |
| D.No.4-B              | 500 | 10 | Hava | 53,3 |
| D.No.4-C              | 500 | 10 | Hava | 60,3 |
| D.No.5-A              | 500 | 4  | Su   | 74,6 |
| D.No.5-B              | 500 | 4  | Su   | 68,8 |
| D.No.5-C              | 500 | 4  | Su   | 68,6 |
| D.No.6-A              | 500 | 6  | Su   | 69,6 |
| D.No.6-B              | 500 | 6  | Su   | 69,1 |
| D.No.6-C              | 500 | 6  | Su   | 66,9 |
| D.No.7-A              | 500 | 8  | Su   | 74,3 |
| D.No.7-B              | 500 | 8  | Su   | 74,3 |
| D.No.7-C              | 500 | 8  | Su   | 73,9 |
| D.No.8-A              | 500 | 10 | Su   | 83,5 |
| D.No.8-B              | 500 | 10 | Su   | 72,5 |
| D.No.8-C              | 500 | 10 | Su   | 73,1 |

Çizelge 4.36 (T0 temperi) ile kıyaslandığında sertlik değerinde;

- 1 numaralı deneyde % 6
- 2 numaralı deneyde % 5
- 3 numaralı deneyde % 6
- 4 numaralı deneyde artış olmamış
- 5 numaralı deneyde % 24
- 6 numaralı deneyde % 20
- 7 numaralı deneyde % 30
- 8 numaralı deneyde % 34

civarında bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. 500°C'de solüsyona alınan numunelerin sertlik dağılımları

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere en yüksek ortalama sertlik 500°C 10 saat süreyle çözülen ve sonra suda soğutulan numuneden elde edilmiştir.

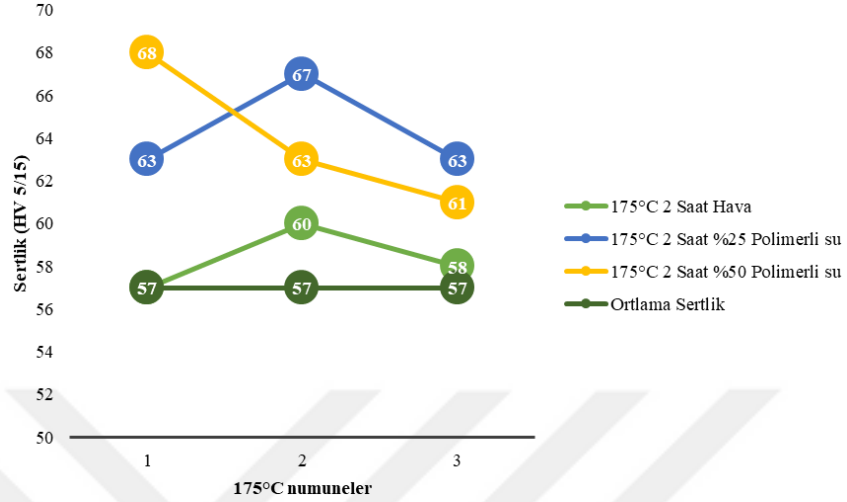
#### 4.3.3 175°C'de yapay yaşlandırma sertlik sonuçları

Ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.38'de verilmiştir.

Çizelge 4.38. 500°C'de 2 saat suda soğutma ve 175°C'de yapay yaşlandırma

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Ortalama Sertlik (HV 5/15) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|
| D.No.10-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava                | 57                         |
| D.No.10-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava                | 60                         |
| D.No.10-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | Hava                | 58                         |
| D.No.12-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 63                         |
| D.No.12-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 67                         |
| D.No.12-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 63                         |
| D.No.13-A | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer +%50 su | 68                         |
| D.No.13-B | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer +%50 su | 63                         |
| D.No.13-C | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %50 polimer +%50 su | 61                         |

Çizelge 4.36'daki sonuçlarla kıyaslandığında havada soğutma halinde %2 değerinde artış, %25 polimerli su ile soğutmada %13 değerinde artış, %50 polimerli su ile soğutmada %12 ye yakın bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.13. AA6082 175°C numunelerin sertlik sonuç grafiği

Şekil 4.13'den görüldüğü üzere en yüksek ortalama sertlik 175°C'de 2 saat yaşlandırılıp %25 polimerli su ile soğutma durumunda elde edilmiştir.

#### 4.3.4 185° C yapay yaşlandırmanın sertlik sonuçları

Ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.39'da verilmiştir.

Çizelge 4.39. 500°C'de 2 saat suda soğutma ve 185° C'de yapay yaşlandırma

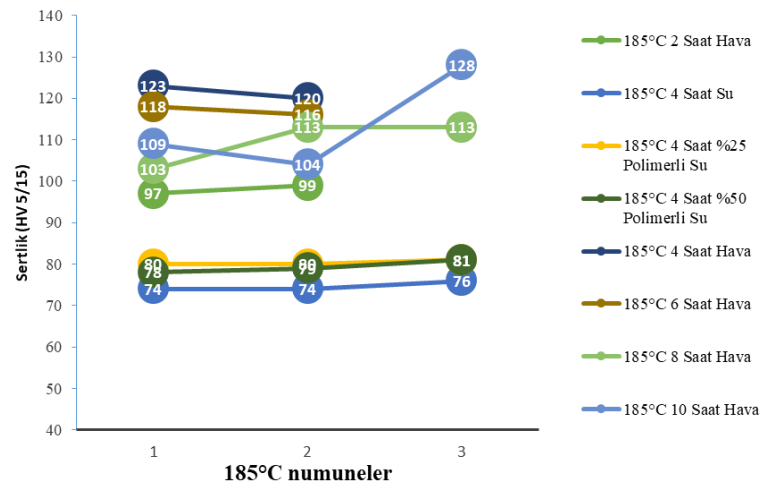
| Numune No. | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Ortalama Sertlik (HV 5/15) |
|------------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|
| D.No.14-A  | 500                          | 2                   | 185                              | 2                            | Hava                | 97                         |
| D.No.14-B  | 500                          | 2                   | 185                              | 2                            | Hava                | 99                         |
| D.No.15-A  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su                  | 74                         |
| D.No.15-B  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su                  | 74                         |
| D.No.15-C  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Su                  | 76                         |
| D.No.16-A  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 Polimer +%75 Su | 80                         |
| D.No.16-B  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 Polimer +%75 Su | 80                         |
| D.No.16-C  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %25 Polimer +%75 Su | 81                         |
| D.No.17-A  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %50 Polimer +%50 Su | 78                         |
| D.No.17-B  | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | %50 Polimer +%50 Su | 79                         |

| Çizelge 4.39 ( Devam) |     |   |     |    |                     |     |
|-----------------------|-----|---|-----|----|---------------------|-----|
| D.No.17-C             | 500 | 2 | 185 | 4  | %50 Polimer +%50 Su | 81  |
| D.No.18-A             | 500 | 2 | 185 | 4  | Hava                | 123 |
| D.No.18-B             | 500 | 2 | 185 | 4  | Hava                | 120 |
| D.No.19-A             | 500 | 2 | 185 | 6  | Hava                | 118 |
| D.No.19-B             | 500 | 2 | 185 | 6  | Hava                | 116 |
| D.No.19-C             | 500 | 2 | 185 | 6  | Hava                | 120 |
| D.No.20-A             | 500 | 2 | 185 | 8  | Hava                | 103 |
| D.No.20-B             | 500 | 2 | 185 | 8  | Hava                | 113 |
| D.No.20-C             | 500 | 2 | 185 | 8  | Hava                | 113 |
| D.No.21-A             | 500 | 2 | 185 | 10 | Hava                | 109 |
| D.No.21-B             | 500 | 2 | 185 | 10 | Hava                | 104 |
| D.No.21-C             | 500 | 2 | 185 | 10 | Hava                | 128 |

Çizelge 4.36 ile kıyaslandığında;

- 14 numaralı deneyde % 72
- 15 numaralı deneyde % 31
- 16 numaralı deneyde % 41
- 17 numaralı deneyde % 39
- 18 numaralı deneyde % 113
- 19 numaralı deneyde % 107
- 20 numaralı deneyde % 92
- 21 numaralı deneyde % 99

civarında bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14. AA6082 185°C numunelerin sertlik sonuç grafiği

Şekil 4.14'den görüldüğü üzere en yüksek ortalama sertlik 185°C'de 4 saat havada soğutma durumunda elde edilmiştir.

#### 4.3.5 195° C'de yapay yaşlandırmanın sertlik sonuçları

195 °C de farklı koşullarda yapay yaşlandırılarak hazırlanan numunelere çekme deneyi uygulanmış ve sonrasında sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri ASTM E 92'e uygun olacak şekilde hazırlanan her numunenin 10 farklı noktasında HV 5/15 olarak sertlikleri ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerleri kayıt altına alınmıştır. 10 farklı sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak çizelgeler olarak verilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.40'da verilmiştir.

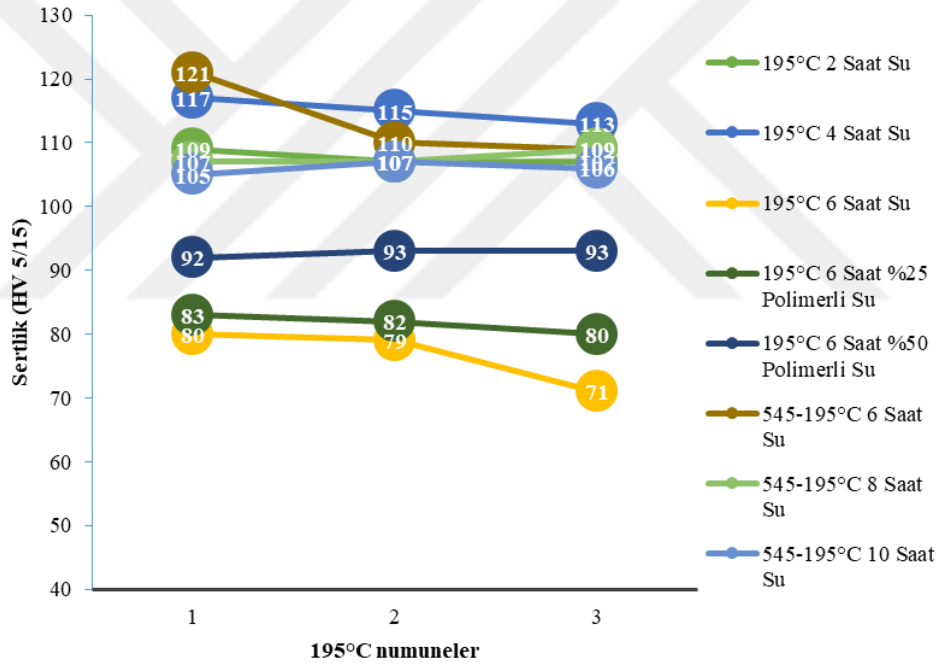
**Çizelge 4.40.** 500°C'de 2 saat suda soğutma 195° C'de yapay yaşlandırma

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Ortalama Sertlik (HV 5/15) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|
| D.No.22-A | 545                          | 2                   | 195                              | 2                            | Su                  | 109                        |
| D.No.22-B | 545                          | 2                   | 195                              | 2                            | Su                  | 107                        |
| D.No.23-A | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su                  | 117                        |
| D.No.23-B | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su                  | 115                        |
| D.No.23-C | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su                  | 113                        |
| D.No.24-A | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su                  | 80                         |
| D.No.24-B | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su                  | 79                         |
| D.No.24-C | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su                  | 71                         |
| D.No.25-A | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %25 polimer +%75 su | 83                         |
| D.No.25-B | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %25 polimer +%75 su | 82                         |
| D.No.25-C | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %25 polimer +%75 su | 80                         |
| D.No.26-A | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %50 polimer +%50 su | 92                         |
| D.No.26-B | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %50 polimer +%50 su | 93                         |
| D.No.26-C | 500                          | 2                   | 195                              | 6                            | %50 polimer +%50 su | 93                         |
| D.No.27-A | 545                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su                  | 121                        |
| D.No.27-B | 545                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su                  | 110                        |
| D.No.27-C | 545                          | 2                   | 195                              | 6                            | Su                  | 109                        |
| D.No.28-A | 545                          | 2                   | 195                              | 8                            | Su                  | 107                        |
| D.No.28-B | 545                          | 2                   | 195                              | 8                            | Su                  | 107                        |
| D.No.28-C | 545                          | 2                   | 195                              | 8                            | Su                  | 109                        |
| D.No.29-A | 545                          | 2                   | 195                              | 10                           | Su                  | 105                        |
| D.No.29-B | 545                          | 2                   | 195                              | 10                           | Su                  | 107                        |
| D.No.29-C | 545                          | 2                   | 195                              | 10                           | Su                  | 106                        |

Çizelge 4.36 ile kıyaslandığında;

- 22 numaralı deneyde % 89
- 23 numaralı deneyde % 102
- 24 numaralı deneyde % 35
- 25 numaralı deneyde % 43
- 26 numaralı deneyde % 63
- 27 numaralı deneyde % 99
- 28 numaralı deneyde % 89
- 29 numaralı deneyde % 86

civarında bir artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.15. AA6082 195°C numunelerin sertlik sonuç grafiği

Şekil 4.15'den görüldüğü üzere en yüksek ortalama sertlik 195°C'de 4 saat süreyle havada soğutma durumunda elde edilmiştir.

#### 4.3.6 220° C'de yapay yaşlandırmanın sertlik sonuçları

220 °C'de farklı koşullarda yapay yaşlandırılarak hazırlanan numunelere çekme deneyi uygulanmış ve sonrasında sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri ASTM E 92'e uygun



olacak şekilde hazırlanan her numunenin 10 farklı noktasında HV 5/15 olarak sertlikleri ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerleri kayıt altına alınmıştır. 10 farklı sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak çizelgeler olarak verilmiştir. Ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.41’de verilmiştir.

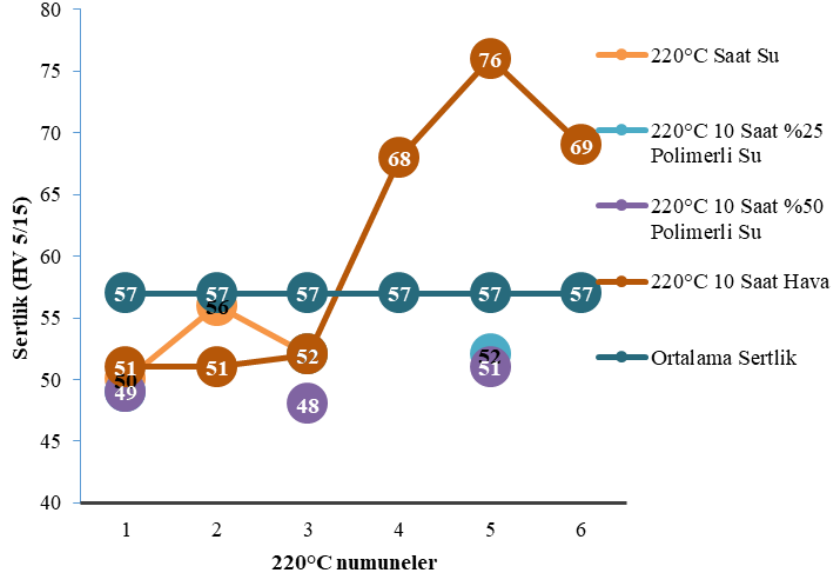
**Çizelge 4.41.** 500°C’de 2 saat suda soğutma 220° C’de yapay yaşlandırma

| D. No.    | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı       | Ortalama Sertlik (HV 5/15) |
|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|
| D.No.30-A | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Su                   | 50                         |
| D.No.30-B | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Su                   | 56                         |
| D.No.30-C | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Su                   | 52                         |
| D.No.31-A | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %25 polimer + %75 su | 49                         |
| D.No.31-B | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %25 polimer + %75 su | 52                         |
| D.No.31-C | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %25 polimer + %75 su | 52                         |
| D.No.32-A | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %50 polimer + %75 su | 49                         |
| D.No.32-B | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %50 polimer+ %75 su  | 48                         |
| D.No.32-C | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | %50 polimer+ %75 su  | 51                         |
| D.No.33-A | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava                 | 51                         |
| D.No.33-B | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava                 | 51                         |
| D.No.33-C | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava                 | 52                         |
| D.No.33-D | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava                 | 68                         |
| D.No.33-E | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava                 | 76                         |
| D.No.33-F | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Hava                 | 69                         |

Çizelge 4.36 ile kıyaslandığında;

- 30 numaralı deneyde % - 8
- 31 numaralı deneyde % -11
- 32 numaralı deneyde %- 13
- 33 numaralı deneyde %-10

civarında bir azalma olduğu görülmüştür. Alaşım T0 koşulundan daha yumuşak hale gelmiştir.



**Şekil 4.16.** AA6082 220°C numunelerin sertlik sonuç grafiği

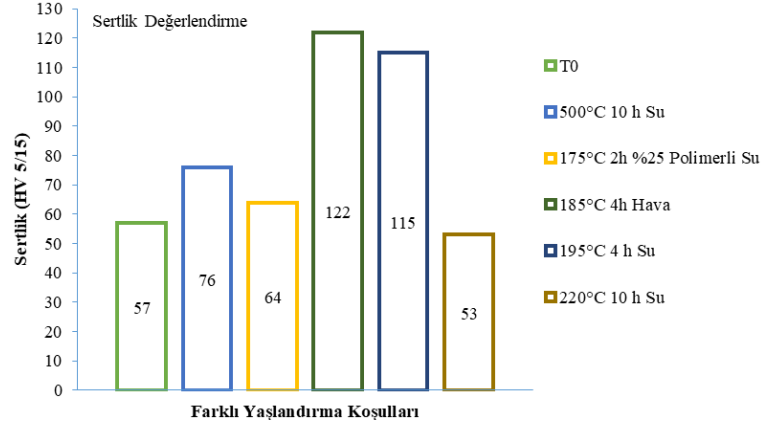
Şekil 4.16'dan görüldüğü üzere en yüksek ortalama sertlik 220°C'de 10 saat süreyle yaşlandırılan ve suda soğutulan durumda elde edilmiştir.

#### 4.4 Sertlik Ölçüm Sonuçları Değerlendirme

Çizelge 4.42'de bu tüm durumlardaki değerler verilmiş ve Şekil 4.17'de de grafik halinde kıyaslanmıştır. Bu değerlendirme gösteriyor ki çeliğe kıyasla en ideal çekme ve sertlik değeri 185°C 4 saat koşulunda elde edilmiştir.

**Çizelge 4.42.** AA6082 farklı koşullar ortalama sertlik sonuçları

| D. No.  | Solüsyona Alma Sıcaklık (°C) | Solüsyon Süresi (h) | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Ortalama Sertlik (HV 5/15) |
|---------|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------|
| D.No.0  | -                            | -                   | -                                | -                            | -                   | 57                         |
| D.No.8  | 500                          | 10                  |                                  |                              | Su                  | 76                         |
| D.No.12 | 500                          | 2                   | 175                              | 2                            | %25 polimer +%75 su | 64                         |
| D.No.18 | 500                          | 2                   | 185                              | 4                            | Hava                | 122                        |
| D.No.23 | 545                          | 2                   | 195                              | 4                            | Su                  | 115                        |
| D.No.30 | 500                          | 2                   | 220                              | 10                           | Su                  | 53                         |



Şekil 4.17. AA6082 farklı koşullar ortalama sertlik sonuç grafiği

Şekil 4.17’den de anlaşıldığı üzere en yüksek sertlik 185°C 4 saat hava ortamında elde edilmiştir. Lakin 195°C değeri de 185°C koşuluna yakın bir değere sahip olduğu görülmektedir. Proses şartlarına ve enerji verimliliği açısından kıyaslandığında 185°C derece koşulunun enerji verimliliği açısından %14 e yakın daha avantajlı olduğu görülmektedir.

#### 4.5 Çentik Darbe Deney Sonuçları

Çentik darbe testi en ideal yaşlandırma durumu olan 185°C’de yapay yaşlandırma ve havada, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8 polimerli su ortamında soğutulma haline uygulanmıştır.

##### 4.5.1 AA6082 T0 çentik darbe deney sonuçları

AA6082 T0 koşulunda çentik darbe testi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.43’de sonuçlar verilmiştir. Elde edilen bu değerler gerçekleştirilecek olan çentik darbe deneylerinde kıyaslama için referans olarak alınmıştır.

Çizelge 4.43. AA6082 T0 Çentik darbe deneyi sonuçları (D.No.0)

| D. No    | Soğutma Ortamı | Makine (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açısı (°) | Enerji (kgm) | Enerji (J/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|----------------|------------|-------------------|---------------|--------------|-----------------------------|
| D.No.0-A | -              | 75         | 151               | 86            | 12           | 140                         |
| D.No.0-B | -              | 90         | 151               | 75            | 14           | 168                         |
| D.No.0-C | -              | 72         | 150               | 88            | 11           | 134                         |



**Fotoğraf 4.1.** AA6082 T0 çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyleri

Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.1.'de verilmiştir.

#### 4.5.2 %2 polimerli ortam numuneleri

Çentik darbe testi sonuçları Çizelge 4.44'de verilmiştir.

**Çizelge 4.44.** 185°C'de 4 saat %2 polimerli ortam (D.No.34)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açısı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.34-A | 185                              | 4                            | %2 Polimer+%98 Su   | 63                 | 151               | 109           | 7            | 80                                 |
| D.No.34-B | 185                              | 4                            | %2 Polimer + %98 Su | 76                 | 150               | 103           | 8            | 96                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 41 oranında azalmıştır. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir.

Deney gerçekleştirildikten sonra kırılma yüzeylerinin fotoğrafları çekilmiş ve ISO 148-1 figüre C ye göre kırılma durumları analiz edilmiştir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.2.'de verilmiştir.



**Fotoğraf 4.2.** %2 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.3 %3 polimerli ortam numuneleri

Çentik darbe deneyi sonuçları Çizelge 4.45.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.45.** %3 polimerli ortam (D.No.35)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı     | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.35-A | 185                              | 4                            | %3 Polimer+ %97 Su | 57                 | 150               | 113         | 6            | 73                                 |
| D.No.35-B | 185                              | 4                            | %3 polimer+ %97 Su | 68                 | 150               | 107         | 7            | 86                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 47 oranında azalmıştır. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.3'de verilmiştir.



**Fotoğraf 4.3.** %3 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.4 %4 polimerli ortam numuneleri

AA6082 serisi önce 500°C de 2 saat solüsyona alma işlemine tabi tutulmuş ardından suda soğutulmuştur. Yapay yaşlandırma sıcaklığı olarak 185°C de 4 saat yapay yaşlandırma yapılmış ve %4 polimerli sıvı yardımıyla soğutulmuştur. Tüm bu işlemlerden sonra ISO 148-1 uygun olan numunelere çentik darbe deneyi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.46.'da verilmiştir. Çentik darbe deneyinden sonra sertlik ölçümleri ASTM E 92'e uygun olacak şekilde her numunenin 10 farklı noktasında HV 5/15 olarak sertlikleri ölçülmüştür.

**Çizelge 4.46.** %4 polimerli ortam (D.No.36)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açısı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.36-A | 185                              | 4                            | %4 Polimer + %96 Su | 68                 | 150               | 107           | 7            | 86                                 |
| D.No.36-B | 185                              | 4                            | %4 Polimer + %96 Su | 61                 | 150               | 111           | 6            | 78                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 45 daha azdır. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.4'de verilmiştir.



**Fotoğraf 4.4.** %4 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.5 %5 polimerli ortam numuneleri

Çentik darbe deneyi sonuçları Çizelge 4.47'de verilmiştir.

**Çizelge 4.47.** %5 polimerli ortam (D.No.37)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı     | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.37-A | 185                              | 4                            | %5 Polimer+ %95 Su | 72                 | 150               | 105         | 7            | 91                                 |
| D.No.37-B | 185                              | 4                            | %5 Polimer+ %95 Su | 66                 | 151               | 108         | 7            | 84                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 41 daha azalmıştır. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.5’de verilmiştir.



**Fotoğraf 4.5.** %5 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.6 %6 polimerli ortam numuneleri

Çentik darbe deneyi sonuçları Çizelge 4.48’de verilmiştir.

**Çizelge 4.48.** %6 polimerli ortam (D.No.38)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.38-A | 185                              | 4                            | %6 Polimer + %94 Su | 73                 | 151               | 104         | 8            | 93                                 |
| D.No.38-B | 185                              | 4                            | %6 Polimer + %94 Su | 67                 | 150               | 108         | 7            | 85                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 40 daha azalmıştır. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.6’da verilmiştir.



**Fotoğraf 4.6.** %6 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.7 %7 polimerli ortam numuneleri

Çentik darbe deneyi sonuçları Çizelge 4.49’da verilmiştir. Çentik darbe testinden sonra sertlik ölçümleri ASTM E 92’e uygun olacak şekilde her numunenin 10 farklı noktasında HV 5/15 olarak sertlikleri ölçülmüştür.

**Çizelge 4.49.** %7 polimerli ortam (D.No.39)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açısı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.39-A | 185                              | 4                            | %7 Polimer + %93 Su | 45                 | 150               | 119           | 5            | 58                                 |
| D.No.39-B | 185                              | 4                            | %7 Polimer+ %93 Su  | 63                 | 150               | 110           | 6            | 79                                 |
| D.No.39-C | 185                              | 4                            | %7 Polimer + %93 Su | 67                 | 150               | 108           | 7            | 84                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 50 oranında azalmıştır. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.7’de verilmiştir.





**Fotoğraf 4.7.** %7 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.8 %8 polimerli ortam numuneleri

Çentik darbe testi sonuçlar Çizelge 4.50’de verilmiştir.

**Çizelge 4.50.** %8 polimerli ortam (D.No.40)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı        | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.40-A | 185                              | 4                            | %8 Polimer<br>+%92 Su | 75                 | 150               | 103         | 8            | 95                                 |
| D.No.40-B | 185                              | 4                            | %8 Polimer<br>+%92 Su | 73                 | 151               | 104         | 8            | 93                                 |
| D.No.40-C | 185                              | 4                            | %8 Polimer<br>+%92 Su | 62                 | 150               | 110         | 6            | 79                                 |

Çentik darbe testi yapıldıktan sonra T0 durumuna göre enerjiyi hapsedmesi % 40 daha az enerji hapsedmiştir. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.8.’de verilmiştir.



**Fotoğraf 4.8.** %8 polimerli ortam numunesi kırılma yüzeyleri

#### 4.5.9 500°C de 2 saat solüsyona alma 185°C havada soğutma

Çentik darbe testi sonuçları Çizelge 4.51’de verilmiştir.

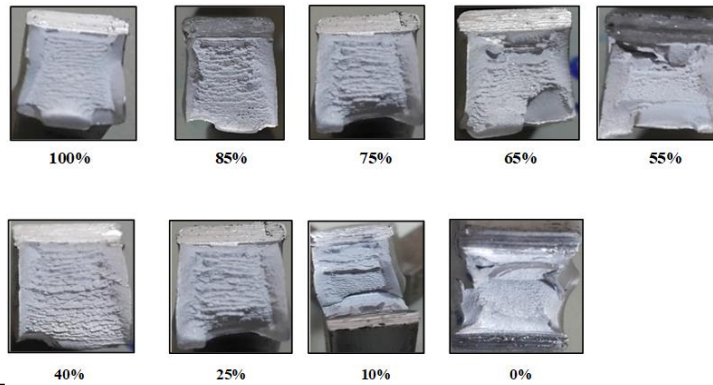
**Çizelge 4.51.** AA6082 hava da soğutma durumu (D.No.18)

| D. No.    | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı | Darbe enerjisi (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açısı (°) | Enerji (kgm) | Darbe tokluğu (J/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------|------------------------------------|
| D.No.18-A | 185                              | 4                            | Hava           | 62                 | 150               | 110           | 6            | 79                                 |
| D.No.18-B | 185                              | 4                            | Hava           | 66                 | 151               | 108           | 7            | 84                                 |

Numuneler T0 durumuna göre % 45 daha az enerji hapsedmiştir. Bu durum malzemenin sertlik ve gevrekliğinin arttığını göstermektedir. Isıl işlem adımları esnasında malzeme içerisinde bulunan kalıntılar çözülerek dislokasyon hareketlerini kısıtladığını ve bu durumun ani kırılmalara neden olacağını göstermektedir. Kırılma yüzeyleri Fotoğraf 4.9’da verilmiştir.



**Fotoğraf 4.9.** AA6082 Hava da soğutulmuş numunelerin çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyleri

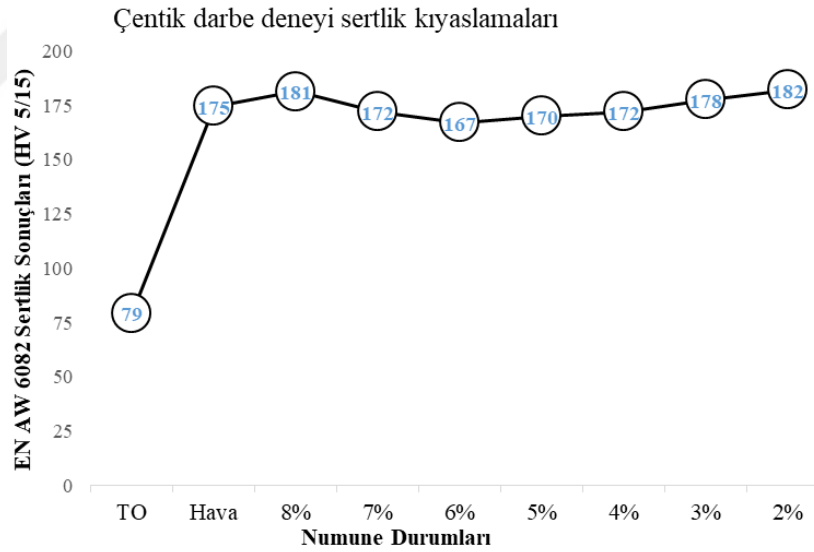


**Fotoğraf 4.10.** Çentik darbe deneyi sonrası numunelerin gevrek/sünek kırılma yüzeyleri

Fotoğraf 4.10'da ISO 148-1 C referans alınarak AA6082 için kırılma yüzey alanlarının ne kadarının gevrek olduğu, ne kadarının sünek olduğu verilmiştir. Bu yüzdesel değişimler oluşturulur iken çentikten sonra kırılıp-kırılmadıkları, kırılma kenar kalınlıkları, sünek ya da gevrek olmaları, kırılmadan sonra orta bölge de kalan alanlar gibi ölçümler yapılarak temel bir sıralama yapılmıştır. Fotoğraflar sırası ile düşük polimer sıvısı içeriğindeki yaşlandırmadan yüksek polimer sıvısına doğru sıralanmış olup, bu nedenle de yaşlandırma sıvısındaki polimer arttıkça içyapının gevrekleştiği görülmüştür. Polimer sıvısı konsantrasyonu arttıkça numunenin enerji absorbe etmesi azalmıştır. Fotoğraflardan da görüldüğü üzere numunelerin kırılma kenarları gittikçe artmıştır.

#### 4.5.10 Çentik-darbe enerjisi ve sertlik kıyaslamaları

AA6082 alaşımı çentik darbe deneyinin öncesinde 10 noktadan 5 kg lık yük altında vicker sertlik ölçüm cihazında sertlikleri ölçülmüştür. Ölçülen sertlikler ortalama sertlik değerleri olarak aşağıdaki Şekil 4.18.'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Çentik darbe deneyi numunelerin sertlik sonuç grafiği

Çekme deneyi sonrasında 185°C deki numunelerden ölçülen sertlik değeri ortalama 122 HV 5/15 (ölçümler çekme testinden sonra uygulanmış idi) iken çentik darbe numunelerinde ortalama sertlik değeri 175 HV 5/15 (ölçümler çentik darbe testinden önce uygulanmış) olarak bulunmuştur. Bu farkın, çekme sonrası numunelerde ön deformasyon olduğu öngörülmüştür. Çentik darbe numunelerin sertlik değerleri ön deformasyonsuz

ölçüldüğü için beklendiği gibi daha yüksek çıkmıştır. Thangarasu vd., (2014), Kilic vd., (2019) ön deformasyonun alüminyum esaslı alaşımlarda yumuşaya sebep verdiğini belirtmişlerdir. Bu durum çelik esaslı malzemelerde ise tersine bir etkiye sahiptir (Zulfi ve Akorda 2016).

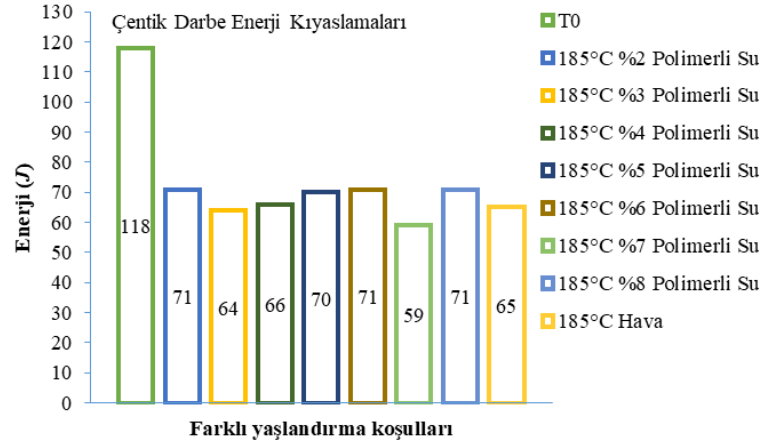
#### 4.5.11 Çentik darbe deneyi sonuçların değerlendirilmesi

Çizelge 4.52’de tüm değerler yapılan testlerin ortalamaları alınarak verilmiştir. Isıl işlem görmemiş AA6082 alaşımının en yüksek enerji emici olması beklenen bir durumdur. Her uygulanan ısıl işlemten sonra sertliğin arttığı, yapının gevrekleştiği ve neticede de kırılma enerjisinin azaldığı anlaşılmaktadır. En az enerji hapseden ise %7 polimerli su ortamında soğutulan numunede olmuştur.

**Çizelge 4.52. Çentik darbe enerjisi**

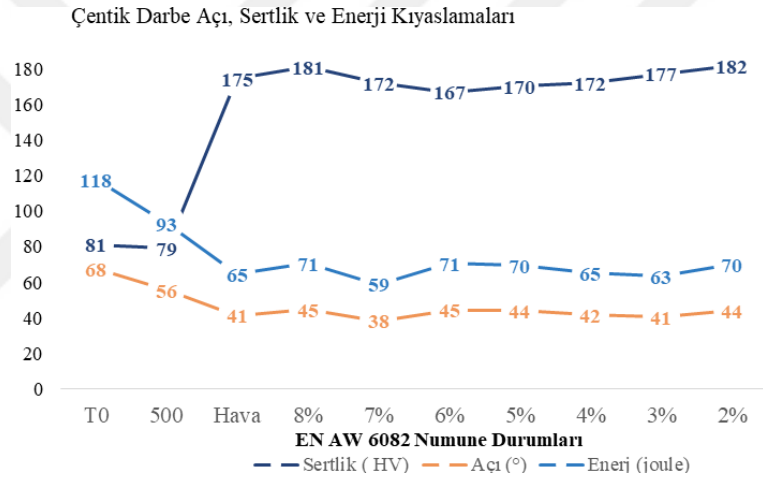
| D. No.  | Yapay Yaşlandırma Sıcaklığı (°C) | Yapay Yaşlandırma Süresi (h) | Soğutma Ortamı      | Makine (J) | Başlama Açısı (°) | Son Açı (°) | Ortalama Enerji (J/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|------------|-------------------|-------------|--------------------------------------|
| D.No.0  | -                                | -                            | -                   | 75         | 151               | 86          | 148                                  |
| D.No.34 | 185                              | 4                            | %2 Polimer +%98 Su  | 63         | 151               | 109         | 89                                   |
| D.No.35 | 185                              | 4                            | %3 Polimer + %97 Su | 57         | 150               | 113         | 80                                   |
| D.No.36 | 185                              | 4                            | %4 Polimer + %96 Su | 68         | 150               | 107         | 83                                   |
| D.No.37 | 185                              | 4                            | %5 Polimer+ %95 Su  | 72         | 150               | 105         | 88                                   |
| D.No.38 | 185                              | 4                            | %6 Polimer + %94 Su | 73         | 151               | 104         | 89                                   |
| D.No.39 | 185                              | 4                            | %7 Polimer + %93 Su | 45         | 150               | 119         | 74                                   |
| D.No.40 | 185                              | 4                            | %8 Polimer+ %92 Su  | 75         | 150               | 103         | 89                                   |
| D.No.18 | 185                              | 4                            | Hava                | 62         | 150               | 110         | 81                                   |

Şekil 4.19’da ise grafiksel kıyaslama verilmiştir.



Şekil 4.19. Çentik darbe enerjisi hapsedme yetenekleri

Şekil 4.20’de ise sarkaç açısı, sertlik ve enerji kıyaslaması birlikte verilmiştir.



Şekil 4.20. Çentik darbe sarkaç açısı, enerji ve sertlik kıyaslamaları

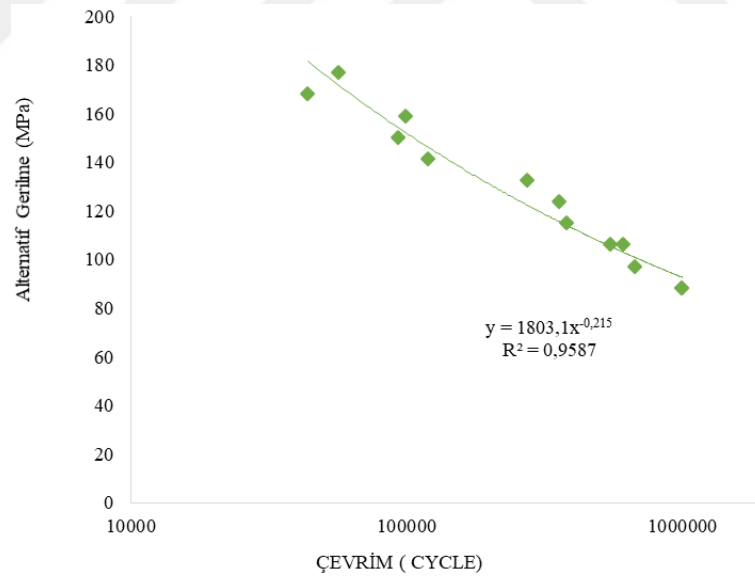
#### 4.6 Yorulma Deneyi Sonuçları

ASTM E606-92 standardına uygun olarak hazırlanmış olan numuneler 185°C de solüsyona alınıp 4 saat bekletilmiş ardından havada soğutulmuştur (çekme deneyinde gözlemlenen en iyi şart). Bu numuneler yorulma deneyine alınmış ve deney sonuçları Çizelge 4.53’de verilmiştir.

**Çizelge 4.53.** 185°C 4 saat S-N değerleri

| D. No.    | Kuvvet (kN) | Frekans (Hz) | Çevrim (Cycle) | Gerilme (MPa) |
|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------|
| D.No.18-A | 5           | 1            | 56.500         | 176.84        |
| D.No.18-P | 4,75        | 1            | 43.800         | 168.00        |
| D.No.18-B | 4,5         | 1            | 98.825         | 159.15        |
| D.No.18-N | 4,25        | 1            | 93.350         | 150.31        |
| D.No.18-C | 4           | 1            | 119.890        | 141.47        |
| D.No.18-L | 3,75        | 1            | 273.400        | 132.63        |
| D.No.18-D | 3,5         | 1            | 356.155        | 123.79        |
| D.No.18-M | 3,25        | 1            | 380.400        | 114.95        |
| D.No.18-E | 3           | 1            | 547.000        | 106.10        |
| D.No.18-G | 3           | 1            | 612.000        | 106.10        |
| D.No.18-K | 2,75        | 1            | 673.400        | 97.26         |
| D.No.18-F | 2,5         | 1            | 1.000.000      | 88.42         |
| D.No.18-H | 2,5         | 1            | 1.000.000      | 88.42         |

Çizelgedeki değerlerin daha anlamlı olması ve analizlerde kullanımının kolay olması amacı ile Şekil 4.21'deki gibi Wöhler grafiği çizilmiştir.

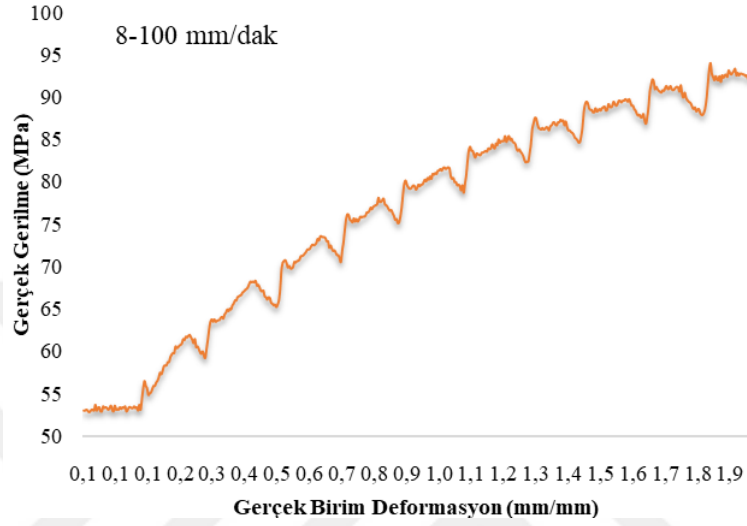


**Şekil 4.21.** AA6082 185°C 4 saat S-N grafiği

#### 4.7 Sıçrama Deney Sonuçları

AA6082 T0 durumundaki 3 numune ASTM B557 M 02A uygun olarak hazırlanarak çekme deney cihazında programlanarak sıçrama testine tabii tutulmuştur. Elastik data

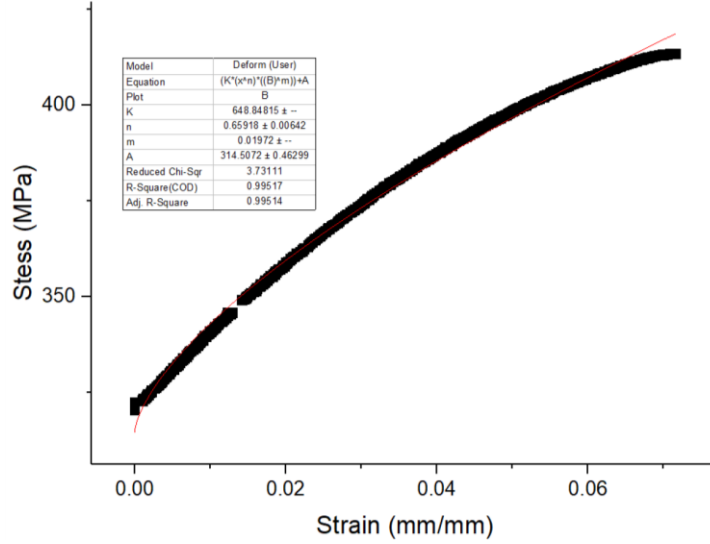
çıkartılmıştır. Maksimum gerilme değerinden sonrası çıkartılmıştır. Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiğinde çalışılmıştır. Bu deneyden birim deformasyon hızına duyarlılık katsayısı  $m$  tespit edilmiştir. Bu değer, pekleşme üsteli  $n$  ve mukavemet katsayısı  $C$  değerleri ile birlikte, DEFORM© programında malzeme modeli oluşturmak üzere kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.22.** AA6082 T0 sıçrama deneyi sonuç grafiği (D. No. 0) Sıçrama deney sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.54.'da verilmiştir.

**Çizelge 4.54.** AA6082 sıçrama deneyi sonuçları (D. No. 0)

| No. | $\sigma_1$ | $\sigma_j$ | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\frac{\sigma_j}{\sigma_1}$ | $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ | $\ln \frac{\sigma_j}{\sigma_1}$ | $\ln \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ | $m_j = \frac{\ln \frac{\sigma_j}{\sigma_1}}{\ln \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}$ | c      | m     | n    | y     |
|-----|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---|---|--------|-------|------|-------|
| 1   | 53,04      | 54,86      | 0,090           | 0,100           | 1,034                       | 1,111                                 | 0,034                           | 0,105                                     | 0,320   | 648,84 | 0,019 | 0,65 | 314,5 |
| 2   | 59,16      | 60,43      | 0,300           | 0,310           | 1,021                       | 1,033                                 | 0,021                           | 0,033                                     | 0,648   | -      | -     | -    | -     |
| 3   | 65,38      | 70,43      | 0,480           | 0,550           | 1,077                       | 1,146                                 | 0,074                           | 0,136                                     | 0,547   | -      | -     | -    | -     |
| 4   | 70,52      | 71,06      | 0,680           | 0,690           | 1,008                       | 1,015                                 | 0,008                           | 0,015                                     | 0,523   | -      | -     | -    | -     |
| 5   | 75,09      | 76,14      | 0,850           | 0,870           | 1,014                       | 1,024                                 | 0,014                           | 0,023                                     | 0,597   | -      | -     | -    | -     |
| 6   | 78,68      | 80,12      | 1,040           | 1,070           | 1,018                       | 1,029                                 | 0,018                           | 0,028                                     | 0,640   | -      | -     | -    | -     |



**Şekil 4.23.** Sıçrama deneyi curve fitting sonuç grafiği

Şekil 4.23'te 500°C'de 2 saat solüsyona alınan ve 185°C'de 4 saat yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin çekme deneyi sonuçları baz alınarak oluşturulmuştur. Bu grafik oluşturulurken çekme eğrisinin elastik kısmı atılmış ve kopmadan önceki maksimum değer alınarak hesaplanmıştır. Eğri uydurma fonksiyonu olarak Denklem 5.1 kullanılmış olup, epsilon nokta 100 mm/dak alınmıştır. Levenberg Marquardt algoritması kullanılmıştır. Denklem 5.1 çözümlenerek formüldeki “c”, “m”, “n”, “y”, değerleri hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 4.54'de verilmiştir. R<sup>2</sup> korelasyon değeri ise 0,99 olarak bulunmuştur.

#### 4.8 AA6082 Mikro Yapı Görünümleri

AA6082 alaşımı temel olarak Al, Mg, Si, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, elementlerini içermektedir. Elemental olarak Al temel elemandır. Bunun yanında yapı içerisinde en çok Mg ve Si geçiş elementleri bulunmaktadır. Bu elementler yapı içerisinde koyu olarak gözüken intermetalik Mg<sub>2</sub>Si fazlarını oluşturmaktadır. Yapı içerisinde bulunan Fe ve Mn elementleri çok küçük miktarlarda kirlilikler oluşturmaktadır. Al döküm sırasında Fe ile ikili, üçlü, dörtlü intermetalik fazlar oluşturmaktadır. Bunlar temel olarak Al-Fe, Al-Fe-Si ve Al-Fe-Mn-Si fazlarıdır. Beta fazı olarak adlandırılan demir ve silisyum içerikli bileşikler β-Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> yada β-Al<sub>5</sub>FeSi'dur. Bunlar yapı içerisinde saçaklanma (dendrite) olarak görülmektedir. Mikro yapıya bakıldığında intermetalik fazların tane sınırlarına yerleştiği görülmektedir. Mn ve Cr ise mikro yapılar içerisinde Fe içeriğini dengede tutan elementler



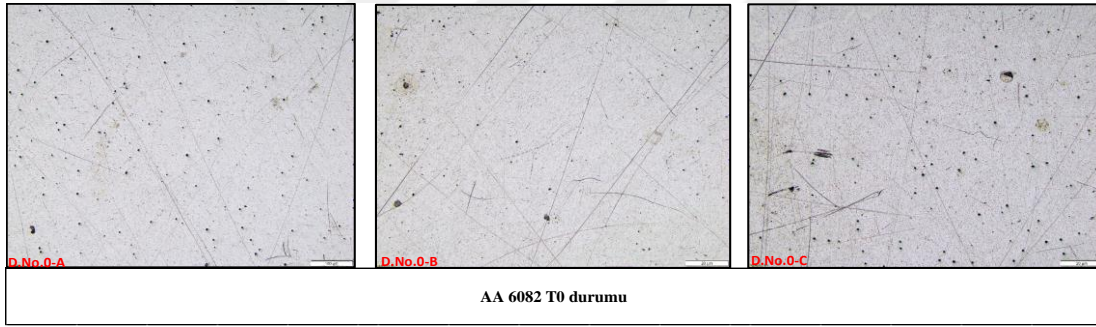
olarak görülmektedir. Bu fazlar  $\alpha$ -Al<sub>12</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si yada  $\alpha$ -Al<sub>12</sub>(FeCr)<sub>3</sub>Si dir. Bu fazlar mekanik özelliklere zararlı yapılar olarak bilinmektedir.

Mikro yapıda incelemesinde kullanılan sembollerin açıklamaları aşağıdaki gibidir.

□ : Mg<sub>2</sub>Si, △ :  $\alpha$ -dendrite ○ : Al Ɔ :  $\beta$ -dendrite

#### 4.8.1 AA6082 T0 mikro yapı görünüşleri

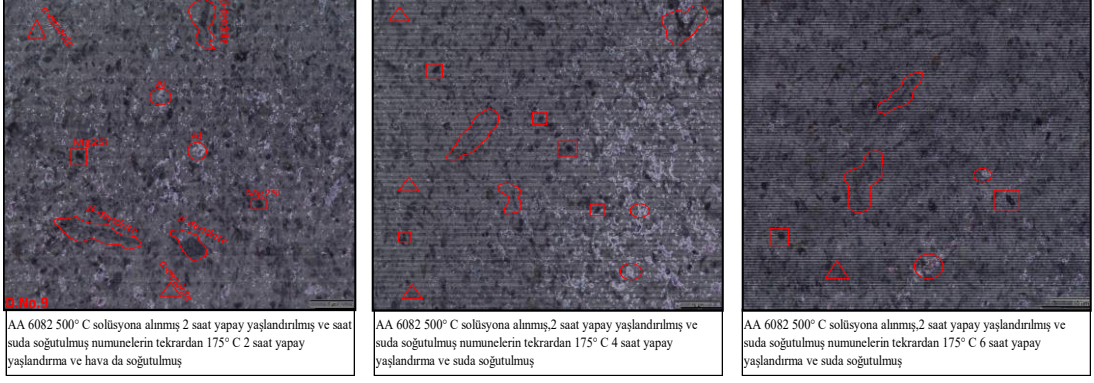
AA6082 alaşımının mikro yapı numuneleri optik mikroskopta 20  $\mu$ m büyütülmüş ve fotoğrafları çekilmiştir. AA6082 T0 için mikro yapı görüntüleri Fotoğraf 4.11’de verilmiştir. Fotoğrafta görülen siyahlıklar dağlama süresinin uzun olmasından kaynaklanmaktadır.



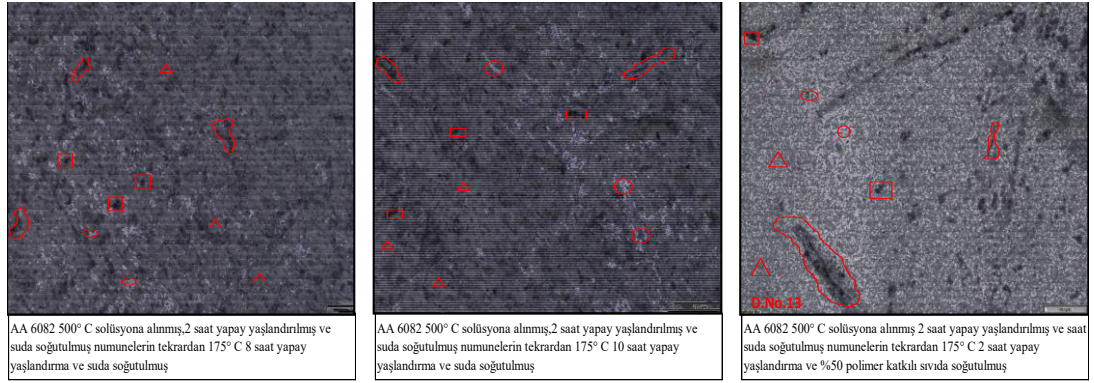
**Fotoğraf 4.11.** AA6082 T0 mikro yapı görünüşleri

#### 4.8.2 175°’de yaşlandırılan numuneler

175° C de yapay yaşlandırma işlemi yapılan numunelerin optik mikroskop altında mikro yapılarına bakılmıştır. 100  $\mu$ m de mikroskop fotoğrafları çekilmiştir. Görüntülerin Fotoğraf 4.12 ve Fotoğraf 4.13’de verilmiştir. Fotoğrafta açık olan kısımlar Al temel elemana aittir. Tanelerin iri kaldığı ve yapı içerisinde tam olarak çözülmediği görülmektedir. Bunun nedeni yapı içerisinde mikro kirliliğin yüksek olmasıdır. Mikro kirlilikler tane sınırlarında biriktiği için çekme sırasında dislokasyon hareketlerini kolaylaştırmakta ve çekme değerinin düşük olmasına neden de olmaktadır. Ayrıca malzeme sünek olarak davranmaktadır. Yapay yaşlandırma süresi arttıkça tane boyutları küçülmüştür. Özellikle Mg<sub>2</sub>Si fazlarının küçülerek sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Dendrit yapıların uzunluğu süreye bağlı olarak arttığı da ayrı bir bulgudur.



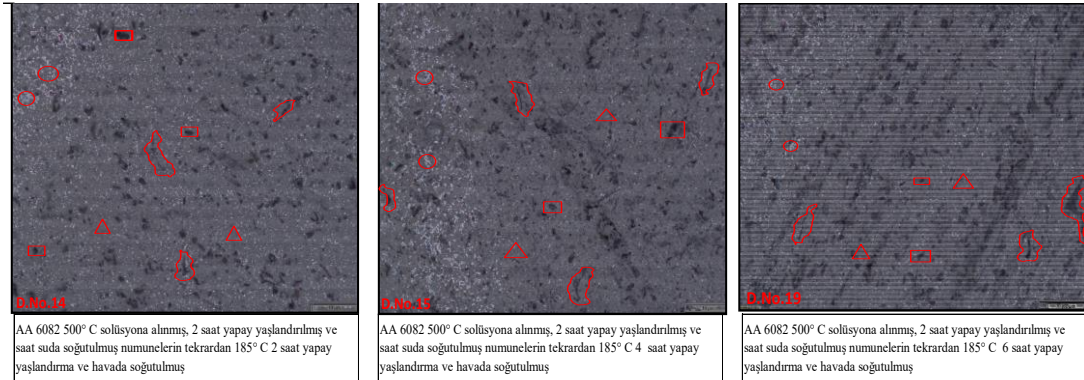
**Fotoğraf 4.12.** 175°C’de 2, 4 ve 6 saat boyunca yaşlandırma



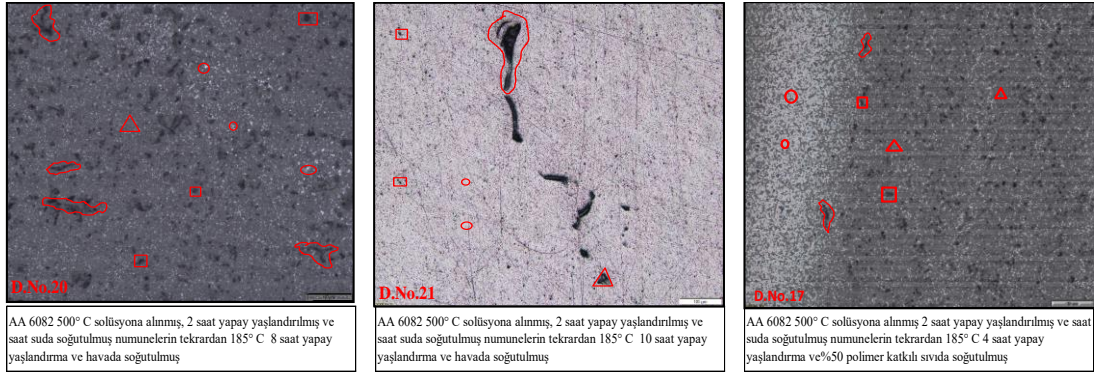
**Fotoğraf 4.13.** 175°C’de 10 saat boyunca yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma

#### 4.8.3 185°’de yaşlandırılan numuneler

Mikro yapı görüntüleri Fotoğraf 4.14 ve Fotoğraf 4.15’de görülmektedir. Tanelerin iri kaldığı ve yapı içerisinde tam olarak çözülmediği görülmektedir. Bu da yapı içerisinde mikro kirliliğin yüksek kaldığını göstermektedir.



**Fotoğraf 4.14.** 185°C’de 2, 4 ve 6 saat boyunca yaşlandırma

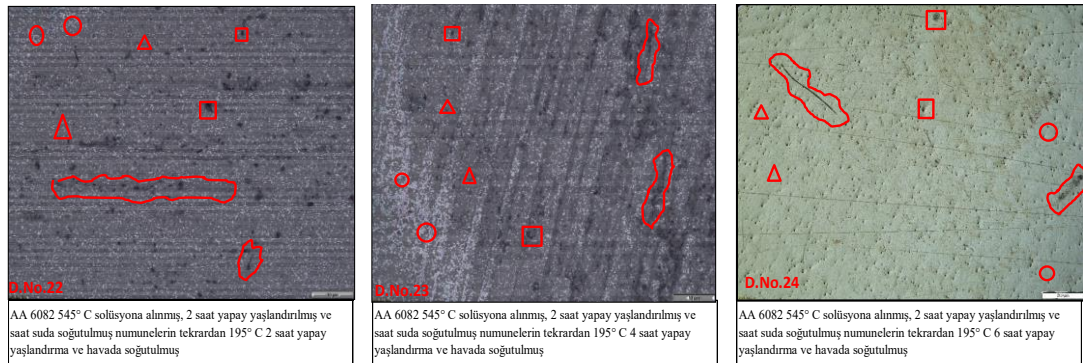


**Fotoğraf 4.15.** 185°C’de 10 saat boyunca yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma

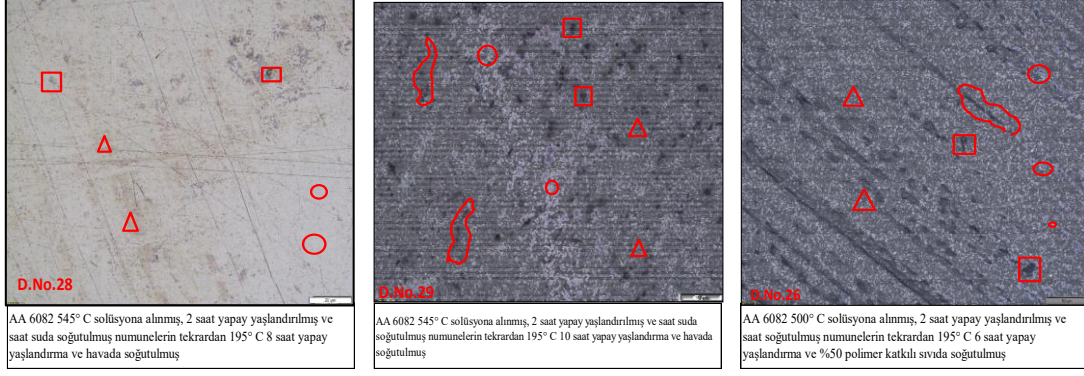
Yapay yaşlandırma süresi artıçça tane boyutları 175°C dekine göre küçülmüştür. Özellikle Mg<sub>2</sub>Si fazlarının küçülmüş sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 185°C deki α-dendrit ve β-dendritler 175°C’dekine göre daha küçük olduğu ve iğnemi bir yapıda kaldığı görülmektedir. Çekme deneyinde en iyi sonuç 185°C 4 saat yapay yaşlandırılmış numunede görülmüştür.

#### 4.8.4. 195°de yaşlandırılan numuneler

Mikro yapı görüntüleri Fotoğraf 4.16 ve Fotoğraf 4.17’de görülmektedir. Mikro yapıda tanelerin çözüldüğü ve küçük noktalar olarak yapı içerisinde kaldığı görülmektedir.



**Fotoğraf 4.16.** 195°C’de 2, 4 ve 6 saat boyunca yaşlandırma

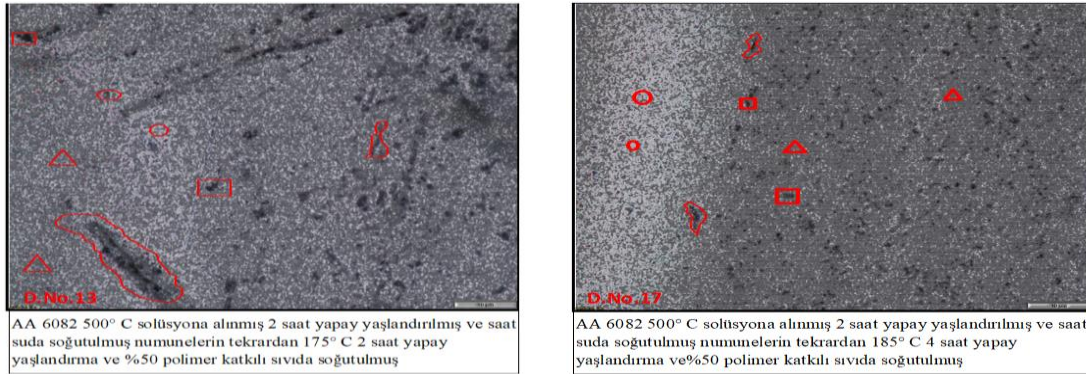


**Fotoğraf 4.17.** 195°C’de 10 saat boyunca yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma

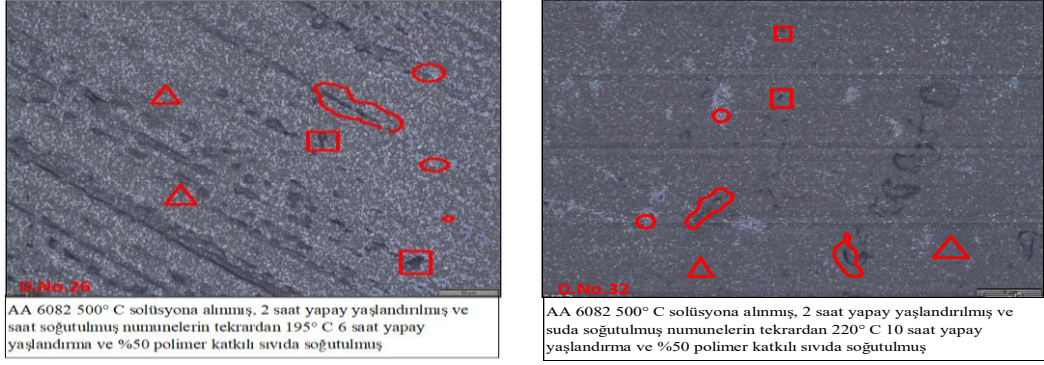
195°C de lik mikro yapı numunelerinde yapay yaşlandırma süresi arttıkça tane boyutları 185°C dekine göre küçülmüştür. Özellikle Mg<sub>2</sub>Si fazlarının küçülerek sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 195°C deki α-dendrit ve β-dendritler 185°C dekine göre daha küçük olduğu ve iğnemsî bir yapıya dönüşmüş ve hatta çok küçülerek mikro yapı içerisinde yok olmuşlardır.

#### 4.8.5 175°C-185°C-195°C-220°C yapay yaşlandırılan numunelerin %50 polimerli soğutma ortamının etkisi

175°C 2 saat, 185°C 4 saat, 195°C 6 saat ve 220°C 10 saatte gerçekleştirilen yaşlandırma işlemlerinden sonra numuneler %50 polimerli sıvıda soğutulmuştur. Mikro yapı görüntüleri Fotoğraf 4.18 ve Fotoğraf 4.19’da görülmektedir. Sıcaklık ve zamanın artması ile mikro yapı içerisindeki tane boyutlarının küçüldüğü görülmektedir.



**Fotoğraf 4.18.** 175°C 2 saat boyunca ve 185°C 4 saat boyunca yapay yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma



**Fotoğraf 4.19.** 195°C 6 saat boyunca ve 220°C 10 saat boyunca yapay yaşlandırma ve %50 polimerde soğutma

175°C de  $\beta$ -dendritlerin yapı diğer mikro yapılara göre daha uzun ve daha koyu olduğu görülmektedir. 185°C de mikro yapı incelemesinde tane yapısı diğer polimerli mikro yapılara göre homojen ve daha küçük olarak dağıldığı görülmektedir. 195°C de ise mikro yapı içerisinde dendritlerin oluşmaya başladığı görülmektedir. 220°C de ise tane dağılımının çok ince olduğu ancak çekme mukavemetinde azalmaya sebep olduğu tespit edilmiştir.

## BÖLÜM V

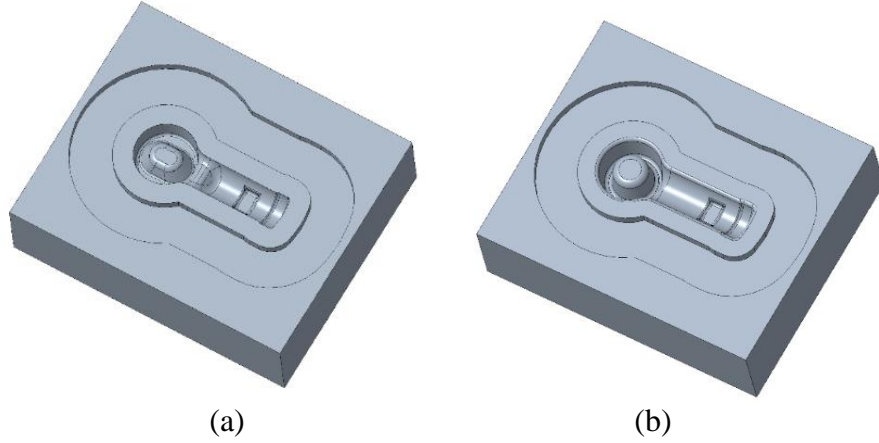
### SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONU

Bu çalışma kapsamında dövme ve yorulma simülasyonları yapılmıştır. Dövme simülasyonları için kalıp tasarlanmış ve kütük parçasından rot başının şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Prosesle ilgili elde edilen dövme verilerinden çapak oranı, pres kuvveti, sıcaklık değişimi değerleri deneysel dövme değerleri ile kıyaslanarak doğrulamalar gerçekleştirilmiştir. Şekillendirilen parçanın yorulma simülasyonları ile de kullanım yerindeki yorulma davranışı belirlenmiştir.

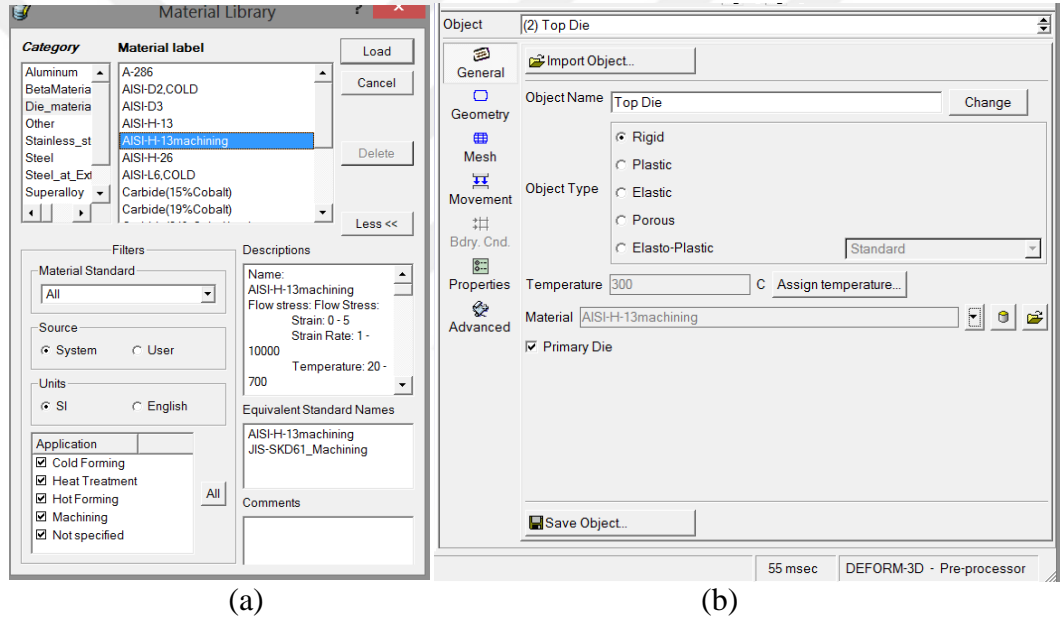
#### 5.1 Sıcak Dövme Simülasyonu

Sonlu eleman analizleri, fiziksel gerçekliği mümkün olduğunca modelleyerek aranan değeri sayısal iterasyonlar ile bulmaya yarayan simülasyonlardır. Dövme işlemindeki fiziksel olay, kalıp sabit dururken zımbanın sıcak taslak parçasını kalıp boşluğu şeklini almaya zorlamasıdır. Bu işlem; taslak malzemesinde büyük deformasyonların oluşması, malzemede plastik akmanın mevcudiyeti ve kalıp-taslak-zimba temas ara yüzlerinde sürtünmeli kontakların olmasından dolayı hayli nonlineer bir analiz gerektirmektedir. Sonuçların hassasiyeti; en çok, kurduğumuz plastisite modelinin parametrelerine bağlıdır. Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilmiş olan akma, çekme dayanımı, anizotropi katsayıları, yorulma verisi, sonlu eleman simülasyon programında model verisi olarak kullanılarak yapılan simülasyon neticeleri deneysel dövme sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Simülasyon ortamı olarak Deform© programı kullanılmıştır. Programın kullanımı konusunda yardımlarını esirgemeyen DİTAŞ firmasına teşekkür ederiz. Şekil 5.1'de simülasyonda kullanılan erkek ve dişi kalıp boyutları verilmiştir. Her iki kalıp malzemesi AISI H13 olup rijit cisim olarak modellenmiştir. Termal etkileri görebilmek için mecburen kalıpların dış yüzeyi meshlenmiştir.



**Şekil 5.1.** Dişi erkek kalıp boyutları ve malzeme özellikleri alt kalıp (Dış ebat 150x180x50mm) (a) ve üst kalıp (Dış ebat 150x180x50mm) (b)

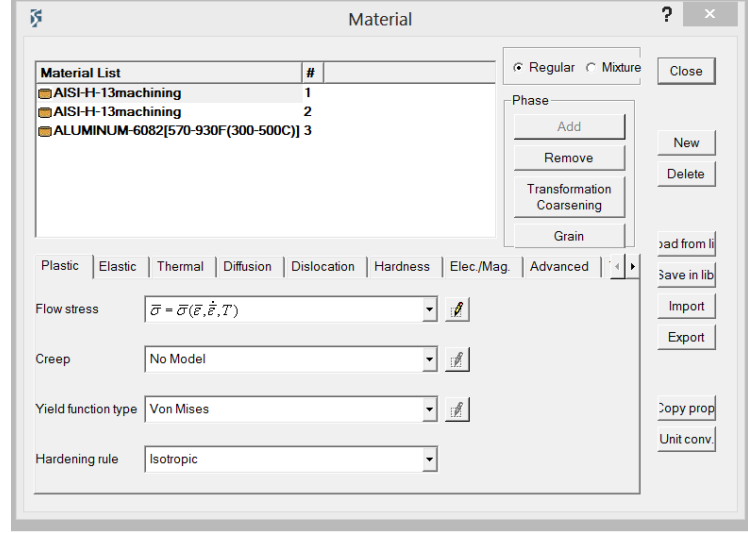


**Fotoğraf 5.1.** Kalıp malzemesi (a) ve Kalıp davranışı (b)

Başlangıçta kalıp yüzey sıcaklığı 300 °C ve kütük sıcaklığı ise 350 °C'dir. Kalıp dış yüzeylerindeki eleman ağı gerçeğe yakın sıcaklık dağılımı için sıklaştırılmış, tüm yapıda tetrahedron elementler kullanılmıştır. Taslak parçası  $\phi 25 \times 100$ mm ebadında silindirik AA6082 alaşımı olup, malzemenin plastik davranışını modellemek üzere, 500 derecede 2 saat boyunca çözülen ve sonra suda soğutulup daha sonra 185 derecede 4 saat yapay yaşlandırılmış, havada soğutulmuş numuneden elde edilen deneysel veri kullanılmıştır (Fotoğraf 5.1). Analiz edilen süre aralığı 1 sn. olarak ayarlanmıştır. Toplam strok 150 mm iken dövme stroku 100 mm olarak uygulanmıştır. Zaman ve gereksiz hesaplamalardan kaçınmak amacıyla presleme sonunda kaldırma işlemi yapılmamış ve simülasyon







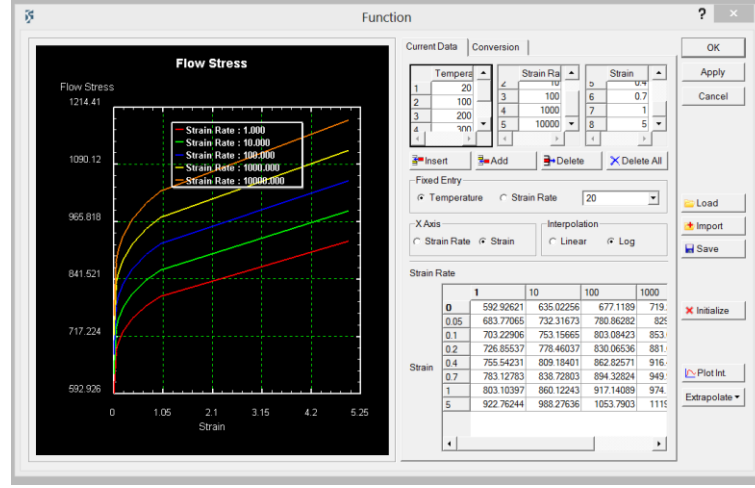
**Fotoğraf 5.2.** Seçilen malzeme modeli

Fotoğraf 5.2’de ise kullanılan malzeme modeli ve parametreleri gösterilmektedir. Denklem (5.1)’de modelin formülü verilmiştir.

$$\bar{\sigma} = c (\bar{\epsilon})^n (\dot{\bar{\epsilon}})^m + y \quad (5.1)$$

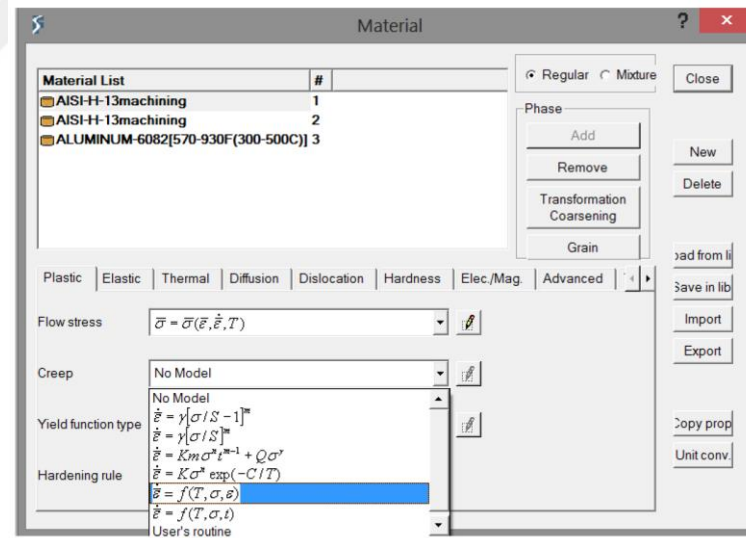
Burada;  $\bar{\sigma}$  (MPa) ortalama akma gerilmesini,  $\epsilon$  plastik şekil değiştirmeyi,  $\bar{\epsilon}$  eşdeğer plastik şekil değiştirmeyi,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  eşdeğer plastik şekil değiştirme hızı,  $c$  (MPa) dayanım katsayısını,  $n$  pekleşme üssü,  $m$  şekil değiştirme hızına duyarlılık üssü,  $y$  (MPa) ise başlangıçtaki akma noktasını ifade etmektedir.

Flow stress modeli olarak Şekil 5.4’de verildiği gibi programın kütüphanesi kullanılmış ayrıca deneysel veriler de kullanılmış, kıyaslamalı analizler yapılmıştır.



Şekil 5.4. Malzemenin gerilme şekil değiştirme datası

Sürünme modelleri için program ara yüzünde olan denklem modelleri Şekil 5.5’de verilmiştir. Sürünme malzemelerin yüksek sıcaklık ve sabit yük altında zamana bağlı deformasyonu olup analizde sürünme modeli kullanılmamıştır. Zira sıcak dövme süreci sürünmeye sebep olacak kadar zamana bağlı bir işlem içermemektedir.



Şekil 5.5. Deform sürünme modelleri

Akma kriteri olarak program ara yüzünde Von Mises kriteri seçilmiştir. Program ara yüzünde ayrıca alternatif olarak Hill’s quadratic gibi kriterler de bulunmaktadır. Bu kriterler sac metallerde daha öne çıkan anizotropik davranışı modelleyebilmek için iyi iken, dövme süreçleri için Von Mises kriteri yeterli olmaktadır. Pekleşme kuralı olarak

izotropik pekleşme seçilmiştir. Zira malzemenin çekme ve basma durumlarında simetrik davranış göstermektedir.

Yapılan termomekanik analiz neticesinde elde edilen birim deformasyon, gerilme, sıcaklık dağılımı çözümleri sonuçları elde edilmiştir.

### 5.1.2 Sıcak dövme süreç tasarımı ve analiz sonuçları

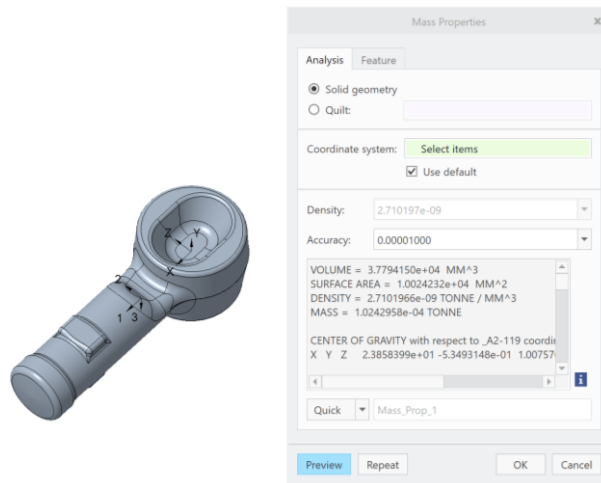
Sıcak dövme analizi yapmadan önce süreç tasarımı yapılmış olmalıdır. Bu amaçla;

- hammadde çapı ve boyu,
- şekillendirme sıcaklık aralığı,
- analizin çevre koşulları

belirlenmiştir. Hammadde çapı ve boyunun belirlenmesi için ilk önce kalıp çapak kalınlığı ve genişliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için literatürdeki ampirik bağlantılar kullanılmıştır (Davis, 1989).

$$h = 0.015 \sqrt{A} \quad (5.2)$$

Burada;  $h$  çapak kalınlığını  $A$  dövülecek olan malzemenin yüzey alanıdır. Ancak dövülen parçanın şekli kompleks olduğu için geometrik metotlarla yüzey alanı hesaplaması zordur. Bu yüzden öncelikle bilgisayar destekli yazılımlar (CAD) yardımıyla dövülecek malzemenin ağırlığı bulunmuştur (Şekil 5.6).

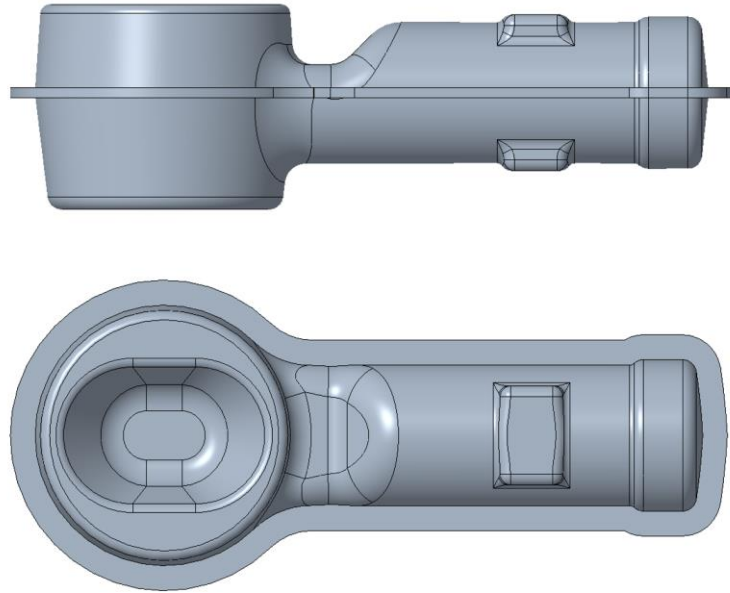


Şekil 5.6. Dövülen malzemenin hacim, ağırlık ve yüzey alanı

Bulunan yüzey alanı denklem (5.2) 'de yerine yazılıp matematiksel işlemler yapıldığında çapak kalınlığı 1,5 mm olarak bulunmuştur. Literatürden ve edilen tecrübeler neticesinde çapak kalınlığı ile çapak genişliği arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki alüminyum malzemeler için

$$\frac{w}{h} = 4.5 \quad (5.3)$$

olmaktadır. Burada;  $w$  çapak genişliğini,  $h$  çapak kalınlığını ifade etmektedir. Hesaplanan 1,5 mm çapak kalınlığı (5.3)'de yerine konulup gerekli olan matematiksel, işlemler yapıldığında çapak genişliği 6,75 mm olarak bulunmuştur. Tasarımda bir üst sayıya yuvarlanarak katı model üzerine uygulanmıştır (Şekil 5.7).



**Şekil 5.7.** Parçanın ön görülen çapaklı katı modeli

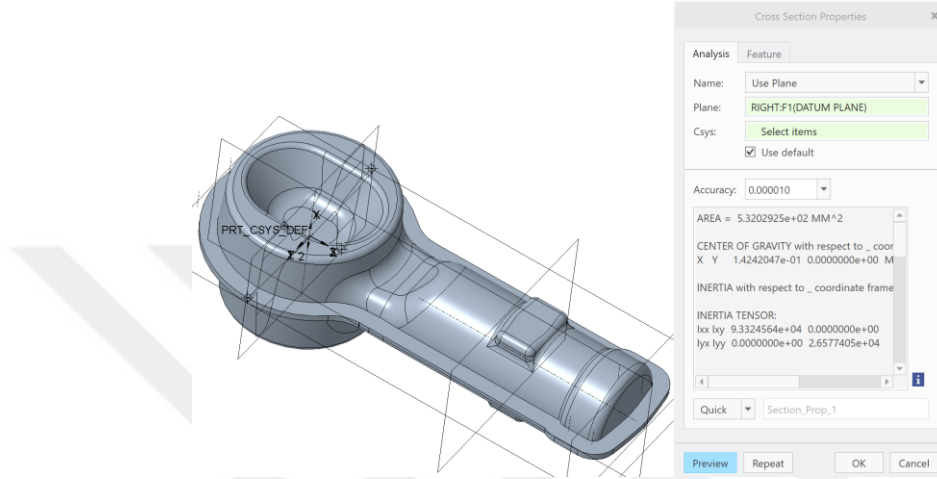
Bu çalışmalar sonrasında parçanın hangi malzeme çapından şekillendirilmesi gerektiği için silindirik malzemeler için alan formülünden yararlanılır.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (5.4)$$

Burada  $A$  parçanın kesit alanını,  $d$  kütük çapını ifade etmektedir. (5.4)'ten çap ifadesi çekilerek (5.5)'deki gibi hesaplanır. Kesit alanı yerine yazılıp gerekli olan matematiksel

işlemler yapıldığında dövülecek olan malzeme çapı 26,03 mm olarak bulunmuştur. Parça da güvenli tarafta kalınması için analizlerde malzeme çapı 28 mm olarak alınmıştır.

$$d = \sqrt[2]{\frac{4A}{\pi}} \quad (5.5)$$



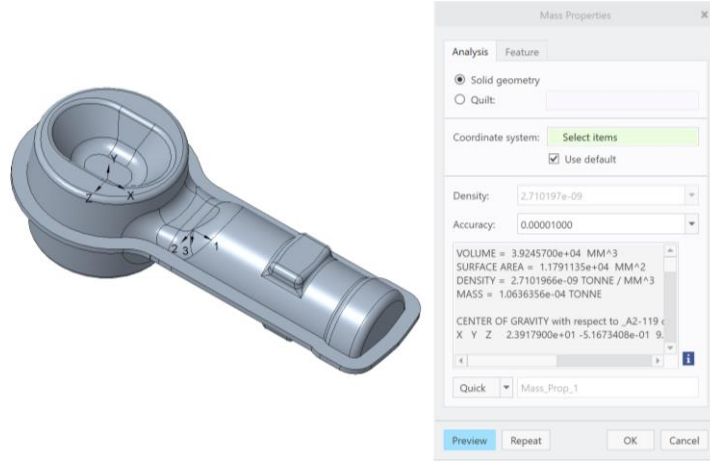
Şekil 5.8. Dövülecek parçanın en büyük kesti alanı

Dövülecek olan kütüğün boyunu bulmak için öncelikle hacmi hesaplanmaktadır.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} * l \quad (5.6)$$

Burada;  $V$  parçanın çapaklı hacmi,  $d$  kütük çapı,  $l$  kütük boyudur. Bu denklemden parçanın boyu “ $l$ ” çekilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta dövülecek olan parçanın çapaklı modelinin hacmi üzerinden gidiliyor olmasıdır.

Sıcak dövme sektöründe genelde bir miktar emniyet payı konularak işlem yapılmaktadır ki bu da çapak olarak çıkmaktadır. Biz analizimizde %5 lik bir emniyet payı koyarak işlem yaptık. Buradan malzeme boyu 80 mm olarak tespit edilmiştir.

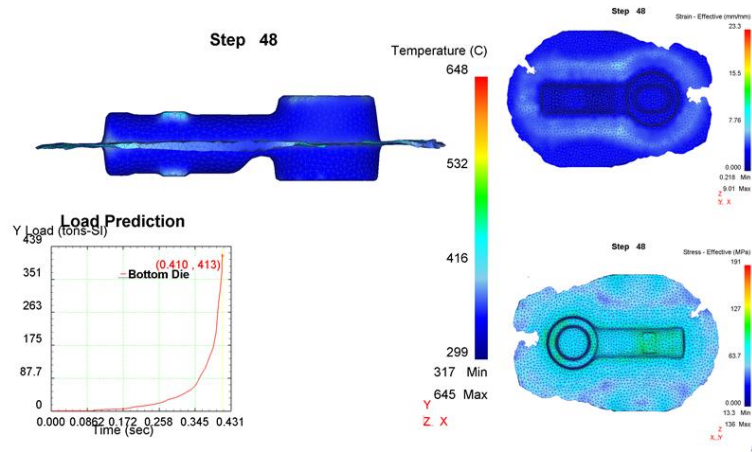


**Şekil 5.9.** Parçanın çapaklı hacmi

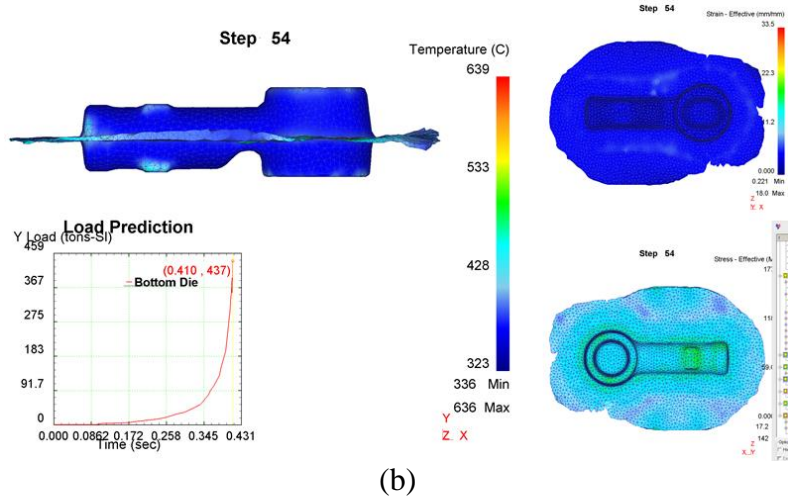
Biz parçayı sıcak dövme ile şekillendirmeyi planladığımız için malzemenin ergime noktasının %50 ile %80 arasında sıcak bir sıcaklık belirlenmesi gerekmektedir.

ALCOA© firmasında AA6082 için ergime noktası  $585^{\circ}\text{C}$  - $650^{\circ}\text{C}$  arasında verilmektedir. Analizlerde ergime noktasının üst sıcaklık değerleri üzerinden hesaplama yapılarak dövme sıcaklık aralığı  $325^{\circ}\text{C}$  ile  $520^{\circ}\text{C}$  olarak bulunmuştur.

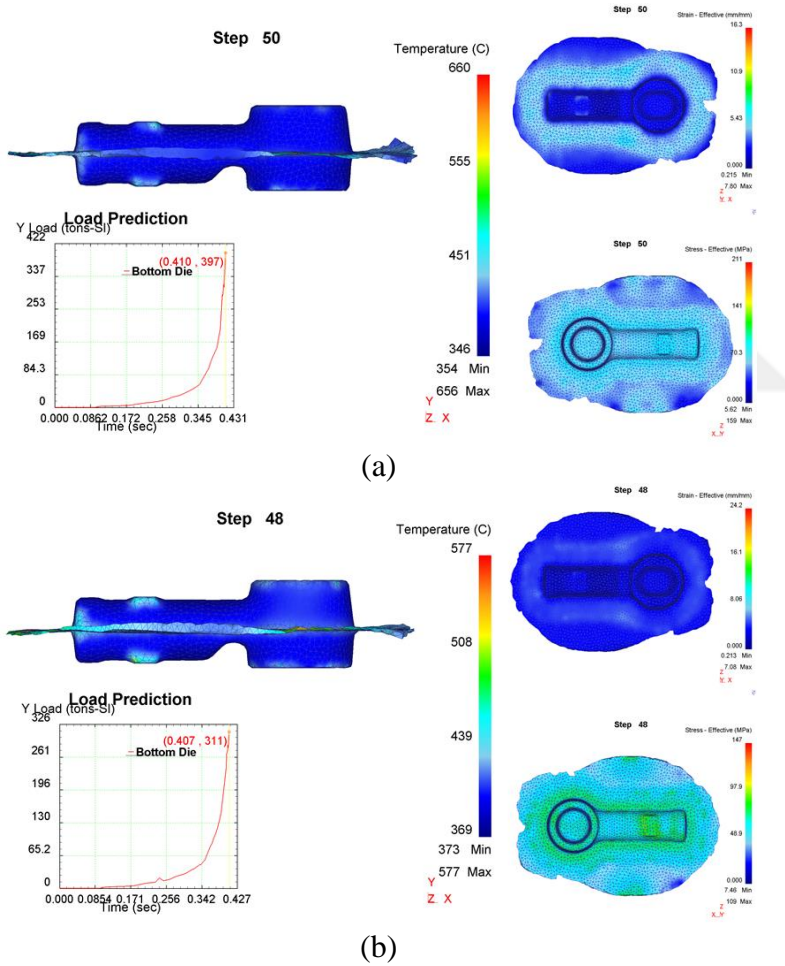
$300^{\circ}\text{C}$  den başlanarak  $525^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar  $25^{\circ}\text{C}$ 'lik artışlarla sıcak dövme analizleri DEFORM© programında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kalıp başlangıç sıcaklığı  $300^{\circ}\text{C}$  alınmıştır. Şekil 5.10'dan görüleceği üzere  $300^{\circ}\text{C}$  de yapılan analizde maksimum sıcaklık  $648^{\circ}\text{C}$  ve pres yükü ise 413 ton olarak bulunmuştur.  $325^{\circ}\text{C}$  de yapılan analizde maksimum sıcaklık  $639^{\circ}\text{C}$  ve pres yükü ise 437 ton olarak bulunmuştur. Malzeme kalıp boşluğunu tamamen doldurmuştur.



(a)

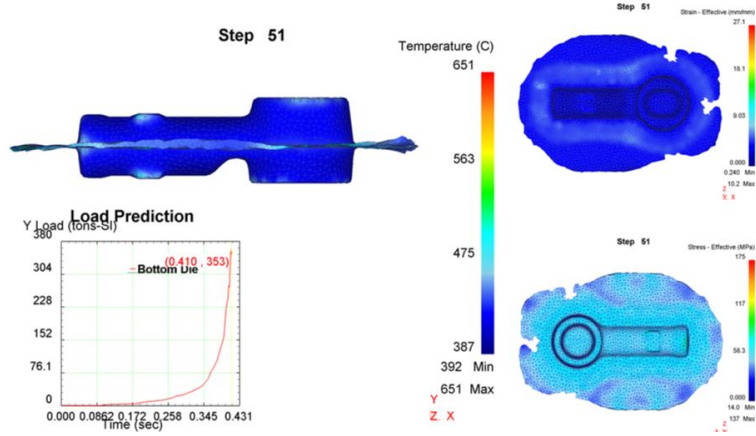


Şekil 5.10. 300°C (a) ve 325°C (b) sıcak dövme analiz sonucu

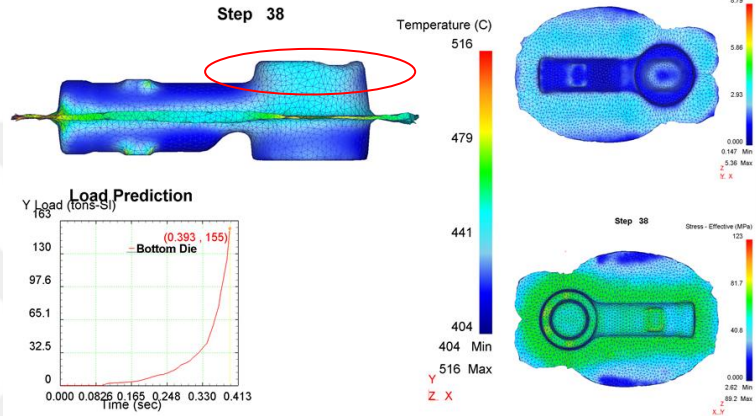


Şekil 5.11. 350°C (a) ve 375°C (b) sıcak dövme analiz sonucu

Şekil 5.11'dan görülmektedir ki malzeme kalıp boşluğunu tamamen doldurmuştur.



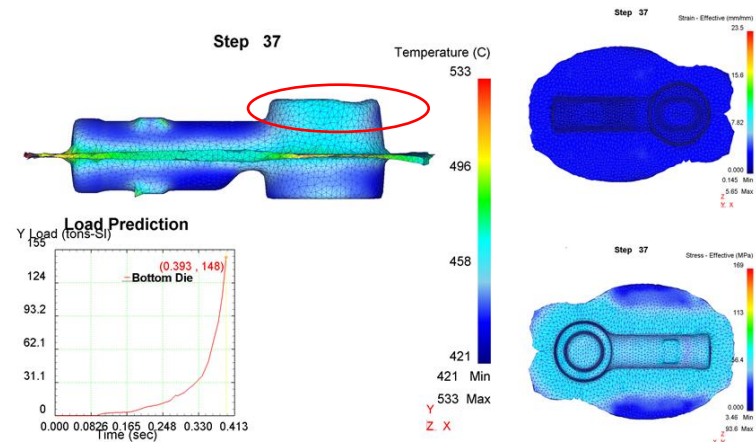
(a)



(b)

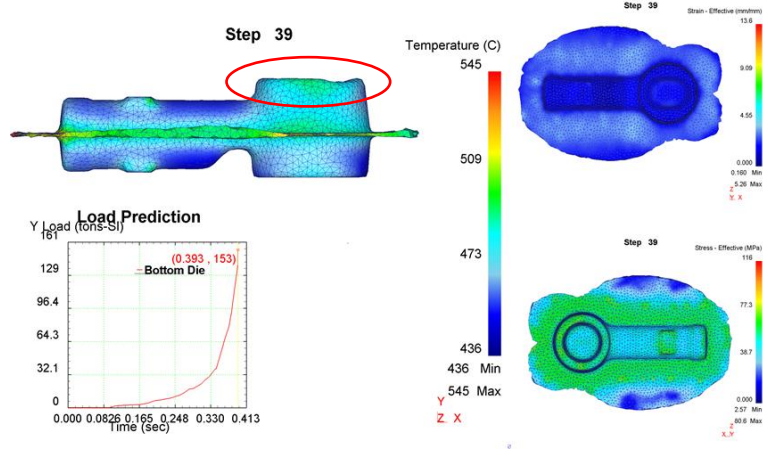
Şekil 5.12. 400°C (a) ve 425°C (b) Sıcak dövme analiz sonucu

Şekil 5.12’den görüleceği üzere 425°C de yapılan analizde parçada doldurmuyan kısımlar görülmüştür.



(a)

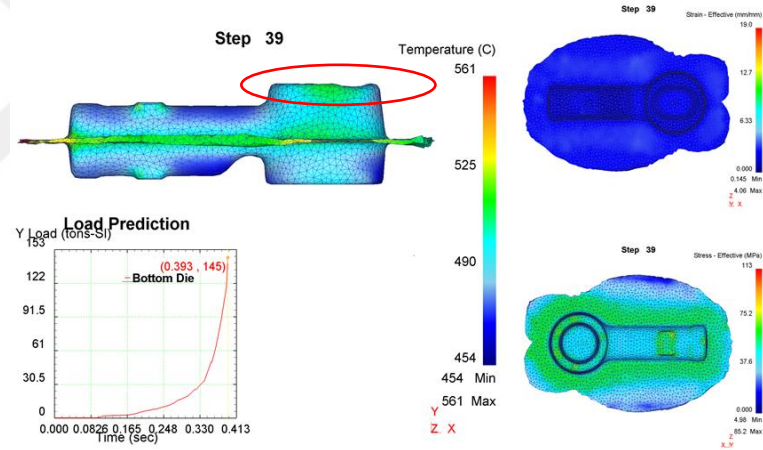




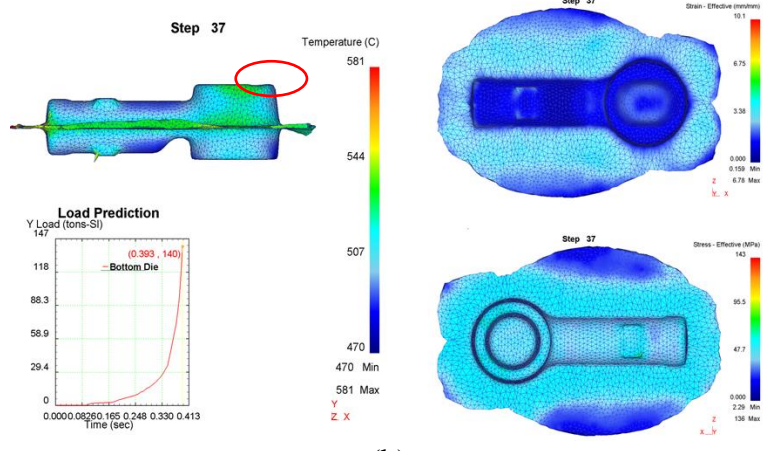
(b)

Şekil 5.13. 450°C (a) ve 475°C (b) Sıcak dövme analiz sonucu

Şekil 5.13.'den görüleceği üzere hem 450°C ve hem de 475°C de parçada doldurmayan kısımlar kalmıştır.



(a)



(b)

Şekil 5.14. 500°C (a) ve 525°C(b) Sıcak dövme analiz sonucu

Şekil 5.14'den parçada doldurmayan kısımlar görülmüştür. Elde edilen değerler tablo halinde verilmiştir.

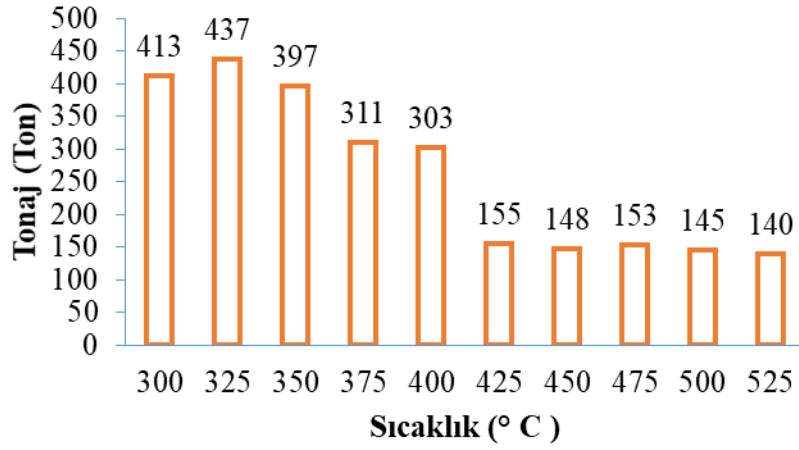
**Çizelge 5.1.** Elde edilen dövme sonuçları

| Analiz başlangıç sıcaklığı (°C) | Ulaşılan sıcaklık (°C) | Pres kuvveti (ton) | Kalıbı dolduramama | Çapak |
|---------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 300                             | 648                    | 413                | --                 | %12   |
| 325                             | 639                    | 437                | --                 | %12   |
| 350                             | 660                    | 397                | --                 | %12   |
| 375                             | 577                    | 311                | --                 | %12   |
| 400                             | 651                    | 353                | --                 | %12   |
| 425                             | 516                    | 155                | --                 | %12   |
| 450                             | 651                    | 353                | Oluştı             | %12   |
| 475                             | 516                    | 153                | Oluştı             | %12   |
| 500                             | 561                    | 145                | Oluştı             | %12   |
| 525                             | 581                    | 140                | Oluştı             | %12   |

Sonuçlardan anlaşılmaktadır ki; düşük sıcaklıklarda yapılan dövme daha fazla sıcaklık üretimine sebep olmuştur. Bunun sebebi iç enerjideki daha fazla değişimdir. Emilen iç enerji arttıkça yapı içerisinde sıcaklık yükselmesi de fazla olmaktadır. Ayrıca başlangıç sıcaklığı arttıkça gereken pres kuvveti azalmaktadır. Bunun sebebi de artan sıcaklıklarda malzemenin akma noktasının düşmesi ve daha az gerilme ile deforme edilebilme olanağıdır.

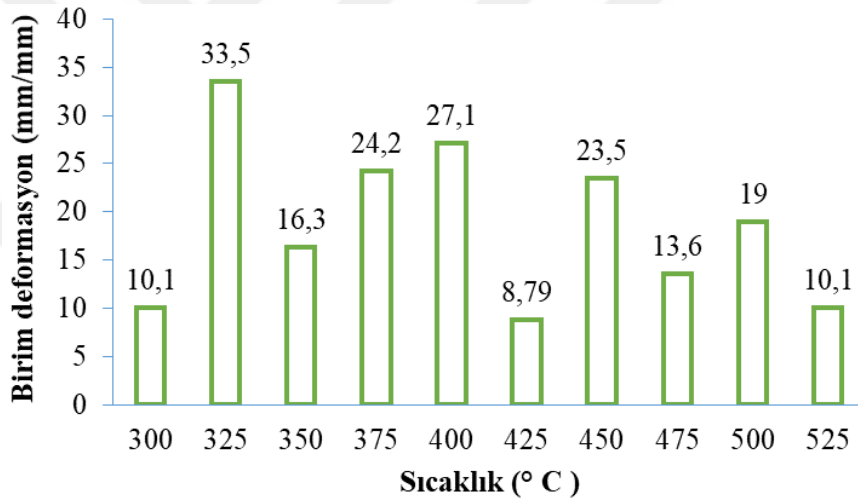
### 5.1.3 Sıcak dövme analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Sıcak dövme analizleri yapıldıktan sonra her bir analizde tonaj, gerilme, şekil değiştirme ve maksimum sıcaklık değerleri açısından değerler grafiklerle değerlendirilmiştir. Bu grafiklerden parçanın kaç °C'de ve hangi tonajda dövülebileceği görülmüştür gerilme, şekil değiştirme açısından grafiklerden de anlaşılacağı üzere fonksiyonel bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu Fonksiyonel ilişki Şekil 5.15'de verilmiştir.



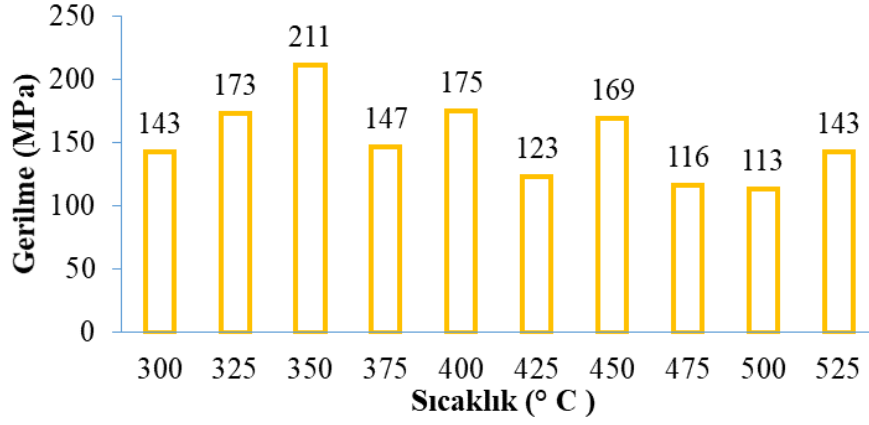
**Şekil 5.15.** Tonaj-sıcaklık grafiği

Şekil 5.15.'den görüldüğü üzere sıcaklık artıkcça tonajın azaldığı ve 425°C de sonrasında tonajın çok değişmediği görülmüştür.



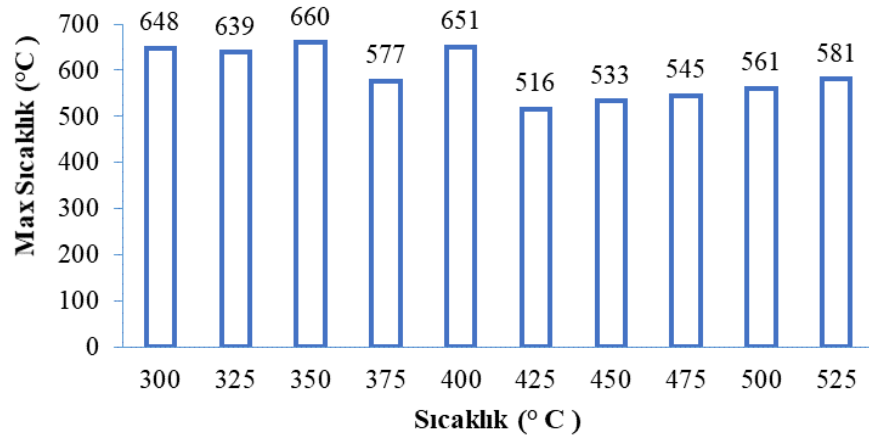
**Şekil 5.16.** Birim şekil değiştirme-sıcaklık grafiği

Şekil 5.16'dan görüldüğü üzere malzemenin birim deformasyonu ile sıcaklık arasında bir ilişki bulunmaktadır. Birim deformasyonun yüksek olması, yüksek debili akmadan kaynaklanmaktadır ki bunun da bir dezavantajı eğer malzemenin akmasında stoplama yapılmaz ise büyük bir kısmının çapağa gidebilecek olmasıdır.



**Şekil 5.17.** Gerilme-sıcaklık grafiği

Şekil 5.17’den gerilme ile sıcaklık arasında belirgin bir ilişki tespit edilememesine rağmen 350 °C’ye kadar lineer bir ilişkinin olduğu sıcaklık daha da arttıkça gerilmenin azaldığı gözlemlenmiştir. Kullanılan pekleşme modeli izotropik pekleşme kuralı idi. Artan sıcaklık ile birlikte oluşacak gerilmenin de azalması beklenen bir durum idi. Ancak bazı sıcaklıklar için gerilmelerde dalgalanma görülmesinin nedeni, gerilme ölçümünün parça üzerindeki bir noktadan yapılmaması, parçanın tamamına ilişkin yapılması, bunun da gerilmenin daha az/çok olduğu yerlerin, bizim sonucumuzu etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Plastik deformasyon ile birlikte parça içerisinde artık gerilmeler de kalmaktadır. Bunu gidermek için uygulamada dövme sonrası gerilme giderme tavlaması yapılmaktadır.



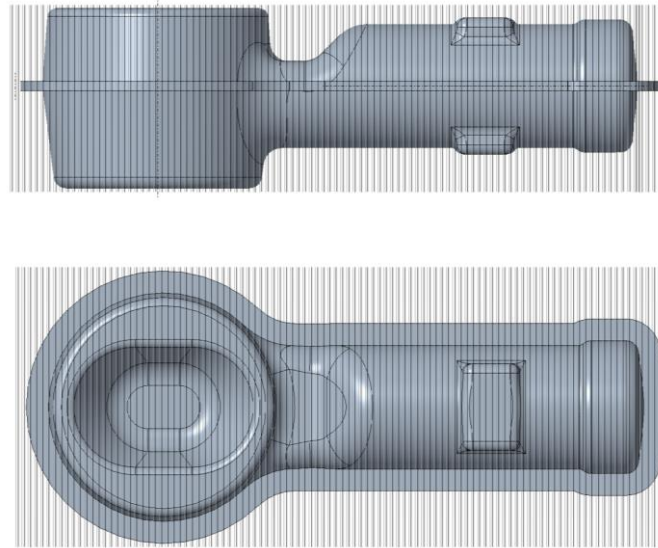
**Şekil 5.18.** Başlangıç kütük sıcaklığı-iç sıcaklık

Şekil 5.18’den görüldüğü üzere artan sıcaklıkla birlikte üretilen iç sıcaklıkta düşme olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın değişimi uygulanan kuvvete, sürtünmeye, kalıp

sıcaklığına bağı olarak değişmektedir. AA6082 nin ergime sıcaklığı 650°C dir. Yüksek iç sıcaklık oluştuğunda malzeme kısmi olarak sıvı hale geçecektir. Bu da kalıp üzerine alüminyum sıvanması ve yapışması olarak görülecektir. Kalıptan parçanın çıkması zorlaşacak, yüzey pürüzlülük ve katışkılar artabilecektir.

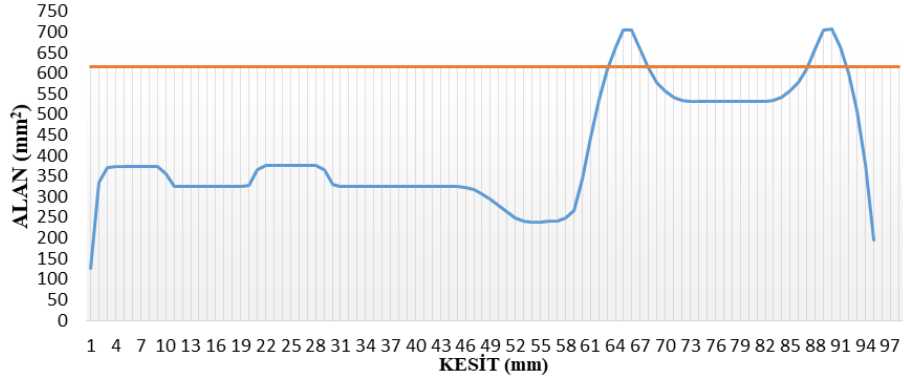
Tek adımda gerçekleştirilen analiz neticesinde giren hammadde 133 gram iken, dövme sonrasında parçanın 103 gram olduğu ölçülmüştür. Bu durumda 30 gram üretim firesi (çapak) olarak atılacaktır. Bu da çapak oranı yaklaşık %30 dur. Bu oran gelişmiş sanayilerde ortalama % 8 oranlarındadır. Çapak oranının azalması için optimum kütük boyutu tespit edilmelidir.

Analizin adım sayısının artırılması genel bir strateji olsa da daha önemlisi hassas bir kütük boyutu tayinidir. Bunun için ilk önce parçanın hacim dağılımı grafiğı çizilmelidir. Parçanın hacim dağılımı yapılabilmesi için katı model üzerinden parçanın boyunca 1 mm aralıklarla kesit alınmıştır. Kesit alınabilmesi için CAD programı üzerinde birer mm'lik düzlemler oluşturulmuştur. Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



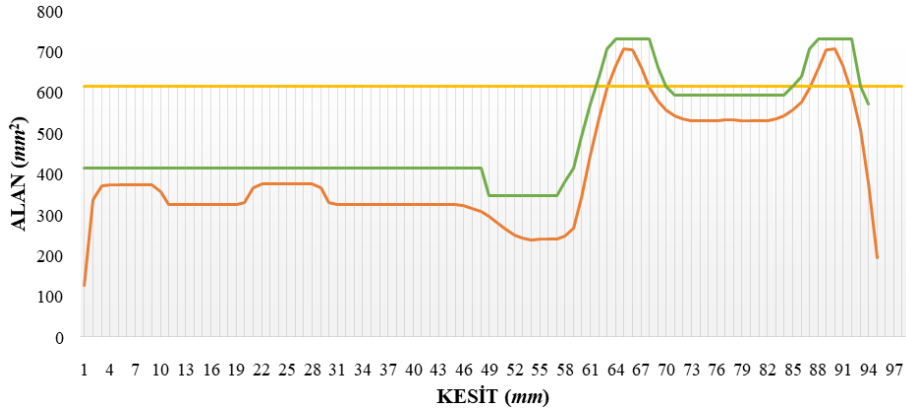
**Şekil 5.19.** Parça modelinin birer mm'lik düzlemlili halii

Her bir düzlemin alanı CAD programı yardımıyla bulunmaktadır. Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.20.** Parça ve hammaddenin hacim dağılımı

Parçanın ve hammaddenin hacim dağılımı çizildikten sonra “şekillendirme adımları” olarak adlandırılan boyutlar grafik üzerinden tespit edilir. Bunun için denklem (5.5) kullanılmaktadır. Parçanın hacim dağılımına göre ön şeklin olması gereken başlangıç geometrisi Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Şekilde dövülecek olan malzemenin ön formu yeşil renk ile gösterilmektedir. Buradan elde edilen değerler yardımıyla CAD ortamında ön dövme modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan ön dövme modeline göre sıcak dövme kalıp tasarımının tekrar yapılması ve analiz edilmesi ile çapak miktarı azaltılabileceği ön görülmüştür.

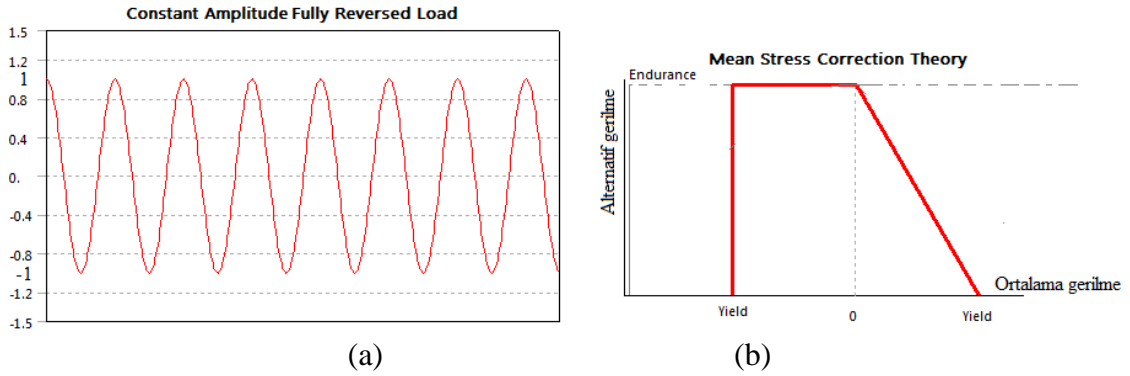


**Şekil 5.21.** Parça, kütük ve ön şeklin hacim dağılımı

## 5.2 Yorulma Simülasyonu

Analiz gerilme-ömür türünde yapılmıştır. Yük, çekme/basma tarzında eşit genlikte (R=-1) uygulanmış olduğundan dolayı uygulanan bu periyodik yükün oluşturduğu ortalama gerilme sıfırdır. Ortalama gerilme düzeltme teorisi olarak Soderbeg kriteri

seçilmiştir. Şekil 5.22’de yükün türü ve kriterin sınırladığı şekil gösterilmiştir. Bu kriter sünek davranışa sahip malzemeler için kullanışlı bir düzeltme kriteridir.



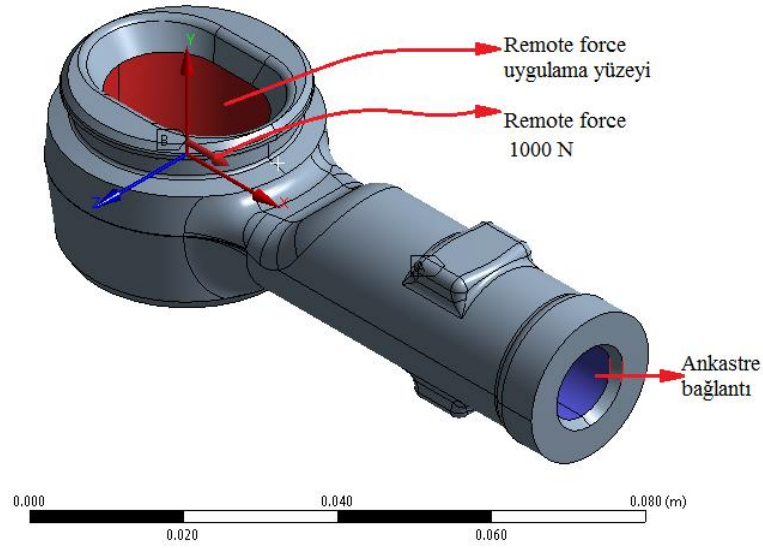
**Şekil 5.22.** Yorulma analizi için (a) ve sabit genlikte simetrik tam ters yükleme Soderberg düzeltme kriteri (b)

Dövülmüş iş parçasının lineer elastik malzeme özellikleri Şekil 5.23’deki veriler kullanılarak programa girilmiştir.

| Properties of Outline Row 3: AA6082 |                                |                                     |                                   |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                                     | A                              | B                                   | C                                 |
| 1                                   | Property                       | Value                               | Unit                              |
| 2                                   | Material Field Variables       | Table                               | 1 Cycles Alternating Stress (MPa) |
| 3                                   | Density                        | 2770                                | kg m <sup>-3</sup> 2 43800 176.84 |
| 4                                   | Isotropic Elasticity           |                                     | 3 56500 168                       |
| 5                                   | Derive from                    | Young's Modulus and Poisson's Ratio | 4 93350 159.15 1 Mean Stress (Pa) |
| 6                                   | Young's Modulus                | 90                                  | 5 98825 150.31 2 0                |
| 7                                   | Poisson's Ratio                | 0.34                                | 6 1.1989E+05 141.47 *             |
| 8                                   | Bulk Modulus                   | 9.375E+07                           | 7 2.734E+05 132.63                |
| 9                                   | Shear Modulus                  | 3.3582E+07                          | 8 3.5616E+05 123.79               |
| 10                                  | Alternating Stress Mean Stress | Tabular                             | 9 3.804E+05 114.95                |
| 11                                  | Interpolation                  | Linear                              | 10 5.47E+05 106.1                 |
| 12                                  | Scale                          | 1                                   | 11 6.734E+05 97.26                |
| 13                                  | Offset                         | 0                                   | 12 1E+06 88.42                    |
| 14                                  | Tensile Yield Strength         | 321                                 | MPa                               |
| 15                                  | Tensile Ultimate Strength      | 413.6                               | MPa                               |

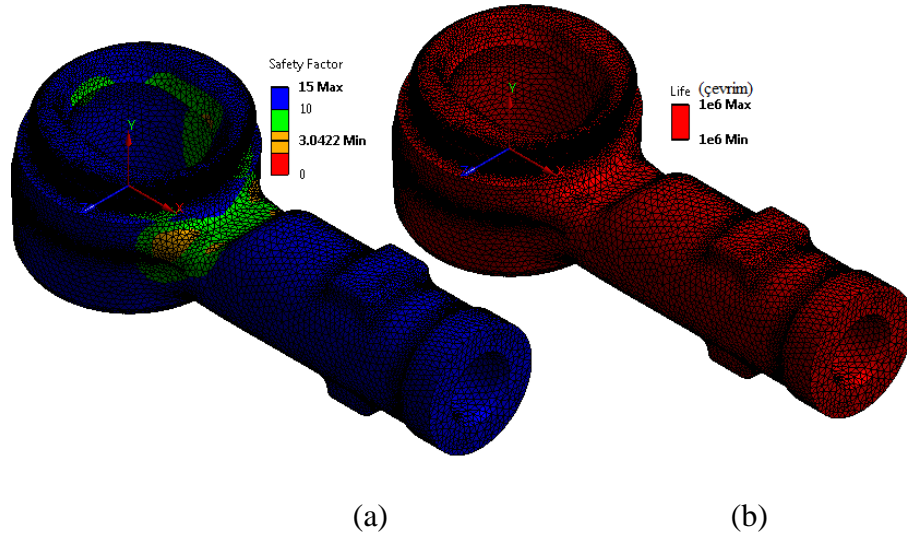
**Şekil 5.23.** Yorulma analizi için tanımlanan malzeme özellikleri

Yorulma analizine esas sonlu eleman modeli Şekil 5.24’te verilmiştir. Modelde, rot başının ankastre bağlantılı olan ve kuvvet uygulanan yüzeyleri, uygulanan kuvvetin yönü ve büyüklüğü gösterilmektedir. Yorulma için ANSYS© kullanılmış olup, programın kullanımı konusunda yardımlarını esirgemeyen DİTAŞ firmasına teşekkür ederiz. Analiz 6 dakika 44 saniye sürmüştür. Analiz neticesinde 362,38 MB boyutunda veri oluşmuştur. Analiz tek adımda gerçekleştirilmiştir.



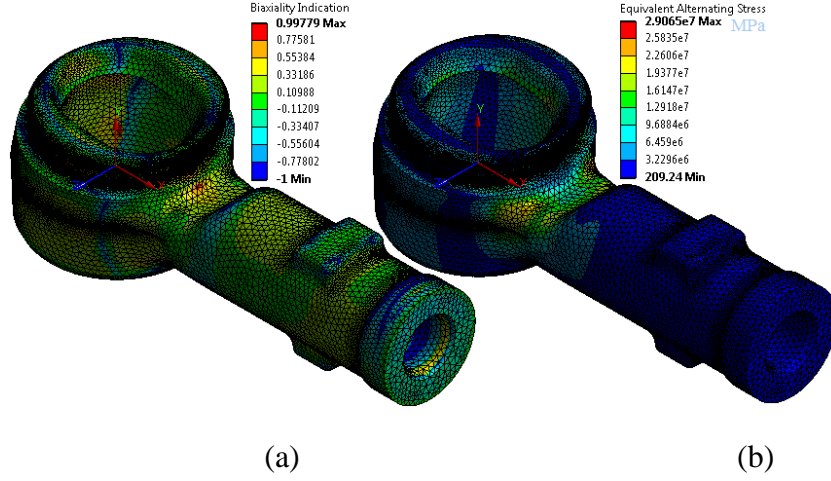
**Şekil 5.24.** Yorulma analizi için kullanılan sonlu eleman modeli ve uygulanan yük ve sınır şartları

Şekil 5.25’de analiz neticesinde elde edilen emniyet katsayısı, ömür çözüm sonuçları görülmektedir. Emniyet katsayısı dağılımından anlaşıldığı üzere; parça üzerinde yorulmaya en hassas kısımlar yuvanın sapa bağlandığı nispeten ince olan kesittir. En düşük emniyet katsayısı 3,0422 olup bu hali ile kabul edilebilir seviyededir. Ömür grafiğinden anlaşılmaktadır ki; parçanın bütün noktaları en az bir milyon çevrimlik bir ömre sahip olacaktır.



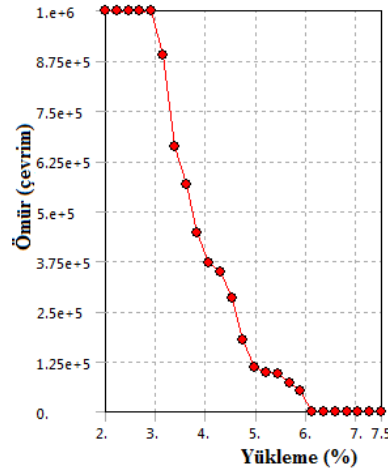
**Şekil 5.25.** Yorulma analizi neticesinde elde edilen emniyet katsayısı (a) ve ömür çözüm sonuçları (b)





**Şekil 5.26.** Yorulma analizi neticesinde elde edilen gerilme çözüm sonuçları (a) biaxiality göstergesi ve eşdeğer alternatif gerilme (b)

Şekil 5.26 (a) da parça genelindeki gerilme dağılımının kodlandığı biaxiality indication grafiği, parça üzerindeki gerilme dağılımını türü hakkında fikir vermektedir. 1 ve -1 arasında değişir. 0 tek eksenli gerilmeyi, 1 sadece kaymayı, -1 ise iki eksenli gerilme halini göstermektedir. Şekil 5.26 (b) ise Soderberg+Von Mises kriterinin eşdeğer gerilme formülüne göre gerilme dağılımı verilmiştir.



**Şekil 5.27.** Fatigue sensitivity diyagramı.

Şekil 5.27'de verilen yorulmaya hassasiyet diyagramında, uygulanan yük değerinin artırılıp-azaltılması halinde (yüzde olarak) çalışma ömrünün nasıl değişebileceği görülecektir. Hassasiyet değeri; ömür, hasar veya güvenlik faktörü için bulunabilir. Bu grafiklerden uygulanan yükün %400'üne kadar emniyetli çalışmaya devam edileceği söylenebilmektedir.

## BÖLÜM VI

### TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında AA6082 mekanik ve termomekanik karakterizasyonunu için yapay yaşlandırma parametreleri, çekme deneyleri, sert deneyleri, sıçrama deneyi, çentik darbe deneyi, yorulma deneyi, yorulma, dövme simülasyonu ve dövme denemeleri yapılmıştır.

Genellikle alüminyum esaslı alaşımlarda soğuk dövülebilirlik kötü olduğu bilinmekte ancak, mikro yapıdaki katı çökeltilerin sağladığı yaşlandırılabilme imkânı sayesinde de eşsiz mekanik özelliklerin elde edilebildiği görülmüştür.

500° C’de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185° C’de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması neticesinde çekme mukavemeti 406 MPa ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. 500°C de yapılan solüsyona alma ve havada soğutma işlemleri literatürde T4 yapay yaşlandırma olarak görülmektedir. Dünyada alüminyumun en büyük üretici firmalarında biri olan ALCOA© (2020) firması T4 yapay yaşlandırma için minimum 205 MPa çekme değeri garantilemektedir. Eser vd., (2015) 284 MPa değerine kadar ulaşabilmiş ve bu hali ile bile maliyet/ mukavemet oranının çok yüksek olduğu AA 7075’e doğrudan alternatif olabileceği ortaya konulmuştur. Kvacakaj vd. (2009) 550°C’de 1,5 süreyle çözdürüp suda soğutarak 3 defa eş kanallı açısız presleme uygulayıp 100°C’de 30 saat bekleyerek 427MPa çekme mukavemetine ulaştı ancak çok gevrek bir yapı nedeni ile kırılmaya karşı aşırı zayıfladığı görülmüştür ki, yapının hem “mukavemet” hem de “kırılma tokluğu” değerlerinin aynı anda yüksek olduğunu ifade etmek için kullanılan “hasar toleranslı” değeri düşmektedir. Böylesi bir durumda AA6082 alaşımı havacılık sektörünün gereksinimlerini karşılamamaktadır. 185°C’de yaptığımız yaşlandırmada çentik darbe testleri neticesinde 65 J lük enerji absorbe yeteneği gözlemlenmiştir. Bu değer Chen (2017) tarafından 22, 27 J ve 51,71 J olarak bulunmuştur. Yüksek enerji yüksek tokluk anlamına gelir ve bu da yapının gevrek hasara karşı direncinin yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Böylece malzemenin çarpma, ani yükleme, titreşim gibi durumlarına daha dayanıklı olacağı anlamına gelmektedir.

Solüsyona alma işleminden sonra soğuma ortamı olarak hava ve su seçilmiş ve soğutma ortamına bağlı olarak malzemenin çekme mukavemetinde değişme görülmüştür. 4 saati aşkın solüsyona alma işlemlerinde tanelerin iri kaldığı ve yapı içerisinde tam olarak çözülmediği dentrit şeklinde kümelenedikleri, ancak Mg<sub>2</sub>Si fazlarının küçülerek sayısının arttığı ve tane sınırları da birikerek mikro yapıyı heterojenleştirdiği ve mekanik özelliklerde düşüşe sebep olduğu tespit edilmiş olup bu durum Shao vd. (2020), Birol vd. (2017), Kumar vd.'nin (2015) tespitleri ile uyumludur. Bekleme süresinin artmasıyla fazların matris içerisinde çözünme miktarını artmış ve neticede de şekil değiştirebilme miktarı artmıştır.

Çalışmamızda 500°C de 2 saat çözdürülen ve müteakiben de 175°C yapay yaşlandırma işlemi yapılan numunede sertlik değerleri 50-70 Vickers olarak ölçülmüştür. T0 için sertlik değerinin 55 HV olduğu düşünülürse, bu artım beraberinde mukavemet artması da getirmiştir. 170°C'lik yapay yaşlandırma işlemi Eser vd. (2015) ve 160°C için de Chang vd. (2019) tarafından tespit edilen sertlik artışı ile paralel bulgulardır. Angella vd. (2004) 180°C deki yapay yaşlandırma sertlik değerlerini 80-100 HV arasında ölçmüştür. Çalışmamızda 500°C de solüsyona alınan 185°C yapay yaşlandırılan numunelerin sertlik değerini 70 ile 130 HV arasında bulunmuştur. Böylece bulgularımızın literatür ile uyumlu olduğunu görerek tespitlerimizin güvenilirliğini sağlamış olduk.

Çalışmamızda 500°C de solüsyona alma ve 185° yapay yaşlandırma işlemi yapıldığında 233-417 MPa arasında çekme dayanımı ve 74-128 HV 5/15 sertlik değeri bulunmuştur. Zhang vd. (2018) de paralel olarak 180°C için 260-320 MPa arasında bulurken sertlik değerini 40-80 HV<sub>0.5</sub> bulmuşlardır. Bu hali ile araçların direksiyon ve süspansiyon sistem parçalarına, travers saçlarına, St 52 malzemesine alternatif olabilme ve havacılık araçlarının kaburgası olarak tabir edilen frameleri için alternatif olarak değerlendirilmektedir. Başer (2015) 530°C de solüsyona alma işlemi gerçekleştirmiş ve ardından 200°C de 5 dakika ön ısıtma ardından 180°C 30 dakika de boya fırınlaması uyguladığı numunelerde sertlik değeri 44-58 HV<sub>0.2</sub> arasında iken çekme mukavemetini 180-240 MPa arasında bulmuştur.

Çalışmamızda 500°C de solüsyona alma ve 220° yapay yaşlandırma işlemi yapıldığında 148-164 MPa arasında çekme dayanımı ve 48-76 HV<sub>5/15</sub> sertlik değeri bulunmuştur.

Prabhukho vd. (2015) aynı şartlarda 60-64 HRE arasında sertlik bulmuşlardır. Yüzey kaplaması ile kullanımı önerilmiştir.

AA6082 yapay yaşlandırma işleminde su da soğutulan numunelerin polimerli suda soğutulması durumu çalışmamız kapsamına alınmış ve bir takım sonuçlar bölümlerde yer verilmiştir. 500°C solüsyona alınan ve sırası ile 175°C -185°C -195°220°C de yapay yaşlandırılan numuneler %25 ve %50 polimerli su ortamında soğutulmuştur. Çalışmamız kapsamında su da soğutulan numunelere göre sertlik değerleri ve çekme değerleri açısından artış olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak polimer konsantrasyon oranının yüksek olduğu ve çalışmanın daha düşük konsantrasyonlarda tekrar edilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. Çalışma düşük kontrasyonlarda tekrar edilmiş (%2-8 polimer) olup sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiş mukavemetin de artacağı kanaati hasıl olmuştur. Polimerli suyun soğutma ortamı olarak kullanılmasının nedeni ısı transferini azaltmak olmasına rağmen yüksek polimer konsantrasyonu mikro yapı kirlilikleri ve pahalı olması soğutma ortamında %8 den daha fazla polimer ilavesinin yapılmamasını gerektirmektedir. Polimer ilavesi soğutma ortamının hızını yavaşlatmakla birlikte maliyet dezavantajına sahiptir.

Mikro yapı incelemelerinde sıcaklık artıkça tanelerin küçüldüğü ve yapı içerisinde çözüldüğü görülmüştür. 185°C deki mikro yapıdaki tane çözülmesi ve dentritlerin diğer mikro yapılara göre farklı olduğu görülmüştür. Çekme ve sertlik değerlerinin yüksek olması

- Mikro yapı içerisinde tanelerin küçülmüş olması
- Al temel fazının az olması
- Dentritik yapıların az ve çözülmüş olması
- Yapı içerisinde sertliğe önemli etki eden Mg ve Mn elementlerin bileşikler halinde bulunması
- Çekme ve sertlik değerinin yüksek olması özellikle yapı içerisinde bulunan Mg<sub>2</sub>Si fazlarının oluşması ve yapı içinde homojen olarak dağılmış olması gibi temel nedenlerden dolayı mukavemet ve sertlik değerleri artmıştır.

Si ve Mg<sub>2</sub>Si'un yapıyı güçlendirmede veya zayıflatmada mikro yapı açısından ana etken oldukları görülmüştür. Ana etmen  $\beta'$ (Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>) fazı olup 300 dereceye kadar oluştuğu daha sonra  $\beta'$ (Mg<sub>1.8</sub>Si) ve  $\beta$ (Mg<sub>2</sub>Si) ö döndüğü ve mukavemeti düşürdüğü gözlenmiştir.  $\beta'$  fazı çokça dislokasyon içermektedir (Xu vd. 2020; Kumar vd. 2019; Cabibbo vd. 2005). Yapay yaşlandırma sıcaklığının artması ve tanelerin küçüldüğü görülmüştür.

Yapılan yorulma simülasyonların dan elde edilen emniyet katsayısı değeri, mühendislik tasarım hesaplamalarında gereken 1.2 katsayısının çok üzerinde olup, yapının yorulmaya karşı gayet emniyetli olduğu görülmektedir.



## BÖLÜM VII

### SONUÇLAR

Bu çalışmada AA6082 serisi alüminyum alaşımının mekanik ve termomekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapay yaşlandırmanın etkileri araştırılmıştır. Yapılan işlemlerin mikroyapıya olan etkileri belirlenmiştir. Sonuçta da, en uygun yapay yaşlandırma koşulları tespit edilmiştir. Bu değerler otomotiv sektöründe kullanılan rot başının yorulma, dövme simülasyonlarında kullanılmıştır. Dövme simülasyonunu doğrulamak üzere deneysel yorulma ve sıcak dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Rotun çalışma ömrü, dövme işlemi için pres kuvvet gereksinimi, çapak oranı, işlem süresi, gerilme-deformasyon değerlendirilmesi sunulmuştur. Yapılan bu çalışmalar sonucunda tespit edilmiş olan temel çıkarımlardan öne çıkanları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- AA6082 alaşımı, bünyesindeki katı çökeltiler oluşumu nedeni ile yapay yaşlandırma özellikleri iyidir.
- AA7075 alaşımından mamül edilmekte olan ürünler için, hem mekanik hem de maliyet açısından meydan okuyabilecek alternatiftir.
- En uygun yaşlandırma koşulları 500°C'de 2 saat beklenip suda soğutulmak suretiyle çözdürülmüş numunelerin 185°C'de 4 saat tutulup havada soğutularak yapay yaşlandırması neticesinde elde edilmiştir. Bu halde çekme mukavemeti 406 MPa ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır.
- Enerji absorbe yeteneğinin yüksek olması nedeni ile çarpmaya, ani yüklemeye, titreşime maruz yapısal parçalar için ve balistik özellik gerektiren uygulamalara iyi bir alternatiftir.
- Mikro yapıda en etkili faz  $\beta'$  ( $Mg_5Si_6$ ) fazı olup mukavemete olumlu katkısı varken, 300 dereceye kadar oluştuğu daha sonra  $\beta'$  ( $Mg_{1.8}Si$ ) ve  $\beta$  ( $Mg_2Si$ ) fazlarına dönüştüğü ve mukavemeti olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. 4 saatten daha fazla bekleme süreleri yapıda ince dağılıma yol açarken tane irileşmesi ve hatta dentrit oluşmasını da beraberinde getirerek mukavemeti azalması olmaktadır.
- Sertlik değerinin yüksekliği aşınma dayanımı açısından olumlu iken deforme edilebilirliği de azaltabilmektedir. %30 dan daha fazla deformasyonlarda çatlak

oluşumu ve hasar muhtemeldir. Mg ve Mn yapı içerisinde sertliğe etki eden önemli elementlerdir.

- Yaşlandırılmış alaşımın soğuk dövülebilirliği, gevrekleşme ve çatlak oluşumu nedenleri ile kötüdür.
- Alaşımın sıcak dövülmesinde kalıp boşluğunu yeterince dolduramaması riski mevcuttur. Dövme için tasarlanan kalıbın 425°Cden daha fazla sıcaklığa sahip kütüğün, kalıp boşluğunu tamamen dolduramayacağı sonucu, simülasyonlar neticesinde ortaya çıkmıştır. Her ne kadar kalıp tasarım değişikliği ile bu durum bertaraf edilse bile, beraberinde getirebileceği yeni baştan mühendislik analizleri gereksinimi yerine hem ısıtma ekonomisi hem de üstün yaşlanma kalitesi nedeni ile ılık şekillendirme tavsiye edilmektedir.
- Alaşımın ılık dövülmesi için hem mikro yapı, hem mukavemet hem şekillendirme, hem enerji emme yeteneği açısından 160-300 °C aralığının dışına çıkılmaması önerilmektedir.

## 7.1 Müteakip Çalışmalar ve Öneriler

Mevcut çalışma sayesinde AA6082 alaşımının oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri tespit edilmiş ve yapay yaşlandırma süreç tasarımı oluşturulmuştur. Uygulama olarak otomotiv sanayinde direksiyon sistem parçası olan rot başının gövde parçası için simülasyon ve denemeler gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışma; yeni kalıp tasarımı yapılması ve denemeler ile teyit edilmesi sureti ile genişleme potansiyeline sahiptir.

Farklı iş parçası geometrileri için ve farklı deformasyon hızlarında malzeme tepkisinin deneysel tespiti ve simülasyonda kullanılan malzeme modelinin optimize edilmesi konusunda ileri çalışmalar yapılabilmesi mümkündür. Halen oda sıcaklığında temin edilen değerleri, farklı sıcaklıklarda da temini yapılabilecektir. XRD mikro yapılarının incelenmesi ile fazlardaki bileşik miktarlarının tayini ve deformasyonlarla aralarındaki ilişkilerin tespit edilmesi mümkündür. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi, alaşımın farklı deformasyon şartlarında daha ileri tecrübe edinilmesine yol açabilecektir.

Müteakip çalışma alanlarının oluşmasına yol açabilme imkânının mevcut olduğu görülmektedir. Zira edinilen bu tecrübelerin rot başı haricindeki başka yapısal parçalar için de uygulanabilirliği müteakip potansiyel araştırma konularındandır. Örneğin;

Özellikle pahalı olmasından dolayı kullanımı kısıtlı olan AA 7075 alaşımının halen kullanılmakta olduğu havacılık parçaları için gereksinimlerden taviz verilmeksizin bire bir değişiminin yapılabileceği şekilde ısıl işlem/imalat süreçlerinin tasarımının gerçekleştirilmesi, doğrulanmasının yapılarak hem ekonomik hem de akademik çıktılar elde etme potansiyeli mevcuttur.





## KAYNAKLAR

ALCOA, “Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6082 - T4 Extrusions”  
[“http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T4-Extrusions\\_147.ashx”](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T4-Extrusions_147.ashx)  
02 Mayıs 2020.

Altenpohl, D., “Aluminum viewed from within an introduction into the metallurgy of aluminum fabrication”, *Aluminium-Verlag*, Dusseldorf, 133-147, 1982.

Altenpohl, D., “Aluminum: technology, applications and environment, the aluminum association and the minerals”, *Metals Materials*, Washington, 1998.

Aluminium Federation, “The properties of aluminium and its alloys, Broadwayhouse”, *Calthorpe Road*, Birmingham, 1983.

Angella, G., Bassani, P., Tuissi, A. and Vedani, M., “Aging behaviour and mechanical properties of a solution treated and ecap processed 6082 alloy”, *Materials Transactions* 45(7), 2282-2287, 2004.

Askeland, D. R., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, Çeviri Editörü, Mehmet Erdoğan, *Nobel Yayınevi*, Ankara, cilt 1, s. 238-245, 1998.

ASTM B 557M – 02a, Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products, *ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM E8/E8M – 09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, *ASTM International*, 100 Barr Harbour Dr., PO Box C700 West Conshohocken Pennsylvania 19428-2959, United States.

ASTM E 340 – 00, Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys, *ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM E 606 – 92, Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing. *ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM E606/E606M – 12, Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, *ASTM International*, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

Başer, T. A., “Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı”, *UCTEA Chamber of Mechanical Engineers, Engineer and Machine* 53(635), 51-58, 2012.

Başer, T. A., “Effect of aging parameters on the mechanical properties of naturally aged Al–Mg–Si alloy”, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 46(8), 829-834, 2015.

Bırol, Y., İlğaz, O., Akdi, S. and Ünüvar, E., “Comparison of cast and extruded stock for the forging of AA6082 alloy suspension parts”, *Advanced Materials Research* 939, 299-304, 2014.

Bırol, Y., Gokcil E., and Akdi S., “Potential of twin-belt-cast EN AW 6082 blanks for the manufacture of wishbone suspension forgings”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92, 3693–370, 2017.

Brynjulfsen, M., “Fatigue of Extruded AA6082 and AA7108 Alloys”, Department of master of degree thesis”, *Materials Science and Engineering Norwegian University of Science and Technology* 11, 2015.

Bouquerel, J., Diawara, B., Dubois, A., Dubar, M., Vogt J.B., and Najjar, D., “Investigations of the microstructural response to a cold forging process of the 6082-T6 alloy”, *Materials and Design* 68, 245–258, 2015.

Cabibbo, M., Evangelista, E., and Vedani, M., “Influence of severe plastic deformations on secondary phase precipitation in a 6082 Al-Mg-Si alloy”, *Metallurgical and Materials Transactions* 36A, 1353-1364, 2005.

Car, E., “Alüminyum üretim süreçleri”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, İstanbul, 2-15, 2011.

Chang L, Y., Hung F, Y., and Lui T,S., “Study of microstructure and tensile properties of infrared-heat-treated cast-forged 6082 aluminum alloy” *Journal of Materials Research and Technology* 8(1), 173–179, 2019.

Chen, X., Peng, Y., Peng, S., Yao, S., Chen, C. and Xu, P., “Flow and fracture behavior of aluminum alloy 6082-T6 at different tensile strain rates and triaxialities”, *Plos One* 12(7), 1-28, 2017.

Çapan, L., “Metallere plastik şekil verme”, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 2010.

Dadbakhsha, S., Taheria A, K., and Smith C,W., “Strengthening study on 6082 Al alloy after combination of aging treatment and ECAP process”, *Materials Science and Engineering*, A 527, 4758–4766, 2010.

Davis, J. R. and Semiatin, S. L., “Forming and Forging”, *ASM Metals Handbook* 14, ASM International, 1989.

Davis, J.R., “ASM specialty handbook, aluminum and aluminum alloys”, *ASM International*, United States of America, 23, 59-86, 248-327, 649-690, 1993.

Eker, A.A., “Al ve alaşımları ders notları”, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, 1-16, 2018.

Eroğlu, G. ve Şahiner, M., “Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı*, Aralık, 2018.

Eser, A. A., Gökçi, E. L., Akdı, S. ve Birol, Y., “Alüminyum işlem alaşımlarının t6 ısıl işleminde yaşlandırma sıcaklık ve sürelerinin incelenmesi”, *Verimlilik Kongresi* 2015. FGDC-STD-001-1998, Mineral Commodity Summaries, *U.S. Geological Survey National Minerals Information Center*, 988 National Center Reston, USA.

Gokcil, E., Akdi, S. and Birol Y., “A novel processing route for the manufacture of EN AW 6082 forged components”, *Material Research Innovations* 19(10), 311-313, 2015.

Guo, G., “Aluminum microstructure evolution and effects on mechanical properties in quenching and aging process”, Doctoral Dissertation, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 53-57, 2017.

Güner, A. T., “Yarı-katı halde şekil verilmiş alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine su verme sıcaklığının etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, s.8-10, 2013.

Higgins, R. A., “Materials for Engineers and Technicians”, *Newnes-Elsevier*, Oxford, UK, 93-102, 216-229, 2006.

İlgaz, O., “Döküm, ekstrüzyon ve dövme işlemlerinin 6082 al alaşımlı dövme süspansiyon parçalarında mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s. 1-15, 2014.

ISO 148-1, Metallic materials — Charpy pendulum impact test, *International Standard*, Second edition, 2009.

Kaufman, J. G., “Properties Of Aluminum Alloys”, *ASM International® Materials Park*, 44073-0002, Ohio, July, 2008.

Kılıç, S., “Twip Çeliklerde İkizlenme Mekanizmasının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2016.

Kilic, S., Kacar, I., Sahin, M., Ozturk, F. and Erdem, O., “Effects of Aging Temperature, Time, and Pre-Strain on Mechanical Properties of AA7075”, *Materials* 22(5), 1-13, 2019.

Krolo, J., Lela B., Ljumović P., and Bagavac P., “Enhanced Mechanical Properties of Aluminium Alloy EN AW 6082 Recycled without Remelting”, *Tehnički vjesnik* 26, 5,1253-1259, 2019.

Kumar N., Goel S, and Brokmeier J.H.G., “Effect of solution treatment on mechanical and corrosion behaviors of 6082-t6 al alloy”, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 4, 411–422, 2015.

Kumar, N., Jayaganthan, R., and Brokmeier H., G. “Effect of deformation temperature on precipitation, microstructural evolution, mechanical and corrosion behavior of 6082 Al alloy”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 27, 475–492, 2017.

Kumar, N., Owolabi G.M., and Jayaganthanb R., “Al 6082 alloy strengthening through low strain multi-axial forging”, *Materials Characterization* 155, 2019.

Kumar, M., Baloch, M. M., Abro, M. I., Memon, S. A., and Chandio, A. D., “Effect of Artificial Aging Temperature on Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy” *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology* 38(1), 31-36, 2019.

Kvackaj T., Rjjda M., and Besterc M, “Ultra fine microstructure and properties formation of EN AW 6082 alloy”, *Trans. JSASS Space Tech. Japan* 7(26), pp. Pc\_85-Pc 91, 2009.

Lowe, A., Ridgway, K. and Atkinson, H., “The pros and cons of semi-solid processing”, *Materials World* 7(9), 541-43 September, 1999.

Mario, C., Giancarlo, D., and Rodolfo, T., “Aluminium and Its Applications”, *Edimet*, Brescia, 1992.

Muirhead, J. J., “The morphological characterisation of grains and grain boundaries”, Doctoral Dissertation, *Sheffield Hallam University*, United Kingdo, 83-90, 2001.

Mrówka-Nowotnik, G. and Sieniawski, J. “Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys”, *Journal of Materials Processing Technology* 367-372, 2005.

Naser, T. B., Bobor, K. and Krállics, G., “Tensile behavior of multiple forged 6082 Al alloy”, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 58 (2), 113-117, 2014.

Nowotnik, G. M., Sieniawski, J. and Wierzbńska, M., “Intermetallic phase particles in 6082 aluminium alloy”, *Archives of Materials Science and Engineering* 28(2), 69-76, 2007.

Oersted, H. C., “Periodic table: Aluminum” *From The Latin Word Alumen*, 1996.

Oğuz, B., “Demirdışı Metaller Kaynağı Metalurjisi-Uygulama”, *Oerlikon*, 1990.

Özer, B., Güven, V. ve Mustafaoğlu, M., “Dünya ve Türkiye’de Alüminyum Pazarı ve Ticareti”, *Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi*, Seydişehir, Konya, Mayıs, 2003.

Pittsburgh Reduction Company plant in Massena, “An image of the Pittsburgh Reduction Company plant in Massena”, <https://historicpittsburgh.org/islandora/object/pitt:20170210-hpichswp-0024>, New York, May 30 2020.

Prabhukhot, A. R., and Prasad, K., “Effect of heat treatment on hardness of 6082-T6 aluminum alloy”, *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6(12), 38-42, 2015.

Petrofer©, “Isomax Serisi” *Petrofer endüstriyel yağlar ve kimyasallar*, [http://www.petrofer.com.tr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=47&Itemid=69&lang=tr](http://www.petrofer.com.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=47&Itemid=69&lang=tr), 05 Mayıs 2020.

Sancar, İ., “Alüminyum kristal yapısı hakkında bilgi”, <https://docplayer.biz.tr/131345-1-giris-2-kristal-yapilar-3-kristal-kafes-noktaları-4-kristal-kafes-dogrultuları-ve-duzlemler-malzeme-bilgisi-b3.html>, 01 Mart 2020.

Shao, Z., Lee, J., Wang, J., Lin, J., and Jiang, J., “A study of various heating effects on the microstructure and mechanical properties of AA6082 using EBSD and CPFE” *,Journal of Alloys and Compounds* 818, 2020.

Sürmen Ö., Tarakçı M., Gençer Y. and Zeytin S., “Improvement of heat treatment application of aluminium forged parts”, *UCTEA Chamber of Metallurgical & Materials Engineers*, 721-724, 2016.

Tan, E., “Alüminyum alaşımlarında blister oluşumu”, Doktora Tezi, *P. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 2011.

Temürtürkan, Y. ve Kabukçu, K. S., “Alüminyumun Sektördeki Yeri ve Önemi”, *II.Alüminyum Sempozyumu*, Seydişehir, Konya, Mayıs, 2003.

Thangarasu, A., Murugan,N. and Dinaharan, I., “Production and wear characterization of AA6082 -TiC surface composites by friction stir processing”, *Procedia Engineering*, 97, 590 – 597, 2014.

Torca, I., Aginagalde, A., Esnaola, J. A., Galdos, L., Azpilgain, Z. and Garcia, C., “Tensile behaviour of 6082 aluminium alloy sheet under different conditions of heat treatment, temperature and strain rate”, *Key Engineering Materials* 423, 105-112, 2010.

TS EN 10260-1, Çeliklerin kısa gösteriliş sistemi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara 2003.

TS EN ISO 643, Çelikler - Görünür tane büyüklüğünün mikrografik tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2012.

Turbaloğlu, K., “6063 Alüminyum alaşımının düşey sürekli döküm yönteminde üretim parametrelerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, s. 5, 2008.

Vatansever, F., Ertürk, A. T. ve Karabay, S., “Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 20(60), 797-803, 2018.

Weissbach W.; Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Malzeme bilgisi ve muayenesi, Çeviri Editörü, Anık, S., Anık, E.S., 215-217, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 1967.

Xu, Z., Ma H., Zhao, N., and Hu Z., “Investigation on Compressive Formability and Microstructure Evolution of 6082-T6 Aluminum Alloy”, *Metals* 10, 469, 2020.

Yibo, P., Gang, W., Tianxing, Z., Shangfeng, P. and Yiming, R., “Dynamic Mechanical behaviors of 6082-T6 aluminum alloy”, *Advances in Mechanical Engineering* 2013(8), 1-8, 2013.

Zhang L., He H., Li S., Wu X. and Li L., “Dynamic compression behavior of 6005 aluminum alloy aged at elevated temperatures”, *Vacuum*, 155, 604–611, 2018.

Zulfi, F. R., and Korda, A. A., “Effect of pre-strain on mechanical properties and deformation induced transformation of 304 stainless steel”, *Journal of Physics: Conference Series* 739, 1-7, 2016.

Zvinys, J., Kandrotaitė J. R., Meskys, J. and Juzenas, K., “Investigation of thermo mechanical effect on structure and properties of aluminum alloy 6082”, *Scientific Proceedings IX International Congress, Machines, Technologies, Materials* 3, 13-16, 2012.

Zvinys, J., Kandrotaitė J. R., Meskys, J. and Juzenas, K., “Investigation of thermo mechanical effect on structure and properties of aluminium alloy 6082”, *Machines, Technologie, Materials : International Virtual Journal For Science, Technics And Innovations For The Industry* 9, 3-6, Lithuania, 2012.



## ÖZ GEÇMİŞ

1990 Kahramanmaraş Elbistan doğumluyum. İlk, orta ve lise eğitimi 2009 yılına kadar Elbistan da tamamladım. Yükseköğrenim için 2009 yılında Niğde'ye geldim. 2015 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldum. 2017 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliğinde Yüksek Lisans Eğitime başladım. 2014 yılında stajyer olarak başladığım Ditaş Doğan yedek parça ve imalat ve teknik A.Ş. de çalışma hayatıma kalıp mühendislik ve İmalat yöneticisi olarak devam etmekteyim.

## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 2 (iki) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Tunç Ö., Kacar İ., Kiliç S. and Bidav K., “Determination of effects of dissolution time on mechanical properties of AA6082 alloys for forging”, **1<sup>st</sup> International Conference On Environment, Technology and Management (ICETEM)** pp. 488-499, 2019.

Tunç Ö., Kacar İ., Kiliç S. and Bidav K., “Investigation of ageing parameters Al 6082 alloy”, **International Turkic World Congress on Science and Engineering** ISBN 978-975-8062-32-4 pp. 1215-1223, 2019.

