**T.C.**

**TRAKYA ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM İŞ PARÇALARINA AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON METOTLARI UYGULANARAK MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

**CEM MISIRLI**

**DOKTORA TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz ÇAN**

**EDİRNE-2023**

**CEM MISIRLI**'nın hazırladığı "**Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Alüminyum İş Parçalarına Aşırı Plastik Deformasyon Metotları Uygulanarak Mekanik Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Prof. Dr. Yılmaz ÇAN (Danışman) …….....

Prof. Dr. Mümin ŞAHİN ..……...

Doç. Dr. Ali İhsan MEŞE …….

Doç. Dr. Sencer Süreyya KARABEYOĞLU …….

Doç. Dr. Ümit HÜNER …….

Tez Savunma Tarihi: 18/01/2023

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Yılmaz ÇAN …….

Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI**

**DOĞRULUK BEYANI**

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

18/01/2023

*Cem MISIRLI*

*İmza*

Doktora Tezi

Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Alüminyum İş Parçalarına Aşırı Plastik Deformasyon Metotları Uygulanarak Mekanik Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

# ÖZET

Alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, büyük ölçüde faz bileşimlerine ve mikroyapılarına bağlıdır. Yüksek mukavemet; ince, homojen olarak dağılmış ikinci faz parçacıklarının yüksek hacimli fraksiyonunun eklenmesiyle ve tane boyutunun iyileştirilmesi ile elde edilmektedir. Toz metalurjisi, daha fazla çökelme güçlendirmesi için uygun olan artırılmış katı çözünürlüğe sahip ince taneli malzemelerin hazırlanmasına olanak sağlamaktadır. Alüminyum alaşımları, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kapsamlı bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle uçakların kanat ve gövdelerinde kullanılmakla birlikte otomobillerde de motor bloğu, jant, iskelet, dış gövde ve çeşitli parçalarda kullanımı artmıştır. Bu iki ana sektöre ek olarak, tıbbi cihazlar, ısıtma ve soğutma cihazları, bina ve yapılar, elektronik ürünler ile ev ve el aletlerinin üretiminin yapıldığı birçok mühendislik sektöründe de alüminyum alaşımlarının kullanımı artmıştır. Bu çalışmada 600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklıklarda 4 saat süre ile 750 MPa basınç uygulanarak toz metalurjisi (sinterleme) ile üretilmiş AA7075 alaşımı ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımı aşırı plastik deformasyon işlemi ile deforme edilecektir. Aşırı plastik deformasyon işlemi için eşit kanal açısal basma kalıp (ECAP) kullanılacaktır. Aşırı plastik deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası AA7075 alaşımı ve AA7075Zr alaşımı elektron mikroskobunda incelenecektir. Daha sonra numunelerin üzerinde sırasıyla sertlik, çekme ve yorulma deneyleri uygulanarak numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin değişimi analiz edilecektir.

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 165

Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, aşırı plastik deformasyon(ECAP), plastik şekil verme, sertlik, çekme deneyi, yorulma deneyi

PhD Thesis

Investigation of the Change of Mechanical Properties by Applying Extreme Plastic Deformation Methods to Aluminum Workpieces Produced by Powder Metallurgy Method

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Mechanical Engineering

# ABSTRACT

The mechanical properties of aluminum alloys are largely dependent on their phase composition and microstructure. High strength; It is obtained by adding a high volume fraction of fine, homogeneously dispersed second phase particles and improving the grain size. Powder metallurgy allows the preparation of fine-grained materials with increased solid solubility suitable for further precipitation strengthening. Aluminum alloys have a wide range of uses in the aerospace and automotive industries. It is used especially in the wings and bodies of airplanes, but also in automobiles, its use in engine blocks, rims, skeleton, outer body and various parts has increased. In addition to these two main sectors, the use of aluminum alloys continues and increases in many engineering sectors where the production of medical devices, heating and cooling devices, buildings and structures, electronic products and household and hand tools is made. In this study, AA7075 alloy produced by powder metallurgy (sintering) by applying 750 MPa pressure at 600 $^{o}$C to 700 $^{o}$C temperatures for 4 hours and AA7075Zr alloy containing 1% Zr by weight will be deformed by extreme plastic deformation process. Equal channel angular compression molding (ECAP) will be used for the extreme plastic deformation process. Before and after extreme plastic deformation, AA7075 alloy and AA7075Zr alloy will be examined under electron microscope. Then, the hardness, tensile and fatigue tests will be applied on the samples, respectively, and the changes in the microstructure and mechanical properties of the samples will be analyzed.

Year : 2023

Number of Pages : 165

Keywords : Powder metallurgy, severe plastic deformation(ECAP), plastic forming, hardness, tensile testing, fatigue testing

# TEŞEKKÜR

Çalışma konusunun belirlenmesi, çalışmanın hazırlanması ve yürütülmesi sürecinin her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve değerli zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Yılmaz ÇAN'a teşekkür ederim.

Tezimde kullanmış olduğum iş parçalarının üretilmesi ve deney numunesi olarak hazırlanmasında tarafıma katkı sağlayan Alumin Yapı İth. İhr. San. ve Tic. Ltd. Şirketine, yorulma deneylerinin yapılmasında deney teçhizatlarını kullandığım Hema Endüstrisi A.Ş. Hattat Holding'e, atölyelerini kullandığım Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesine ve son olarak Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma, Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğüne teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **vi**

**TEŞEKKÜR** ..... **viii**

**İÇİNDEKİLER** ..... **ix**

**SEMBOLER VE KISALTMALAR** ..... **xii**

**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **xiv**

**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... **xxi**

**BÖLÜM 1** ..... **1**

**GİRİŞ** ..... **1**

1.1. Giriş ..... 1

1.2. Tezin Amacı ..... 3

1.2.1. Elastik Şekil Değiştirme ..... 4

1.2.2. Plastik Şekil Değiştirme ..... 4

1.2.3. Elasto-Plastik Şekil Değiştirme ..... 4

1.3. Plastik Şekil Verme ..... 4

1.4. Aşırı Plastik Deformasyon ..... 5

1.5. Bazı Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri ..... 7

1.5.1. Eşit Kanal Açısal Basma ( Equal Channel Angular Pressing-ECAP) ..... 7

1.5.2. Çevrimsel Ekstrüzyon ve Basma (Cyclic Extrusion Compression- CEC) ..... 9

**BÖLÜM 2** ..... **10**

**LİTERATÜR ARAŞTIRMASI** ..... **10**

2.1. Mukavemetin Yüksek Sıcaklık Kararlılığı ..... 10

2.1.1. Güçlendirici Parçacıkların Kararlılığı ..... 10

2.2. İşleme Yöntemleri Teorisi ..... 11
2.2.1. Toz Üretim Teknikleri ..... 11
2.3. Alüminyum Alaşımları ..... 11
2.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Toz Metalurjisi ..... 13
2.3.2. Yüksek Sıcaklık Alüminyum Alaşımları ..... 15
2.3.3. Zirkonyum Elementinin (Zr) Al Alaşımındaki Rolü ..... 17
2.3.4. Toz Metalurjisi ..... 18
2.4. AA 7075 Alaşımı ..... 23
2.5. Zirkonyum Metali ..... 24
2.6. AA 7075 Alaşımı ve % 1 Zr İçeren AA7075 Alaşımları ..... 25
2.7. Eşit Kanal Açısal Presleme (ECAP) ..... 25
2.8. ECAP Sırasında Evrim Mikroyapısı ..... 28
2.9. ECAP İşleme Prensipleri ..... 29
2.10. ECAP-PC Sırasında Preslemenin Etkisi ..... 32
**BÖLÜM 3 ..... 36**
**MALZEME HAZIRLAMA VE DENEYSEL ARAŞTIRMA ..... 36**
3.1. Malzeme Hazırlama ..... 36
3.2. Deney Numuneleri ile Deney Araç ve Teçhizatları ..... 40
3.3. Mikroyapı İncelemesi-Sem Görüntüsü ..... 43
3.4. Numunelerin Sertlik Deneyleri ..... 47
3.4.1. Sertlik Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi ..... 53
3.5. Numunelerin Çekme Deneyleri ..... 55
3.5.1. Çekme Deneyi Sonuçları ..... 66
3.6. Numunelerin Yorulma Deneyleri ..... 69
3.6.1. Yorulma Deneyi Sonuçları ..... 116

**BÖLÜM 4.....118**

**DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....118**

4.1. Sertlik Deneyi Analiz Sonuçları.....118

4.2. Çekme Deneyi Analiz Sonuçları .....121

4.3. Yorulma Deneyi Analiz Sonuçları .....125

**KAYNAKLAR .....132**

**ÖZGEÇMİŞ.....141**

# SEMBOLER VE KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| Al | Alüminyum |
| C | Karbon |
| ℃ | Santigrat Derece |
| Co | Kobalt |
| Cr | Krom |
| Cu | Bakır |
| Fe | Demir |
| GPa | Giga Pascal |
| Hf | Hafniyum |
| kN | Kilonewton |
| Mg | Magnezyum |
| Mn | Mangan |
| Mo | Molibden |
| MPa | Mega Pascal |
| N | Newton |
| Ni | Nikel |
| nm | Nanometre |
| O | Oksijen |
| Sc | Skandiyum |
| Si | Silisyum |
| T6 | Çözeltiye Alma ve Yapay Yaşlandırma Isıl İşlemi |
| Ti | Titanyum |

| | |
|---|---|
| V | Vanadyum |
| Zn | Çinko |
| Zr | Zirkonyum |
| μm | Mikrometre |
| $\sigma_y$ | Akma Gerilimi |
| $\sigma_0$ | Diğer Güçlendirme Mekanizmalarının Katkısı |
| $d$ | Tane Boyutu |
| $k$ | Her Malzeme İçin Sabit Bir Değer |
| θ | Teta Açısı |
| γ | Kayma Miktarı |
| ε | Efektif Gerinim |

## KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| AA | Alüminyum Alaşımı |
| ARB | Biriktirmeli Hadde Yapıştırması |
| CEC | Çevrimsel Ekstrüzyon ve Basma (Cyclic Extrusion Compression) |
| ECAP | Eşit Kanal Açısal Basma (Equal Channel Angular Pressing) |
| HRE | Hardness Rockwell |
| RT | Oda Sıcaklığı |
| SEM | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| UFG | Ultrafine Grained |
| XRD | X-Işını Difraksiyonu |
| TSE | Türk Standartlar Enstitüsü |
| ISO | International Organization for Standardization |

# ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Eşit kanal açısal basma yönteminin şematik görünümü. ..... 8

Şekil 1.2. Eşit dik kesitli yanal ekstrüzyon yönteminin şematik görünümü A) klasik yöntem, B) S tipi ..... 8

Şekil 1.3. Çevrimsel ekstrüzyon ve basma. ..... 9

Şekil 2.1. $Al_3Zr$ fazının birim hücrelerinin şeması: a) yarı kararlı $L1_2$ modifikasyonu, b) stabil $DO_{23}$ modifikasyonu. ..... 17

Şekil 2.2. Bir sinterleme fırınındaki işlemler zincirinin şematik gösterimi. Diyagram, tipik zaman-sıcaklık profilini göstermektedir (Sarıtaş vd., 2007). ..... 19

Şekil 2.3. Sinterleme ile toz partiküllerinde boyun oluşum başlangıcı ..... 20

Şekil 2.4. Toz malzemenin etkisi ile difüzyona uğrama mekanizması. ..... 21

Şekil 2.5. Toz partiküllerinin noktasal temasıyla başlayan sinterleme sırasında gözenek yapısının gösteren şematik diyagram. ..... 21

Şekil 2.6. Sinterleme ile üretilmiş örnek malzemeler. ..... 23

Şekil 2.7. AA7075 için ısıl işlem diyagramları: (a) Tavlama-(O); (b) Katı çözelti muamelesi (Söndürme + suni yaşlandırma)-(T6). ..... 24

Şekil 2.8. ECAP ve ARB'nin uygulama alanları: a) aşırı plastik deformasyon ile üretilen yüksek mukavemetli diş; b) aşırı plastik deformasyon nanoyapısından yapılmış plak implantları; c) nanoyapılı AA1420'den imal edilmiş motor bloğu makinesi; d) yüksek mukavemetli malzemelerden askeri helikopter gövdesi; e) İçi boş kanatlı modeller için UFG Ti-6Al-4V süperplastisite levha malzemeleri f) askeri cihaz - amfibi saldırı aracı, BAE Systems'in izniyle (Resev, 2002; Tähemaa, 2002). ..... 27

Şekil 2.9. ECAP sürecinden geçen mikroyapı gelişiminin şematik gösterimi: (a) açıdan geçmeden önce iri taneler; (b) basıncın daralması nedeniyle çıkıkların hareketi; (c) hareket ikizlenmesine dönüşen dislokasyon duvarlarıyla sonuçlanan kayan kayma düzlemleri; (d) ikincil kayma ve mikro bantların hareketi (Barashkova, 2006). ..... 29

Şekil 2.10. Tipik bir ECAP kalıp tesisinin şematik modelleri: mikroyapıdaki değişiklikleri belirlemek için enine veya boyuna en iyi yönü belirlemek için X, Y ve Z düzlemleri (Kartushinsky, Krupensky, Tisler, Hussainov , & Shcheglov , 2009). ..... 30

Şekil 2.11. ECAP kalıbındaki kesme düzlemini açıklayan ECAP ilkesi. ..... 31

Şekil 2.12. Dört temel ECAP işleme yolu (Kaljas, 2005) ..... 32

Şekil 2.13. Paralel bir kanalın kanal kesitinin sırasıyla presleme etkisine farkı - her köşe karakteristik özellikler farklılığı üretir (Peetsalu, 2007). ..... 33

Şekil 2.14. (Kollo, 2007)'dan uyarlanmış ECAP-PC'de tek geçişte etkili gerinim üzerindeki yer değiştirme kanallarının etki kesitleri. ..... 33

Şekil 2.15. Gerinim sertleşmesi üs değerlerine karşı sıkıştırma basıncının büyüklüğünün diyagramı (Kollo, 2007). ..... 34

Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan eşit kanal açısal basma kalıbı (kapalı durum üstten görünüm) ..... 37

Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan eşit kanal açısal basma kalıbı (kapalı durum yandan görünüm) ..... 38

Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan eşit kanal açısal basma kalıbı (açık durum) ..... 38

Şekil 3.4. Numunelerin mikroyapısını incelemede kullanılan cihazlar. ..... 40

Şekil 3.5. Çekme deneylerinde kullanılan cihaz. ..... 41

Şekil 3.6. Yorulma deneylerinde kullanılan cihaz. ..... 42

Şekil 3.7. Yorulma deneylerinde kullanılan cihazın teknik özellikleri. ..... 43

Şekil 3.8. 600 $^{o}$C sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 44

Şekil 3.9. 600 $^{o}$C sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 44

Şekil 3.10. 700 $^{o}$C sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 45

Şekil 3.11. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 45

Şekil 3.12. 600 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 46

Şekil 3.13. 600 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1Zr), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 46

Şekil 3.14. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2Zr), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 47

Şekil 3.15. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2Zr), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü. ..... 47

Şekil 3.16. Deney Numunesi ..... 48

Şekil 3.17. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) basma sayısı-sertlik grafiği. ..... 49

Şekil 3.18. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının basma sayısı-sertlik grafiği. ..... 50

Şekil 3.19. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının basma sayısı-sertlik grafiği. ..... 51

Şekil 3.20. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile AA7075Zr (numune-2Zr) alaşımının basma sayısı-sertlik grafiği. ..... 52

Şekil 3.21. Deformasyona uğrayan ve uğramayan AA7075 alaşımlarının ve AA7075Zr alaşımlarının basma sayısı-sertlik grafiği. ..... 53

Şekil 3.23. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının basma sayısı - çekme dayanımı grafiği. ..... 58

Şekil 3.24. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı. ..... 59

Şekil 3.25. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının basma sayısı - çekme dayanımı grafiği. ..... 60

Şekil 3.26. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı. ..... 61

Şekil 3.27. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının basma sayısı - çekme dayanımı grafiği. ..... 62

Şekil 3.28. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı. ..... 63

Şekil 3.29. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının basma sayısı çekme dayanımı grafiği. ..... 64

Şekil 3.30. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı. ..... 65

Şekil 3.31. Aşırı plastik deformasyon uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin basma sayısı - çekme dayanımları. ..... 65

Şekil 3.32. Aşırı plastik deformasyon uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin basma sayısı - % uzama oranı. ..... 66

Şekil 3.33. Yorulma deneyi numunesi. ..... 70

Şekil 3.34. Yorulma deneyi numunesi fotoğrafı. ..... 70

Şekil 3.35. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) Wöhler Eğrisi. ..... 72

Şekil 3.36. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) Wöhler Eğrisi. ..... 74

Şekil 3.37. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) çizilen Wöhler Eğrisi. ..... 76

Şekil 3.38. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) Wöhler Eğrisi. ..... 78

Şekil 3.39. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. 80

Şekil 3.40. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. 82

Şekil 3.41. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .....84

Şekil 3.42.700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .....86

Şekil 3.43. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .....88

Şekil 3.44. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi..90

Şekil 3.45. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .....92

Şekil 3.46. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .....94

Şekil 3.47. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .96

Şekil 3.48. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .98

Şekil 3.49. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. .....100

Şekil 3.50. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....102

Şekil 3.51. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. ..... 104

Şekil 3.52. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. ..... 106

Şekil 3.53. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. ..... 108

Şekil 3.54. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi. ..... 110

Şekil 3.55. Numunelere ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği. ..... 111

Şekil 3.56. Numunelere bir basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği. ..... 112

Şekil 3.57. Numunelere iki basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği. ..... 113

Şekil 3.58. Numunelere üç basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği. ..... 114

Şekil 3.59. Numunelere dört basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği. ..... 115

Şekil 4.1. Numunelere uygulanan deformasyon ile % sertlik değerlerinin değişimi grafiği. ..... 119

Şekil 4.2. Numunelere uygulanan ilk deformasyon ile dördüncü deformasyon işlemi ile % sertlik değerlerinin değişimi grafiği. ..... 120

Şekil 4.3.Numunelere uygulanan deformasyon ile % çekme dayanımı değişim grafiği. ..... 122

Şekil 4.4. İlk deformasyon basamağı ve dördüncü deformasyon basamağı sonrası % uzama oranları değişim grafiği. ..... 123

Şekil 4.5. Numunelere uygulanan deformasyon işlem basamağı ile % çekme dayanımı değişimi grafiği. ..... 124

Şekil 4.6. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi. ..... 125

Şekil 4.7. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi. ..... 126

Şekil 4.8. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi. ..... 127

Şekil 4.9. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi. ..... 128

Şekil 4.10. ECAP öncesi ve ECAP sonrasında $3x10^5$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin değişim grafiği. ..... 129

Şekil 4.11. $10^6$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin basma sayısı ile değişim grafiği. ..... 131

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Toz üretimi ve toz ürünlerden parça üretimi. ..... 11

Çizelge 2.2. Farklı parametrelerle mekanik öğütme ile ulaşılan Al alaşımlarının son tane boyutları. ..... 14

Çizelge 3.1. İncelenen alaşımların % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimi. ..... 36

Çizelge 3.2. AA7075 ve AA7075Zr alaşımı tozlarına toz metalurjisi (sinterleme) işleminde uygulanan sıcaklık ve basınç değerleri. ..... 39

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılacak numuneler. ..... 39

Çizelge 3.4. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) sertlik deneyleri sonuçları. ..... 49

Çizelge 3.5. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) sertlik deneyleri sonuçları. ..... 50

Çizelge 3.6. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının sertlik deneyleri sonuçları. ..... 51

Çizelge 3.7. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının sertlik deneyleri sonuçları. ..... 52

Çizelge 3.8. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının çekme deneyi parametreleri. ..... 57

Çizelge 3.9. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının çekme deneyi sonuçları. ..... 58

Çizelge 3.10. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının çekme deneyi parametreleri. ..... 59

Çizelge 3.11. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının çekme deneyi sonuçları. ..... 60

Çizelge 3.12. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının çekme deneyi parametreleri. ..... 61

Çizelge 3.13. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının çekme deneyi sonuçları. ..... 62

Çizelge 3.14. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının çekme deneyi parametreleri. ..... 63

Çizelge 3.15. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının çekme deneyi sonuçları. ..... 64

Çizelge 3.16. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) yorulma deneyi sonuçları. ..... 71

Çizelge 3.17. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) yorulma deneyi sonuçları. ..... 73

Çizelge 3.18. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) yorulma deneyi sonuçları. ..... 75

Çizelge 3.19. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) yorulma deneyi sonuçları. ..... 77

Çizelge 3.20. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. ..... 79

Çizelge 3.21. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. ..... 81

Çizelge 3.22. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. ..... 83

Çizelge 3.23. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. ..... 85

Çizelge 3.24. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. ..... 87

Çizelge 3.25. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....89

Çizelge 3.26. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....91

Çizelge 3.27. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....93

Çizelge 3.28. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....95

Çizelge 3.29. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....97

Çizelge 3.30. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....99

Çizelge 3.31. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....101

Çizelge 3.32. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....103

Çizelge 3.33. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....105

Çizelge 3.34. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. .....107

Çizelge 3.35. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları. ..... 109

Çizelge 4.1. Numunelere uygulanan deformasyon ile % sertlik değerlerinin değişimi. ..... 118

Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan ilk deformasyon ile dördüncü deformasyon işlemi ile % sertlik değerlerinin değişimi. ..... 119

Çizelge 4.3. Numunelere uygulanan deformasyon ile % çekme dayanımını değişimleri. ..... 121

Çizelge 4.4. İlk deformasyon basamağı sonrası ve dördüncü deformasyon basamağı sonrası % uzama oranları değişimi. ..... 122

Çizelge 4.5. Numunelere uygulanan deformasyon işlem basamağı ile % çekme dayanımı değişimi. ..... 123

Çizelge 4.6. ECAP öncesi ve ECAP sonrasında $3x10^5$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin değişimi. ..... 129

Çizelge 4.7. $10^6$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin basma sayısı ile değişimleri. ..... 130

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Doğal kaynakların kısıtlılığının artması, sürekli gelişen dünya endüstrimizde giderek artan bir sorun teşkil etmektedir. Sınırlı kaynakların getirdiği zorluklarla yüzleşilerek malzeme ve enerji verimliliği iyileştirilmelidir. Çevreye verilecek zarar, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanılması ve hafif malzemeler kullanılarak mekanik parçanın ağırlığının azaltılmasıyla engellenebilir. Alüminyum bazlı alaşımlar; düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet ve oksidasyona karşı dirençli olmaları gibi özelliklerinden dolayı tercih edilerek uzun ömürlü uygulamalarda kullanılabilirler. Alüminyum metal ve alaşımlarının değişik sektörlerde, farklı kullanım alanları bulunmasının sebepleri arasında; kolayca üretilebilmeleri, şekillendirilebilmeleri, işlenebilmeleri ile yüksek korozyon dirençlerinin olması, hafif olmaları ve mukavemet özelliklerinin iyi olması bulunmaktadır (Yurdakul, Özbay, & İç, 2002), (Kaluç & Taban, 2005). Ayrıca alüminyum geri dönüşüm için son derece uygundur. Alüminyum alaşımı neredeyse sonsuz olarak geri dönüştürülebilir ve geri dönüşüm süreci, birincil alüminyum üretim enerjisinin yalnızca % 5'ini gerektirmektedir (Melo, 1999).

Yüksek saflıkta alüminyum, endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini sınırlayan, yaklaşık 10 MPa nihai mukavemete sahip yumuşak bir malzemedir (Davis, 2001). Diğer yapı malzemeleriyle rekabet edebilmek için Al bazlı malzemelerin mukavemetinin önemli ölçüde artırılması gerekmektedir. Metalik malzemelerin mukavemetini artırmanın birkaç yolu vardır; yeterli elementlerle alaşımlama, uygun güçlendirici partiküllerin eklenmesi, plastik deformasyon veya tane boyutunun küçültülmesidir. Ticari olarak temin edilebilen en güçlü Al alaşımı, özel ısıl işlem uygulanarak verimi ve nihai çekme mukavemeti 683 ve 710 MPa'ya kadar artırılabilen AA7068 alaşımıdır. Özel işleme teknolojileri kullanılarak, yüksek basınçlı burulma ile

işlenmiş nano yapılı AA7075 alaşımında olduğu gibi, alüminyum alaşımlarının akma dayanımı 1 GPa'ya kadar artırılabilir (Liddicoat, ve diğerleri, 2010).

Alüminyum alaşımlarının ciddi bir dezavantajı, yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerinin düşmesidir. Yaşlanarak sertleşebilen Al alaşımlarında, yüksek sıcaklığa maruz kalma genellikle güçlendirici ikinci faz parçacıklarının sertleşmesine veya çözünmesine yol açmaktadır. Dövülmüş alüminyum alaşımlarında ise, işlenmesi sırasında malzemede depolanan deformasyon enerjisi, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen geri kazanım veya yeniden kristalleştirme işlemleri ile serbest bırakılır. Son olarak, yüksek sıcaklığa maruz bırakılma da tane irileşmesine neden olabilir. Yukarıda belirtilen tüm bu yapısal değişiklikler genellikle mukavemette bir azalmaya neden olmaktadır. Bu sorunun çözümü, modern Al bazlı malzemelerin üretimindeki en önemli hususlardan biridir.

Yüksek mukavemetli Al bazlı alaşımların geliştirilmesi için geleneksel işleme yollarının verimliliği oldukça sınırlı olduğundan, alternatif malzeme işleme yöntemleri aranmıştır. Geçen yüzyılın 70'li ve 80'li yıllarında, hızlı katılaşma süreçleri yoğun bir şekilde incelenmiş ve geliştirilmiş bir mikroyapıya sahip malzemelerin hazırlanması için kullanılmıştır. $10^6$ $Ks^{-1}$'e ulaşabilen soğutma hızları nedeniyle katı çözünürlüğü güçlü bir şekilde artırılabilmektedir (Suryanarayana, Singh, & Lele, 2013). Aşırı doymuş katı çözelti, uygun şekilde dağılmış çok ince ikinci faz parçacıklarının yeterince yüksek hacimli bir fraksiyonunun çökeltilmesi için mükemmel bir öncüdür. Aynı zamanda, hızlı katılaşan malzemeler için ince taneli bir mikroyapı (tane boyutu genellikle 1 μm'ye yakın) tipik olup, her iki yöntem de güç artışına katkıda bulunmaktadır (Lavernia, Ayers, & Srivatsan, 1992)( (Lavernia, Rai, & Grant, 1986)

Geçen yüzyılın 90'larından itibaren Al bazlı malzemelerin işlenmesi için aşırı plastik deformasyon yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Estrin & Vinogradov, 2013), (Iwahashi, Horita, Nemoto, & Langdon, 1998). Ortaya çıkan dökme malzeme genellikle herhangi bir gözeneklilik içermez ve mukavemeti, ağırlıklı olarak büyük miktarda depolanmış deformasyon enerjisi ve tane boyutunda belirgin bir azalma (tipik olarak 1 μm'nin altında) ile artar. Diğer taraftan, bu yöntemler, faz bileşimindeki değişikliklerle mekanik özelliklerin yalnızca sınırlı bir varyasyonuna izin verir.

Sinterleme toz haline getirilmiş metallere tatbik edilen bir işlemdir. Toz metalurjisi yöntemi, döküm yöntemleri ile talaşlı işleme yöntemlerine (sıcak ve soğuk) seçenek olarak geliştirilmiştir. Bu süreçte, imalatı zor olan iş parçalarının toz halindeki ham ürünlerden başlayarak yüksek mukavemetli, az girdili, minimum toleranslı ve düşük ürün kayıplı nihai ürün üretilmesi için kullanılan ve diğer üretim yöntemlerine göre daha avantajlı olan bir tekniktir.

Toz metal partiküllerine mukavemet kazandırılması için belirli sıcaklıklarda sinterleme uygulanmaktadır. Preslenmiş toz parçacıklarının birbirleri ile oluşturdukları bağlar, yapışma ve mekanik kilitlemeye benzer şekilde zayıf bağlardır. Bu tür bağlantılar kristal kafesteki bağ kuvvetlerine kıyasla çok güçsüz bağlardır. Preslenmiş durumdaki toz yapılarda tanecikler birbirleri ile temas halinde olsalar da her tanecik birbirinden bağımsız olarak konumlanmaktadır. Sinterleme (fırınlama), partiküllerin temas yüzeylerini artırarak, atomlar ile iyonlar arasındaki fiziksel bağların oluşumunu gerçekleştirmektedir. Bu tarzda oluşturulan bağlar, metallerdeki kristal kafes yapılarını andıran yüksek güçte atomik bağlara benzemektedir. Bu oluşum; düşük yoğunluk, yüksek dayanım, yeterli aşınma ve korozyon direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı ve tokluk gibi öne çıkan özelliklerinden dolayı birçok gereksinimi karşılayabilmektedir.

Son on yılda, teknolojik malzemelerin üretilmesi için toz metalurjisi yöntemine dönülerek nispeten düşük sıcaklıklarda ve kısa süreli ısıya maruz kalma sürelerinde neredeyse istenen yoğunlukta kompaktlar üretilebilmiştir (Saheb, 2013). Araştırmamızda, farklı sıcaklıklarda ve aynı basınçta 4 saat süreyle toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş AA7075 alaşımı ve % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının deformasyon öncesi ve sonrası mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılacaktır.

## 1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada 600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklıklarda 4 saat süre ile 750 MPa basınç uygulanarak toz metalurjisi ile üretilmiş (sinterlenmiş) AA7075 alaşımı ile ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımı aşırı plastik deformasyon işlemi ile deforme edilecektir. Aşırı plastik deformasyon işlemi için eşit kanal açısal basma kalıp (ECAP) kullanılacaktır. Aşırı plastik deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası AA7075 ve AA7075Zr alüminyum alaşımları elektron mikroskobunda incelenecektir. Daha sonra

numunelerin üzerinde sertlik, çekme ve yorulma deneyleri uygulanarak numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin değişimi analiz edilecektir.

Katı cisimlerin şekil değiştirme davranışları (deformasyon) üçe ayrılır. Bunlar;

- Elastik şekil değiştirme,
- Plastik şekil değiştirme,
- Elasto-plastik şekil değiştirmedir.

### 1.2.1. Elastik Şekil Değiştirme

Uygulanan herhangi bir kuvvetin etkisiyle malzemelerde deformasyon meydana gelmektedir. Ancak uygulanan kuvvetin ortadan kalkmasıyla, oluşan deformasyon da ortadan kalmaktadır. Tüm malzemeler herhangi bir gerilimin sonunda, malzeme özellikleri ile gerilimin büyüklüğüne bağlı olarak az ya da çok şekil değiştirmektedir. Bu bağlamda, tüm malzemelerin bir esneklik sınırı vardır, bu esneklik sınırına karşılık gelen yük veya stres "elastiklik sınırı yükü" veya "gerilme" olarak adlandırılmaktadır.

### 1.2.2. Plastik Şekil Değiştirme

Uygulanan kuvvet ile malzeme yapısında meydana gelen şekil değişimi plastik şekil değiştirme olarak adlandırılır.

### 1.2.3. Elasto-Plastik Şekil Değiştirme

Kuvvet uygulanan malzemede bir miktar deformasyon meydana gelmektedir. Kuvvet uygulaması ortadan kaldırıldığında deformasyonun bir kısmı ortadan kalkarken, bir kısmı malzemede kalır. Şekil değiştirmenin kaybolduğu kısım elastik şekil değiştirme, şekil değiştirmenin kaldığı kısım ise plastik şekil değiştirme olarak adlandırılmaktadır.

## 1.3. Plastik Şekil Verme

Katı cisimlerin şekillerini farklı bir şekle dönüştürmek için uygulanan ve bu proses esnasında katı cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliklerine yol açmayan üretim yöntemleri plastik şekil verme yöntemleri olarak tanımlanmıştır. Plastik şekillendirme yöntemlerinde katı malzeme, çekme, basma ve kayma gibi deformasyonlardan bir veya birkaçının etkisi altındadır. Plastik şekillendirmede hacim

sabitliği ilkesi esastır. Uygulanan kuvvetin etkisiyle, malzeme kalıcı (plastik) şekil değişimleri neticesinde istenilen şekil ve ebatlara ulaşmaktadır.

Metal malzemelerde katı halde belli bir düzene sahip kristal bir yapı mevcut iken, sıvı halden katı hale geçiş esnasında ise atomların malzemenin iç yapısına göre sıralandığı görülmektedir. Burada, en küçük yapı öğesi olan birim kafes tekrarlanarak kristal yapıyı oluşturmaktadır.

Geleneksel olarak metallere uygulanan plastik şekil verme yöntemleri;

- yığma,
- dövme,
- haddeleme,
- ekstrüzyon,
- soğuk çekme,
- boru imali,
- saç işleme şeklinde sınıflandırılabilir.

## 1.4. Aşırı Plastik Deformasyon

Aşırı plastik deformasyon işlemiyle nano boyutlu metalik malzemeler elde edilebilmektedir. Nano boyutlu malzemeler,

- yüksek mukavemet,
- düşük elastisite modülü,
- yüksek tokluk,
- yüksek difüzyon aktivasyonu
- düşük sıcaklıklarda yüksek süper plastiklik özellikleri

gibi beklenmedik fakat istenilen özellikleri sunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle aşırı plastik deformasyon araştırmacıların ilgisini giderek daha fazla çekmektedir.

Metal malzemelerde yukarıda belirtilen özelliklerin sağlanması amacıyla ultra ince taneli (ultra fine grain-UFG) yapı elde etmenin bilinen metotları arasında en ergonomik iki yol bulunmaktadır.

Bunlar, düşük sıcaklıklarda (yeniden kristalleşme sıcaklığının altında) aşırı plastik deformasyon ve toz metalurjisi yöntemleridir.

Aşırı plastik deformasyon, metalik bir malzemenin düşük sıcaklıkta (erime sıcaklığının 0,3 katının altında) yüksek miktarda plastik gerilmeye tabi tutularak plastik deformasyona uğraması olarak tanımlanmaktadır. Aşırı plastik deformasyon, iri taneli mikroyapıların, hücre blokları ve dislokasyon hücrelerinin hiyerarşik bir sisteme ayrılmasını önceliklendirir.

Malzemenin gerinimindeki artışla birlikte, mikroyapı boyutları aynı oranda azalır. Geleneksel malzeme işleme yöntemleri, malzemenin yüksek gerilmelerde hasar görmeden deforme olmasına izin vermez.

Her türlü aşırı plastik deformasyonun en belirleyici özelliği, malzemenin enine kesit alanının aşırı plastik deformasyondan sonra sabit kalmasıdır. Bu yüzden, enine kesit değişikliği olmadan yüksek miktarda plastik deformasyonu mümkündür çünkü bir numune, plastik genlemenin toplam miktarında artış olması için birçok kez aşırı deformasyona tabi tutulabilir. Pek çok farklı çeşidi bilinmesine rağmen çok az bir kısmının endüstriyel potansiyeli bulunmaktadır.

Metalik malzemelerin mukavemeti, söz konusu malzemenin tane boyutuyla ilgilidir.

Tane sınırları, polikristal malzemelerde hareket eden dislokasyonlar için önemli bir engel teşkil etmektedir. Tane sınırlarından kaynaklı güçlenmenin, hem saf metaller hem de alaşımlar için Hall-Petch ilişkisi ile geniş bir yelpazedeki tane boyutları üzerinde şu şekilde ifade edilmektedir (Mittemeijer, 2021), (Nabarro & Duesbery, 2002)

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \tag{1.1}$$

$\sigma_y$; akma gerilimi,

$\sigma_0$; diğer güçlendirme mekanizmalarının katkısı,

$d$; tane boyutu,

$k$; her malzeme için sabit bir değerdir.

Bu; sabit, birikmiş dislokasyonları serbest bırakmak için gerekli olan kayma gerilmesini karakterize eder. Tane boyutunun küçültülmesi, tane sınırlarının

yoğunluğunu ve güçlendirme etkisini artırır. Bu nedenle, tane sınırı güçlendirmesi, ultra ince taneli malzemelerde en önemli güçlendirme mekanizmasıdır.

Hall-Petch ilişkisi, tane boyutu yalnızca kritik bir değerin üzerinde olan malzemeler için geçerlidir. Tane boyutu kritik değerin altına düştüğünde ve dislokasyon yığınlarını destekleyemez hale geldiğinde, viskoz akış meydana geldikçe mekanizmaları zayıflatır ve azalan tane boyutu ile mukavemette bir azalmaya yol açar (Nieh & Wang, 2005) Bu kritik tane boyutu çoğu metal için 10 nm'nin altındadır (Eckert, Holzer, Krill III, & Johnson, 1992).

Daha yüksek sıcaklıklarda veya denge dışı tane sınırları içeren malzemelerde (çok gerilmiş malzemelerde olduğu gibi) dislokasyonlar tane sınırları tarafından yakalanabilir ve orada yok edilir. Yüksek hacimli tane sınırlarına sahip olan malzemelerde bu mekanizma dikkate değer bir yumuşamaya yol açar. Azalan tane boyutuyla birlikte, tane sınırı kayması gibi diğer deformasyon mekanizmaları meydana gelir ve bu da Hall-Petch ilişkisinin bozulmasına neden olur.

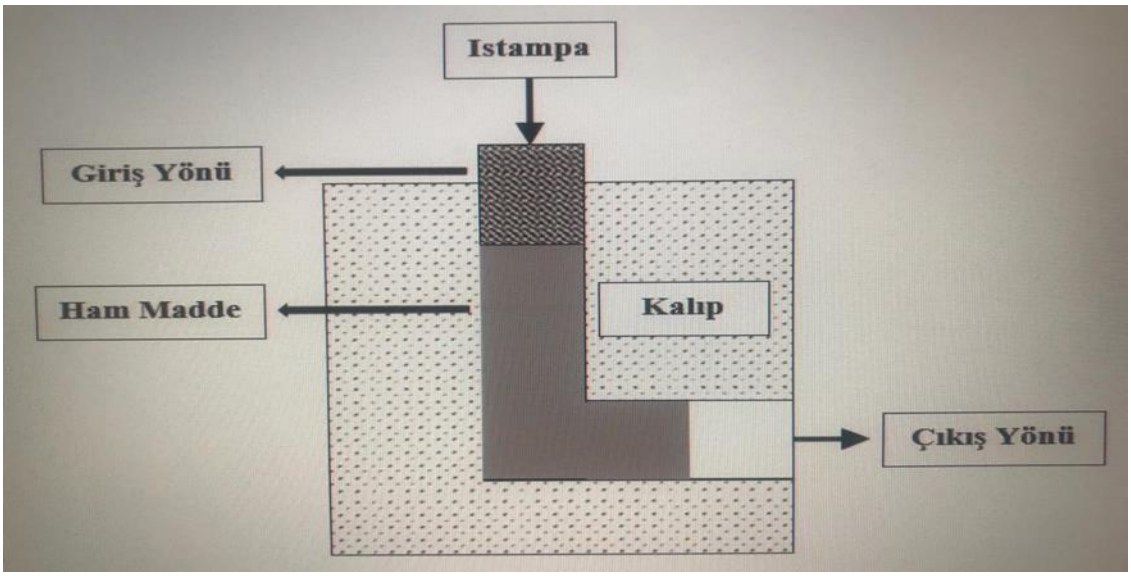
## 1.5. Bazı Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri

- Eşit Kanal Açısal Basma (Equal Channel Angular Pressing - ECAP),
- Çevrimsel ekstrüzyon ve basma (Cyclic Extrusion Compression - CEC )

Bu yöntemler ile ultra ince yapıda malzemeler elde edilebilirken, deforme olan ürünün giriş ve çıkış bölümlerinin ölçüsü değişmemektedir.

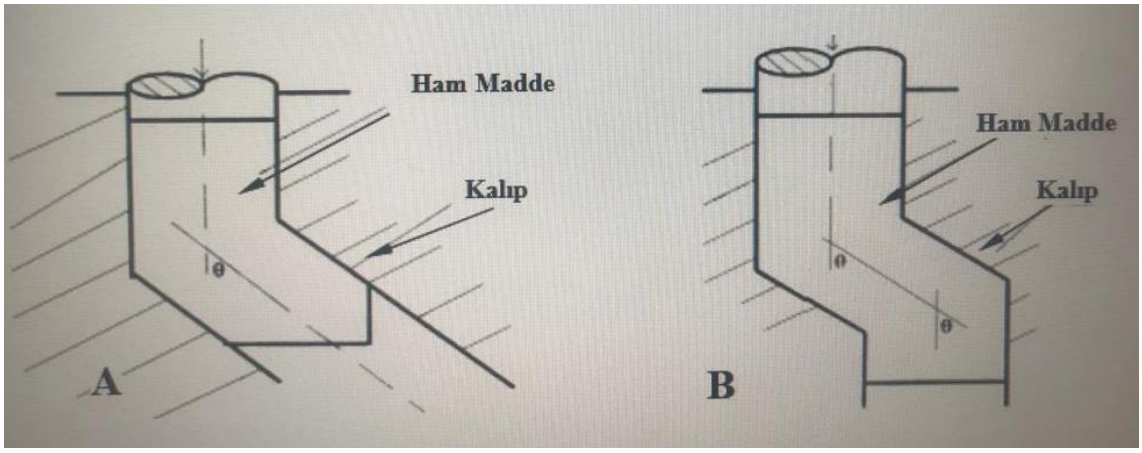
### 1.5.1. Eşit Kanal Açısal Basma ( Equal Channel Angular Pressing-ECAP)

Eşit kanal açısal basma yönteminde, Şekil 1. 1'de gösterildiği gibi birbirini 90º'lik bir açıyla kesen eşit boyutta iki kanal bulunmaktadır. Burada hammadde istenilen kanalın bir tarafından bir ıstampa ile basınç uygulanarak preslenir ve diğer ucundan boyutları değiştirilmeden çıkarılır. Bu esnada malzeme kayma deformasyonuna uğrar. Genleme miktarını ve dolayısıyla plastik deformasyonu artırmak için işlem birkaç defa tekrarlanabilir.




Şekil 1.1. Eşit kanal açısal basma yönteminin şematik görünümü.

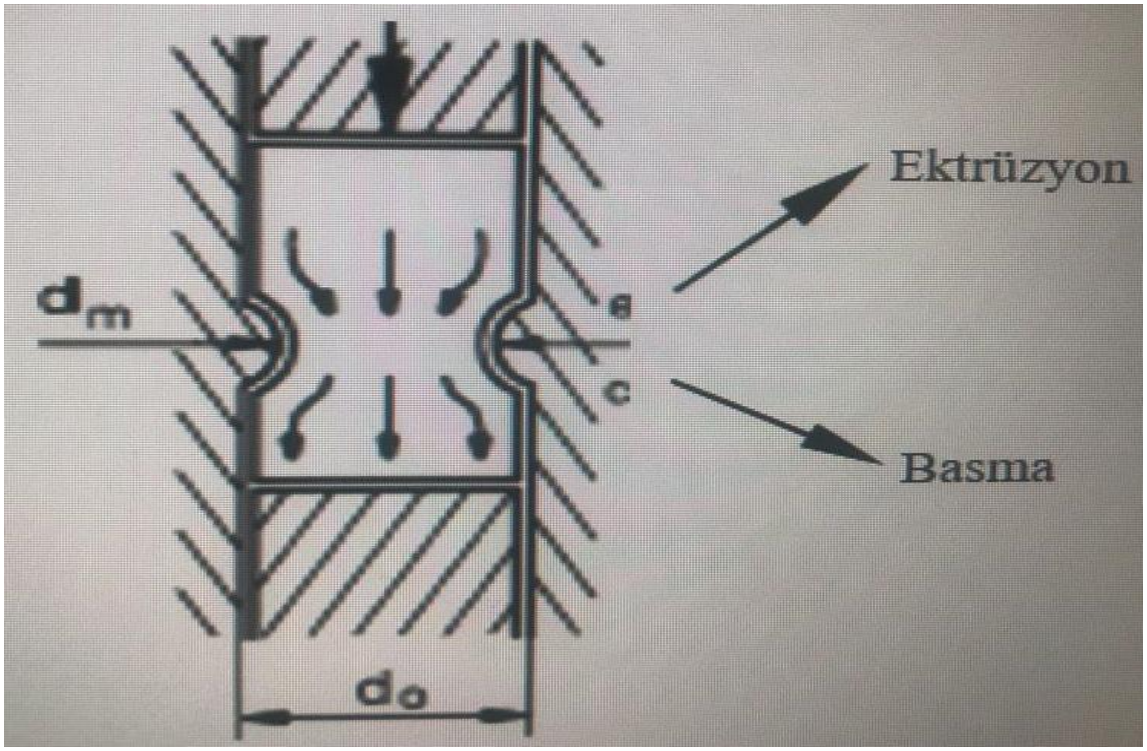
Eşit dik kesite sahip yanal ekstrüzyon, eşit kanal açısal basma yönteminin özel bir durumudur. Şekil 1. 2'de gösterildiği gibi, birbirini $90^{o}$'den daha büyük bir açıyla kesen iki kanal bulunmaktadır. Bu kanal S harfi şeklindedir ve θ açısının kanalın her iki ucunda aynı olması durumu ise S tipi eşit dik kesitli yanal ekstrüzyon olarak adlandırılmaktadır. Burada da malzeme kanalın bir ucundan ıstampa vasıtasıyla bastırılır ve diğer ucundan deforme olmuş fakat boyutlarında hiçbir değişiklik olmamış şekilde çıkarılır. Toplam genleme miktarını artırmak için işlem birkaç defa tekrarlanabilir.




Şekil 1.2. Eşit dik kesitli yanal ekstrüzyon yönteminin şematik görünümü A) klasik yöntem, B) S tipi

### 1.5.2. Çevrimsel Ekstrüzyon ve Basma (Cyclic Extrusion Compression- CEC)

Çevrimsel ekstrüzyon ve basma tekniğinde, malzeme kalıptan birkaç defa geçirilerek hem ekstrüde edilir hem de preslenir. Böylece plastik şekillendirme miktarı artırılmaktadır. (Şekil 1.3)




Şekil 1.3. Çevrimsel ekstrüzyon ve basma.

# BÖLÜM 2

# LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Metalik malzemelerin mukavemetini artırmak için uzun yıllardır süregelen çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla, bileşimlerinin ve mikroyapılarının malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Metallerin güçlendirme mekanizmalarıyla ilgili birçok çalışma bulunmaktadır (Kelly & Nicholson, 1972); (Nabarro & Duesbery, 2002). Bununla birlikte, bireysel güçlendirme mekanizmaları teorisi, bunların aynı anda kullanılması, etkileşimi oldukça zordur ve derin bir matematik, mekanik ve kimya bilgisi gerektirmektedir.

## 2.1. Mukavemetin Yüksek Sıcaklık Kararlılığı

Sıcaklık, faz bileşimi ve mikroyapısal değişiklikler malzemelerin mukavemetini güçlü bir şekilde etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda, yüksek malzeme mukavemetini korumak için ikinci faz partiküllerinin ve tane yapısının stabilitesi gerekmektedir.

### 2.1.1. Güçlendirici Parçacıkların Kararlılığı

Çözücülerdeki çözünen maddelerin denge katı çözünürlüğünün sıcaklığa bağımlılığı nedeniyle, ikinci faz parçacıklarının içeriği değişen sıcaklık ile birlikte değişmektedir. Sıcaklık değiştirildiğinde, azalan denge katı çözünürlüğü, ikinci faz partiküllerinin oluşumuna yol açarken, artan denge katı çözünürlüğü bunların çözünmesine neden olur.

Sıcaklığın değiştirilmesiyle indüklenen süreçlerin yanı sıra, ikinci faz parçacıkları da sabit bir sıcaklıkta gelişmektedir. İkinci faz partiküllerini içeren malzeme, diğerlerinin yanı sıra, ikinci faz partiküllerinin yüzey/hacim oranını düşürerek, küçük partiküllere karşın daha büyük partiküllerin büyümesiyle enerjisini azaltır. Ostwald olgunlaşması

olarak da adlandırılan bu sürecin kinetiği, çözünen atomların küçülen ikinci faz partiküllerinden büyüyen partiküllere hacim difüzyonu ile kontrol edilmektedir.

## 2.2. İşleme Yöntemleri Teorisi

Benzersiz özelliklere sahip modern malzemelerin geliştirilmesi genellikle alternatif işleme yolları gerektirir. Hazırlanan tezde toz metalurjisi yöntemi seçilmiştir.

### 2.2.1. Toz Üretim Teknikleri

İnce taneli tozlar çok çeşitli tekniklerle işlenebilir (Suryanarayana, Singh, & Lele, 2013); (Thümmler & Oberacker, 1993). Üç ana toz üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar:

- hızlı katılaşma gibi fiziksel yöntemler,
- mekanik yöntemler; kırma, taşlama, mekanik alaşımlama, öğütme,
- kimyasal yöntemler; elektrolitik biriktirme, sıvı veya gazdan çökeltme vb.

Çizelge 2.1. Toz üretimi ve toz ürünlerden parça üretimi.

| | |
|---|---|
| Toz Üretimi | 1- Öğütme<br>2- Elektroliz<br>3- Kimyasal İndirgeme<br>4- Atomizasyon |
| Toz Mamüllerden Parça Üretimi | 1- Karıştırma<br>2- Presleme<br>3- Sinterleme<br>4- İnfiltrasyon<br>5- Yağ Emdirme<br>6- Boyutlandırma<br>7- İkinci Presleme<br>8- Buharlama<br>9- Talaşlı imalat<br>10- Çapak alma<br>11- Birleştirme<br>12- Isıl işlem |

## 2.3. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, dünya üzerinde en bol bulunan metalik element olmasına rağmen yüksek kimyasal aktivitesi nedeniyle hiçbir zaman saf haliyle bulunmaz. Al, hemen

hemen tüm minerallerde, bitkilerde ve hayvanlarda bileşikler halinde bulunmaktadır. Alüminyum, demir ve bakırdan yaklaşık üç kat daha hafiftir ve mükemmel bir ısı ve elektrik iletkenidir. Ayrıca, havaya maruz kaldığında yüzeyinde hemen sert bir inert oksit film tabakası oluşur ve bu film tabakası da yüksek korozyon direncine neden olur. Bu nedenle alüminyum; ulaşım, inşaat malzemeleri, dayanıklı tüketim malları, kimyasal ve gıda işleme ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Saf alüminyum (% 99,996) yumuşak ve zayıf olup, yaklaşık 10 MPa'lık bir nihai mukavemete sahiptir (Davis, 2001). Ticari saflıktaki Al (% 99-99,6), özellikle Si ve Fe gibi elementlerin varlığında daha sert ve güçlü hale gelmektedir. Al esaslı alaşımlarda daha fazla mukavemet artışı sağlanmaktadır. Ana alaşım elementlerine göre (örn; Cu, Mn, Si, Mg, Mg + Si, Zn), alüminyum alaşımları Alüminyum Birliği tarafından 9 aileye (Al1xxx ila Al9xxx) ayrılmıştır. Bazı alaşım elementleri (örneğin Mg), oda sıcaklığında Al içinde nispeten yüksek bir katı çözünürlük sergiler ve katı çözelti güçlendirmesi bu tür alaşımlar için tipiktir (Zolotorevsky, Belov, & Glazoff, 2007). Bu alaşımların mukavemeti ısıl işlemden önemli ölçüde etkilenmez ve bu nedenle bu alaşımlar ısıl işlem göremezler. Diğer taraftan, oda sıcaklığında sınırlı katı çözünürlüğe sahip ve katı çözünürlüğünün sıcaklığa güçlü bir bağımlılığı olan (örneğin Cu) alaşım elementleri içeren Al alaşımları, uygun bir ısıl işlemle güçlendirilebilmektedir. Bu ısıl işlem sırasında alaşıma uygun çözeltiler eklenmesi suretiyle mukavemeti artırılmaktadır. Bu tür alaşımlara ısıyla işlenebilir denilmektedir. Isıl işlem görmüş ticari Alüminyum alaşımlarının mukavemeti 550 MPa'yı aşmaktadır (Davis, 2001); (Hussin, Sinha, & Darbari, 2014).

Mikrokristalin altına ve hatta nanokristalin aralığına kadar tane inceltme, malzemelerin mukavemetini daha da artırmaktadır. Aşırı plastik deformasyon yöntemleri (özellikle eşit kanallı açısal presleme yöntemi) bu amaçla sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak aşırı plastik deformasyon tekniklerini ısıl işlemle birleştirmek zordur. Aşırı plastik deformasyondan önce güçlendirme fazlarının çökeltilerinin oluşumu genellikle malzemenin deforme edilebilirliğini sınırlar ve aşırı plastik deformasyon sırasında çatlamaya neden olur. Bu özellikle, ana alaşım elementi olarak Zn içeren Al7xxx tipi Al alaşımlarının birçoğu için geçerlidir (Chinh, ve diğerleri, 2009); (Zhao, Liao, Jin, Valiev, & Zhu, 2004). Burada güçlendirme fazları söndürmeden sonra hızla oluşur ve böylece sonraki aşırı plastik deformasyon için süre sınırlanır. Bu sınırlama ön yaşlandırma

işlemiyle aşılmıştır, ancak dikkate değer güç kaybı ile bağlantılı olarak aşırı yaşlanmaya neden olmaktadır (Nam, Han, Chung, & Shin, 2003).

Toz metalurjisi, çeşitli güçlendirme mekanizmalarının katkısını birleştirebilecek alternatif bir işleme yolunu temsil etmektedir.

### 2.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, alüminyum alaşımlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Geleneksel metal işleme yöntemleriyle üretilemeyen, istenilen özellikleri taşıyan malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle üretilebilmektedir. Ayrıca toz metalurjisi ile işleme tekniği, malzeme seçimi ve tasarımında büyük bir esneklik sağlamaktadır. Toz metalurjisi yöntemi günümüzde yüksek mukavemetli ve/veya sürünmeye dirençli Al alaşımlarının üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalar için en uygun malzeme; ince, aşırı doymuş mikroyapıya sahip veya irileşme/çözünmeye dirençli ince kuvvetlendirici partiküllerin yoğun bir dağılımına sahip bir tozdur. Bu şekilde bir mikroyapı genellikle hızlı katılaşma, mekanik öğütme ve alaşımlama ile elde edilmektedir.

Gaz atomizasyonu, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının hazırlanmasında en çok kullanılan hızlı katılaştırma yöntemlerinden biridir. Atomizasyon işlemleri, geniş bir boyut aralığına sahip küresel toz partikülleri üretmektedir. Atomizasyon ortamının veya işlem parametrelerinin değiştirilmesi ile elde edilecek partikül boyutu özelleştirilebilmektedir. Toz partikülünün katılaşma hızı, katılaşan damlacığın boyutu tarafından belirlendiğinden, gerçek toz partikül boyutu aynı zamanda partikülün mikroyapısını da etkilemektedir (Wiskel, Navel, Henein, & Maire, 2002).

Atomize tozlar, mikrometre ve mikrometrenin üzerindeki tane boyutları ile karakterize edilmektedir (Rokni, Widener, & Crawford, 2014). Gaz atomizasyonu sırasındaki hızlı soğutma, alaşımların faz kompozisyonunu da etkilemektedir. Yarı kararlı fazlar ile genişletilmiş katı çözeltinin atomize tozlardan oluştuğu bilinmektedir (Tongsri, Dashwood, & Mcshane, 2004). Tüm bu özellikler, ince tane boyutu, yarı kararlı fazların varlığı ve uzun süreli katı çözünürlük, bu tozların nispeten yüksek mikro sertliğine yol açmıştır.

Tozların mekanik olarak öğütülmesiyle daha fazla mikroyapısal iyileştirme sağlanabilmektedir. İyileştirmenin gerçek ölçüsü, alaşım özelliklerine ve öğütme

parametrelerine bağlıdır. Frezeleme genellikle mikroyapıda dikkate değer bir iyileştirmeye yol açmaktadır.

Araştırmacılar tarafından, farklı değirmenler ve öğütme parametreleri kullanılarak, tane boyutu iyileştirmesine ilişkin sonuçlar bulunmuştur (bkz. Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Farklı parametrelerle mekanik öğütme ile ulaşılan Al alaşımlarının son tane boyutları.

| **Malzeme** | **İşleme Parametreleri** | **En Son Tane Boyutu** | **Referans** |
|---|---|---|---|
| Saf Al | Çalkalayıcı Değirmen 22 saat | 22 nm | (Eckert vd., 1992) |
| Saf Al | 20 saat | 39 nm | (Khan, Farrokh, & Takacs, 2008) |
| Saf Al | 100 saat | 25 nm | (Oleszak & Shingu, 1996) |
| Saf Al | 32 saat | 21 nm | (Bonetti, Pasquini, & Sampaolesi, 1997) |
| Saf Al | Dondurarak Kurutma 8 saat | 26 nm | (Zhou, Lee, & Lavernia, 2001) |
| AA6061 | 20 saat | 30 nm | (Rana, Sivaprahasam, Raju, & Sarma, 2009) |
| AA2124 | 60 saat | 18 nm | (Eldesouky, Johnsson, Svengren, Attallah, & Salem, 2014) |
| Al-Cu | 4 saat | 60 nm | (Azabou, Khitouni, & Kolsi, 2009) |
| Al-Ti | 60 saat | 21 nm | (Choi, ve diğerleri, 2001) |
| Al-Ti | Dondurarak Kurutma 60 saat | 16 nm | (Choi Ve diğerleri, 2001) |
| Al-Fe | 150 saat | 26 nm | (Sasaki, Ohkubo, & Hono, 2009) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Al-Mg | Dondurarak Kurutma 7 saat | 29 nm | (Akinrinlola, Gauvin, & Brochu, 2012) |
| Al-Mg | Dondurarak Kurutma, 8 saat | 26 nm | (Enayati, 2017) |
| Al-Mg | Dondurarak Kurutma, 8 saat | 20-200 nm | (Ahn, Newsbery, Lavernia & Nutt, 2007) |
| Al50Mg50 | 76 saat | 2 nm | (Calka, Kaczmarek & Williams, 1993) |

Herhangi bir Al alaşımı için şimdiye kadar ulaşılan minimum tanecik boyutu 2 nm'dir. Bu tür bir tane boyutu, Al ve Mg tozlarının Al50Mg50'ye karşılık gelen bir bileşimle 76 saat boyunca değirmende mekanik alaşımlandırılmasıyla elde edilmiştir (Calka, Kaczmarek , & Williams , 1993).

Toz konsolidasyonu, Al alaşımlarında toz metalurjisinin en ciddi sorunudur. Al tozlarının konsolidasyondan önce gazdan arındırılması gerekmektedir. Yüksek yoğunluklu kompaktların elde edilmesi için, genellikle yüksek basınç ve/veya sıcaklıklar ile uzun sinterleme süreleri gerekmektedir. Al tozlarının yüzeyindeki sert oksit tabakası, iyi bir metal-metal teması elde edilmesini engellemektedir.

Alüminyum tozları, konsolidasyonlarından önce gözenekliliğe ve malzeme bozulmasına neden olabilecek sıkışmış kirleticileri çıkarmak için gazdan arındırılır (Ping, 1986). Bu genellikle 400 °C ile 525 °C arasındaki sıcaklıklarda birkaç saat süreyle yapılır (Han, Lavernia, Lee, Nutt, & Witkin , 2005); (Lee, Nutt, Rodriguez, Hayes, & Lavernia , 2003); (Tang, Hagiwara, & Schoenung, 2005); (Ye, ve diğerleri, 2005). Yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalınması, toz özelliklerinin bozulmasına yol açmaktadır (Ahn, Newbery, Lavernia, & Nutt, 2007).

### 2.3.2. Yüksek Sıcaklık Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımlarının zayıf termal stabilitesi, uygulama alanlarında dezavantaj oluşturmaktadır. Ticari alüminyum alaşımlarının yüksek mukavemeti genellikle çökelme güçlendirmesi yoluyla elde edilmektedir. İnce tane boyutu ve çoklu tane sınırları, daha fazla güçlendirmeye katkıda bulunmaktadır. Ne yazık ki, Al

alaşımlarının genellikle 200 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklara maruz kalması sırasında yeterli faz bileşimini ve mikroyapıyı koruması oldukça zordur (Kopas, Blatnický, Sága, & Vaško, 2017). Alüminyum matrisindeki alaşım elementlerinin katı çözünürlüğünün sıcaklığa bağımlılığı nedeniyle bazı çökeltiler çözünebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda iç enerjiyi düşürme ve artan difüzyon eğilimi, kalan çökeltilerin irileşmesine de katkıda bulunur. Ayrıca, çökeltilerin sabitleme etkisini de azaltmaktadır. Tüm bu etkiler, yüksek sıcaklıklara maruz kalmaları sırasında Al alaşımlarının mukavemetinde bir azalmaya neden olmaktadır.

Alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklara maruz kalmalarına rağmen yüksek mukavemetini korumak için, yukarıda bahsedilen işlemlerden kaçınılmalı veya en aza indirilmelidir.

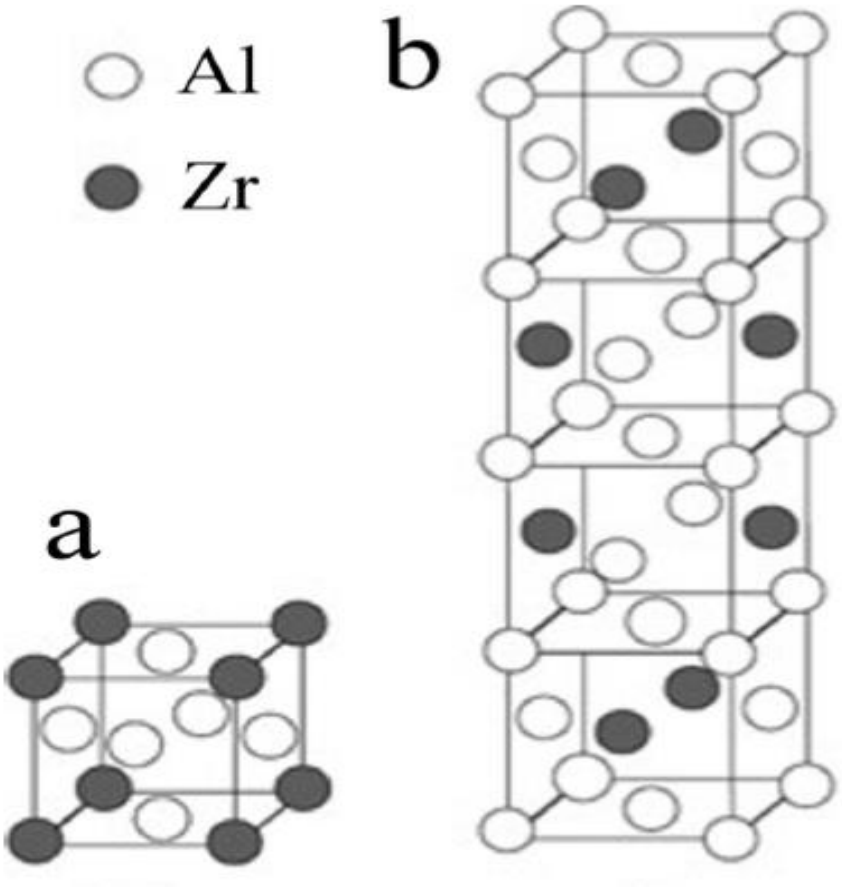
Yeterli miktarda ikinci faz partikülü elde etmek için, alaşım elementleri dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda alüminyum içinde düşük katı çözünürlüğe ve düşük bir yayılıma sahip olmalıdırlar. Ayrıca, alüminyum matrisiyle düşük bir uyumsuzluğa sahip olan matris atomları ile böyle bir intermetalik faz oluşturmalıdırlar. Bu şekilde, ikinci faz partiküllerinin çözünmesi ve olgunlaşması baskılanabilir ve kalıcı bir ikinci faz partikül içeriği korunabilir.

En yaygın kullanılan ticari yüksek sıcaklık alüminyum alaşımları Fe, Cr, Mo, Ti vb. elementlerini içermektedir. Bu elementler, alüminyum matrisinde, dispersiyon sertleştirici görevi görmek ve tane sınır sabitleyicileri olarak tane boyutunun yüksek sıcaklık stabilitesini artırmak için yüksek sıcaklık stabilitesine ve uygun morfolojiye sahip ikinci faz parçacıklarını oluşturmaktadırlar (Galano, Audebert, Garcia-Escorial, & Stone, 2009); (Stolyarov, Lapovok, Brodova, & Thomson, 2003).

Diğer bir yüksek sıcaklık Al alaşımları grubu, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda çok düşük difüzyon katsayısına ve düşük bir denge katı çözünürlüğüne sahip olan Zr, Sc, Ti, Hf, V vb. içermektedir (Davis, 2001); (Fujikawa, 1997). Ayrıca, özellikle $L1_2$ yapısında bulunduklarında, Al matrisi ile düşük uyumsuzluğa sahip olan trialüminidlerin Al partikülleri ile oluşturulabilirler. Bu yapı yalnızca $Al_3Sc$ fazı için tipiktir, ancak Zr, Ti, Hf veya V gibi diğer elementler yarı kararlı faz olarak $L1_2$ yapısına sahip trialüminidleri oluşturabilirler. Bu trialüminidler, Ostwald olgunlaşmasını etkili bir şekilde bastırmak için tüm gereksinimleri karşılamaktadır.

### 2.3.3. Zirkonyum Elementinin (Zr) Al Alaşımındaki Rolü

Zr en yavaş difüzyon hızına sahip olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklı Al alaşımlarının üretimi için kullanılan elementler arasında özel bir konuma sahiptir (Das & Davis, 1988). Alüminyumdaki denge katı çözünürlüğü çok düşüktür [maksimum ağırlıkça % 0.28 (atom ağırlıkça % 0,083) 660 °C'de)] (Mondolfo, 1999). İki modifikasyonda görünen $Al_3Zr$ fazını oluşturmaktadır. $DO_{23}$ yapısı ile kararlı faz oluşumundan önce $L1_2$ yapısının yarı kararlı bir fazı oluşmaktadır. (bkz. Şekil 2.1)




Şekil 2.1. $Al_3Zr$ fazının birim hücrelerinin şeması: a) yarı kararlı $L1_2$ modifikasyonu, b) stabil $DO_{23}$ modifikasyonu.

$L1_2$ yapısı yarı kararlı fazı, kararlı faza [yaklaşık % 2,9 (Srinivasan, Desch, & Schwarz , 1991)] kıyasla Al matrisi ile [yaklaşık % 0.7 (Nes, 1972); (Srinivasan, Desch, & Schwarz , 1991)] daha düşük bir kafes uyumsuzluğuna sahiptir. Difüzyon kontrollü partikül irileşmesi teorisine göre bu azaltılmış uyumsuzluk, bu ikinci faz partiküllerinin artan termal stabilitesine yol açmaktadır.

Yarı kararlı fazın kararlı yapıya geçişi, uzun sürelerden sonra nispeten yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Knipling, Dunand ve Seidman (2008)'de 1600 saat süre ile uygulanan 425 °C'de bir Al-Zr (atom ağırlıkça % 0,2) alaşımının yaşlandırılmasından sonra kararlı faza geçişin meydana geldiği görülmüştür. (Knipling, Dunand, & Seidman, 2008) $L1_2$ yapısının stabil hale geçişi, 500 °C'de 100 saat süre yaşlandırılması ile olmuştur (Robson & Prangnell, 2001). $DO_{23}$ yapısına geçiş 550 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ve 20 saatten fazla süren yaşlandırma ile olmuştur.

Etkili bir güçlendirme için homojen ve yoğun bir ince partikül çökeltisi gerekmektedir. Al-Zr alaşımlarında, iri parçacıklar yalnızca 10 $Ks^{-1}$ düzeyindeki düşük katılaşma oranlarında bulunmaktadır, daha yüksek katılaşma oranları, yüksek Zr içeriklerinde bile oluşumlarını bastırmaktadır (Nes & Billdal, 1977). Bu nedenle, hızlı katılaşma yöntemleri, işlemden sonra malzemeler sırasında uygun ikinci faz parçacıklarının çökeltilmesi için uygun mikroyapıya yol açmaktadır.

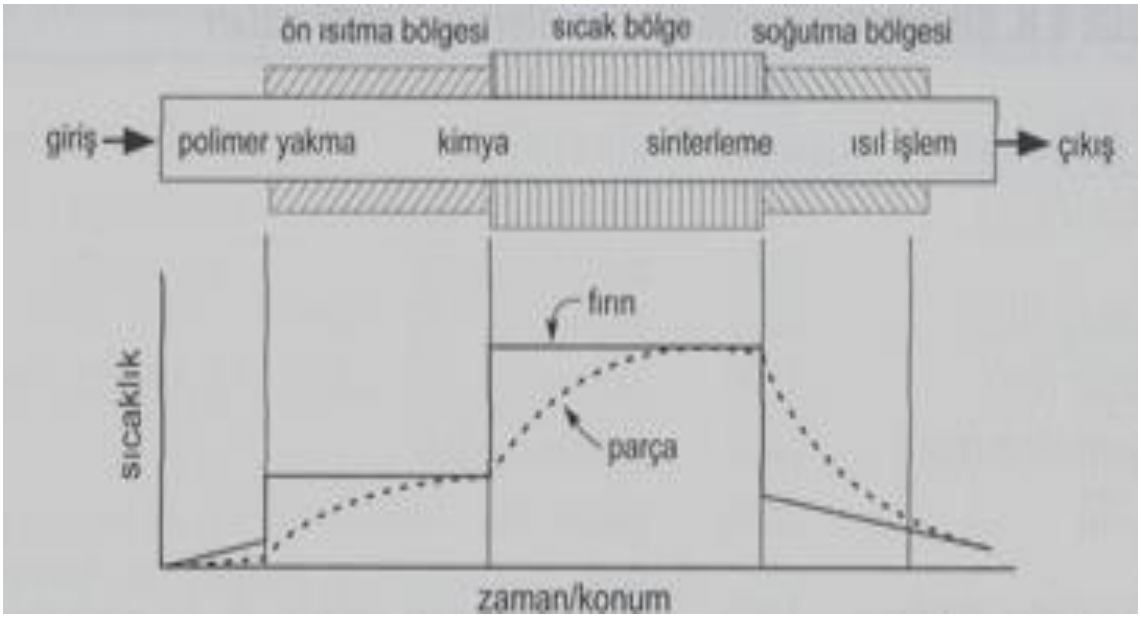
### 2.3.4. Toz Metalurjisi

Metal tozlarına ısıl işlem uygulanmasının ardından mekanik işlemlerle birleştirilmesi ve son ürünlerin elde edilmesi işlemi toz metalurjisi olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde toz metalurjisi yöntemiyle parça üretimi giderek artmakta ve bu nedenle diğer alışılmış üretim yöntemlerine bir seçenek oluşturmaktadır (Ünlü, Kurgan, & Yılmaz, 2009).

Toz metalurjisi yönteminde, uygun proses işlemleri ve kalıplama biçimleri ile yüksek oranda talaş kaldırma işlemine gerek duyulmadan veya bazı bölgelerde talaş kaldırma işleminin ardından son ürünler üretilebilmektedir. İstenilen özellik ve bileşime sahip toz karışımları öncelikle elverişli kalıplar içerisinde preslenir. Presleme işleminde basınç farklılıklarına, presleme etki sürelerine ve presleme uygulama şekillerine göre üretilecek iş parçalarının yoğunluk özellikleri de değişmektedir. Bu proses, mekanik ve fiziksel özellikler açısından istenilen özelliklere sahip ürünlerin hazırlanmasında önemli bir yere sahiptir. Toz metalurjisi tekniği ile üretilen iş parçalarında diğer bir aşama olan üretim sürecinin en önemli kısmı fırınlama yani sinterleme işlemidir. Sinterleme, malzemelerin ergime sıcaklığının altında ve genellikle koruyucu atmosfer altında yapılmaktadır. Bu aşamada, parça ısıtılmaya başlanır ve korozyon etkilerinin en aza indirilmesi için dış ortamla ilgisi olmayan fırın içinde önce yağ ve diğer olumsuzluk

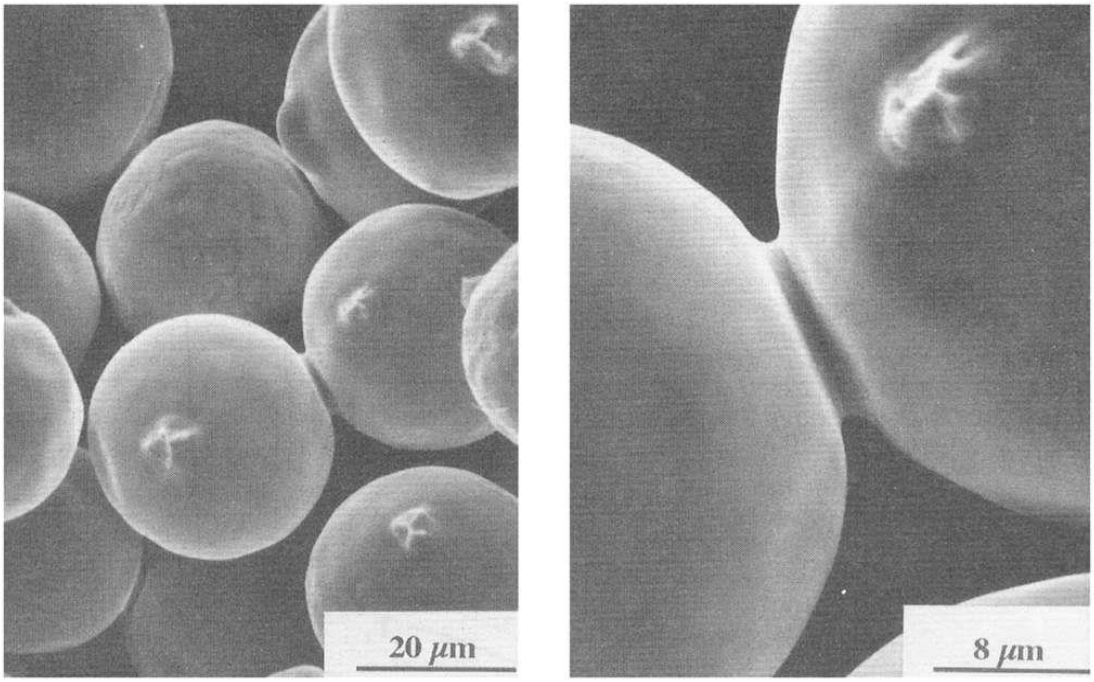
yaratabilecek maddelerden temizlenmek üzere ön ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Oksit indirgeme işleminden sonra parçalar fırının sıcak kısmına gönderilir ve sinterleme işleminin bitmesi beklenir. Sinterleme sonrasında fırından alınan parçalar soğutma alanlarında bekletilerek işlemin tamamlanması sağlanır (Sarıtaş, Türker, & Durlu, 2007).

Bu araştırma için hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini artırmak amacıyla iki Al bazlı alaşım, AA7075 alaşımı ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075 alaşımı seçilmiştir. Farklı işlem aşamalarının bu alaşımların mikroyapısı, faz bileşimi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, çeşitli deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir.



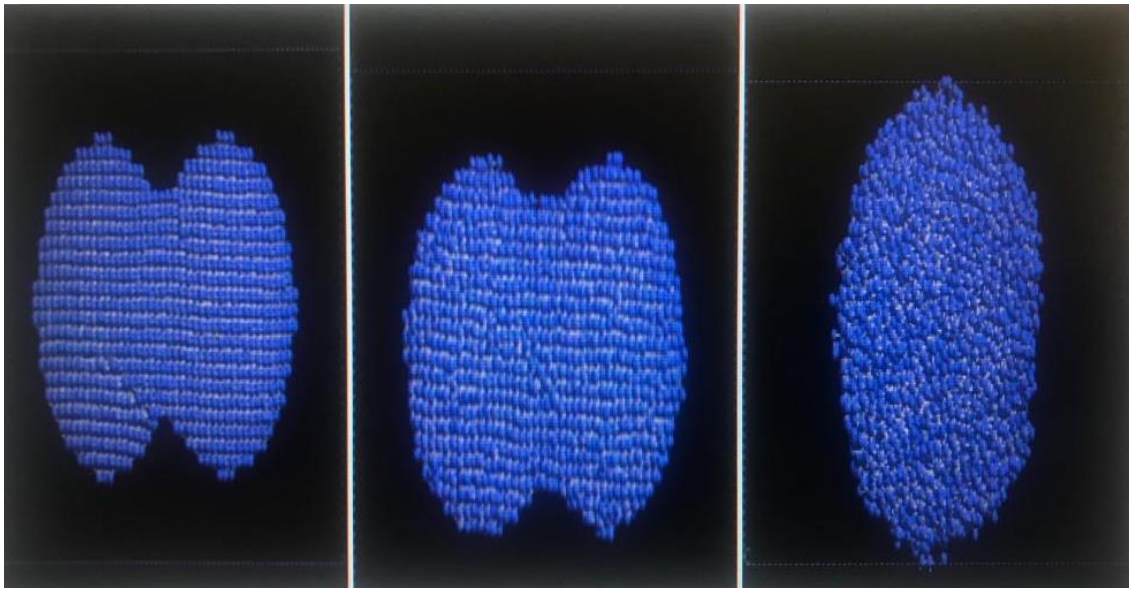

Şekil 2.2. Bir sinterleme fırınındaki işlemler zincirinin şematik gösterimi. Diyagram, tipik zaman-sıcaklık profilini göstermektedir (Sarıtaş vd., 2007).

Toz metal süreci ile üretilen ürünler gözenekli ve kompakt parçalar olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Bitirme işlemlerinden sonra malzeme % 10 ila 30 oranında gözenek içeriyorsa gözenekli malzeme, % 1 ila 3 oranında gözenek içeriyorsa bu ürün de kompakt malzeme olarak adlandırılmaktadır (Avcı, 1993); (Bishop, Kipouros, & Caley , 1997).

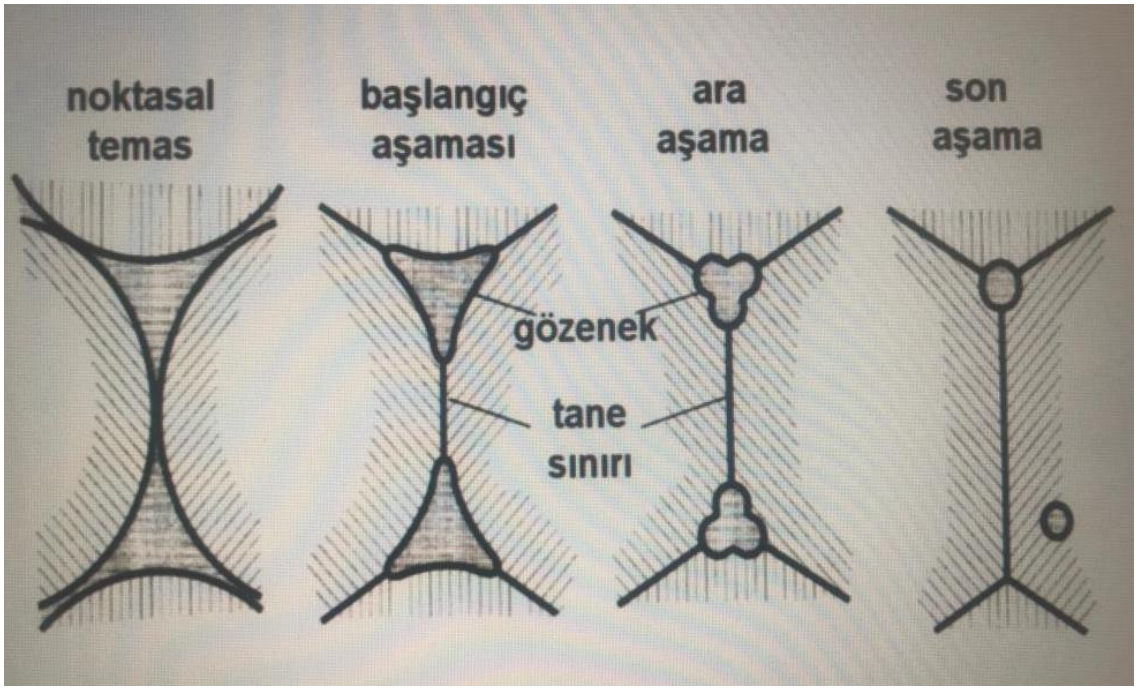



Şekil 2.3. Sinterleme ile toz partiküllerinde boyun oluşum başlangıcı

Pres uygulanarak sıkıştırılan toz partikülleri arasında oluşan bağlar, yapışma ve mekanik kilitlenme gibi zayıf bağlardır. Bu tür bağlar, kristal kafes yapısında oluşan bağların dayanım güçlerine oranla çok zayıf kalmaktadır. Pres uygulanarak sıkıştırılmış toz parçacıkları temas halinde olmalarına rağmen birbirlerinden bağımsız yapıdadırlar. Sinterleme işleminde yüksek sıcaklıktan etkilenen toz parçacıkları arasında temas yüzeyleri artmaktadır. Sinterleme işlemiyle malzeme içerisindeki iyon ve atomlar arasında bağlar oluşur. Tek bileşenli yapılarda sinterleme işlemi katı faz olarak yapılırken, çok bileşenli yapılarda ise preslenen parçaların genel durumunu bozmayacak şekilde katı veya sıvı fazlarda sinterleme işlemi yapılabilmektedir. Sinterleme işlemi yüksek basınç ve sıcaklık altında birleştirme işlemi olup, tozların birbirleriyle birleşerek difüzyon mekanizması sağlaması esasına dayanmaktadır (Kurt, Boz, & Özdemir, 2004).



Şekil 2.4. Toz malzemenin etkisi ile difüzyona uğrama mekanizması.




Şekil 2.5. Toz partiküllerinin noktasal temasıyla başlayan sinterleme sırasında gözenek yapısının gösteren şematik diyagram.

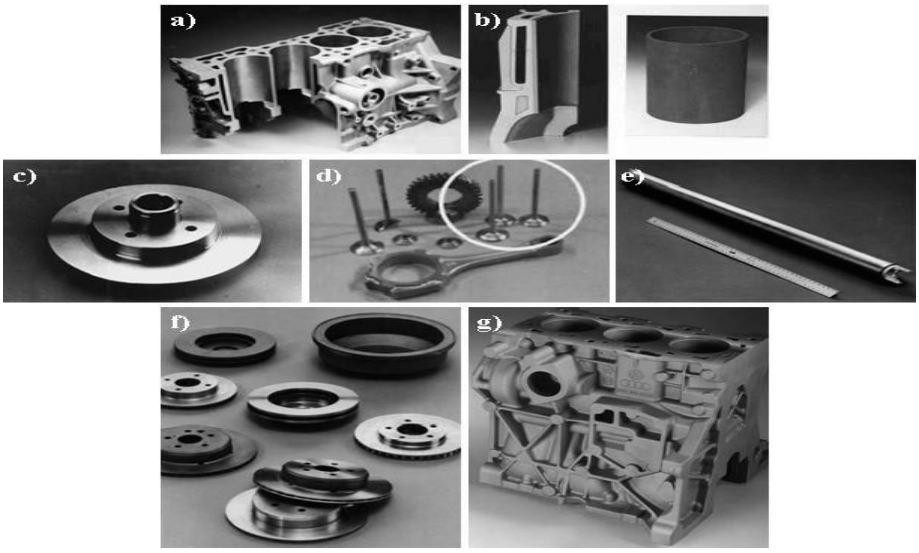
Toz metalurjisi tekniği; plastik şekil verme (ekstrüzyon), kaynaklı imalat (ergitme kaynağı), talaşlı imalat, döküm ve benzeri üretim yöntemlerine göre farklı bir imalat tekniğidir. Bu teknik, üretimi pahalı, işlenmesi zorlu, aşırı zahmet, emek ve daha çok süre isteyen alaşımların daha kolay üretilebilmesine imkân sağlamanın yanında, spesifik

malzemelerin üretimini kolaylaştırarak, malzemelerin yoğunluk ve mukavemet kontrollerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Toz metalurjisi yöntemi gelişen teknoloji ile birlikte diğer tüm yöntemlerle karşılaştırıldığında daha kazançlı ve kullanılabilirliği yüksek bir yöntem olma yönünde ilerlemektedir. Günümüzde toz metalurjisi genellikle maliyet, zaman ve karmaşık işçilik gerektiren ve diğer yöntemlerle yapımı zor olan parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Toz metalurjisi ile üretilecek parçalar üretim öncesi nitelik, maliyet, zaman gibi kavramlar göz önünde bulundurularak diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırılmalıdır. Ulaşılan sonuca göre toz metalurjisi üretim sürecinin kullanılmasına karar verilmelidir. Toz metalurjisi teknolojisi ile yapılan üretim, makine ve makine parçalarının yapımında bilinen diğer teknolojilere göre olağanüstü farklılıklar bulunmaktadır. En önemli farkı ise tek seferde başka bir işleme ihtiyaç duyulmaksızın istenilen mekanik, fiziksel ve şekilsel özelliklerde ürünlerin oluşturulmasına imkân sağlamasıdır. Günümüzde yüksek kaliteli ve karmaşık iş parçalarının diğer yöntemlere kıyasla çok daha ekonomik olarak üretilebilmesi nedeniyle toz metalurjisi ön plana çıkmıştır (Babayev, Karadeniz , & Memmedov , 2005); (Federçenko & Pugina, 1980).

Karmaşık şekillere ve büyük boyutlara sahip parçaların imalatı, diğer üretim teknikleriyle birlikte toz metalurjisi tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Çok karmaşık şekillere sahip makine parçaları ve elemanları, tek parça yerine birden fazla parça halinde üretildikten sonra birbirleri ile kombin edilmektedir. Parçanın bir bütün olarak hazırlanması üretim için gereken süreyi artırmakta, daha büyük ebatlarda ve daha yüksek kapasiteli presler gerektirmekte ve pres kalıplarının büyümesine ve maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır. Bunlara ek olarak, birçok teknik ve mali sorun ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, bu elemanların birkaç uygun parçaya ayrılarak istenilen parçaların elde edilmesi ve sonrasında modern kaynak veya birleştirme yöntemleri ile son haline getirilmesi daha uygun olacaktır (Ordenko , 1987).

Toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin, döküm, ekstrüzyon, haddeleme veya diğer konvansiyonel üretim teknikleri aracılığıyla birleştirilmesi ve kaynaklanmasına göre değişiklikler göstermektedir. Preslenmiş ve sinterlenmiş toz malzemeler kaynak yapıldığında, erimiş malzemenin hacimsel büzülmesi ve ısıl genleme miktarı bilinmeli ve kaynak yapılmadan önce belirlenmelidir. Bunun haricinde parçalar arasındaki boşluklar, parçaların birleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Bu ara

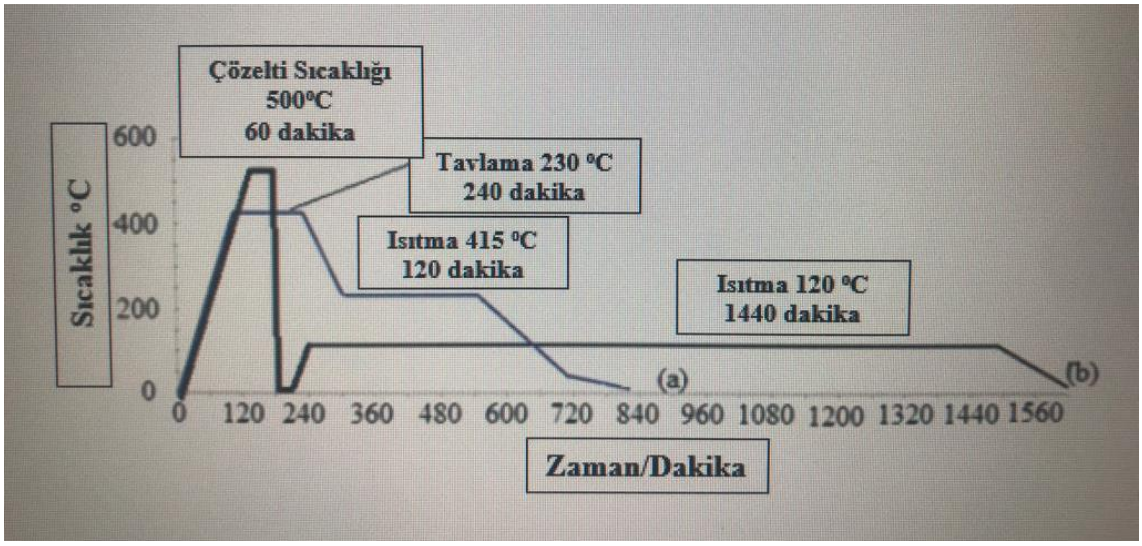
boşlukların fark değerleri, esas malzemeye bağlı olabileceği gibi, bu malzemedeki ergiyen metal yoğunluğuna da bağlı olabilir.




Şekil 2.6. Sinterleme ile üretilmiş örnek malzemeler.

## 2.4. AA 7075 Alaşımı

AA7075 alaşımın tavlanması, 415 °C sıcaklığa ısıtılması ve 2 saat süre bekletilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Daha sonra sıcaklık 230 °C'ye düşürülerek, 4 saat süre bekletilmesi gerekmektedir. T6 ısıl işlemi, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi önce 500 $^{o}$C'ye kadar 1 saat süreyle çözeltiye ısıl işlem uygulanıp, söndürme işleminin ardından 120 $^{o}$C'de bekletilmesiyle yapılmaktadır.




Şekil 2.7. AA7075 için ısıl işlem diyagramları: (a) Tavlama-(O); (b) Katı çözelti muamelesi (Söndürme + suni yaşlandırma)-(T6).

## 2.5. Zirkonyum Metali

Zirkonyum elementi; simgesi Zr, atom numarası 40 ve atom ağırlığı 91,224 g/mol olup, periyodik cetvelin 4-B grubunda yer alan bir geçiş metalidir. 1789 yılında Martin Heinrich Klaproth tarafından keşfedilmiştir. Kelime kökeni, Pers dilinde "altın rengi" anlamına gelen zar (altın) ve gun (renk) (Zargun)'dan gelmektedir.

Erime noktası 1855 ºC, kaynama noktası ise 4409 ºC'dir. Grimsi beyaz renkte ve sünek yapıda bir metaldir. Zirkonyum, aynı grupta yer alan hafniyum ve titanyuma yakın kimyasal özellikler taşır. Bu nedenle Zr ve Hf minerallerde belli oranlarda bir arada bulunur. Isı değişiklikleri ve korozyon tipi aşınmalara karşı oldukça dayanıklıdır. Çelikten hafif ve bakırdan sert yapıda, % 99 saf hali gevrek olup, kristal yapısı ise hegzagonaldir.

Zirkonyum metalinin havadaki azot ve oksijen ile etkileşime girmemesi için döküm işlemlerinde özel fırınlar kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yüksek iletken özellik göstermesi nedeniyle mıknatıs yapımında zirkonyum-niyobyum alaşımları kullanılmaktadır. Zirkonyum, normal sıcaklıkta reaktif değilken, yüksek sıcaklıkta reaktif hale gelmektedir. Havada ve sıvı içerisinde oksitlenerek korozyona karşı direnç kazanır. Saf zirkonyumun doğada bulunma olasılığının oldukça düşük olmasına karşı, zirkonyum bileşikleri dağınık halde oldukça fazla bulunmaktadır. Neredeyse tüm zirkonyum cevherleri hafniyum içermektedir ve bakır, nikel, kurşun, kalay ve çinko gibi metallerin

toplamından da fazla zirkonyum cevheri olduğu düşünülmektedir. Zirkonyumun 30'dan fazla minerali bulunmakla birlikte, metal üretiminde kullanılan başlıca mineralleri zirkon ($ZrSiO_4$ ) ve baddeleyit ($ZrO_2$ )'tir. (Şahin Kılavuz & Şen, 2021)

## 2.6. AA 7075 Alaşımı ve % 1 Zr İçeren AA7075 Alaşımları

İşleme teknolojisinin verimliliği üzerine yapılan çalışmada, tanınmış ticari AA7075 alaşımı kullanılmıştır. AA7075 alaşımının seçilmesi çeşitli işleme teknikleriyle elde edilen bu alaşım hakkında diğer araştırmalarda elde edilen deneysel sonuçlarla, özellikle en yüksek mukavemete erişmeyi amaçlayan özel ısıl işlemlerden sonra AA7075 alaşımı için elde edilen değerlerle karşılaştırmamızı sağlamıştır (Ibrahim, Garza-Elizondo, Samuel, & Samuel, 2016). AA7075 alaşımın faz bileşiminin sıcaklıkla büyük ölçüde değişkenlik göstermesi, yüksek sıcaklık davranışının araştırılması, malzemenin mukavemetini kararlı ince tane boyutu ile artırmak amacıyla daha çok stabilitesine odaklanılmıştır.

Mikroyapısal stabiliteyi artırmak için, AA7075 alaşımına ağırlıkça % 1 Zr ilave edilmiştir. $Al_3Zr$ fazının çok ince parçacıklarının tane sınırlarını sabitleyeceğine ve aksi takdirde tane büyümesine neden olacak şekilde göçlerini geciktirebileceğine inanılmaktadır (Weiland & Cheong, 2007). Zr'nin mikroyapı stabilitesi üzerindeki olumlu etkisi daha önce hem hızlı katılaştırma teknikleri hem de aşırı plastik deformasyon ile hazırlanan materyallerde saptanmıştır (Málek, Erlebach, Cieslar, & Knoop, 1996).

## 2.7. Eşit Kanal Açısal Presleme (ECAP)

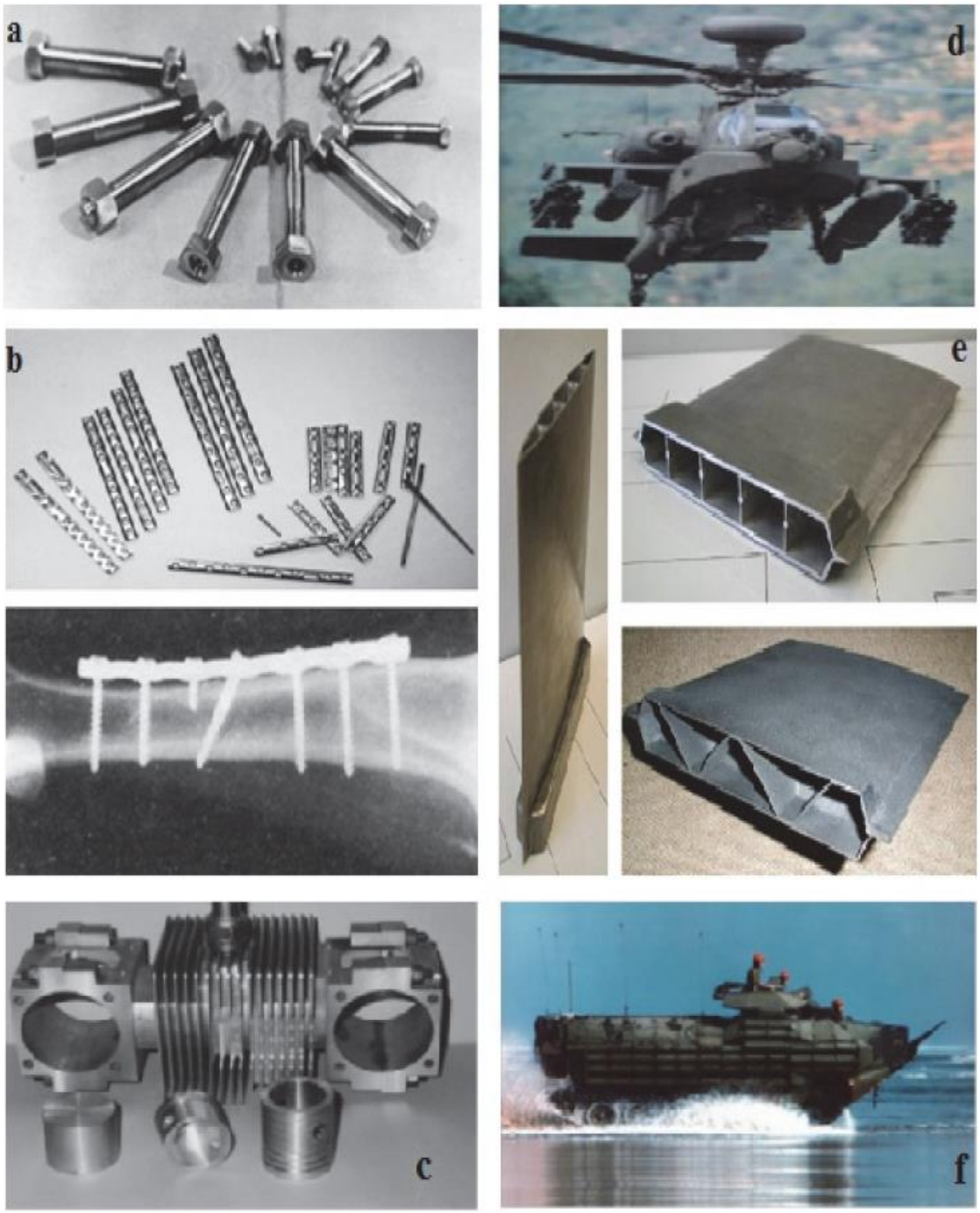
Metal alaşımlarının ve alüminyum matrisli kompozitlerin üretim teknolojisi, geleneksel teknolojiden yüksek basınçlı deformasyona doğru gelişmektedir. Kesintili şekilli veya fiber takviyeli MMC, sünek metal alaşımlarına gömülü ayrı sert seramik takviyeler sunmaktadır. Genellikle, takviye olarak liflerin eklenmesi sertliği arttırır ve bağıl yoğunluğu azaltır (Podgurski , 2001).

Aşırı plastik deformasyon, değişen polikristal numuneler için azaltılmış tane boyutuna sahip alaşımlar ve kompozitler için bir işleme tekniğidir (Penkov, 2001) (Tähemaa, Kaljas, & Reedik, 2002). ECAP ve ARB en çok bilinenler olmak üzere bir dizi aşırı plastik deformasyon teknolojisi geliştirilmiştir. Her ikisi de Şekil 2.8'de görüldüğü

gibi endüstriyel olarak farklı alanlarda uygulanmaktadır (Tähemaa, 2002). Spesifik dayanım veya artırılmış yorulma ömrü gibi üstün özelliklerin gerekli olduğu sektörlerde aşırı plastik deformasyon işlemiyle nanoyapılı malzemeler için pazarlar mevcuttur. Aşırı plastik deformasyon malzemelerinin kullanıldığı uygulamalardan bazıları, yüksek akma mukavemeti ve süperplastik özelliklere sahip alüminyum esaslı kompozitler, soğuk ve kriyojenik sıcaklıklarda daha yüksek mekanik özellikler ve uzay, medikal ve diğer birçok uygulama için şekil hafızası etkisine sahip yüksek mukavemetli hafif TiNi alaşımlarıdır (Resev & Roosimölder , 2004).

ECAP'ın geliştirilmesi, son zamanlarda geliştirilen Geri Basınç-ECAP ve Paralel Kanal-ECAP gibi bazı gelişmiş metotları ortaya çıkarmıştır (Letunovitš, 2003); (Pihl, 2002). ARB'nin geliştirilmesinin sonucu, döngüler sırasında daha etkili sıkıştırma elde etmek için çapraz haddelemedir. Ayrıca, iyi bir yapıştırma ara yüzü elde etmek için haddeleme işleminden önce presleme getirilmiştir. Aşırı plastik deformasyon yöntemi, mekanik özellikleri geliştirmek için temel olarak UFG boyutu 1μm'nin altında olan bir malzemenin üretilmesini sağlamaktadır.

ECAP ve ARB gibi aşırı plastik deformasyon yöntemleri ve diğer birkaç yöntem, farklı özelliklere sahip belirli uygulamalar için özel olarak tasarlanmıştır (Málek, Erlebach, Cieslar, & Knoop, 1996). Deformasyon modunda çok çeşitlidirler, bu da saf kesmeden basit kesmeye, monotondan döngüsel yüklere ve çapraz yüklemeye kadar değişebilir. İnce tane boyutuna sahip UFG, daha yüksek özelliklere sahip olmaktadır. Aşırı plastik deformasyon teknolojileri, genellikle, kütük boyutlarındaki değişikliklerle seri üretim için geçerlidir.




Şekil 2.8. ECAP ve ARB'nin uygulama alanları: a) aşırı plastik deformasyon ile üretilen yüksek mukavemetli diş; b) aşırı plastik deformasyon nanoyapısından yapılmış plak implantları; c) nanoyapılı AA1420'den imal edilmiş motor bloğu makinesi; d) yüksek mukavemetli malzemelerden askeri helikopter gövdesi; e) İçi boş kanatlı modeller için UFG Ti-6Al-4V süperplastisite levha malzemeleri f) askeri cihaz - amfibi saldırı aracı, BAE Systems'in izniyle (Resev, 2002; Tähemaa, 2002).

Aşırı plastik deformasyon, süperplastik özelliklere sahip yüksek mukavemetli hafif malzemeler üretebildiği gibi, dövme, haddeleme, ekstrüzyon ve çekme gibi geleneksel işlemlerden daha yüksek plastik gerilmeler sağlayabilmektedir (Tähemaa, 2002).

## 2.8. ECAP Sırasında Evrim Mikroyapısı

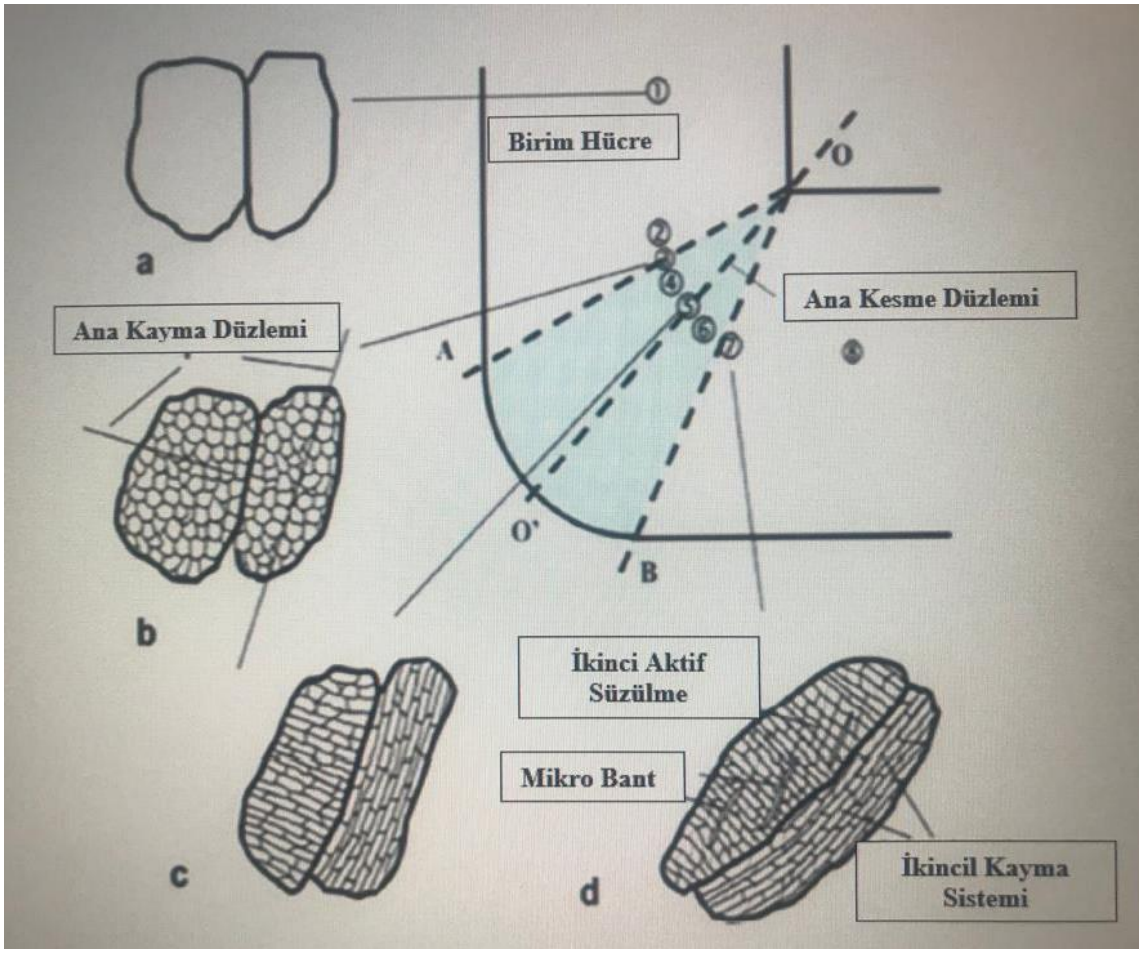
ECAP ile presleme, gerilmeyi en üst düzeye çıkaran kanal kalıpları aracılığıyla malzeme üzerinde basit bir kesme sağlamaktadır (Hussainov, 2005). Bir geçiş ile elde edilen gerinim büyüklüğü bu yöntemin temel avantajlarından biridir. Kayma gerilmesi, sürekli olarak geçirilen ECAP rejimleri sırasında, ECAP kalıbının kesişme açısına ulaştıktan sonra aynı düzlemde meydana gelir, bu nedenle kayma yönü düzgün bir gerinim dağılımından sonra Şekil 2.11'de monte edildiği gibi döndürülür, kayma miktarı (γ) sürtünme koşulu varsayılarak hesaplanabilir (Mittemeijer, 2021); (Yu, Tieu, Lu, & Kong, 2014)

$$\gamma = 2\cot\left(\frac{(\phi+\psi)}{2}\right) + \psi\,\mathrm{cosec}\left(\frac{(\phi+\psi)}{2}\right) \tag{2.1}$$

N geçtikten sonra ECAP'ın sonucu olan efektif gerinim (ε), aşağıdaki ilişki ile verilir:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{N}{3^{1/2}}\left[2\cot\left(\frac{(\phi+\psi)}{2}\right) + \psi\cosh\left(\frac{(\phi+\psi)}{2}\right)\right] \tag{2.2}$$

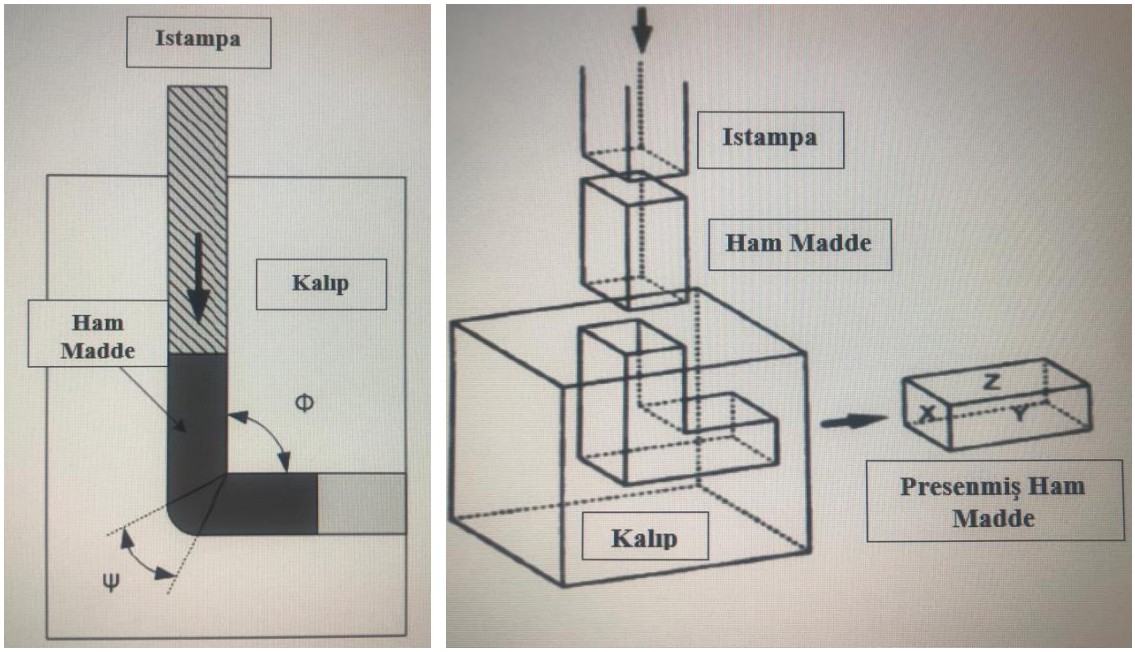
Denklem (2.2) tüm süreç boyunca ECAP numunesi üzerindeki etkili gerilimi açıklamaktadır. ECAP'ın kalıp duvarlarındaki iç basıncı, kayma düzleminde ilerleyebilmektedir, basınç bükülme açısına ulaştıktan sonra malzemeler gerilir. Bu durumda dislokasyon oluşur ve sonunda tane boyutu küçülür. Bu arıtma mekanizması, ikizlenme şeklinde dislokasyondur. Eşleştirme mekanizması düşük sıcaklıklarda, bir sıcaklık düşüşü ile çalışmaktadır, bu nedenle kayma atomik bölgesi keskin bir şekilde artar. Bu, tanenin gerekli sayıda geçişle UFG'ye kadar daha ince olmasını sağlamaktadır (Barashkova, 2006).




Şekil 2.9. ECAP sürecinden geçen mikroyapı gelişiminin şematik gösterimi: (a) açıdan geçmeden önce iri taneler; (b) basıncın daralması nedeniyle çıkıkların hareketi; (c) hareket ikizlenmesine dönüşen dislokasyon duvarlarıyla sonuçlanan kayan kayma düzlemleri; (d) ikincil kayma ve mikro bantların hareketi (Barashkova, 2006).

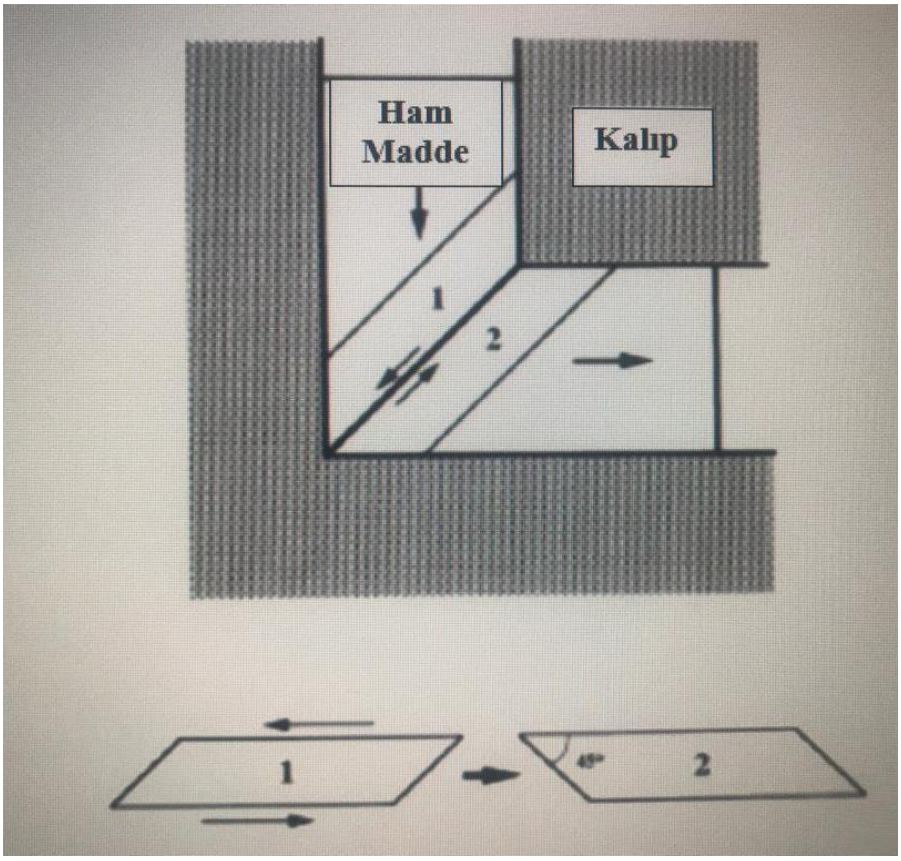
## 2.9. ECAP İşleme Prensipleri

Çoğu metal alaşımı için ECAP işleme rejimleri belirlenmiştir, ancak MMC tozlarının sıkıştırılmasına yönelik nadir çalışma bulunmaktadır. Şekil 2.10 ECAP prosedürünün şematik bir modelini göstermektedir. ECAP kalıbı, Şekil 2.10'da olduğu gibi, en yaygın olarak 90° boyunca köşe altında bükülmüş bir kanala sahiptir. Çubuk, kalıplar boyunca hareket eder. Numunenin preslemeden önceki ve sonraki boyutları değişmez ve bu nedenle taneleri daha da rafine etmek için sınırsız sayıda geçişe izin verilmektedir (Hussainov, 2005; (Veınthal, 2005).



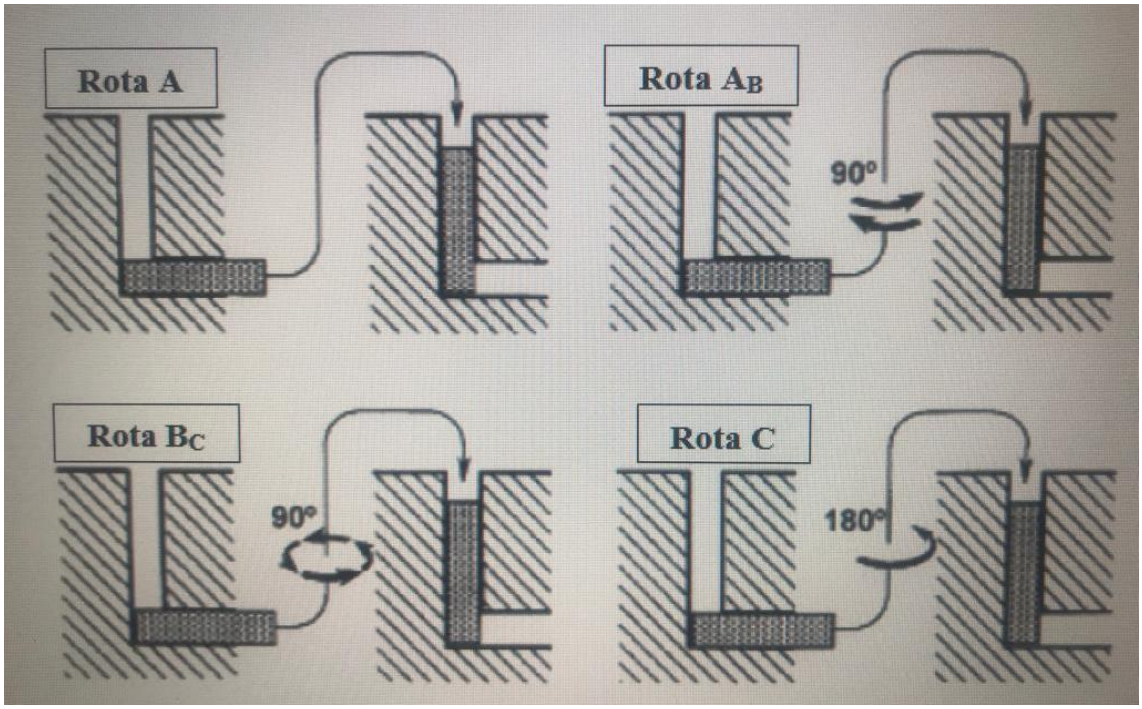

Şekil 2.10. Tipik bir ECAP kalıp tesisinin şematik modelleri: mikroyapıdaki değişiklikleri belirlemek için enine veya boyuna en iyi yönü belirlemek için X, Y ve Z düzlemleri (Kartushinsky, Krupensky, Tisler, Hussainov , & Shcheglov , 2009).

Deformasyon çalışması sırasında uygulanan kuvvet, işletim basıncı olarak basit bir kesmedir, kesme gerilimi alanı yörünge ile gösterilebilir; x, y ve z, Şekil 2.13'deki gibi. Kalıbın açısı 90°'dir, Şekil 2.11'de kayma alanında, gösterilen görünür değişiklikler 1'den 2'ye kadardır, bu teorik olarak mekanik özellikleri iyileştirebilecek malzeme atomlarının bir kaymasını göstermektedir (Otto, 2006).




Şekil 2.11. ECAP kalıbındaki kesme düzlemini açıklayan ECAP ilkesi.

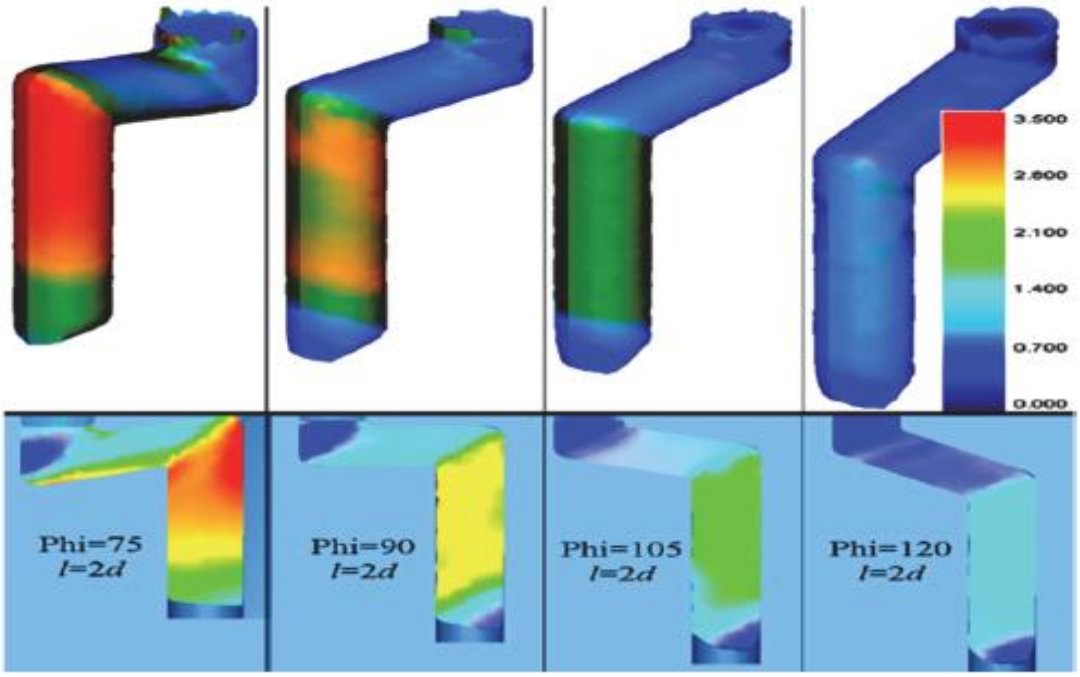
Değişken mekanik özellikler ve tane dağılımı üretmek için farklı ECAP yolları kullanılmaktadır. ECAP işleme rotası, ECAP tarafından istenen mikroyapılara bağlı olarak numunelerin geçişler arasında önceden tanımlanmış açı altında, genellikle $90^o$ ve $180^o$ döndürülmesiyle ayırt edilmektedir (Kaljas, 2005). ECAP işleme yollarının dört rejimi Şekil 2.12'de gösterilmektedir. A rotası rotasyondan muaftır. $B_A$ rotası boyunca numune dönüşümlü olarak ters yönde ve 90° açıyla döndürülür. $B_C$ güzergâhında, güzergâh numuneleri üzerindeki dönüş, presleme yönü değiştirilmeden, her geçiş arasında 90°'nin altında ardışık geçişlerle gerçekleştirilmektedir. C yolunda, numune geçişler arasında 180° döndürülür. Bu rotaların kombinasyonlarına da izin verilir, örneğin, ECAP rejiminde birkaç geçişten sonra $90^o$ ve $180^o$ boyunca dönüşümlü rotasyonlar yaparak rotaların Bc ve C'sini birleştirmektedir (Hussainov, 2005; Kaljas, 2005).



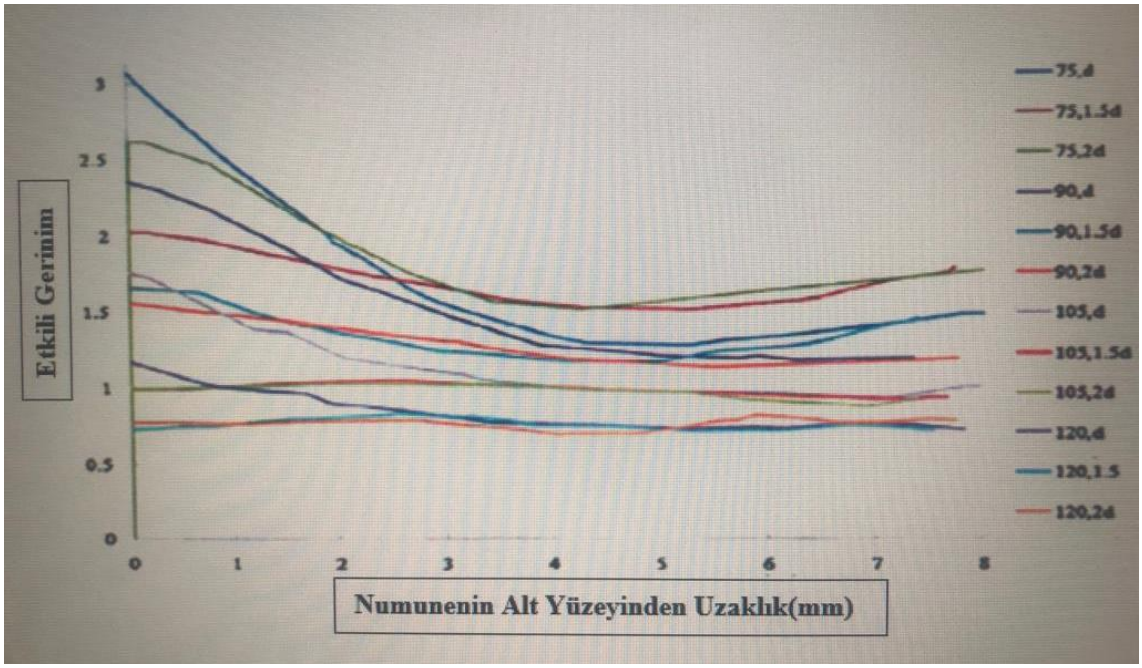

Şekil 2.12. Dört temel ECAP işleme yolu (Kaljas, 2005)

## 2.10. ECAP-PC Sırasında Preslemenin Etkisi

FEM incelemesine dayanarak, açı ECAP-PC'nin başarısını güçlü bir şekilde etkilemektedir (Peetsalu, 2007). Kalıp kanalı açısındaki ve kanal yer değiştirmesindeki değişiklikle, etkili gerinim, Şekil 2.14'te görüldüğü gibi farklı yer değiştirme koşulları altında çizilebilmektedir. Küçük olan sürtünmenin etkisinden kaynaklanan 120º'lik açıyla homojen basınç üretilir, bazı durumlarda presleme kalıp açısına ulaştığında kanal uzunluğunda bir azalma olur ve sonuç olarak etkili bir gerilme sağlanır. Kanal açısının 120º'den 75º'ye düşürülmesi, gerilimi 2.36'dan 1.27'ye düşürmektedir. Daha düşük etkili gerinim 120º'de l = 2d ve en yüksek etkili gerinim 75º, l = d ile ilişkilidir. Ancak bu açı, numune soğuk koşullarda işlendiğinde bir noktada kusurlara neden olmaktadır (Dedov, 2007); (Kollo, Pirso, & Juhani, 2007).

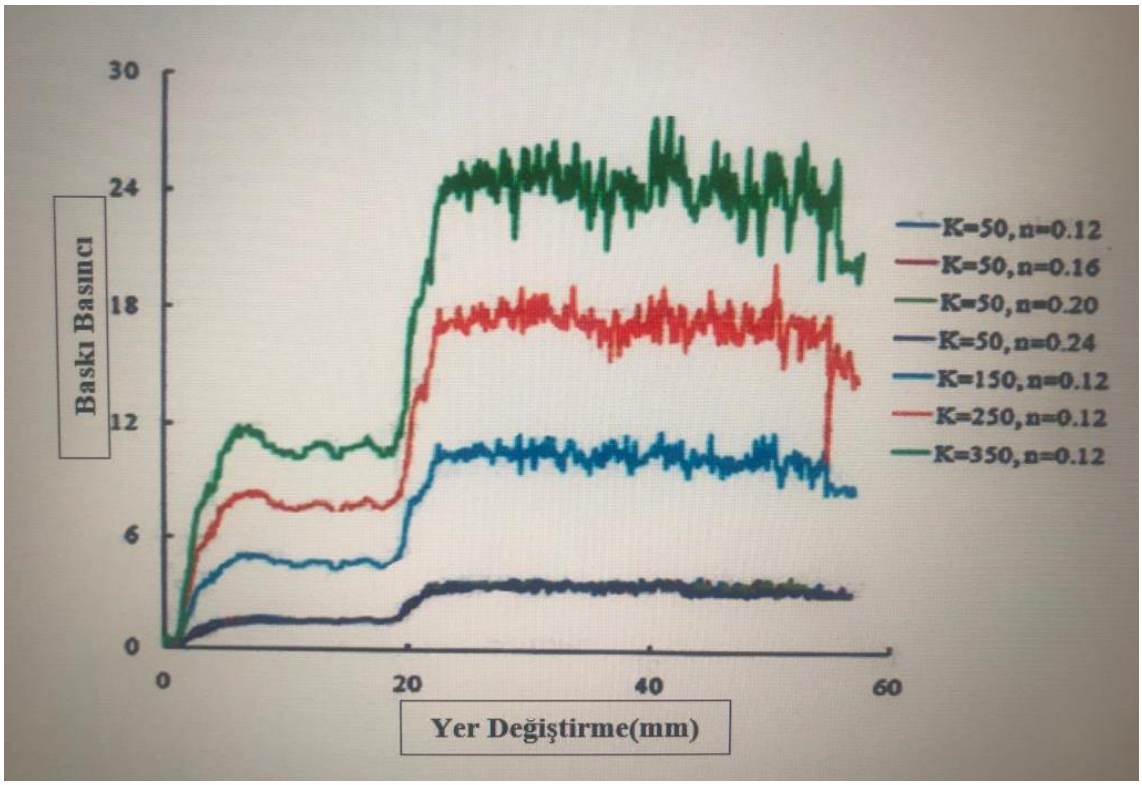



Şekil 2.13. Paralel bir kanalın kanal kesitinin sırasıyla presleme etkisine farkı - her köşe karakteristik özellikler farklılığı üretir (Peetsalu, 2007).




Şekil 2.14. (Kollo, 2007)'dan uyarlanmış ECAP-PC'de tek geçişte etkili gerinim üzerindeki yer değiştirme kanallarının etki kesitleri.

Şekil 2.13’de gösterildiği gibi, $l \geq 1.5d$ kanal yer değiştirmesi için kanalların etkin gerinimlere karşı açıları arasındaki ilişki, kalıp açısından bağımsız olarak tek tip gerinim üretir.




Şekil 2.15. Gerinim sertleşmesi üs değerlerine karşı sıkıştırma basıncının büyüklüğünün diyagramı (Kollo, 2007).

ECAP konsolidasyonunda ve paralel kanalda akış stresi üzerinde değer oluşturmak için gerinim sertleşmesi ve mukavemeti birçok çalışmada incelenmiştir (Dedov, 2007; Kollo, 2007; Peetsalu, 2007); (Sergejev, 2007). Preslemenin ilk kayması, makine preslemesinin kalibrasyonuna bağlıdır, örneğin, mukavemet büyüklüğü 50 MPa'da (ilk adım presleme olarak) sabit kalır, preslemenin her noktası artan gerinim sertleşmesiyle sonuçlanır. Elde edilen gerinim sertleşmesi üsleri: 0,12; 0,16; 0,2 ve 0,24’tür ve bu da basıncın büyüklüğü ile ilişkilidir. Şekil 2.15, ECAP-PC sırasındaki sıkıştırma kuvvetinin boyutları ile elde edilen gerinim sertleştirme katsayısının değeri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Numunenin başlangıç ayarından sona doğru hareketine gerinim değerindeki artış eşlik eder. İkinci viraja ulaşmadan önce, kuvvette % 88 civarında bir düşüş gerçekleşmiştir. Mukavemet büyüklüğü, Şekil 2.15’de gösterildiği gibi, makinenin ilk ayarı olarak 350 MPa'dan 50 MPa'ya düştüğünde, ikinci köşeden

sonra, şekil değiştirme sertleşmesi üssünden (n=0.12) kaynaklanan, enine kesit % 87'ye düşürülmüştür (Kollo, 2007; Peetsalu, 2007). Kompozit tozları konsolide ederken bir bakır kapsül kullanılırsa, ikizleme deformasyonu ile akış stresini engellemediği, dolayısıyla dislokasyon hareketinin daha optimal bir akış stresi sağlayabileceği varsayılabilir.

# BÖLÜM 3

# MALZEME HAZIRLAMA VE DENEYSEL ARAŞTIRMA

## 3.1. Malzeme Hazırlama

Bu tezde iki alüminyum alaşımı incelenmiştir. Geniş çapta incelenen AA7075 alüminyum alaşımı ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075 alaşımı araştırılmıştır. Her iki alaşımın kimyasal bileşimi Çizelge 3.1' de sunulmuştur.

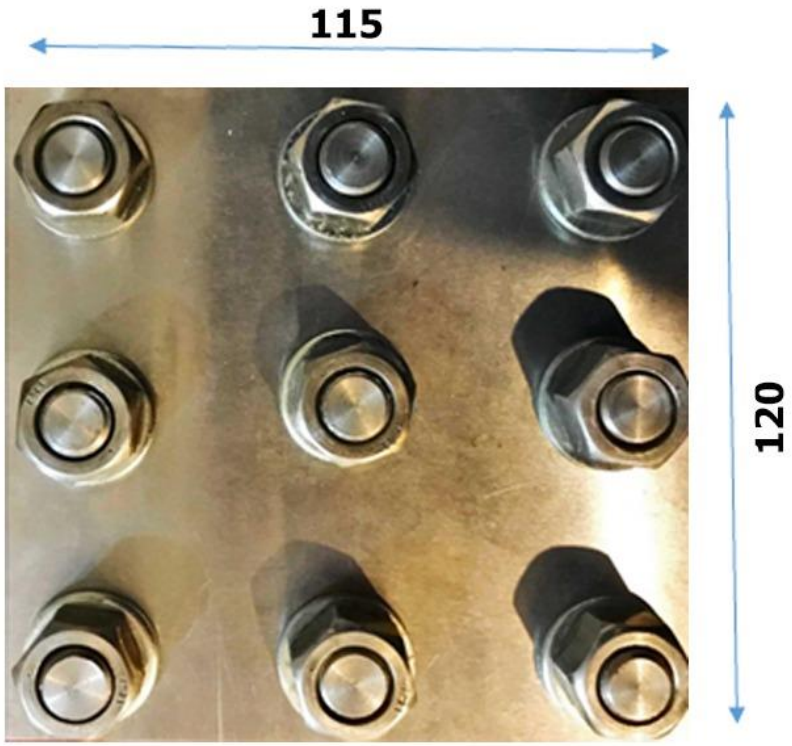
Çizelge 3.1. İncelenen alaşımların % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimi.

| | **Zn** | **Mg** | **Cu** | **Zr** | **Ti** | **Al** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **AA7075** | 6.6 | 2.3 | 1.7 | - | - | geri kalan |
| **AA7075Zr** | 6.6 | 2.3 | 1.7 | 1.0 | - | geri kalan |

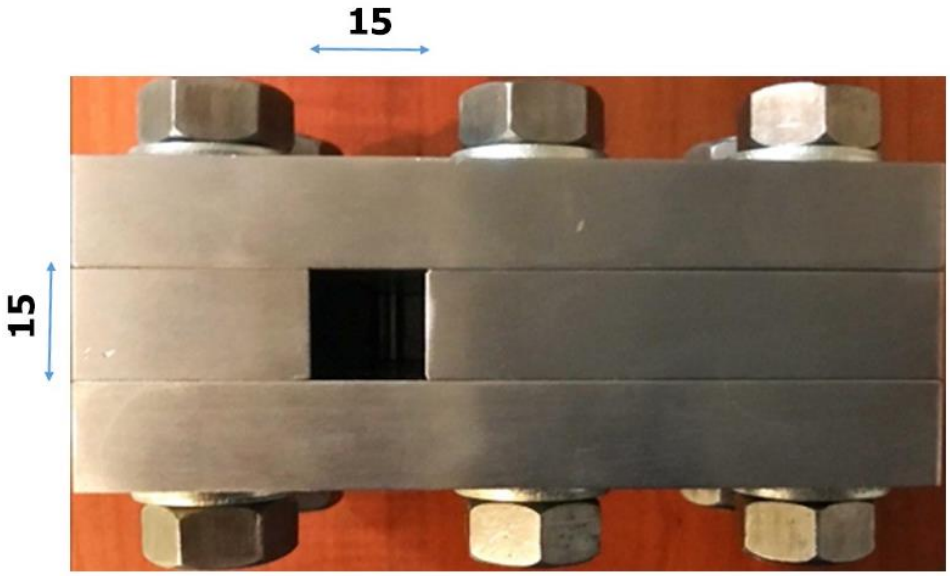
Bu çalışmada gaz atomizasyonu ile elde edilen ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verildiği gibi ayarlanmış alüminyum tozlarına, toz metalurjisi yöntemi ile 600 $^{o}$C ve 700 $^{o}$C sıcaklık olmak üzere iki farklı sıcaklık ve 750 MPa basınç uygulanarak 4 saat süreyle sinterleme işlemi sonucunda AA7075 alaşımı ve % 1 Zr içeren AA7075 alaşımı üretilmiştir. Elde edilen numuneler 15 x 15 x 70 ebatlarındadır. Numunelerin mikro yapıları ile mekanik özellikleri analiz edilmiştir.

Tez çalışmasında, birbirini 90$^{o}$ açı ile kesen iki eşit boyutlu kanaldan oluşan eşit kanal açısal basma kalıbı kullanılmıştır. Bu tarz işlemler düzlem genleme işlemi olduğu için deforme olan malzemenin enine kesitinin daire, kare veya başka bir şekil olmasının önemi yoktur. Talaşlı işlenmesi kolay olması sebebiyle kare kalıp tercih edilmiştir. Belirli sıcaklık ve basınç derecelerinde üretilen alüminyum alaşımları bu kalıp sayesinde deforme edilmiştir. Alüminyum alaşımlarının termomekanik işlemlerden sonra yeniden kristalleştirme ile tane boyutunu ortalama 10 μm'nin altına indirmek çok zordur. Buna rağmen aşırı plastik deformasyon ile tane boyutunu 1 μm'nin altına düşürmek mümkün olmaktadır (Horita, Fujinami, Nemoto, & Langdon, 2001). Deformasyon sırasında kuvvet

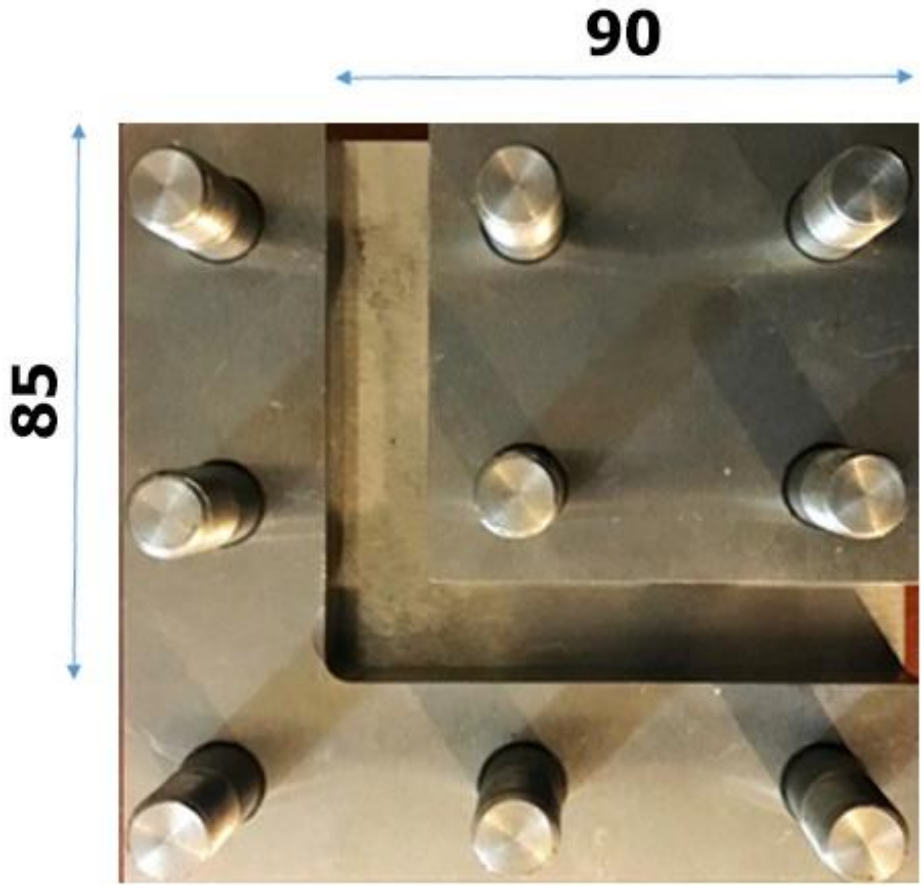
ve mesafe kayıt edilecektir. Daha sonra deforme edilen ürünlere çekme, sertlik ve yorulma deneyleri uygulanacaktır.




Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan eşit kanal açısal basma kalıbı (kapalı durum üstten görünüm)




Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan eşit kanal açısal basma kalıbı (kapalı durum yandan görünüm)




Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan eşit kanal açısal basma kalıbı (açık durum)

Kimyasal bileşimleri belirlenen AA7075 ve AA7075Zr tozlarına toz metalurjisi (sinterleme) işlemi Çizelge 3.2'de sunulan sıcaklık ve basınç değerlerinde uygulanmıştır.

Çizelge 3.2. AA7075 ve AA7075Zr alaşımı tozlarına toz metalurjisi (sinterleme) işleminde uygulanan sıcaklık ve basınç değerleri.

| **Sıcaklık** | 600 $^{o}$C | 700 $^{o}$C |
|---|---|---|
| **Basınç** | 750 MPa | 750 MPa |

Bu tezde, toz metalurjisi yöntemi ile belli sıcaklık ve basınç değerlerinde üretilen AA7075 ve AA7075Zr alaşımı numunelerinin her birinden 70 adet olmak üzere toplam 280 adet numune üzerinde deneysel işlemler yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Deneylerde kullanılacak numuneler.

| **Numune No** | **AA7075 Tozlarına ve AA7075Zr Tozlarına Uygulanan Sıcaklık ve Basınç Değerleri** |
|---|---|
| **Numune 1** | AA7075<br>600 $^{o}$C sıcaklık, 750 MPa basınç ile 4 saat süre sinterleme |
| **Numune 2** | AA7075<br>700$^{o}$C sıcaklık, 750 MPa basınç ile 4 saat süre sinterleme |
| **Numune 1Zr** | % 1 Zr içeren AA7075Zr<br>600 $^{o}$C sıcaklık, 750 MPa basınç ile 4 saat süre sinterleme |
| **Numune 2Zr** | % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımı<br>700$^{o}$C sıcaklık, 750 MPa basınç ile 4 saat süre sinterleme |

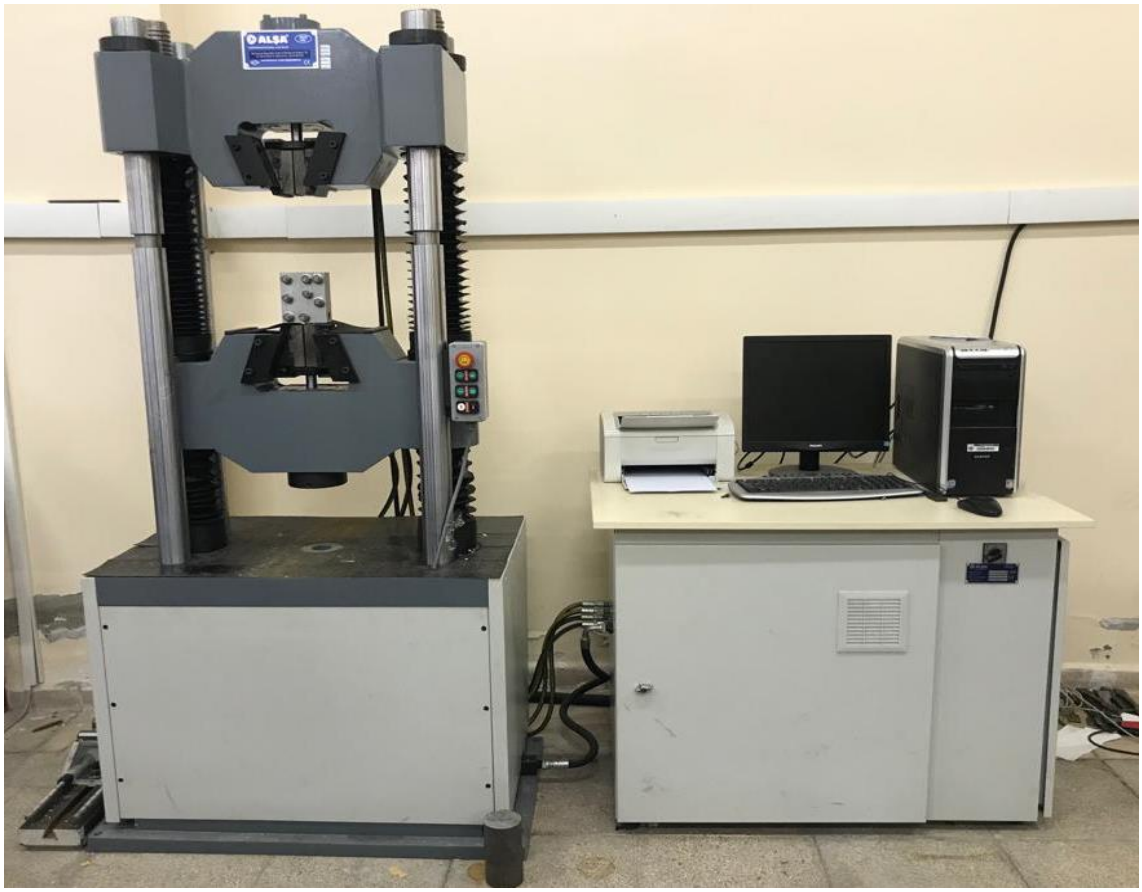
## 3.2. Deney Numuneleri ile Deney Araç ve Teçhizatları

Bu çalışmada kullanılan malzemeler, özel olarak belirlenmiş sıcaklık ve basınç değerleri uygulanarak toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanmış 15x15x70 mm ölçülerinde AA7075 alaşımı ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075 alaşımlarıdır. Numunelerin talaşlı işlemleri için kaba işçilikte Ø8 mm çapında DIN844N - HSSCo8 normlarında 4 ağızlı parmak freze ve hassas işlemleri Ø16 mm çapında için SB tip çapraz karbür kalıpçı freze uçları kullanılmıştır.

Mikroyapı incelemeleri Zeiss EvoLS10 marka elektron mikroskobunda yapılmıştır. Numunelerin Sertlik testleri Tronik marka sertlik ölçüm cihazında, çekme testleri Alşa marka çekme basma test cihazında, yorulma deneyleri Sincotec marka, Power Swing Mot 50 yorulma deneyi test cihazında yapılmıştır.




Şekil 3.4. Numunelerin mikroyapısını incelemede kullanılan cihazlar.








Şekil 3.5. Çekme deneylerinde kullanılan cihaz.



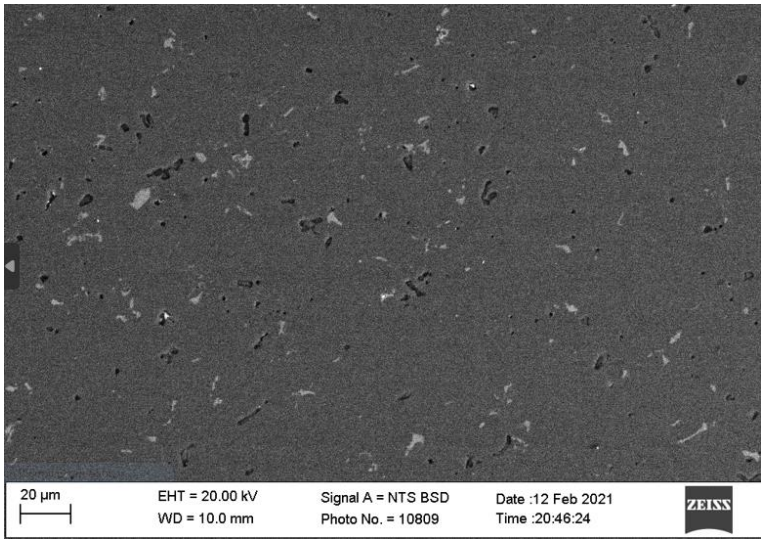

Şekil 3.6. Yorulma deneylerinde kullanılan cihaz.



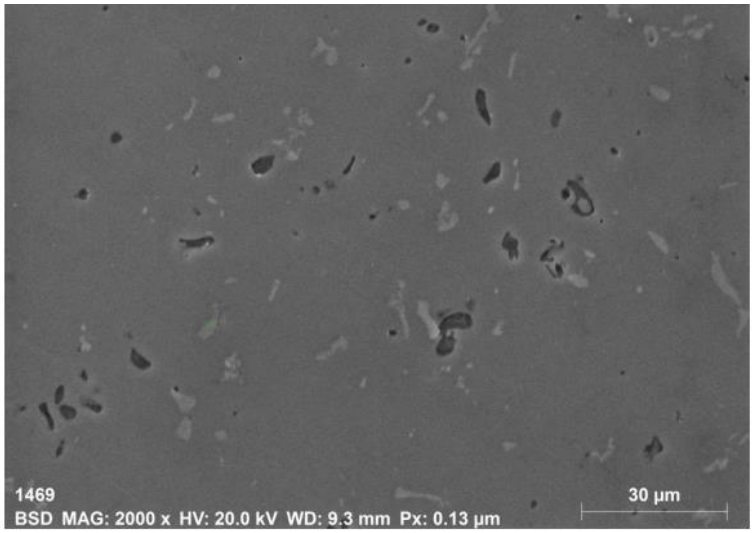

Şekil 3.7. Yorulma deneylerinde kullanılan cihazın teknik özellikleri.

### 3.3. Mikroyapı İncelemesi-Sem Görüntüsü

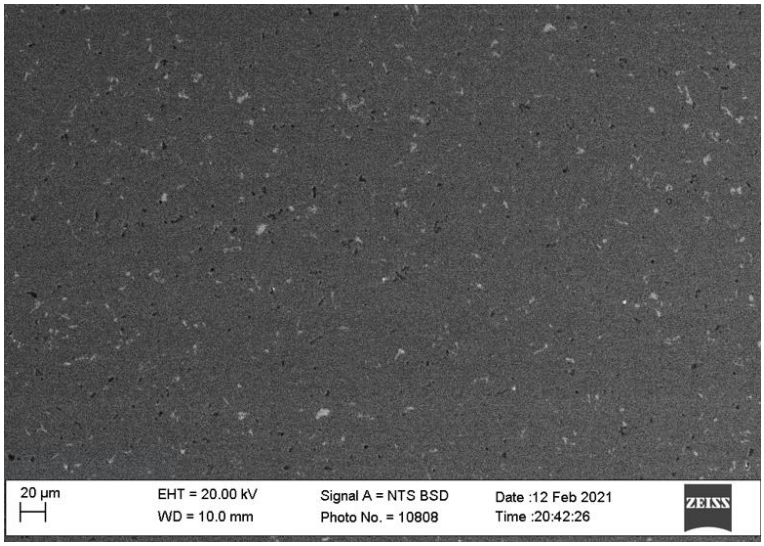
AA7075 ve AA7075Zr alaşımı numunelerinin ECAP işlemi öncesi ve sonrası SEM Görüntüleri Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma, Geliştirme ve Uygulama Merkezi (TÜTAGEM) laboratuvarında bulunan Zeiss EVO LS 10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmıştır. Görüntüler ikincil ve geriye doğru dağılmış elektron ile elde edilmiştir. Bileşenleri ortaya çıkarmak için alaşımlar 10 saniye boyunca Dix-Keller reaktifi ile dağlanmıştır.



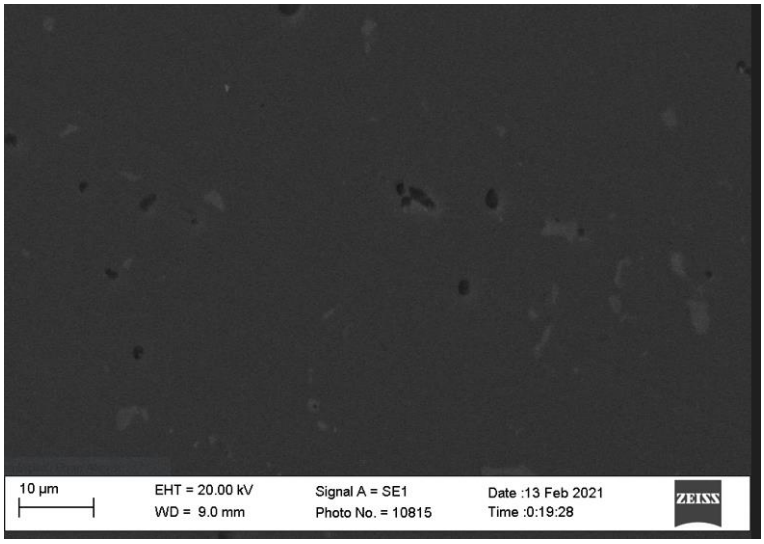

Şekil 3.8. 600 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



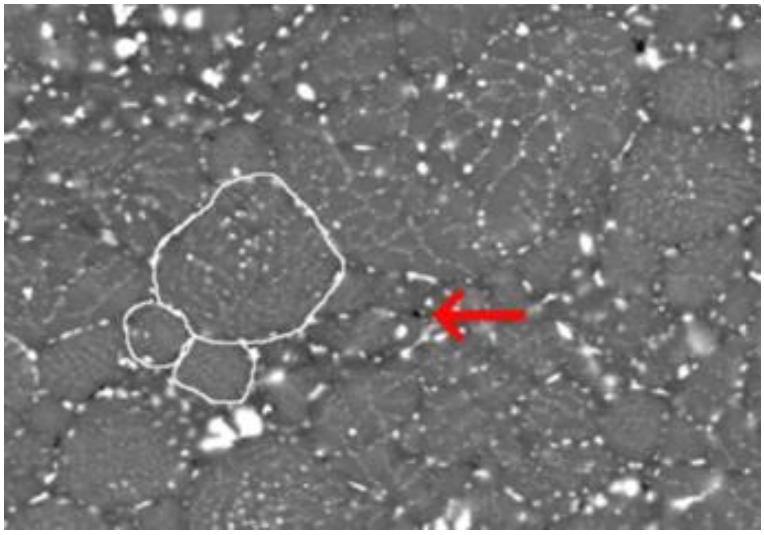

Şekil 3.9. 600 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



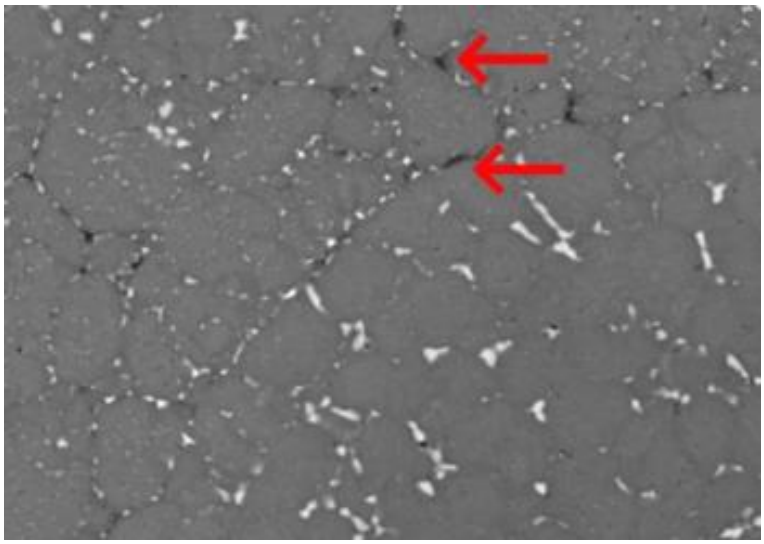

Şekil 3.10. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



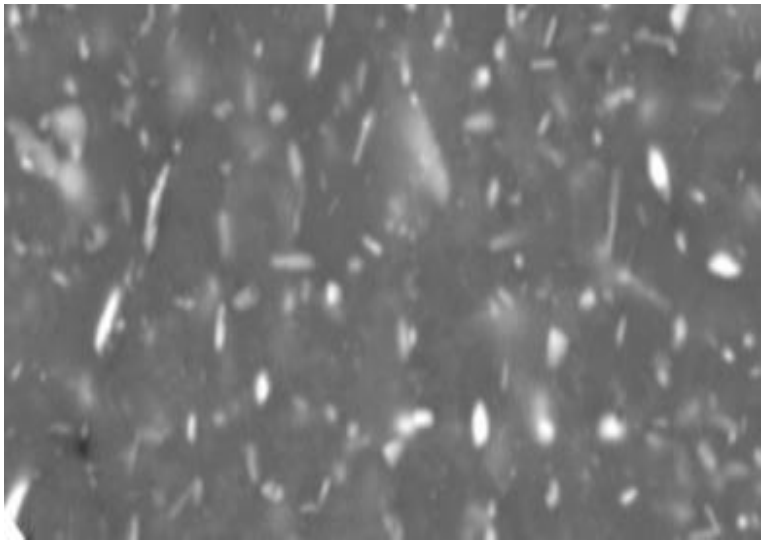

Şekil 3.11. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



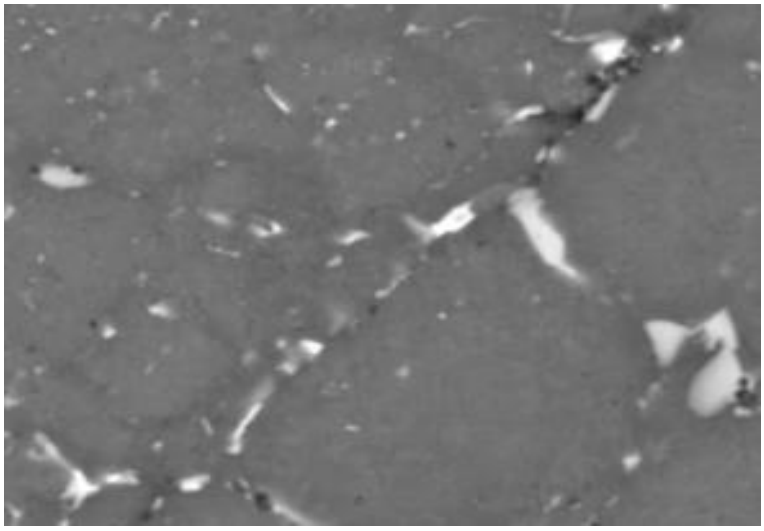
Şekil 3.12. 600 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



Şekil 3.13. 600 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1Zr), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



Şekil 3.14. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2Zr), Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.



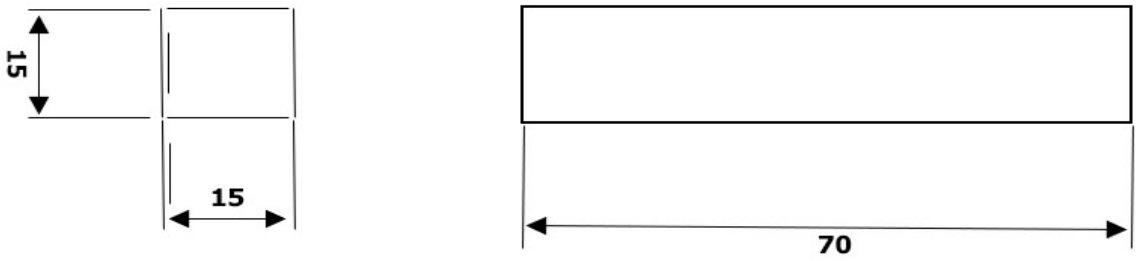
Şekil 3.15. 700 ºC sıcaklık 750 MPa basınç uygulanarak sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2Zr), deforme işlemi sonrası Dix-Keller reaktifi ile dağlanıp çekilen SEM görüntüsü.

### 3.4. Numunelerin Sertlik Deneyleri

Sertlik, bir malzemenin sürtünmeye, aşınmaya, çizilmeye ya da deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır. Sabit bir kuvvet ile malzeme üzerinde deformasyona neden olan statik sertlik ölçme yöntemlerinin birbirine benzer sonuçlar vermesi, numuneyi daha az tahrip etmesi ve test süresinin kısa olması nedeniyle tercih edilirler (Aydemir, 2009). Bir diğer tercih sebebi ise, malzemenin sertlik değeri ile

diğer mekanik ve fiziksel özellikleri arasında paralel bir ilişki olmasıdır. Örneğin metalik malzemelerin, çekme mukavemetleri ile sertlik değerleri arasında doğru orantılı bir bağ bulunmaktadır. Böylelikle, sertlik deneyleri neticesinde malzemelerin mukavemetleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu yöntemler statik sertlik ölçme yöntemleri olarak adlandırılırken, sertlik değerini etkileyen faktörler de test cihazı, batıcı uç ve yükleme koşulları olarak sıralanabilir. Çok farklı sertlik ölçme yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları; Rockwell, Brinell, Vickers, Meyer, Berkovich, Aletli iz deneyi (martens sertliği), Knoop sertlik ölçme yöntemleridir.

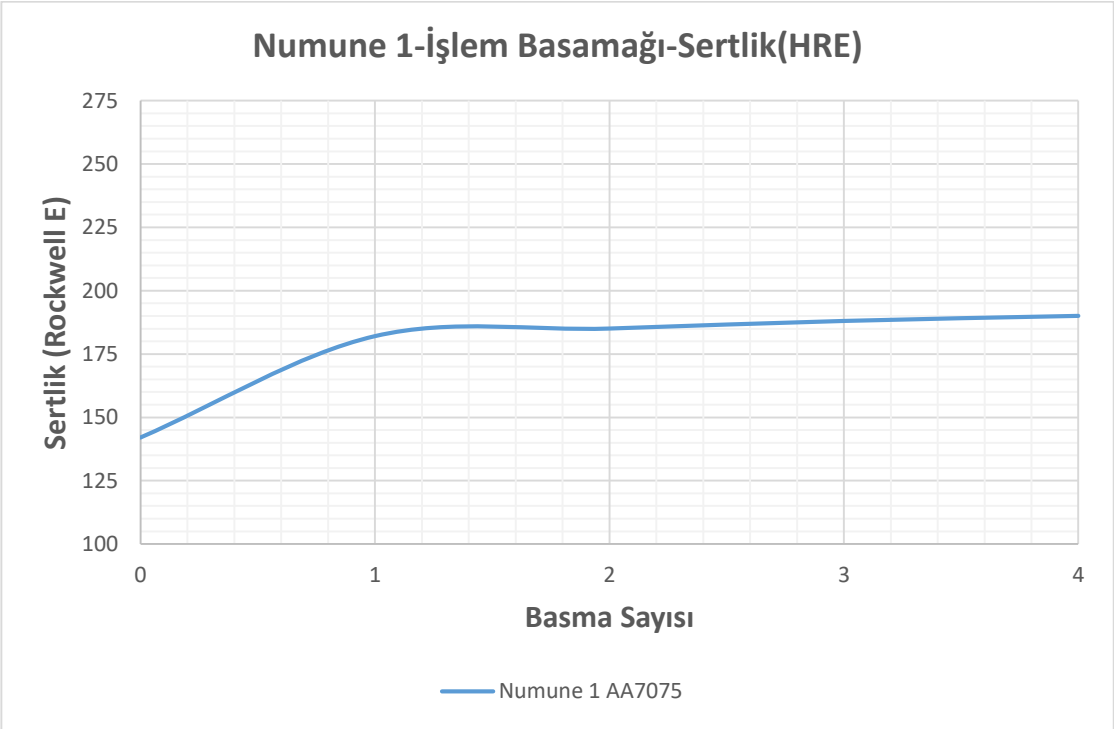
Sertlik deneyleri metallerin sertlik ölçümünde en yaygın kullanılan Rockwell (HRE) usulüne uygun olarak gerçekleştirilmiştir. HRE sertlik skalası; 3,2 mm (1/8inç) bilyalı bir batıcı uç ile 100 kg'lık yük altında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası her bir işlem basamağında ölçümler yapılmıştır. Sertlik deneylerinde toplam 20 adet deney numunesi kullanılmıştır.




Şekil 3.16. Deney Numunesi

Çizelge 3.4. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) sertlik deneyleri sonuçları.

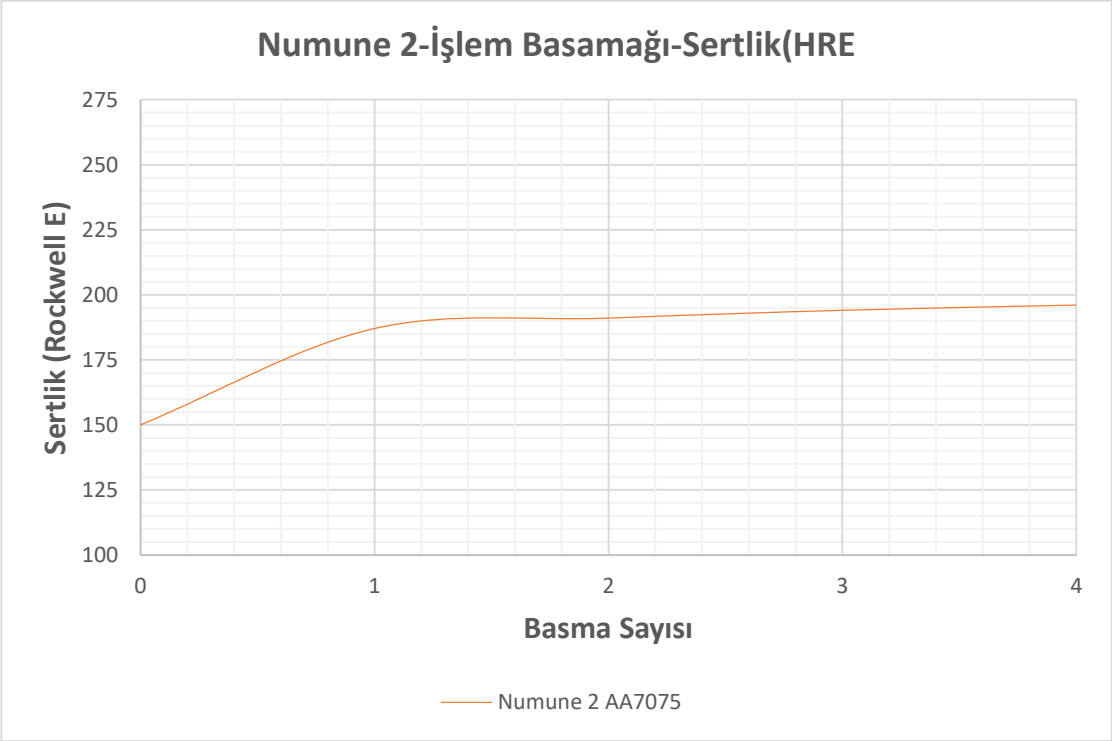
| **Aşırı Plastik Deformasyon İşlem Basamağı** | **Ölçülen Sertlik Değeri Rockwell E (HRE)** |
|---|---|
| **İşlenmemiş Numune 1** | 142 |
| **Birinci Basma-Numune 1** | 182 |
| **İkinci Basma-Numune 1** | 185 |
| **Üçüncü Basma-Numune 1** | 188 |
| **Dördüncü Basma-Numune 1** | 190 |




Şekil 3.17. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) basma sayısı-sertlik grafiği.

Çizelge 3.5. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) sertlik deneyleri sonuçları.

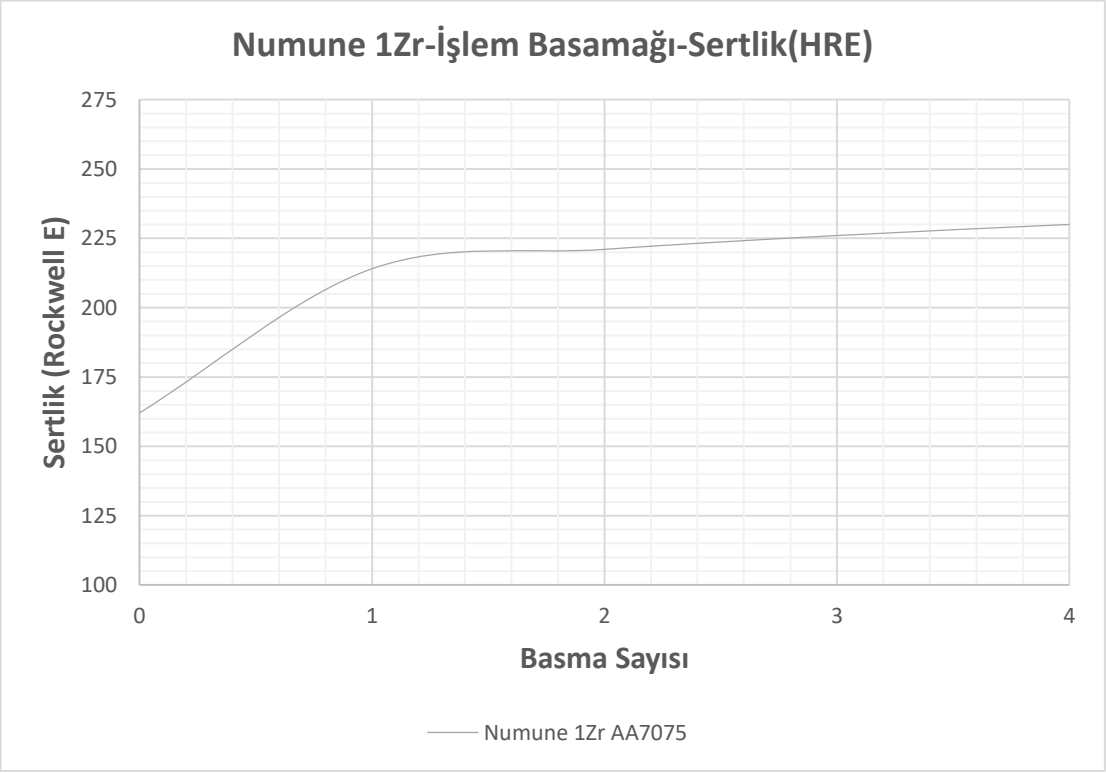
| **Aşırı Plastik Deformasyon İşlem Basamağı** | **Ölçülen Sertlik Değeri Rockwell E (HRE)** |
|---|---|
| **İşlenmemiş Numune 2** | 150 |
| **Birinci Basma-Numune 2** | 187 |
| **İkinci Basma-Numune 2** | 191 |
| **Üçüncü Basma-Numune 2** | 194 |
| **Dördüncü Basma-Numune 2** | 196 |




Şekil 3.18. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune-2) alaşımının basma sayısı-sertlik grafiği.

Çizelge 3.6. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının sertlik deneyleri sonuçları.

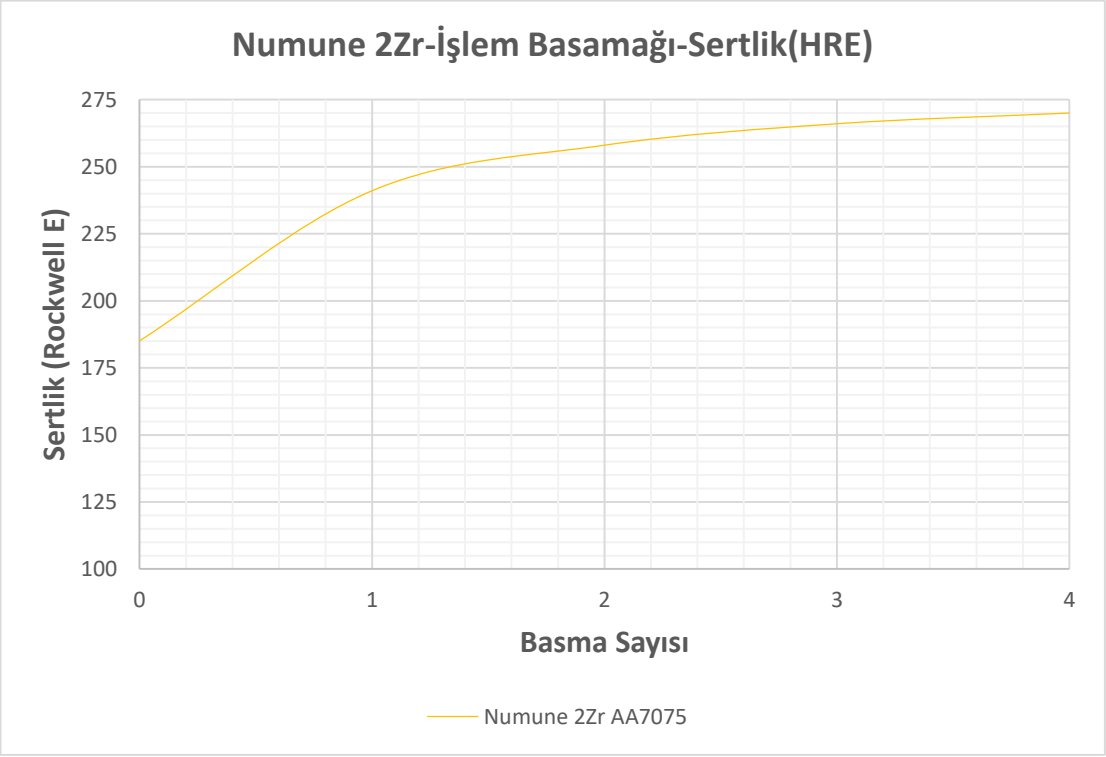
| **Aşırı Plastik Deformasyon İşlem Basamağı** | **Ölçülen Sertlik Değeri Rockwell E (HRE)** |
|---|---|
| **İşlenmemiş Numune 1Zr** | 162 |
| **Birinci Basma-Numune 1Zr** | 214 |
| **İkinci Basma-Numune 1Zr** | 221 |
| **Üçüncü Basma-Numune 1Zr** | 226 |
| **Dördüncü Basma-Numune 1Zr** | 230 |



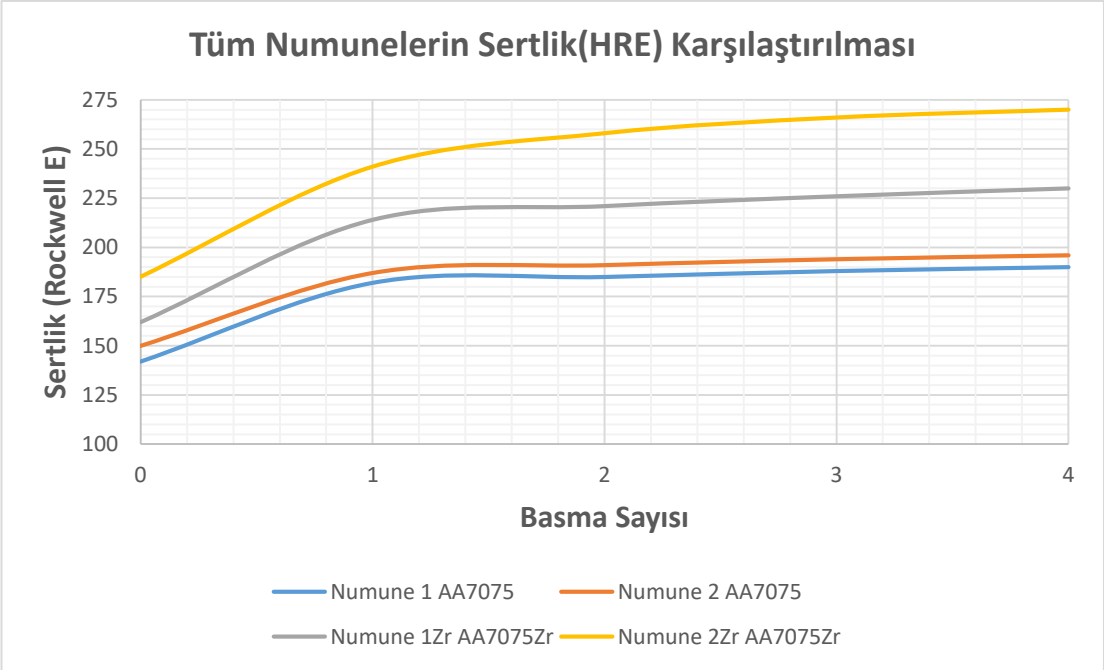

Şekil 3.19. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının basma sayısı-sertlik grafiği.

Çizelge 3.7. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının sertlik deneyleri sonuçları.

| **Aşırı Plastik Deformasyon İşlem Basamağı** | **Ölçülen Sertlik Değeri Rockwell E (HRE)** |
|---|---|
| **İşlenmemiş Numune 2Zr** | 185 |
| **Birinci Basma-Numune 2Zr** | 241 |
| **İkinci Basma-Numune 2Zr** | 258 |
| **Üçüncü Basma-Numune 2Zr** | 266 |
| **Dördüncü Basma-Numune 2Zr** | 270 |




Şekil 3.20. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile AA7075Zr (numune-2Zr) alaşımının basma sayısı-sertlik grafiği.




Şekil 3.21. Deformasyona uğrayan ve uğramayan AA7075 alaşımlarının ve AA7075Zr alaşımlarının basma sayısı-sertlik grafiği.

### 3.4.1. Sertlik Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi

Malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç sertlik olarak adlandırılmaktadır. 600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre sinterleme ile üretilmiş AA7075 alaşımının ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının sertlik analizleri hem aşırı plastik deformasyon öncesi ve hem de dört basamak aşırı plastik deformasyon uygulandıktan sonra her bir basma için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Rockwell (HRE) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.4'den de anlaşılacağı üzere sertlik değerleri artan deformasyon basamakları ile artmaktadır. 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) 142 HRE olarak ölçülen sertlik değeri birinci basamak deformasyon sonrası % 28,17 artış göstererek 182 HRE olarak ölçülmüştür. İkinci basamak plastik deformasyon işlemi sonrasında sertlik birinci basamak deformasyon işlemine göre % 1,65 oranında artarak 185 HRE olarak ölçülmüştür. Üçüncü basamak deformasyon işleminde artış ikinci basamak deformasyon işlemine göre % 1,62 oranında artarak 188 HRE olarak ölçülmüştür. Dördüncü basamak deformasyon işleminden sonra sertlik üçüncü basamak plastik deformasyon işlemine göre % 1.05 oranında artarak 190 HRE olarak ölçülmüştür. Dört basamak plastik deformasyon

işleminden sonra iş parçasının sertliğinin % 33,80 oranında arttığı hesaplanmıştır. Deformasyon basamakları artışı ile sertlik değerlerinin azalan oranlarda artış göstermesi, üçüncü ve dördüncü basamaktaki sertlik değişiminin % 1 civarında olması nedeni ile işlem basamağı dört ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 3.5'ten de anlaşılacağı üzere sertlik değerleri artan deformasyon basamakları ile artış göstermiştir. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) 150 HRE olarak ölçülen sertlik değeri birinci basamak deformasyon sonrası % 24,67 artış göstererek 187 HRE olarak ölçülmüştür. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında sertlik birinci basamak deformasyon işlemine göre % 2,14 oranında artarak 191 HRE olarak ölçülmüştür. Üçüncü basamak deformasyon işleminde artış ikinci basamak deformasyon işlemine göre % 1,57 oranında artarak 194 HRE olarak ölçülmüştür. Dördüncü basamak deformasyon işleminden sonra sertlik üçüncü basamak deformasyon işlemine göre % 1,03 oranında artarak 196 HRE olarak ölçülmüştür. Dört basamak plastik deformasyon işleminden sonra iş parçasının sertliğinin % 29,33 oranında arttığı hesaplanmıştır. Deformasyon basamakları artışı ile sertlik değerlerinin azalan oranlarda artış göstermiş ve işlem basamağı dört ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 3.6'dan da anlaşılacağı üzere sertlik değerleri artan deformasyon basamakları ile artış göstermiştir. 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) 162 HRE olarak ölçülen sertlik değeri birinci basamak deformasyon sonrası % 32,10 artış göstererek 214 HRE olarak ölçülmüştür. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında sertlik, birinci basamak deformasyon işlemine göre % 3,17 oranında artarak 221 HRE olarak ölçülmüştür. Üçüncü basamak deformasyon işleminde artış, ikinci basamak deformasyon işlemine göre % 2,26 oranında artarak 226 HRE olarak ölçülmüştür. Dördüncü basamak plastik deformasyon işleminden sonra sertlik üçüncü basamak deformasyon işlemine göre % 1.77 oranında artarak 230 HRE olarak ölçülmüştür. Dört basamak deformasyon işleminden sonra iş parçasının sertliğinin % 41,98 oranında arttığı hesaplanmıştır. Deformasyon basamakları artışı ile sertlik değerlerinin azalan oranlarda artış göstermesi nedeni ile işlem basamağı dört ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 3.7'den de anlaşılacağı üzere sertlik değerleri artan deformasyon basamakları ile artış göstermiştir. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) 185 HRE olarak ölçülen sertlik değeri birinci basamak deformasyon sonrası % 30,27 artış göstererek 241 HRE olarak ölçülmüştür. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında sertlik birinci basamak deformasyon işlemine göre % 7,05 oranında artarak 258 HRE olarak ölçülmüştür. Üçüncü basamak plastik deformasyon işleminde artış ikinci basamak deformasyon işlemine göre % 3,10 oranında artarak 266 HRE olarak ölçülmüştür. Dördüncü basamak deformasyon işleminden sonra sertlik, üçüncü basamak deformasyon işlemine göre % 1,50 oranında artarak 270 HRE olarak ölçülmüştür. Dört basamak deformasyon işleminden sonra iş parçasının sertliğinin % 45,95 oranında arttığı ölçülmüştür. Deformasyon basamakları artışı ile sertlik değerlerinin azalan oranlarda artış göstermesi nedeni ile işlem basamağı dört ile sınırlandırılmıştır.

## 3.5. Numunelerin Çekme Deneyleri

Çekme deneylerinin amacı bir malzemenin mekanik özelliğini belirleyerek, gösterdiği mekanik davranışlarına göre sınıflandırmasını yapmaktadır. (Şen & Kurgan, 2015). Malzemelerin başlıca mekanik özellikleri ile ilgili bilgi vermesi nedeniyle; bazı mühendislik uygulamaları için malzeme seçiminin yapılmasında, malzemelerin istenilen kalite standardının olup olmadığının kontrol edilmesinde, yeni malzeme ve süreçlerin geliştirilmesinde, farklı malzemelerin karşılaştırılmasında ve servis şartlarında malzeme davranışlarının saptanmasında geniş ölçekte kullanılmaktadır. Bu bağlamda, malzemelerin akma, çekme ve kopma dayanımları, uzama değerleri ve elastiklik modülü gibi pek çok mekanik davranışları çekme deneyleri sonucunda elde edilmektedir (Aydemir, 2015).

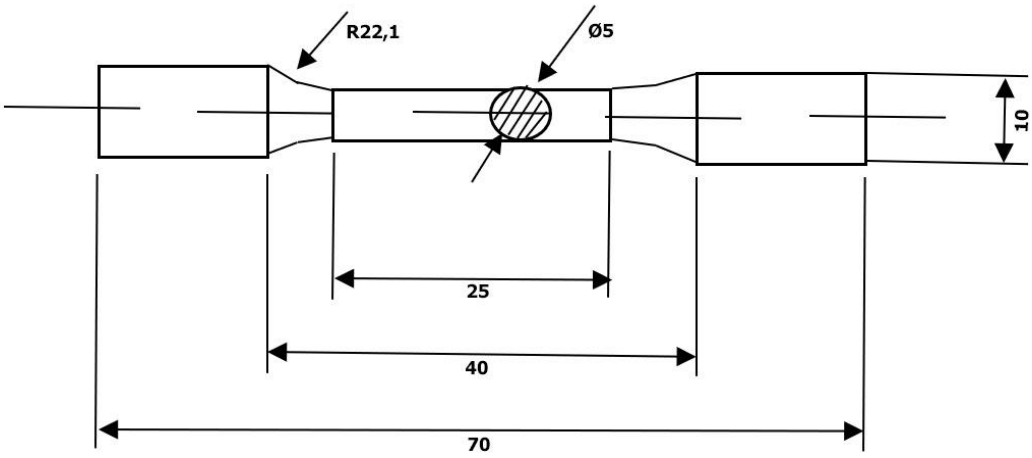
Çekme deneyi yapılarak saptanan mekanik özellikleri üç şekilde sınıflandırmak gerekirse; bunlar, mukavemete bağlı olanlar, sünekliğe bağlı olanlar ve hem mukavemet hem de sünekliğe bağlı olanlar şeklinde yapılabilir.

Deney şartlarının çekme deneyi sonuçlarına etkisi üç başlık altında değerlendirilebilir:

- Sıcaklık: Sıcaklık artırıldığında malzeme mukavemeti düşerken, süneklik artar. Sıcaklığın düşürülmesi ise mukavemet ve kırılganlığı artırmaktadır.
- Deformasyon hızı**:** Numuneye uygulanan deformasyonun (birim şekil değişiminin) hızı, gerinim değerlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Cihazın çekme hızı ve numunenin ölçü uzunluğuna bağlı bir değerdir.
- Numune yönünün etkisi: Haddelenmiş yassı metalik malzemeler veya dövülmüş malzemeler ile hazırlanan numunelerde, numunenin alındığı yön, çekme deneyi sonuçlarını etkilemektedir.

Tezin bu bölümünde deformasyon öncesi ve dört deformasyon basamağı sonrası elde edilen deney numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çekme testleri, çekme kapasitesi 600 kN olan ALŞA çekme cihazında 5 mm/dk çene ayırma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri için 600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre sinterleme ile üretilmiş AA7075 alaşımının ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının analizleri yapılmıştır. Numuneler CNC dikey işleme merkezinde talaş kaldırma ile işlenmiştir. Talaş kaldırmanın kaba paso işlemleri parmak freze ile hassas işlemesi kalıpçı frezesi ile yapılmıştır. İşlem sırasında soğutma için yarı sentetik kesme sıvısı kullanılmıştır. Çekme deneylerinin tamamı art arda 22-24 $^{o}$C sıcaklık aralıklarında yapılmıştır. Çekme deneylerinde deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası her bir işlem basamağında ölçümler yapılmıştır. Çekme deneylerinde toplam 20 adet deney numunesi kullanılmıştır.

Numunelerin hazırlanması aşamasında TSE ISO EN 6892-1 standartlarına uyulmuştur. Deformasyon işleminden kalan tüm çapaklar temizlenmiş ve tüm diğer olumsuzluklar ortadan kaldırılmıştır.



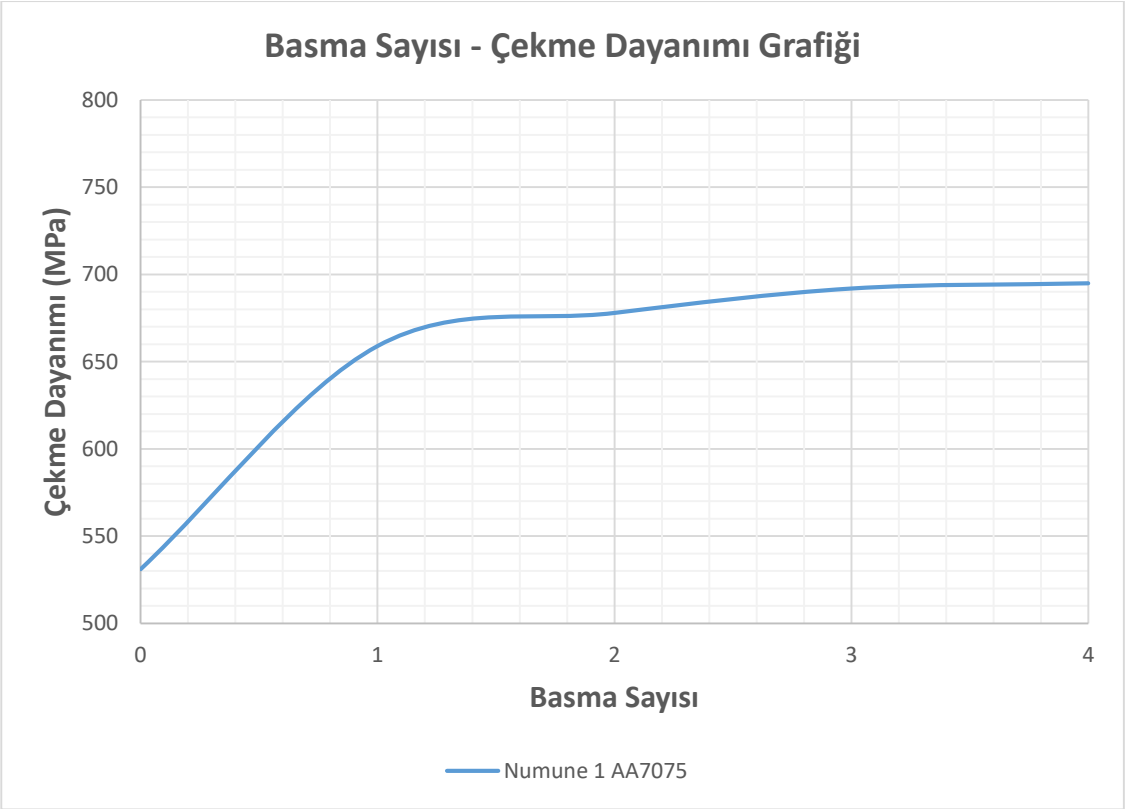

Şekil 3.22. Çekme Deneyi Numunesi

Çizelge 3.8. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının çekme deneyi parametreleri.

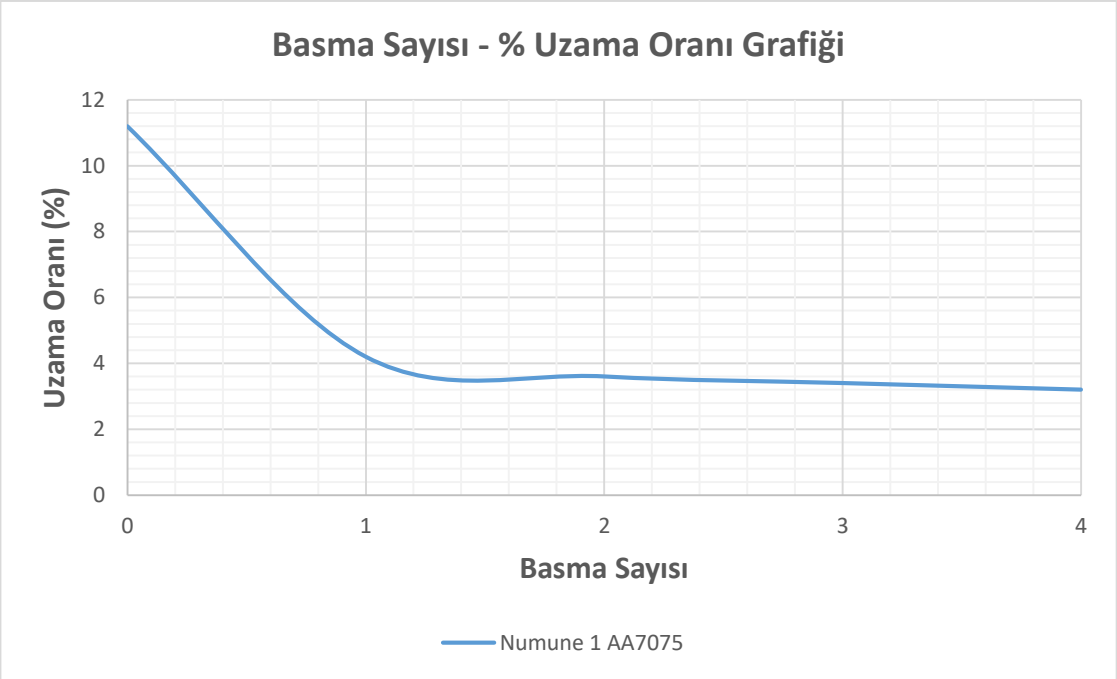
| **Numune ve Basma** | **$d_0$ ($\phi$) (mm)** | **$L_0$(mm)** |
|---|---|---|
| **Deformasyon uygulanmamış AA7075 (numune 1)** | 5 | 25 |
| **Numune 1- Birinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 1-İkinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 1-Üçüncü Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 1-Dördüncü Basma** | 5 | 25 |

Çizelge 3.9. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının çekme deneyi sonuçları.

| Numune No | Fmax. (N) | $A_0$ ($mm^2$) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | $L_k$ (mm) | $\Delta L$ ($L_k$-$L_0$) (mm) | Kopma Uzaması (% ε) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **AA7075 (Numune 1)** | 10.423 | 19,625 | 531,11 | 27,80 | 2,80 | 11,2 |
| **Numune 1 Birinci Basma** | 12.929 | 19,625 | 658,80 | 26,05 | 1,05 | 4,2 |
| **Numune 1 İkinci Basma** | 13.308 | 19,625 | 678,11 | 25,90 | 0,90 | 3,6 |
| **Numune 1 Üçüncü Basma** | 13.574 | 19,625 | 691,67 | 25,85 | 0,85 | 3,4 |
| **Numune 1 Dördüncü Basma** | 13.645 | 19,625 | 695,29 | 25,80 | 0,80 | 3,2 |




Şekil 3.23. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının basma sayısı - çekme dayanımı grafiği.



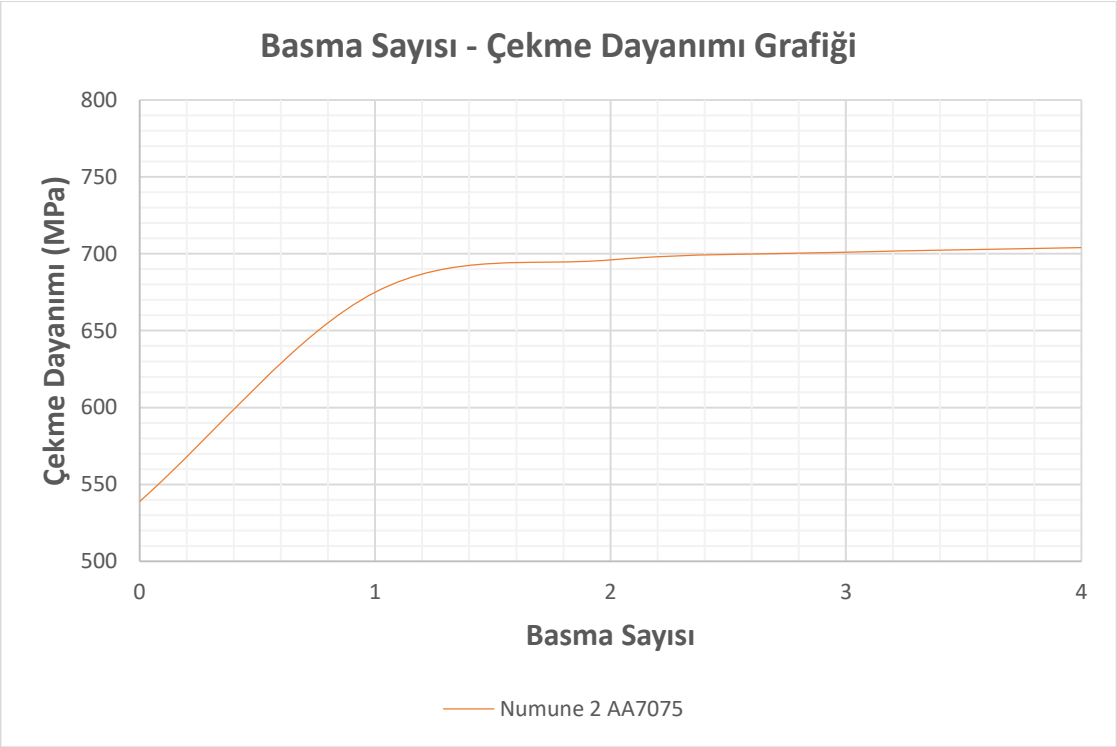

Şekil 3.24. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı.

Çizelge 3.10. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının çekme deneyi parametreleri.

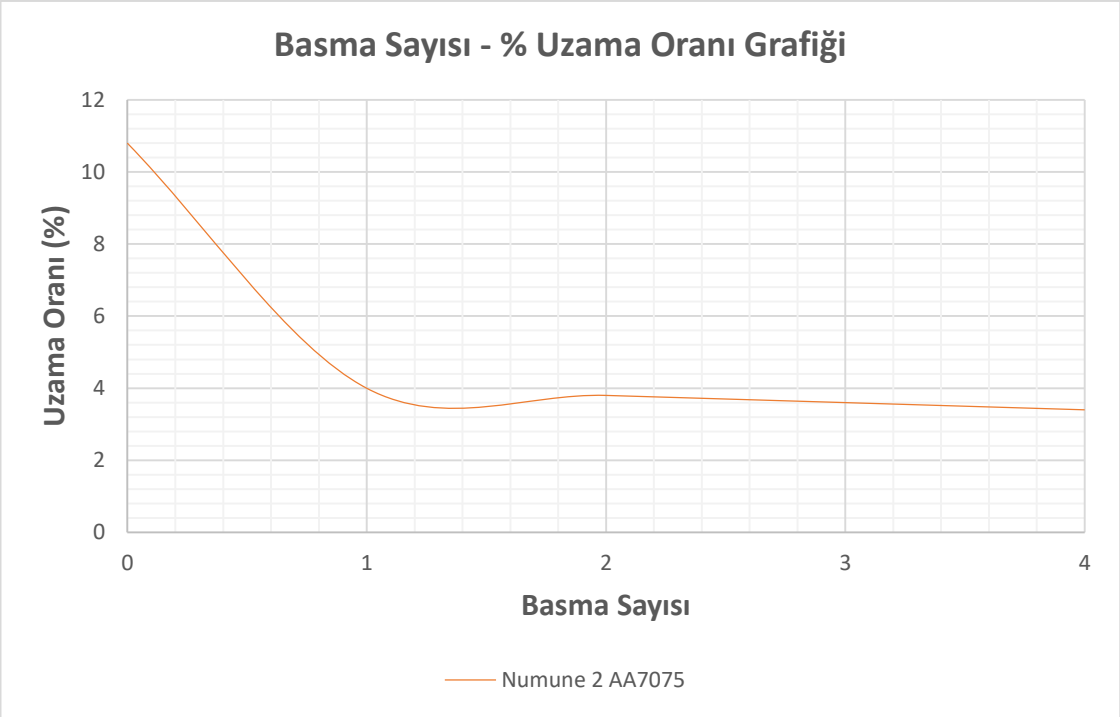
| **Numune ve Basma** | **$d_0$ ($\phi$) (mm)** | **$L_0$(mm)** |
|---|---|---|
| **Deformasyon uygulanmamış AA7075 (Numune 2)** | 5 | 25 |
| **Numune 2- Birinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 2-İkinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 2-Üçüncü Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 2-Dörtüncü** | 5 | 25 |

Çizelge 3.11. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının çekme deneyi sonuçları.

| Numune No | Fmax. (N) | $A_0$ ($mm^2$) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | $L_k$ (mm) | $\Delta L$ ($L_k$-$L_0$) (mm) | Kopma Uzaması (% ε) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **AA7075 Numune 2** | 10.581 | 19,625 | 539,16 | 27,70 | 2,70 | 10,8 |
| **Numune 2 Birinci Basma** | 13.255 | 19,625 | 675,41 | 26,00 | 1,00 | 4,0 |
| **Numune 2 İkinci Basma** | 13.658 | 19,625 | 695,95 | 26,00 | 0,95 | 3,8 |
| **Numune 2 Üçüncü Basma** | 13.758 | 19,625 | 701,04 | 25,90 | 0,90 | 3,6 |
| **Numune 2 Dördüncü Basma** | 13.810 | 19,625 | 703,69 | 25,85 | 0,85 | 3,4 |




Şekil 3.25. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının basma sayısı - çekme dayanımı grafiği.



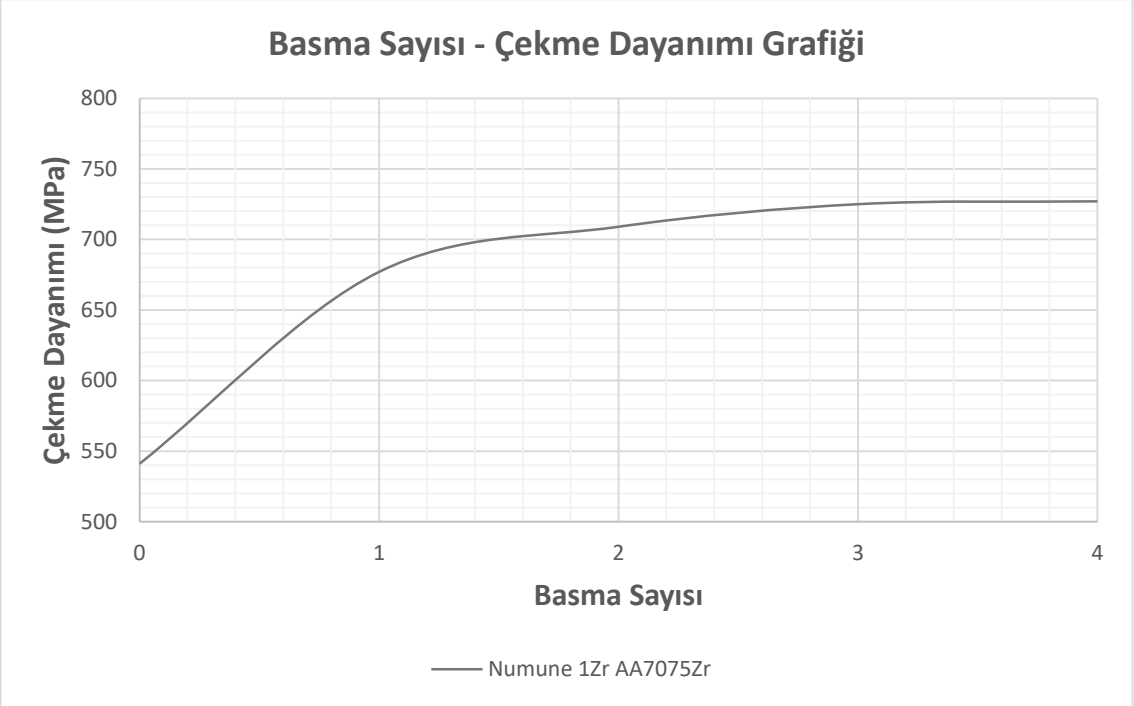

Şekil 3.26. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı.

Çizelge 3.12. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının çekme deneyi parametreleri.

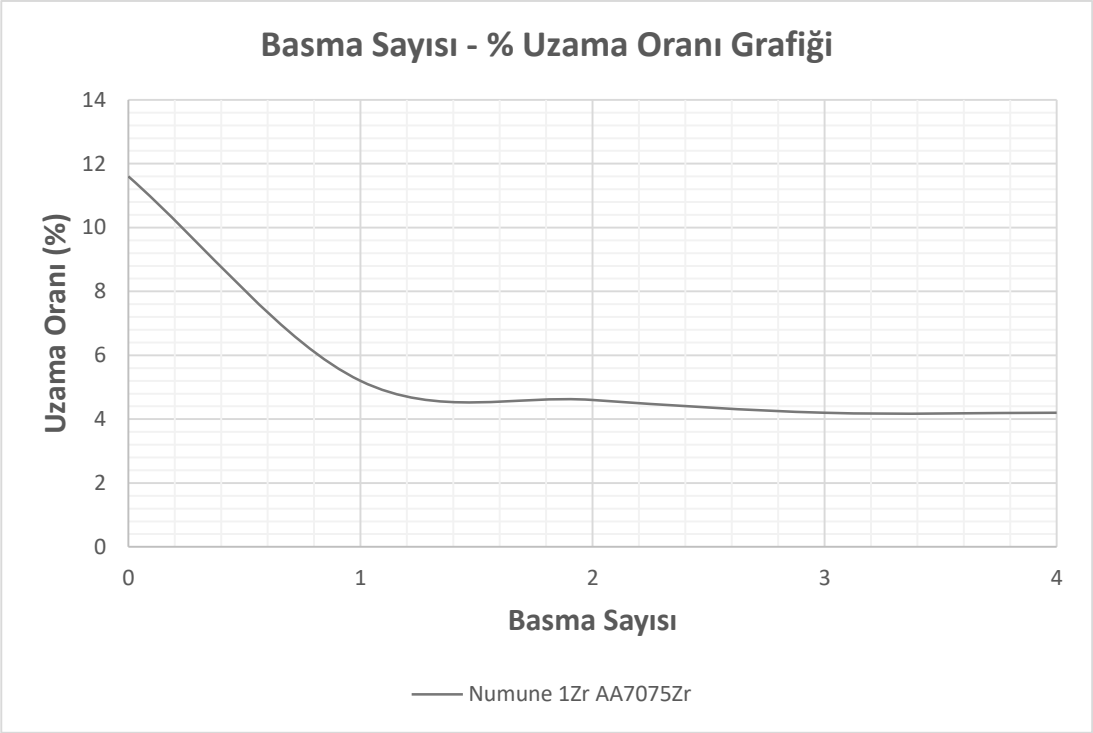
| **Numune ve Basma** | **$d_0$ ($\phi$) (mm)** | **$L_0$ (mm)** |
|---|---|---|
| **Deformasyon uygulanmamış AA7075Zr (numune 1Zr)** | 5 | 25 |
| **Numune 1Zr- Birinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 1Zr-İkinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 1Zr-Üçüncü Basma** | 5 | 25 |
| **Numune1Zr -Dördüncü Basma** | 5 | 25 |

Çizelge 3.13. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının çekme deneyi sonuçları.

| Numune No | Fmax. (N) | $A_0$ ($mm^2$) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | $L_k$ (mm) | $\Delta L$ ($L_k$-$L_0$) (mm) | Kopma Uzaması (% ε) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **AA7075Zr Numune 1Zr** | 10.623 | 19,625 | 541,30 | 28,00 | 2,90 | 11,60 |
| **Numune 1Zr Birinci Basma** | 13.293 | 19,625 | 677,35 | 26,30 | 1,30 | 5,2 |
| **Numune 1Zr İkinci Basma** | 13.912 | 19,625 | 708,89 | 26,15 | 1,15 | 4,6 |
| **Numune 1Zr Üçüncü Basma** | 14.232 | 19,625 | 725,20 | 26,05 | 1,05 | 4,2 |
| **Numune 1Zr Dördüncü Basma** | 14.275 | 19,625 | 727,39 | 26,05 | 1,05 | 4,2 |




Şekil 3.27. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının basma sayısı - çekme dayanımı grafiği.



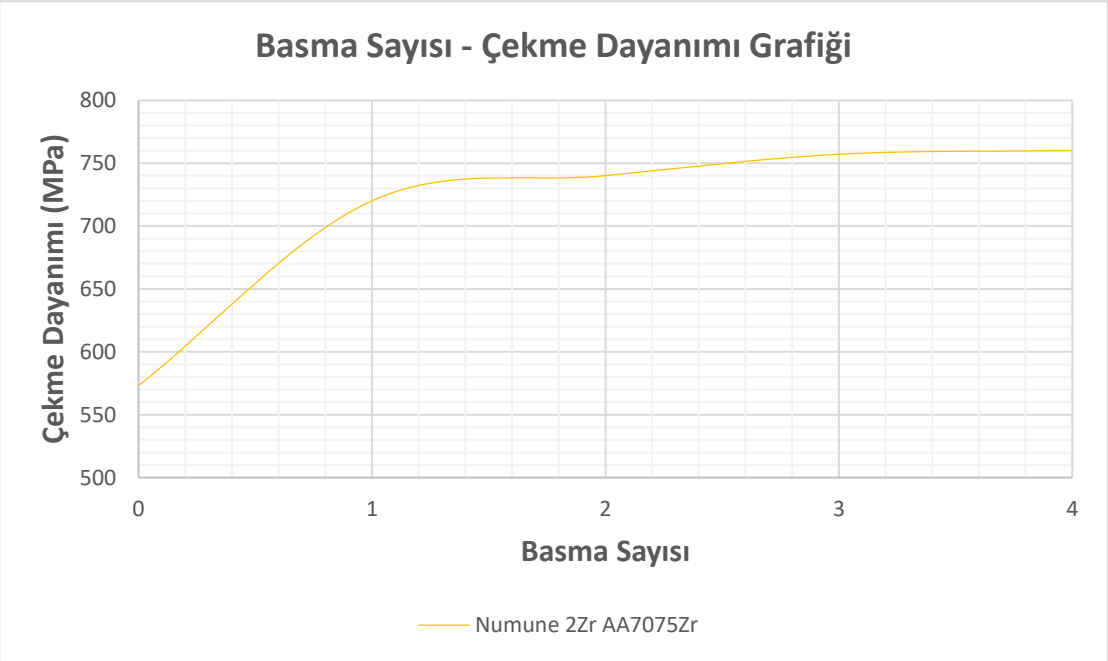

Şekil 3.28. 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı.

Çizelge 3.14. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının çekme deneyi parametreleri.

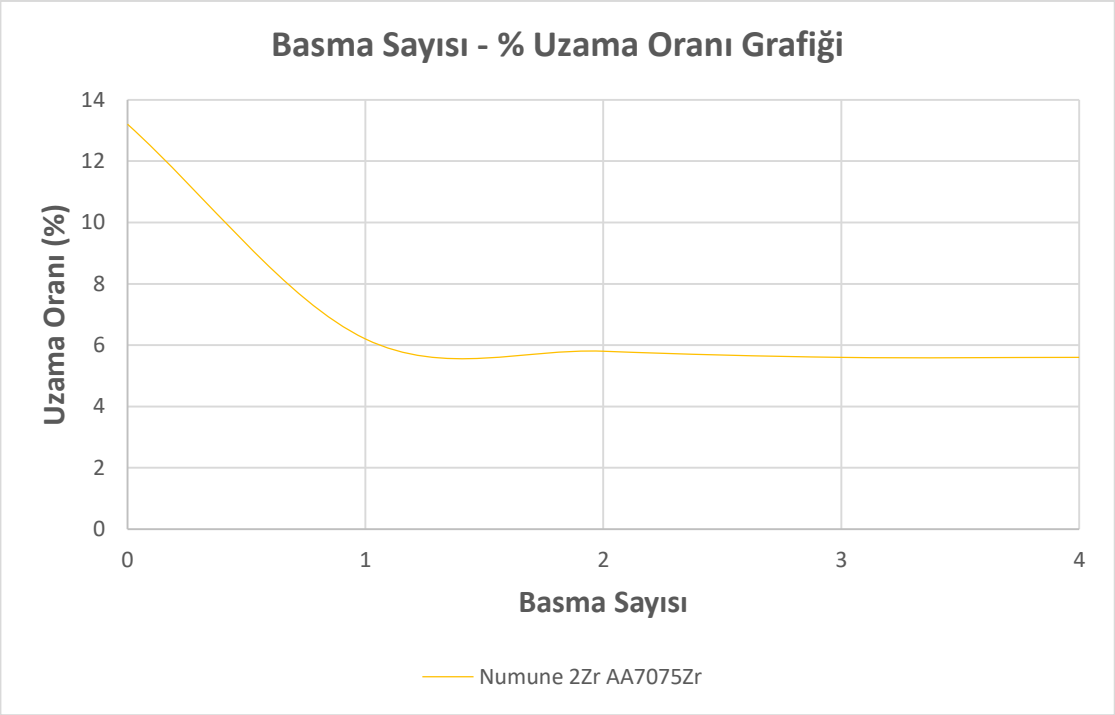
| **Numune ve Basma** | **$d_0$ ($\phi$) (mm)** | **$L_0$ (mm)** |
|---|---|---|
| **Deformasyon uygulanmamış AA7075Zr (numune 2Zr)** | 5 | 25 |
| **Numune 2Z- Birinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 2Zr-İkinci Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 2Zr-Üçüncü Basma** | 5 | 25 |
| **Numune 2Zr-Dördüncü Basma** | 5 | 25 |

Çizelge 3.15. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının çekme deneyi sonuçları.

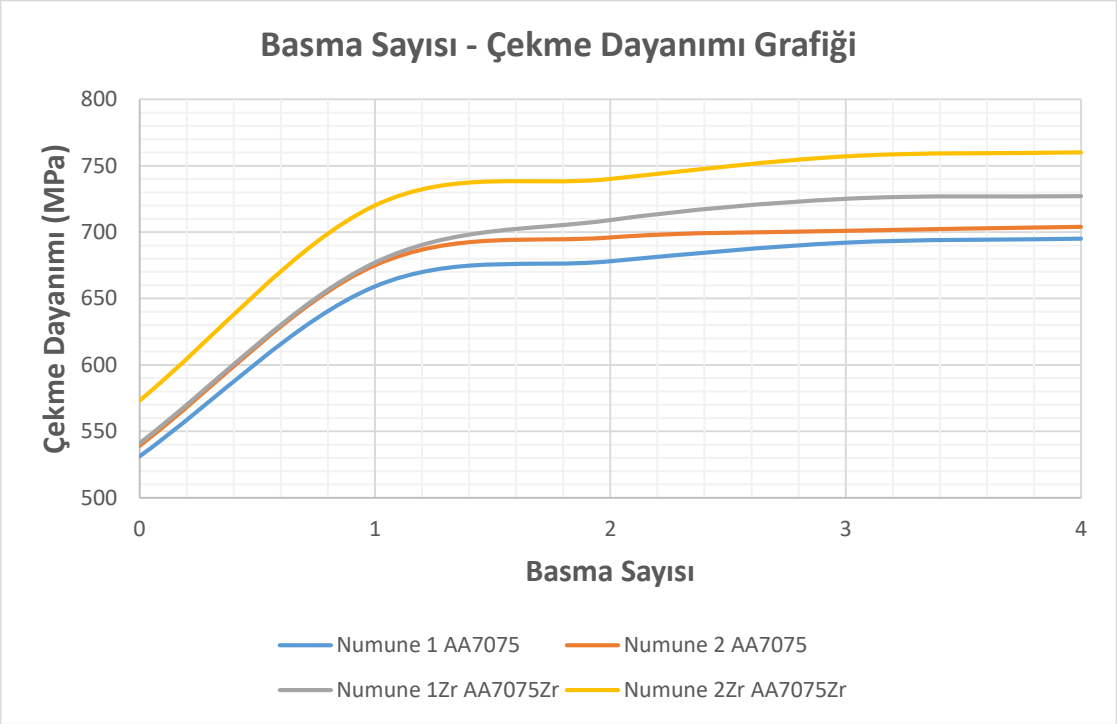
| Numune No | Fmax. (N) | $A_0$ ($mm^2$) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | $L_k$ (mm) | $\Delta L$ ($L_k$-$L_0$) (mm) | Kopma Uzaması (% ε) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **AA7075Zr Numune 2Zr** | 11.241 | 19,625 | 572,80 | 28,30 | 3,30 | 13,2 |
| **Numune 2Zr Birinci Basma** | 14.126 | 19,625 | 719,80 | 26,75 | 1,55 | 6,2 |
| **Numune 2Zr İkinci Basma** | 14.523 | 19,625 | 740,03 | 26,15 | 1,15 | 5,8 |
| **Numune 2Zr Üçüncü Basma** | 14.856 | 19,625 | 756,99 | 26,10 | 1,10 | 5,6 |
| **Numune 2Zr Dördüncü Basma** | 14.923 | 19,625 | 760,41 | 26,10 | 1,10 | 5,6 |



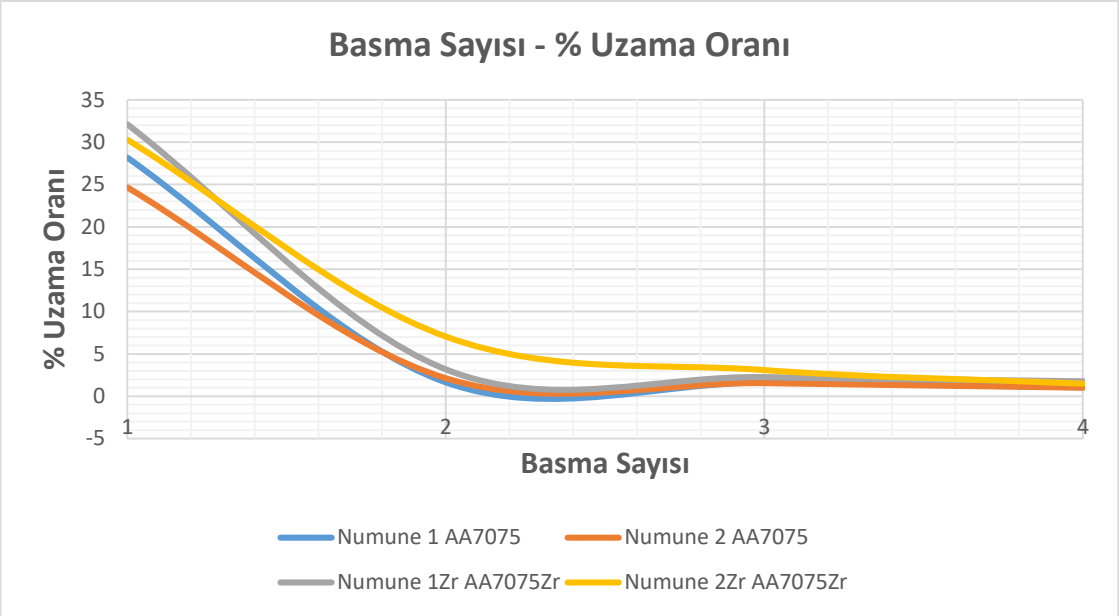

Şekil 3.29. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının basma sayısı çekme dayanımı grafiği.




Şekil 3.30. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr (numune 2) alaşımının basma sayısı - % uzama oranı.




Şekil 3.31. Aşırı plastik deformasyon uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin basma sayısı - çekme dayanımları.




Şekil 3.32. Aşırı plastik deformasyon uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin basma sayısı - % uzama oranı.

### 3.5.1. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneylerinde 600 ºC ile 700 ºC sıcaklıklarda ve 750 MPa basınçta 4 saat süre sinterleme ile üretilen AA7075 alaşımına ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımına ait kullanılan parametreler ve elde edilen sonuçlarla ilgili çizelge ve şekiller Bölüm 3.5'te yer almaktadır.

Sertlik deneyinde olduğu gibi çekme deneyinde de numunelere dört basamak deformasyon işlemi uygulanmıştır. Numunelerin çekme sonuçlarının değerlendirilebilmesi için numunelerin maksimum çekme dayanımı ölçülmüş ve % kopma uzama değerleri hesaplanmıştır.

600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 531,11 MPa ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 11,20 olarak hesaplanmıştır. Birinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 658,80 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 4,2 olarak hesaplanmıştır. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine

bağlı olarak 678,11 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 3,6 olarak hesaplanmıştır. Üçüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 691,67 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 3,4 olarak hesaplanmıştır. Dördüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 695,29 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 3,2 olarak hesaplanmıştır. Her deformasyon basamağından sonra AA7075 alaşımının ölçülen çekme dayanımı artarken hesaplanan % kopma uzaması da azalmakta, böylelikle numunenin mukavemeti ile beraber gevrekliği de artmaktadır.

700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 539,16 MPa ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 10,80 olarak hesaplanmıştır. Birinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 675,41 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 4,0 olarak hesaplanmıştır. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 695,95 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 3,8 olarak hesaplanmıştır. Üçüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 701,04 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 3,6 olarak hesaplanmıştır. Dördüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075 alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 703,69 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 3,4 olarak hesaplanmıştır. Her deformasyon basamağından sonra AA7075 alaşımının ölçülen çekme dayanımı artarken hesaplanan % kopma uzaması da azalmakta, böylelikle numunenin mukavemeti ile beraber gevrekliği de artmaktadır.

600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr (numune 1Zr) alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 541,31 MPa ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 11,60 olarak hesaplanmıştır. Birinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 677,35 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 5,2 olarak hesaplanmıştır. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme

dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 708,89 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 4,6 olarak hesaplanmıştır. Üçüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 725,20 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 4,2 olarak hesaplanmıştır. Dördüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 727,39 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 4,2 olarak hesaplanmıştır. Her deformasyon basamağından sonra AA7075 alaşımının ölçülen çekme dayanımı artarken hesaplanan % kopma uzaması da azalmakta, böylelikle numunenin mukavemeti ile beraber gevrekliği de artmaktadır. 600 $^{o}$C sıcaklıkta 4 saat süre ile 750 MPa basınç uygulanarak toz metalurjisi (sinterleme) ile üretilmiş ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının aynı sıcaklık, basınç ve sürelerde sinterlenen AA7075 alaşımına göre maksimum çekme dayanımı %1,92 oranında arttığı hesaplanırken % kopma uzaması da % 3,57 oranında arttığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre Zr ilave edilen AA7075 alaşımının mukavemeti artarken sünekliği de artmıştır.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr (numune 2Zr) alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 572,80 MPa ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 13,20 olarak hesaplanmıştır. Birinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 719,80 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 6,2 olarak hesaplanmıştır. İkinci basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 740,03 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 5,8 olarak hesaplanmıştır. Üçüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 756,99 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 5,6 olarak hesaplanmıştır. Dördüncü basamak deformasyon işlemi sonrasında AA7075Zr alaşımının maksimum çekme dayanımı, maksimum çekme kuvvetine bağlı olarak 760,41 MPa olarak ölçülmüş ve % kopma uzaması da % 5,6 olarak hesaplanmıştır. 700 $^{o}$C sıcaklıkta 4 saat süre ile 750 MPa basınç uygulanarak toz metalurjisi (sinterleme) ile üretilmiş ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının aynı sıcaklık, basınç ve sürelerde sinterlenen AA7075 alaşımına göre maksimum çekme dayanımı % 6,24 oranında arttığı

hesaplanırken % kopma uzaması da % 22,22 oranında arttığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre Zr ilave edilen AA7075 alaşımının mukavemeti artarken sünekliği de artmıştır. Sünekliğin ciddi oranda artması Zr metalinin sünek bir yapıya sahip olması ile açıklanabileceği gibi sinterlemede uygulanan 700 $^{o}$C sıcaklığın AA7075 alaşımının erime sıcaklığının üzerinde bir değer olması ile de açıklanabilmektedir.

### 3.6. Numunelerin Yorulma Deneyleri

İlkeleri 1850'li yıllarda Wöhler tarafından ortaya atılan yorulma olgusu ile malzemelerin tekrarlayan veya değişen gerilmelere maruz kalmaları neticesinde ciddi mekanik kusurların oluşacağı bilinmektedir. Malzemelerdeki mekanik kusurların neredeyse %90'ının yorulmadan kaynaklı kusurların oluşturduğu düşünüldüğünde yorulmanın önemi daha iyi açıklanabilmektedir (Yavuz, 2007). Miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçalar yorulma kopmasına maruz kalan parçalara örnek olarak gösterilebilir.

Malzemelerde yorulma, iki safhada gelişerek kırılmaya yol açar. Bunlar; çatlak oluşması ve mikroskobik ebattaki çatlağın büyüyerek makroskobik boyuta ulaşma aşamalarıdır.

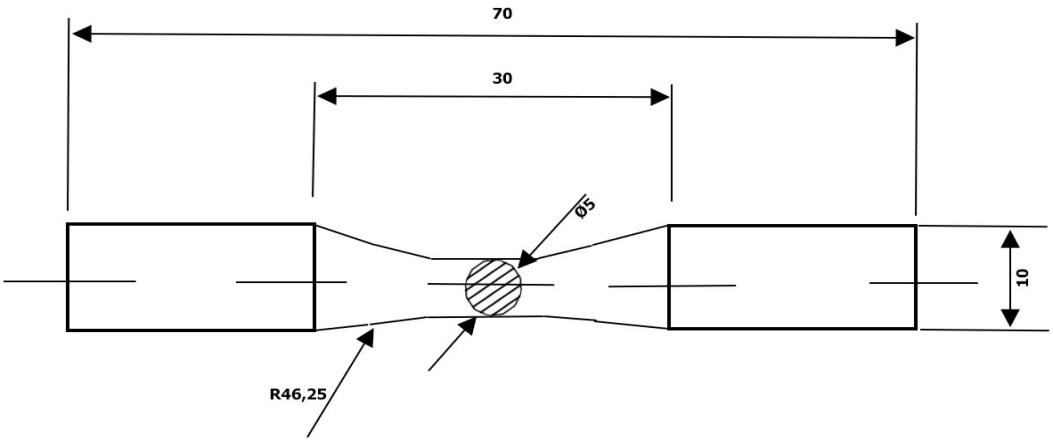
Yorulma kusurları başlıca üç faktörden etkilenmektedir;

- Yeterince yüksek maksimum çekme gerilimi,
- Uygulanan gerilimin geniş varyasyonu ve dalgalanması,
- Uygulanan gerilimin yeterince fazla sayıda tekrar üzerindeki etkisidir.

Bunlara ek olarak, yorulma için şartları değiştirme eğiliminde olan gerilme konsantrasyonu, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, metalurjik yapılar, kalıntı gerilmeler ve birleşik gerilmeler gibi faktörler de sayılabilir (Alsaran, 1997)

Yorulma deneyleri Sincotec marka, Power Swing Mot marka yorulma test makinesi kullanılarak, 60 Hz frekansta yapılmıştır.

Yorulma deneylerinde deformasyon öncesi ve deformasyon sonrası her bir işlem basamağında ölçümler yapılmıştır. Yorulma deneylerinde toplam 240 adet deney numunesi kullanılmıştır.



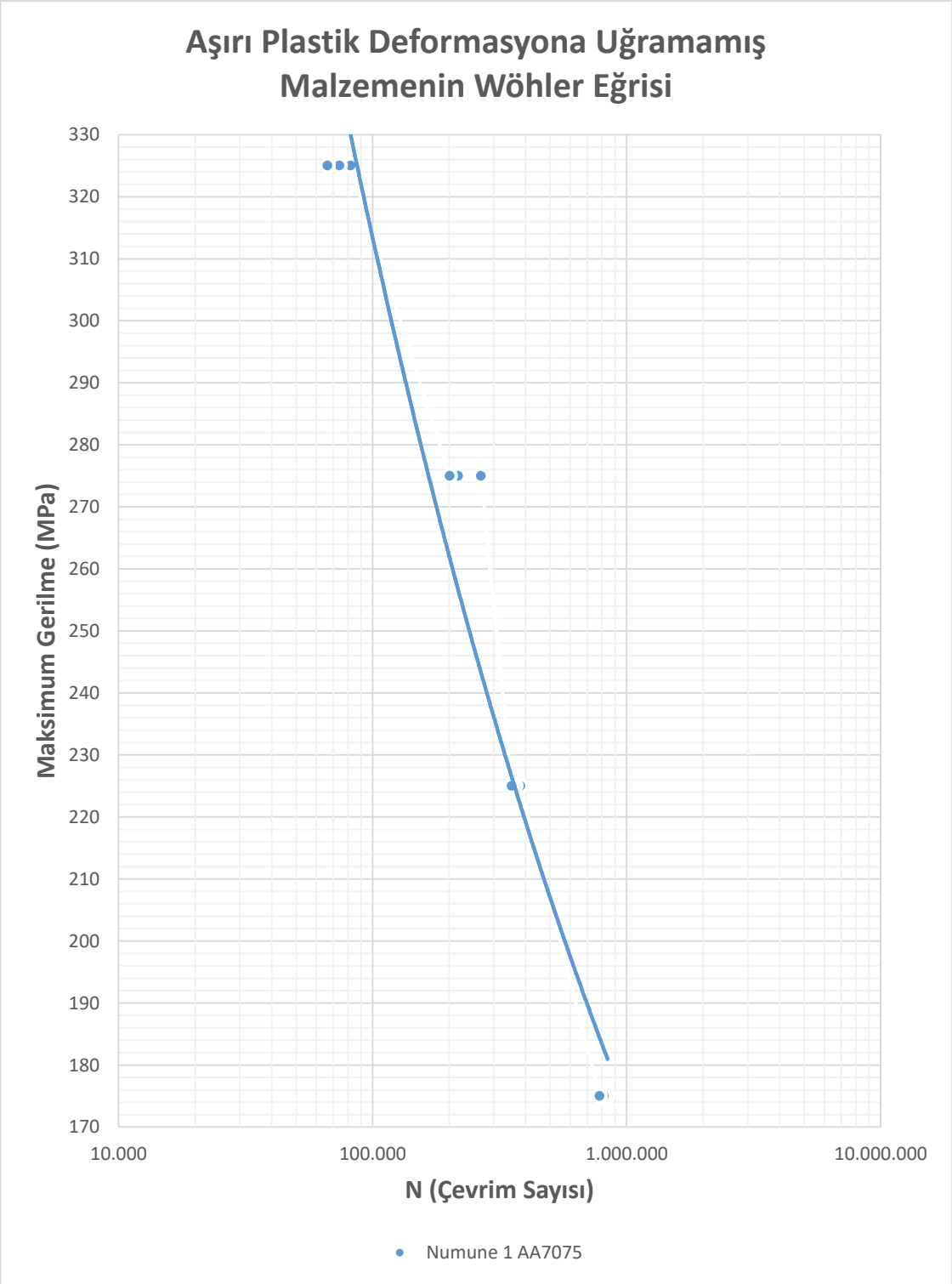

Şekil 3.33. Yorulma deneyi numunesi.



Şekil 3.34. Yorulma deneyi numunesi fotoğrafı.

Çizelge 3.16. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) yorulma deneyi sonuçları.

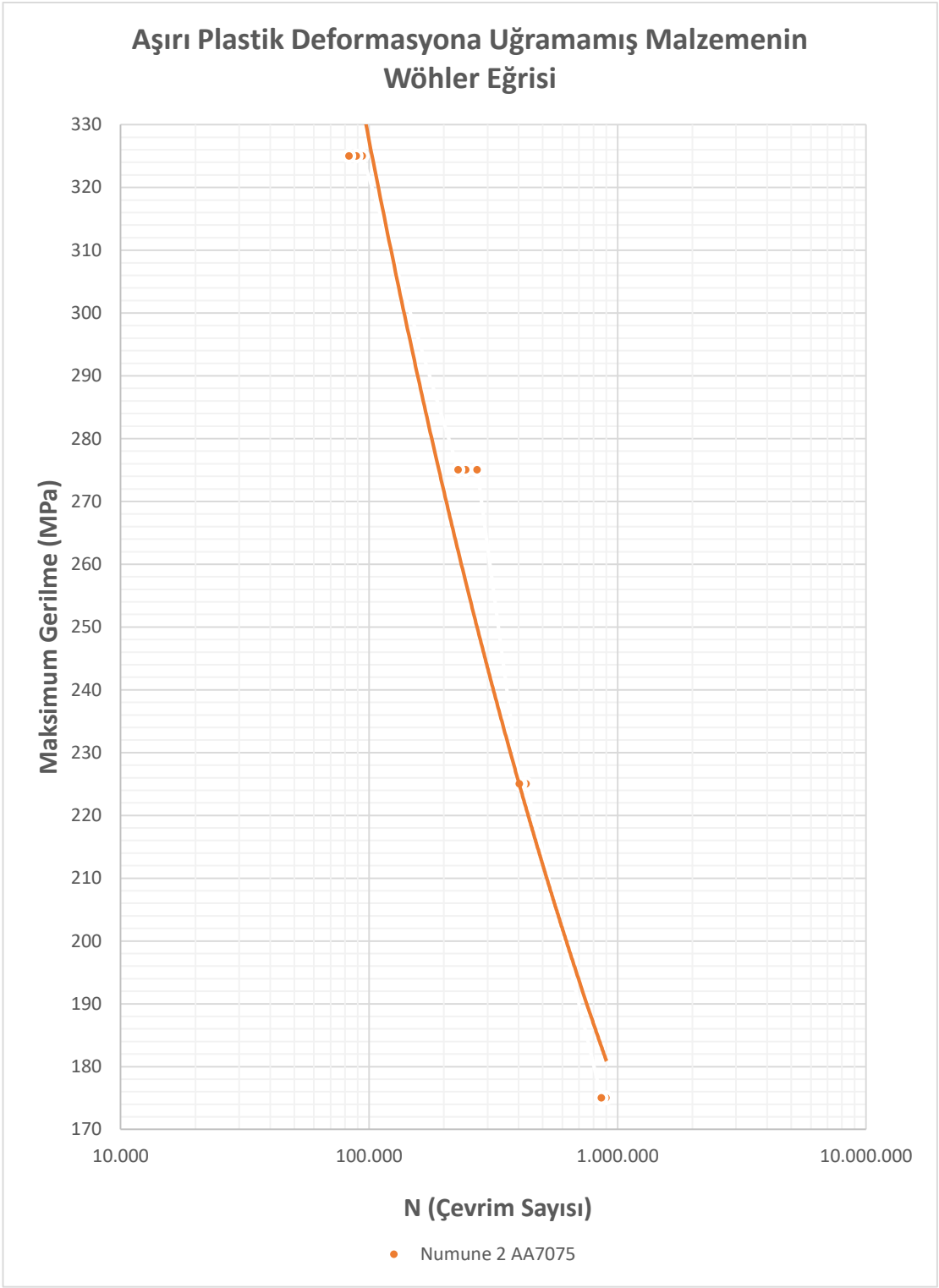
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1** | 325 | 5.397 | 981 | 66.539 |
| **Numune 1** | 325 | 5.397 | 981 | 74.148 |
| **Numune 1** | 325 | 5.397 | 981 | 81.970 |
| **Numune 1** | 275 | 4.416 | 981 | 201.280 |
| **Numune 1** | 275 | 4.416 | 981 | 217.034 |
| **Numune 1** | 275 | 4.416 | 981 | 267.371 |
| **Numune 1** | 225 | 3.434 | 981 | 352.791 |
| **Numune 1** | 225 | 3.434 | 981 | 365.036 |
| **Numune 1** | 225 | 3.434 | 981 | 382.472 |
| **Numune 1** | 175 | 2.453 | 981 | 782.763 |
| **Numune 1** | 175 | 2.453 | 981 | 813.875 |
| **Numune 1** | 175 | 2.453 | 981 | 842.308 |




Şekil 3.35. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.17. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) yorulma deneyi sonuçları.

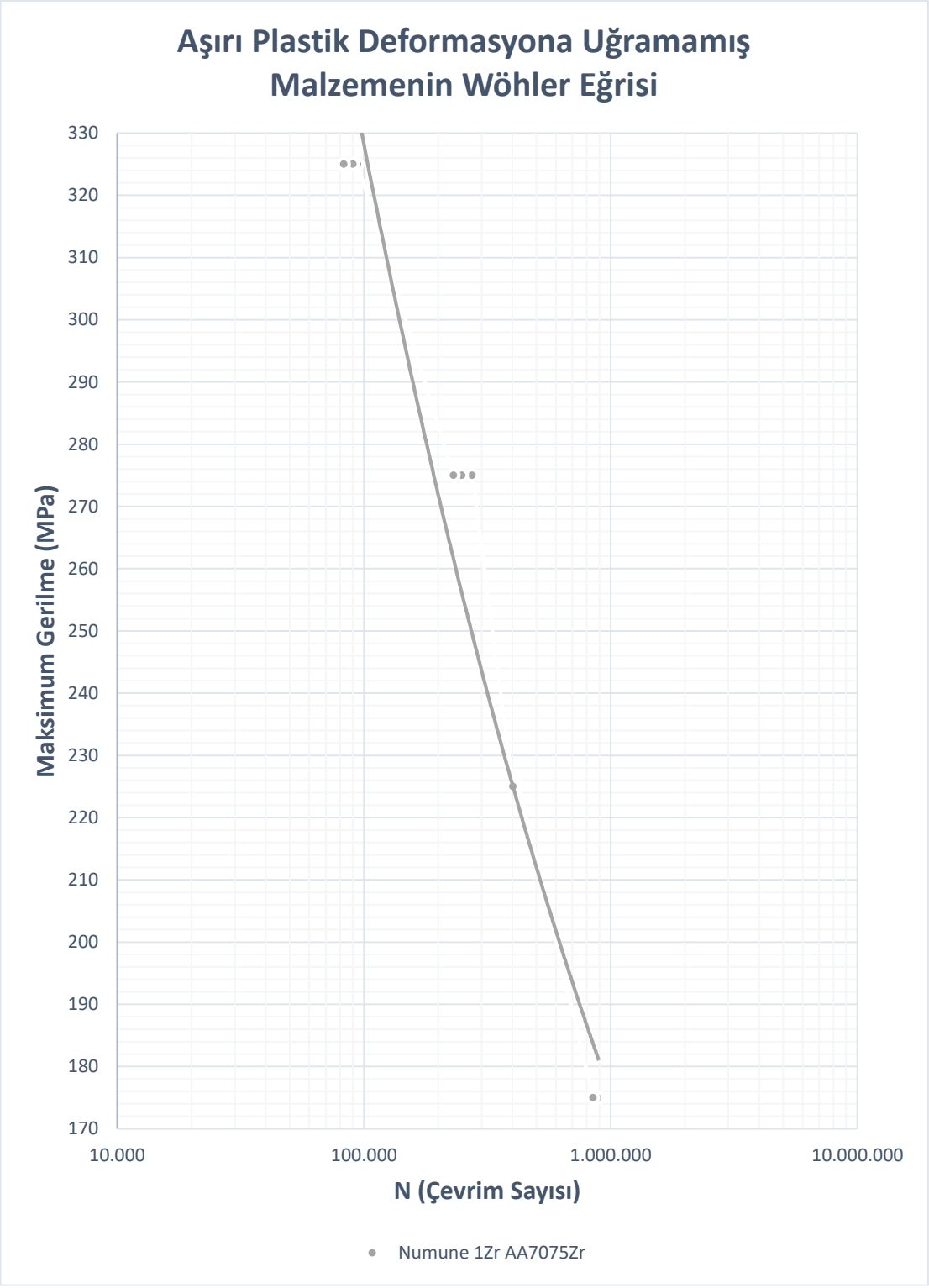
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2** | 325 | 5.397 | 981 | 83.134 |
| **Numune 2** | 325 | 5.397 | 981 | 88.908 |
| **Numune 2** | 325 | 5.397 | 981 | 94.016 |
| **Numune 2** | 275 | 4.416 | 981 | 228.793 |
| **Numune 2** | 275 | 4.416 | 981 | 245.034 |
| **Numune 2** | 275 | 4.416 | 981 | 272.237 |
| **Numune 2** | 225 | 3.434 | 981 | 402.791 |
| **Numune 2** | 225 | 3.434 | 981 | 407.018 |
| **Numune 2** | 225 | 3.434 | 981 | 428.967 |
| **Numune 2** | 175 | 2.453 | 981 | 863.259 |
| **Numune 2** | 175 | 2.453 | 981 | 899.124 |
| **Numune 2** | 175 | 2.453 | 981 | 902.818 |




Şekil 3.36. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.18. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) yorulma deneyi sonuçları.

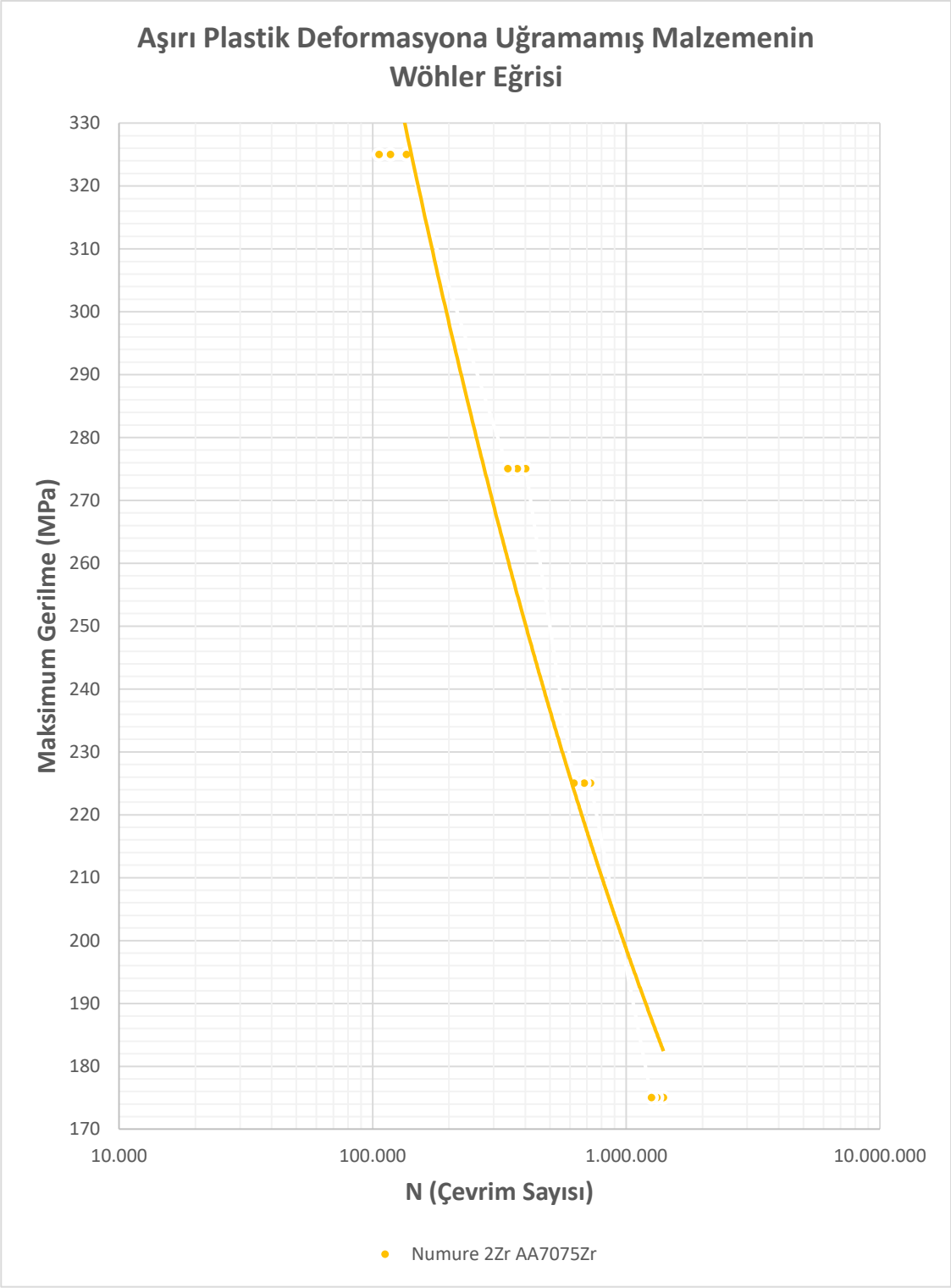
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1Zr** | 325 | 5.397 | 981 | 82.972 |
| **Numune 1Zr** | 325 | 5.397 | 981 | 90.261 |
| **Numune 1Zr** | 325 | 5.397 | 981 | 94.185 |
| **Numune 1Zr** | 275 | 4.416 | 981 | 230.999 |
| **Numune 1Zr** | 275 | 4.416 | 981 | 249.332 |
| **Numune 1Zr** | 275 | 4.416 | 981 | 274.877 |
| **Numune 1Zr** | 225 | 3.434 | 981 | 401.980 |
| **Numune 1Zr** | 225 | 3.434 | 981 | 412.744 |
| **Numune 1Zr** | 225 | 3.434 | 981 | 425.318 |
| **Numune 1Zr** | 175 | 2.453 | 981 | 850.399 |
| **Numune 1Zr** | 175 | 2.453 | 981 | 887.174 |
| **Numune 1Zr** | 175 | 2.453 | 981 | 895.847 |




Şekil 3.37. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.19. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) yorulma deneyi sonuçları.

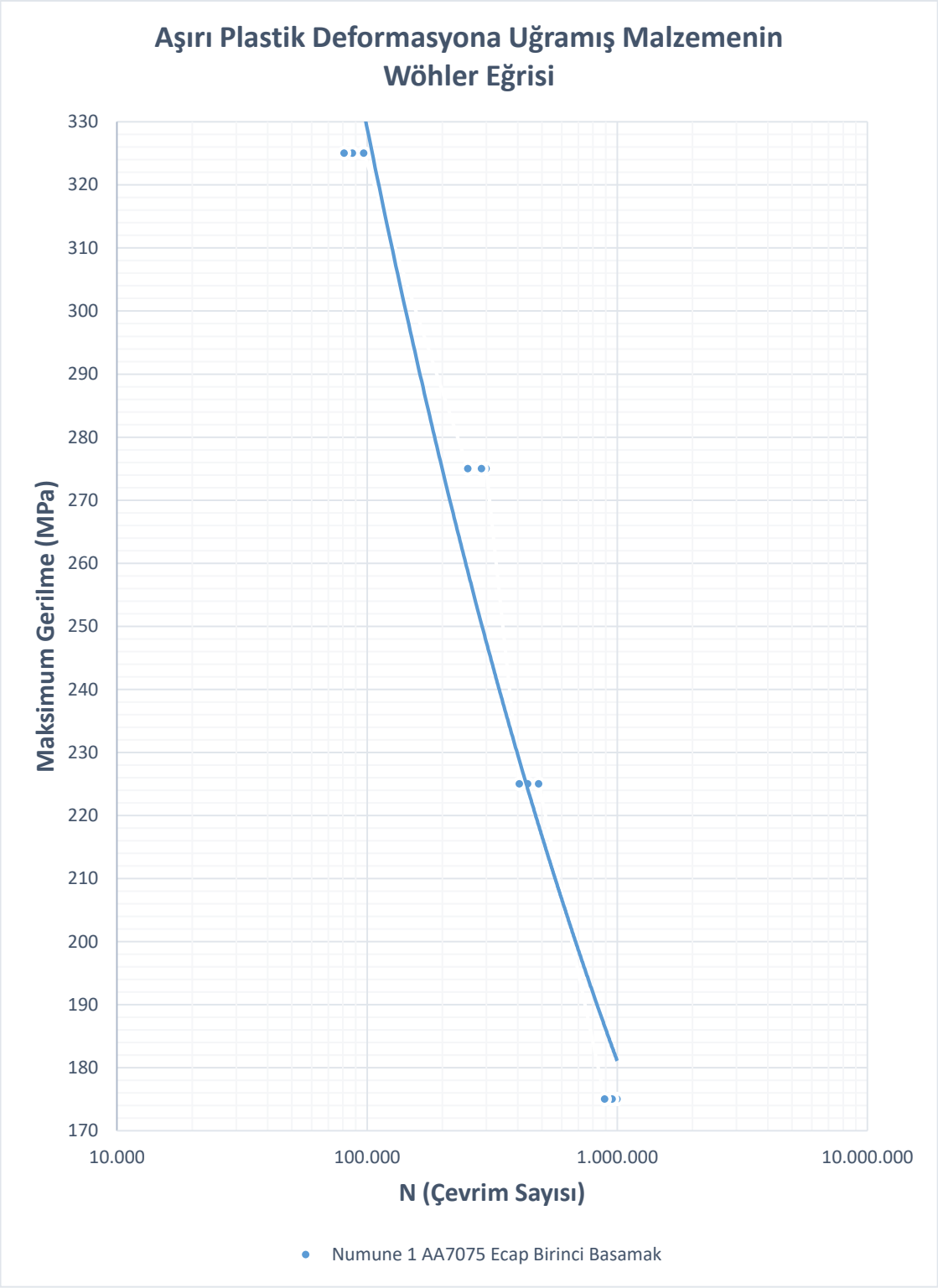
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2Zr** | 325 | 5.397 | 981 | 106.052 |
| **Numune 2Zr** | 325 | 5.397 | 981 | 117.521 |
| **Numune 2Zr** | 325 | 5.397 | 981 | 135.867 |
| **Numune 2Zr** | 275 | 4.416 | 981 | 341.773 |
| **Numune 2Zr** | 275 | 4.416 | 981 | 372.147 |
| **Numune 2Zr** | 275 | 4.416 | 981 | 401.201 |
| **Numune 2Zr** | 225 | 3.434 | 981 | 623.090 |
| **Numune 2Zr** | 225 | 3.434 | 981 | 682.870 |
| **Numune 2Zr** | 225 | 3.434 | 981 | 723.466 |
| **Numune 2Zr** | 175 | 2.453 | 981 | 1.258.399 |
| **Numune 2Zr** | 175 | 2.453 | 981 | 1.320.751 |
| **Numune 2Zr** | 175 | 2.453 | 981 | 1.401.845 |




Şekil 3.38. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.20. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

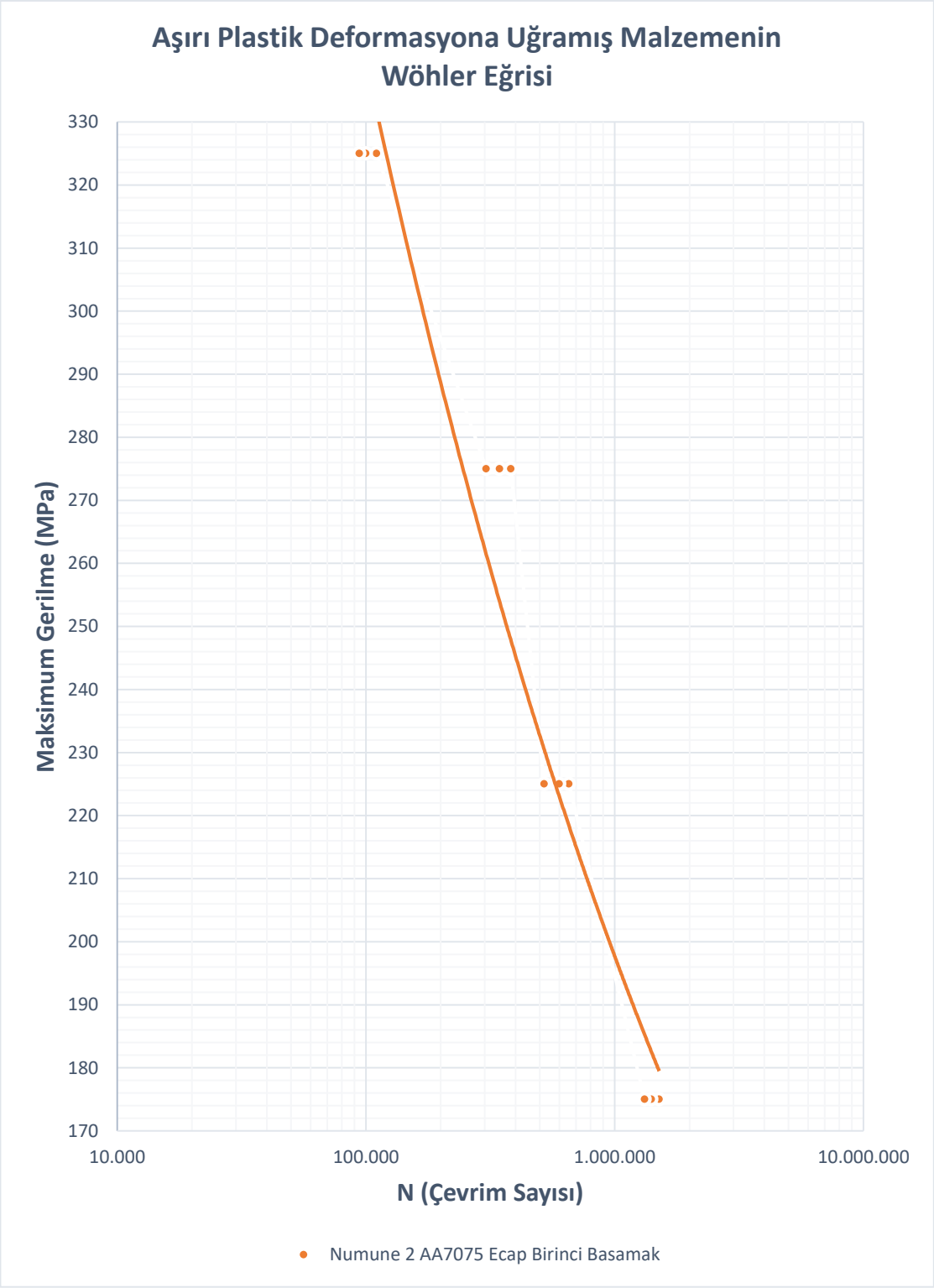
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 81.074 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 87.493 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 96.945 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 252.973 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 287.388 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 299.131 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 406.471 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 438.963 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 485.747 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 891.312 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 955.483 |
| **Numune 1 (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 999.254 |




Şekil 3.39. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.21. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

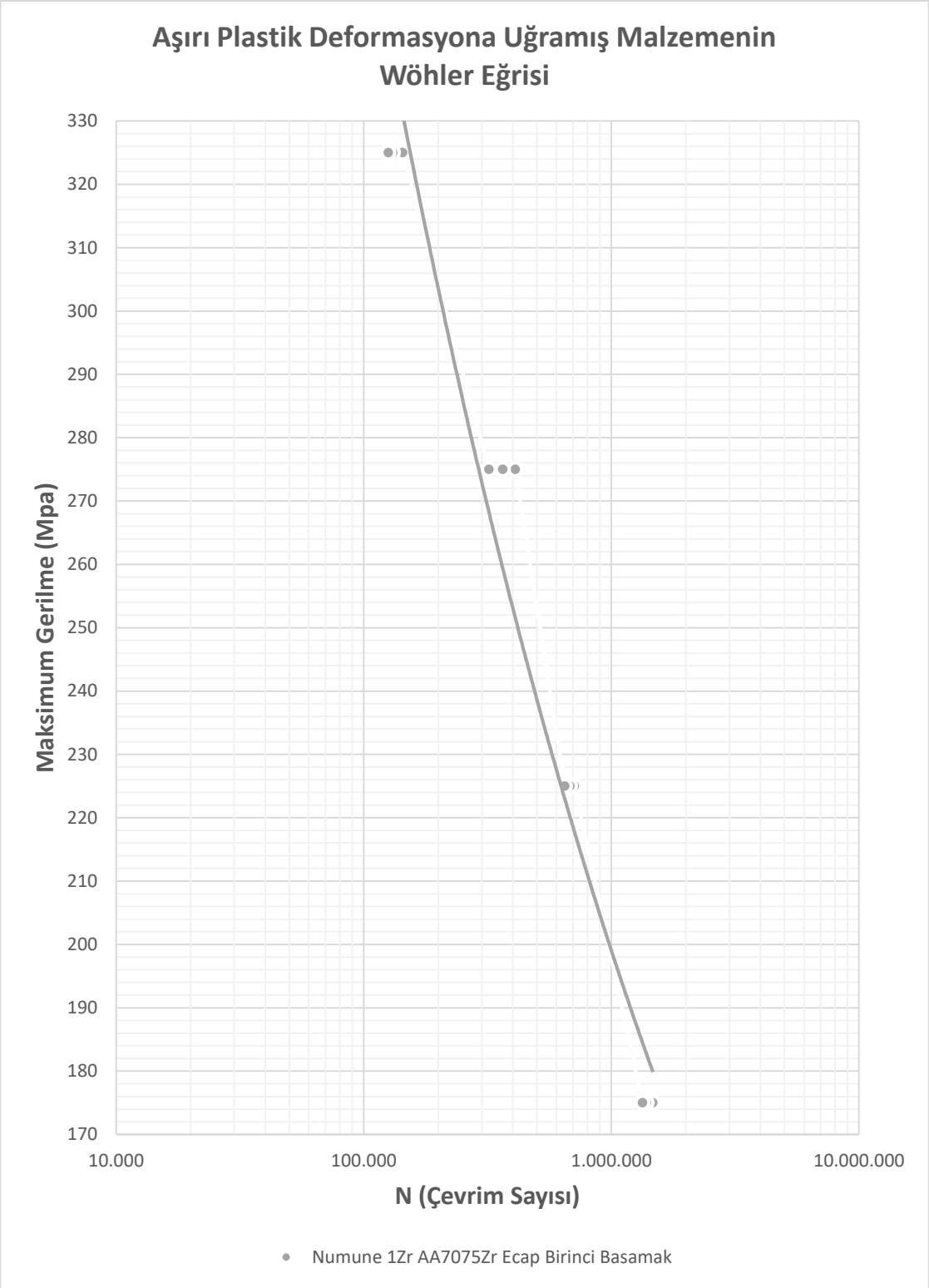
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 94.096 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 99.829 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 110.387 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 304.176 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 344.934 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 382.535 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 520.959 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 598.087 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 654.623 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.319.671 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.406.302 |
| **Numune 2 (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.511.108 |




Şekil 3.40. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.22. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

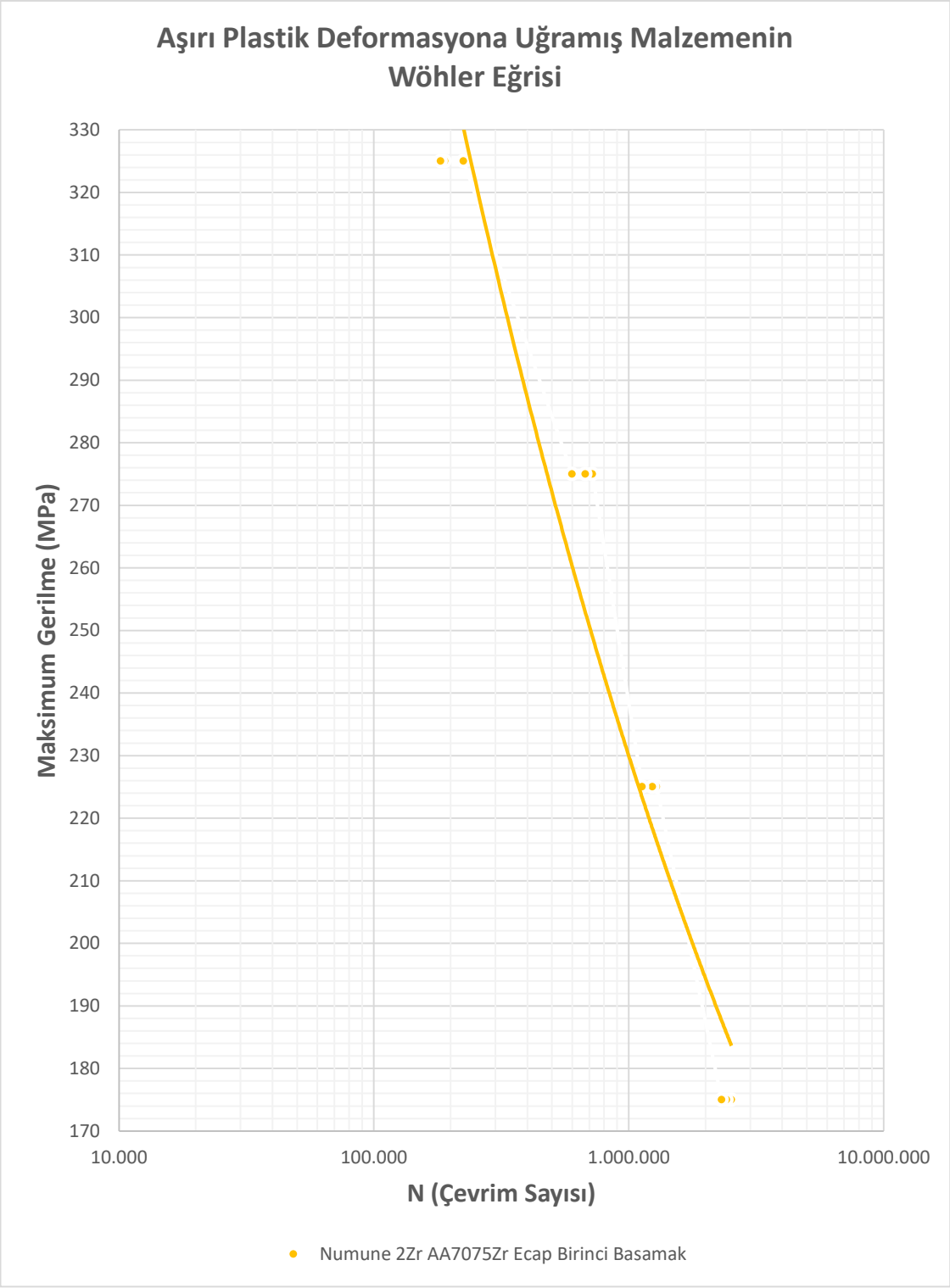
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 125.776 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 131.208 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 143.869 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 320.798 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 365.250 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 409.638 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 649.013 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 680.393 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 709.881 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.337.309 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.389.174 |
| **Numune 1Zr (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.472.202 |




Şekil 3.41. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.23. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

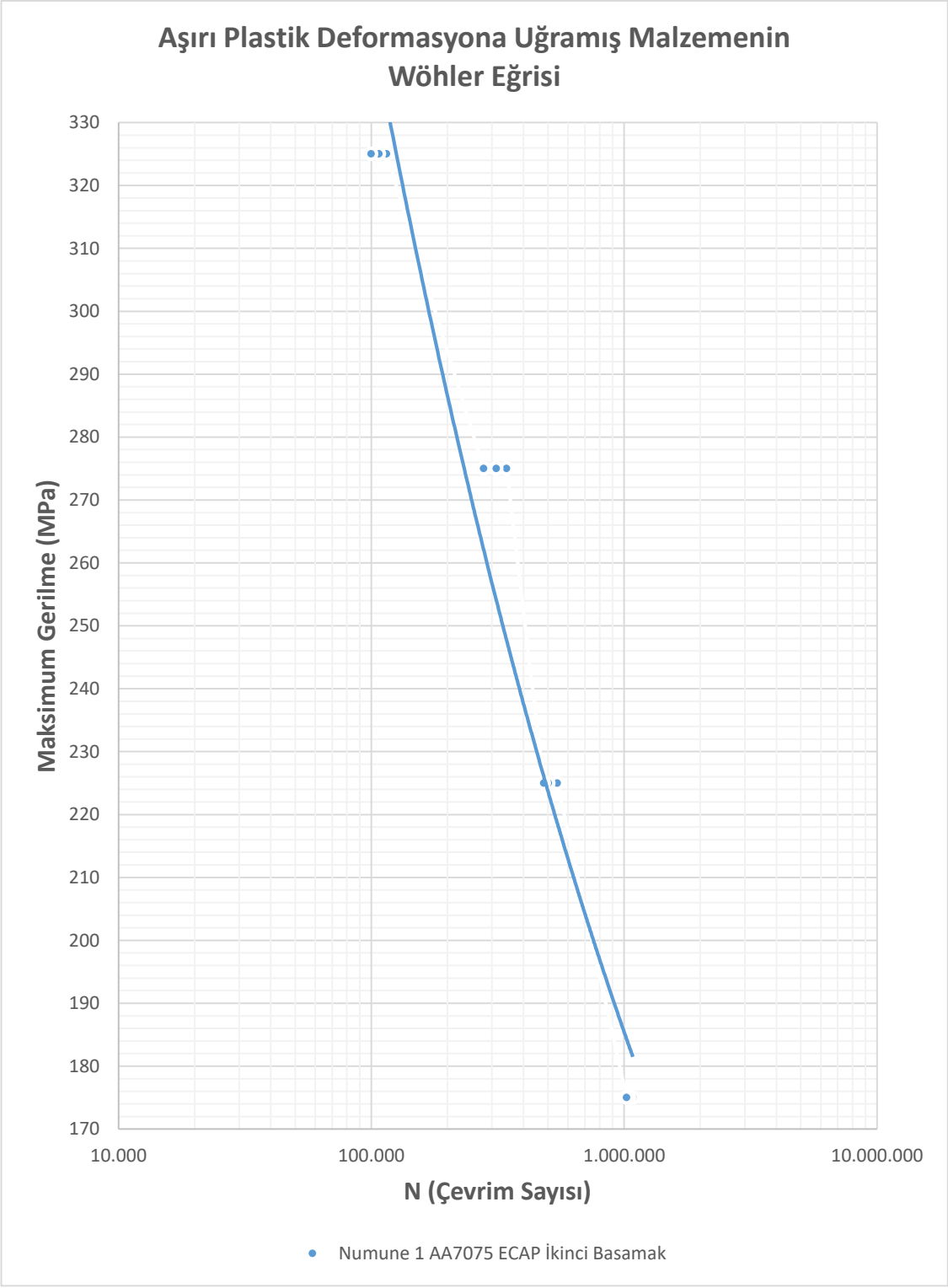
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 182.908 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 189.637 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 224.776 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 600.093 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 675.909 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 721.234 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.129.309 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.240.196 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.286.697 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.316.470 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.421.888 |
| **Numune 2Zr (Birinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.530.296 |




Şekil 3.42.700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) bir basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.24. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

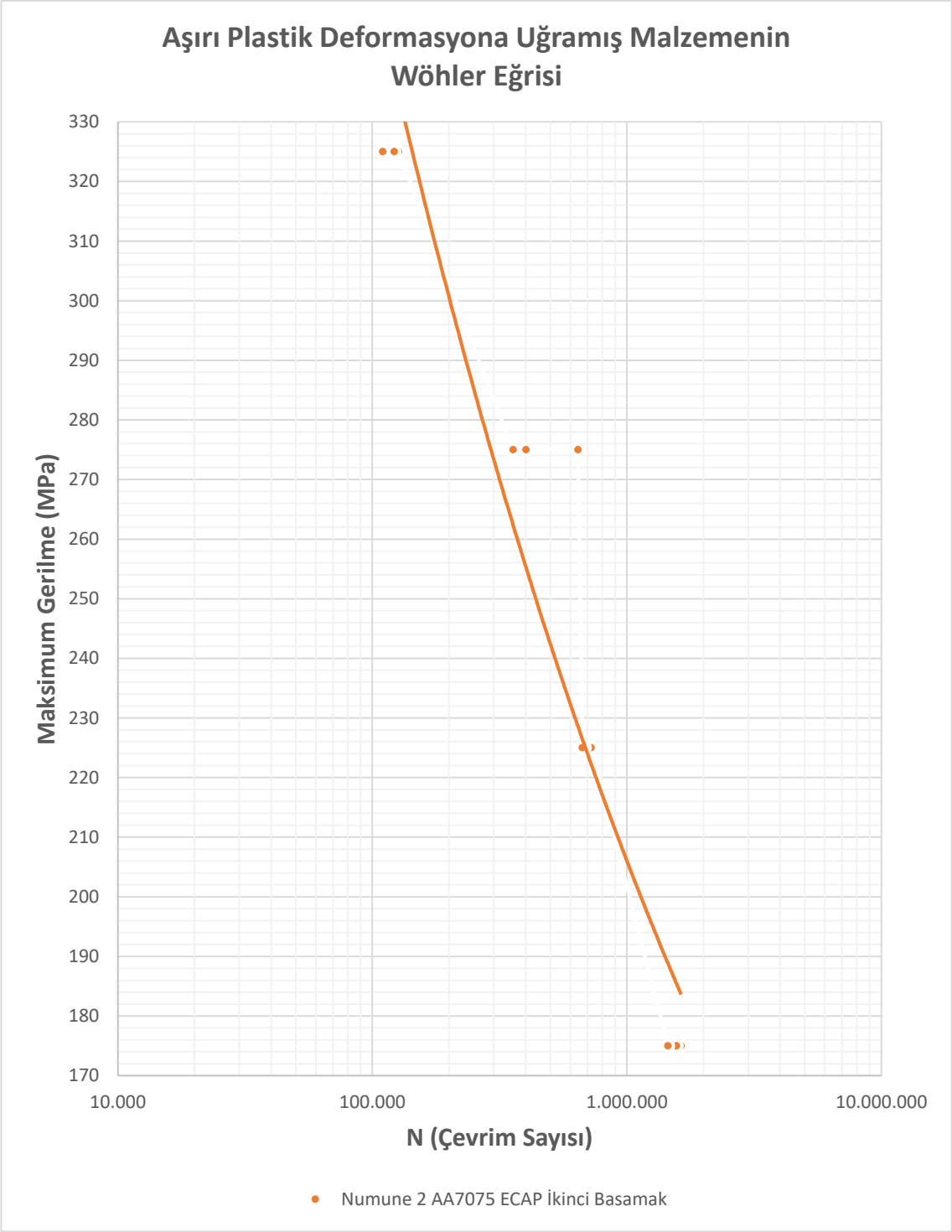
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 99.905 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 107.201 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 114.905 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 278.395 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 312.029 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 342.782 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 481.471 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 501.390 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 543.901 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.023.782 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.045.090 |
| **Numune 1 (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.082.254 |




Şekil 3.43. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.25. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

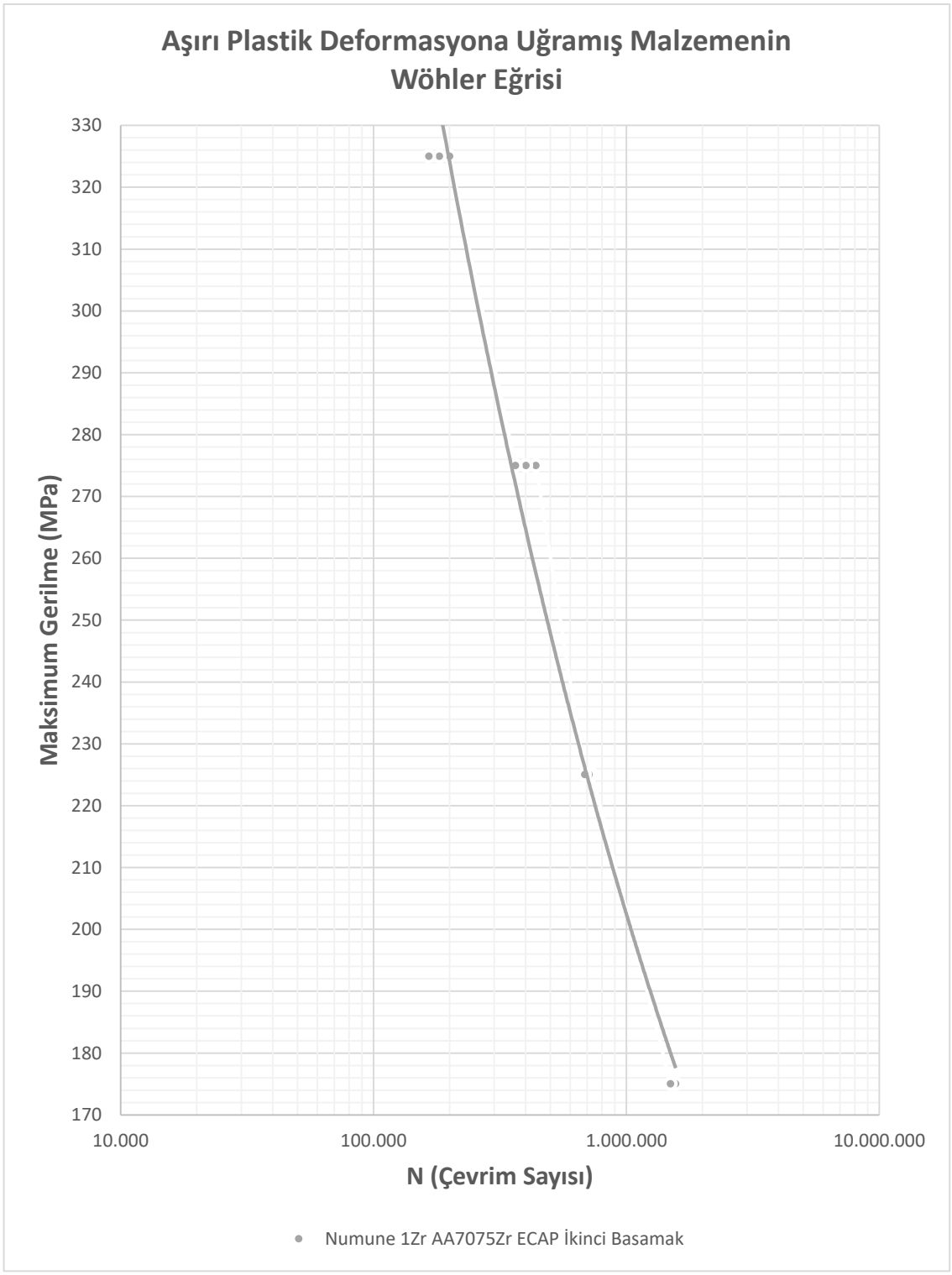
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 109.995 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 122.004 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 127.012 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 357.308 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 401.623 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 643.209 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 669.640 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 684.044 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 724.090 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.450.671 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.567.302 |
| **Numune 2 (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.634.876 |




Şekil 3.44. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.26. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

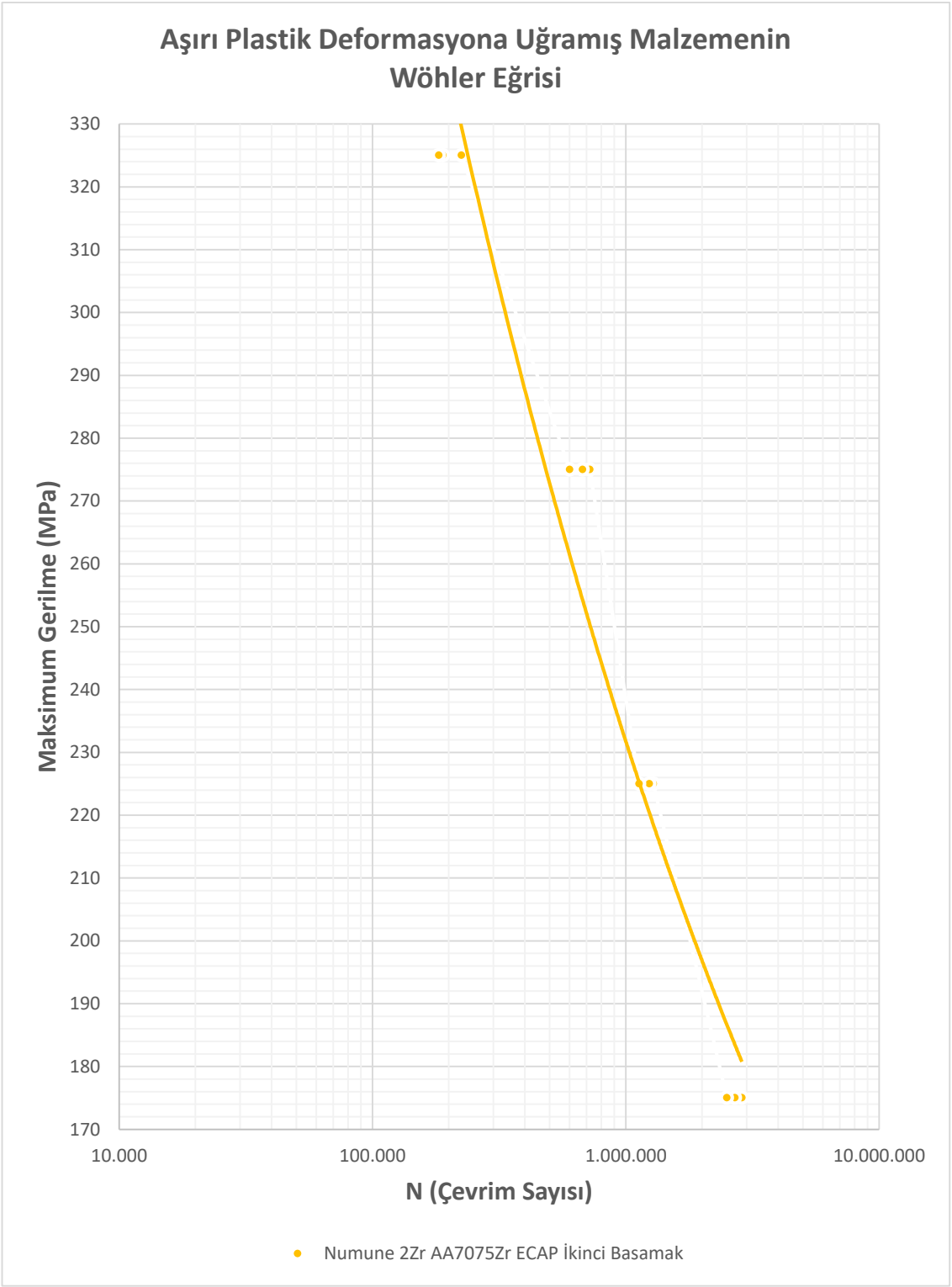
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 165.776 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 182.200 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 200.027 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 365.012 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 400.728 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 439.068 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 686.105 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 712.019 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 732.283 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.497.019 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.567.298 |
| **Numune 1Zr (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.563.829 |




Şekil 3.45. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.27. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

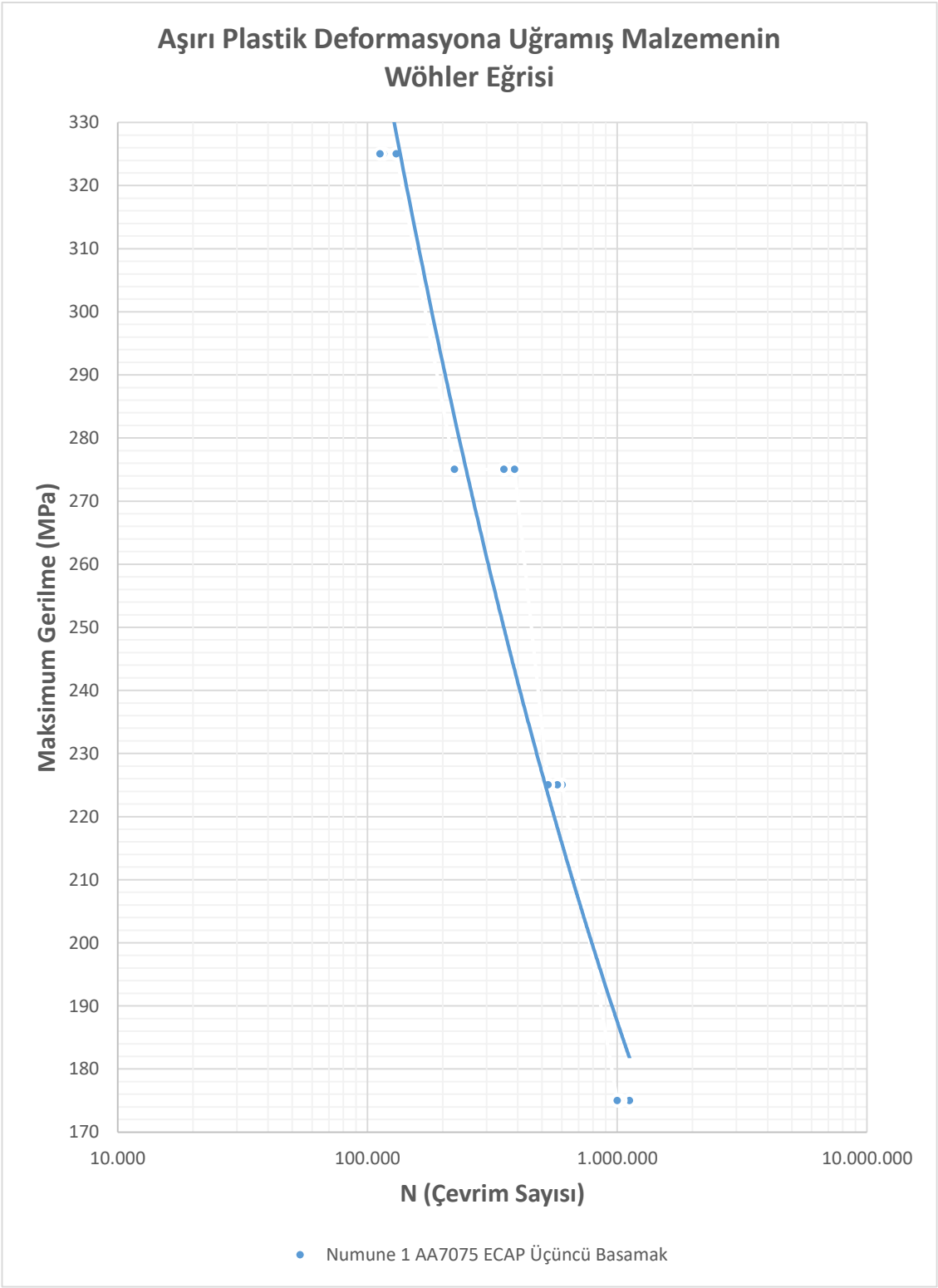
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 182.908 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 189.637 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 224.776 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 600.093 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 675.909 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 721.234 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.129.309 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.240.196 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.286.697 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.509.961 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.701.295 |
| **Numune 2Zr (İkinci ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.873.009 |




Şekil 3.46. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) iki basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.28. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

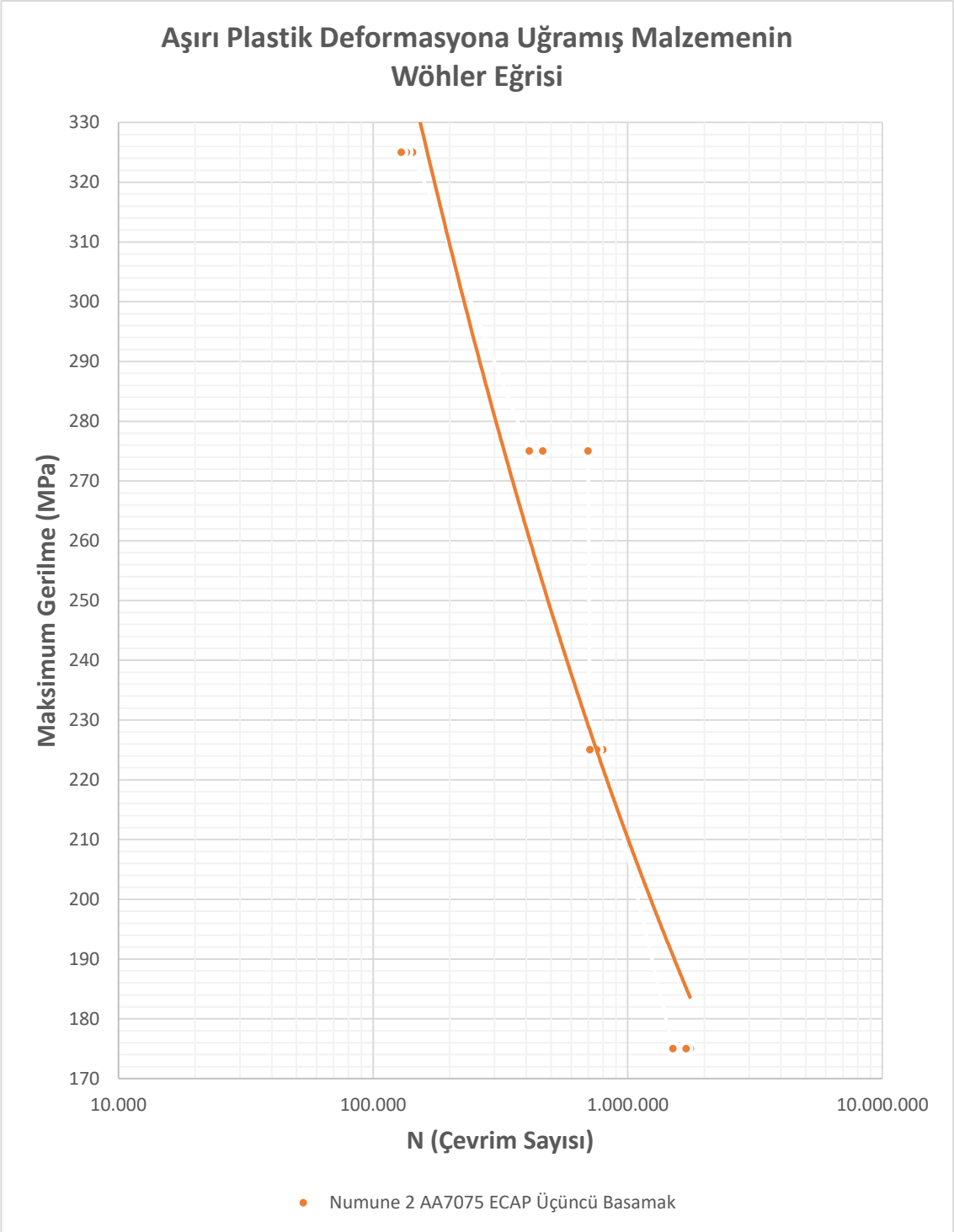
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 112.303 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 116.409 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 130.533 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 223.011 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 351.894 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 388.001 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 529.179 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 576.905 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 602.189 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.000.129 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.030.921 |
| **Numune 1 (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.121.098 |




Şekil 3.47. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.29. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

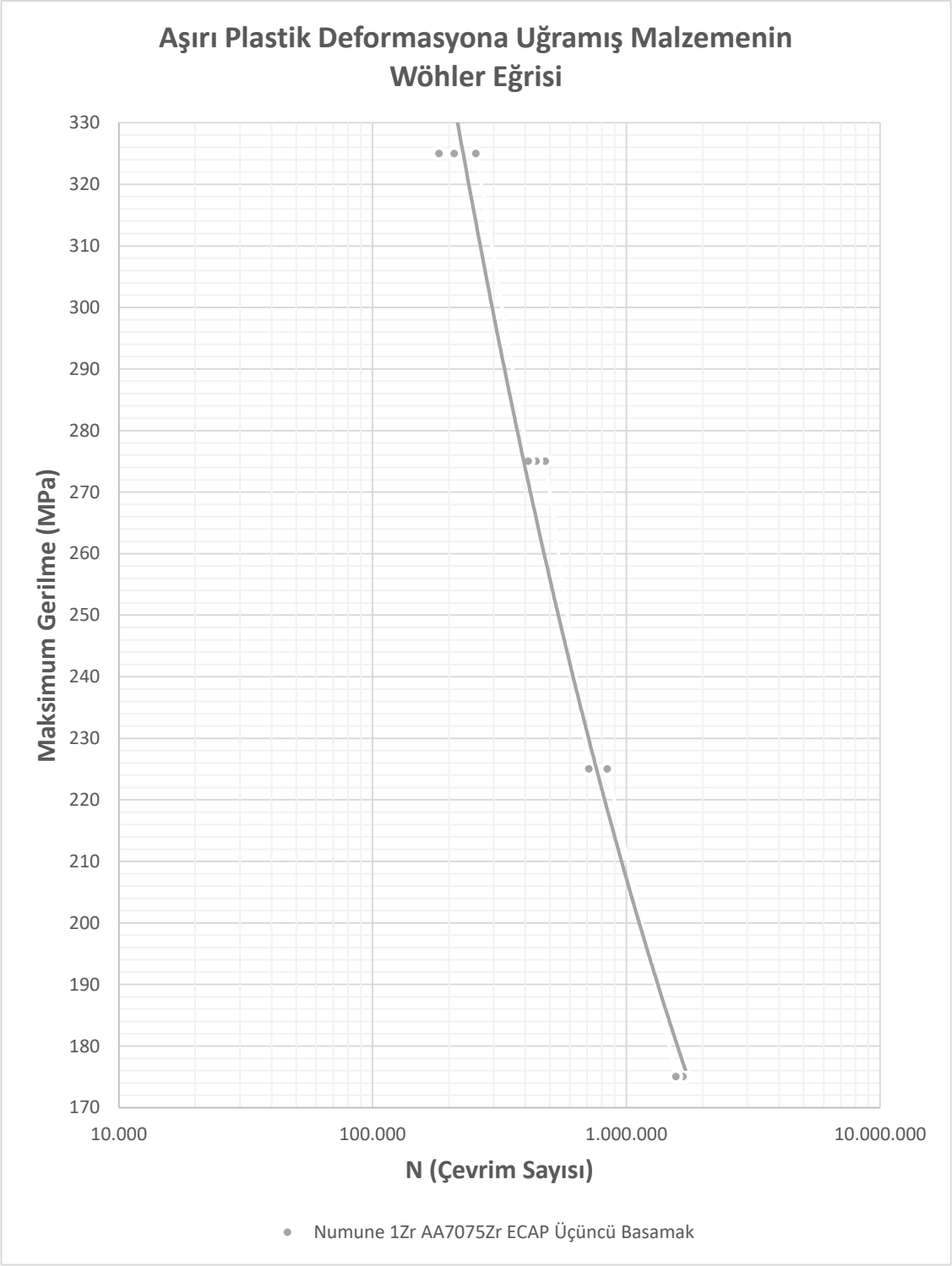
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 129.113 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 135.299 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 142.988 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 411.009 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 464.399 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 698.871 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 712.010 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 754.999 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 800.121 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.506.466 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.698.025 |
| **Numune 2 (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.765.306 |




Şekil 3.48. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.30. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

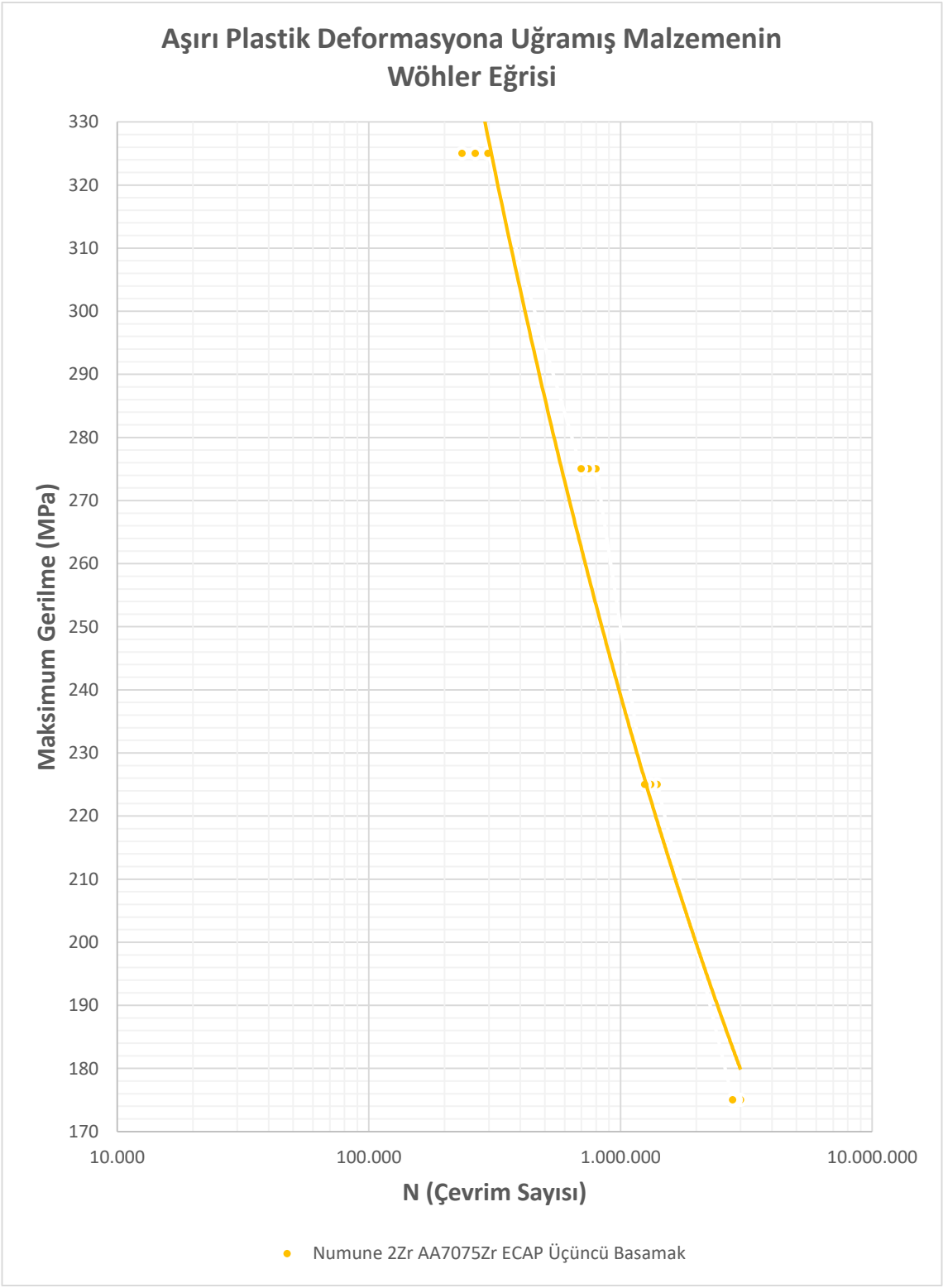
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 183.222 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 209.788 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 255.302 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 410.822 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 442.082 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 479.994 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 712.105 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 743.262 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 842.091 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.569.128 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.672.099 |
| **Numune 1Zr (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.713.343 |




Şekil 3.49. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.31. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

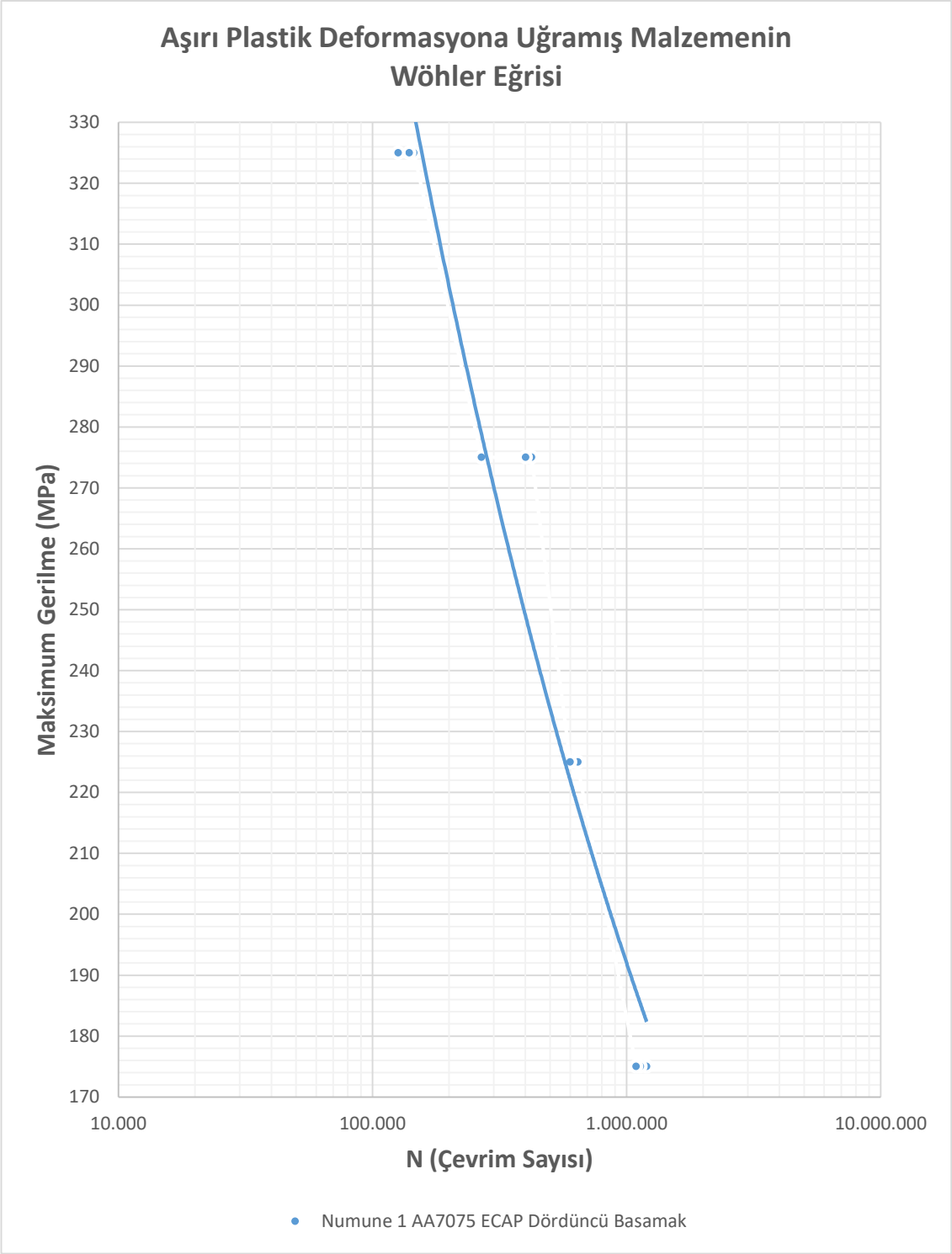
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 234.976 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 264.890 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 297.555 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 698.477 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 745.367 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 799.980 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.247.810 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.321.905 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.400.921 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.789.299 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 2.876.588 |
| **Numune 2Zr (Üçüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 3.000.234 |




Şekil 3.50. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) üç basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

Çizelge 3.32. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

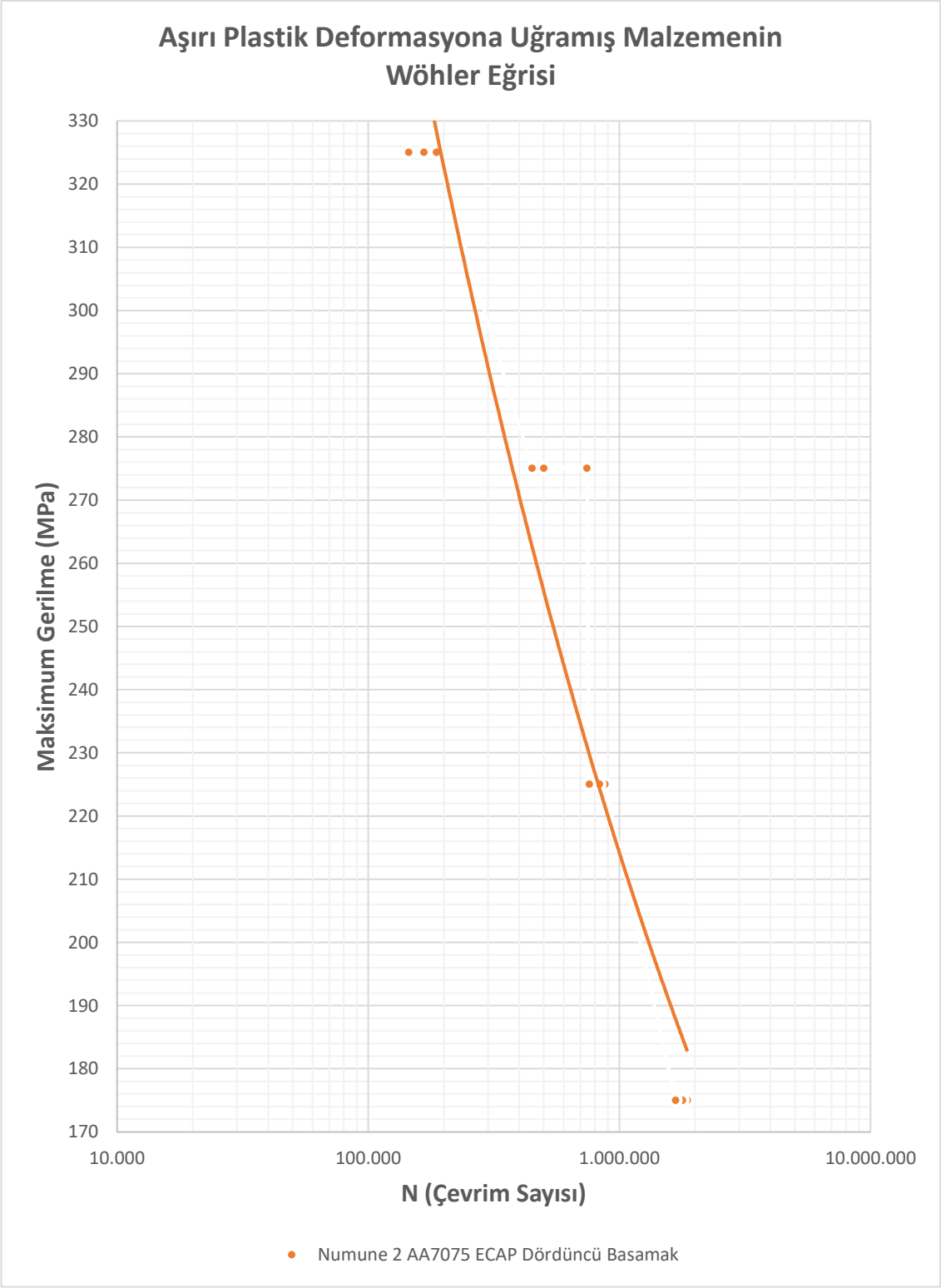
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 126.478 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 139.478 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 145.449 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 268.364 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 401.475 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 423.324 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 600.426 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 643.530 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 637.978 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.090.124 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.136.157 |
| **Numune 1 (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.200.413 |




Şekil 3.51. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.33. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

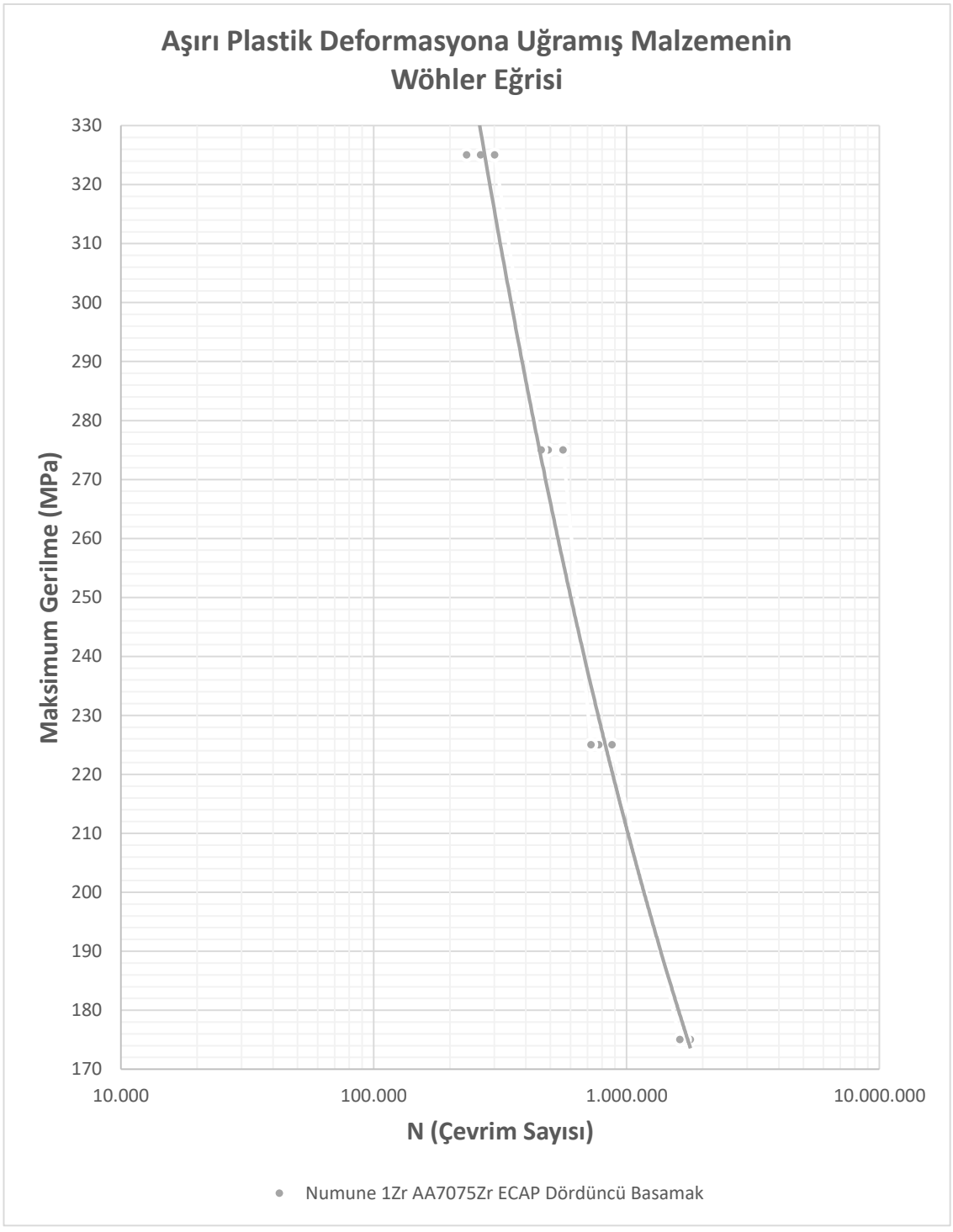
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 145.254 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 166.783 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 187.247 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 449.541 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 500.457 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 743.785 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 760.457 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 834.639 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 879.012 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.677.349 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.789.214 |
| **Numune 2 (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.867.235 |




Şekil 3.52. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.34. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

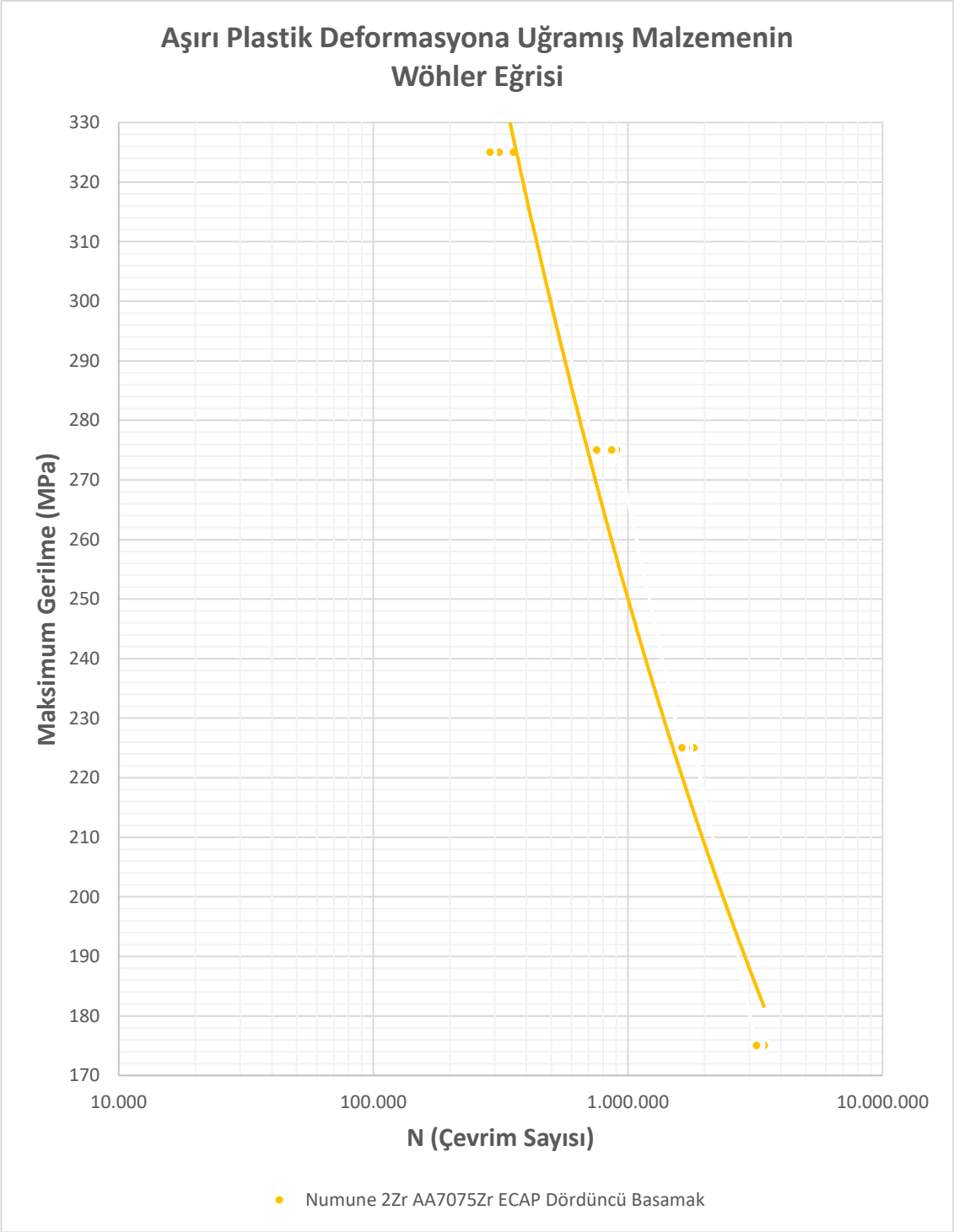
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 233.546 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 265.112 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 300.875 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 460.201 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 489.907 |
| **Numune1Zr (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 561.245 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 723.471 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 776.540 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 877.327 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.624.920 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.700.542 |
| **Numune 1Zr (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 1.788.841 |



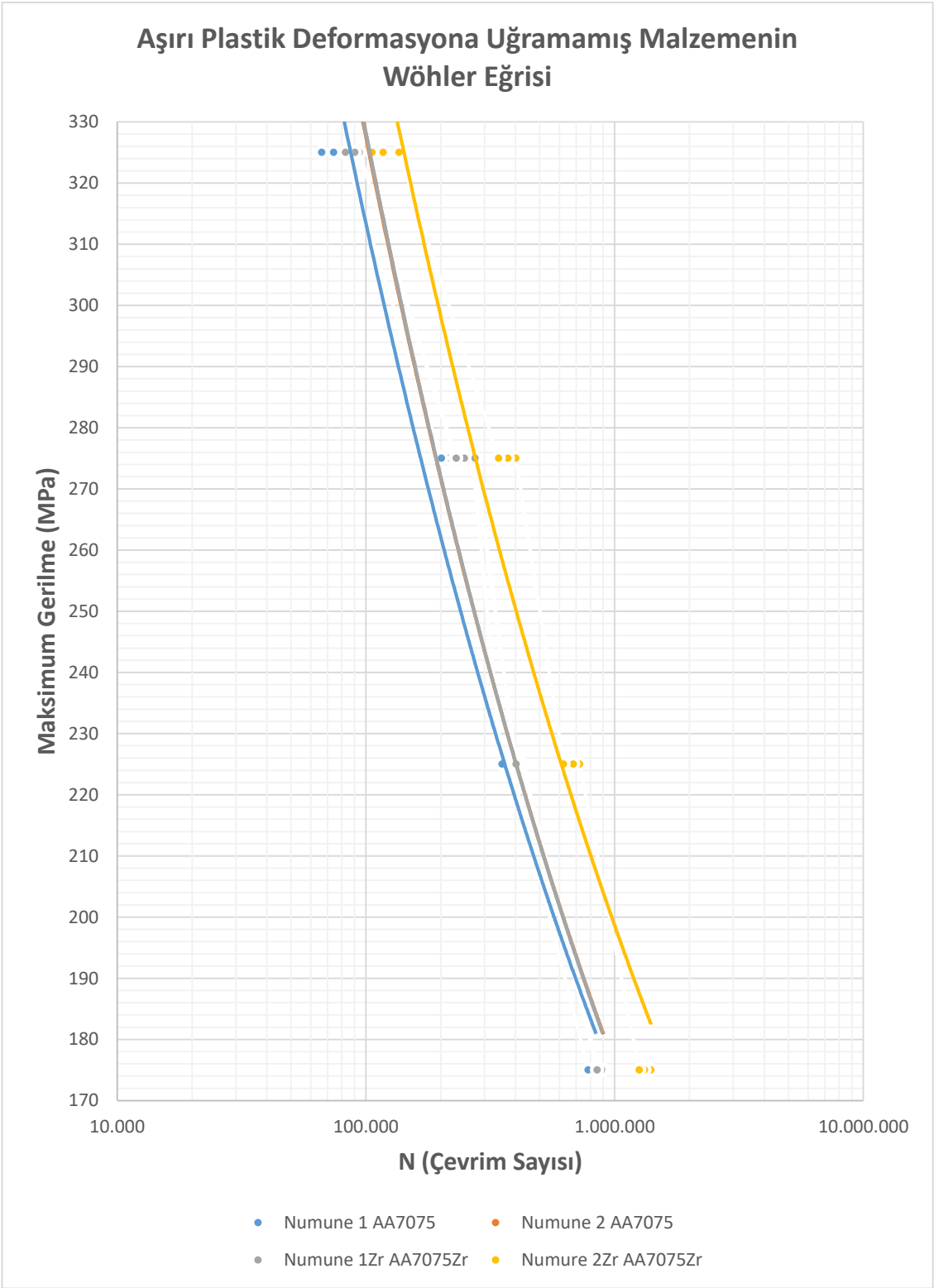

Şekil 3.53. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.

Çizelge 3.35. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra yorulma deneyi sonuçları.

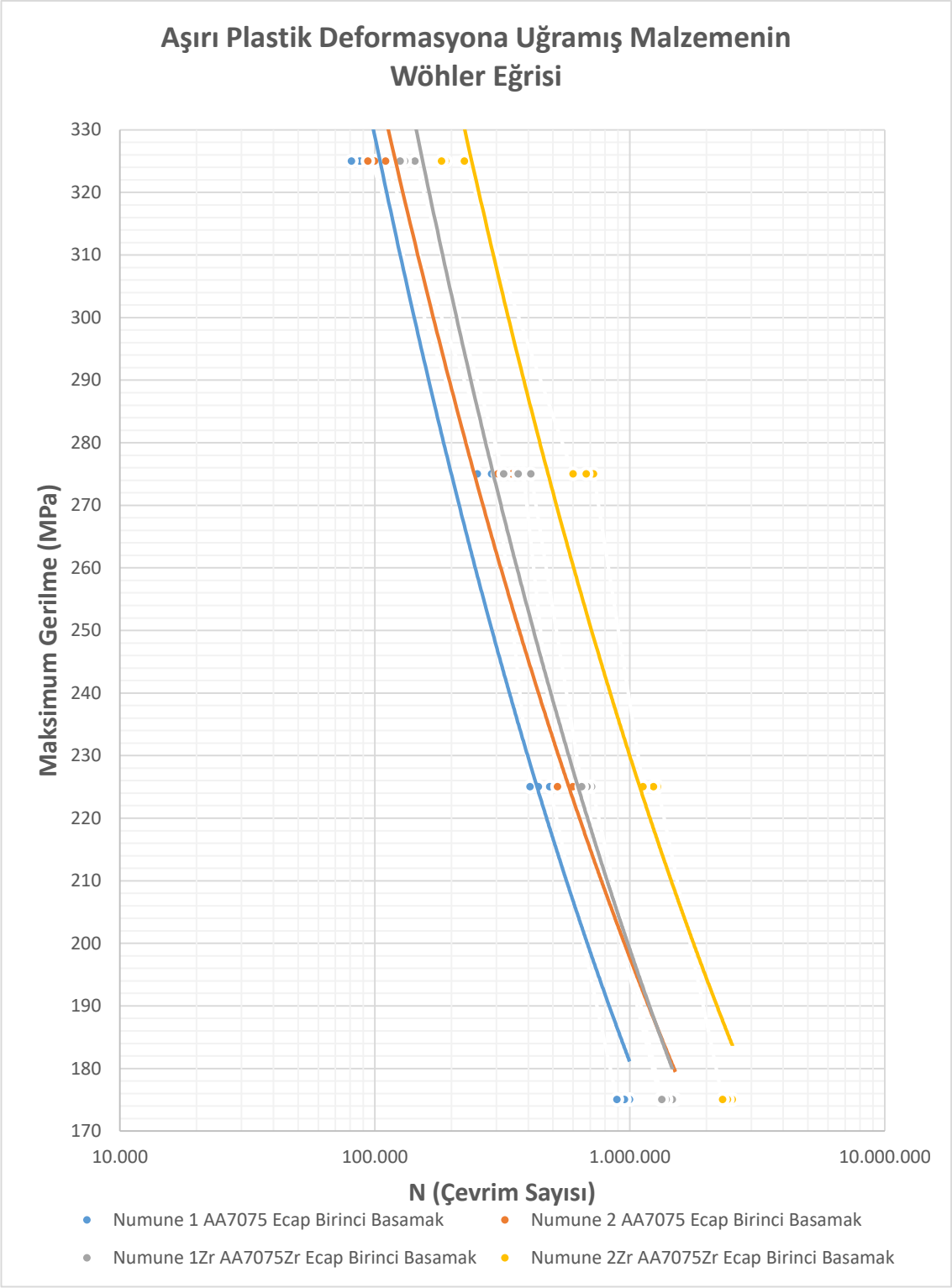
| **Numune No** | **$\sigma_{max}$ (Mpa)** | **$F_{ön}$ (N)** | **$F_{genlik}$ (N)** | **N (Çevrim Sayısı)** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 287.809 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 312.253 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 325 | 5.397 | 981 | 355.965 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 755.332 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 865.020 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 275 | 4.416 | 981 | 905.142 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.634.267 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.699.784 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 225 | 3.434 | 981 | 1.817.310 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 3.200.447 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 3.255.459 |
| **Numune 2Zr (Dördüncü ECAP)** | 175 | 2.453 | 981 | 3.440.476 |



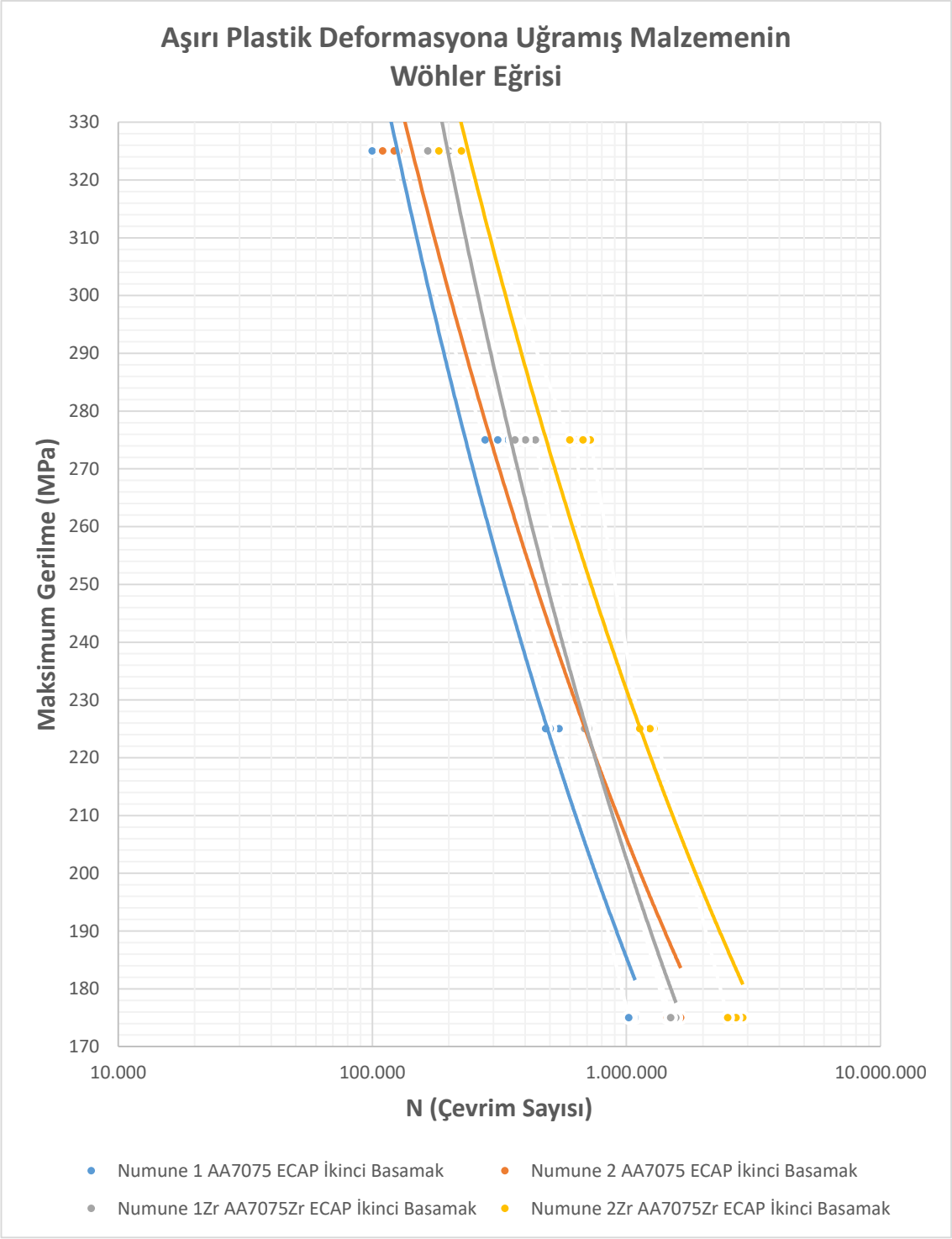

Şekil 3.54. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) dört basamak ECAP uygulandıktan sonra çizilen Wöhler Eğrisi.



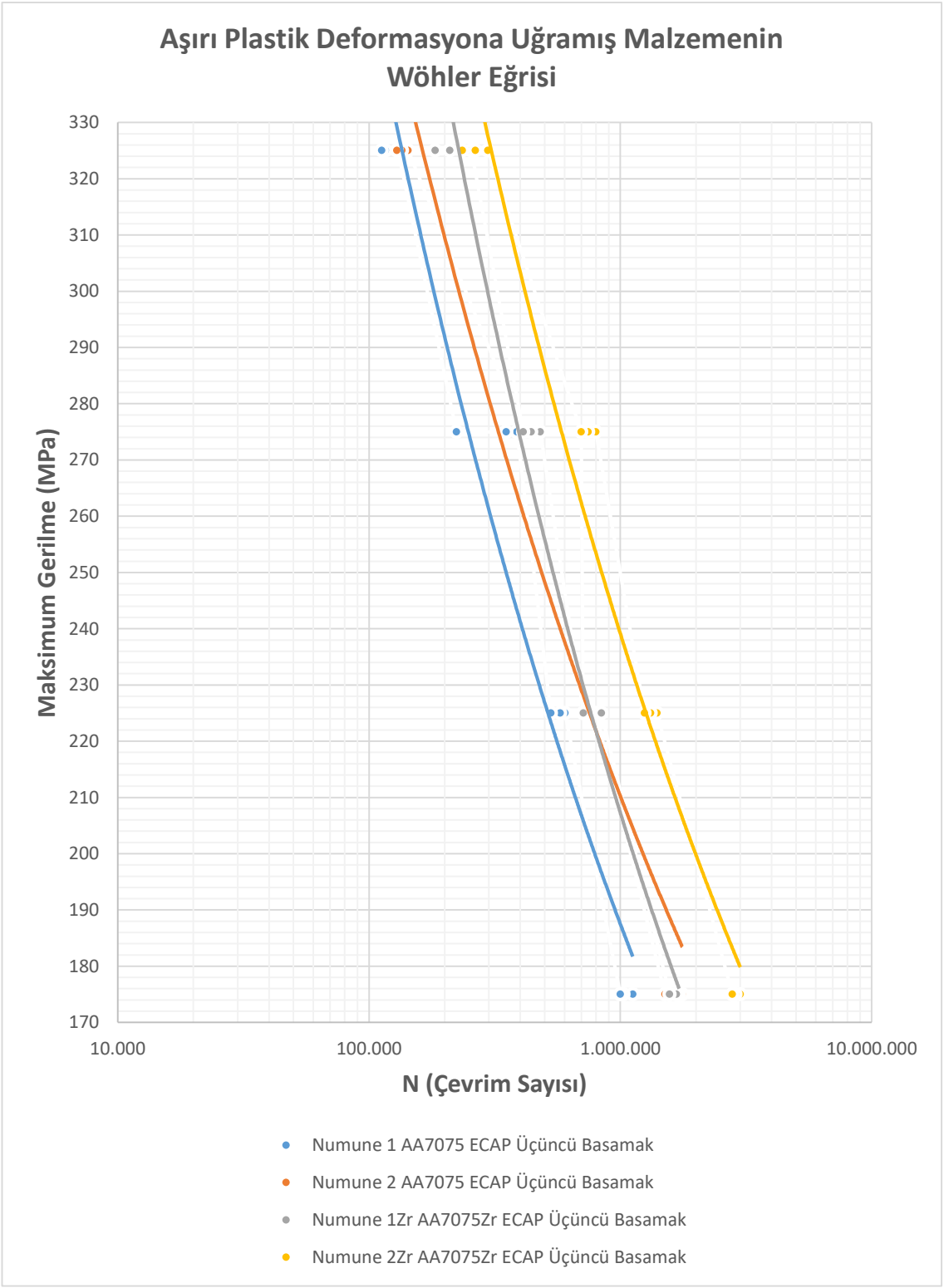

Şekil 3.55. Numunelere ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği.



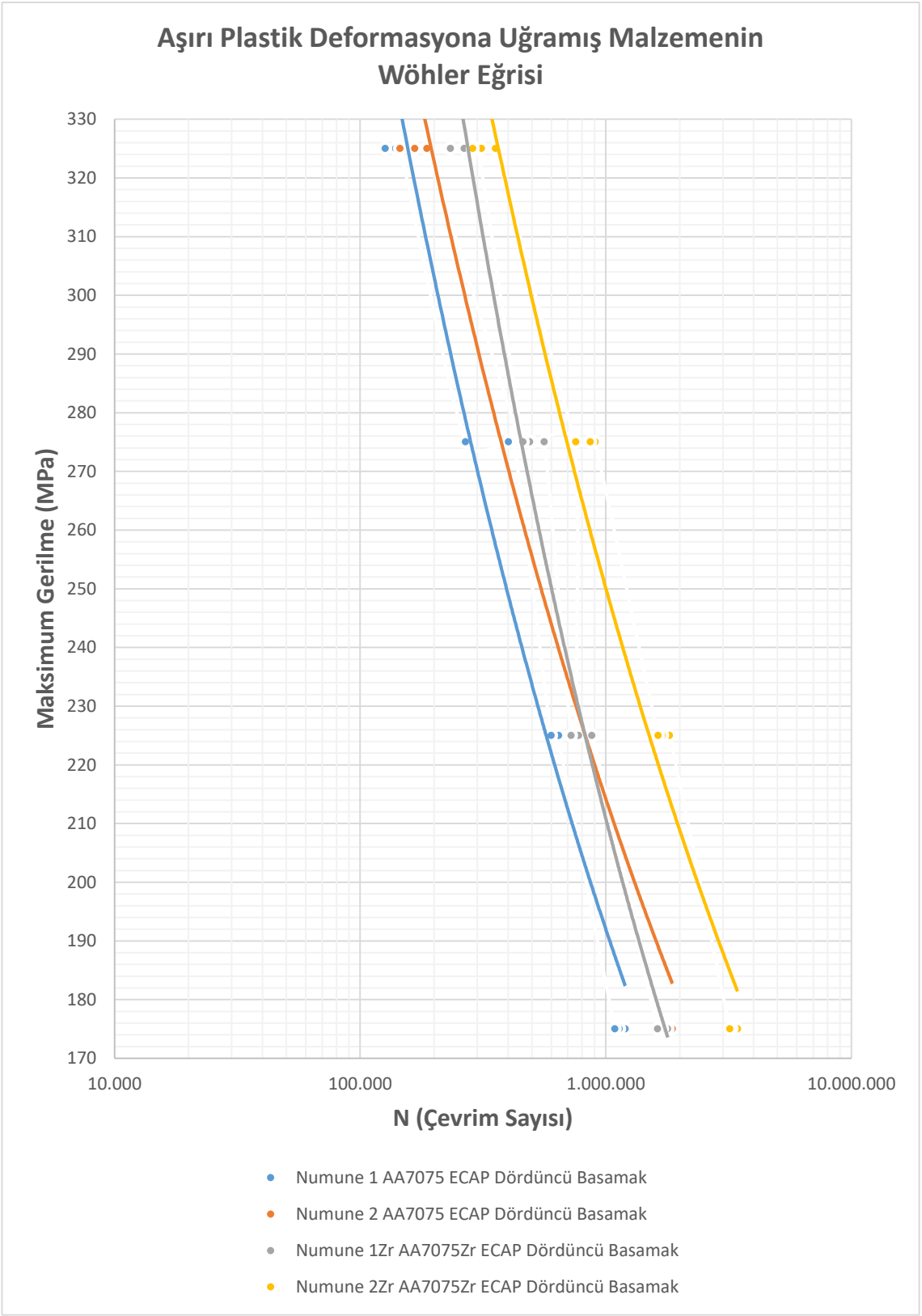

Şekil 3.56. Numunelere bir basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği.




Şekil 3.57. Numunelere iki basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği.




Şekil 3.58. Numunelere üç basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği.




Şekil 3.59. Numunelere dört basamak ECAP uygulanmadan önce çizilen çevrim sayısı maksimum gerilme grafiği.

### 3.6.1. Yorulma Deneyi Sonuçları

Yorulma, makine bileşeni uygulamalarında çok yaygın bir arıza mekanizmasıdır. Makine elemanlarında karşılaşılan hasarların büyük kısmı yorulmadan kaynaklanır. Diğer deneylerde olduğu gibi yorulma deneylerinde de 600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklıklarda 750 MPa basınçta 4 saat süre ile toz metalurjisi ile üretilmiş AA7075 alaşımları ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımları kullanılmıştır. Yorulma deneyleri uygulanırken eşit aralıklarla azalan maksimum gerilme kuvvetleri uygulanırken kuvvet genlikleri sabit bırakılmıştır. Yorulma deneyinde belirlenen 4 farklı maksimum gerilme kuvveti ile her bir numune için 3 yorulma deneyi yapılarak elde edilen maksimum gerilme değerlerine karşılık gelen çevrim sayıları ile wöhler eğrileri çizilmiştir. Her bir işlem basamağı için 12'şer adet numune kullanılmış, beş yorulma deneyi için toplam 60 adet numune kullanılmıştır. Karşılaştırılması yapılan farklı sıcaklık değerlerinde, sabit basınçta ve farklı içeriklerle üretilmiş olan 240 adet numune üzerinde analiz yapılmıştır. Yorulma deneyi sonucunda tüm numuneler kopmuştur.

600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) deformasyon öncesi $3x10^5$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 236 MPa'dan deformasyon sonrası 248 MPa'a yükselmiştir.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) deformasyon öncesi $3x10^5$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 242 MPa'dan deformasyon sonrası 262 MPa'a yükselmiştir.

600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) deformasyon öncesi $3x10^5$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 244 MPa'dan deformasyon sonrası 272 MPa'a yükselmiştir.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) deformasyon öncesi $3x10^5$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 270 MPa'dan deformasyon sonrası 308 MPa'a yükselmiştir.

600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) birinci deformasyon basamağı sonrası $10^6$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 180 MPa iken, ikinci deformasyon basamağı sonrası 198 MPa'a, üçüncü deformasyon basamağı sonrası 200 MPa'a ve dördüncü deformasyon basamağı sonrası 230 MPa'a yükselmiştir.

700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) birinci deformasyon basamağı sonrası $10^6$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 186 MPa iken, ikinci deformasyon basamağı sonrası 206 MPa'a yükselirken, üçüncü deformasyon basamağı sonrası 202 MPa'a düşmüş, dördüncü deformasyon basamağı sonrası 232 MPa'a yükselmiştir.

600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Z alaşımının (numune 1Zr) birinci deformasyon sonrası $10^6$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 188 MPa iken, ikinci deformasyon basamağı sonrası 210 MPa'a yükselirken, üçüncü deformasyon basamağı sonrası 208 MPa'a düşmüş, dördüncü deformasyon basamağı sonrası 240 MPa'a yükselmiştir.

700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Z alaşımının (numune 2Zr) birinci deformasyon basamağı sonrası $10^6$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değeri 192 MPa iken, ikinci deformasyon basamağı sonrası 214 MPa'a yükselmiş, üçüncü deformasyon basamağı sonrası 210 MPa'a düşerken, dördüncü deformasyon basamağı sonrası 250 MPa'a yükselmiştir.

# BÖLÜM 4

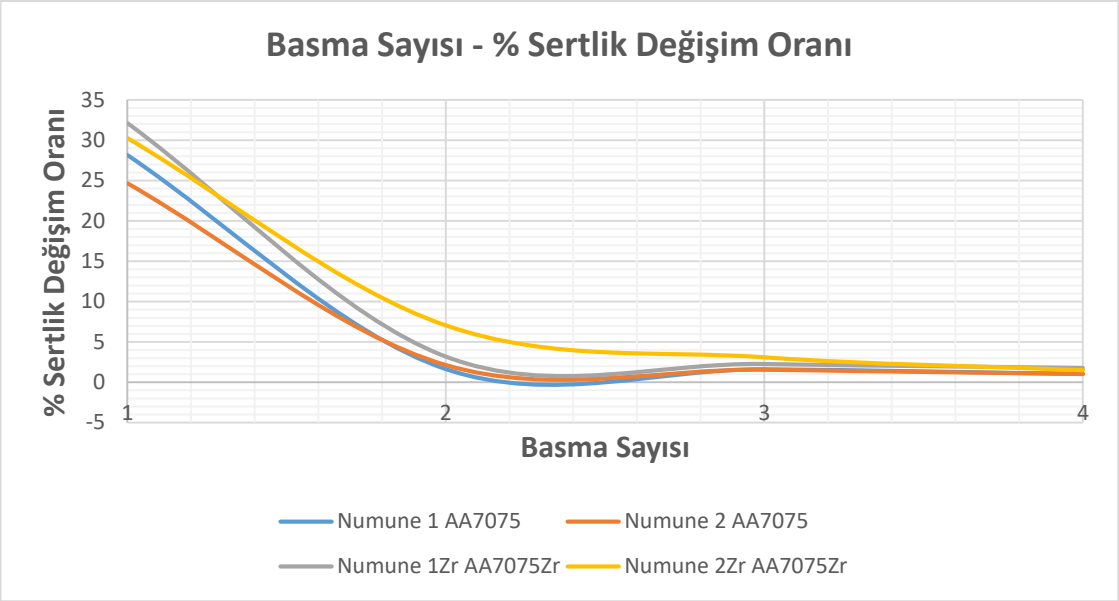
# DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

## 4.1. Sertlik Deneyi Analiz Sonuçları

600 ºC ile 700 ºC sıcaklıklarda ve 750 MPa basınçta 4 saat süre sinterleme ile üretilen AA7075 alaşımlarının ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımlarının sertlik değerleri ilk basamak deformasyon işleminden sonra yüksek oranda artmıştır. Daha sonraki işlem basamaklarında sertlik artışları azalan oranda artış göstermiş ve artış yatay bir seyre ulaşınca işlem basamağı sonlandırılmıştır.

Çizelge 4.1. Numunelere uygulanan deformasyon ile % sertlik değerlerinin değişimi.

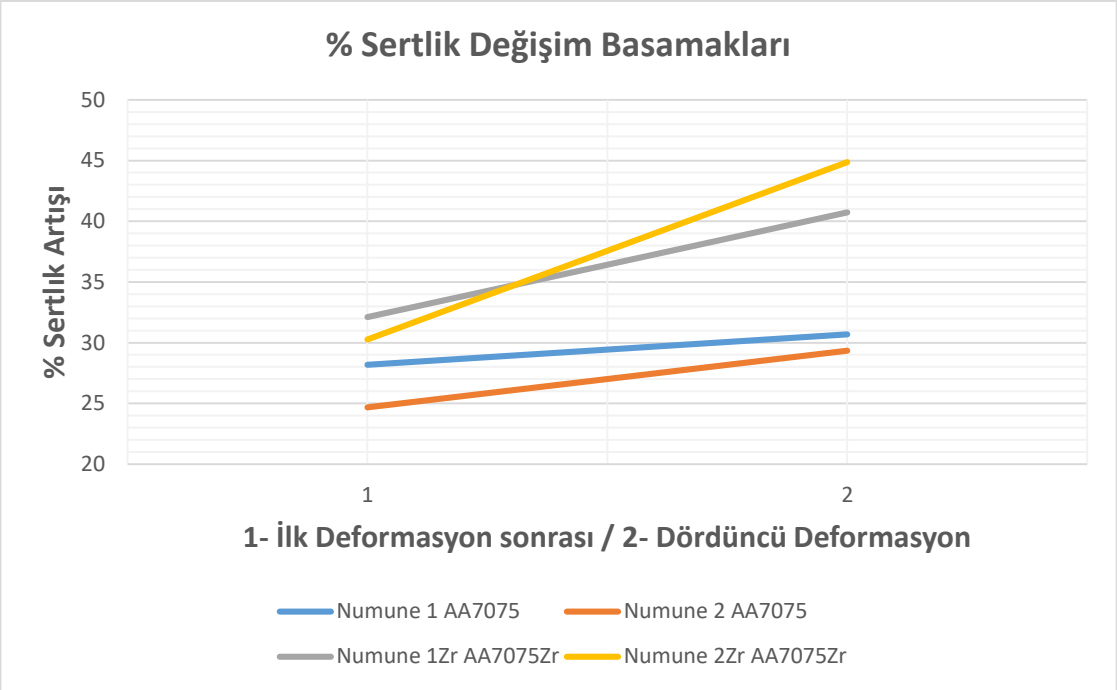
| **Numune No** | **Birinci Basma** | **İkinci Basma** | **Üçüncü Basma** | **Dördüncü Basma** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1** | 28,17 | 1,65 | 1,62 | 1,05 |
| **Numune 2** | 24,67 | 2,14 | 1,57 | 1,03 |
| **Numune 1Zr** | 32,1 | 3,17 | 2,26 | 1,77 |
| **Numune 2Zr** | 30,27 | 7,05 | 3,10 | 1,50 |




Şekil 4.1. Numunelere uygulanan deformasyon ile % sertlik değerlerinin değişimi grafiği.

Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan ilk deformasyon ile dördüncü deformasyon işlemi ile % sertlik değerlerinin değişimi.

| **Numune No** | **İlk Basamak Deformasyon % Sertlik Artış** | **Dördüncü Basmak Deformasyon % Sertlik Artışı** |
|---|---|---|
| **Numune 1** | 28,17 | 33,80 |
| **Numune 2** | 24,67 | 30,67 |
| **Numune 1Zr** | 32,10 | 41,98 |
| **Numune 2Zr** | 30,27 | 45,95 |




Şekil 4.2. Numunelere uygulanan ilk deformasyon ile dördüncü deformasyon işlemi ile % sertlik değerlerinin değişimi grafiği.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) ilk deformasyon işlem basamağı sonrasında ve dördüncü deformasyon işlem basamağı sonrasında % sertlik artış oranlarının diğer numunelere göre yüksek oranda artması, Zr metalinin sünek bir metal olması ve sinterleme sıcaklığının AA7075 alaşımının erime sıcaklığının üzerinde bir değer olması ile açıklanabilir.

% 1 Zr içeren AA7075Zr (numue 1Zr ve numune 2Zr) alaşımlarının Zr metali içermeyen AA7075 alaşımlarına (numune 1 ve numnune 2) kıyasla ilk deformasyon işlem basamağı sonrası ve dördüncü deformasyon işlem basamağı sonrasında % sertlik artış oranlarının diğer numunelere göre daha yüksek olarak bulunmuş olmasını da Zr metalinin sünek bir yapıya sahip olması ile açıklanabilir.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) sertlik artış oranının 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) sertlik artış oranından yüksek olması AA7075 alaşımının erime sıcaklığının 700 $^{o}$C'nin altında olması ile açıklanabilir.

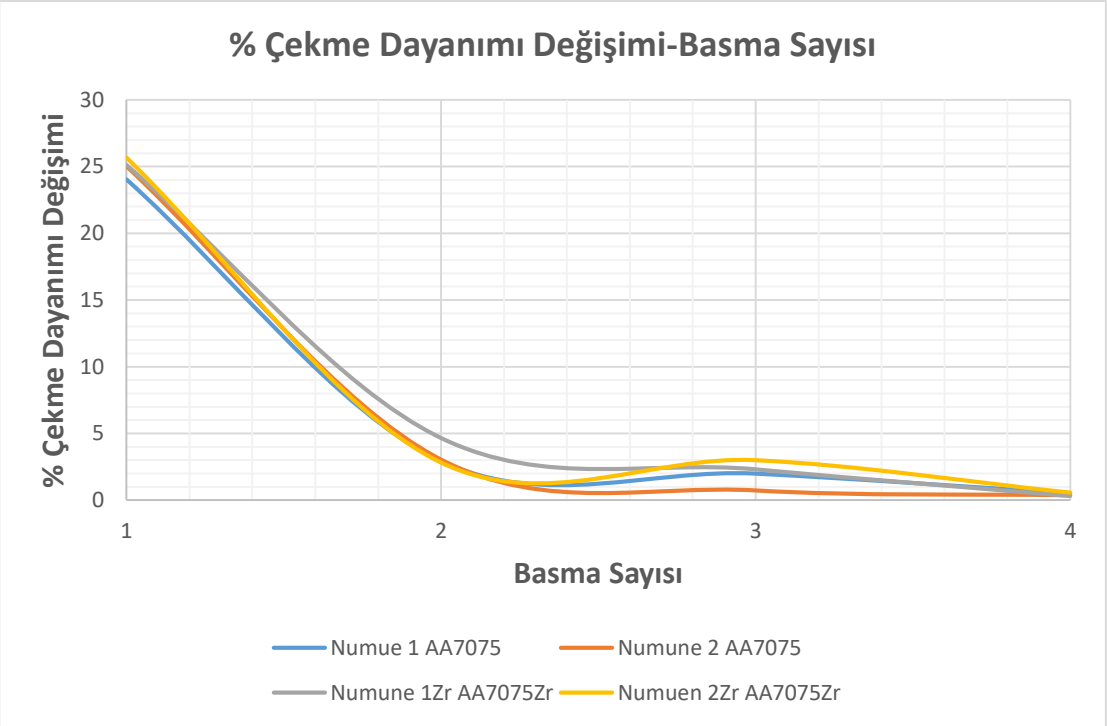
## 4.2. Çekme Deneyi Analiz Sonuçları

Oda sıcaklığında yapılan çekme deneylerinde, mukavemetin basma sayısının artması ile arttığı fakat hasara göre uzamanın (kopma uzaması) ilk basmadan sonra büyük bir azalma oranı gösterirken, diğer basma işlemlerinde ise azalan oranlarda değişim göstermektedir (Horita vd.2001).

Çekme deneylerinde bulunan tüm sonuçlar yapılan çalışma ile uygunluk göstermektedir.

Çizelge 4.3. Numunelere uygulanan deformasyon ile % çekme dayanımını değişimleri.

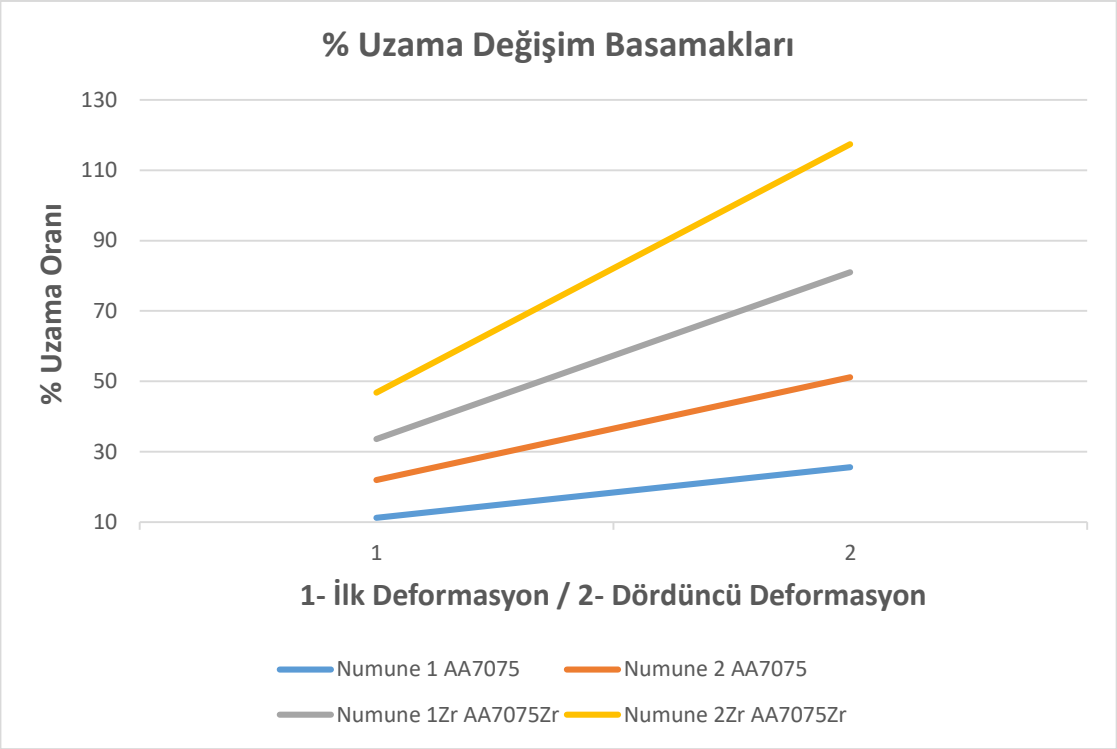
| **Numune No** | **Birinci Basma** | **İkinci Basma** | **Üçüncü Basma** | **Dördüncü Basma** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1** | 24,04 | 2,93 | 1,99 | 0,52 |
| **Numune 2** | 25,02 | 3,04 | 0,73 | 0,37 |
| **Numune 1Zr** | 25,12 | 4,65 | 2,3 | 0,3 |
| **Numune 2Zr** | 25,66 | 2,81 | 2,99 | 0,56 |




Şekil 4.3.Numunelere uygulanan deformasyon ile % çekme dayanımı değişim grafiği.

Çizelge 4.4. İlk deformasyon basamağı sonrası ve dördüncü deformasyon basamağı sonrası % uzama oranları değişimi.

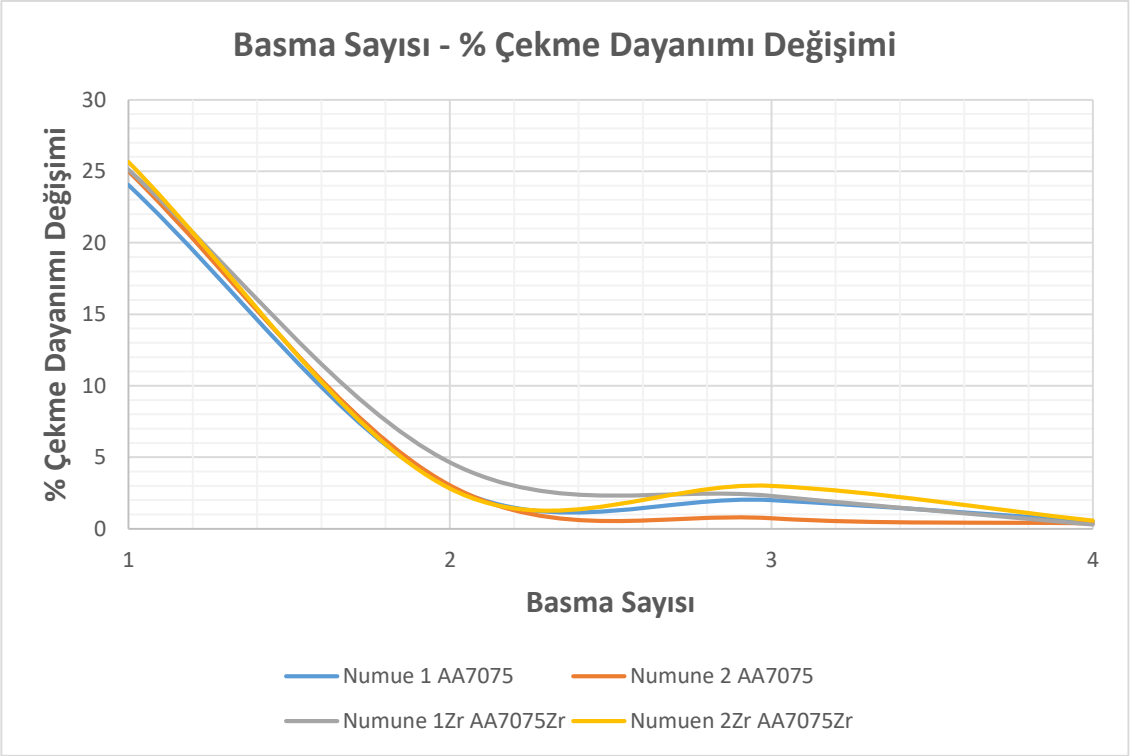
| **Numune No** | **İlk Basamak Deformasyon % Uzama Oranı** | **Dördüncü Basamak Deformasyon % Uzama Oranı** |
|---|---|---|
| **Numune 1** | 11,2 | 25,6 |
| **Numune 2** | 10,8 | 25,6 |
| **Numune 1Zr** | 11,6 | 29,8 |
| **Numune 2Zr** | 13,2 | 36,4 |




Şekil 4.4. İlk deformasyon basamağı ve dördüncü deformasyon basamağı sonrası % uzama oranları değişim grafiği.

Çizelge 4.5. Numunelere uygulanan deformasyon işlem basamağı ile % çekme dayanımı değişimi.

| **Numune No** | **Birinci Basma** | **İkinci Basma** | **Üçüncü Basma** | **Dördüncü Basma** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1** | 24,04 | 2,93 | 1,99 | 0,52 |
| **Numune 2** | 25,02 | 3,04 | 0,73 | 0,37 |
| **Numune 1Zr** | 25,12 | 4,65 | 2,30 | 0,30 |
| **Numune 2Zr** | 25,66 | 2,81 | 2,99 | 0,56 |



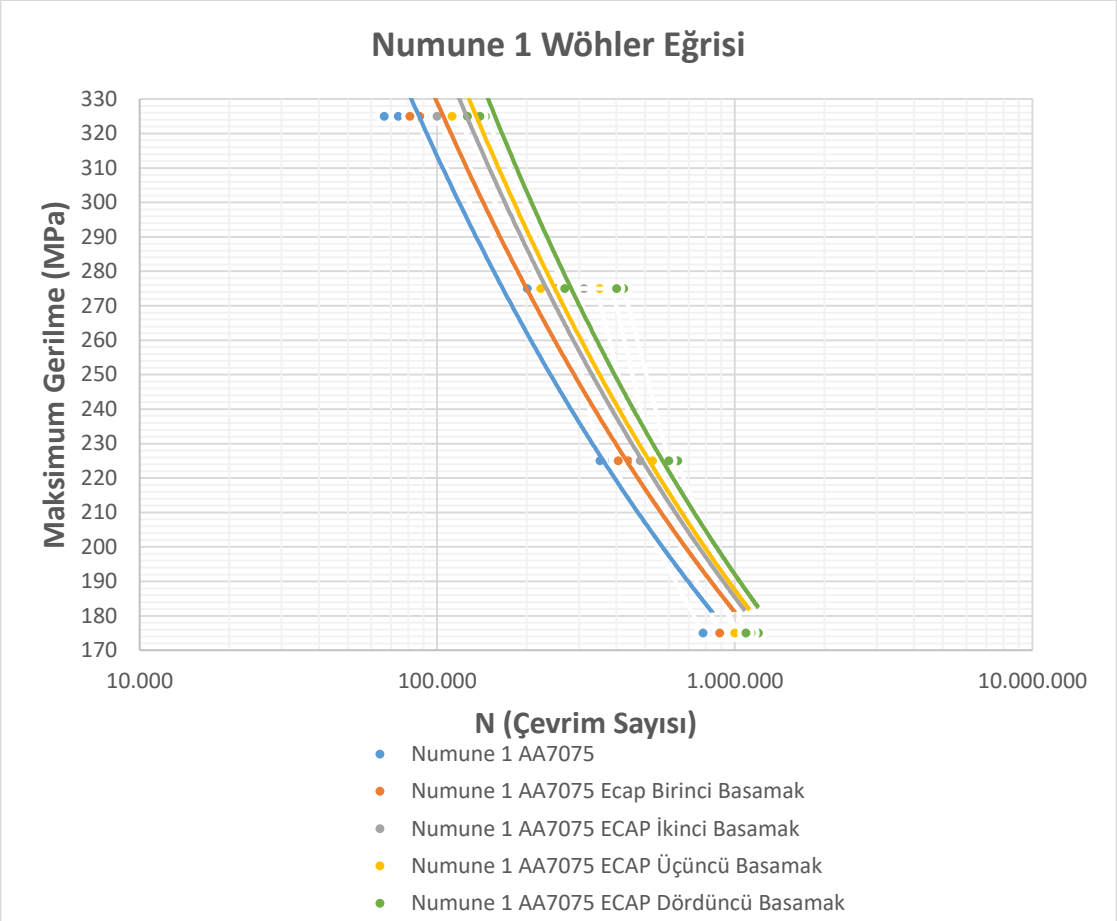

Şekil 4.5. Numunelere uygulanan deformasyon işlem basamağı ile % çekme dayanımı değişimi grafiği.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) ilk deformasyon işlem basamağı sonrasında ve dördüncü deformasyon işlem basamağı sonrasında % uzama artış oranlarının diğer numunelere göre yüksek oranda artması Zr metalinin sünek bir metal olması ve sinterleme sıcaklığının AA7075 alaşımının erime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta yapılmış olması ile açıklanabilir.

% 1 Zr içeren AA7075Zr (numue 1Zr ve numune 2Zr) alaşımlarının Zr metali içermeyen AA7075 alaşımlarına (numune 1 ve numune 2) kıyasla ilk deformasyon işlem basamağı sonrası ve dördüncü deformasyon işlem basamağı sonrasında % uzama artış oranlarının diğer numunelere göre daha yüksek olarak bulunmuş olmasını da Zr metalinin sünek bir yapıya sahip olması ile açıklayabiliriz.

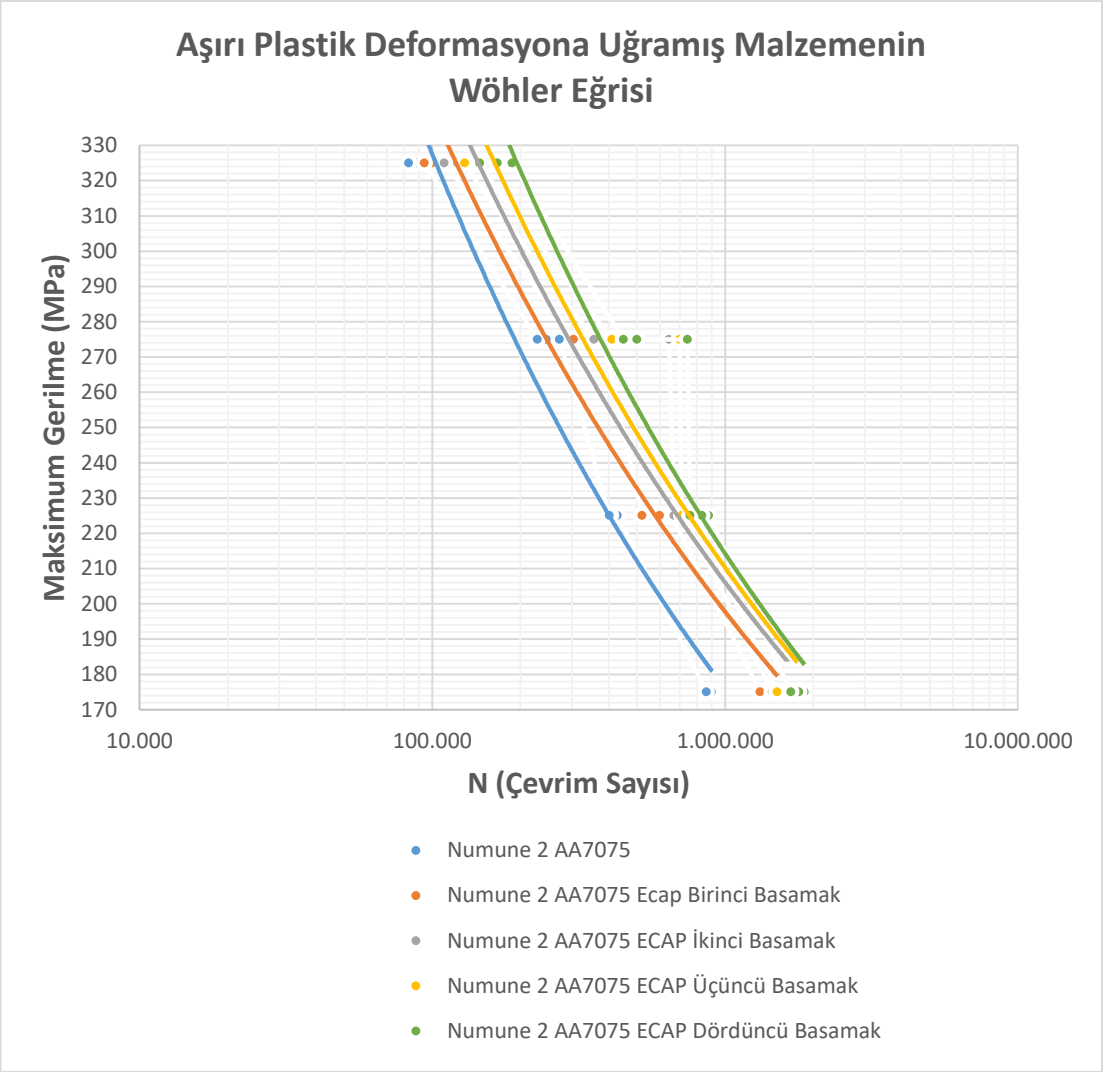
600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımlarının (numune 1 ve numune 2) uzama değişim oranları arasında çok az farklılıklar olması sünek bir yapının oluşması için alaşıma sünek bir elementin ilave edilmesinin sinterleme sıcaklıklarından daha etkili olabileceği izlenimini yaratmaktadır.

## 4.3. Yorulma Deneyi Analiz Sonuçları



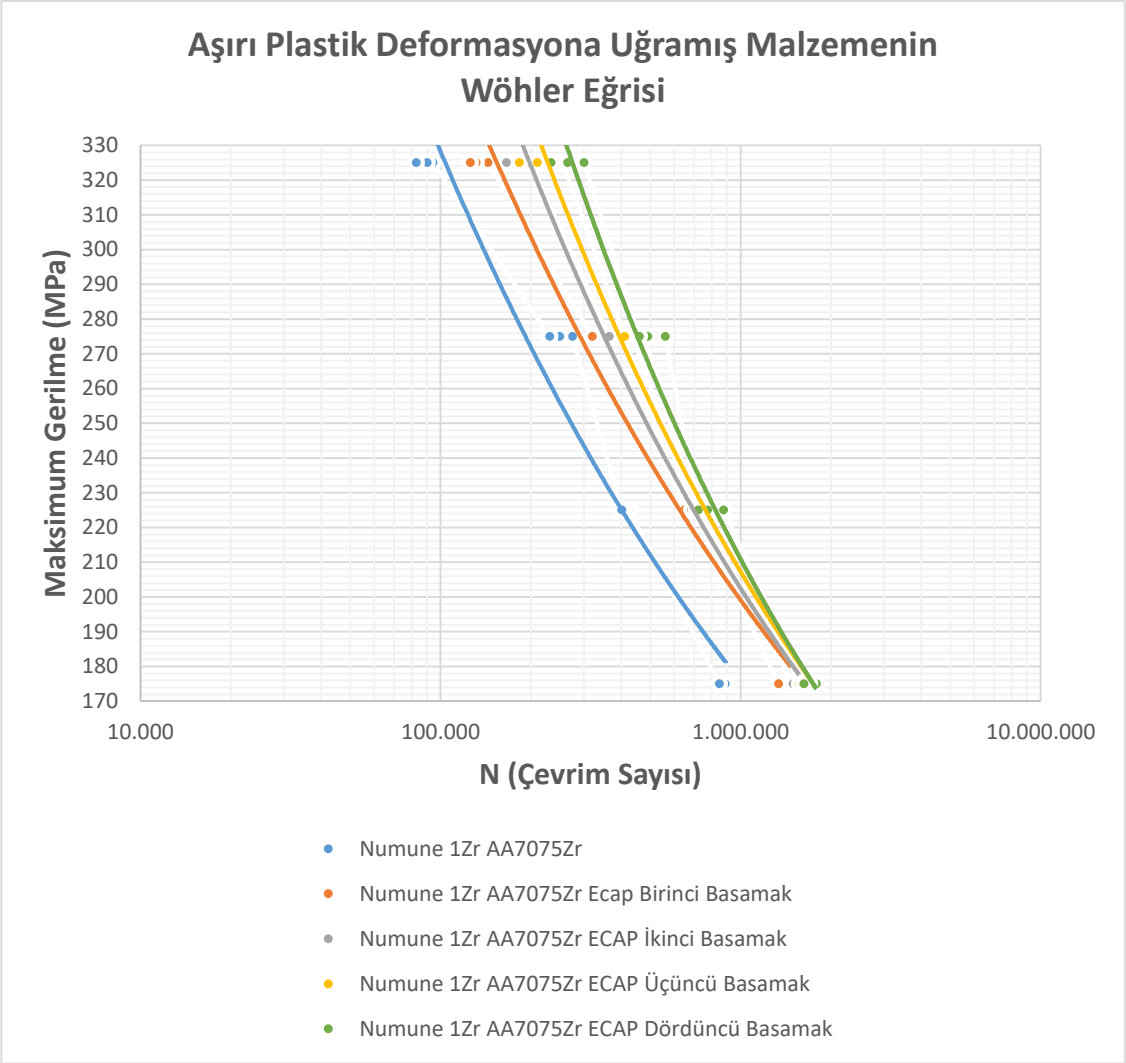

Şekil 4.6. 600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi.

600 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 1) uygulanan her bir basamak ECAP işleminden sonra çevrim sayıları artmıştır.



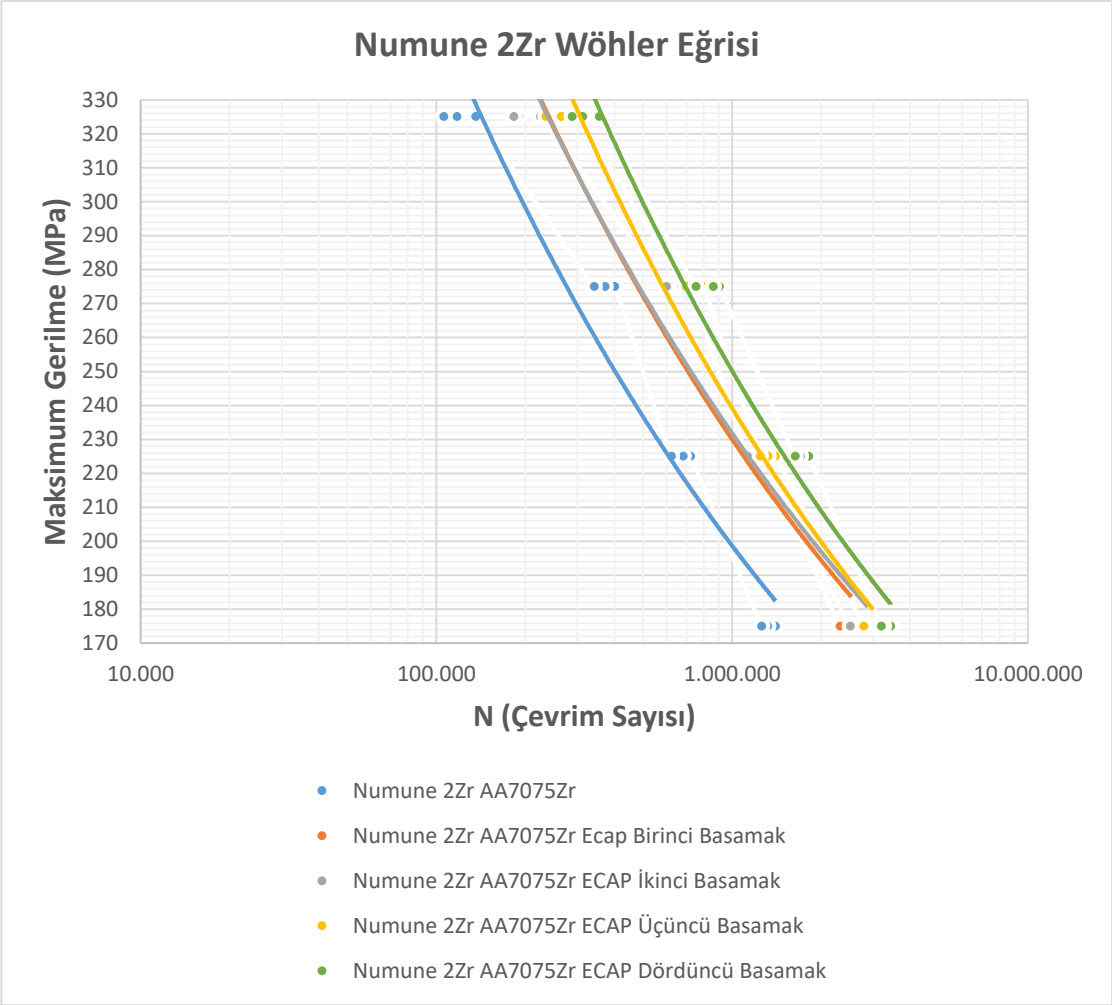

Şekil 4.7. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi.

700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımına (numune 2) uygulanan her bir basamak ECAP işleminden sonra çevrim sayıları artarken 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 1) alaşımıyla benzer davranışlar göstermiştir.




Şekil 4.8. 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi.

600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımına (numune 1Zr) uygulanan ECAP işlem basamakları artmasına rağmen çevrim sayılarında belirgin artışlar görülmemektedir. Buradan yola çıkarak, alüminyum alaşımına uygulanan ısıl işlemin, alüminyum alaşımının erime sıcaklığından düşük bir değerde mukavemeti yüksek elementin ilave edilmiş olması, alaşımın ilk ECAP işleminden sonra maksimum gerilme değerini artırırken, diğer işlem basamaklarının ise beklenen oranda maksimum gerilme değerinde artış sağlamadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

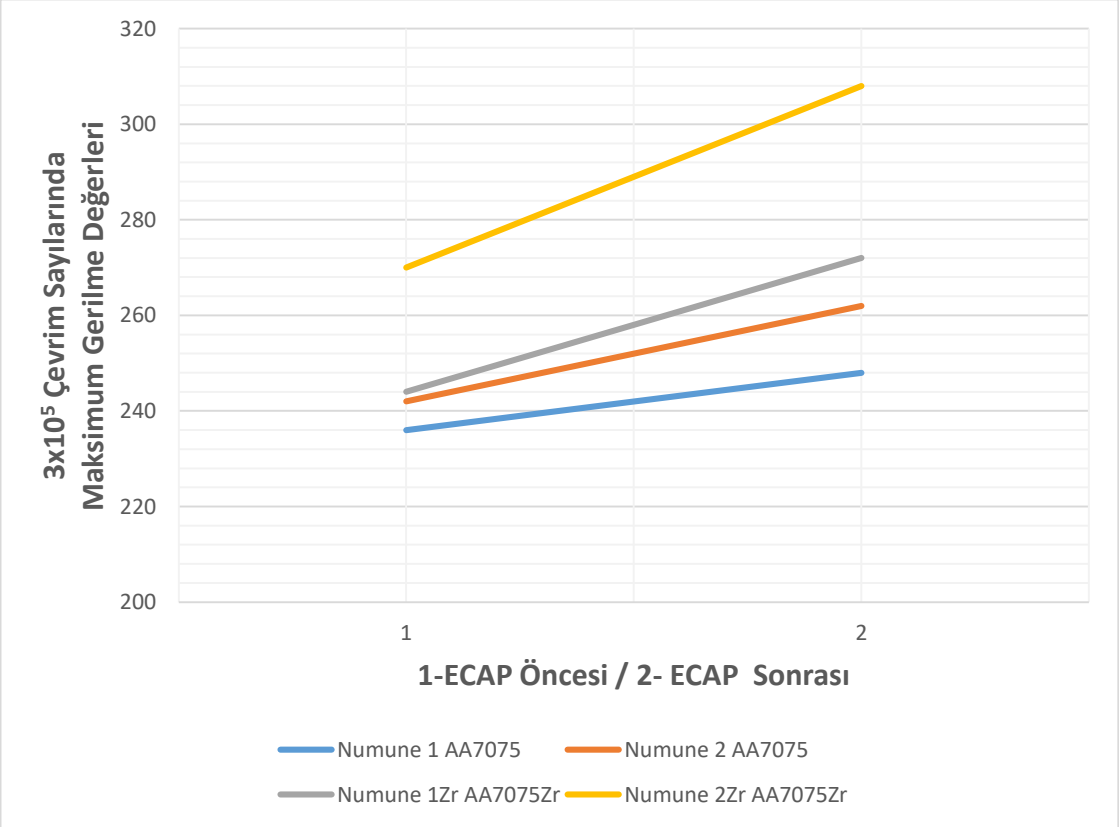



Şekil 4.9. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) tüm işlem basamaklarındaki Wöhler Eğrisi.

700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımına (numune 2Zr) uygulanan her bir basamak ECAP işleminden sonra çevrim sayıları artmıştır. 700 ºC sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 (numune 2) alaşımıyla benzer davranışlar göstermiştir.

Çizelge 4.6. ECAP öncesi ve ECAP sonrasında $3x10^5$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin değişimi.

| Numune No | ECAP Öncesi $3x10^5$ Çevrim Sayılarında Maksimum Gerilme Değeri | ECAP Sonrası $3x10^5$ Çevrim Sayılarında Maksimum Gerilme Değeri |
|---|---|---|
| **Numune 1** | 236 | 248 |
| **Numune 2** | 242 | 262 |
| **Numune 1Zr** | 244 | 272 |
| **Numune 2Zr** | 270 | 308 |

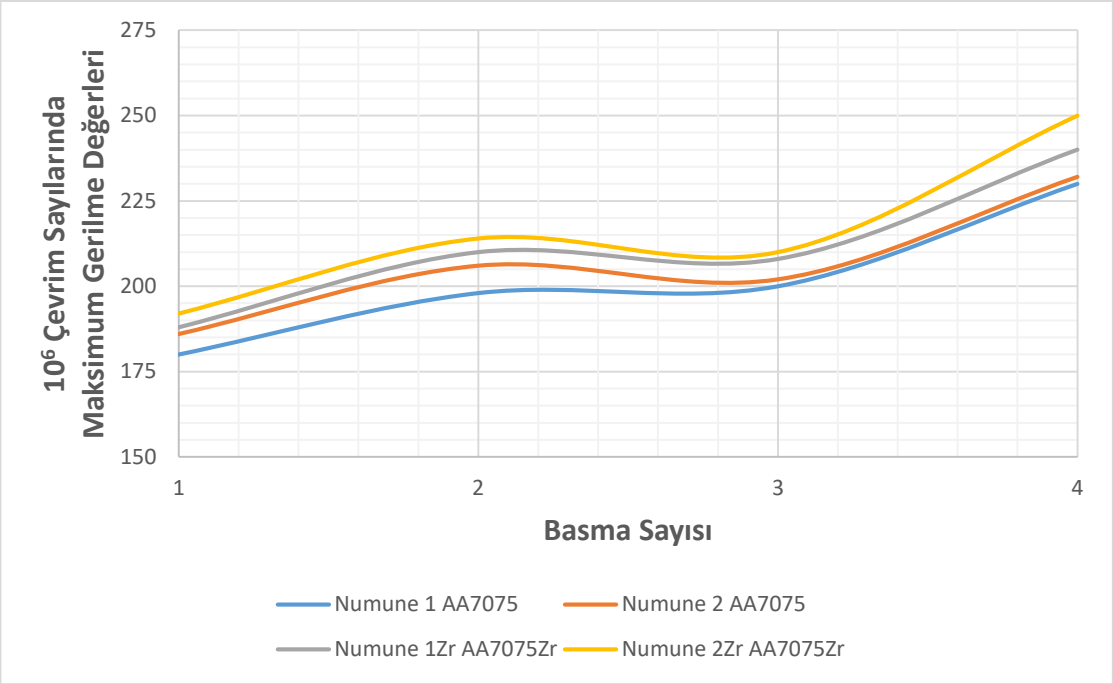



Şekil 4.10. ECAP öncesi ve ECAP sonrasında $3x10^5$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin değişim grafiği.

600 $^{o}$C ile 700 $^{o}$C sıcaklıklarda ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının yorulma deney sonuçları analiz edildiğinde; 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 1), 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (nunune 2) ve 600 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) ECAP işlemi öncesi ve ECAP işlemi sonrası $3x10^5$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin benzer oranlarda artış gösterdiği görülmüştür. 700 $^{o}$C sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) ECAP işlemi sonrası diğer numunelerin maksimum gerilme değerlerinin artış oranlarından daha yüksek oranda artış gösterdiği görülmüştür.

Çizelge 4.7. $10^6$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin basma sayısı ile değişimleri.

| **Numune No** | **Birinci Basma** | **İkinci Basma** | **Üçüncü Basma** | **Dördüncü Basma** |
|---|---|---|---|---|
| **Numune 1** | 180 | 198 | 200 | 230 |
| **Numune 2** | 186 | 206 | 202 | 232 |
| **Numune 1Zr** | 188 | 210 | 208 | 240 |
| **Numune 2Zr** | 192 | 214 | 210 | 250 |




Şekil 4.11. $10^6$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerlerinin basma sayısı ile değişim grafiği.

600 $^oC$ ile 700 $^oC$ sıcaklıklarda ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının ve ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının yorulma deney sonuçları analiz edildiğinde; 700 $^oC$ sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen AA7075 alaşımının (numune 2), 600 $^oC$ sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 1Zr) ve 700 $^oC$ sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) üçüncü deformasyon basamağı sonrası $10^6$ çevrim sayısına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değerlerinde azalma görülmüştür. Üçüncü basamak deformasyon işlem basamağı sonrası $10^6$ çevrim sayılarına wöhler grafiğinde karşılık gelen maksimum gerilme değerlerindeki azalmanın numunelerin mikroyapısal ve işlemsel hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

700 $^oC$ sıcaklık ve 750 MPa basınçta 4 saat süre ile sinterlenen ağırlıkça % 1 Zr içeren AA7075Zr alaşımının (numune 2Zr) $10^6$ çevrim sayılarında maksimum gerilme değerinin ve değişim oranlarının diğer numunelerden (numune 1, numune 2 ve numune 1Zr) yüksek olması, Zr metalinin AA7075Zr alaşımına mukavemet kazandırması ve sinterleme sıcaklığının AA7075 alaşımın erime sıcaklığının üzerindeki bir değerde uygulanması ile açıklanabilir.

# KAYNAKLAR


Ahn, B., Newbery, A. P., Lavernia, E. J., & Nutt, S. R. (2007). Effect of Degassing Temperature on the Microstructure of a Nanocrystalline Al–Mg Alloy. *Materials Science and Engineering: A, 463*(1-2), 61-66. doi:10.1016/j.msea.2006.07.158

Akinrinlola, B., Gauvin, R., & Brochu, M. (2012). Improving the Mechanical Reliability of Cryomilled Al–Mg Alloy Using a Two-Stage Spark Plasma Sintering Cycle. *Scripta Materialia, 66*(7), 455-458. doi:10.1016/j.scriptamat.2011.12.014

Alsaran, A. (1997). Kaynaklı Parçaların Yorulması. *Yüksek Lisans Tezi*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Avcı, A. U. (1993). Toz Metalurjisi Ders Notları. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi.

Aydemir, B. (2009). Sertlik Ölçüm Yöntemlerinin Bugünü ve Yarını. *Metal Dünyası*(189), 2.

Aydemir, B. (2015). Çekme Deneyi Standartlarındaki Çekme Hızı Farkları ve Etkileri. *Metal Dünyası Dergisi*(270).

Azabou, M., Khitouni, M., & Kolsi, A. (2009). Characterization of Nanocrystalline Al-Based Alloy Produced by Mechanical Milling Followed by Cold-Pressing Consolidation. *Materials Characterization, 60*(6), 499-505. doi:10.1016/j.matchar.2008.12.016

Babayev, Y., Karadeniz , S., & Memmedov , A. (2005). Fe-Cu Karışımı Toz Malzemenin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. *3. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, (s. 127-130). Konya.

Barashkova, T. (2006). *Research of the Effect of Correlation at the Measurement of Alternating Voltage* .

Bishop, D. P., Kipouros, G. J., & Caley , W. F. (1997). Diffusion-Based Microalloying Via Reaction Sintering. *Journal of Materials Science, 32*, 2353–2358. doi:10.1023/A:1018592720990

Bonetti, E., Pasquini, L., & Sampaolesi, E. (1997). The İnfluence of Grain Size on the Mechanical Properties of Nanocrystalline Aluminium. *Nanostructured Materials, 9*(1-8), 611-614. doi:10.1016/S0965-9773(97)00137-2

Calka, A., Kaczmarek , W., & Williams , J. S. (1993). Extended Solid Solubility in Ball-Milled Al-Mg Alloys. *Journal of Materials Science, 28*, 15-18. doi:10.1007/BF00349027

Chinh, N. Q., Gubicza, J., Czeppe, T., Lendvai, J., Xu, C., Valiev, R. Z., & Langdon, T. G. (2009). Developing a Strategy for the Processing of Age-Hardenable Alloys by ECAP at Room Temperature. *Materials Science and Engineering: A, 516*(1-2), 248-252. doi:10.1016/j.msea.2009.03.049

Choi, J. H., Moon, K., Kim, J. K., Oh, M. Y., Suh, H. J., & Kım, S. J. (2001). Consolidation Behavior of Nanocrystalline Al–5at.%Ti Alloys Synthesized by Cryogenic Milling. *Journal of Alloys and Compounds, 315*(1-2), 178-186. doi:10.1016/S0925-8388(00)01213-5

Das, S. K., & Davis, L. A. (1988). High Performance Aerospace Alloys Via Rapid Solidification Processing. *Materials Science and Engineering, 98*, 1-12. doi:10.1016/0025-5416(88)90116-4

Davis, J. R. (2001). *Alloying: Understanding the Basics.* ASM International.

Dedov, A. (2007, December). Assessment of Metal Condition and Remaining Life of In-service Power Plant Components Operating at High Temperature. *Doctora Thesis*. Tallinn University of Technology.

Eckert, J., Holzer, J. C., Krill III, C. E., & Johnson, W. L. (1992). Structural and Thermodynamic Properties of Nanocrystalline Fcc Metals Prepared By Mechanical Attrition. *Journal of Materials Research, 7*(7), 1751 - 1761. doi:10.1557/JMR.1992.1751

Eldesouky, A., Johnsson, M., Svengren, H., Attallah, M. M., & Salem, H. G. (2014). Effect of Grain Size Reduction of AA2124 Aluminum Alloy Ppowder Compacted by Spark Plasma Sintering. *Journal of Alloys and Compounds, 609*, 215-221. doi:10.1016/j.jallcom.2014.04.136

Enayati, H. M. (2017). Nanocrystallization of Al Powder by Cryomilling Process. *34*, 207-212. doi:10.14356/kona.2017006

Estrin, Y., & Vinogradov, A. (2013). Extreme Grain Refinement by Severe Plastic Deformation: A Wealth of Challenging Science. *Acta Materialia, 61*(3), 782-817. doi:10.1016/j.actamat.2012.10.038

Federçenko , İ. M., & Pugina, L. İ. (1980). Kompoziçionnıe Speçennıe Antifrikçionnıe. Kiev.

Fujikawa, S. I. (1997). Impurity Diffusion of Scandium in Aluminium. *Defect and Diffusion Forum, 143-147*, 115-120.

Galano, M. E., Audebert, F., Garcia-Escorial, A., & Stone, I. (2009). Nanoquasicrystalline Al–Fe–Cr-Based Alloys. Part II. Mechanical Properties. *Acta Materialia, 57*(17), 5120–5130. doi:10.1016/j.actamat.2009.07.009

Han, B. O., Lavernia, E. J., Lee, Z., Nutt, S., & Witkin , D. (2005). Deformation Behavior of Bimodal Nanostructured 5083 Al Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A, 36*(4), 957-965. doi:10.1007/s11661-005-0289-7

Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (2001). Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Processing Technology, 117*(3), 288-292. doi:10.1016/S0924-0136(01)00783-X

Hussainov, M. (2005). Effect of Solid Particles on Turbulence of Gas in Two-Phase Flows. *Tallinn University of Technology Press*.

Hussin, M. A., Sinha, P. K., & Darbari, A. S. (2014). Design and Analysıs of Connecting Rod Usıng. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), 5*(10), 57-69.

Ibrahim, M. F., Garza-Elizondo, G. H., Samuel, A. M., & Samuel, F. H. (2016). Optimizing the Heat Treatment of High-Strength 7075-Type Wrought Alloys: A Metallographic Study. *Inter Metalcast, 10*, 264–275. doi:10.1007/s40962-016-0038-2

Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (1998). The Process of Grain Refinement in Equal-Channel Angular Pressing. *Acta Materialia, 46*(9), 3317-3331. doi:10.1016/S1359-6454(97)00494-1

Kaljas, F. (2005, May). Synergy-Based Approach to Design of the Interdisciplinary Systems. *Doctora Thesis*. Tallinn: Tallinn Unıversity of Tecnology.

Kaluç, E., & Taban, E. (2005). Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Standard Gösterimleri. *MakinaTEK*(90), 178-185.

Kartushinsky, A. I., Krupensky, I. A., Tisler, S. V., Hussainov , M. T., & Shcheglov , I. N. (2009). Deposition of Solid Particles in Laminar Boundary Layer on a Flat Plate. *High Temperature, 47*(892). doi:10.1134/S0018151X09060170

Kelly, A., & Nicholson, R. B. (1972). Strengthening Methods in Crystals. *Progress of Materials Science, 41*(6), 652. doi:10.11470/oubutsu1932.41.652

Khan, A. S., Farrokh, B., & Takacs, L. (2008). Effect of Grain Refinement on Mechanical Properties of Ball-Milled Bulk Aluminum. *Materials Science and Engineering: A, 489*(1-2), 77-84. doi:10.1557/JMR.1992.1751

Knipling, K. E., Dunand, D. C., & Seidman, D. N. (2008). Precipitation Evolution in Al–Zr and Al–Zr–Ti Alloys During İsothermal Aging at 375–425 °C. *Acta Materialia, 56*(1), 114-127.

Kollo, L., Pirso, J., & Juhani, K. (2007, January). Effect of Sinter/HIP Technology on Properties of TiC-NiMo Cermets. *Materials Science Forum, 534-536*, 1169-1172. doi:10.4028

Kopas, P., Blatnický, M., Sága, M., & Vaško, M. (2017). Identification Of Mechanical Properties Of Weld Joints Of AlMgSi07.F25 Aluminium Alloy. *Metalurgija, 56*(1-2), 99-102.

Kurt, A., Boz, M., & Özdemir, M. (2004). Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19*(2), 191 - 197.

Lavernia, E. J., Ayers, J. D., & Srivatsan, T. S. (1992). Rapid Solidification Processing With Specific Application to Aluminium Alloys. *International Materials Reviews, 37*(1), 1-44. doi:10.1179/imr.1992.37.1.1

Lavernia, E., Rai, G., & Grant, N. J. (1986). Rapid Solidification Processing of 7XXX Aluminium Alloys: A Review. *Materials Science and Engineering, 79*(2), 211-221. doi:10.1016/0025-5416(86)90406-4

Lee, Z., Nutt, S. R., Rodriguez, R., Hayes, R. W., & Lavernia , E. J. (2003). Microstructural Evolution and Deformation of Cryomilled Nanocrystalline Al-Ti-Cu Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A, 34*(7), 1473–1481. doi:10.1007/s11661-003-0259-x

Letunovitš, S. (2003). *Tribology of Fine-Grained Cermets.*

Liddicoat, P. V., Liao, X.-Z., Zhao, Y., Zhu, Y., Murashkin, M. Y., Lavernia, E. J., . . . Ringer, S. P. (2010). Nanostructural Hierarchy İncreases the Strength of Aluminium Alloys. *Nature Communications, 1*(63). doi:10.1038/ncomms1062

Málek, P., Erlebach, J., Cieslar, M., & Knoop, F. M. (1996). Superplasticity in an Al–Zn–Mg–Cu–Zr Alloy Prepared by Power Metallurgy. *Physica Status Solidi, 157*(2), 213-531. doi:10.1002/pssa.2211570209

Melo, M. T. (1999). Statistical Analysis of Metal Scrap Generation: The Case of Aluminium in Germany. *Resources, Conservation and Recycling, 2*(26), 91-113. doi:10.1016/S0921-3449(98)00077-9

Mittemeijer, E. J. (2021). *Fundamentals of Materials Science.* Berlin.

Mondolfo, L. F. (1999). *Aluminum Alloys: Structure and Properties.* Butterworths.

Nabarro, F. R., & Duesbery, M. S. (2002). *Dislocations in Solids.* Amsterdam, Holland: Elsevıer.

Nam, C. Y., Han, J. H., Chung, Y. H., & Shin, M. C. (2003). Effect of Precipitates on Microstructural Evolution of 7050 Al Alloy Sheet During Equal Channel Angular Rolling. *Materials Science and Engineering: A, 347*(1-2), 253-257. doi:10.1016/S0921-5093(02)00597-X

Nes, E. (1972). Precipitation of the Metastable Cubic Al3Zr-Phase in Subperitectic Al-Zr Alloys. *Acta Metallurgica, 20*(4), 499-506. doi:10.1016/0001-6160(72)90005-3

Nes, E., & Billdal, H. (1977). Non-Equilibrium Solidification of Hyperperitetic Al-Zr Alloys. *Acta Metallurgica, 25*(9), 1031-1037. doi:10.1016/0001-6160(77)90132-8

Nieh, T. G., & Wang, J. G. (2005). Hall–Petch Relationship in Nanocrystalline Ni and Be–B Alloys. *Intermetallics, 3*(3-4), 377-385. doi:10.1016/j.intermet.2004.07.029

Oleszak, D., & Shingu, P. H. (1996). Nanocrystalline Metals Prepared by Low Energy Ball Milling. *Journal of Applied Physics, 79*(6). doi:10.1063/1.361294

Ordenko , V. B. (1987). *Proizvodstvo i Primeneniya İzdeliy İz Metalliçeskix Poroikov.* Kiev.

Otto, T. (2006, August). Models for Monitoring of Technological Processes and Production Systems. *Doctora Thesis*. Tallinn: Tallinn Unıversity of Tecnology.

Peetsalu, P. (2007). Microstructural aspects of thermal sprayed WC-Co coatings and NiCr coated steels. *Doctora Thesis*. Tallinn: Tallinn University of Technology.

Penkov, I. (2001). Strength Investigation of Threaded Joints Under Static and Dynamic Loading. *Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus*.

Pihl, T. (2002). *Powder Coatings for Abrasive Wear.*

Ping, S. (1986). *Developments in Premium High-Strength Powder Metallurgy Alloys by Kaiser Aluminum.* ASTM International.

Podgurski , V. (2001). Laser ablation and thermal evaporation of thin films and structures. *Thesis for Doctoral Degree*, 39. Tallinn Technical University, Department of Materials Technology.

Rana, J. K., Sivaprahasam, D., Raju, K. S., & Sarma, V. S. (2009). Microstructure and Mechanical Properties of Nanocrystalline High Strength Al–Mg–Si (AA6061) Alloy by High Energy Ball Milling and Spark Plasma Sintering. *Materials Science and Engineering: A, 527*(1-2), 292-296. doi:10.1016/j.msea.2009.08.041

Resev , J., & Roosimölder , L. (2004). Virtual Differential as Torque Distribution Control Unit in Automotive Propulsion Systems. 4. I. Conference (Dü.), *Industrıal Engıneerıng-Innovatıon As Competıtıve Edge For Sme.* içinde Tallinn.

Robson, J. D., & Prangnell, P. B. (2001). Dispersoid Precipitation and Process Modelling in Zirconium Containing Commercial Aluminium Alloys. *Acta Materialia*, *49*(4), 599-613. doi:10.1016/S1359-6454(00)00351-7

Rokni, M. R., Widener, C. A., & Crawford, G. A. (2014). Microstructural Evolution of 7075 Al Gas Atomized Powder and High-Pressure Cold Sprayed Deposition. *Surface and Coatings Technology, 251*, 254-263. doi:10.1016/j.surfcoat.2014.04.035

Saheb, N. (2013). Spark Plasma and Microwave Sintering of Al6061 and Al2124 Alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 20*(2), 152-159. doi:10.1007/s12613-013-0707-6

Sarıtaş, S., Türker, M., & Durlu, N. (2007). Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri. *TMMD*, 2-9, 143, 233-273, 279-296.

Sasaki, T. T., Ohkubo, T., & Hono, K. (2009). Microstructure and Mechanical Properties of Bulk Nanocrystalline Al–Fe Alloy Processed by Mechanical Alloying and Spark Plasma Sintering. *Acta Materialia, 57*(12), 3529-3538. doi:10.1016/j.actamat.2009.04.012

Sergejev, F. (2007). Investigation of the fatigue mechanics aspects of PM hardmetals and cermets. *Doctora Thesis*. Tallinn University of Technology.

Srinivasan, S., Desch, P. B., & Schwarz , R. B. (1991). Metastable Phases in the Al Sub 3 X (X = Ti, Zr, and Hf) İntermetallic System. *Scripta Metallurgica, 25*(11), 2513-2516.

Stolyarov, V. V., Lapovok, R., Brodova, I. G., & Thomson, P. F. (2003). Ultrafine-Grained Al–5 wt.% Fe Alloy Processed by ECAP with Backpressure. *Materials Science and Engineering: A, 357*(1-2), 159-167. doi:10.1016/S0921-5093(03)00215-6

Suryanarayana, C., Singh, S., & Lele, S. (2013). Decomposition Behaviour of Rapidly Quenched Al–Nb Alloys–TEM Study. *Materials Science and Technology, 2*(8), 788-794. doi:10.1179/mst.1986.2.8.788

Şahin Kılavuz, F., & Şen, M. (2021). Dünyanın Zaman Kapsülü: Zirkon. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 32*, 25-39.

Şen, N., & Kurgan, N. (2015). Sac Metal Malzemelerin Ilık Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirme Prosesinde Malzeme Karekterizasyonu. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3*(2), 663-674.

Tähemaa, T., Kaljas, F., & Reedik, V. (2002). Assurance of Synergy and Competitive Reliability at Mechatronic Systems Design. *IFAC Proceedings Volumes, 35*(2), 797-802. doi:10.1016/S1474-6670(17)34037-5

Tang, F., Hagiwara, M., & Schoenung, J. M. (2005). Formation of Coarse-Grained İnter-Particle Regions During Hot İsostatic Pressing of Nanocrystalline Powder. *Scripta Materialia, 53*(6), 619-624. doi:10.1016/j.scriptamat.2005.05.034

Thümmler, F., & Oberacker, R. (1993). *Introduction to Powder Metallurgy*. London: The Instıtute of Materials.

Tongsri, R., Dashwood, R., & Mcshane, H. (2004). Microstructure and Solidification of Al-Fe-(V, Si) Alloy Powders. *ScienceAsia, 30*, 33-41.

Ünlü, B. S., Kurgan, N., & Yılmaz, S. S. (2009). Toz Metal Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri. *Mühendis ve Makine, 50*, 11-19.

Veınthal, R. (2005, Kasım). Characterization and Modelling of Erosion Wear of Powder Composite Materials and Coatings. *Doctoral Thesis*. Tallinn: Tallinn Unıversity of Technology .

Weiland, H., & Cheong, S. W. (2007). The Role of Zirconium Additions in Recrystallization of Aluminum Alloys. *Materials Science Forum, 558-559*, 383-387.

Wiskel, J. B., Navel, K., Henein, H., & Maire, E. (2002). Solidification Study of Aluminum Alloys Using Impulse Atomization: Part ii. Effect of Cooling Rate on Microstructure. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science, 41*(2), 193-204. doi:10.1179/cmq.2002.41.1.97

Yavuz, F. A. (2007). Elektrik Deşarj Yöntemi ile Elde Edilen Yüzeylerde Plastik Deformasyonun Yorulma Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. *Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*. Bursa: Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ye, J., Han, B. Q., Lee, Z., Ahn, B., Nutt, S. R., & Schoenung, J. M. (2005). A Tri-Modal Aluminum Based Composite with Super-High Strength. *Scripta Materialia, 53*(5), 481-486. doi:10.1016/j.scriptamat.2005.05.004

Yu, H., Tieu, A. K., Lu, C., & Kong, C. (2014). Abnormally High Residual Dislocation Density in Pure Aluminum After Al/Ti/Al Laminate Annealing for Seven Days. *Philosophical Magazine Letters, 94*(11), 732-740. doi:10.1080/09500839.2014.971902

Yurdakul, M., Özbay, O., & İç, Y. (2002). Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17*(2), 1-23.

Zhao, Y. H., Liao, X. Z., Jin, Z., Valiev, R. Z., & Zhu, Y. T. (2004). Microstructures and Mechanical Properties of Ultrafine Grained 7075 Al Alloy Processed by ECAP and Their Evolutions During Annealing. *Acta Materialia, 52*(15), 4589-4599. doi:10.1016/j.actamat.2004.06.017

Zhou, F., Lee, J., & Lavernia, E. J. (2001). Grain Growth Kinetics of a Mechanically Milled Nanocrystalline Al. *Scripta Materialia, 44*(8-9), Scripta Materialia. doi:10.1016/S1359-6462(01)00826-0

Zolotorevsky, V. S., Belov, N. A., & Glazoff, M. V. (2007). *Casting Aluminum Alloys.* Elsevıer.

# ÖZGEÇMİŞ

Cem MISIRLI, 1979 yılında Edirne'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Edirne'de tamamladıktan sonra 1997 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümüne başladı ve 2003 yılında tamamlayıp mezun oldu. 2011 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans derecesi aldıktan sonra 2015 yılında doktora eğitimine başladı. 2015 yılından beri Trakya Üniversitesi Rektörlüğü bünyesinde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.