

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**1050 VE 8006 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ  
DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME  
DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Met. Müh. Ergin DOĞAN**

**Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : MALZEME**

**ŞUBAT 2006**

**1050 VE 8006 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ  
DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME  
DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Met. Müh. Ergin DOĞAN**  
**(506001210)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Şubat 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**  
**Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. E. Sabri KAYALI (İ.T.Ü.)**  
**Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)**

**ŞUBAT 2006**

## **ÖNSÖZ**

Tezimin her aşamasında fikir ve önerilerinden faydalandığım değerli danışman hocam Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na ve benden yardımlarını esirgemeyen Ar.Gör.Y.Müh. Fatih Mehmet GÜÇLÜ'ye en derin saygı ve sevgilerimi sunarım.

Tezim boyunca desteklerini gördüğüm sevgili eşim Zeynep DOĞAN'a, değerli dostum İnş.Müh.Sadık Murat ARPACIOĞLU'na ve tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen annem Makbule DOĞAN ile babam Emin Metin DOĞAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca deneylerde kullandığım alüminyum levhaları sağlayan Assan Alüminyum ile bu levhaların soğuk haddelemesini gerçekleştiren TÜBİTAK-MAM'a teşekkürü bir borç bilirim.

**ŞUBAT 2006**

**Ergin DOĞAN**

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ÖZET</b>	<b>x</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. ALÜMİNYUMA GENEL BAKIŞ</b>	<b>2</b>
2.1. Tarihçe	2
2.2. Genel Özellikler	4
2.3. Üretim Yöntemleri	7
2.3.1. Sürekli Döküm Tekniği ile Alüminyum Sac veya Levha Üretimi	10
2.4. Döküm Yapısı ve Özellikleri	15
2.5. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	17
2.6. Alaşım Elementlerinin Etkisi	19
2.7. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	21
<b>3. PLASTİK ŞEKİLLENDİRME VE SOĞUK DEFORMASYON</b>	<b>24</b>
3.1. Şekillendirme Yöntemleri	25
3.1.1. Haddeleme	27
3.2. Deformasyon Sertleşmesi	30
<b>4. YENİDEN KRİSTALLEŞME TEORİSİ</b>	<b>37</b>
4.1. Soğuk İşlemde Depolanan Enerji	37
4.2. Toparlanma	39
4.3. Yeniden Kristalleşme	40
4.3.1. Yeniden Kristalleşmeye Zaman ve Sıcaklığın Etkisi	43
4.3.2. Yeniden Kristalleşmeye Deformasyon Miktarının Etkisi	47
4.3.3. Yeniden Kristalleşmeye Metalin Saflığını Etkisi	49
4.3.4. Yeniden Kristalleşmeye Başlangıç Tane Boyutunun Etkisi	51
4.3.5. Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	51
4.4. Tane Büyümesi	53
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>56</b>
5.1. Haddeleme	56
5.2. Tavlama	56
5.3. Karakterizasyon	57

<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>59</b>
6.1. 1050 ve 8006 Alüminyumun Soğuk Haddeleme Davranışı	59
6.2. 1050 ve 8006 Alüminyumun Yeniden Kristalleşme Davranışı	65
<b>7. GENEL SONUÇLAR</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>74</b>
<b>EKLER</b>	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>81</b>

## KISALTMALAR

<b>AEG</b>	: Alman Edison Gesellschaft
<b>BHN</b>	: Brinell Sertliği
<b>TRC</b>	: İkiz Merdane Döküm Yöntemi
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b>AA</b>	: Alüminyum Birliği
<b>RH</b>	: Reaksiyon Hızı
<b>CP</b>	: Ticari Saflıkta
<b>KYM</b>	: Kübik Yüzey Merkezli
<b>İHE</b>	: İstif Hatası Enerjisi

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 2.1</b> : Sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları.	14
<b>Tablo 2.2</b> : Alüminyum işlem alaşımlarının gösterimi.....	18
<b>Tablo 2.3</b> : Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi.....	19
<b>Tablo 2.4</b> : Alüminyumun kullanım yerleri ve alternatif olduğu malzemeler..	22
<b>Tablo 3.1</b> : Farklı malzemeler için n ve K sabitleri.....	35
<b>Tablo 3.2</b> : Deformasyon sertleşmesi üssü (n) ile İHE arasındaki ilişki.....	36
<b>Tablo 4.1</b> : Saf bakıra % 0,01 kadar element ilavesinin yeniden kristalleşme sıcaklığına etkisi.....	50
<b>Tablo 4.2</b> : Bazı metallerin yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları.....	51
<b>Tablo 5.1</b> : 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu.	58
<b>Tablo 5.2</b> : 1050 ve 8006 alaşımları için deformasyon kalınlıkları ve bu kalınlıklara bağlı olan deformasyon miktarı.....	58
<b>Tablo 6.1</b> : 1050 ve 8006 alüminyumun farklı tavlama sıcaklıklarında farklı deformasyon yüzdeleri için Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'den hesaplanan yeniden kristalleşme süreleri ( $t_r$ ).....	67
<b>Tablo 6.2</b> : 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının farklı deformasyon yüzdeleri için hesaplanan yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi değerleri.....	72
<b>Tablo A.1</b> : 1050 alüminyumun 300°C ve 340°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.....	77
<b>Tablo A.2</b> : 1050 alüminyumun 400°C ve 450°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.....	78
<b>Tablo A.3</b> : 8006 alüminyumun 300°C ve 340°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.....	79
<b>Tablo A.4</b> : 8006 alüminyumun 400°C ve 450°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.....	80

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b>Sayfa No</b>
<b>Şekil 2.1</b> : Dünya birincil alüminyum üretimi dağılımı .....	8
<b>Şekil 2.2</b> : İkiz merdane dökümü detay görüntüsü.....	10
<b>Şekil 2.3</b> : Tipik bir sürekli döküm hattı akış şeması.....	11
<b>Şekil 2.4</b> : Alüminyum alaşımına ait makroyapının şematik görünümü.....	16
<b>Şekil 2.5</b> : Alüminyum alaşımlarının çeşitli kullanımlarının gösterimi.....	23
<b>Şekil 3.1</b> : Metalik malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan tipik mekanik işlemlerin şematik gösterimi.....	26
<b>Şekil 3.2</b> : Haddeleme işleminin şematik gösterimi.....	27
<b>Şekil 3.3</b> : Hadde ürün örnekleri: (1) Kare kesitli çubuk, (2) Daire kesitli çubuk, (3) Yassı ürün, (4) Altı köşe kesitli çubuk, (5) Köşebent, (6) T demiri, (7) I demiri (putrel), (8) U demiri, (9) Ray.....	27
<b>Şekil 3.4</b> : Ticari saflıktaki alüminyumun (%99,9 Al) a)%0, b)%45, c)%95 soğuk haddelenmiş mikroyapı görüntüsü.....	29
<b>Şekil 3.5</b> : Frank- Read Kaynağı. (a) Kayabilir A-B dislokasyon parçası. (b)'den (d)'ye kadar: gerilemenin arttırılması ile bir dislokasyon halkasının ve yeni bir A-B dislokasyon parçasının oluşumu.....	31
<b>Şekil 3.6</b> : Çeşitli malzemeler için logaritmik gerçek gerilme – gerçek şekil değişimi arasındaki ilişki.....	35
<b>Şekil 4.1</b> : Çok kristalli saf bakırda soğuk işlemde depolanan enerji .....	38
<b>Şekil 4.2</b> : Toparlanma ve yeniden kristalleşmenin tane yapısına etkilerinin şematik gösterimi... ..	42
<b>Şekil 4.3</b> : %85 soğuk haddelenmiş %0,8 magnezyum içeren alüminyum alaşımının yeniden kristalleşmesi sırasındaki mikroyapısal değişimler.....	42
<b>Şekil 4.4</b> : İzotermal yeniden kristalleşme eğrilerinin elde edilmesi.....	43
<b>Şekil 4.5</b> : % 98 Soğuk deformasyona uğramış saf bakırın (%99,99 Cu) izotermal yeniden kristalleşme eğrileri.....	44
<b>Şekil 4.6</b> : Saf bakırın %50 yeniden kristalleşme miktarına karşı mutlak sıcaklığın tersinin ilişkisi.....	44
<b>Şekil 4.7</b> : Tavlama süresine bağlı olarak yeniden kristalleşmenin gelişmesi	45
<b>Şekil 4.8</b> : Saf bakırda deformasyon miktarıyla (a) depolanan enerji, (b) yeniden kristalleşme sıcaklığının değişimi.....	47
<b>Şekil 4.9</b> : Farklı başlangıç deformasyon oranlarının zirkonyumun yeniden kristalleşme süresine etkisi.....	48
<b>Şekil 4.10</b> : Zirkonyumun yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin soğuk işlem miktarıyla değişimi.....	48



<b>Şekil 4.11</b>	: Alfa-pirinçte soğuk işlem miktarının yeniden kristalleşmiş tane boyutuna etkisi.....	49
<b>Şekil 4.12</b>	: Alüminyumda yeniden kristalleşme sıcaklığına saflığın etkisi.....	50
<b>Şekil 4.13</b>	: Çeşitli metallerin ergime sıcaklıklarıyla yeniden kristalleşme sıcaklarının değişimi.....	52
<b>Şekil 4.14</b>	: Tane büyümesi esnasında tane sınırlarının değişimi.....	53
<b>Şekil 4.15</b>	: Tane birleşmesiyle tane büyümesinin şematik gösterimi.....	54
<b>Şekil 4.16</b>	: Bazı metal ve alaşımlarda tane büyümesinin sıcaklıkla değişimi..	55
<b>Şekil 6.1</b>	: 1050 ve 8006 alaşımlarının 400 büyütmede optik mikroskop hadde yönüne dik kesit görüntüleri.....	59
<b>Şekil 6.2</b>	: Sertliğin ( $HV_{0,3}$ ) deformasyona göre değişimi.....	60
<b>Şekil 6.3</b>	: Şekil 6.2'nin logaritmik olarak çizimi.....	61
<b>Şekil 6.4</b>	: 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının deformasyon hızı değişimleri.....	62
<b>Şekil 6.5</b>	: Soğuk haddeleme işlemi ile 1050 alüminyum alaşımının sertlik artışı ve mikro yapı değişimi.....	63
<b>Şekil 6.6</b>	: Soğuk haddeleme işlemi ile 8006 alüminyum alaşımının sertlik artışı ve mikro yapı değişimi.....	64
<b>Şekil 6.7</b>	: İzotermal olarak tavlanan 1050 alüminyum alaşımının yeniden kristalleşme eğrileri. Tavlama sıcaklığı (a) 300°C, (b) 340°C, (c) 400°C, (d) 450°C.....	68
<b>Şekil 6.8</b>	: İzotermal olarak tavlanan 8006 alüminyum alaşımının yeniden kristalleşme eğrileri. Tavlama sıcaklığı (a) 300°C, (b) 340°C, (c) 400°C, (d) 450°C.....	69
<b>Şekil 6.9</b>	: “ $\ln t_r - 1/T$ ” grafikleri 1050 alüminyumun yeniden kristalleşme aktivasyon enerjilerinin hesabı için (a)%4, (b)%28, (c)%52, (d)%76 deformasyon oranlarına göre çizilmiştir.....	70
<b>Şekil 6.10</b>	: “ $\ln t_r - 1/T$ ” grafikleri 8006 alüminyumun yeniden kristalleşme aktivasyon enerjilerinin hesabı için (a)%20, (b)%40, (c)%60, (d)%80 deformasyon oranlarına göre çizilmiştir.....	71

## SEMBOL LİSTESİ

<b>T</b>	: Mutlak Sıcaklık
<b>T<sub>m</sub></b>	: Ergime sıcaklığı
<b>Δσ</b>	: Deformasyon sertleşmesi sonucu mukavemet artışı
<b>α</b>	: Sabit
<b>G</b>	: Kayma modülü
<b>b</b>	: Burgers vektörü
<b>ρ</b>	: Dislokasyon yoğunluğu
<b>n</b>	: Deformasyon sertleşmesi üssü
<b>K</b>	: Sabit
<b>ΔF</b>	: Soğuk işlem serbest enerjisi
<b>ΔS</b>	: Entropi değişimi
<b>ΔE</b>	: İç veya depolanan deformasyon enerjisi
<b>Q</b>	: Aktivasyon enerjisi
<b>R</b>	: Gaz sabiti
<b>v</b>	: Çekirdeklenen tanenin hacmi
<b>t</b>	: Süre
<b>N</b>	: Birim hacimdeki çekirdek sayısı
<b>V</b>	: Yeniden kristalleşme toplam hacmi
<b>P</b>	: Çokgen sayısı
<b>B</b>	: Kenar sayısı
<b>C</b>	: Köşe sayısı
<b>H<sub>v</sub></b>	: Vickers sertlik değeri
<b>σ<sub>y</sub></b>	: Akma dayanımı
<b>K</b>	: Malzeme parametresi
<b>ε</b>	: Deformasyon miktarı
<b>A<sub>r</sub></b>	: Sabit

## 1050 VE 8006 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME DAVRANIŞI

### ÖZET

Alüminyum ve alaşımları endüstride, birim yoğunluğa göre yüksek mukavemet oranı, yüksek ısı ve elektrik iletim oranı ve mükemmel korozyon dayanımları nedeniyle tercih edilmektedir. Sürekli döküm tekniği alüminyum levha üretiminde tüm dünyada sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bir çok endüstriyel uygulamada soğuk haddelenmiş alüminyum ürünleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sürekli döküm tekniği ile üretilmiş 1050 ve 8006 kalite alüminyumun soğuk haddeleme ve yeniden kristalleşme davranışları incelenmiştir. 1050 ve 8006 alüminyumun soğuk haddeleme sırasındaki deformasyon sertleşmesi davranışı Holloman eşitliği ile sırasıyla şu şekilde ifade edilebilir,  $\sigma_y = 147,45 \times \varepsilon^{0,0952}$  (N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_y = 119,43 \times \varepsilon^{0,1497}$  (N/mm<sup>2</sup>). %20 ila % 80 arasında uygulanan deformasyon sonrasında yapılan yeniden kristalleşme tavlamasında, yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi 1050 alüminyum için 25–30 kJ/mol ve 8006 alüminyum için 35–40 kJ/mol olarak bulunmuştur.

## **THE DEFORMATION AND RECRYSTALLIZATION BEHAVIOR OF 1050 AND 8006 ALUMINIUM**

### **ABSTRACT**

Aluminium and its alloys are widely used engineering materials owing to their improved specific strength, high thermal and electrical conductivity and excellent corrosion resistance in many aggressive media. Continuous casting is widely used manufacturing technique of flat products all over the world. Cold rolled aluminium sheet is used in many industrial applications. In this study, the cold rolling and recrystallization behaviors of 1050 and 8006 quality aluminium produced by continuous casting route has been examined. According to Holloman Equation the deformation strengthening of 1050 and 8006 aluminium, was expressed as  $\sigma_y = 147,45 \times \varepsilon^{0,0952}$  (N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_y = 119,43 \times \varepsilon^{0,1497}$  (N/mm<sup>2</sup>), respectively. In the deformation range between 20% and 80%, the recrystallization activation energy was found as 25-30 kJ/mol for 1050 aluminium alloy and 35-40 kJ/mol for 8006 kJ/mol.

## 1.GİRİŞ

1886 yılında endüstriyel olarak üretilmeye başlanan alüminyum, yer kabuğunun %8'ini oluşturur ve bu miktar alüminyumu, yer kabuğunun %50'sini oluşturan oksijen ve %27'sini oluşturan silisyumun ardından elementler arasında en çok bulunan üçüncü element, metaller arasında ise birinci element olmasını sağlar [1].

Cevherden folyoya olan serüveni çok kısa bir sürede gelişen alüminyum günümüzde çok kullanılır hale gelmiştir. Tüketimde, alüminyum ve alaşımlarının demir-çelik ile mukayese edilecek duruma gelmesi, son yıllarda elektrik, kimya, tıp, inşaat, havacılık ve otomotiv sanayinde ve bunların yan kollarında her geçen gün artan bir şekilde kullanılması, bu metalin önemini gün geçtikçe artırmaktadır. Hafif metal sınıfından olan alüminyumun bu önemi, yumuşak ve demirden üç kat daha hafif, mukavemetin ağırlığına oranının yüksek olması, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması, kolay işlenebilirliği, korozyona dayanıklılığı, dekoratifliği, soğuk ve sıcak olarak şekillendirilebilirliği, talaşlı ve talaşsız olarak işlenebilirliği gibi özelliklere sahip olmasındandır [2].

İşlenerek oluşturulan alüminyumun ürünleri, kısa veya uzun bir faydalanma döneminden sonra, yani kullanılmaz hale geldiklerinde dahi ekonomik değer taşımaktadır. Bu sayede kazanılan aktivite kola kutularının, konserve kutularının, tüplerin, çatıların, kaportaların, uçak gövdelerinin, kapı gövdelerinin, v.b. değişik kullanım alanlarına sahip alüminyum alaşımlarının geri kazanılabilmesi ve tekrar üretilmesi sağlanmaktadır. İşte bu noktada ikincil alüminyum üretimi büyük önem kazanmaktadır. Bu kolun da en büyük lokomotifi alüminyum sürekli döküm makineleri olmuştur [2].

Bu çalışmanın amacı, sürekli döküm yöntemi ile üretilmiş iki farklı alüminyum alaşımının soğuk haddeleme ve yeniden kristalleşme davranışlarının incelenmesidir.

## 2. ALÜMİNYUMA GENEL BAKIŞ

### 2.1. Tarihçe

Antik çağda Herodot alüminyum bileşikleri için alumen adından söz etmiştir. 1754 yılında Marggraf kil ve alüminyum bileşiklerinin aynı metale bağlı olduğunu saptamıştır. 1786'da De Merveau bu metale alumine demiştir. 1807'de Sir Humphrey Davy ise bu metale önceleri alumium, sonra aluminum ve daha sonrada aluminium adını vermiştir [1].

1807 yılında Sir Humphrey Davy alüminada oksijene bağlı bir metalin varlığını tahmin etmiştir. Alüminanın elektrolizinde demir katot kullanıldığı için demir-alüminyum alaşımı elde etmiş, alüminyum ayıramamıştır. 1821 yılında M.Pierre Berthier Güney Fransa'da Les Baux kasabasında boksit madenini bulmuştur. Bu yerin adına ithafen bauxit adını vermiş ve kimyasal formülünü de  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  olarak kabul etmiştir. 1825 yılında Danimarkalı fizikçi Christian Oersted, alüminyum susuz alüminyum klorürden kalsiyum amalgamı ile redükleyerek ilk metalik alüminyum üretmiştir. 1827'de Friedrich Wöhler susuz alüminyum kloriti saf potasyumla redükte ederek pulverize bir toz elde etmiş, bu tozun içinde alüminyumun ana özelliklerine çok yakın özellikte pul pul metallerin bulunduğunu görmüştür. Böylece artık kimyasal yöntemden elektrolitik yöntemeye geçilmiştir.

1845'te Wöhler bu yöntemle toplu iğne başı büyüklüğünde bilyalar halinde alüminyumun tüm özelliklerine sahip biraz daha fazla miktarda metal elde etmiştir. 1852'de Robert Bunsen elektrotik yöntemi daha da geliştirmiştir [1,2].

1850–1860 yılları arasında Fransız araştırmacı Henry Sainte-Clarie Deville 3. Napolyon'un maddi desteği ile endüstriyel alüminyumun kazanılmasına temel adımları atmıştır. 200 ton alüminyum üretmek için alüminyumun fiyatını 2400 DM'den 25 DM'ye düşürmüştür. 1855 yılında, Deville tarafından ilk olarak üretilen alüminyum Paris'te bir fuarda, "balçıkta gümüş" sloganı ile teşhir edilmiştir

1883'te Charles S. Bradley alüminyum oksitlerin kriyolit kullanılarak elektrolizi için bir patent çıkarmış, ancak uygulamaya geçilememiştir.

1886 modern alüminyum endüstrisinin doğum yılı olmuştur. Fransa'da Paul T. Heroult ve Amerika'da Charles Martin Hall birbirlerinden bağımsız olarak kriyolitte çözülmüş alüminanın elektrolitik parçalanması ile ilgili patent almışlardır. Günümüzde bütün cevherden alüminyum üreten tesisler bu patente göre üretim yapmaktadırlar. Yine 1886 yılında Almanya'da Deville'in kimyasal metodu ile çalışan ilk alüminyum fabrikası kurulmuştur. 1887 – 1888 yıllarında Heroult İsviçre firması Metallurgischen Gesellschaft ilk elektroliz tesisini kurmuştur. Daha sonra bu firma Alman Edison Gesellschaft (AEG) firması ile birleşmiştir. 1887 – 1892 tarihleri arasında Avusturyalı Dr. Karl J. Bayer kendi ismi ile anılan Bayer Prosesinde (alümina üretimi) ilk patenti almıştır. Bayer Metodu ile çalışan ilk alüminyum fabrikası 1908 – 1914 yılları arasında Almanya'da kurulmuştur. Alüminyum boksit cevherlerinden üretiminin geliştirilmesinden sonra alüminyum hızla endüstride kullanılmaya başlanmıştır [1,2].

Alüminyumun başlıca ilk gelişim adımları;

1889: Mutfak eşyalarında kullanımı (tencere ve tabak),

1891: Gemi inşaatında kullanımı (yatlarda),

1892: Havacılık sektöründe kullanımı,

1893: Sanat eserlerinde kullanımı,

1890: Alüminyum sert lehim,

1905: Alüminyum dökümden ticari motor üretimi,

1906: Yüksek mukavemetli sertleşebilir duralümin (Al-Cu-Mg) keşfi,

1909: Bira kutularında kullanımı,

1910: Bant haddeleme ile folyo üretimi,

1918: Sertleşebilir korozyona karşı Al-Mg-Si alaşımlarının geliştirilmesi,

1919: Konserve kutularında kullanımı

1920: Alüminyum boruların büyük ölçekte kullanılması,

1928: İlk alüminyum tank (30,3 m<sup>3</sup>'lük) imalatı,

1931: Süt kapaklarında kullanımı,

1933: Köprü inşaatında kullanılması,

1951: Almanya'da yaya köprüsü inşaatı.

1960–2000: Motor blokları, otomotiv jantları, cephe giydirme, diş macunu tüpleri, televizyon kuleleri, roket komponentleri, gaz taşıma üniteleri, doğalgaz sıvılaştırma üniteleri, zırh plakaları, v.b. imali [2].

## 2.2. Genel Özellikler

Alüminyum ve alaşımlarının sağladığı üstün özellikler sebebiyle, tüketimleri büyük bir hızla artmakta ve her geçen gün yeni kullanım alanları açılmaktadır. Saf alüminyum galvanik seride çok aktif bir metal olmasına karşın, yüzeyinde kolaylıkla oluşan koruyucu oksit tabakası onun yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Alüminyum oksitten ( $Al_2O_3$ ) oluşan bu geçirimsiz, sert ve koruyucu oksit tabakası alüminyumun korozyon direncini önemli ölçüde artırır. Buna bağlı olarak alüminyum saflaştırıldıkça korozyon direnci ve iletkenliği artar. Bu nedenle, korozyona karşı oldukça hassas olan alüminyum alaşımları günümüzde saf alüminyum giydirilmesi yoluyla korozyondan korunmaktadır. Diğer yandan saf alüminyum oldukça düşük olan mukavemeti soğuk işleme arttırılabilmektedir.

Bugün alüminyum ve alaşımları sahip olduğu özellikleri itibariyle endüstride kullanılan en önemli yapı ve mühendislik malzemelerinden birisi halini almıştır. Saf halde yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, korozyon direnci gibi özelliklere sahipken, alaşımlama ile bu özellikler çok daha geniş bir spektruma yayılarak yaygın bir kullanım alanına sahip olmuştur. Bugün endüstride geniş çaplı olarak 100'ün üstünde alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. En önemli özellikleri aşağıdaki gibidir [3];



- Hafifliği: Saf alüminyumun özgül ağırlığı yaklaşık 2,7 gr/cm<sup>3</sup>'tür. Kütlesi demirin %35'i, bakırın ise %9'u kadardır. Bu düşük ağırlık özelliği başta uçak ve otomobil endüstrisinde olmak üzere, tüm taşımacılık sanayinde önemli bir rol oynamaktadır.

- Mekanik Özellikler: Çeşitli alüminyum alaşımlarının ısıt işlemleri sonucu, istenilen şekilde mukavemet, tokluk, sertlik ve diğer mekanik özellikler geliştirilebilir. Özellikle küçük miktarlarda Mn, Mg, Si, Cu, Zn, Ti ilavesiyle mukavemeti daha da arttırılan alaşımlarında, ısıt işlem ile bugün çok yüksek çekme mukavemeti değerlerine ulaşılmıştır.

Alüminyumun mekanik özellikleri arasında en önemli olan elastisite modülünün 1/3'üne eşit olduğundan, çelik yerine alüminyum kullanılmaya karar verildiğinde, esnemenin çeliğe göre 3 kat daha fazla olacağı göz önüne alınmalıdır. Alüminyumun sertliği 19-20 BHN değerinde olmakla birlikte, alaşımlarında ise 120 BHN değerine kadar çıkabilmektedir. Çekme dayanımı ise 90 MPa değerinden, bazı yaşlanabilir alaşımlarında 650 MPa değerine kadar ulaşılabilmektedir.

- Korozif Özellikler: Alüminyum yaygın kullanım nedenlerinden biri de onun yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Bu özelliği sebebiyle, kimya ve besin sanayinden, inşaat sanayine ve ev eşyalarına kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır. Alüminyum yüzeyler, atmosferik korozyona maruz kaldığında, çok ince (20–25 Å) görünmez bir oksit tabakası oluşur ve bu tabaka daha fazla oksitlenmeyi önler. Alüminyumun bu özelliği yüksek korozyon direncini temel nedeni olup, birçok aside karşıda aynı direnci göstermektedir. Ancak bazı alkaliler bu oksit tabakasını tahrip etme özelliğine sahiptir. Elektrolitik ortamlarda bazı metallerle doğrudan temas etmesi sonucunda galvanik korozyon olabilir. Bu durumda boya ya da yalıtkan bant uygulaması yapılmalıdır.

- Toksik Reaksiyonlara Girmemesi: Zehirleyici olmama özelliği, gıda endüstrisinde ya da mutfak malzemelerinde yaygın kullanım alanı bulmasına yol açmıştır. Bu özelliği sayesinde yiyecek ve ilaç ambalajlanmasında, sigara, çay paketlenmesinde geniş çaplı olarak kullanılır.

- Isı ve Elektrik İletkenliği: Alüminyum ve alaşımları ısı ve elektriği oldukça iyi iletirler. Yüksek ısıt iletkenliği (çeliğin 6 katı), ısıtma/soğutma endüstrilerinde, gıda, kimya, petrol, havacılık sektörlerinde alüminyum ısı değiştiricilerinin yaygın olarak

kullanımına yol açmıştır. Ticari alüminyum elektrik iletkenliği 37 siemens civarındadır. Elektriksel iletkenliği bakırın %62'si mertebesindedir. Bakırın yoğunluğu 8,9, alüminyumun ise 2,7 gr/cm<sup>3</sup> olduğu düşünülürse; ağırlıkça kıyaslandığında alüminyumun bakırdan daha iyi iletken olduğu ortaya çıkar.

- Yüksek Isı ve Işık Yansıtması: %80'in üzerinde ışık yansıtma özelliği ile aydınlatmada, yüksek ısı yansıtma özelliği dolayısıyla da çatı kaplamalarında kullanılmaktadır. Bu özelliğin dolayı ışık reflektörlerinin kaplanması ve aynaların geri yansıtıcılığında kullanılır.

- Metalotermik Reaksiyonlarda Kullanımı: Alüminyum oksijene olan ilgisinden dolayı, diğer metallerin oksitlerini redükler. Bu özelliği nedeniyle toz alüminyum krom, vanadyum, baryum ve lityum gibi metal oksitleri redükleyerek bu metallerin üretiminde kullanılır.

- Kolay Şekillendirilebilirliği ve İşlenebilirliği: Kolayca dökülebilir, kağıttan daha ince şekilde haddelenebilir (folyo), çekilebilir (tel, ekstrüzyon ürünleri, profil) dövülebilir. Alüminyum kolayca ve hızlı bir şekilde tornalama, frezeleme, delme operasyonlarına tabi tutulabilir.

- Kaynaklanabilirliği: Her türlü birleştirme yöntemi uygulanabilir (kaynak, perçinleme). Ayrıca havacılık ve otomotiv sektöründe yapıştırma uygulamaları da yaygındır.

- Çok Geniş Spektrumda Yüzey İşlemlerine Tabi Tutulması: Koruyucu bir kaplama gerektirmeyen durumlarda mekanik yüzey işlemleri olarak parlatma, kumlama veya fırçalama birçok durumda yeterlidir. Koruyucu kaplama olarak, kimyasal, elektrokimyasal boya uygulamaları ile eloksal ve elektro kaplamalar uygulanabilir. Uygulamaların büyük çoğunluğunda yukarıda belirtilen özelliklerden bir ya da daha fazlası bir araya gelerek belirleyici rol oynar. Örneğin, hafifliği ve mukavemeti uçak sanayinde, raylı sistem taşımacılık ekipmanlarında; korozyon direnci ve ısı iletkenliği kimya ve petrol sanayinde, bu özelliklerine ilaveten olmama özelliği ile, albenili görünümü, atmosferik koşullara dayanımı ve düşük bakım maliyetleriyle inşaat sektöründe yüksek yansıtma, mükemmel atmosferik direnç ve hafifliği ile çatı kaplamalarında yaygın alanı bulmasını sağlamıştır.

- Düşük maliyet: Alüminyumun ekonomik yönden avantajı diğer metallere göre büyük bir hızla yükselmesidir. Bunun başlıca nedeni birim ünitesinin maliyetinin diğer metallere göre daha ekonomik olmasıdır. Alüminyumun diğer metallere göre daha hafif olması dökümde büyük bir avantaj sağlar. Aynı boyuttaki diğer metallere göre daha fazla döküm yapabilmek mümkündür. Ayrıca çok yüksek olmayan ergime sıcaklığı, döküm sırasında daha fazla enerji harcanması ve kalıp aşındırması sebebiyle önemli bir tercih nedenidir.

### 2.3 Üretim Yöntemleri

Bir asırdan kısa bir zamanda alüminyum hem üretim hem de kullanım açısından dikkate değer bir gelişme göstermiş ve günümüz endüstrisi için önem açısından çelikten sonra ikinci sırayı almıştır. Alüminyum üretimi birincil ve ikincil alüminyum üretimi olarak iki bölümde gelişme göstermiştir.

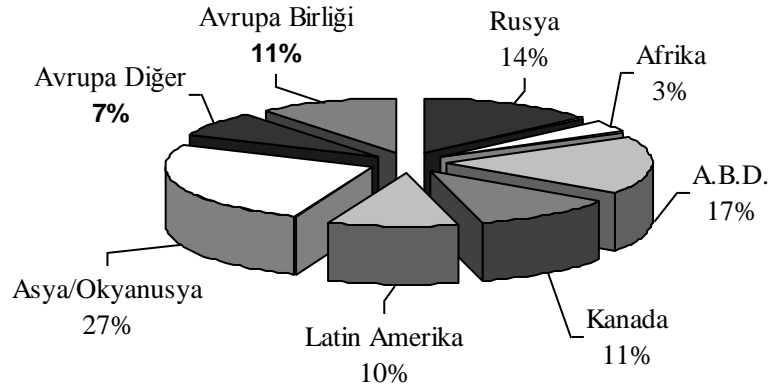
Alüminyum, yeryüzünün bileşiminde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olarak dünya kabuğunun yaklaşık %8'ini teşkil etmektedir. Alüminyumun oksijene karşı afinitesinin yüksekliği sebebiyle doğada saf halde bulunmaz. Bu nedenle alüminyum eldesi alüminyum silikat, demir oksit ve alüminyum oksitten oluşan boksit cevherinden yapılır. Boksit yeryüzünde oldukça geniş bir yayılım gösterir. Ancak en geniş kaynaklar tropik ve alt tropik kuşaklarda bulunmaktadır [4].

En önemli boksit kaynakları olarak günümüzde Avustralya, Jamaika, Gana, Endonezya, Brezilya, Çin ve Rusya'daki yataklar işlenmekte, alüminyum endüstrisinde kullanılan boksit cevherinin %80'i bu kaynaklardan gelmektedir.

Avrupa'daki önemli üreticiler Yunanistan, Yugoslavya, Fransa ve Macaristan olarak dünya toplam üretiminin yaklaşık %14'ünü oluşturmaktadır. Alüminyum, boksit içinde ve kaynağın bulunduğu bölgeye bağlı olarak, mono-hidrat oksit ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) veya tri-hidrat oksit ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) olarak bulunur. Avrupa boksitleri, Avustralya ve tropik bölgelerinden farklı olarak genellikle mono-hidrat tipindedir.

Boksit cevherlerinin en sık rastlanan minareleri Diaspor, Böhmit, Hidrargilit gibsit örnek olarak verilebilir.

Alüminyum günümüzde hala ilk endüstriyel üretimin başlarında geliştirilen proses ile boksitten üretilmektedir (Şekil 2.1). Bu metot iki farklı safhaya ayrılır; birincisi boksitten alümina üretimi için Bayer Prosesi, ikincisi ise bundan alüminyum üretimi için Hall-Heroult Prosesi'dir.



**Şekil 2.1:** Dünya birincil alüminyum üretimi dağılımı [5].

Günümüzde birincil alüminyum üretiminde yaygın olarak kullanılan boksit cevheri, yerküre yüzeyinin kazınması ile çıkartılır ve %5–30 arasında nem içerir. Alümina tesisleri, genellikle boksit cevherlerinin yanına kurulur. Madenden çıkarılan boksit cevheri, öncelikle kırılır, kurutulur ve sıvı kostik soda ile karıştırılıp otoklav adı verilen basınçlı tanklarla pompalanır. Bu tanklarda yüksek sıcaklık ve basınçta işleme tabi tutulur. Daha sonra takip edilen yol filtrasyon, çöktürme işlemleri sonucunda oluşan erimeyen kalıntılar (kırmızı çamur) ayrılır ve döner fırınlarda alüminyum hidroksitin kalsinasyonu ile alümina (alüminyum oksit) elde edilir. Kalsinasyondan çıkan alümina ( $Al_2O_3$ ) beyaz toz halinde elektrolizhaneye pompalanır. Beyaz bir toz görünümündeki hammadde olan alümina ile birlikte kok, zift karışımından oluşan anot pasta ve elektroliti oluşturan kriyolit ( $Na_3AlF_6$ ) elektroliz işleminin yapılacağı hücreye yüklenir. Alüminanın yüksek ergime sıcaklığından ( $2000^{\circ}C$ 'nin biraz üzerinde) kaynaklanan üretim güçlüğüne aşmak için; alümina ergitilmiş kriyolit ile karıştırılarak elektroliz hücrelerinde alüminyum redüksiyonu gerçekleştirilir. Burada amaç, alüminyum oksijenden ayırmaktır. DC akım uygulandığında, sıvı metal, astarı negatif kutup (katot) olarak oluşturulmuş fırının altında toplanır. Pozitif kutup (anot), ergimiş banyoya batırılan karbon bir

bloktur (genelde Soderberg elektrotları) ve etrafında açığa çıkan oksijen tarafından yavaşça yakılır. Karbon, böyle yüksek sıcaklıklarda ergimiş banyo atağına ve hatta sıvı alüminyum atağına doğal olarak direnç gösterebilen tek iletkenidir. Genel olarak ağırlıkça 4 ton boksitten, 2 ton alümina ve 2 ton alüminadan da , 1 ton alüminyum elde edilir.

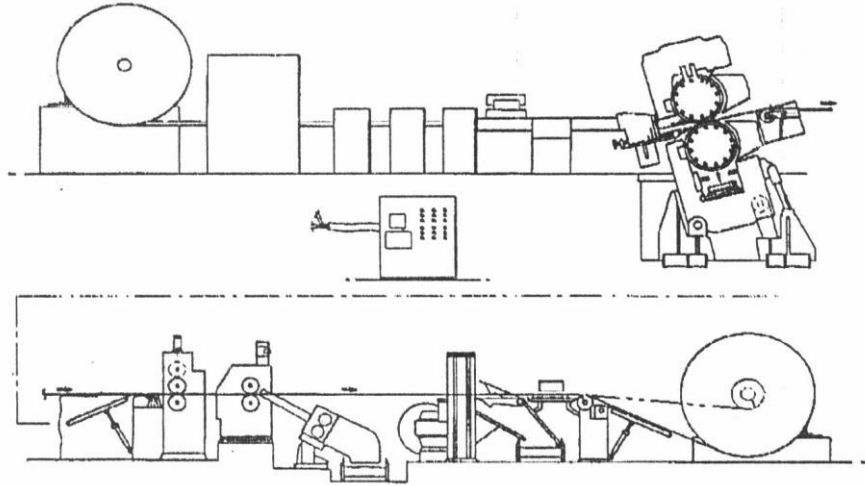
Birincil alüminyum üretiminde en önemli faktör, yeteri kadar elektrik enerjisinin uygun maliyette temin edilmesidir. Alüminyum üretim teknolojisi geliştikçe, ilk zamanlarda üretilen birincil alüminyumun her tonu için 42.000 kwh olan enerji sarfiyatı, günümüzde ortalama 16.500 kwh değerine düşmüştür. Bu değer, en modern teknoloji ile çalışan tesislerde 13.000 kwh/t değerlerine kadar düşürülmüştür.

Yukarıda sözü edilen işlemler ile elde edilen alüminyum birincil alüminyum (primary aluminium) olarak tanımlanır. Alüminyum daha sonra yarı ürün ve ürüne dönüştürülmek üzere, gerekiyorsa alaşımlandırılarak külçe (ingot), T-ingot, yassı ürün ingotu veya ekstrüzyon ingotu (bilet) halinde dökülür. T- ingot ve slablar en alışılmış işlem formlarıdır ve genellikle bir yarı sürekli su soğutmalı döküm prosesiyle üretilir. Bu prosesler mikro kristalin tane boyutunu, optimum metalurjik özellikleri ve kimyasal kompozisyon homojenitesini sağlayacak hızlı soğuma etkisini sağlarlar. Yarı-sürekli döküm tekniğinin yanında sürekli döküm tekniği de mevcuttur. Genelde bilet üretim sistemine adapte edilmiştir. Diğer sürekli döküm uygulamaları ise Hunter Eng., Hazelett, Pechiney ve Alussuisse döküm makinesi gibi birçok üretici firmalar tarafından yapılmıştır.

Elektroliz ile üretilen birincil metalden farklı olarak, ikincil alüminyum (ikincil ergitme) endüstrisinde “yeni hurda” olarak adlandırılan ve üretim işlemleri esnasında oluşan çeşitli atıkların yeniden ergitme yoluyla veya “eski hurda” olarak bilinen kullanım ömrünü yitirmiş alüminyum ürünlerinin yeniden değerlendirilmesi ile elde edilir. Alüminyum çok kolayca geri kazanılabilir ve bu özelliğinin yüksek verimlilikte ve iyi dizayn edilmiş proseslerle doğru işlenmesi diğer hafif metaller içerisinde önemli bir element olarak öne çıkmasını sağlamaktadır [4].

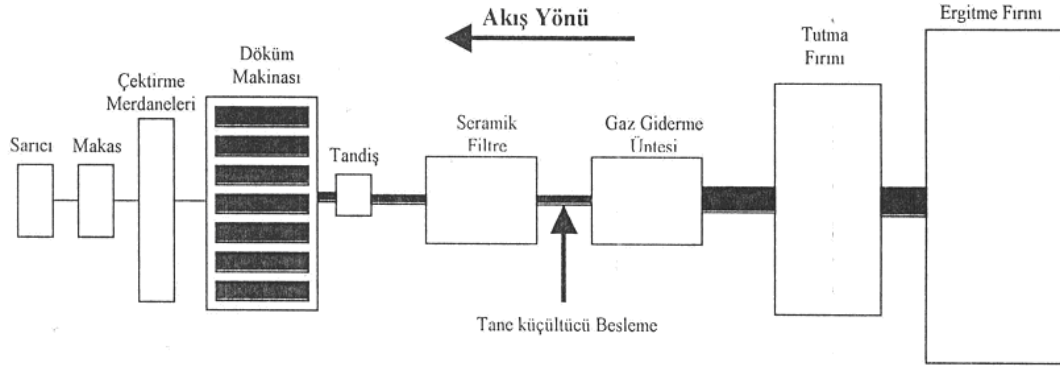
### 2.3.1 Sürekli Döküm Tekniği ile Alüminyum Sac veya Levha Üretimi

Sürekli levha döküm tekniği ile alüminyum rulo üretimi alüminyum endüstrisinde standart uygulama haline gelmeye başlamıştır. Sürekli levha döküm tekniği ilk defa 1846 yılında Sir Henry Bessemer tarafından tasarlanmıştır. Sistemi desteklemesi gereken teknolojiler yeterli olmadığından, tekniğin uyandırdığı heyecan kısa sürmüştür. Bir asırdan daha kısa bir zamanda, gelişmekte olan ülkeler arasındaki rekabet daha şiddetli hale geldiğinde sürekli levha döküm teknolojisi endüstrileşmiş ülkeler tarafından yeniden keşfedilmiştir. Bu yöntemin ilk olarak ticari anlamda uygulanması 1950'li yıllarda amerikan Hunter Engineering ve Fransız Pechiney şirketleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Günümüzde %60'ı Kuzey Amerika ve Avrupa'da olmak üzere 180 kadar döküm makinesi üretim yapmaktadır. Şekil 2.3'de alüminyum endüstrisinde kullanılan tipik yerleşim görülmektedir [6].



**Şekil 2.2:** İkiz merdane dökümü detay görüntüsü [7].

Şekil 2.3'te sürekli levha döküm tekniği ile üretim yapan tesislerin akış şeması verilmektedir [7].



**Şekil 2.3:** Tipik bir sürekli döküm hattı akış şeması [7].

Şekil 2.3'ten de görüldüğü gibi hammadde (hurda+ingot+slab) sıvı metali oluşturmak için ergitme fırını beslenir. Ergitme fırını sıvı metal oluşturularak tutma fırınına transfer edilir. Ergitme ve tutma fırınlarında sıvı metal içerisine belirli elementler ilave etmek suretiyle alüminyum alaşımı hazırlanır. Alaşım hazırlama işleminde sıvı metalin bileşimi en önemlisidir. Metal sıvı haldeyken numune alınarak bileşim belirlenir ve alüminyum içerisindeki elementlerin çözünürlükleri dikkate alınarak master alaşımları şeklinde çözeltiye ilave edilir. Alüminyum içerisinde istenmeyen bileşikler alabilmek için flaks kullanılır. Flaks; inorganik özellikte olup gaz giderme, temizleme, oksidasyon, deoksidasyon, rafinasyon fonksiyonlarına sahiptir. Flaks kullanımının ana nedeni metalin ergimesi anında metal kayıplarını önlemek, gazların banyo tarafından absorbe edilmesine karşı koymak ve metali temizlemektir. Alüminyum alaşımlarında dört temel flaks türü vardır. Bunlar; örtü flaksları, temizleyici flakslar, metal geri kazanım flaksları ve rafinasyon flakslarıdır. Flaks inert gaz taşıyıcısı kullanılarak mekanik bir cihaz ile ergimiş metalin içine verilirler.

Sıvı alüminyum fırından döküm makinesine götürmek için refrakter yolluklar kullanılır. Refrakter malzemeden beklenen en önemli özellikler; düşük termal iletkenlik, iyi termal şok dayanımı, operasyon sıcaklığında boyutsal kararlılık, kalınlık boyunca yüksek mekanik mukavemet, mükemmel ısıtılmama özelliği, kolay montaj için düşük ağırlık, ergimiş alüminyumdan daha düşük yoğunluk ve kolay temizlenebilirliktir [6].

Tutma fırınında yolluklarla sıvı metal ergimiş alüminyumdaki alkali safsızlıkları alabilmek için gaz giderme ünitesine gelir. Daha sonra metalik ve metalik olmayan

inklüzyonlar seramik filtrelerde sıvı metalden uzaklaştırılır. Alüminyum alaşımındaki inklüzyonlar; oksitler ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ), spinel ( $Mg_2 AlO_4$ ), boritler ( $TiB_2$ ,  $VB_2$ ), karbürler ( $TiC$ ,  $Al_3C_4$ ), intermetalikler ( $MnAl_3$ ,  $FeAl_3$ ), nitritler ( $AlN$ ) ve dış refrakter inklüzyonlarıdır. Seramik filtre yüzeyinde bir kek tabakası oluşarak  $30\ \mu m$ 'den büyük partiküller yakalanır. Temizlenen metal tandişe gelerek seviye kontrolü altında tip aracılığıyla döküm makinesine ulaşır.

Sürekli levha döküm tekniğinin hem ekonomik hem de metalurjik açıdan diğer yöntemlere nazaran getirdiği bazı avantajlar vardır. Söz konusu proses, katılaşmayı ve sıcak haddelemeyi tek bir operasyonla birleştirerek rulo ürettiğinden geleneksel rulo üretiminde gerek duyulan ilave bir sıcak haddeleme işlemine ya gerek kalmaz veya belirgin bir şekilde azalır.

Sürekli levha döküm tekniği için gerekli yatırım maliyeti, geleneksel ingot-döküm sıcak haddeleme prosesi için gerekenden çok daha azdır. Metalurjik açıdan bakıldığında, prosesteki yüksek katılaşma hızı levhaların saf bir metalurjik mikroyapıya sahip olmasını sağlar. Oluşan mikroyapı; rafine dendritik hücreler ( $5\ \mu m$  civarında), ince intermetalik taneler ( $1\ \mu m$  boyutunda), katı çözünürlükteki artış ve yarı kararlı fazın varlığı ile karakterize edilir.

Sürekli levha döküm makinesinin teorik olarak tahmin edilenden çok daha düşük hızda çalışması dezavantaj olarak görülebilir. Teorik üretim limiti  $4,96\ kg/sn.m$  iken, pratikte bu değer ortalama  $0,248 - 0,372\ kg/sn.m$  civarındadır. Bu üretim aralığı arasındaki farkı azaltmak için beslenme sisteminin gelişmiş tasarımı, ara yüzeydeki ısı transferinin gibi konularda araştırma yapılmaktadır.

Sürekli levha döküm tekniği katılaşma ve deformasyonun aynı anda ele alındığı bir yöntemdir. Rulo üretimi için mevcut diğer prosesler yalnız katılaşmayı içermekte, deformasyonu içermemektedir. Yalnız katılaşma teknikleri; yüksek verimlilik, alaşım kısıtlaması olmayışı, nispeten düşük katılaşma oranları ve yüzey hatalarına duyarlılık ile karakterize edilirler.

Sürekli levha döküm tekniğinde bazı alaşımlarda, belirli sıcaklık ve seviyedeki ergimiş alüminyum, döküm makinesinde tandişe gelmeden önce gaz giderme ve filtrasyon işlemlerine tabi tutulur. Tandiş, metali döküm makinesinin merdanelerine veren ve tip olarak bilinen nozula bağlıdır. Tip bir çeşit seramik malzemenen



oluşmakta ve dökülen levhanın genişliğini oluşturmada bir kalıp görevi görmektedir. Ergimiş metal birbirine ters yönde dönen içten su soğutmalı iki merdane arasındaki boşluğa beslenir. Bu sebeple, levha sürekli döküm tekniği “İkiz Merdane Döküm Yöntemi” (Twin-Roll Casting – TRC) olarak da bilinir. Döküm merdanelerinin 15° açılı yapması, tandiştaki metal seviyesiyle ergimiş metalin tipten çıkış basıncının arasındaki dengenin ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu özellik, metalin tip nozulundan döküm merdanelerine düzgün akışını sağlamaktadır. Döküm merdaneleri arasındaki mesafe hidrolik bir sistemle sabit tutulmaktadır. Tip çıkışıyla döküm merdanelerinin eksenleri arasında belli bir mesafe vardır. Böylece bir proste döküm merdaneleri, metali katılaştırmanın yanında belli oranda sıcak haddeleme de yaparlar. Tip çıkışıyla döküm merdanelerinin eksenleri arasındaki mesafeye “tip eksenleri” denir. Merdanelerin yüzeyine, levhanın merdanelere yapışmasını önlemek amacıyla sürekli olarak su bazlı grafit veya boron nitrat püskürtülür.

Döküm makinesinden çıktıktan sonra levha, rulo halinde sarılmadan önce gergi merdanelerinden ve makastan geçer. Normal operasyonda gergi merdaneleri çalıştırılmaz. Çünkü sarıcı dökülen levha üzerinde gerekli gergi kuvvetini oluşturur. Rulo istenilen boyuta geldiğinde gergi merdaneleri dökülen levha üzerinde gergi kuvveti oluşturmak amacıyla çalıştırılır, levha makasla kesilir ve operasyonun akışı etkilenmeden rulo sistemden alınır. Kesilen uç sarıcıya ulaştığında sarıcının yarattığı gergi kuvveti yeniden sağlanmış olur ve gergi merdaneleri durdurulur. Tablo 2.1’de sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları görülmektedir.

Sürekli levha döküm tekniğinin avantajları; iyi yüzey kalitesi, ince tane yapısı, uygun kalınlık ve profil dağılımı ve ilave sıcak haddeye gerek olmayışı olarak verilebilir. Dezavantajları ise; düşük verimlilik ve sınırlı alaşım kapasitesidir. Levha döküm tekniği ile donma aralığı dar alaşımlar üretilmektedir. Alaşımların donma aralığı arttıkça verimlilikte azalma görülmektedir [7].

**Tablo 2.1:** Sürekli levha döküm tekniği ile üretilen alüminyum alaşımları [6].

1050	1060	1100	1145	1188	1190	1193	1199
1200	1230	1235	1345				
3003	3004	3005	3006	3105			
5005	5010	5034	5050	5052	5056		
5083	5085	5086	5154	5182	5252	5254	5356
5454	5456	5457	5652	5657			
6063							
7072							
8006	8010	8011	8014	8111			

Sürekli levha döküm tekniğinde birbiri ardına oluşan katılaşma ve sıcak haddeleme sonucu ortaya karakteristik bir mikroyapı ortaya çıkar. Bu mikroyapı geleneksel D.C. ingot ve sıcak haddeleme yöntemiyle üretilen levhaların mikroyapısından farklıdır. Sürekli levha dökümünde oluşan hızlı katılaşma ve deformasyon sayesinde tane boyutu küçük levhalar elde etmek mümkündür. Geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında sürekli dökülmüş levhadaki intermetalik partikül boyutunda %80'lik bir küçülme vardır. Sürekli dökülmüş alüminyum levhada homojen olmayan bir partikül dağılımı görülmektedir.

Sürekli dökülmüş levhanın döküm makinesinde çıktığındaki düşük sıcaklığı (ortalama 300°C), döküm esnasında oluşan sıcak haddelemede malzemenin tamamıyla yeniden kristalleşmesine izin vermez. Bu ise sürekli dökülmüş levhada kalıntı gerilmelerin oluşmasına yol açar.

Sürekli dökülmüş alüminyum levhanın kendine has mikroyapısı bu malzemenin bazı kullanım alanlarında özellikle tercih edilmesine neden olmaktadır. Örnek olarak harddisk üretimi verilebilir. Harddisklerin hafıza kapasitesi büyük oranda bilgilerin manyetik olarak yazılıp sonrada okunabileceği minimum alana bağlıdır. Bu alan manyetik kaplamanın kalınlığı ve düzgünlüğüne bağlı olmakta, bu da harddiskin yüzey kalitesi ile doğru orantı göstermektedir [7].

## 2.4. Döküm Yapısı ve Özellikleri

Alüminyum alaşımlarında döküm yapısının önemi, bilhassa yapıya hassas olan özelliklerin birinci dereceden önemli olduğu mühendislik uygulamalarında ön plana çıkmaktadır. Döküm yapısı başlangıç yapısı olup, alaşımların mekanik davranışlarını ve üretilen ürünlerin kalitelerini belirleyen en önemli unsurdur.

Alüminyum alaşımlarının bilhassa mekanik özelliklerine makroyapı önemli derecede etki etmektedir. En önemli makro yapısal parametre tane boyutudur.

Alüminyum alaşım ingotunun soğuması esnasında çeşitli kademelerde çok değişik ısıl şartlar oluşur. Bu sebeple, alüminyum ingotlarının yapısında bütünüyle birbirinden ayrı zonların geniş şekilde değişen karakterleri olabilir. Alüminyum alaşım ingotlarında tane boyutu ve şekli bakımından iyice belirli üç farklı bölge (zon) mevcuttur. Bunlar, Şekil 2.4'te görülen çil, kolonsal ve eş eksenli tanelerdir.

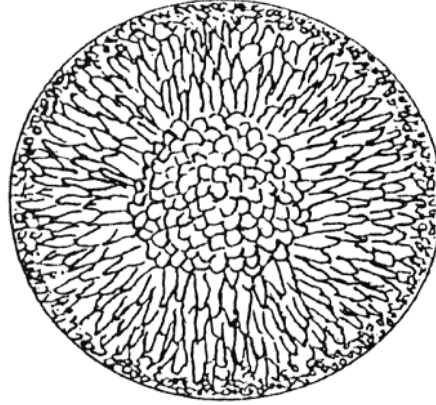
Sıvı metal kalıp içine döküldüğünde soğuk metal duvarı ile temas eden sıvı, liküdü sıcaklığının altına hızla soğur. Kalıp duvarında birçok katı çekirdek oluşur. Bu çekirdekler sıvı içerisine doğru büyümeye başlar. Çekirdeklerin büyük bir kısmı kalıp duvarından koparak uzaklaşabilirler. Geri kalan kristaller soğuma bölgesini oluşturmak için kalıp duvarının yakınında büyüebilecekler ve bilet yüzeyinde gelişmiş güzel yönlendirilmiş küçük eş eksenli tanelerden oluşan ince bir kabuk oluştururlar. Bu oluşan küçük eş eksenli tanelere çil kristalleri adı verilir. Dökümden sonra kalıp duvarındaki ısı gradyanı derhal azalacak, soğuma bölgelerindeki kristaller genellikle kalıp duvarına dik, yani ısı akış yönüne uygun olan tercihli kristalografik yönlendirmelerle dentiritik olarak büyüyerek kolonsal (sütunsal) taneleri oluşturacaklardır.

Eş eksenli tanelerin oluşum mekanizması ise, dentiritlerin kenar kollarının kalınlıkları, köklerinde genellikle azalır ve oluşumlarından sonra dentiritlerin etrafındaki sıcaklığın artması ile erimeye başlayacak ve ana gövdeden kopma ihtimalleri yüksek olacaktır. Daha sonra sıcaklık düştüğünde dentiritik kollar tamamen kaybolmadan önce yeni dentiritler için kaynak olarak rol oynayabilirler. Sıcaklık farkının sebep olduğu sıvıdaki girdaplı iletim akımları arta kalan eriyik üzerinde ergimiş kolların uzağa iletilmesi için bir kuvvet sağlar. Bu işlem kristal

çoğalması olarak bilinmektedir. Sonuç olarak ingotun merkezinde eş eksenli ve üniform tanelerin meydana getirdiği bir bölge oluşur.

Ticari alaşım ingotlarında çil ve kolonsal bölgenin bulunuşu daha sonraki üretim işlemlerinde pek fazla etkili olmaz. Çünkü dökümden sonra çoğunlukla talaşlı işlemlerle bu bölgeler alınır. Eş eksenli bölgenin tabiatı ve homojenitesi metal üretim proseslerinde önemlidir.

Alüminyum döküm ingotlarının makro yapılarına bakıldığında tane boyutu dış yüzeyden merkeze doğru gittikçe düşüş gösterir. Bunun nedeni döküm sırasında soğuma hızının dış yüzeyden merkeze doğru gittikçe düşüş göstermesidir [8].



**Şekil 2.4:** Alüminyum alaşımına ait makroyapının şematik görünümü [8].

Alüminyum alaşımlarının tane boyutunun mekanik özelliklere etkisi önemli olup, optimum özellikler için homojen dağılımlı ince tane yapısı tercih edilir. Alüminyum alaşımlarında tane boyutu küçüldüğünde dislokasyon hareketlerini engelleyen tane sınırlarının miktarı artacağından dolayı akma dayanımı artacaktır. Tane boyutundaki küçülme sünekliği ve tokluğu arttırmaktadır.

Çoğu araştırmacıya göre alüminyum döküm ürünlerinin fabrikasyon davranışları ve bunlardan imal edilen ürünlerin mekanik özellikleri makro yapıdan daha çok mikroyapıya bağlıdır. Tane küçültücü ilavesi ve dinamik etkenlerle makro yapı üniform hale getirilebilmektedir. Ancak tane küçültücü unsurlar mikroyapıya etki etmemektedir.

Dentiritik yapı bütün alüminyum alaşımlarının döküm yapılarında yer almaktadır. Alüminyum alaşımlarının katılaşması sırasında yapısal aşırı soğumanın yüksek olması nedeniyle sıvı katı ara yüzeyi düz halde kalmaz. Ara yüzey dallanmaya meyil gösterecektir. Böylece dentiritik yapı ortaya çıkar.

İşlem alaşımlarında tane boyutu önemlidir, fakat daha önemli bir metalurjik karakteristik ikinci dentirit kolları arasındaki mesafedir. İkinci dentirit kolları arasındaki mesafe malzemenin en önemli mikroyapısal uzunluk ölçüsüdür. Alaşımın mekanik özellikleri ikinci dentirit kolları arası mesafeye bağlıdır. Bu mesafe azaldıkça alaşımın maksimum çekme mukavemeti, sünekliği ve uzama miktarı artar. Dentirit kolları arasındaki mesafe, katılaşma hızının artması ile azalmaktadır. Bunun yanı sıra alaşım elementi miktarında dentiritler arası mesafeye etki ettiği saptanmıştır. Sabit katılaşma hızlarında bu etki genellikle ötektik bileşime doğru, dentiritler arası mesafenin azalması şeklindedir. İnce dentiritik yapı, ince çökelti fazlarının üniform dağılması sonucu meydana gelir ve bu yapı arzu edilir [8].

## **2.5 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması**

Uygulamada, ürüne şekil verme yöntemine göre alüminyum alaşımları iki ana grupta incelenebilir. Bunlar, alüminyum işlem alaşımları ve alüminyum döküm alaşımlarıdır.

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında birçok standart kullanılmaktadır. Bu standartlardan en çok kullanılanı Alüminyum Birliği'nin (AA:Aluminium Association) standardıdır. Bunun yanında ALCOA, ASTM, DIN 1713, Fransız Standartları gibi standartlar kullanılmaktadır. Yukarıda belirtilen standartların ortak özelliği ise tüm standartlarda alüminyum alaşımlarının, alüminyum işlem alaşımları ve alüminyum döküm alaşımları olmak üzere iki grupta sınıflandırılmasıdır [9].

Alüminyum Birliği'nin simgeleme metodu dört rakamdan oluşur. Tablo 2.2'de bu simgeleme metodu gösterilmektedir.

**Tablo 2.2:** Alüminyum işlem alaşımlarının gösterimi [9].

Simge	Temel Alaşım Elementi
1xxx	Saf Alüminyum ( % 99,00 Al)
2xxx	Al – Cu
3xxx	Al – Mn
4xxx	Al – Si
5xxx	Al – Mg
6xxx	Al – Mg – Si
7xxx	Al – Zn
8xxx	Diğer Elementler
9xxx	Kullanılmayan Dizi

Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı alaşımların hangi temel alaşım elementini içerdiğini gösterir. Son iki rakam ise %99 değerinin virgülden sonraki değerini belirtir. Örneğin, 1050 alaşımındaki son iki rakam alüminyumun %99,50 saflığında olduğunu göstermektedir. Soldan ikinci rakam ise özel olarak denetlenen empürite elementlerinin sayısını göstermektedir. 2xxx'den 8xxx'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam ise alaşım kompozisyonundaki değişimleri gösterir. Son iki rakam ise değişik alaşımları tanıtmak amacıyla kullanılır.

Alüminyum döküm alaşımlarında da dört rakamlı simgeleme kullanılır. Yalnız üçüncü rakamdan sonra bir nokta konulmuştur. Tablo 2.3'te bu simgeleme metodu gösterilmektedir. Burada 1xx.x serisi için, ikinci ve üçüncü rakamlar alüminyumun virgülden sonraki saflık değerini belirtir. Noktadan sonraki rakam ise ürünün şeklini belirtir. Aşağıda ürün şekilleri ve rakamsal karşılıkları verilmiştir:

0-Döküm, 1-İngot, 2-Modifiye edilmiş ingot.

2xx.x ile 9xx.x alaşımlarda ise ikinci ve üçüncü rakamlar yalnızca bir sıralama sayısı oluşturur.

**Tablo 2.3:** Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi [9].

<b>Simge</b>	<b>Temel Alaşım Elementi</b>
1xx.x	Minimum % 99,00 Al
2xx.x	Al – Cu
3xx.x	Al – Si – Cu veya Al – Mg – Si
4xx.x	Al – Si
5xx.x	Al – Mg
6xx.x	Kullanılmayan Dizi
7xx.x	Al – Mg – Zn
8xx.x	Al – Sn
9xx.x	Diğer Elementler

## 2.6 Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alüminyum alaşımlarında başlıca kullanılan alaşım elementleri, bakır, silisyum, magnezyum, demir, çinko, krom, kalay, manganez, nikel, titanyum, zirkonyum, fosfor, sodyum ve lityumdur.

- Bakırın Etkisi: Genel olarak bakır alüminyuma, sertlik, dayanım, iyi döküm özelliği ve işlenebilme kolaylığı gibi özellikler kazandırır. Bakır dövme alaşımlarında %3 ile %5 arasında kullanılır. %5'ten fazla kullanılırsa mekanik işleme güçlükleri ortaya çıkar. Ayrıca elektrik iletkenliği ve korozyon direnci düşer. Dövme alaşımlarında %12'ye kadar bakır kullanılabilir.

Bakır Al-Si alaşımlarında mekanik mukavemeti arttırırken buna karşın alaşımın deniz suyuna, zayıf asitlere ve kötü atmosfer şartlarına karşı dayanımını azaltır. Ayrıca Al-Si alaşımlarına bakır ilavesiyle düşük genleşme katsayısı elde edilebilir.

- Silisyumun Etkisi: Silisyum ilavesiyle alaşımın akışkanlık, korozyon direnci, kaynak kabiliyeti özellikleri iyileşmektedir. Ayrıca tane boyutu küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme özelliği sağlanır. Ayrıca silisyum ilavesiyle çok iyi döküm özellikleri elde edilirken, talaş kaldırma ise zorlaşmaktadır.

Silisyumun mekanik özelliklere katkısında alaşımın bileşiminden çok silisyum içeren fazın şekil ve dağılımı daha etkindir. Küçük ve yuvarlak primer faz yüksek mukavemet sağlar. İğne şeklindeki silisyumlu faz ise çekme mukavemetini arttırmakla beraber, sünekliği, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür.

- Magnezyumun Etkisi: Magnezyum alüminyuma ilave edilen önemli alaşım elementlerinden biridir. Magnezyum alaşıma yüksek mukavemet ve mükemmel korozyon direnci kazandırır. Kaynak kabiliyetini artırır. Ayrıca magnezyum ötektik altı Al-Si alaşımlarında demirin mekanik özelliklere yaptığı olumsuz etkiyi giderir ve mekanik mukavemet, korozyon direnci ve aşınma direncini artırır. Buna karşılık sünekliği azaltır.

Al-Si alaşımları katı eriyik bölgesinin dar olması nedeniyle ısıl işleme sertleştirilemezler. Magnezyum ilavesiyle Al-Si alaşımları ısıl işleme sertleşebilme yeteneği kazanır.

- Manganezin Etkisi: Manganez, alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetini artırır. Ayrıca yeniden kristalleşme sıcaklığını korozyon direncine zarar vermeksizin 50–60 °C kadar yükseltir.

Manganez Al-Si alaşımlarında demirin mekanik ve fiziksel özelliklere yaptığı olumsuz etkiyi giderme imkanı verir. Böylece mekanik mukavemet ve korozyon direnci artar.

- Çinkonun Etkisi: Çinko ilavesiyle bütün alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti, haddelenebilme ve işlenebilme kabiliyeti artmaktadır. Çinko magnezyum ile birlikte ilave edildiğinde yüksek darbe mukavemeti kazandırır.

Çinko Al-Si alaşımlarında çökelme sertleşmesine sebep olduğundan dolayı aşınma direncini arttırıcı etki yapar.

- Titanyumun Etkisi: Titanyumun alüminyum alaşımlarında tane küçültücü etkisi vardır. En iyi etkiyi bor ile beraber kullanıldığında gösterir. Titanyum alüminyum alaşımlarında çekme mukavemeti ve sünekliği artırır, ısı iletkenliğini düşürür.

- Demirin Etkisi: Demir alüminyum alaşımlarında tane küçültücü etki gösterir. Ayrıca bazı alüminyum alaşımlarında yüksek sıcaklık mukavemetini artırır. Demirin



Al-Si alaşımlarında mekanik özelliklere olumsuz etkisi vardır. Yüksek silisyum içeren alaşımlarda demir kaba ve gevrek bir yapının ortaya çıkmasına sebep olur. Bu nedenle bu tip alaşımlarda demir oranının minimum değerde olması istenir.

- Nikelin Etkisi: Nikel alüminyum alaşımlarına yüksek sıcaklık mukavemeti ve boyutsal kararlılık sağlamak için ilave edilir. Al-Si alaşımlarına nikel ilave edildiğinde yüksek aşınma direnci ve düşük genleşme katsayısı elde edilir.

- Sodyumun Etkisi: Sodyum Al-Si alaşımlarına i yapıyı modifiye edici eleman olarak katılır. Al-Si alaşımlarına %0,001 ile %0,003 oranlarında Na ilavesiyle ötektik ve ötektik altı modifiye edilmiş veya ince ötektik malzeme yapısı elde edilir.

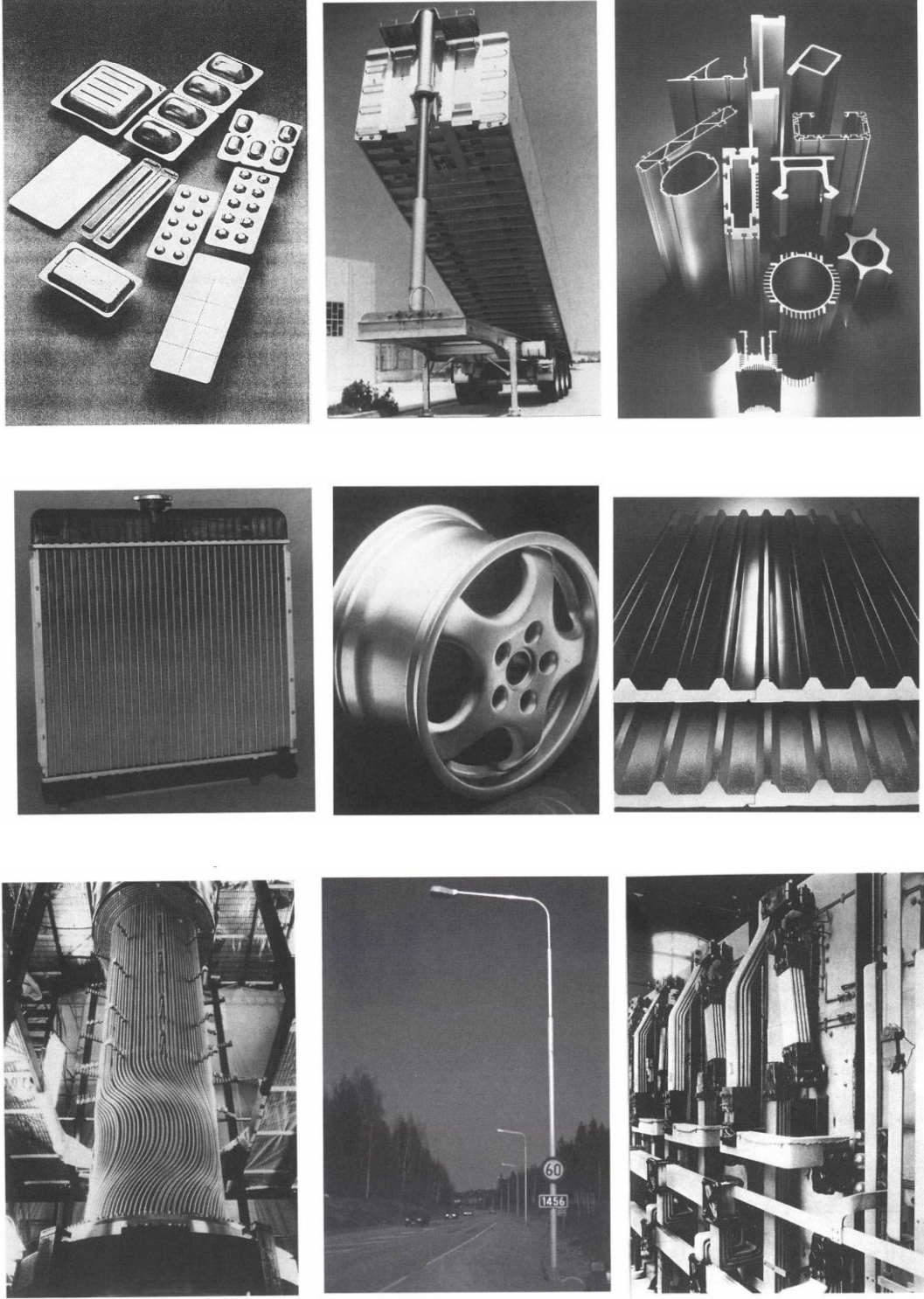
Sodyum yüksek sıcaklıkta işlenen Al-Mg alaşımlarında çatlak hatalarının oluşmasına neden olur. Mg miktarı %2'den fazla ise gevreklik sorunu ortaya çıkar [9].

## **2.7. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları**

zellikleri göz önüne alındığında alüminyum kullanım yerleri ve alternatif olduğu malzemeler Tablo 2.4'te gösterilmiştir. [3]. Şekil 2.5'te ise alüminyum alaşımlarının endüstriyel ürün olarak kullanım alanları görülmektedir [10].

**Tablo 2.4:** Alüminyumun kullanım yerleri ve alternatif olduğu malzemeler [3].

<b>Sektör</b>	<b>Önemli Kullanım Yerleri</b>	<b>Alternatif Olduğu Malzeme</b>
Ulaşım	Radyatörler Motor Parçaları Kaportalar	Bakır / Pirinç Dökme Demir Galvanizli veya Kaplamalı Saclar
Uçak / Uzay	Yapı Elemanları Uçak Gövdeleri	Çelik / Plastik / Magnezyum Karbon Elyafı / Kompozit Malzemeler
Tren	Yolcu ve Yük Vagonları	Çelik
Deniz Araçları	Tekne Gövdeleri	Ağaç / Cam Elyafı / Çelik
İnşaat	Duvar Kaplamaları Çatı Kaplamaları	Ağaç / Çelik / Plastik Ağaç / Galvanizli Çelik / Kurşun Plaka
Ambalaj	Meşrubat Kutuları Konserve Kutuları Aerosol Kutuları Folyo Kapaklar	Teneke / Plastik / Cam / Kompozit Teneke / Cam Teneke Plastik / Kağıt Plastik / Teneke
Elektrik	İletkenler Baralar Transformatörler Jeneratörler Telefon Kabloları	Bakır
Makine	Yataklar Isı Eşanjörleri Hidrolik Sistemler	Döküm Malzemeler Bakır / Paslanmaz Çelik
Dayanıklı Tüketim Malları	Buzdolapları Klimalar	Özel Çelikler / Bakır / Plastik
Diğer Uygulamalar	Sulama Boruları Ziraat Aletleri Kimyasal Tesisler	Dökme Demir / Çelik / Plastik Çelik Paslanmaz Çelik



**Şekil 2.5:** Alüminyum alaşımlarının çeşitli kullanımlarının gösterimi [10].

### 3. PLASTİK ŞEKİLLENDİRME VE SOĞUK DEFORMASYON

Üretilen metallerin %85'i bir veya daha fazla deformasyon işleminde şekillendirildikten sonra kullanılmaktadır. Şekillendirilebilme, mukavemet ile birlikte, yapısal eleman olarak kullanılan malzemelerin en önemli özelliğini teşkil eder. Bu, şekillendirilebilme çalışmalarının gereğini ve önemini göstermektedir.

Şekillendirilebilirlik; bir malzemenin belirli bir yöntemle, belirli bir tasarıma uygun olarak şekil alma yeteneği olarak tanımlanır. Malzeme, yöntem ile tasarım şekillendirilebilirlik karakteristiklerini belirleyen temel araçlardır.

Şekillendirilebilirlik gerilme, deformasyon, deformasyon hızı, sıcaklık gibi işlem değişkenlerine ve ikinci faz tanecikleri gibi malzeme değişkenlerine bağlıdır. Plastik deformasyona uğrayan bir malzemede gerilme ve deformasyonlar üniform olmayıp, bir noktadan diğerine değişkenlik gösterir. Kalıp tasarımı, ön parça geometrisi, yağlama gibi işlem değişkenleri, iş parçasındaki gerilme ve deformasyon dağılımını belirler. Bu değişkenlerin denetimiyle kırılmadan önce daha fazla deformasyon elde etmek mümkündür.

Şekillenebilir saclar, dayanıklı tüketim malları ve otomotiv endüstrisinin önemli bir girdisini oluşturmaktadır. Ancak, şekillendirme sırasında kullanılan sacların hepsi nihai ürüne dönüştürülmemekte ve belirli oranda malzeme, yırtılma veya benzer diğer nedenlerle hurdaya ayrılmaktadır. İlgili standartlar belirli bir hurda oranına izin vermekle birlikte, zaman zaman hurda oranının kabul edilebilir düzeyin çok üstüne çıktığı, hatta bazı hallerde %50'yi aşabildiği bilinmektedir.

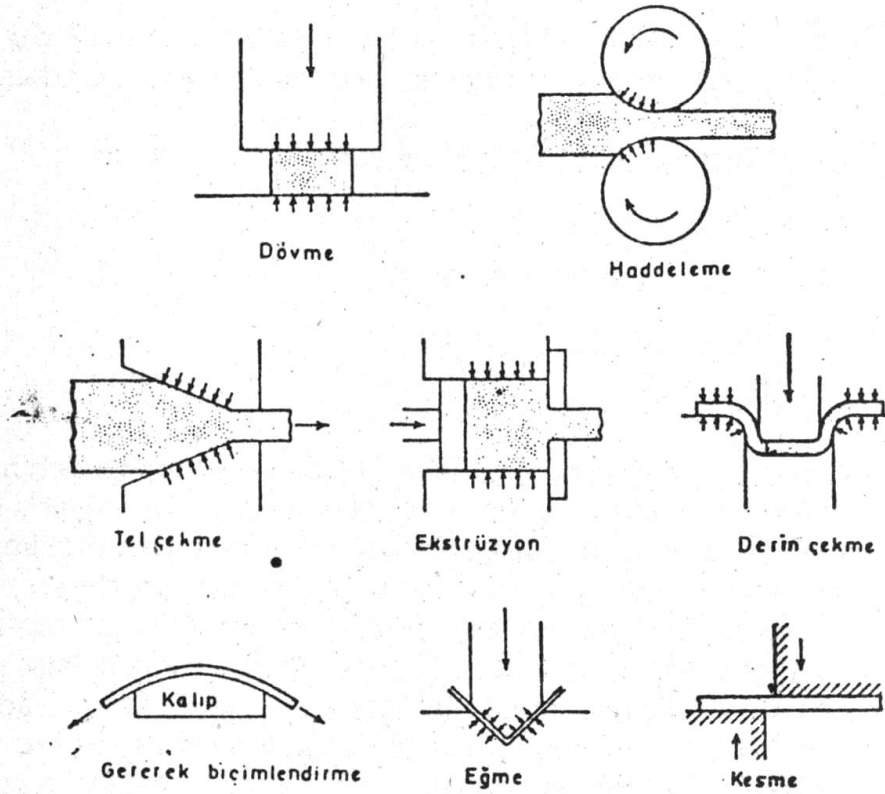
Şekillendirme işleminde karşılaşılan başarısızlık akla önce malzeme kalitesini getirmektedir. Gerçekten de hurda oranındaki yüksekliğin malzemedeki bozukluktan kaynaklandığı ileri sürülebilir. Ancak şekillendirme işleminde karşılaşılan başarısızlık malzeme kökenli olabileceği gibi, diğer etkenlerden de kaynaklanabilir. Presleme işlem parametresinin uygun seçilmemesi, yağlama şartlarının uygun ya da

yeterli olmaması, yanlış kalıp zımba tasarımı teker teker veya birlikte başarısızlığın nedeni olabilir.

Şekillendirme işlemi bu karmaşıklığı içinde değerlendirildiğinde, karşılaşılan sorunun gerçek kaynağını belirlemek zorlaşmaktadır. Yağlama şartları ve presleme işlem parametreleri mümkün olduğu sınırlar içerisinde kolaylıkla değiştirilebilmekte, ancak bu sorunu çözmediği zaman gündeme gelen malzeme mi kalıp mı ikilemine bir yaklaşım göstermek kolay olmaktadır. Kalıp tasarımında bir değişikliğe gidebilmek için önce karşılaşılan sorunun tasarımından kaynaklandığının belirlenmesi zorunludur. Bunun için de, malzemenin şekillendirme sınır değerlerinin (şekillendirme diyagramlarının) bilinmesi gereklidir. Bu değerler bir malzeme özelliği olarak belirlendiğinde, şekillendirme işlemi kolaylıkla değerlendirilebilmektedir. Kısaca diyagram, ait olduğu malzemede neyin yapılabileceğini neyin yapılamayacağını açıklıkla göstermekte, kullanıcıya üreteceği parça için yol göstermektedir [7].

### **3.1. Şekillendirme Yöntemleri**

Malzemeleri şekillendirmede kullanılan yöntemlerden birisi olan plastik şekil verme işlemlerinde, işlem sırasında kuvvet uygulanarak malzemenin kalıcı olarak şekil değiştirmesi sağlanır. Mekanik işlem olarak da isimlendirilen plastik şekil verme işlemlerinde metalleri şekillendirmede kullanılan yöntemler Şekil 3.1’de görülmektedir [11].



**Şekil 3.1:** Metalik malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan tipik mekanik işlemlerin şematik gösterimi [11].

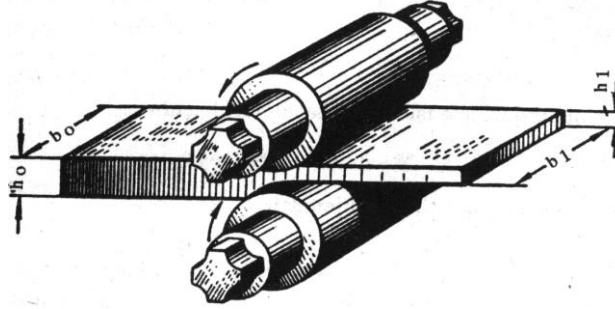
Plastik şekil verme yöntemleriyle malzemelerin şekillendirilebilmesi için, malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin üzerinde kuvvet uygulanmalıdır. Ancak bu kuvvet malzemenin çatlama ve/veya kırılmasına sebep olmamalıdır [11].

Şekil 3.1’de gösterilen yöntemlerin yanı sıra son zamanlarda geliştirilen ve yeni uygulama alanları bulan şekillendirme çeşitleri de vardır. Kauçuk yastıkla şekillendirme, süperplastik şekillendirme, patlayıcı şekillendirme, elektrohidrolik şekillendirme, elektromanyetik şekillendirme, hidrolik şekillendirme, çekiçle şekillendirme, şahmerdanla şekillendirme, gofrajlama, kıvrırma, presleyerek şekillendirme bunlara örnek olarak verilebilir [12].

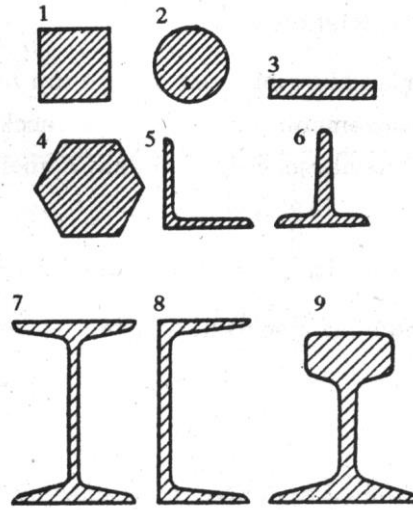
Bu yöntemlerden biri olan ve bu çalışma kapsamında incelenen malzemelerin de deformasyonunda kullanılan haddeme aşağıda incelenmiştir.

### 3.1.1. Haddelenme

Haddelenme, malzemeyi eksenleri etrafında dönen ve merdane olarak isimlendirilen iki silindir arasından geçirerek yapılan plastik şekil verme işlemidir (Şekil 3.2). Haddelenme sırasında merdaneler aynı hızda ve birbirlerine zıt yönde dönerlerken merdaneler arasından geçen malzeme istenen şekli alır. Haddelenme ürününün cinsine göre merdanelerin yüzeyi düz veya profilli olabilir (Şekil 3.3). Yassı metallerin haddelenmesinde silindirik yüzeyli profiller kullanılır [13].



Şekil 3.2: Haddelenme işleminin şematik gösterimi [14].



Şekil 3.3: Haddelenme ürün örnekleri: (1) Kare kesitli çubuk, (2) Daire kesitli çubuk, (3) Yassı ürün, (4) Altı köşe kesitli çubuk, (5) Köşebent, (6) T profili, (7) I profili (putrel), (8) U profili, (9) Ray [14]

İşlem sıcaklığına ( $T$ ) göre, haddelenmeyi sıcak ve soğuk haddelenme olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Haddelenme işlemi, sıcaklık  $T > T_{yk}$  veya  $T > 0,5 T_m$  ise sıcak,  $T < T_{yk}$  veya  $T < 0,3 T_m$  ise soğuk haddelenme ismini alır (Burada  $T_{yk}$  ve  $T_m$  sırasıyla metalin yeniden kristalleşme ve mutlak ergime sıcaklıklarıdır). Malzemenin yüksek

oranlarda plastik deformasyona uğratılabileceği sıcak haddeleme ile çeliklerde slab, blum ve kütük gibi yarı ürünler ile levha, sac, çubuk, boru, ray ve profiller gibi çeşitli ürünler elde edilir. Soğuk haddeleme ise, düzgün bir yüzey, hatasız boyutlar ve yüksek mukavemet sağlamasına karşılık, işlem için gerekli haddeleme kuvvetlerinin ve gücünün artmasına yol açar. Soğuk haddeleme, sac, folyo, ince çubuk ve tel gibi küçük kesitli ürünlerin elde edilmesinde kullanılır [11].

Soğuk haddelemenin amacı; blok halinde dökülmüş malzemeleri istenen kalınlık, yüzey kalitesi, mekanik ve metalurjik özellikleri ve maliyeti sağlayacak şekilde, düz plaka veya haddelenmiş ürün haline getirmektedir. Malzemeye uygulanan ön ısıtma ve homojenleştirme prosesleri metalin iç yapısını değiştirmektedir. Bunun mukabili haddeleme işlemi ile malzemeye uygulanan deformasyon miktarı malzemenin iç yapısında değişimleri meydana gelmesini sağlar.

Merdaneler arasındaki metalin deformasyonu (ezme) uygulanan kuvvete ve temas alanına bağlıdır. Merdanelerin ve metalin birbirine temas alanı merdanelerin büyüklüğüne ve uygulanan ezme miktarına bağlıdır.

Yüksek ezmeler uygulayabilmek için temas yüzeyi mümkün olduğu kadar küçültülmeli ki, maksimum basınç elde edilebilsin. Bu da küçük çaplı merdaneler kullanılarak elde edilebilir.

Metaller çatlamadan, çok fazla sıkıştırılabilirler. Metaller sertleştikçe sıkıştırılmaları için gereken basınç artar. Metal işlendikçe, (örneğin: haddelendikçe) sertliği artar. Haddelemeyle oluşan bu sertleşme hem işleme kolaylığı için hem de çatlamayı önlemek için isteğe göre tamamen veya kısmen tavlama işlemi ile kaldırılabilir.

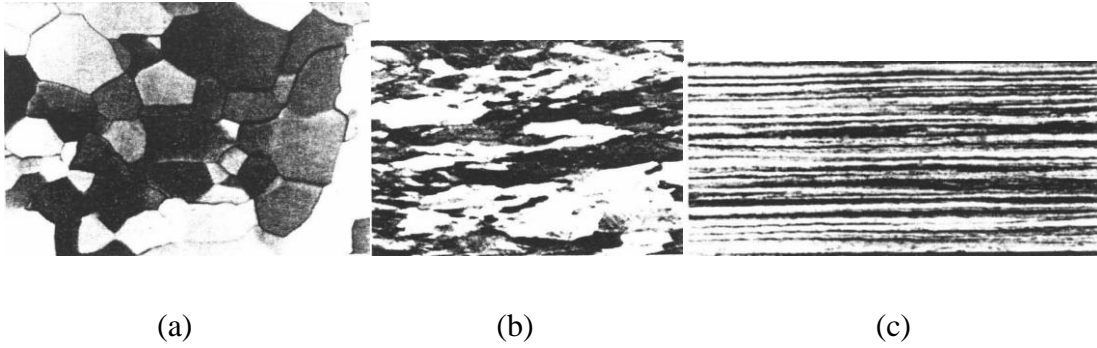
Metal haddelenirken metal tabakalarının birbirleri üzerinden kayarak yer değiştirmesi ile deformasyon sağlanır. Dış tabakalar (alt ve üst) orta tabakalara göre daha çok haddelenerek daha ileri giderler. Bir metal bloğunun kenarına çizgiler çizilip, tek yönde haddeledikten sonra bu çizgiler incelendiğinde balık kuyruğu biçimini aldıkları görülebilir.

Metalin hacmi değişmediğine fakat kalınlığı azaldığına göre boyu uzamak zorundadır. Bu da, merdanelerin arasından geçerken metal hızının artması anlamına gelmektedir. Eğer metal merdane hızı ile aynı hızda haddeye girerse haddeden daha



hızlı çıkmak zorundadır. Bir başka deyişle, merdane hızı ile aynı hızda haddeden çıkarsa o zamanda daha düşük hızda haddeye girmiş olmalıdır. Pratikte metal haddeye daha düşük hızla girer, daha yüksek hızla çıkar. İki merdane arasında “Nötr Nokta” dediğimiz bir noktada da metal, merdane ile aynı hızdadır. Bu noktadan (nötr nokta) önce metal, merdaneye göre giriş tarafına doğru kayar, bu noktadan (nötr nokta) sonra çıkış tarafına doğru hızıyla kayar. Bu kaymaya “sürtünme” karşı koyar.

Sürtünmenin, metalin hareket eden tabakaları üzerindeki etkileri bazı ilginç silindir basma deneyleriyle incelenmiştir. Silindirlerin baskı, altında üstten aşağı kadar aynı şekilde şişerek yüksekliğinin azalıp çapının düzgün bir şekilde artacağı beklenmekteydi. Fakat silindirlerin fiçı şekli aldığı görüldü. Bunun sebebi alt ve üstteki metal plakalar ile silindir arasındaki sürtünmenin silindirin alt ve üstündeki metal tabakalarının dışarı doğru hareketini kısıtlamasındadır. Bu tabakalar sırasıyla bir sonraki tabakanın dışarı doğru hareketini kısıtlarlar, fakat harekete tamamıyla mani olmazlar. Bu yüzden her tabaka bir öncekinde daha çok dışarıya doğru hareket eder ve tam ortadaki tabakalar dışarı doğru en fazla hareket ederek fiçı şeklini oluşturur [14].



**Şekil 3.4:** %99,9 saflıktaki alüminyumun a) %0, b) %45, c) %95 soğuk haddelenmiş mikroyapı görüntüsü [5].

Çok kristalli metallerde, soğuk deformasyon sonucu tane şekillerinde değişim meydana gelir. Şekil 3.4’ te ticari saflıktaki (%99,9) alüminyumun soğuk haddeleme ile tanelerinin haddeleme yönünde uzadığı görülmektedir.

### 3.2.Deformasyon Sertleşmesi

Malzemelerin mutlak ergime sıcaklıklarından ( $T_m$ , °K) oldukça düşük sıcaklıklarda ( $T < 0,4 T_m$ ) plastik deformasyona uğramaları sonucu mukavemetlerinin ve sertliklerinin artması deformasyon sertleşmesi olarak isimlendirilir. Bu oldukça önemli bir sertleştirme mekanizmasıdır.  $T < 0,4 T_m$  şartlarında yapılan plastik deformasyon soğuk işlem olarak bilinir. Soğuk işlem malzemeye plastik şekil verme yöntemleri ile uygulanır. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının çoğu herhangi bir plastik şekil verme yöntemi (örneğin haddeleme) ile deformasyon sertleşmesine uğratıldıktan sonra kullanılırlar. Deformasyon sertleşmesi, çeşitli yapı elemanlarının emniyetini arttırma açısından da faydalıdır. Eğer bir yapı elemanı aşırı yüklenecek olursa, plastik deformasyona uğrar ve buna bağlı olarak deformasyon sertleşmesi nedeniyle mukavemeti artar. Ancak, deformasyon sertleşmesinin meydana gelebilmesi için, malzemeye plastik deformasyon uygulanması gerektiğinden, malzemenin sünekliği yüksek olmalıdır [15].

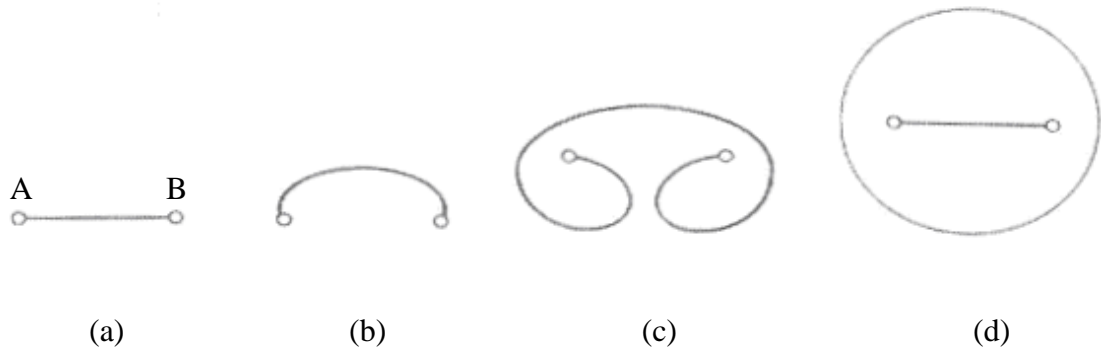
Deformasyon sertleşmesi, dislokasyonların hareketi ve etkileşimi ile ilgilidir. Dislokasyonlar, gerilme alanlarına sahip olduklarından, birbirlerini etkileyen kuvvetler oluşturmaktadırlar. Örneğin iki paralel dislokasyon birbirlerine yaklaştıkça, dislokasyonların gerilme alanları onları yok etme eğilimindedir, bu nedenle dislokasyonlar birbirlerini çekerler ve böylece üzerlerinde onları birbirlerine doğru hareket ettiren kuvvetler oluşur. Bundan farklı olarak, paralel dislokasyonların gerilme alanları birbirlerine ters ise, dislokasyonlar birbirlerini iterler [15].

Bir kristalde tek ve izole bir dislokasyonu hareket ettirmek için, çok küçük bir gerilme gereklidir. Bu dislokasyon kristal içinde boydan boya hareket edip dışarı atılınca meydana gelen şekil değiştirme de küçüktür ve ancak bir kayma basamağı oluşur. Gerçekte mikroskobik düzeyde şekil değiştirme elde etmek için çok büyük sayıda dislokasyonun hareketine gerek vardır.

Bir kristaldeki dislokasyon yoğunluğu  $\rho$ 'yu birim hacmindeki dislokasyon çizgilerinin toplam uzunluğu ( $\text{cm çizgi}/\text{cm}^3$ ) veya yaklaşık olarak herhangi bir kesitte birim alanı delen dislokasyonların sayısı ( $\text{çizgi sayısı}/\text{cm}^2$ ) şeklinde tanımlamak mümkündür. Çok saf ve tavllanmış tek kristallerde dislokasyon yoğunluğu  $10^2-10^3$  ( $\text{çizgi}/\text{cm}^2$ )'ye kadar düşebilir.

Bir metalde başlangıçta mevcut dislokasyon yoğunluğu, kopma şekil değiştirmesini oluşturmak için gerekenden birkaç merteye daha azdır. Örneğin, tavllanmış metallerde ortalama dislokasyon yoğunluğu  $10^7$  ile  $10^8$  çizgi/cm<sup>2</sup> civarındadır. Halbuki aynı numunede önemli derecede plastik şekil değiştirmeden sonra bu yoğunluk  $10^{11}$  -  $10^{12}$  çizgi/cm<sup>2</sup>, ye kadar ulaşılabilir. O halde plastik şekil değiştirme süresinde dislokasyon doğuran bir mekanizmanın varlığı zorunludur. [16]

Frank – Read kaynağı diye adlandırılan böyle bir dislokasyon doğurucu kaynak Şekil 3-5'te görülmektedir. Genellikle kapalı bir çevrim oluşturan bir dislokasyonun sadece A ve B noktaları arasındaki bölümü hareketli, yani bir kayma düzlemi üzerinde olsun (Şekil 3.5.a). Bir kayma gerilmesinin etkimesi ile dislokasyon hareket edecek, ancak kapalı çevrim bozulmayacağından A ve B noktaları sabit, dislokasyon cephesi eğilerek bir yay oluşturacaktır. (Şekil 3.5.b). Şekil 3.5.c aşamasından geçen dislokasyon, paralel büyüyen kısımların etkileşimi ile Şekil 3.5.d'de gösterilen duruma ulaşır. Yani Şekil 3.5. c'de karşılıklı yaklaşan kısımlar birbirini yok ederek, tekrar başlangıçtaki A-B parçası ve ayrıca dislokasyon halkası ortaya çıkar.



**Şekil 3.5:** Frank- Read Kaynağı. (a) Kayabilir A-B dislokasyon parçası. (b)'den (d)'ye kadar gerilemenin artırılması ile bir dislokasyon halkasının ve yeni bir A-B dislokasyon parçasının oluşumu [17].

Kayma gerilmesinin etkimeye devam etmesi halinde olay tekrarlanacağından, böyle bir kaynak devamlı olarak yeni dislokasyon halkaları oluşturur. Şekil değiştirmiş bir metalde, şekil değiştirmemiş oranla dislokasyon yoğunluğunun önemli miktarda yüksek olması bu gerçeğe dayanır. Dislokasyon halkalarının diğer engellerle veya başka kaynaklarda oluşmuş halkalarla tepkimeye girmesi dislokasyon ağlarını ortaya çıkarır [17].

Çeşitli dislokasyon kaynaklarının çalışması dislokasyon kesişmelerinin sayısını gittikçe artırır ve neticede her birinde birçok basamaklar bulunan karışık bir dislokasyon çizgileri ormanı oluşturur. Böylece takip eden şekil değiştirmeler için gerilmeyi sürekli olarak arttırmak gereklidir. Bu olaya deformasyon sertleşmesi denir. Bununla beraber şekil değiştirme arttıkça gerilmenin artış hızında azalma olur, çünkü yukarıda görülen deformasyon sertleşmesi mekanizmanın tersi yönünde çalışan bir toparlanma veya yumuşama olayı vardır. Örneğin, her ne kadar şekil değiştirmeyi daha da arttırmak için uygulanacak gerilmenin yükseltilmesi gerekirse de gerilmedeki bu yükseliş çapraz kaymalara veya yığılmış dislokasyonların harekete zorlanmasına neden olabilir. Diğer taraftan sıcaklığı arttırarak dislokasyon tırmanmalarından doğan toparlanma olayı da etkin hale gelebilir [16].

Deformasyon sertleşmesine uğramış bir kristalde malzemenin mukavemetindeki deformasyon sertleşmesinden kaynaklanan artış [16];

$$\Delta\sigma = \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (3.1)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Burada  $\alpha$ , bir sabit (genellikle 0,3 – 0,6 arasındadır),  $\rho$  dislokasyon yoğunluğu,  $G$  kayma modülü,  $b$  dislokasyon çizgisine dik burgers vektörü ve  $\Delta\sigma$  deformasyon sertleşmesi sonucunda mukavemette meydana gelen artıştır.

Endüstriyel olarak, deformasyon sertleşmesinin şekillendirme, imalat işlemleri üzerindeki etkisi ve hem de işlenmiş metal parçaların özellikleri üzerindeki etkisi çok önemlidir.

Bir şekillendirme işleminde, deformasyon sertleşmesi iyi ya da istenmeyen durum olabilir. Bazen aynı anda her iki durum de söz konusu olabilir. Örneğin, bir soğuk haddeleme işleminde, deformasyon sertleşmesi, devam eden deformasyona karşı metalin direncini sürekli olarak artırır ve deformasyona devam edebilmek için sürekli artan bir güç gerektirir. Ayrıca deformasyon sertleşmesi metalin gevrekliğini sürekli olarak artırır ve böylece deformasyonun ileriki kademelerinde çatlak veya yarı oluşma tehlikesi ortaya çıkar. Özellikle bu etkiler nedeniyle, metallerin çoğunda, nispeten düşük bir deformasyondan sonra soğuk haddelemeye ara vermek gereklidir v haddelemeye devam etmeden önce deformasyon sertleşmesini ortadan kaldırmak için tavlama gereklidir.

Bu nedenle malzeme çok kere yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde belirli bir süre ısıtılır veya tavllanır. Bu işlem sonucunda şekil değiştirmeden arınmış yeni taneler elde edilir. Yumuşatılmış metal daha fazla şekil değiştirmeye elverişli hale gelir. Tavlama ve yeniden kristalleşme olayı dislokasyonların geniş ölçüde giderilmesine ve daha düşük enerjiyi gerektiren konumlara doğru göçmesine sebep olur. Dislokasyonların birçoğu tane sınırlarına, mikroskobik boşluklara ve malzeme yüzeylerine çıkarak kaybolur veya rastladıkları zıt işaretli dislokasyonlar tarafından yok edilir. Yukarıda sözü edilen hallerden hiç birini yapamayan dislokasyonlar da şekil ve yapı değişimine doğru eğilim gösterirler. Örneğin, basamakları kaybolabilir, boyları kısalabilir veya bir hizaya dizilerek küçük açılı tane sınırı türünden bir alt tane sınırı oluşturabilirler. Deformasyon durdurularak yapılan bu tür ara tavlama pahalıdır, zaman kaybıdır birçok yönden istenmeyen bir durumdur.

Öte yandan, deformasyon sertleşmesi soğuk işlenmiş metal parçalara, son özelliklerine nazaran yüksek derecede bir elastik eğilebilme yeteneği kazandırır. Böylece, bazı tip paslanmaz çeliklerin soğuk haddelenmesiyle, bunların çekme mukavemetleri yaklaşık iki katına ve akma mukavemetlerinin de iki kattan da fazla bir değerde arttırılmasıyla, uçaklar ve demiryolu vagonlarının dizaynında, hem ağırlık hem de malzeme maliyetinde önemli tasarruflar yapmak mümkündür. Pirinçler ve diğer birçok yaygın alaşımların, soğuk şekillendirmeye aşınma direnci, mukavemet gibi özelliklerinde belirgin bir gelişme sağlanabilir. Yalnız bu yapılırken bazı diğer özelliklerin – özellikle süneklilik ve dövülebilirlik – korunması gereklidir.

Derin çekme, metalik saçlara uygulanan ve pek çok endüstri dalında çeşitli parçaların üretiminde kullanılan bir şekillendirme yöntemidir. Derin çekme işlemlerinde en çok kullanılan malzeme az karbonlu çeliktir. Bunun yanı sıra Al, Cu, Pb ve pirinç gibi demir dışı metal ve alaşımların levha ve saçları da geniş ölçüde kullanılmaktadır.

Soğuk deformasyon sınırı; bir metalin esas olarak deformasyon sertleşmesi yeteneğinden etkilenen bölgesel boyun verme olayından sonra şekillendirmeye devam etmenin mümkün olmadığı plastik kararsızlık davranışıdır. Bu yetenek, basit çekme deneyinden saptanan deformasyon sertleşmesi üssü ( $n$ ), akma oranı, ve homojen uzama ile tanımlanabilir. Gerçekte, şekillendirme işlemlerinin çoğunda gerilme sistemi iki eksenslidir. Fakat basit çekme deneyinden saptanan özelliklerin,

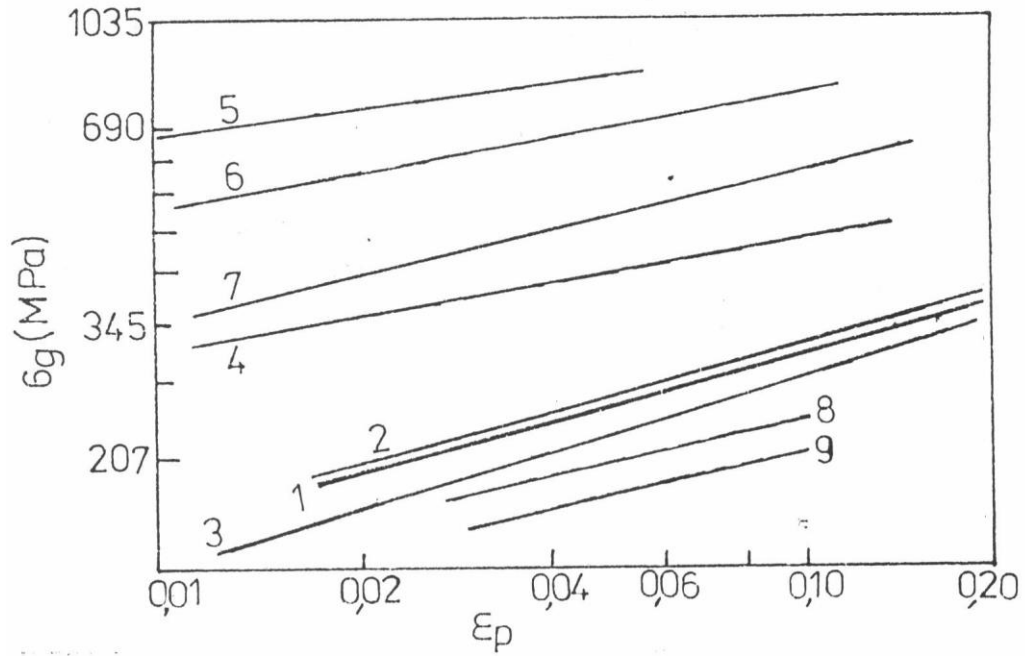
örneğin, gererek şekillendirmede olduğu gibi, iki eksenli gerilme durumları için, iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.

Bu ilişkide en iyi özellik, üslü eşitlik tarafından tanımlanan deformasyon sertleşmesi üssüdür. Deformasyon sertleşmesi üssü (n), bir metalin bölgesel deformasyona olan direnme yeteneğini belirtir. (n) değeri Duncan tarafından ileri sürülen bir çok yöntem ile saptanabilir. Hatta eşitliğe uymayan metallerde (n) değerini saptamak için Halford tarafından ileri sürülen alan yöntemini kullanmak mümkündür.

Deformasyon sertleşmesi üssü (n), metalin gerilme gradyanı altında, birim şekil değişimini dağıtabilme yeteneğinin bir ölçüsü olduğundan, (n) değerinin yüksek olması, birim şekil değişiminin da homojen olarak dağılmasına, deformasyona uğrayan malzemenin sertleşerek boyun vermeye karşı daha fazla direnç göstermesine sebep olur. Kleemola ve Kumpulainen, (n) değerinin yöne göre değiştiğini tespit etmişler v ortalama (n) değerinin yumuşak Al (Al 1100-0) için 0.243 ve yarım sert Al (Al 1100-H14) için 0,27 olarak bulmuşlardır.

Deformasyon sertleşmesi üssü, bakır, pirinç, ticari saflıkta Al ve ostenitik paslanmaz çelikler gibi, tavllanmış saf metaller ve tek fazlı alaşımlar için nispeten büyüktür. Oysa, deformasyon sertleşmesi üssü (n), soğuk haddelenmiş çelik, yaşlanma sertleşmesi uygulanmış Al-alaşımları, su verilmiş ve temperlenmiş çelikler gibi soğuk şekillendirilmiş tek fazlı metaller ve dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlarda daha düşüktür.

Gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme çekme deneyi verileri logaritmik kağıda çizildiğinde, hemen hemen doğrusal bir ilişki gösteren metal ve alaşımların sayısı oldukça fazladır [12].



**Şekil 3.6:** Çeşitli malzemeler için logaritmik gerçek gerilme – gerçek şekil değişimi arasındaki ilişki [18].

Tablo 3.1’de, Şekil 4.4’te verilen grafikteki malzemeler için n ve K değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Farklı malzemeler için n ve K sabitleri [18].

No	Malzeme	İşlem	n	K [MPa]
1	% 0,05 C, Çelik	Tavlanmış	0,261	532
2	% 0,05 C, Söndürülmüş Çelik	Tavlanmış ve Temper Haddesi Uygulanmış	0,234	504
3	% 0,05 C, Tamamen Dekarbürize Edilmiş	Tavlanmış	0,284	520
4	% 0,05–0,07 P’lu Az C’lu Çelik	Tavlanmış	0,156	643
5	SAE 4130 Çelik	Tavlanmış	0,118	1168
6	SAE 4130 Çelik	Normalize Edilmiş ve Temper Haddesi Uygulanmış	0,156	1065
7	430 Paslanmaz Çelik (%17 Cr)	Tavlanmış	0,229	986
8	Alcoa 24-S Al	Tavlanmış	0,211	385
9	Reynolds R.301 Al	Tavlanmış	0,211	334

Deformasyon sertleşmesi üssü, istif hatası enerjisinin (İHE) azalmasıyla artış gösterir. Aşağıdaki Tablo 3.2 bazı metaller için n ile İHE arasındaki ilişkiyi göstermektedir [18].

**Tablo 3.2:** Deformasyon sertleşmesi üssü (n) ile İHE arasındaki ilişki [18].

Metal	İHE [Mj/m <sup>2</sup> ]	n
Paslanmaz Çelik	10	0,45
Bakır	90	0,30
Alüminyum	250	0,15



## 4. YENİDEN KRİSTALLEŞME TEORİSİ

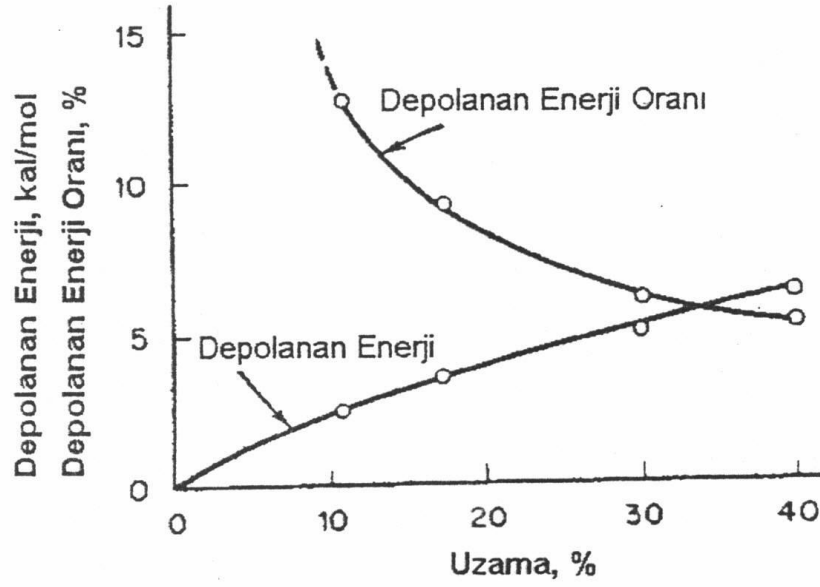
Yeniden kristalleşme soğuk işlem ile malzemenin mikroyapısında meydana gelen yüksek açılı tane sınırlarının hareketidir [19].

Bu bölümde soğuk deformasyon sonrasında tavlama ile meydana gelen yeniden kristalleşme ve etki eden parametreler ayrıca incelenecektir.

### 4.1. Soğuk İşlemde Depolanan Enerji

Soğuk işlemde harcanan enerjinin çoğu ısıya dönüşür, fakat bir kısmı deformasyonla oluşmuş çeşitli kafes hatalarına bağlı deformasyon enerjisi olarak metalde depolanır. Depolanan enerjinin miktarı, deformasyon şiddetine, metalin bileşimi, deformasyon hızı, sıcaklık gibi parametrelere bağlıdır. Araştırmalar, depolanan enerji miktarının, soğuk işlemde harcanan enerji miktarının %10'u kadar olduğunu göstermiştir [20,21,23]. Çok kristalli saf bakırda (%99.999) uzama miktarına bağlı olarak depolanan enerji miktarı Şekil 4.1'de verilmiştir. Buradan, deformasyon miktarı arttıkça depolanan enerji miktarının arttığı görülmektedir.

Soğuk işlem metaldeki dislokasyonların yoğunluğunu artırır. Tavlanmış bir metal  $10^6$ - $10^8$  cm/cm<sup>-3</sup> dislokasyon yoğunluğuna sahipken, şiddetli soğuk deformasyona uğramış metallerde dislokasyon yoğunluğu  $\approx 10^{12}$  cm/cm<sup>-3</sup>'dir. Dislokasyonların kendisine özgü enerjisi vardır. Dislokasyon yoğunluğunun arttıkça, depolanan enerji miktarı da artar. Plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerinden kaynaklanan atom boşluklarının oluşması da soğuk deformasyona uğramış metallerde enerji kaynağı olarak kabul edilir [20,21].



**Şekil 4.1:** Çok kristalli saf bakırda soğuk işlemde depolanan enerji [21].

Deforme edilmiş bir metalin serbest enerjisi,  $\Delta F$ , tavllanmış bir metalin serbest enerjisinden yaklaşık olarak depolanmış deformasyon enerjisi kadar fazladır. Plastik deformasyon malzemenin entropisini artırır, fakat bu artış ( $\Delta S$ ) kalıntı deformasyon enerjisi sebebiyle iç enerjideki artışa göre düşüktür [21,22]

$$\Delta F = \Delta E - T \Delta S \quad (4.1)$$

Bu nedenle, serbest enerji denklemindeki (Eşitlik 4.3)  $T \Delta S$  terimi ihmal edilebilir ve;

$$\Delta F \approx \Delta E \quad (4.2)$$

olur. Burada  $\Delta F$ ; soğuk işlem serbest enerjisi,  $\Delta E$ ; iç veya depolanan deformasyon enerjisi,  $\Delta S$ ; soğuk işlemde dolaylı entropi artışı ve  $T$ , mutlak sıcaklıktır.

Soğuk işlenmiş malzemelerin serbest enerjisi, tavlama metallerekinden daha yüksek olduğundan denge konumuna dönme eğilimi vardır ve bu nedenle koşullar sağlandığında yumuşayabilir. Soğuk işlem halinin karmaşıklığı sebebiyle malzeme genellikle basit tek bir reaksiyonla tavlama durumuna dönmez. Malzemenin soğuk işlemde önceki halini alması birkaç farklı reaksiyonla meydana gelir. Bu reaksiyonların çoğu atom, atom boşluğu hareketiyle (yayınma ile) ilgilidir ve bu

nedenle son derece sıcaklığa duyarlıdır. Reaksiyon hızlarının sıcaklıkla değişimi Arrhenius ilişkisi şeklindedir;

$$RH = A e^{-Q/RT} \quad (4.3)$$

Burada; RH reaksiyon hızı, Q aktivasyon enerjisi, R gaz sabitidir.

Soğuk işlem sırasında atom boşluklarının meydana gelmesi ne bunların konsantrasyonunun gittikçe artması malzemede çatlaklara ve yırtılmalara sebep olur. Bu nedenle soğuk işlem miktarı metallerde sınırlıdır. İşte bunun içindir ki, malzeme soğuk işlem sırasında zaman zaman tavlanır.

Tavlama, soğuk işlem görmüş malzemelerin sabit sıcaklıkta bir süre tutulmasıdır. Tavlama esnasında soğuk işlem yapısı bozulur. Malzeme yapısında bu değişim başlıca üç aşamada gerçekleşir. Bunlar sırasıyla; toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesidir.

## 4.2. Toparlanma

Bir metal soğuk deformasyona uğradığında hemen hemen tüm fiziksel ve mekanik özellikleri değişir. Soğuk deformasyon; mukavemet, sertlik ve elektrik direncini artırır, sünekliği azaltır.

Tavlama işleminin toparlanma kademesinde, soğuk deformasyon sonucu olarak değişikliğe uğramış fiziksel ve mekanik özellikler orijinal değerlerine dönme eğilimindedir. Orijinal hale dönüşün ilk aşaması “toparlanma” olarak bilinir. Toparlanma aşamasında dislokasyonlar düzene girer ve malzemenin soğuk işlem mukavemetinde veya sertliğinde bir miktar düşüş kaydedilir. Toparlanma prosesinde çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklerin geri kazanılma hızları düşüktür [20,21].

Toparlanma aşamasında tanelerin yönlenmesinde değişim olmaz fakat soğuk işlem sonucu yapıda oluşan dislokasyonlar yeniden düzene girer ve bir kısmı yok olur. Bu yok olma ters işaretli dislokasyonların bir araya gelmesiyle meydana gelir. Bu proses dislokasyonların kayma ve tırmanma hareketlerini kapsar. Bu hareketler için itici güç, poligonizasyon sonunda dislokasyonların enerjisinin azalmasından gelir. Poligonizasyon hızı, sıcaklıkla artar, çünkü dislokasyonların tırmanması boşlukların

hareketine bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda dislokasyonların kayması da kolaylaştığı için sıcaklığın atması poligonizasyonu kolaylaştırır. Ayrıca, artan sıcaklıkla kritik kayma gerilmesi de düşmektedir.

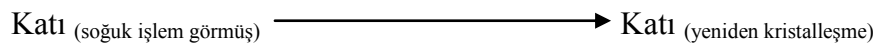
Bir kristal tavlaniırsa, eğilmiş kristaller küçük kristal parçalarına bölünür. Bu “düşük açılı” kristallere ayrılma olayına “poligonizasyon” ismi verilmiştir [21].

Kenar dislokasyonlarının düşük açılı taneler şeklinde yeniden gruplaşması, gerilme enerjisini düşürmenin yanında ikinci bir önemli etkiye sahiptir; bu da genel kafes eğiminin kalkmasıdır. Poligonizasyon sonucu, düşük açılı tane sınırları arasındaki kristal parçaları düz, eğimsiz düzlemlere sahip, gerilmesiz kristal haline yaklaşır. Bununla beraber, her kristalcik 10°’den daha düşük açılı tane sınırları sebebiyle komşularından farklı yönelmeye sahiptir.

Poligonizasyonda oluşan bu düşük açılı sınırlara alt tane sınırı ve çevreledikleri alanlara da alt tane denir. Alt-tanelerin şekli, boyutu ve dağılımı metale, tavlama sıcaklığı ve süresine bağlıdır [21].

### 4.3. Yeniden Kristalleşme

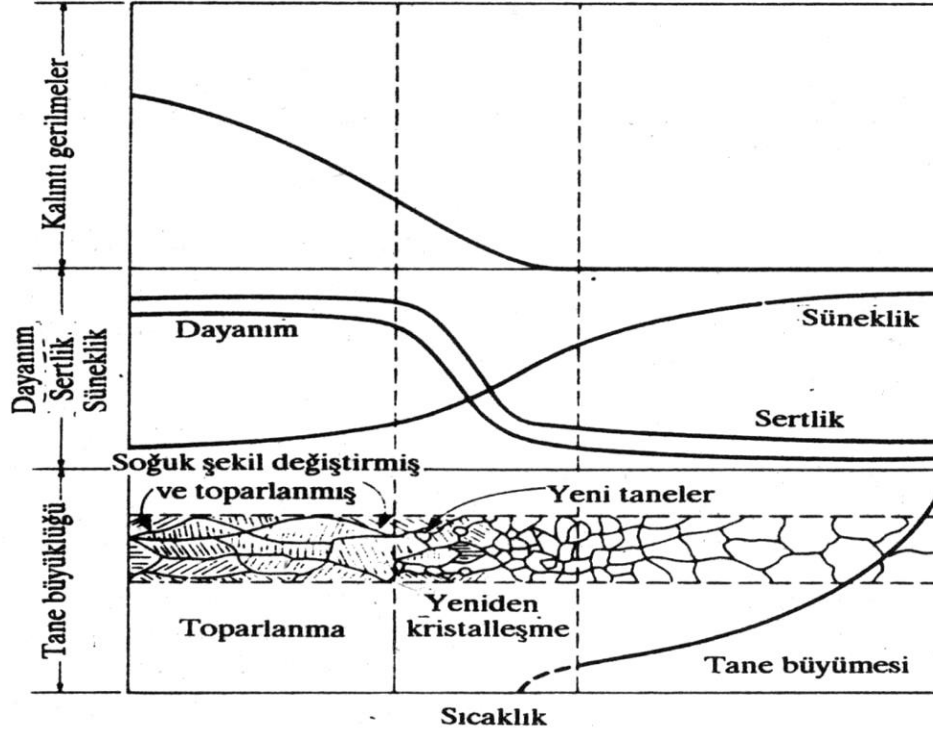
Soğuk işlem görmüş malzemenin tavlama sırasında toparlanma evresini yeniden kristalleşme izler. Toparlanma ve yeniden kristalleşme temel olarak farklı iki olaydır. Yeniden kristalleşme, soğuk işlem neticesinde deforme olmuş tanelerin yerinin tamamen yeni tanelerin almasıdır. Dolayısıyla yeniden kristalleşme;



şeklinde bir katı-katı dönüşümdür. Bunun sonucu olarak malzeme soğuk işlemde kazandığı mekanik özelliklerini tamamen kaybeder (Şekil 4.2), Diğer yandan, yeniden kristalleşmenin kinetiği toparlanmadan tamamen farklıdır, çekirdeklenme ve büyüme kademelerini içerir. Bu tip diğer proseslerde uygun olarak bir izotermal tavlama sırasında yeniden kristalleşme çok yavaş başlar ve maksimum reaksiyon hızına ulaşır, sonra yavaşça biter. Toparlanma ve yeniden kristalleşme arasındaki fark, toparlanmanın tavlama sürecinin başlangıcında ve ilk enerji çıkışının sebebi olmasıdır.

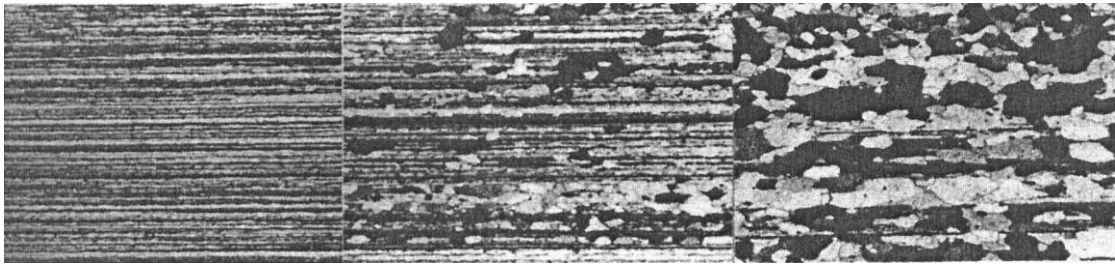
Eşitlik 4.3 yeniden kristalleşme reaksiyonunun birçok metalde basit bir aktivasyon denklemiyle açıklanabileceğini göstermiştir. Ancak, bu ampirik eşitlik yeniden kristalleşmede meydana gelen atomik mekanizmaları göstermez. Bunun sebebi yeniden kristalleşmenin çekirdeklenme ve büyüme prosesini içermesidir. Çekirdeklenme ve çekirdek büyüme hızı aynı zamanda nihai tane boyutunu da belirler. Eğer çekirdek hızlı oluşur ve yavaş büyürse birçok kristal oluşur. Bu durumda nihai tane boyutu küçük olur. Diğer yandan, çekirdeklenme hızı çekirdek büyüme hızına göre küçükse tane boyutu büyük olacaktır. Yeniden kristalleşmenin kinetiği, çekirdeklenme hızı ve çekirdek büyüme hızına bağlıdır.

Yeniden kristalleşmenin kinetiğini ortaya koyan teori 1952 yılında Burke ve Turnbull tarafından ortaya atılmıştır [20,21]. Bu teoriye göre belirli bir kuluçka döneminden sonra soğuk işlem görmüş malzeme içinde tamamen yeni kristaller oluşmaktadır. Bu yeni kristaller tane sınırları, kayma düzlemleri gibi yüksek kafes deformasyonuna sahip noktalarda çekirdeklendiklerinden, çekirdeklenme noktaları önceden bilinebilir. Büyüyen ve etrafındaki deformasyonlu matrisi tüketen çekirdek için birkaç model olmasına karşın, bu modeller iki noktada uyuşurlar. Birinci nokta; çekirdeğin büyüebilmesi için belirli kritik bir boyuta sahip olması, ikinci nokta ise; çekirdeğin en azından bir kısmının büyük aç (tane) sınırıyla çevrili olması gerektiğidir.



**Şekil 4.2:** Toparlanma ve yeniden kristalleşmenin tane yapısına etkilerinin şematik gösterimi [13].

Çok kristalli metallerde, tane sınırları ve üç tanenin bulunduğu noktalar çekirdeklenmeye uygundur. Soğuk deformasyona uğramış metalin iki tanesinin dislokasyon yoğunluğunda fark varsa, tavlama esnasında daha az dislokasyona sahip tanenin sınırı daha fazla dislokasyona sahip taneye doğru hareket edilebilir. Bu hareket bir çıkıntı meydana getirir. Bu tane sınırı hareketi, yolundaki dislokasyonları süpürür ve böylece küçük, dislokasyonsuz bir bölge oluşur. Eğer bu çıkıntı kritik çekirdek boyutunu aşarsa çekirdek oluşumunun iki şartı da yerine gelmiş olur [20,21]. Şekil 4.3’de soğuk haddelenmiş alüminyumun yeniden kristalleşme esnasındaki mikroyapı değişimi görülmektedir.

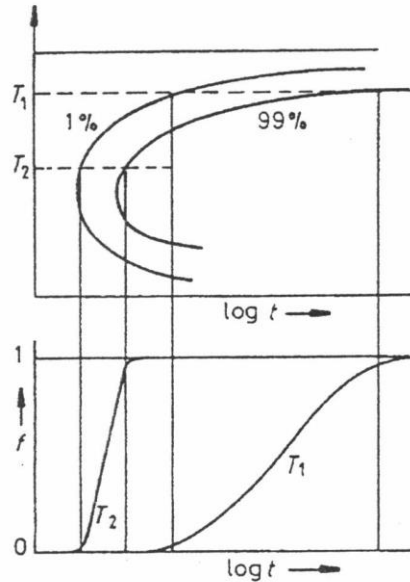


**Şekil 4.3:** %85 soğuk haddelenmiş %0,8 magnezyum içeren alüminyum alaşımının yeniden kristalleşmesi sırasında mikroyapısal değişimleri[24]

Yeniden kristalleşme sıcaklıkla aktive olan bir prosestir bu nedenle yeniden kristalleşmeyi etkileyen en önemli parametre sıcaklık ve işlem süresidir. Yeniden kristalleşme etkileyen diğer parametreler; deformasyon miktarı, metalin saflık derecesi ve başlangıç tane boyutudur [20,21,23,25].

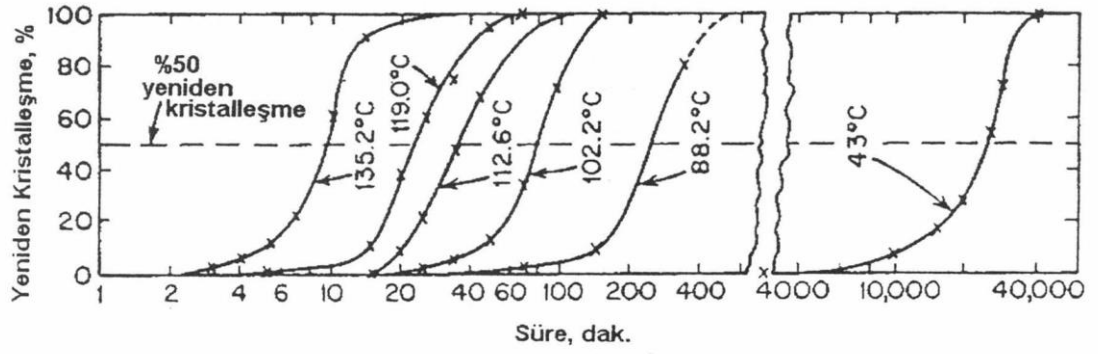
#### 4.3.1. Yeniden Kristalleşmeye Zaman ve Sıcaklığın Etkisi

Yeniden kristalleşme prosesi çalışmanın bir yolu Şekil 4.4'te görülen tipte yeniden kristalleşme eğrileri elde etmektir. Her eğri çalışılan sıcaklıktaki verileri ve yeniden kristalleşme miktarını zamana bağlı olarak gösterir. Bu tip her eğrinin verileri soğuk işlenmiş numunelerin sabit sıcaklıkta farklı sürelerde tutulmasıyla elde edilir (Şekil 4.5).



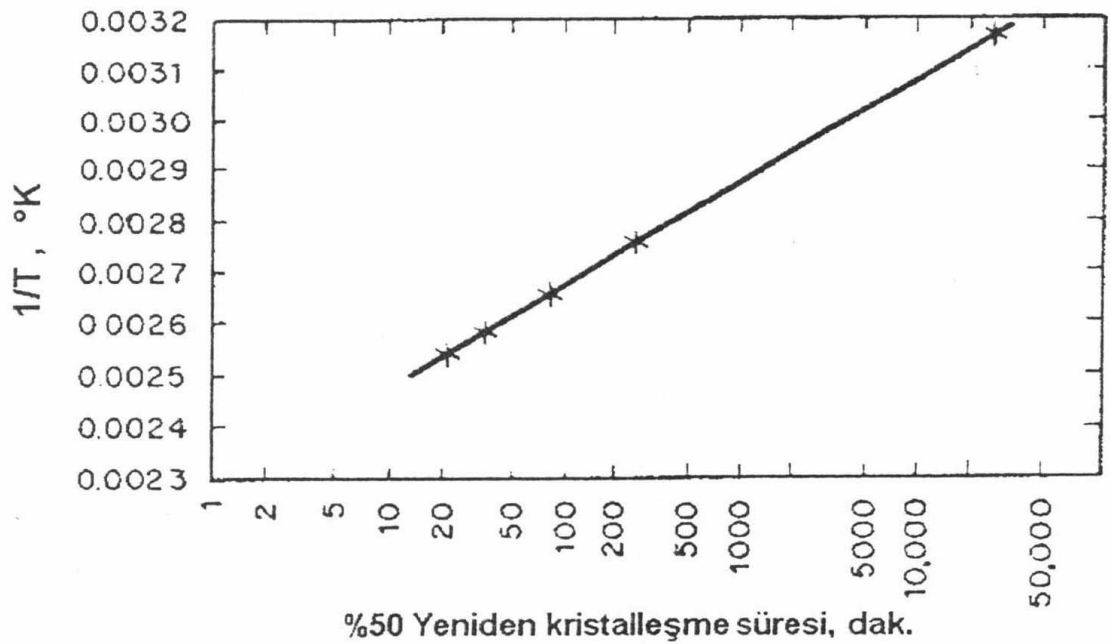
**Şekil 4.4:** İzotermal yeniden kristalleşme eğrilerinin elde edilmesi [25].

Fırından çıkartılıp oda sıcaklığına soğuttuktan sonra her numune yeniden kristalleşme derecesini saptamak için metalografik olarak incelenir. Tavlama sıcaklığının artmasına etkisi Şekil 4.5'de açıkça görülmektedir. Sıcaklık arttıkça, yeniden kristalleşme için gerekli süre azalır. Şekil 4.5'deki S-eğrileri çekirdeklenme ve büyüme proseslerinin tipik eğrileridir [20,21,23,25]



**Şekil 4.5:** % 98 Soğuk deformasyona uğramış saf bakırın (%99,99 Cu) izotermal yeniden kristalleşme eğrileri [21,25].

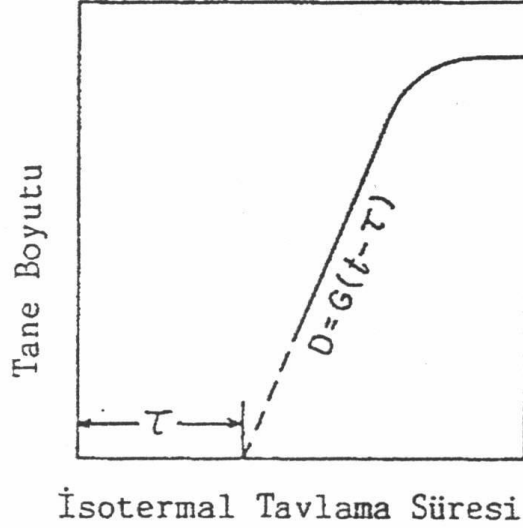
Şekil 4.5'deki eğrileri kullanarak, sabit bir yeniden kristalleşme oranı için, o sıcaklıkta yapının yarısının yeniden kristalleşmesi için gerekli zaman bulunabilir. Şekil 4.6'daki mutlak sıcaklığın tersinin bir fonksiyonu olarak çizilmiş zamanı (t) göstermektedir. Şekil 4.6'daki eğri, saf bakırın yeniden kristalleşme verilerinin gösterir ve Arrhenius ilişkisini (Eşitlik 4.3) sağlar.



**Şekil 4.6:** Saf bakırın %50 yeniden kristalleşme miktarına karşı mutlak sıcaklığın tersinin ilişkisi [21,25].



Yeniden kristalleşmede, büyümekte olan tanelerin çapını  $D$  ve lineer büyüme hızı da  $G$  ile gösterilirse, tane boyutunun tavlama süresi ile değişimi genellikle Şekil 4.7'deki gibidir. Burada  $\tau$  kuluçka süresini göstermektedir.



**Şekil 4.7:** Tavlama süresine bağlı olarak yeniden kristalleşmenin gelişmesi [20,25].

Yeniden kristalleşme için geçen zaman  $(t-\tau)$ 'dan

$$D = G (t - \tau) \quad (4.4)$$

yazılabilir. Teşekkül eden tanelerin şekilleri küre olarak alındığında, çekirdeklenen tanenin hacmi  $v$ ,

$$v = 4/3 \pi r^3 \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.4 ile eşitlik 4.5 birleştirildiğinde,  $t$  süresinde yeniden kristalleşen tanenin hacmi,

$$v = \pi / 6 G^3 (t - \tau)^3 \quad (4.6)$$

Burada  $\pi / 6 = K$  ile gösterildiğinde,  $K$  en genel anlamda tane şekline ait faktörü temsil eder. Yeniden kristalleşmede, çekirdekleşme hızı;

$$\dot{N} = dN / dt \quad (4.7)$$

dir. Burada  $N$ , birim hacimdeki çekirdek sayısıdır. Yeniden kristalleşen toplam hacmi ise;

$$V = K G^3 (t - \tau)^3 \check{N} dt \quad (4.8)$$

olacaktır  $t$  süresinde yeniden kristalleşen tanelerin toplam hacmi ise;

$$X = K G^3 \int_0^t (t - \tau)^3 \check{N} dt \quad (4.9)$$

Çekirdekleşme hızı ( $\check{N}$ ) sabit olması halinde,

$$X = K \check{N} G^3 t^4 / 4 = \check{N} G^3 t^4 / 3 \quad (4.10)$$

Bu denklem taneler diğer tanelerin büyümesini engellemediği sürece geçerlidir. Buna mukabil, uzun sürede taneler birbirlerinin büyümesini etkileyerek  $t$  süresinde kristalleşen miktarla bu zaman zarfında meydana gelen tanelerin hacmi,

$$dV / dX = 1 / 1 - X \quad (4.11)$$

$$\int_0^x (dX) / (1 - X) = \int_0^v dV \quad (4.12)$$

$$\ln (1 - X) = V \quad (4.13)$$

$$X (t) = 1 - \exp(-V) \quad (4.14)$$

elde edilir.  $V$ 'nin değeri yerine konulduğunda,

$$X (t) = 1 - \exp (-K G^3) \int_0^t (t - \tau)^3 \check{N} dt \quad (4.15)$$

elde edilir. Eğer  $\check{N}$  sabit kabul edilirse,

$$X (t) = 1 - \exp (-K G^3 \check{N} t^4) \quad (4.16)$$

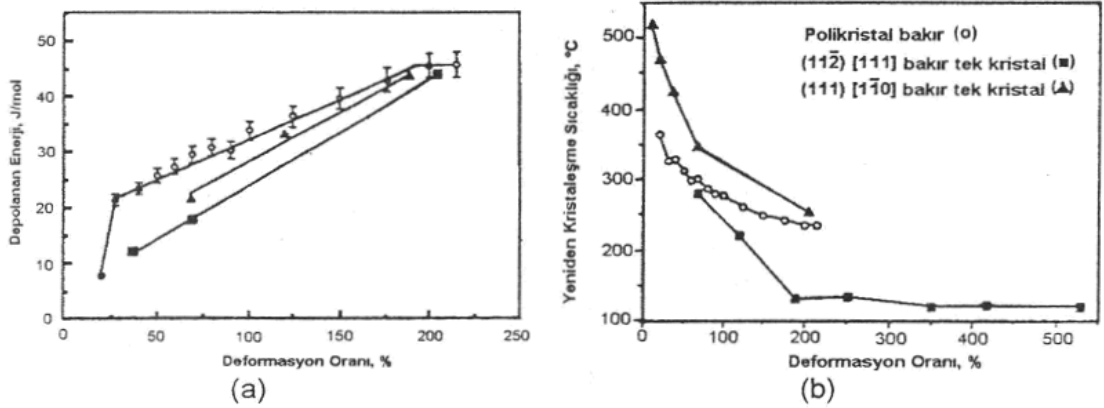
Elde edilir.  $K G^3 \check{N} = A$  ile gösterildiğinde, en genel şekilde,

$$X (t) = 1 - \exp (-A t^n) \quad (4.17)$$

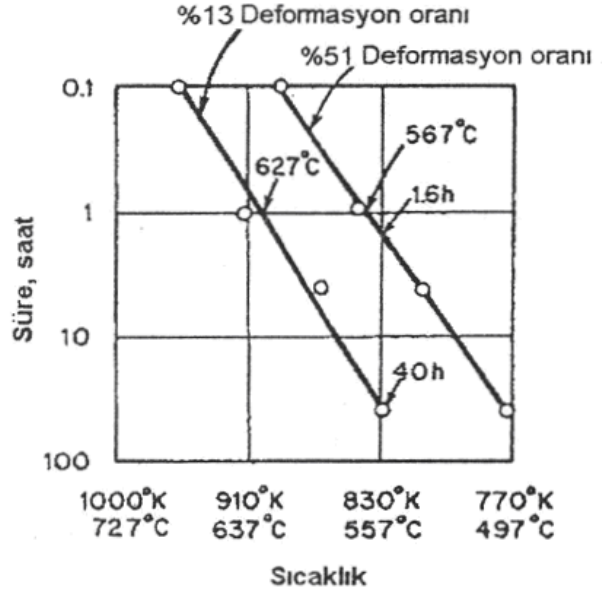
denklemini elde edilir. Bu denklem; ‘‘Avrami’’ Denklemi olarak tanınır [20,21,25]. Avrami Denklemi sayesinde belirli bir tavlama süresinde malzemenin ne kadarının yeniden kristalleştiği saptanabilir.

#### 4.3.2. Yeniden Kristalleşmeye Deformasyon Miktarının Etkisi

Deformasyon miktarının artmasıyla malzemede kusurlu bölgeler çoğalacağından, depolanan enerji artar, çekirdeklenme kademesi kolaylaşır ve bu nedenle yeniden kristalleşme için gerekli kuluçka süresi azalır (Şekil 4.8). Şekil 4.6’deki benzer olarak, farklı başlangıç deformasyon oranına sahip bir malzemenin yeniden kristalleşme hızı eğrileri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Şekil 4.9 artan soğuk deformasyon miktarıyla yeniden kristalleşmenin kolaylaştığını açıkça göstermektedir. Aynı sıcaklıkta tavlendiğinde, daha fazla soğuk deformasyon gören metal daha hızlı yeniden kristalleşmektedir. Örnek olarak, 553°C’da yeniden kristalleşmenin tamamlanma zamanı düşük deformasyon oranında 40 saat, yüksek deformasyon oranında ise 1,6 saattir. Benzer olarak, yüksek deformasyon miktarında yeniden kristalleşme sıcaklığı daha düşüktür [20,23,25].

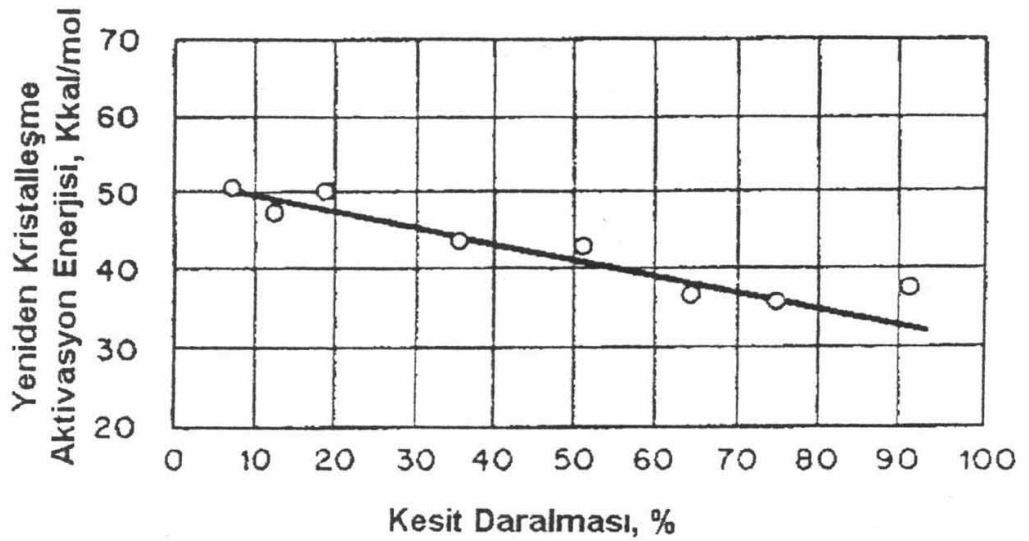


Şekil 4.8: Saf bakırda deformasyon miktarıyla (a) depolanan enerji, (b) yeniden kristalleşme sıcaklığının değişimi [25].



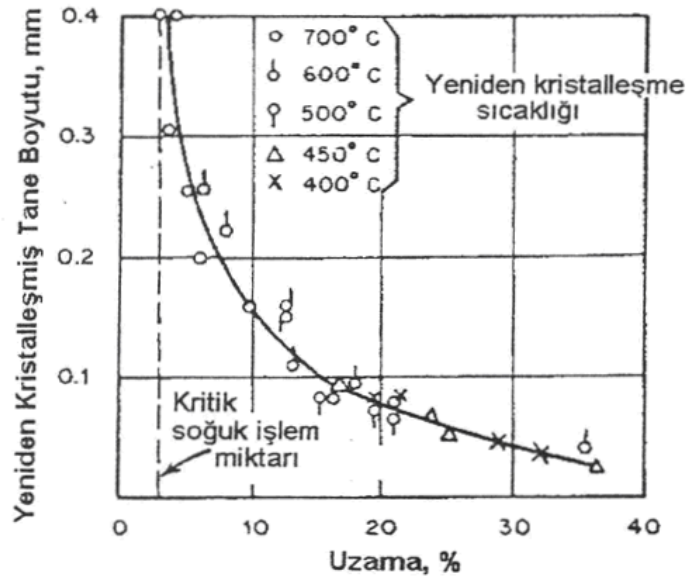
**Şekil 4.9:** Farklı başlangıç deformasyon oranlarının zirkonyumun yeniden kristalleşme süresine etkisi [21,25].

Şekil 4.9'daki iki doğrunun dikkatli incelenmesiyle aynı eğime sahip olmadıkları görülür. Bunun sebebi, yeniden kristalleşmenin sıcaklığa bağlılığının soğuk deformasyon miktarıyla değiştiği veya yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin deformasyon miktarına bağlı olduğudur. Şekil 4.8 yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin ( $Q_r$ ) soğuk deformasyon miktarıyla değişimini göstermektedir.



**Şekil 4.10:** Zirkonyumun yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin soğuk işlem miktarıyla değişimi [21,25].

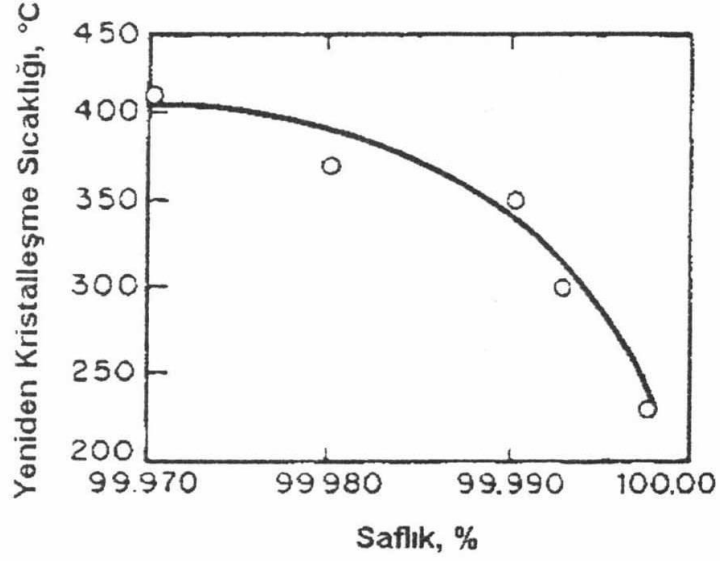
Yeniden kristalleşme çalışmalarında yeniden kristalleşmiş tane boyutu önemli bir faktördür. Yeniden kristalleşmiş tane boyutu, yeniden kristalleşme tamamlandıktan hemen sonra, tane büyümesi meydana gelmeden önceki tane boyutudur. Şekil 4.11,  $\alpha$  pirincinde deformasyon miktarına bağlı olarak yeniden kristalleşmiş tane boyutunu göstermektedir. Şekil 4.11'dan azalan deformasyon miktarıyla yeniden kristalleşme sonrası oluşan tane boyutunun oldukça büyüdüğü görülmektedir. Bununla beraber, kritik deformasyon miktarının altında tavlama süresi ne olursa olsun yeniden kristalleşme olmaz.



**Şekil 4.11:** Alfa-pirinçte soğuk işlem miktarının yeniden kristalleşmiş tane boyutuna etkisi [21,25].

#### 4.3.3. Yeniden Kristalleşmeye Metalin Saflığının Etkisi

Saf metallerde yeniden kristalleşme hızının yüksek olduğu bilinen bir gerçektir. Katı çözümlerde %0.01 kadar az miktarda yabancı atom bulunması yeniden kristalleşme sıcaklığını önemli ölçüde yükseltilebilir. Çözünen atomun yeniden kristalleşme hızına etkisi, düşük konsantrasyonlarda çok daha fazladır. Çeşitli saflık derecelerindeki alüminyum için yeniden kristalleşme sıcaklığının değişimi Şekil 4.12'de görülmektedir [21,23,25].



**Şekil 4.12:** Alüminyumda yeniden kristalleşme sıcaklığına saflığın etkisi [21,25].

Yabancı atomlar dolayısıyla yeniden kristalleşme sıcaklığında görülen artış çözünen atomun davranışına bağlıdır. Tablo 4.1, saf bakıra aynı miktarda (At.%0,001) farklı element ilave edilmesiyle yeniden kristalleşme sıcaklığındaki artışı göstermektedir.

**Tablo 4.1:** Saf bakıra % 0,01 kadar element ilavesinin yeniden kristalleşme sıcaklığına etkisi [21,25].

İlave Edilen Element	Yeniden Kristalleşme Sıcaklığındaki Artış (°C)
Ni	0
Cu	15
Fe	15
Ag	80
Sn	180
Te	240

Düşük miktardaki elementlerin yeniden kristalleşme sıcaklığına böyle belirgin etki etmesi, tane sınırlarıyla çözünen atom etkileşmesi sebebiyledir. Söz konusu etkileşme, dislokasyonlarla-çözünen atom etkileşmesine benzerdir. Bir yabancı atom tane sınırına yerleştiğinde, tane sınırının hareket kabiliyeti düşer. Yeniden kristalleşmede tane sınırı hareketi çekirdek oluşup büyümesi için gereklidir. Bu

sınırlarda yabancı atomların varlığı, ikinci yaz veya empüriteler tane sınırı hareketini engeller ve bu yüzden yeniden kristalleşme hızını düşürür [20,21,25].

#### 4.3.4. Yeniden Kristalleşmeye Başlangıç Tane Boyutunun Etkisi

Çok kristalli metal soğuk işlenirse, tane sınırları kristallerdeki kayma hareketini engeller. Sonuç olarak, tane sınırlarına yakın olan kristal kafesleri tane içindikilerden daha fazla distorse olurlar. Tane boyutunun azalması tane sınırı miktarını artırır ve böylece tane sınırlarına yakın, distorse olmuş kafes miktarı artar. Böylece ince taneli yapıda, mümkün çekirdeklenme noktası sayısı artmış olur. Bu nedenle ince taneli malzemelerde çekirdeklenme hızı artar ve yeniden kristalleşmiş tanelerin boyutu küçülür [21,25].

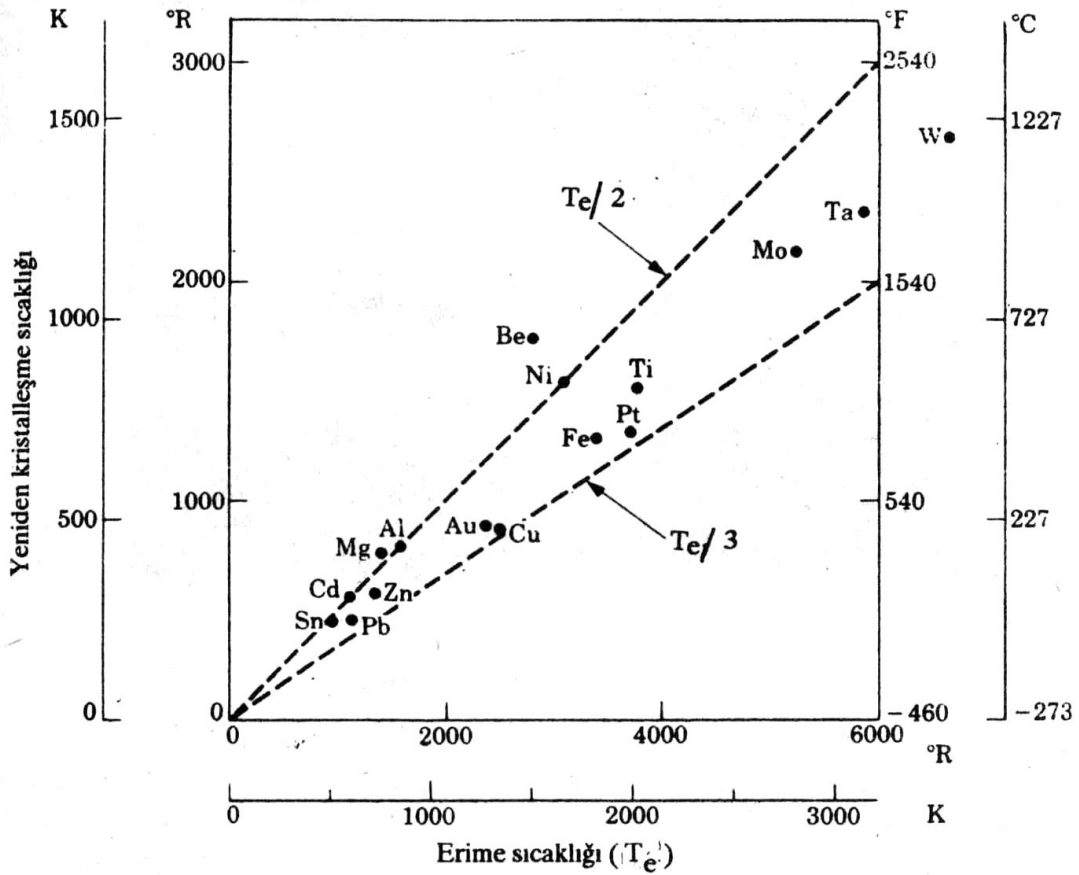
#### 4.3.5. Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı

Yeniden kristalleşme sıcaklığı; soğuk deformasyona uğramış metalin belirli bir sürece (genellikle bir saat) %50'sinin yeniden kristalleştiği sıcaklık olarak tanımlanır. Çeşitli metallerin yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları Tablo 4.2'de verilmiştir, Şekil 4.13'de yeniden kristalleşme sıcaklıklarının ergime sıcaklıklarıyla değişimi görülmektedir.

**Tablo 4.2:** Bazı metallerin yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları [23,25].

Metal	Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı $T_r$ (°C)	Ergime Sıcaklığı $T_m$ (°C)
Alüminyum	175	660
Kurşun	25	327
Kalay	25	232
Bakır	250	1083
Nikel	700	1453
Magnezyum	150	650
Çinko	50	420

Yüksek aktivasyon enerjileri sebebiyle, yeniden kristalleşmenin meydana geleceği bir minimum sıcaklık vardır.  $Q = 50\ 000$  cal/mol olan bir metalde, yeniden kristalleşme  $600^\circ\text{K}$ 'de ( $323^\circ\text{C}$ ) bir saatte tamamlanıyorsa, tavlama  $10^\circ\text{C}$  daha düşük sıcaklıkta ( $313^\circ\text{C}$ ) yapılırsa, hız denkleminin yardımıyla (Eşitlik 4.3) tamamen yeniden kristalleşme için iki saat geçeceği görülür. Yeniden kristalleşme sıcaklığının  $10^\circ\text{C}$  altında bir saat tavlama sonunda kısmen yeniden kristalleşme olacaktır. Diğer yandan,  $323^\circ\text{C}$ 'un üzerinde herhangi bir sıcaklıkta metalin tamamen yeniden kristalleşmesi için bir saatten az süre gerekir. Gerçekten, sıcaklıktaki  $10^\circ\text{C}$ 'luk yükselme ( $333^\circ\text{C}$ ) yeniden kristalleşme süresini 1/2 saat'e ve  $20^\circ\text{C}$ 'luk yükselme  $\approx 15$  dk'ya düşürür. Pratikte, yeniden kristalleşme prosesinin sıcaklıktaki küçük değişikliklere karşı hassasiyeti sebebiyle, metalin sabit bir yeniden kristalleşme sıcaklığı varmış, bunun altında yeniden kristalleşme olmuyormuş gibi görünür. Bu sebeple, yeniden kristalleşme sıcaklığı metalin bir özelliği olarak alınıp, yeniden kristalleşmede zamanın etkisi ihmal edilebilir [21,25].



Şekil 4.13: Çeşitli metallerin ergime sıcaklıklarıyla yeniden kristalleşme sıcaklarının değişimi [13,25].

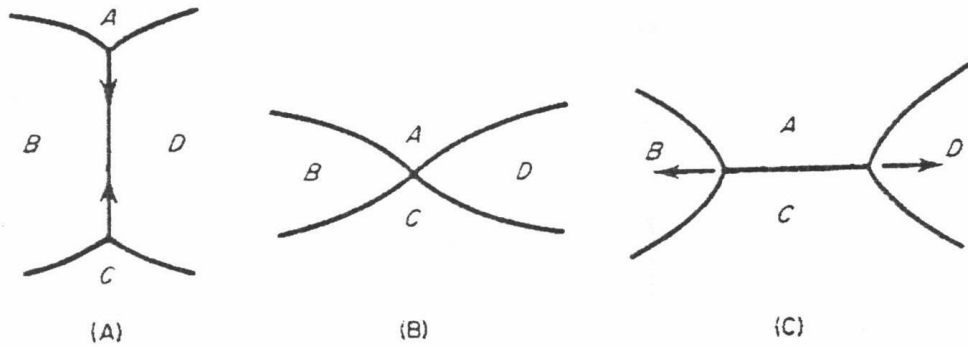


#### 4.4. Tane Büyümesi

Yapıda mevcut veya yeniden kristalleşen tanelerin uzun süre tavlanması neticesinde tane büyümesi meydana gelir. Büyük taneler küçük tanelerden daha düşük serbest enerjiye sahiptir. İdeal koşullar altında bir metal için en düşük enerji hali tek kristaldir. Tamamen yeniden kristalleşmiş bir metalde tane büyümesi için gerekli kuvvet tane sınırlarının yüzey enerjisinden gelir. Taneler boyutça büyüyüp, sayıları azaldıkça, tane sınırları azalır. Böylece tane sınırlarının yüzey enerjisi azalmış olur.

Tane büyümesi gösteren en basit örnek; yüzey enerjisini azaltmak için büyüyen sabun köpüğüdür. Sabun köpüğü, hücrel büyüme için ideal şekilde gösterir. Sabun köpüğünün içindeki gazın basıncı yüzey gerilmesi sebebiyle dış kısımdan daha yüksektir.

Metal kristallerinin tane büyümesine etki eden faktörleri çok daha fazladır. Tane büyümesi tane sınırlarının hareketiyle meydana gelir. Tane sınırlarının hareketi, Şekil 4.14'te görüldüğü gibi gerçekleşir. B ile D tanelerini ayıran sınır küçülerek ortadan kalkar (Şekil 4.14a) ve A ile C taneleri arasında yeni bir sınır oluşur (Şekil 4.14b). Bu işlem sonrası B ile D taneleri bir sınır kaybederken, A ile C taneleri bir sınır kazanır (Şekil 4.14c). Tane sınırı hareketiyle üç kenarlı taneler yok olurken, komşu taneler bir kenar kaybeder.



**Şekil 4.14:** Tane büyümesi esnasında tane sınırlarının değişimi [21,25].

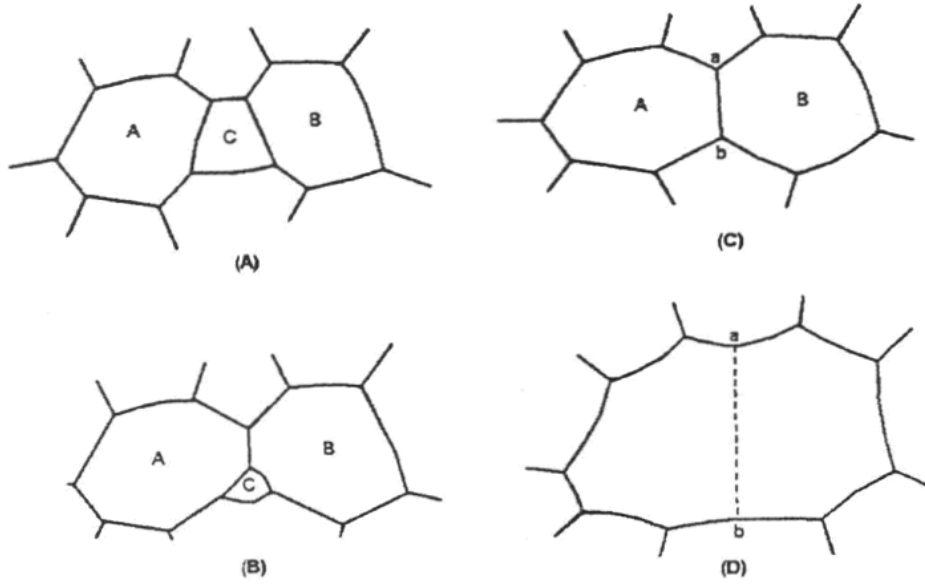
İki boyutlu ortamda taneler için aşağıdaki teorem mevcuttur;

$$P - B + C = 1 \quad (4.18)$$

Burada, P çokgen sayısını, B kenar sayısını ve C köşelerin sayısını göstermektedir. Çokgenin kenar sayısı eğer 6 ise kenarlar arasındaki açı  $120^\circ$  olup yapı dengededir.

Bu durumda altıgenler, iki boyutlu uzayı tamamen doldururlar. Bu hal, mikro yapıda mevcutsa, yüzey gerilmesinin dengede olması nedeniyle taneler büyümmez. Fakat çokgenin kenar sayısı 6'dan azsa ve köşelerdeki açı  $120^\circ$  ise kenarlar doğrusal olmayıp kavisli olur (bu özel durumda kavis dışarı doğru olur). Büyüme sırasında, tane sınırı kavisin merkezine doğru hareket ettiğinde zamanla taneler küçülerek ortadan kalkar. Bu durumun tersi mevcutsa, yani çokgenin kenar sayısı 6'dan fazla ise ve köşelerdeki açı  $120^\circ$  ise taneler büyür [20,25].

Diğer bir mekanizma; tane birleşmesi mekanizmasıdır. Tane birleşmesi, basit olarak aralarında düşük enerjili tane sınırı bulunan iki tanenin birleşerek tek bir tane haline gelmesi esasına dayanır [21,25]. Bu birleşmenin kademeleri Şekil 4.15'te görülmektedir.

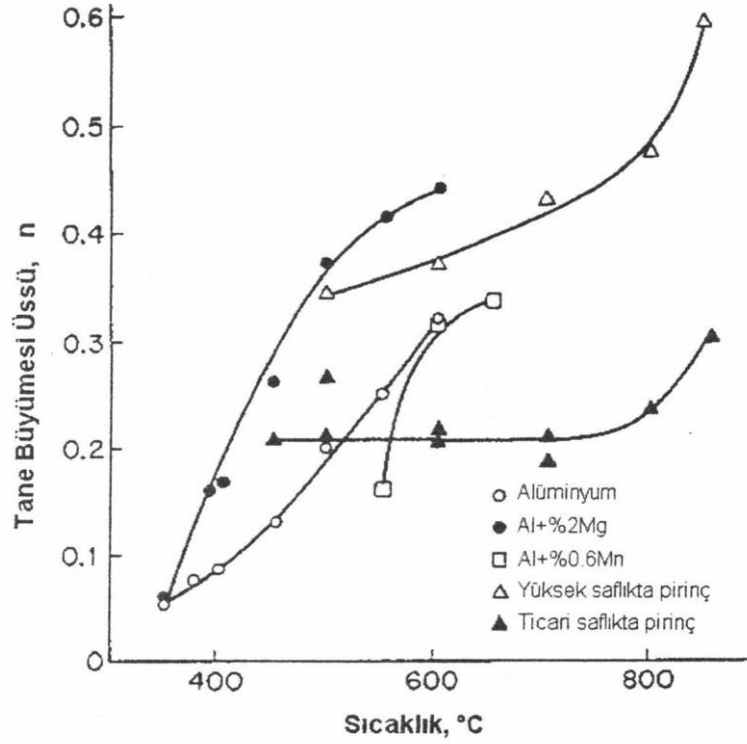


**Şekil 4.15:** Tane birleşmesiyle tane büyümesinin şematik gösterimi [21,25].

Birincil yeniden kristalleşmeden sonra bazı tanelerin komşu tanelere kıyasla aniden büyümesine “ikincil yeniden kristalleşme” denir. İkincil yeniden kristalleşmeye anormal tane büyümesi adı da verilir. İkincil yeniden kristalleşme, genellikle birincil yeniden kristalleşmeden bir süre sonra oluşur. Bu iş için gerekli enerji, tane sınırlarının yüzey enerjisi tarafında sağlanır. İkincil yeniden kristalleşmenin iki sebebi olabilir; tane büyümesini önleyen empüritelerden bulunması ve tanelerin tercihli yönelme eğilimi.

Şekil 4.16'da bazı metal malzemelerde tane büyümesi üssünün sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Yeniden kristalleşen malzemede ikinci faz çöktürleri, kalıntılar ve

porozite mevcutsa bunlar tane büyümesine engel teşkil ederek tanelerin küçük olmasına neden olurlar [21,25]. Fakat malzemenin herhangi bir bölgesinde empüriteler mevcut değilse, bu bölge komşu tanelere göre anormal bir şekilde büyüme imkanına sahip olur. Bu nedenle, malzemede heterojen empürite dağılımı ikincil yeniden kristalleşmeye neden olur [20,21,25].



**Şekil 4.16:** Bazı metal ve alaşımlarda tane büyümesinin sıcaklıkla değişimi [21,25].

Yeniden kristalleşen malzemede taneler, belirli bir doğrultuda yönlendiğinde bunların büyümesi oldukça zordur. Fakat yönlendiğinde herhangi bir tane, yönlendiğinde komşu tanelere göre çok farklı bir konumda ise bu tane anormal olarak büyüyebilir. Bu hal, tane sınırlarının bazı yönlerde daha serbest hareket etmesinden kaynaklanır [20,21,25].

## **5.DENEYSEL ÇALIŞMA**

Bu çalışmada, Assan Alüminyum Tesisleri'nde üretilmiş olan kimyasal bileşimleri Tablo 5.1'de görülen farklı kalınlıklarda 1050 ve 8006 alüminyum alaşımları kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar üç başlık altında toplanabilir;

- i. Haddeleme,
- ii. Tavlama,
- iii. Karakterizasyon

### **5.1. Haddeleme**

200 x 300 mm boyutlarındaki saclar, TÜBİTAK MAM'de Tablo 5.2.'de belirtilen deformasyon yüzdelerinde oda sıcaklığında haddelenmiştir. Bu çalışma kapsamında 1050 alüminyum %4, %28, %52, %76 ve 8006 alüminyum %20, %40, %60, %80 gerçek deformasyon oranlarında haddelenmiştir. Haddeleme sıcaklığının alüminyumun mutlak ergime sıcaklığına oranı 0,4'ten daha düşük olduğundan, oda sıcaklığında yapılan haddeleme işlemi soğuk işlem ya da soğuk haddeleme olarak isimlendirilebilir.

### **5.2.Tavlama**

Soğuk haddelenmiş farklı kalınlıklardaki saclardan, Presi marka kesme cihazı kullanılarak 15 mm x 25 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler 300, 340, 400, 450 °C' de ve 1, 3, 5, 7,5, 10 dakika tutulduktan sonra havada soğutulmuştur. Tavlama işlemleri ticari ismi Petrofer AS 135 olan tuz banyosunda yapılmıştır.

### 5.3. Karakterizasyon

Karakterizasyon çalışmaları sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri ile yapılmıştır. Tavlanan numuneler, 320 ve 1200 meşlik SiC zımparalar kullanılarak yüzeyleri temizlendikten sonra sertlik ölçümüne tabi tutulmuştur. Sertlik ölçümleri Schimadzu HVM-2 mikrosertlik cihazında Vickers uç kullanılarak 300 gram yük altında yapılmıştır. Numuneler üzerinde yapılan başarılı en az beş ölçümün ortalaması alınarak ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir. Ölçülen değerlerle her iki malzemenin dört deformasyonunun sıcaklık (°C)-sertlik ( $H_v$ ) diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen bu diyagramlar vasıtasıyla farklı deformasyonda ki malzemeler için yeniden kristalleşme süresi okunmuştur. Daha sonra okunan yeniden kristalleşme sürelerinin doğal logaritması alınarak uygulanan tavlama sıcaklığının tersine karşı grafiği çizilmiş bu grafikten okunan eğimin R sabiti ile çarpılması ile her deformasyon yüzdesi için yeniden kristalleşme aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri için numuneler standart metalografik yöntemle kaba ve ince parlatmaları yapıldıktan sonra Keller dağlayıcısı kullanılarak dağlama işlemi yapılmıştır. Numunelerin mikroyapıları optik mikroskop altında incelenmiştir.

**Tablo 5.1:** 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu [26].

Alaşım	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ti %	Va %	Diğer %	Kalan %
<b>1050</b>	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05	0,03	>99,5
<b>8006</b>	0,40	1,20 – 2,00	0,30	0,30 – 1,00	0,10	0,10	0,00	0,00	0,20	95,9 – 97,4

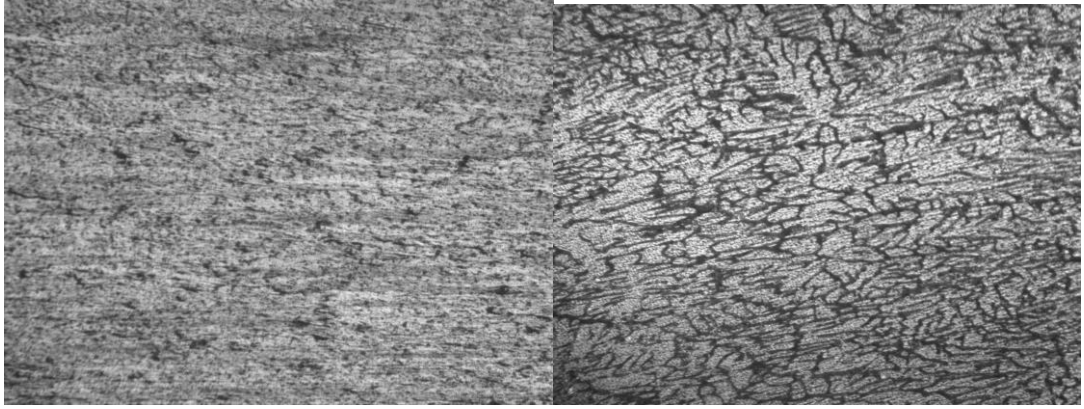
**Tablo 5.2:** 1050 ve 8006 alaşımları için deformasyon kalınlıkları ve bu kalınlıklara bağlı olan deformasyon miktarı

Alaşım	Orijinal Kalınlık (mm)	Birinci Haddeleme Sonrası Kalınlık (mm)	Birinci Haddeleme Sonrası Toplam Deformasyon (%)	İkinci Haddeleme Sonrası Kalınlık (mm)	İkinci Haddeleme Sonrası Toplam Deformasyon (%)	Üçüncü Haddeleme Sonrası Kalınlık (mm)	Üçüncü Haddeleme Sonrası Toplam Deformasyon (%)	Dördüncü Haddeleme Sonrası Kalınlık (mm)	Dördüncü Haddeleme Sonrası Toplam Deformasyon (%)
<b>1050</b>	5	4,8	4	3,6	28	2,4	52	1,2	76
<b>8006</b>	6	4,8	20	3,6	40	2,4	60	1,2	80

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 6.1. 1050 ve 8006 Alüminyumun Soğuk Haddeleme Davranışı

1050 ve 8006 alüminyumun haddeleme öncesi mikroyapıları Şekil 6.1’de gösterilmiştir. 1050 ve 8006 alüminyumun sertlikleri sırasıyla 36 HV<sub>0,3</sub> ve 55 HV<sub>0,3</sub> olarak ölçülmüştür. 8006 alüminyum demir ve manganez oranının daha fazla olması nedeniyle 1050 alüminyumdan daha yüksek sertlik değeri sergilemiştir.

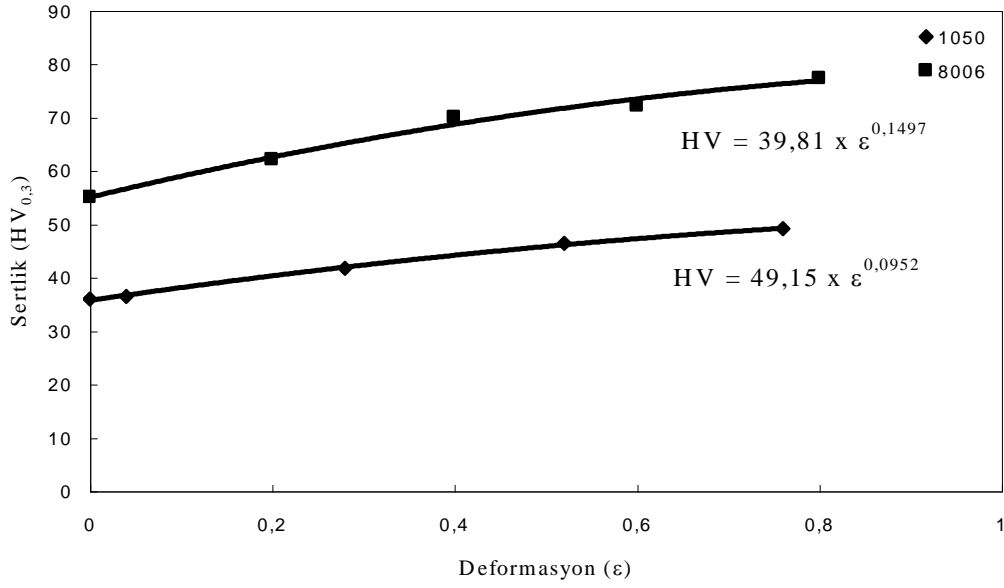


(a)

(b)

**Şekil 6.1:** (a)1050 ve (b) 8006 alaşımlarının 400 büyütmede optik mikroskop hadde yönüne dik kesit görüntüsü.

1050 ve 8006 alüminyumun deformasyona bağlı olarak sertliğinde meydana gelen değişim Şekil 6.2.’de görülmektedir. Artan deformasyon miktarı ile birlikte her iki alaşımda da sertlik artma eğilimi göstermiştir.



**Şekil 6.2:** Sertliğin (HV<sub>0,3</sub>) deformasyona göre değişimi.

Her iki alaşımın oda sıcaklığında yapılan soğuk haddeleme işlemi sonrasında, 1050 alüminyum için döküm yapısı sertliği 36 HV<sub>0,3</sub> iken % 76 deformasyona çıkıldığında sertlik 49,1 HV<sub>0,3</sub>'e artarken, 8006 alüminyum için 55 HV<sub>0,3</sub> olan döküm yapısı sertliği % 80 deformasyona çıkıldığında 77,3 HV<sub>0,3</sub>'ye artmıştır.

Şekil 6.2 logaritmik olarak çizildiğinde her iki alaşım içinde doğruların eğiminden deformasyon sertleşmesi üssü değeri belirlenebilir. Bu durumda Şekil 6.2'ye göre 1050 ve 8006 alüminyumun deformasyon davranışı sırası ile 6.1 ve 6.2 eşitlikleriyle ifade edilebilir,

$$HV = 49,15 \times \varepsilon^{0,0952} (\text{kg/mm}^2) \quad (6.1)$$

$$HV = 39,81 \times \varepsilon^{0,1497} (\text{kg/mm}^2) \quad (6.2)$$

6.1 ve 6.2 eşitliği, Holloman eşitliği şeklinde yeniden yazılabilir [26];

$$\sigma_y = K \times \varepsilon^n (\text{kg/mm}^2) \quad (6.3)$$

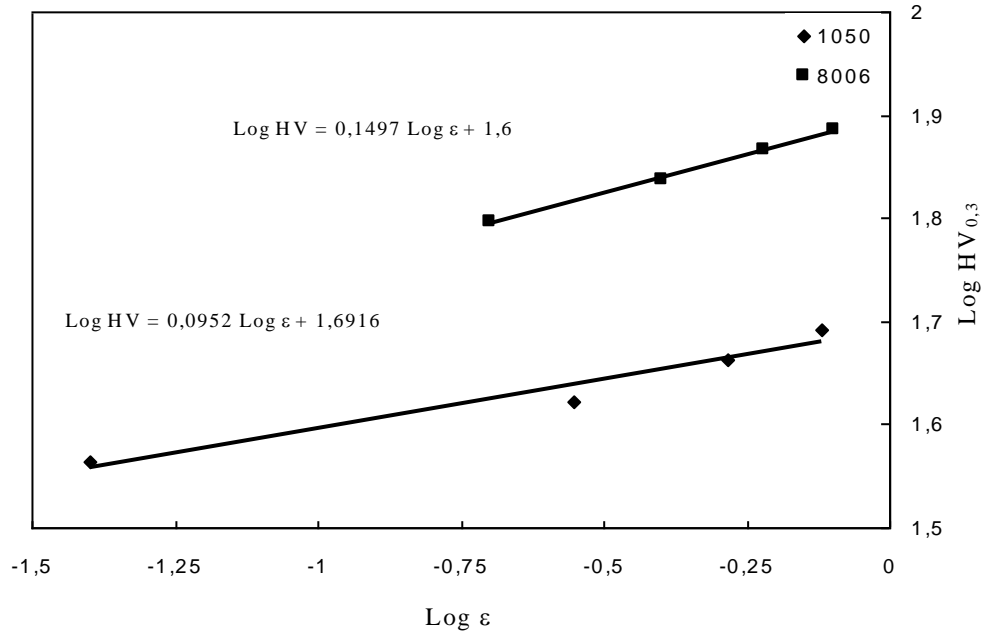


Burada  $\sigma_y$  akma dayanımı, K malzeme parametresi,  $\varepsilon$  deformasyon miktarı ve n deformasyon sertleşmesi üssüdür. HV ve  $\sigma_y$  arasındaki  $\sigma_y = HV/3$  [27] eşitliği mevcut olduğuna göre Hollomon eşitliği 1050 ve 8006 alüminyum için sırası ile;

$$\sigma_y = 147,45 \times \varepsilon^{0,0952} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.4)$$

$$\sigma_y = 119,43 \times \varepsilon^{0,1497} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.5)$$

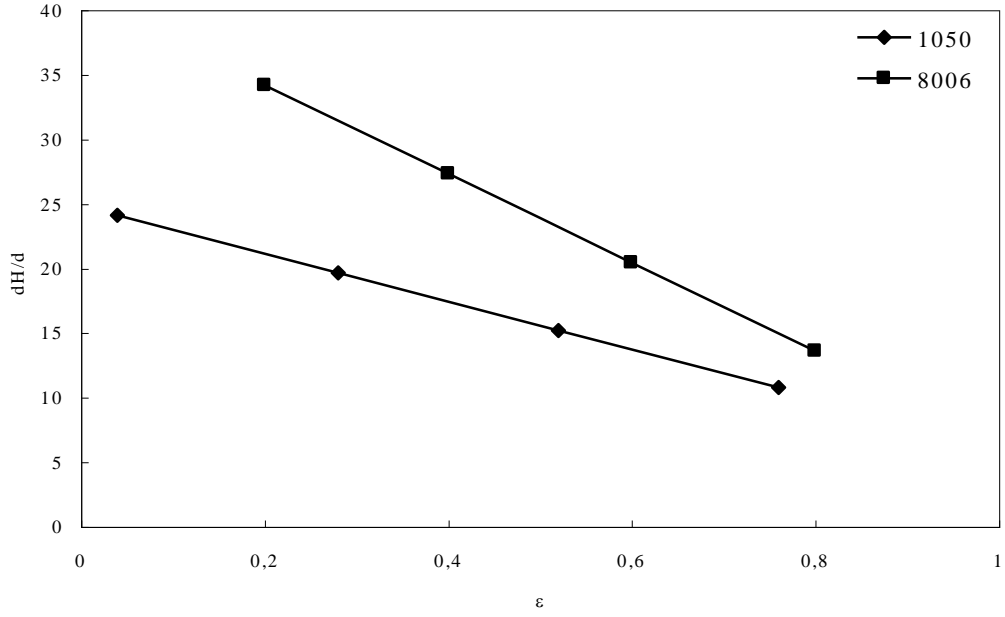
şeklinde düzenlenebilir. 6.4 ve 6.5 eşitliklerine göre, 1050 alüminyum için deformasyon sertleşmesi üssü 0,0952 ve 8006 alüminyum için ise deformasyon sertleşmesi üssü 0,1497 olarak bulunmuştur. K değeri ise 1050 ve 8006 alüminyum için sırasıyla 147,45 ve 119,43 olarak hesaplanmıştır. Bowen ve Partridge'in [28] yaptığı çalışmanın sonuçlarına göre farklı alüminyum alaşımları için deformasyon sertleşmesi üssü değerlerinin 0,1 ile 0,23 ve K değerlerinin de 145 ile 690 arasında değiştiği hesaplanmıştır.



**Şekil 6.3:** Şekil 6.2'nin logaritmik olarak çizimi.

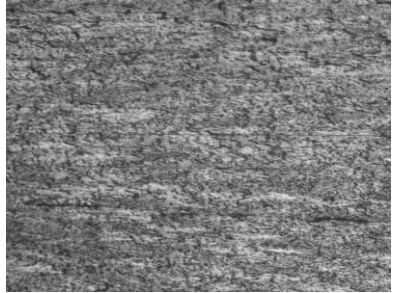
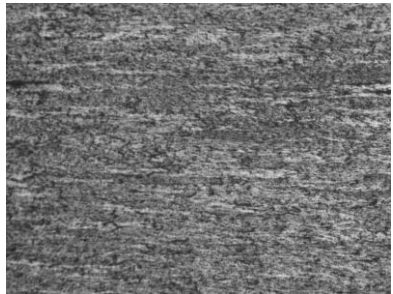
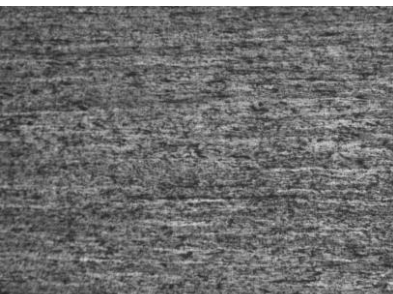
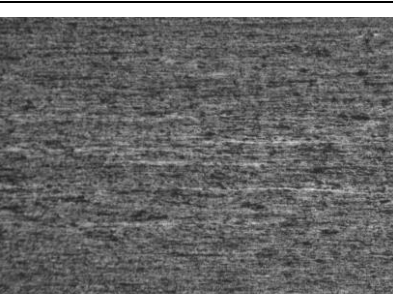
1050 ve 8006 alüminyumun deformasyon sertleşmesi davranışı deformasyon miktarına bağlı olarak deformasyon hızının ( $dH/d\varepsilon$ ) değişimini gösteren Şekil 6.4. ile analiz edilebilir. Şekil 6.4'de görüldüğü gibi her iki malzemenin deformasyon

sertleşmesi hızı artan deformasyonla azalmaktadır. 1050 alüminyum 8006 alüminyuma nazaran daha düşük deformasyon sertleşmesi hızı sergilemektedir.

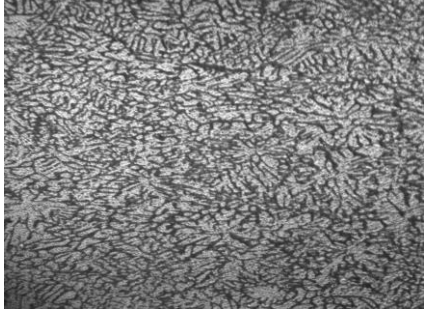
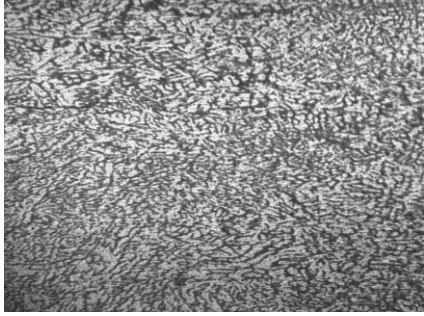
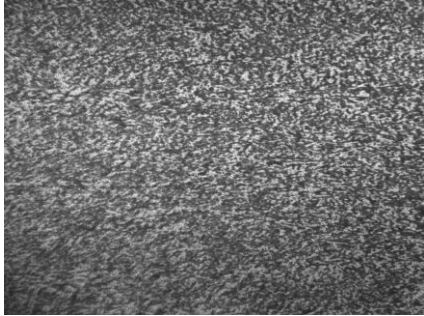
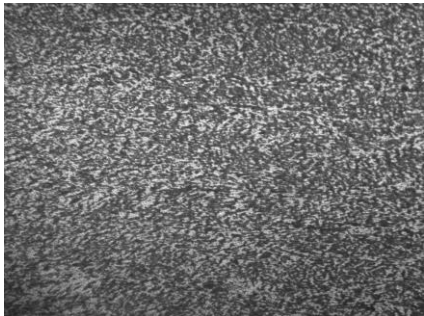


**Şekil 6.4:** 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının deformasyon hızı değişimleri

Şekil 6.5’de ve Şekil 6.6’da sırasıyla 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının uygulanan soğuk haddeleme işlemi ile ölçülen sertlik değerlerinin artışı ve mikroyapıda meydana gelen değişimler görülmektedir. Soğuk haddeleme sonrasında numunelerin kalınlıkları Tablo 5.2’de ve numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümleri Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da verilmiştir.

DEFORMASYON (%)	SERTLİK (HV <sub>0,3</sub> )	HADDE YÖNÜNDE MİKROYAPILAR
4	36,4 ± 1,10	
28	41,7 ± 1,01	
52	46,4 ± 1,12	
76	49,1 ± 2,37	

**Şekil 6.5:** Soğuk haddeleme işlemi ile 1050 alüminyum alaşımının sertlik artışı ve mikroyapı değişimi.

DEFORMASYON (%)	SERTLİK (HV <sub>0,3</sub> )	HADDE YÖNÜNDE MİKROYAPILAR
20	62,1 ± 1,55	
40	70,0 ± 3,84	
60	72,1 ± 4,55	
80	77,3 ± 2,32	

**Şekil 6.6:** Soğuk haddeleme işlemi ile 8006 alüminyum alaşımının sertlik artışı ve mikro yapı değişimi.

## 6.2. 1050 ve 8006 Alüminyumun Yeniden Kristalleşme Davranışı

Tavlama sonrası numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinin sonuçları Ek A1-A4'te verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan 1050 ve 8006 alüminyumun yeniden kristalleşme eğrileri “% Normalize Sertlik – Tavlama Süresi” eksenlerine göre Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de çizilmiştir. Normalize sertlik değerleri, belli tavlama süresi sonunda ölçülen sertlik değerinin tavlama öncesi deforme edilmiş haldeki sertlik değerine yüzde oranı olarak hesaplanmıştır. Yeniden kristalleşme tavlama işlemi sonrasında ölçülen sertlik değerleri çok kısa bir süre sonunda kararlı hale geldiği için, yeniden kristalleşme eğrileri 10 dakikalık tavlama süreleri için verilmiştir.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’deki yeniden kristalleşme grafiklerinde toparlanma bölgesi belirgin olarak görülmemiştir. İzotermal tavlamanın ilk safhalarında sertlik aniden düşmekte (yeniden kristalleşme bölgesi) ve sonrasında kararlı bir hal almaktadır (tane büyümesi bölgesi). Normal olarak yüksek istif hata enerjisine sahip metallerde (alüminyum ve alfa-demir) önemli oranda toparlanma görülmektedir. Ancak alaşım elementlerinin istif hata enerjisi üzerindeki etkisinden dolayı toparlanma bölgesinin görülmemesine neden olabilirler [19]. Yüksek oranda deformasyon malzemenin hızlıca yumuşamasına ve çok kısa sürede tane büyümesi bölgesine geçmesine neden olmaktadır. Bu davranış soğuk işlem sırasında malzemede depolanan enerji ile açıklanmaktadır. Bir metal soğuk işleme maruz kaldığında, enerji dislokasyonlar ve nokta hataları gibi diğer düzensizliklerde depolanırlar. Artan enerjiyle artan yüksek enerjili bölgelerden oluşan yapı, çekirdeklenme için gerekli olan aktivasyon bölgelerinin sayısını artırır [26]. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’deki yeniden kristalleşme eğrilerinde artan soğuk deformasyon miktarı ile yeniden kristalleşme için gerekli olan süre azalmaktadır.

Bu çalışmada, yeniden kristalleşme kinetiği Arrhenius denklemine göre incelenmiştir[19,21,26].

$$1/t_r = A_r \times \exp(-Q_r/RT) \quad (6.6)$$

Bu denklemde,  $t_r$  %50 yeniden kristalleşme süresi,  $A_r$  sabit,  $Q_r$  yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi,  $R$  gaz sabiti [8,3144 J/molK],  $T$  mutlak tavlama sıcaklığıdır. Bu

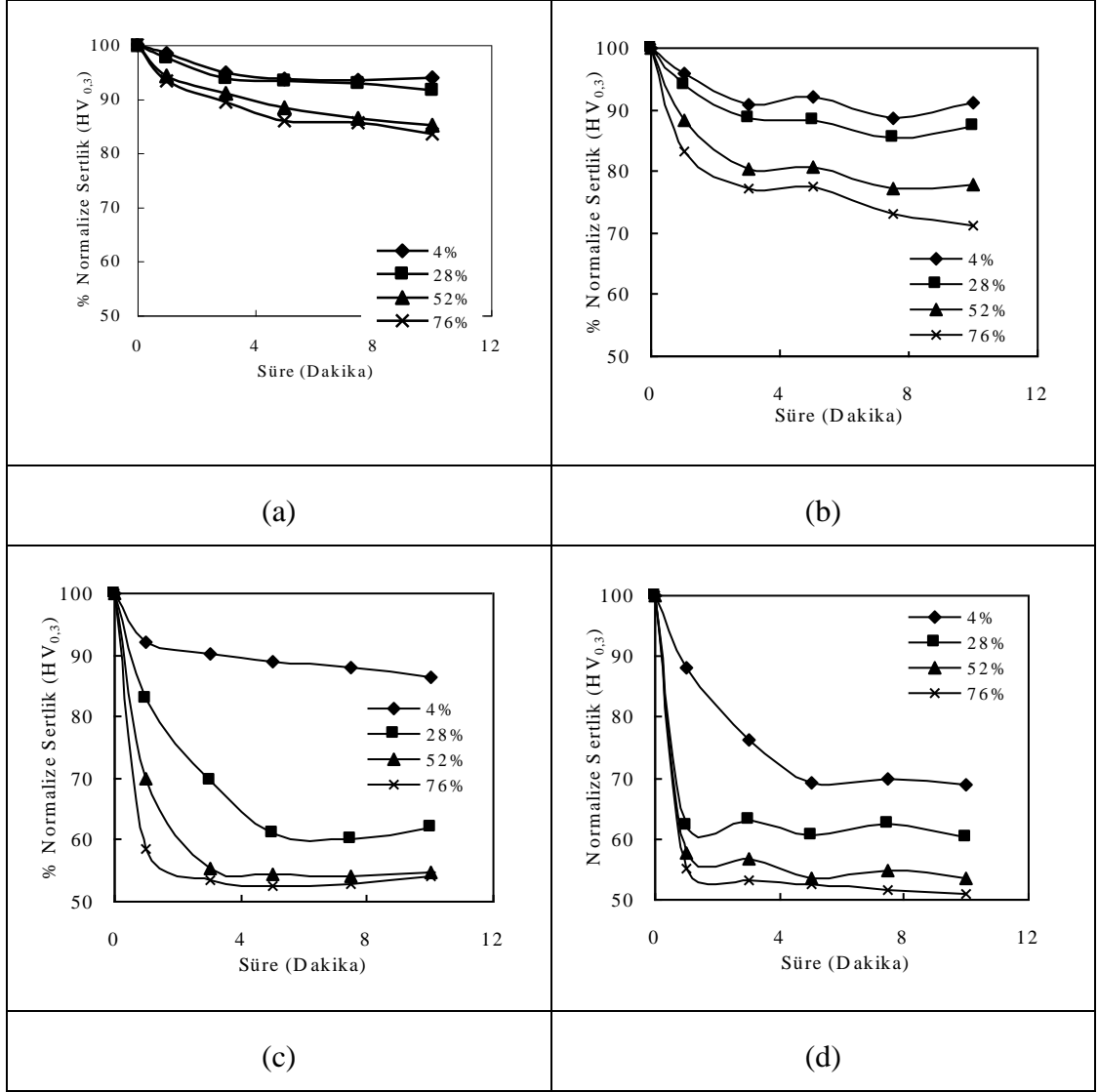
çalışmada %50 yeniden kristalleşme süresi, soğuk deformasyon halindeki sertlik değeri ile tavlama sonrasında elde edilen kararlı haldeki sertlik değerinin aritmetik ortalamasına denk gelen süre olarak hesaplanmıştır (Tablo 6.1).

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da “ $\ln t_r$  ile  $(1/T)$ ” değişiminin grafiği 6.6 denklemini kullanılarak çizilmiştir.  $Q_r$ 'nin hesaplanmasında kullanılan “ $\ln t_r$  ile  $(1/T)$ ” arasındaki deneysel bağıntılar Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da grafikler üzerinde gösterilmiştir. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da grafiklerin üzerindeki deneysel bağıntılardaki eğim kullanılarak Tablo 6.2'de  $Q_r$  değerleri 1050 ve 8006 alüminyum için verilmiştir.

Literatürde, alüminyum içinde alüminyumun yayınımla aktivasyon enerjisi 60 kJ/mol olarak verilmektedir. Bu çalışmada bulunan yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi değerleri alüminyum atomunun alüminyum içinde yayınması için gerekli aktivasyon enerjisinden daha düşük bulunmuştur.

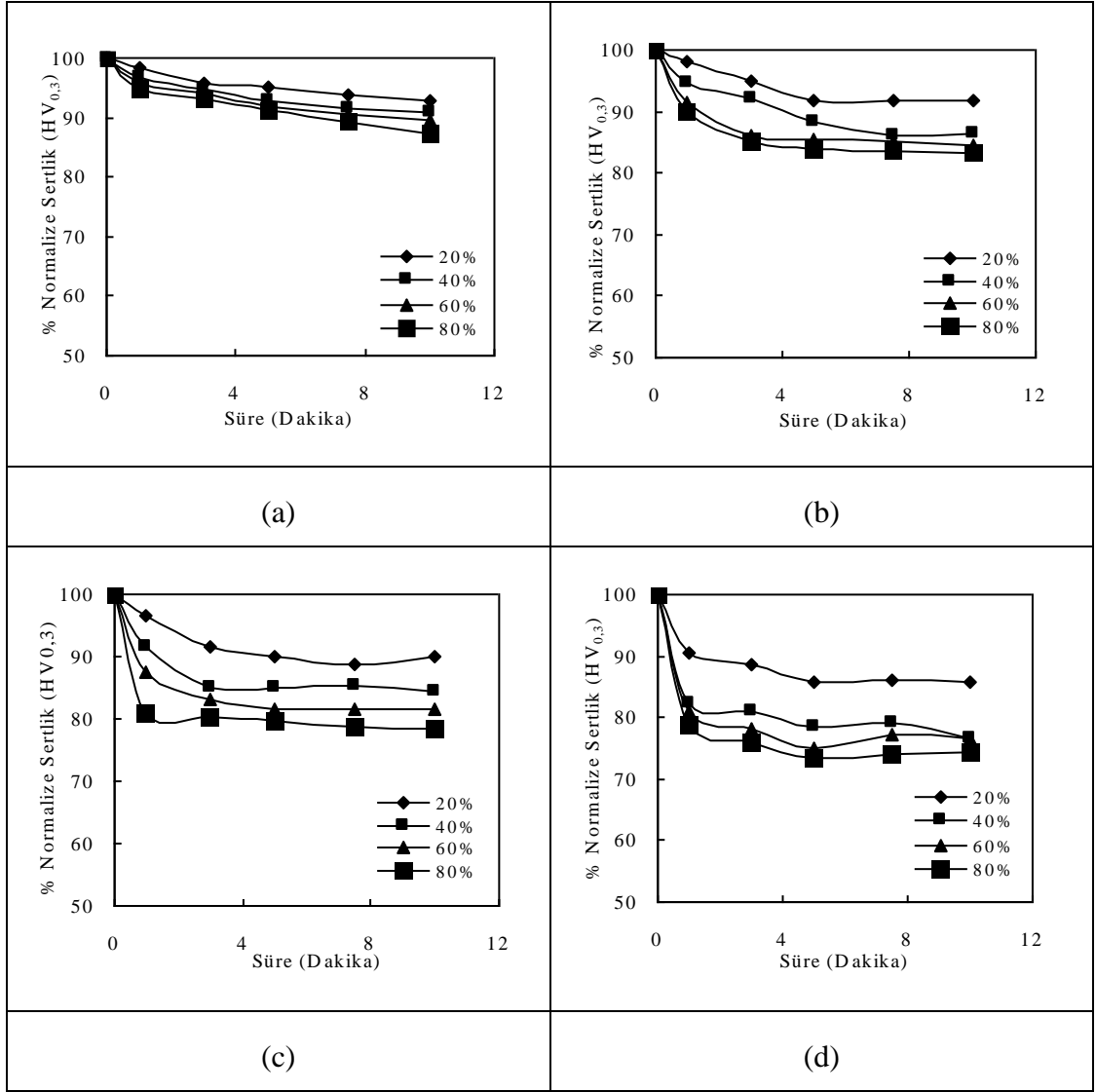
**Tablo 6.1:** 1050 ve 8006 alüminyumun farklı tavlama sıcaklıklarında farklı deformasyon yüzdeleri için Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'den hesaplanan yeniden kristalleşme süreleri ( $t_r$ ).

<b>1050</b>		<b>8006</b>	
<b>Soğuk Deformasyon</b> [%]	<b>Yeniden Kristalleşme Süresi</b> $t_r$ [s]	<b>Soğuk Deformasyon</b> [%]	<b>Yeniden Kristalleşme Süresi</b> $t_r$ [s]
<b>Tavlama Sıcaklığı 300°C</b>			
4	120	20	159
28	105	40	156
52	102	60	105
76	90	80	87
<b>Tavlama Sıcaklığı 340°C</b>			
4	93	20	138
28	75	40	129
52	54	60	51
76	42	80	42
<b>Tavlama Sıcaklığı 400°C</b>			
4	90	20	76
28	81	40	42
52	39	60	27
76	27	80	21
<b>Tavlama Sıcaklığı 450°C</b>			
4	80	20	33
28	26	40	31
52	24	60	22
76	22	80	15

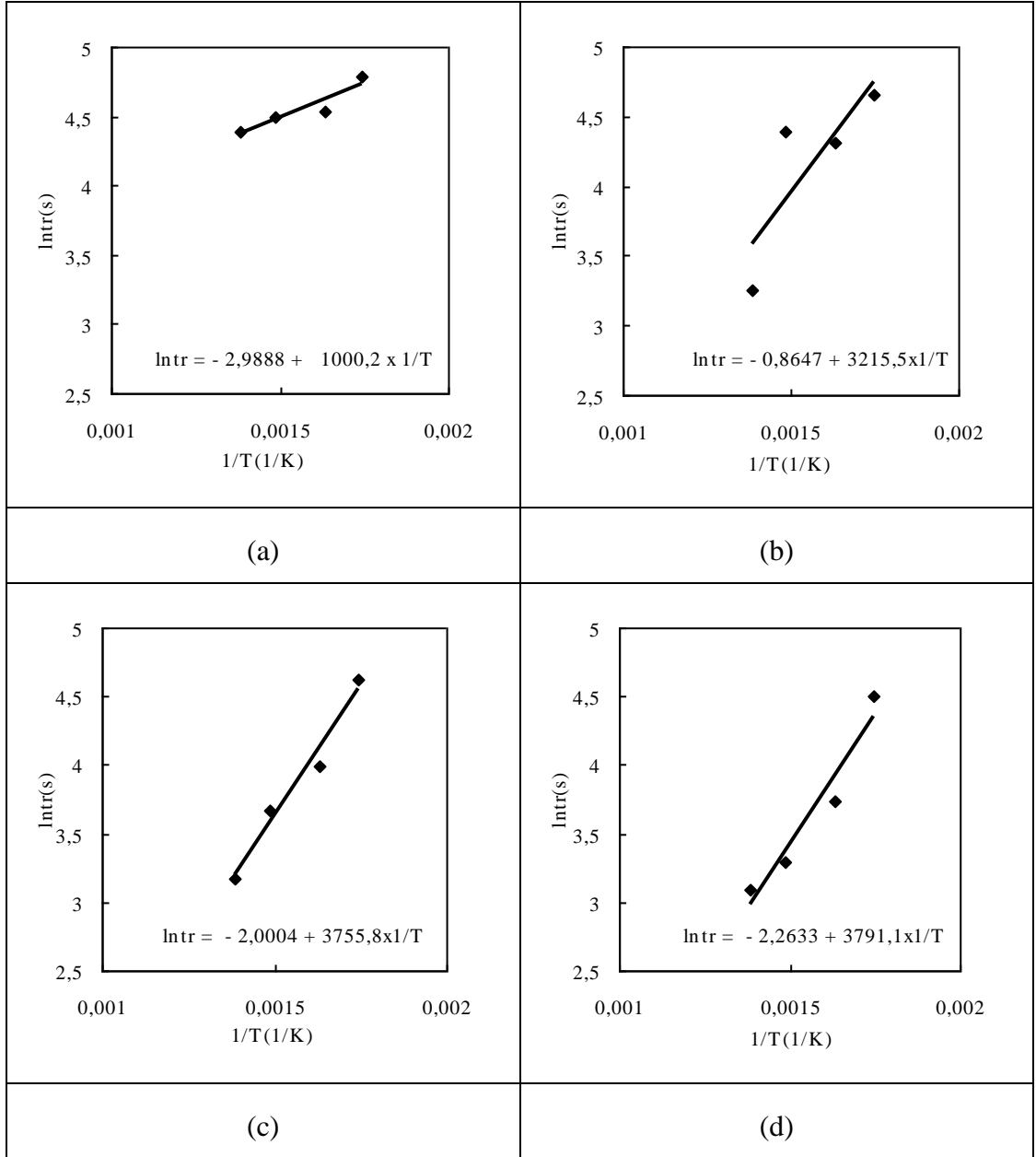


**Şekil 6.7:** İzotermal olarak tavlanan 1050 alüminyum alaşımının yeniden kristalleşme eğrileri. Tavlama sıcaklığı (a) 300°C, (b) 340°C, (c) 400°C, (d) 450°C.

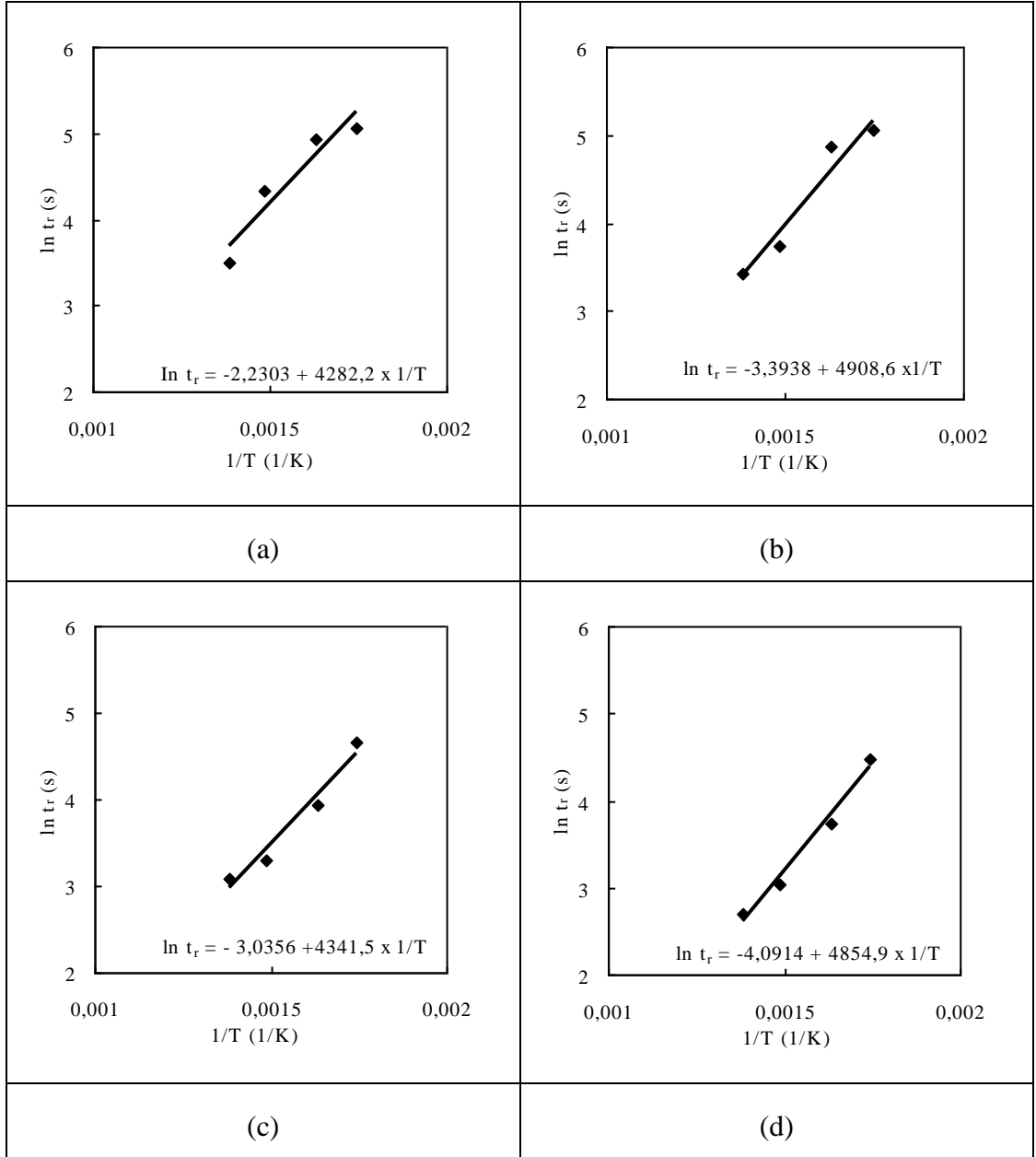




**Şekil 6.8:** İzotermal olarak tavlanan 8006 alüminyum alaşımının yeniden kristalleşme eğrileri. Tavlama sıcaklığı (a) 300°C, (b) 340°C, (c) 400°C, (d) 450°C.



**Şekil 6.9:** “ $\ln t_r - 1/T$ ” grafikleri 1050 alüminyumun yeniden kristalleşme aktivasyon enerjilerinin hesabı için (a)%4, (b)%28, (c)%52, (d)%76 deformasyon oranlarına göre çizilmiştir.



**Şekil 6.10:** “ $\ln t_r - 1/T$ ” grafikleri 8006 alüminyumun yeniden kristalleşme aktivasyon enerjilerinin hesabı için (a)%20, (b)%40, (c)%60, (d)%80 deformasyon oranlarına göre çizilmiştir.

**Tablo 6.2:** 1050 ve 8006 alüminyum alaşımlarının farklı deformasyon yüzdeleri için hesaplanan yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi değerleri

1050		8006	
Soğuk Deformasyon [%]	Yeniden Kristalleşme Aktivasyon Enerjisi $Q_r$ [kJ/mol]	Soğuk Deformasyon [%]	Yeniden Kristalleşme Aktivasyon Enerjisi $Q_r$ [kJ/mol]
4	8,3	20	35,6
28	26,7	40	40,8
52	31,2	60	36,0
76	31,5	80	40,3

## 7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 1050 ve 8006 alüminyum oda sıcaklığında haddelenmiş ve sonra yeniden kristalleşme tavlamasına tabi tutulmuş olup, elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Oda sıcaklığında yapılan haddelenme sırasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi, 1050 alüminyum için  $HV = 49,2 \times e^{0,10}$  (kg/mm<sup>2</sup>) ve 8006 alüminyum için  $HV = 39,8 \times e^{0,15}$  (kg/mm<sup>2</sup>) bağıntıları ile karakterize edilebilir. Uygulanan deformasyona karşı 8006 alüminyum, 1050 alüminyumdan daha yüksek deformasyon sertleşmesi hızı sergilemektedir.
2. % 20 ila % 80 arasında uygulanan deformasyon sonrasında yapılan yeniden kristalleşme tavlamasında, yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi 1050 alüminyum için 25–30 kJ/mol ve 8006 alüminyum için 35–40 kJ/mol olarak bulunmuştur.

## KAYNAKLAR

- [1] **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası**, 1976, Alüminyum Raporu.
- [2] **Robert E. Sanders Jr.**, February 2001. Technology Innovation in Aluminum Products, 21-25.
- [3] **TALSAD Yayınları**, 1995, Türkiye’de ve Dünya’da Alüminyum.
- [4] **Conserva M., Donzelli G., Trippodo R.**, 1992. Aluminum and Its Applications, Edimet, Brescia.
- [5] **MacKenzie, D.Scott**, 2003. Handbook of Aluminum, Volume 1 Physical Metallurgy and Processes.
- [6] **Kavaklıoğlu, B.**, 1999. Alüminyum Levha Üretiminde Proses Optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Alper, M.G.**, 2003. Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş 5052 – 5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Erarslan, Y.**, 1999. Etial-60 Alaşımında Döküm ve Homojenizasyon Uygulamalarının Ekstrüzyon Kabiliyetine Etkileri, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Turhan, S.**, 2002. Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Magnezyum ve Silisyumun Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **Kaufman, J. Gilbert.**, 2000, Introduction to Aluminum Alloys and Tempers, pp. 87-118.
- [11] **Kayalı E.S. ve Çimenoğlu H.**, 1995. Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1, 61.

- [12] **ASM International**, ASM Speciality Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, Fabrication and Finishing of Aluminum Alloys, 231-246.
- [13] **Çapan, L.**, 1999. Metallere Plastik Şekil Verme, İstanbul, Çağlayan Kitabevi, 207-211.
- [14] **Gibson G.C. and Smith H.**, 1964. The Principles of Aluminium Rolling, The British Aluminium Company Limited, Bainsford, Falkirk, Stirlingshire.
- [15] **Kayalı E.S. ve Çimenoğlu H.**, 1986. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [16] **Hayden, H.W., Moffat, W.G. and Wulff, J.**, Çevirenler: Onaran, K. ve Erman, B., 1978. Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, Cilt III, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.
- [17] **Bargel, H.J., and Schulze, G.**, Çevirenler: Güleç S. ve Aran, A., 1985. Malzeme Bilgisi, Cilt I, TÜGAM Matbaası, Gebze.
- [18] **Yazıcı, E.**, 1987. Alüminyumda Tane Boyutunun Deformasyon Davranışına Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **Humphrey, F.J. and Hatherly, M.**, 1995. Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier Publications, Oxford.
- [20] **Byrne, J. G.**, 1965. Recovery, Recrystallization and Grain Growth, The Macmillan Co., New York.
- [21] **Reed-Hill, R. E.**, 1973. Physical Metallurgy Principles, pp. 267-325, Litton Educational Publishing, New York.
- [22] **Askeland, D. R.**, 1990. The Science and Engineering of Materials, pp. 186-217, Chapman and Hall, London.
- [23] **Avner, S. H.**, 1974. Introduction to Physical Metallurgy, pp. 129-147, McGraw-Hill Book Company, New York.
- [24] **Uyar, Ç.**, 2005. Effect of Cold Drawing Ratio and Composition on Recrystallization Behaviours of Steels, *M.Sc. Thesis*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [25] **Yıldırım, S.**, 2001. Saf Bakırın Yüksek Sıcaklıktaki Mekanik Davranışı: Dinamik Yeniden Kristalleşme ve Dinamik Tane Büyümesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] <http://asia-aec.org>
- [27] **Güçlü, F. M.**, 2004. Recrystallization and Oxidation Behaviour of Commercial Purity Titanium, *M.Sc. Thesis*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] **Bowen, A.W., Partridge P.G.**, 1974. *J.Phys.D; Appl. Phys.*, Vol.7, Great Britain, pp. 969-978.



## EKLER

**Tablo A.1:** 1050 alüminyumun 300°C ve 340°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.

<b>300°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>Zaman (dk)</b>	<b>4% Deformasyon</b>	<b>28% Deformasyon</b>	<b>52% Deformasyon</b>	<b>76% Deformasyon</b>
<b>0</b>	36,4 ± 1,10	41,7 ± 1,01	46,4 ± 1,12	49,1 ± 2,37
<b>1</b>	35,6 ± 1,12	40,7 ± 0,13	43,7 ± 1,11	45,8 ± 0,87
<b>3</b>	34,3 ± 1,30	39,1 ± 0,63	42,2 ± 1,01	43,9 ± 1,41
<b>5</b>	33,9 ± 0,85	38,9 ± 0,61	41,0 ± 1,16	42,2 ± 0,88
<b>7,5</b>	33,8 ± 0,50	38,7 ± 0,55	40,1 ± 0,74	42,0 ± 0,77
<b>10</b>	34,0 ± 1,08	38,2 ± 0,76	39,5 ± 0,36	41,0 ± 1,59
<b>340°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>0</b>	36,4 ± 1,10	41,7 ± 1,01	46,4 ± 1,12	49,1 ± 2,37
<b>1</b>	34,7 ± 0,28	39,2 ± 0,30	41,0 ± 1,13	40,8 ± 0,71
<b>3</b>	32,9 ± 0,43	36,9 ± 0,67	37,3 ± 0,91	37,9 ± 1,16
<b>5</b>	33,3 ± 1,14	36,8 ± 1,09	37,5 ± 0,79	38,1 ± 0,72
<b>7,5</b>	32,1 ± 0,44	35,6 ± 0,79	35,9 ± 0,43	35,9 ± 0,43
<b>10</b>	33,0 ± 0,49	36,4 ± 0,87	36,1 ± 0,46	34,9 ± 0,95

**Tablo A.2:** 1050 alüminyumun 400°C ve 450°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.

<b>400°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>0</b>	36,4 ± 1,10	41,7 ± 1,01	46,4 ± 1,12	49,1 ± 2,37
<b>1</b>	33,3 ± 0,82	34,6 ± 0,17	32,4 ± 0,85	28,8 ± 0,65
<b>3</b>	32,6 ± 0,99	29,0 ± 0,91	25,7 ± 0,51	26,3 ± 0,17
<b>5</b>	32,2 ± 1,38	25,5 ± 1,14	25,2 ± 0,62	25,8 ± 0,61
<b>7,5</b>	31,8 ± 0,35	25,1 ± 0,58	25,1 ± 1,45	25,9 ± 0,29
<b>10</b>	31,3 ± 1,12	25,8 ± 0,42	25,4 ± 0,42	26,5 ± 0,83
<b>450°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>0</b>	36,4 ± 1,10	41,7 ± 1,01	46,4 ± 1,12	49,1 ± 2,37
<b>1</b>	31,9 ± 0,59	25,9 ± 0,98	26,7 ± 0,53	27,0 ± 0,20
<b>3</b>	27,6 ± 0,56	26,3 ± 0,39	26,3 ± 0,63	26,1 ± 0,63
<b>5</b>	25,1 ± 0,73	25,2 ± 0,54	24,9 ± 0,49	25,8 ± 0,64
<b>7,5</b>	25,3 ± 0,65	26,1 ± 0,51	25,4 ± 0,79	25,3 ± 0,82
<b>10</b>	24,9 ± 0,84	25,1 ± 0,72	24,9 ± 0,52	25,0 ± 0,37

**Tablo A.3:** 8006 alüminyumun 300°C ve 340°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.

<b>300°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>Zaman (dk)</b>	<b>20% Deformasyon</b>	<b>40% Deformasyon</b>	<b>60% Deformasyon</b>	<b>80% Deformasyon</b>
<b>0</b>	62,1 ± 1,55	70,0 ± 3,84	72,1 ± 4,55	77,3 ± 2,32
<b>1</b>	61,0 ± 2,02	67,6 ± 0,90	69,0 ± 1,29	73,2 ± 1,84
<b>3</b>	59,4 ± 1,69	66,3 ± 2,29	67,8 ± 2,59	71,9 ± 0,47
<b>5</b>	59,0 ± 1,78	65,0 ± 2,11	66,2 ± 2,17	70,5 ± 1,45
<b>7,5</b>	58,3 ± 0,85	64,0 ± 1,70	65,3 ± 1,32	69,0 ± 1,24
<b>10</b>	57,6 ± 1,34	63,5 ± 1,49	64,6 ± 1,93	67,5 ± 1,10
<b>340°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>0</b>	62,1 ± 1,55	70,0 ± 3,84	72,1 ± 4,55	77,3 ± 2,32
<b>1</b>	60,9 ± 0,60	66,2 ± 0,76	66,0 ± 1,93	69,4 ± 1,62
<b>3</b>	58,9 ± 2,29	64,4 ± 1,90	62,1 ± 0,52	65,8 ± 1,75
<b>5</b>	56,9 ± 1,91	61,7 ± 1,69	61,7 ± 1,38	64,9 ± 1,51
<b>7,5</b>	56,9 ± 1,01	60,2 ± 0,89	61,4 ± 1,50	64,6 ± 1,19
<b>10</b>	56,9 ± 1,17	60,5 ± 1,98	61,0 ± 1,76	64,3 ± 1,46

**Tablo A.4:** 8006 alüminyumun 400°C ve 450°C tavlama sonrasında ölçülen ortalama sertlik değerleri.

<b>400°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>0</b>	62,1 ± 1,55	70,0 ± 3,84	72,1 ± 4,55	77,3 ± 2,32
<b>1</b>	60,0 ± 1,32	64,0 ± 1,54	63,0 ± 1,08	62,6 ± 1,96
<b>3</b>	56,9 ± 0,73	59,6 ± 0,59	60,0 ± 1,26	62,0 ± 0,83
<b>5</b>	55,8 ± 1,61	59,4 ± 1,73	58,8 ± 1,67	61,5 ± 1,06
<b>7,5</b>	55,2 ± 1,12	59,7 ± 1,35	58,8 ± 1,28	60,9 ± 1,06
<b>10</b>	55,8 ± 1,34	59,0 ± 1,73	58,9 ± 2,48	60,7 ± 0,52
<b>450°C Tavlama Sıcaklığı Sertlik (H<sub>v</sub>) Değerleri</b>				
<b>0</b>	62,1 ± 1,55	70,0 ± 3,84	72,1 ± 4,55	77,3 ± 2,32
<b>1</b>	56,2 ± 1,37	57,6 ± 0,84	58,3 ± 1,20	60,8 ± 2,13
<b>3</b>	55,1 ± 1,37	56,6 ± 1,11	56,4 ± 1,73	58,8 ± 2,05
<b>5</b>	53,3 ± 1,46	54,9 ± 1,54	54,1 ± 1,65	56,7 ± 2,23
<b>7,5</b>	53,4 ± 0,76	55,4 ± 0,44	55,6 ± 1,75	57,2 ± 0,75
<b>10</b>	53,3 ± 0,75	53,5 ± 0,94	55,3 ± 2,15	57,6 ± 1,54

## ÖZGEÇMİŞ

Ergin Doğan, 1978 yılında İstanbul'da doğmuştur. Lise eğitimini 1996 yılında Kabataş Erkek Lisesi'nde tamamlamıştır. 1996 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlamış, 2000 yılında bu bölümden metalurji mühendisi unvanıyla mezun olmuştur. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. İzinli olarak teslim olduğu Kayseri 1.Komando Tugayı'nda askerlik hizmetini tamamlayarak 2003 yılında terhis olmuştur, evlidir.