

**AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KONİK  
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE İŞLEM  
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

**2018  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Çetin BATUK**

**AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KONİK  
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

**Çetin BATUK**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2018**

Çetin BATUK tarafından hazırlanan "AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KONİK, ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ramazan KAÇAR

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/ 06/ 2018

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)



...../2018

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Çetin BATUK

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KONİK ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

**Çetin BATUK**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Ramazan KAÇAR**

**Haziran 2018, 92 sayfa**

AA7075 alüminyum alaşımı, düşük yoğunluk ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle havacılık ve otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alüminyum alaşımının son yıllarda savunma sanayisinde de kullanımı oldukça artmaktadır. Birçok endüstriyel uygulamalarda olduğu gibi savunma sanayisinde de aerodinamik ve yapısal gereksinimlerden dolayı konik ve silindirik kesitli makine parçalarına sık sık ihtiyaç duyulmaktadır. Soğuk olarak konik bükme işlemi sayesinde üretim zamanının kısaltılması ve fire miktarı ile işlem maliyetinin azaltılması önemli ölçüde sağlanmaktadır. Bu konik soğuk şekillendirme yönteminde karşılaşılan en önemli problem malzemenin geri yaylanma davranışdır.

Geri yaylanma, elastik şekil değiştirme özelliği gösteren eğilen ya da soğuk şekillendirilen malzemenin başlangıçtaki orijinal hale dönme eğilimi ya da kapasitesi olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, dört merdaneli hidrolik konik bükme tezgâhında AA7075 alaşımı sac malzemelerin konik şekillendirme sürecinde geri yaylanma miktarına işlem parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma ile optimum konik şekillendirme şartları tayin edilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda işlem parametrelerinden; büküm açısı 10°, 15°, 20° ve malzeme kalınlıkları 2mm, 3mm, 4mm olacak şekilde konik bükme işlemleri yapılmıştır. Konik şekillendirilen numunelerin geri yaylanma miktarları belirlenmiştir. Ayrıca malzeme sertliğinin de geri yaylanma üzerinde etkisini tespit etmek için; 2mm kalınlığındaki malzemeler ısıl işlem ile üç farklı sertlikte hazırlanmıştır. Böylece, aynı kalınlıkta farklı sertliğe sahip AA7075 alaşımı sacın geri yaylanma miktarları da belirlenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler** : AA7075 alüminyum alaşımı, konik büküm, plastik deformasyon, büküm açısı ( $\alpha$ ), geri yaylanma, mikroyapı ve mekanik özellikler, sertlik.

**Bilim Kodu** : 708.1.140

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON THE CONICAL BENDING OF AA7075 ALUMINIUM ALLOYS**

**Çetin BATUK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Manufacturing Engineering Education**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Ramazan KAÇAR**

**June 2018, 92 pages**

AA7075 aluminum alloy is widely used in aerospace and automotive industry due to its low density and high mechanical properties. The use of this aluminum alloy in the defense industry has increased considerably in recent years. As in many industrial applications, the defense industry is often in need of conical and cylindrical section machine parts due to aerodynamic and structural requirements. By means of the cold conical bending process, it is possible to shorten the production time and to reduce the waste amount and the process cost to a considerable extent. The most important problem encountered in this conical cold forming method is the back spring behavior of the material.

The back spring is define as “The capacity or tendency of a bent or shaped elastic material (such as a metal) to revert to its original form”.

In this study, the effect of process parameters on the amount of back spring in the conical forming process of AA7075 alloy sheet materials in four hydraulic cone bending mills was investigated. It was aimed to determine optimum cone forming conditions by the study. Within this context; the conical bending operations were performed with bending angles of 10°, 15°, 20° and material thicknesses of 2mm, 3mm, 4mm. The amount of back spring of conical shaped specimens was determined. In addition, to determine the effect of material hardness on back spring of materials with a thickness of 2 mm were prepared by heat treatment in three different hardness. Thus, the amount of back spring of AA7075 alloy sheet with different hardness of the same thickness was determined and the results evaluated.

**Key Word** : AA7075 aluminum alloy, conical bending, plastic deformation, bending angle ( $\alpha$ ), back spring, microstructure and mechanical properties, hardness

**Science Code** : 708.1.140



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Ramazan KAÇAR'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Malzeme alımı, malzeme analizleri, ısıl işlem, bükme işlemlerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen TUBİTAK SAGE alıőanlarından Murat KILIÇ, Harun KAHYA, Onur DİNÇER, Hüsamettin İŐLER ve diğerlerine teşekkür ederim.

Manevi hiçbir yardımcı esirgemedен yanımda olduğu için sevgili eşim Songül BATUK' a tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
ALÜMİNYUM .....	4
2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE SINIFLANDIRILMASI.....	6
2.1.1. Dökme Alüminyum Alaşımları .....	8
2.1.2. Dövme Alüminyum Alaşımları .....	10
2.1.3. AA7075 Alüminyum Alaşımı .....	12
2.1.3.1. AA7075 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Özellikleri .....	13
2.1.3.2. AA7075 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri .....	14
2.1.3.3. AA7075 Alüminyum Alaşımının Kullanım Alanları .....	14
BÖLÜM 3 .....	16
SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİ .....	16
3.1. MALZEMELERİN DEFORMASYONU .....	16
3.1.1. Elastik Deformasyon .....	16
3.1.2. Plastik Deformasyon .....	18
3.1.2.1. Metalik Malzemelerde Plastik Deformasyon Mekanizmaları .....	20
3.1.2.2. Plastik Deformasyona Etki Eden Faktörler.....	25

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.2. PLASTİK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ.....	30
3.2.1. Kesme Yöntemi .....	31
3.2.2. Bükme Yöntemi.....	33
3.2.3. Derin Çekme Yöntemi.....	34
3.2.4. Diğer Yöntemler .....	36
3.3. KONİK BÜKÜM İŞLEMİ .....	37
3.4. GERİ YAYLANMA .....	41
BÖLÜM 4 .....	44
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	44
4.1. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN MALZEMELER .....	45
4.2. DENEY MALZEMELERİNE UYGULANAN TEST VE ANALİZLER.....	45
4.2.1. Kimyasal Bileşim Analizi.....	45
4.2.2. Sertlik Ölçümü.....	46
4.2.3. Çekme Testi.....	47
4.2.4. Metalografi Numunelerinin Hazırlanması ve İncelenmesi.....	48
4.3. KONİK BÜKME İŞLEMLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA .....	49
4.3.1. Koniklik Açısının Geri Yaylanma Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi İçin Hazırlanan Numuneler .....	50
4.3.2. Sac Kalınlığının Geri Yaylanma Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi İçin Hazırlanan Numuneler .....	52
4.3.3. Malzeme Sertliğinin Geri Yaylanma Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi İçin Hazırlanan Numuneler .....	54
4.3.3.1. Isıl İşlem.....	54
4.4. KONİK BÜKME TEZGÂHI VE KONİK BÜKME İŞLEMİ .....	56
4.5. GERİ YAYLANMA MİKTARININ ÖLÇÜMÜ .....	62
BÖLÜM 5 .....	64
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	64
5.1. SERTLİK ÖLÇÜM SONUCU.....	64
5.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI .....	65
5.3. MİKROYAPI İNCELEMELERİ VE DEĞERLENDİRİLMELERİ .....	68

**Sayfa**

5.4. KONİKLİK BÜKÜM AÇISININ GERİ YAYLANMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ .....	72
5.5. SAC KALINLIĞININ GERİ YAYLANMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ .....	75
5.7. MALZEME SERTLİĞİNİN GERİ YAYLANMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.	78
BÖLÜM 6 .....	81
GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR .....	83
ÖZGEÇMİŞ .....	92

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyum döküm alaşımı olan motor bloğu.....	9
Şekil 2.2. Tavlanmış alüminyum alaşım mikro görüntüleri.....	11
Şekil 3.1. Kristal yapılı malzemelerde çekme ve basma gerilmelerin etkisiyle oluşan elastik deformasyonun şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.2. Alüminyum alaşım bir malzemenin elastik deformasyonunu gösteren gerilme-birim uzama eğrisi .....	18
Şekil 3.3. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğe ait gerilme-uzama eğrisi.....	19
Şekil 3.4. Bir kristalde meydana gelen kayma düzlemi ve kayma yönü.....	21
Şekil 3.5. İkizlenmenin kristalografik gösterimi.....	22
Şekil 3.6. Deformasyon ve tavlama ikizlenmelerinin görünüşleri.....	22
Şekil 3.7. Tane sınırı kaymasının şematik gösterimi .....	23
Şekil 3.8. Yayınmalı sürünmenin şematik gösterimi .....	24
Şekil 3.9. 6061 alüminyum alaşım malzemede sıcaklık ve yaşlanma süresinin akma dayanıma etkisi.....	27
Şekil 3.10. Yağlama işleminde moleküllerin metal yüzeyi ile reaksiyona girmesi ...	28
Şekil 3.11. Yumuşak çelik bir malzeme üzerinde basınç artışı ile kopma alanı arasındaki ilişki .....	29
Şekil 3.12. Kesme işleminin şematik gösterimi .....	32
Şekil 3.13. Büküm işlemi.....	33
Şekil 3.14. Bükme işlemi çeşitleri.....	34
Şekil 3.15. Derin çekme işlem (deformasyon) aşamaları .....	35
Şekil 3.16. Üç merdaneli bükme makinesinin önden görüşü işlem basamakları.....	38
Şekil 3.17. Dört merdaneli konik bükme tezgâhı ve konik bükümü yapılan iş parçasının görünüşü.....	39
Şekil 3.18. Büküm sonrası sac malzemenin geri yaylanması .....	42
Şekil 4.1. Struers Duramin-500 sertlik ölçüm tezgâhı .....	46
Şekil 4.2. Çekme testi deney numunelerinin makro görüntüsü .....	47
Şekil 4.3. Zwick Roell Z100 çekme tezgâhı ve tezgâh çenesine bağlanmış numune	48
Şekil 4.4. Zeiss AxioCam MRc 5 mikroskop .....	49
Şekil 4.5. Trumpf Trumatic L 3030 TLF 4000 Lazer kesim tezgâhı.....	50

Şekil 4.6. Farklı büküm açısında kesilmiş deney numunelerinin açınım resimleri .	51
Şekil 4.7. Deney numunelerine ait açınım ölçülerinin gösterimi.....	51
Şekil 4.8. Farklı koniklik açısında kesilmiş deney numuneleri .....	52
Şekil 4.9. Farklı kalınlıklardaki deney numunelerinin açınım ölçüleri gösterimi....	53
Şekil 4.10. Lazer kesim tezgâhında kesilmiş farklı kalınlıktaki deney numuneleri..	54
Şekil 4.11. Isıl işlem çalışmaları için kesilmiş deney numuneleri .....	55
Şekil 4.12. Isıl işlem fırınına parçaların yerleştirilmiş görüntüsü.....	55
Şekil 4.13. Isıl işlem sırasında fırın sıcaklık değerleri .....	56
Şekil 4.14. Hidrolik dört merdaneli konik bükme tezgâhı .....	57
Şekil 4.15. Dört merdaneli konik bükme tezgâhı kontrol ünitesi .....	59
Şekil 4.16. Konik şekillendirme işlem basamakları.....	60
Şekil 4.17. Bir koninin bükülmüş şekli ve şekilsel sapmaları .....	62
Şekil 4.18. Geri yaylanma miktarının ölçümü .....	63
Şekil 5.1. Isıl işlem sonuçlarına ait ortalama değerler .....	65
Şekil 5.2. T6 halinde deney numunelerinin çekme testi eğrileri.....	66
Şekil 5.3. Y1 ısıtıl işlem sonrası deney numunelerinin çekme testi eğrileri .....	67
Şekil 5.4. Y2 ısıtıl işlem sonrası deney numunelerinin çekme testi eğrileri .....	67
Şekil 5.5. AA7075-T6 alaşımının hadde yönüne paralel farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü .....	68
Şekil 5.6. AA7075-T6 alaşımının hadde yönüne dik farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü .....	68
Şekil 5.7. Y1 ısıtıl işlem sonrası elde edilen numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü .....	70
Şekil 5.8. Y2 ısıtıl işlem sonrası elde edilen numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü .....	71
Şekil 5.9. Koniklik açıları farklı konik şekillendirilmiş deney numuneleri.....	72
Şekil 5.10. Geri yaylanma miktarının koniklik açısıyla ilişkisi.....	73
Şekil 5.11. Burukluk miktarının koniklik açısı ile ilişkisi .....	74
Şekil 5.12. Sac kalınlıkları farklı konik şekillendirilmiş deney numuneleri.....	75
Şekil 5.13. Geri yaylanma miktarının sac kalınlığı ile ilişkisi .....	76
Şekil 5.14. Burkulma miktarının kalınlık ile ilişkisi .....	77
Şekil 5.15. Isıl işlemleri farklı konik şekillendirilmiş deney numuneleri .....	78
Şekil 5.16. Geri yaylanma miktarının sac sertliği ile ilişki.....	79

Şekil 5. 17. Burkulma miktarının sac sertliği ile ilişkisi ..... 79



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlem seri numaraları.....	7
Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımının sınıflandırılması .....	9
Çizelge 2.4. Dövme alüminyum alaşımının sınıflandırılması.....	10
Çizelge 2.5. Dövme alüminyum alaşımlarının genel kullanım alanları .....	12
Çizelge 2.6. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi .....	13
Çizelge 2.7. AA7075 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri .....	14
Çizelge 3.1. Bazı metallerin oda sıcaklığındaki kritik kayma gerilmesi değerleri ....	20
Çizelge 3.2. Plastik şekil verme yöntemleri.....	31
Çizelge 3.3. Bazı malzemeler için pot çemberi basınç değerleri .....	36
Çizelge 4.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	45
Çizelge 4.2. Deney numunelerinin açınım ölçüleri.....	51
Çizelge 4.3. Farklı kalınlıktaki deney numunelerine ait açınım ölçüleri .....	53
Çizelge 4.4. 4R HC 10-155 dört merdaneli konik bükme tezgâhı teknik verileri .....	57
Çizelge 5.1. Çekme testi ve sertlik ölçümü sonuçları .....	66
Çizelge 5.2. Geri yaylanma miktarı ortalama ölçüm sonuçları.....	72
Çizelge 5.3. Geri yaylanma miktarı ortalama ölçüm sonuçları.....	76
Çizelge 5.4. Geri yaylanma miktarına ait ortalama ölçüm sonuçları.....	78



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $\alpha$  : koniklik açısı  
 $\sigma$  : gerilme Değeri  
 $\varepsilon$  : deformasyon Miktarı  
Al : alüminyum  
 $\tau$  : kayma (kesme) gerilmesi  
 $\tau_{KR}$  : kritik kayma gerilmesi  
F : kesme kuvveti  
 $\alpha$  : büküm açısı  
P : basınç  
K : geri yaylanma faktörü

## KISALTMALAR

- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
- CAM : Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar Destekli Üretim)
- CMM : Coordinate Measurement Machines (Koordinat Ölçüm Makinası)
- CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayımlı Yönetim)
- NC : Numerical Control (Sayısal Kontrol)
- SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
- EDS : Elektron Mikroskobu Nokta Analizi
- YMK : Yüzey Merkezli Kübik Yapı
- HMK : Hacim Merkezli Kübik Yapı
- AA : Alüminyum alaşım
- HERF : High Energy Rate Forming (Yüksek Enerjili Şekillendirme)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında ve insan yaşamında önemli ölçüde kullanım alanı bulan alüminyumun en belirgin özellikleri arasında hafiflik, yüksek derecede ısı ve elektrik iletkenliği gelir. Kolayca dökülebilirlikleri, sıcak ve soğuk şekillendirilebilirlikleri, talaşlı işlenebilirlikleri ve korozyona dirençleri önemli karakteristikleridir. Bu özelliklerinden dolayı makine imalat, metal, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik – elektronik, uzay ve savunma sanayilerinde ve diğer birçok alanlarda kullanılırlar. Elde edilebilme kolaylığı ve diğer metaller ile yüksek çekme mukavemetine sahip alaşımlar oluşturabilmesi de kullanım alanının fazla olmasında önemli rol almaktadır [1,2]. Kaynak, lehim veya mekanik birleştirme usulleri ile birleştirilebilirler [3]. Döküm veya dövme yoluyla üretilen bazı alüminyum alaşımları ısıl işlemle dayanımları arttırılmaz iken, bazı seri alüminyum alaşımları ise ısıl işlem yoluyla belirli sıcaklıklarda belirli zaman bekletilerek mukavemeti iyileştirilerek, sertliği yükseltilebilir. Bu bekletmeye yaşlandırma ve bu olaya da ayrışma sertleşmesi denir. Yaşlandırma belirli sıcaklıkta yapılırsa suni (yapay) yaşlandırma, oda sıcaklığında yapılırsa tabii (doğal) yaşlandırma adını alır [2].

Bir alüminyum alaşımının ısıl işlemle sertleştirilmesi; önceden tayin edilen bir sıcaklığa kadar ısıtma, belirlenen bir sürede bu sıcaklıkta bekletme, düşük bir sıcaklığa hızla su verme ve su vermeye takiben, yaşlandırma veya çökeltme sertleşmesi olmak üzere dört kademedeki incelenir. AA7075 alaşımı diğer 7xxx serisi alüminyum alaşımları gibi çökeltme sertleştirilmesiyle dayanımları arttırılabilir. AA7075 alaşımlarında yaşlandırmaya bağlı olarak çökeltme oluşma sıralaması aşırı doymuş katı eriyik → GP I zonu → çözülme → GP II zonu → yarı kararlı  $\eta'$  fazı ve kararlı  $\eta$  fazı ( $MgZn_2$ ) şeklinde araştırmacılar tarafından özetlenmektedir. Bu çeşit alüminyum alaşımlarında sertlik veren faz yarı kararlı  $\eta'$  fazıdır [4,5]. Artan yaşlanma zamanı ile birlikte GP1 ve GP2 zonları yarı

kararlı  $\eta'$  fazını oluşturarak sertlik artışına ve dislokasyon hareketine engel çıkararak dayanım artışına neden olduğu düşünülmektedir. Sha ve Cerezo yarı kararlı  $\eta'$  fazı levhalı morfolojisi sebebiyle Al-Zn-Mg (-Cu) alaşımlarının sertliğinin sorumlusu olduğunu rapor etmişlerdir [6].

AA7075 alaşımı, T6 ısıl işlem şartlarında eriştiği yüksek mukavemet özellikleri sayesinde savunma sanayisinde de kullanımı oldukça artmaktadır. Günümüzde birçok endüstriyel uygulamalarda olduğu gibi savunma sanayisinde de aerodinamik ve yapısal gereksinimlerden dolayı konik ve silindirik kesitli makine parçalarına sık sık ihtiyaç duyulmaktadır. Konik kesitli parçaların üretilmesi için talaşlı imalat, döküm, sıvama ve soğuk olarak konik bükme gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Soğuk konik bükme işlemi diğer yöntemlere göre üretim zamanının kısaltılması ve fire miktarı ve işlem maliyetinin azaltılması konularında avantaj sağladığı için geliştirilmesi ve kullanılması gereken bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat bu yöntemde karşılaşılan problemlerin başında geri yaylanma davranışı gelir.

Geri yaylanma elastik şekil değiştirme özelliği gösteren eğilen ya da soğuk şekillendirilen malzemenin başlangıçtaki orijinal hale dönme eğilimi ya da kapasitesi olarak tanımlanabilir [7]. Diğer bir ifadeyle geri yaylanma şekillendirme sürecinde hizalama problemine neden olan bağlantıya tam yük uygulandığında ve üzerinden yük kaldırıldığında ortaya çıkan şekil uyumsuzluğudur.

Bu çalışmada, dört merdaneli hidrolik konik bükme tezgâhında AA7075 alaşımı sac malzemelerin konik şekillendirme sürecinde geri yaylanma miktarına işlem parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada bu etkiler üç farklı bölümde ele alınmıştır.

Birinci bölümde; işlem parametrelerinden kalınlığın geri yaylanma davranışı üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda ticari olarak temin edilen 2 mm, 3 mm ve 4 mm farklı kalınlıklardaki konik şekillendirilen AA7075-T6 sac numunelerin geri yaylanma miktarları ölçülmüştür. Böylece aynı parametreler kullanılarak yapılan konik şekillendirme işleminde farklı malzeme kalınlıkları için geri yaylanma sonuçları değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde, işlem parametrelerinden koniklik büküm açısının ( $\alpha$ ) geri yaylanma davranışına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda koniklik büküm açısı ( $\alpha$ ) 10°, 15°, 20° olacak şekilde konik şekillendirilen numunelerin geri yaylanma miktarları ölçülmüştür. Böylece AA7075-T6 malzeme üzerinde aynı parametreler kullanılarak yapılan soğuk konik şekillendirme işleminde farklı koniklik açıları için geri yaylanma miktarı sonuçları değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde ise, işlem parametrelerinden malzeme sertliğinin geri yaylanma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda T6 yaşlandırılma işlemine sahip şekliyle ticari olarak temin edilen bir grup AA7075 alaşımı, 180°C’ de 24 saat fırında tutulup oda sıcaklığında soğutulularak ve diğer bir grup malzeme de 200°C’ de 24 saat tutulup oda sıcaklığında soğutulularak yaşlandırma ısıl işlemlerine tabi tutulmuştur. Daha sonra oluşan aynı kalınlıkta ve koniklik bükme açısında farklı sertliklerdeki numunelerin konik büküm işlemleri yapılmış numunelerin geri yaylanma miktarları ölçülmüştür. Böylece soğuk konik şekillendirme işlemlerinde farklı sertliğin geri yaylanma sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Genel olarak bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, hidrolik konik bükme tezgâhında soğuk şekillendirme yöntemiyle yapılan konik şekillendirme işlemlerinde işlem parametrelerinden malzeme kalınlığı ve konik büküm açısı arttıkça geri yaylanma miktarının azaldığı, malzeme sertliği arttığında ise geri yaylanma miktarının arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile, bir mühendisin AA7075 malzemedен konik büküm yapılacak bir parça tasarımı yaparken, konik büküm işleminde en etkin sıkıntı olan geri yaylanma miktarını kontrolü altında tutabilmek için malzeme kalınlığı, sertliği ve/veya koniklik açısı gibi işlem parametrelerinin seçiminde kolaylık olması ümit edilmiştir. Ne yazık ki geri yaylama her zaman mevcut olacaktır. Ancak iyi belirlenmiş işlem parametreleri setiyle arzu edilen şekilsel özelliğe en yakın parça üretimi mümkün olacaktır.

## BÖLÜM 2

### ALÜMİNYUM

Alüminyum, yer kabuğu üzerinde oksijen ve silisyumdan sonra en fazla bulunan element olup sembolü Al ile gösterilmektedir. Atom numarası 13 olan bu element, periyodik cetvelin metal serisi olan IIIA grubunda yer almaktadır. Görüntü olarak parlak gümüş rengini anımsatmaktadır. Saf alüminyum, yüzey merkezli kübik (YMK) kristal kafes yapısına sahip olup yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Bir metale göre oldukça hafif olduğunu gösteren bu değer aynı zamanda çeliğin yaklaşık üçte bir oranında özgül ağırlığa sahip olduğunu da göstermektedir. Malzeme seçiminde yüksek yoğunluk-mukavemet oranı sunmaktadır. Ayrıca çok iyi bir elektrik ve termal iletkenliğine ve yüksek korozyon direncine de sahiptir [8]. Saf alüminyumun özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Yukarıda yazılanlara ek olarak kolayca dökülebilir, işlenebilir ve diğer metallerle alaşımlar oluşturabilir olması önemli özellikleri olarak karşımıza çıkmaktadır [1].

Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri [9].

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluğu	$2,7 \text{ gr/cm}^3$
Ergime noktası	658 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150–300 °C
Özgül ısısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	$72 \times 10^3 \text{ MPa}$
Kayma modülü	$27 \times 10^3 \text{ MPa}$
Çekme mukavemeti	40–90 MPa
Akma mukavemeti	10–30 MPa
Kopma uzaması	%30–40

Diğer metallerin üretimiyle mukayese edildiğinde alüminyum üretimi genç bir endüstri olup 1800' lü yılların sonlarından itibaren kullanılmaya başlandığı bilinmektedir. O günlerde üretilmesi zor ve pahalıdır. Diğer metallere göre hafif, iyi şekillendirilebilir ve iyi iletken olması gibi avantajlarından dolayı üretim süreçlerini iyileştirme ve genişletme çalışmaları artarak devam ettirilmiştir. Günümüzde birçok ülkede eritildiği ve birçok ülkede yüzlerce firmada son ürün olarak kullanıldığı bir noktaya geldiği aşikardır. Nihayetinde günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan ikinci metalik malzeme konumuna gelmiştir. Alüminyumu diğer metallere göre birçok alanda avantajlı hale getiren başlıca bazı özellikleri;

- Hafif olması,
- Hafifliğine rağmen alaşımlandırıldığında iyi mukavemete sahip olması,
- Tekrar kullanılabilir olması,
- Korozyona karşı direncinin yüksek olması,
- Çekilebilir olması,
- Kolay şekillendirilebilir olması,
- Dövülebilir bir malzem olması,
- İşlenebilirliğinin iyi olması,
- İyi ısı ve elektriksel iletkenliğine sahip olması,
- İyi ısı ve ışık yansıtıcılığı sağlaması olarak sayılabilmektedir.

Alüminyum, yeryüzünde “Boksit, Kriyolit, Korund, Spinel” gibi bileşikler halinde bulunur. Alüminyum üretiminde en çok boksit ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) bileşiği kullanılır. Saf alüminyum, boksit cevherinden alümina üretilmesi ve elektroliz yöntemi ile alüminadan alüminyum üretilmesi şeklinde iki aşamada elde edilir. Saf alüminyuma çinko, bakır, magnezyum ve silisyum gibi başka elementlerle alaşımlandırma yapılarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesi alanında birçok çalışma yapılmıştır. Böylece yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları elde edilerek çok geniş uygulama alanlarına ulaşılmıştır. Örneğin; temel alaşım elementleri çinko, magnezyum ve bakır olan 7xxx alüminyum alaşımları, yüksek sıcaklık, yüksek mekanik özellikler, iyi korozyon direnci ve bunların yanı sıra hafif olması gerektiren birçok havacılık ve savunma sanayi uygulamalarında oldukça fazla tercih

edilmektedir. Zamanla çoğu endüstriyel uygulamalarda alüminyum alaşım malzemeler çelik malzemelerin yerini almış olduğu görülmektedir [10].

## **2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE SINIFLANDIRILMASI**

Saf alüminyumun sertlik ve mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi için diğer metallerle alaşım oluşturma çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda bakır, silisyum, çinko, magnezyum, demir, mangan, titanyum ve nikel elementleri alüminyuma ilave edilerek birçok alüminyum alaşım çeşidi elde edilmiştir. Alüminyum alaşımların mikroyapısı, mekanik ve kimyasal özellikleri alüminyumun saflığı, bileşen olarak kullanılan alaşım elementine ve üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir.

Alüminyum alaşımlar, imalat yöntemlerine göre dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Her iki grup da ısıl işlem yapılabilir ve ısıl işlem yapılamaz alaşımlar olarak ikiye ayrılırlar. Döküm ve dövme alüminyum alaşımlarının bazıları ısıl işlemle mukavemetlendirilemez iken bazıları ise ısıl işlem yoluyla belirli sıcaklıklarda belirli zaman bekletilerek dayanımları artırılabilir. Burada yapılan mukavemet iyileştirme olayına ayrışma sertleşmesi ve bekletme işlemine de yaşlandırma denir. Yaşlandırma, oda sıcaklığında yapılırsa tabii (doğal) yaşlandırma veya oda sıcaklığından farklı belirli sıcaklıkta yapılırsa suni (yapay) yaşlandırma adını almaktadır [1].

Alüminyum alaşımları, iyileştirme ve güçlendirme durumlarına göre de birbirlerinden ayrılması için sınıflandırılmışlardır. Sertleştirilip, sertleştirilmediğine veya ısıl işlem uygulanıp uygulanmadığına göre gruplandırılmakta ve tanımlanan harfler ile ifade edilmektedir. İmal edildiği hali (F), çözeltiye alma ısıl işlemi uygulandıysa (W), tavlandıysa (O), soğuk şekillendirildiyse (H) ve sıcak şekillendirildiyse (T) ile tanımlanmaktadır. Gerilme sertleşmesinin miktarı, ısıl işlem türü veya varsa diğer özel işlemleri tanımlamak için H veya T den sonra standart hale getirilmiş rakamlar verilmektedir [11,12]. Uluslararası standartlar olarak belirlenmiş seri kodlamalar ve yapılan ısıl işlemler Çizelge 2.2' de verilmiştir.



Çizelge 2.2. Alüminyum alaşımlarının ısıtım işlem seri numaraları [12].

<b>KOD</b>	<b>UYGULANAN ISIL İŞLEM</b>
<b>F</b>	Fabrikasyon hali
<b>O</b>	Tavlanmış (en yüksek süneklik, en düşük dayanım)
<b>H</b>	Soğuk şekillendirilmiş
<b>H</b>	H1 Sadece soğuk şekillendirilmiş
	H2 Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
	H3 Soğuk şekillendirilmiş ve kararlı hale getirilmiş
<b>W</b>	Solüsyona alma
<b>T</b>	Yaşlandırılmış
<b>T</b>	T1 İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
	T2 İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
	T3 Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
	T4 Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
	T5 İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
	T6 Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
	T7 Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş
	T8 Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
	T9 Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
	T10 İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T</b>	T351 Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış. Hadde ürünleri uygulamaları için geçerlidir.
	T3510 T351 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için.
	T352 Çözeltiye alınmış, sıkıştırma ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
	T651 Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir.

Çizelge 2.2. (devam ediyor).

KOD	UYGULANAN ISIL İŞLEM
T6510	T651 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için geçerlidir.
T73	Çözeltiye alma ve korozyon dayanımını arttırmak için aşırı yapay yaşlandırma uygulanmış
T	T7651 Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve korozyon dayanımını arttırmak için yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir.
T76510	T7651 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için geçerlidir.

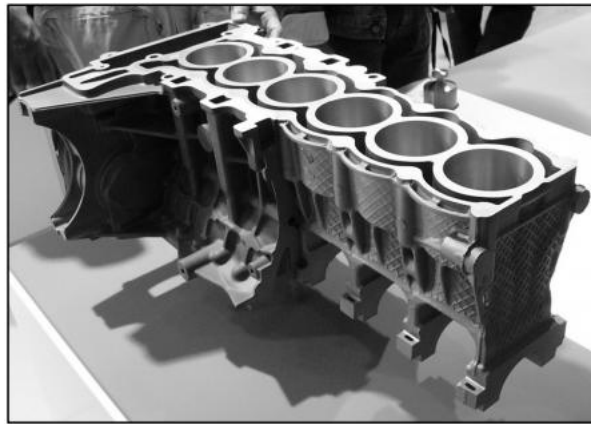
### 2.1.1. Dökme Alüminyum Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımlar, kumlama, kalıp veya basınçlı kalıp dökümü yöntemlerinden birisiyle ve çoğunlukla nihayi şeklini alacak şekilde üretilirler. Döküm yoluyla üretilen alaşımlar, dört rakam olacak şekilde standart numaralandırma sistemiyle gösterilmektedirler. İlk numara asıl alaşım elementini, ikinci ve üçüncü basamaklar alaşımın ayrıntılarını göstermektedir. Üçüncü basamak ile arasında nokta bulunan dördüncü basamak, sürekli döküm (0) veya ingot (1 veya 2) olduğunu belirtmektedir. Döküm yoluyla üretilen alüminyum alaşımlarının bazılarında yaşlandırma işlemi uygulanabilir fakat bazılarında uygulanamaz. Çizelge 2.3'de döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve yaşlandırabilirlikleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca herhangi bir grup içindeki bir alaşımın, ana alaşım elementlerinin aynı olduğu fakat saflık limitlerine göre çok küçük farklar olduğunda dört haneli rakamın başına A, B ve C şeklinde devam eden harfler verilerek birbirinden ayrılmaktadır [11,12]. Bu durums aralarında çok az saflık farkı bulunan 356.0 alaşımın varyasyonları olan B356.0 ve C356.0 alaşımları örnek olarak verilebilmektedir.

Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımının sınıflandırılması [12].

DÖKÜM ALAŞIMLAR	ISIL İŞLEM	
1XX.X	Ticari Safılıkta Al	Yaşlandırılmaz
2XX.X	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Kısmen yaşlandırılabilir
4XX.X	Al-Si	Yaşlandırılmaz
5XX.X	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XX.X	Kullanımda değil	-
7XX.X	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir
8XX.X	Al-Sn	Yaşlandırılabilir
9XX.X	Kullanımda değil	-

Döküm alüminyum alaşımları, savunma sanayide füze gövdeleri, havacılık sanayinde yapısal parçalar, otomotiv sanayinde motor blokları, gaz düzenleyicileri (regülatörleri) ve yakıt pompaları ve çoğu günlük kullanım eşyaları dahil birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de dış kısmı Mg ve iç tarafı Al-Si alaşımından basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiş bir motor bloğu resmi verilmiştir. Düşük yoğunluk ile yüksek mekanik özellikleri, döküm kolaylığı, yüksek yüzey kalitesi, döküm sonrası kolay işlenebilirlik ve ölçüsel kararlılık avantajlarından dolayı kullanım alanları hızla artmaktadır.



Şekil 2.1. Alüminyum döküm alaşımı olan motor bloğu [13].

### 2.1.2. Dövmeye Alüminyum Alaşımaları

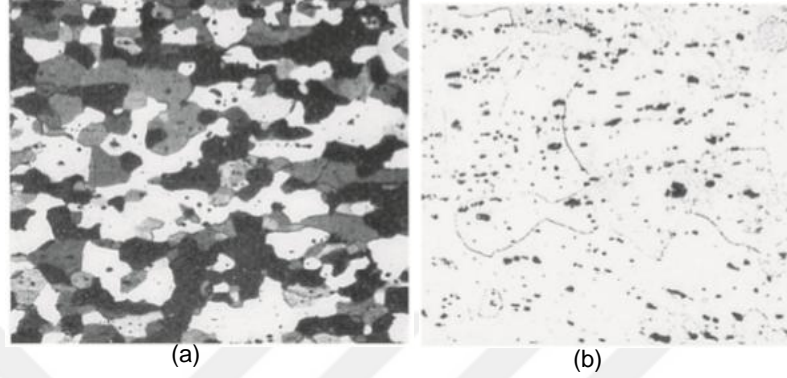
Dövmeye alüminyum alaşımaları, önce kütük veya külçe olarak imal edilirler. Sonrasında sıcak veya soğuk ya da sıcak ve soğuk olarak mekanik işlemlerden geçirilirler. Haddelendirme, dövme veya ekstrüzyon gibi yöntemlerden yararlanılarak istenilen formda şekillendirilerek, dövme alüminyum alaşımaları elde edilirler. Döküm alüminyum alaşımalarında olduğu gibi dört basamaklı rakamlar ile ifade edilirler. Ancak bu alaşımlarda dördüncü basamaktan önceki nokta bulunmaktadır. Birinci rakam asıl alaşım elementini, ikinci basamak alaşım değişikliklerini, üçüncü ve dördüncü basamaklar alüminyum saflığını belirtmektedir [11,12]. Dövmeye alüminyum alaşımalarının sınıflandırılması ve yaşlandırabilme durumları Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Dövmeye alüminyum alaşımının sınıflandırılması [12].

<i>Dövmeye Alaşım</i>	<i>Isıl İşlem</i>	
1xxx	Ticari Saflıkta Al (>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4xxx	Al-Si veya Al-Mg-Si	Mg varsa yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Zn-Mg	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li, Sn, Zr veya B	Yaşlandırılabilir
9xxx	Kullanımda değil	-

Çizelge 2.4'de görüldüğü üzere; 2xxx, 6xxx ve 7xxx seri numaralı dövme alüminyum alaşımaları ısıl işlemle mekanik özellikleri iyileştirebilirler. 1xxx ve 3xxx alaşımaları, az miktarda inklüzyonların veya metaller arası bileşiklerin varlığı haricinde tek fazlı alaşım olduklarından dolayı yaşlandırılmazlar. 5xxx alaşımlara ise  $Mg_2Al_3$  kararlı yapıya sahip olmadıklarından dolayı ısıl işlem uygulanamamaktadır. Bu alaşımların özellikleri, gerinim sertleştirilmesi, katı çözümlü sertleştirilmesi veya tane boyutu kontrolü ile iyileştirilebilmektedir. Şekil 2.2'de,

tavlanmış AA5457 alüminyum alaşımlarının  $Mg_2Si$  çökeltileri (a) ve AA1100 alüminyumdaki  $FeAl_3$  inklüzyonları (b) gösteren mikroyapıları gösterilmiştir. 4xxx seri numaralı alaşımlarda durum biraz farklı olup alaşım magnezyum ihtiva ediyorsa ısıl işlem uygulanabilmekte, etmiyorsa ısıl işlem uygulanamamaktadır [14].



Şekil 2.2. Tavlanmış alüminyum alaşım mikro görüntüleri. a) Tavlanmış AA5457 alüminyum alaşımındaki  $Mg_2Si$  çökeltileri b) Tavlanmış AA1100 alüminyumdaki  $FeAl_3$  inklüzyonları [14].

Endüstriyel uygulamalarda 2024, 5083, 6061, 7075 ve 7050 kullanımı en çok olan dövme alüminyum alaşımları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada kullanılan AA7075-T6 alaşımı da bu grupta yer almaktadır ve bu malzemeler ile ilgili detaylı bilgi aşağıda verilecektir. Dövme alüminyum alaşımlarının seri numarlarına göre genel olarak kullanım alanları özetlenerek Çizelge 2.5'te verilmiştir. Mühendisin bir dövme alüminyum alaşımı malzeme seçimi yaparken bu çizelgede yazılmış olan özelliklere dikkat etmesi önerilmektedir. Birkaç örnek verecek olursak, büküm ve sonrasında kaynak olacak bir parça için 5083 gibi 5xxx serisi, yüksek dayanım gerektiren bir parça için 7xxx veya 8xxx serisi ya da ekstrüzyon işlemi yapılacaksa 6xxx serisi malzeme seçimi yapması doğru bir karar olacaktır. 7xxx ve 8xxx serisi malzemeler diğerlerine göre pahalı malzemeler olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı kullanılacak yere ve yapılacak işlemlere göre ihtiyaç duyulan özelliklere sahip bir malzemenin seçimi yapılırken gereksiz maliyetten kaçınmak için de uygun bir malzemenin seçilmesine dikkat edilmelidir.

Çizelge 2.5. Dövme alüminyum alaşımlarının genel kullanım alanları [15].

Seri Numara	KULLANIM ALANLARI
1XXX	Elektrik ve kimya sanayi parçalarının imalatında.
2XXX	Yüksek mukavemet istenen havacılık ve savunma sanayi parçalarının imalatında.
3XXX	Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda.
4XXX	Kaynak işlemi yapılacak parçaların imalatında.
5XXX	Korozyon direnci yüksek olduğundan korozyon direnci yüksek olması gereken parçaların imalatında, kaynak işlemi yapılacak parçaların imalatında.
6XXX	Şekillendirebilirlik kabiliyeti yüksek olduğundan özellikle ekstrüzyon ile üretilen otomotiv, havacılık, savunma ve birçok alandaki parçaların imalatında.
7XXX	Yüksek dayanım gerektiren havacılık, savunma sanayi parçalarının imalatında.
8XXX	Havacılık ve uzay sanayi parçalarının imalatında.
9XXX	Kullanımı bulunmamaktadır.

### 2.1.3. AA7075 Alüminyum Alaşımı

Alcoa firması tarafından 1943' te geliştirilip tanıtılmış olan 7075 alüminyum alaşım, o günden bugüne başta havacılık ve savunma endüstrisinde ve birçok farklı alanda yoğun bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Kısa zamanda bu kadar yaygın kullanılmasını, yüksek mukavemet özelliği, ısıl işlem ile daha da mukavemetleştirilebilir ve bunların yanında hafif olması kaçınılmaz kılmıştır. Bu alaşımlar levha, plaka, sac, çubuk, lama, boru ve profil olarak imal edilmektedirler. Diğer 7xxx serisi alüminyum alaşımları gibi çökeltme sertleştirilmesi ile mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir.

AA7075 alaşımlarında yaşlandırmaya bağlı olarak çökelti oluşma sıralaması aşırı doymuş katı eriyik → GP I zonu → çözülme → GP II zonu → yarı kararlı  $\eta'$  fazı ve kararlı  $\eta$  fazı ( $MgZn_2$ ) şeklinde araştırmacılar tarafından özetlenmektedir. Bu çeşit

alüminyum alaşımlarında sertlik veren faz yarı kararlı  $\eta'$  fazıdır [4,5]. Yaşlanma zamanının artması ile birlikte GP1 ve GP2 zonları yarı kararlı  $\eta'$  fazını oluşturarak sertliğin artmasına ve soğuk deformasyon sürecinde dislokasyon hareketine engel çıkarak mukavemetin iyileşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Sha ve Cerezo yarı kararlı  $\eta'$  fazı levhalı morfolojisi sebebiyle Al-Zn-Mg (-Cu) alaşımlarının sertliğinin sorumlusu olduğunu bildirmişlerdir [6]. O, F, T6, T73 ve T76 gibi ısıtma işlem kodlu olarak kullanılmaktadır. AA7075 alaşımı, T6 veya T651 ısıtma işlem şartlarında eriştiği yüksek mukavemet özellikleri sayesinde havacılık ve savunma sanayisinde tercih edilmesi ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

AA7075 alüminyum alaşımının yüksek mekanik özelliklerine rağmen, atmosfer ortamı gibi düşük aktiviteli ortamlarda bile gerilim korozyon çatlama hassas olduğu tespit edilen bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu duruma çözüm olarak sac malzemelerin, genellikle her iki tarafına korozyona karşı dayanıklı bir alüminyum alaşımı olan "Alclad" denilen metal ile kaplanmış şekilde piyasaya sunulduğu görülmektedir [16].

### 2.1.3.1. AA7075 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Özellikleri

AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşiminde alüminyumun dışında %5,1-6,1 arasında çinko, %2,1-%2,9 arasında magnezyum ve %1,2-2 arasında bakır, toplamı en fazla %1,6 Fe, Si, Mn, Cr ve Ti bulunmaktadır. Çizelge 2.6'da AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 2.6. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık) [17-19].

Alaşım Elementi	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
(% Ağırlık)	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2,0	Max 0,5	Max 0,4	Max 0,3	0,18-0,28	Max 0,2	Kalan

### 2.1.3.2. AA7075 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri

AA7075 alüminyum alaşımının başta mukavemet değerleri olmak üzere fiziksel özellikleri diğer alüminyum alaşımlarından daha iyidir. AA7075 alaşımın fiziksel özellikleri Çizelge 2.7’de görülmektedir.

Çizelge 2.7. AA7075 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri [17].

Özgül Ağırlık	2,81 gr / cm <sup>3</sup>
Elastik Modülü	73000 MPa
Rijitlik Modülü	27500 MPa
Ergitme Aralığı	477 – 635 °C
Özgül Isı (0-100 °C Arasında)	0,23 cal/gr °C
Lineer Genleşme Katsayısı (20-100 °C, T6 İçin)	24-10-6 mm/°C
Özgül Elektrik Direnci (20 °C, T6 İçin)	0,058 Ohm.mm <sup>2</sup> /m

AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini daha da iyileştirmek için ısıl işlemler uygulanmaktadır [16]. AA7075 alaşımın ısıl işlem uygulanmış mekanik özellikleri ise Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri [19].

Isıl İşlem Kodu	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)
T0 Sac/Plaka	0.38-50.80	Max. 276	Max. 145	9-10
T6 Sac	0.203-6.32	510-538	434-476	5-8
T651 Plaka	6.35-101.60	538-462	462-372	9-3
T76 Sac	3.18-6.32	503	427	8
T7651 Plaka	6.35-25.40	496-490	421-414	8-6
T73 Sac	1.02-6.32	462	386	8
T7351 Plaka	6.35-101.60	476-421	393-331	7-6

### 2.1.3.3. AA7075 Alüminyum Alaşımının Kullanım Alanları

AA7075 alüminyum alaşımı, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, süneklik, tokluk ve yorulma direncine sahip olması sebebiyle imalat sanayinin birçok alanında geniş yelpazede kullanılmaktadır [1,20-24]. Özellikle hafiflik ve yüksek mukavemet



gerektiren parçalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle havacılık yapısal parçalarında sıklıkla kullanılan önemli bir malzemedir [25]. Ayrıca endüstride aşağıda belirtilen alanlarda da sıklıkla kullanıldığı görülmektedir.

- Savunma sanayinde,
- Askeri ve sivil uçak sanayinde,
- Kalıp yapımında (özellikle kauçuk ve plastik kalıpları),
- Tenis racketlerinde,
- Makine parçaları imalatında,
- Cıvata, vida ve somun üretimlerinde,
- Nükleer uygulamalarda,
- Yüksek mukavemet ve işlenebilirlik gerektiren her alanda.

Yukarıdaki listenin yanında ayrıca uçak armatürleri, dişliler, miller, sigorta parçaları, metre şaftları ve dişlileri, füze gövde parçaları, düzenleyici valf parçaları, sonsuz dişliler, anahtarlar, askeri ve sivil uçak parçaları, bisiklet kasaları, tüm arazi aracı dişlileri gibi parçalarda da AA7075 alüminyum alaşımı kullanıldığı görülmektedir [17].

## BÖLÜM 3

### SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Günümüz imalat sanayiinde parçaların üretilebilir olmasının yanında pratik ve ekonomik olması tercih sebebi olmaktadır. Bundan dolayı nispeten pahalı olan talaşlı imalat, döküm ve dövme yoluyla üretilen parçaların yerini sac şekillendirme ve sac malzemeler almaktadır. Rekabetin ciddi şekilde yaşandığı üretim dünyasında, ağır, karmaşık, firesi çok parçaların üretiminden ziyade basit, fonksiyonel ve kullanışlı parçalara yönelmek zorunlu hale gelmiştir [26]. Sac malzemelerin şekillendirebilme kabiliyetlerin belirlenmesi olarak ifade edilen şekillendirilebilirlik ve bazı sac metal şekillendirme yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

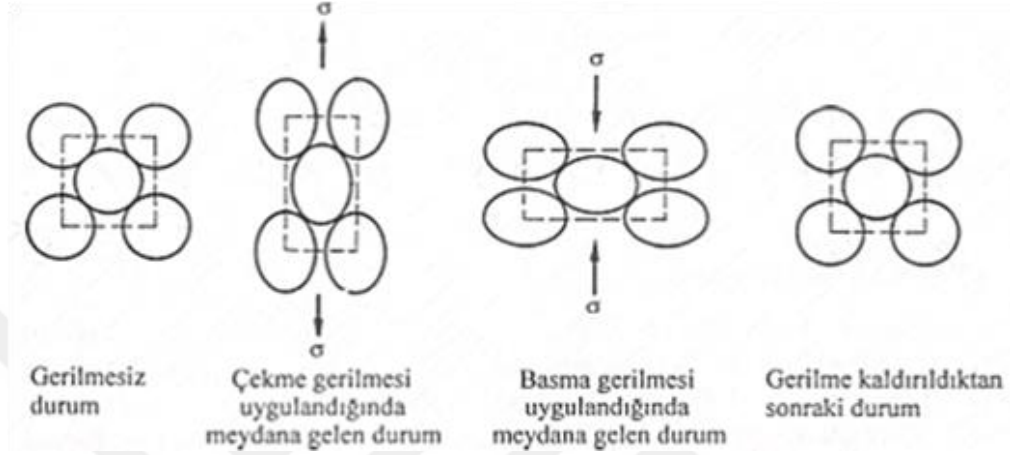
#### 3.1. MALZEMELERİN DEFORMASYONU

Bir malzemenin bir veya birden fazla dış kuvvet etkisi altında başlangıçtaki boyut ya da biçiminin değişmesi olayına malzemelerin deformasyonu veya şekil değişimi adı verilmektedir. Dış kuvvetler malzeme üzerinde basma, çekme veya kayma biçiminde şekil değişimine neden olmaktadır. Uygulanan kuvvetin büyüklüğüne veya artırılmasına göre plastik şekil değiştirebilen malzemede önce elastik şekil deformasyonu oluşur, sonra plastik deformasyon başlar ve oluşur ve en sonunda kopma gerçekleşir. Malzemelerin elastik ve plastik şekil değişimi özelliklerinden yola çıkılarak istenilen faydalı şekil haline getirilmesi sağlanmaktadır [27,28].

##### 3.1.1. Elastik Deformasyon

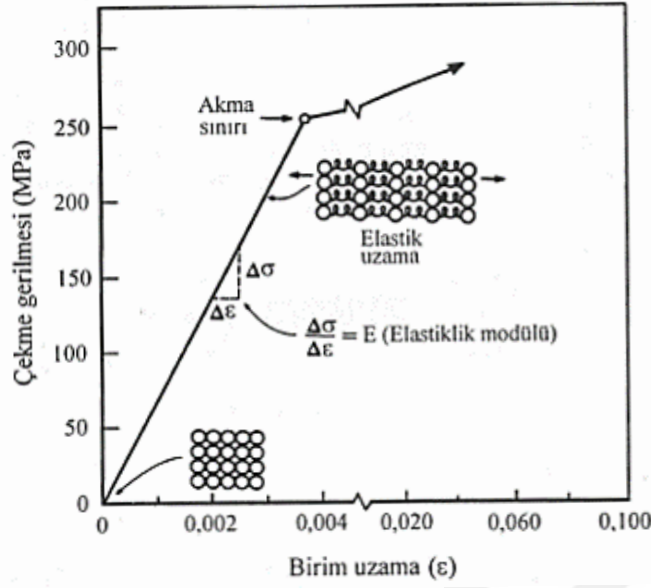
Elastik şekil değiştirme, genel olarak basma veya çekme kuvveti uygulanan malzemenin atomlarının birbirlerinden ayrılmadan aralarındaki mesafelerin değişmesi olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle uygulanan kuvvetin ortadan kalkması sonrasında malzeme eski formuna geri dönüyorsa bu cisimde meydana

gelen şekil değişimine elastik deformasyon denilmektedir. Elastik deformasyonda atomlar arasındaki bağların bir yay gibi davrandıkları ve şekil değişimi sırasında kopmadıkları görülmektedir [29]. Şekil 3.1’de kristal yapıları malzemelerde elastik deformasyonun meydana gelişi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Kristal yapıları malzemelerde çekme ve basma gerilmelerin etkisiyle oluşan elastik deformasyonun şematik gösterimi [29].

Bir malzemenin elastik davranışı karakteristik özelliğidir ve malzemenin malzemeye değişiklik gösterir. Elastik davranışı belirlemek için gerilme-birim uzama diyagramlarından veya çekme ya da basma testi sonuçlarından yararlanılmaktadır. Örneğin Şekil 3.2’de verilen çekme diyagramı bir alüminyum alaşımının elastik davranışını grafiksel olarak göstermektedir. Kristal yapıları malzemelerde, uygulanan çekme gerilmesi ( $\sigma$ ) ile elde edilen birim elastik uzama ( $\epsilon$ ) arasında Hooke kanunu ile ifade edilen doğrusal bir ilişki ( $\sigma=E.\epsilon$ ) vardır. Çekme diyagramının elastik kısmına ait doğrunun eğimi, malzemenin elastiklik veya elastisite modülünü (Young modülünü) (E) verir [29]. Polimer ve benzeri sünek malzemelerin elastik davranışları metallere ve seramiklere göre daha yüksektir.



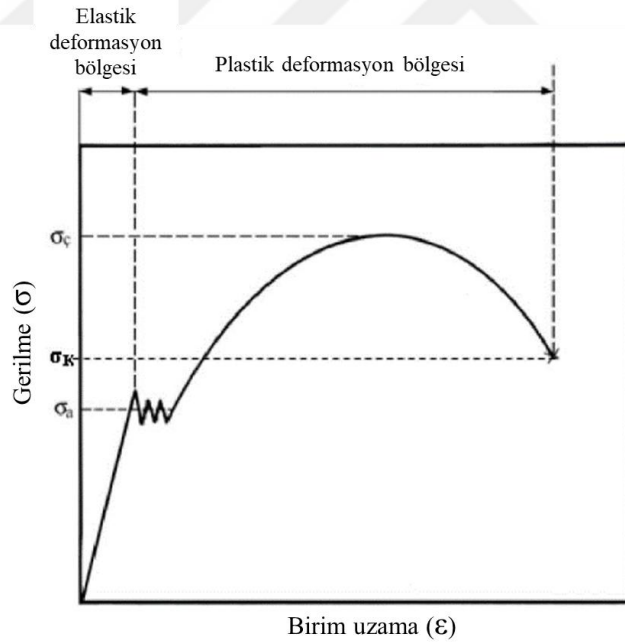
Şekil 3.2. Alüminyum alaşım bir malzemenin elastik deformasyonunu gösteren gerilme-birim uzama eğrisi [29].

### 3.1.2. Plastik Deformasyon

Malzeme üzerine uygulanan kuvvetin veya kuvvetlerin malzemede oluşturduğu gerilme, malzemenin elastik şekil değiştirme sınırını aşıyorsa ve kalıcı şekil değişimine neden oluyorsa bu şekil değişimine plastik şekil değiştirme veya plastik deformasyon denilmektedir. Plastik deformasyon, uygulanan kuvvetin etkisiyle malzemeye ait atomların birbirlerinden ayrılması, komşularını değiştirmesi ve yeni komşularla sabit bir yapıya dönüşmesi olarak da tanımlanmaktadır [30]. Malzemelerin plastik deformasyon davranışları da elastik deformasyon davranışları gibi karakteristik özellikleridir ve malzemedan malzemeye değişiklik gösterirler. Bir mühendis, kullanılacağı yere göre malzemenin plastik şekil değiştirme özelliğini önemli bir ayırt edici özellik olarak dikkate almalı ve ona göre malzeme seçimi yapmalıdır. Haddelme, markalama, dövme, presleme, ekstrüzyon, derin çekme ve tel çekme gibi birçok imalat yöntemlerinde gerçekleştirilen şekil değişim

işlemlerinde birer plastik deformasyon oluşmaktadır. Endüstride sıklıkla başvurulan talaşlı işlem uygulamalarındaki şekil değişimleri de bir plastik deformasyon oluşumu sonucudur. Bu tez kapsamında yapılan deney çalışmalarında uygulanan konik büküm işlemlerindeki şekil değişimi de plastik deformasyon yoluyla gerçekleşmektedir.

Metallerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve deformasyon esnasında malzemede meydana gelen elastik ve plastik şekil değişiminin incelenmesinde çekme deneyi testleri kullanılmaktadır. Gerilme ve şekil değiştirme eğrileri malzemelerin mekanik davranışları hakkında bilgiler edinilmesini sağlamaktadır. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğe ait tipik gerilme uzama eğrisinde plastik deformasyon bölgesi Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere uygulanan gerilim altında birim uzamaya bağlı olarak belli bir yere kadar malzeme elastik deformasyon sonrasında kopma noktasına kadar plastik deformasyon davranışı göstermektedir.



Şekil 3.3. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğe ait gerilme-uzama eğrisi [31,32].

Şekillendirme işlemlerinin kontrollü ve doğru yapılabilmesi için plastik deformasyon mekanizmaları ile malzemelerin plastik deformasyon sırasındaki davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bundan dolayı metalik malzemelerdeki plastik deformasyon mekanizmalarına aşağıda alt başlık olarak kısaca değinilmiştir.

### 3.1.2.1. Metalik Malzemelerde Plastik Deformasyon Mekanizmaları

Metalik malzemelerdeki plastik deformasyon, kayma, ikizlenme, tane sınırı kayması ve yayıncı sürünme olarak adlandırılan mekanizmalarından biri veya birden fazlasının harekete geçmesiyle meydana gelmektedir. Bu mekanizmalar aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

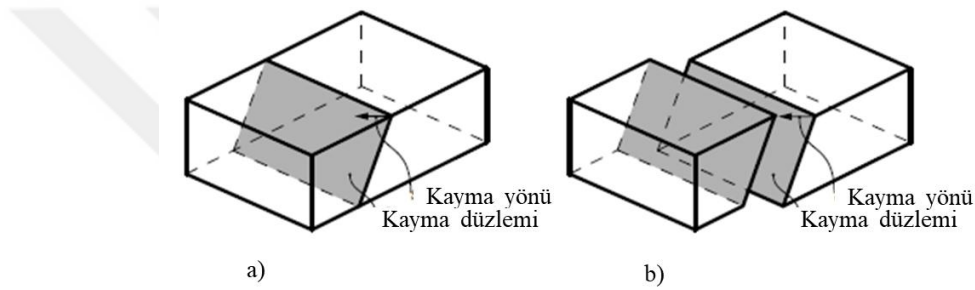
#### Kayma

Kayma, dislokasyonların hareketi neticesinde atom düzlemlerinin birbiri üzerinde kayması veya ötelenmesi anlamına gelmektedir. Malzemede kaymanın meydana gelmesi için dislokasyon hareketine karşı olan direnci yenecek kadar bir kuvvet veya kayma gerilmesinin etkimesi gerekmektedir. Başka bir ifade ile kaymanın meydana gelebilmesi için, etkiyen kuvvet veya gerilmenin malzemenin kritik kayma gerilmesinden ( $\tau_{kr}$ ) daha büyük olması gerekir. Kayma için gerekli en düşük kayma gerilmesine kritik kayma gerilmesi denir [33]. Bazı metallerin oda sıcaklığındaki kritik kayma gerilmeleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı metallerin oda sıcaklığındaki kritik kayma gerilmesi değerleri [29].

<b>Metal</b>	<b>Kafes Yapısı</b>	<b>Kritik Kayma Gerilmesi (N/mm<sup>2</sup>)</b>
Gümüş	YMK	0,37
Bakır	YMK	0,49
Alüminyum	YMK	0,79
Magnezyum	SDH	0,44
Kobalt	SDH	6,60
Titan	SDH	13,71
Demir	HMK	27,44
Molibden	HMK	71,70
Kolombiyum	HMK	33,37

Kayma yönü ve kayma miktarı Burgers vektörü ile belirlenmektedir. Bir kenar dislokasyonu için, kayma yönü aynı zamanda kayma dislokasyon yönüdür fakat bir vida dislokasyonu için, bu yönler birbirine diktir. İki kaymış kristal parçayı ayıran düzleme kayma düzlemi denir. Kayma yönü ve kayma düzlemi ile oluşan kombinasyon kayma sistemi olarak adlandırılmaktadır [34]. Metallerde kayma düzlemleri, kayma doğrultuları ve kayma sistem sayıları kafes yapılarına göre değişiklik göstermekte ve birçok malzeme bilgisi kaynaklarında bu değerlerin tablo halinde verildiği görülmektedir. Şekil 3.4'de bir kristalde meydana gelen kayma sistemi gösterilmiştir.

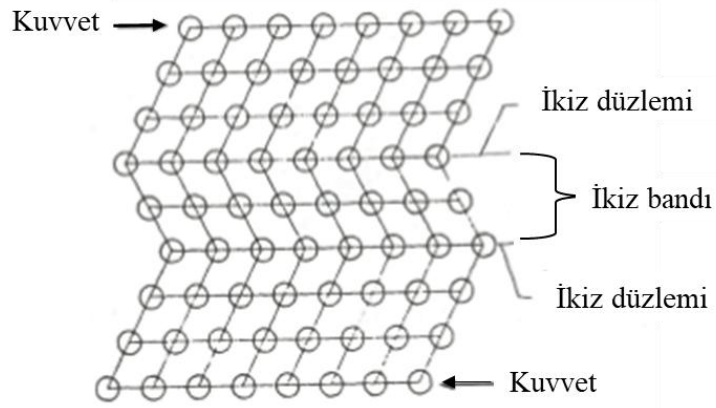


Şekil 3.4. Bir kristalde meydana gelen kayma düzlemi ve kayma yönü. a) kayma öncesi, b) kayma sonrası [34].

Metallerde kayma sistemi sayısı o metalin şekil değiştirebilme özelliğini etkilemektedir. Kayma sistemi sayısı fazla olan metallerin şekil değiştirebilme özelliğinin daha yüksek ve daha kolay şekil değiştirebilir olduğu bilinmektedir.

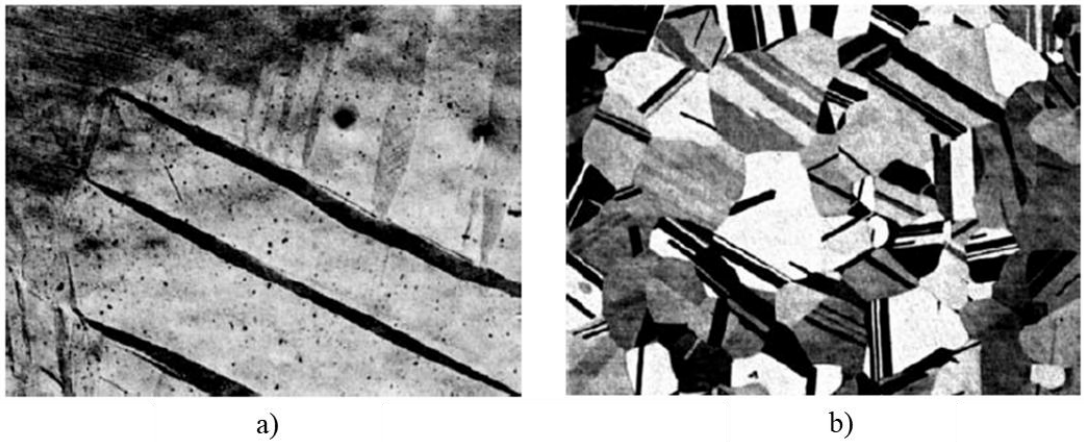
## İkizlenme

İkizlenme, atom düzlemlerinin ikiz düzlemine paralel doğrultuda hareket etmeleri sonucunda kafes yapısının farklı yönlenmiş iki simetrik kısma bölünmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Genellikle düşük sıcaklıklarda veya yüksek deformasyon hızlarında oluşan bir plastik deformasyon mekanizmasıdır. Aslında kaymanın zor olduğu durumlarda plastik deformasyonun ikizlenme ile oluştuğu görülmektedir. İkizlenmenin kristalografik gösterimi Şekil 3.5'de verilmiştir. Çarpma veya darbe ile gerçekleşen plastik deformasyonlarda ikizlenme, statik bir yükün uygulanması sonucu gerçekleşen plastik deformasyonlarda kayma daha sık görülmektedir [32].



Şekil 3.5. İkizlenmenin kristalografik gösterimi [29].

İkizlenme olayı, deformasyon ve tavlama ikizlenmesi olarak iki gruba ayrılmaktadır. Hekzagonal sıkı paket yapıli metallerde ve hacim merkezli yapılarda genellikle deformasyon ikizlenmesi görülürken yüzey merkezli kübik kafes yapıli malzemelerde ise tavlama ikizlenmesi görülmektedir [29,34]. Deformasyon ikizlenmesinde, Şekil 3.6-a'da gösterilen magnezyumda olduğu gibi genellikle merceksi bir yapı görülmekte ancak tavlama ikizlenmesinde Şekil 3.6-b'de gösterilen pirinç malzemesindeki gibi genellikle mükemmel yakın paralel düzlemlerden oluşan yapı görülmektedir.

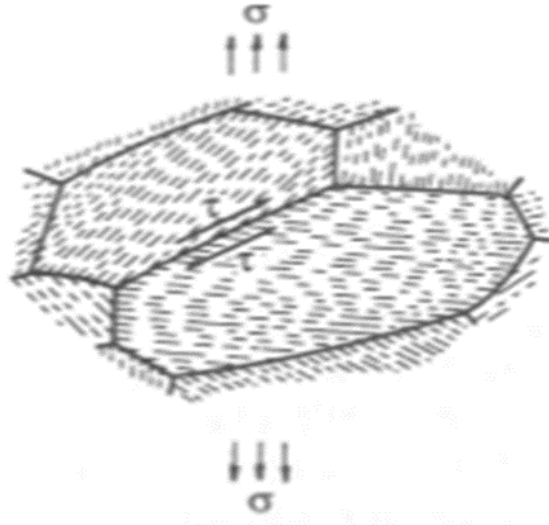


Şekil 3.6. Deformasyon ve tavlama ikizlenmelerinin görüntüleri. a) Magnezyum malzemesindeki deformasyon ikizlenmesi, b) Pirinç malzemesindeki tavlama ikizlenmesi [35].



## Tane Sınırı Kayması

Tane sınırı kayması mekanizması, seramik ve çok kristalli metal malzemelerde yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon hızlarında oluşmaktadır. Tane sınırı kayması, tanelerin tane sınırı boyunca kayarak birbirlerine göre yer değiştirmeleri sonucunda meydana gelmektedir. Tane sınırı kayması Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir. Malzemeye uygulanan kuvvet ile tane sınırlarında oluşan kayma gerilmesi ( $\tau$ ), tane sınırının kayma mukavemetinden yüksek olduğu durumlarda tane sınırı kaymaları gerçekleşir. Tane sınırları, çekme eksenine 45 derecelik açı yaptığı zaman kayma gerilmesi en yüksek değerine ulaşır ve en fazla kayma bu sınırlarda görülür. Tane boyutu küçüldükçe birim hacimdeki tane sayısı ve dolayısıyla tane sınırı oranı artar. Bu nedenle ince taneli malzemelerde tane sınırı kaymasının toplam deformasyona katkısı oldukça yüksektir [29,36].

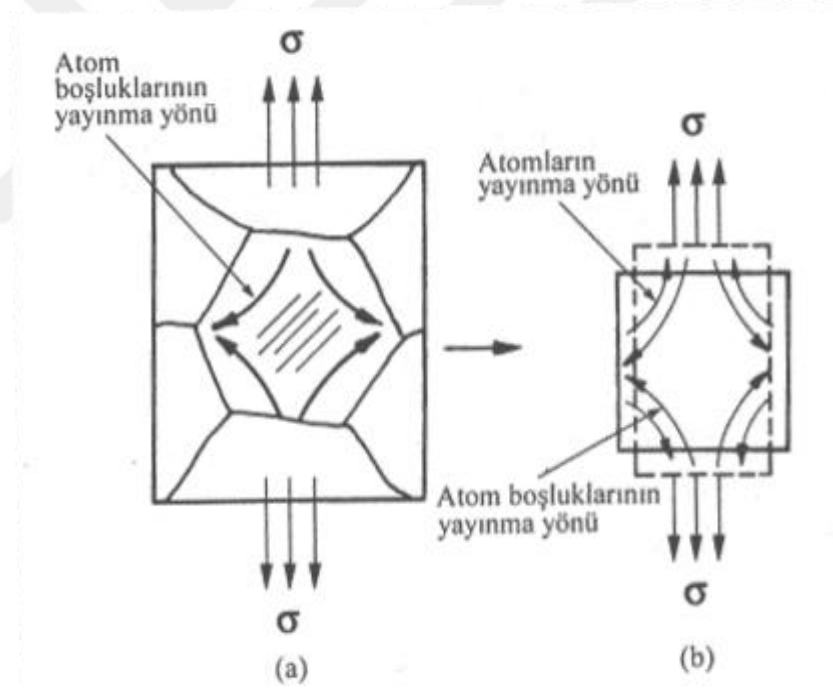


Şekil 3.7. Tane sınırı kaymasının şematik gösterimi [29].

Tane sınırı kayması, deformasyon sürecinde malzemenin esneklik veya süper esneklik özelliğini ortaya çıkarmaktadır. Süper plastik oluşumlarındaki deformasyonun birçoğunun tane sınır kaymasıyla meydana geldiği ifade edilmektedir [36].

## Yayınma sürünmesi

Yayınma sürünmesi, çok yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük deformasyon hızlarında meydana gelmekte ve difüzyon sürünmesi olarak da adlandırılmaktadır. Deformasyon sıcaklığının malzemenin ergime sıcaklığına oldukça yakın sıcaklıklarda olması durumunda bu mekanizma gerçekleşir. Malzeme içerisindeki atomlar gerilme eksenine doğrultusunda, boşluklar ise gerilme eksenine dik doğrultuda yayınırlar. Bu dik yayınmalar sonucunda malzemenin taneleri uzayabilmektedir. Bu mekanizmada taneler en fazla tane boyutu kadar yol alabilirler [29]. Uygulanan gerilme ( $\sigma$ ) sonucu atomların yayınma sürünmesi ile şekil değişimi ve atomların hareket yönleri Şekil 3.8-a'da ve bir tanede yayınma sürünmesi ile oluşan plastik deformasyon Şekil 3.8-b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Yayınmalı sürünmenin şematik gösterimi. a) atomların yayınma sürünmesi ile oluşan plastik deformasyon, b) atomlardan bir tanesinde yayınma sürünmesi ile oluşan plastik deformasyon [29].

Plastik deformasyon mekanizmalarının yanında plastik deformasyona etki eden faktörlerin de bilinmesi ve faydalı olarak kullanılması önemli bir konu olarak

karşımıza çıkmaktadır. Bundan dolayı plastik deformasyona etki eden faktörlere aşağıda değinilmiştir.

### **3.1.2.2. Plastik Deformasyona Etki Eden Faktörler**

Malzeme yapısı, mekanik özellikleri, sıcaklık, deformasyon hızı ve sürtünme gibi parametreler malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetlerini etkileyen önemli faktörlerdir. Plastik deformasyonu etkileyen başlıca faktörler aşağıdaki gibidir.

- Malzeme yapısı
- Mekanik özellikler
- Deformasyon hızı
- Sıcaklık
- Sürtünme ve yağlama
- Hidrostatik basınç
- Kalıntı gerilmeler
- Geometrik faktörler

Tüm bu faktörler ve etkilerine ait özet bilgilere sırasıyla aşağıda yer verilmiştir.

#### **Malzeme yapısı**

Plastik deformasyon özellikleri dahil malzemelerin çoğu özellikleri malzeme yapılarına bağlıdır. Malzemeler, içerdikleri atomların cinsine, dizilişine, büyüklüklerine ve birbirlerine bağlantı şekillerine göre değişiklik gösterirler. Malzemelerin mukavemeti, sünekliği, kristal yapısı, tane boyutu, kırılma şekli, yapısında bulunan metalik olmayan kalıntıların (inklüzyonların) türü ve miktarı gibi parametreler plastik deformasyonu olumlu veya olumsuz yönde etkilemektedirler. Örneğin tek fazlı malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetleri çok fazlılara göre daha iyi olduğu bilinmektedir. Malzeme yapısı, makroskobik ve mikroskobik yöntemler ile tespit edilebilmektedir. Bu tespitler, şekil verme işlemleri sırasında malzeme yapısı uygun olan malzemenin seçilmesinde yardımcı olmaktadır [29].

## **Malzemelerin mekanik özellikleri**

Malzemelerin mekanik özellikleri atomik yapıları ile belirlenir. Bu amaçla çekme, basma, burma, sertlik ölçme vb. mekanik deneyler gibi bazı tahribatlı veya tahribatsız muayene yöntemleri kullanılmaktadır. Elde edilen bu deney sonuçlarının yardımı ile malzemenin deformasyon özellikleri (deformasyon hızı, deformasyon sertleşmesi, birim şekil değiştirme tipi) hakkında bilgiye ulaşılmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda bitmiş ürünün kullanılacağı şartlara ve uygulanacak şekil değiştirme işlemlerine göre optimum mekanik özelliklere sahip malzeme seçimi yapılabilmektedir.

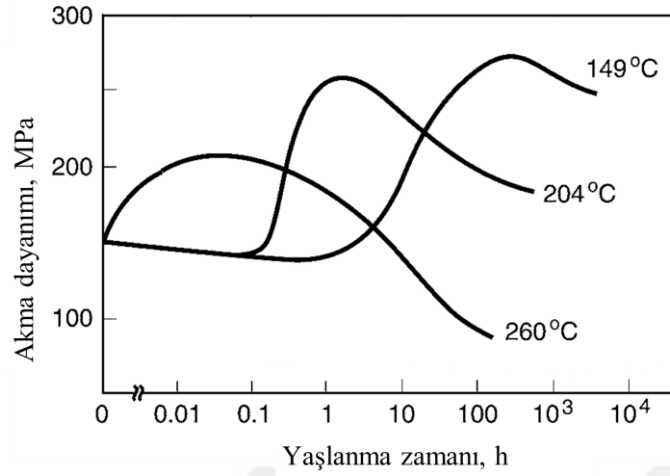
### **Deformasyon hızı**

Deformasyon hızının malzemenin mekanik özelliklerine ve sünekliğine etkisi vardır. Deformasyon hızının artması malzemenin mukavemetine pozitif yönde ancak sünekliğine negatif yönde etki etmektedir. Literatüre bakıldığında farklı sac malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar sonucu deformasyon hızının artırılması ile akma dayanımı ve çekme dayanımlarının genel olarak arttığı fakat uzama miktarlarının azaldığı görülmektedir [37-39]. Deformasyon hızının artırılması, sac metal şekillendirme çalışmalarında geri yaylanma davranışını artırdığı da yapılan çalışmalar sonucu rapor edilmiştir [40]. Yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı metallerin, deformasyon hızına diğer metallerden daha az duyarlı olduğu bilinmektedir [41,42].

### **Sıcaklık**

Sıcaklık, malzemenin mekanik özellikleri ve deformasyon hızları başta olmak üzere direk ve/veya dolaylı olarak birçok açıdan plastik deformasyonu etkileyen faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Sıcaklığın artması, deformasyon hızının plastik şekil vermeye etkisini artırmaktadır. Malzemelerin akma dayanımları sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.9'da 6061 alüminyum alaşımı bir malzemede sıcaklığın zamana bağlı olarak akma dayanımındaki etkisi gösterilmiştir. Verilen grafikte

görüldüğü üzere sıcaklık arttığında maksimum akma mukavemeti düşmektedir [30,43].



Şekil 3.9. 6061 alüminyum alaşım malzemedeki sıcaklık ve yaşlanma süresinin akma dayanımına etkisi [43].

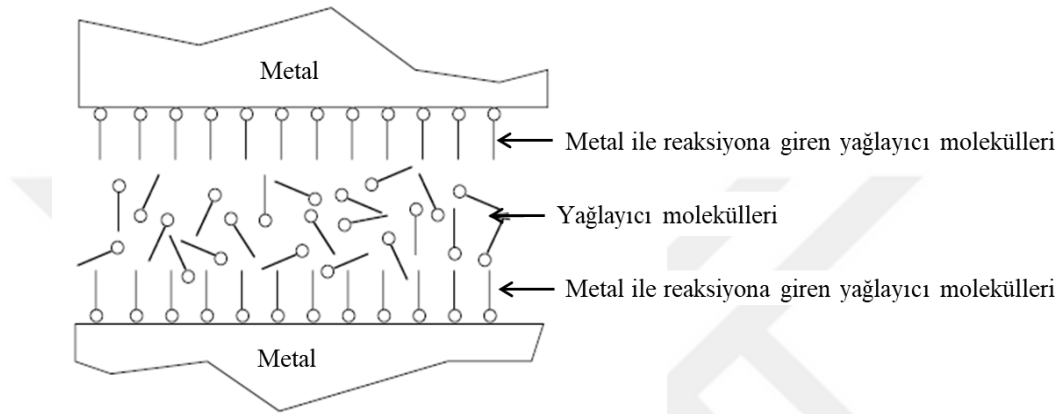
Yüksek sıcaklıklarda metal ve seramikler zamana bağlı olarak değişen ve sürünme olarak adlandırılan plastik deformasyon özellikleri de ortaya koymaktadırlar [34,44].

Malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde gerçekleşen şekil değişimine sıcak şekil değişimi adı verilmektedir. Sıcak şekil değişimi, malzemenin çatlamadan şekil değişebilme kabiliyetini artırmaktadır. Ufak taneli ve yüksek mukavemetli yapı elde edilmesini sağlarlar. Sıcak şekil değişiminin yanında malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleşen ve soğuk şekil değişimi olarak adlandırılan şekil değişimleri de bulunmaktadır. Soğuk şekil değişimi sonunda, malzemenin cinsine göre mukavemeti ve sertliği artmakta fakat sünekliği azalmaktadır. Soğuk şekillendirme işlemlerinde, şekil değişimi için harcanan enerji sıcak şekil değiştirmeye göre daha fazla olmaktadır [28].

### Sürtünme ve yağlama

Mikroskobik ölçekte tüm malzeme yüzeyleri pürüzlüdür. Dolayısı ile malzemeler arasındaki etkileşimlerde sürtünme olması veya sürtünme direnci ile karşılaşılması kaçınılmazdır. Sürtünme katsayısı, malzemenin malzemeye değişkenlik gösteren, çeşitli deneylerle belirlenebilen veya malzemelerin türü ve temas yüzeylerinin

durumuna göre çeşitli tablolarda rahatlıkla bulanabilen ayırt edici bir özelliktir. Sürtünme katsayısının artması deformasyon kabiliyetini azaltmaktadır. Plastik şekillendirme sırasında sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak için yağlama işlemine başvurulmaktadır [35]. Uygun seçilen yağ, malzemelerin temas yüzeylerinde koruyucu bir tabaka gibi davranmaktadır. Şekil 3.10'da yağlayıcı moleküllerinin metal yüzeyi ile reaksiyona girmesi ve koruma tabakası oluşturması gösterilmiştir.

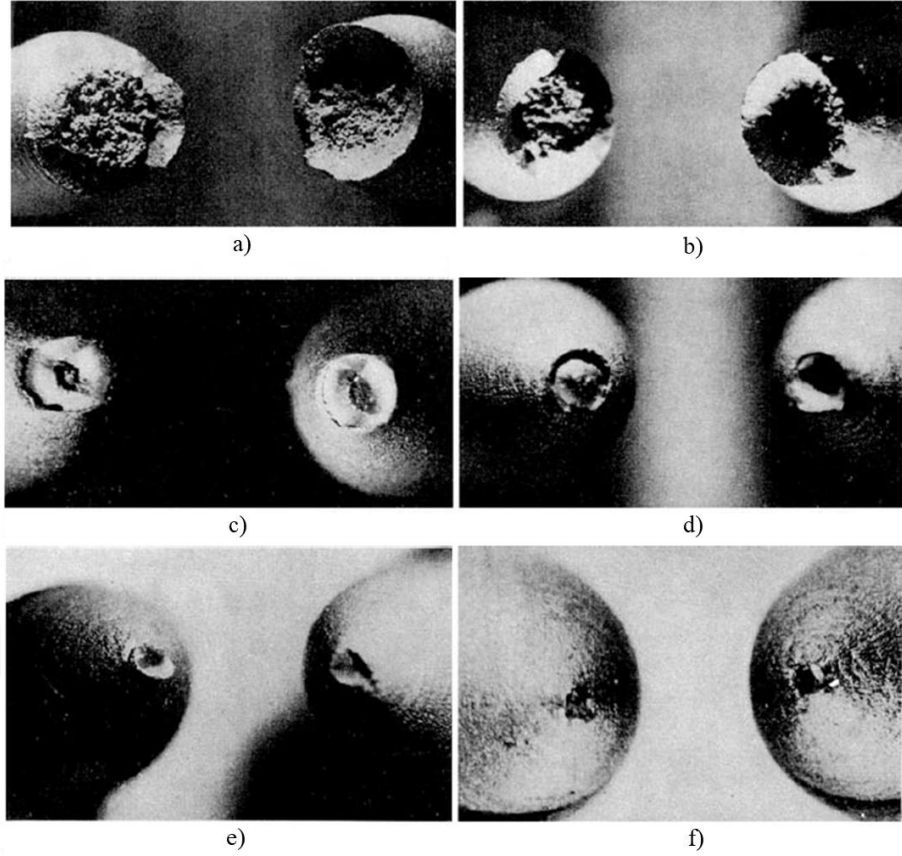


Şekil 3.10. Yağlama işleminde moleküllerin metal yüzeyi ile reaksiyona girmesi [35].

Metal şekillendirme işlemlerinde soğutma görevi için de yağlayıcı kullanılmaktadır. Plastik şekil verme işlemlerinde, viskozite değerleri, korozyondan koruma, temizlenme, alevlenmeme, kalite ve ekonomikliği gibi özelliklerini dikkate alarak uygun yağ seçilmeli ve kullanılmalıdır.

### **Hidrostatik basınç**

Hidrostatik basınç ile malzemenin sünekliğinde artış sağlanmakta ve kopma geciktirilmektedir. Deformasyon sırasında malzemede oluşacak hasarın daha az olmasına yardımcı olmaktadır [35,45,46]. Yumuşak çelik bir malzeme üzerinde yapılan testlerde basıncın artırılması ile kopma alanının Şekil 3.11'de gösterildiği gibi küçüldüğü görülmektedir.



Şekil 3.11. Yumuşak çelik bir malzeme üzerinde basınç artışı ile kopma alanı arasındaki ilişki. a) atmosfer basıncında, b) 235 MPa' da, c) 1 GPa' da, d) 1.3 GPa' da, e) 1.85GPa' da, f) 2.67 GPa' a [46].

Hidrostatik basıncın yukarıda bahsedilen etkilerinden yola çıkarak, sınırlı süneklik kabiliyetine sahip malzemelerin yüksek hidrostatik basınç altında şekillendirilebileceği rahatlıkla söylenebilmektedir.

### **Kalıntı gerilmeleri**

Dışarıdan herhangi bir kuvvet veya gerilme etkisi olmadığında malzemede bulunan mevcut gerilmeler kalıntı gerilmeleri olarak adlandırılmaktadır. Kalıntı gerilmelerinin ulaşabileceği maksimum değer malzemenin akma gerilmesi kadardır [47-52]. Metal malzemelerde, mekanik ve termal birçok işlem yöntemleri ve neredeyse tüm plastik şekil verme yöntemlerinden sonra kalıntı gerilmeleri oluşabilmektedir [47,48]. Kalıntı gerilmelerinin ölçümlerinde genellikle gerinim ölçer kullanılmaktadır. Ölçüm teknikleri olarak ise, delik delme ve talaş kaldırma

gibi bazı tahribatlı muayene metotları ile X-ışınımı kırınımı, nötron ışınımı kırınımı, Manyetik Barkhausen, ultrasonik yöntemler ve Raman Tayf ölçüm yöntemi gibi tahribatsız muayene metotları kullanılmaktadır. Kalıntı gerilmeler ısıtma işlemi veya plastik deformasyonla azaltılabilmekte veya giderilebilmektedir [47,53-58].

### **Geometrik faktörler**

Plastik deformasyon işlemlerinde, yapılan malzemenin işlem öncesi ve işlem sonrası şekli, kalıbın şekli veya baskı plakalarının şekli gibi geometrik faktörler plastik şekillenme davranışlarını etkilemektedir. Farklı şekillerin elde edilmesinde farklı kuvvetler ve gerilmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Yine farklı geometrilerin farklı geri yayılma davranışları olmaktadır.

Yukarıda alt başlıklar halinde açıklanan plastik deformasyona etki eden faktörlerin neler ve etkilerin nasıl olduğunun bilinmesi ve malzeme seçimi, işlem tipinin belirlenmesi, işlemlerin uygulanması gibi birçok aşamada bu faktörleri dikkate alınması gerekmektedir. Başka bir ifade ile başarılı sac şekillendirme işlemleri için, olumlu ve olumsuz etkilerin bilinmesi onların faydalı olarak kullanılmasına imkân sağlamaktadır.

### **3.2. PLASTİK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ**

Plastik şekil verme, kütleli şekil verme ve sac şekillendirme yöntemleri olmak üzere iki ayrı grupta ele alınmaktadır. Plastik şekil verme yöntemleri ve alt grupları Çizelge 3.2' de verilmiştir.



Çizelge 3.2. Plastik şekil verme yöntemleri.

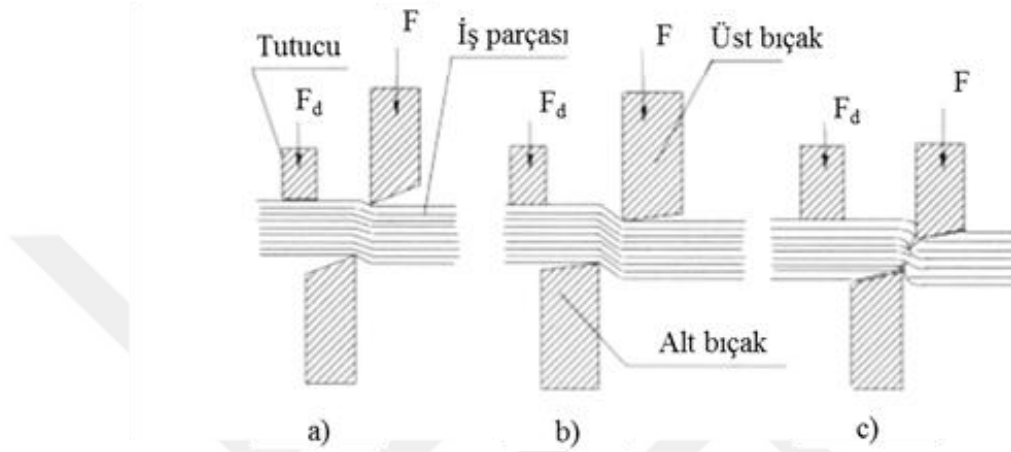


Plastik şekil verme süreçlerinden haddeleme yönteminin gelişmesi ve haddeleme ile sac malzeme üretiminin yapılması sac malzeme üretimini ve kullanımını artırmıştır. Alüminyum saclar, endüstride çelik saclardan sonra en çok kullanılan sac malzemelerdir. Hafif oluşu, yüksek korozyon direncine ve üstün mekanik özelliklere sahip olması bu sacların kullanım alanının çok geniş olmasını sağlamaktadır. Sac işleme yöntemleri genellikle soğuk şekil verme olarak gerçekleştirilir. Literatürde sac işleme yöntemlerinin kesme, bükme, derin çekme ve diğer yöntemler olarak gruplandırıldığı görülmektedir. Plastik şekil verme yöntemlerinden kütleli şekillendirme yöntemleri de endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu çalışma konusunun dışında kaldığı için bu yazıda açıklanmamıştır.

### 3.2.1. Kesme Yöntemi

Kesme, mekanik, pinomatik veya hidrolik güçle çalışan makinelerde kesicilerle yapılan metali iki veya daha fazla parçaya ayırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Kesme işlemiyle plaka ve sac malzemeler ara mamul veya nihai ürün haline getirilmektedirler. Kesme işlemi, genellikle Şekil 3.12'de gösterildiği gibi sırasıyla şu üç aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşama, kesme kuvvetiyle ( $F$ ) iş parçası üzerinde oluşan gerilmenin ( $\tau$ ) iş parçası malzemesinin akma gerilmesinden ( $\tau_e$ ) düşük olduğu ( $\tau < \tau_e$ ) ve elastik deformasyonun olduğu aşamadır (Şekil 3.12-a). İkinci aşama, iş parçası üzerinde oluşan kesme gerilmesinin ( $\tau$ ) malzemenin akma

gerilmesinden ( $\tau_e$ ) büyük, ancak maksimum çekme dayanımından ( $\tau_m$ ) küçük olduğu ( $\tau_e < \tau < \tau_m$ ) aşamadır (Şekil 3.12-b). Bu aşamada iş parçasında plastik deformasyon oluşmaktadır. Üçüncü aşama ise, iş parçası üzerindeki kayma gerilmesinin ( $\tau$ ) malzemenin emniyetli kayma gerilmesine ( $\tau_m$ ) eşit ( $\tau = \tau_m$ ) olduğu ve kırılmaların başlayarak kopma veya ayrılmaların gerçekleştiği aşamadır (Şekil 3.12-c) [32].

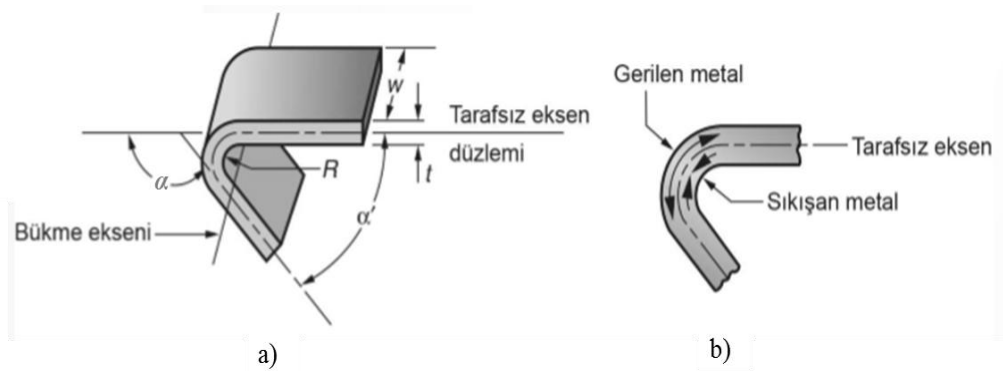


Şekil 3.12. Kesme işleminin şematik gösterimi. a) elastik deformasyon oluşma aşaması, b) plastik deformasyon oluşma aşaması, c) kopmanın oluşması aşaması [32].

Kesme işlemi sırasında üst bıçağın malzemeye girme miktarı malzemenin süneklik ve kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Malzeme kalın ve kırılgen olduğunda üst bıçak girme miktarı az olmakta veya başka deyişle malzemenin kopması daha erken gerçekleşmektedir. Sünek malzemelerde üst bıçağın malzemeye girme miktarı daha fazla olmaktadır [32]. Kesme işlemlerinde ihtiyaç duyulan kesme kuvvetinin bilinmesi önemlidir ve kesici tiplerine göre hesaplanabilmektedir. Endüstride düz paralel kesiciler, düz eğimli kesiciler ve döner kesiciler olmak üzere üç tip kesici kullanılmaktadır. Kesiciler, kullanıldıkça aşınırlar ve zamanla kesme işlemini yapamaz hale gelirler. Yüksek mukavemetli malzemelerde bu aşınma daha çabuk gerçekleşir [35].

### 3.2.2. Bükme Yöntemi

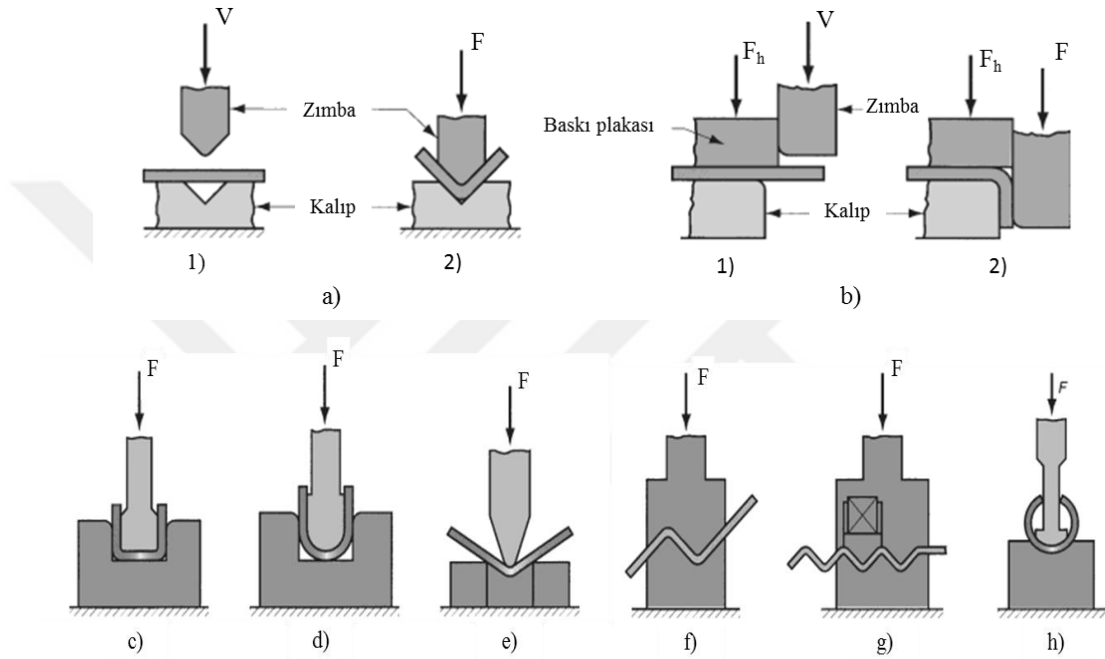
Bükme, sac metal ürünlerin büyük çoğunluğunda sıklıkla kullanılan sac şekillendirme yöntemidir. Malzemenin sıcak veya soğuk olarak ve talaş kaldırmadan belli bir eksen etrafında eğilerek veya döndürülerek şekillendirilmesine bükme işlemi denilmektedir [59]. Diğer bir ifade ile bükme işlemi, sac malzemelerin belli bir eksen etrafında eğilerek veya döndürülerek plastik deformasyona uğratılması yoluyla kalıcı şekil değişime uğratıldığı sac şekillendirme yöntemi olarak tanımlanmaktadır [60]. Şekil 3.13-a'da düz bir eksen etrafında bükülen bir metalin büküm parametreleri gösterilmiştir. Bükülecek parçanın tasarımını yaparken ve bükme kuvvetini belirlerken malzemenin mekanik özelliklerinin, parçanın genişliğinin ( $w$ ), kalınlığının ( $t$ ), bükme açısının ( $\alpha$  ve  $\alpha'$ ) ve büküm radiusunun ( $R$ ) uygun seçilmesi gerekmektedir. En küçük bükme radiusunun ( $R$ ), malzemenin mekanik özellikleri ve kalınlığına göre belirlenmesi önemlidir. Çünkü olması gerekenden daha küçük bükme yarıçapı seçildiğinde gerginliğin artması ve malzemede istenilmeyen yırtılmanın olmasına sebep olabilmektedir. Bükme işlemi sırasında tarafsız düzlemin iç kısmındaki metal sıkışmaktayken, tarafsız düzlemin dış kısmındaki metal uzamaktadır. Bu gerilme durumu Şekil 3.13-b'de gösterilmiştir. Uygun bir bükme işlemi sonrasında sac metal kalınlığında çok az veya hiç değişiklik oluşmayacağı açıklanmaktadır [61].



Şekil 3.13. Büküm işlemi, a) büküm işlemi parametreleri, b) büküm işlemi sırasında uzama ve sıkıştırma gerilmesinin oluşumu [61].

Bükme işlemi, özellikle otomotiv ve uçak sanayinde olmak üzere sac metal parçaların olduğu birçok alanda kullanılmaktadır. Bükme işlemleri genellikle preste

ve abkant tarzı bükme tezgâhlarda parçanın şekline ve geometrisine göre zımba ve kalıplar kullanılarak yapılmaktadır. V bükme, kenar bükme, kıvrırma ve çeşitli geometrideki kalıplarla bükme şeklinde birçok büküm tipleri bulunmaktadır. En çok kullanılan büküm tiplerine ait resimler Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Bunların yanında ezilme olmadan yapılan profil ve boru bükme işlemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

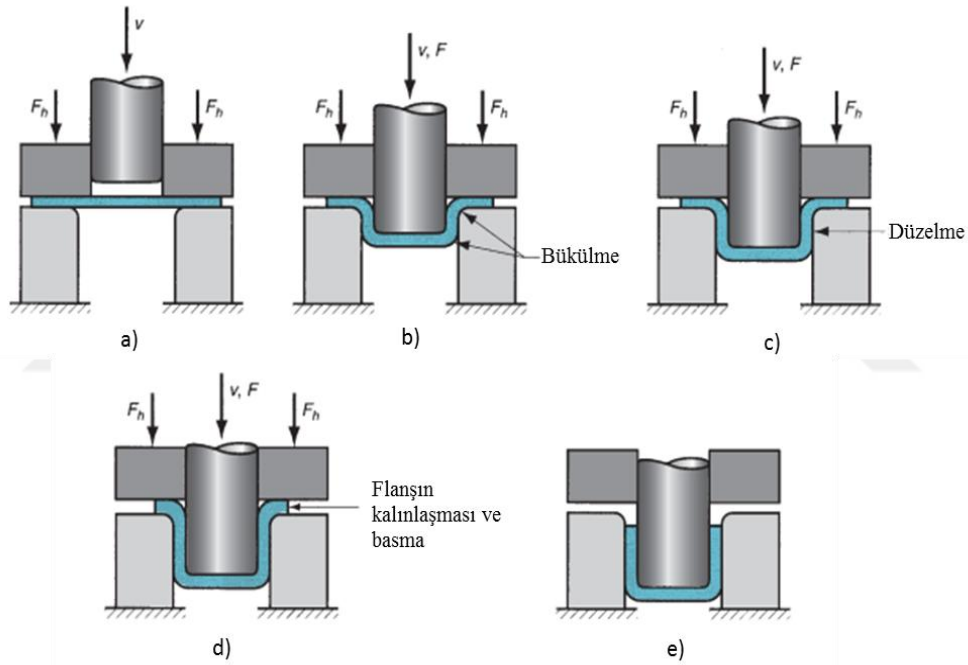


Şekil 3.14. Bükme işlemi çeşitleri. a) V büküm ve işlem basamağı, b) Kenar büküm ve işlem basamağı, c) Kanal büküm, d) U büküm, e) Havalı bükme kalıbında büküm, f) ofset büküm, g) Dalgalı veya oluklu büküm, h) Tüp şeklinde büküm [61].

### 3.2.3. Derin Çekme Yöntemi

Derin çekme, sac malzemelerden silindir, dikdörtgen, kare veya karmaşık geometrili içi boş kap şeklinde parçalar elde etmek için kullanılan sac şekillendirme yöntemi olarak bilinmektedir. İçecek kutuları, mermi kovanları ve otomotiv gövde sac parçalarının üretiminde bu yöntem kullanılmaktadır. Derin çekme, açınım kesimi yapılmış veya uygun çapta pul şeklinde hazırlanmış sac malzemenin kalıp boşluğuna itilerek yani malzemeyi çekerek yapılan şekillendirme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Derin çekme işlemi genellikle şu beş aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşamada, sac malzeme kesilir ve kalıbın üzerine yerleştirilir. Yerleştirilen malzeme üzerine, katlanma olmaması ve çekme gerginliğinin oluşması için pot çemberi veya diğer adıyla baskı çemberi ile bastırılır (Şekil 3.15-a). İkinci aşamada, ıstampa (zımba) ile sac malzeme uygun hızla kalıp boşluğuna doğru bastırılarak bükülür (Şekil 3.15-b). Üçüncü aşamada, zımbanın etkisi ile bükülen sac malzemesi düzleşir (Şekil 3.15-c). Dördüncü aşamada zımba daha ileri bastırılır ve baskı çemberinin altında iş parçası kalınlaşmaya çalışır. Beşinci ve son aşamada zımba belirlenen son noktaya kadar bastırılır ve çekme işlemi tamamlanır (Şekil 3.15-d) [61].



Şekil 3.15. Derin çekme işlem (deformasyon) aşamaları. a) Tutucu ve zımbanın iş parçasına teması, b) büküm, c) düzeltme, d) zımbanın basması ve baskı çemberi altında işin kalınlaşmaya çalışması e) nihai şeklin oluşması. V= zımba hızı, F= zımba kuvveti, F<sub>h</sub>= baskı çemberi [61].

Derin çekme işlemi uygulamalarında pot çemberinin malzemeye uygulayacağı kuvvet önemlidir. Kullanılan pot çemberinin kuvveti çekilen malzemenin cinsine ve mekanik özelliklerine göre belirlenmektedir. Bu kuvvetin yetersiz olduğu durumda malzemede katlanmalar oluşabilmekte ve gereğinden fazla olduğunda malzemede yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Çeşitli malzemeler için belirlenmiş olan pot çemberi basınç değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir. Bazı uygulamalarda pot çemberi

kullanılmadan ve katlanmalar ve yırtılmamalar oluşmadan yapılan derin çekme işlemlerinin yapıldığı da görülmektedir.

Çizelge 3.3. Bazı malzemeler için pot çemberi basınç değerleri.

<b>Malzeme</b>	<b>P (MPa)</b>
Alüminyum	0,98 – 1,18
Çinko	1,18 – 1,47
Paslanmaz Çelik	1,96
Prinç	1,96
Çelik	2,45
Kalaylı Sac	2,94

Derin çekme işlemlerinde, pot çemberinin kuvvetinin yanında, zımba ile kalıp duvarları arasında bırakılacak boşluk miktarı, zımba ve kalıp kenarlarına kırılacak maksimum radius değerleri, işlem sırasında zımbanın uygulaması gerektiği maksimum kuvvet ve çekilecek pul şeklindeki taslak sacın çap değerleri gibi işlem parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler çekme işleminin uygun yapılabilmesi için önemli olup geçmişte yapılan literatür çalışmaları sonucunda ortaya koyulan hesaplamalar ve denklemlerle belirlenebilmektedir.

#### 3.2.4. Diğer yöntemler

Sac şekillendirme yöntemleri olarak kesme, bükme ve derin çekme yöntemlerinin dışında uygulanan başka yöntemler de bulunmaktadır. Genel olarak kullanılan şekillendirme yöntemlerinden bazıları aşağıdaki gibidir [7].

- Gererek şekillendirme (Stretch forming)
- Sıvama (Spinning)
- Sıvıyla şekillendirme (Hydro forming)
- Yüksek enerjili şekillendirme (High Eenergy Rate Forming-HERF)
  - Patlama ile şekillendirme (Explosive forming)
  - Elektro hidrolik şekillendirme (Electro hydraulic forming)

- Elektro manyetik şekillendirme (Electromagnetic forming)
- Lastikle şekillendirme (Guerin process)
- Süper plastik şekillendirme
- Kabartma
- Konik büküm

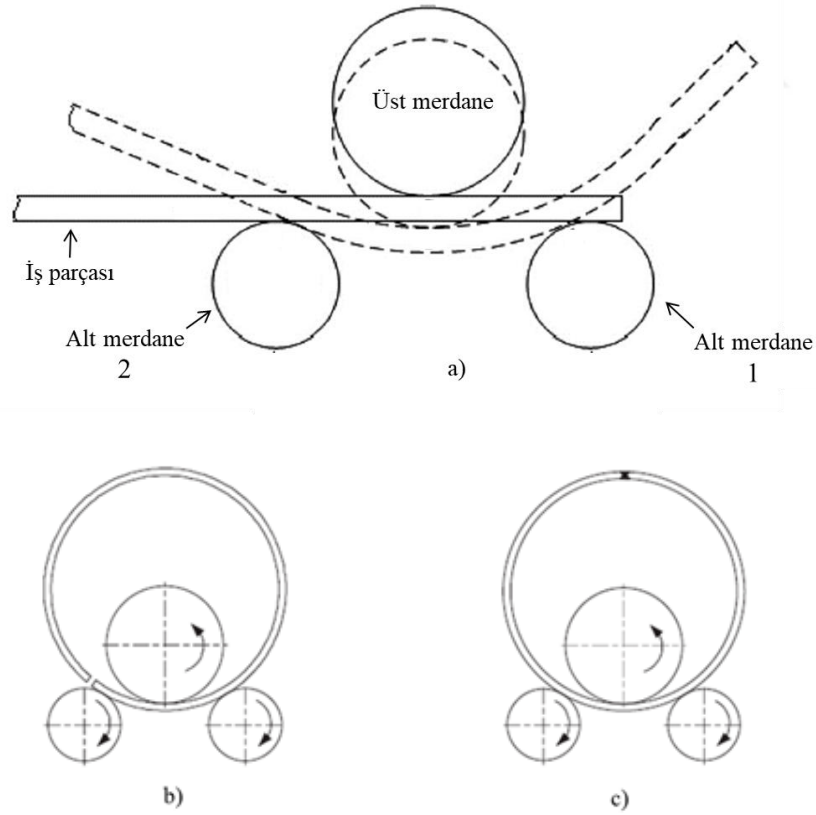
Yukarıda maddeler halinde verilen şekillendirme yöntemleri çalışma kapsamında olmadığı için ayrıntılı bilgi verilmemiştir. Bu tez çalışmasında sac malzemelerin plastik şekillendirilmesinde görülen geri yaylanmanın incelenmesi için son sıradaki konik büküm yöntemi kullanıldığından sadece bu yöntem aşağıda ayrı bir başlık altında detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

### **3.3. KONİK BÜKÜM İŞLEMİ**

Günümüzde birçok endüstriyel uygulamalarda olduğu gibi savunma sanayisinde de aerodinamik ve yapısal gereksinimlerden dolayı konik kesitli parçalara sık sık ihtiyaç duyulmaktadır. Bu konik kesitli parçalar talaşlı imalat, döküm, sıvama ve sac metal şekillendirme gibi yöntemlerle üretilmektedir. Sac metal şekillendirme yöntemleri ile konik bükme işlemleri diğer yöntemlere göre üretim zamanının kısaltılması, fire miktarı ve işlem maliyetinin azaltılması yani imalat sürecinin verimliliği konusunda ciddi avantaj sağlayan yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır [27,62]. Bu yöntemler, bugünün havacılık, enerji, gemi, inşaat endüstrisi ve savunma sanayisi endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [63].

Konik büküm işlemleri, sac metal şekillendirme yöntemlerinde diğer yöntemler başlığı altında yer alan yöntemlerden biridir. Literatür taramaları ve sanayie bakıldığında konik büküm yöntemleri olarak merdaneli büküm tezgâhlarında yapılan büküm işlemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Merdaneli konik büküm olarak da adlandırılan bu yöntem, bir soğuk plastik şekillendirme işlemi olup genellikle bitmiş konik ürünlerin elde edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [64]. Bu işlemler için, günümüz metal şekillendirme endüstrisinde genel olarak üç merdaneli konik bükme ve dört merdaneli konik bükme tezgâhları kullanılmaktadır.

Üç merdaneli konik bükme tezgâhlarında büküm işlemi genel olarak hizalama ve statik büküm, ileri sarım ve geri sarım, yükün kaldırılması ve parçanın sökülmesi olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada sac malzeme üst merdane ile alt merdaneler arasına yerleştirilir, hizalaması yapılır ve üst merdane malzeme kalınlık ölçüsüne kadar alt merdanelere yaklaştırılarak yükleme yapılır. İkinci ve üçüncü aşamalarda alt merdanelere dönme hareketi verilerek malzeme ileri ve geri hareket ettirilmesi sağlanır. Bu işlem büküm tamamlana kadar tekrarlanır. Dördüncü ve son aşamada üst merdane yukarı hareket ettirilerek plaka üzerinden yük kaldırılır ve bükülmüş parça tezgâhtan alınarak işlem tamamlanır. Şekil 3.16'da üç merdaneli bükme makinesinin önden görüşü verilmiştir. Şekilde 3.16-a'da iç merdanenin ve iş parçasının büküm işlemi sırasında ilk aşamadaki konumları devamlı çizgi, ikinci aşamadaki konumları kesik çizgi ile gösterilmiştir. Şekilde 3.16-b'de iş parçasının ileri geri hareketi ile devam edilen üçüncü ve Şekilde 3.16-c'de ise büküm işlemi tamamlanmış dördüncü aşama gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Üç merdaneli bükme makinesinin önden görüşü işlem basamakları.



Sac malzemelerin şekillendirebilirliğini kolaylaştırmak, işleme maliyetini ve malzeme israfını azaltmak ve arzu edilen şeklin elde edilmesini yani kalitesini artırmak için dört merdaneli konik bükme tezgâhları tasarlanmıştır [65-68]. Bu tezgâh, parçaya yük uygulayan alt ve üst merdaneler ile bükme işlemine yardımcı olan sağ ve solda bulunan yan merdanelerden oluşmaktadır. Şekil 3.17’de dört merdaneli hidrolik silindir makinesi ve üzerinde bükümü yapılmış parça gösterilmiştir. Sac metal endüstrisinde, daha hassas bükümlerin elde edilmesi için dört merdanesinin de konik olduğu tezgâhlar da geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasındaki tüm konik büküm işlemleri de bu tarz bir tezgâhta gerçekleştirilmiştir. Dört merdaneli tezgâhlarda işlem basamakları üç merdaneli olan ile benzer olup daha detaylı bilgi bölüm 4.4’ de verilmiştir.



Şekil 3.17. Dört merdaneli konik bükme tezgâhı ve konik bükümü yapılan iş parçasının görünüşü [69].

Merdaneli konik bükme işlemleri, diğer yöntemlere göre verimli olmasının yanında şekillendirme mekanizması açısından karmaşık bir sürece sahiptirler. Bu yöntemde, süreci etkileyebilecek malzeme ölçüleri ve özellikleri, merdanelerin geometrisi ve konfigürasyonu, sürtünme, sıcaklık, vb. birçok işlem parametresi bulunmaktadır. Başarılı bir büküm çalışması için bu parametreler ve etkilerinin bilinmesi dikkate alınması gerekmektedir [70]. Yöntemin bazı dezavantajlı yönleri de bulunmaktadır. Hatta yapılan literatür taramalarına ve sanayide kullanımına bakıldığında hala tam olarak anlaşılmadığı da söylenebilmektedir. Ağırlıkla operatörün tecrübesine ve

becerisine bağı kalınması, ilk üretimlerde şablonlara veya deneme yanılma yoluyla doğru parçanın elde edilebilmesi ciddi dezavantajlı yönleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişen imalat sanayide kullanımı çok yaygın hale gelen bilgisayar destekli üç boyutlu modeller ile işleme (CAM) bu sac şekillendirme yöntemi için henüz kullanılamaması da dezavantaj olarak görülmektedir [71,72]. Merdaneli konik büküm yöntemleri ile ilgili bazı önemli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Hua vd. ile J. Zeng vd. merdaneli büküm işlemlerinde merdaneler ve iş parçası arasındaki kinematik ilişki, geometrik kurulum ve bu parametrelere göre matematiksel modellerin oluşturulması konusunda çalışmalar yapmışlardır [70,72]. Ayrıca J. Zeng vd. malzeme kalınlığı ve merdanelerin konfigürasyonları açısından ihtiyaç duyulan kuvvetler ve momentler hakkında bilgiler sunmuşlardır [70]. Hua ve Lin tarafından dört merdaneli bükme makinelerinde çalışma prensibi ve kesintisiz işlem mekanizmasını araştırmışlar ve merdanelerde eğme kuvveti ve sürüş torkunu hesaplamışlardır [73]. Baines vd., dört merdaneli tezgâhlarda sac malzeme ile merdaneler temasında oluşan iç ve dış eğilme momentleri göz önüne alınarak analitik model oluşturulmuş ve bu momentlerin bükülmeye etkileri hakkında bilgi verilmiştir [74]. Lin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, dört silindirik tezgâhlarda sac malzeme bükme işlemi sırasında farklı koniklik açılarında matematiksel oluşturularak büküm mekaniğini simule etmişlerdir [64]. Hua ve Lin, dört merdaneli sac bükme işleminde sürekli gerilme ve kenar bükme mekaniğine malzeme gerilimi sertliğinin etkisini araştırmışlardır [75]. A. H. Gandhi vd. tarafından konik bükme işlemlerinde eğilme kuvveti ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [27,76,77]. Yang ve Shima ise iş parçasının eğme momenti ve eğriliği arasındaki ilişkiyi geliştirmişlerdir [78]. Osakada vd., merdaneli büküm tezgâhlarında merdanelerin dikey ve yatay hareketlerini kontrol ederek, konik bükülmüş parçaların iki ucunda oluşan düzlemsel bölgelerin uygun eğriliğini elde etmeye çalışmışlardır [79]. Shin ve arkadaşları merdanelerin hareketi ile bükülmüş plakanın istenen eğriliği arasındaki ilişkiyi kurmak için sonlu elemanlar analizine dayanan iki boyutlu model geliştirmişlerdir [80]. Fan ve Meng, kalınlık ölçüsünün genişlik ölçüsüne oranla çok düşük olduğu sac malzemelerin bükümlerini incelemek için iki boyutlu simülasyon modeli oluşturmuşlardır. [81].

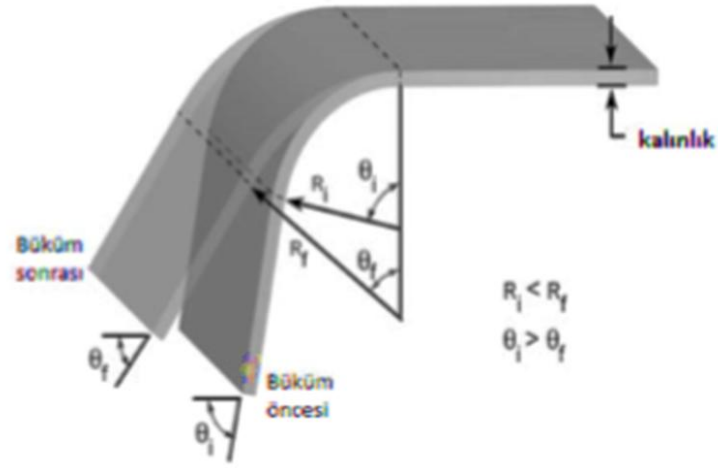
Yukarıda verilmiş olan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, son yıllarda merdaneli bükme işlemleri ve tezgâhları hakkında kapsamlı araştırma ve geliştirme çalışmaları yapıldığı ve yapılmaya devam edileceği görülmektedir.

### 3.4. GERİ YAYLANMA

Sac metal şekillendirme yöntemlerinin talaş kaldırma yöntemlerine göre önemli avantajları olarak işlem süresinin kısa ve malzeme firesinin az olması söylenebilmektedir. Bunun yanında bu yöntemlerin uygulanması sırasında ve sonrasında birçok sıkıntı ile karşı karşıya kalınmaktadır. Uygulamada karşılaşılan başlıca problemler geri yaylanma, yırtılma, kıvrılma, katlanma, burulma, boyunlanma ve kulaklanma olarak sayılabilmektedir. Sac şekillendirme yöntemlerinde genellikle karşılaşılan en önemli problem geri yaylanma olayıdır. Tüm büküm işlemlerinde az da olsa geri yaylanma olayıyla karşılaşmaktadır.

Daha önce de belirtildiği gibi geri yaylanma, elastik şekil değiştirme özelliği gösteren ya da soğuk şekillendirilebilen malzemelerin başlangıçtaki orijinal hale dönme eğilimi ya da kapasitesi olarak tanımlanmaktadır [7]. Diğer bir ifadeyle geri yaylanma, şekillendirme sürecinde uygulanan yükün malzeme üzerinden kaldırıldığında ortaya çıkan şekil uyumsuzluğudur. Bir büküm işlemi sonrası oluşan geri yaylanma Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi geri yaylanma sonrası bükme açısı (büküm sırasında  $\theta_i$  ve geri yaylanma sonrası  $\theta_f$ ) küçülmüş ve bükme yarıçapı (büküm sırasında  $R_i$  ve geri yaylanma sonrası  $R_f$ ) ise büyümüştür [82].

Sac metal şekillendirme yöntemlerinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi geri yaylanma ise bunun önceden bilinmesi ve telafi etmek veya sonraki işlemlerde sapmayı kabul etmek açısından önemlidir. Geri yaylanmayı doğru bir şekilde ölçmek, ilgili parametreler arası ilişkileri belirlemek ve değerlendirmek için günümüze kadar birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ölçme ve değerlendirme konularında, kumpas, CMM (Koordinat Ölçüm Makinesi), optik tarama, projeksiyon ve sonlu elemanlar metodunun kullanımı gibi uygulanabilir ve pratik yöntemler bulunmaktadır.



Şekil 3.18. Büküm sonrası sac malzemenin geri yaylanması [83].

Geri yaylanma kavramını sayısal olarak tanımlamak için, K ve W olarak iki eşitlik ele alınmaktadır. Burada K geri yaylanma faktörü ve W yay uzunluğunu ifade etmektedir. Şekil 3.18'de gösterildiği gibi başlangıç yarıçapı  $R_i$ , son yarıçap  $R_f$ , parça açısı  $\alpha_f$ , kalıp veya bükülme açısı  $\alpha_i$  ve sac malzeme kalınlığı  $t$  geri yaylanma ile ilgili diğer parametrelerdir. İşlem sırasında nötr eksendeki yay uzunluğunun ( $W$ ) iş parçasının bükülme bölgesinde değişmediği varsayılmaktadır. Yay uzunluğu  $W$ ' nin  $R_i$ ,  $R_f$ ,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_i$  arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir [84]:

$$W = a_f \left( R_i + \frac{t}{2} \right) = a_i \left( R_f + \frac{t}{2} \right) \quad (3.1)$$

Geri yaylanma faktörü  $K$ ' nin  $\alpha_f$ ,  $\alpha_i$ ,  $R_i$ ,  $R_f$  ve  $t$  arasındaki ilişki de aşağıdaki gibidir [34]:

$$K = a_i / a_f = \left( R_i + \frac{t}{2} \right) / \left( R_f + \frac{t}{2} \right) \quad (3.2)$$

Sac malzemelerin şekillendirilmesi sonrası meydana gelen geri yaylanmayı etkileyen parametreler üç ana grupta ele alınmaktadır. Bunlar malzeme, geometrik özellikler ve işlem parametreleridir [85]. Geri yaylanma davranışını etkileyen başlıca parametreler aşağıdaki gibidir [86-88,91]:

- Malzemenin kalınlığı.
- Malzemenin kimyasal yapısı.
- Malzemenin mekanik özellikleri (akma dayanımı, elastikiyet modülü, sertliği, Poisson oranı vb.).
- İşlem parametreleri (işlem hızı, uygulanan kuvvetin malzeme üzerinden kalma süresi, sıcaklık vb.).
- Uygulanan kuvvet.
- Kalıp ölçüleri.
- Büküm açısı, bükme yarıçapı.

Geri yaylanma üzerinde malzeme özellikleri büyük bir etkiye sahiptir. Bunlar sertliği, akma dayanımı, çekme mukavemeti, Young modülü ve gerilme sertleştirme katsayısı gibi malzeme özellikleridir. Geri yaylanmayı etkileyen geometrik özellikler, malzeme kalınlığı, bükme açısı, bükme kalıbı, zımba şekli, merdaneli bükümlerde merdane şekli ve konfigürasyonu gibi parametrelerdir. Bükme hızı, şekillendirme oranı ve malzeme haddelene yönüne göre bükme yönü işlem parametreleri de geri yaylanmayı etkilemektedir [85].

Geri yaylanmayı etkileyen faktörlerden malzeme kalınlığı, malzeme mekanik özellikleri ve büküm açısı olmak üzere üç önemli parametre bu tez çalışmasında deneyler yapılarak detaylı incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Bükme sonrası istenilen parça geometrisi etkilendiğinden, geri yaylanmanın en az olması veya telafi edilmesi için çalışmalar yapılmış ve yöntemler geliştirilerek uygulanmıştır. Geri yaylanmaya müdahale etmek mümkün olmakta fakat tamamen ortadan kaldırılması mümkün olmamaktadır [89,90]. Geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla en sık başvurulan yöntemler aşağıdaki gibidir [86,91];

- Büküm açısı, geri yaylanma miktarına göre artırılır.
- Bükme bölgesi geri esnemeyecek şekilde ezilir.
- Parça gerdirilerek bükme işlemi yapılır.
- Malzeme üzerindeki kuvvetin bekleme süresi artırılır.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasında, AA7075 alüminyum alaşımı sac levhalarının soğuk olarak konik şekillendirilmesinde ortaya çıkan geri yaylanma problemi üzerinde işlem parametrelerinin etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında 2 mm, 3 mm ve 4 mm kalınlıklarında AA7075-T6 kalite alüminyum alaşım sac malzemeler ticari olarak temin edilmiştir. Ticari olarak temin edilen AA7075 sac levhalardan numuneler kesilerek spektral analizlerine bakılmış ve kimyasal bileşen tablosunun uygunluğu incelenmiştir.

Mekanik özelliklerinin incelenmesi için sertlik ölçümü yapılmış ve standart çekme testi numuneleri hazırlanarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin metalografik incelemeleri, SEM, EDS verileri alınarak mekanik özellikler ve mikroyapı arasındaki ilişki de belirlenmeye çalışılmıştır.

Farklı malzeme kalınlıklarına ve farklı büküm açlarına göre 3D modeller ve açınım resimleri oluşturulmuştur. Açınım resimlerine göre lazer kesim tezgâhında AA7075 sac levhalar kesilerek büküm numuneleri hazırlanmıştır. Malzeme sertliğinin geri yaylanma üzerindeki etkisini tayin etmek için literatür ve ön deneysel işlemlerden yararlanılarak önceden belirlenen sıcaklık ve bekletme süreleri kullanılarak ısıtım işlemleri yapılmıştır.

Dört merdaneli hidrolik konik bükme tezgâhında konik bükümler yapılmış ve konik bükümü yapılan bu numunelerin geri yaylanma miktarları ölçülmüştür. Çalışmalardan elde edilen bulgular değerlendirilerek işlem parametrelerinin AA7075 malzemenin soğuk şekillendirme yöntemi olan konik büküm işleminde geri yaylanma miktarına etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

#### 4.1. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN MALZEMELER

Deneysel çalışmada, birçok sektörde kullanım alanı bulan, özellikle havacılıkta yaygın olarak kullanılan ve son zamanlarda savunma sanayisinde de kullanımı oldukça artan AA7075 alüminyum alaşım sac malzemeler kullanılmıştır. Alcoa Co'nun ürettiği AA7075 T6 sac malzemeler ticari olarak temin edilmiştir. Bu bağlamda çalışmada kullanılmak üzere 4 adet 2x1000x2000 mm, 2 adet 3x1000x2000 mm ve 2 adet 4x1000x2000 mm ölçülerinde T6 ısıtım işlemi uygulanmış AA7075-T6 kalite sac malzeme satın alınmıştır. Bu malzemenin literatürdeki kimyasal analiz değerleri önceki bölümlerde verilmiştir.

#### 4.2. DENEY MALZEMELERİNE UYGULANAN TEST VE ANALİZLER

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, ticari olarak temin edilen deney numunelerinin doğruluğunu teyit etmek ve malzemeleri tanımak için aşağıda belirtilen bazı testler uygulanmış ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

##### 4.2.1. Kimyasal Bileşim Analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan AA7075 alüminyum alaşımı sac malzemelerin kimyasal bileşimini belirlemek için her kalınlıktaki sac malzemelerden 20x30 mm ölçülerinde numuneler kesilip hazırlanmıştır. Spektrel analizle malzemelerin kimyasal bileşimleri saptanmaya çalışılmıştır. Sonuçların güvenilirliğini arttırmak için ölçümler her numunede en az üç farklı noktadan yapılmıştır. Bu numuneler üzerinden yapılan spektrel analiz sonucunda tespit edilen ortalama kimyasal bileşim sonuçları % ağırlık olarak Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Ti	Zr	Kalan
0,057	0,124	1,52	0,04	2,5	6,44	0,01	0,196	0,04	0,33	Al

Yapılan spektral analiz sonuçları incelendiğinde deney malzemelerinin literatürde belirtilen kimyasal bileşim sınırları içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Hem literatürde belirtilen hem de analizlerde görülen değerlere bakıldığında AA7075 alüminyum alaşımının ağırlıklı olarak Al-Mg-Zn ve Cu alaşım elementlerinden meydana geldiği görülmektedir.

#### 4.2.2. Sertlik Ölçümü

Kimyasal bileşimi spektral analiz ile doğrulanan numunelerin sertlikleri Rockwell sertlik ölçüm yöntemine göre belirlenmiştir. Şekil 4.1’de görseli verilmiş olan Struers Duramin-500 sertlik ölçüm tezgahında, 1/16 inç çapında batıcı bilye uca 100 kg yük uygulanarak sertlik testleri yapılmıştır. Deneysel hataları minimize edebilmek ve güvenilirliği arttırmak için her numunede farklı bölgelerden en az üç ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.1. Struers Duramin-500 sertlik ölçüm tezgâhı.



Yapılan ölçümler sonucu malzemelerin sertlikleri tespit edilmiştir. Ortalama sertlik değerleri çizelge halinde eklenmiş olup sonuçlar değerlendirilmiştir.

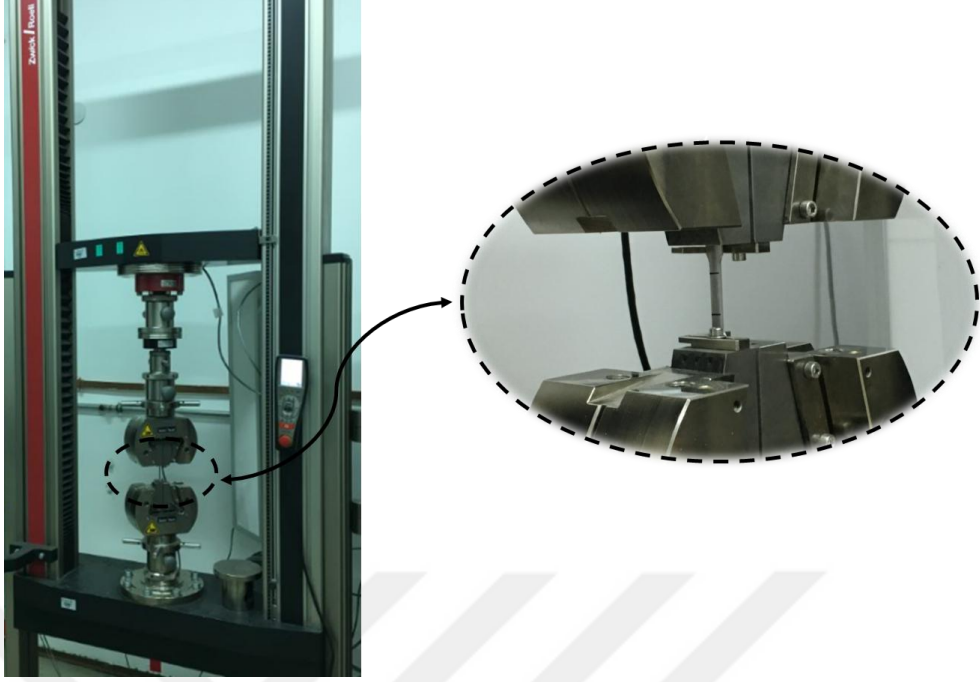
#### 4.2.3. Çekme Testi

Ticari olarak temin edilen farklı kalınlıklardaki tüm deney numuneleri için çekme testleri yapılmıştır. Deney numuneleri TMC 700 V Taksan CNC Freze Tezgâhında ASTM E8/E8M standardına göre hazırlanmıştır. Bu çekme testi deney numunelerinin makro görüntüleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çekme testi deney numunelerinin makro görüntüsü.

Çekme testleri, 21483 A/G/A kodlu Zwick Roell Z100 marka ve model çekme test cihazında 2 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Hataları minimize etmek amacıyla her kalınlık için üçer adet deney numunesi test edilmiştir. Zwick Roell Z100 çekme tezgâhı ve tezgâh çenesine bağlanmış çekme testi numunesinin görüntüsü Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Zwick Roell Z100 çekme tezgâhı ve tezgâh çenesine bağlanmış numune.

Yapılan çekme testlerine ait sonuçlar ve grafikler eklenmiş ve literatürdeki mekanik özelliklere göre uygunluğu değerlendirilmiştir.

#### 4.2.4. Metalografi Numunelerinin Hazırlanması ve İncelenmesi

Ticari olarak satın alınan her kalınlık grubu için numune malzemeler kesilmiştir. Numuneleri mikroyapı incelemesine hazırlamak için, öncelikle klasik metalografi yöntemi ile yüzeyleri zımparalanmış ve sonrasında parlatma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra hazırlanan bu numuneler 95 ml saf su içine 1,5 ml HNO<sub>3</sub>, 1,5 ml HCL, 1ml HF asitleri kullanılarak oluşan çözelti (Keller) ile 2 dakika süre ile dağlanarak incelemeye hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan numunelerin mikroyapılarını tespit etmek için Şekil 4.4'de görüntüsü verilmiş Zeiss AxioCam MRc 5 mikroskop kullanılmıştır. Farklı büyütme olarak incelemeler yapılmış ve farklı büyütmelerde görüntüler alınmıştır.



Şekil 4.4. Zeiss AxioCam MRC 5 mikroskop.

İncelemeler her kalınlık grubu malzemeleri için yapılmıştır. T6 olarak temin edilen malzemelerin ve mevcut ısıl işlemlerin oluşturduğu mikroyapılar belirlenmeye çalışılmıştır.

### **4.3. KONİK BÜKME İŞLEMLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA**

Deney çalışmalarında, işlem parametrelerinin geri yaylanma üzerine etkisini incelemek için farklı şekil ve boyutlarda deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlama aşamasında önce Unigraphics bilgisayar programı kullanılarak 3D model ve açınım resimleri çizilmiştir.

Açınım resimleri oluşturulan tüm deney numuneleri Trumpf Trumatic L3030 TLF 4000 Lazer kesim tezgâhında kesilerek deney çalışmalarına hazır hale getirilmiştir. Kesim işlemi için Şekil 4.5'te resmi verilmiş olan Lazer Kesim tezgâhı kullanılmıştır.



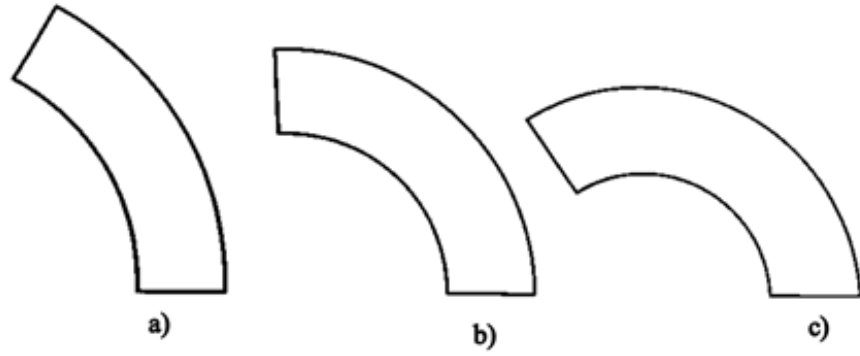
Şekil 4.5. Trumpf Trumatic L 3030 TLF 4000 Lazer kesim tezgâhı.

Tüm deney numuneleri tasarlanırken alt çap  $\text{Ø}250$  mm ve yükseklik 250 mm olarak sabit tutulmuş ve diğer ölçüler ilgili deney çalışmalarına göre uygun şekilde seçilmiş ve aşağıda verilen alt başlıklarda detaylı olarak belirtilmiştir.

Yapılan araştırmalarda, sac malzemelerinin haddeleme yönlerinin büküm çalışmaları için önemli olduğu görülmüştür. Haddeleme yönüne dik yapılan büküm çalışmalarında şekillendirebilirliğin daha iyi ve geri yaylanma davranışın daha az olduğu bildirilmiştir [92]. Tüm kesim işlemleri haddeleme yönüne dikkat edilerek yapılmıştır. Bu şekilde haddeleme yönünün, tüm büküm deney çalışmalarında sabit parametre olması sağlanmıştır.

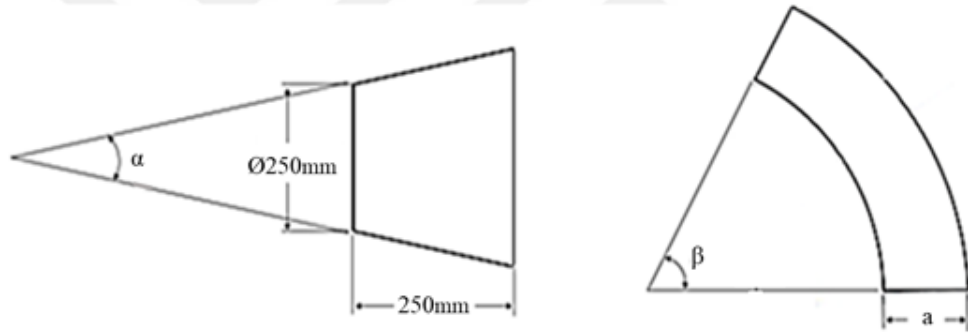
#### **4.3.1. Koniklik Açısının Geri Yaylanma Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi İçin Hazırlanan Numuneler**

Koniklik açısının geri yaylanmaya etkisinin belirlenmesi için numuneler hazırlanmıştır. Bu kapsamda önce koniklik açıları  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  ve  $20^\circ$  olan deney numuneleri için 3D modelleri oluşturulmuş ve açınım resimleri çizilmiştir. Bu deney çalışmasında malzeme kalınlığı 2 mm olarak sabit tutulmuş olup AA7075 malzeme ticari olarak temin edildiği T6 şekliyle kullanılmıştır. Deney numunelerinin açınım resmi Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Farklı büküm açısında kesilmiş deney numunelerinin açınım resimleri. a)  $\alpha=10^\circ$  b)  $\alpha=15^\circ$  ve c)  $\alpha=20^\circ$ .

Alt çap  $\varnothing 250$  mm ve yükseklik 250 mm olarak sabit tutularak hazırlanan açınım ölçülerinin gösterimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Deney numunelerine ait açınım ölçülerinin gösterimi.

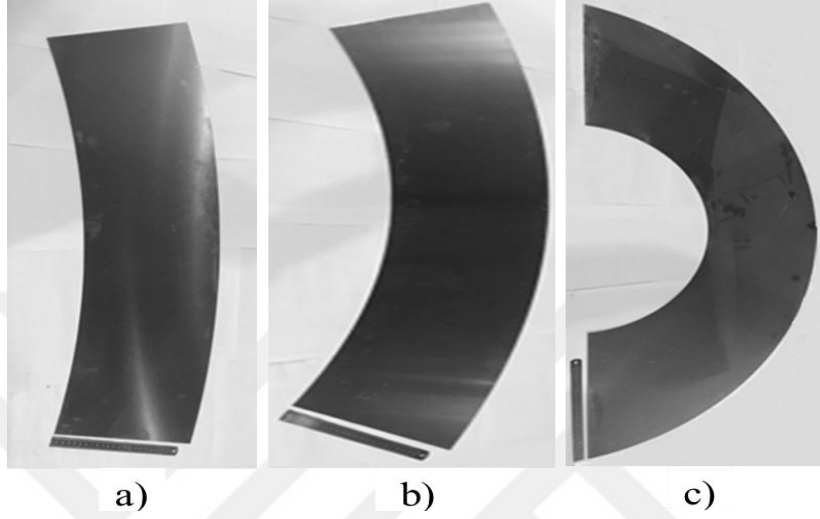
Ayrıca  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  ve  $20^\circ$  olarak farklı koniklik açılarında tasarlanan konilerin açınımlarına ait ölçü değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney numunelerinin açınım ölçüleri.

	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=15^\circ$	$\alpha=20^\circ$
a	253,86 mm	258,82 mm	266,11 mm
$\beta$	$62,51^\circ$	$93,17^\circ$	$123,13^\circ$

Yukarıda ölçüleri ve açınımları verilmiş olan numuneler lazer kesim tezgâhında kesilerek hazırlanmıştır. Büküm işlemine hazır hale getirilmiş yani kesilmiş

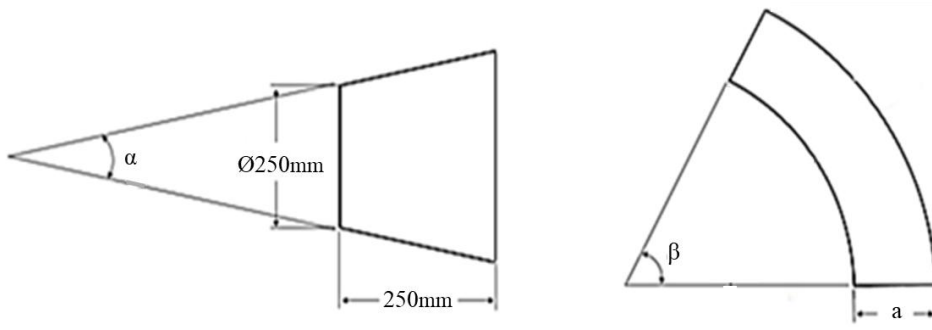
numunelere ait makro görüntüler Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Böylece deney numuneleri dört merdaneli konik büküm tezgâhında büküm işlemine hazır hale getirilmiştir. Deneysel hataları minimize edebilmek ve güvenilirliği arttırmak amacıyla her bükme açısı için en az üç adet deney numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 4.8. Farklı koniklik açısında kesilmiş deney numuneleri. a)  $\alpha=10^\circ$  b)  $\alpha=15^\circ$  ve c)  $\alpha=20^\circ$ .

#### **4.3.2. Sac Kalınlığının Geri Yaylanma Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi İçin Hazırlanan Numuneler**

Sac kalınlığının geri yaylanmaya etkisini belirlemek için 2 mm, 3 mm ve 4 mm kalınlıklarında üç farklı deney numunesi için 3D modeller ve açınım resimleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada koniklik açısı tüm numunelerde  $10^\circ$  olarak sabit tutulmuş ve AA7075 malzeme ticari olarak temin edildiği T6 şekliyle kullanılmıştır. Alt çap  $\varnothing 250$  mm ve yükseklik 250 mm olarak sabit tutulan farklı kalınlıklardaki deney numunelerinin açınım ölçüleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Farklı kalınlıklardaki deney numunelerinin açınım ölçüleri gösterimi.

Malzeme kalınlıkları 2, 3 ve 4 mm olarak tasarlanan konilerin açınımlarına ait ölçüler eşit olup hepsi için ortak değerler Çizelge 4.3' te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Farklı kalınlıktaki deney numunelerine ait açınım ölçüleri.

t=2,3 ve 4 (mm)	
a	253,86 mm
$\beta$	62,51°
$\alpha$	10°

Yukarıda ölçüleri ve açınımları verilmiş olan numuneler lazer kesim tezgâhında kesilerek dört merdaneli konik büküm tezgâhında soğuk bükme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Lazer kesim tezgahında kesilmiş farklı kalınlıktaki numuneler Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Deneysel hataları minimize edebilmek ve güvenilirliği arttırmak için her kalınlıktaki malzemeden en az üç adet deney numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 4.10. Lazer kesim tezgâhında kesilmiş farklı kalınlıktaki deney numuneleri.

### **4.3.3. Malzeme Sertliğinin Geri Yaylanma Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi İçin Hazırlanan Numuneler**

Bu çalışmada, deney numunelerinin açınım resmi ve ölçü değerleri sac kalınlığının geri yaylanma etkisini belirlemek için yapılan çalışmalar ile aynı tutulmuştur. Aynı şekilde koniklik açısı tüm numunelerde  $10^\circ$  olarak sabit tutulmuştur. Tüm malzeme sertliğinin etkileri çalışmaları için 2 mm kalınlığında AA7075-T6 sac malzemeler kullanılmıştır. Deney numunelerinin açınım verileri ve açınım resmi yukarıda verildiği için bu başlık altında tekrar verilmemiştir. Malzeme sertliğinin elde edilebilmesi için aşağıda açıklanan ısıl işlem çalışmaları yapılmıştır.

#### **4.3.3.1. Isıl İşlem**

Isıl işlem çalışmaları için tüm numuneler lazer kesim tezgâhında kesilerek hazırlanmıştır. Kesimi yapılmış numunelere ait makro görüntü Şekil 4.11'de verilmiştir.





Şekil 4.11. Isıl işlem çalışmaları için kesilmiş deney numuneleri.

Sertliğin geri yaylanmaya etkisini belirleyebilmek için üç farklı sertlikte malzeme kullanılmıştır. Birinci sertlik değeri için, AA7075 malzeme ticari olarak temin edildiği T6 şekliyle mevcut sertliği tespit edilerek bu değerler referans alınmıştır. Diğer iki sertlik değeri için mevcut malzemeye iki farklı ısıl işlem çalışması yapılmıştır. Bu ısıl işlemler TUBİTAK SAGE' nin bünyesinde bulunan ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Açınımı kesilmiş olan malzemeler Şekil 4.12'de gösterildiği gibi fırın içerisine aralarına seramik malzemeler koyularak üst üste yerleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Isıl işlem fırınına parçaların yerleştirilmiş görüntüsü.

İkinci farklı sertlik değerindeki deney numunelerini elde etmek için uygulanan ısıtma işlemde malzeme ısıtma işlem fırınında 180°C de 24 saat bekletilmiş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bu ısıtma işlem bundan sonraki kısımlarda Y1 ısıtma işlemi olarak anılacaktır. Üçüncü farklı sertlikteki deney numunelerini elde etmek için ise malzeme 200 °C’de 24 saat bekletilmiş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bu ısıtma işlem de bundan sonraki kısımlarda Y2 ısıtma işlemi olarak anılacaktır. Böylece deney numuneleri aşırı yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Her iki ısıtma işlem çalışmasındaki fırın sıcaklık değerleri Şekil 4.13’de gösterildiği gibi ayarlanmış ve dijital ekrandan takip edilmiştir.



Şekil 4.13. Isıtma işlem sırasında fırın sıcaklık değerleri. a) Y1 için 180°C ve b) Y2 için 200°C.

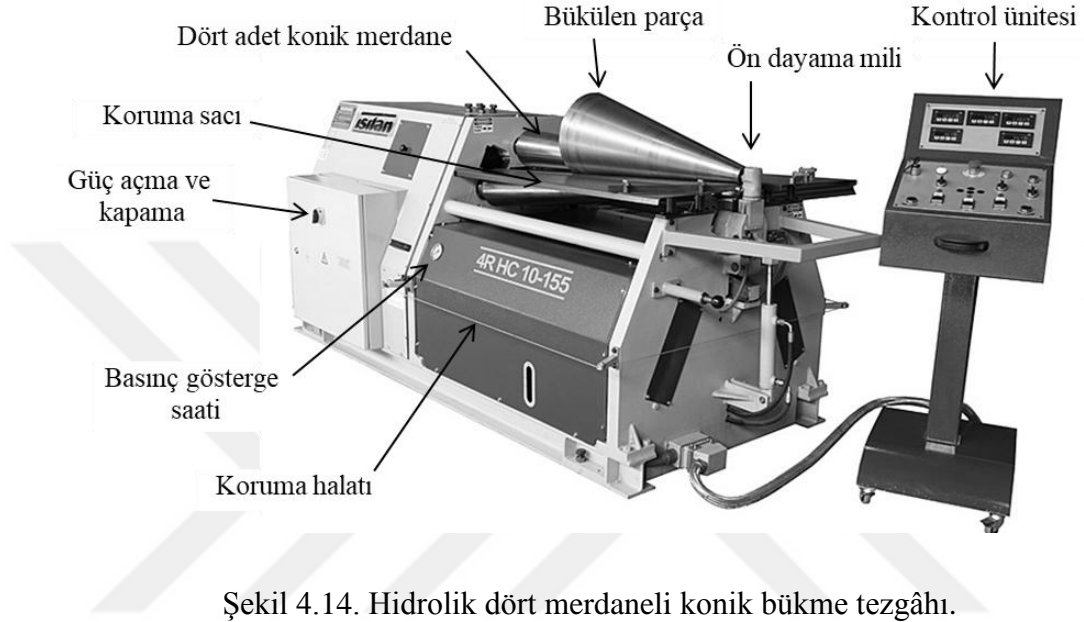
Malzeme sertliğinin geri yaylanmaya etkisini belirlemek için yapılan ısıtma işlemler sonrasında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirilip ortalama değerleri eklenmiştir. Sertlik ölçümünde olduğu gibi ısıtma işlem çalışması sonrası farklı sertlikte elde edilen numuneler için çekme testi çalışmaları da tekrarlanmıştır. Yine bu testlere ait sonuçlar da değerlendirilip ortalama değerleri verilmiştir.

Ticari olarak alındığı T6 sertlik değeri ve yapılan bu ısıtma işlem çalışmaları sonrası iki farklı sertlik değerlerine sahip numuneler hazırlanmış olmuştur. Her sertlik çalışması için en az üçer adet numune hazırlanmıştır.

#### **4.4. KONİK BÜKME TEZGÂHI VE KONİK BÜKME İŞLEMİ**

Yapılan deney çalışmalarının temelini soğuk olarak konik bükme işleminde meydana gelen geri yaylanma oluşturmaktadır. Bu amaçla farklı özellik ve parametrelerdeki

soğuk konik bükme işlemleri, ISITAN 4R HC 10-155 marka ve model dört merdaneli hidrolik konik bükme makinesi kullanılarak yapılmıştır. Deneyde kullanılan dört merdaneli hidrolik konik bükme tezgâhı Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Yapılan tüm konik büküm işlemleri soğuk şekillendirme olarak bu tezgâhta gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.14. Hidrolik dört merdaneli konik bükme tezgâhı.

Ülkemizde geliştirilmiş ve yerli olarak üretilmiş olan bu tezgâh; alüminyum veya paslanmaz sac malzemelerin konik kıvrılması için çok uygun olması ve dijital göstergeler ile merdanelerin pozisyonlarının ve hareketlerinin ayarlanabilir olması gibi üstün teknik özelliklere sahiptir. Ayrıca tezgâhın merdanelerinin konik olması konik bükme işleminde düz merdanelere göre büküm kalitesi ve büküm hızı açısından artı avantajlar sağlamaktadır [93,94]. Kullanılan hidrolik dört merdaneli bükme tezgâhına ait teknik bilgiler aşağıdaki Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. 4R HC 10-155 dört merdaneli konik bükme tezgâhı teknik verileri.

MODEL	Kıvrma uzunluğu	Kapasite	Merdane Çapları		Motor Gücü	Çalışma Hızı	Ebatlar (UxGxY)	Ağırlık
	mm	mm	En büyük	En küçük	kw	m/dk.	mm	kg
4R HC 10-155	1050	3	155	40	2.2+1.5	5	3200 x 1150 x 1100	2000

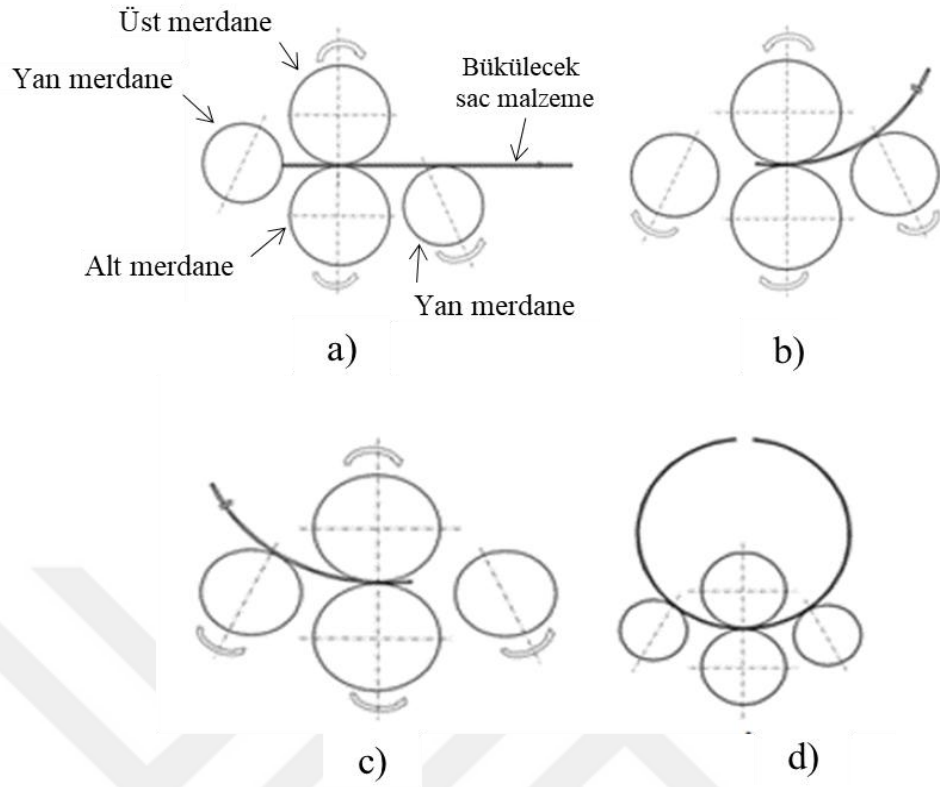
Hidrolik dört merdaneli bükme tezgâhında üst merdane sabit, alt merdane aşağı yukarı şeklinde hareketlidir. Alt merdanelerin yukarı hareketi ile üst merdane ile araya koyulan malzemenin sıkılması veya yük uygulanması ve aşağı hareket ettirilmesi ile malzeme üzerinden yükün kaldırılması sağlanmaktadır. Uygulan yükün basınç (bar) olarak değeri Şekil 4.14’de gösterilen basınç göstergesi saatinden görülmektedir. Yan merdaneler ayrı ayrı aşağı ve yukarı ve koniklik açısına göre açılı hareketlidirler. Büküm işlemi sırasında parçanın ileri geri hareketinin sağlanması için tüm merdaneler kendi eksenleri etrafında dönmektedir. Tezgâhta merdanelerin hareketleri ve konum değişimleri hidrolik sistemle sağlanmaktadır. Bu hareketler Şekil 4.15’de gösterilmiş olan ve NC (Nümerik Kontrol) olarak dijital ekrana sahip olan kontrol ünitesi ile sağlanmakta ve değerleri takip edilebilmektedir. Kontrol ünitesi, operatörün daha iyi bakış açısı ile kullanabilmesi için alttaki tekerlekleri sayesinde hareketlidir. Kontrol panelindeki dijital göstergeler ve basınç göstergesi saati sayesinde bu tez kapsamında yapılan deneylerde istenilen işlem parametreleri (yan merdanelerin kaldırma miktarları, yan merdanelerin en fazla kaldırılacağı miktarı, baskı kuvveti vb.) sabit tutulması sağlanmış ve takip edilmiştir. Tezgâhta, rulman yardımıyla kendi eksenleri etrafında dönebilen, kontrol ünitesindeki buton ile açılıp kapanabilen ve kapandığında üst merdaneye sabitlenen ön dayama mili bulunmaktadır. Ön dayama mili Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Bu milin başlıca iki görevi vardır. Birincisi, büküm işlemi sırasında yan merdanelerin parçayı ileri geri hareketinin kesim iç radiusüne göre yapılmasını sağlamaktır. Bükme işleminde ileri ve geri hareketin hep iç radiusüne göre olması başarılı bir konik şeklin oluşması için önemlidir. İkinci görevi ise konik büküm işlemi tamamlandıktan sonra açılarak parçanın tezgâhtan alınmasını sağlamaktır.



Şekil 4.15. Dört merdaneli konik bükme tezgâhı kontrol ünitesi.

Çalışma kapsamında yapılan tüm konik büküm çalışmalarında genel olarak aşağıdaki işlem basamakları kullanılmıştır. Bu işlem basamakları şematik olarak Şekil 4.16'da de sırasıyla gösterilmiştir.

- Deneş malzemesi yan merdanelerden birine dayandırılarak hizalanır ve alt merdane yukarı kaldırılarak deneş numunesi sıkılır (Şekil 4.16-a),
- Büküm işlemi için yan merdaneler belirlenen optimum değere kadar kaldırılır ve alt ile üst merdane arasından numune çıkmayacak kadar ileri hareket ettirilir (Şekil 4.16-b),
- Yan merdaneler aynı pozisyonda tutularak numunenin geriye hareket ettirilmesi sağlanır (Şekil 4.16-c),
- Yan merdanelerin her kaldırmasında b ve c' de belirtilen işlemler tekrar edilir ve tam kapanma için belirlenen değere kadar kaldırılarak büküm işlemi tamamlanır (Şekil 4.16-d).



Şekil 4.16. Konik şekillendirme işlem basamakları.

İmalat sanayisinde diğer imalat yöntemlerinde olduğu gibi üç boyutlu modellerle işleme durumu bu tezgâh ve benzeri merdaneli bükme tezgâhlarında kullanılamamaktadır. Diğer taraftan bu tezgahların operatör kontrollü olması, vasıflı işçi gerektirmesi ve başlangıcında deneme yanılma yoluyla optimum değerlerin bulunmasının verimlilik açısından zorunlu olması yapılan deney çalışmalarında ve literatür araştırmalarında da açıkça görülmüştür.

Deney çalışmaları sırasında, büküm işlemlerinin ve sonuçlarının tezin amacına doğru ulaştırabilmesi için bazı ön çalışmalar yapılmış ve bazı işlem parametreleri sabit tutulmuştur. Sabit tutulan işlem parametreleri, yapılan ön çalışmalar ve nasıl belirlendiği aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Her bükme adımı için yan merdanelerin yukarıya kaldırılma miktarını belirlemeye yönelik ön çalışma yapılmıştır. Bu ön çalışmada merdanelerin her aşamadaki yukarıya hareket miktarı düşük olduğunda işlemin çok uzun sürdüğü, hareket miktarı yüksek olduğunda ise bükülen sac malzemelerde şekilsel bozuklukların oluştuğu

belirlenmiştir. Deneme yanılma yoluna dayalı olarak yapılan bu çalışma neticesinde yan merdanelerin yukarıya kaldırılma miktarı 5 mm olarak belirlenmiştir. Tüm çalışmalarda sabit parametre olarak kullanılmış ve dijital ekrandan takip edilmiştir.

Deney çalışmaları sırasında büküm açısının doğru ve düzgün çıkması için yan merdanelerin zemin eksenine göre açısının belirlenmesi gerekmiştir. Bunun için ise yine deneme yanılma yöntemine dayalı olarak farklı açılarda büküm işlemleri yapılmıştır. Yapılan bu ön çalışma sonrası yan merdanelerin açısı için 15 derece optimum değer olarak belirlenmiştir ve tüm deney çalışmalarında bu açı değeri sabit işlem parametresi olarak kullanılmıştır.

Arzu edilen konik şekle en yakın ürünü yani en az geri yaylanma gerçekleşmiş parçayı elde edebilmek için parçanın ön ve arka yüzeyinin temasından daha fazla bükülmesi gerekmiştir. Bunun için de ön çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu parçanın iki ucunun ne kadar iç içe gireceği belirlenmiştir. Belirlenen bu değer tüm büküm çalışmalarında sabit değer olarak kullanılmıştır.

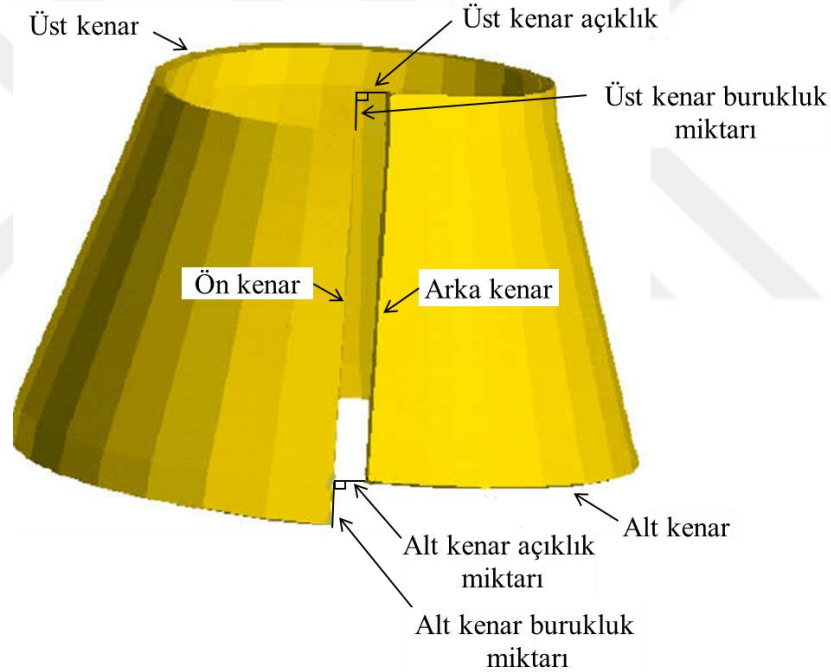
Deney çalışmaları kapsamında yukarıdaki sabit parametrelerin belirlenmesi çalışmalarından sonra geri yaylanma miktarına etkisi araştırılacak üç farklı işlem parametreleri için büküm çalışmaları yapılmıştır. Birinci çalışmada, koniklik açısının geri yaylanma miktarına etkisini belirlemek için 10°, 15° ve 20° olarak konik bükme işlemleri yapılmıştır. İkinci çalışmada, malzeme kalınlığının etkisini belirlemek için 2 mm, 3 mm ve 4 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta ayrı ayrı konik büküm çalışmaları yapılmıştır. Üçüncü çalışmada ise, malzeme sertliğinin etkisini belirlemek için ortalama sertlik değerleri 92 HRB, 74 HRB ve 54 HRB olarak üç farklı sertlikte malzemeler kullanılarak konik büküm çalışmaları yapılmıştır. Yapılan üç farklı çalışmada da değerlerin doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini görmek için en az üçer adet numune ile konik bükümler yapılmış ve ortalama değerleri kullanılmıştır.

Hidrolik dört merdaneli bükme tezgâhında yapılan konik bükme işlemlerinde, koninin ön ve arka uçlarına yakın yerlerde düzlemsel bölgelerin kaldığı görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda, merdaneli konik bükme işlemlerinde bu düz bölgenin mutlaka kaldığı ve koniyi kaynattıktan sonra konik bükme işlemini

tekrarlayarak bu düzlüklerin giderilebildiği bilgisine ulaşılmıştır [63,71,95]. Mevcut konik bükme işlemlerinde yeterli koniklik ve geri yaylanma bilgilerine ulaşılabilmesi sebebiyle bu çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Bükme sırasında bu düzlüğün oluşmaması için çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.

#### 4.5. GERİ YAYLANMA MİKTARININ ÖLÇÜMÜ

Sac malzemelerin konik bükülmesi işlemlerinde, arzu edilen son şekil ile bükümü yapılan parça arasında şekilsel farklar olduğu görülmektedir. Aslında geri yaylanma davranışı da bu şekilsel farklardan bir tanesidir. Bir koninin bükülmüş şekli ve tam kapanmış ideal koniye göre şekilsel farkları Şekil 4.17’de verilmiştir.

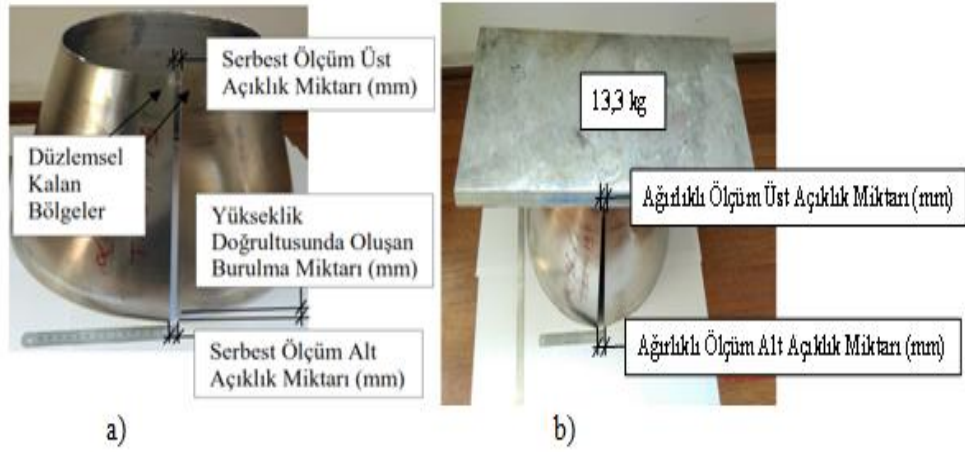


Şekil 4.17. Bir koninin bükülmüş şekli ve şekilsel sapmaları.

Yukarıdaki şekilde verilen sapmaları dikkate alarak seçilen işlem parametrelerinin geri yaylanma miktarına etkisini daha iyi belirleyebilmek ve raporlayabilmek için iki farklı ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Birinci yöntemde dört merdaneli konik bükme cihazında şekillendirilen numunelerin büküm sonrası kesik koninin alt ve üst tabanında geri yaylanmaya bağlı olarak meydana gelen açıklık serbest halde dijital kumpas aracılığı ile Şekil 4.18-a’da gösterildiği gibi ölçülmüştür. İkinci yöntemde



ise şekillendirme sürecinde taban eksenlerinde meydana gelen kaçıklığı gidermek için aynı numunelerin üst tabanına 13,30 kg ağırlık konduktan sonra alt ve üst tabanlarında meydana gelen geri yaylanma açıklık mesafesi ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Böyle bir ölçüm metodunun çalışmaya dahil edilmesinin sebebi, konik büküm işlemi sırasında istenmeyen bir durum olan burulmanın oluşması ve serbest halde geri yaylanma miktarının içinde aslında burulmadan gelen değerlerinde olmasıdır. Pratikte konik bükülen parçaların tabanının düz olarak kullanılacağından dolayı ağırlık koymak kaydıyla bükülen parçanın iki tarafının aynı düzlem üzerine oturtulduğu haldeki geri yaylanma miktarlarının da ölçülerek bilinmesi önemlidir. Tüm deney numunelerinde ikinci ölçüm yöntemi olarak uygulanan ağırlıklı geri yaylanma miktarı ölçümü Şekil 4.18-b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Geri yaylanma miktarının ölçümü. a) Serbest, b) Ağırlıklı ölçüm.

Yapılan tüm ölçümler, her deney çalışmasında aynı parametrelerde şekillendirilen üç numunenin alt ve üst taban geri yaylanma miktarları ölçüldükten sonra ortalamaları alınarak verilmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

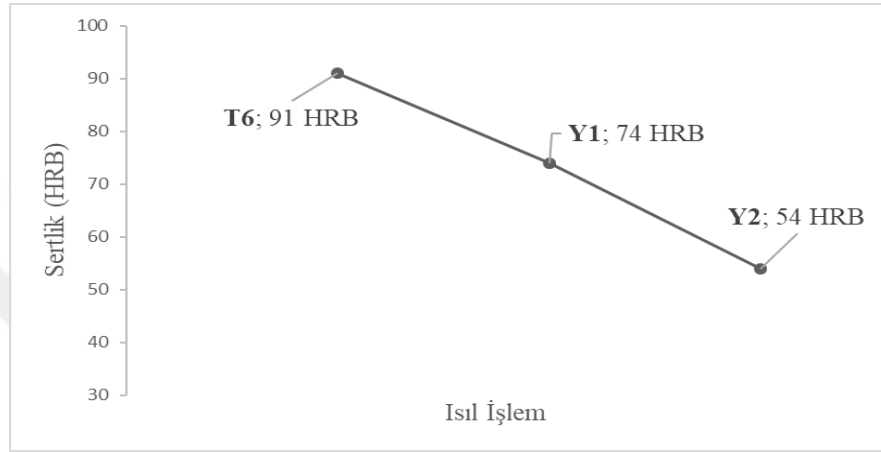
Deney numunelerine ait malzemeleri tanımak, doğruluğunu teyit etmek için uygulanmış olan testlere ait sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir. Aynı zamanda geri yaylanma miktarı üzerine farklı işlem parametrelerinin etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular da aşağıda başlıklar halinde ele alınmış ve değerlendirilmiştir.

#### 5.1. SERTLİK ÖLÇÜM SONUCU

Çalışmada AA7075-T6 alaşımının temin edildiği şekliyle ve uygulanan ısı işlemler sonrasında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde numunelerin temin edildiği haldeki sertlik değerleri 90-92 HRB aralığında dağılım sergilediği tespit edilmiştir. Yapılan literatür incelemelerinde bu malzemelere uygulanan T6 ısı işlemiyle yaşlandırılan numunelerin sertlik değerlerinin oldukça yükseltildiği belirtilmiştir. Elde edilen en yüksek sertlik değerlerinin 90-92 HRB civarında ölçüldüğü rapor edilmiştir [96].

Daha öncede ifade edildiği gibi AA7075 alaşımının da diğer 7xxx serisi alüminyum alaşımları gibi çökeltme sertleştirilmesiyle dayanımları artırılabilir. AA7075 alaşımlarında yaşlandırma ısı işlemine bağlı olarak çökelti oluşma sıralaması aşırı doymuş katı eriyik → GP1 zonu → çözülme → GP2 zonu → yarı kararlı  $\eta'$  fazı ve kararlı  $\eta$  fazı ( $MgZn_2$ ) şeklinde özetlenmektedir. Bu çeşit alüminyum alaşımlarında sertlik veren faz, yarı kararlı  $\eta'$  fazıdır [4,5]. Yaşlanma zamanının artmasıyla GP1 ve GP2 zonları yarı kararlı  $\eta'$  fazını oluşturarak sertliğin artmasına ve dislokasyon hareketine engel çıkarak mukavemetin iyileşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Sha ve Cerezo yarı kararlı  $\eta'$  fazı levhalı morfolojisi sebebiyle Al-Zn-Mg (Cu) alaşımlarının sertliğinin sorumlusu olduğunu rapor etmişlerdir [6].

Aynı malzemeye uygulanan farklı iki ısıtma işlem sonrasında malzeme sertlikleri tekrar ölçülmüştür. Bu ölçümlerde Y1 aşırı yaşlanma ısıtma işlem sonrasında malzeme sertliğinin ortalama 74 HRB' ye ve Y2 ısıtma işlem sonrasında ise sertlik değerinin ortalama 54 HRB' ye düştüğü görülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde deneysel çalışmalar için istenen T6, Y1 ve Y2 olmak üzere üç farklı sertlik değerindeki numuneler elde edilmiştir. Ölçülen değerler Şekil 5.1'de grafik şeklinde verilmiştir.



Şekil 5.1. Isıl işlem sonuçlarına ait ortalama değerler.

T6 ısıtma işlemi uygulanmış şekliyle temin edilen AA7075 sac levhalarına 180 °C ve 200°C sıcaklıkta 24 saat süreyle uygulanan ısıtma işlemler sonucunda aşırı yaşlanmaya bağlı mevcut çökeltilerin ve tane boyutunun büyümesi kaçınılmazdır. Mütakabilde uygulanan yavaş soğutma sonrasında ölçülen sertlik değerlerinin T6 yaşlandırma ısıtma işlemiyle elde edilen sertlik değerlerinden daha düşük bulunması doğal bir sonuçtur. AA7075 T6 malzemeler için yaşlandırma işlemlerinde 12 saatten sonrasında sertlik değerlerinin düştüğü bilinmektedir [97].

## 5.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

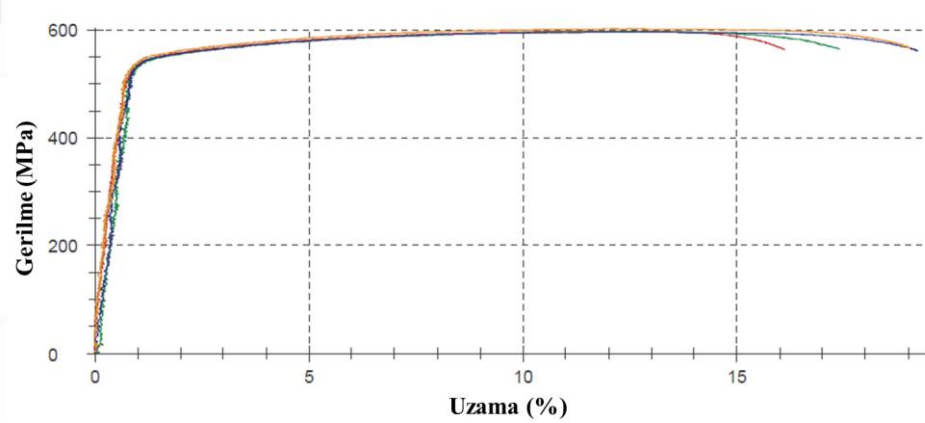
Çalışmada AA7075-T6 alaşımının temin edildiği şekliyle ve ısıtma işlem çalışmaları sonrasındaki statik çekme yükü altındaki davranışı çekme testi ile belirlenmiştir. Çekme testleri her deney grubu için dört adet çekme testi numunesinden oluşan setler olarak tekrarlanmış ve elde edilen değerlerin Çizelge 5.1'de ortalaması verilmiştir. Bu çizelgede ayrıca deney numunelerinin sertlik ölçüm sonuçları da verilerek çekme

sonuçları ile ilişkilendirilmiştir. Tüm çekme testi deney gruplarına ait sonuçların kendi içerisinde birbirine yakın çıkması çekme dayanımı değerlerinin uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5.1. Çekme testi ve sertlik ölçümü sonuçları.

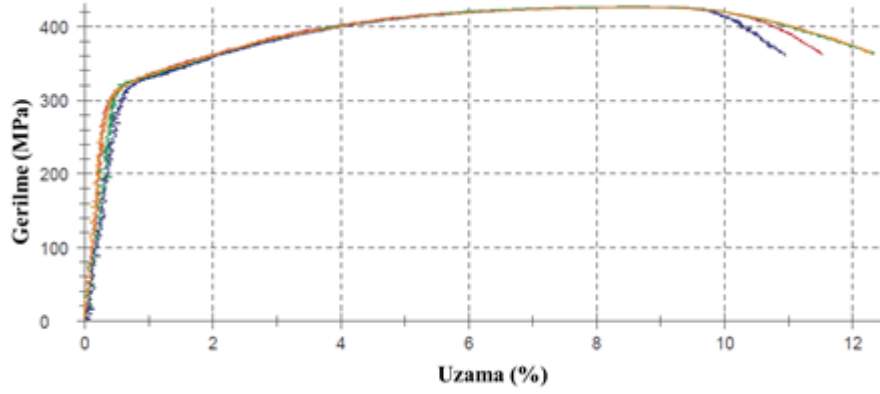
Deney numunesi	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HRB)
T6 (Temin edildiği şekliyle)	533	598	18.03	92
Y1. ısıt işleme sonrası	388	427	11.8	74
Y2. ısıt işleme sonrası	234	351	11.5	54

T6 deney numunelerinin çekme test sonuçları gerilim-uzama grafiği şeklinde Şekil 5.2’de verilmiştir. Bu deney numunelerinin ortalama çekme dayanımı 598MPa, akma dayanımı 533MPa olarak belirlenmiştir. Numunelerin % uzama miktarı ise %18,03 ölçülmüştür. Ayrıca deney numunelerinin ortalama sertliği de 92HRB ölçülmüştür.



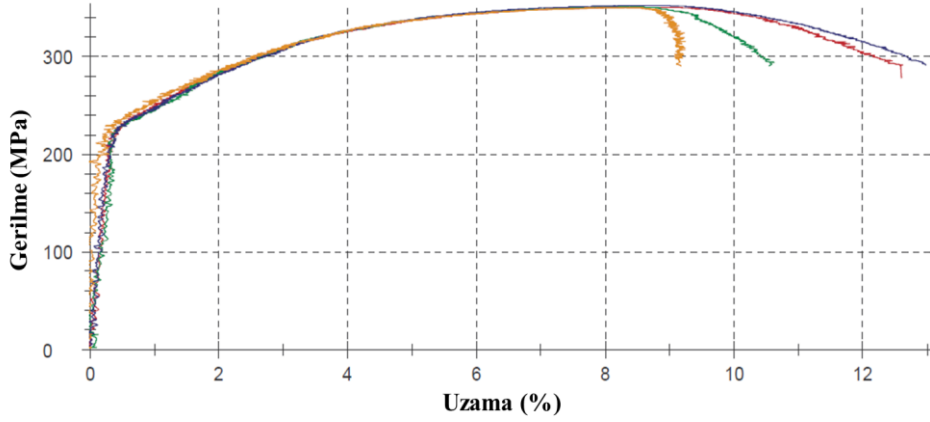
Şekil 5.2. T6 halinde deney numunelerinin çekme testi eğrileri.

Y1 ısıt işleme çalışması sonrası malzemeler için hazırlanan numunelerin çekme test sonuçları Şekil 5.3’de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ortalama çekme dayanımı 427MPa, akma dayanımı 388MPa ve % uzama miktarı ise %17,5 ölçülmüştür. Deney numunelerinin sertlik değerleri de ortalama 74HRB olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3. Y1 ısıt işlem sonrası deney numunelerinin çekme testi eğrileri.

Y2 ısıt işlemi sonrası hazırlanan numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 5.4’de verilmiştir. Sonuçlar ele alındığında ortalama çekme dayanımı 351MPa, akma dayanımı 234MPa ve % uzama miktarı ise %12,0 görülmüştür. Deney numunelerine ait ortalama sertlik değerleri ise 54HRB olarak ölçülmüştür.



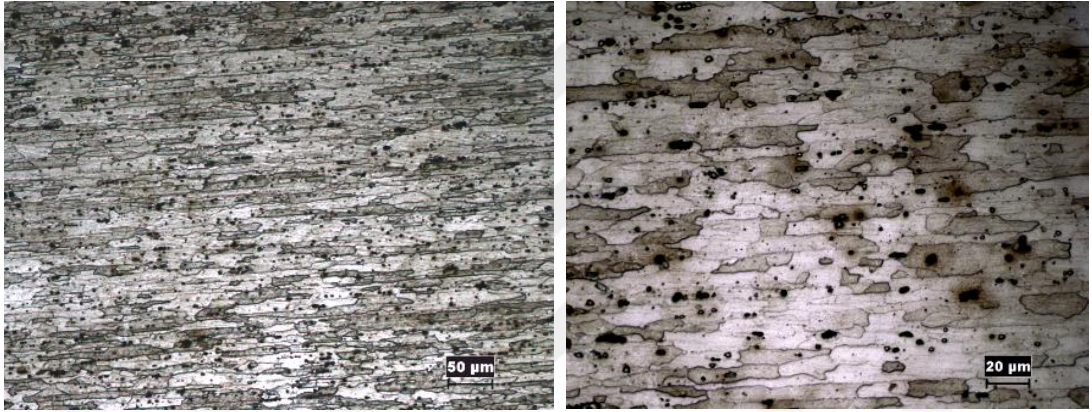
Şekil 5.4. Y2 ısıt işlem sonrası deney numunelerinin çekme testi eğrileri.

Çizelge 5.1’de verilen değerler ile Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekilde 5.4’de çıkan eğriler incelendiğinde ilave ısıt işlem yapılmamış numunenin genel olarak mekanik özelliklerinin en yüksek çıktığı görülmektedir. Mekanik özelliklerindeki bu yüksek değerlerin çıkmasını malzeme fabrika çıkışı sonrası uygulanan T6 ısıt işlemi sağlamıştır. Bununla birlikte yapılan Y1 ve Y2 ısıt işlemleri sonrasında süneklikte azalma ve mekanik özelliklerde belirgin bir düşme olmuştur. Bunun sebebi ise esas malzemenin T6 işleminden dolayı kazandığı özelliklerinin ısıt işlemle kaybolmasıdır.

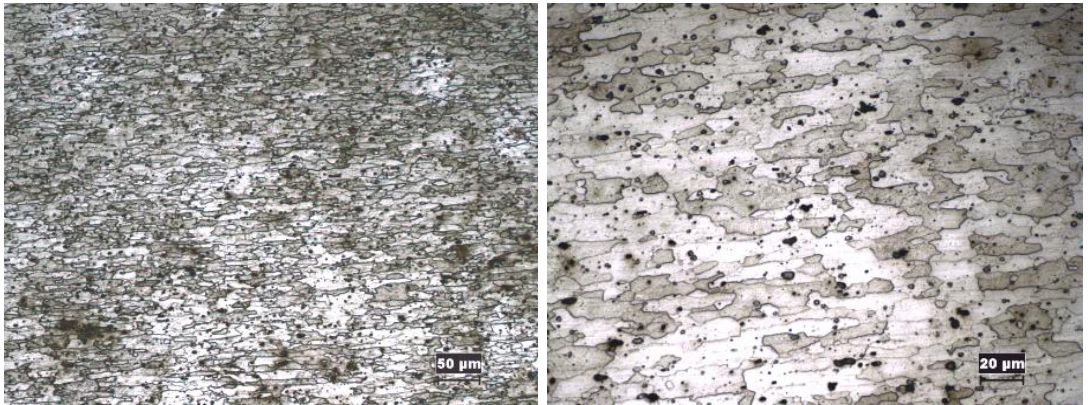
Diğer bir ifadeyle dayanım ve sertlikte azalma aşırı yaşlanmayla birlikte T6 ısıt işleminde oluşmuş olan çökeltilerin kabalaştığına işaret etmektedir.

### 5.3. MİKROYAPI İNCELEMELERİ VE DEĞERLENDİRİLMELERİ

Çalışmada AA7075-T6 alaşımının temin edildiği şekliyle içyapısı sırasıyla hadde yönüne paralel (Şekil 5.5) ve hadde yönüne dik (Şekil 5.6) olacak şekilde optik mikroskopla incelenmiş elde edilen farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.5. AA7075-T6 alaşımının hadde yönüne paralel farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü.



Şekil 5.6. AA7075-T6 alaşımının hadde yönüne dik farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü.

Mikroyapılar incelendiğinde hadde yönüne paralel olan mikroyapı görüntüsünde taneler uzun formda iken hadde yönüne dik olan mikroyapı görüntüsünde tanelerin

daha eş eksenli olduğu görülmektedir. İmalattan kaynaklı mikroyapıda oluşan bu anizotropik durumun deneysel verileri etkilememesi için tüm numuneler hadde doğrultusuna paralel olarak alınmıştır.

Şekil 5.5 ve 5.6 'dan görüldüğü gibi AA7075 alaşımı T6 ısıtma işlemi uygulanmış şekliyle temin edildiği için yapısı aşırı doymuş tanelerinin yanı sıra ötektik çökelti fazlarından oluştuğu düşünülmektedir. Genellikle tane sınırlarında görülen bu ötektik çökelti fazlarının  $Zn-Al_2$ ,  $Mg_2Si$ ,  $MgAl_2$  ve  $CuAl_2$  olabileceği rapor edilmiştir [98]. Yaşlandırma esnasında Al-Zn-Mg temelli 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında meydana gelen çökelti, fazlarının sırası ve türü alaşımın bileşimine, soğutma koşullarına ve yaşlandırma sıcaklığına bağlıdır. Al-Zn-Mg alaşımlarında yaygın olarak kabul gören ısıtma işlem dönüşüm sıralaması;

A Aşırı doymuş  $\rightarrow$  GP 1-2 zonları  $\rightarrow$   $\eta'$   $\rightarrow$   $\eta$  ( $MgZn_2$ ) şeklindedir [5,99].

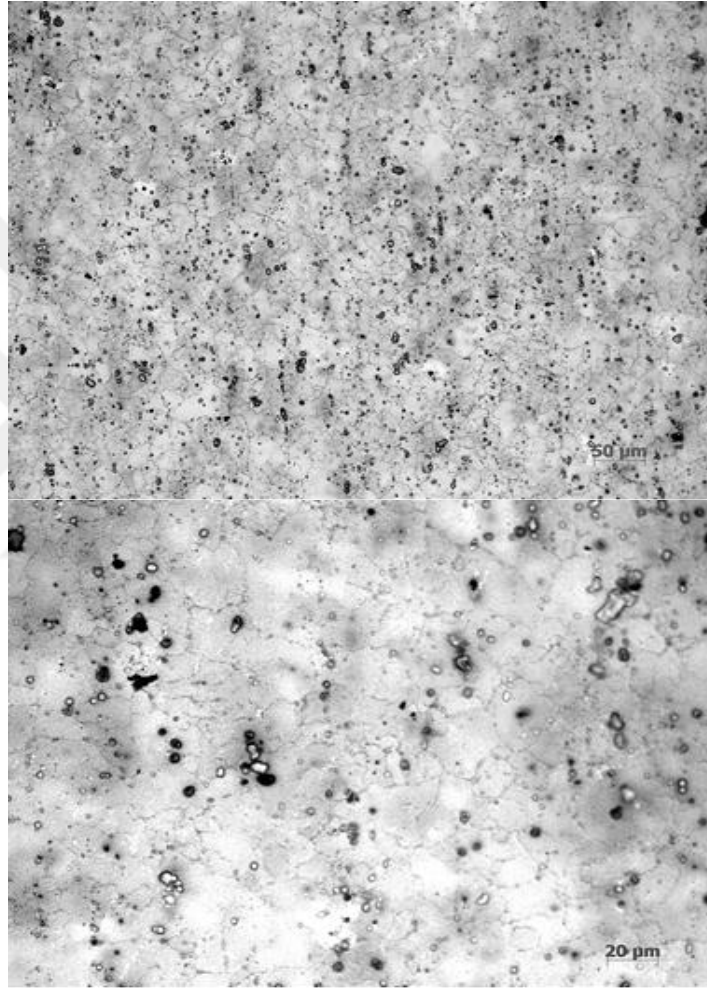
Çökeltmenin ilk aşamalarında GP1 ve GP2 olmak üzere iki tip zon oluşmaktadır. GP1 zonları düşük Mg oranlarında meydana gelir ve çözünen atomca zengin zonlar olarak bilinmektedir. GP2 zonları ise çözünen atom ve boşluk olarak zengin olduğu bilinmektedir. GP zonlarının oluşumu için üst sıcaklık limiti, alaşımın bileşimine bağlı olarak 10-180°C arasında değişir. GP1 zonları, alüminyum matriks ile tamamen uyumludur ve soğutma sıcaklığından bağımsız olarak, oda sıcaklığından 140-150°C'e kadar olan sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma sonrası Zn, Al ve Mg atomlarının matriks kafesinde alt birimler şeklinde periyodik dizilmeye meydana gelir. Oda sıcaklığında 60-70°C sıcaklığa kadar sadece GP1 zonları oluşmakta, dolayısıyla doğal yaşlandırma sırasında oluşan GP zonları, GP1 tipinde olmaktadır. GP2 zonları ise 450°C'nin üzerindeki çözeltiye alma sıcaklıklarında su verme sonrası 70°C'nin üstündeki sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma sonrası oluşmaktadır. GP2 zonu  $\eta'$  fazının oluşması için bir tür başlangıç fazı olarak değerlendirilmekte ve oluşumun, ani soğutma sırasında meydana gelen zengin kümelenmelerden kaynaklandığı bilinmektedir. Yarı kararlı  $\eta'$  fazı  $MgZn_2$  bileşiminde, kafes parametreleri  $a=0.496$  nm ve  $c=1.402$  nm olan hegzogonal kafes yapısına sahip bir fazdır. Bileşimi  $MgZn_2$  olan  $\eta$  ise,  $a=0.521$  nm  $c=0.860$  nm kafes parametrelerine ve hegzogonal yapıya sahip kararlı denge fazıdır [100,101].





etkisinin kısmen giderildiğine işaret etmektedir. Ayrıca tanelerin kısmen irileşmesi ve iç gerilmelerin azalması da sertlikteki azalmayı tetiklemiştir.

Farklı bir sertlik elde etmek amacıyla diğer bir grup AA7075-T6 alüminyum sac malzemeye uygulanan ısıtıl işlem neticesinde elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



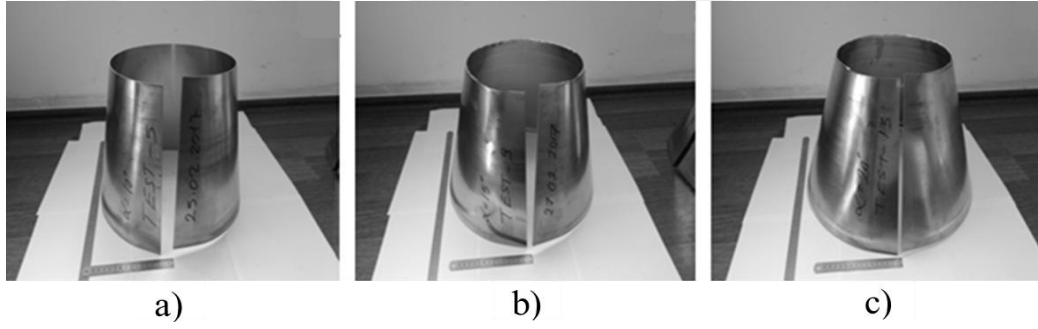
Şekil 5.8. Y2 ısıtıl işlem sonrası elde edilen numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüsü.

Şekil 5.8’de verilen Y2 (180°C, 24h) ısıtıl işlemi sonrasındaki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde Y1 ısıtıl işlemi sonrasında olduğu gibi tane yapısı büyük oranda eş aksenel hale dönmüştür. Yine Y1 ısıtıl işlemine benzer şekilde uygulanan ısıtıl işlemle T6 ısıtıl işleminin etkisi daha bariz bir şekilde giderilmiş, tane büyümeleri ve kaba çökeltiler olmuş ve bunlara bağlı olarak da sertlikte daha fazla düşüş görülmüştür. Bu

yapılan çalışmalar sonucunda uygulanan ısıl işlemler sonrasında mikroyapıda oluşması beklenen değişimlerin elde edildiği görülmüştür.

#### 5.4. KONİKLİK BÜKÜM AÇISININ GERİ YAYLANMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Koniklik büküm açısının geri yaylanma miktarı üzerindeki etkisinin belirlenmesi çalışmasında, dört merdaneli hidrolik konik bükme tezgâhında soğuk olarak konik şekillendirilen 2 mm kalınlığındaki AA7075-T6 alaşımı sac malzemenin konik şekillendirme sürecinde geri yaylanma miktarına işlem parametrelerinden koniklik açısının ( $\alpha$ ) etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda koniklik açısı 10°, 15°, 20° olacak şekilde soğuk şekillendirme ile konik büküm işlemleri yapılmıştır (Şekil 5.9-a,b,c).



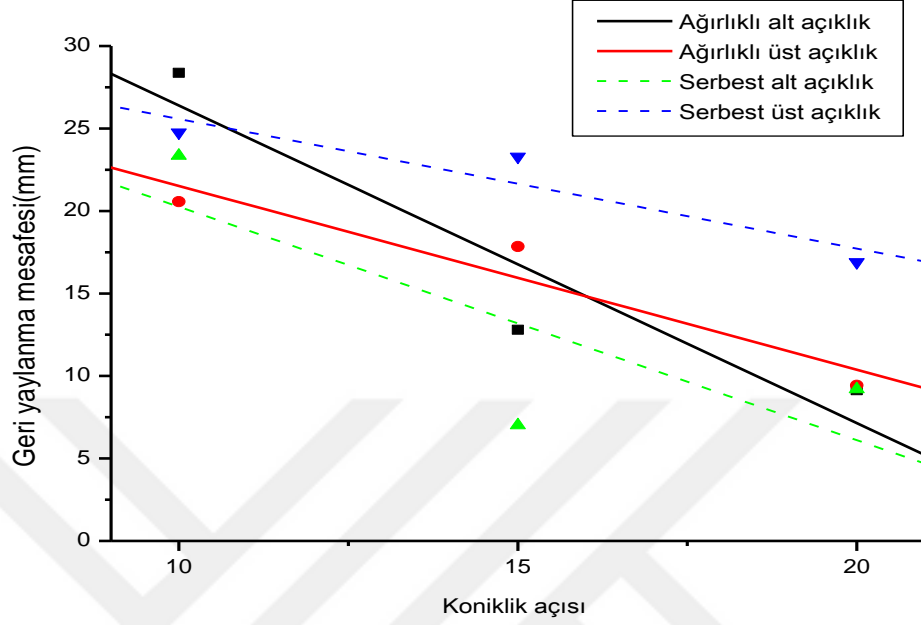
Şekil 5.9. Koniklik açıları farklı konik şekillendirilmiş deney numuneleri. a) 10°, b) 15°, c) 20°.

Konik şekillendirilen numunelerin geri yaylanma miktarları serbest ve ağırlıklı olarak dijital kumpas ile ölçülmüştür. Geri yaylanma miktarının ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Geri yaylanma miktarı ortalama ölçüm sonuçları.

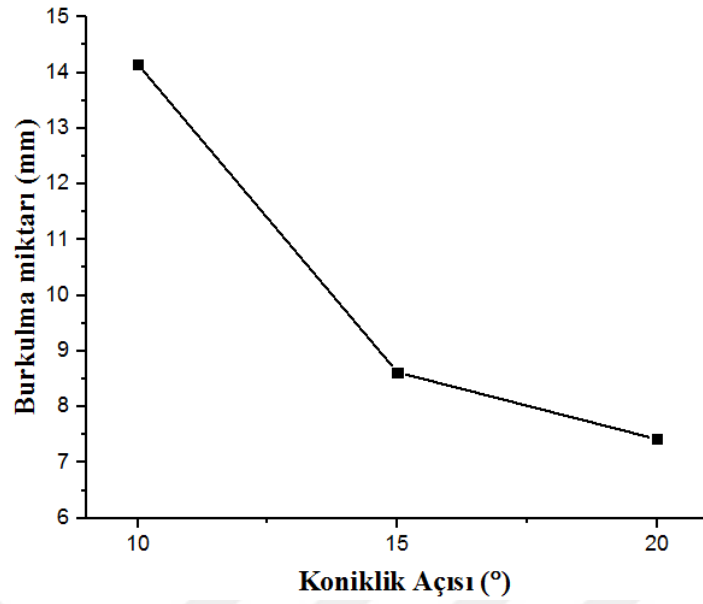
Büküm ( $\alpha$ ) açısı	Serbest alt (Ort. mm)	Serbest üst (Ort. mm)	Burukluk (Ort. mm)	Ağırlıklı alt (Ort. mm)	Ağırlıklı üst (Ort. mm)
10°	23,35	24,76	14,15	28,38	20,57
15°	11,12	23,30	8,62	12,80	17,85
20°	9,20	16,90	7,42	9,14	9,43

Geriyaylanma miktarlarının ortalama değerlerinin koniklik açısı ile ilişkisi grafiksel olarak Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Geriyaylanma miktarının koniklik açısıyla ilişkisi.

Dört merdaneli hidrolik konik bükme tezghlerinde yapılan konik büküm işlemlerinde bükülen koninin alt ve st uçlarında burulmalar grlmştir. Bu durumun nedeni, parça ile merdaneler arasındaki statik ve dinamik sürtünmeler olduğu düşünülmektedir. Sürtünme katsayısı ile plakanın alt ve st tarafı hız oranı ayarlanarak bu burulma değerinin en aza indirilebileceği yapılan araştırmalarda bildirilmiştir [63]. Burulma değerlerin en aza indirilmesi bu çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Buna rağmen burulma değerlerinin geriyaylanma miktarını etkilemesi sebebi ile bu ve diğer konik büküm deney çalışmalarında işlem parametrelerinin değişimi ile ilgisi incelenmiştir. Ortalama burukluk miktarının koniklik açısına göre değişiminin değerleri yukarıda izelge 5.2’de grafiksel ilişkileri de aşağıda Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11. Burukluk miktarının koniklik açısı ile ilişkisi.

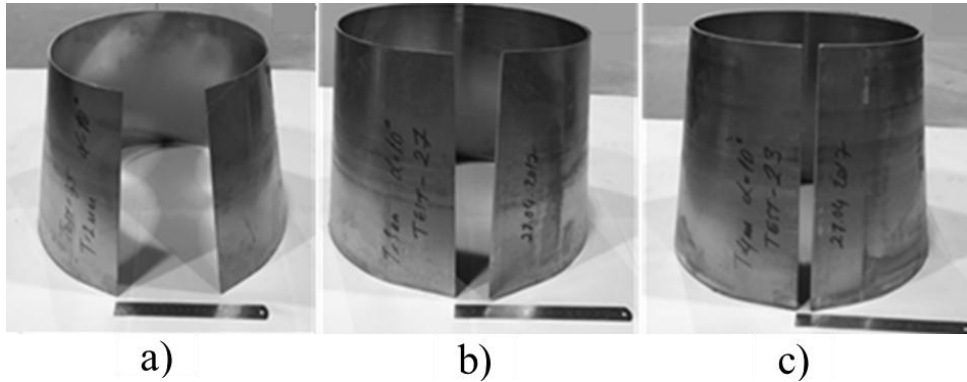
Verilen çizelge ve grafiklerden görüldüğü üzere üç farklı koniklik açısında kesilerek konik olarak soğuk şekillendirilen numunelerin alt ve üst tabanlarının uçları arasındaki açıklık diğer ifadeyle geri yaylanma miktarı serbest ve ağırlıklı olarak ölçülmüştür. Her iki geri yaylanma mesafesi ve burkulma miktarı artan koniklik kesme açısına göre genel eğilim olarak azalma göstermiştir. Bunda farklı konik açılara sahip numunelerde plaka kontak arayüzündeki statik ve dinamik sürtünme katsayılarının etkili olduğu düşünülmektedir [63]. Bükülme yarıçapı arttıkça, gerekli bükülme kuvvetinin azaldığı ve daha büyük açılı parçaların daha az çabayla üretilebileceği de rahatlıkla söylenebilmektedir [62]. Geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla sık başvurulan yöntemlerden birisinin koniklik büküm açısını arttırmak olduğu rapor edilmiştir [86,91].

Ayrıca geri yaylanma miktarı üzerinde malzeme kalınlık ölçüsünün ve malzemenin yaşlandırma yoluyla sertliğinin ve mukavemetinin artırılmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu etkileri belirleyebilmek için ileriki aşamada farklı kalınlıklarda ve farklı sertliklerde malzemeler kullanılarak konik büküm çalışmaları yapılmış ve geri yaylanma miktarları tespit edilmiştir.

Göze çarpan diğer bir husus da ağırlıklı olarak ölçülen geri yaylanma miktarı her iki taban uçları arasında da serbest ölçüme göre daha düşük bulunmuştur. Doğal olarak soğuk konik şekillendirmeye bağlı olarak uçlar arasındaki hizalama problemi kesik koninin üzerinden yük uygulandığında minimize edilerek alt ve üst uçlar arasındaki açıklık mesafesi birbirine en yakın konuma gelmektedir.

### 5.5. SAC KALINLIĞININ GERİ YAYLANMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

AA7075-T6 sac malzemenin konik şekillendirme sürecinde geri yaylanma miktarına sac kalınlığının etkisini belirlemek için önceki çalışma doğrultusunda koniklik açısı ( $\alpha$ )  $10^\circ$  olarak sabit alınmıştır. En düşük koniklik büküm açısının seçilmesinin ardında yatan sebep artan koniklik büküm açısına bağlı olarak geri yaylanma miktarının azalmasıdır. Sac kalınlık farkının geri yaylanma üzerindeki etkisini tespit edebilmek için en fazla geri yaylanmanın olduğu en düşük koniklik açısında yapılması tercih edilmiştir. Sac malzeme kalınlıkları 2 mm, 3 mm ve 4 mm seçilerek konik büküm işlemleri yapılmıştır. Soğuk konik şekillendirmeye ait makro görüntüler Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



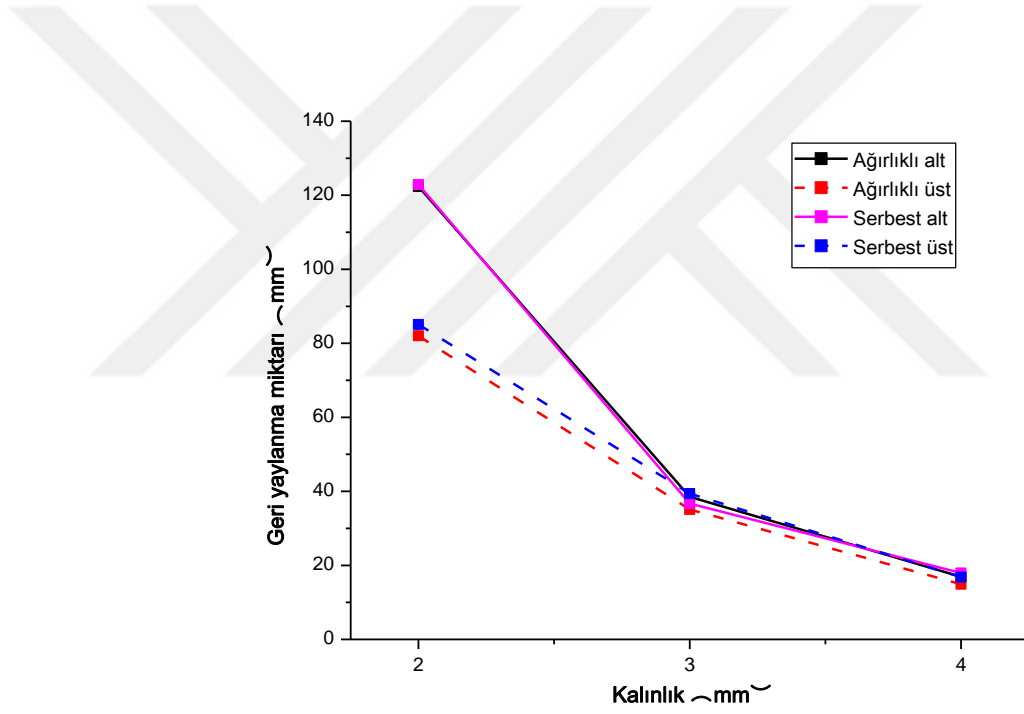
Şekil 5.12. Sac kalınlıkları farklı konik şekillendirilmiş deney numuneleri. a) 2 mm, b) 3 mm, c) 4 mm.

Konik şekillendirilen numunelerin geri yaylanma miktarları serbest ve ağırlıklı olarak dijital kumpas ile ölçülmüştür. Sac kalınlığına bağlı olarak ortalama geri yaylanma ölçüm sonuçları Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Geri yaylanma miktarı ortalama ölçüm sonuçları.

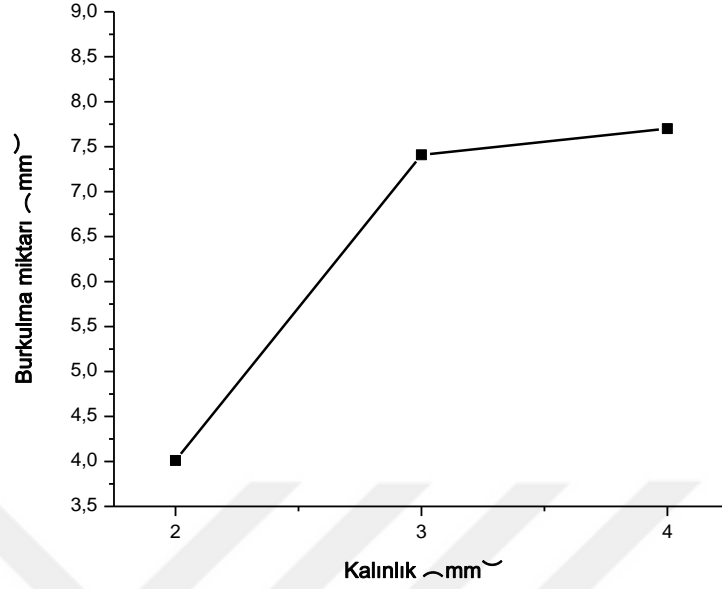
Sac Malzeme Kalınlık	Serbest alt (Ort. mm)	Serbest üst (Ort. mm)	Serbest alt burukluk (Ort. mm)	Ağırlıklı alt (Ort. mm)	Ağırlıklı üst (Ort. mm)
4 mm	17,92	16,82	7,80	16,93	14,91
3 mm	36,70	39,40	7,41	38,52	35,10
2 mm	122,88	85,11	4,01	123,47	82,03

Geri yaylanma miktarının ortalama değerlerinin sac kalınlığı ile ilişkisi grafiksel olarak Şekil 5.13’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Geri yaylanma miktarının sac kalınlığı ile ilişkisi.

Ortalama burukluk miktarının malzeme kalınlığına göre değişiminin değerleri yukarıda Çizelge 5.3’de ve grafiksel ilişkileri de Şekil 5.14’de verilmiştir.



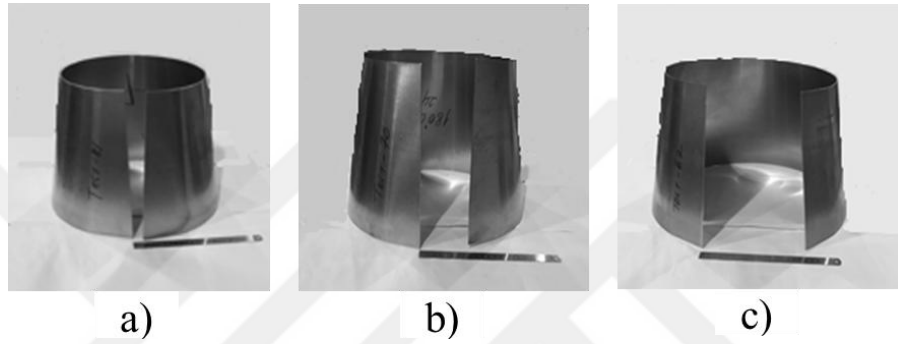
Şekil 5.14. Burlulma miktarının kalınlık ile ilişkisi.

Verilen çizelge ve şekillerden görüldüğü gibi sabit koniklik açısında kesilerek konik olarak şekillendirilen üç farklı kalınlıktaki numunelerin alt ve üst tabanlarının uçları arasındaki açıklık diğer ifadeyle geri yaylanma miktarı sac kalınlıkları arttıkça azaldığı fakat burkulma miktarının arttığı görülmektedir. Bunun sorumlusunun kalıcı gerilmeler olduğu düşünülmektedir. Yapılan literatür incelemesinde sac kalınlığının arttıkça geri yaylanma miktarının azaldığının birçok çalışmada tespit edildiği görülmektedir [70,102,103]. Örnek verilecek olursa, Zeng ve diğerleri ASTM A743 kalite CA-6NM malzeme ile yapılan bir çalışmada malzeme kalınlığı değişikçe kıvrıma kalitesindeki değişime bakmışlardır. Sonuç olarak malzeme kalınlığı arttıkça yarıçap sapmasının daha küçük çıktığını tespit etmişler, yani daha kalın bir malzeme için daha iyi bir bükülme kalitesi ve daha az geri yaylanma davranışı elde edildiğini rapor etmişlerdir [70].

Deney çalışmaları sonucundan ve literatür taramasından anlaşıldığı üzere geri yaylanma miktarının az olması için kalınlığı fazla olan malzeme seçilmesi önerilmektedir. Ancak bükülen parçanın kullanılacağı yerdeki ağırlık, hacim gereksinimleri dikkate alınmalıdır. Malzeme kalınlaştıkça bükme işlemi sırasında daha fazla reaksiyon kuvvetine ihtiyaç duyulacağı da göz ardı edilmemelidir.

## 5.7. MALZEME SERTLİĞİNİN GERİ YAYLANMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

AA7075-T6 alaşımlı sac malzemenin konik şekillendirme sürecinde geri yaylanma miktarına malzeme sertliğinin etkisini belirlemek için önceki çalışmalar doğrultusunda koniklik açısı ( $\alpha$ )  $10^\circ$  ve sac kalınlığı 2 mm olarak sabit alınmıştır. T6 haliyle ve iki farklı ısıl işlem uygulanarak elde edilen toplamda üç farklı sertlikte sac malzemeye soğuk olarak konik bükme işlemleri yapılmıştır. Bükmeye ait makro görüntüler Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Isıl işlemleri farklı konik şekillendirilmiş deney numuneleri. a) Y2, b) Y1, c) T6.

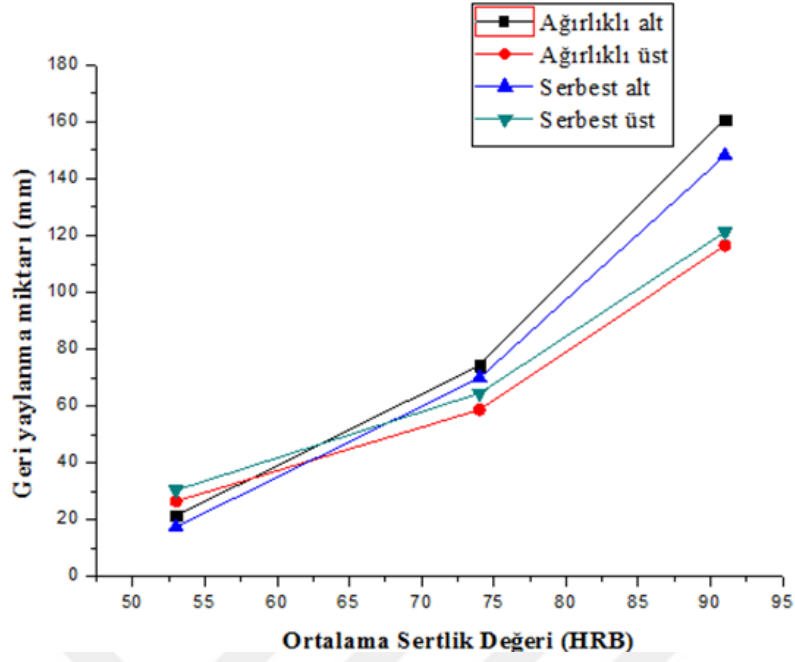
Konik şekillendirilen numunelerin geri yaylanma miktarları serbest ve ağırlıklı olarak dijital kumpas ile ölçülmüştür. Malzeme sertliğine bağlı olarak ortalama geri yaylanma ölçüm sonuçları Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Geri yaylanma miktarına ait ortalama ölçüm sonuçları.

Isıl İşlem Durumu	Serbest alt (Ort. mm)	Serbest üst (Ort. mm)	Serbest alt burukluk (Ort. mm)	Ağırlıklı alt (Ort. mm)	Ağırlıklı üst (Ort. mm)
T6	148,18	121,27	4,0	160,85	116,53
Y1	69,88	64,45	9,34	74,30	58,65
Y2	17,45	30,31	16,06	21,31	26,46

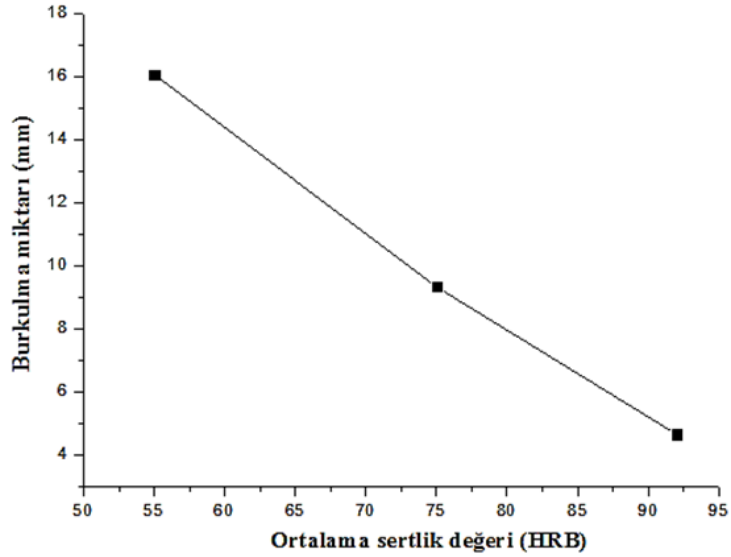
Geri yaylanma miktarlarının ortalama değerlerinin malzeme sertliği ile ilişkisi grafiksel olarak Şekil 5.16’da gösterilmiştir





Şekil 5.16. Geri yaylanma miktarının sac sertliği ile ilişki.

Ortalama burukluk miktarının malzeme sertlik değişimine göre değerleri yukarıda Çizelge 5.4’de ve grafiksel ilişkileri de Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 17. Burkulma miktarının sac sertliği ile ilişkisi.

Çizelge ve şekillerde verilen değerler incelendiğinde sertlik değerleri arttıkça geri yaylanma miktarının arttığı fakat burkulma miktarının azaldığı görülmektedir. En

fazla geri yaylanma miktarı ticari olarak temin edildiği şekliyle, T6 ısıl işlem görmüş olarak yapılan deneylerde görülmüştür. 180°C sıcaklıkta 24 saat ısıl işlem yapılan malzemede daha az geri yaylanma görülmüştür. En az geri yaylanma miktarı ise 200°C sıcaklıkta 24 saat ısıl işleme tabi tutulan deneylerde görülmüştür. Bunun nedeni malzeme sertliğinin ve dolayısı ile malzeme mekanik özelliklerinin yüksek olduğunda bükülmeye karşı daha fazla direnç göstermesi ve eğme kuvveti kaldırıldığında eski haline gelme eğiliminin daha fazla olması olduğu düşünülmektedir. Yapılan ısıl işlemler ile malzeme sertlik ve mekanik özellikleri düşürüldüğü için geri yaylanma eğilimleri de düşürülmüştür. Isıl işlemin büküm çalışmalarına etkisi ile ilgili literatüre bakıldığında bazı önemli çalışmalar aşağıda verilmiştir.

X. Gu vd. yaptıkları çalışmada ısıl işlem ile malzemelerin şekillendirebilirliğinin iyileştirilebileceğini bildirmişlerdir [92]. M.K. Chudasama ve H.K. Raval, mukavemet katsayısı arttıkça, malzemenin bükülmeye karşı iç direncini artıracak ve dolayısı ile geri yaylanma miktarının artacağını söylemişlerdir [62].

Elde edilen bu deney sonuçlarına göre malzemelerin sertlik ve mekanik özellikleri düşük ve/veya ısıl işlem çalışmaları ile düşürülerek büküm işlemlerinin yapılması ve gereksinim varsa büküm işleminden sonra ısıl işlem ile sertleştirilmesi veya mukavemetlendirilmesi rahatlıkla önerilebilir. Bu şekilde hem geri yaylanma miktarının az olması hem de büküm için harcanacak kuvvetten kazanım elde edilmiş olunacağı düşünülmektedir.

## BÖLÜM 6

### GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada üç farklı koniklik bükme açısı, üç farklı sac kalınlığı ve üç farklı sertlik değerlerindeki AA7075 alüminyum sacların soğuk olarak dört merdaneli konik şekillendirme tezgâhında konik şekillendirilen numunelerinin serbest ve ağırlıklı olarak geri yaylanma miktarları ölçülmüş elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- AA7075 alaşımı T6 ısıl işlemi uygulanmış şekliyle temin edildiği için yapısı aşırı doymuş alfa tanelerinin yanı sıra çökelti fazlardan oluşmuştur.
- T6 ısıl işlemine bağlı olarak AA7075 alaşımının ortalama 523MPa akma dayanımına, 591MPa çekme dayanımına, %17,5 uzama miktarına sahip olduğu bulunmuştur. Yarı karalı  $\eta'$  fazı MgZn<sub>2</sub> kafesi çarpıtılarak dislokasyon hareketini engellemiş ve sertliği arttırmıştır. Sertlik ortalama 92 HRB ölçülmüştür.
- Malzeme sertliğini değiştirmek için uygulanan Y1 ısıl işlemi sonrasında aşırı yaşlanmaya bağlı olarak dayanımda, uzamada ve sertlikte azalma meydana gelmiştir. Sertlik ortalama 74 HRB olarak ölçülmüştür.
- Uygulanan Y2 ısıl işlemi sonrasında ise aşırı yaşlanma ve çökelti kabalaşmasına bağlı olarak dayanım ve uzamada azalma en üst seviyeye ulaşmıştır. Sertlik ortalama 54 HRB olarak ölçülmüştür.
- Geri yaylanma miktarı her iki uç açıklık mesafesi içinde ve burkulma miktarının artan koniklik açısına göre azalma gösterdiği bulunmuştur.

- Farklı kalınlıktaki sacların bükmesinde ise sac kalınlığı arttıkça geri yaylanma miktarının azaldığı buna karşın burkulma miktarının arttığı bulunmuştur.

- Malzeme sertliğinin azalmasının ise AA7075 alaşımlı sacın geri yaylanma miktarını azalttığı fakat burkulma miktarını artırdığı tespit edilmiştir.

- Ağırlıklı olarak ölçülen geri yaylanma miktarı her iki taban uçları arası içinde serbest ölçüme göre daha düşük bulunmuştur.

Yapılan çalışmalar neticesinde sac kalınlığının, sertliğinin ve bükme açısının geri yaylanmaya olan etkileri incelenmiş ve yukarıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan çalışmalar tez kapsamında sınırlandırıldığı için bazı konuların daha detaylı olarak incelenmesi sebeplerin daha net sonuçlara oturtulması için faydalı olacaktır. Bu kapsamda ileride yapılacak çalışmalarda;

- Geri yaylanmanın malzeme mikroyapısı ile daha detaylı ilişkilendirilmesi,
- Malzeme elastisite modülü ve rezilyansının geri yaylanmaya etkisinin araştırılması,
- Farklı kimyasal bileşimde ve/veya mikroyapıda malzemeler üzerinde benzer çalışmaların yapılması gibi ilave işlemler tavsiye edilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Williams, J. C. and Starke, E. A., “Progress in structural materials for aerospace systems1”, *Acta Materialia*, 51 (19): 5775–5799 (2003).
2. Demirci, A. H., “Malzeme bilgisi ve malzeme muayenesi”, *Alfa Yayıncılık*, 121-145 (1982).
3. Köse, A., “Alüminyum alaşımlarda yaşlanma olayı”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 30-40 (2002).
4. Chen, J., Zhen, L., Yang, S., Shao, W. and Dai, S., “Investigation of precipitation behavior and related hardening in AA 7055 aluminum alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 500 (1-2): 34-32 (2009).
5. Starink, M. J., and Li, X. M., “A model for the electrical conductivity of peak-aged and overaged Al-Zn-Mg-Cu alloys”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34 (4): 899-910 (2003).
6. Sha, G., and Cerezo, A., "Early-stage precipitation in Al-Zn-Mg-Cu alloy (7050)", *Acta Materialia* 52 (15): 4503-4516 (2004).
7. Levon, Ç., “Metallere plastik şekil verme”, *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, (2010).
8. Polmear, I. J., “Recent developments in light alloys”, *Materials transactions, JIM*, 37 (1): 12-31 (1996).
9. Sun, Y., “Yaşlanabilir alüminyum alaşımlarının aşınma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-10 (1998).
10. Çakır, A., “AA 7075 ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-10 (2015).
11. Erdoğan, M., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, *Nobel Yayınevi*, Ankara, (1998).
12. Askeland D. R., Fulay, P. P. and Wright, W. J., “The science and engineering of materials, sixth edition”, *Cengage Learning*, Stamford, USA, 539-569 (2010).

13. İnternet: “BMW N52 motoru teknik özellikleri”, [http://www.mwerks.com/artman/publish/features/article\\_960.shtml](http://www.mwerks.com/artman/publish/features/article_960.shtml), (2006).
14. Voort, W. and George, F., et al., “ASM Handbook, Metallography and microstructures”, *ASM International, Materials Park*, OH 44073-0002 107-112, 313-324 (2004).
15. Davis, J. R., “Aluminum and aluminum alloys, ASM Handbook”, *ASM international*, Material Parks, Ohio, 2-7 (1993).
16. Van, H. and Kent, R., “Aluminium Vol. I”, *American Society For Metals*, Metals Park, Ohio, 26-28 (1967).
17. İnternet: ASM Aerospace Specification Metals, “7000 Series Aluminum Alloy” <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6> (2018).
18. İnternet sitesi: Kaiser Aluminum, “Sheet coil and plate alloy 7075 technical data”, [https://www.kaiseraluminum.com/wp-content/uploads/Kaiser\\_Aluminum\\_7075\\_Sheet\\_Coil\\_and\\_Plate.pdf](https://www.kaiseraluminum.com/wp-content/uploads/Kaiser_Aluminum_7075_Sheet_Coil_and_Plate.pdf) (2018).
19. İnternet: “Alcoa alloy 7075 technical data”, [http://www.alcoa.com/gcfp/catalog/pdf/alcoa\\_alloy\\_7075.pdf](http://www.alcoa.com/gcfp/catalog/pdf/alcoa_alloy_7075.pdf) (2009).
20. Gholami, S., Emadoddin, E., Tajally, M. and Borhani, E., “Friction stir processing of 7075 Al alloy and subsequent aging treatment”, *Transaction Nonferrous Metals Society*, China, 25 (9): 2847-2855 (2015).
21. Li, J. F., Peng, Z. W., Li, C. X., Jia, Z. Q., Chen, W. J. And Zheng, Z. Q., “Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminum alloy with various aging treatments”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(4): 755-762 (2008).
22. Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R. and Miller W. S., “Recent developments in aluminum alloys for aerospace applications”, *Materials Science and Engineering A*, 280 (1): 102-107 (2000).
23. Cepeda-Jimenez C. M., Garcia-Infanta J. M., Ruano, O. A., Carreno, F. "Mechanical properties at room temperature of an Al-Zn-Mg-Cu alloy processed by equal channel angular pressing." *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (35): 8649-8656 (2011).
24. Jayaganthan, R., Brokmeier, H. G., Schwebke, B., and Panigrahi, S. K., “Microstructure and texture evolution in cryorolled Al 7075 alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, 496 (1-2): 183-188 (2010).

25. Lee, W. S., Sue, W. C., Lin C. F. and Wu, L. J., “The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 100 (1-3): 116–122 (2000).
26. Gavaş, M. “Sac metallerin şekillendirilmesi”, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 27-32 (2017).
27. Gandhi, A. H., Shaikh, A.A. and Raval, H. K., “Formulation of springback and machinesetting parameters for multi-pass three-roller cone frustum bending withchange of flexural modulus”, *International Journal of Material Forming*, 2 (1): 45–57 (2009).
28. Anık, S., Dikicioğlu, A. ve Vural, M., “İmal Usulleri”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 231-232 (1994).
29. Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, *Beta Basım A.Ş.*, Trabzon, 1-7, 53-79 (1999).
30. Dowling, N. E., “Mechanical\_Behavior\_of\_Materials, Engeneering Methods for Deformation, Fructure and Fatigue, Fourth Edition”, *Pearson Education Limited*, Harlow, England, 57-59 (2013).
31. Ulu, D., “Derin çekme prosesi ile üretilen alüminyum sac metal parçalarına ait veri tabanı oluşturulması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-19 (2008).
32. Boljanovic, V., “Sheet metal forming processes and die design”, *Heat Transmission 2nd Edition, Industrial Press*, New York 17, 23-27 (2004).
33. Van Vlack, L. H., “Malzeme bilimine giriş” Çeviri Editörü, Recep A. Safoğlu, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 153-171 (1990).
34. Roesler, J., Harders, H. And Baeker, M., “Mechanical behaviour of engineering materials, Metals, ceramics, polymers and composites”, *Springer Science and Business Media*, New York, 173, 223 (2007).
35. Hosford, W. F., “Mechanical behaviour of materials”, *Cambridge University Press*, New York, 103, 179, 187, 277 (2005).
36. Meyers, M. and Chawla, K., “Machenical behavior of materials, Second edition”, *Cambridge University Press*, New York, 675 (2008).
37. Meriç, C., Atik, E. Ve Özkaya, E., “Deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının al 99.0’un mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3 (1): 293-298 (1997).

38. Yu, H., Guo, Y. and Lai, X., "Rate-dependent behavior and constitutive model of DP600 steel at strain rate from  $10^{-4}$  to  $10^3$  s $^{-1}$ ", *Materials and Design*, 30 (7): 2501–2505 (2009).
39. Kim, J. H., Kim, D., Han H. N., Barlat, F. and Lee, M. G., "Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling", *Materials Science and Engineering*, 559 (A): 222–231 (2013).
40. Çavuşoğlu, O. ve Gürün, H. "Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29 (4): 777-784 (2014).
41. Bash, V.Y. and Shkaraputa, L. M., "Stability with time of the strain hardening effect of constructional materials", *Strength of Materials*, 20 (3): 358-362 (1988).
42. Manthey, D.W. and Farhat, J. P., "Comparison between steel and aluminium strain rate effects", *Technical papers-society of manufacturing engineers*, 1-10, (1993).
43. Boyer, H. E. and Gall, T. L., "Metals handbooks desk edition", *American Society for Metals*, Ohio, 1-48 (1985).
44. Riedel, H., "Fracture at high temperatures, Materials research and engineering", *Springer Verlag*, Berlin, 14-15 (1987).
45. Lewandowski, J. J. and Lowhaphandu, P., "Effects of hydrostatic pressure on mechanical behavior and deformation processing of materials", *International Materials Reviews*, 43 (4): 145-187 (1998).
46. Bridgman, P. W., "Studies in large plastic flow and fracture", *McGraw-Hill*, New York, 76–78 (1952).
47. Yelbay, H. I., Çam, I., Gür, C. H., "Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique", *NDT&E International*, 43 (1): 29-33 (2010).
48. Dieter, E.G., "Mechanical metallurgy, Metallurgy and metallurgical engineering series", *McGraw-Hill Book Company*, Philadelphie, 393-417 (1961).
49. Weisman, C., "Fundamental of welding", *American Welding Society* 7 (1): 221-230 (1976).



50. Bahadur, A., Kumar, B. R. and Chowdhury, S. G., "Evaluation of changes in X-Ray elastic constants and residual stress as a function of cold rolling of austenitic steels", *Materials Science and Technology*, 20 (3): 387-392 (2004).
51. Kafkas, F., "Tornalanmış parçalardaki kalıcı gerilmelerin sapma yöntemi kullanılarak tahmini", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 1394-1399 (2009).
52. Lin Y. C. and Lee, K. H., "Effect of preheating on the residual stressing type 304 stainless steel weldment", *Journal of Materials Processing Technology*, 63 (1-3): 797-801 (1997).
53. Price, J. W. H., Paradowska, A. Z., Joshi, S., Finlayson, T., Semetay, C. and Nied, H., "Comparison of experimental and theoretical residual stresses in welds: The issue of gauge volume", *International Journal of Mechanical Sciences*, 50 (3): 513-521 (2008).
54. Macherauch, E., "Origin, measurement and evolution of residual stresses", *Residual Stresses in Science and Technology*, 1, 3-25 (1986).
55. Yiğit, O., Dilmeç, M. ve Halkacı, S., "Tabaka kaldırma yöntemi ile kalıcı gerilmelerin ölçülmesi ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması", *Mühendis ve Makine*, 49 (579): 20-27 (2008).
56. Kafkas, F., Karataş, Ç., Sozen, A., Arcaklioğlu, E. ve Saritaş, S., "Determination of residual stresses based on heat treatment conditions and densities on a hybrid (FLN2-4405) powder metallurgy steel using artificial neural network", *Materials and Design*, 28 (9): 2431-2442 (2007).
57. Vishay Micro-Measurements "Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gage method", *Vishay Micro-measurement Tech. Note*, 19-34 (2007).
58. Özer, A. ve Özçatalbaş, Y., "Delik delme yöntemiyle kalıcı/kalıntı gerilmelerin ölçülmesi ve gerinin ölçerlerin kalibrasyonu", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 26 (3): 657-666 (2011).
59. Tekaslan, Ö., Gerger, N. ve Şeker, U., "V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 23 (1): 232-238 (2008).
60. Song, N., Qian, D., Cao, J., Lui, W. K. and Li, S., "Effective models for prediction of springback in flanging", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123 (4): 456-461 (2001).
61. Groover M. P., "Fundamentals of modern manufacturing, Materials, process and systems, 4th Edition", *John Wiley and Sons, Inc*, Danvers, 443-483 (2010).

62. Chudasama, M. K. and Raval, H. K., “Bending force prediction for dynamic roll-bending during 3-roller conical bending process”, *Journal of Manufacturing Processes*, 16 (2): 284–295 (2014).
63. Feng, Z. and Champlaud, H., “Investigation of non-kinematic conical roll bending process with conical rolls”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 27, 65–75 (2012).
64. Hua M. and Lin, Y. H., “Large deflection analysis of elastoplastic plate in steady continuous four-roll bending process”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 41 (12): 1461–1483 (1999).
65. Winshop, J. T., “Basics of roll bending”, *American Machinist*, 127 (2): 105 (1983).
66. Hua, M., “The mechanics of continuous roller bending of plates”, *Ph.D. Thesis, University of Aston*, England (1986).
67. Hua, M., Sansome, D. H., Rao, K. P. and Baines, K., “Continuous four-roll plate bending process: its bending mechanism and influential parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, 45 (1-4): 181-186 (1994).
68. Hua, M., Baines, K. and Cole, I. M., “Bending mechanisms, experimental techniques and preliminary tests for the continuous four-roll plate bending process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 48 (1-4): 159-172 (1995).
69. İnternet: İsitane Makine, “4R HC 4 top konik bükme”, <http://www.isitan.com/urun--4r-hc-4top-konik-bukme.php?x=18> (2017).
70. Zeng, J., Liu, Z. and Champlaud, H., “FEM dynamic simulation and analysis of the roll-bending process for forming a conical tube”, *Journal of Materials Processing Technology*, 198 (1-3): 330–343 (2008).
71. Feng, F., Champlaud, H. and Dao T. M., “Numerical study of non-kinematic conical bending with cylindrical rolls” *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (10): 1710–1722 (2009).
72. Hua M., Sansome D. H. and Baines K., “Mathematical modeling of the internal bending moment at the top roll contact in multi-pass four-roll thin-plate bending”, *Journal of Materials Processing Technology*, 52 (2-4): 425–459 (1995).
73. Hua, M. and Lin, Y. H., “Effect of strain hardening on the continuous four-roll plate edge bending process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 89: 12–18 (1999).

74. Hua, M., Cole, I. M., Baines, K. and Rao, K. P., "A formulation for determining the single-pass mechanics of the continuous four-roll thin plate bending process", *Journal of Materials Processing Technology*, 67 (1-3): 189–194 (1997).
75. Lin, Y. H. and Hua, M., "Influence of strain hardening on continuous plate roll-bending process", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 35 (5): 883–896 (2000).
76. Gandhi, A. H., Gajjar, H. V. and Raval, H. K., "Mathematical modelling and finite element simulation of pre-bending stage of three-roller plate bending process", *ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing*, American Society of Mechanical Engineers, 617–625 (2008).
77. Gandhi, A. H., "Investigation on machine setting parameters for 3-roller conical bending machine for springback", Ph.D. Thesis, *S V National Institute of Technology*, 1-20 (2009).
78. Yang, M. and Shima, S., "Simulation of pyramid type three-roll bending process", *International Journal of Mechanical Sciences*, 30 (12): 877–886 (1988).
79. Osakada, K., Yang, G. and Mori K., "Determination of optimum forming path in three-roll bending by combination of fuzzy reasoning and finite element simulation", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 42 (1): 291–294 (1993).
80. Shin, J. G., Lee, J. H., Kim, Y. I. and Yim, H., "Mechanics-based determination of the center roller displacement in three-roll bending for smoothly curved rectangular plates", *Journal of Mechanical Science and Technology* 15 (12): 1655–1663 (2001).
81. Fan, S. T. and Meng, S.F., "Simulation of the three-roll pyramid type plate bending machine: multi-bending process", *Machinery Design and Manufacture*, 6: 82–84 (2007).
82. Tekaslan, Ö., Şeker, U. and Özdemir, A., "Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies", *Materials and design*, 27 (3): 251-258 (2006).
83. Işıktaş, A. ve Ay, A., "Farklı kalınlıklardaki Dkp sacın farklı açılarda yapılan V-Bükme işlemindeki geri esnemelerinin incelenmesi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17 (1): 59-69 (2015).
84. Esat, V., Darendeliler, H. ve Gökler, M. I., "Finite element analysis of springback in bending process", *Materials and Design*, 23 (2): 223-229 (2002).

85. Krinninger, M., Opritescu, D., Golle, R. and Volk, W., “Experimental investigation of the influence of punch velocity on the springback behavior and the flat length in free bending” *Procedia CIRP*, 41: 1066 – 1071 (2016).
86. Güneş, A. T., “Pres İşleri Tekniği”, *Erk Yayıncılık*, Ankara 184-241 (1989).
87. Wang, C. T., Kinzel, G. and Altan T., “Mathematical modeling of plane-strain bending of sheets and plates”, *Journal of Materials Processing Technology*, 39 (3-4): 279–304 (1993).
88. Sidebottom, O. M. and Gebhardt, C. F., “Elastic springback in plates and beams formed by bending”, *Experimental Mechanics*, 19 (10): 371–377 (1979).
89. Gan, W. and Wagoner, R. H., “Die design method for sheet springback”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 46 (7): 1097-1113 (2004).
90. Tekiner, Z., “An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies”, *Journal of Materials Processing Technology*, 145 (1): 109-117 (2004).
91. Kalpakjian, S. “Manufacturing engineering and technology, 6th Edition”, *Prentice Hall*, New York, 381-431 (2012).
92. Gu, X., Franzke, M., Bambach, M. and Hirt G., “Experimental and numerical investigation of grid sheet bending behavior in four-roll bending”, *CIRP annals*, 59 (1): 303–306 (2010).
93. Feng, Z., Champlaud, H. and Dao, T. M., “Modeling and simulation of conical bending with cylindrical rolls”, *Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Materials and Fabrication*, 545–550 (2007).
94. Feng, Z., Champlaud, H., Zeng, J., and Dao, T. M., “Investigation of influence of sliding of rolls over plate on continuous conical bending”, *The 18th IASTED International Conference on Modelling and Simulation*, 527-531 (2007).
95. Feng, Z. and Champlaud, H. “Three-stage process for improving roll bending quality”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19 (2): 887–898 (2011).
96. Hussey, B. and Jo Wilson, J., “Light alloys, Direktory and data book, 1st ed.”, *Springer-Science+Business Media, B.V.*, 48 (1998).
97. Güleryüz, K. Ve Kaçar, R., “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”- *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, Elazığ, 147-152 (2011).

98. Rengarajan, S. and Rao, V. S., “Characteristics of AA7075-T6 and AA6061-T6 friction welded joints”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 39 (4): 845-854 (2015).
99. Chemingui, M., Khitouni, M., Jozwiak, K., Mesmacque, G., and Kolsi, A., “Characterization of the mechanical properties changes in an Al–Zn–Mg alloy after a two-step ageing treatment at 70 and 135°C”, *Materials and Design*, 31 (6): 3134-3139 (2010).
100. Kaçar, R., and Güleriyüz, K., “Effect of Quenching Rate and Pre-strain on the Strain Ageing Behaviors of 7075 Aluminum Alloys”, *Materials Research*, 18 (2): 328-333 (2015).
101. Baydoğan, M., “Retregasyon ve yeniden yaşlandırma uygulanmış 2014 ve 7075 kalite alüminyum alaşımlarının mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi”, Doktora tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 20-80 (2003).
102. Shah, J. R., Sharma, S. K. and Patel, B. C., “Investigating springback effect in U-Die Bending Process by varying different Parameters”, *Nirma University International Conference on Engineering*, Ahmedabad, 01-6 (2011).
103. Chikalthankar, S. B., Belurkar, G. D. and Nandedkar, V. M., “Factors affecting on springback in sheet metal bending: a review”, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3: 247-251 (2014).

## ÖZGEÇMİŞ

Çetin BATUK 1984 yılında Kastamonu' da doğdu, ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2002 yılında Sezai Türkeş-Fevzi Akkaya Anadolu Teknik Lisesi Makine Bölümü' nü bitirdi. 2002 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2006 yılında mezun oldu. 2006 yılında Mazsan Makine firmasında Kalite Kontrol Sorumlusu olarak işe başladı. Aynı yıl içerisinde Modül Kalıp Elemanları firmasına başlayarak CAD/CAM sorumlusu olarak dört yıl çalıştı. 2011 yılında Kale Havacılık A.Ş. firmasına başladı ve burada Proje Proses Mühendisi olarak dört yıl çalıştı. 2014 yılında TUBİTAK SAGE Kurumu'nda Mekanik Üretim ve Bütünleme Birimi' nde Uzman olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Turgut Özal Mah. 2220. Cad. Öz Barem Sit. 17A/19  
Yenimahalle / ANKARA  
Tel : (0543) 486 8993  
E-posta : [cetinbatuk2@gmail.com](mailto:cetinbatuk2@gmail.com)