

**AA 2024 VE AL 5754 SAC METAL MALZEMELERDE BÜKME
ESNASINDA OLUŞAN GERİ ESNEME MİKTARININ DENEYSEL
VERİLERLE MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ**

MEHMET FAHRİ TİRYAKİOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2013

ANKARA

Mehmet Fahri TIRYAKIOĞLU tarafından hazırlanan "AA 2024 VE AL 5754 SAC METAL MALZEMELERDE BÜKME ESNASINDA OLUŞAN GERİ ESNEME MİKTARININ DENEYSEL VERİLERLE MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ" adlı bu tezin Yüksek Lisans olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

.....

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN

.....

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç.Dr. Hakan ATEŞ

.....

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih : 25.07.2013

Bu tez ile Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof.Dr.Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

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

Mehmet Fahri TIRYAKIOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN'e, analiz çalıőmalarımdaki katkılarından dolayı Arő. Gör. Onur Çavuşoğlu'na, çalıőmalarımda deney malzemelerin tedarik edilmesinde ve engin tecrübelerinden ötürü bana destek veren TÜRK HAVA YOLLARI TEKNİK A.ő. ile çalıőanlarına ve beni yetiőtirip bu günlere getiren aileme teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	x
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. BÜKME PROSESİNDE GERİ ESNEME	11
3.1. Bükme Teorisi	11
3.2. Bükme Çeşitleri	11
3.2.1. Bükme	11
3.2.2. Kenar bükme	12
3.2.2. Kıvrırma bükme	12
3.2.2. Katlama ve kenet bükme	13
3.2.2. Oluklama bükme	13
3.2.2. Kabartma bükme	13
3.3. Geri Esneme	14
3.4. Geri Esnemeye Etki Eden Faktörler	15
3.4.1. Bükme yarı çapının geri esnemeye etkisi	16

	Sayfa
3.4.2. Bükme açısının geri esnemeye etkisi	18
3.4.3. Parça kalınlığının geri esnemeye etkisi	18
3.4.4. Malzeme cinsinin geri esnemeye etkisi	18
3.4.5. Kalıp boşluğunun geri esnemeye etkisi	20
3.4.6. Bükme kuvvetinin geri esnemeye etkisi	20
3.4.7. Federlemenin geri esnemeye etkisi	21
3.4.8. İşlem parametrelerinin geri esnemeye etkisi	21
3.4.9. Hadde yönünün geri esnemeye etkisi	22
3.5. Bükmede Geri Esnemeyi Giderme Yöntemleri	23
3.5.1. Bükme açısının artırılması	23
3.5.2. Çift bükme tekniği	24
3.5.3. Ezerek bükme	24
3.5.4. Gererek bükme	25
3.5.5. Zimba ucunun iç bükey yapılması	26
3.5.6. Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi	27
5. METALLERE PLASTİK ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ	28
4.1. Plastik Şekil Değiştirme Mekanizmaları	28
4.2. Metallerin Kristal Yapısı	30
4.3. Tek Kristallerde Şekil Değişimi	31
4.3.1. Kayma	31
4.3.2. İkizlenme	31
4.3.3. Taneler ve tane sınırları	32

	Sayfa
4.4. Malzemelerin mekanik davranışları	32
4.5. Malzeme çekme deneyi	33
4.6. Çekme diyagramı	35
4.7. Metallere Plastik Şekil Verme Yöntemleri	38
4.7.1. Dövme	38
4.7.2. Ekstrüzyon	39
4.7.3. Haddemeleme	39
4.7.4. Derin çekme	40
4.7.5. Tel çekme	40
4.7.6. Boru çekme	41
4.7.7. Gererek şekillendirme	41
4.7.8. Sıvama	41
4.8. Çekme Deneyi İle Elde Edilen Malzeme Özellikleri	42
4.8.1. Malzemelerin mekanik özellikleri	42
4.8.2. Malzemelerin fiziksel özellikleri	45
4.8.3. Malzemenin kimyasal özellikleri	45
4.8.4. Malzemenin elektriksel özellikleri	46
4.9. Alaşım elementleri ve özellikleri	46
5. MATERYAL VE METOD	49
5.1. Deneysel Çalışmalar	49

	Sayfa
5.1.1. Deney Malzemeleri	49
5.1.2. Bükme kalıbının tasarımı ve hesaplaması	50
5.1.3. Deneysel çalışmada kullanılan makine ve cihazlar	55
5.2. Analiz çalışmaları	57
5.3. Metot	64
6. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME	67
6.1. 60°lik Bükme Deneyleri	67
6.2. 90°lik Bükme Deneyleri	70
6.3. 120°lik Bükme Deneyleri	74
6.4. Değerlendirme	77
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
7.1. Deney Sonuçları	91
7.2. Öneriler	93
KAYNAKLAR	94
EKLER	98
EK-1. Bükme işleminde kullanılan V bükme kalıbı komple ve detay resimleri.....	99
EK-2. Deney sonuçlarını gösteren geri esneme tabloları	102
EK-3. Deney sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri	105
ÖZGEÇMİŞ	112

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Tek taraflı kalıp boşluğu değerleri.....	20
Çizelge 4.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı	30
Çizelge 5.1. AL 5754 Alüminyum malzeme için kimyasal analiz raporu	49
Çizelge 5.2. AA 2024 Alüminyum malzeme için kimyasal analiz raporu	50
Çizelge 5.3. Pres tezgâhının teknik özellikleri	56
Çizelge 5.4. AL 5754 sac numunelerin Autoform programında 60°, 90° ve 120° bükülmesi sonucunda elde edilen analiz verileri.....	62
Çizelge 5.5. AA 2024 sac numunelerin Autoform programında 60°, 90° ve 120° bükülmesi sonucunda elde edilen analiz verileri	63
Çizelge 5.6. Deney serilerinde kullanılan zımba açıları ve zımba uç kavisleri	64
Çizelge 5.7. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametreleri	65
Çizelge 6.1. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac malzemelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri	68
Çizelge 6.2. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac malzemelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri	70
Çizelge 6.3. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac malzemelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri	71
Çizelge 6.4. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac malzemelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri	73
Çizelge 6.5. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac malzemelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri	74
Çizelge 6.6. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac malzemelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil.2.1. Düz baskı analitik modellemede çeşitli şekil değiştirmelerinin gösterilmesi	4
Şekil 2.2. Elastik kalıp ile bükme işleminin şematik olarak gösterilmesi	7
Şekil 2.3. Bükme teknikleri	8
Şekil 2.4. Geri esneme simülasyonu için sonlu elemanlar analiz modeli	9
Şekil 3.1. Uzama ve basılma gerilimleri ve uygulanan kuvvetlerin yönleri	11
Şekil 3.2. Çeşitli bükme örnekleri	14
Şekil 3.3. Geri esneme ve geri esneme kuvveti	15
Şekil 3.4. Bükme işlemi operasyon sırası ve geri esnemenin oluşumu	15
Şekil 3.5. Bükme işlemi esnasında K faktörünün hesaplanması	17
Şekil 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan 60°, 90° ve 120° bükme açıları	18
Şekil 3.7. Bükme kavis yarıçapların, sac malzeme cinsine ve parça kalınlığına göre ve geri esneme faktörü arasındaki bağıntı diyagramı	19
Şekil 3.8. Farklı biçim ve kalınlıkta federleme işlemi uygulanmış örnek iki adet parça	21
Şekil. 3.9. Bükme işleminde hadde yönünün gösterilmesi, a) Hadde yönüne paralel bükme b) Hadde yönüne dik bükme	22
Şekil 3.10. Bükme açısının arttırılması yöntemi	23
Şekil 3.11. Çift bükme tekniği	24
Şekil 3.12. Taban (ezme) Bükme İşleminin Şekil Olarak Anlatılması	25
Şekil 3.13. Gererek bükme işlemi	26
Şekil 3.14. Zimba ucunun iç bükey yapılması yöntemi	27
Şekil 4.1. Hegzagonal, tetragonal ve kübik kafes yapıları	28

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. a) Bir metal kafesinin normal kuvvetler etkisi altında şekil değiştirmesi b) Bir metal kafesinin teğetsel kuvvet çiftinin etki ile elastik şekil değiştirmesi	29
Şekil 4.3. Atomlar arası kayma	29
Şekil 4.4. Tek kristalin şekil değişimi, a) Şekil değişiminden önce kristal yapı, b) Kayma c) Mekanik ikizlenme	31
Şekil 4.5. Üç temel şekil değişimi, a) Basma, b) Çekme, c) Kayma	33
Şekil 4.6. Çekme deney çubuğu	34
Şekil 4.7. Sünek bir metalin mühendislik çekme diyagramı	35
Şekil 4.8. Mühendislik çekme diyagramı	36
Şekil 4.9. Çekme diyagramında uzama, büzülme ve kopma	37
Şekil 4.10. a) Açık kalıpla dövme b) Kapalı kalıpla çapaklı dövme	38
Şekil 4.11. Ektrüzyon yöntemi ile üretilmiş parça	39
Şekil 4.12. Haddeleme uygulama örneği	39
Şekil 4.13. Derin çekme uygulama örneği	40
Şekil 4.14. Gererek şekillendirme yöntemi	41
Şekil 4.15. Çeşitli sıvama örnek parçaları	42
Şekil 4.16. Gerilme uzama diyagramı	42
Şekil 5.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve bölümleri	56
Şekil 5.2. Analiz işlemlerinde kullanılan 60° V bükme modeli	58
Şekil 5.3. Sac malzemelerin Autoform paket programı ile bükülmesi sonucu elde edilen geri esneme açısının bulunması	59
Şekil 5.4. Bükme işleminin sonucunda elde edilen geri esnemenin grafik ile gösterilmesi	59

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. 1 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 60°'lik V bükme analizinde elde edilen örnek bükme modeli	60
Şekil 5.6. 1 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 90°'lik V bükme analizinde elde edilen örnek bükme modeli	60
Şekil 5.7. 1 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 120°'lik V bükme analizinde elde edilen örnek bükme modeli	61
Şekil 5.8. 1 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 60°'lik V bükme analizi esnasında oluşan kopmanın gösterilmesi	61
Şekil 6.1. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerinin 60°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları	67
Şekil 6.2. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları	69
Şekil 6.3. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları	71
Şekil 6.4. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları	72
Şekil 6.5. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları	74
Şekil 6.6. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Deneyleerde kullanılmak üzere hazırlanmış numuneler.....	50
Resim 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan bükme zımbaları	54
Resim 5.3. Deneyleerde kullanılan dişi plaka	54
Resim 5.4. Kalıp üst ve alt grup montajı	55
Resim 5.5. Kalıp komple montajı	55
Resim 5.6. Bükme işleminde kullanılan pres tezgahı	56
Resim 5.7. Ölçme işleminde kullanılan profilometre	57
Resim 6.1. 1 mm kalınlığındaki AL 2024 sac numunelerin, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonucu meydana gelen kopma örneği	78
Resim 6.2. 1,0; 1,5 ve 2,0 mm kalınlığındaki sac numunelerin 60° ve 90°'lik bükme işleminde, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımbalar kullanılarak yapılan deneyler sonucu elde edilen numuneler	79
Resim 6.3. 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac malzemelerin, 60° açılı ve 1, 2 ve 4mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonucu elde edilen numuneler	87
Resim 6.4. 1-1,5 ve 2 mm kalınlıktaki AL 5754 sac malzemelerin, 60° açılı ve 2 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler ...	88
Resim 6.5. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac malzemelerin, 120° açılı ve 1 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler...88	
Resim 6.6. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac malzemelerin, 60° açılı ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler ...89	
Resim 6.7. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac malzemelerin, 90° açılı ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler89	
Resim 6.8. 1,5 mm kalınlığındaki AA 2024 sac malzemelerin, 60°, 90° ile 120°'lik ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler.. 90	

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgelerin açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
Cr	Krom
Cu	Bakır
Fe	Demir
Mn	Mangan
Si	Silisyum
Ni	Nikel
Sn	Kalay
Pb	Kurşun
Mb	Burulma momenti, Nmm
E	Elastikiyet modülü, N/mm ²
t	Sac malzeme kalınlığı, mm
b	Sac malzeme genişliği, mm
r	Bükme yarıçapı, mm
K	Geri esneme sabiti
σ_{ζ}	Çekme dayanımı (kg/mm ²),
σ_a	Akma dayanımı (kg/mm ²),
δ_{10}	Kopma uzaması (%)
R_1	Kavis yarıçapı, mm
R_d	Kalıp kavis yarıçapı
α_d	Kalıp açısı
α	Parça bükme açısı
B	Şerit malzeme eğim açısı
$\Delta\alpha$	Kalıp açısı, mm
Simgeler	Açıklama

W	Kalıp açıklığı, mm
P_b	Bükme kuvveti (N/mm ²)
P_e	Son bükme kuvveti (N/mm ²)
c	Katsayı

1. GİRİŞ

Endüstride seri imalatı yapılması gereken birçok parça, kullanım alanlarına göre sac metal veya hacim kalıplarından yararlanılarak üretilmektedir. Ülkemiz de bu konuda her geçen gün kendisini bir adım daha ileriye götürmektedir.

Günümüzde bir çok ülke ekonomik olarak birbirleriyle rekabet içerisinde. Bu rekabette, günlük hayatta ve endüstride kullanılan birçok parçanın düşük maliyetle üretilmesi gerekmektedir. Bu üretimde sac metal kalıpcılığının önemi büyüktür. Sac metal kalıplarıyla, sac malzemelerden talaş kaldırma işlemi yapılmadan istenilen boyut ve profillerde parçalar seri olarak üretilebilmektedir.

Sac metal kalıplarıyla üretilen parçalar; endüstride otomotiv parçaları, havacılıkta uçak parçaları, mutfak eşyaları, elektrik ve elektronik parçalar gibi çeşitli alanlarda kullanılan parçalardır. Otomobilin tüm kaporta işlemleri, televizyon metal parçaları, uçakların slat denilen kanat ön kenarı vb. örnekleri sayabiliriz.

Kalıpcılığının en önemli uygulama alanlarından biriside bükme kalıpcılığıdır. Bükme, ısı ile veya ısı yardımı olmaksızın, talaş kaldırmadan, malzemenin bir eksen etrafında biçimlendirilmesi işlemidir. Bükmenin amacı, konstrüksiyon şartlarına göre, istenen parçayı meydana getirmektir [1].

Sac metallere form verildiğinde oluşan geri esneme, artan gerilimle birlikte metal malzemeler için kaçınılmaz sonuçlardan birisidir. Diğer taraftan, basit bir bükme işleminde dahi bükme kavisinin dış kısmında uzama gerilmesi artarken iç kısmında artan baskı gerilmesi oluşmaktadır [2]. Sac parçalara form verilmesinde yada kalıcı şekil verme işlemi sırasında bir miktar elastik olarak yer değiştirmesi de geri esneme olarak adlandırılır.

Bükmede geri esneme çalışmaları incelendiğinde, farklı cins malzeme, açı, kalınlık, ve zımba uç kavislerinde geri esneme miktarını veren sonuçların yetersiz olduğu görülmüştür. Özellikle havacılık sektöründe sık kullanılan AA 2024 malzemeler için

yapılan deneysel çalışmalar oldukça azdır. Bu nedenle tasarımcısı yada imalatçı, kalıba verilmesi gereken açığı ya hesaplamak ya da deneme yanılma yoluyla bulmak zorunda kalmıştır. Bu yöntemler de hem zaman hem para kaybına yol açmaktadır. Bu çalışmada, AA 2024 ile AL 5754 sac parçaları kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen sonuçların gelecekte yapılacak çalışmalara ışık tutması hedeflenmiştir.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, iki farklı malzeme için geri esneme miktarlarının ortaya konması amaçlanmıştır. Havacılık sektöründe kullanılan AA 2024 ve otomotiv sektöründe kullanılan AL 5754 alüminyum sac malzemeler, üç farklı kalınlıkta, üç farklı uç kavisli zımbayla ve üç farklı açıda bükülerek geri esneme grafikleri oluşturulmuş ve bu grafikler literatüre kazandırılmıştır.

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi için 60°, 90°ve 120°lik bükme kalıpları tasarlanmış ve imal edilmiştir. Zımba uç yarıçapının etkisinin belirlenebilmesi için erkek zımbanın uç kavis yarıçapı, 1 mm, 2 mm ve 4 mm olarak imal edilmiş ve R1, R2 ve R3 olarak gösterilmiştir. Bu uç kavis yarıçaplarının geri esnemeye olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda 216 adet deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deney 3'er defa tekrar edilerek 3 ayrı numune üzerinde ölçmeler yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Kalıp teknolojisinde kullanılan malzemelerin önemi oldukça büyüktür. Kullanılan sac malzemeler ürünlerin ömrüne doğrudan etki etmektedir ve üretim esnasında çeşitli sorunlar doğurmaktadır. Saclarda meydana gelen geri esneme, karşılaşılan bu sorunlardan bir tanesidir. Bu nedenle istenilen özellikte ürünün üretilmesi için çeşitli şartların sağlanması gerekmektedir. Sac metal malzemelerde geri esneme ile ilgili çalışmalar literatürde yerini almıştır.

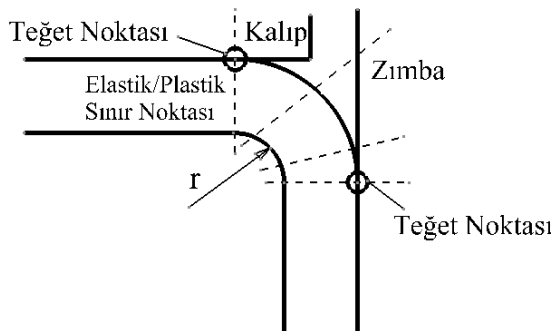
Ötü ve arkadaşları, AA 5754 ve AL 1050 alüminyum sac numuneleri, 60°'lik V bükme kalıbında bükerek ön gerilmelerin geri esnemeye olan etkisini araştırmışlardır. Dört farklı bükme metodu uygulayarak, iki farklı kalınlıktaki numuneleri en az 3'er defa bükme suretiyle yaklaşık 500 adet deney numunesi bükmüşlerdir. Elde edilen değerler bilgisayar ortamında değerlendirilmiş ve geri esneme grafiklerini çıkarmışlardır. Grafiklerin kullanılabilirliği tartışılarak geri esneme değerleri açısından dört farklı bükme metodu içerisinde ikisinin kullanılmayacağını tespit etmişlerdir. Çalışmada kullanılan zımbaların uç yarıçaplarının artması ile zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilme süresinin geri esnemeyi azalttığı, sac malzeme kalınlığının artmasının geri esnemeyi azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca sac malzemelerin anizotropik özelliğinin geri esneme açısından farklılıklar oluşturduğu tespit edilmiştir [3].

Tekaslan ve arkadaşları, geri esnemenin tespit edilebilmesi için, modüle bir V bükme kalıbı tasarlayarak, çok yaygın olarak kullanılan bakır sac malzemelerin farklı bükme açılarındaki geri esneme miktarlarını tespit etmişler ve bu özelliklere bağlı kalarak geri esneme grafikleri elde etmişlerdir. Modüler 18 değişik kalıpta, dört değişik bükme metodu kullanılarak üç farklı kalınlıktaki bakır malzeme için en az 10'ar tane olmak kaydıyla 720'nin üzerinde deney numunesi bükülerek deney sonuçları bilgisayar ortamında değerlendirilerek, geri esneme grafikleri çıkarılmış, geri esneme değerlerinin 0,5° ile 5° arasında değiştiği görülmüştür, farklı bükme metodlarının geri esnemeye etkileri ve elde edilen grafiklerin kullanılabilirliği de tartışılmıştır. Literatürde en çok kullanılan dört farklı bükme metodundan ikisinin geri esneme

açısından kullanılmayacağı tespit edilmiştir. Ayrıca zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilmesinin geri esnemeyi azalttığı, artan malzeme kalınlığının ve bükme açısının geri esneme değerlerini arttırdığını tespit etmişlerdir [4].

Altan ve arkadaşları, serbest düşme yöntemiyle üretilen konik parçalarda oluşan geri esneme miktarlarını, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Geri esnemenin azaltılması için kullanılması gereken en uygun ölçülerin tespiti çalışmalarını yapmışlardır. Bükme esnasında sürtünmenin geri esnemeye etkisinin ihmal edilebilir derecede olduğu tespit edilmiştir. Yapılan araştırmalarda, deneyler sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirilerek geri esnemenin %40 oranında bir azalma görülmüş [5].

Altan ve arkadaşları, sac parçaların bükme işleminde bilinmesi gereken en küçük bükme kavisinin tespiti için analitik ve sayısal modellemeler geliştirilmiştir. Bunun için bilgisayar destekli analizlerden faydalanmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle geri esnemenin tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Analizlerin uzun bir süre alacağını ve bu sorunun çözümünde matematiksel model ile bilgisayar destekli analiz için geliştirilmiş bükme teorilerinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalarda bükme için gerekli olan en küçük bükme kavisini, bükme kuvveti, elastik ve plastik şekil değiştirme alanları gibi bilgiler analizler sonucu tespit edilmiştir. Altan ve arkadaşlarının yaptığı analitik modellemede, sac numunedeki değişim Şekil 2.1'de gösterilmiştir [6].



Şekil 2.1. Düz baskı analitik modellemede çeşitli şekil değiştirmelerin gösterilmesi [6]

Tiryaki ve arkadaşları yapmış oldukları deneysel çalışmada, sac metal numunelerin bükme işleminde, farklı geometrilerde oluşan geri esneme açısının yapay sinir ağı kullanılarak tahminini yapmışlardır. Bunun için sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programı ile bir simülatör geliştirmişlerdir. Analizler yapılırken bükme işlemine ait parametreler verilmiş, çözümlene sonucunda üretim süresince sacın eğim değişimine ulaşılmıştır. Bükme işleminde geri esnemenin tespiti için 16 ayrı uç kavis değeri ve kalınlık belirlenmiştir. Uç kavis miktarı artırıldıkça geri esneme miktarında artış görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, bükme işleminde farklı geometrilerde oluşan geri esneme açısının 3 farklı yapay sinir ağı kullanılarak tahmini de gerçekleştirilmiş ve Matlab programından faydalanılarak geri esneme açısının tahmini yapılmıştır [7].

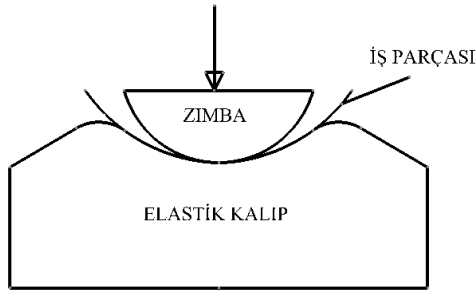
Wagoner ve Gan sacların geri esnemesinde kalıp tasarımının önemi üzerinde durmuşlardır. Ürünlere son şeklinin verilmesinde kullanılan sac şekillendirme metodunu geliştirmişlerdir. Kalıp tasarımında sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak, geri esnemenin tespitinde "Displacement Adjustment Method (DAM)" ve "Karafillis and Boyce (K&B)" metodlarını uygulanmıştır. U ve yay bükme testlerinde daha basit olduğundan dolayı DAM metodunu uygun görülmüştür. Bu iki metodu kullanarak DA metodunun daha etkin ve hızlı olduğunu tespit etmişlerdir [8].

Tekiner, serbest bükme kalıplarında geri esnemenin deneysel olarak tespiti ve sonlu elemanlar yöntemi ile tahmini üzerine çalışmalar yapmıştır. Geri esnemenin tespiti için V bükme kalıbı tasarlanıp imal edilmiştir. üç farklı kalınlık (0,5; 0,75 ve 1 mm), yedi bükme açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° ve 105°) ve her açıda üç farklı bükme kavis değeri kullanılarak bükme deneyleri 18 farklı modüler kalıpla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, çelik, paslanmaz çelik, galvanizli çelik, alüminyum, bakır, pirinç ve alaşımlı çelikler kullanılmıştır. Üretilen parçaların geri esneme değerleri optik projeksiyon cihazıyla ölçülmüş ve elde edilen veriler, bilgisayar destekli sonlu elemanlar analiz programı Marc-Mentat ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bütün numunelerde bükme açısının artmasıyla geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir [9].

Nilsson ve arkadaşları, serbest V bükme kalıplarında oluşan geri esnemeyi, sonlu elemanlar metodu kullanarak test etmeyi amaçlamışlardır. Saclarda geri esnemenin tespitinde tecrübelerin yeterli olmayacağını ve deneysel çalışmalarla bu konuda daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini vurgulamıştır. Çalışmada, 8 farklı malzeme ve değişken kalınlıklar kullanılmıştır. Bükme açısının artmasıyla geri esneme değerinin attığı tespit edilmiştir. Nike2d simülasyon programı ile elde edilen deneysel verilerle kıyaslanmıştır ve geri esnemede yaklaşık 0,5°'lik bir fark olduğu, sonuçların birbirlerine yakın oldukları tespit edilmiştir. Geri esnemenin etkisinin oldukça düşük olduğu görülmüştür [10].

Carden ve arkadaşları, üç farklı otomotiv sacı olan yüksek dayanımlı düşük alaşımli çelik, silikon destekli çelik ve 6022 T4 alüminyum sac malzemeleri kullanarak çeşitli ölçümler yapmışlardır. Bu deneyler esnasında kalıp boşluğu/uç kavisi oranını, sürtünme katsayısını ve kontrollü gerilme kuvvetlerini dikkate almıştır. Baskın bölgelerin yer değişimini ve hangi bölgenin nasıl bir tepki verdiğini tespit etmek için ölçümler yapmışlardır. Yüksek kuvvetler uygulandığında geri esneme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Geri esnemenin analitik modellenmesi için de grafikler oluşturmuşlar ve literatüre kazandırmışlardır [11].

Lin ve arkadaşları, gerilim altındaki elastik kalıp ve zımba ile sac metal malzemelerde oluşan geri esnemenin analitik çözümünü gerçekleştirmiştir. İş parçası kalıp ve zımbaya göre üç parça bölünmüştür. Üretim esnasında geri esnemenin en önemli etkilerinden birinin kalıp ile iş parçası arasında oluşan sürtünmenin olduğunu gözlemlenmiştir. Elastik kalıp sayesinde malzemede sürtünme etkisi azaltılmış ve sabit zımba şekli verilmesi kolaylaşmıştır. Bu yöntem daha karmaşık sacların bükülmesinde de kullanılmıştır. Şekil 2.2'de elastik kalıp ile yapılan bükme işlemi gösterilmiştir [12].

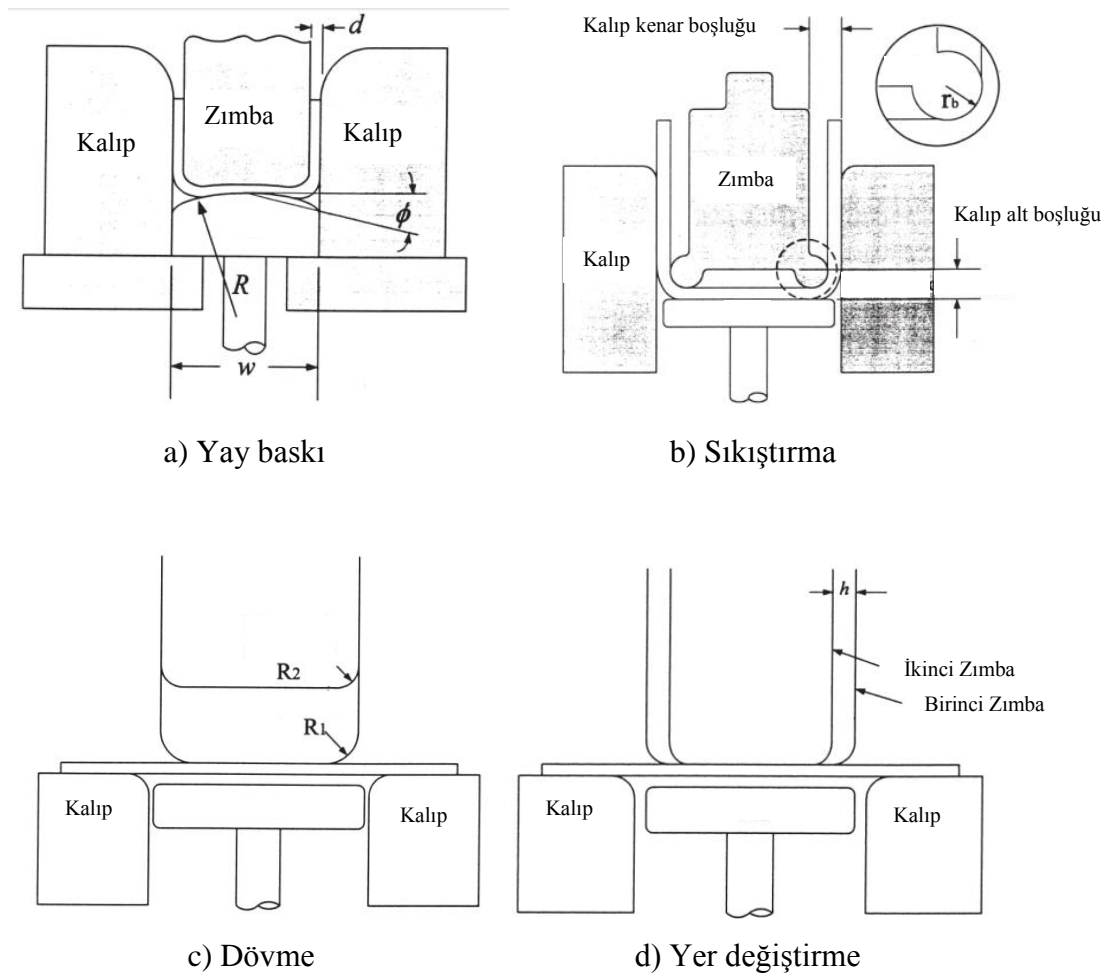


Şekil 2.2. Elastik kalıp ile bükme işleminin şematik olarak gösterilmesi [12]

Moon ve arkadaşları, alüminyum 1050 sac malzemelerdeki geri esneme miktarını azaltmak için zımba ve kalıp sıcaklığının geri esnemeye olan etkilerini araştırmışlardır. 1050 alüminyum sac numuneleri ile U bükme deneyleri yapmışlar ve kalıp sıcaklığı ile zımba soğukluğu arasında parçanın bükülmesini sağlamışlardır. Elde edilen deneysel veriler oda sıcaklığında yapılan bükme deneyleri ile kıyaslanmış ve geri esneme miktarında % 20'ye kadar bir azalma gözlenmiştir. Burada uygun presleme hızı önem arz etmektedir. Çünkü kalıbın sıcaklığının etkinliği, iyi ısıtılıp ısıtılmadığına bağlıdır. 25°C oda sıcaklığındaki kalıp ve -10°C ile +25°C arasındaki zımba ile bükme deneyi sonucunda baskı hızı 1 mm/s'den 10 mm/s'ye çıkarıldığında geri esneme miktarı ortalama 8°'den 8,5°'ye çıkmıştır. Ancak kalıp sıcaklığı artırılarak 100°C'ye çıkarıldığında bu değer 7,5°'den 8,5°'ye çıkmıştır. Yani kalıp sıcaklığının geri esnemeye doğrudan bir etkisinin olduğu görülmektedir [13].

Chou ve arkadaşları, yay baskı, sıkıştırma, dövme ve yer değiştirme metotlarını içeren sonlu elemanlar yöntemiyle U bükme kalıplarında geri esnemenin azaltılması için birkaç teknik kullanmışlardır (Şekil 2.2). HS110 ve AKDQ malzemeleri kullanılarak her bir metotta, form verme parametreleri ile geri esneme arasındaki ilişkileri incelemişler ve her yöntem için en uygun değerleri bulmaya çalışmışlardır. Yay destekli geri esneme metodunda, zımba alt temas yüzeylerinde yeni sınırlamalar olmuştur. Bu nedenle geri esnemede 0,05 mm'lik bir hata payı giderilmiştir. Kısmi yöntemi olan ikinci metotta, zımbada bırakılan boşluğunun geri esnemeyi etkilediği, boşluğunun azalmasıyla geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir. Keskin adı verilen

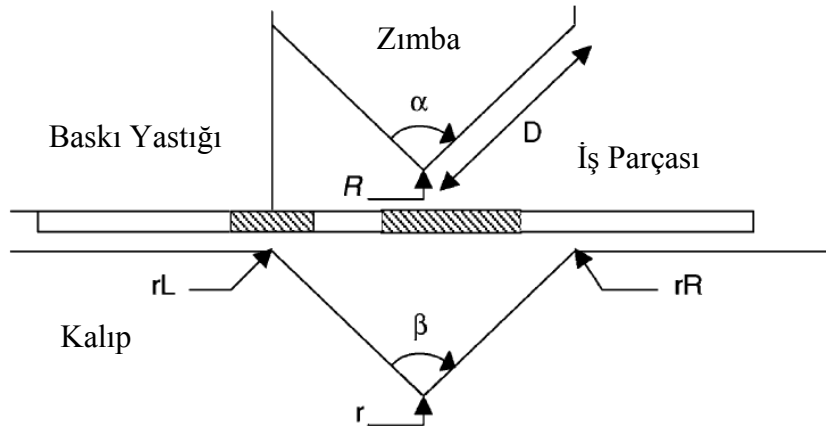
üçüncü yöntemde, farklı köşe kavisleri kullanılarak geri esnemenin önüne geçilmiştir. Önce büyük kavisli zımba ile baskı yapılarak, küçük kavisli zımba ile son haline getirilmiştir. Bu yöntemde geri esneme daha hassas bir şekilde değerlendirilmektedir. Son metot olan kaydırma ile bükme işleminde ise, iki farklı genişlikte zımba kullanılmıştır. Geniş olan zımba ile ilk bükme gerçekleştirilip, ikinci zımba ile de parçaya son hali verilmiştir. Şekil 2.3'de çeşitli bükme teknikleri gösterilmiştir [14].



Şekil 2.3. Bükme teknikleri a) Yay baskı b) Sıkıştırma c) Dövme d) Yer değiştirme [14]

Chan ve arkadaşları V bükme kalıplarında sac metal şekillendirme işleminde, geri esnemenin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi üzerinde çalışmalar yapmışlardır

(Şekil 2.3). Yapılan deneylerde geri esnemenin, dişi kalıbın V bölgesinde ve kalıp uç kısmında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Farklı zımba parametreleri olan zımba uç kavisi, zımba açısı ve zımba yarıçapının geri esneme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, geri esnemeye zımba boyutlarının nasıl etki ettiği üzerine de durulmuştur. Yapılan bu çalışmalarda; Abacus/Standart, Abacus/CAE ve Patran yazılımları kullanılmıştır. Kalıbın sert yüzeylerinin ve sac metalin düğüm yerlerinin modellenmesi için Patran, zımba işleminin simülasyonunda Abacus/Standart ve sonuçların analizinde Abacus/CAE yazılımları kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre, zımba uç yarıçapının azalması ve zımba açısının artmasıyla geri esneme azaltılmaktadır. Tüm bu araştırmalar sonucunda geri esnemenin, kalıp uç yarıçapına, zımba açısına ve zımba yarıçapına bağlı olduğu görülmüştür [15]. Şekil 2.3'de sonlu elemanlar analiz modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Geri esneme simülasyonu için sonlu elemanlar analiz modeli [15]

Arezoo ve arkadaşları, bükmede delikli sac metallerde oluşan geri esneme tahmini için, sonlu elemanlar yöntemini ve yapay sinir ağları metodunu kullanmışlardır. Elde edilen bu sonuçları deneysel verilerle kıyaslamışlardır. Silindirik delikleri olan sac parçalarda yapılan bükme deneylerinde meydana gelen geri esnemenin, kare delikleri olan sac parçalarda oluşan geri esnemeye göre daha fazla olduğu, delikli parçalarda geri esnemenin daha az olduğu, ayrıca parçadaki delik sayısının artışının geri esnemeyi yavaşça azalttığını tespit etmişlerdir. Bu verilerin farklı malzeme, baskı kuvveti ve uç kavisi için de aynı olduğu belirtilmiştir [16].

Lia ve arkadaşları, 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile geri esneme analizi üzerine çalışmalarda bulunmuşlardır. Sac parçalara şekil verme işleminden sonra simülasyonlara tabi tutularak kıyaslama yapılmıştır. 2 boyutlu simülasyonda iyi sonuçlar elde etmişler ve 3 boyutta daha iyi neticeler almışlardır [17].

Inamdar ve arkadaşları, bükme işleminde geri esneme tahmini için sac metaller ile deneysel çalışmalar yapmış ve yapay sinir ağları yöntemini de kullanarak geri esneme tahminlerinde bulunmuştur [18].

Chatti ve arkadaşları, malzeme modellemesinde sayısal geri esneme tahminlerinde bulunmuşlardır. Modellemelerinde Bauchinger etkisi yöntemini kullanarak L ve U bükme işlemleri yapmış, deneysel geri esneme açıları ölçülerek sayısal tahminlerde bulunmuşlardır [19].

Gau ve arkadaşları, Bauschinger etkisi yönteminin geri esneme tahmini üzerindeki etkileri üzerinde çalışmalarda bulunmuşlardır. Yapılan bu deneysel çalışmada, üç farklı çelik ve bir adet alüminyum sac malzeme kullanılmıştır. Bauschinger etkisinin, AL 6111-T4 malzemelerde çelik malzemeye göre daha önemli olduğu tespit edilmiştir. Bükme deneylerinden elde edilen verilere göre, alüminyum malzemedeki geri esneme çelik malzemeye göre ortalama 10° daha az olduğu tespit edilmiştir [20].

Yapılan çalışmalarda sac metal kalıpcılığında karşılaşılan geri esneme problemleri üzerinde durulmuştur. Geri esnemenin bilinmesi, hem ürün kalitesi hem de kalıp açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiş ve bunlardan faydalanılmıştır. Matematiksel modellemenin amacı ise, uygun kalıp parametreleri, bükme açısı, bükme kavis yarıçapı, sac numune kalınlığı kullanılarak geri esnemenin önüne geçilmesidir. Çeşitli çalışmalarda farklı sac numuneler kullanılmış ve literatüre kazandırılmıştır. Genel olarak yapılan bu çalışmalar, bükme işlemi esnasında oluşan geri esnemeyi en aza indirgeyerek istenilen boyutlarda üretim yapılabilmesini sağlamaktır.

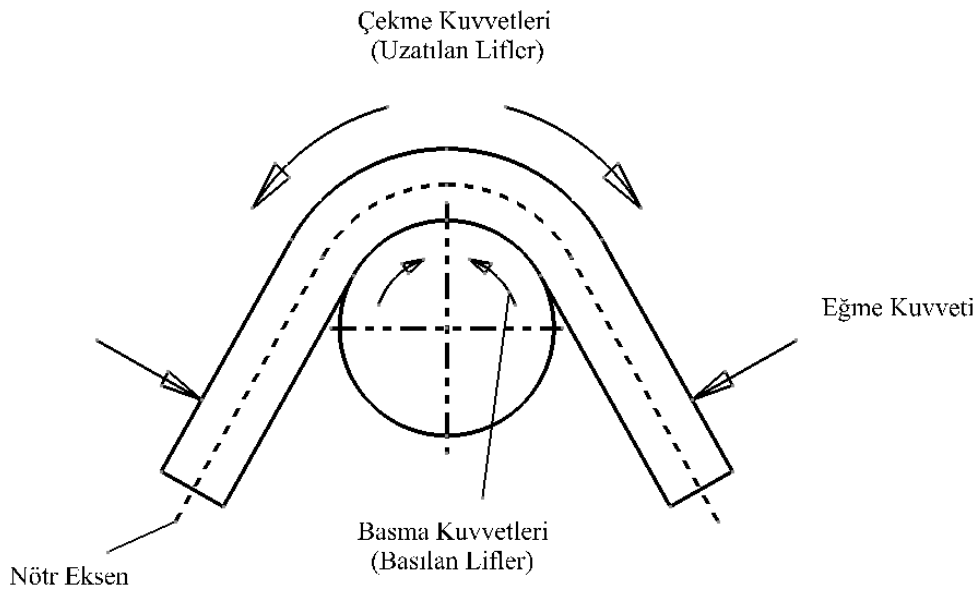
3. BÜKME PROSESİNDE GERİ ESNEME

3.1. Bükme Teorisi

Bükme, ısı ile veya ısı yardımı olmaksızın, talaş kaldırmadan, malzemenin bir eksen etrafında biçimlendirilmesi işlemidir.

Bükme prosesi sac metal parça üzerine bir kuvvet uygulamak suretiyle gerçekleşmektedir. Bükme işlemi preslerde gerçekleştirildiğinden bu kuvvete pres kuvveti denir. Bükme kalıplarında uygulanan pres kuvveti diğer kalıplara göre biraz farklıdır. Çünkü bükme işleminde plastik şekil değişikliğinin sağlanması (kalıcı değişiklik) ve parçanın son biçimini alması gerekmektedir. Bu bakımdan pres kuvveti plastik şekil değişimi meydana gelene kadar uygulanır [26].

Saç parça bükmeye zorlandığı zaman dış yüzeylerde çekilme, iç yüzeylerde basılma gerilimleri oluşur. Bu da çekilme gerilimlerin olduğu yüzeylerin uzaması, basılma gerilimlerinin olduğu yüzeylerin kısılması anlamına gelmektedir. Şekil 3.1'de çekme-basma gerilmeleri ve uygulanan kuvvetler gösterilmiştir [26].



Şekil 3.1. Uzama ve Basılma Gerilimleri ve Uygulanan Kuvvetlerin Yönleri [26]

3.2. Bükme Çeşitleri

Bükme tipleri sac malzemeye verilecek profilin özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Genel olarak bükme çeşitleri altı ana başlık altında toplanmaktadır.

Bunlar;

Bükme,

Kenar bükme,

Kıvrırma bükme,

Katlama ve kenet bükme,

Oluklama bükme,

Kabartma bükme

olarak sıralanmaktadır [2].

3.2.1. Bükme

Sac malzemelerden kesilen parçaya, istenilen şekli vermek veya dayanımını artırmak amacıyla yapılan kalıplama işlemidir. Ayrıca bükme işlemi en çok delinen, boşaltılan veya kanal açılan parçalar üzerindeki bu kısımların şekil değiştirmelerini önlemek ve yırtılmaya karşı dayanım kazandırmak amacıyla uygulanır [2].

3.2.2. Kenar bükme

Kenar bükmede, bükülen parçanın boyu uzar, buruşma ve yırtılma meydana gelebilir. Kenar bükmede meydana gelen buruşma ve yırtılma önlenemez ancak, uzama kontrol altına alınmaz [2].

3.2.3. Kıvrırma bükme

Kalıplanan parçaların kenar dayanımını artırmak, kesmeden dolayı meydana gelen kesici çapakları gidermek ve ayrıca iki parçanın mafsallı olarak birleştirilmesinde uygulanan kalıplama işlemidir [2].

3.2.4. Katlama ve kenet bükme

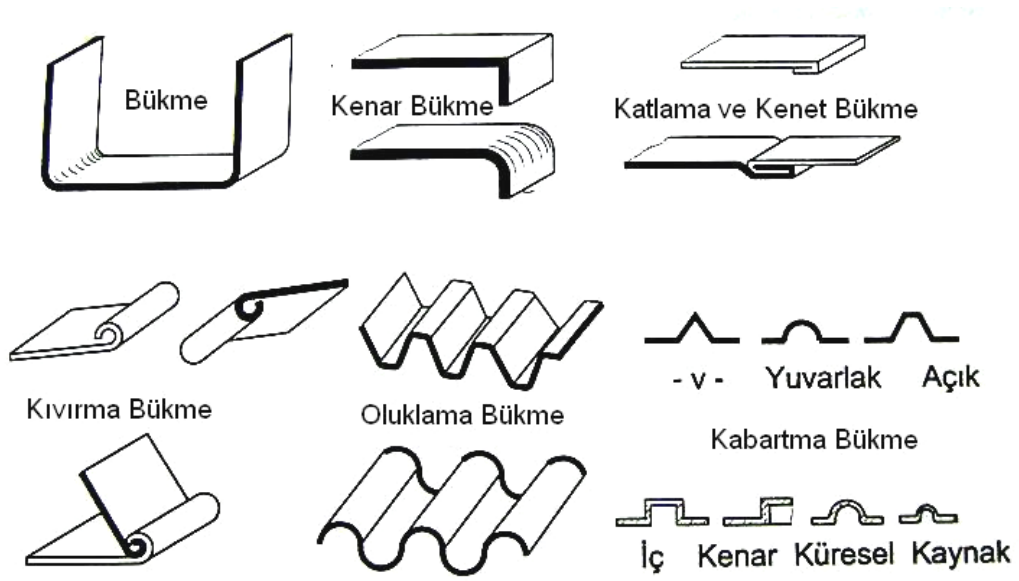
Katlama ve kenet bükme kalıplama işlemleri genellikle giyim eşyası sanayisinde kullanılan sac malzemeden yapılacak makine parçalarına uygulanır. Katlama, sac malzeme ucundaki çapağı giderme ve parçaya dayanım kazandırma amacıyla yapılır. Katlanan uç 180° döndürülür ve birbiri üzerine kalıplanır. Kenet yapma ise iki ucu birleştirilecek silindir, kazan ve benzeri parçalara uygulanır [2].

3.2.5. Oluklama bükme

Düz sac levhaların dayanımını artırmak ve biçimlendirildikten sonra şekil değiştirmesini önlemek amacıyla yapılan kalıplama işlemidir. Genellikle duvar panoları, çatı levhaları, hangar, gölgelik ve benzeri yerlerde kullanılan alüminyum ve galvanizli sac malzemelerden yapılması gereken makine parçalarına uygulanan kalıplama işlemidir [2].

3.2.6. Kabartma bükme

Flaş, kıvrırma, katlama ve benzeri bükme işlemleri genellikle sac malzemelerin uç kısımlarına uygulanır. Kabartma bükme, sac malzemelerin kenar kısımlarından uzak olan yerlerde yapılan çökertme işlemidir. Ayrıca kabartma bükme işlemi, simetrik biçimde kalıplanmayan parça çevresine uygulanır. Kabartma bükme işlemleri, kaburga ve kenar süsleme, ofset ve süsleme kalıplama olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 3.2'de bükme işleminde elde edilen çeşitli örnekler gösterilmiştir [2].

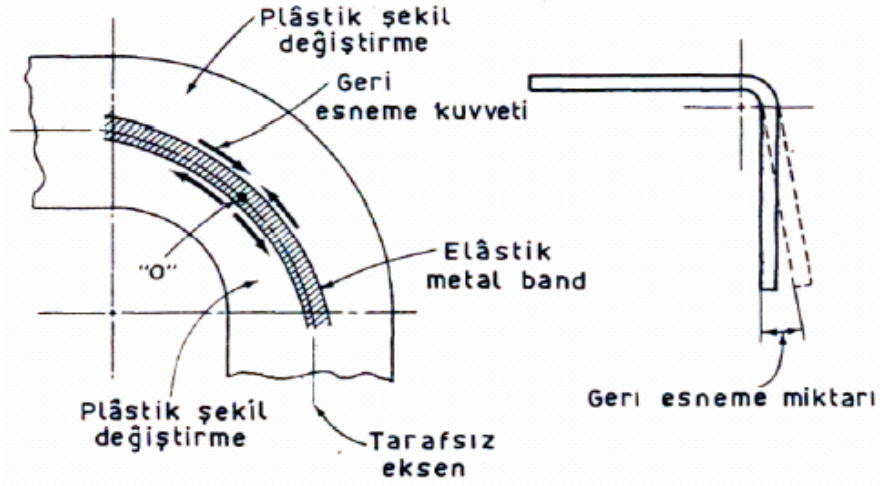


Şekil 3.2. Çeşitli Bükme Örnekleri [26]

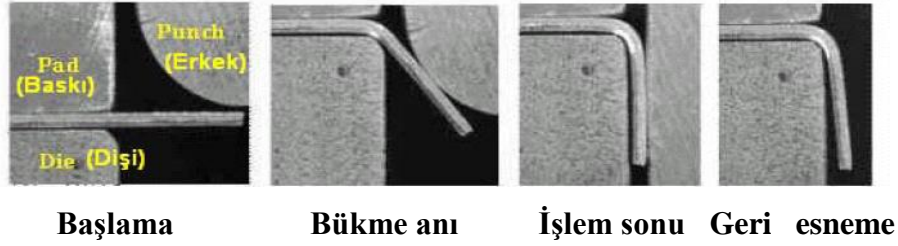
3.3. Geri Esneme

Kalıpta bükme işlemi yapılırken parça üzerinden baskı kuvveti kalktığıında, parça büküldüğü gibi kalmaz. Yani malzeme tam plastik deformasyona uğramaz. Bükülme sonunda küçük değerlerde de olsa, parça üzerinde elastikiyet kalır. Baskı kuvveti kalktığıında, kalan bu elastikiyetlik kuvveti ile parça belli bir açı geri açılır. Bu geri açılma olayın geri esneme denir [24].

Bükme işlemlerinde, sac parçaların iç kısmı basmaya, dış kısmı ise çekmeye zorlanır. Uygulanan kuvvet ile önce akma sınırına, sonra çekme sınırına ulaşılmaktadır. Akma sınırına gelinceye kadar uygulanan kuvvet kaldırılırsa sac parça orijinal haline döner. Eğer kuvvet uygulanmaya devam ederse malzeme elastik halden plastik hale geçer ve kalıcı şekil değişimine uğrar. Sac parçaya uygulanan yük kaldırıldığıında malzeme bir miktar geriye dönmeye çalışır ve parçanın dış kısmında basmaya, iç kısmında ise çekmeye zorlanır. Malzemenin bu bir miktar geriye dönmesi durumu geri esneme (springback) olarak adlandırılmaktadır [2]. Şekil 4.1'de geri esnemenin oluşumu ve geri esneme kuvveti ile Şekil 4.2'de bükme işlemi basamaklar halinde ve oluşan geri esneme gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Geri Esneme ve Geri Esneme Kuvveti [2]



Şekil 3.4. Bükme İşlemi Operasyon Sırası ve Geri Esnemenin Oluşumu [26]

3.4. Geri Esnemeye Etki Eden Faktörler

Gerisneme miktarı birçok faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu faktörlerin en önemlileri aşağıda verilmiştir [26].

- Sac metal parçanın kalınlığı,
- Sac numunelerin cinsi,
- Zımba yükünün malzeme üzerinde kalma süresi,
- Uygulanan bükme kuvveti,
- Hadde yönü,
- Kalıp boşluğu,

- Bükme yarıçapı,
- İşlem parametreleri (sıcaklık, ıslak/kuru işlem vb.),

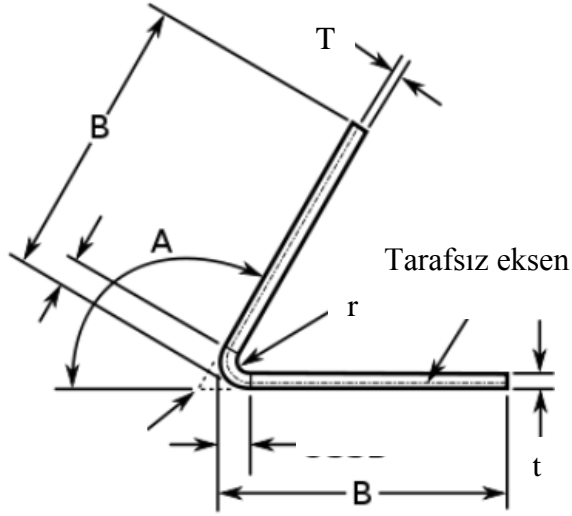
Yukarıda verilen faktörlerin geri esneme üzerindeki etkilerinin neler olduğu ve en önemli bulunanların geri esneme miktarına etkileri aşağıda detaylandırılmıştır [26].

3.4.1. Bükme yarıçapının geri esnemeye etkisi

Bükme işleminde, bükme yarıçapının geri esneme üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Bükme yarıçapı küçüldükçe şekil değişimi artar. Özellikle iç kavis 0° doğru gittikçe, dış tarafta uzama artar ve çatlamalara neden olur. Bu durum bükmede iç kavisin 0 olamayacağını gösterir. Uygun olmayan bir bükme yarıçapı seçimi geri esneme miktarı artırır veya azaltır [26]. Bükme yarıçapının geri esnemeye etkileri şu şekilde özetlenebilir:

- Geri esneme, bükme yarıçapıyla doğru orantılı olarak değişir.
- Bükme yarıçapı büyüdükçe geri esneme miktarı da artmaktadır.
- r/t oranı geri esnemeyi etkiler. r/t oranı arttıkça geri esneme de artar.
- Geri esneme daha çok kavisli kısmın kavisine bağlı olduğundan, kavisin esas yarıçapı ile ilgili daha iyi bir tanımlama vermek için bir K sabiti kullanılır.

K faktörü, sac numunelerin ortasından geçen tarafsız eksenin, sac malzeme kalınlığına oranıdır. Bükme işlemi esnasında numunelerin üst kısmı çekmeye, alt kısmı ise basmaya zorlanır. Tarafsız eksen ise çekilen alandan basılan alana doğru kaymaya başlar. K faktörü, malzeme fiziksel özelliklerine ve kalınlığına göre değişir [43].



Şekil 3.5. Bükme işlemi esnasında K faktörünün hesaplanması [43]

Serbest “V” bükmede geri esneme katsayısının tespitinde kullanılan bir bağıntı aşağıdaki gibidir [43];

$$K = \frac{-R + \frac{BA}{\pi A / 180}}{t} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte;

K = K faktörü,

r = Sac numune iç kavisi,

B = Parça kenar boyu,

A = Bükme dış açısı,

t = Sac kalınlığı,

T = Tarafsız eksenin kenara olan uzaklığıdır.

Bükme işlemi için hesaplanması gereken en küçük bükme kavisi eşitliği denklem 3.2'de verilmiştir [1].

$$r_{min} = S \left(0,0085 \frac{\sigma_b}{\delta_{10}} + 0,5 \right) \quad (3.2)$$

r_{min} = En küçük bükme kavisi (mm),

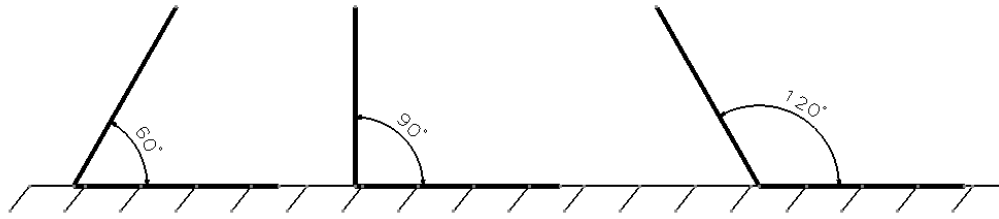
S = Malzeme kalınlığı (mm),

σ_b = Çekme dayanımı (kg/mm²),

δ_{10} = Kopma uzaması (%) [1].

3.4.2. Bükme açısının geri esnemeye etkisi

Bükme açısı geri esneme miktarının etkileyen en önemli etkenlerin başında gelmektedir. İstenilen açıdaki bükmenin elde edilebilmesi için, zimbaya verilmesi gereken bükme açısı geri esneme miktarı kadar azaltılır [26]. Buna aşırı bükme de denilmektedir. Şekil 3.6'da deneysel çalışmalarda kullanılan işlemde kullanılan bükme açıları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Deneysel çalışmada kullanılan 60°, 90° ve 120° bükme açıları

Bükme açısının arttırılması malzeme cinsine göre değişkenlik göstermektedir. Yumuşak çelik, alüminyum, bakır, pirinç için geri esneme sert malzemelere göre daha azdır. Geri esneme miktarı tam olarak bilindiği zaman, kalıp geri esneme miktarı kadar büyük yapılarak istenen bükme sağlanabilir [26].

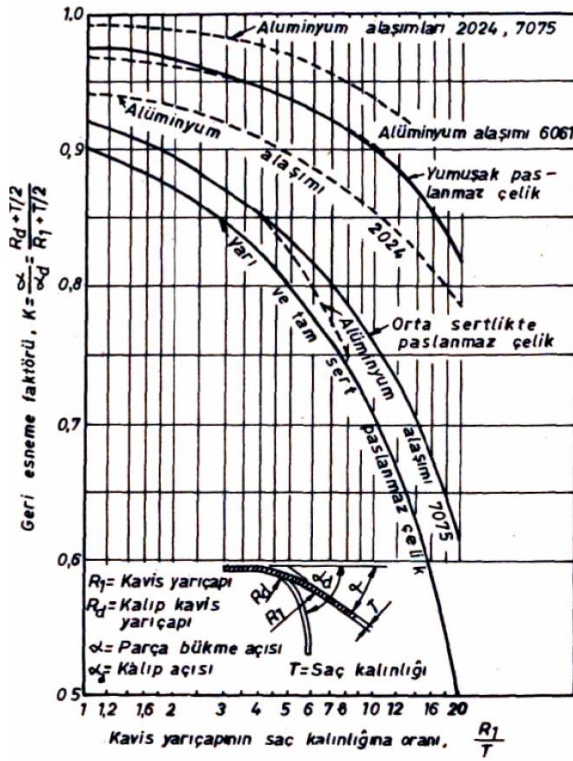
3.4.3. Parça kalınlığının geri esnemeye etkisi

Parça kalınlığı da bükme açısı kadar olmasa da geri esnemeyi etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Sac kalınlığının (t) geri esnemeye etkisi r/t bükme oranına göre

açıklanır. Sac kalınlığı azaldıkça r/t oranı artacağından dolayı geri esneme miktarı da artar. Sac kalınlığı arttıkça r/t oranı azalacağından dolayı geri esneme miktarı da azalır [26].

3.4.4. Malzeme cinsinin geri esnemeye etkisi

Geri esneme miktarı numunelerin cinsine göre önemli değişiklikler göstermektedir. Malzeme cinsi ve özellikleri göz önüne alınarak kalıp tasarımı yapılmasında fayda vardır. Kullanılan sac numunelerin; elastikiyet modülü, akma gerilmesi, kopma gerilmesi gibi önemli parametrelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Sertliği fazla olan sac malzemeler geri esneme miktarını artırır. Yumuşak malzemelerde geri esneme oldukça düşmektedir. Malzeme normalleştirme tavına tabi tutulmuş olması, geri esnemeyi azaltır. Alüminyum ve paslanmaz çelik malzemelerin istatistiki geri esneme faktörü diyagramı Şekil 3.6'da gösterilmiştir [26].



Şekil 3.7. Bükme kavis yarıçaplarının, sac malzeme cinsine ve parça kalınlığına göre ve geri esneme faktörü arasındaki bağıntı diyagramı [26]

3.4.5. Kalıp boşluğunun geri esnemeye etkisi

İstenilen bükmenin elde edilebilmesi için, yani geri esneme miktarının azaltılması için bükme kalıbının kalıp boşluğu iyi ayarlanmalıdır. Genellikle kalıp boşluğunun tek taraflı olarak verilmesinin, geri esnemeyi azalttığı gösterilmiştir [24]. Malzeme kalınlığına göre, tek taraflı kalıp boşluğu değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tek taraflı kalıp boşluğu değerleri [1]

Malzeme Kalınlığı, t, mm	Kalıp Boşluğu
0 - 0,50	(1,07 - 1,09) t
0,50 - 1,25	(1,08 - 1,10) t
1,25 - 3,25	(1,10 - 1,12) t
3,25 ve yukarısı	(1,12 - 1,14) t

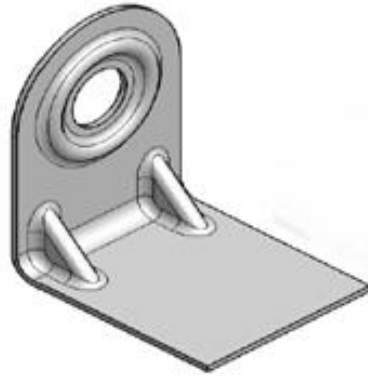
Çizelgeden de anlaşılacağı gibi numunelerin sac kalınlığı (t) arttıkça kalıp boşluğu değerleri de artış göstermektedir. Yani, sac kalınlığı ile kalıp boşluğu doğru orantılı olarak değişmektedir.

3.4.6. Bükme kuvvetinin geri esnemeye etkisi

Komple kalıbı oluşturan elemanların dayanımı, kalıpta meydana gelen kuvvet dağılımına göre hesaplanır. Kalıplama kuvvetine kalıbın çift etkili oluşu, şerit malzemedeki ölçü fazlalığı, uygun olmayan kalıp boşluğu, kalıplanacak parçadaki ölçü fazlalığı ve benzeri sebepler etki etmektedir. Bükme kuvvetinin tam olarak hesaplanması etkin bir bükme yapılmasını sağlayacaktır. Çeşitli deneysel çalışmalar bükme kuvvetinin arttırılmasının geri esnemeyi azalttığını gösterse de, bükme kuvvetinin gereğinden fazla uygulanması hem malzemedeki aşırı şekil değişikliğine yol açacak hem de malzemenin dayanımını ciddi oranda azaltacaktır. Bunun yerine zımba sac malzemenin üzerin de biraz fazla tutularak geri esneme engellenebilir [2].

3.4.7. Federlemenin geri esnemeye etkisi

Federleme; bükülen malzemenin dayanımını arttırmak amacıyla parça üzerine, özel formlar verme, kordon çekme, çeşitli kaburgalar oluşturma gibi işlemlere verilen addır. Amaç, hem malzeme dayanımını arttırmak, hem de geri esnemeyi önlemektir [8]. Şekil 3.7'de parça üzerine oluşturulmuş çeşitli federleme örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Farklı biçim ve kalınlıkta federleme işlemi uygulanmış örnek iki adet parça [26]

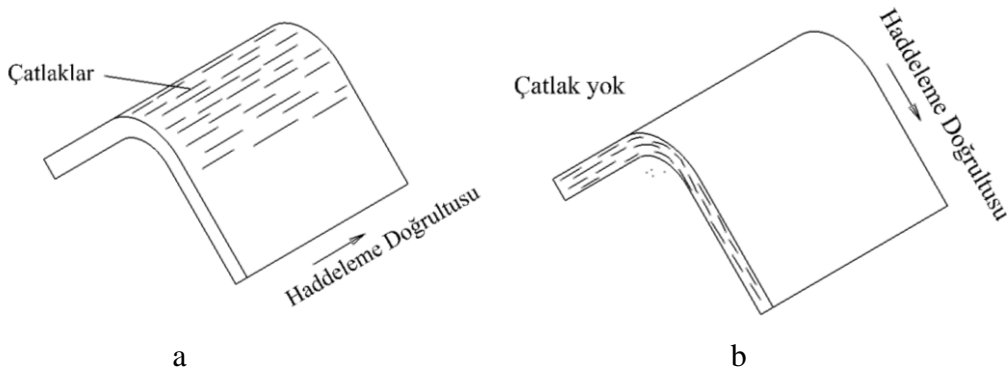
Şekillerden de anlaşılacağı gibi parça üzerinde oluşturulacak feder, hem malzemenin estetik görünümünü bozmayacak, hem de parçanın çalışmasına engel teşkil etmeyecek şekilde tasarlanmalıdır [26].

3.4.8. İşlem parametrelerinin geri esnemeye etkisi

İşlem parametreleri, malzemenin bulunduğu ortamın fiziksel koşulları ile ilgili etkenlerdir. Burada ortamın sıcaklığı, ıslaklığı, kirliliği, ıslak/kuru gibi parametrelerin malzemenin fiziksel özelliklerini az da olsa etkilediği çeşitli deney ve araştırmalarla saptanmıştır. Bu yüzden bükülecek sac malzeme istenilen çalışma koşullarına uygun olarak bükülmeli, büküm yapılan pres ve kalıbın dişi ve erkek kısımları temiz olmalı, ortam sıcaklığı iyi ayarlanmalıdır [26].

3.4.9. Hadde yönünün geri esnemeye etkisi

Anizotropi bükülebilirliği etkileyen en önemli etkendir. Soğuk haddelenmiş saclarda kalıntı ve boşlukların haddeleme doğrultusunda uzaması ve sıralanmasıyla oluşan bantlı yapı malzemede anizotropi doğurur. Bantlı içyapı, haddeleme doğrultusuna dik doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotropudur ve bu doğrultuda süneklik düşüktür. Dolayısıyla bükmede hadde yönü çok önemlidir. Bükme kıvrımı sacın haddeleme yönüne dik olmalıdır aksi takdirde bükme sırasında sac çatlak (Şekil 3.8). Bu nedenle bükülecek bir sac levha veya rulodan kesilirken bu nokta kesinlikle unutulmamalıdır [22].



Şekil 3.9. Bükme işleminde hadde yönünün gösterilmesi, a) Hadde yönüne paralel bükme b) Hadde yönüne dik bükme [22].

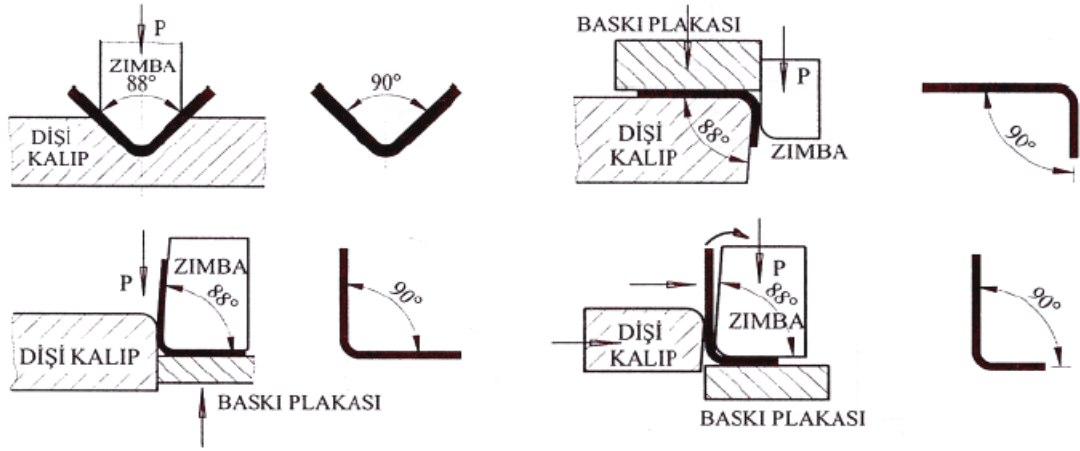
Levha veya şerit malzemelerin hadde yönündeki bükme işleminde, bükme kavis yarıçapı (R) sınırlıdır. Hatalı bükmeyi önlemek için şerit malzeme, sac levha hadde yönüne göre belli bir eğim açısı altında kesilir. Hadde yönüne göre şerit malzeme eğim açısı β büyütülebilir. Genellikle hadde yönüne dik bükme en çok uygulanandır, ancak bazı malzemelerde kavis yarıçapı küçük bükmelerde mümkün olmayabilir. Bükme işlemi esnasında haddeleme yönüne dikkat edilmezse, parçanın bükülen kısmında çatlaklar oluşabilir [22].

3.5. Bükmede Geri Esnemeyi Giderme Yöntemleri

Bükme işlemi sırasında meydana gelen geri esneme, tamamen yok edilemez fakat en az seviyeye indirilebilir. Bunun için çeşitli teknik ve yöntemler geliştirilmiştir. Geri esnemenin önüne geçmek için uygulanan başlıca yöntemler şunlardır: bükme açısının artırılması, çift bükme tekniği, ezerek bükme, germe altında bükme, zımba ucunun iç bükey yapılması ve zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesidir [22].

3.5.1. Bükme açısının artırılması

İstenilen açıda bükme yapılabilmesi için bükme açısı geri esneme miktarı kadar artırılır. Bükme açısının artırılması en çok tercih edilen yöntemdir [24]. Şekil 3.9'da bükme açısını artırma yönteminin uygulama şekli verilmiştir.

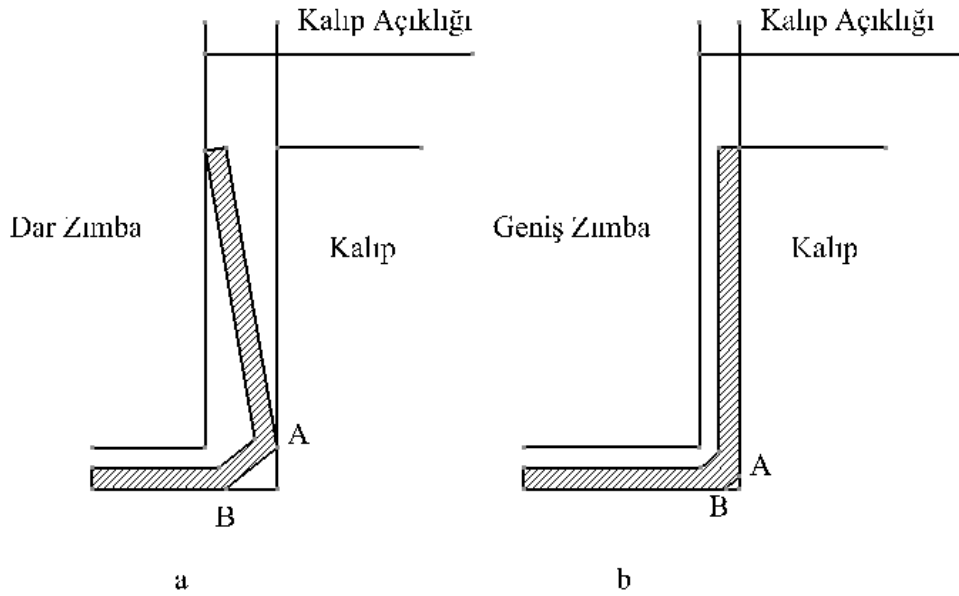


Şekil 3.10. Bükme açısının artırılması yöntemi [26]

Bükme açısını artırma yönteminin olumlu sonuçlarının yanı sıra çeşitli durumlarda da olumsuz sonuçlarıyla karşılaşmaktadır. Bükme açısının artırılması malzeme cinsine göre değişkenlik göstermektedir. Yumuşak çelik, alüminyum, bakır, pirinç için geri esneme sert malzemelere göre daha azdır. Geri esneme miktarı tam olarak bilindiği zaman, kalıp geri esneme miktarı kadar büyük yapılarak istenen bükme sağlanabilir [26].

3.5.2. Çift bükme tekniği

Çift bükme yöntemi ile önce dar bir zımba ile sac malzemeye şekil verilir. Burada malzeme belli bir şekil aldıktan sonra, daha geniş bir zımba ile sac son şeklini alır. Çift bükme yönteminin özellikle U bükmelerde geri esnemeyi azalttığı çeşitli deneylerle saptanmıştır [26]. Şekil 3.10'da çift bükme işlemin şematik olarak nasıl yapıldığı gösterilmektedir. Burada önce sac malzeme dar bir zımba ile şekillendirilmekte, daha sonra geniş zımbayla sac istenilen açıda bükülmektedir.

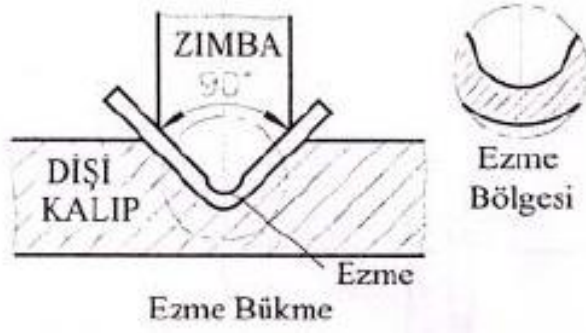


Şekil 3.11. Çift Bükme Tekniği, a) Dar zımba b) Geniş zımba [26]

3.5.3. Ezerek bükme

Bükme bölgesi şekil değiştirmeyecek şekilde zımba ve dişi kalıp arasında ezilir. Taban ezme işlemi, basma gerilmesini arttıracığından, geri esneme miktarını ortadan kaldıracaktır. Ancak taban bükme yapabilmek için tonajı yüksek pres tezgahına ihtiyaç vardır. Çünkü yüksek kuvvetler gereklidir. Ayrıca pres başlığının kurs boyu iyi ayarlanmalıdır. Aksi takdirde kalıba ve iş parçasına zarar verilebilir. Eğer, pres kurs boyu iyi ayarlanmaz ise, fazla kurs boyundan dolayı kalıbın çatlamasına ve iş

parçasının bükme alanında ezilmesine neden olacaktır [26]. Şekil 3.11'de ezerek bükme işleminin yapılışı gösterilmiştir.

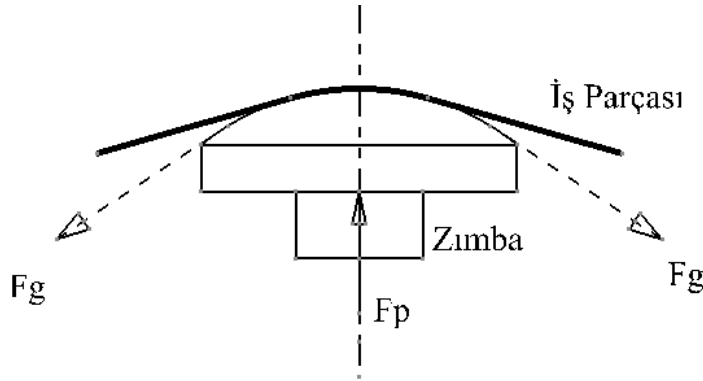


Şekil 3.12. Ezerek bükme işleminin şekil olarak anlatılması [26]

Taban ezme yöntemi uygulamada fazla sağlıklı bir yöntem değildir. Ezilmenin bükmeyi ve parçayı zayıflatacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Ayrıca ezilmeden dolayı malzemede elde etmek istediğimiz gerçek yay oluşmayacağı da düşünülürse, taban ezme yönteminin olumlu sonuç vermesi pek beklenemez. Unutulmaması gereken bir olay da kalıbın zarar görme ihtimalinin, zamanın ve maliyetin artmasına neden olacak olmasıdır [26].

3.5.4. Gererek bükme

Gererek bükmede saclar genellikle iki ucundan veya bazen tüm çevresi boyunca çenelere bağlandıktan sonra zımba ile bastırılarak şekillendirilir. Germe bükme işleminde, bütün malzemeler akma sınırına yaklaşıncaya kadar çekmeye tabi tutulur ve gergin haldeki parça zımba üzerine bastırılır. Bu şekilde yapılan bükme işleminde parça bir miktar esner. Gererek bükme işlemi, kavis yarıçapı büyük parçalara uygulanır. Şekil 3.12'de gererek bükme işlemi uygulaması gösterilmiştir [22].

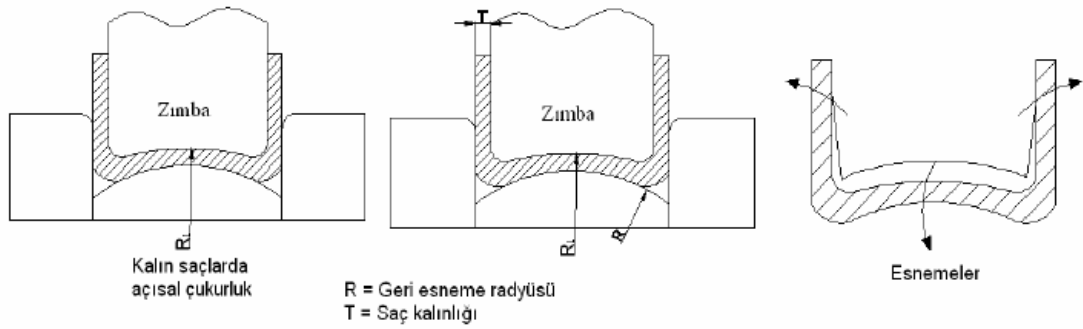


Şekil 3.13. Gererek bükme işlemi [22]

Gererek bükme yöntemi, sert bir yüzey üzerine bağlanan kalıba vuruş esnasında metal levhayı tutan iki çene levhayı gerdirecek şekilde hareket ettirilmektedir. Kalıp dikey olarak hareket ederken, çeneler yatay olarak hareket eder. Genel olarak 50-150 tonluk bir kuvvet hem kalıba, hem de çenelere uygulanmaktadır. İlk yapılan işlem gerdirme işlemi olup, sac levha elastik sınırının üstüne kadar gerdirilerek kalıp şeklini alması sağlanır. İşlem sonucunda sac levhada ihmal edilebilecek bir incelme ve yapılan işlem sonucu olarak da kalıcı olarak çok az bir geri esneme meydana gelir. İki kez bükülecek geniş parçaların diğer metotlarla şekillendirilmesi zor olduğunda, germe bükme yöntemi kullanılarak kolayca şekillendirme yapılabilir. Artık malzeme miktarı oldukça fazla olduğundan, kenarları düzeltmek için biraz malzeme bırakılmalıdır [22].

3.5.5. Zımba ucunun iç bükey yapılması

Zımba ucunu iç bükey yapma fazla tercih edilen bir yöntem değildir. Uygulama alanı kalın parçalarla sınırlıdır [26]. Uygulama yöntemi Şekil 3.13'de kademeli olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Zımba ucunun iç bükey yapılması yöntemi [26]

3.5.6. Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi

Zımbanın malzeme üzerinde bekletilmesi geri esnemeyi azaltmasına rağmen, zamanı arttırdığından, maliyetin de artması söz konusudur. Bu nedenle uygulaması yapılırken bütün koşullar dikkate alınmalıdır [26].

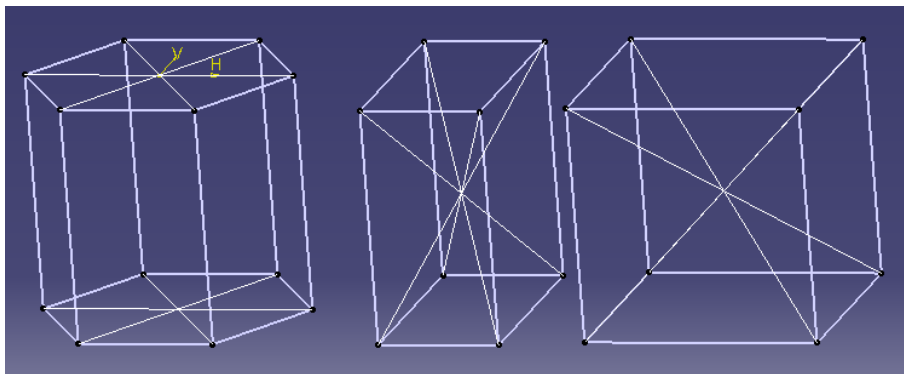
Yukarıda, sözü edilen yöntemler tek tek değerlendirildiğinde, en kolay çözümün, bükme açısının geri esnemeye bağlı olarak artırılması olduğu görülmektedir. Buradaki problem, bükme açısının ne kadar büyük yapılacağına karar verilmesidir. Bunlar için daha önceden deneysel olarak çalışılarak hazırlanmış çeşitli grafik ve tablolardan yararlanılabilir. Ancak bu tablolar yeterli düzeyde olmamakla birlikte, farklı kalınlık, özellik ve kimyasal kompozisyonlara sahip malzemeler için geri esneme değerlerini veren tabloların literatüre kazandırılması gereklidir.

4. METALLERE PLASTİK ŞEKİL VERME YÖNTEMLERİ

4.1. Plastik Şekil Değişirme Mekanizmaları

Bir malzemeye gerilme uygulandığında şekli değişir. Gerilme kalkınca malzeme eski konumuna geliyor ise elastik şekil değiştirmeye, gelmiyor ise plastik şekil değiştirmeye maruz kalmış demektir. Metalin içindeki diskolasyonların hareket etmeye başlaması plastik şekil değişimine uğraması demektir. Plastik şekil değiştirmeye uğramış malzeme çoğu kez hasara uğramış sayılır. Sünek malzemelerin belirli bir şekil değişimine uğradığı akma sınırı, hasara uğrama sınırı olarak kabul edilir [22].

Katı halde bütün metaller kristal yapıya sahiptir. Yani yapıdaki bütün atomlar bir düzen içerisindedir. Bir kristalin en küçük yapı elemanına hücre denir. Bu hücreler de kafesleri meydana getirir. Metallerde üç grup kafes şekli vardır; kübik, tetragonal ve hegzagonal. En basit birim hücre sekiz atomdan meydana gelmiştir. Atomlar bir küpün köşelerindedir. Buna basit kübik kafes denir. Şayet basit kübik kafesin birim hücrelerinin merkezlerinde de birer atom yer alıyorsa hacim merkezli kübik kafes, yüzeylerde atomlar varsa yüzey merkezli kübik kafes denir. Şekil 4.1'de çeşitli kafeslere ait birim hücreler gösterilmiştir [23].



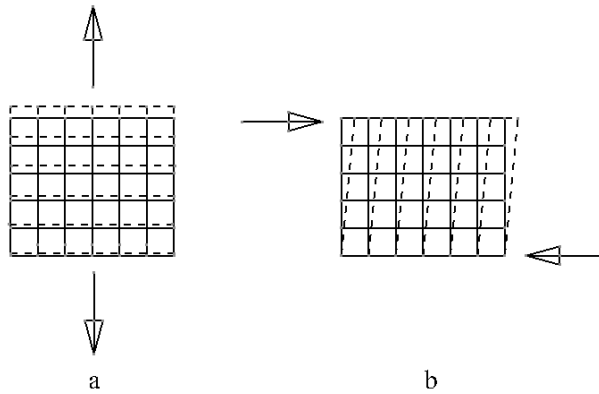
a) Hegzagonal

b) Tetragonal

c) Kübik

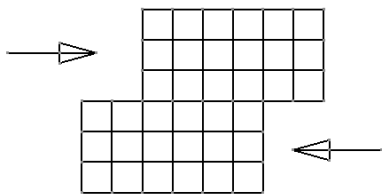
Şekil 4.1. Hegzagonal, tetragonal ve kübik kafes yapıları [23]

Atom merkezlerinin hayali olarak birleştirilmesi ile elde edilen bir metal kafesi Şekil 4.1'de görüldüğü gibi normal gerilmelere tabi ise, tesir eden gerilmeler kafes düzlemlerini açmaya çalışacaklardır ve kafes düzlemleri kuvvet tesiri ile birbirlerinden bir miktar uzaklaştırılacaktır. Şayet bu gerilmeler Şekil 4.1'de görüldüğü gibi teğetsel bir kuvvet çifti etki ediyorsa ve tesir eden bu kayma gerilmeleri bir τ_{kritik} kayma gerilmesinden küçükse, kafeste sadece bir açı ve uzunluk değişimi meydana gelir. Bu gerilme ortadan kalkınca kafes eski halini alır. Bu elastik bir şekil değişimidir. τ kayma gerilmeleri kritik bir değer aşınca $\tau > \tau_{kritik}$ olunca, kayma gerilmelerinin hasıl ettiği kuvvetler doğrultusunda Şekil 4.2'de ve Şekil 4.3'de görüldüğü gibi kayma olacaktır. Bu kaymanın olması için kayma düzlemindeki atomlar eski konumundan, en az atomlar arası mesafe kadar ayrılmalıdır. Ancak atomların böyle bir yer değiştirmesi sonucu şekil değişimi kalıcı, yani plastik şekil değişimi olur [23].



Şekil 4.2. a) Bir metal kafesinin normal kuvvetler etkisi altında şekil değişimi

b) Bir metal kafesinin teğetsel kuvvet çiftinin etki ile elastik şekil değişimi [23]



Şekil 4.3. Atomlar arası kayma [23]

Kayma genellikle kafes düzlemlerinde atomların en sık olduğu düzlemlerde olur. Kaymanın meydana geldiği kafes düzleminde kayma düzlemi denir. Bu kristallerde ve özellikle sıcaklığın etkisiyle atomlar daha az sık bulunduğu düzlemlerde de kayma olabilir. Bir kayma düzleminde atomların en sık bulunduğu doğrultuya kayma doğrultusu denir [23].

4.2. Metallerin Kristal Yapısı

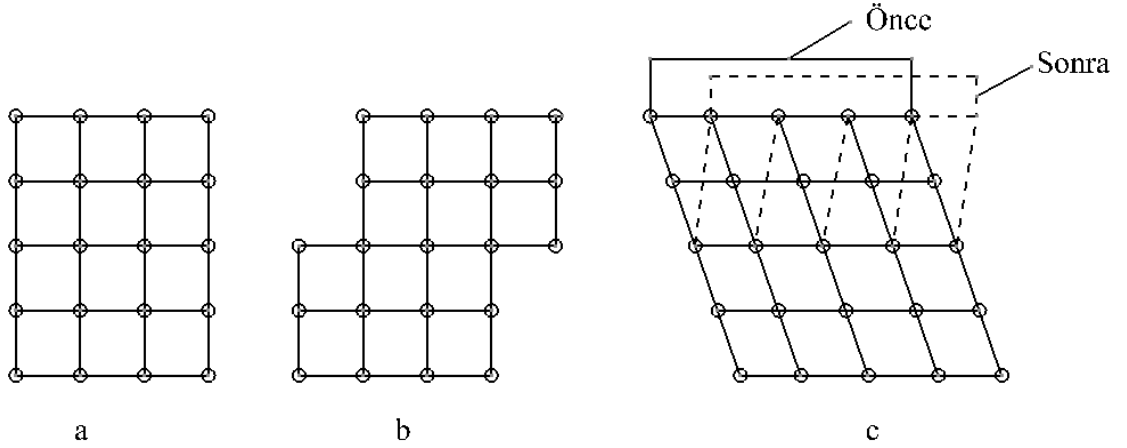
Metallerin esas yapısı, atomların üç boyutlu uzayda belirli bir düzene göre dizilmesinden ibarettir. Sıvı haldeki bir metalin katılaşması sırasında atomların düzenli bir şekilde dizilmeleri sonucunda oluşan yapıya kristal yapı denir. Düzenli diziliş tekrarlı karakterdedir. Bir metalin karakteristik kafes yapısının özelliğinde olan en küçük atom topluluğuna birim hücre denir. Kristal yapı birim hücrenin tekrarlanması ile meydana gelir. Metallerde en çok rastlanan üç birim hücre hacim merkezli kübik, yüzey merkezli kübik ve sıkı düzenli hegzagonal olarak adlandırılır [22]. Çeşitli metallerin kristal yapısı Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çeşitli metallerin kristal yapısı [22]

Hacim Merkezli Kübik	Yüzey Merkezli Kübik	Sıkı Düzenli Hegzagonal
Krom	Alüminyum	Berilyum
Demir	Demir	Magnezyum
Molibden	Bakır	Çinko
Tungsten	Altın	Kobalt
Vanadyum	Kurşun	Titanyum
Tantal	Nikel	Zirkonyum
Titanyum	Gümüş	
Zirkonyum	Kobalt	

4.3. Tek Kristallerde Şekil Değişimi

Kristal yapılarda plastik şekil değişimini meydana getiren iki mekanizma vardır: kayma ve ikizlenme. Şekil 4.4'de kristal bir yapı görülmektedir [22].



Şekil 4.4. Tek kristalin şekil değişimi, a) Şekil değişiminden önce kristal yapı, b) Kayma c) Mekanik ikizlenme [22]

4.3.1. Kayma

Kaymada kristalin bir kısmı bitişik kısma kıyasla bu iki kısmı ayıran düzlem içindeki bir doğrultu boyunca ötelenir. Ötelenme miktarı kayma doğrultusunda atomlar arası uzaklığın tam katıdır. Kaymanın başlaması için, kristale etkiyen dış kuvvetlerin kayma düzlemi içinde kayma doğrultusunda doğurdıkları τ kayma gerilmesi kritik bir değere ulaşmalıdır [22].

4.3.2. İkizlenme

İkizlenme çoğunlukla hacim merkezli kübik veya sıkı düzenli hegzagonal metallerde, şekil değiştirme hızının yüksek veya sıcaklığın düşük olması, şekil değiştirme sertleşmesi gibi nedenlerle kaymanın güç olduğu hallerde görülmektedir. Tarif olarak ikizlenme, kristalin bir kısmının, şekil değişiminden sonra, diğer kısmın bir kristal

düzlemine göre aynadaki görüntüsü şeklini almasıdır. Atom düzlemlerinin simetrik duruma geldikleri, diğer bir tabirle yansımanın olduğu kristal düzlemine ikizlenme düzlemi denir. İkizlenmede atomların hareket miktarı atomlar arası uzaklıktan çok küçüktür. Bu nedenle ikizlenme ile büyük plastik şekil değişimleri elde edilemez. Mekanik ikizlenme birkaç mikro saniyede oluşabilen çok hızlı bir olaydır [22].

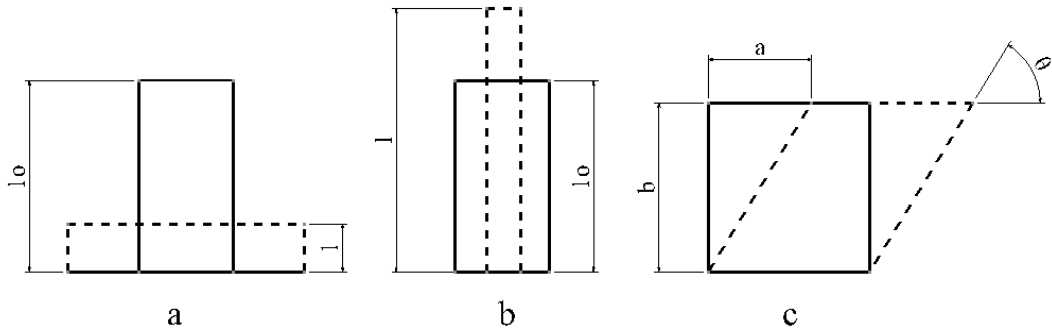
4.3.3. Taneler ve Tane Sınırları

Sıvı haldeki bir metalin katılaşması sırasında, sıvı kütle içinde önce katı metal çekirdekleri oluşur. Bir sıvı metal içinde var olabilecek kristal kafesine sahip en küçük atom topluluğuna çekirdek denir. Sıvı kütle içinde çeşitli noktalarda çok sayıda oluşan bu çekirdeklerin her birinde kafes doğrultusu farklı ve gelişigüze. Çekirdekler birbirine temas edinceye kadar büyür ve katılaşma sonunda temas ettikleri bölgede tane sınırlarını meydana getirirler. Taneler arasında kalan atomlar komşu tanelerle uyum sağlayamadıklarından düzensiz bir bölge oluştururlar. Bu bölgenin yani tane sınırının kalınlığı yaklaşık 2-3 atomlar arası uzaklık kadardır. Tane, kafes doğrultusu aynı ve tek olan metal parçası şeklinde tarif edilebilir [22].

4.4. Malzemelerin Mekanik Davranışları

Bir katı cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek amacıyla uygulanan ve bu işlem sırasında malzemenin kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan üretim yöntemlerine plastik şekil verme yöntemleri denir.

Karbonlu ve alaşımlı çelikler, alüminyum, çinko, bakır ve bunların alaşımları gibi demir dışı malzemeler plastik şekil verme yöntemleri ile işlenebilmektedir. Tüm plastik şekil verme işlemlerinde malzeme çekme, basma ve kayma gibi üç temel şekil değişiminden birinin veya birkaçının etkisinde kalır. Şekil 4.5'de üç temel şekil değişimi gösterilmiştir [22].



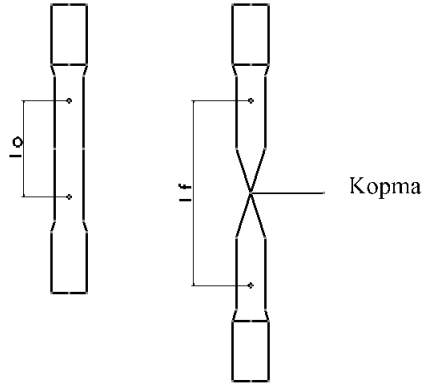
Şekil 4.5. Üç temel şekil değişimi, a) Basma, b) Çekme, c) Kayma [22]

Herhangi bir şekil değiştirme işlemi uygulanan bir elemanda meydana gelen birim şekil değiştirme, bu elemanın şekil değiştirmeden önceki ve sonraki boyutlarına bağlı olarak tarif edilir [22].

4.5. Malzeme Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin ekseni doğrultusunda çekmeye zorlandığı zaman göstermiş olduğu davranışları belirlemek için yapılır. Bir malzeme ekseni doğrultusunda çekmeye zorlandığında boyu uzar, kesiti daralır. Kuvvet uygulanmaya devam edilecek olursa, malzeme çeşidine göre bazı değişiklikler olduktan sonra kopma meydana gelir [21].

Kuvvet ve şekil değiştirme arasındaki bağıntıların incelenmesi bakımından uygulanan en basit deney çekme deneyidir. Şekil 4.6'de de basit bir çekme deneyi örneği gösterilmiştir [22].



Şekil 4.6. Çekme deney çubuğu [22]

Deney çubuğunun çekme kuvvetine dik doğrultudaki kesit yüzeyi başlangıçta A_0 , deney sırasında P kuvvetinin uygulandığı anda ise A ile gösterilirse, nominal ve gerçek gerilmeler aşağıda gösterilmiştir [22].

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0} \text{ (Nominal gerilmeler)} \quad (4.1)$$

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \text{ (Gerçek gerilmeler)} \quad (4.2)$$

σ_n = Nominal gerilme

σ_g = Gerçek gerilme

Başlangıç ölçü boyu l_0 , deneyin herhangi bir anında uygulanan P yükünün etkisi ile 1 değerini alırsa, çekme doğrultusunda birim şekil değiştirme aşağıda gösterilmiştir [22].

$$e = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4.3)$$

e = Elastik uzama

l = Uzamadan sonraki boy

l_0 = Başlangıç ölçü boyu

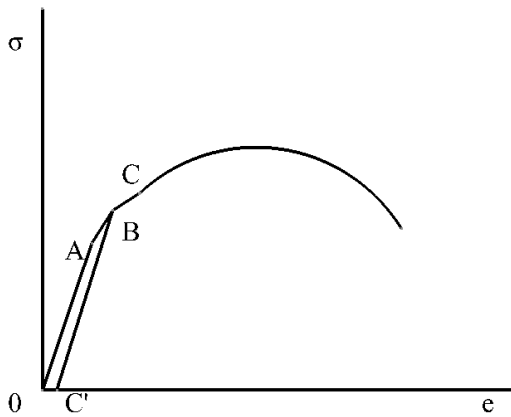
Birim şekil değıştirme, yukarıdaki ifadeden de görülebileceği gibi, l_0 başlangıç ölçü boyuna bağlı olarak hesaplanmaktadır [22].

4.6. Çekme Diyagramı

Alüminyum, bakır veya benzer sünek malzemelerin çekme diyagramı Şekil 4.7'de ve Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi e başlangıçta σ_n ile doğrusal olarak artar. Bu bölgede şekil değışimi elastiktir, yani yükün boşaltılması ile parça başlangıçtaki boyutlarını alır. Doğrunun (Hook Doğrusu) eğimi E ile gösterilir ve elastik modülü (Young Modülü) adını alır. Doğru boyunca aşağıdaki bağıntı geçerlidir (Hook Kanunu) [22].

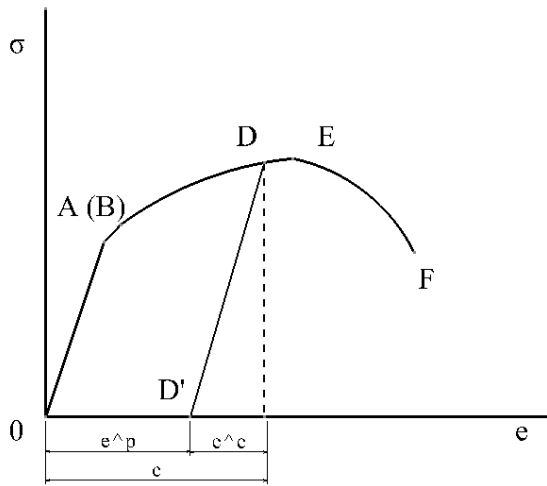
$$\sigma_n = E_e \quad (4.4)$$

Çekme deneyinde parça uzarken kesit yüzeyi de azalır. Deney çubuğunun eksenine dik doğrultudaki birim şekil değıştirme ile aksenal doğrultudaki birim şekil değıştirme arasındaki oranın mutlak değerine poisson oranı denir ve ν ile gösterilir. Örneğin, alüminyum ve alaşımları için $\nu = (0,31 \dots 0,34)$, alaşımsız çelikler için $\nu = 0,33$ ve tungsten için $\nu = 0,27$ değerindedir.



Şekil 4.7. Sünek bir metalin mühendislik çekme diyagramı [22]

Orta sınırı olarak adlandırılan A noktasından sonra, bir B noktasına kadar şekil değişimi yine elastiktir fakat A ve B noktaları arasında e , σ_n ile doğrusal olarak artmaz, yani bu noktalar arasında Hook Kanunu geçersizdir. B noktası elastiklik sınırıdır. Tarif olarak elastiklik sınırı, çekme yükü kaldırıldığı zaman malzemede kalıcı şekil değişiminin görülmediği en büyük gerilmedir. Genellikle orantı sınırı ile elastiklik sınırı birbirine çok yakın oldukları için B noktasının A noktası ile çakıştığı kabul edilebilir.

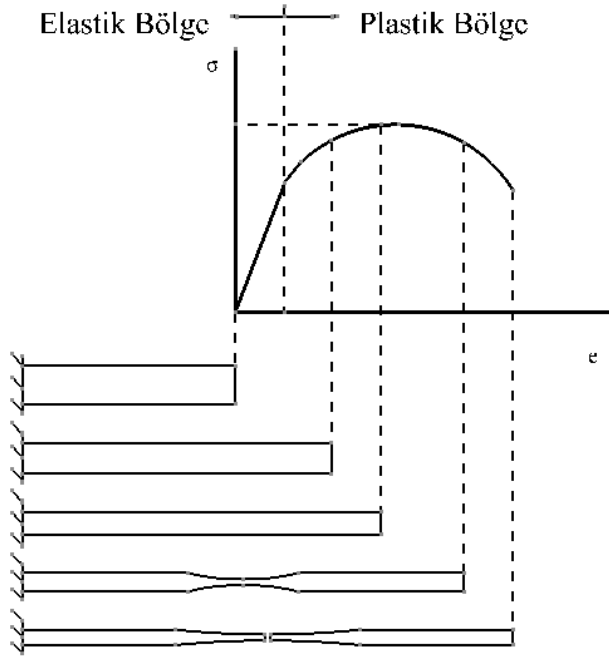


Şekil 4.8. Mühendislik çekme diyagramı [22]

Elastiklik sınırı aşıldığında plastik şekil değişimi başlar. Plastik alanda çekme eğrisinin E maksimum noktasından önce bir D noktasında yük boşalttığı takdirde, geriye dönüş OA doğrusuna paralel DD' boyunca olur. Şekil 4.8'dan görülebileceği gibi D noktasında e olan toplam birim şekil değiştirme, yük boşaltıldıktan sonra e^e kadar azalmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi D noktasındaki toplam birim şekil değiştirme e , e^e elastik bileşenle e^p plastik bileşenin toplamından ibarettir ve dolayısı ile yük boşaltıldıktan sonra çekme deneyi çubuğunun e^p kadar bir kalıcı birim şekil değiştirmeye uğradığı görülür.

Tarif olarak $e^p = 0,002$ (%0,2) plastik birim uzamaya karşılık olan nominal çekme gerilmesine akma sınırı ($\sigma_{0,2}$ sınırı) denir. Şekil 4.7'de C noktası akma sınırını

göstermektedir ve tarife göre C' noktasında $e = 0,002$ 'dir. Elastik ve plastik bölgelerin oluştuğu çekme diyagramı Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Çekme diyagramında uzama, büzülme ve kopma [22]

Mühendislik çekme diyagramındaki maksimum nominal gerilmeye malzemenin çekme dayanımı (mukavemeti) denir. Nominal gerilmenin maksimum değerinin aldığı bu noktaya kadar (E noktası) şekil değişimi homojendir yani deney çubuğunun çekme doğrultusuna dik kesiti çubuk boyunca her yerde aynı oranda azalır. Çekme dayanımının azalmasıyla birlikte deney çubuğu bir noktadan büzülmeye başlar ve çekme dayanımından daha düşük bir nominal gerilme değerinde kopar. Deney çubuğunun başlangıç ölçü boyu l_0 kopmada l_f değerinin almışsa % kopma uzaması aşağıdaki formülle bulunur.

$$e_f = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{\Delta l_f}{l_0} \times 100 \quad (4.5)$$

Kopma uzaması ne kadar büyükse malzeme o kadar sünektir. Sünekliliğin karşısı gevrekliktir (kırılganlık). Deney çubuğunun kopma kesiti A_f ile gösterilirse % kopma büzülmesi, aşağıdaki bağıntıdan bulunur.

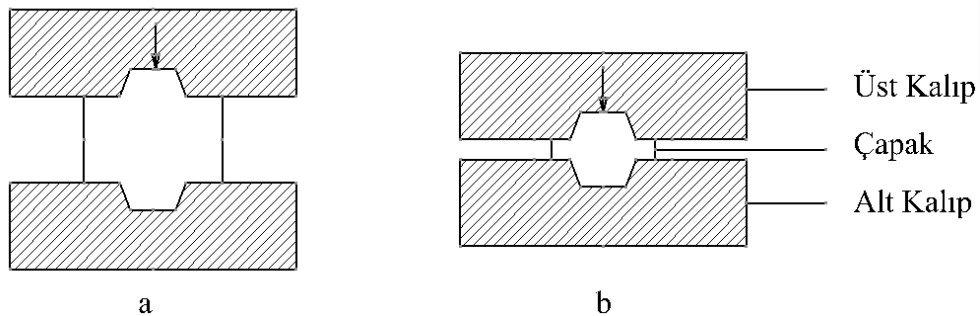
$$\frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (4.6)$$

Büzülme yerel bir oluşumdur. Deney çubuğu üzerinde çeşitli noktalarda ölçü işaretleri konarak çubuk bir miktar çekildikten sonra yük boşaltılır ve her işaret çifti için % uzama hesaplanırsa, başlangıç ölçü boyu küçüldükçe % uzamanın arttığı görülür. Büzülmenin yerel olarak oluşması nedeniyle de en büyük % uzama değeri büzülme bölgesine en yakın işaret çiftleri için bulunur. Başlangıç ölçü boyu arttıkça % uzama değerinin sifıra düşmediğine dikkat edilmelidir. Bunun nedeni deney çubuğunun, kopmadan önce sonlu, sonra kalıcı bir uzamaya uğramış olmasıdır. Bu bakımdan, % uzama değeri verilirken aynı zamanda başlangıç ölçü boyu da belirtilmelidir. Buna karşılık diğer çekme özellikleri başlangıç ölçü boyundan bağımsızdır [22].

4.7. Metallere Plastik Şekil Verme Yöntemleri

4.7.1. Dövme

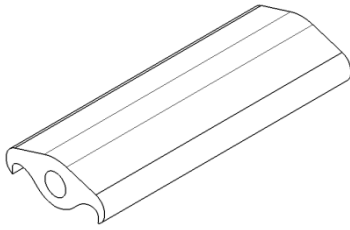
İş parçasına, çekiç, şahmerdan veya presle basma tesiri altında yığarak şekil verme işlemine dövme denir. Şekil 4.10'da kalıpla dövme örnekleri verilmiştir [22].



Şekil 4.10. a) Açık kalıpla dövme b) Kapalı kalıpla çapaklı dövme [22]

4.7.2. Ekstrüzyon

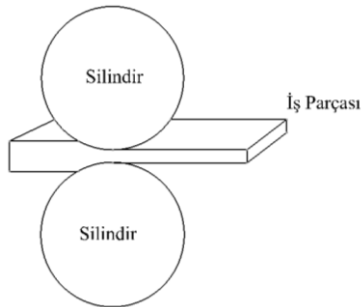
Silindirik bir metal bloğun, bir kovan içine yerleştirilerek zımba vasıtasıyla uygulanan basma kuvveti etkisiyle, matris deliğinden geçirilmesine ekstrüzyon denir. Matris deliği ürün kesitinin şeklindedir. Şekil 4.11'de bir ekstrüzyon örneği gösterilmiştir [22].



Şekil 4.11. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş parça örneği [22]

4.7.3. Haddeme

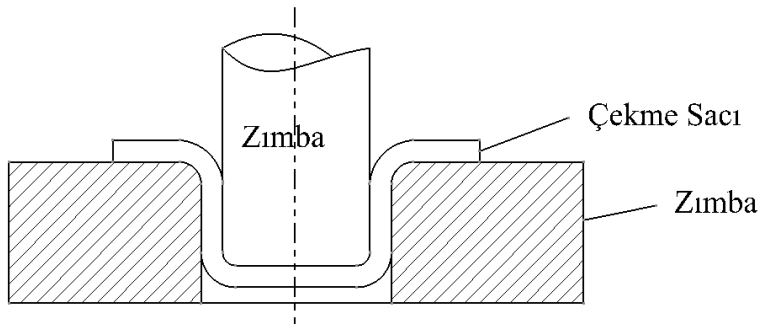
İş parçasının merdane denilen ve bir eksen etrafında dönen iki takım arasındaki aralıktan geçirilerek şekillendirilmesi işlemine haddeme denir. Haddemede malzeme dövme veya basmada olduğu gibi uzatılır ve genişletilir, fakat burada şekil değişimi işlemi sürekli dir. Dolayısıyla zaman kaybı yoktur. Böylece iş parçasının ısından daha iyi bir şekilde faydalanılır. Haddemede tek bir tavlama işlemi ile dövme ve basmadakine nazaran daha fazla şekil değiştirme elde edilir [23]. Şekil 4.12'de haddemenin uygulama şekli gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Haddeme uygulama örneği [22]

4.7.4. Derin çekme

Sac levhaların kap şeklinde cisimler elde etmek için kullanılan yöntem derin çekme denir. İmal edilecek olan parçanın açılmış şekline uygun bir sac parçası çekme matrisi üzerine konur. Pot çemberi adı verilen bir bastırıcı levhayı tutar ve bir zımba sac parçasını matris deliğinden geçirerek kap şeklindeki iş parçasının elde edilmesini sağlar. En basit çekme takımları pot çembersiz olanlardır. Bunlar sadece matris ve zımbadan oluşur. Derinliği az olan çekme işlemlerinde kullanılır. Çekilecek olan kabın derinliği arttıkça pot çemberi kullanılma ihtiyacı duyulur. Aksi takdirde sacın kenarlarında katlanmalar olabilir [23]. Şekil 4.13'de derin çekme uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Derin çekme uygulama örneği [22]

4.7.5. Tel çekme

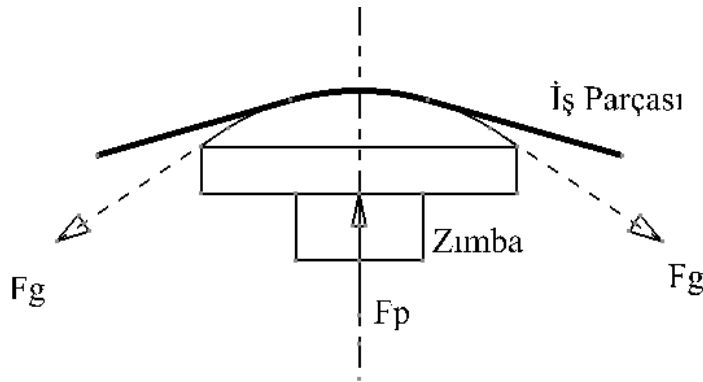
Kalın kesitli olan bir telin, bir matris (kalıbı) içinden geçirilerek kesitini küçültme işlemidir. Tel kesitleri genellikle daireseldir. Ancak kare altıgen kesitlerde çekilebilmektedir. Tel çekme işleminde, telin hasara uğramaması bakımından giriş kısmında hiçbir keskin kenar bulunmamalıdır. Matrisin bu kısmı genellikle itina ile parlatılıp temizlenir [22].

4.7.6. Boru çekme

Ekstrüzyon, haddeleme gibi sıcak şekil verme yöntemleriyle üretilen borulara daha sonra çekme işlemi uygulanarak boyut toleranslarının daha hassas ve yüzeylerinin daha düzgün olması sağlanır. Bu işleme boru çekme denir. Şekil 4.15'de boru çekme işlemi gösterilmiştir [22].

4.7.7. Gererek şekillendirme

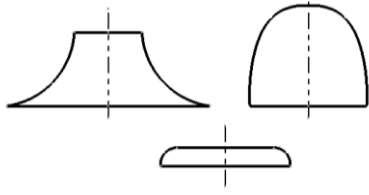
Gererek şekillendirme genellikle havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılan bir yöntemdir. Özellikle üretim adedi düşük ve büyük parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Bu işlemde sac malzeme, karşılıklı iki ucundan veya bazen tüm çevresi boyunca çenelere bağlandıktan sonra zımba ile ilerletilerek şekillendirme işlemi yapılır. Şekil 4.14'da gererek şekillendirme uygulaması gösterilmiştir [22].



Şekil 4.14. Gererek şekillendirme yöntemi [4]

4.7.8. Sıvama

Sacların rijit bir takım vasıtasıyla dönen bir kalıp üzerine bastırılarak aksel simetrik kap şeklinde parçalar üretilmesi yöntemine sıvama denir. Sıvama yöntemi ile elde edilen bazı örnek parçalar Şekil 4.15'de gösterilmiştir [22].



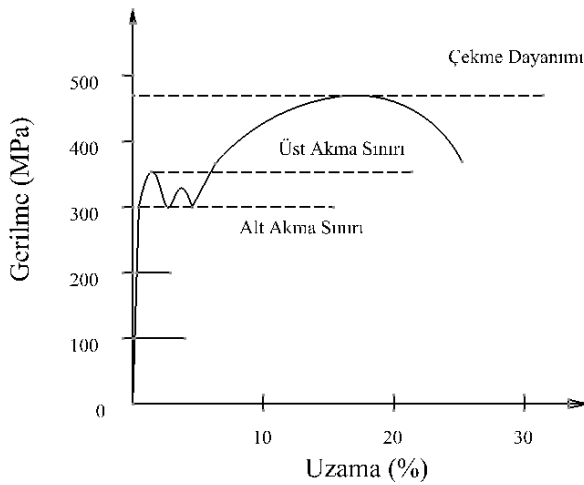
Şekil 4.15. Çeşitli sıvama örnek parçaları [22]

4.8. Çekme Deneyi İle Elde Edilen Malzeme Özellikleri

4.8.1. Malzemelerin mekanik özellikleri

Akma Sınırı (Akma Dayanımı)

Az karbonlu bir çelik çekme deneyine tabi tutulur ise Şekil 4.18'deki gibi bir eğri elde edilir. Başlangıçta malzeme kuvvetle orantılı olarak uzarken belirli bir noktada bu durum bozulmakta ve uzama artarken kuvvet artmamaktadır. Tanım olarak belirli bir kalıcı şekil değiştirmenin meydana gelmesi durumuna akma denir. Diyagramdaki zigzaglı bölgeye akma sınırı denir. Genellikle %0,02 kalıcı birim şekil değişikliğinin meydana geldiği σ gerilmesi akma gerilmesi olarak adlandırılır. Akma sınırı sünek metallerin dayanım sınırı olarak anılır. Şekil 4.16'da gerilme uzama grafiği gösterilmiştir [21].



Şekil 4.16. Gerilme uzama diyagramı [21]

Çekme dayanımı

$\sigma - e$ diyagramında gerilmenin en büyük değerine çekme dayanımı denir ve R_m ile gösterilir. Çekme noktasına kadar malzeme homojen olarak uzar. Çekme noktasını geçince, şayet malzeme sünek ise büzülerek kopar [21].

Çekme dayanımı malzemenin taşıyabileceği en büyük gerilme değeridir. Çekme dayanımı, gevrek malzemeler için dayanım sınırı olarak kabul edilir. Gevrek malzemedan yapılmış makine veya yapı elemanı bu gerilmenin üzerinde çekmeye zorlanacak olursa kırılır. Sünek malzemede ise gerilme bir miktar düştükten sonra kırılır. Her iki malzeme çeşidi için çekme dayanımı, o malzemeye uygulanabilecek en büyük gerilme değeridir [21].

Başlangıçta çekme ve basma hallerindeki akma sınırı aynı olan bir malzemenin basit çekme deneyinde, akma sınırından sonra, üniform şekil değişimi bölgesinde bir noktada yük boşaltıldıktan sonra deney parçası tekrar fakat aksi yönde basmaya yüklendiği takdirde, basmadaki yeni akma sınırı çekmede akma sınırınının pekleşme nedeniyle yükselmiş olduğu değere kıyasla düşük bulunur. Buna "Bauschinger etkisi" denilir [21].

Elastisite Modülü

Kuvvet ile uzamanın orantılı olduğu bölgedeki doğrunun eğimine elastisite modülü denilir.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_e} \quad \text{veya} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon_e} \quad (4.7)$$

$\sigma = E \times \varepsilon_e$ bağıntısına Hook Kanunu denir [21].

Tokluk

Bir malzemenin plastik şekil değiştirme esnasında enerji absorbe etme özelliğine tokluk denilir. Çekme eğrisi altında kalan alan malzeme tokluğunun bir ölçüsüdür. Tokluk malzemenin dayanımını ve sünekliğini beraber değerlendiren bir kavramdır. Sünekliği yüksek olan malzemenin tokluğu, sünekliği daha az olan bir malzemeye göre daha düşük olabilir [21].

Poisson Oranı

Malzemenin, elastik bölgede, enlemesine birim şekil değiştirme oranının (ϵ_x), boylamasına şekil değiştirmesi oranına (ϵ_y) Poisson oranı denilir [21].

Kopma Uzama Yüzdesi

Numunenin koptuğu andaki kalıcı uzama oranıdır. Başka bir ifade ile numunenin koptuğu zaman meydana gelen uzama miktarının ilk boya oranına kopma uzama yüzdesi denilir ve A harfi ile gösterilir [21].

Sertlik

Sertlik, bir cismin kendisine batırılan başka bir cisme karşı göstermiş olduğu dirençtir. Sertlik ölçme deneyleri, malzemenin kullanım yerine göre değişik şekillerde; genellikle cisme sivri bir uç batırılarak yapılır. Batırılan cismin şekli ve uygulanan kuvvetin farklılığına göre sertlik ölçme deneyleri çeşitli isimler alır. Sertlik ölçümü yapılırken, sertliği ölçülecek cisme sert bir uç batırılır ve cisim üzerindeki izin boyutları ölçülür. Uygulanan kuvvet ve iz boyutlarından faydalanılarak sertlik değerleri hesaplanır [21].

4.8.2. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzemelerin, mekanik olmayan fiziksel etkilere karşı davranışını belirleyen özelliklerdir. Bunlar, malzemenin yoğunluğu, geçirimsizlik, ısı iletkenliği vb. özellikleridir [21].

Yoğunluk

Malzemelerin çoğunda gözle görülen veya görülmeyen boşluklar vardır. Bu boşluklar çıkarıldığında geriye kalan cismin katı ağırlığının hacmine oranına yoğunluk denir [22].

Geçirimsizlik

Malzemenin bir basınç etkisiyle suyu bir taraftan diğer tarafa geçirme yeteneğine geçirimsizlik denir. Bu özellik, belirtilen koşullarda birim alandan, birim zamanda geçirilen su miktarı olarak tanımlanır ve geçirimsizlik katsayısı ile ifade edilir [22].

4.8.3. Malzemenin kimyasal özellikleri

Korozyon

Metallerin çevre etkisiyle kimyasal veya elektrokimyasal yolla madde kaybına uğramasına korozyon denir. Metallerin çoğu tabiatta oksit, sülfür ve karbonat şeklinde bulunur. Cevher denilen bu bileşikler metalürjik yöntemlerle saf metal veya alaşımlar haline getirilir. Çevrenin etkisi ile elektrokimyasal yolla eski kararlı, bileşikleri haline dönmeye çalışırlar [21].

4.8.4. Malzemenin elektriksel özellikleri

Elektrik İletkenliği

Elektrik akımı, elektronların veya iyonların yönlendirilmiş hareketidir. Malzemelerin elektrik akımı iletme yeteneğine iletkenlik denir [21].

Manyetiklik

Dönen elektrik akımları manyetik alan oluşturur. Elektronların çekirdek etrafında ve kendi eksenleri etrafında dönüş hareketleri vardır. Bu dönme hareketleri manyetik alan meydana getirir [21].

Maddeler manyetik özelliklerine göre üç gruba ayrılabilir. Genellikle manyetik alandan kaçan, dış manyetik alan tarafından itilen maddelere diyamanyetik, manyetik alana doğru çekilen maddelere de paramanyetik maddeler denir. Ayrıca demir, kobalt, nikel ve bunların alaşımları, Fe₃O₄ bazı bakır-mangan alaşımları gibi maddeler paramanyetik maddelerden en az bin kez daha fazla bir kuvvetle manyetik alana çekilirler. Bu tür maddelere de ferromanyetik maddeler denir [3].

Manyetik özellik, elektronların kendi eksenleri çevresindeki hareketleri ile ilişkilidir. Elektronları eşleşmiş olan atomlar manyetik özellik göstermezler. Çünkü bunlarda eşleşmiş elektronlar birbirine karşıt yönde döneceğinden manyetik alanları birbirini yok eder. Sonuçta madde diyamanyetik özellikte olur. Eşleşmemiş bir tek elektronu bulunan maddeler zayıf bir manyetik etki gösterirler. Eşleşmemiş elektron sayısı arttıkça manyetik özellik artar. Bir elementin ferromanyetik olması için aşağıdaki koşulları sağlaması gerekir [21].

4.9. Alaşım Elementleri ve Özellikleri

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri, alaşım elementlerine ve mikro yapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli

alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Bu alaşım elementlerinin toplamı %10' a ulaşabilir [21].

Alüminyum alaşımları üretim şekillerine göre dövme ve dökme alaşımlar olarak ikiye ayrılır. Dövme alaşımlar, plastik olarak şekil değiştirebilir. Dökme alaşımların bu özellikleri iyi olmadığından ancak dökülerek şekillendirilebilirler. Alüminyumun dövme ve dökme alaşımlarının çoğuna, çöktürme sertleştirilmesi ısıl işlemi uygulanır. Alüminyum alaşımlarında kullanılan bazı elementlerin özellikleri aşağıda verilmiştir [21].

Bakır, atmosferik ortamda korozyon direncini ve sertliğini artırır. Bakır, malzemenin yüzey işleme kalitesini, sıcak şekillendirme ve sıcak dövme kaynağı özelliğini bozar. %12 Cu'a dek dayanımı artırır. Daha fazla gevreklik yaratır; genellikle yüksek sıcaklık özellikleri ile işlenebilirliği artırır [21].

Mangan, malzemenin dayanımını geliştirir ve esnekliği azaltır. Sertleşme kabiliyetinin artırır. Ancak sertleşme esnasında çatlama eğilimini artırır. Çentik darbe özelliğini iyileştirir. Dövme ve kayna edilebilme özelliğine olumlu katkıda bulunur. Korozyona karşı direnci geliştirir. Dökülebilirliği artırabilmek için demir ile birlikte kullanılarak metaller arası bileşiğin özelliğini değiştirir. Çekmeyi azaltır, alaşımların süneklik ve tokluk özelliklerini artırır [21].

Silisyum, fiziksel dayanımı ve özgül ağırlığı artırır. Malzeme içerisinde artırıldığında tokluğu düşürmeden dayanımın artmasını sağlar. Kimyasal tepkimelere karşı dayanımı yüksektir. Akışkanlığı, döküm kabiliyetini ve aşınma direncini artırır; sıcak çatlama eğilimini ve ısıl genleşme katsayısını azaltır. %13'den fazla silis içeren alaşımların talaşlı işlemi zordur [21].

Magnezyum, korozyon direncini artırır. Katı çözelti sertleşmesi yaratır: %6'dan fazla magnezyum içeren alaşımlarda sertleşmesi olur ve dökümleri zordur [21].

Çinko, dökülebilirliği düşürür, yüksek çinkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gösterirler, %10'dan yüksek olduğunda gerilmeli korozyon çatlama gösterir, diğer alaşım elementleriyle birlikte dayancı çok artırır. %3'den daha az çinko içeren ikili alüminyum alaşımlarda belirli bir etkisi yoktur [21].

Titanyum, tokluğun iyileşmesini sağlar. Yüksek sıcaklığa dayanımı artırır [21].

Demir, alüminyum cevherlerinde doğal katkı olarak bulunur, düşük oranlarda bazı alaşımların sertlik ve dayanımını artırır, dökümleri sıcak çatlama eğilimlerini azaltır [21].

Nikel, tokluğu ve sünekliği artırır. Nikel oranının artması, sertleşmeye etkisini azaltır [21].

Krom, sertliği ve aşınma direncini artırır [21].

Kalay, yüksek mukavemet ve korozyon direncini artırır [21].

5. MATERYAL VE METOD

Sac metal malzemelerde bükme işlemi sırasında oluşan geri esneme miktarının modellenmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmış, bu çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilip bilgisayar ortamında analizlerle desteklenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmaların detayları, bilgisayar destekli analiz, iş parçası malzemesi, bükme parametreleri, bükme tezgahı, , açılı ölçüm cihazı ve çalışmalar için gerekli diğer gereksinim ve donanımlar hakkında bilgiler verilmiştir.

5.1. Deneysel Çalışmalar

5.1.1. Deney Malzemeleri

Bükme işleminde kullanılan AL 5754 (1,0; 1,5 ve 2 mm) ve AA 2024 (1,0; 1,5 ve 2 mm) malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. AL 5754 alüminyum malzeme için kimyasal ve mekanik özellikleri

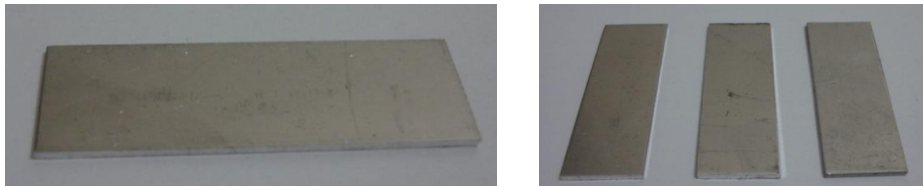
Element	%	Element	%
Silisyum (Si)	0,12100	Demir (Fe)	0,19400
Mangan (Mn)	0,01330	Magnezyum	0,00849
Nikel (Ni)	0,00887	Bakır (Cu)	0,04140
Kalay (Sn)	0,00848	Titanyum (Ti)	0,03100
Kurşun (Pb)	0,01480	Çinko (Zn)	0,04250
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı	MPa	225	
Akma Dayanımı	MPa	148	
Uzama	%	18,5	
Elastikiyet Modülü	GPa	68	
Poission Oranı	-	0,33	
Özgül Ağırlığı	g/cm ³	2,67	
Sertlik (HB)	Kg/mm ²	68	

Çizelge 5.2. AA 2024 alüminyum malzeme için kimyasal ve mekanik özellikleri

Element	%	Element	%
Silisyum (Si)	max. 0.5	Demir (Fe)	max. 0.5
Krom (Cr)	max. 0.1	Magnezyum	1.2 - 1,8
Mangan (Mn)	0.3 - 0.9	Bakır (Cu)	3.8 - 4.9
Çinko (Zn)	max.	Titanyum (Ti)	max.0.15
Mekanik Özellikler			
Çekme Dayanımı	MPa	483	
Akma Dayanımı	MPa	345	
Uzama	%	18	
Elastikiyet Modülü	GPa	73.1	
Poission Oranı	-	0,33	
Özgül Ağırlığı	g/cm ³	2.78	
Sertlik (HB)	Kg/mm ²	120	

Deney numunelerinin hazırlanması

Deney numuneleri hadde yönünde 58 x 20 mm ölçülerinde giyotin tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Ayrıca, hadde yönüne paralel olarak 2 mm kalınlık için deney numuneleri de hazırlanmıştır. Resim 5.1'de deneylerde kullanılan numuneler gösterilmiştir. Kesme esnasında numune kenarlarında oluşan çapaklar ege yardımı ile giderilerek temizlenmiştir. Deney numunelerine herhangi bir ısıl işlem uygulanmadan bükme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.1. Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanmış numuneler

5.1.2. Bükme kalıbının tasarımı ve hesaplaması

Deneyisel çalışmada kullanılan bükme kalıbının komple ve detay resimleri EK-1'de verilmiştir.

AA 2024 ve AL 5754 sac malzemeler için Microsoft Excell programının yardımıyla 60°, 90° ve 120°'lik bükme işlemleri için 1,0; 1,5 ve 2 mm sac kalınlığına göre bükme kuvvetleri hesaplanır. AA 2024 sac malzeme için bükme kuvveti ve diğer kalıp hesaplamaları kalıp hesaplamaları aşağıdaki gibidir;

Zımba uç kavisinin tespiti

$$r_{i1} = K (r_{i2} + (0,5 \times t)) - (0,5 \times t) \quad (5.1)$$

$$r_{i1} = 0,045 (1 + (0,5 \times 2)) - (0,5 \times 2)$$

$$r_{i1} = 0,91 \text{ mm}$$

r_{i1} = Zımbaya verilmesi gerekli uç kavisi (mm),

r_{i2} = Bükme uç kavisi (mm),

t = Sac kalınlığı (mm),

K = Katsayı.

K katsayı formülü;

$$K = 1 - \left[a \left(\frac{\sigma_s * \sigma_b}{2} \right) + b \left(\frac{\sigma_s * \sigma_b}{2} \right) \left(\frac{r_{i2}}{t} \right)^2 \right] \quad (5.2)$$

$$K = 1 - \left[0,001 \left(\frac{35,19 \times 58,65}{2} \right) + 0,000015 \left(\frac{35,19 \times 58,65}{2} \right) \left(\frac{1}{1} \right)^2 \right] = 0,045$$

$$\sigma_a = [0,6 \times \sigma_c] \quad (5.3)$$

$$\sigma_c = 586,5 \text{ N / mm}^2$$

a = 0,001 katsayı

b = 0,000015 katsayı

σ_a = Akma sınır dayanımı (N / mm²)

σ_ζ = Çekme dayanımı (N / mm²)

Alt kalıp kavisi hesabı;

$$R = r_i 1 + t \quad (5.4)$$

$$R = 0,91 + 1 = 1,91 \text{ mm}$$

Kalıp açısı hesabı;

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha_0) \left(\frac{r_i^2}{r_i 1} - 1 \right) \quad (5.5)$$

$$\Delta\alpha = (180 - 90) \left(\frac{1}{0,91} - 1 \right) = 8,9^\circ$$

$\Delta\alpha$ = Kalıp açısı

α_0 = Bükme açısı

Kalıp açıklığı hesabı;

$$W = \frac{r_i 1}{0,15 - 0,25} \quad (5.6)$$

$$W = \frac{0,91}{0,15 - 0,25} = 9,1 \text{ mm}$$

W = Kalıp açıklığı

Bükmede uygulanacak P_b bükme kuvveti kalıbın ömrü ve üretilecek numunelerin kalitesi açısından çok önemlidir. Hesaplanan bükme kuvvetine göre uygun tonajlı pres seçilmelidir. Kalıplarda kuvvet analizi yaparken kalıbın çalışma yüzeylerindeki sürtünme katsayısı, yatay konumda oluşan kalıbın içerisindeki itme kuvveti, kurs boyuna göre değişen pres kuvveti, ve kalıp boşluğu değerleri dikkate alınmalıdır [2]. Bükme kuvveti hesabı aşağıdaki gibi yapılmaktadır;

$$P_b = \frac{c \times \sigma_c \times t^2 \times b}{W} \quad (5.7)$$

$$P_b = \frac{1,43 \times 586,5 \times 1 \times 28}{9,1} = 25806 \text{ N}$$

$$P_e = 2 P_b \quad (5.8)$$

$$P_e = 2 \times 25850 = 51612 \text{ N}$$

$$c = 1 + \frac{4 \times t}{W} \quad (5.9)$$

$$c = 1 + \frac{4 \times 1}{9,1} = 1,43$$

P_b = Bükme kuvveti (N)

P_e = Son bükme kuvveti (N)

t = Sac kalınlığı (mm)

σ_b = Çekme dayanımı (N / mm²)

b = Parça genişliği (mm)

c = Katsayı (sürtünme, geri yaylanma gibi ek kuvvetleri karşılamak içindir) [1].

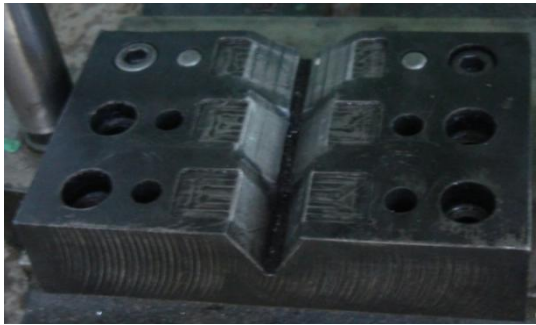
Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbı

Deneysel çalışmada kullanılan bükme kalıbının erkek zımbası ve dişi kalıbı 1050 imalat çeliğinden, CNC freze tezgahında hassas olarak imal edilmiştir. Kullanılan zımba ve dişi kalıp ısıtılma tabii tutularak sertleştirilmiş ve 53 HRC sertlik değerine çıkarılmıştır.

Deneysel çalışmada kullanılan kalıp zımbaları Resim 5.2'de, dişi plaka Resim 5.3'de, kalıp üst ile alt grup montajı Resim 5.4'de ve kalıp komple montajı Resim 5.5'de gösterilmiştir.



Resim 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan bükme zımbaları



Resim 5.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan dişi plaka



Resim 5.4. Kalıp üst ve alt grup montajı



Resim 5.5. Kalıp komple montajı

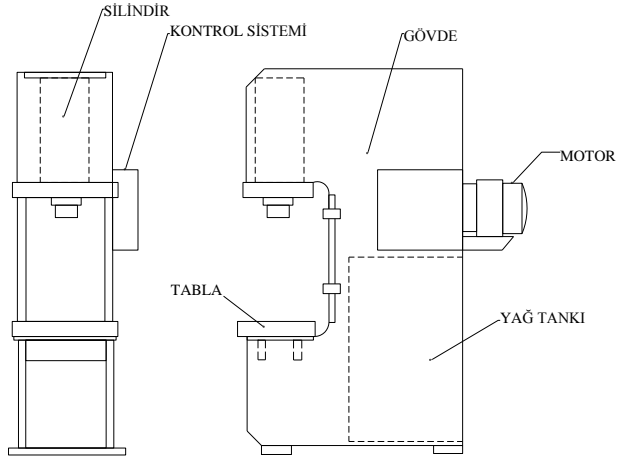
5.1.3. Deneysel çalışmada kullanılan makine ve cihazlar

Deneysel çalışmalarda, baskı işlemi için hidrolik pres tezgahı, deney parçalarının kesilmesi için eksantrik giyotin tezgahı, bükülen parçaların ölçülmesi için optik profilometre ve imal edilen kalıp elemanlarının ısıl işleme tabi tutulması için dijital termostatlı ve en yüksek sıcaklığı 850°C olan tavlama fırını kullanılmıştır.

Hidrolik Pres

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan 600 kN basma kapasiteli C tipi Şahinler marka hidrolik pres tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı Resim

5.1'de, tezgahın bölümleri ve Çizelge 5.3'de pres tezgahının teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı pres tezgahı ve bölümleri



Resim 5.6. Bükme işleminde kullanılan pres tezgahı

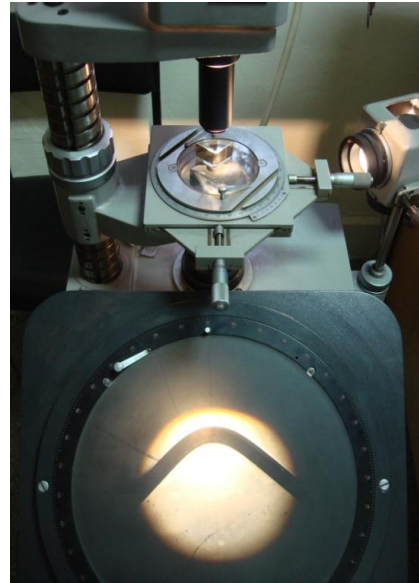
Çizelge 5.3. Pres tezgâhının teknik özellikleri

Presleme Kuvveti	600 kN
Motor Gücü	4 KW
Faydalı Kalıp Alanı	500 x 500 mm
Piston Hareketi	500 mm
Max. Açıklık	650 mm
Presleme Hızı	37,5 mm/s
Geri Dönüş Hızı	50 mm/s

Bükme işleminde, farklı iki farklı numune, üç farklı uç kavisli zımba ve üç farklı kalınlıktaki numuneler kullanılmak suretiyle zımbalar kalıpta değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Profilometre

Bükme işleminden sonra elde edilen parçalar, 1 dakika hassasiyetindeki optik ölçü aleti olan Mitutoyo marka profilometre kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Bu sayede ölçmede meydana gelebilecek hatalar en aza indirilmiş ve sonuçların güvenilirliği sağlanmıştır. Deney numunelerinin ölçümünde kullanılan profilometre Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



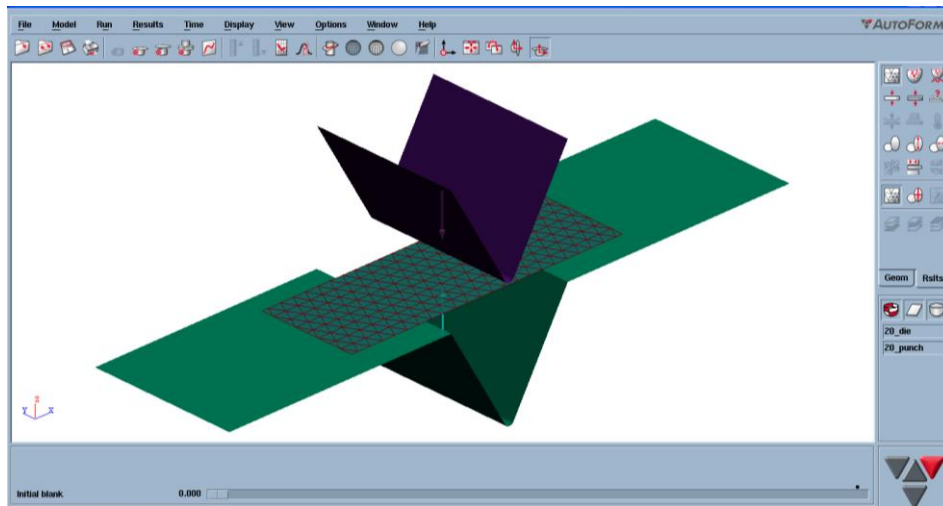
Resim 5.7. Ölçme işleminde kullanılan profilometre

5.2. Analiz Çalışmaları

Sac metal parçalarda meydana gelen şekil değiştirmelerin analizleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak Autoform programında gerçekleştirilmiştir. Autoform, şekil değiştirme işlemlerinin analizinde dünya çapında kabul görmüş, yüksek güvenilirliğe sahip paket program olarak bilinmektedir.

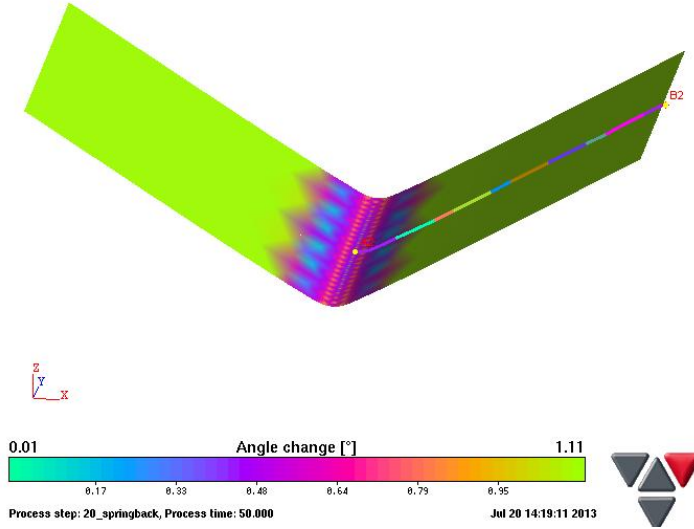
Bükme işleminin analiz edilebilmesi için öncelikle kalıp elemanlarının ve sac numunelerin bilgisayar ortamında modellenmesi, modelin analiz işleminde kullanılacak olan paket programa aktarılması, ağ yapılarının oluşturulması ve sac malzeme özelliklerinin atanması gerekmektedir.

Analiz işlemlerinde kullanılacak olan modeller SolidWorks paket programında çizilmiş ve Autoform paket programı içerisine aktarılmıştır. Autoform'da oluşturulan ve analiz işlemlerinde kullanılan 60° V bükme işlemi örnek model yapısı Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



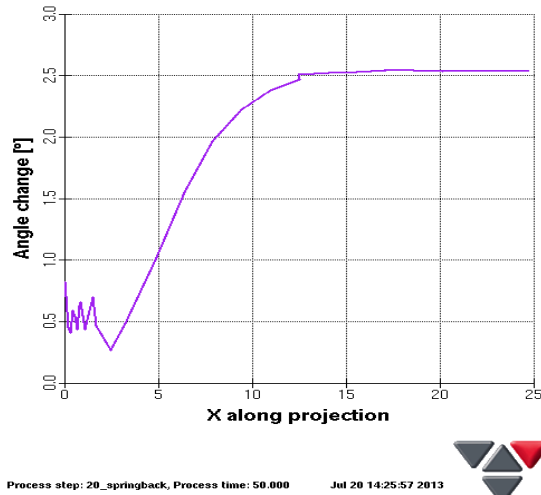
Şekil 5.2. Analiz işlemlerinde kullanılan 60° V bükme modeli

Autoform'da yapılan bükme analizi sonucunda oluşan geri esnemenin, parça üzerinde herhangi bir noktada nasıl tespit edileceği Şekil 5.3'de örnek olarak gösterilmiştir.



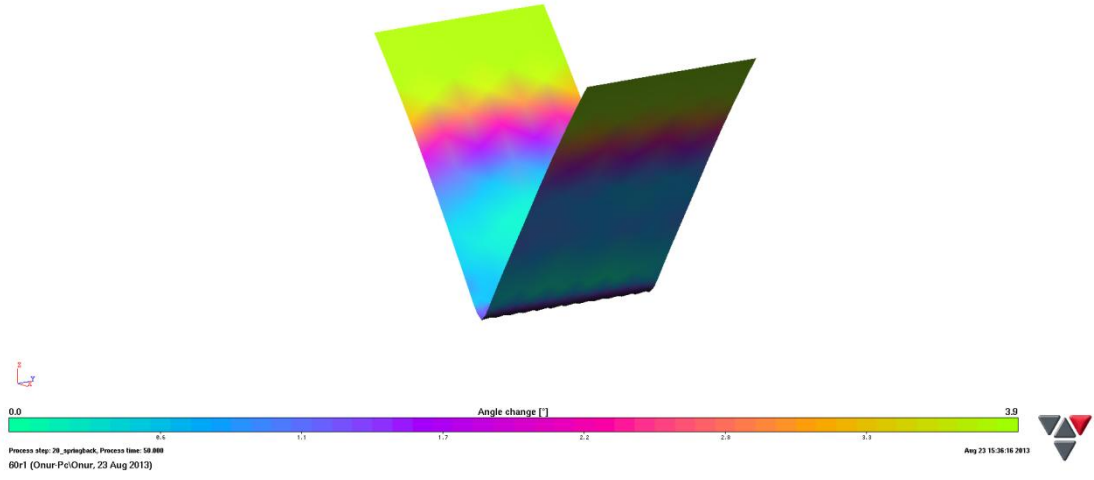
Şekil 5.3. Sac malzemelerin Autoform paket programı ile bükülmesi sonucu elde edilen geri esneme açısının bulunması

Elde edilen geri esnemenin en yüksek ve en düşük değerlerinin belirtildiği grafik Şekil 5.4'de gösterilmiştir.

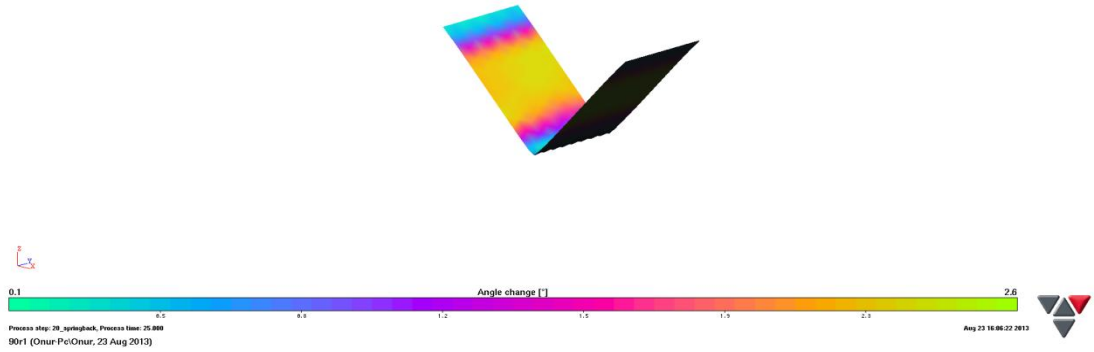


Şekil 5.4. Bükme işlemi sonucunda elde edilen geri esnemenin grafik ile gösterilmesi

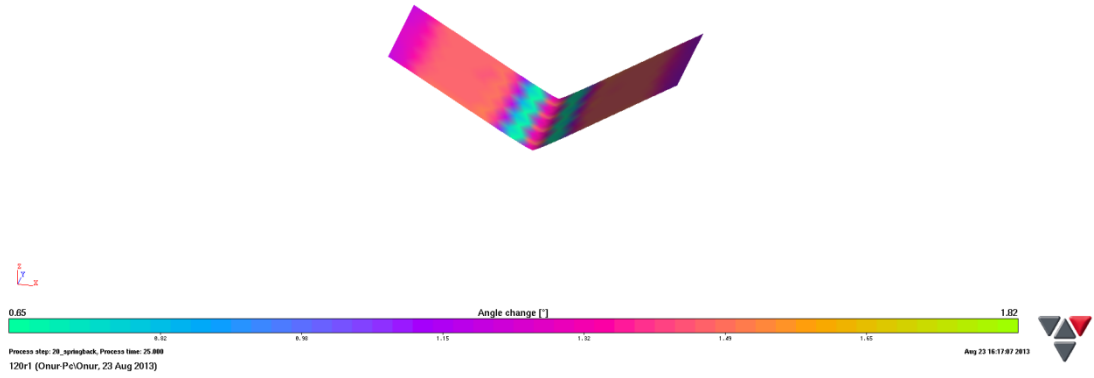
Şekil 5.3'de AL 5754 sac numunenin 60° V bükme analizi, Şekil 5.4'de AL 5754 sac numunenin 90° V bükme analizi, Şekil 5.5'de AL 5754 sac numunenin 120° V bükme analizi ve Şekil 5.6'de AA 2024 sac numunenin 90° V bükme analizlerinin örnek modelleri gösterilmiştir.



Şekil 5.5. 1 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 60°'lik V bükme analizinde elde edilen örnek bükme modeli

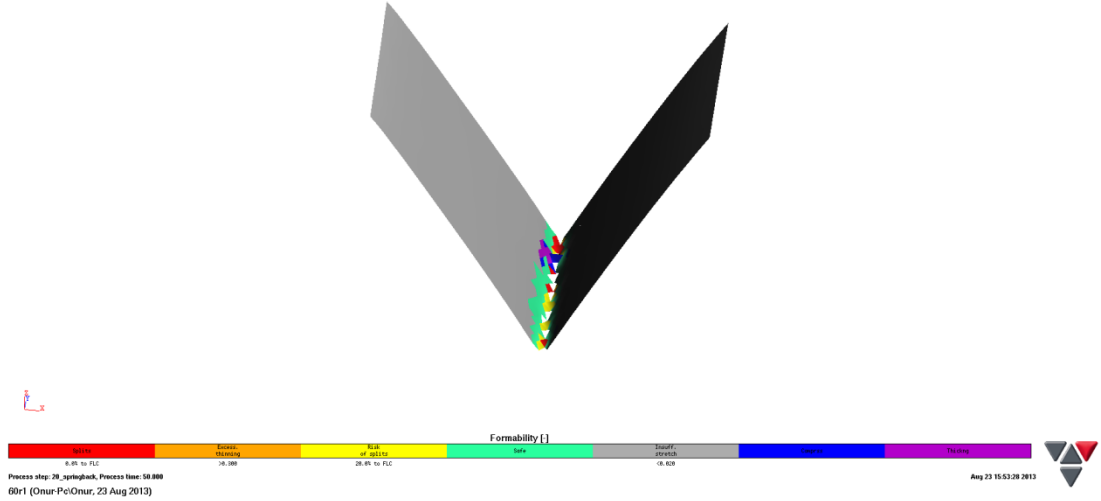


Şekil 5.6. 1 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 90°'lik V bükme analizinde elde edilen örnek bükme modeli



Şekil 5.7. 1 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 120°'lik V bükme analizinde elde edilen örnek bükme modeli

1 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerde yapılan bükme analizi sonucunda meydana gelen kopma Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. 1 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunenin, 1 mm uç kavisli zımba ile 60°'lik V bükme analizi esnasında oluşan kopmanın gösterilmesi

Autoform programı kullanılarak bükme işlemi gerçekleştirilen AL 5754 ve AA 2024 sac metal numunelerin analiz sonuçları Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5' de verilmiştir.

Çizelge 5.4. AL 5754 sac numunelerin Autoform programında 60°, 90° ve 120° bükülmesi sonucunda elde edilen analiz verileri

Malzeme	Bükme açısı	Malzeme kalınlığı (mm)	Zımba uç kavisi (mm)	Geri esneme miktarı
AL 5754	60°	1	1 mm	5,4°
AL 5754	60°	1	2 mm	5,8°
AL 5754	60°	1	4 mm	6,1°
AL 5754	60°	1,5	1 mm	2,7°
AL 5754	60°	1,5	2 mm	3°
AL 5754	60°	1,5	4 mm	3,4°
AL 5754	60°	2	1 mm	2,1°
AL 5754	60°	2	2 mm	2,3°
AL 5754	60°	2	4 mm	3,2°
AL 5754	90°	1	1 mm	2,2°
AL 5754	90°	1	2 mm	4,1°
AL 5754	90°	1	4 mm	5,3°
AL 5754	90°	1,5	1 mm	1,8°
AL 5754	90°	1,5	2 mm	3,5°
AL 5754	90°	1,5	4 mm	4,1°
AL 5754	90°	2	1 mm	1,7°
AL 5754	90°	2	2 mm	3,2°
AL 5754	90°	2	4 mm	3,8°
AL 5754	120°	1	1 mm	5,4°
AL 5754	120°	1	2 mm	6°
AL 5754	120°	1	4 mm	6,3°
AL 5754	120°	1,5	1 mm	2,7°
AL 5754	120°	1,5	2 mm	3,6°
AL 5754	120°	1,5	4 mm	4,9°
AL 5754	120°	2	1 mm	2,4°
AL 5754	120°	2	2 mm	3,5°
AL 5754	120°	2	4 mm	4,1°

Çizelge 5.5. AA 2024 sac numunelerin Autoform programında 60°, 90° ve 120° bükülmesi sonucunda elde edilen analiz verileri

Malzeme	Bükme açısı	Malzeme kalınlığı (mm)	Zımba uç kavisi (mm)	Geri esneme miktarı
AA 2024	60°	1	1 mm	x
AA 2024	60°	1	2 mm	x
AA 2024	60°	1	4 mm	9,7°
AA 2024	60°	1,5	1 mm	x
AA 2024	60°	1,5	2 mm	x
AA 2024	60°	1,5	4 mm	8°
AA 2024	60°	2	1 mm	x
AA 2024	60°	2	2 mm	x
AA 2024	60°	2	4 mm	5,8°
AA 2024	90°	1	1 mm	x
AA 2024	90°	1	2 mm	x
AA 2024	90°	1	4 mm	7,6°
AA 2024	90°	1,5	1 mm	x
AA 2024	90°	1,5	2 mm	x
AA 2024	90°	1,5	4 mm	4,7°
AA 2024	90°	2	1 mm	x
AA 2024	90°	2	2 mm	x
AA 2024	90°	2	4 mm	4°
AA 2024	120°	1	1 mm	2,9°
AA 2024	120°	1	2 mm	5,1°
AA 2024	120°	1	4 mm	6,8°
AA 2024	120°	1,5	1 mm	2°
AA 2024	120°	1,5	2 mm	4,4°
AA 2024	120°	1,5	4 mm	6,1°
AA 2024	120°	2	1 mm	1,2°
AA 2024	120°	2	2 mm	2,3°
AA 2024	120°	2	4 mm	4,9°

x: Bükme esnasında malzemede meydana gelen kopma sonucunda ölçülemeyen numuneler

5.3. Metot

Malzeme özellikleri ve işlem parametreleri geri esnemenin tahminini zorlaştıran etkenlerdendir. Sac metal parçaların farklı bükme parametrelerinde şekillendirilebilirliğini araştırmak için dokuz farklı deney serisi kullanılmıştır. Deneylerin yapılışında bir dişi plaka, üç farklı kalınlık, iki farklı cins malzeme, üç farklı açı ve üç farklı uç kavisli zımba olmak üzere toplam dokuz çeşit zımba kullanılmıştır. V tip bükme tekniği kullanılarak aşağıdaki deneysel prosedür gerçekleştirilmiştir.

Deney serilerinde, zımba ile dişi plaka arasında sac kalınlığı kadar boşluk verilmiş ve böylece sac numunelerin bükme bölgesinde ezilmesi önlenmiştir. Zımba sac malzeme üzerinde bekletilmeden bükme işlemini yaptıktan sonra hemen üzerindeki yük kaldırılarak geri dönüşü yapılmıştır. Deney serilerinde kullanılan zımba açıları ve zımba uç kavisleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Deney serilerinde kullanılan zımba açıları ve zımba uç kavisleri

Deney Serisi	Zımba Açısı	Zımba Uç Kavis
1.	60°	1 mm
2.	60°	2 mm
3.	60°	3 mm
4.	90°	1 mm
5.	90°	2 mm
6.	90°	3 mm
7.	120°	1 mm
8.	120°	2 mm
9.	120°	3 mm

Yapılan çalışmada, her zımba için AL 5754 ve AA 2024 olmak üzere iki çeşit numunede bükme deneyleri en az 3'er defa tekrarlanmıştır. Ayrıca 2 mm sac kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel bükme işlemi de yapılarak, hadde yönünün bükmeye olan etkisi incelenmiştir. Farklı parametrelerin kullanıldığı çalışmalarda toplam 216 adet deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen

sonuçlar için sac malzemelerin geri esneme grafikleri oluşturulmuştur. Çizelge 5.7'de deneysel çalışmalarda kullanılan bükme parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Deneysel çalışmada kullanılan bükme parametreleri

Kalıp Zımba Açıları	60°	90°	120°
Malzeme	Alüminyum AL 5754 Alüminyum AA 2024	Alüminyum AL 5754 Alüminyum AA 2024	Alüminyum AL 5754 Alüminyum AA 2024
Sac Malzeme Kalınlığı (mm)	1 1,5 2	1 1,5 2	1 1,5 2
Zımba Uç Kavisi (mm)	1 2 4	1 2 4	1 2 4

Deneysel çalışmalar, oda sıcaklığında, kuru işlem yapılarak atölye ortamında gerçekleştirilmiştir. Her bir deney numunesi, kalıpta işlenen parça yuvasına yerleştirilerek hidrolik pres ile numuneye ve kalıba zarar vermeden dikkatli bir şekilde bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Profilometre ile açı ölçme işlemlerinde de aynı titizlik uygulanmıştır.

Bükülen her bir parçanın ölçme işlemlerinde açı ölçer kullanılarak ön kontroller yapılmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamında bir dakika hassasiyetinde profilometre ile hassas ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm tekrarları yapılarak ölçülen değerlerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Böylece sağlıklı deney sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, Microsoft Excel ofis programı yardımı ile çizelge ve grafiklere dönüştürülmüştür. Oluşturulan grafikler Ek-3'de sunulmuştur. Ölçümler neticesinde elde edilen verilerin ortalamaları derece ve onluk sisteme uyarlanarak tabloya aktarılmıştır. Herhangi bir değer değişirse ortalama ve değerler otomatik olarak değişmektedir. Çizelgelerdeki derece ve dakika cinsinden

olan geri ve ileri esneme değerleri alınarak grafik ve denklemler elde edilmiştir. Her bir grafiğin eğim çizgileri alınarak polinom eğri denklemleri çıkarılmıştır. Polinom eğri denklemi ikinci dereceden bir denklem olması ve hesaplamaların daha kolay yapılmasından dolayı tercih edilmiştir. Grafikler sonucunda elde edilen R^2 değerlerinin 1'e yakın çıkması türetilen matematiksel modellerin doğruluğunu göstermektedir. Dolayısıyla, matematiksel eşitliklerin bilimsel çalışmalarda kullanılabilir olacağı tespit edilmiştir.

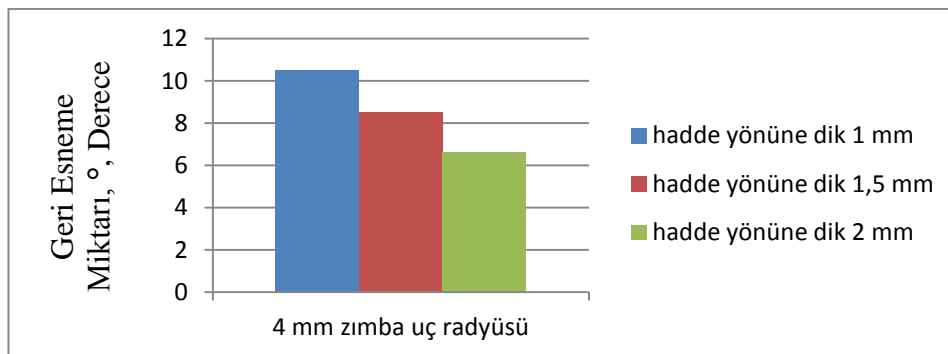
6. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

Bükme esnasında oluşan geri esnemenin matematiksel olarak modellenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda deneyler iki ana kategoride ele alınmıştır. İlk olarak, 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numuneler bükme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı kalınlıklardaki bu numuneler, hadde yönüne dik, ayrıca 2 mm kalınlıktaki sac numune için de hadde yönüne paralel bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bükme işlemleri, 60°, 90° ve 120°'lik zımbalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İkinci olarak, 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac malzemeler bükme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı kalınlıklardaki bu numuneler, hadde yönüne dik, ayrıca 2 mm kalınlıktaki sac numune için de hadde yönüne paralel bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bükme işlemleri, 60°, 90° ve 120°'lik zımbalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.1. 60°'lik Bükme Deneyleri

1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 ile 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac malzemelerin 60° bükülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerinin 60°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları

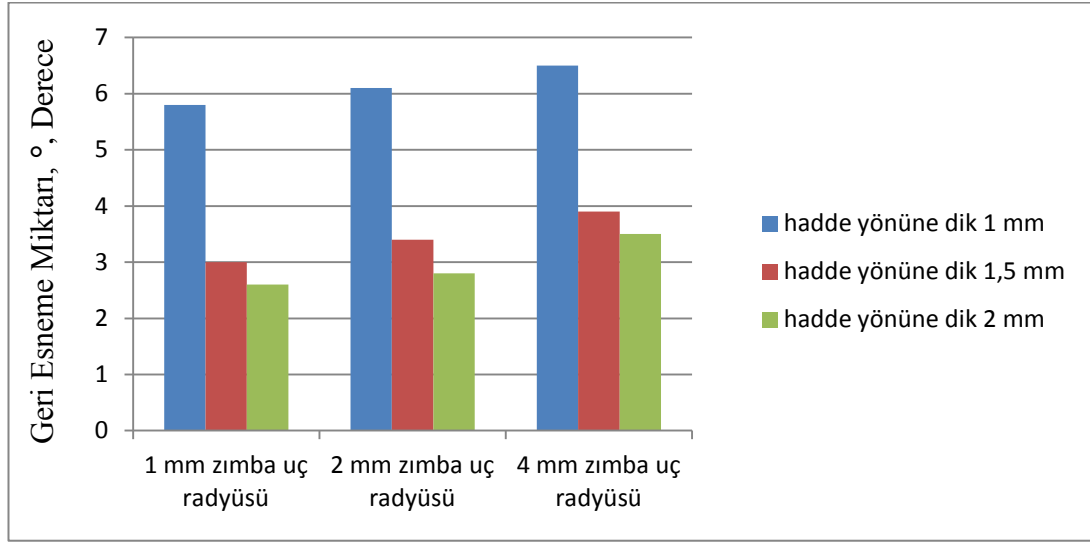
Bükme esnasında en büyük çekme gerilimi bükülen parçanın dış yüzeyinde meydana gelir. İç yüzeye doğru çekme gerilimi azalır ve tarafsız eksen üzerinde 0 olur. Sac numuneye uygulanan yük kaldırıldığında, numune eski haline dönmeye çalışır ve bir miktar geri gelir. Bu da geri esneme olarak adlandırılır. Değişken çekme gerilimi bükülen parçanın geri esnemesine sebep olur [2].

AA 2024 sac malzeme için 1 ve 2 mm uç kavisli ve 60° uç açılı zimbalar kullanılarak gerçekleştirilen bükme işleminde, 1-1,5 ve 2 mm sac malzemeler bükme esnasında gerilime dayanamayıp bükme ekseninden kırılmışlardır. 4 mm uç kavisli zımba için, sac malzemelerde kırılma veya kopma meydana gelmemiştir. 4 mm uç kavisi için uygun sonuçlar elde edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki sac malzemeler için gerçekleştirilen bükme işleminde ortalama geri esneme değeri 10,5° olarak ölçülmüştür. 1,5 mm sac kalınlığında açı değerinin azaldığı gözlenmiş ve geri esneme miktarı 8,5° ölçülmüştür. 2 mm kalınlığındaki numuneler için geri esneme azalmaya devam ederek 6,6° olarak ölçülmüştür ve aynı kalınlıkta hadde yönüne paralel yapılan bükme işleminde geri esneme artışı görülmüş ve 7,5° olarak tespit edilmiştir. AA 2024 sac numuneler için 60°'lik bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri esneme miktarları Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	x	x	10,5°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	x	x	8,5°
Hadde yönüne dik	2 mm	x	x	6,6°
Hadde yönüne paralel	2 mm	x	x	7,5°

X: Bükmede, bükme bölgesinde kopma gerçekleşmiştir.



Şekil 6.2. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları

AL 5754 sac malzeme için 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm kalınlığındaki sac numuneleri için ortalama esneme açısı değeri 5,8° olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak 1,5 mm kalınlıktaki numunelerde geri esneme azalmaya başlamış ve 3° olarak ölçülmüştür. 2 mm kalınlığındaki numuneler için geri esneme daha da azalarak 2,6° olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde elde edilen sonuçlara karşın geri esneme artış görülmüş ve ortalama 2,9° olarak esneme değeri ölçülmüştür.

AL 5754 sac malzeme için 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama geri esneme değeri 6,1° olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak 1,5 mm kalınlıktaki numunelerde ortalama değer artmış ve 3,4° olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığı 2 mm olan numunelerde geri esneme azalmaya devam ederek 2,8° olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde bükme açısında azalma görülmüş ve ortalama değer 3,3° olarak ölçülmüştür.

AL 5754 sac malzeme için 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama esneme açısı değeri 6,5° olarak

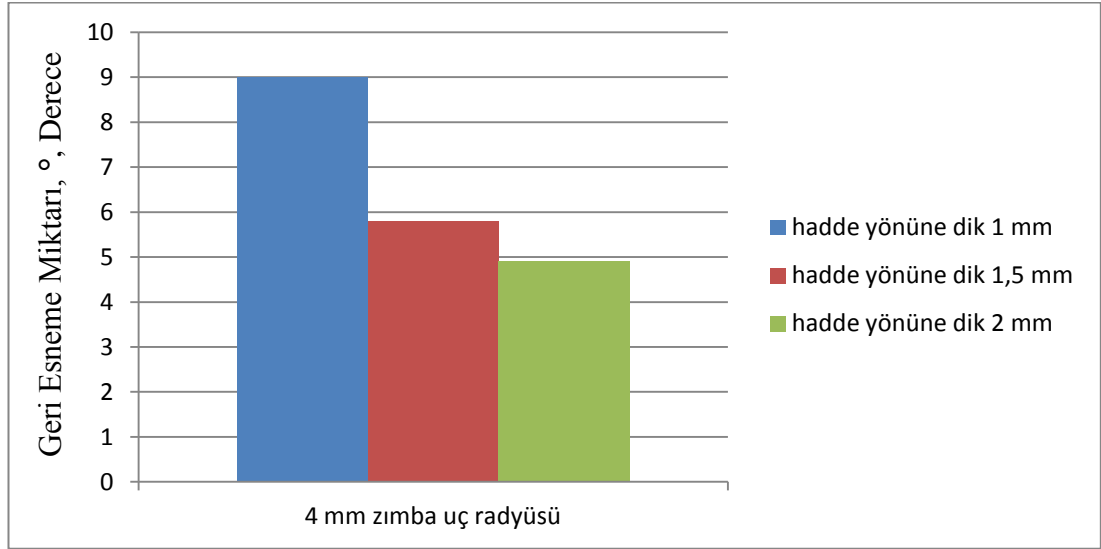
ölçülmüştür. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak 1,5 mm kalınlıktaki numunelerde ortalama değer azalarak 3,9° olarak ölçüm yapılmıştır. 2 mm kalınlığındaki numunelerde 3,5° olarak ölçülmüştür. Ayrıca 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde elde edilen sonuçlara karşın geri esneme değerinde artış görülmüş ve ortalama 3,7° olarak geri esneme değeri ölçülmüştür. AL 5754 sac numuneler için 60°'lik bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri esneme miktarları Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	5,8°	6,1°	6,5°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	3°	3,4°	3,9°
Hadde yönüne dik	2 mm	2,6°	2,8°	3,5°
Hadde yönüne paralel	2 mm	2,9°	3,3°	3,7°

6.2. 90°'lik Bükme Deneyleri

1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 ile 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 90° bükülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 6.3'de ve Şekil 6.4'de gösterilmiştir. AA 2024 sac numuneler için 90°'lik bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri esneme miktarları ise Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları

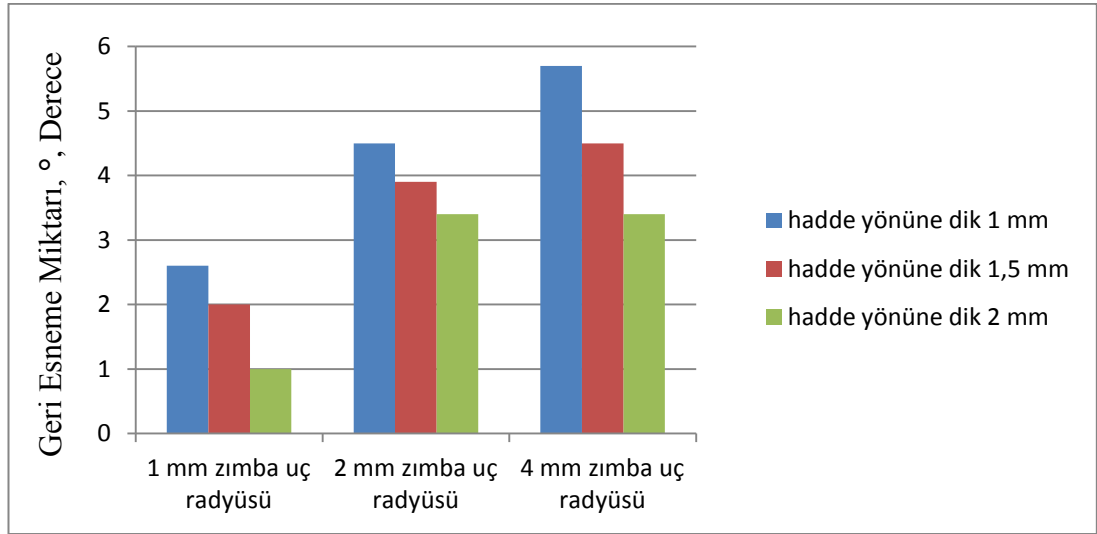
Çizelge 6.3. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numuneler 90°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	X	X	9°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	X	X	5,8°
Hadde yönüne dik	2 mm	X	X	4,9°
Hadde yönüne paralel	2 mm	X	X	7°

X: Bükmede, bükme bölgesinde kopma gerçekleşmiştir.

AA 2024 sac numuneler için 1 ve 2 mm uç kavisli zımbalar kullanılarak gerçekleştirilen bükme işleminde, 1-1,5 ve 2 mm sac numuneler bükme esnasında gerilime dayanamayarak bükme ekseninden kırılmışlardır. 4 mm uç kavisli zımba için, sac numunelerde kırılma veya kopma meydana gelmemiştir. 4 mm uç kavisi için uygun sonuçlar elde edilmiştir. 1 mm sac için gerçekleştirilen bükme işleminde ortalama geri esneme değeri 9° olarak ölçülmüştür. 1,5 mm için bu açı değeri azalma göstermiş ve 5,8° ölçülmüştür. 2 mm kalınlığındaki numuneler için geri esneme

azalmaya devam etmiş ve $4,9^\circ$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel bükme işleminde geri esneme değerinde artış görülmüş ve 7° olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.4’de 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 90° ’lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları gösterilmiştir.



Şekil 6.4. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 90° ’lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları

AL 5754 sac numuneler için 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama esneme açısı değeri $2,6^\circ$ olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak 1,5 mm kalınlıktaki numunelerde sac kalınlığına bağlı olarak ortalama değerde azalma görülmüş ve 2° olarak ölçülmüştür. Sac numune kalınlığı tekrar artırılarak 2 mm’ye çıkarıldığında numunelerde ölçülen geri esneme değeri 1° olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde azalarak devam eden sonuçlara karşın geri esneme değerinde artış görülmüş ve ortalama $1,3^\circ$ olarak ölçülmüştür.

AL 5754 sac numuneler için 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama esneme açısı değeri $4,5^\circ$ olarak ölçülmüştür. 1,5 mm kalınlıktaki numunelerde sac kalınlığının artışına bağlı olarak

geri esneme değerinde azalma görülmüş ve ortalama değer 3,9° olarak llmştir. Sac numune kalınlığı artırılmaya devam edilerek 2 mm kalınlığındaki sac numunelerde geri esneme değeri yine azalmaya devam etmiş ve 3,4° tespit edilmiştir. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde çıkan diğer sonuçlara karşın geri esnemede artış grlmştir ve ortalama 3,5° olarak llmştir.

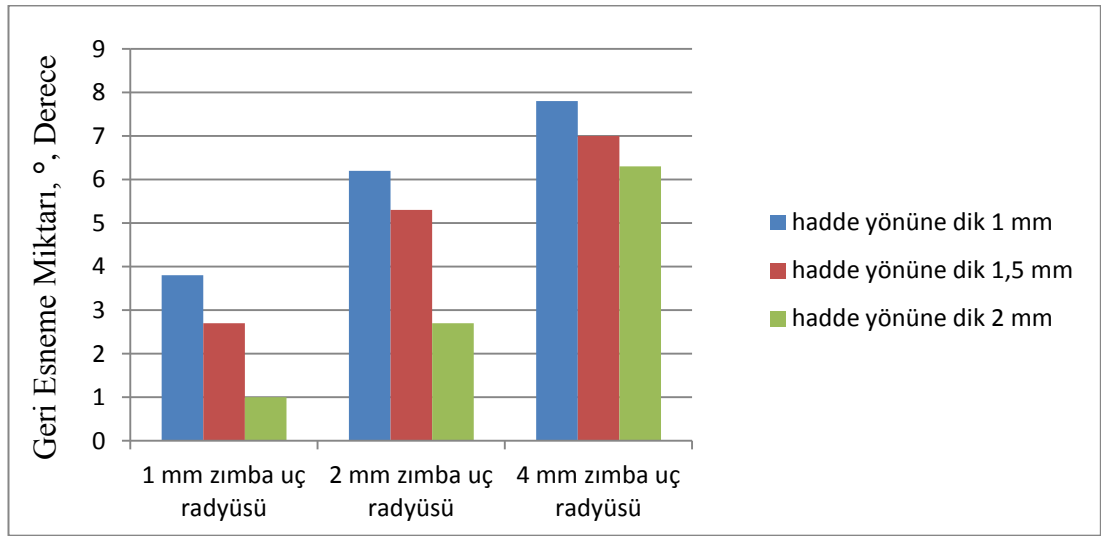
AL 5754 sac numuneler için 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama esneme açısı değeri 5,7° olarak llmştir. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak 1,5 mm kalınlıktaki numunelerde ortalama değer 4,5° ve 2 mm kalınlıktaki malzemede 3,4° olarak llmştir. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde elde edilen sonuçlara karşın bükme açısında artış görülmüş ve ortalama 3,6° olarak esneme değeri llmştir. AL 5754 sac numuneler için 90°lik bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri esneme miktarları izelge 6.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 90°lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisli		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	2,6°	4,5°	5,7°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	2°	3,9°	4,5°
Hadde yönüne dik	2 mm	1°	3,4°	3,4°
Hadde yönüne paralel	2 mm	1,3°	3,5°	3,6°

6.3. 120°'lik Bükme Deneyleri

1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 ile 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 120° bükülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 5'de ve Şekil 6'da gösterilmiştir. AA 2024 sac numuneler için 120°'lik bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri esneme miktarları Çizelge 6.5'de, AL 5754 sac numuneler için 120°'lik bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri esneme miktarları ise Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.5. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları

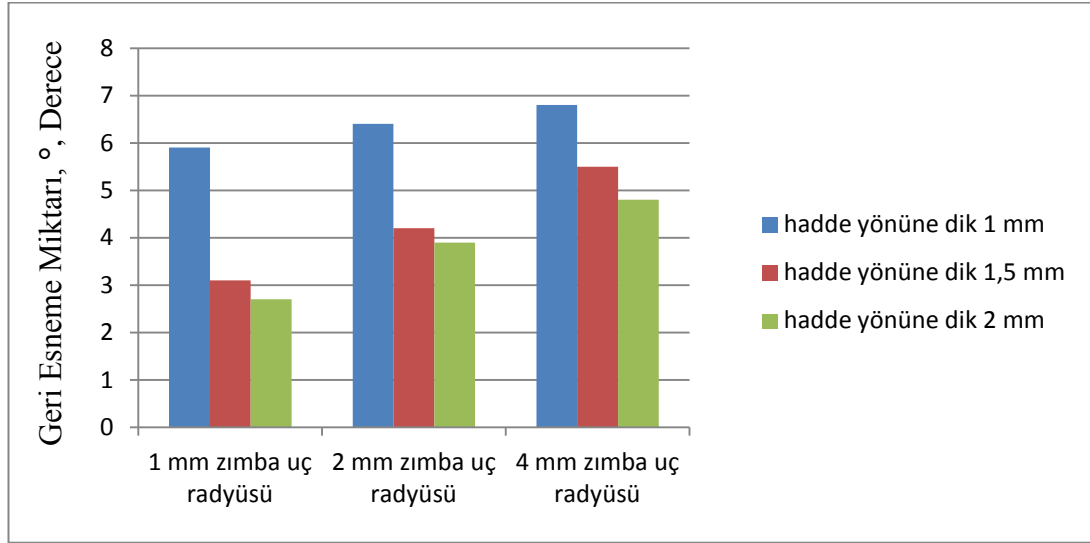
Çizelge 6.5. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	3,8°	6,2°	7,8°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	2,7°	5,3°	7°
Hadde yönüne dik	2 mm	1°	2,7°	6,3°
Hadde yönüne paralel	2 mm	3,1°	4,5°	7,5°

AA 2024 sac numuneler için 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımbalar ile yapılan bükme deneylerinde, 60° ve 90°'lik zımbalarla yapılan bükme deneylerine kıyasla şekil değiştirmede herhangi bir sorun olmadan bükme işlemi gerçekleştirilebilmiştir. 1mm uç kavisli zımba ile 1mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama esneme açısı değeri 3,8° olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak sac numune kalınlığı 1,5 mm'ye çıktığında ortalama geri esneme değerinde azalma görülmüş ve 2,7° olarak ölçülmüştür. Kalınlığı 2 mm olan sac numuneler kullanıldığında geri esneme azalma devam etmiş ve 1° olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki sac numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde, elde edilen sonuçlara karşın geri esneme değerinde artış görülmüş ve 3,1° olarak ölçülmüştür.

AA 2024 sac malzeme için 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm kalınlığındaki sac numuneler için ortalama esneme değeri 6,2° olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığının artışına bağlı olarak 1,5 mm kalınlığındaki numuneler için geri esneme azalma görülmüş ve ortalama geri esneme değeri 5,3° ölçülmüştür. Sac numune kalınlığı 2 mm'ye çıkarıldığında, geri esneme değeri azalmaya devam etmiş ve 2,7° olarak ölçülmüştür. Ayrıca, 2 mm kalınlığındaki sac numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde geri esneme değerlerinde artış görülmüş ve ortalama 4,5° olarak ölçülmüştür.

AA 2024 sac numuneler için 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm sac kalınlığındaki numuneler için ortalama esneme açısı değeri 7,8° olarak ölçülmüştür. Sac numune kalınlığı 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme değerinde azalma tespit edilmiş ve 7° olarak ölçülmüştür. 2 mm kalınlığındaki sac malzemede ise geri esnemenin azalması devam etmiş ve 6,3° olarak ölçülmüştür. Ayrıca 2 mm kalınlığındaki sac numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde geri esnemenin arttığı görülmüş ve ortalama 7,5° olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.6. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen geri esneme miktarları

Çizelge 6.6. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	5,9°	6,4°	6,8°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	3,1°	4,2°	5,5°
Hadde yönüne dik	2 mm	2,7°	3,9°	4,8°
Hadde yönüne paralel	2 mm	3,53°	5,1°	5,8°

AL 5754 sac numuneler için 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm sac kalınlığındaki numuneler için ortalama esneme değeri 8,44° olarak ölçülmüştür. Sac numune kalınlığı 1,5 mm'ye çıktığında ölçülen geri esneme değeri azalmış ve 5,6° olarak tespit edilmiştir. 2 mm kalınlıktaki sac numunelerde geri esneme azalmaya devam etmiş ve 4,9° olarak ölçülmüştür. Ayrıca 2 kalınlığındaki sac numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde geri esneme miktarında artış gözlenmiş ve 5,5° olarak ölçülmüştür.

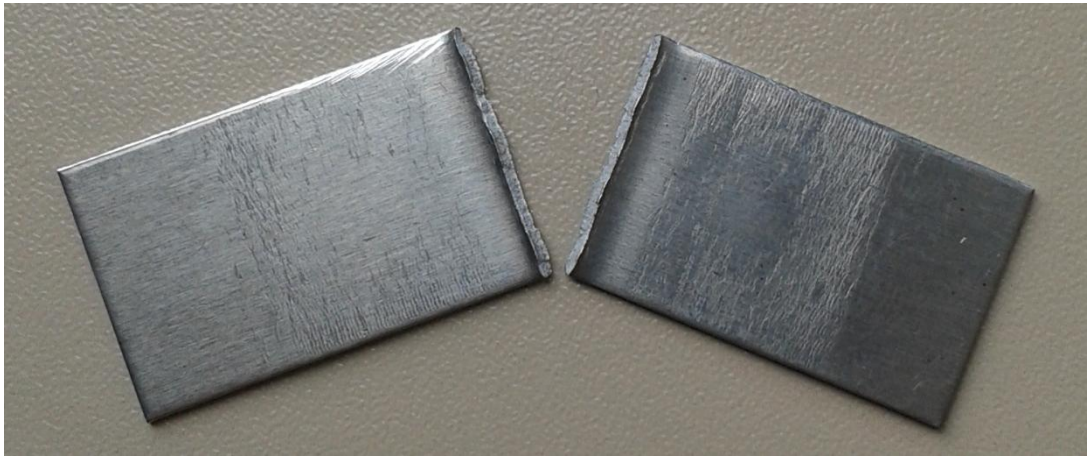
AL 5754 sac numuneler için 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1 mm sac kalınlığındaki numuneler için ortalama esneme değeri $6,2^\circ$ olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığı 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esnemede azalma meydana gelmiş ve $5,3^\circ$ olarak ölçülmüştür. 2 mm kalınlıktaki sac numunelerde geri esneme azalmaya devam etmiş ve $4,63^\circ$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca 2 mm kalınlığındaki sac numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde elde edilen bu sonuçlara karşın geri esnemede artış görülmüş ve ortalama $5,1^\circ$ olarak ölçülmüştür.

AL 5754 sac numuneler için 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme deneylerinde, 1mm sac kalınlığındaki numuneler için ortalama esneme açısı değeri $5,72^\circ$ olarak ölçülmüştür. Sac kalınlığı artırılıp 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esnemede azalma tespit edilmiş ve $4,8^\circ$ olarak ölçülmüştür. 2 mm kalınlığındaki sac numunelerde geri esneme azalmaya devam etmiş ve $4,5^\circ$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca 2 mm kalınlığındaki sac numuneler için hadde yönüne paralel yapılan bükme deneyinde elde değerlerde artış görülmüş ve ortalama 5° olarak geri esneme değeri ölçülmüştür.

6.4. Değerlendirme

60° , 90° ve 120° 'lik bükme işlemleri incelendiğinde, 60° 'lik bükme işleminde AA 2024 alüminyum malzemeler için 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımbalarla yapılan deneylerde malzeme özelliğinden dolayı bükmeye karşı direnç gösterememiş ve tarafsız eksenden kırıldığı gözlenmiştir. Ancak 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneyde bükme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. Sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye arttırılınca r/t (zımba uç kavisi / sac kalınlığı) oranından dolayı geri esnemede azalma meydana gelmiştir. Yani sac parça kalınlığının artması, yukarıda da açıklandığı gibi geri esnemenin azalmasına sebep olmuştur. Kalınlık tekrar 1,5 mm'den 2 mm'ye çıkarıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca 2 mm için hadde yönüne paralel bükmede geri esneme miktarının arttığı gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde, sac numune kalınlığının geri esnemeyi ters orantılı olarak etkilediği görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça geri esneme azalmakta, sac parça kalınlığı azaldıkça ise geri esneme artmaktadır. Bununla beraber hadde yönünün de geri esnemeyi doğrudan etkilediğini göstermektedir. Aynı kalınlık ve özelliklerdeki

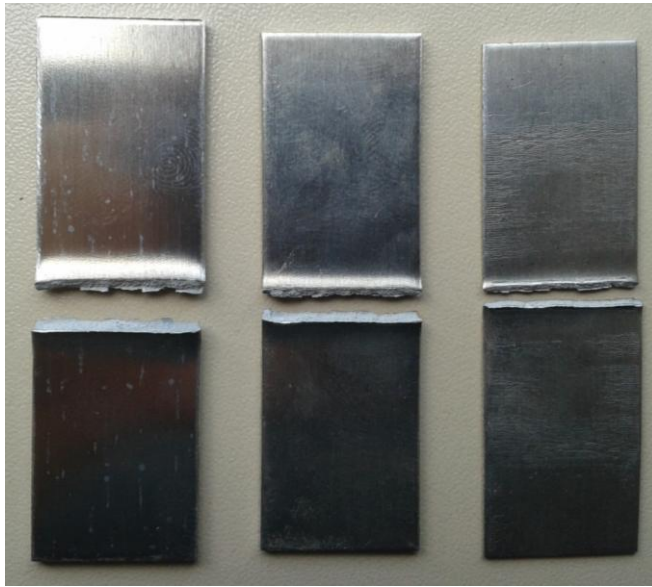
malzemelerde hadde yönüne paralel yapılan bükme işlemlerinde geri esneme miktarında artışlar görülmektedir. Bu da hadde yönüne paralel yapılan bükme işleminde, numunelerin fiziksel yapısındaki akış yönünün bükme doğrultusunda olmasının geri esnemeyi olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Hadde yönüne paralel yapılan bükme işlemleri çatlaklara da neden olabilmektedir. Uygun uç kavis değeri kullanılmaz ve hadde yönüne paralel bükme işlemi gerçekleştirilirse, malzeme istenilen ebatlarda elde edilemeyebilir. Hadde yönü bükme eksenine dik olduğunda, bükmenin gerçekleştiği yerde oluşan gerilimler asgari olmaktadır. Böylece burada rahatlıkla bükme işlemi gerçekleştirilebilir. Ancak hadde yönüne paralel bükme işleminde, gerilimler en yüksek değere ulaşmakta ve özellikle küçük uç kavis değerlerinde bükme kenarlarında bir takım yırtılmalar meydana gelmektedir. Resim 6.1'de AA 2024 sac numunelerin 60°'lik, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımba ile bükme işlemi sırasında kopması ile ortaya çıkan numune gösterilmektedir.



Resim 6.1. 1 mm kalınlığındaki AL 2024 sac numunelerin, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonucu meydana gelen kopma örneği

AA 2024 sac malzemenin 90° bükme deneylerinde de benzer geri esneme davranışları gözlenmiştir. 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımbalarla yapılan deneylerde malzeme özelliğinden dolayı bükmeye dayanamamış ve tarafsız eksenden (bükme kenarından) kırıldığı gözlenmiştir. Bu durum AA 2024 numunelerin kırılabilirliğinin oldukça fazla olduğunu göstermektedir. Malzeme 60° ve 90° bükmelerde küçük uç kavis değerleri ile bükülmeye çalışıldığında bükmeye karşı mukavemet

gösterememektedir. 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye arttırılınca geri esneme R/T oranından dolayı azalma görülmüştür ve malzeme kalınlığı 2 mm'ye çıkartılınca da devam etmiştir. Zımba uç kavisli büyüdüğünde, yani 4 mm'ye çıkarıldığında bükmede herhangi bir sıkıntı ile karşılaşılmaamıştır. Çünkü tarafsız ekseninde oluşan gerilmeler uç kavisinin etkisiyle azalmıştır. Malzeme kalınlığının artmasıyla elastik şekil değiştirme miktarı artmış ve geri esneme miktarı azalmıştır. 2 mm için hadde yönüne paralel bükme işleminde geri esneme miktarının arttığı gözlenmiştir. Hadde yönünün bükme eksenine paralel olması en büyük gerilme değerini oluşturduğundan yırtılmalara ve hatta kırılmalara neden olabilir. 90°'lik bükme deneylerinde elde edilen geri esneme miktarının, 60°'lik bükme işleminde elde edilen sonuçlara göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Bükme açısının artması geri esneme miktarını azaltmıştır. Bükmede kullanılan açı miktarı arttıkça malzemenin elastikiyet bölgesi artmakta, dolayısıyla her bükme derecesinde oluşan geri esneme miktarı azalmaktadır. 1,0; 1,5 ve 2,0 mm kalınlığındaki sac numunelerin 60° ve 90°'lik bükme işleminde, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımbalar kullanılarak yapılan deneyler sonucu elde edilen numuneler Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Resim 6.2. 1,0; 1,5 ve 2,0 mm kalınlığındaki sac numunelerin 60° ve 90°'lik bükme işleminde, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımbalar kullanılarak yapılan deneyler sonucu elde edilen numuneler

AA 2024 numunelerin 120° bükme deneylerinde, kullanılan tüm zımba uç kavislerinde bükme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. 1 mm zımba uç kavisli bükme işleminde malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak geri esneme miktarında azalma tespit edilmiştir. Sac kalınlığı arttıkça malzemede elastik şekil değiştirme miktarı da artmaktadır. 1,0; 1,5 ve 2 mm sac malzemelerde geri esneme, en inceden en kalına doğru gidildikçe azalma göstermiştir. Dolayısıyla geri esneme miktarı ters orantılı olarak azalmaktadır. 1, 2 ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bütün deneylerde geri esnemenin zımba uç kavisine bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. 2 mm kalınlığındaki sac numunelerde hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde, geri esnemenin arttığı gözlenmiştir. Bükme esnasında malzemede gerilmeler oluşmaktadır. Gerilmeler hadde yönüne dik olduğunda asgari düzeydedir ancak paralel olursa en yüksek seviyeye çıkar. Bu da geri esnemenin artmasına sebebiyet verir. Buradan da bükme işleminin hadde yönünde yapılmasının, daha uygun olacağı tespit edilmiştir. 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca 2 mm kalınlık için hadde yönüne paralel yapılan deneylerde de malzemede bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esnemedede bir miktar artış görülmüştür. 2 mm zımba uç kavisliyle yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme azalmış ancak 2 mm'ye çıkarıldığında tekrar bir artış görülmüştür. 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1mm' den 1,5 mm'ye çıkarıldığında elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak, geri esneme ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca hadde yönünde yapılan bükme işlemlerinde, bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esnemedede bir miktar artış görülmüştür.

Bükme işlemlerinde zımba açısına ve uç kavisine bağlı olarak numunelerin bükmeye dayanımı ve bükme açıları değişim göstermektedir. Zımba uç kavisinin artmasıyla bükme işlemi daha sağlıklı gerçekleştirilebilmektedir. 60° ve 90° bükme açısı, 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde sac malzemeler bükme eksenindeki gerilmelere dayanamayarak kırılmıştır. Bu açılarda en küçük uç kavisli zımba ile

bükme işleminin gerçekleştirilebilmesinin zor olduğu tespit edilmiştir. Sadece zımba uç kavisi 4 mm olduğunda sağlıklı sonuçlar alınabilmektedir. 120°'lik zımbayla yapılan bükme deneylerinde bükme işleminde herhangi bir şekil bozukluğu veya kırılma olmadan gerçekleştirilmiştir. Zımba uç kavisi 4 mm olan tüm zımbalarla yapılan deneyler başarı ile sonuçlanmıştır. Genel olarak, malzeme kalınlığının artması elastik şekil değiştirme miktarını artırmakta ve buna bağlı olarak da geri esnemeyi azaltmaktadır. Bükme açısının artması, geri esneme elastikiyet bölgesini artırmakta ve bu sebeple geri esneme azalmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bükme açısının artmasıyla geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir.

Pandya, yapmış olduğu tez çalışmasında 30°, 45°, 60° ve 90°'lik kalıp zımbalarını kullanarak çeşitli bükme deneyleri yapmıştır. Bu deneylerde, 1,5 mm kalınlığında AA 2024 T3 sac malzeme kullanılmıştır. 60°'lik bükme açısı ve 7,5 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerden elde edilen geri esneme miktarı 1,08° olarak tespit edilmiştir. Ayrıca 90°'lik bükme açısı ve 7,5 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerden elde edilen geri esneme miktarı 1,47° olarak tespit edilmiştir. Yaptığımız çalışma ile kıyaslandığında bulunan geri esneme değerleri daha düşük bulunmuştur [42].

AL 5754 alüminyum malzemeler için 60°'lik bükme işleminde 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde, sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye arttırıldığında R/T (zımba uç kavisi / sac kalınlığı) oranından dolayı geri esnemede azalma meydana gelmiştir. Yani malzeme kalınlığının artması, geri esnemenin azalmasına sebep olmuştur. Kalınlık tekrar 1,5 mm'den 2 mm'ye çıkarıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca 2 mm için hadde yönüne paralel bükmede geri esneme miktarının arttığı gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde, malzeme kalınlığının geri esnemeyi ters orantılı olarak etkilediği görülmektedir. Malzeme kalınlığı arttıkça geri esneme azalmakta, malzeme kalınlığı azaldıkça ise geri esneme artmaktadır. Bununla beraber hadde yönünün de geri esnemeyi doğrudan etkilediği görülmektedir. Aynı kalınlık ve özelliklerdeki malzemelerde hadde yönüne paralel yapılan bükme işlemlerinde geri esneme miktarında artışlar görülmektedir. Bu da hadde yönüne paralel yapılan bükme işleminde, numunelerin fiziksel yapısındaki akış yönünün bükme

doğrultusunda olmasının geri esnemeyi olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Hadde yönüne paralel yapılan bükme işlemleri çatlaklara da neden olabilmektedir. Uygun uç kavis değeri kullanılmaz ve hadde yönüne paralel bükme işlemi gerçekleştirilirse, malzeme istenilen ebat ve şekillerde elde edilemeyebilir. Hadde yönü bükme eksenine dik olduğunda, bükmenin gerçekleştiği yerde oluşan gerilmeler asgari olmaktadır. Böylece burada rahatlıkla bükme işlemi gerçekleştirilebilir. Ancak hadde yönüne paralel bükme işleminde, gerilimler en yüksek değere ulaşmakta ve özellikle küçük uç kavis değerlerinde bükme kenarlarında bir takım yırtılmalar meydana gelmektedir. 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca 2 mm kalınlık için hadde yönüne paralel yapılan deneylerde de malzemede bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esneme bir miktar artış görülmüştür. 2 uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme azalmış ancak 2 mm'ye çıkarıldığında tekrar bir artış görülmüştür. 4 mm zımba uç kavisiyle yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak, geri esneme ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca hadde yönünde yapılan bükme işlemlerinde, bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esneme bir miktar artış görülmüştür.

AL 5754 numunelerin 90° bükme deneylerinde, bükme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak geri esneme miktarında azalma tespit edilmiştir. Sac kalınlığı arttıkça malzemede elastik şekil değiştirme miktarı da artmaktadır. 1-1,5 ve 2 mm sac numunelerde, geri esneme kalınlık arttıkça azalma göstermiştir. Dolayısıyla geri esneme miktarı ters orantılı olarak azalmaktadır. 1, 2 ve 4 mm uç kavislerinde yapılan bütün deneylerde, geri esnemenin zımba uç kavisine bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak 2 mm kalınlığındaki sac numunelerde hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde, geri esnemenin arttığı gözlenmiştir. Bükme esnasında malzemede oluşan gerilmelerden dolayı geri esneme, hadde

yönüne dik bükme işlemi olduğunda asgari düzeydedir ancak paralel olursa en üst seviyeye çıkar. Bu da geri esnemenin artmasına sebebiyet verir. Buradan da bükme işleminin hadde yönünde yapılmasının, daha uygun olacağı tespit edilmiştir. 2 mm zımba uç kavisiyle yapılan deneylerde sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca 2 mm kalınlık için hadde yönüne paralel yapılan deneylerde de malzemede bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esnemede bir miktar artış görülmüştür. 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme azalmış ancak 2 mm'ye çıkarıldığında tekrar bir artış görülmüştür. 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1mm' den 1,5 mm'ye çıkarıldığında elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak, geri esneme ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca hadde yönünde yapılan bükme işlemlerinde, bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esnemede bir miktar artış görülmüştür.

AL 5754 numunelerin 120° bükme deneylerinde, bükme işlemi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak geri esneme miktarında azalma tespit edilmiştir. Sac kalınlığı arttıkça malzemede elastik şekil değiştirme miktarı da artmaktadır. 1-1,5 ve 2 mm sac malzemelerde, geri esnemede kalınlık arttıkça azalma göstermiştir. Dolayısıyla geri esneme miktarı ters orantılı olarak azalmaktadır. 1, 2 ve 4 mm uç kavislerinde yapılan bütün deneylerde, geri esnemenin zımba uç kavisine bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak 2 mm kalınlığındaki sac numunelerde hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde, geri esnemenin arttığı gözlenmiştir. Bükme esnasında malzemede oluşan gerilmelerden dolayı geri esneme, hadde yönüne dik bükme işlemi olduğunda asgari düzeydedir ancak paralel olursa en yüksek seviyeye çıkar. Bu da geri esnemenin artmasına sebebiyet verir. Buradan da bükme işleminin hadde yönünde yapılmasının, daha uygun olacağı tespit edilmiştir. 2 mm zımba uç kavisiyle yapılan deneylerde sac kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak ters

orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca 2 mm kalınlık için hadde yönüne paralel yapılan deneylerde de malzemede bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esneme bir miktar artış görülmüştür. 2 mm zımba uç kavisiyle yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkarıldığında geri esneme azalmış ancak 2 mm'ye çıkarıldığında tekrar bir artış görülmüştür. 4 mm zımba uç kavisiyle yapılan deneylerde malzeme kalınlığı 1mm' den 1,5 mm'ye çıkarıldığında elastik şekil değiştirmenin de artmasına bağlı olarak, geri esneme ters orantılı bir şekilde azalmış ve kalınlık 2 mm' ye artırıldığında azalma devam etmiştir. Ayrıca hadde yönünde yapılan bükme işlemlerinde, bükme ekseninde oluşan gerilmelerden dolayı geri esneme bir miktar artış görülmüştür.

Forcellese ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarda, 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 90° bükülmesiyle elde edilen geri esneme miktarı 0,33° olarak tespit edilmiştir. Yaptığımız çalışmada 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numune için 90° bükme işleminde 3,4° olarak tespit edilmiştir. Bulunan geri esneme değerleri daha yüksek çıkmıştır [41].

Carden ve arkadaşları, üç farklı otomotiv sacı olan yüksek dayanımlı düşük alaşımli çelik, silikon destekli çelik ve 6022 T4 alüminyum sac malzemeleri kullanarak çeşitli ölçümler yapmışlardır. Bu deneyler esnasında kalıp boşluğu/uç kavisi oranını, sürtünme katsayısını ve kontrollü gerilme kuvvetlerini dikkate almıştır. Baskın bölgelerin yer değişimini ve hangi bölgenin nasıl bir tepki verdiğini tespit etmek için ölçümler yapmışlardır. Yüksek kuvvetler uygulandığında geri esneme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. AA 2024 ve AL5754 sac malzemeleri kullanarak yaptığımız bu çalışmada, yüksek kuvvet uygulamanın geri esneme miktarına etkisinin azalttığı gözlenmiştir. Ancak gereğinden fazla uygulanan kuvvet kalıbın ömrünü azaltmaktadır. Bükme kuvveti doğru hesaplanmayıp, sac numuneye uygulandığında, numunede gereğinden fazla şekil değişimi meydana gelir. Bu nedenle uygun bükme kuvveti hesabı yapılmalıdır [11].

Gau ve arkadaşları, Bauschinger etkisi yönteminin geri esneme tahminindeki etkileri üzerine yaptıkları çalışmalarında, çelik saclarda yapılan deneylerde elde edilen geri esneme değerlerinin alüminyum saclarda elde edilen değerlere göre ortalama 10° daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [20]. Yaptığımız çalışmalarda, malzemenin sertlik değerinin geri esnemeyi önemli derecede etkilediği ortaya çıkmıştır. Kullanılan iki çeşit alüminyum sac numunede, sert ve mukavemeti daha fazla olan saclarda meydana gelen geri esnemenin diğer sac numuneye oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Burada kıyaslama yaptığımızda Gau'nun bulduğu değerlerin çalışmamızdaki değerlerle örtüştüğü görülmektedir.

Bükme işlemlerinde, malzeme türüne bağlı olarak çeşitli değişkenlikler görülmektedir. AA 2024 ile AL 5754 alüminyum malzemeler kıyaslandığında, AA 2024 sac numunelerin daha mukavemetli ancak kırılabilirliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. 60° kalıp zımbasıyla yapılan bükme deneylerinde AA 2024 sac malzemedeki meydana gelen geri esneme değerlerinin, aynı koşullar ile yapılan AL 5754 sac numunelerde elde edilen değerlere yaklaşık 3° - 5° daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 90° 'lik zımbayla yapılan deneylerde, aradaki geri esneme farkının azaldığı ve yaklaşık 2° - 4° olarak sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. 120° 'lik bükme deneylerinde ise aradaki farkın daha da azaldığı görülmüş ve yaklaşık 1° - 2° olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, aynı açılarda ve şartlarda yapılan bükme deneylerinde AA 2024 sac numunelerde AL 5754 numunelere göre daha fazla geri esneme olduğu görülmüştür. Bükme açısının artmasıyla da geri esneme değerleri azalmış ve malzemelerinde kendi aralarındaki geri esneme farkları azalarak devam etmiştir.

Malzeme bükme işlemleri esnasında, imalatı yapılacak olan zımbanın bükme açısı hesaplanırken, ileri ve geri esnemeler hesaba katılmalıdır. Örneğin, 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 90° 'lik ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükme işleminde kullanılması gereken uygun bükme açısını tespit etmek için Çizelge 6.4'den, geri esneme değeri $3,4^\circ$ olarak alınmalıdır. Bu değer, Şekil 6.4'den de bulunabilmektedir. Buradan erkek zımbaya verilmesi gereken açı miktarının hesabı aşağıda verilmiştir.

Erkek zımbaya verilmesi gereken açı = bükülecek açı - geri esneme açısı (6.1)

$\alpha = 90^\circ - 3,4^\circ = 86,6^\circ$ olmaktadır.

Diğer sac kalınlıkları ve bükme parametreleri için, Ek-3'de yer alan geri esneme grafikleri ve polinom eğri denklemleri üzerinde değerler girilerek istenilen ölçülerde kalıp ve zımba imalatı yapılabilir. Dolayısıyla, zımba imalatı yapılırken, geri esnemenin açıdan çıkarılmasıyla istenilen açıda bükme gerçekleştirilebilmektedir.

Yapılan çalışmalarda malzemelerin geri esneme değerleri oluşturulan tablolar yardımıyla kolay bir şekilde bulunabilir. Ancak deneylerde kullanılmayan sac kalınlıkları için geri esneme miktarı, polinom eğri denklemleri yardımı ile bulunabilmektedir. Bu denklemler, sac kalınlığı, bükme açısı, zımba uç kavisi etkisiyle meydana gelen geri esneme miktarlarının derece cinsinden hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır.

Grafiklerde kullanılan açılar için de geri esneme miktarları bulunmaktadır. Ayrıca ara değerler için de geri esneme miktarını bulmak oldukça kolaydır. Örneğin, EK 3'te Şekil 3.1'den, 1 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerin 60°'lik zımba ile yapılan bükme deneylerinde grafik yardımı ile geri esneme miktarını bulunabilir. 1 mm sac için çıkan geri esneme değerinin grafikten 10,5° olduğu görülmüştür. Bununla beraber grafikte olmayan ara değerler içinde oluşturulan polinom eğri denklemini kullanabilir. Bu denklem;

$$GE = 0,1933t^2 - 4,4767t + 14,78 \quad (6.2)$$

Sonuç olarak, kullanıcı grafiklerden veya denklemlerden istenilen kalınlıklardaki geri esneme miktarını bulabilmektedir. Bulunan bu değerlerle daha doğru ve ölçülü çalışmalar yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, iki farklı malzeme, üç farklı kalınlık, üç farklı bükme açısında ve üç farklı uç kavisli zımba ile geri esneme durumları incelenmiştir. Çalışmalarda sadece

AL 5754 ve AA 2024 sac malzemeleri kullanılarak deneyler yapılmıştır. Otomotiv ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan bu saclar kıyaslanmıştır.

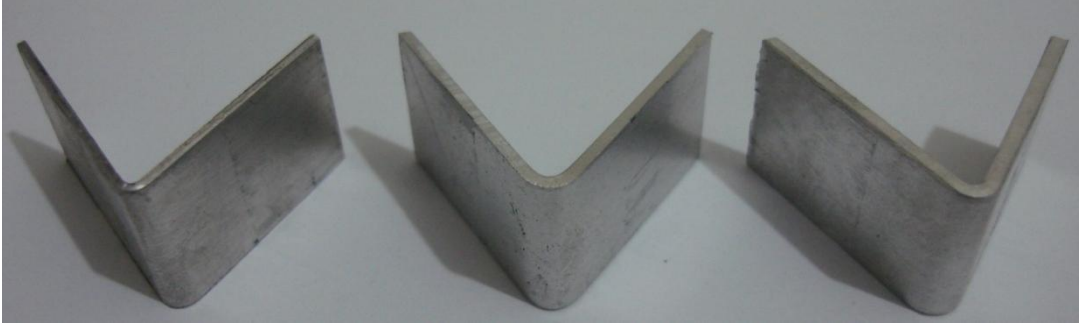
Sahip olunan tecrübelerden faydalanılarak, "V" bükme işlemlerinde sac malzemeler üzerinde geri esnemelerin olduğu görülmektedir. Bu geri esneme davranışı, malzemenin kimyasal-fiziksel yapısına, kalınlığına, hadde yönüne, bükme açısına, zımba uç kavisine ve uygulanan kuvvete göre değişkenlikler göstermektedir.

2 mm kalınlığındaki AL 5754 malzemelerin 60°'lik bükme deneylerinde 1, 2 ve 4 mm uç kavisli zımbalar kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen numuneler Resim 6.3'de gösterilmiştir. Aynı kalınlıktaki numunelerin farklı uç kavisli zımbalarla yapılan bükme işlemi görülmektedir.



Resim 6.3. 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac malzemelerin, 60° açılı ve 1, 2 ve 4mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonucu elde edilen numuneler

1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 malzemelerin 60°'lik bükme deneylerinde 2 mm uç kavisli zımba kullanılarak elde edilen numuneler Resim 6.4'de gösterilmiştir. Aynı bükme açısıyla ve ancak farklı kalınlıklarda yapılan deney numuneleri kıyaslanmıştır.



Resim 6.4. 1-1,5 ve 2 mm kalınlıktaki AL 5754 sac malzemelerin, 60° açılı ve 2 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler

1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 malzemelerin 120°'lik bükme deneylerinde 1 mm uç kavisli zımba kullanılarak elde edilen numuneler Resim 6.5'de gösterilmiştir.



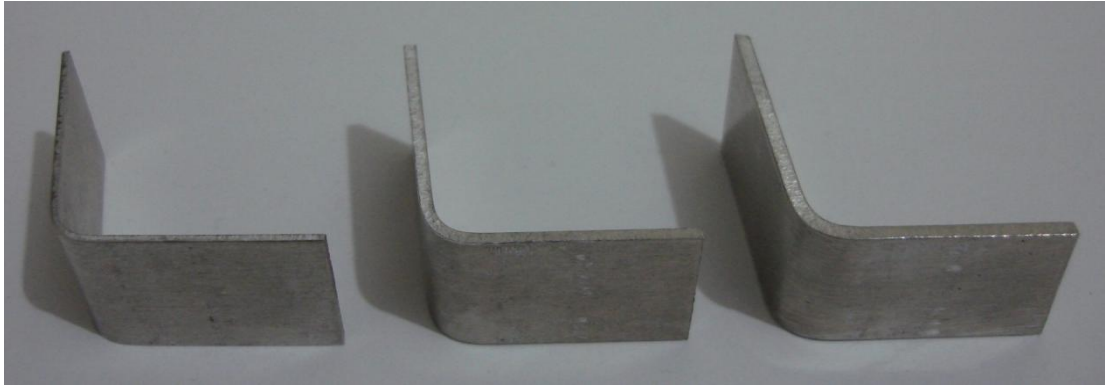
Resim 6.5. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac malzemelerin, 120° açılı ve 1 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler

1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 malzemelerin 60°'lik bükme deneylerinde 4 mm uç kavisli zımba kullanılarak elde edilen numuneler Resim 6.6'da gösterilmiştir.



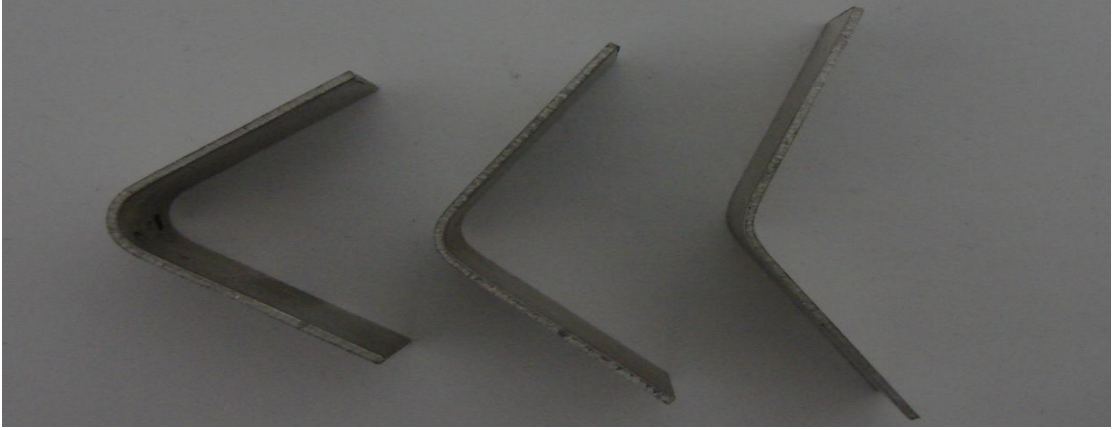
Resim 6.6. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac malzemelerin, 60° açılı ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler

1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 malzemelerin 90°'lik bükme deneylerinde 4 mm uç kavisli zımba kullanılarak elde edilen numuneler Resim 6.7'de gösterilmiştir.



Resim 6.7. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac malzemelerin, 90° açılı ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler

1,5 mm kalınlığındaki AA 2024 malzemelerin 60°, 90° ve 120°'lik bükme deneylerinde 4 mm uç kavisli zımba kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen numuneler Resim 6.8'de gösterilmiştir. Aynı sac kalınlığında fakat farklı bükme açılarında elde edilen deney numunelerinin örnekleri görülmektedir.



Resim 6,8. 1,5 mm kalınlığındaki AA 2024 sac malzemelerin, 60°, 90° ile 120°'lik ve 4 mm uç kavisli zımba ile bükülmesi sonu elde edilen numuneler

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, "V" bükme kalıplarında bükme işlemi sonucunda oluşan geri esneme miktarını incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan literatür taramalarında geri esneme konusunda birçok çalışmanın mevcut olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda mevcut olan konular genellikle geri esnemenin önemi, nasıl giderilebileceği ve neden kaynaklandığıdır. Ayrıca sacların hem geri esneme hem de ileri esnemesi üzerinde de çalışmalar mevcuttur. Sac malzemelerin özelliklerinden dolayı malzemede bükme esnasında geri veya ileri esneme olabilmektedir. Bükme deneyleri sırasında oluşan geri esneme miktarlarını incelemek için, AA 2024 ve AL 5754 sac malzemeleri kullanılarak 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki sac malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemeler 60°, 90° ve 120°'lik, 1, 2 ve 4 mm uç kavisli zımbayla yapılan bükme işlemine tabi tutulmuşlardır.

7.1. Deney Sonuçları

AA 2024 sac malzemelerin 60° bükme işleminde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde malzemeler dayanamayıp bükme kenarından kırılmıştır. Sadece 4 mm zımba uç kavisli zımbayla yapılan bükme işlemi sağlıklı gerçekleştirilebilmiştir.
- Sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Zımba uç kavisinin artması geri esnemeyi azaltmıştır.
- 2 mm kalınlığındaki sac malzeme için, hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir.

AA 2024 sac malzemelerin 90° bükme işleminde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- 1 mm ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan deneylerde malzemeler dayanamayıp bükme kenarından kırılmıştır. 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde kullanılabilir sonuç elde edilebilmiştir.

- Sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Zımba uç kavisinin artması geri esnemeyi azaltmıştır.
- 2 mm kalınlığındaki sac malzeme için, hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

AA 2024 sac malzemelerin 120° bükme işleminde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Sac malzemeler tüm zımba uç kavislerinde bükülebilmektedir.
- Kullanılan tüm uç kavislerinde, sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarında azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Zımba uç kavisinin artması geri esnemeyi azaltmıştır.
- 2 mm kalınlığındaki sac numune için, hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

AL 5754 sac numunelerin 60° bükme işleminde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Sac numuneler, tüm zımba uç kavislerinde bükülebilmektedir.
- Sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Zımba uç kavisinin artması geri esnemeyi azaltmıştır.
- 2 mm kalınlığındaki sac numune için, hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir.
- AA 2024 numune ile kıyaslandığında geri esnemenin bu numunelerde daha az olduğu tespit edilmiştir.

AL 5754 sac numunelerin 90° bükme işleminde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Sac numuneler tüm zımba uç kavislerinde bükülebilmektedir.
- Sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Zımba uç kavisinin artması geri esnemeyi azaltmıştır.
- 2 mm kalınlığındaki sac numune için, hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir.

- AA 2024 numune ile kıyaslandığında geri esnemenin bu numunelerde daha az olduğu tespit edilmiştir.

AL 5754 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Sac numuneler tüm zımba uç kavisleriyle bükülebilmektedir.
- Sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- 2 mm kalınlığındaki sac numune için, hadde yönüne paralel yapılan bükme deneylerinde geri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir.
- Zımba uç kavisinin artması geri esnemeyi azaltmıştır.
- AA 2024 numune ile kıyaslandığında geri esnemenin bu numunelerde daha az olduğu tespit edilmiştir.

7.2. Öneriler

Yapılan bu çalışmada, bükme deneylerinden elde edilen sonuçları daha da ayrıntılı bir şekilde getirebilmek için aşağıdaki çalışmaların yapılması önerilebilir.

- Aynı özellikteki numunelerin farklı açılarda bükülmesiyle oluşan geri esneme miktarı tespit edilebilir.
- Zımba uç kavisleri değiştirilerek oluşan esneme miktarı gözlenebilir.
- Farklı kalınlıktaki numunelerin aynı parametreler kullanılarak bükülmesiyle elde edilen geri esneme değerleri incelenebilir.
- Bulanık mantık yöntemi kullanılarak, farklı deney parametreleri için tahminler elde edilebilir.
- Zımba, numune üzerinde bekletilerek bükme işlemi gerçekleştirilir ve çıkan değerler incelenebilir.
- Bükme esnasında birim hacme düşen yük miktarı hesaplanarak değerlerde değişiklik yapılabilir ve alınan değerler incelenebilir.
- Tüm kalıp parametreleri değiştirilerek daha ayrıntılı bilgiler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Simith, A.D., "Die Design Handbook", *Society of Manufacturing Engineers*, Michigan, 10,1-12,43 (1990).
2. Erişkin, Y., "Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu", *Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi*, Ankara, 73-126 (1986).
3. Ötü, R., Demirci, H.İ., "60°'lik V bükme kalıbında AA 5754 ve AL 1050 Sac Malzemelerin Farklı Bükme Metotları Kullanılarak Geri Esneme Miktarlarının Tespiti", *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, 1006-1013 (2012)
4. Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker., U., "V Bükme Kalıplarında Bakır Sac Malzemelerin Geri Esneme Miktarlarının Tespiti", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim.Fak.Der.*, 23: 201-238 (2008).
5. Altan, T., Ngaile, G., Palaniswamy, H., "Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 28-34 (2004).
6. Altan, T., Livatyali, H., Kinzel, L., "Computer aided die design of straight flanging using approximate numerical analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 532-543 (2003).
7. Tiryaki, A., Şahin, Ş., Kazan, R., Fırat, M., "Sac Metalleri Bükme İşleminde Geri Esneme Açısının Yapay Sinir Ağları İle Kestirimi", *11 th. Conference for Computer-Aided Engineering and System Modeling, Metal Forming*, 8-16 (2006).
8. Gan, W., Wagoner, R.H., "Die design method for sheet springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, 46: 1097–1113 (2004).
9. 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: 109-117 (2004).
10. Nilsson, A., Melin, L., Magnusson, C., " Finite-element simulation of V-die bending: a comparison experimental results", *Journal of Materials Processing Technology*, 65: 52-58 (1997).
11. Carden, W.D., Genga, L.M., Matlock, D.K., Wagoner, R.H., "Measurement of springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, 44: 79-101 (2002).
12. Lin, Z., Zhang, L.C., "An analytical solution to springback of sheet metals stamped by a rigid punch and an elastic die", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 49-54 (1997).

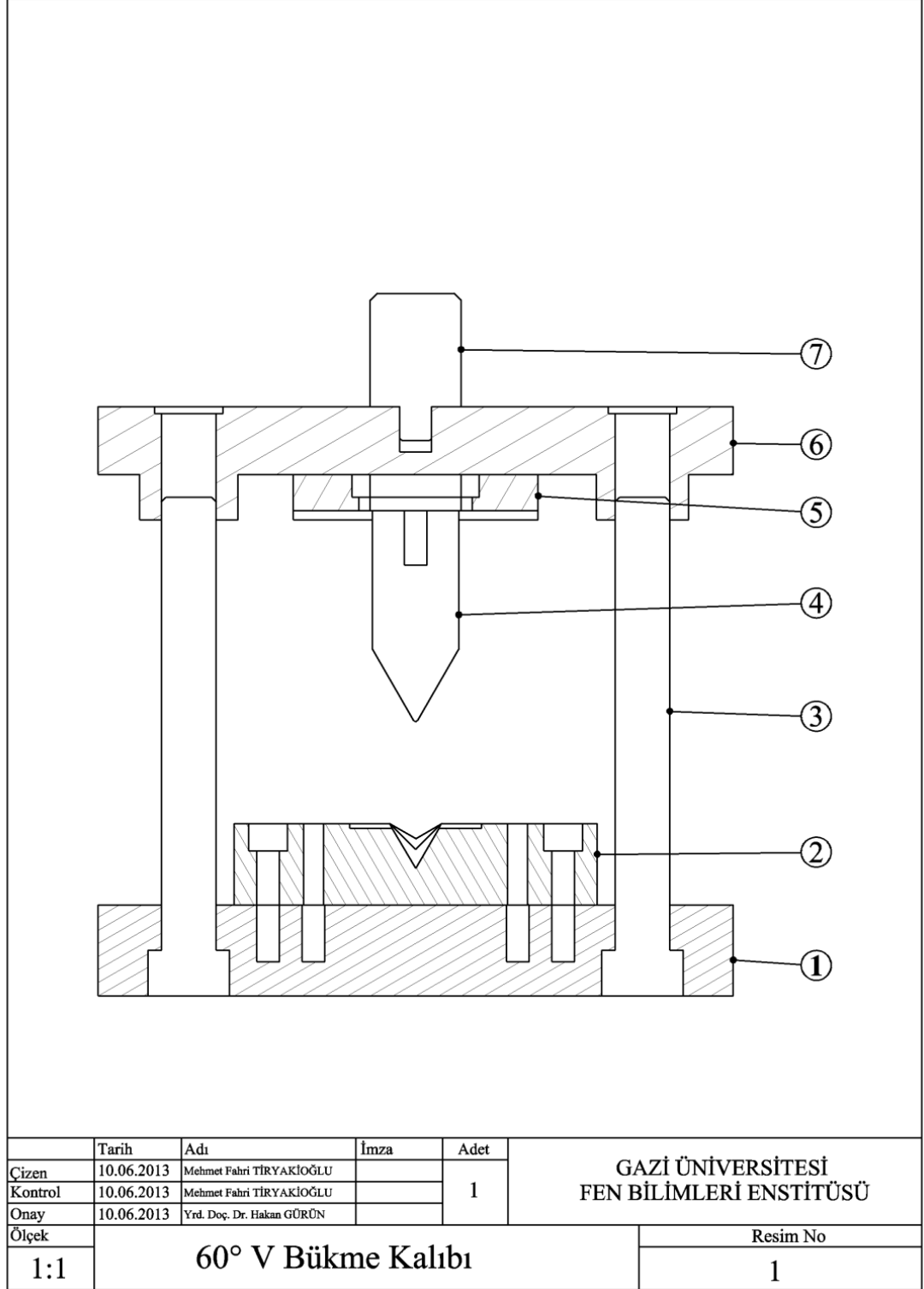
13. Moon, Y.H., Kang, S.S., Cho, J.R., Kim, T.G., "Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 356-368 (2003).
14. Chou, I., Hung, C., "Finite element analysis and optimization on springback reduction", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39: 517-536 (1999).
15. Chan, W.M., Chew, H.I., Lee, H.P., Cheok, B.T., "Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes" *Journal of Materials Processing Technology*, 148: 15-24 (2004).
16. Arezoo, B., Nasrollahi, V., "Prediction of springback in sheet metal components with holes on the bending area, using experiments, finite element and neural networks", *Materials and Design*, 36: 331-336 (2012).
17. Lia, K.P., Carden, W.P., Wagoner, R.H., "Simulation of springback", *International Journal of Mechanical Sciences*, 44: 103-122 (2002).
18. Inamdar, M.V., Date, U.B., Desai, U.B., "Studies on the prediction of springback in air vee bending of metallic sheets using an artificial neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, 108: 45-54 (2000).
19. Chatti, S., Hermi, N., " The effect of non-linear recovery on springback prediction", *Computers and Structures*, 89: 1367-1377 (2011).
20. Gau, T., Kinzel, L., "An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions", *Journal of Materials Processing Technology*, 108: 369-375 (2001).
21. Can, A.Ç., "Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 8-231 (2010).
22. Çapan, L., "Metallere Plastik Şekil Verme", *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 13-50, 87-132 (1999).
23. Bodur, H.O., " Metallere Plastik Şekil Verme Usulleri", *Birsen Kitabevi Yayınları*, İstanbul, 1-15 (1975).
24. Ataşımşek, S. , "Plastik Ve Metal Kalıpcılık Teknikleri", *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 196-205 (2006).
25. Çapan, L., " Kalıpcılık Tekniği", *Eğitim Yayınları*, İstanbul, 54-65 (1977).
26. Uzun, İ., Erişkin, Y., "Sac Metal Kalıpcılığı", *MEB*, Ankara, 253-286 (1997).

27. Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker., U., " Bükme Kalıplarında 0.75 mm kalınlığındaki Çelik Sac Malzemenin Geri Esneme Miktarlarının Belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Müh. Mim.Fak.Der.*, 13: 15-22 (2007)
28. Mullan, H.B., "Improved prediction of springback on final formed components", *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154,464-471 (2004).
29. Onate, E., Rojek, J., "Prediction of elastic springback deffects in sheet stamping processes using finite element methods", *Advanced Methods in Material Processing Defects*, 349-359 (1997).
30. Suchy, I., "Handbook of Die Design", *RR Donnelley*, USA, (1998).
31. Şık, A., Ertürk, İ., Önder, M., "AA2024 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında Farklı Parametrelerin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 139-147 (2010)
32. Özaydın, M.A., "Bükme Ve Kesme Kalıpları, Kesme Kalıplarının Bilgisayar Destekli Tasarımı", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1996).
33. Wang, J.F., Wagoner, R.H., Carden, W.D., Matlock, D.K., Barlat, F., " Creep and anelasticity in the springback of aluminum", *International Journal of Plasticity*, 20:2209–2232 (2004).
34. Panthi, S.K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Shambhavi, S., Goel, M.D., " Finite Element Analysis of sheet metal bending process to predict the springback", *Materials and Design*, 31: 657-662 (2010).
35. Xu, W.L., MA, C.H, Li, C.H., Feng, W.J., "Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming", *Journal of Materials Processing Technology*, 151: 217-222 (2004).
36. Liu, H., Xing, Z., Sun, Z., Bao, J., "Adaptive multiple scale meshless simulation on springback analysis in sheet metal forming", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 35: 436-451 (2011).
37. Bui, Q.V., Papeleux, L., Ponthot, J.P., " Numerical simulation of springback using enhanced assumed strain elements", *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 314-318 (2004).
38. Gisario, A., Barletta, M., Conti, C., Guarino S., "Springback control in sheet metal bending by laser-assisted bending: Experimental analysis, empirical and neural network modelling", *Optics and Lasers in Engineering*, 49: 1372-1383 (2011).

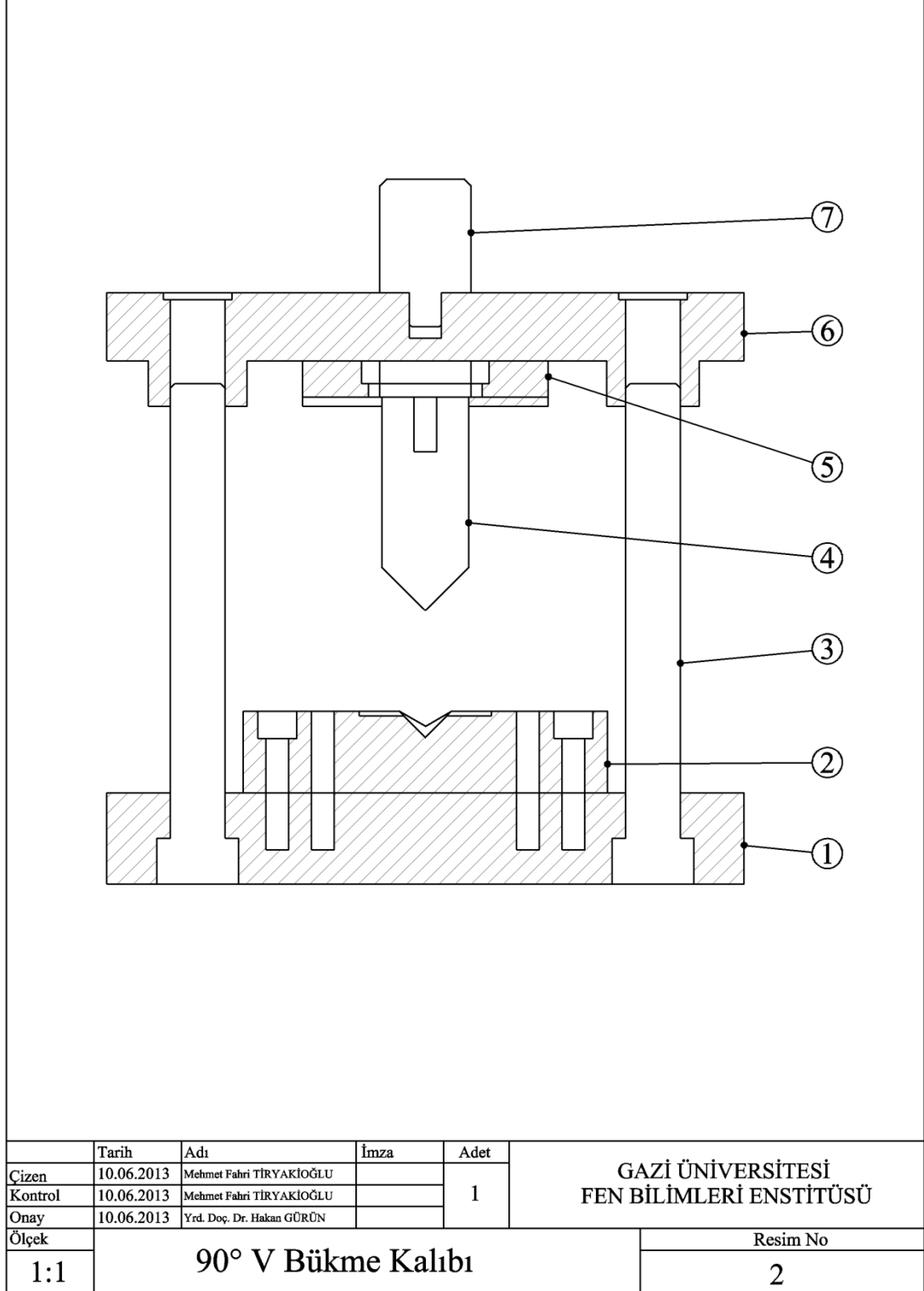
39. Xue, P., Yu, T.X., Chu, E., "Theoretical prediction of the springback of metal sheets after a double-curvature forming operation", *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 65-71 (1999).
40. Altan, T., Wu, H-C., "Process optimization in stamping—a case study for flanging a clutch hub from steel plate", *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 8-19 (2004).
41. Forcellese, A., Gabrielli, F., Ruffini, R., "Effect of the training set size on springback control by neural network in an air bending process", *Journal of Materials Processing Technology*, 493-500 (1998).
42. Pandya, R.S., "Prediction of variation dimensional tolerance due to sheet metal hydroforming using finite element analysis", Master Science, *Bachelor of Engineering Sardar Patel University*, India 40-42 (2002).
43. Benson, S.D., " Press Brake Technology: A Guide to Precision Sheet Metal Bending", Society of Manufacturing Engineers, 5-20 (1997)

EKLER

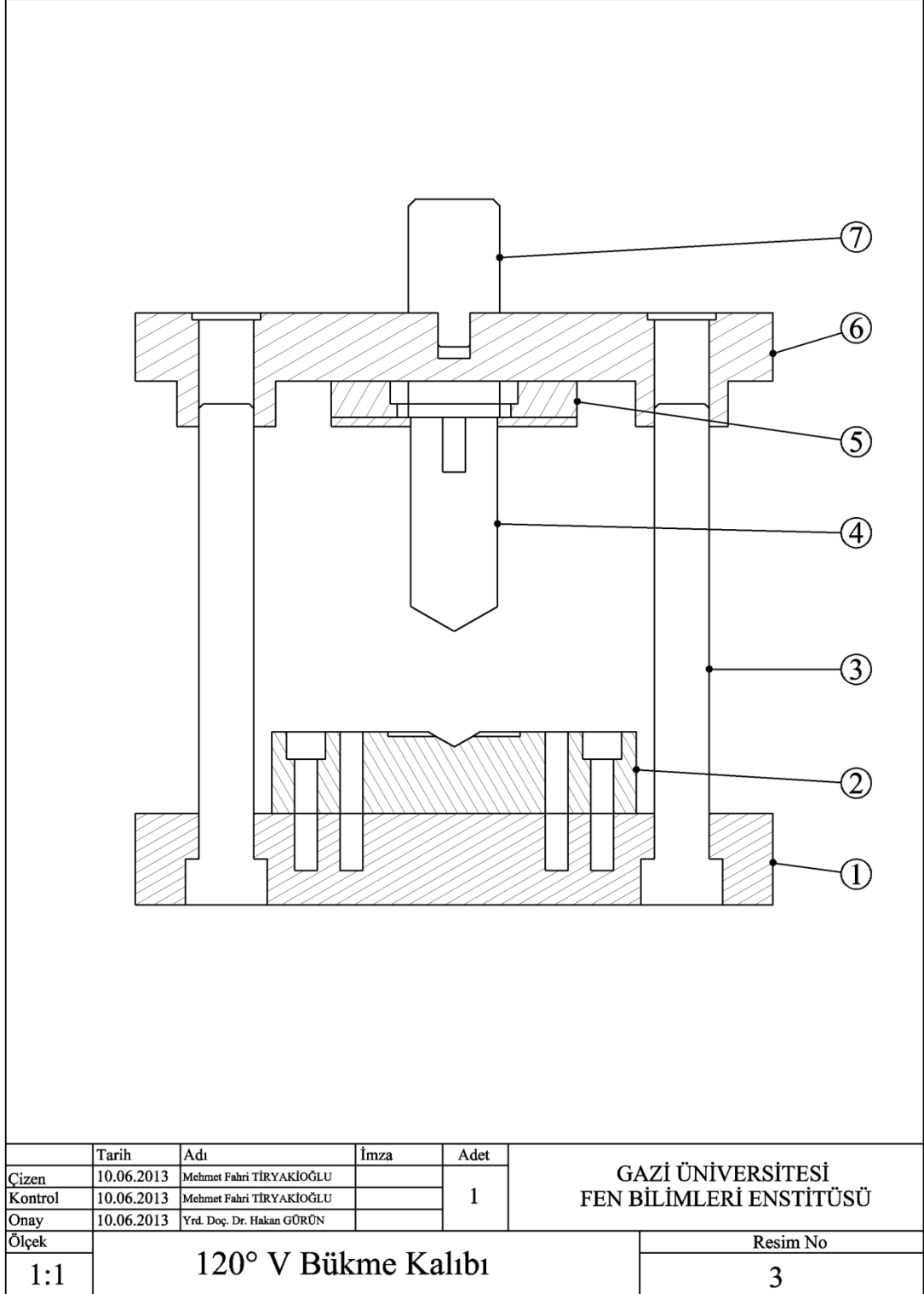
EK-1. Bükme işleminde kullanılan V bükme kalıbının komple ve resimleri



EK-1. (Devam) Bükme işleminde kullanılan V bükme kalıbının komple resimleri



EK-1. (Devam) Bükme işleminde kullanılan V bükme kalıbının komple resimleri



EK-2. Deney sonuçlarını gösteren geri esneme tabloları

Çizelge 2.1. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	x	x	10,5°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	x	x	8,5°
Hadde yönüne dik	2 mm	x	x	6,6°
Hadde yönüne paralel	2 mm	x	x	7,5°

x: Bükmede, bükme bölgesinde kopma gerçekleşmiştir.

Çizelge 2.2. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 60°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	5,8	6,1	6,5°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	3	3,4	3,9°
Hadde yönüne dik	2 mm	2,6	2,8	3,5°
Hadde yönüne paralel	2 mm	2,9	3,3	3,7°

x: Bükmede, bükme bölgesinde kopma gerçekleşmiştir.

EK-2. (Devam) Deney sonuçlarını gösteren geri esneme tablolar

Çizelge 2.3. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	x	x	9°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	x	x	5,8°
Hadde yönüne dik	2 mm	x	x	4,9°
Hadde yönüne paralel	2 mm	x	x	7°

x: Bükmede, bükme bölgesinde kopma gerçekleşmiştir.

Çizelge 2.4. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 90°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

	Numune kalınlığı	Zımba uç kavisi		
		1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	2,6	4,5	5,7
Hadde yönüne dik	1,5 mm	2	3,9	4,5
Hadde yönüne dik	2 mm	1	3,4	3,4
Hadde yönüne paralel	2 mm	1,3	3,5	3,6

EK-2. (Devam) Deney sonuçlarını gösteren geri esneme tablolar

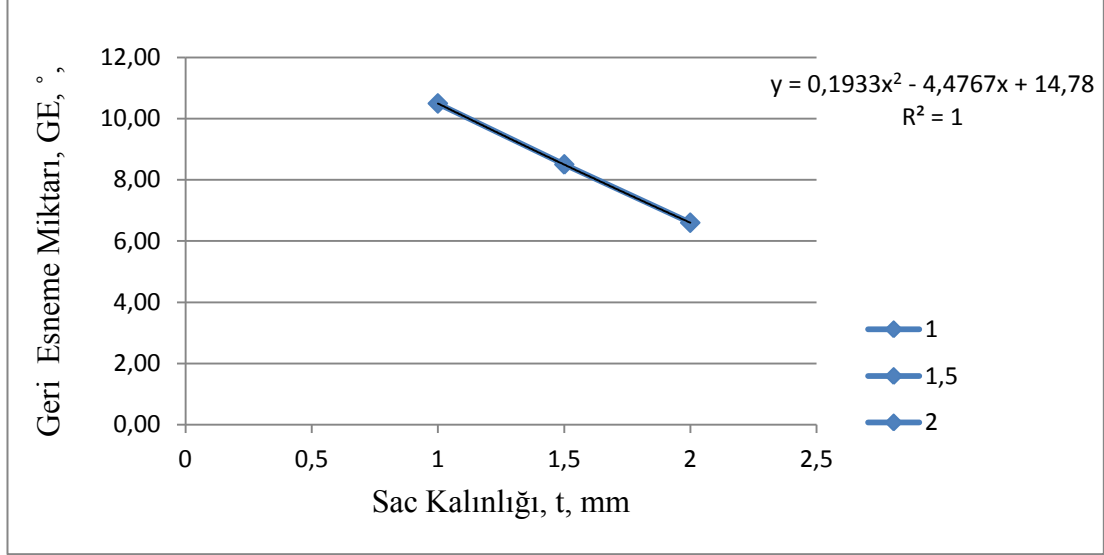
Çizelge 2.5. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AA 2024 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

		Zımba uç kavisi		
	Numune kalınlığı	1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	3,8	6,2	7,8°
Hadde yönüne dik	1,5 mm	2,7	5,3	7°
Hadde yönüne dik	2 mm	1	2,7	6,3°
Hadde yönüne paralel	2 mm	3,1	4,5	7,5°

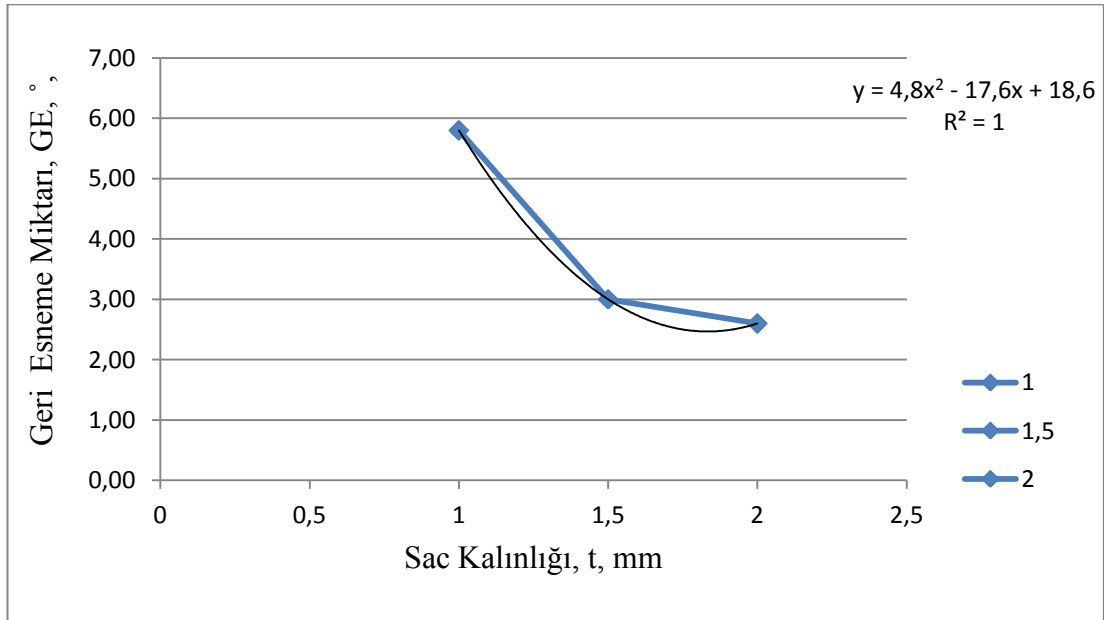
Çizelge 2.6. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki, AL 5754 sac numunelerin 120°'lik bükme işleminde elde edilen ortalama geri esneme değerleri

		Zımba uç kavisi		
	Numune kalınlığı	1 mm	2 mm	4 mm
Hadde yönüne dik	1 mm	5,9	6,4	6,8
Hadde yönüne dik	1,5 mm	3,1	4,2	5,5
Hadde yönüne dik	2 mm	2,7	3,9	4,8
Hadde yönüne paralel	2 mm	3,53	5,1	5,8

EK-3. Deney sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri

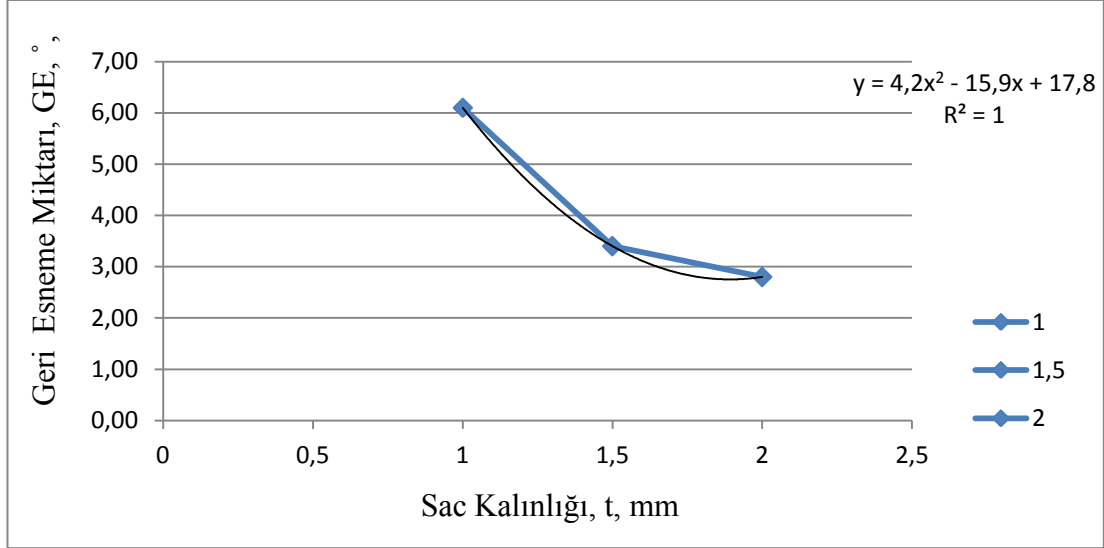


Şekil 3.1. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerinin 60° bükme açısı ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

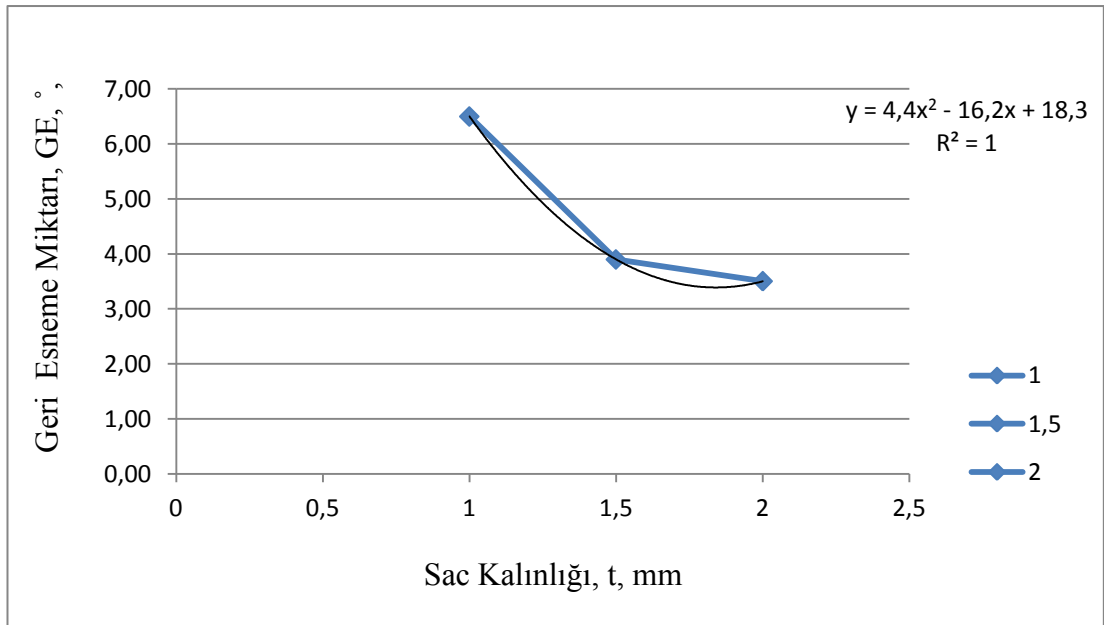


Şekil 3.2. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerinin 60° bükme açısı ve 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

EK-3. (Devam) Deneysel sonuçları gösteren geri esneme grafikleri

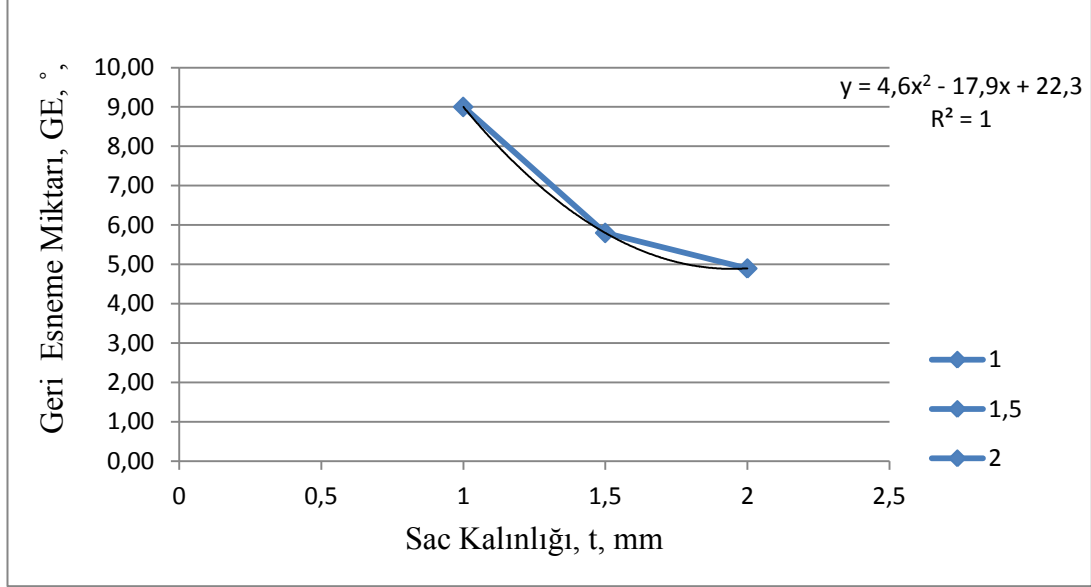


Şekil 3.3. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 60° bükme açısı ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

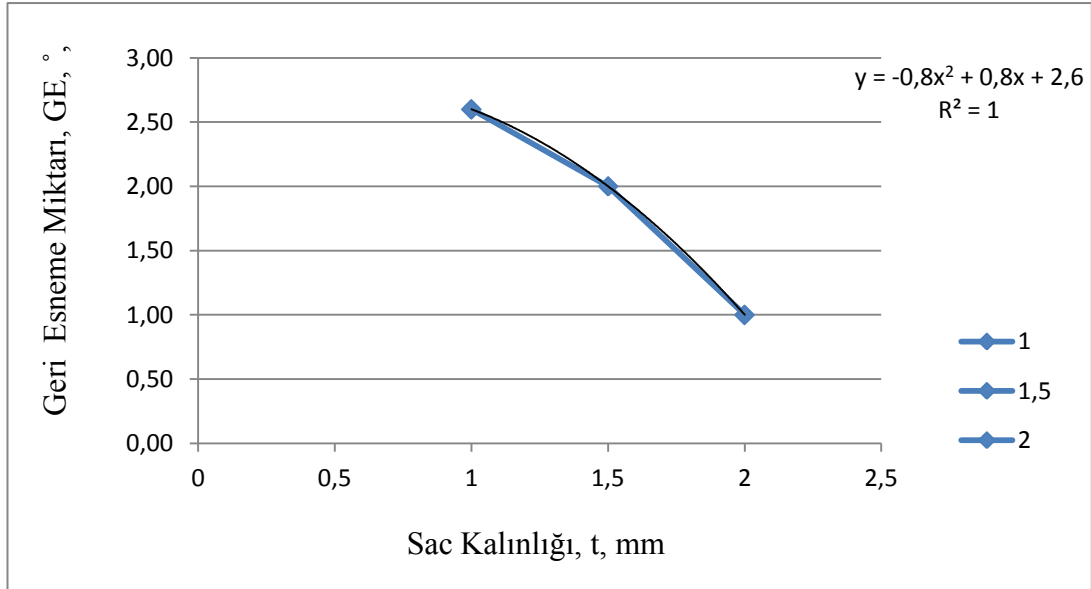


Şekil 3.4. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 60° bükme açısı ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

EK-3. (Devam) Deney sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri

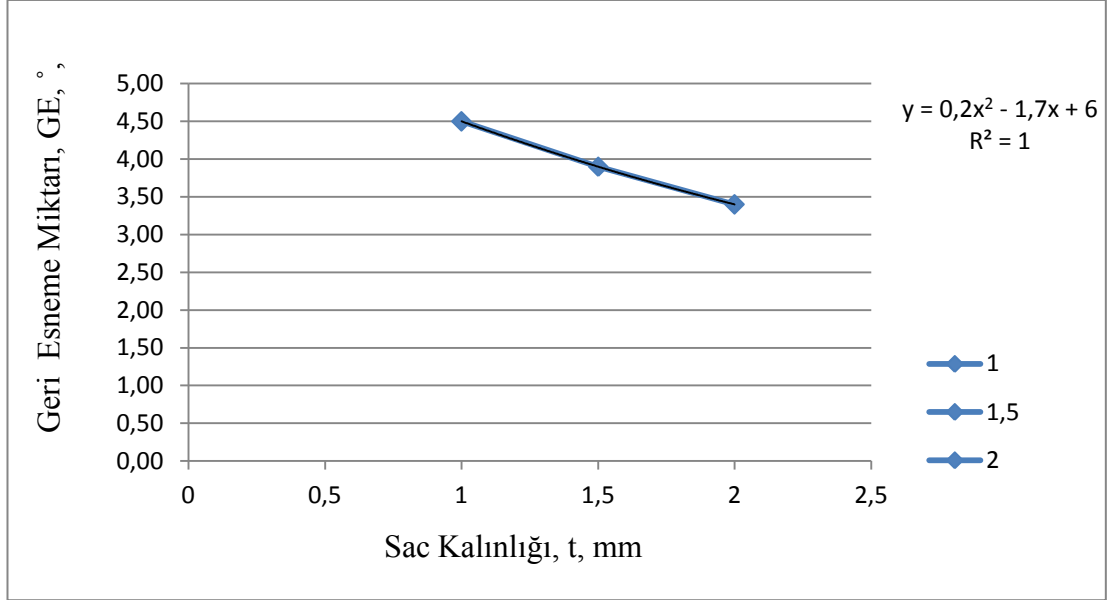


Şekil 3.5. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerin 90° bükme açısı ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

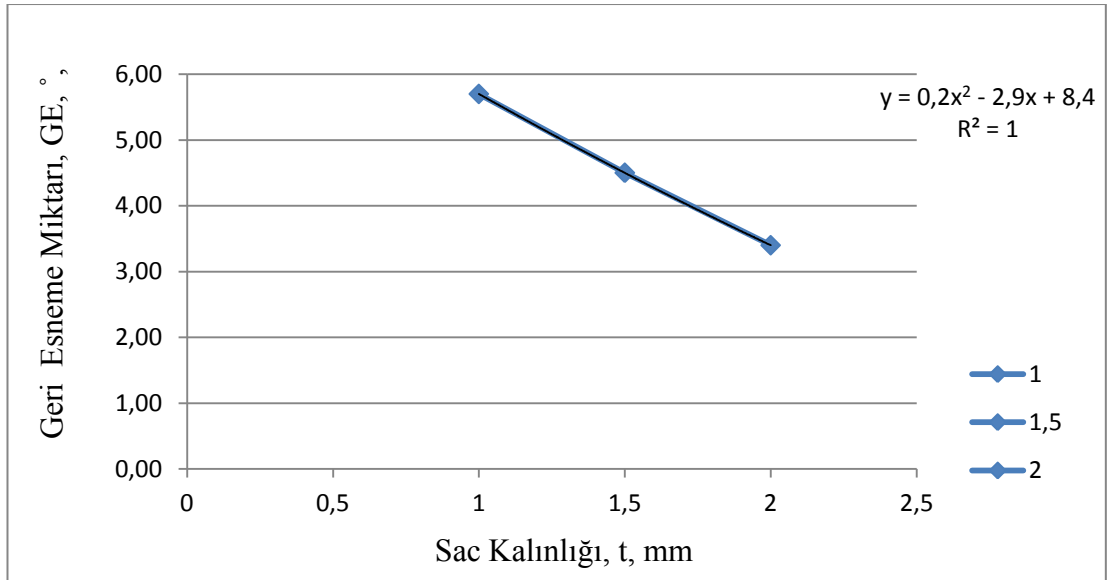


Şekil 3.6. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 90° bükme açısı ve 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

EK-3. (Devam) Deney sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri

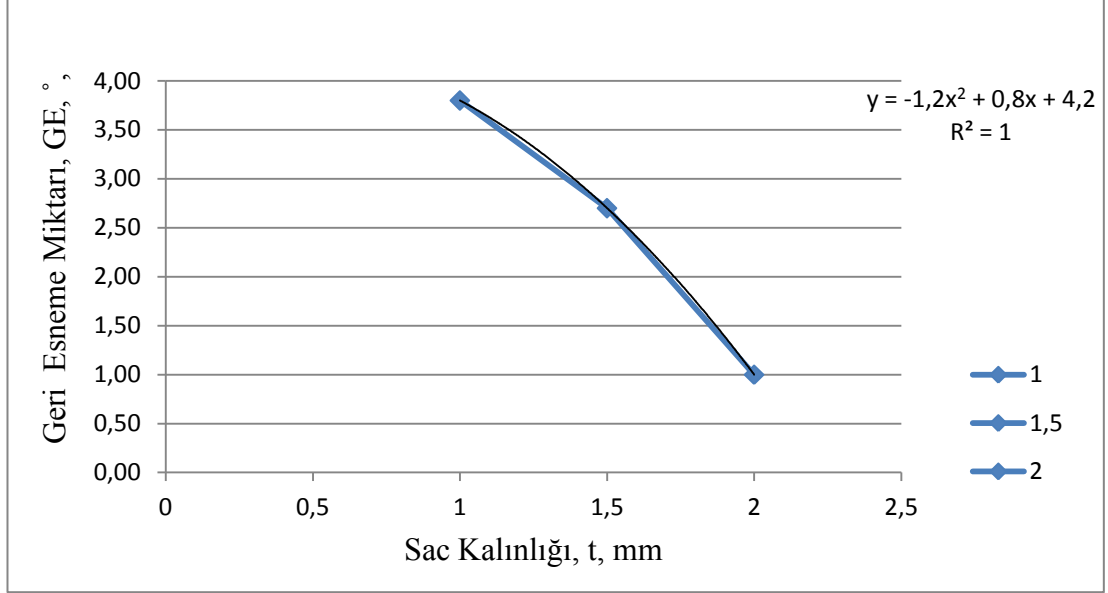


Şekil 3.7. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 90° bükme açısı ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

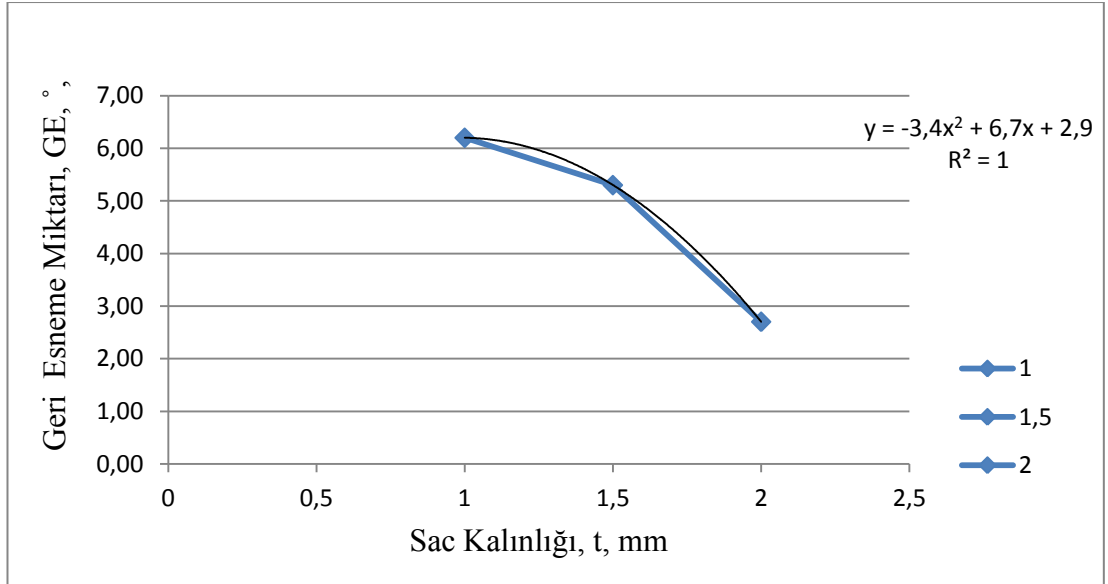


Şekil 3.8. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 90° bükme açısı ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

EK-3. (Devam) Deneý sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri

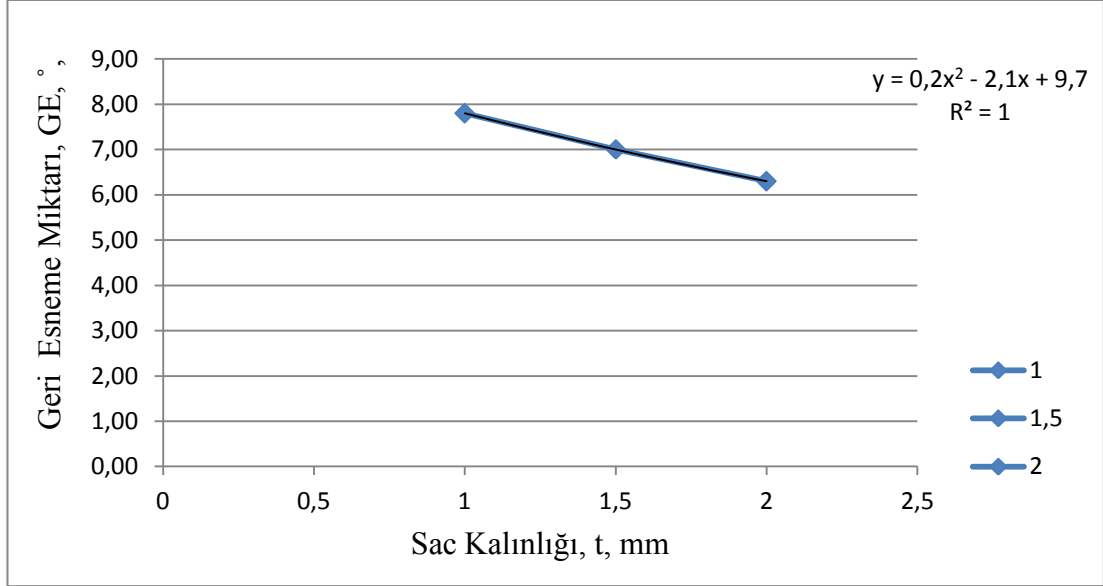


Şekil 3.9. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerin 120° bükme açısı ve 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

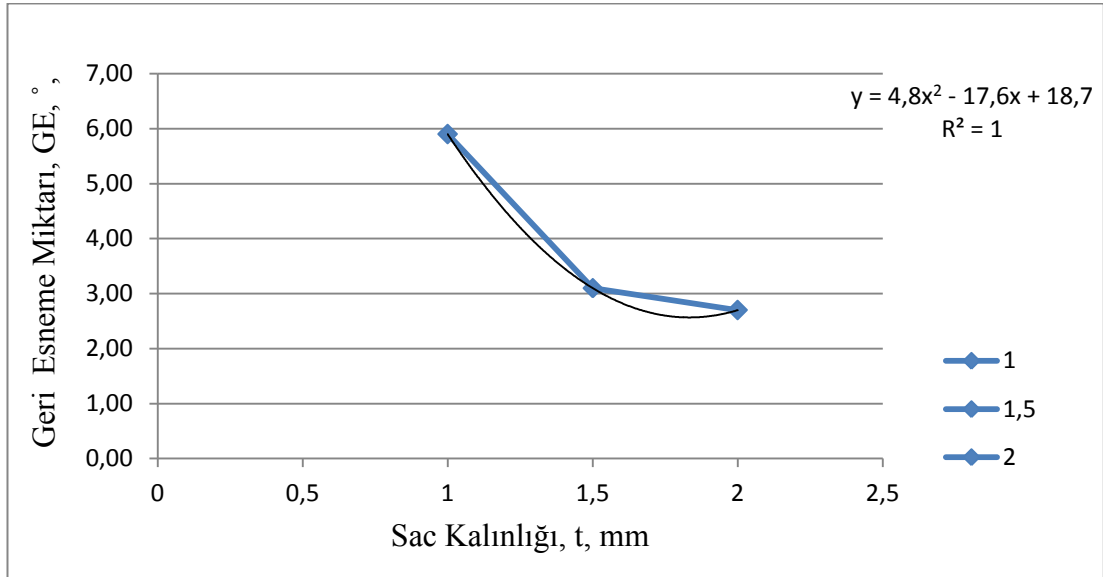


Şekil 3.10. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerin 120° bükme açısı ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

EK-3. (Devam) Deney sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri

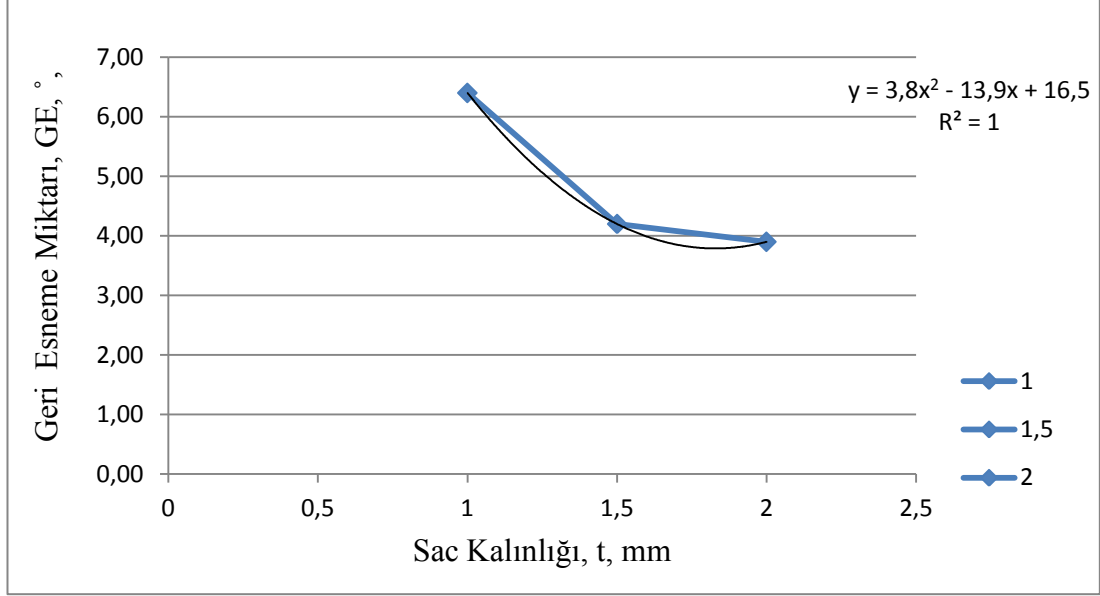


Şekil 3.11. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AA 2024 sac numunelerin 120° bükme açısı ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

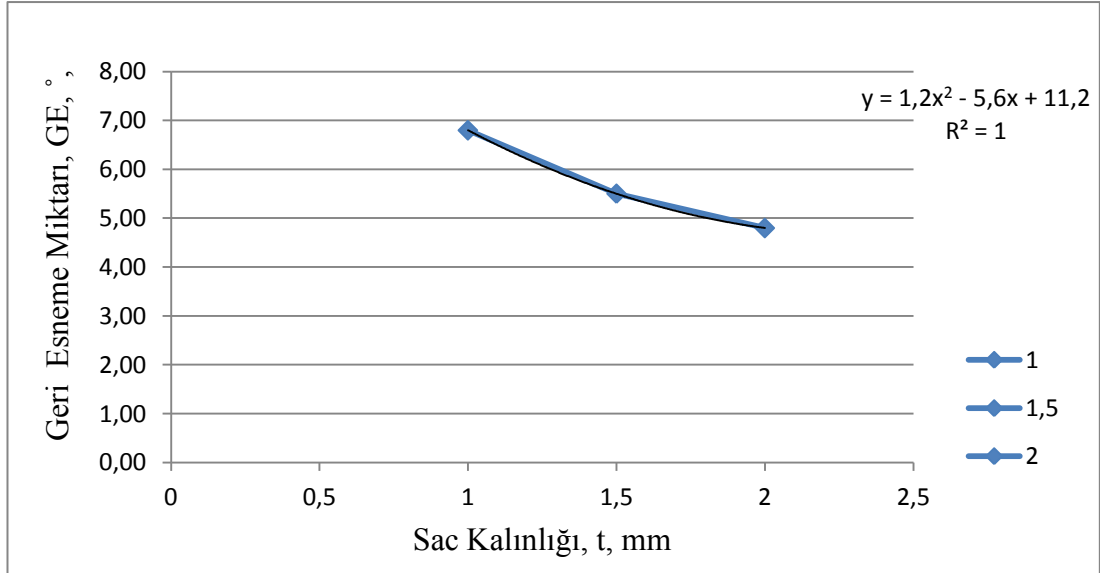


Şekil 3.12. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerin 120° bükme açısı ve 1 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denklemi

EK-3. (Devam) Deney sonuçlarını gösteren geri esneme grafikleri



Şekil 3.13. 1-1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerinin 120° bükme açısı ve 2 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denkleminin



Şekil 3.14. 1,0; 1,5 ve 2 mm kalınlığındaki AL 5754 sac numunelerinin 120° bükme açısı ve 4 mm uç kavisli zımba ile yapılan bükme işleminde elde edilen geri esneme grafiği ve Türetilen Polinom Eğri Denkleminin

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Mehmet Fahri TİRYAKİOĞLU
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 11.09.1986 Fatsa
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 542 376 73 52
e-mail : mf_tiryakioglu@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi Bölümü	2013
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi Bölümü	2008
Lise	Ordu Teknik Lisesi / Makine Bölümü	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008	Ostim Kalıpçılık	Kalıp Tasarımcısı
2009	Kutay Plastik	Kalıp Tasarımcısı
2011	Türk Hava Yolları Habom A.Ş.	Uçak Bakım Teknisyeni

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Müzik, Gezi, Futbol