

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM 1050 SAC METALİN V BÜKME İŞLEMİNDEKİ
GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Hasan MESCİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

ŞUBAT 2024

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM 1050 SAC METALİN V BÜKME İŞLEMİNDEKİ
GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Hasan MESÇİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Seçil EKŞİ

ŞUBAT 2024

Furkan Hasan MESCI tarafından hazırlanan “Alüminyum Sac Metalin V Bükme İşlemindeki Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışması __.__.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans teziolarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Unvan Adı SOYADI**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
(Gerekliyse) Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Unvan Adı SOYADI**
(Gerekliyse) Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ALÜMİNYUM SAC METALİN V BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../2023).

(imza)

Furkan Hasan Mesci

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında benden bilgisini ve yardımını esirgemeyen, çalıőmalarımı yönlendirmekte destek veren, akademik bilgi ve tecrübesiyle beni aydınlatan Doç. Dr. Seçil EKŐI hocama saygılarımı ve teőekkürlerimi sunarım.

Numunelerin tedarik edilmesinde ve hazırlanmasında yardımcı olan Ahmed Ozan ÖRNEKI arkadaşşıma teőekkürü borç bilirim.

Çalışma süresince maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, en zor zamanlarda yanımda olan aileme minnet ve őükranlarımı sunmak isterim.

Furkan Hasan Mesci

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Alüminyum Malzemeler	5
2.1.1. Kullanım yerleri	7
2.1.2. Alüminyum alaşımları	8
2.1.2.1. Alüminyum 1xxx serisi	10
2.1.2.2. Alüminyum 2xxx serisi	10
2.1.2.3. Alüminyum 3xxx serisi	11
2.1.2.4. Alüminyum 4xxx serisi	12
2.2. Sac Bükme	12
2.2.1. Bükme işleminin tanımlanması	13
2.2.2. Bükme işlem çeşitleri	14
2.2.2.1. V bükme	16
2.2.2.2. U – bükme	16
2.2.2.3. Oluklama bükme	16
2.2.2.4. Kenar bükme	17
2.2.2.5. Kabartma bükme	17
2.2.2.6. Serbest bükme	17
2.2.2.7. Katlama ve kenet bükme	18
2.2.3. Bükmeyi etkileyen faktörler	18
2.2.4. Malzeme davranışı	20
2.3. Geri Yaylanma	21
2.3.1. Geri yaylanmanın telafisi	23
2.3.2. Geri yaylanma davranışını etkileyen parametreler	24
2.3.2.1. Akma dayanımı	25
2.3.2.2. Anizotropi	25
2.3.2.3. Baskı plakası kuvveti	25
2.3.2.4. Bauschinger etkisi	26
2.3.2.5. Bükme radyusu	26
2.3.2.6. Elastiklik modülü	27
2.3.2.7. Kalınlık	27
2.3.2.8. Kalıp açıklığı	27

2.3.2.9. Pekleşme üsteli	28
2.3.2.10. Pres hızı	28
2.3.2.11. Sıcaklık	29
2.3.2.12. Sürtünme	29
2.3.2.13. Şekillendirme hızı	29
2.3.2.14. Tane boyutu	29
2.3.2.15. Ütuleme süresi	30
3. YÖNTEM.....	31
3.1. Deney Numuneleri.....	31
3.1.1. Çekme testi.....	31
3.1.2. Kimyasal analiz testi	32
3.1.3. Sertlik testi.....	32
3.1.4. Numune ölçüm kontrolü.....	32
3.1.5. Method	33
3.2. Deneyin Yapılışı ve Ölçümler	36
3.3. Deney Sonuçları ve Tartışma	38
3.4. Varyans (ANOVA) ve Regresyon Analizleri	40
3.4.1. Varyans (ANOVA) analizi.....	40
3.4.2. Regresyon analizi	40
3.5. Sonlu Elemanlar Analizleri	41
3.5.1. Mesh hassasiyet analizi	43
3.5.2. Sonlu elemanlar analiz sonuçları.....	43
4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
4.1. Genel Sonuçlar	51
4.2. Öneriler.....	51
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59

KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials
Cu	: Bakır
DIN	: Deutsche Institute für Normunge (Alman Standartlar Enstitüsü)
DP	: Çift Fazlı Çelikler
Fe	: Demir
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Methodu)
HMI	: Human Machine Interface (İnsan Makine Arayüzü)
kN	: Kilonewton
KSi	: Kip per square inch
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum

SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$: Celsius
b_s	: Sac malzeme genişliği
F_b	: Zımba kuvveti
K	: Dayanım sabiti
n	: Pekleşme üsteli
R	: Bükme radyusu
t	: Kalınlık
σ	: Çekme gerilimi

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi	9
Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımları.	10
Tablo 2.3. Döküm alüminyum alaşımları.	10
Tablo 2.4. Bükme işlemleri.	15
Tablo 2.5. Geri yaylanma telafisinde kullanılan yöntemler.	24
Tablo 2.6. Geri yaylanma davranışını etkileyen faktörler.	30
Tablo 3.1. 1050 serisi alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri.	32
Tablo 3.2. Deneyde kullanılan alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi.	32
Tablo 3.3. Deney koşulları.	34
Tablo 3.4. Deneyde kullanılan proses parametreleri.	37
Tablo 3.5. Deneylerden elde edilen geri yaylanma açısı sonuçları.	38
Tablo 3.6. ANOVA sonuçları.	40
Tablo 3.7. Sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen değerler.	46
Tablo 3.8. Sonlu elemanlar analizleri ve deneysel sonuçlar arasındaki fark.	47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Rijit plastik model.	19
Şekil 2.2.	Malzeme modelleri.....	20
Şekil 3.1.	a) Çekme testi için numune ölçüleri b) Deney düzeneği.	31
Şekil 3.2.	a) 1050 serisi alüminyum malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, b) Çekme testi öncesi ve sonrası numune görünümü.	32
Şekil 3.3.	Deneylerde kullanılan numuneler.....	33
Şekil 3.4.	Kesimde kullanılan giyotin makinesi.	33
Şekil 3.5.	a) 1 mm kalınlığındaki alüminyum numune b) 1,5 mm kalınlığındaki alüminyum numune c) 2,5 mm kalınlığındaki alüminyum numune.	33
Şekil 3.6.	DeneySEL çalışmanın gerçekleştiği pres makinesi.	35
Şekil 3.7.	Büküm Kapasite Tablosu.....	35
Şekil 3.8.	Değer girilen HMI paneli.	36
Şekil 3.9.	Deneyde kullanılan dijital açı ölçer.	37
Şekil 3.10.	Deneyde kullanılan zımba.	37
Şekil 3.11.	Farklı kalınlıklara sahip plaka üzerindeki geri yaylanma davranışı.....	39
Şekil 3.12.	Farklı kalıp açılarında plaka üzerindeki geri yaylanma davranışı.....	39
Şekil 3.13.	Nx programından alınan V yatak tasarımı ve zımba a) 90° b)135° c)150°.	41
Şekil 3.14.	V yatak ve zımba uç yarıçap ölçüleri.	41
Şekil 3.15.	Sonlu eleman analiz modeli.	42
Şekil 3.16.	Mesh yapılmış sonlu eleman analiz modeli.	42
Şekil 3.17.	90° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises gerilme dağılımı.....	43
Şekil 3.18.	90° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises birim şekil değişimi.....	44
Şekil 3.19.	90° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için toplam deformasyon.....	44
Şekil 3.20.	135° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von- Mises gerilme dağılımı.....	44
Şekil 3.21.	135° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises birim şekil değişimi.....	44
Şekil 3.22.	135° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için toplam deformasyon.....	45
Şekil 3.23.	150° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises gerilme dağılımı.....	45
Şekil 3.24.	150° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises birim şekil değişimi.....	45
Şekil 3.25.	150° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için toplam deformasyon.....	45
Şekil 3.26.	1 mm kalınlıkta 90° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü.....	47

Şekil 3.27. 1 mm kalınlıkta 135° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü	47
Şekil 3.28. 1 mm kalınlıkta 150° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü	48
Şekil 3.29. 1,5 mm kalınlıkta 90° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü	48
Şekil 3.30. 1,5 mm kalınlıkta 135° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü.....	48
Şekil 3.31. 1,5 mm kalınlıkta 150° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü.....	49
Şekil 3.32. 2,5 mm kalınlıkta 90° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü	49
Şekil 3.33. 2,5 mm kalınlıkta 135° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü.....	49
Şekil 3.34. 2,5 mm kalınlıkta 150° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü.....	50

ALÜMİNYUM 1050 SAC METALİN V BÜKME İŞLEMİNDEKİ GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Sac şekillendirme proseslerinden biri olan V büküm ile oluşturulan parçaların temel özelliklerinden biri olan geri yaylanma, elastik toparlanmanın neden olduğu boyutsal sapmadır. Büküm işleminden sonra şekillendirme yüklerinin ortadan kalkması sırasında uygulanan deformasyonun elastik kısmı geri kazanılır ve bükülen parçada boyutsal sapmaya neden olur. İş parçasının boyutsal doğruluğunu, geometriyi etkilemesi ve özellikle montaj işlemi sırasında ciddi hatalara sebebiyet vereceğinden dolayı geri yaylanmanın sayısal olarak tahmini ve telafisi önem arz etmektedir. Bu çalışmada sac kalınlığı, kalıp açısı, malzeme özelliği, yükleme durumu gibi proses parametrelerinin geri yaylanma üzerindeki etkileri araştırılmış olup hem yapısal analiz hem de deneysel test yapılarak incelenmiştir.

Alüminyum 1050 serisi plakalar 100x100mm olucak şekilde giyotin makinesinde kesilmiştir. 1mm, 1.5mm ve 2.5mm kalınlığındaki plakalar 90°, 135°, 150° büküm açılarında pres tezgahında bükülerek geri yaylanma değerleri ölçülmüştür. HMI paneline malzeme cinsi, sac kalınlığı ve büküm açıları girilerek proses parametreleri hazırlanmıştır. Her kalınlık ve her kalıp açısı için deney yapılmış olup toplamda 12 numune üzerinde büküm prosesi gerçekleştirilmiştir.

90°büküm açısında 1mm kalınlıktaki geri yaylanma açısı 1° ve 1.5mm kalınlıktaki geri yaylanma ölçüsü 1° ve 0,6° ölçülmüştür. Kalınlık 0.5 mm arttırıldığında geri yaylanma açısı %40 azalma göstermiştir. Aynı şekilde 2.5 kalınlıktaki alüminyum plakalarda - 0.3°ölçülerek 1.5 kalınlığa göre %50 azalma yaşanmıştır. 135° büküm açısında 1mm kalınlıktaki numunede 3,9° geri yaylanma tespit edilirken 1.5 mm kalınlıktaki plakalarda 2.1° ölçülerek % 46.1 azalma görülmüştür. 2.5 mm kalınlıktaki plakalarda ise %19 azalarak 1.7° olarak ölçülmüştür. Büküm açısı daha da arttırılarak 150° kalıp açısında 1mm kalınlıktaki geri yaylanma açısı 5.4°ölçülmüştür. 1.5 mm kalınlığında plakada ise 5.3 °ölçülerek %1.85 azalmıştır. Kalıp açısının artmasıyla kalınlık artışının geri yaylanma üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. 2.5mm kalınlıktaki geri yaylanma ölçüsü 4.9 °ölçülerek % 7.54 azalma olmuştur. Sonuç olarak kalıp açısı ve sac kalınlığı parametreleri değerlendirilerek geri yaylanma değerleri ölçülmüştür. Sac kalınlığının artmasıyla geri yaylanma açı değerlerinin azaldığı fakat büküm açılarının artışıyla geri yaylanma değerlerinin arttığı görülmüştür.

Deneysel çalışmada kullanılan V kılavuzu ve zimba modeli Nx 12.0 programında tasarlanmıştır. Model 90°, 135° ve 150° bükülme açılara göre oluşturulmuştur. Malzemenin geri esneme davranışını incelemek için üç farklı kalınlık ve farklı kalıp açısı kullanılmıştır. Temas ayarları olarak sürtünmeli temas seçildi. Analiz sonucunda deformasyon değerlerinin doğru hesaplanabilmesi için eleman boyutu 2 mm olarak alınmıştır. Yakınsama problemini ortadan kaldırmak için alt adım zaman aralığında analiz yapılarak ani büyük değişiklikler ortadan kaldırılmıştır. Belirlenen kalınlıklar için her kalıp açısında bükme yapılarak toplam 9 adet analiz elde edilmiştir. Çalışma

doğruluğunu hedeflemek için plaka kalınlığı ve temas yüzeyleri dikkate alınarak geri esneme açısındaki eleman sayısının hassasiyeti incelenmiştir.

Formülasyonlar kullanılarak toplam deformasyon, von-mises gerilmeler ve geri esneme açısı değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarında olduğu gibi FEM analizinde de plaka kalınlığı arttıkça geri esneme açısı değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kalıp bükme açısı 90°'den 135°'ye çıkarıldığında geri esneme açısı değeri artarken, 135° bükme açısı ve 150° bükme açısında geri esneme açısı değerleri benzer olmuştur. Sonuç olarak bükme açısı arttıkça geri esneme değeri artarken, levha kalınlığı arttıkça geri esneme açısı değeri azalmaktadır.

Deneysel sonuçları doğrulamak için, dikkate alınan parametreler kullanılarak sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Tahmin edilen geri yaylanma açısı ölçülmüş olup deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak açılar arasındaki hatalar belirlenmiştir. Deney ve simülasyon sonuçlarına bakıldığında aynı bükme açısında plaka kalınlığı arttıkça geri yaylanma açısının azaldığı görülmüştür. Deney sonuçlarından bükülme açısı arttıkça geri esneme açısının da arttığı elde edilmiştir. Varyans analizi sonucunda bükme açısının geri esnemeye plaka kalınlığına göre daha fazla etki ettiği görülmüştür. FEM analizi sonucunda ise belirlenen bükme açılarını elde edebilmek için farklı kalıp derinlikleri modellenerek bükme kuvveti hesaplanmıştır.

INVESTIGATION OF THE SPRING BACK BEHAVIOR OF ALUMINUM 1050 SHEET METAL DURING V BENDING PROCESS

SUMMARY

Springback, one of the basic irregularities of V-bend and breakage, which is one of the sheet metal forming processes, is the dimensional deviation caused by elastic recovery. After the bending bend, the elastic part of the deformation is recovered as the forming loads are eliminated, causing dimensional deviation in the bent part. Digital estimation and detection of springback is important because it affects the dimensional accuracy of the workpiece, geometry, and will cause serious errors, especially during the assembly process. The effects of this changing process, such as mold condition, feature, and loading condition, on the springback have been investigated, and both structural analysis and experimental testing have been carried out.

Experiments were carried out to examine the effects of process parameters on the V-die bending process. Material type, thickness and process parameters affect the springback value and make prediction difficult. By changing the sheet thickness of the material, the springback behavior was examined at different forces and different mold angle parameters. The effects of process variables and bending angles on springback after unloading were evaluated.

Aluminum 1050 series plates were cut on a guillotine machine to 100x100mm. Plates with 1mm, 1.5mm and 2.5mm thickness were bent on the press bench at 90°, 135°, 150° bending angles and springback values were measured. Process parameters were prepared by entering the material type, sheet thickness and bending angles into the HMI panel. Experiments were carried out for every thickness and every bending angle, and the bending process was carried out on a total of 18 samples.

At a 90° bending angle, the springback angle for 1mm thickness was measured as 1° degree and the springback for 1.5mm thickness was measured as 0.6° degree. When the thickness was increased by 0.5 mm, the springback angle decreased by 40%. Likewise, in aluminum plates with a thickness of 2.5 mm, there was a 50% decrease compared to 1.5 thickness, measured by -0.3 degrees. While a 3.9° degree springback was detected in the 1 mm thick sample at a 135° bending angle, a 46.1% decrease was observed in the 1.5 mm thick plates, measuring 2.1°. In 2.5 mm thick plates, it decreased by 19% and was measured as 1.7 degrees. The bending angle was further increased and the springback angle of 1mm thickness was measured as 5.4° degrees at a 150° bending angle. In the 1.5 mm thick plate, it decreased by 1.85% by measuring 5.3° degrees. It has been observed that the effect of thickness increase on springback decreases as the bending angle increases. The springback measure at 2.5mm thickness was measured as 4.9° degrees, resulting in a 7.54% decrease. As a result, springback values were measured by evaluating the bending angle and sheet thickness parameters. It has been observed that springback angle values decrease with increasing sheet thickness, but springback values decrease with increasing bending angles.

Springback, one of the basic irregularities of V-bend and breakage, which is one of the sheet metal forming processes, is the dimensional deviation caused by elastic recovery. After the bending bend, the elastic part of the deformation is recovered as the forming loads are eliminated, causing dimensional deviation in the bent part. Digital estimation and detection of springback is important because it affects the dimensional accuracy of the workpiece, geometry, and will cause serious errors, especially during the assembly process. The effects of this changing process, such as mold condition, feature, and loading condition, on the springback have been investigated, and both structural analysis and experimental testing have been carried out.

By considering the experimental results, the effect of the independent variable values on the dependent variable values was examined. The analysis result showed that the thickness and mold angle parameters had a significant effect on the springback angle. As a result of the Anova analysis, the effect of the die angle on springback was determined to be 99%.

The V guide and punch model used in the experimental study was designed in the Nx 12.0 program. The model was created according to 30°, 135° and 150° bending angles. Three different thicknesses and different mold angles were used to examine the springback behavior on the material. Frictional contact was selected as the contact settings. In order to accurately calculate the deformation values as a result of the analysis, the element size was taken as 2 mm. To eliminate the convergence problem, analysis was performed in the substep time interval and sudden large changes were eliminated. The punch was advanced in the -Z direction by entering the displacement value. As the punch progressed, the sheet material began to take shape. After bending, springback occurs in the plate. For the specified thicknesses, bending was made at each die angle and a total of 9 analyzes were obtained. In order to target operating accuracy, the sensitivity of the number of elements on the springback angle was examined by considering the plate thickness and contact surfaces. As the number of elements increases, the amount of springback on the aluminum plate will remain the same after a certain number of elements. However, an unnecessarily large number of elements will increase the analysis time and cause incorrect stresses on the plate. Element precision was made by analyzing a 1 mm thick plate at a die angle of 150°.

Total deformation, von-misses stresses and springback angle values were obtained using the formulations. As in the experimental results, in the FEM analysis, a decrease was observed in the springback angle values as the plate thickness increased. When the die bending angle was increased from 90° to 135°, the springback angle value increased, while the springback angle values at 135° degree bending angle and 150° degree bending angle were similar. As a result, as the bending angle increases, the springback value increases, while as the plate thickness increases, the springback angle value decreases. Considering the analysis results, the yield strength in the inner part of the bending is less than the yield strength in the outer part. For this reason, springback occurred.

In this study, springback behavior, which is frequently seen in bending processes, was examined on 1050 aluminum plates by V bending. Plates with 1mm, 1.5mm and 2.5 mm thickness were bent at 90°, 135°, 150° bending angles and the springback angle was measured with a digital protractor. Deviation values were obtained using the same die width and punch angle. In order to verify the experimental results, finite element analysis was used using the parameters considered. The estimated springback angle was measured and errors between the angles were determined by comparing it with

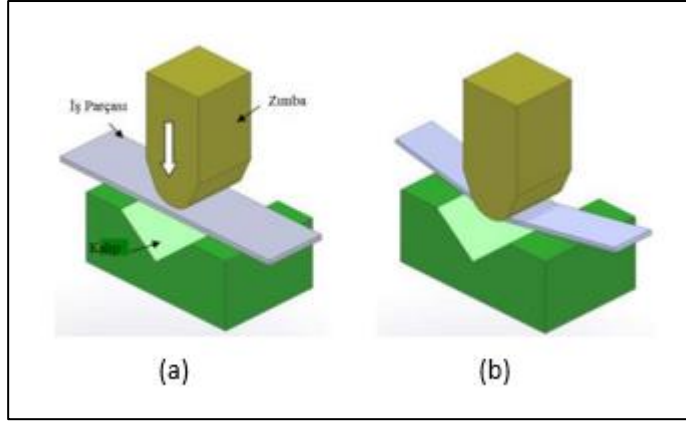
the experimental results. Considering the experimental and simulation results, it was seen that the springback angle decreased with increasing plate thickness at the same bending angle. It has been obtained from the experimental results that the springback angle increases as the bending angle increases. As a result of the variance analysis, it was seen that the twist angle had a greater effect on springback than the plate thickness. In order to obtain the bending angles specified as a result of the FEM analysis, different die depths were modeled and the bending force was calculated.

1. GİRİŞ

Sanayi, otomotiv gibi çeşitli sektörlerde sac büküm prosesi sırasında geri yaylanma problemi sık sık yaşanmaktadır. Sac metal şekillendirme proseslerinde istenilen geometriyi elde etmek için uygun bir elastik-plastik deformasyonun uygulanması esastır. Proses işleminden sonra şekillendirme yüklerinin ortadan kaldırılması sırasında, uygulanan toplam deformasyonun elastik kısmı geri kazanılır ve şekillendirilen parçada boyutsal bir sapmaya yol açar. İstenilen iş parçasının boyutsal doğruluğunu ve geometrisini doğrudan etkileyebilen ve montaj aşamasında büyük uyumsuzluklara yol açabilen bu olay, geri esneme olarak bilinir (Reddy ve ark., 2014). Zimba, alüminyum levha üzerindeki yükün kaldırmasından sonra elastikiyetin geri kazanılması, bükülme momenti kaldırıldıktan sonra bükümdeki eğrilik yarıçapının arttığı geri yaylanma olayına neden olur. Geri yaylanma durumu pekleşme üsteli, sac kalınlığı, kalıp açısı, elastik modül gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu parametrelerin geri yaylanma durumuyla yanlış ilişkilendirmesi durumunda hurdaya çıkarma ya da yeniden işleme nedeniyle ürün kaybına neden olabilmektedir. Geri yaylanma prosesi sadece iş parçasının malzemesine değil aynı zamanda kullanılan takımın geometrisine ve plastik deformasyon mekaniğine de bağlıdır. Belirtilen parametreler numunenin çalışma koşullarıyla doğru ilişkilendirilirse mevcut hatalar giderilebilir. Bunun sonucunda deformasyon altındaki malzemelerin gerçek mekanik ve geometrik özellikleri kullanılarak geri yaylanmanın telafi edilmesiyle yakın toleransların elde edilebileceği anlamına gelir (Moon ve ark., 2003).

Bükme prosesi DIN 8550 standardı ele alındığında doğrusal kalıp hareketiyle iki sınıfa ayrılır. Bunlar V büküm ve U büküm olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada şekillendirme yöntemlerinden biri olan V bükme kullanılmıştır. Bükme prosesi sonrasında V bükme prosesi şekilde belirtildiği gibi kullanılan levhanın V şeklindeki kalıp ve zimba arasında ezilerek istenen şekle getirilmesi işlemidir. Bu kullanılan methodun en büyük avantajı tezgaha gerekli sac kalınlığı, kalıp açısı değerlerinin girilmesiyle istenilen büküm açılara sahip ürün elde edilmesidir. Mevcut levhanın zimba tarafından ezilmesi malzemede negatif veya pozitif geri yaylanma durumu oluşturabilir (Tekiner, 2004). Bu geri esneme değeri bükülme düzlemindeki her noktadaki kalınlık gerilimi

dağılımı nedeniyle malzemenin bükülme momentiyle ilişkilidir. Akma dayanımı ve sertlik nedeniyle geri yaylanma değerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması, üretilen levhanın boyutsal doğruluğu özellikle imalat ve montaj süresince önem arz etmektedir (Reddy ve ark., 2014).



Şekil 1.1. V bükme (a) ilk aşama ve (b) son aşama (Abdullah ve ark.2012).

Umur ve ark. (2016), DP600 ve DP780 sac kalınlığının geri yaylanma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sac kalınlığının artmasıyla geri yaylanma değerlerinin düştüğünü ve malzemedeki eğrilik yarıçapının artmasıyla geri yaylanmanın azaldığını tespit etmişlerdir.

Karaağaç ve ark. (2014), bükme kuvvetinin artmasıyla geri yaylanma değerlerinin düştüğünü yaptıkları deneylerden elde etmişlerdir. Bükme radyüsündeki azalmanın geri yaylanmayı azalttığı ve bununla birlikte yüksek gerilim nedeniyle geri yaylanma değerlerinin yüksek olduğunu göstermişlerdir. Sac malzeme kalınlığındaki artış ve kalıp açısındaki artışın geri yaylanma değerinde artış olmuştur. Ayrıca akma dayanımındaki ve pekleşmedeki artış geri esneme miktarını arttırmıştır.

Appukutan ve ark. (2013), L bükme prosesi gerçekleştirerek alüminyum levhalar üzerindeki geri yaylanma davranışını incelemişlerdir. Çeşitli kalınlıkta numuneler hazırlayıp farklı kalıp açılarında deneyler yapmışlardır. Sacın her kalınlığı için geri yaylanmanın arttığı görülmüştür. Aşınma nedeniyle sac yüzeyinde çizikler SEM görsellerinde görülmüştür. Zimba ve kalıp arasındaki açıklık arttıkça geri esneme etkisinde ve kırılma ilerlemesinde artış olmuştur.

Tekaslan ve arkadaşları, paslanmaz çelikler üzerinde geri yaylanma davranışını incelemişlerdir. Deneyde iki yöntem kullanmış olup zimba ve V yatak arasındaki boşluğun sac malzemenin kalınlığına eşit olmasını ve zımbanın kalıp üzerinde 20

saniye tutulmasını gerektirir. 2. yöntemde zımba ve V yatak arasında sac malzemenin kalınlığına eşit bir boşluğun verilmesi ve zımba parçayı ezdikten hemen sonra kaldırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sac üzerinde zımba ne kadar tutulursa geri yaylanma değerleri o kadar az olmaktadır. Zımba yükünün sac üzerinde fazla tutulması büküm süresini arttırmakla birlikte geri yaylanma değerlerini de azaltmıştır. Tablo ve grafikler, sac malzeme kalınlığının ve kalıp açılarının geri yaylanma değerlerinin üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Sac malzeme kalınlığı ve kalıp açısı değerleri arttıkça geri yaylanma değerlerinde de artış olduğu görülmüştür. Geri esneme prosesinin malzemesine ve parametrelere bağlı olduğu bilinmektedir.

Joybari ve ark. (2008), geri yaylanma üzerindeki parametreleri araştırmışlardır. V kalıp bükmede bazı durumlarda sacda yaylanma görüldüğü halde U kalıp bükmede yaylanma görülmemiştir. Sac kalınlığının artması geri yaylanma değerinin azalmasına sebebiyet vermiştir. Geri yaylanmanın olmadığı bir zımba yarıçapı ucu mevcuttur. Zımba ucu yarıçapı arttıkça geri yaylanma miktarı azaldı.

Thipprakmas ve ark. (2011), V bükme işleminde proses parametrelerinin etkilerini araştırılmıştır. Geri yaylanma ve esneme üzerinde zımba yarıçapı araştırılmıştır. Bükülme açısı, malzeme kalınlığı ve zımba yarıçapına göre FEM tarafından analiz edilen geri yaylanma değerlerini ifade etmiştir. Bükülme açısı arttıkça geri esneme miktarı azalmıştır. Ayrıca malzeme kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalırken, zımba yarıçapı arttıkça geri esneme miktarı arttığı tespit edilmiştir.

Samad Z ve ark. (2013), geri yaylanma modelini iş parçasının bükülme açısı, uzunluğu ve kalınlığının değişimine bağlı olarak gözlemlemiştir. Belli strok değerlerinde iş parçasının kopma eğilimi incelenmiştir. İş parçası uzunluğunun geri yaylanma üzerinde daha az etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yüksek kalınlıklarda büküm açısının etkisi açıkça görülmüştür. Düşük kalınlıklarda ise geri yaylanma miktarı yüksek ama büküm açısının etkisinin daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Alüminyum Malzemeler

Alüminyum, periyodik cetvelde 3A grubunda bulunan element olup atom numarası 13, atom ağırlığı 26.98 g/mol'dür. İyonik yarıçapı 54 pm, yoğunluğu ise 2.7 g/cm³'tür. Erime noktası 660.4°C iken kaynama noktası yaklaşık 2400°C'dir (İnan Eroğlu, 2017). Alüminyum doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunan gümüş renge sahip bir metaldir (Greenwood ve Earnshaw, 1998). 27Al tek kararlı izotopu olup 26Al, 28Al ve 29Al gibi izotoplar yapay olarak üretilebilir. Alüminyum, Al³⁺ (üç değerli iyon) formunda bulunur ve bu nedenle oksidasyon-redüksiyon reaksiyonlarına katılmaz. Nitrik asit ve suda çözünmez ancak sülfürik asit ve hidrojen klorürde çözünür (İnan Eroğlu, 2017). Yer kabuğunda oksijen ve silikondan sonra kütlece (%8,23) en bol bulunan metal elementi olup mineralleri metal kaynağı olarak uygun değildir (Greenwood ve Earnshaw, 1998). Genellikle tropikal iklimde bulunan düşük demir ve silika anakayasının kötü havadan ayrışma ürünü olan boksit cevherinden (AlO_x(OH)_{3-2x}) üretilir (Marr, 2016).

Alüminyum, yüksek reaktivitesi nedeniyle serbest metal olarak doğada bulunmaz. Genellikle oksijen, silikon, flor ve diğer elementlerle bileşikler oluşturarak veya organik maddelerle kompleksler halinde bulunur (Gupta, 2007). Alüminyumun kimyasal bileşikleri çoğunlukla toprakta, madenlerde (safir, yakut, turkuaz gibi vb.), kayalarda (özellikle volkanik kayalar) ve kil gibi çeşitli doğal materyallerde bulunabilir (Ramos ve ark., 2014). Neticede doğada alüminyum oksit, alüminyum nitrat, alüminyum fosfat, alüminyum laktat, alüminyum klorit, alüminyum hidroksit, alüminyum hidroklorit gibi bileşikler halinde bulunabilir (Gupta, 2007). Alüminyum sülfat, alüminyum nitrat ve alüminyum klorit suda çözünebilirken alüminyum oksit güçlü alkaliler ve mineral asitlerde çözünebilir (Soni ve ark., 2001).

Alüminyum, geçmişten günümüze dek farklı amaçlarla yararlanılan bir element olmuştur. Eski Yunan ve Roma'da alüminyum sülfat (alum) formu renk sabitleyici ve hemostatik ajan olarak kullanılmıştır. Bugün bile kan durdurucu veya damar büzücü olarak bazı tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır (İnan Eroğlu ve Ayaz, 20018).

Modern keşfi ise 1808 yılına dayanır. Humphry Davy, bu elementin varlığını kanıtlamış ve isimlendirmiştir. Daha sonra, 1821 yılında Pierre Berthier, Güney Fransa’da %52 düzeyinde alüminyum oksit içeren bir kil benzeri materyal olan boksiti keşfetmiş ve onu boksit olarak adlandırmıştır (Crisponi ve ark., 2012).

1825 yılında Hans Christian Ørsted, saf olmayan bir formda alüminyum elde etmiş, 1827 yılında Friedrich Wöhler, potasyum ile anhidrus alüminyum klorürünü karıştırarak alüminyumun ayrıştırılmasını başaran ilk kişi olmuştur (Abramson ve ark., 1989). Ancak potasyum maliyetli olduğundan Henri Saint-Claire Deville sodyum kullanmıştır. Günümüzde kullanılan temel alüminyum üretim yöntemi olan Hall-Héroult yöntemi, 1886’da Charles Martin Hall tarafından geliştirilmiştir. Aynı yıl içinde, Paul Héroult da bağımsız olarak benzer bir yöntemi kullanarak alüminyum üretmeyi başarmıştır. Bu elektrolitik proses, boksit cevherinden alüminyumun elde edilmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Binczewski, 1995). Ancak boksit kayanın yerden çıkarılmasıyla başlayan proses öncelikle Bayer prosesi ile önce alüminaya daha sonra Hall-Héroult prosesi ile alüminyuma dönüştürülür. Dolayısıyla Bayer Prosesi, boksitten alümina eldesini ifade eder. Deville tarafından geliştirilen alüminanın sodyum karbonat ile ekstraksiyonuna dayanır. Ancak 1886’da Siemens tarafından keşfedilen dinamo aracılığıyla 1892’de Bayer, boksitten alümina eldesi sağlayan yeni bir proses keşfetmiştir. Bayer prosesi olarak adlandırılan bu proses ile yaygınlaşan endüstriyel üretim neticesinde Al, demirden sonra küresel ölçekte en fazla üretilen ikinci metal olmuştur (Hudson ve ark., 2000).

Hall-Héroult yöntemi, alüminyum metalinin üretiminde kullanılan önemli bir süreçtir. Bu yöntem, Bayer prosesinden edinilen erimiş alüminayı elektroliz yoluyla alüminyum metale dönüştürmek için kullanılır. Bayer prosesi ile üretilen alümina 950-980°C indirgenme hücrelerinde erimiş kriyolit içerisinde çözündürülerek saf metale indirgenir. Hazırlanan erimiş alümina, kriyolit (sodyum alüminyum florür) ve kalsiyum florür içeren elektrolit ortamında elektroliz edilir. Bu işlem sırasında, elektrik akımı kullanılarak alüminayı alüminyum metale indirger. Sıvı alüminyum çözelti, elektrolit içinde çöker ve alt kısımda biriktirilerek alüminyum kütükleri haline getirilir. Anotlar karbondan yapılı ve florür nedeniyle korozyona karşı dayanıklı hale getirilir. Katotlar ise antrasit gibi malzemelerdendir. Anotların saflığı çok önemli değildir, ancak katotların saflığı daha kritiktir. Hall-Héroult yöntemiyle üretilen alüminyum, genellikle %99 ve daha yüksek saflığa sahiptir. Ancak istenirse,

alüminyumun saflığını artırmak için sodyum, baryum ve alüminyum florür elektroliti ile çalışan Hoopes yöntemi gibi ilave işlemler uygulanabilir (Totten ve Mackenzie, 2003).

Alüminyum metalinin üretimi dünya genelinde yaygın bir şekilde gerçekleştirilir. Bu metal, başta boksit olmak üzere alüminyum içeren cevherlerden elde edilir (Soni ve ark., 2001). Yumuşak, biçimlendirilebilir ve dövülerek işlenebilen gümüş renginde bir metaldir. Manyetik değildir, hafiftir, yanmaz, ısıyı ve elektriği iyi iletir. Bu özellikleri sayesinde, endüstriyel alanda geniş kullanıma sahiptir (İnan Eroğlu, 2017).

2021 yılı verilerine göre küresel ölçekte primer olarak 65.400 bin ton alüminyum üretilmiş olup Çin (37.080.400 ton), Rusya (3.638.000 ton) üretim liderleridir. Türkiye'nin üretimi 79.900 tondur. Her bir birey için 80 kg alüminyum mevcut olup gelişmiş ülkelerde 350-500/kg/kişi olan ortalama az gelişmiş ülkelerde 35 kg/kişi düzeyindedir (BGS, 2022).

2.1.1. Kullanım yerleri

Çelikten sonra en fazla tercih edilen metal olan Al ve alaşımları gündelik yaşamda dahi geniş kullanım alanına sahiptir (BGS, 2022). Alüminyum, inşaat sektörü ve mimari alanlarda büyük bir öneme sahiptir. Hafifliği ve kolay şekillendirilebilirliği, pencerelerin ve kapıların çerçevelerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Şık ve modern görünümü ile binanın dış tasarımına katkıda bulunur. Dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci sayesinde çitler, korkuluklar ve balkonlar gibi güvenlik amaçlı yapıların yapımında sıklıkla tercih edilir. Yüksek mukavemeti, hafif olması nedeniyle bina iskeletlerinin yapımında kullanılmasını sağlar. Özellikle yüksek binaların, köprülerin, stadyumların ve endüstriyel yapıların inşaatında tercih edilir. Binanın dış cephe kaplamalarında kullanılır. Estetik bir görünüm sunmanın yanı sıra, dayanıklılığı sayesinde uzun ömürlü bir kaplama malzemesi sağlar. Korozyona karşı dirençli olduğu için bakım gereksinimini minimumda tutar. İyi ısı iletimi özelliği, enerji verimliliği açısından avantaj sağlar. Isıyı iyi ilettikleri için ısı yalıtım sistemlerinde kullanılır ve iklim koşullarına karşı koruma sağlar. Özellikle alüminyum kompozit levhalar, dış cephe kaplamaları, iç mekan dekorasyonu ve tabela üretimi gibi birçok uygulamada kullanılır (Gandara, 2013).

Alüminyumun neredeyse %20'si folyo, şişe, termos, tava ve tencere gibi yiyecek-içecek ambalajlarında kullanıldığı görülmektedir. Alüminyum, nem ve kokuları

geçirmez, UV ışınlarına dayanıklıdır, toksik değildir ve sızdırmazlık sağlar. Bu nedenle gıda ve ambalaj endüstrisinde yaygın olarak kullanılır (Ranau ve ark., 2001). Yüksek ısı iletim yeteneği nedeniyle elektrik ve elektronikte yararlanır. Özellikle bakırın maliyetli olması ve elektrik iletkenliği için ek yapıların gerekliliği nedeniyle elektrik hatlarında alüminyum kullanımı artmıştır (Tarhan, 2023). Motorlu taşıtların üretiminde, diğer metallerle alaşım yapma ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle yaklaşık %25 oranında alüminyum kullanılır. Ağırlığına göre yüksek mukavemet gösterir, bu da yakıt verimliliği sağlar. Sünekliliği yüksektir ve korozyon direnci sayesinde kargo ve yolcu uçakları gibi araçların yapımında tercih edilir (Gandara, 2013). Ayrıca cam sanayisinde ayna üretimi, askeri sanayide roket ve füze üretiminde, aydınlatma sektöründe kullanımı yaygındır. Farklı sektörlerdeki kullanım düzeyleri kimya ve tarım ürünleri sanayi %1, demir çelik - metalurji %3, mobilya - ofis eşyaları %6, genel mühendislik %9, elektrik / elektronik %10, ambalaj %15, ulaşım %24, inşaat %25 şeklindedir (Tarhan, 2023).

2.1.2. Alüminyum alaşımları

Alüminyumun saf hali, yüksek mukavemet ve döküm özellikleri bakımından bazı uygulamalarda yetersiz olabilir. Bu nedenle, alüminyumun mekanik özelliklerini iyileştirmek ve belirli endüstriyel gereksinimlere uygun hale getirmek için farklı elementlerle alaşımlandırma yapılır. Bu alaşımlar, alüminyumun saflığına çeşitli elementlerin katılmasıyla oluşur ve farklı uygulama alanlarına yönelik farklı özelliklere sahip olabilirler (Savaş, 2005):

- Bakır (Cu): Bakır katılması, alaşımın mukavemetini artırabilir.
- Silisyum (Si): Silisyum eklenmesi, alüminyumun ısıl işlem sırasında sertleşmesine yardımcı olur.
- Magnezyum (Mg): Magnezyum, alaşımın mukavemetini ve direncini artırabilir.
- Çinko (Zn): Çinko, alaşımın işlenebilirliğini artırabilir ve sıcaklık dayanımını artırabilir.
- Mangan (Mn): Mangan, alaşımın mukavemetini ve çekme dayanımını artırabilir.
- Nikel (Ni): Nikel, korozyon direncini artırabilir ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı artırabilir.
- Titanyum (Ti): Titanyum, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı artırabilir ve korozyon direncini artırabilir.

- Zirkonyum (Zr): Zirkonyum, alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirebilir.
- Demir (Fe): Demir, alaşımın mukavemetini artırabilir.

Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi Tablo 2.1’de paylaşılmıştır.

Tablo 2.1. Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi.

Nitelikler	Co	Cu	Cr	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn
Anodizasyon elverişsizlik		-			++	-		+		+
Döküm kabiliyeti		+		-	-	-		++	+	+
Elastiki Sınır		++			-		-	+		+
Elastikiyet modülü	++	+		-	-	+	+	++		+
Isıya dayanıklılık		++		+	++		+			
Kaynak kabiliyeti		-	+		+	+	-	++	+	-
Kopma Mukavemeti	+	++	-		+		+	+	+	++
Korozyon direnci		-	++	--	++	-		+		+
Sertlik		++		+	-	+	+			-
Süneklik		-		--	+			--	+	
Talaş kaldırma ile işlenebilirlik		++	+	++	+	+	+	-	++	+

Kaynak: (Hal, 2023) * ++; çok iyi +; iyi - ; ortanın altında --; zararlı

Alüminyum alaşımları, işlem ve döküm alaşımları olarak kategorize edilebilir. Döküm alaşımları, genellikle kalıp döküm işlemleriyle üretilir ve karmaşık geometrili parçalar için uygundur. İşlem alaşımları ise dövme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi işlemlerle şekillendirilir ve daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılır (Savaş, 2005).

Alüminyum işlem (dövme) alaşımları, özel uygulamalar için özel olarak tasarlanan alüminyum alaşımlarıdır. İşlem alaşımları genellikle Cu, Ni, Mg, Zn, Mn, Si, Sn gibi elementleri içerir (Tablo 2.2). Bu elementler, alaşımın özel özelliklerini ve kullanım amacını belirlemeye yardımcı olur. Bu alaşımlar genellikle döküm yöntemi ile üretilirler ve daha sonra şekillendirilirler. Bu süreçte alüminyum alaşımı ergitilir ve özel döküm şekillerine dökülür. Döküm işleminde hemen sonra alaşımın homojenleştirme tavı uygulanır. Bu, alaşımın içsel yapısal homojenliğini sağlar. Alaşımın şekillendirilmesi için iki temel yöntem kullanılır: haddeleme ve ekstrüzyon. Haddeleme, alaşımın rulo haline getirilmesini sağlar, ekstrüzyon ise farklı kesitlerde şekillendirmeye olanak tanır. İşlem alaşımları, dört basamaklı bir sisteme göre numaralandırılır. Bu numaralandırmada dört basamaklı sayının ilk rakamı, alaşım içindeki temel elementi temsil eder. 1, 3-5XXX plastik şekil değiştirme ile 2, 6-8XXX ısıl işlem ile sertleştirilebilir (Savaş, 2005).

Tablo 2.2. Dövme alüminyum alaşımları.

Sayısal yazımı	Ana Alaşım Elementi
1XXX	Saf Alüminyum
2XXX	Bakır
3XXX	Mangan
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Silisyum ve Magnezyum
7XXX	Çinko
8XXX	Kalay

Kaynak: (Hal, 2023)

Döküm alüminyum alaşımları, döküm yöntemi ile üretilirler. Genellikle bu alaşımlara silisyum eklenir. Silisyum, döküm kabiliyetini artırır ve alaşımın daha iyi akmasını sağlar. Döküm alaşımları Cu, Mn, Mg, Zn, Ni, Sn gibi elementleri içerebilir (Tablo 2.3). Bu elementler, alaşımın özel özelliklerini ve kullanım amacını belirlemeye yardımcı olur. Döküm alüminyum alaşımları, genellikle üç basamaklı bir sistemle kodlanır ve bazen ondalık bir ek ile dört basamaklı bir kod sistemi ile ifade edilir. Temel element, ana özellik, içerik ve ek özellikleri belirtir (Al-Saadi ve Tunay, 2017).

Tablo 2.3. Döküm alüminyum alaşımları.

Sayısal yazımı	Ana Alaşım Elementi
1XX.X	Saf Alüminyum
2XX.X	Bakır
3XX.X	Silisyum, Bakır ve Magnezyum
4XX.X	Silisyum
5XX.X	Magnezyum
7XX.X	Çinko
8XX.X	Kalay

Kaynak: (Al-Saadi ve Tunay, 2017)

2.1.2.1. Alüminyum 1xxx serisi

Bu seri, minimum %99 alüminyum içeriğine sahip olup, ısıtılma işlemi görmeyen alaşımları içerir. İçerisinde bulunan alaşım elementleri Fe ve Si'dir. Bunlar alaşımların mukavemetini artırır. Saf alüminyum miktarının daha yüksek olması sebebiyle 1xxx serisi alaşımların çekme mukavemeti düşüktür. 1xxx serisindeki örnek gösterilecek alaşımlardan bazıları 1050, 1060, 1200'dür.

2.1.2.2. Alüminyum 2xxx serisi

2xxx alaşımlı alüminyum ısıtılma işlemi tabii tutulabilir. Bunlar esas olarak alüminyum-Bakır alaşımlarıdır. Bakır ilavesi (%0,7-6,8 aralığında) alaşımları geniş bir sıcaklık

aralığında güçlendirir. Ancak bu alaşımlar, gerilim korozyonu nedeniyle ark kaynağı işlemleri için çok iyi değildir. Bakır ayrıca kırılma yapısını ve yorulma özelliklerini de geliştirir. Bakır dışında Başlıca alaşım elementleri Vanadyum, Titanyum, Manganez, Demir, Nikel, Kadmiyum ve Kalay 2xxx serisi alaşımlarda kullanılan diğer bazı elementlerdir.

Al-Cu-Ni alaşımlarına demir eklendiğinde yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artar. Çok düşük oranda eklenen nikel bile genleşme katsayısını düşürür. Düşük erime noktasına sahip olan kadmiyum, korozyon direncini ve mukavemetini artırır. Kalay, Al-Cu alaşımlarının yaşlanma tepkisini ve korozyona karşı direncini artırır. Bakır, Nikel, Silikon ve Kalay alaşımların yük taşıma kapasitesini artırır ve kurşun ilavesi alaşımların işlenebilirliğini artırır. Bu malzemeler bazen dolgu maddeleri kullanılarak 2xxx serisi alaşımlarla kaynaklanabildiği gibi 4xxx serisi dolgularla da kaynak yapılabilir. Bu serideki yaygın alaşımlardan bazıları 2007, 2011, 2014, 2017A, 2024 ve 2030'dur.

2.1.2.3. Alüminyum 3xxx serisi

Alüminyum 3xxx serisindeki ana alaşım elementi Manganezdır (Mn). Manganez alaşımları sünek hale getirir ve şekillendirilebilirliğini artırır. Bu alaşımlar çok çeşitli mekanik özellikler sergiler. Alaşımlar orta mukavemetlidir. 3xxx serisi alaşımlar ısı işleme tabi tutulmazlar ve genellikle 2xxx alaşımlarından daha az çekme mukavemetine sahiptirler. Alaşımlar mükemmel şekillendirilebilirlik nedeniyle presleme, çekme ve haddelemede iyidir. Bu alaşımlar düşük ısıl iletkenliklerinden dolayı enerji santrallerinde ve taşıtlarda ısı transfer malzemesi olarak büyük katkı sağlarlar. Korozyona karşı iyi dirençleri nedeniyle bunlar aynı zamanda çeşitli ev aletlerinde ve teneke kutular gibi ambalajlarda da kullanılır. Manganez ayrıca yüksek sıcaklıklarda 3xxx serisinin tane boyutunun stabilize edilmesine yardımcı olur. Manganez, Demir ile birlikte alaşımların döküm kabiliyetini artırır ve metal katılaşması sırasında büzülme azaltır. Bu alaşımların kuvvetlendirme etkisini arttırmak için belli oranlarda Magnezyum da eklenebilir. 3xxx serisi alaşımlar, servis gereksinimi ve uygulamanın niteliğine bağlı olarak dolgu alaşımlarıyla da kaynak yapılabilir. 3xxx Alüminyum serisindeki ana alaşımlardan bazıları 3003, 3004, 3005, 3103 ve 3105'tir.

2.1.2.4. Alüminyum 4xxx serisi

4xxx serisi alaşımlar mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için ısıyla sertleştirilebilir. 4xxx alaşımları için ana alaşım elementi silikondur (Si). Çoğunlukla bu alaşımlar doğası gereği daha az sünektir. Çoğunlukla bu alaşımlar, iyi sertlik ve düşük sünekliliğin gerekli olduğu ürünlerin dökümü için kullanılır. Bu alaşımların çekme mukavemeti 25 ile 55 KSi arasında değişmektedir. Silikonun eklenmesi esas olarak akışkanlığını artırır ve sünekliliği azaltır. Bu alaşımlara eklenen diğer ana elementler fosfor, kalsiyum ve nikelidir. Fosfor işlenebilirliği artırır ve kalsiyum CaSi'yi oluşturur. Silikon ile iletkenliği artırır. Nikel alaşımların sertliğini ve mukavemetini arttırmaya yardımcı olur [48]. Alaşımlar uçak pistonu gibi dövme işlemlerinde uygulama alanı bulur ve otomotiv uygulamalarında kaynak için dolgu alaşımları olarak kullanılır. En yaygın kullanılan 4xxx alaşımları 4032 ve 4043'tür (Singh ve ark., 2017).

2.2. Sac Bükme

Sac bükme, metal işleme ve imalat endüstrisinde kullanılan bir terimdir. Bu işlem, metal levha veya sacın belirli bir şekle veya eğriye bükülmesi anlamına gelir. Sac bükme işlemi, metal levhaların çeşitli ürünlerin parçalarına veya bileşenlerine dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılır. İşlem genellikle hidrolik veya mekanik presler kullanılarak gerçekleştirilir. Metal levha, presin kalıpları veya matrisleri arasına yerleştirilir ve ardından pres tarafından bükülerek istenen şekil elde edilir. Bu işlem, otomotiv endüstrisinden inşaat sektörüne kadar birçok farklı uygulama alanında kullanılır. Ayrıca sac hammaddesi, haddehanelerde farklı soğuk şekil verme yöntemleri kullanılarak çeşitli geometrik yapılar oluşturulabilir. Bu yapılar dinamik ve statik yüklerle başa çıkabilen dayanıklılığa sahip olacak şekilde tasarlanır ve çeşitli imalat yöntemleriyle üretilir. Sac bükme işlemi, metalin dayanıklılığını ve şekil verme yeteneğini artırmak üzere ısıtma işlemleriyle birleştirilebilir (İlhan, 2018).

Yapı elemanları, birbirleri içindeki yük aktarımını, yapının işlevlerini ve rijitliğini, tekrarlı kuvvetlerin bileşimlerini bozmadan karşılamalıdır. Özellikle yüksek mukavemet gereken yapılarda, dinamik ve statik kuvvetler tasarım aşamasında önemsenir. Seçilen malzemenin akma ve çekme mukavemet değerleri, çeşitli mekanik özellikleri yüksek olmalıdır. Ancak yüksek mukavemetli malzemelerle çalışmak, imalat süreçlerini daha zorlu ve maliyetli hale getirebilir. Yüksek mukavemetli malzemelerle şekil verme işlemi, tolerans ölçülerini etkileyebilir ve kalıp ömrünü

kısaltabilir. Ayrıca bu malzemelerin maliyeti genellikle daha yüksektir, bu da üretim maliyetlerini artırabilir. Bu nedenle, mukavemet gereksinimlerini karşılamak için doğru malzeme seçimi yapılmalı ve imalat süreçleri dikkatle planlanmalıdır. Bu hem mukavemet gereksinimlerini karşılamayı hem de üretim maliyetlerini kontrol altında tutmayı mümkün kılar (Panthi ve ark., 2010).

Sac metal şekillendirme işlemlerinde mukavemet artırma yöntemleri, birçok endüstri alanında uygulanabilir. Mukavemet artırıcı yöntemler, yapısal geometri ve kalıp süreçlerinde yapılan iyileştirmeleri içerir ve bu parametreler, önemli bir rol oynar. Yapı elemanının geometrik şekli, kuvvetleri daha dengeli bir şekilde dağıtmak için optimize edilebilir. Bu optimizasyonlar, malzemenin kalınlığını ve akma-çekme mukavemet değerlerini artırmadan belirli miktarda statik ve dinamik yükleri taşıyabilecek nitelikte yapılabilir. Kaliteli tüketim ürünleri ve korunan doğal kaynaklar için sac hammaddesinin kullanımı en iyi düzeyde olmalıdır (İlhan, 2018).

İlerleyen teknoloji mühendislik hesaplamalarını ve sayısal analizleri daha hızlı ve etkili hale getirmiştir. Bilgisayar destekli üretim sistemlerinin yaygınlaşması, işletmelere rekabetçi bir avantaj sağlar. Ürünlerin tasarım aşamasında geliştirilen özellikler ve müşteri beklentileri, kalite seviyelerini belirlemede önemli bir etkiye sahiptir. Ar-Ge çalışmaları, sayısal analizler ve simülasyonlar sayesinde, belirli bir konu üzerinde daha kısa sürede doğru ilerleme sağlanabilir. Ürünlerin kullanım ömrü boyunca belirli koşullarda güvenilir bir şekilde çalışabilmesi, tüketiciler tarafından tercih edilen bir özelliktir. Sac metal levhaların şekillendirilmesi hala yaygın çalışılan bir konudur. Teknolojinin de yardımıyla, tasarım aşamalarında ürünlerin analizi ve çözümlenmesi daha etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Sonlu elemanlar yönteminden yararlanan bilgisayar programları aracılığıyla bu çözümlenme daha da kolaylaşmaktadır (Gupta ve ark., 1998; Duflou ve ark., 2005).

2.2.1. Bükme işleminin tanımlanması

Sanayi devriminin ardından mekanizasyonun üretim süreçlerine dahil edilmesi, üretim kavramını yeni bir boyuta taşımıştır. Bu dönemde üretim adımları işlevsel hale gelmiş ve ayrıca farklı imalat yöntemleri geliştirilmiştir (Turan, 2009). Bu bağlamda, uygulanan bükme işlemi, malzemenin talaş kaldırmaksızın bir eksen etrafında şekillendirilmesi olarak tanımlanabilir. Bükme işlemi sırasında deformasyona uğrayan sac bölgelerinde plastik ve elastik şekil değişiklikleri meydana gelir (Eren, 2022).

Bükme işlemi sırasında, sac malzemenin dış kısmındaki lifler uzar ve kesit daralır (çekilmeye maruz kalır), iç kısmındaki lifler ise kısalır ve kesit genişler (basınca maruz kalır). Bu nedenle, bükülen malzemenin iç kısmında basınç gerilmeleri, dış kısımda ise çekme gerilmeleri oluşur. Eğer bükülen bölgede sac kalınlığı değişmezse, sacın ağırlık merkezinden nötr eksen adlı bir çizgi geçer. Bu eksen, çekilmeye ve basınca maruz kalan bölgeleri ayırır. Nötr ekseninde herhangi bir değişiklik olmadığından lifin uzunluğu değişmez (Hekim, 2016).






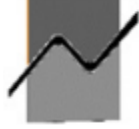







Bükme işlemi sırasında malzeme kesitinde meydana gelen değişiklikler bükme kuvveti, bükme yarıçapı, bükme açısı, malzeme kalınlığı, malzeme kalitesi gibi değişkenlere bağlıdır. Bükme işlemi için uygulanan kuvvet, malzemenin elastik sınırlarını aşmalı ve istenilen yönde değişiklik yapabilmesi için yeterli büyüklük önemlidir. Bükme kuvveti, kalıp tarafından uygulanan kuvvetten küçük ancak malzeme direncinden büyük olmalıdır (Arslan, 2007).

2.2.2. Bükme işlem çeşitleri

Sac parçalarının bükme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında V bükme ve U bükme bulunur. V bükme işlemi daha spesifik alt gruplara ayrılabilir, bunlar arasında serbest bükme, kenar bükme ve açısal bükme yer alır (Tablo 2.4). Bükme işlemi sırasında parça önce elastik olarak sonra plastik şekilde değişir. Bu nedenle, yük kaldırıldıktan sonra, parça elastik geri dönüş nedeniyle orijinal şekline kısmen geri döner (Hekim, 2016).

Günümüzde bükme işlemleri genellikle hidrolik veya mekanik presler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu işlemlerde kullanılan kalıplar genellikle iki parçadan oluşur. Çıkıntılı olan “erkek kalıp,” zimba (ıstamp) olarak adlandırılırken, bu kalıpla çalışan ve girintili şekilli dişi kalıp,” matris (kalıp) olarak adlandırılır. Bazı bükme işlemleri sırasında sacın sabitlenmesi veya işlem sırasında kırışmasının önlenmesi için bir baskı plakası (pot çemberi) kullanılabilir. Pot çemberinin saca baskısı, genellikle pnömotik sistemler veya çift etkili kalıpların kullanılmasıyla sağlanır. Kalıpların birbirlerine göre doğru konumlanması, işin hassasiyeti açısından kritik önem arz eder (Arslan, 2007).

Tablo 2.4. Bükme işlemleri.

V Kalıp Bükme	1. Üretimde en yaygın bükme işlemi. 2. Zımba, iş parçasının şeklini V şeklinde değiştirmek için kullanılır.	
Kenar Bükme	3. Silme kalıbı ile sac metal bükme işlemlerinden biridir.	
Döner Bükme	4. İstenilen açığa sahip bir silindirik zımba görevi görür. Zımba hareket ettikçe bükme işlemi gerçekleşir.	
Hava Bükme	5. Zımba iki yüzey arasında hareket ederken sac bükme işlemi gerçekleşir.	
U bükme	6. U bükümleri yapmak için kullanılan U şekilli zımba.	
Ofset Bükme	7. Ofsetler oluşturmak ve sac metali şekillendirmek için bir araya getirilen çoklu bükme işlemleri.	
Oluklama	8. Bükme işlemini gerçekleştirmek için sac metalin genişliği boyunca ve tüm uzunluğu boyunca düzenli aralıklarla simetrik bir bükme kullanılır.	
Üç Nokta Bükme	9. Üç noktalı eğme, gerilme elastikiyet modülünü ölçmek için kullanılan diğer yöntemlerden biridir.	
Flanşlama	10. Flanşlama bir kenar bükme işlemi olarak adlandırılır. Genellikle şekillerde 90° açı oluşturulur.	
Tek bir kalıpla boncuk işleme	11. Boncuk, bir parçanın kenarı üzerinde bir kıvrım oluşturur. Bu boncuk düz veya kavisli bir eksen üzerinde oluşturulabilir.	
Hemming	12. Hemming bir bükme işlemidir ve sac metalin kenarı genellikle kendi üzerine bükülür.	
Dikiş	13. Dikişleme, sac metallerin kenarlarının birbirine kilitlendiği bir bükme işlemidir.	
Rulo Bükme	14. Merdaneler arasındaki mesafe ve açı bükme şeklini etkiler	

Kaynak: (Cinar ve ark., 2021)

2.2.2.1. V bükme

V bükme süreci sırasında, zımba aşağı doğru inerken öncelikle sacın desteksiz orta kısmıyla temas eder. Zımba, iş parçasının merkezinden başlayarak malzeme kalınlığını dikkate alarak aşağı doğru bastırılır. Bu sırada bükme kollarının uçları yukarı doğru döner ve kalıp radyusları etrafında çok az bir hareket yaparak reaksiyon gösterirler (Arslan, 2007).

Malzeme, kalıp radyuslarında kayma ve sürüklenme hareketi yapar, bu durum malzemenin salınma hareketi yapmadığını gösterir. Bükme işlemi ilerledikçe sürüklenme ve dolayısıyla malzemenin reaksiyonu artar. Bu nedenle bükme kolları sürekli yukarı konumda olur. Son aşamada, yalnızca zımba ucu değil, aynı zamanda yan yüzeyler de temas halindedir ve zımba parçayı kalıp içine sıkıştırmış bir pozisyonda bulunur (Arslan, 2007). V-kalıpları ekonomik ve basit olduğundan az sayıda üretim için abkant preslerde üretilir (Gülmez, 2011).

2.2.2.2. U – bükme

U bükme yöntemi, sac malzemenin U şeklinde bükülmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Chirita ve Brabie, 2007). Bu işlemde, süreç sac metalin bir U şeklindeki kalıba yerleştirilmesiyle başlar. Ardından zımba aşağı doğru hareket ederek malzemeye temas eder. Kalıbın dibine doğru ilerlerken malzemeye U şeklini verir. U bükme işleminde, zımbanın uyguladığı kuvvet, kalıbın derinliği, açıklığı ve zımbanın yarıçapı gibi faktörlere bağlı olarak tanımlanabilir (Acar, 2020). Aynı bükme açısıyla yapıldığında, U bükme işlemindeki şekil değişimi miktarının, V bükme işlemine göre daha fazla olduğu gözlemlenir (Gautam ve ark., 2016). U bükme işleminde, malzemenin alması gereken şekle bağlı olarak erkek ve dişi kalıp seçimi yapılır, böylece bükme işlemi gerçekleştirilir. İşlem kalıp radyusunun, derinliğinin, açıklığının; bükme radyusunun ve uygulanan kuvvetin bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Aynı bükme açısı ile yapıldığında, U-kalıpta bükme işlemi sırasında şekil değişimi miktarının, V-kalıpta bükme işlemine göre daha fazla olduğu gözlenir (Turan, 2009).

2.2.2.3. Oluklama bükme

Düz sac levhalarda dayanımını artırmak, biçimlendirme ardından şekil değiştirmesini engellemek amacıyla yapılan bir kalıplama işlemidir (Acar, 2020). Bu yöntem, genellikle duvar panelleri, çatı levhaları, hangarlar, gölgelikler vb. için kullanılan

galvanizli ve alüminyum sac levhalar için uygulanır. Oluklama bükme işlemi, bu tür levhaların dayanıklılığını ve işlevselliğini artırmak için önemlidir.

2.2.2.4. Kenar bükme

Kenar bükme işlemi, çeşitli amaçlarla kullanılan bir metal şekillendirme işlemidir (Acar, 2020):

- Kenar bükme, bir parçanın veya sac malzemenin kenarlarının mukavemetini artırmak için kullanılır. Bu, parçanın dayanıklılığını artırabilir ve mekanik olarak sağlamlaştırılabilir.
- Kenar bükme, parçanın kenar kısımlarında hafif bir kavis oluşturarak dış görünüşünü iyileştirmek için kullanılabilir.
- Kenar bükme işlemi, nokta kaynağı veya benzeri birleştirmeler sırasında meydana gelen kabarık yüzeyleri düzeltmek için kullanılabilir. Bu, kaynak sonrası pürüzlü yüzeyleri gidermeye yardımcı olabilir.

Kenar bükme işlemi sırasında sac malzeme, bir baskı plakası tarafından sabitlenir ve hareketli bir ıstampa tarafından şekillendirilir. Bu işlem, bükülecek sacın uzunluğunun diğer kısımlara göre kısa olduğu durumlarda tercih edilir. Kenar bükme için karmaşık kalıplar kullanılabilir ve bu işlem genellikle seri imalatta tercih edilir (Gülmez, 2011).

2.2.2.5. Kabartma bükme

Kıvrırma, katlama ve kenar bükme gibi yaygın bükme işlemlerinden farklı bir yöntemdir. Genellikle sac malzemelerin uç kısımlarına uygulanan diğer bükme işlemlerinin aksine, kabartma bükme işlemi, sac malzemenin kenarlarından uzak olan bölgelerde gerçekleştirilir. Ayrıca kabartma bükme işlemi, genellikle simetrik bir şekilde kalıplanmayan parçaların çevresine uygulanır. Bu işlem, sac malzemesinin yüzeyine kabartma veya oyuk desenler oluşturarak estetik veya işlevsel amaçlar için kullanılabilir. Kabartma bükme işlemi, sac malzemenin özgün bir doku veya görünüm kazanmasını sağlayabilir ve bu nedenle tasarım açısından çeşitli seçenekler sunar (Acar, 2020).

2.2.2.6. Serbest bükme

Serbest bükme, sac parçasının altında bulunan kalıbın kenarları tarafından desteklendiği bir bükme işlemidir. Bu işlem sırasında sac parçası, zımba tarafından aşağı doğru itilerek istenen bükme açısı elde edilir. Serbest bükme işlemi, bükme açısı

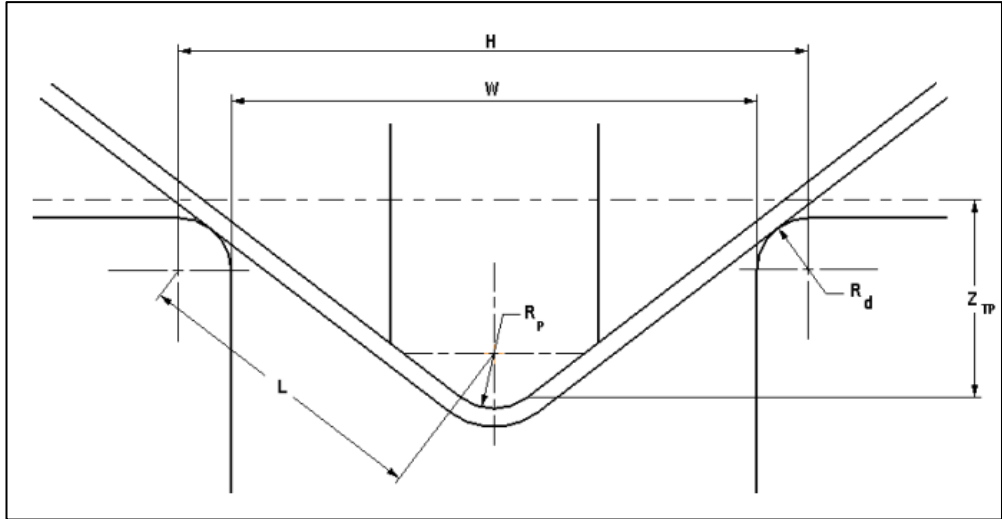
itibariyle V bükme işlemine benzemesine rağmen, sac parçasının kenarları bükme işlemi boyunca serbest bir şekilde kalır. Bu işlem, sac malzemesini şekillendirmek için kullanılırken, sacın kenarları sabit bir şekilde kalır ve sadece istenen bükme açısına uyacak şekilde bükülür. Serbest bükme işlemi, bazı uygulamalarda diğer bükme yöntemlerine göre avantajlı olabilir, çünkü sacın kenarlarında herhangi bir deformasyon oluşmaz ve bu nedenle daha düzgün bir sonuç elde edilebilir (Hekim, 2016).

2.2.2.7. Katlama ve kenet bükme

Genelde giyim endüstrisinde yararlanılan sac malzeme ile üretilen makine parçalarına uygulanır. Bu iki işlem, sac malzemeyi şekillendirme ve dayanıklılığını artırma amaçlarıyla gerçekleştirilir. Katlama işlemi, sac malzemenin ucundaki çapağı giderme ve parçaya dayanıklılık kazandırma amacıyla yapılır. Bu işlem sırasında katlanacak uç 180 derece döndürülerek birbiri üzerine bindirilir. Katlama işlemi genellikle malzemenin kenarlarına uygulanır. Kenet bükme işlemi ise iki ucu birleştirilecek silindir, kazan ve benzeri parçalara uygulanır. Parçaların birleştirilmesi ve sızdırmazlık sağlanması gereken durumlarda kullanılır. Her iki işlem de önemli ve yaygındır. Bu işlemler, sac malzemelerin işlevselliğini artırırken aynı zamanda dayanıklılıklarını da sağlar (Acar, 2020).

2.2.3. Bükme etkileyen faktörler

Bükme işlemi sırasında, sac malzemenin dış yüzeyindeki lifler uzar, bu da çekme gerilmesi oluşturur. Aynı zamanda, iç kısımdaki lifler kısalır ve basmaya zorlanır. Bükülen malzemede iç kısımda basma gerilmeleri, dış kısımda çekme gerilmeleri meydana gelir. Bükme işlemi sırasında herhangi bir ezilme veya malzeme kalınlığının değişmediği varsayılırsa, nötr ekseninde bu çekme ve basma bölgelerini ayırır. Nötr ekseninde bir değişiklik olmadığından lif uzunluğu değişmez (Işıқтаş, 2011).



Şekil 2.1. Rijit plastik model.

Kaynak: (Işıktaş, 2011)

Sac bükme işlemi birçok faktörden etkilenir ve bu faktörlerin doğru bir şekilde yönetilmesi, istenilen sonuçların eldesinde önemlidir (Ötü, 2012).

- Malzeme Türü: Sac bükme işlemi için kullanılan malzemenin türü, işlem sırasındaki davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Farklı alaşımlar farklı özelliklere sahiptir.
- Malzeme Kalınlığı: Metal levhanın kalınlığı, bükme işlemi üzerinde önemlidir. Daha kalın malzemeler daha fazla kuvvet gerektirir ve daha büyük yarıçap gerektirebilir.
- Bükme Yarıçapı: Bükme işleminde kullanılan yarıçap, bükme sonucunu etkiler. Daha büyük yarıçaplar daha az gerilmeye neden olur.
- Bükme Açısı: Bükme açısı, malzeme üzerindeki gerilimi ve deformasyonu etkiler. Daha büyük açılar daha fazla deformasyona yol açabilir.
- Pres Kuvveti: Bükme işleminde kullanılan presin kuvveti, malzeme üzerindeki stresi belirler. İhtiyaca uygun bir pres kuvveti seçimi önemlidir.
- Malzeme Sıcaklığı: Sac bükme işlemi sırasında malzemenin sıcaklığı, bükme davranışını etkileyebilir. Soğuk işleme ve sıcak işleme farklı sonuçlar doğurabilir.
- Yüzey Kalitesi: Metal levhanın yüzey kalitesi, bükme işlemi sırasında deformasyonu ve yüzey pürüzsüzlüğünü etkileyebilir.
- Kalıp ve Matris Tasarımı: Kullanılan kalıp ve matris tasarımı, bükme işleminin sonucunu etkiler. Kalıp ve matrislerin şekli ve malzemesi, bükme işlemi için kritik öneme sahiptir.

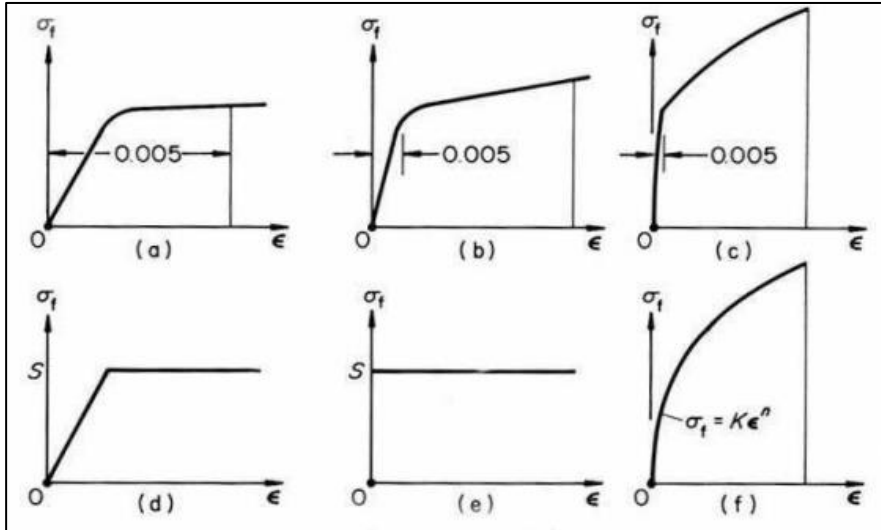
- Ön Germe (Pre-Bükme): Malzemenin ön gerilmesi veya ön bükülmesi, bükme işleminin sonucunu iyileştirebilir ve geri yaylanmayı azaltabilir.
- Malzeme Özellikleri: Malzemenin elastiklik modülü, akma dayanımı ve gerilme-kayma davranışı, geri yaylanma davranışı gibi özellikleri önemlidir.

2.2.4. Malzeme davranışı

Malzemelerin mekanik özellikleri, akma gerilmesi ve şekil değiştirme ile ifade edilir.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2.1)$$

Şekil 2.2'deki grafikler, bu iki özellik arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu grafikler, malzemenin davranışını tanımlamada kullanılıp her biri farklı bir malzeme özelliğini yansıtır (Arslan, 2007; Işıktaş, 2011).



Şekil 2.2. Malzeme modelleri.

Kaynak: (Işıktaş, 2011)

- Şekil (a): İdeal bir elastik malzemenin gerçek gerilme-gerçek gerinme diyagramını temsil eder. Bu malzeme, belirli bir gerilme uygulandığında elastik şekilde deformasyona uğrar ve gerilme kaldırıldığında eski haline döner. Dolayısıyla malzeme, elastik bir davranış sergiler.
- Şekil (b): Gerçek bir malzemenin gerilme-gerçek gerinme diyagramını gösterir. Bu grafikte, malzeme akma gerilmesine ulaştığında plastik şekil değiştirme gösterir. Bu nedenle, gerilme kaldırıldığında tamamen eski şekline geri dönmez. Malzeme, plastik deformasyona sahiptir.

- Şekil (c): Bir malzemenin gerilme-gerçek gerinme eğrisini temsil eder, ancak bu malzeme belirli bir gerilme seviyesine ulaştığında ani bir kırılma yaşar. Bu tür malzemeler kırılmandır ve plastik deformasyon göstermezler.
- Şekil (d): Elastik-tam plastik ideal malzeme için gerilme-gerçek gerinme diyagramını gösterir. Bu malzeme, akma sınırına kadar rijittir ve akma sınırına ulaştığında plastik deformasyon gösterir.
- Şekil (e): Rijit-tam plastik ideal malzeme için gerilme-gerçek gerinme diyagramını gösterir. Bu malzeme gerilme esnasında akma sınırına kadar rijittir ancak bu sınıra ulaştığında plastik şekil değiştirme gösterir.
- Şekil (f): Gerilme değeri, n ifadesiyle ifade edilen bir denklemlle gösterilir. Bu denklemlde n , pekleşme katsayısını temsil eder.

2.3. Geri Yaylanma

Sac malzemelerin bükme işlemi sırasında uygulanan kuvvet sonucunda plastik deformasyon; bu kuvvetin etkisiyle elastik deformasyon yaşanır. Elastik deformasyon, malzemenin geçici olarak şekil değiştirmesine neden olur. Ancak malzeme elastik sınırlar içinde kaldığı sürece bu deformasyon geri dönüşümlüdür. Yani uygulanan kuvvet kalktığında, malzeme kendi başlangıç konumuna geri döner ve bu süreç elastik toparlanma olarak adlandırılır. Bükülen sac malzeme, basılan tarafından uzama eğilimindedir, çekilen tarafında ise kısalma eğilimi gösterir. Bu durum, malzemenin bükme işleminde iç ve dış yüzeylerinde farklı gerilme ve deformasyon bölgelerinin oluşmasından kaynaklanır. Geri esneme veya geri yaylanma, bu deformasyonların tersine dönme eğilimidir. Yani sac malzeme, bükme kuvveti kalktığında, eski şeklini yeniden almaya çalışır (Uslu, 2014). Bu fenomen, özellikle soğuk şekillendirme işlemlerinde gözlemlenir ve tasarım ve üretim aşamalarında dikkate alınmalıdır. Elastik geri dönüşüm, ürünün son şeklini ve toleranslarını etkileyebilir, bu nedenle bükme işlemleri dikkatlice planlanmalıdır (Turan, 2009).

Geri esneme veya geri yaylanma, bükme işleminin sonucunda oluşan; tasarım, üretim ve montaj süreçlerinde önemli bir faktör olan bir olgudur. Bu olgu, malzemenin özellikleri ve bükme işleminin doğasıyla yakından ilişkilidir. Malzeme özellikleri, geri esneme olgusunun birincil nedenlerinden biridir. Bükme sırasında malzemenin gerilme-gerinim ilişkisi önemli bir rol oynar. Malzeme, bükme sırasında plastik deformasyona uğrar ve bu deformasyon sonucunda geri esneme meydana gelir. Bu

geri esneme, malzemenin elastik sınırları içinde meydana gelir ve uygulanan kuvvet kalktığıında malzeme eski şekline dönmeye çalışır (Yenice, 2006). Bükme işleminde, iç ve dış yüzeylerde farklı gerilme ve deformasyon bölgeleri oluşur. Genellikle malzemenin dış yüzeyinde çekme gerilmeleri ve deformasyonları, iç yüzeyinde ise basma gerilmeleri ve deformasyonları meydana gelir. Bu farklı deformasyon bölgeleri, geri esneme olgusunun bir nedeni olarak kabul edilir (Yazdani ve ark., 2017). Malzemenin yanı sıra kalıp şekli ve ölçüleri, sac kalınlığı ve sac anizotropisi gibi faktörler de geri esneme olgusunu etkileyebilir. Bu faktörlerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve anlaşılması, tasarım ve üretim süreçlerinin daha verimli ve başarılı bir şekilde yönetilmesine yardımcı olabilir. Geri esneme olgusu, parça kalitesini etkileyebilir ve montaj süreçlerini zorlaştırabilir. Bu nedenle, malzeme seçimi, kalıp tasarımı ve bükme işlemi parametreleri gibi faktörlerin dikkatlice değerlendirilmesi ve kontrol edilmesi gereklidir. Ayrıca geri esneme olgusunu modellenmesi ve tahmin edilmesi, üretim süreçlerinin optimize edilmesine yardımcı olabilir ve hatalı üretimleri önleyebilir (Hayrat, 2021).

Geri esneme veya geri yaylanma, tasarım, üretim ve montaj süreçlerinde önemli sorunlara neden olabilen bir olgu olması nedeniyle çeşitli çözümler geliştirilmelidir (Acar, 2020):

- Kalıp Tasarımı ve Maliyeti: Geri esneme, kalıp tasarımı sürecini etkileyebilir. Kalıp tasarımcıları, geri esnemeyi dikkate alarak kalıpları oluşturmalıdır. Deneysel yöntemler yerine analitik veya simülasyon tabanlı yöntemler kullanarak geri esnemeyi tahmin etmek ve bu bilgiyi kalıp tasarımına entegre etmek, maliyetleri düşürebilir.
- Ölçü Değişikliği ve Montaj Sorunları: Geri esneme nedeniyle parçaların ölçülerinde değişiklikler meydana gelebilir. Bu, montaj sürecini olumsuz etkileyebilir. Kalıp tasarımı ve üretim süreçleri, bu ölçü değişikliklerini minimize etmek için optimize edilmelidir. Ayrıca montaj sürecinde bu değişiklikleri telafi edebilecek esnekliklere sahip tasarımlar düşünülmelidir.
- Hurda Miktarı: Geri esneme nedeniyle oluşan hatalı ürünler hurda olarak kabul edilebilir ve bu maliyeti artırır. Bu sorunu azaltmak için üretim prosesi değerlendirilmeli ve kalite kontrol önlemleri alınmalıdır.

- Maliyetler: Geri esneme olgusunu azaltmak için tasarım ve üretim prosesleri optimize edilmelidir. Daha kesin hesaplamalar ve simülasyonlar kullanarak geri esnemenin miktarını en aza indirmek, maliyetleri düşürebilir.

2.3.1. Geri yaylanmanın telafisi

Sac malzemelerin bükme sonrası geri yaylanma sorununu azaltmak ve istenilen toleranslara ulaşmak için yapılabilecek bazı önemli işlemler ve stratejiler vardır (Yenice, 2006):

- Aşırı Bükme (Overbending): Geri esneme miktarını azaltmanın en yaygın yolu, sac malzemesini bükme işlemi sırasında belirtilen açıdan daha fazla bükerek başlar. Daha sonra, geri yaylanma sonucu malzemenin istenen açığa dönmesi sağlanır. Bu yöntem, geri yaylanmayı telafide yararlanılan etkili bir tekniktir.
- Yüksek Mukavemetli Malzemeler: Sac malzemenin geri esneme özelliği, kullanılan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Yüksek mukavemetli malzemeler, daha az geri esneme eğiliminde olabilir. Bu nedenle, geri esnemeyi azaltmak için uygun mukavemet özelliklerine sahip malzemelerin seçimi önemlidir.
- Sıcak İşlem: Sıcak işlem yöntemleri, sac malzemesinin geri esneme davranışını azaltabilir. Malzeme yüksek sıcaklıklarda şekillendirildiğinde, moleküler yapısı değişir ve daha az geri esneme eğilimindedir.
- Kontrollü Soğutma: Sac malzemesi büküldükten sonra kontrollü bir soğutma işlemi uygulanarak geri esneme miktarı azaltılabilir. Bu yöntem, malzemenin şekil değiştirme sırasında elde edilen özel bir yapıyı sabitlemeye yardımcı olabilir.
- Kesim ve Düzeltme İşlemleri: Bükülen sac malzemenin son ölçülerine ulaşmasını sağlamak için kesim ve düzeltme işlemleri yapılabilir. Bu işlemler, geri esnemeyi telafi edebilir ve istenilen toleranslara ulaşmayı kolaylaştırabilir.
- Simülasyon ve Modelleme: Geri esnemenin miktarını tahmin etmek için bilgisayar tabanlı simülasyonlar ve modelleme kullanılabilir. Bu, bükme işlemi öncesinde geri esneme miktarını daha iyi anlamayı ve tahmin etmeyi sağlar.
- Kalite Kontrol: Bükme işlemi sonrası ürünlerin geri esneme miktarını belirlemek için kalite kontrol prosedürleri kullanılabilir. Bu sayede malzeme ölçülerinin istenen toleranslara uygun olduğundan emin olunabilir.

Aşırı bükme yöntemi, geri yaylanmayı azaltmak için bükme işlemi sırasında malzemeyi istenenden daha fazla bükme anlamına gelir. Bu, parçanın geri yaylanmasını telafi etmek için tasarlanır. İşlem sırasında, malzeme istenen açının

ötesine bükülür, bu da geri esneme davranışını dengelemek için kullanılır. Aşırı bükme yöntemi, sac parçasının son ölçülerine ulaşmasını ve istenen toleranslara ulaşmasını sağlamada etkili bir tekniktir. V-kalıpta bükme işleminde geri yaylanmanın azaltılması amacıyla kullanılan bir başka yöntem ise bükme bölgesinin ezilerek deforme edilmesidir. Bu yöntemde zımba geometrisinde yapılan değişikliklerle zımba, parçaya temas eden bölgeyi ezerek plastik deformasyonu artırır. Büküm bölgesinde daha fazla deformasyon olan parça, daha az geri yaylanma eğilimi gösterir. Çift bükme tekniği ise U-kalıpta bükme işleminde kullanılır. Bu yöntemde, U şeklindeki kalıpta iki zımba bulunur. Üstteki zımba parçayı aşağı yönlü hareket ettirirken alttaki zımba da parçayla temasını kaybetmeden aşağı yönlü hareket eder. Bu ek sürtünme oluşturur ve parçanın ütüleme süresini artırır. Sonuç olarak, bükme işlemi sonrası geri yaylanma miktarı azalır (Acar, 2020).

Gererek bükme işlemi, geri yaylanmayı azaltmak için sıklıkla kullanılır. Yöntemde kenar bükme işlemine benzer baskı plakalarından yararlanır ancak burada önemli olan malzemenin akma sınırına kadar yüklenmesidir. Bu esnada baskı plakaları, malzemenin yan yüzeylerine doğru yanal yönlerde doğru hareket eder. Ardından zımba aşağı yönlü bir hareket uyguladığında, malzeme bükülmeye başlar, ancak bu sırada baskı plakaları da yanal hareket etmeye devam eder. Bu sayede, malzeme sürekli olarak gerilime maruz kalır ve geri yaylanma miktarı azaltılmış olur (Gülmez, 2011).

Tablo 2.5. Geri yaylanma telafisinde kullanılan yöntemler.

Yöntem	Açıklama	Referans
Aşırı Eğilme	Levha gerekli açının ötesinde bükülür. Elastik toparlanmadan sonra, gerekli boyutlar elde edilecektir	(Sarıkaya, 2008; Saravanan ve ark., 2017)
Coining	Bir tür kapalı kalıp dövme işlemidir. Bu işlem daha pürüzsüz yüzeyler ve daha yakın toleranslar sağlar	

2.3.2. Geri yaylanma davranışını etkileyen parametreler

Geri yaylanma, metal levhanın büküldükten sonra istenmeyen bir şekilde orijinal formuna dönme eğilimidir. İstenmeyen sonuçlar yaratabilir ve ürünün özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir. Sac bükme işleminde geri yaylanma davranışını etkileyen birçok parametre vardır.

2.3.2.1. Akma dayanımı

Bir malzemenin plastik deformasyona geçtiği noktayı temsil eden ve geri yaylanma davranışını önemli ölçüde etkileyen bir özelliktir. Malzemenin akma dayanımı, belirli bir gerilme seviyesini aştığında malzemenin plastik deformasyona uğradığı ve geri dönme yeteneğini kaybettiği gerilme seviyesini ifade eder. Bu nokta, malzeme üzerine uygulanan yükün elastik sınırları aşıldığında meydana gelir. Yani malzeme, bu noktadan sonrasında şekil değiştirirken geri dönme eğilimi göstermez ve kalıcı deformasyonlar oluşabilir. Araştırmalar, malzemenin akma dayanımının arttıkça geri yaylanma miktarının da arttığını göstermektedir. Yani daha yüksek akma dayanımına sahip bir malzeme, daha fazla geri yaylanma eğilimine sahip olabilir. Bu nedenle, bükme işlemleri için malzeme seçerken, işlem sırasında oluşacak geri yaylanmayı kontrol etmek için malzemenin akma dayanımını dikkate almak önemlidir (Forcellese ve ark., 1998).

2.3.2.2. Anizotropi

Anizotropi, malzemenin mekanik özelliklerinin farklı yönlere göre değişkenlik gösterdiği bir özelliktir. Bu, malzemenin homojen olmadığını ve belirli yönlere karşı farklı davrandığını gösterir. Hadde yönü, malzemenin içindeki süreksizlikler, kristal yapısı gibi birçok faktör, malzemenin anizotropisini etkileyebilir. Anizotropi, bükme işlemlerinde geri yaylanmayı etkileyen önemli bir faktördür. Araştırmalar, malzemenin anizotropisinin arttıkça geri yaylanmanın da arttığını göstermektedir. Bu, anizotropik bir malzemenin, deformasyon direncinin anizotropinin artmasıyla arttığını ve bu nedenle geri yaylanma eğiliminin arttığını gösterir. Malzemenin hadde yönü de anizotropiyi etkileyen bir faktördür. İşlem esnasında malzeme, hadde yönüne dik olmalıdır. Hadde yönüne dik işlem görmeyen bir malzeme, anizotropisi nedeniyle geri yaylanma eğilimi gösterebilir. Bu nedenle, malzeme seçimi ve işlem tasarımı sırasında malzemenin anizotropisi ve hadde yönü dikkate alınmalıdır. İşlem sırasında doğru hadde yönü seçilmeli ve malzemenin anizotropik özellikleri göz önünde bulundurularak geri yaylanma miktarı kontrol edilmelidir. Bu, istenmeyen sonuçların önlenmesine ve ürün kalitesinin artırılmasına yardımcı olabilir (Mkaddem ve Saidane, 2007).

2.3.2.3. Baskı plakası kuvveti

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde geri yaylanmayı etkileyen önemli bir faktördür. Bu kuvvet, özellikle kenar bükme ve kenet bükme yönteminde kullanıp malzemeyi

sabit tutmaya yardımcı olur. Baskı plakasının malzemeye uyguladığı kuvvet, geri yaylanma miktarını etkiler. Yapılan literatür çalışmaları, baskı plakası kuvvetinin geri yaylanma üzerindeki etkisini incelemiş ve göstermiştir ki baskı plakasının kuvveti arttıkça geri yaylanma azalır. Bu, baskı plakasının malzemeye uyguladığı büyük gerilmeler nedeniyle plastik deformasyonun arttığını gösterir. Plastik deformasyonun artması, malzemenin geri yaylanma eğilimini azaltır. Buna karşılık azalan baskı plakası kuvveti, geri yaylanmayı azaltır. Daha düşük bir baskı plakası kuvveti, malzeme üzerinde daha az gerilme ve plastik deformasyon anlamına gelir, bu da geri yaylanmanın azalmasına katkı sağlar. İşlem tasarımı sırasında uygun baskı plakası kuvveti seçilerek geri yaylanma miktarı kontrol edilebilir ve istenmeyen sonuçların önlenmesine yardımcı olabilir (Burchitz, 2005).

2.3.2.4. Bauschinger etkisi

Metal malzemelere belli bir yönde uygulanan kuvvetin, malzeme içindeki dislokasyonları artırarak malzemenin sertleşmesine neden olan bir fenomeni ifade eder. Bu etki nedeniyle, malzeme ilk kez bir yönde deformasyona uğratıldığında, aynı yönde daha fazla kuvvet uygulamak gerekebilir. Ancak malzemeye ters yönde bir kuvvet uygulandığında, dislokasyonların ters yönde daha kolay hareket etmesi nedeniyle, daha düşük bir kuvvetle malzeme ters yönde deforme edilebilir. Bauschinger etkisi, malzemenin mekanik özelliklerini değiştirir, bu da geri yaylanma üzerinde etkili olabilir. Malzemenin akma ve çekme değerleri bu etki nedeniyle değişebilir. Bu nedenle, geri yaylanma analizi veya hesaplamaları yaparken Bauschinger etkisini dikkate almak önemlidir. Bauschinger etkisi, metal işleme ve şekillendirme süreçlerinde de önemli bir rol oynar. Malzeme işleme süreçleri sırasında bu etkiyi kontrol etmek veya dikkate almak, işlenen malzemenin son özelliklerini belirlemeye yardımcı olabilir (Chintankumar, 2018).

2.3.2.5. Bükme radyusu

Bükme yarıçapı, malzemenin bükülebilirliğini belirler ve aynı zamanda malzemenin bu işlem sırasında kırılma riskini de etkiler. Küçük bir bükme yarıçapı, malzemenin elastik deformasyona uğrayacağı anlamına gelir ve bu nedenle bükme işlemi gerçekleşmez. Bu nedenle, bükme işlemleri genellikle büyük bükme yarıçaplarında gerçekleştirilir. Bu tür araştırmalarda gözlemlenen bir diğer önemli sonuç, bükme yarıçapının arttıkça geri yaylanmanın arttığıdır. Bu, malzemenin elastik sınırlarının ötesine geçmeden deformasyona uğradığını gösterir. Ayrıca bükme yarıçapının bükme

kuvvetine olan etkisi de önemlidir. Bazı çalışmalar, artan bükme yarıçapının, gerekli olan bükme kuvvetini azalttığını göstermektedir. Bu, işlemin daha az enerji gerektirdiği ve malzeme üzerinde daha az stres yarattığı anlamına gelebilir. Bu nedenle, bükme işlemi tasarlanırken uygun bir bükme yarıçapının seçilmesi önemlidir (Racz ve ark., 2010).

2.3.2.6. Elastiklik modülü

Elastiklik modülü, malzemenin şekillendirme işlemi sırasındaki davranışını anlamak ve geri yaylanmayı tahmin etmek için önemli bir parametredir. Genellikle bu modül, hesaplamalarda sabit bir değer olarak kullanılır. Ancak yapılan araştırmalar, elastiklik modülünün deformasyon arttıkça azaldığını göstermektedir. Bu nedenle geri yaylanmanın daha doğru tahmini için önemlidir. Literatürde, değişken bir elastiklik modülünün göz önünde bulundurulduğu simülasyonların sabit elastiklik modülü kullanılan simülasyonlara göre %10 daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak elastiklik modülünün deformasyona bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Bu, işlemin daha hassas bir şekilde tasarlanmasına ve malzeme davranışının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olabilir (Yu, 2009).

2.3.2.7. Kalınlık

Kalınlık, bükme işleminin önemli bir parametresidir ve geri yaylanmayı etkileyebilir. Bu etki genellikle R/t oranı olarak ifade edilen bükme radyusu ile kalınlık oranı ile değerlendirilir. R/t oranının azalması, yani bükme radyusunun kalınlığa göre daha küçük olması, geri yaylanmayı azaltma eğilimindedir. Bu, daha büyük bir bükme radyusu kullanıldığında daha az geri yaylanma olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, bükme işlemi sırasında malzemenin kalınlığının azalması, yani R/t oranının artması, geri yaylanmayı artırabilir. Yani, diğer tüm koşullar sabitken, malzeme kalınlığının azalması geri yaylanmayı artırma eğilimindedir. Bu nedenle, bükme işleminde kalınlık ve bükme radyusu arasındaki ilişki dikkate alınmalıdır. Malzeme şekillendirme işlemi tasarlanırken bu parametrelerin dikkatlice değerlendirilmesi ve uygun bir denge bulunması önemlidir (Livatyalı ve Altan, 2001).

2.3.2.8. Kalıp açıklığı

Kalıp açıklığı, bükme işlemi sırasında malzeme ile zımba arasında kalan boşluğu ifade eder. Kalıp açıklığının, malzeme kalınlığına oranının geri yaylanma üzerinde doğrusal bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Çoğu zaman, kalıp açıklığının artması, yani

malzeme ile zımba arasındaki boşluğun büyümesi, geri yaylanmayı artırır. Bu, daha fazla plastik deformasyona yol açar ve malzemenin geri yaylanmasını azaltır. Yani kalıp açıklığı arttıkça malzeme daha fazla plastik deformasyona uğrar ve bu, geri yaylanmanın azalmasına neden olur. Tam tersi durumda, yani kalıp açıklığının azaltılması, malzemenin plastik deformasyonunu artırıcı bir etkiye sahiptir. Daha yüksek plastik deformasyona maruz kalan malzeme, geri yaylanmanın miktarını azaltma eğilimindedir. Bu nedenle, bükme işleminde kalıp açıklığının dikkatlice kontrol edilmesi ve ayarlanması gerekebilir. Malzeme ve bükme işlemi için uygun bir denge bulmak, istenmeyen geri yaylanmayı en aza indirmeye yardımcı olabilir (Chikalthankar ve ark., 2014).

2.3.2.9. Pekleşme üsteli

Pekleşme üsteli, malzemenin plastik deformasyona uğradığında ortaya çıkan bir özelliktir. Plastik deformasyon sırasında malzeme tanecik yapısının hareket etmesi ve yeni tanecik yapıların oluşması nedeniyle pekleşme meydana gelir. Bu pekleşme, malzemenin daha yüksek düzeyde plastik deformasyona uğraması için daha yüksek gerilme ihtiyacına yol açar. Pekleşme üsteli, genellikle Hollomon denklemi kullanılarak ifade edilir ve malzemenin özgün özelliklerine bağlı olarak farklı değerler alabilir (2.1). Bu n değeri, malzemenin pekleşme davranışını belirler. Yüksek bir pekleşme üsteli (yüksek n değeri), malzemenin daha fazla pekleşme eğiliminde olduğu anlamına gelir. Araştırmalar, pekleşme üstelinin arttıkça geri yaylanmanın da arttığını göstermektedir. Yani malzemenin pekleşme üsteli yüksekse, geri yaylanmanın miktarı da artma eğilimindedir. Bu nedenle geri yaylanma analizlerinde malzemenin pekleşme üsteli dikkate alınmalı ve uygun şekilde hesaplamalara dahil edilmelidir (Patel ve ark., 2013).

2.3.2.10. Pres hızı

Pres hızı, bükme işlemi sırasında zımbanın malzemeye temas ettiği ve istenilen noktaya indiği hızı ifade eder. Araştırmalar, bükme işlemi sırasında pres hızının genellikle normal koşullar altında geri yaylanma üzerinde pek etkili olmadığını göstermektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda etki daha yüksektir. Bu durumda bile pres hızının geri yaylanma üzerindeki etkisi oldukça düşüktür ve genellikle %1 civarında bir etkiye sahiptir (Kim ve Koç, 2008).

2.3.2.11. Sıcaklık

Metal şekillendirme işlemleri genellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir çünkü yüksek sıcaklıkta malzeme daha kolay şekillendirilebilir. Sıcaklık arttıkça malzemenin mukavemeti azalır, böylece kolay şekillendirme sağlanır. Sıcaklığın geri yaylanma üzerindeki etkisi üzerine yapılan araştırmalar, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bükme işlemlerinin oda sıcaklığında gerçekleştirilen işlemlere göre geri yaylanmanın daha az olduğunu göstermektedir. Örneğin malzemenin oda sıcaklığında olduğu bir deneyde, sadece zimba veya kalıbın ısındığı durumlarda bile geri yaylanmanın en az %20 azaldığı görülmüştür (Moon ve ark., 2003).

2.3.2.12. Sürtünme

Sürtünme kuvvetleri, bükme işlemi sırasında geri yaylanmayı etkileyen bir değişken olabilir. Bükme işlemi sırasında, zimba malzemeye temas ettiğinde ve malzeme kalıba akarken sürtünme kuvvetleri ortaya çıkar. Ancak bu sürtünme kuvvetlerinin geri yaylanma üzerindeki etkisi üzerine yapılan araştırmaların sonuçları çelişkilidir. Bazı deneyler, sürtünme katsayısının artmasının geri yaylanmayı arttırdığını göstermiştir. Yani sürtünme kuvvetinin artması, malzeme ile kalıp veya zimba arasındaki sürtünmeyi artırarak geri yaylanmayı artırabilir. Ancak diğer deneylerde, artan sürtünme katsayısının geri yaylanmayı azaltıcı bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu, sürtünme kuvvetinin artmasıyla malzemenin daha fazla plastik deformasyona uğraması sonucu geri yaylanmanın azalmasına bağlanmıştır (Srinivasan ve ark., 2013).

2.3.2.13. Şekillendirme hızı

Geri yaylanma üzerinde, şekillendirme hızının anlamlı etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla malzemenin farklı hızlarda şekillendirilmesi, geri yaylanma miktarı üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmamaktadır. Bu nedenle, geri yaylanma ile mücadele etmek isteniyorsa, şekillendirme sıcaklığı ve diğer önemli parametreler üzerine odaklanmak daha etkili olabilir. Şekillendirme işlemlerinde kullanılan malzemenin sıcaklığı ve diğer koşulları dikkatlice kontrol etmek, geri yaylanmayı minimize etmek için daha etkili bir strateji olabilir (Kim ve Koç, 2008).

2.3.2.14. Tane boyutu

Tane boyutunun malzemenin geri yaylanma davranışı üzerindeki etkisi malzeme türü ve özelliklerine bağlıdır. Farklı malzemelerde tane boyutunun artmasının geri yaylanmayı azaltıcı veya artırıcı etkisi olabilir. Örneğin, pirinç sac malzemesinde tane

boyutunun artması geri yaylanmayı azaltıyorsa, demir malzemesinde bu etki tam tersi olabilir. Bu nedenle, malzeme türünü ve özelliklerini dikkate alarak, tane boyutunun geri yaylanma üzerindeki etkisini anlamak önemlidir. Malzeme özellikleri, tane boyutu ve diğer parametrelerin birlikte değerlendirilmesi gerekebilir (Gautam ve ark., 2016).

2.3.2.15. Ütüleme süresi

Bükme işlemi esnasında, malzeme üzerindeki zımbanın belirli bir süre boyunca parça üzerinde kalması ütüleme süresi olarak adlandırılır. Ütüleme süresi, önemli bir faktördür. Yapılan araştırmalara göre, uzun ütüleme süresi geri yaylanmayı azaltır. Ütüleme süresinin geri yaylanmayı azaltma etkisi, sürtünme deformasyonunun artmasına ve parçadaki iç gerilimlerin azalmasına dayanmaktadır. Bu süreçte, malzeme üzerindeki sürtünme deformasyonu artar ve iç gerilimler azalır. Bu nedenle malzeme, elastik geri kazanımını kaybeder ve geri yaylanma miktarı azalır. Ancak ütüleme süresinin artması bazı sorunlara yol açabilir. Özellikle üretim süresinin uzunluğu, işçilik maliyetlerini ve enerji tüketimini artırabilir. Ayrıca parçanın üretim hızını etkileyebilir ve üretim maliyetlerini artırabilir (Karaağaç ve Uluer, 2017).

Tablo 2.6. Geri yaylanma davranışını etkileyen faktörler.

Faktör	Etki	GYD'na Etki	Referans
Sac kalınlığı	Yüksek	Sac kalınlığındaki artış geri yaylanma etkisinin azalmasına neden olur	(Abdullah ve ark., 2012; Adnan ve ark., 2016; Liu ve ark., 2017)
Bükülme açısı	Yüksek	Bükülme açısındaki artış daha yüksek geri yaylanma etkisine neden olur	(Adnan ve ark., 2016; Adnan ve ark., 2022)
Elastik modül	Orta	Daha yüksek elastik modül daha az geri yaylanma etkisi sağlar.	(Mori ve ark., 2007)
Gerilme sertleşmesi	Orta	Gerinin sertleşmesindeki artış minimum eğilme yarıçapında azalmaya neden olur. Bu nedenle, gerilme sertleşmesi arttıkça geri yaylanma etkisi azalır.	(Adnan ve ark., 2016; Adnan ve ark., 2022)
Bükülme yarıçapı / Kalıp yarıçapı	Orta	Bükülme yarıçapını belirlemek için kalıp ve zımba yarıçapı dikkate alınır. Bu nedenle, kalıp ve zımba yarıçapı arttıkça geri yaylanma etkisi daha yüksektir.	(Raju ve ark., 2010)
Sürtünme katsayısı	Düşük	Sürtünme katsayısındaki artış geri yaylanma açısından hafif bir artışa neden olur.	(Moon ve ark., 2003; Li ve ark., 2012)

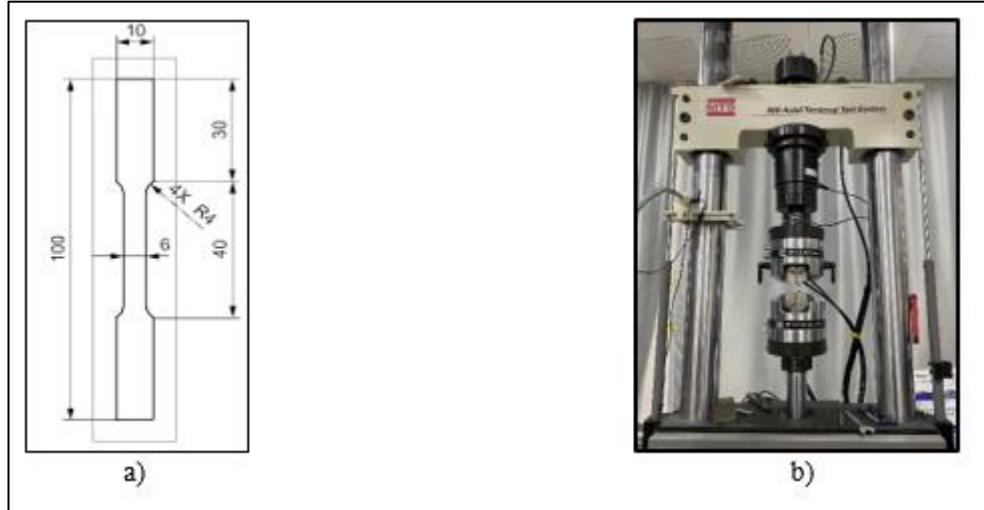
3. YÖNTEM

3.1. Deney Numuneleri

Alüminyum hafif ve yüksek dayanım nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum levhalarda en yaygın kullanılan üretim yöntemlerinden biri bükmedir. Bu çalışmada alüminyum 1050 serisi kullanılmıştır.

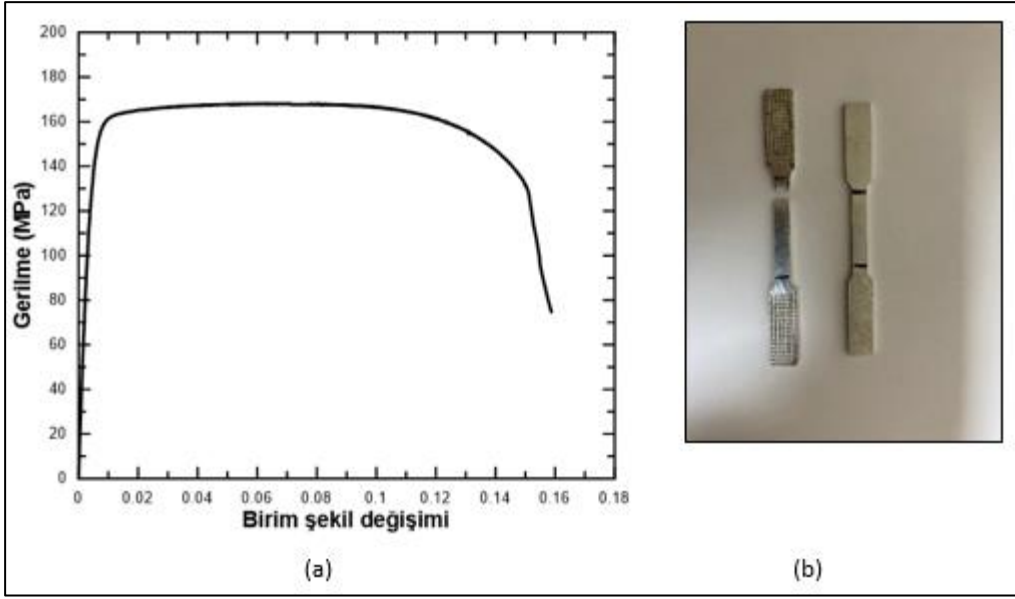
3.1.1. Çekme testi

Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 100x100 mm ölçüsündeki plakalardan lazer kesimde ASTM E8 standardına uygun olarak çekme deney numuneleri çıkartılmıştır. Yapılan testte akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma noktası belirlenmiştir. Çekme deneyi MTS marka 10 kN çekme kapasitesine sahip deney düzeneğinde 2mm/dk'lık sabit hızla gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde kullanılan numunenin teknik resmi ve çekme deney düzeneği Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. a) Çekme testi için numune ölçüleri b) Deney düzeneği.

Çekme deneyi sonucu elde edilen Gerilme-Birim Şekil Değişimi eğrisi, deney öncesi ve sonrası numuneler Şekil 3.2'de verilmiştir. Çekme eğrisinden elde edilen mekanik özellikler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. a) 1050 serisi alüminyum malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, b) Çekme testi öncesi ve sonrası numune görünümü.

Tablo 3.1. 1050 serisi alüminyum malzemesinin mekanik özellikleri.

	Yoğunluk g/cm ³	Young modülü, Gpa	Max çekme gerilmesi, MPa	Akma gerilmesi, MPa
1050 alüminyum serisi	2.7	69	168	150

3.1.2. Kimyasal analiz testi

Deneyde kullanılan alüminyum malzemenin Foundry master HITACHI marka spektrometre cihazıyla kimyasal bileşimi belirlenmiştir. Kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deneyde kullanılan alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi.

Elements	Al	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
%	99.41	0.081	0.384	0.0139	0.0036	0.0060	0.0117	0.0075	0.0148

3.1.3. Sertlik testi

1050 serisi alüminyum plakaların yüzeyi zımparalanarak test için hazır hale getirilmiştir. Yapılan testler sonucunda numunelerin sertlik değeri 36 Brinell olarak ölçülmüştür.

3.1.4. Numune ölçüm kontrolü

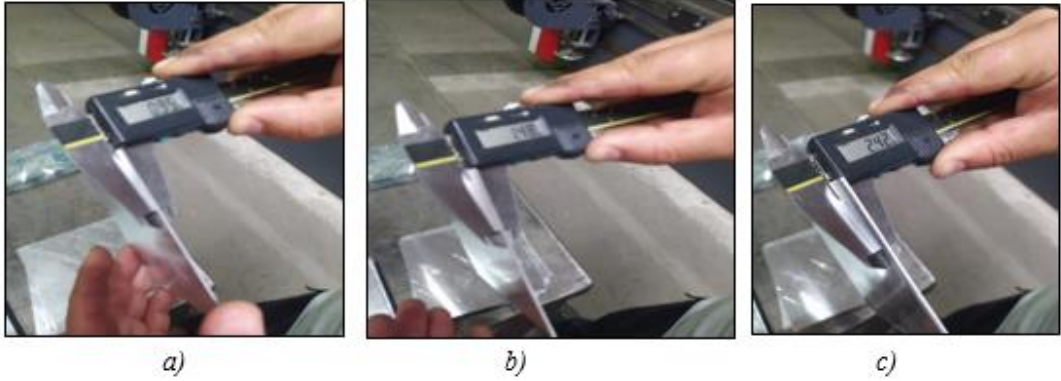
Numune kalınlıkları 1 mm, 1,5 mm ve 2,5 mm olarak seçilmiş olup dijital kumpasla ölçüm kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan numuneler.



Şekil 3.4. Kesimde kullanılan giyotin makinesi.



Şekil 3.5. a) 1 mm kalınlığındaki alüminyum numune b) 1,5 mm kalınlığındaki alüminyum numune c) 2,5 mm kalınlığındaki alüminyum numune.

3.1.5. Method

Mekanik şekillendirme yöntemi farklı parçalar oluşturmak için sacların imalatında kullanılan imalat yöntemlerinden biridir. Sac bükme işlemi geometri üzerinde deforme yaratarak şekil verme işlemidir. Bükme prosesini etkileyen faktörlerden bazıları sac kalınlığı, bükme yarıçapı, bükme açısı, ve metal bükme işi yer alır. Proses parametrelerinin V-kalıp bükme işlemi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Malzeme cinsi, kalınlığı ve proses parametreleri, geri yaylanma

değerini etkilemekte olup tahmini zorlaştırmaktadır. Malzemenin sac kalınlığı değiştirilerek, farklı kuvvetlerde ve farklı kalıp açıları parametrelerinde geri yaylanma davranışı incelenmiştir. Proses değişkenlerinin, boşaltma sonrasında bükülme açılarının geri yaylanma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 1 mm, 1.5 mm, 2.5 mm kalınlığındaki alüminyum numunelerin her birinden 9 adet numune üzerinde şekillendirme yapılmıştır. Her numuneden 1 adeti geri yaylanma davranışını minimize ederek presteki kalıbın referanslamasında kullanılmıştır. Belirlenen kalınlıklara göre farklı kalıp açılarında 90°, 135° ve 150° olacak şekilde geri yaylanma açıları ölçülmüştür. V bükme deneyinde belirlenen parametreler ve koşullar Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Deney koşulları.

V bükme parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Sac kalınlığı (mm)	1	1.5	2.5
Kalıp açısı (°)	90	135	150
Zimba radyüsü (mm)	0.8	0.8	0.8

Alüminyum numuneler 100x100 mm olacak şekilde giyotin makinesinde kesilmiştir. Kesme işlemi yapıldıktan sonra numunelerin etrafındaki çapaklar eğe yardımıyla temizlenmiştir. Alüminyum 1050 serisi plakalar, DENER marka 135 ton kapasitesindeki bir preste gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). V bükme kalıbında kullanılacak gerekli kuvvetler, numune kalınlığı ve kalıp açısı değerleri HMI paneline girildiğinde otomatik olarak pres tezgahı tarafından hesaplanmıştır. 3091 V20 yatak tipi kullanılarak numune kalıp yüzeyine teğet hale gelene kadar zimbada oluşan kuvvet belirlenen hızda erken şekillendirme aşamasında ilerler. Deforme olmuş şekil kalıbın yanları ile maksimum ölçüde temas edene kadar zimba tarafından bastırılmasıyla sonuçlanır. Bükme sonucunda, bükme açısı kalıp açısına yaklaşmaya çalışır. Proses işlemi gerçekleştikten sonra zimba yukarı çekilir. Gerilimler dengeye ulaştıktan sonra alüminyum plaka eski haline dönmeye çalışır.



Şekil 3.6. Deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği pres makinesi.

Kalıp makinesindeki tonaj, Şekil 3.7’de belirtilen tablodan yararlanarak yatak tipi ve sac kalınlığına göre belirlenmiştir. V bükme kalıp kuvveti için her araştırmacı farklı denklem önermiştir. Bu denklemler ne kadar farklı olursa olsun sonuçlarda büyük fark yoktur. Şekillendirme prosesi için gerekli bükme kuvveti F_b (N) kalıp genişliğine bağlıdır. Kalıp boyu l (mm) ve sac metal kalınlığı arasındaki bağlantı t (mm) arasındaki formülasyon aşağıdaki gibidir.

$$l=6 \cdot t \quad (3.1)$$

$w/t \geq 10$ oranına göre F_b zımba kuvveti Eş 3.2 ile hesaplanmaktadır. Formülde σ_m (N/mm²) çekme kuvvetini ve b_s (mm) sac malzeme genişliğini ifade eder.

$$F_b = (b_s \cdot t^2 \cdot \sigma_m) / w \quad (3.2)$$

$w/t \geq 10$ oranına göre F_b zımba kuvveti Eş 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$F_b = (1 + (4 \cdot t) / w) / ((b_s \cdot t^2 \cdot \sigma_m) / w) \quad (3.3)$$



Şekil 3.7. Büküm Kapasite Tablosu.

3.2. Deneyin Yapılışı ve Ölçümler

Alüminyum malzemelerde kalınlığın ve proses parametrelerinin geri yaylanma üzerindeki etkisinin tahmini zor olduğundan dolayı ve bu parametrelerin malzeme üzerindeki davranışını incelemek amacıyla v-bükme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 100x100 mm boyutlarındaki alüminyum plakaların kalınlık, malzeme cinsi ve bükülme açısı özellikleri Şekil 3.8’de gösterilen HMI paneline tanıtılmıştır. Deneyler her kalınlık için 90°, 135° ve 150° kalıp açılarında bükmeyi içermektedir. Küçük boyutta plakaların seçilmesinin nedeni geri yaylanma derecesinin belirlenmesinin dar yüzeylerde daha doğru olduğunun düşünülmesidir. Deneyde yapılan testler sabit hızda gerçekleştirilmiştir. HMI paneline malzeme cinsi, malzeme kalınlığı, deneyde kullanılacak kalıp açısı değeri girilmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak kuvvet hesaplanmıştır. Yükleme işlemi olarak adlandırılan ilk kısımda Şekil 3.10’da belirtilen zımba aşağı doğru ilerlemiştir. Boşaltma işlemi olarak adlandırılan ikinci aşamada zımba yukarı doğru hareket etmiştir. Zımba en son noktaya ulaşır ulaşmaz yük kaldırılmış olup plaka üzerinde hiç durmamıştır.



Şekil 3.8. Değer girilen HMI paneli.

Bükme işlemi tamamlandıktan sonra alüminyum plakalardaki geri yaylanma açısının belirtilen kalıp açısından ne kadar saptığı tespit edilmiştir. Bu sapma miktarı malzemedeki geri yaylanma davranışını ifade etmektedir. Numulardaki bükülme açısının ölçülmesi, Şekil 3.9’da belirtilen dijital açı ölçer yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Deneyde kullanılan dijital açı ölçer.



Şekil 3.10. Deneyde kullanılan zımba.

Kalınlığa göre ilk numune ölçümlerindeki kalıp açısı, belirlenen kalıp açılarından çok farklı değerde çıkmıştır. Bunun sebebi tezgahın referans ayarının yapılmamasıdır. Bunu önlemek için Şekil 3.8’de gösterilen düz α_1 ve α_2 kısmına ölçülen sapma değeri kadar açı değeri girildiğinde sorun giderilmiş olur. 1 mm, 1.5 mm, 2.5 mm kalınlıktaki ilk numunelerde ölçüm yapılırken tezgah referansı göz önünde bulundurulmuştur. Her kalınlıktaki ilk numunelerde panele sapma değeri girilerek referanslama yapılmıştır.

Tablo 3.4. Deneyde kullanılan proses parametreleri.

Girdi parametreleri	➔	Çıkış parametreleri
<ul style="list-style-type: none"> Malzeme cinsi (Alüminyum 1050 serisi) Malzeme kalınlığı Kalıp açısı 	DeneySEL Çalışma	<ul style="list-style-type: none"> Baskı kuvveti Geri yaylanma açısı

3.3. Deney Sonuçları ve Tartışma

Malzeme cinsi, malzeme kalınlığı ve kalıp açısı parametreleri ele alınarak bükme deneyleri yapılmıştır. Her bir deney 3'er kez tekrarlanmış 9 kombinasyon içim toplam 27 deney yapılmıştır. Deneylerden elde edilen geri yaylanma sonuçları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Deneylerden elde edilen geri yaylanma açı sonuçları.

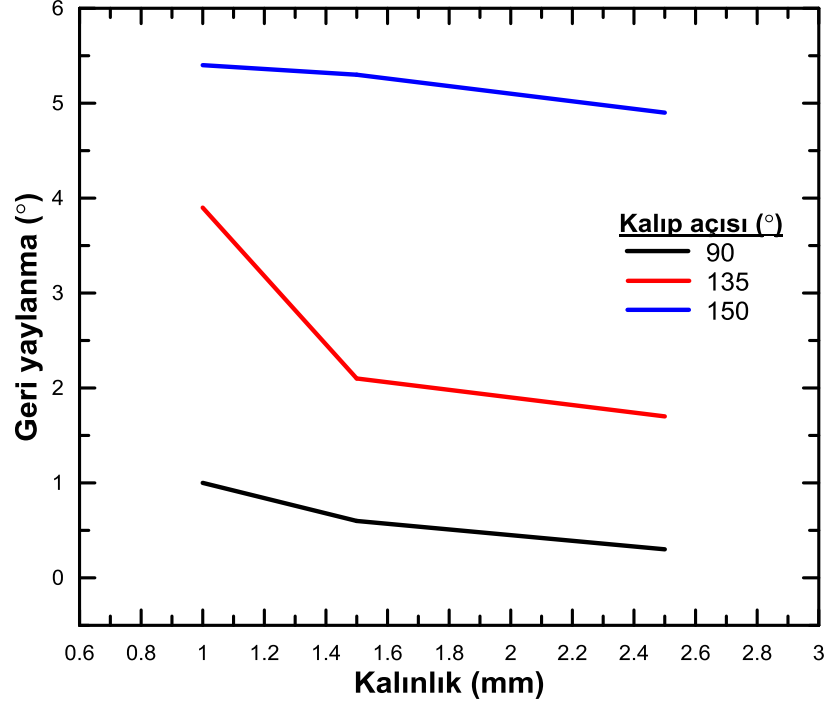
Deney No	Kalıp açısı (°)	Kalınlık (mm)	Geri yaylanma (°)
1		1.0	1
2	90	1.5	0.6
3		2.5	0.3
4		1.0	3.9
5	135	1.5	2.1
6		2.5	1.7
7		1.0	5.4
8	150	1.5	5.3
9		2.5	4.9

90° kalıp açısında, 1 mm kalınlığındaki alüminyum plaka ölçümleri incelendiğinde 1. numunede geri yaylanma açısı 1,0° olarak bulunmuştur. Kalınlığı 1,5 mm olan plakada ölçümler ise 2. numunede 0.60° olarak bulunarak % 60 azalma tespit edilmiştir. 2,5 mm kalınlığındaki numuneler ele alındığında 3. numunede, geri yaylanma ölçüsü 0.30° bulunarak % 50 azalmıştır. Aynı kalıp açısı kullanarak farklı kalınlıkta deney yapıldığında kalınlık arttıkça geri yaylanma açısının düştüğü gözlemlenmiştir (Umur, Y., 2016).

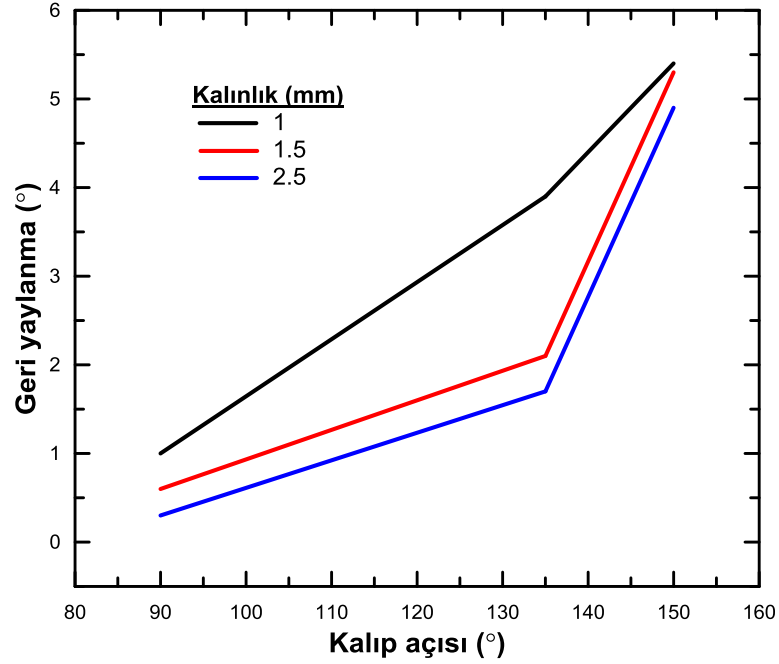
135° kalıp açısında, 1 mm kalınlığındaki alüminyum plaka ölçümleri incelendiğinde 4. numunede geri yaylanma açısı 3,95° olarak bulunmuştur. Kalınlığı 1.5 mm olan plakada ölçümler ise 5. numunede 2,1° olarak bulunarak % 46,1 azalma gerçekleşmiştir. 2,5 mm kalınlığındaki numuneler ele alındığında 6. numunede geri yaylanma derecesi 1,7° olarak ölçülerek % 19 azalma tespit edilmiştir. 90° kalıp açısındaki durumla aynı olarak kalınlığın artmasıyla geri yaylanma açılarında azalma olmuştur.

150° kalıp açısında, 1 mm kalınlığındaki alüminyum plaka ölçümleri incelendiğinde 7. numunede geri yaylanma açısı 5,4° olarak bulunmuştur. Kalınlığı 1,5 mm olan plakada ölçüm ise 8. numunede 5.3° ölçülerek % 1.85 azalma görülmektedir. 2,5 mm kalınlığındaki 9. numune ele alındığında geri yaylanma ölçüsü 4.9° olarak bulunarak % 7,54 azalma olmuştur. Kalıp açısı en yüksek değerde olduğu zaman 150° kalıp

açısında, geri yaylanma üzerindeki kalınlık etkisi diğer kalıp açılara göre daha azdır. Sonuç olarak herhangi bir kalıp açısında plaka kalınlığı arttığında geri yaylanma değerleri azalmaktadır. Bununla birlikte aynı kalınlıkta kalıp açısı arttıkça geri yaylanma değerlerinde artış olmaktadır (Uslu E. ,2014).



Şekil 3.11. Farklı kalınlıklara sahip plaka üzerindeki geri yaylanma davranışı.



Şekil 3.12. Farklı kalıp açılarında plaka üzerindeki geri yaylanma davranışı

3.4. Varyans (ANOVA) ve Regresyon Analizleri

Deneylemlerden elde edilen geri yaylanma sonuçları referans alınarak varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri Minitab 18 programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Varyans (ANOVA) analizi

Varyans analizi, bağımsız değişkenin veya değişkenlerin farklı değerlerinin bağımlı değişken üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılır. Tablo 3.6'da, ölçülen geri yaylanma değerlerine göre yapılan ANOVA sonuçları verilmiştir. Tablonun son sütununda parametrelerin katkı yüzdeleri verilmektedir.

ANOVA' da parametrelerin önemi, her bir parametrenin F oranı karşılaştırılarak belirlenir. Analizin korelasyon katsayısı (R^2) değeri 96,75'tür. Sac kalınlığının geri yaylanma değeri üzerinde etkisi % 5,79 olarak kalıp açısının geri yaylanma değeri üzerinde etkisi ise % 90,9 olarak tespit edilmiştir. Buna göre kalıp açısının geri yaylanma için belirleyici faktör olduğunu söyleyebiliriz. Tablo 3.6'da SD serbestlik derecesini, KT kareler toplamını, KO kareler ortalamasını ifade etmektedir.

Tablo 3.6. ANOVA sonuçları.

Kaynak	SD	KT	KO	F	P	Katkı %
Kalıp açısı (KA)	2	31,527	15,7633	55,96	0,001	90,9
Kalınlık (t)	2	2,007	1,0033	3,56	0,129	5,79
Hata	4	1,127	0,2817			3,31
Toplam	8	34,660				100,00

3.4.2. Regresyon analizi

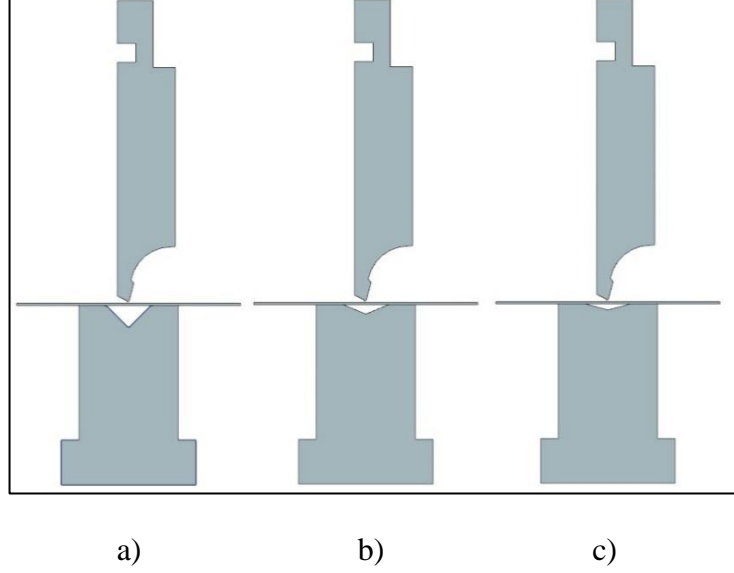
Regresyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan analiz yöntemidir. Bu çalışmada bağımlı değişken geri yaylanma, bağımsız değişkenler ise kalıp açısı (KA) ve parça kalınlığı (t)'dir. Denklem (3.4)'de verilen geri yaylanma için tahmin denklemi regresyon analizi ile elde edilmiştir. Geri yaylanma değeri için lineer regresyon modeli ile elde edilen denklemin korelasyon katsayısı (R^2) % 84,06 olarak bulunmuştur.

Regresyon denklemi:

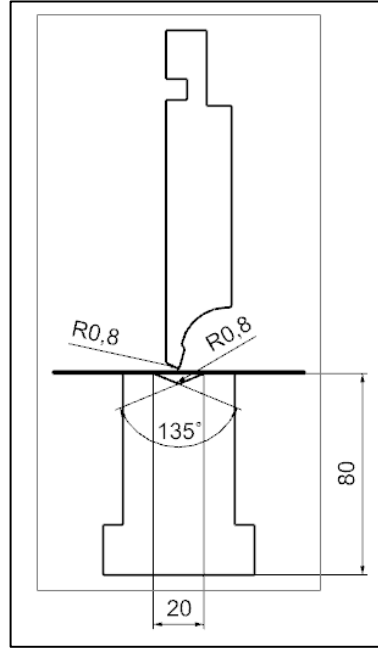
$$GY = -4,59 + 0,0685 KA - 0,7 t \quad (3.4)$$

3.5. Sonlu Elemanlar Analizleri

Deneysel çalışmada kullanılan V yatak ve zımbann modeli Siemens Nx 12.0 yazılımında tasarlanmıştır. 90°, 135° ve 150° derece büküm açlarına göre V yatak modeli ve zımba teknik çizimine göre model oluşturulmuştur.



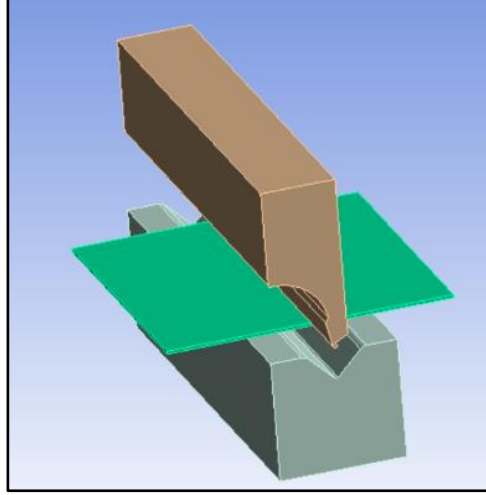
Şekil 3.13. Nx programından alınan V yatak tasarımı ve zımba a) 90° b)135° c)150°.



Şekil 3.14. V yatak ve zımba uç yarıçap ölçüleri.

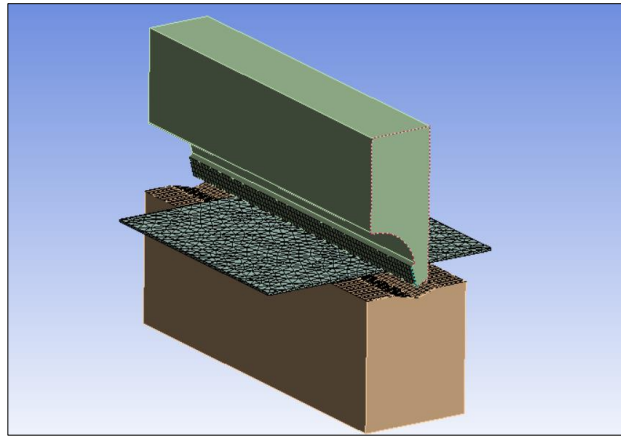
Geri yaylanma davranışını incelemek amacıyla oluşturulan modeller ANSYS workbench 2022 R1 programına aktarılmıştır. Malzeme üzerindeki geri yaylanma davranışını incelemek amacıyla 3 farklı kalınlık ve farklı kalıp açıları kullanılmıştır.

Static Structural analiz tipi kullanılarak oluşturulan geometri programa import edilmiştir. Enginnering Data kısmından kullanılan alüminyum malzemenin özellikleri girilmiştir. Tasarımı yapılan V yatak ve zımba, rigid yapı olarak seçilmiş olup büküm işlemi yapılan alüminyum levha flexible yapı olarak seçilmiştir. Sonlu eleman analiz modeli Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Sonlu eleman analiz modeli.

Analizi yapılan sistemde zımba ve V yatak, alüminyum plakayla etkileşim halinde olduğundan dolayı kontakt tipi sürtünmeli olarak seçilmiş olup 0,3 olarak girilmiştir. Analiz büyük deformasyon içerdiğinden dolayı doğrusal olmayan geometri özelliği açık tutulmuştur. Analiz sonucundaki deformasyon değerlerini hassas şekilde etmek amacıyla eleman boyutu 2 mm olarak alınmıştır. Alüminyum levha üzerindeki elemanların örülürken karmaşık durumu engellemek ve eleman ağının düzgün oluşturulması için tetrahedron eleman kullanılmıştır. Mesh yapılmış sonlu eleman analiz modeli Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Mesh yapılmış sonlu eleman analiz modeli.

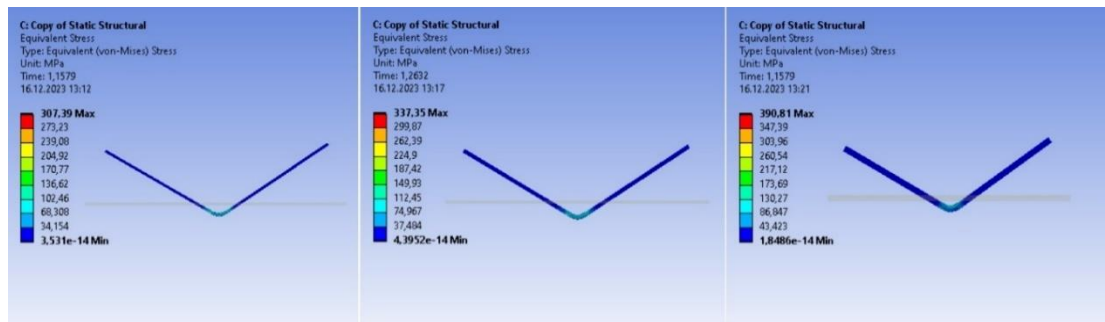
Sonlu eleman analizlerinde farklı sac kalınlığı ve farklı kalıp açılarındaki modeller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla her bir modeldeki eleman ve düğüm sayısı değişmektedir. Analizlerde 6254 ile 10707 arasında düğüm sayısı değişirken, element sayısı ise 16308 ile 32984 arasında değişmektedir.

3.5.1. Mesh hassasiyet analizi

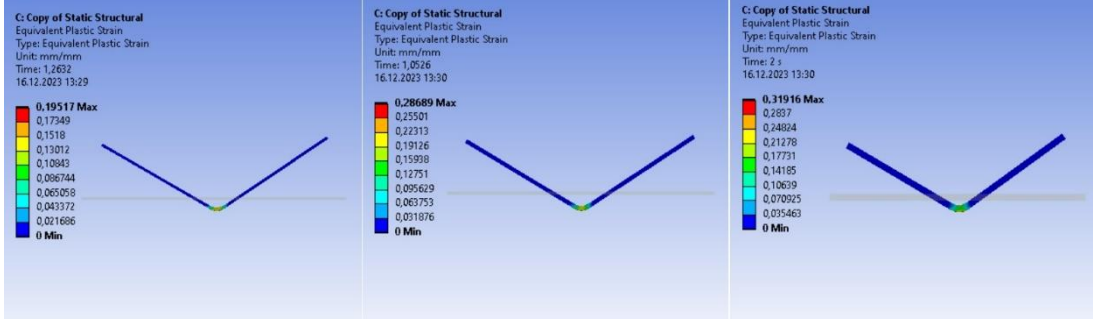
Çalışma doğruluğunu hedeflemek amacıyla eleman sayısı, plaka kalınlığı ve kontak yüzeyleri ele alınarak geri yaylanma açısı üzerindeki hassasiyeti incelenmiştir. Eleman sayısının artmasıyla birlikte alüminyum plaka üzerindeki geri yaylanma miktarı belli eleman sayısından sonra aynı kalacaktır. Bununla birlikte eleman sayısının gereksiz fazla olması hem analiz süresinin artmasına hem de plaka üzerindeki gerilmelerin hatalı çıkmasına sebebiyet verecektir. 150° kalıp açısında 1 mm kalınlıktaki plaka analiz edilerek eleman hassasiyeti yapılmıştır. Eleman hassasiyeti sonucunda optimum eleman boyutu 2 mm belirlenmiş olup tüm analizlerde aynı eleman boyutu kullanılmıştır.

3.5.2. Sonlu elemanlar analiz sonuçları

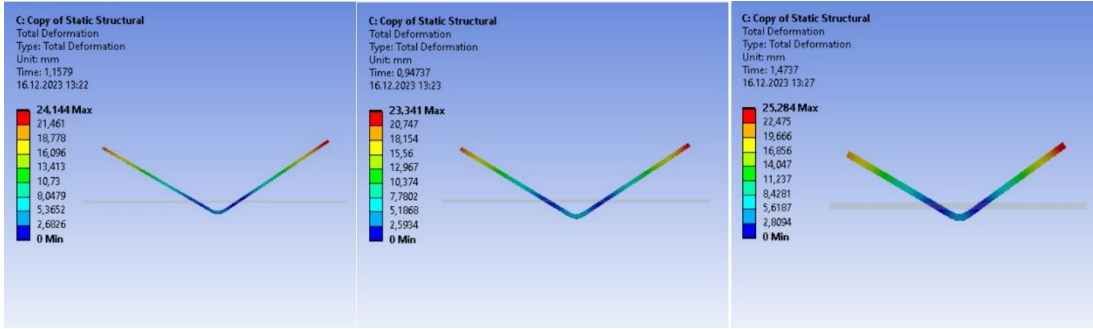
Bu analizde 1050 alüminyum serisinin V bükme koşullarındaki geri yaylanma davranışı incelenmiştir. 1 mm, 1,5 mm ve 2,5 mm kalınlıktaki plakalara 90°, 135° ve 150° kalıp açılarında v-bükme işlemi uygulanmıştır. Belirtilen kalınlıklar için her bir kalıp açısında bükülme yapılmış olup toplamda 9 adet nihai analiz ele alınmıştır. Analizi yapılan plakalar için toplam deformasyon, von mises gerilme ve birim şekil değişimleri Şekil 3.17-3.25 arası verilmiştir.



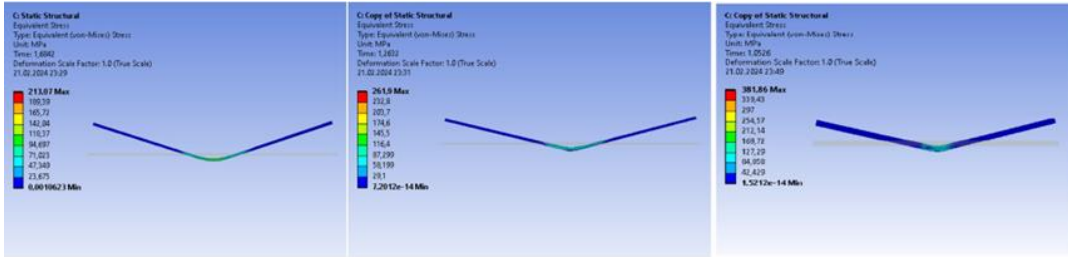
Şekil 3.17. 90° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises gerilme dağılımı



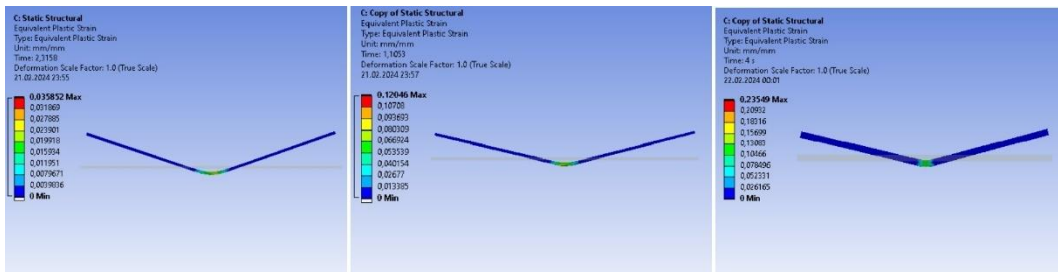
Şekil 3.18. 90° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için plastik gerinme



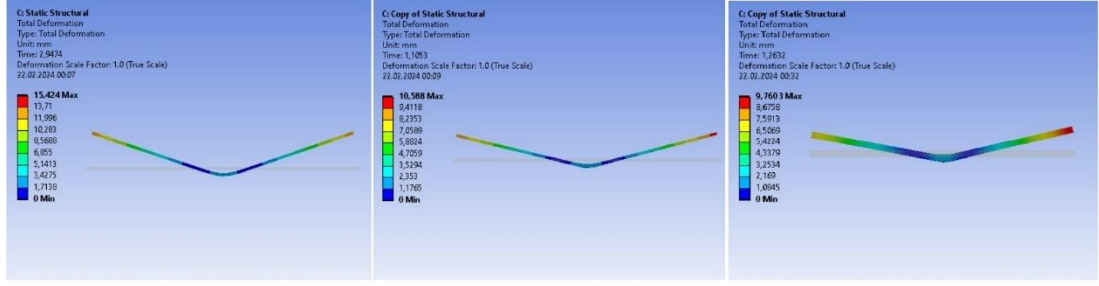
Şekil 3.19. 90° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için toplam deformasyon



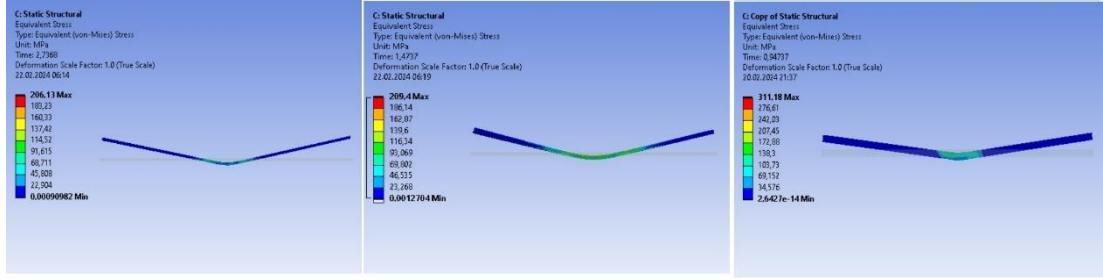
Şekil 3.20. 135° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises gerilme dağılımı



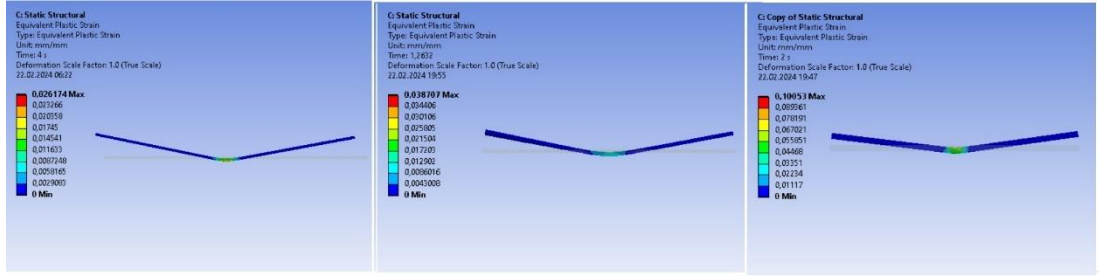
Şekil 3.21. 135° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için plastik gerinme



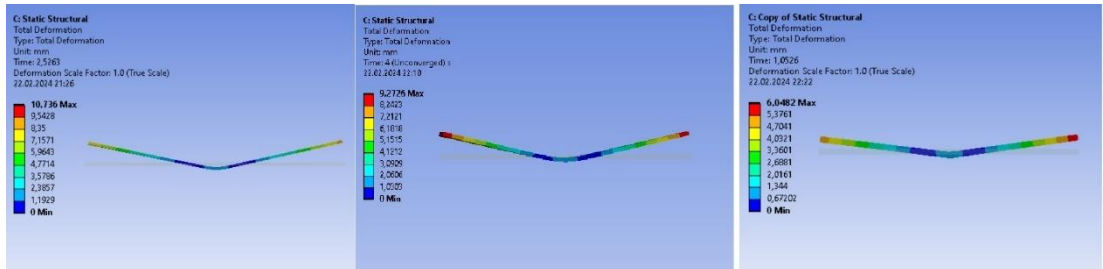
Şekil 3.22. 135° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için toplam deformasyon



Şekil 3.23. 150° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için Von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 3.24. 150° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için plastik gerinme



Şekil 3.25. 150° kalıp açısında 1, 1,5 ve 2,5 mm kalınlıklarında numuneler için toplam deformasyon

Analizlerde elde edilen veriler Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen değerler.

Deney No	Malzemenin Cinsi	Büküm Açısı	Kalınlık	Uygulanan Kuvvet (N)	Max. Von Misses Gerilme (MPa)	Eşdeğer Plastik Gerinme (mm/mm)	Total deformasyon	Geri Yaylanma Açısı (°)	
1	Alüminyum 1050 serisi	90°	1	4659,8	307,3	0,19	24,1	0,97	
2			1,5	9149,5	337,3	0,28	23,3	0,57	
3			2,5	20254	390,8	0,31	25,2	0,32	
4		135°	150°	1	2642,7	213	0,03	15,4	3,3°
5				1,5	3818,1	261,9	0,12	10,5	2,5°
6				2,5	12793	381,8	0,23	9,7	2,2°
7		150°	150°	1	1946,6	206,1	0,02	10,7	5,7°
8				1,5	3083,3	209,4	0,03	9,2	5,6°
9				2,5	11968	311,1	0,10	6	4,2°

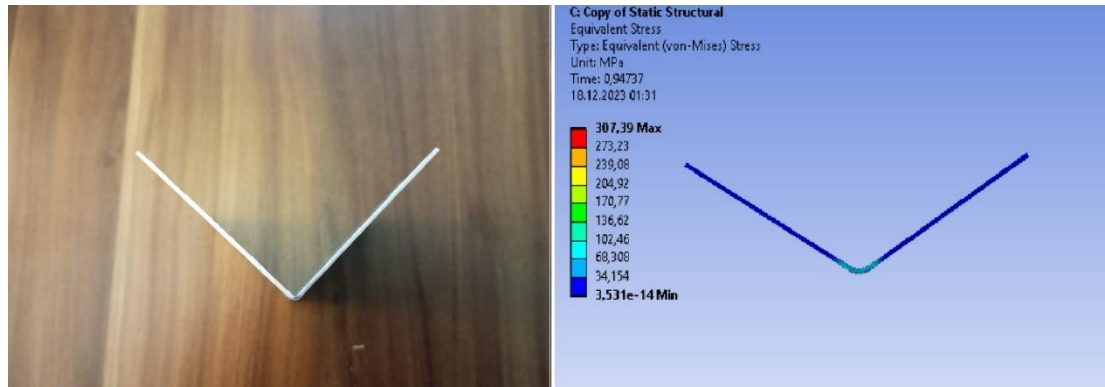
Bu çalışmada sonlu elemanlar analizleri bükme işleminin karakterizasyonu ve geri yaylanma açısının tahmin edilebilmesi için araç olarak kullanıldı. Yapılan deney sonuçlarında olduğu gibi sonlu elemanlar analizlerinde plaka kalınlığı arttıkça geri yaylanma açı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Plaka kalınlığının artmasıyla plastik şekil değişimi artmış ve daha yüksek gerilmeler oluşmuştur (Toroslu A., 2022). Bu sebeple geri yaylanma açıları azalmıştır. Tablo 3.7’de görüldüğü gibi plaka kalınlığı arttıkça plaka üzerinde eşdeğer gerinme miktarı artmakta olup kalıp açısı arttığında ise bu miktar azalmaktadır. Kalıp kalıp açısı değerleri incelendiğinde kalıp açısı 90°’den 135°’ye çıkarıldığında geri yaylanma açısı artarken 135° kalıp açısı ve 150° kalıp açısındaki geri yaylanma açı değerleri yakınlık göstermiştir. Sonuç olarak kalıp açısı arttıkça geri yaylanma değeri artarken plaka kalınlığı arttıkça geri yaylanma açı değeri azalmaktadır (Uslu E., 2014). Analiz sonuçları incelendiğinde büküm iç kısmındaki gerilmeler dış kısımdaki gerilmelerden daha azdır. Bu sebepten dolayı malzemedeki geri esneme meydana gelmektedir (Thipprakmas S., Phanitwong W., 2011). Kalıp açısının artmasıyla geri yaylanma açısının artmasının sebebi plakanın dış yüzey tarafındaki şekil değişimine uğrayan bölgenin uzama miktarının azalması olarak gösterilebilir (Toroslu A., 2022). Analizlerden elde edilen bükme kuvveti incelendiğinde 90° kalıp açısı için plaka kalınlığı artarken bükme kuvveti de artış göstermiştir. Benzer şekilde 135° ve 150° bükme açıları da kalınlığın artışı bükme kuvvetini artırmıştır. Numune kalınlığı arttıkça bükme kuvveti artış göstermiştir. 90°’den ve 135°’ye kalıp açısı artarken bükme kuvveti azalmıştır.

Tablo 3.8. Sonlu elemanlar analizleri ve deneysel sonuçlar arasındaki fark.

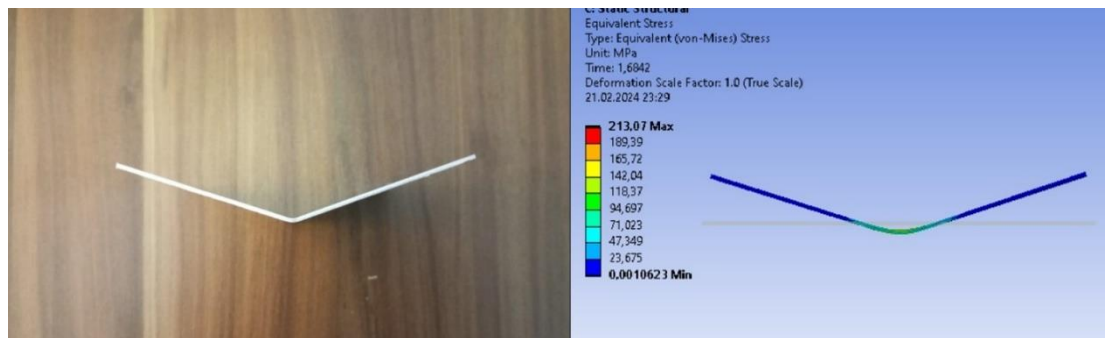
Deneysel No	Malzemenin Cinsi	Büküm Açısı	Kalınlık	Deneysel Sonuçlar	Analitik Sonuçlar	Hata (%)
1	Alüminyum 1050 serisi	90°	1	1°	0,97	3
2			1,5	0,6°	0,57	5
3			2,5	0,3°	0,32	6,6
4		135°	1	3,9°	3,3°	15,3
5			1,5	2,1°	2,5°	19,0
6			2,5	1,7°	2,2°	15,8
7		150°	1	5,4°	5,7°	5,5
8			1,5	5,3°	5,6°	5,6
9			2,5	4,9°	4,6°	6,1

Tablo 3.8 incelendiğinde analizler ve deneysel sonuçlar arasında farkın kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Bu sebeple sonuçlardan anlaşılmaktadır ki sonlu eleman analizleri ile deneysel sonuçlar tahmin edilebilmektedir.

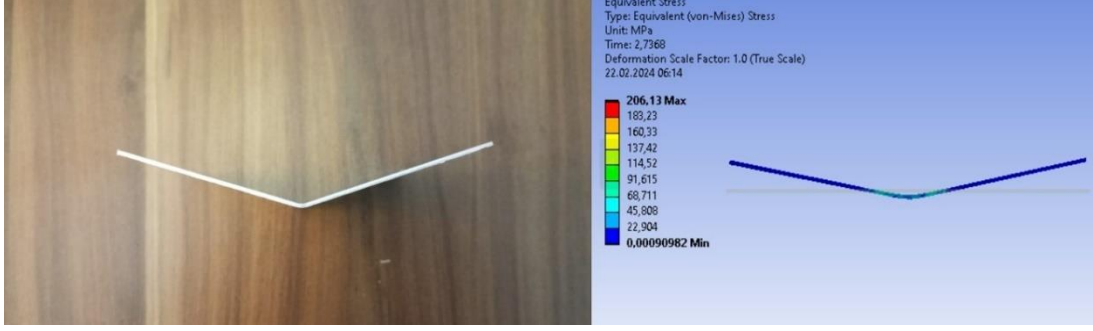
Sonlu eleman analizi sonrası elde edilen görüntü ve deneylerden sonra numunelere ait görüntüler her bir kombinasyon için karşılaştırmalı olarak Şekil 3.26-3.34'te verilmiştir.



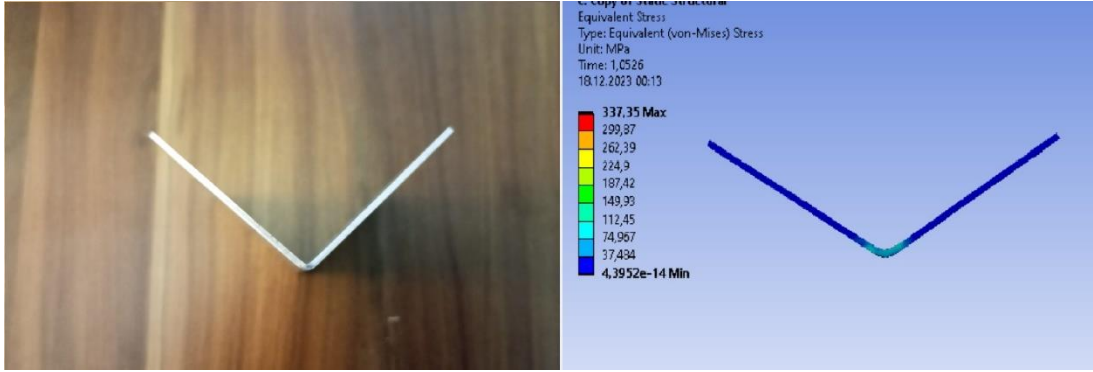
Şekil 3.26. 1 mm kalınlıkta 90° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



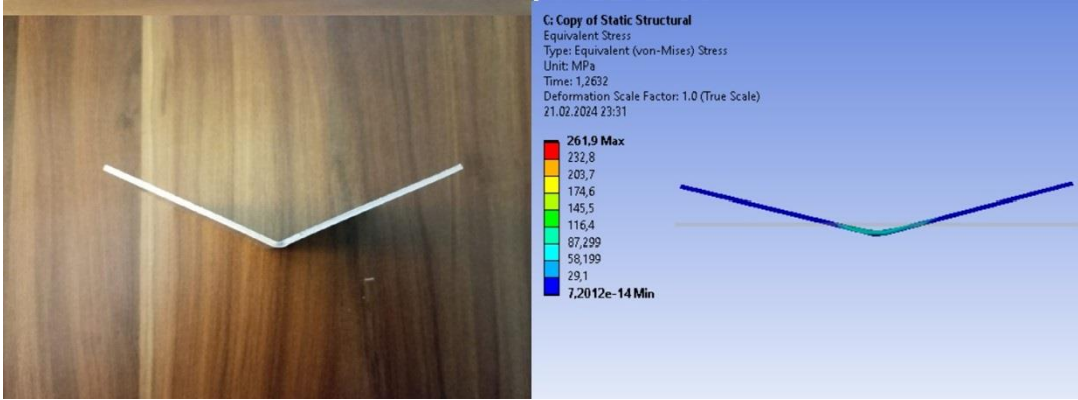
Şekil 3.27. 1 mm kalınlıkta 135° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



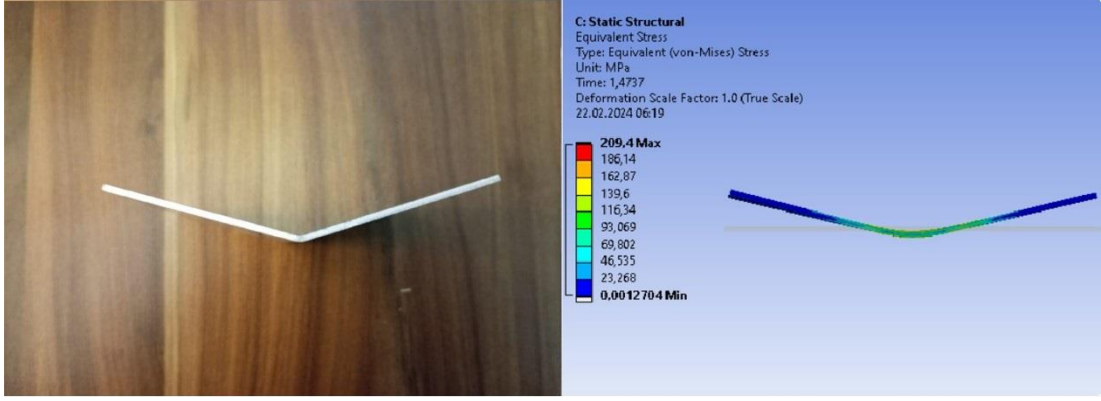
Şekil 3.28. 1 mm kalınlıkta 150° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



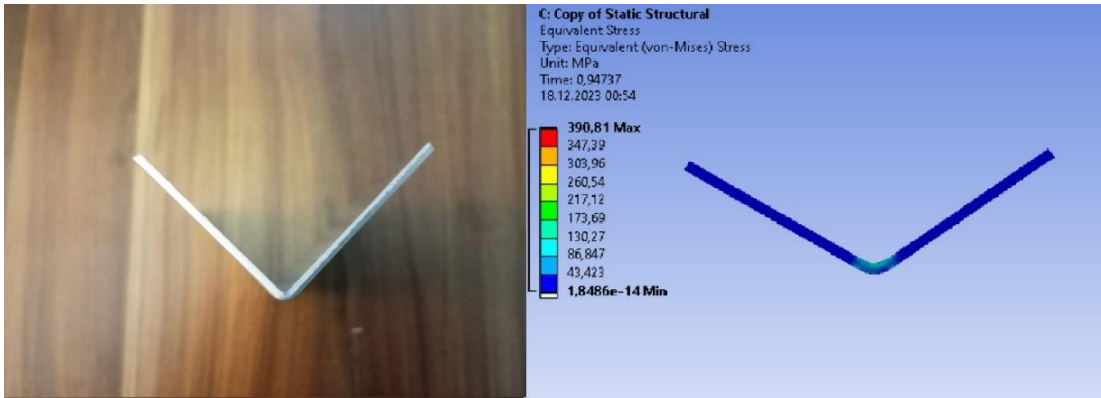
Şekil 3.29. 1,5 mm kalınlıkta 90° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



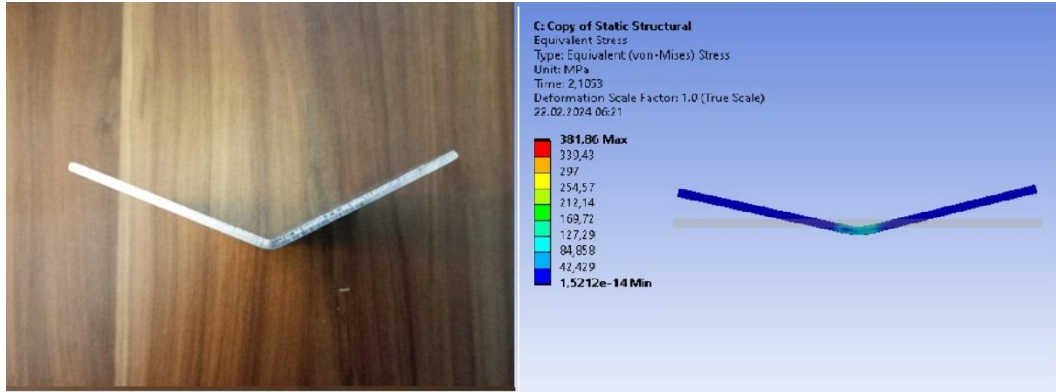
Şekil 3.30. 1,5 mm kalınlıkta 135° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



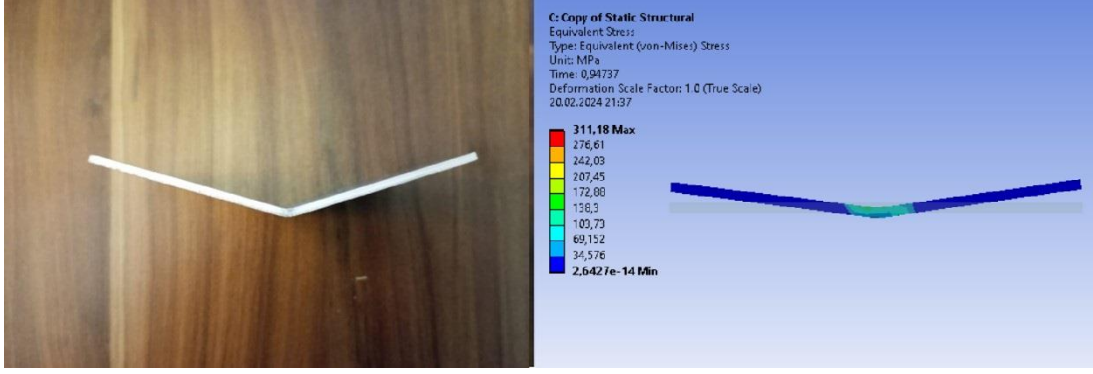
Şekil 3.31. 1,5 mm kalınlıkta 150° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



Şekil 3.32. 2,5 mm kalınlıkta 90° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



Şekil 3.33. 2,5 mm kalınlıkta 135° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü



Şekil 3.34. 2,5 mm kalınlıkta 150° kalıp açısındaki FEM analizi ve deneysel sonuç görüntüsü

4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bükme proseslerinde sıklıkla görülen geri yaylanma davranışı, v-bükme yapılarak 1050 alüminyum plakalar üzerinde incelenmiştir. 1 mm, 1,5 mm ve 2,5 mm kalınlıktaki plakalar 90°, 135°, 150° büküm açılarında bükülerek geri yaylanma değerleri ölçülmüştür. Deneysel sonuçları doğrulamak amacıyla ele alınan parametreler kullanılarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek geri yaylanma değeri ölçülmüştür. Bununla birlikte simülasyonlardan büküm kuvveti belirlenmiştir. Varyans ve regresyon analizleri yapılarak geri yaylanmaya etki eden parametrelerin etkisi belirlenmiştir.

4.1. Genel Sonuçlar

Deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmalarından elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- Aynı kalıp açısında, plaka kalınlığının artmasıyla birlikte geri yaylanma açısının azaldığı görülmüştür.
- Kalıp açısının artmasıyla birlikte geri yaylanma açısının arttığı görülmüştür.
- Sonlu eleman analizleri ve deneysel sonuçlardan elde edilen geri yaylanma değerleri birbirleriyle uyum içindedir.
- Sonlu eleman analizlerinden büküm işlemi için gereken kuvvet tespit edilmiştir.
- Varyans analizi sonucunda büküm açısının, plaka kalınlığına göre geri yaylanma üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür.

4.2. Öneriler

- Tez çalışmasında kullanılan saf alüminyuma soğuk deformasyon uygulayarak bükme ve geri yaylanma davranışı incelenebilir.
- V-bükme esnasında ütüleme süreleri değiştirilerek ütüleme süresinin etkisi incelenebilir.
- Bükme işleminde malzemeyi ısıtarak sıcaklığın etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, A., Sapuan, S., Samad, Z., Khaleed, H., & Aziz, N. (2012). Prediction of geometric defects in the cold embossing of AA6061 aluminum alloy by finite element analysis. *Scientific Research and Essays*, 7(15), 1630-1638. <https://doi.org/https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/8E1AAF329897>
- Abramson, M., Wlodarczyk, J., Saunders, N., & Hensley, M. (1989). Does Aluminum Smelting Cause Lung Disease? *American Review of Respiratory Disease*, 139(4), 1042-1057. <https://doi.org/https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2648910/>
- Acar, M. (2020). *Üzerinde Oval Delikler Bulunan Sac Levhaların V Bükme İşlemindeki Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Adnan, A., Abdullah, A., & Samad, Z. (2022). Study of springback pattern of non-uniform thickness section based on V-bending experiment. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 11(3), 2845-2855. <https://doi.org/https://journal.ump.edu.my/jmes/article/view/8351>
- Adnan, M., Abdullah, A., & Samad, Z. (2016). Springback behavior of AA6061 with non-uniform thickness section using Taguchi Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5), 2041-2052. <https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9221-0>
- Al-Saadi, H., & Tunay, R. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525-532. <https://doi.org/https://dergipark.org.tr/tr/pub/jesd/issue/31477/287005>
- Arslan, B. (2007). *Geri Esnemenin Sac Parçaları Biçim Tamlığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulamaları ile Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- BGS. (2022, 06.). *World mineral statistics*. MineralsUK: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html> adresinden alındı
- Binczewski, G. (1995). The point of a monument: A history of the aluminum cap of the Washington Monument. *JOM*, 47(11), 20-25. <https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/BF03221302>
- Burchitz, I. (2005). *Springback: improvement of its predictability, Literature study report*. Netherlands Institute for Metals Research. https://doi.org/https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/5150325/Literature_review.pdf

- Chikalthankar, S., Belurkar, G., & Nandedkar, V. (2014). Factors Affecting on Springback in Sheet Metal Bending: A review. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 3(4), 247-251. <https://doi.org/https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=5673d7b8d210a354e7fe1ff210ca9a09c08b0fa7>
- Chintankumar, P. (2018). *Bauschinger Effect in spring Back Prediction of High Strength Steel: A Theoretical Approach*. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/325196831_Bauschinger_Effect_in_spring_Back_Prediction_of_High_Strength_Steel_A_Theoretical_Approach
- Chirita, B., & Brabie, G. (2007). Control of Springback in Sheet Metal U Bending Through Design Experiment. *Numiform*. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/235660649_Control_of_Springback_in_Sheet_Metal_U-bending_Through_Design_Experiment
- Cinar, Z., Asmael, M., Zeeshan, Q., & Safaei, B. (2021). Effect of Springback on A6061 Sheet Metal Bending: A Review. *Jurnal Kejuruteraan*, 33(1), 13-26. <https://doi.org/http://journalarticle.ukm.my/16470/1/02.pdf>
- Crisponi, G., Nurchi, V., Bertolasi, V., Remelli, M., & Faa, G. (2012). Chelating agents for human diseases related to aluminium overload. *Coordination Chemistry Reviews*, 256(1-2), 89-104. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010854511001731>
- Duflou, J., Vancza, J., & Aereens, R. (2005). Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art. *Computers in Industry*, 56(7), 747-771. https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361505000710?casa_token=daD6_Q9xpzEAAAAA:PjmQxXs1dkTrvio5lJkv9U2MAuJwX0bl9ye9djtFqSLSJu9y2DImi01XwIWcl356IMSpOJNF1xY
- Erdin, E. (2018). *Sac Şekillendirme İşlemleri*. <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin@hititedutr300420180H7S9C0E.pdf>
- Eren, S. (2022). *Farklı kalınlıklara ve çelik kalitesine sahip sacların bükmede geri yayılma etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Forcellese, A., Fratini, F., Gabrielli, F., & Micari, F. (1998). The Evaluation of Springback in 3D Stamping and Coining Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 108-112. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013698001368>
- Gandara, M. (2013). Aluminium: The metal of choice. *Materials and Technologies*, 47(3), 261-265. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/293653225_Aluminium_The_metal_of_choice
- Gautam, B., Kumar, V., Chandra, V., & Rawat, K. (2016). Analysis of Springback Variation in V Bending. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(2), 555-561. <https://doi.org/https://www.ijert.org/research/analysis-of-springback-variation-in-v-bending-IJERTV5IS020526.pdf>

- Gautam, V., Shukla, R., Singh, J., & Kumar, D. (2016). Effect of Grain Size on Springback in V-Bending of Interstitial Free Steel. *Recent Advances In Mechanical Engineering-2016*. Delhi: Delhi Technological University. https://www.researchgate.net/publication/315494773_Effect_of_Grain_Size_on_Spring_Back_in_V-bending_of_Interstitial_Free_Steel adresinden alındı
- Greenwood, N., & Earnshaw, A. (1998). *Chemistry of the Elements*. Elsevier, 2012. Butterworth Hinemann. <https://doi.org/0-7506-3365-4>. http://lib.ysu.am/disciplines_bk/931545868d143aa17a18c4ad33a7ea3e.pdf
- Gupta, R. (2007). Aluminum Part 5. R. Gupta içinde, *Veterinary Toxicology* (s. 413-418). Academic Press.
- Gupta, S., Bourne, D., Kim, K., & Krishnan, S. (1998). Automated process planning for sheet metal bending operations. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(5), 338-360. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612598800022>
- Gülmez, T. (2011). *Sac Metal Şekillendirme*. <https://web.itu.edu.tr/gulmezt/IMAL%20USULLERI/ch06-Sac%20PSV.pdf>.
- Hal, M. (2023). *Düşük ergime sıcaklığına sahip eritkenlerin (flaksların) alüminyum alaşımlarının sıvı metal temizliğine ve akışkanlığa etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Hayrat, K. (2021). *Inconel sacların bükme işleminde geri yaylanma analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Hekim, A. (2016). *Sac bükmede geri yaylanmanın sonlu eleman yöntemi ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Hudson, L., Anthony, C., Wefers, P., & Williams, F. (2000). *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley. <https://doi.org/9783527306732>. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a01_557
- İlhan, A. (2018). *Sac Metal Şekillendirmede Mukavemet Arttırıcı Parametrelerin Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Inan Eroglu, E., & Ayaz, A. (20018). Is aluminum exposure a risk factor for neurological disorders? *J Res Med Sci.*, 23(51), 1-8. <https://doi.org/https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6040147/pdf/JRMS-23-51.pdf>
- Inan Eroğlu, E. (2017). *Farklı alüminyum folyolar kullanılarak fırınlanan çeşitli et türlerinde alüminyum geçişlerinin saptanması*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Işıктаş, A. (2011). *Farklı kalınlıklardaki dkp ve paslanmaz sacların farklı açılarda yapılan V-bükme işlemindeki geri yaylanmalarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Karaağaç, İ., & Uluer, O. (2017). V bükme prosesinde geri esnemeye etki eden proses parametrelerinin deneysel araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(8), 990-993. <https://doi.org/https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/33121/377736>

- Kim, H., & Koç, M. (2008). Numerical Investigations on Springback Characteristics of Aluminum Sheet Metal Alloys in Warm Forming Conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1), 370-383. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/222404951_Numerical_investigations_on_springback_characteristics_of_aluminum_sheet_metal_alloys_in_warm_forming_conditions
- Li, H., Shi, K., Yang, H., & Tian, Y. (2012). Springback law of thin-walled 6061-T4 Al-alloy tube upon bending. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, 357-363. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/257444191_Springback_law_of_thin-walled_6061-T4_Al-alloy_tube_upon_bending
- Linga Reddy B., et al., “A review of springback in metal forming”, *International Journal of Engineering Research&Technology* 3(1): 646- 651, (2014).
- Liu, Y., Zhu, Z., Wang, Z., Zhu, B., Wang, Y., & Zhang, Y. (2017). Formability and lubrication of a B-pillar in hot stamping with 6061 and 7075 aluminum alloy sheets. *Procedia Engineering*, 207, 723-728. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817355960>
- Livatyali, H., & Altan, T. (2001). Prediction and Elimination of Springback in Straight Flanging Using Computer Aided Design Methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 2(117), 262-268. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/223304533_Prediction_and_elimination_of_springback_in_straight_flanging_using_computer_aided_design_methods_Part_1_Experimental_investigations
- Marr, J. (2016). *The Geology of Ore Deposits*. Forgotten Books. https://doi.org/https://www.forgottenbooks.com/fr/download/TheGeologyofOreDeposits_10022094.pdf
- Mkaddem, A., & Saidane, D. (2007). Experimental Approach and RSM Procedure on the Examination of Springback in Wiping Die Bending Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 189(1), 325-333. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/229379349_Experimental_approach_and_RSM_procedure_on_the_examination_of_springback_in_wiping-die_bending_processes
- Moon, Y., Kang, S., Cho, J., & Kim, T. (2003). Effect of Tool Temperature on the Reduction of the Springback of Aluminum Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1), 365-368. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/222727942_Effect_of_tool_temperature_on_the_reduction_of_the_springback_of_aluminum_sheets
- Mori, K., Akita, K., & Abe, Y. (2007). Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2), 321-325. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695506001003>
- Ötü, R. (2012). *V bükme kalıplarında alüminyum alaşımlı sacların şekillendirilmesi ve geri esneme miktarlarının tespiti*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- Panthi, S., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S., & Goel, M. (2010). Finite Element Analysis of sheet metal bending process to predict the springback. *Materials & Design*, 31(2), 657-662. https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909004452?casa_token=hppsug2GmjsAAAAA:dwJs4h8i9GBC8CWskF50qZLLljVAfl_B5IJxcWM6PorH-piY_M68rljkcdCAUURuqwYUu3Gig1I
- Patel, S., LAI, R., Dwivedi, J., & Singh, V. (2013). Springback Analysis in Sheet Metal Forming Using Modified Ludwik Stress-Strain Relation. *ISRN Mechanical Engineering*. <https://doi.org/https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/640958/>
- Racz, S., Khan, S., Chalal, H., Abed Meraim, F., & Balan, T. (2010). Prediction of Springback After Draw-Bending Test Using Different Material Models. *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*. Paris: AMPT 2010. <https://hal.science/hal-01207297/document> adresinden alındı
- Raju, S., Ganesan, G., & Karthikeyan, R. (2010). Influence of variables in deep drawing of AA 6061 sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(10), 1856-1862. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/229389075_Influence_of_variables_in_deep_drawing_of_AA_6061_sheet
- Ramos, C., de Mello, A., & Kautzmann, R. (2014). A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 30-35. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/263127794_A_preliminary_study_of_volcanic_rocks_for_stonemeal_application
- Ranau, R., Oehlenschläger, J., & Steinhart, H. (2001). Aluminium levels of fish fillets baked and grilled in aluminium foil. *Food Chemistry*, 73(1), 1-6. <https://doi.org/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814600003186>
- Reddy, B. L., Rao, B. C., Reddy, P. R., & Reddy, P. V. R. R. (2014). A review on springback in metal forming. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3(1), 646-655.
- Saravanan, S., Rathish, R., Balakrishnan, N., Balamurugan, R., Balakumaran, S., Ajith, S., & Alexandrian, A. (2017). Experimental analyses of springback variation in wipe bending. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 4(4). https://doi.org/https://www.ijeas.org/download_data/IJEAS0404004.pdf
- Sarikaya, O. (2008). *Analysis of Heat Treatment Effect on Springback in V-Bending*. A Thesis Submitted to the Graduate School Of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
- Savaş, Ö. (2005). *Alüminyum-silisyum döküm alaşımlarında mikro porozite oluşumuna etki eden faktörlerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Singh G. & Goyal S. & Sharma N & Sharma P. (2017) A comprehensive study on aluminium alloy series – a review

- Soni, M., White, S., Flamm, W., & Burdock, G. (2001). Safety evaluation of dietary aluminum. *Regul Toxicol Pharmacol.*, 33(1), 66-79. <https://doi.org/https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11259180/>
- Srinivasan, R., Vasudevan, D., & Padmanabhan, P. (2013). Influence of Friction Parameters on Springback and Bend Force in Air Bending of Electrogalvanised Steel Sheet: An Experimental Study. *Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 36(2), 371-376. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/276943827_Influence_of_friction_parameters_on_springback_and_bend_force_in_air_bending_of_electrogalvanised_steel_sheet_An_experimental_study
- Tarhan, T. (2023). *Alüminyum kaplama endüstrisi atıksularının arıtılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tekiner, Z. (2004). An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of materials processing technology*, 145(1), 109-117.
- Thipprakmas S. , Phanitwong W.(2011). Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique, *Department of Tool and Materials Engineering*,
- Toroslu A. (2022). *Yüksek dayanımlı çeliklerde kalınlık azaltımıyla geri esnemenin telafisi*. Politeknik Dergisi , 25(3): 1359-1368
- Totten, G., & Mackenzie, D. (2003). *Handbook of Aluminum*. Marcel Dekker. <https://doi.org/0--8247-0494-0>. https://www.academia.edu/25635387/Handbook_of_Aluminum
- Turan, S. (2009). *Düz Kenar Bükme Ve Döner Kalıpla Kenar Bükme İşlemlerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Umur, Y. (2016). *Dual fazlı çelik saclarda geri yaylanma probleminin deneysel olarak incelenmesi* (Doctoral dissertation, Bursa Uludağ University (Turkey)).
- Uslu, E. (2014). *Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Yaylanma Davranışının Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yazdani, A., Naseri, R., & Rahmati, S. (2017). Investigation of springback of two - layer metallic sheet produced by explosive welding in U - die bending proces. *Journal of Engineering Research*, 5(2), 188-190. <https://doi.org/https://kuwaitjournals.org/jer/index.php/JER/article/view/2092>
- Yenice, M. (2006). *Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yu, H. (2009). Variation of elastic modulus during plastic deformation and its influence on springback. *Materials & Design*, 30(3), 846-850. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/223319712_Variation_of_elastic_modulus_during_plastic_deformation_and_its_influence_on_springback

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Furkan Hasan MESCI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Dođuő Üniöersite, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2024, Sakarya Üniöersite, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Tasarım ve İmalat Program

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020-2023 yılları arasında Altınay Robot Teknolojileri firmasında Proses Tasarım Mühendisi olarak çalıştı.
- 2023-Devam Parsan Makine'de Method Mühendisi