



**V BÜKME İŞLEMİNDE SAC METALİN GERİ ESNEME DAVRANIŞININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

Berkay ERBEKTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Berkay ERBEKTAŞ

14/07/2023

V BÜKME İŞLEMİNDE SAC METALİN GERİ ESNEME DAVRANIŞININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Berkay ERBEKTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

V bükme günümüzde birçok alanda kullanılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Bütün malzemeler sınırlı bir elastisite modülüne sahip olduğundan bükme sonucu plastik deformasyona uğrayan malzeme ilk haline dönmeye çalışır ve buna geri esneme denmektedir. Geri esnemediği dolayısı istenen geometride parçalar elde edilememektedir. Bu nedenle istenen geometride parçalar elde edebilmek için geri esneme miktarının giderilmesi veya asgari seviyeye indirilmesi gerekir. Deneysel çalışmalarla, matematiksel analizlerle ve sonlu elemanlar yöntemiyle geri esneme miktarı tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmada ABAQUS programı kullanılarak geri esnemenin tespitinin yapılması amaçlanmaktadır. Önceki bir çalışmanın deney şartları ABAQUS programına aktarılmış olup simülasyon sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Üç farklı bükme açısında, iki farklı zımba uç yarıçapında, iki farklı malzeme kalınlığında ve üç farklı malzeme türünde toplamda 36 adet sonlu elemanlar analiz sonucu deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Sac şekillendirme, V bükme kalıbı, geri esneme, sonlu elemanlar yöntemi
Sayfa Adedi : 61
Danışman : Prof. Dr. Abdullah KURT

ANALYSIS OF SPRINGBACK BEHAVIOR OF SHEET METAL IN V DIE BENDING
PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

(M. Sc. Thesis)

Berkay ERBEKTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

V-bending sheet metal forming method is widely used in many fields. However, due to the limited elastic modulus of all materials, the material that undergoes plastic deformation during bending tends to return to its original state, resulting in what is known as springback. This phenomenon makes it difficult to obtain parts with the desired geometry. To overcome this issue, it is necessary to either eliminate or minimize springback. This can be achieved through experimental studies, mathematical analyses and the finite element method. The aim of this study is to use the ABAQUS program to determine the amount of springback. The experimental conditions from a previous study were applied to the program and the simulation results were then compared with the experimental results. The study included a total of 36 finite element analyses that were carried out using three different bending angles, two different punch radii, two different material thicknesses and three different material types.

Science Code : 91438

Key Words : Sheet metal forming, V die bending, springback, finite element method

Page Number : 61

Supervisor : Prof. Dr. Abdullah KURT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında bana destek veren ve tecrübesiyle yol gösteren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Abdullah KURT'a ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Bükme	3
2.1.1. V-kalıpta bükme	4
2.1.2. Serbest bükme.....	5
2.1.3. U-kalıpta bükme	5
2.1.4. Kenar bükme.....	6
2.1.5. Sac bükmenin matematiksel ifadesi	7
2.1.6. Uygulanabilir malzeme modelleri	10
2.2. Şekillendirmede Geri Esneme Problemi	11
2.2.1. Geri esneme	11
2.2.2. Geri esnemeyi etkileyen faktörler.....	12
2.2.3. Geri esneme telafi yöntemleri.....	14
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve ABAQUS Yazılımı.....	14
2.3.1. Sonlu elemanlar yöntemi	14
2.3.2. Sonlu elemanlar analizinde bükmenin malzeme modeli	16

	Sayfa
2.3.3. ABAQUS yazılımı.....	19
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	21
3.1. Mevcut Çalışmalar	21
3.2. Çalışmaların Değerlendirilmesi	26
4. MATERYAL VE METOT	29
5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA	45
5.1. Deney ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	45
5.2. AISI 304 Levhalar İçin Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	47
5.3. Bakır Levhalar İçin Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	49
5.4. DC01 Levhalar İçin Analiz Sonuçlarının İncelenmesi	52
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. AISI 304 için kullanılan malzeme özellikleri	33
Çizelge 4.2. Bakır için kullanılan malzeme özellikleri	34
Çizelge 4.3. DC01 için kullanılan malzeme özellikleri	35
Çizelge 5.1. AISI 304 levha için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	45
Çizelge 5.2. Bakır levha için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	45
Çizelge 5.3. DC01 levha için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bükme terminolojisi	3
Şekil 2.2. V-kalıpta bükme işlemi.....	4
Şekil 2.3. Serbest bükme prensibi.....	5
Şekil 2.4. U-kalıpta bükme işlemi.....	6
Şekil 2.5. a) Bükme öncesi, b) bükme sonrası	6
Şekil 2.6. Bükülmüş bir levhanın eksen boyunca gösterimi.....	7
Şekil 2.7. Bükme sırasında liflerin deformasyonu.....	7
Şekil 2.8. Bükmede varsayılan gerinim dağılımları.....	8
Şekil 2.9. Düzlem gerinim koşullarında levha kesitindeki gerilme durumu.....	9
Şekil 2.10. a) Gerçek gerilme-gerinim eğrisi, b) elastik-mükemmel plastik, c) rijit-mükemmel plastik, d) gerinimle sertleşen plastik model	10
Şekil 2.11. Bükme işleminde geri esneme	11
Şekil 2.12. İzotropik modelin gösterimi	16
Şekil 2.13. Kinematik modelin gösterimi	17
Şekil 4.1. ABAQUS/CAE arayüzü	30
Şekil 4.2. Elastik bölge değerlerinin programda tanımlanması	31
Şekil 4.3. Plastik bölge değerlerinin programda tanımlanması	32
Şekil 4.4. AISI 304 için kullanılan gerilme-gerinim eğrisi.....	33
Şekil 4.5. Bakır için kullanılan gerilme-gerinim eğrisi.....	34
Şekil 4.6. DC01 için referans kullanılan gerilme-gerinim eğrisi	35
Şekil 4.7. Çözücü tipi, zaman ve artış bölümü	36
Şekil 4.8. Temas yüzeyleri.....	37
Şekil 4.9. Yüzey temas koşullarının detay gösterimi.....	38
Şekil 4.10. Sınır koşulları adımı	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. 1 mm kalınlıktaki levhalar için mesh yapısı	39
Şekil 4.12. 2 mm kalınlıktaki levhalar için mesh yapısı	40
Şekil 4.13. Job bölümü.....	41
Şekil 4.14. V-kalıpta bükme işleminin ABAQUS programında gösterimi	41
Şekil 4.15. Yük boşaltımından sonraki durum.....	42
Şekil 4.16. Geri esneme durumu.....	43
Şekil 5.1. 1 mm kalınlıkta AISI 304 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu.....	47
Şekil 5.2. 2 mm kalınlıkta AISI 304 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu	48
Şekil 5.3. a) AISI 304 için minimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası	48
Şekil 5.4. a) AISI 304 için maksimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası	48
Şekil 5.5. 1 mm kalınlıkta bakır levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu	50
Şekil 5.6. 2 mm kalınlıkta bakır levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu	50
Şekil 5.7. a) Bakır için minimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası	51
Şekil 5.8. a) Bakır için maksimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası	51
Şekil 5.9. 1 mm kalınlıkta DC01 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu.....	52
Şekil 5.10. 1 mm kalınlıkta DC01 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu.....	53
Şekil 5.11. a) DC01 için minimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası	53
Şekil 5.12. a) DC01 için maksimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
α, θ	Bükme Açısı
ε	Gerçek Gerinim
$\dot{\varepsilon}$	Plastik Şekil Değiştirme Hızı
$\dot{\varepsilon}_0$	Referans Şekil Değiştirme Hızı
σ	Gerilme
ρ	Tarafsız Eksen Yarıçapı
$\delta\theta$	Bükme ve Geri Esneme Açıları Arasındaki Bağlantı
A	Başlangıç Akma Gerilmesi
B	Gerinim Sertleşme Katsayısı
C	Gerinim Hızı Katsayısı
e	Mühendislik Gerinimi
E	Elastisite Modülü
E'	Düzlem Şekil Değişim Durumunda Elastisite Modülü
K'	Dayanım Faktörü
K_s	Geri Esneme Faktörü
l	Lif Boyu
l_0	İlk Boy
l_s	Son Boy
L_b	Bükme Payı
m	Termal Yumuşama Üsteli
mm	Milimetre
M	Moment
n	Pekleşme Üsteli
r	Yarıçap
R	Bükme Yarıçapı
S	Düzlem Gerinimindeki Akma Kriteri
t	Levha Kalınlığı

Simgeler **y** **Y****Açıklamalar**

Nötr Eksene Olan Uzaklık

Akma Gerilimi

Kısaltmalar**AISI****EN****MPa****SEY****SI****2D****Açıklamalar**

American Iron and Steel Institute

European Norm

Megapascal

Sonlu Elemanlar Yöntemi

Uluslararası Birimler Sistemi

İki Boyutlu

1. GİRİŞ

Bir malzemenin şekillendirilmesi makine endüstrisinin temel işlevlerinden bir tanesidir. Sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisi olan bükme, endüstride özellikle otomotiv ve uçak sanayisinde levhaların şekillendirilmesinde geniş uygulama alanına sahip bir yöntemdir. Bükme yöntemlerinden birisi olan V bükme işlemi de endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Başlangıçta bükme işlemi kullanılarak istenilen açıda ve geometride parçalar elde etmek amaçlanır. Ancak V bükme kalıpları ile birlikte bükülen levhalar sahip oldukları elastik özelliklerinden dolayı ilk (bükülmeden önceki) şekline geri dönmeye çalışır [1]. İlk haline geri dönmeye çalışan bu malzemeler bükülmeden önceki durumuna bir miktar yaklaşmış olur. Amaçlanan geometri ile levhanın son hali arasındaki bu fark geri esneme olarak tanımlanmaktadır [2]. Geri esnemenin meydana gelmesiyle istenen geometri tam olarak elde edilememiş olur. Bu durum malzemelerin şekillendirilmesinde önemli bir problemdir. Bu problem için literatürde de bulunmak üzere geri esnemenin önceden tahmin edilip bu değerlere göre bükme işleminin yapılması, bükme sırasında ezerek şekil verme ve gererek şekil verme, gerilme dağılımlarını düzenleme veya ısıl işlem ile şekillendirebilirliği artırma gibi çözümler üretilmiştir [3]. Geri esneme tahminine göre bükme açısının revize edilip işlemin bu koşullarda gerçekleştirilmesi en yaygın çözüm yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde ne kadar geri esneyeceği tahmin edilen levha sonuçlardan yola çıkılarak daha fazla bükülür. Böylelikle geri esneme probleminin ortadan kalkacağı düşünülmektedir [3].

Geri esnemenin telafi edilebilmesi için geri esneme tahmininin doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Geri esnemenin tahminiyle ilgili çok sayıda deney ve bazı matematiksel ifadeler bulunmaktadır. Bunlara ek olarak deney parametrelerinin uygun bir şekilde bilgisayar ortamına aktarılmasıyla birlikte sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak yapılan analizler ile deneylerde elde edilen bükme sonuçlarına yaklaşılabılır. Bu şekilde geri esneme tahmininin sonlu elemanlar programlarıyla da tespit edilebileceği görülebilir. SEY ile elde edilen sonuçlarla deney sonuçları arasında yakın değerler elde edebilmek için deney koşullarının bilgisayar ortamında doğru tanımlanması oldukça önemlidir.

Sac metal şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan V bükme yönteminde de SEY ile geri esnemenin tespitinin yapılması, deneyler ile bu geri esnemenin tespitinin

yapılmasından zaman ve maliyet açısından çok daha iyi bir seçenektir. Bu açıdan bakılırsa bilgisayar analizleri geri esneme probleminin tespitini kolaylaştırabilen bir seçenektir.

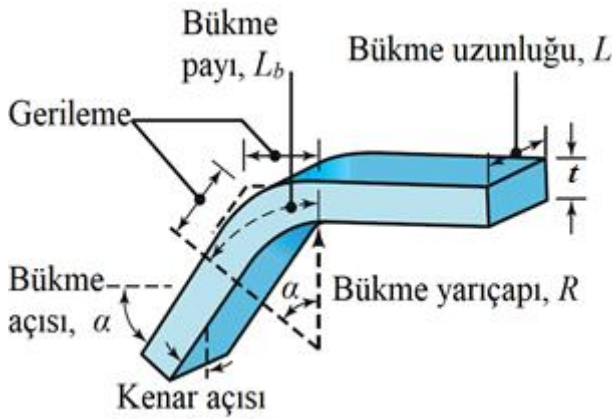
Bu çalışma, ölçüleri 75x50 mm olan 1 mm ve 2 mm kalınlıklarda AISI 304 levhanın, DC01 kalite levhanın ve bakır levhanın 60°, 90° ve 120° kalıp ölçülerinde, 2 mm ile 4 mm zımba uç yarıçaplarında büküldüğü toplamda 36 adet olan önceki bir çalışmanın deney sonuçlarını içermektedir [4]. Deney sonuçları, ABAQUS programı yardımıyla yapılan analiz sonuçlarıyla geri esneme miktarlarının tespiti açısından karşılaştırılmaktadır. Ayrıca hangi durumda esneme miktarlarının ne yönde değiştiğinden bahsedilmiş olup gerilmeler hakkında da genel bilgiler verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Bükme

Bükme, açılı parçaların üretilmesinde kullanılan levhaların basit veya karmaşık bir profil gerektirdiği durumlarda uygulanan sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Levha şeklinde bir parça direkt kuvvet moment etkisiyle veya silindirik bir yapı yardımıyla bükülür [5, 6].

Bükme, yalnızca L,U,V profilleri elde etmek için değil malzemenin atalet momentini arttırarak istenen parçanın sertleşmesini arttırmak için de kullanılan sac metal şekillendirme yöntemidir. Düz bir levhanın veya metal şeritlerin yanı sıra çubuklar, teller, borular ve çekmeyle elde edilen profiller için de bükme kullanılabilir [6].



Şekil 2.1. Bükme terminolojisi [7]

Bükme işleminin açıklaması Şekil 2.1'deki gibidir. Burada bükme yarıçapı R , bükme payı L_b , bükme açısı α , levha kalınlığı t ve bükme uzunluğu L 'dir. Levha kalınlığının orta noktasından paralel çekilen eksen nötr eksenidir. Eksene göre malzemenin dış lifleri gergin yani çekme durumundayken iç lifleri ise sıkıştırılmış yani basma durumunda gözlemlenir. Teorik olarak dış liflerdeki ve iç liflerdeki mühendislik gerinimi e mutlak büyüklükte eşit kabul edilir ve Eş. 2.1 ile ifade edilir.

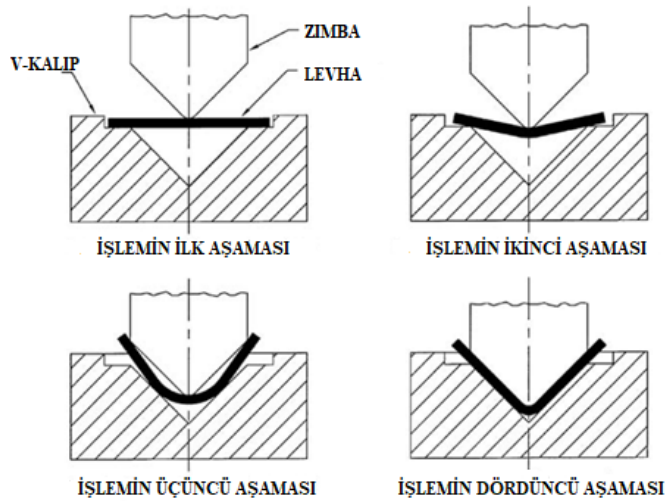
$$e = \frac{1}{(2R/t)+1} \quad (2.1)$$

Deneyisel araştırmalar bu formülün malzemenin dış liflerinin deformasyonundansa iç liflerinin deformasyonunu yansıtmakta daha doğru olduğunu göstermektedir. Dış liflerdeki deformasyon belirgin şekilde daha fazladır. Bu nedenle nötr bölgedeki lifler bükülmüş levhanın iç tarafına doğru hareket eder. Levhanın dış taraftaki genişliği orijinale göre daha küçüktür. İç taraftaki genişlik orijinal genişlikten daha büyüktür. Orijinal şekle göre oluşan bu durumlar için poisson etkisi söz konusudur.

R/t oranı azaldıkça bükülme yarıçapının kalınlığa oranı azalmış demektir. Bu oran küçüldükçe dış liflerdeki çekme gerilimi artarak malzeme en sonunda çatlayacaktır [6, 7]. Bundan dolayı bükmede levha kalınlığı ve bükme açısı arasındaki oranların belirli sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir.

2.1.1. V-kalıpta bükme

V-kalıpta bükme işlemi; V şeklindeki bir kalıp üzerine yerleştirilen levhanın daha sonra kuvveti meydana getiren V şeklinde bir zımba yardımıyla şekillendirildiği bir şekillendirme yöntemidir [8].



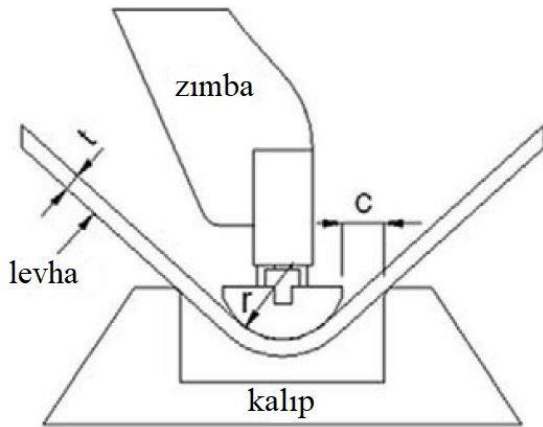
Şekil 2.2. V-kalıpta bükme işlemi [8]

V-kalıpta bükme çok genişten çok dar açılara kadar tüm değerlerde bükme işlemi yapılması mümkün ve kolay bir işlem olduğundan endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de gösterildiği üzere V-kalıpta bükme sırasında zımba aşağı yönde hareket eder ve

desteklenmeyen sac levha ile temas eder. Temasla birlikte zımba levhayı kalıbın sonuna kadar düşey yönde iter ve levhanın kalıbın şeklini almasını sağlar [8]. V-kalıpta bükmede; levhanın dişi kalıba bütünüyle teması sırasındaki zımbanın konumu (erkek kalıp ile dişi kalıp arasındaki mesafe), zımba ile dişi kalıbın açılarının aynı veya farklı olması gibi değişiklikler gözlemlenebilmektedir.

2.1.2. Serbest bükme

Serbest bükmede levhayı tutan iki parça ve zımbanın teması dâhil toplamda üç nokta teması bulunur. Proses gereksinimlerine göre kalıp aralığı ayarlanır ve levha yerleştirilir. Kalıbın ortasındaki zımbaya bir yer değiştirme verilir. Kalıp, levhanın bükme sırasında tabana çarpmayacağı kadar derin olarak oluşturulmuştur. Ayrıca tek adımda serbest bükme işlemi basit tipte parçalar için uygunken karmaşık yüzeyli parçalar için çok adımlı serbest bükme işlemi kullanılır [9].

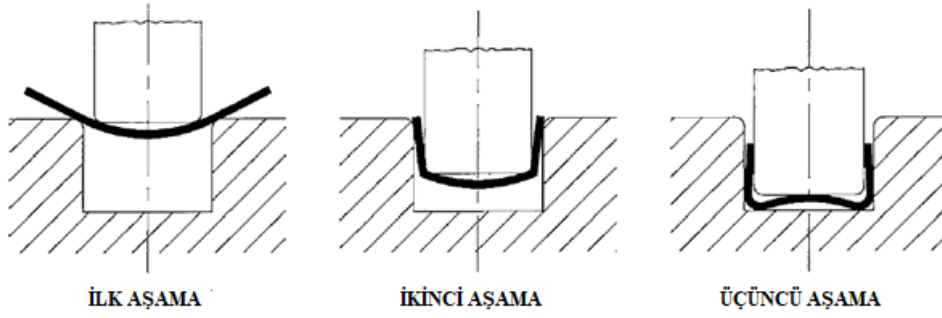


Şekil 2.3. Serbest bükme prensibi [9]

Şekil 2.3'te görüleceği üzere levha zımbanın şeklini alırken kalıp ile temas etmemektedir.

2.1.3. U-kalıpta bükme

U-kalıpta bükme V-kalıpta bükmede olduğu gibi levhaya zımba hareketiyle beraber kalıbın şeklinin vermesiyle meydana gelir. Zımbanın ve kalıbın şeklini alması için levhaya belli bir kuvvet uygulanır. Zımba aşağı yönde hareket ederken önce metal levhayla temas eder ve daha fazla alçalarak levhayı U şeklindeki açıklığa zorlar [8].

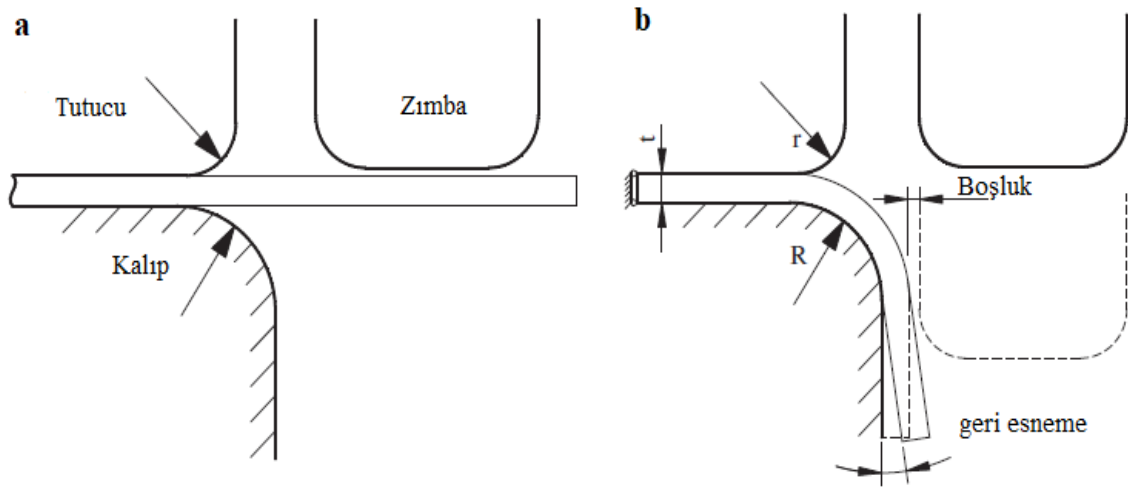


Şekil 2.4. U-kalıpta bükme işlemi [8]

Şekil 2.4'te ilk aşamada levhanın bükülmeye başladığı an gösterilmektedir. İkinci aşamada levha iyice gerilir ve kalıbın şeklini almaya başlar. Son işlemde de şişkin taban parçanın uç kısımlarına yayılır ve U-kalıpta bükme işlemi tamamlanmış olur [8].

2.1.4. Kenar bükme

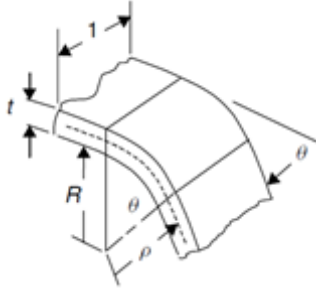
Şekil 2.5'te de görüleceği üzere kenar bükme sırasında levha, tutucu tarafından sabit bir konumda sıkıştırılır. Levhaya şekil vermek için zımba, levhanın açıkta kalan kısmını aşağı yönde hareket ettirir. Böylelikle zımba alçalarak levhayı bükmüş olur [10].



Şekil 2.5. a) Bükme öncesi, b) bükme sonrası [10]

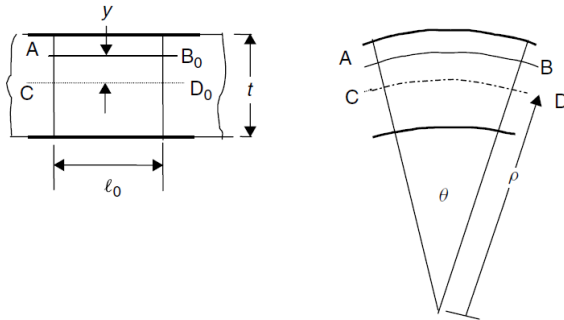
2.1.5. Sac bükmenin matematiksel ifadesi

Bükmenin analizi için bükme yarıçapı, liflerin konumu, eksen uzunlukları, bükme açısı gibi değerler incelenmiştir.



Şekil 2.6. Bükülmüş bir levhanın eksen boyunca gösterimi [11]

Tarafsız eksen yarıçapı ρ , bükme açısı θ , bükme yarıçapı R , Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.7. Bükme sırasında liflerin deformasyonu [11]

Şekil 2.7’de bükme kuvvetlerinden kaynaklı uzunluklar ve değişimleri görülmektedir. Örneğin incelenen parçanın ilk uzunluğu l_0 iken merkezde bulunan CD_0 uzunluğunun deformasyon sonucunda CD eğrisine dönüştüğü görülmektedir. CD eğrisinin boyu da l_s olarak Eş. 2.2’deki gibi tanımlanabilir.

$$l_s = \rho \theta \quad (2.2)$$

CD_0 uzunluğundan y birim uzaklıkta bir AB_0 uzunluğu da deformasyon sonucu AB eğrisine dönüşür. Buradaki boy da Eş. 2.3’te gösterildiği gibi l olur.

$$l = \theta (\rho + y) = \rho \theta \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = l_s \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (2.3)$$

Bu eşitlik $\rho \theta$ yani l_s parantezinde yazılmıştır.

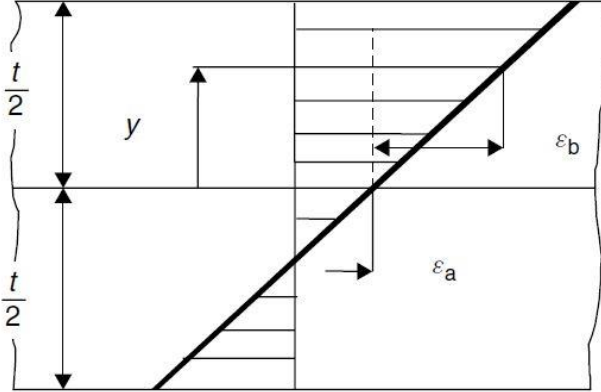
$$\varepsilon = \ln(L/L_0) \quad (2.4)$$

Birim şekil değişimi ifadesi ε şeklinde Eş. 2.4'teki gibi tanımlanır. AB lifindeki gerinim ise Eş. 2.5'teki gibi olur.

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_s}{l_0} + \ln \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (2.5)$$

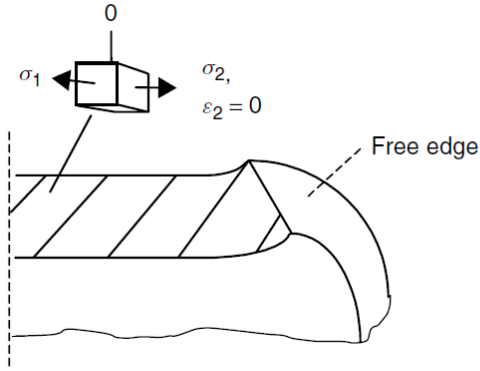
Burada ε_a merkezdeki gerinim iken ε_b , eğilmeden kaynaklı gerinimdir. Bu gerinimler Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Bükme yarıçapının levha kalınlığından büyük olduğu durumlar için bükmedeki gerinme Eş. 2.6 ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon_b = \ln \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \approx \frac{y}{\rho} \quad (2.6)$$



Şekil 2.8. Bükmede varsayılan gerinim dağılımları [11]

Bükme kuvvetinin sabit olup bu kuvvetin dik bir şekilde uygulanması ve levha boyutlarının yanal eksenlerde büyük olması sebebiyle bükme işlemi düzlem gerinim koşulları altında incelenebilir.



Şekil 2.9. Düzlem gerinim koşullarında levha kesitindeki gerilme durumu [11]

İzotropik bir levhanın genişliği boyunca şekil değiştirme değerleri sıfırdır. Büküm eksenini boyunca bir kesit üzerindeki gerilmeler Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Varsayılan gerilme gerinim durumları Eş. 2.7 ve Eş. 2.8'de görülmektedir.

$$\varepsilon_1; \quad \varepsilon_2 = 0; \quad \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \quad (2.7)$$

$$\sigma_1; \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}; \quad \sigma_3 = 0 \quad (2.8)$$

Bu değerler altında Von Mises kriteri temel alınarak düzlem gerinim koşullarındaki eşdeğer gerilme ve eşdeğer gerinime Eş. 2.9 ve Eş. 2.10 yardımıyla ulaşılabilir [11, 12].

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.9)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (2.10)$$

Gerilme ve gerinim değerleri Von Mises formülünde yerine yazılır. Eş. 2.11'de gerilmenin ve Eş. 2.12'de gerinimin en son ifadesine yer verilmiştir.

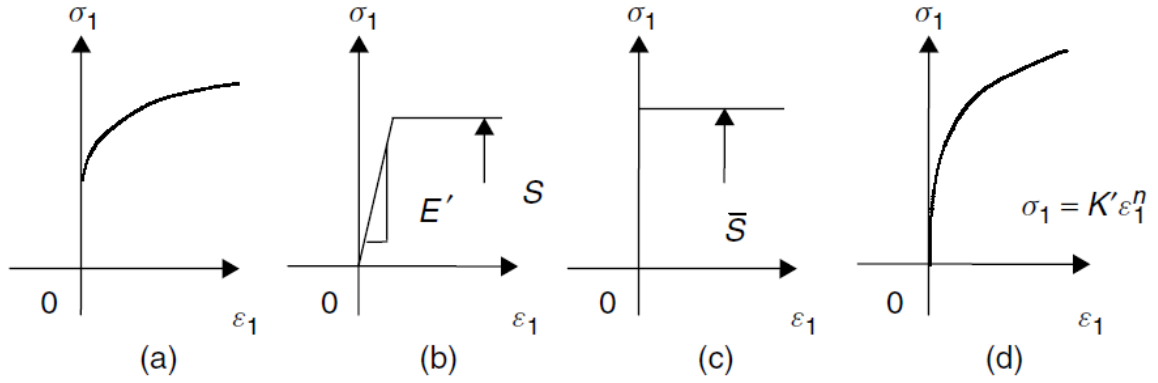
$$\sigma_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \sigma = S \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Burada S düzlem gerinimindeki akma kriterini temsil etmektedir.

2.1.6. Uygulanabilir malzeme modelleri

Malzeme modeli seçimi gerilmelerin büyüklüğüne göre değişmektedir [11]. Bazı malzeme modeli örnekleri Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. a) Gerçek gerilme-gerinim eğrisi, b) elastik-mükemmel plastik, c) rijit-mükemmel plastik, d) gerinimle sertleşen plastik model [11]

Eğer plastik bölge tek değer üzerinden bir gerilmeye (S) sahipse elastik- mükemmel plastik olarak tanımlanabilir [11]. Bu tanımlama plastik bölgede yapılırken tek bir gerilme ve o gerilmeye karşılık gelen gerinim değeri yeterlidir.

Daha küçük yarıçapta bükmelerde ve elastik geri esneme ile ilgilenilmeyen durumlarda ve plastik bölgedeki sertleşmenin önemsenmediği koşullarda rijit mükemmel plastik modeli kullanılabilir. Burada $\bar{S}$, gerinim aralığı üzerinden alınan bir değerdir.

Diğer bir malzeme modeli ise gerinim sertleşme modelidir. Bu model, Eş. 2.13'teki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_1 = K' \varepsilon_1^n \quad (2.13)$$

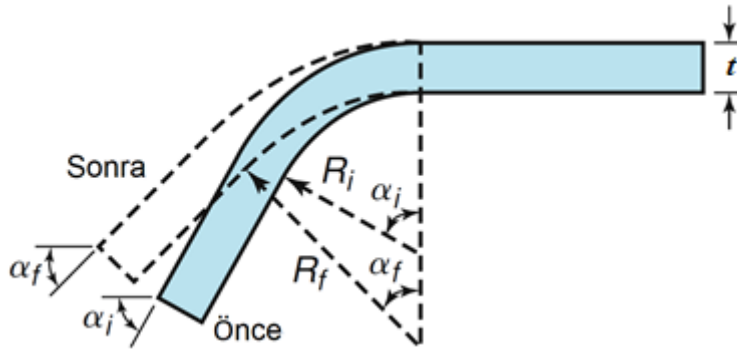
Burada K' dayanım faktörü, n pekleşme üsteli ve ε birim uzamadır.

2.2. Şekillendirmede Geri Esneme Problemi

2.2.1. Geri esneme

Geri esneme, bükme işlemi uygulanan bir parçanın üzerindeki yük kaldırıldıktan sonra o parçanın elastik yapısından dolayı kısmen eski haline gelmesidir [1].

Tüm malzemeler sonlu bir elastisite modülüne sahiptir. Plastik deformasyonu deformasyona neden olan yükün kaldırılmasıyla birlikte elastik toparlanma takip eder ve bu toparlanma ile geri esneme meydana gelir [13]. Geri esnemenin varlığı ve doğru tahmin edilebilmesi bir problem olmakla beraber geri esnemenin tespiti için bazı matematiksel eşitlikler mevcuttur. Geri esnemenin önce ve sonra gözlemlenen açı değerlerine göre geri esnemenin yaklaşık olarak hesaplanabileceği bir formülden bahsetmek mümkündür. Bu eşitliğin çıkış yapısı Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Bükme işleminde geri esneme [7]

Burada R_i parçanın büküldüğü yarıçapken α_i bükme açısıdır. Geri esneme sonrası bu ifadeler R_f ve α_f halini alır. Parça büküldükten sonra elastik olarak toparlanma eğilimi gösterir ve bükülme yarıçapı geri esnemenin önceki bükülme yarıçapından daha büyük olur. Geri esnemenin önceki ve sonraki bükme yarıçapı değerleri arasındaki oran ile düzlemsel bükme durumlarında geri esneme tahmini için Eş. 2.14’teki gibi bir ifade yazılabilir [7].

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{Et} \right) + 1 \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14'te geri esnemenin; R/t oranı arttıkça, malzemenin akma gerilimi olan Y arttıkça ve elastik modül olan E azaldıkça arttığına ulaşılabilir.

Başka çalışmalarda ise eğilme koşullarında geri esnemeyi tahmin etmek için çekme testinde bulunan yapısal ilişkiye dayalı kapalı bir formül çözümü geliştirilmiştir [13, 14]. Bir bükme işlemi için uygulanan moment etkisi (M_b) altında bükülmüş bölge için geri esneme tahmin edilebilir. Yük kaldırma işleminden sonra geri esneme nedeniyle oluşan moment, bükme için uygulanan momentin zıt yönlüsü veya M_{unload} olarak düşünülebilir. Yük kaldırma işlemi sonucunda toplam yük sıfır olacaktır. M_b tarafından yüklenmek ile M_b 'ye zıt yönlü olan M_{unload} tarafından yüklenmek arasındaki deformasyon farkı geri esnemeyi verir. Bu yaklaşımdan yola çıkarak geri esnemeyi tahmin etmek için bir geri esneme faktörü Eş. 2.15'teki gibi tanımlanır.

$$K_s = 1 - 2\delta\theta/\pi \quad (2.15)$$

Burada $\delta\theta = 2\alpha_i - 2\alpha_f$ şeklindedir. Bu matematiksel çözümde $K_s = 1$ geri esneme olmadığını gösterirken $K_s = 0$ tam geri esnemeyi ifade eder [13, 14].

Ayrıca bazı koşullar altında V-kalıpta bükme işleminde kalıp etkisinden dolayı levhada geri esnemenin yerine ileri esneme görülebilir. Serbest bükmede kalıp sınırlaması olmadığı için ileri esneme görülmez [6, 7].

2.2.2. Geri esnemeyi etkileyen faktörler

Matematiksel denklemlerden de anlaşılacağı üzere geri esnemeye elastisite modülü, pekleşme, akma dayanımı vb. parametreler dolayısıyla malzeme özellikleri etki etmektedir. Tüm bunların yanında geri esnemeye ütüleme süresi, bükme sıcaklığı, sürtünme kuvveti, sac malzeme kalınlığı, bükme açısı, hadde yönü, uygulanan kuvvet büyüklüğü, zımba yarıçapı gibi faktörler de etki etmektedir. Bu özelliklerin ve işlemlerin nasıl etki ettiği genel haliyle sıralanabilir;

- Bilindiği üzere elastisite modülü malzemelerin elastik deformasyonu üzerine irdelenen bir ifadedir. Elastisite modülü arttıkça elastik deformasyona direnç de artar ve geri

esneme azalır [15]. Geri esnemenin tespiti sırasında sunulan denklemle de bu ifade anlaşılabilir.

- Bükme sırasında uygulanan kuvvet büyüklüğü ile geri esnemenin artması arasında ters bir orantı mevcuttur [3]. Kuvvet sonucu meydana gelen eğilme momentinin etkisinin mukavemete, pekleşmeye (gerinim sertleşmesine) ve anizotropiye bağlı olduğu malzemelerin mekanik davranışları altında tespit edilmiş bir gerçekliktir [16].
- Bazı durumlarda malzemenin akma eğrisini tanımlamak için pekleşmenin hesaplanması gerekir [17]. Geri esneme genel olarak akma dayanımı ve dayanım faktörünün artmasıyla artarken, pekleşme üstelinin artmasıyla azalır. Çünkü pekleşmenin artması minimum bükülme yarıçapında azalmaya neden olur. Bu nedenle, pekleşme arttıkça geri esneme etkisi azalır. Dayanım faktörünün etkisi akma dayanımı ve pekleşmeye göre daha büyüktür [18].
- Malzemelerin mekanik davranışlarının yöne bağlı olarak değişmesine anizotropi denir. Anizotropi arttıkça geri esnemenin arttığı gözlemlenmiştir [19]. Denklemlerin ve bu ifadelerin aralarındaki ilişki göz önüne alınıp yorumlandığında doğru geri esneme davranışını tahmin etmek için elastik modül, malzeme anizotropisi ve lineer olmayan pekleşme hep birlikte dikkate alınmalıdır [20].
- Bilindiği üzere sıcaklık arttıkça malzemelerin akma dayanımı düşer. Genel sonuçlara bakıldığında da akma dayanımı düşük malzemelerin geri esnemesi daha düşüktür. Sıcaklık arttıkça geri esnemedede bir düşüş görüldüğüne ulaşılabilir [21].
- Malzeme ütüleme süresi (zımbanın bükülen sac üzerinde bekletilme süresi) arttıkça geri esnemedede azalma görülmektedir [15, 22-26].
- Literatürde sürtünmenin geri esnemeyle bir ilişkisi olduğu bilinmekle birlikte sürtünmenin geri esneme üzerinde etkisinin az olduğu düşünülmüştür [18]. Bazı malzeme tipleri için yapılan deneylerde çok düşük sürtünme koşullarında geri esnemenin arttığı görülmüştür. Yüksek sürtünme katsayısının varlığı ise bükme durumları için farklılık gösterir. Bazı durumlarda yüksek sürtünme kuvveti geri esnemeyi azaltırken bazı koşullarda arttırmaktadır [27].
- Bazı çalışmalarda malzeme kalınlığının artmasının geri esneme değerini artırdığı tespit edilmiştir [23-25]. Bazı çalışmalarda ise bu durum tam tersidir [4, 17]. Bunun nedeninin malzemelerin mekanik özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Malzeme kalınlığının etkisi gibi bükme açısının artması ile de geri esneme değerinin değişimi çalışmalara göre değişkenlik göstermektedir [4, 23, 24].

- Birçok çalışmada zımba uç yarıçapının büyük olması durumunda geri esnemenin arttığı gözlemlenmiştir [4, 21].
- Levhanın hadde yönünün geri esneme üzerine etkisi yapılan çalışmalarda gözlemlenmiş olup hadde yönüne dik durumlarda geri esnemenin azaldığı görülmüştür [2]. Bazı çalışmalar ise hadde yönünün etkisinin geri esneme sonuçlarında belli bir düzen içinde olmadığını göstermektedir [28]. Hadde yönünün geri esneme üzerindeki etkisinin genel bulgularla açıklanamayacağı sonucuna varılmıştır.

2.2.3. Geri esneme telafi yöntemleri

Şekillendirme işlemlerinde geri esneme genellikle levhanın aşırı bükülmesiyle telafi edilir. Levhanın bükme işleminden önce ne kadar geri esneyeceğine dair çeşitli yöntemler aracılığıyla tahminlerde bulunulur. Bu tahminler deneysel, analitik veya sonlu elemanlar analizi yapılarak elde edilen sonuçlardır. Tahmin edilen geri esneme miktarına göre levha geri esnemeyi telafi edebilecek kadar fazla bükülmektedir. Böylelikle levha istenen açıda elde edilmiş olur. Bu yüzden geri esnemenin tahmin edilebilmesi çok önemlidir. İstenen derecede bükme sonuçları elde etmek için birkaç deneme gerekebilir. Diğer bir yöntem kalıp ile sac malzeme arasında hiç boşluk bırakılmadan yapılan bükme işlemidir. Bu yöntem zımbayı dibe yerleştirme olarak bilinen bir tekniktir. Böylelikle levha ezilerek bükme işlemine uğrar ve deformasyon daha kalıcı olur. Geri esneme miktarı bu yöntemle azaltılabilir. Ancak ezilme sonucu meydana gelen deformasyon ile malzeme özellikleri kaybolabilir. Bu nedenle bu yöntem çalışmalarda çok fazla tercih edilmemektedir. Başka bir yöntem ise levhanın bükülürken gerilime maruz kaldığı gererek bükmedir. Isıl işlem ile şekillendirilebilirliğin arttırılması da bir telafi yöntemidir [1, 3, 14].

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve ABAQUS Yazılımı

2.3.1. Sonlu elemanlar yöntemi

SEY çözümlenecek alanı statik, dinamik, ısı, akışkan gibi birçok fiziksel etki açısından matematiksel olarak incelemektedir. Bu inceleme yapılırken çözüm alanı sonlu parçalara bölünür ve çok sayıda küçük bölgeler meydana gelir. Küçük parçalar halindeki alanlar daha kolay matematiksel ifadelerle açıklanarak basit bir şekilde çözülür. Bu küçük bölgelerin düğüm noktaları birbirine ağ (mesh) yapısıyla bağlanır.

SEY ile yapılan çalışmalar; herhangi bir makine tasarımının gerilme analizinde, nükleer alanda meydana gelen sıcaklık ve dinamik yük analizlerinde, hidrolik sistemlerdeki akış analizlerinde, askeri alanlarda kullanılan patlayıcıların patlama analizlerinde vb. birçok alanda değişik parametrelerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca SEY yardımıyla bükme işlemlerinin analizleri de yapılabilir. Bu analizler geri esnemenin tespiti için yapılan işlemi zaman ve maliyet açısından iyileştirir.

Sonlu elemanlar analizinin genel kullanışı incelendiğinde öncelikle analizi istenen sistemin modeli gereklidir. Bu modeller bilgisayar ortamında eksiksiz şekilde basitleştirilerek ifade edilebilir. Bilgisayar ortamında bu yapıların her birisi kullanılan programa göre tanımlanır. Daha sonra mesh bölümü ile bu modellerin analizinin daha kolay yapılabilmesi için sistem çok küçük parçalara bölünür. Bu küçük parçalar düğüm noktaları ve bunları birbirine bağlayan ağlardan oluşmaktadır. Bazı problemlerde analiz sonuçlarının düzgün sonuç vermesi veya kıyaslanacak sonuçlara yakınlığının yüksek çıkması için mesh bölümü çok önemlidir. Sıcaklık, kuvvet gibi dış parametrelerin etkilediği hassas bölgeler daha ayrıntılı ağlar ile bölünür. Daha sonra tüm bu sistemin nasıl hareket edeceği, hangi parametrelerin uygulanacağına dair sınır şartları girilir. En sonunda statik, akış, sıcaklık gibi istenen analiz tipine göre sistem çözümlenir. Çözümlenen sonuç ve sistem programın sunduğu imkanlar doğrultusunda simülasyon ve grafiklerle incelenir. SEY ile bükme analizlerinde kapalı (Implicit), açık (Explicit) gibi çözümler kullanılmaktadır. Her iki yöntem de benzer sonuçlar sağlayabilir ancak farklı uygulama senaryolarında farklı avantajlar ve dezavantajlar sunarlar.

Açık çözümler, genellikle yüksek hızlı ve şiddetli dinamik olayların analizi için kullanılır. Ani deformasyonlara yol açan örneğin; kırılmalara, çarpışmalara ve patlamalara sebebiyet veren çalışmalarda açık çözümlerin tercih edildiği görülmektedir. Sonuç olarak yapısal mukavemet analizi, araç tasarımı, balistik testler ve benzeri uygulamalar gibi birçok endüstriyel çalışma için uygundur. Açık çözümlerde genellikle artış sayıları küçüktür [29, 30].

Kapalı çözümler genellikle daha yavaş ve statik uygulamalar için kullanılır. Bu tip uygulamalar genellikle düşük hızlı deformasyonlar, geniş plastik deformasyonlar veya yüksek sıcaklıklarda yapısal mukavemet analizi gibi durumlardır. Kapalı çözümlerde zaman adımları açıkça tanımlanmaz. Açık çözümlerin aksine bu çözümler sistemi kuvvetler açısından dengeye ulaştırmayı amaçlar. Bu dengeye her zaman artışında ulaşılmaya çalışılır [29].

2.3.2. Sonlu elemanlar analizinde bükmenin malzeme modeli

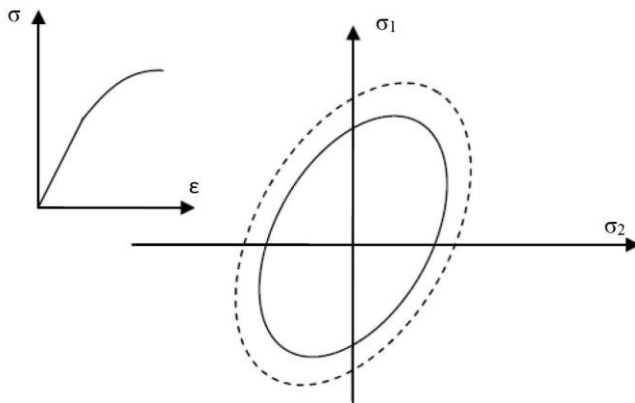
Sonlu elemanlar programlarında malzeme modellemesi bükme gibi elasto-plastik uygulamalarda ilk olarak elastik bölge tanımıyla yapılır. Elastik bölge tipi kullanıcının isteği doğrultusunda izotropik, anizotropik gibi tiplerde tanımlanabilir.

Plastik bölge ise genellikle ilk akmanın gerilim durumunu ifade eden akma fonksiyonu ve plastik deformasyon ile akma fonksiyonunun nasıl değiştiğini anlatan pekleşme yasası ile incelenir. Pekleşme yasasıyla da plastik deformasyon ile meydana gelen ilk akma yüzeyi tespit edilir. Şekil, konum, boyut değişiklikleri bu yüzeyin tanımlanmasına bağlıdır [27, 31].

Bilindiği üzere plastik davranış için literatürde birçok malzeme modeli mevcuttur. Bu malzeme modelleri için izotropik, anizotropik durumlara göre hangi yapının uygulanması gerektiği seçilir. Bükme işlemi için izotropik sertleşme modeli, kinematik sertleşme modeli, izotropik-kinematik sertleşme birleşik modeli, Johnson Cook modeli plastik bölge için yaygın kullanılabilir modellerdendir.

İzotropik model

İzotropik malzeme modelleri, malzemenin mekanik davranışının tüm yönlere göre aynı olduğu varsayımı altında çalışan modellerdir. Bu modeller, malzemenin gerilme-gerinim davranışını plastik deformasyon ve elastik davranış için bir eğri veya ilişki ile tanımlar. Şekil 2.12’de izotropik modelin eğri durumu ve şematik gösterimine yer verilmiştir.

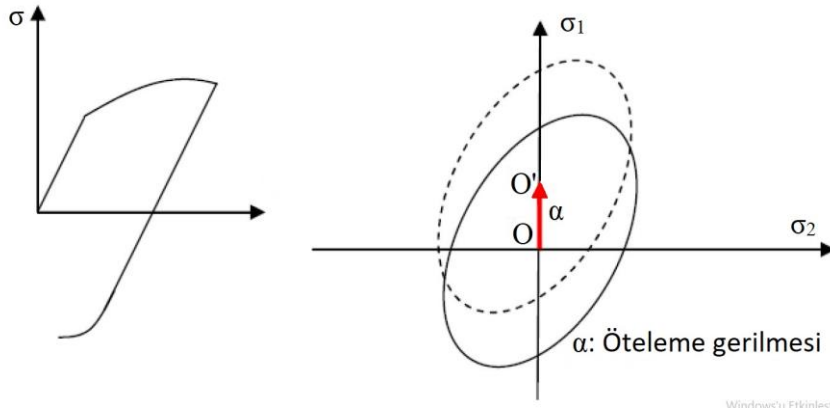


Şekil 2.12. İzotropik modelin gösterimi [32]

İzotropik malzeme modeli, malzemenin gerilme-gerinim eğrisini açıklarken gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi birinci dereceden elastik ve plastik deformasyon bölgesinde basit modellerle ifade eder. Hooke Kanunu (Elastik bölge için) ve Power Law (Plastik bölge için) en çok bilinen izotropik modellerdir.

Kinematik model

Kinematik sertleşme modeli, plastik deformasyon davranışını açıklamak için kullanılan bir malzeme modelidir. Bu model, plastik deformasyon sırasında malzemenin sertleşme davranışını ani şekil değiştirmeye bağlı olarak ölçmez. Şekil değişiminin geçmişine bağlı olduğunu ifade eder. Bu sertleşme, malzemenin plastik bölgeden çıktıktan sonra geri dönüşte değişen sertleşme davranışını tanımlar. Yani malzeme deformasyon sürecinde sertleşirken, boşaltma sürecinde sertleşme azalabilir veya tamamen kaybolabilir. Bu nedenle kinematik sertleşme modeli, malzeme gerilme-gerinim eğrisinin yüklemeye ve boşaltmaya bağlı olarak değişen şeklini ifade eder. Şekil 2. 13'te kinematik sertleşme modelinin şematik gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 2.13. Kinematik modelin gösterimi [32]

Johnson Cook modeli

Bu model metallerde yaygın olmak üzere birçok malzeme için kullanılan gerinim hızına ve sıcaklığa bağlı bir malzeme modelidir ve Eş. 2.16'daki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (2.16)$$

Eş. 2.16'da; σ gerilmeyi, A başlangıç akma gerilmesini, B şekil değiştirme sertleşme katsayısını, C gerinim hızı katsayısını, ε şekil değiştirme hızını, $\dot{\varepsilon}$ plastik şekil değiştirme hızını, ε_0 kullanıcı tanımlı referans şekil değiştirme hızını, n pekleşme üstelini, m termal yumuşa değerini, T sıcaklığı, T_r referans sıcaklığı, T_m malzemenin ergime sıcaklığını ifade etmektedir [33].

Nilsson ve diğerleri, serbest V bükme uygulanan levhanın geri esnemesini inceledikleri çalışmalarında SEY'i deney sonuçlarıyla karşılaştırıp bu yöntemin kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Bu analizi gerçekleştirirken izotropik sertleşme modelini kullanmışlardır [34].

Alüminyum ve paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan bir çalışmada da V bükme işleminde geri esneme analiz edilmiştir. Bu çalışmada izotropik sertleştirme modeli, lineer kinematik sertleştirme modeli ve birleşik model olmak üzere üç farklı malzeme modeli kullanarak malzeme modellerinin geri esneme üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir [35].

Sousa ve diğerleri, çalışmalarında U ve V bükmede geri esnemeyi incelemişlerdir. Bükme işlemi sırasında ABAQUS/Explicit kullanırlarken geri esnemeyi tespit sırasında da ABAQUS/Standart kullanmışlardır. Bu çalışmada malzeme olarak düşük karbonlu çelik, malzeme modeli olarak ise izotropik elastikliğe sahip elasto-plastik model ve plastisite için Hill anizotropik akma kriteri kullanılmıştır [36].

Wang ve diğerleri, çalışmalarında Ti-6Al-4V boru sıcak bükme işleminde esneme tahmin modeli geliştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Değişken sıcaklık alanı göz önünde bulundurularak modifiye edilmiş Johnson Cook modeline dayanan bir tahmin modeli önerilmektedir. Çalışmada, borunun farklı sıcaklık bölgelerindeki malzeme özellikleri ve bükme yarıçapı değişimleri dikkate alınarak geri esneme değeri hesaplanmaktadır. Sonuçlar önerilen modelin geri esneme tahmini için diğer yöntemlerden daha doğru çıktılar ifade ettiğini vurgulamaktadır [37].

SEY ile analizler sonucunda uygulanan malzeme modellerinin sonuçlarda istenmeyen, deneylerle örtüşmeyen durumlara sebep olması söz konusuysa bu modellerde revize işlemleri yapılabilir.

2.3.3. ABAQUS yazılımı

ABAQUS yazılımı gerçek dünya koşullarındaki bir uygulamayı kullanıcıya gereksiz dayatmalar yapmayacak bir şekilde bilgisayar ortamına aktarılmasını sağlayan bir sonlu elemanlar analiz programıdır. ABAQUS metallerin gerilme ve deformasyon analizinde oldukça iyi olmakla beraber bunun yanında kauçuk ve polimerleri, betonarme, cam ve seramikleri, kırılabilir veya esnek köpükleri ve toprak, kaya gibi jeoteknik malzemeleri de analiz edebilmektedir. ABAQUS ile gerilme analizleri tek başına incelenebilirken başka etkilerle birlikte incelenebilmektedir. Gerilme analiziyle beraber iletken ve konvektif ısı transferi, kütle difüzyonu, elektrokimya gibi etkiler de bağımsız olarak, ardışık olarak veya stres analiziyle tam olarak birleşerek analiz edilebilmektedir [38].

ABAQUS bu analizleri gerçekleştirirken kendi içinde dört yazılım tipi kullanır. Bunlar ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, ABAQUS/CFD ve ABAQUS/CAE yazılımlarıdır. Kullanıcı analiz etmek istediği modeli eksiksiz bir şekilde ABAQUS programına aktardıktan sonra aktarma sırasında seçtiği bu yazılım tiplerini paket olarak çalıştırır.

ABAQUS yazılımı bükme analizlerinde sunduğu özelliklerle de mühendislerin tasarım sürecini daha verimli hale getirmektedir. Noktasal yüklerin, dağıtılmış yüklerin uygulanabilmesi ve farklı sınırlama, bağlantı tiplerinin modellenmesi kullanıcıların gerçek dünya koşullarını analiz etmelerine olanak tanır.

ABAQUS programının bükme analizlerindeki bir diğer önemli özelliği büyük ölçekli modellerin etkin bir şekilde çözümlenebilmesidir. Bu programın hesaplama yetenekleri; karmaşık yapıları, yüksek detay gerektiren modelleri hızlı ve verimli bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılar. Bu durum da kullanıcılara daha kapsamlı ve detaylı analiz yapabilme imkanı sunar.

ABAQUS sonlu elemanlar yazılımıyla çok sayıda çalışmanın yapılmasıyla birlikte deney sonuçlarının analiz sonuçlarıyla kıyaslandığı çalışmalarda da genel olarak sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Mevcut Çalışmalar

Otomotiv sektöründe kullanılması planlanan üç sac alaşımı DQSK ve HSLA çelikler ile 6022-T4 alüminyum alaşımlarında geri esneme tahmini için çekme ve bükme testleri yapan Carden ve diğerleri, geri esnemeyi gerilim altındaki davranış, sürtünme ve test takım parçalarının yarıçap büyüklükleri açısından değerlendirmişlerdir [1].

Gürün ve diğerleri, V bükme işlemi sonrasında geri esneme davranışlarının incelenmesini ele aldıkları deney ve analiz çalışmalarında 60°, 90°, 120° bükme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Her açı durumundaki zımba için üç ayrı bükme yarıçapı kullanılmış çalışmalar sonucunda malzemenin sac kalınlığı, zımba açısı ve zımba uç yarıçapının geri esnemeyi önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Zımba uç yarıçapı arttıkça geri esnemede artış gözlemlenmiş, bükme açısının artmasının geri esnemeyi azalttığı tespit edilmiştir. Sac kalınlığının arttıkça geri esneme miktarının azaldığı da sonuçlar arasındadır. Ayrıca malzemenin hadde yönünün geri esnemeyi etkilediği yapılan çalışmalarda incelenmiş olup hadde yönüne dik durumlar için yapılan bükme işleminde geri esnemenin daha az olduğu gözlemlenen diğer bir sonuçtur. Gerilme dağılımlarının belirlenmesi için Deform 2D paket programının kullanıldığı simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlara göre zımba yarıçapının artmasıyla şekil değiştirme oranında ve plastik deformasyonda azalma görülmüştür. Bunun sebebinin zımba yarıçapının artmasıyla birlikte kuvvetin daha geniş bir alana homojen olarak dağılmasına bağlanmıştır [2].

Tekaslan ve diğerleri, yaptıkları bir çalışmada 0,75 mm kalınlığındaki çelik sac malzemelere lineer olarak artan bükme açılarıyla ayrı ayrı V kalıpta bükme işlemini uygulamış olup bükme açılarının arttıkça geri esnemenin arttığını, zımbanın sac üzerindeki bekleme süresinin arttıkça geri esnemenin aynı oranda azaldığını gözlemlemiştir. Ayrıca bu çalışmada zımba ile kalıp arasında sac malzeme kalınlığı kadar boşluk verilmeyen durumlar için ezilmeden dolayı sacın kalıcı şekil değişikliğine uğrayacağı ve geri esnemenin hassas bir şekilde tespit edilmesinin zorlaştığı görülmüştür [22].

Tekiner, çalışmasında farklı kalınlıktaki pirinç, bakır, alüminyum, paslanmaz çelik, galvaniz sac ve metal sacın V bükme işlemi ardından geri esnemesini incelemiştir. Geri esnemenin

tespiti için V bükme kalıbı tasarlanıp imal edilmiştir. Yükün malzeme üzerinde ne kadar uzun süre tutulursa geri esnemenin o kadar az olduğunu, zımba ile kalıp arasına boşluk bırakılmaması durumunda güvenilir geri esneme değerleri elde edilememesini, geri esnemenin malzeme cinsine göre farklılık gösterdiğini ve bükme açılarının arttıkça geri esnemenin arttığını gözlemlemiştir. Sonuçlar ile ilgili birçok grafiğe yer verilmiştir [15].

Yenice, V bükme ile şekil verme işlemi sonucunda geri esnemeyi incelediği bu çalışmada farklı kalıp parametrelerinden ve farklı malzemelerden yararlanmıştır. Değişken olarak; malzeme, kalıp açısı, hadde yönü, kalıp yarıçapını kullanmıştır. DP 600, FeP04 ve Fee355 saclar için sacın kenar ve ortasında, 80°, 90° ve 100° kalıp açısı durumlarında geri esneme değerlerini pozitif veya negatif yönde olacak şekilde incelemiştir [28].

Tekaslan ve diğerleri, başka bir çalışmalarında da bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti konusuna yer vermişlerdir. Yapılan dört deney serisinden ikisinde kalıp ile zımba arasına sac kalınlığı kadar boşluk bırakmışlardır. Diğer ikisinde ise bu boşluk olmaksızın bükme işlemi uygulamışlardır. Sac kalınlıklarına göre hesaplanan kuvvetler sonucu yapılan bu V bükme işlemlerinde zımbanın kalıbın dibine boşluksuz oturtulduğu deneyler için karmaşık ve hassas olmayan sonuçlar ile karşılaşmıştır. Bu karmaşık sonuçlar geri esneme sonuçlarına dahil edilmemiştir. Elde edilen deney sonuçlarına dayanarak sac malzeme kalınlığının arttıkça geri esneme değerinin artmasına, zımba yükünün uygulanma süresinin arttıkça geri esneme değerinin azalmasına, bükme açısının arttıkça da geri esneme değerinin artmasına ulaşılabilir. Bükme açısını arttırmanın geri esnemeyi arttırma üzerindeki etkisinin malzeme kalınlığının oluşturduğu etkiye oranla daha önemli bir parametre olduğu saptanmıştır [23].

Başka bir çalışmada da Ötü, AA 5754-O ve AL 1050-O sac malzemelerin V şekilli kalıplarda bükülmesi ve geri esnemesini incelemiştir. 1 mm ve 2 mm sac kalınlıklarında 60°, 90°, 120° kalıp bükme açılarında, 2 mm, 4 mm, 6 mm zımba uç yarıçaplarında, hadde yönüne 0°, 45°, 90° olacak şekilde ve her bir parametre için en az üçer tane olmak üzere yaklaşık 1500 adet numuneye bükme işlemi uygulayarak geri esnemeleri incelemiştir. Dört yöntem uygulanmış olup bunların ikisinde zımba ile kalıp arasına sac kalınlığı kadar boşluk bırakılıp bükme işlemi yapılmış ve bu işlemlerin geri esnemeyi tespit etmede uygun olduğu görülmüştür. Diğer iki yöntemde ise zımba ile kalıp arasına herhangi bir boşluk bırakılmamış olup bu yöntemle elde edilen sonuçların geri esnemeyi tespit etmede uygun olmadığı görülmüştür.

Çalışmada kullanılan V zımbaların uç yarıçaplarının artmasıyla ve zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilme süresinin artmasıyla geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca sac malzemelerin hadde yönü özelliğinin geri esneme açısında farklılıklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Aynı malzeme ve aynı işlem süresinde yalnızca sac malzeme kalınlığının değişken olarak arttırılmasıyla geri esnemenin azaldığı görülmüştür. Deneysel yöntem dışında bükme işlemi, SEY ile analiz edilmiş olup sonuçların kabul edilebilir yakınlıkta olduğu gözlemlenmiştir. SEY için ANSYS/LS-DYNA sonlu elemanlar analizi programından yararlanılmıştır [24].

Pirinç sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti üzerine de çalışmalar yapılmıştır. V bükme yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışmalarda dört deney serisinden ikisinin geri esnemeyi tespit etme açısından hassas olmadığı gözlemlenmiştir. Zımba ile kalıp yüzeyinin arasına sac malzeme kalınlığı kadar boşluk bırakılan çalışmalarda geri esnemeyi test etme açısından düzgün sonuçlar görülürken zımbanın kalıbın dibine tam oturtularak yapılan bükme işlemlerinin düzgün sonuçlar vermediği tespit edilmiştir. Geri esnemenin malzeme ve kalıp ikilisinin fonksiyonlarına göre değişkenlik gösterdiği bir kez daha tespit edilmiş olup sac kalınlığı arttıkça geri esnemenin arttığı, zımbanın sac üzerinde bekleme süresinin arttıkça geri esnemenin azaldığı ve bükme açısının artması ile de geri esneme değerinin arttığı bir kez daha gözlemlenmiştir [25].

Hem deneysel hem analitik tekniklerin benimsendiği bir çalışmada bakır berilyum (CuBe) levhaların farklı ısıtma işlemleri altında geri esneme davranışı incelenmiştir. CuBe için geri esnemeyi tahmin etmek amacıyla çekme özelliklerine dayalı analitik bir çözüm geliştirilmiştir. Bu çözümün, birden fazla yarıçap için test yapabilme imkânı sağlayan değiştirilebilir zımbaya sahip tasarlanmış bir V bükme test cihazının test sonuçları ile bağlantılı olduğu görülmüştür. Ayrıca pekleşmenin ve temperlemenin sacın bükülebilirliği üzerine etkisi gözlemlenmiştir [14].

Arslan, çalışmasında farklı kalınlıklara sahip alüminyum alaşımlarını V bükmeye maruz bırakmış olup bu levhalarda meydana gelen deformasyon ve geri esneme durumlarını incelemiştir. Ayrıca bu malzemelerin ABAQUS programında analizini yapmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre deney sonuçları ve ABAQUS analiz sonuçları arasında birebir örtüşme olmasa da oldukça yakın sonuçlar elde etmiştir. Geri esneme ile levhalarda oluşan gerilmelerin düştüğünü gözlemlemiştir. Ek olarak derin çekme işlemine etki eden

faktörlerden çekme derinliği, sac kalınlığı ve direkt olarak malzemenin etkisini incelemiştir. Yaptığı tüm çalışmalar sonucunda SEY ile yapılan analizlerin soğuk şekillendirme yöntemleri için tutarlı sonuçlar verdiğini saptamıştır [17].

0,5 mm kalınlığındaki çelik sacların geri esneme miktarlarının bükme kalıplarında bükülerek belirlendiği bir çalışmada geri esnemenin önemi vurgulanmıştır. Bükme sonucu meydana gelen geri esnemeyi bulmak için basit ama farklı işlemler yapabilen V kalıp tasarlanmıştır. Bu çalışmada 15 farklı kalıp hazırlanmış ve her biri en az 10 kez bükülmüş 150'den fazla numune ile sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan dört deney serisinden ikisinde malzemenin ezilmesi nedeniyle kalıcı şekil değişikliği meydana gelmiş ve geri esneme tahmini yapılmasına imkan sağlanamamıştır. Malzeme ile kalıbın arasına malzeme kalınlığı kadar boşluk bırakılmış deney serilerinde ise sonuçların geri esnemeyi tahmin etmek için kullanılabilir olduğu görülmüştür. Sonuçlarda geri esnemenin hem malzemeye hem de kalıba bağlı olan bir değişken olduğu saptanmıştır [26].

Başka bir çalışmada geri esnemenin tespiti için analitik yöntem ve deneysel yöntemle başvurulmuştur. Deneyde 90° değişmeyen dişi kalıp üzerine 80°, 85° ve 90° zımbalarla bükme işlemleri sırasıyla uygulanmıştır. Bu üç farklı açıdaki her zımba için 2 mm, 4 mm ve 6 mm zımba uç yarıçapında bükme yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen deney sonuçları ile analitik çözüm sonuçlarının benzerliği ifade edilmiştir [39].

Geri esnemenin daha doğru tespit edilebileceği önerisinde bulunulan bir çalışma da mevcuttur. Öneri olarak sac kalınlığı ve malzeme özelliklerinin etkilerini dikkate alan matematiksel bir model sunulmuştur. Bu matematiksel modelin doğruluğunu sağlamak için serbest V bükme deneyi yapılmıştır. Bu deneyde belli derecelerde yük kaldırılmış ve tekrar yük uygulanmaya başlanmış böylece yükleme ve boşaltma döngüleriyle elde edilen bilgiler ile geri esneme sorunu en aza indirilmeye çalışılmıştır [16].

Verma ve diğerleri, çalışmalarında anizotropinin geri esneme üzerine etkisini incelemiştir. Anizotropi arttıkça geri esnemenin önce azaldığı daha sonra ise arttığı izotropik durumlarda geri esnemenin minimum olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, SEY ile ve bu yöntemle türetilen analitik modelle kontrol edilmiştir [19].

V bükmede geri esneme açılarının tespiti üzerine yoğunlaşıl原因 başka bir çalışmada soğuk haddelenmiş çelik (CRDQ) levha, bükme açısı 60° ve zımba yarıçapı 2 mm sabit olacak şekilde sadece sac kalınlıkları 2 mm ile 4 mm arasında değiştirilerek V bükme işlemine maruz bırakılmıştır. Bükme analizi için Hyperform yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sacın 2 mm ile 3 mm aralığında geri esnemesinin kademeli olarak düştüğü, kalınlığın 3 mm'den 3,2 mm'ye çıkartıldığında ani olarak düştüğü ve 3,2 mm'den 4 mm'e çıkartılan sac kalınlığı sonucunda da geri esneme açısının arttığı tespit edilmiştir [40].

Bauschinger etkisinin geri esnemedeki etkisini araştırmak için yapılan bükme deneyi de çalışmalar arasındadır. Bu deneyde üç farklı AISI çelik ve bir adet alüminyum kullanılmıştır. Bu malzemelerin seçilmesindeki amaç otomotiv sektöründe tercih edilmeleridir. Bükme işlemi sonucunda Bauschinger etkisinin geri esnemenin tahminindeki öneminin alüminyum malzemede çelik malzemelere oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Hatta çelik malzemelerde Bauschinger etkisinin önemsiz olduğu ifade edilmiştir [41].

Yuen, yaptığı çalışmada homojen malzemelerin geri esnemesinin tespitinin aksine katmanlı kompozit çalışma parçası kullanmıştır. Kompozit parçanın geri esnemesinin tahmini için basitleştirilmiş matematiksel denklemler iyileştirilmiştir. Geri esnemenin tespiti için her bir katmanda gerinim ve gerilimin incelenmesinin gerekliliği belirtilen çalışmada matematiksel sonuçların deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirtilmiştir [20].

Çelik malzemeye U bükme işlemi uygulanan bir çalışmada sonlu elemanlar analizi kullanılarak geri esnemeyi tespit etmek amaçlamaktadır. Amaç doğrultusunda ABAQUS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak yapılan analizlerin hem U büküm hem de çift büküm işlemlerinde elde edilen deney sonuçları ile benzerliğine ulaşılmıştır [42].

Başka bir çalışmada da CK67 çelik saclarda geri esnemeye etki eden faktörler, V bükme ve U bükme kalıplarında deneysel, sayısal ve SEY ile incelenmiştir. Malzeme parametrelerinin çekme testi ile belirlendiği, 0,5; 0,7 ve 1 mm kalınlıktaki sacların büküldüğü bu çalışmada sac kalınlıkları arttıkça geri esneme azalmış ve zımba uç yarıçapı büyüklüğüne göre geri esneme miktarında değişiklik meydana gelmiştir [43].

Bükme işlemine sıklıkla maruz bırakılan alüminyum malzemeler için geri esnemenin belirlenmesi adına deneysel verilerle sonlu elemanlar analizlerinin karşılaştırılması yöntemi

uygulanan başka bir çalışmada da mevcuttur. SEY için Marc/Mentat yazılımı kullanılırken düzlem gerinim koşullarını dikkate alan bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak geri esnemenin bükülme açıları ve yer değiştirmeler açısından kolayca tespit edilebileceği sonucuna varılmıştır [44].

Ling ve diğerleri, ABAQUS programı ile SEY'i kullanarak L bükme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bükmede kullanılan levhalar AL2024-T4 malzemedir. Çok sayıda simülasyonun yapıldığı çalışmada bükme işlemindeki amaç geri esnemenin analizini yapmaktır. ABAQUS programıyla bu çalışmanın yapılabileceği gösterilmiştir [45].

3.2. Çalışmaların Değerlendirilmesi

Geri esnemenin varlığı ve tam olarak tespiti bükme işlemlerinde her zaman bir sorun olmuştur. Bu tespitin düzgün bir şekilde yapılması için birçok parametre dikkate alınmalıdır. Tüm çalışmalara rağmen geri esneme bükme işlemlerinde günümüzde devam eden büyük bir problemdir.

Literatürde geri esneme tespiti için yapılmış deney, matematiksel formül ve sonlu elemanlar analizleri bulunmaktadır. V bükme deney sonuçlarını, matematiksel modelleri ve SEY ile yapılan analiz sonuçlarını karşılaştırdığımızda çalışmaların genelinde verilerin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Geri esnemeye etki eden davranışların; malzeme parametreleri, proses parametreleri, kalıp parametreleri olduğu görülmüştür. Geri esnemeye etki eden faktörler malzeme parametreleri açısından değerlendirildiğinde başta malzemenin türü ve kimyasal yapısı olmak üzere sacın kalınlığı, anizotropi, akma dayanımı, elastisite modülü, pekleşme gibi özelliklerdir. Bu özelliklerin bazılarının birbiriyle ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca zımbanın bekleme süresi, bükme sıcaklığının etkisi, uygulanan bükme kuvveti gibi etkenler de geri esnemede proses parametrelerinin etkisi olarak incelenmiştir. Bükme açısı, bükme yarıçapı, zımba ucu yarıçapı, kalıp açısı gibi kalıba bağlı parametrelerin önemi de yine geri esneme değişiminde sıkça vurgulanmıştır. Bu parametrelerden bazılarının geri esneme üzerindeki etkilerinin diğerlerine göre daha büyük olduğu ve geri esneme miktarını tespit etmede ve geri esneme değişiminde önemli rol oynadığı görülmüştür. Bazı çalışmalarda bükme yarıçapı arttıkça geri esneme artar, uygulanan kuvvet süresi uzatılırsa geri esnemede azalma görülür şeklindeki genel yargılara ulaşılmıştır. Ayrıca akma dayanımı küçükse geri esneme küçük olur, elastiklik modül

arttıkça geri esneme azalır gibi sonuçlara da ulaşılmıştır. Ancak bu gözlemlerin başta malzeme türü olmak üzere diğer bazı parametrelerin etkisiyle değişebileceği, sonuçlarda farklılıkların görülebileceği dikkat edilmesi gereken bir durumdur. İncelenen bazı çalışmalarda geri esnemeyi etkileyen faktörlerin geri esnemeye nasıl etki ettiklerinin tespiti için deney sonuçları ile matematiksel sonuçların, deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının ve matematiksel sonuçlar ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması yöntemine başvurulmuştur. Bu yöntemler sonucunda geri esneme büyüklüğü tespit edilmeye çalışılmış olup bununla alakalı birçok grafik sunulmuştur.

Geri esnemenin tespitinin amacı geri esnemeyi etkileyen faktörlerin nasıl ve ne şekilde etki oluşturduğundan yola çıkarak geri esnemeyi engellemek ve istenilen parçanın üretiminde geri esneme probleminin sorun oluşturma ihtimalini azaltmaktır. Geri esnemenin telafisi için birkaç yöntem sunulmakla beraber geri esnemenin önceden tespit edilip bükmenin ona göre yapılması en sağlıklı yöntemlerden birisidir.

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma endüstride bir problem olan sac metal şekillendirmede meydana gelen geri esneme sorununun sonlu elemanlar analizi ile tespit edilmesi üzerinde duracaktır. Bütün malzemeler sınırlı bir elastikiyet modülüne sahip olduğundan malzeme üzerine binen yük kaldırıldıktan sonra plastik deformasyonu bir miktar elastik geri dönüş takip eder. Bundan dolayı sac malzemelerin şekillendirilmesinde malzeme ilk haline geri dönmeye çalışır ve geri esneme meydana gelir. Geri esneme, şekillendirme sonucu istenen geometrinin elde edilememesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı geri esnemenin telafi edilmesi gerekmektedir. Geri esnemenin telafisi için öncelikle miktarı tespit edilmelidir. Ülke kaynaklarının optimum seviyede kullanılması düşüncesiyle ve literatürde birçok deneysel çalışmanın mevcudiyeti sebebiyle bu çalışmada deneysel verilerin önceki çalışmalardan alınarak kullanılması, SEY'e dayalı ABAQUS programı yardımıyla da V-kalıpta bükme işleminin ve sac metalin geri esneme davranışının analiz edilmesi planlanmaktadır. Deney parametreleri dikkate alınarak SEY ile yapılacak olan analizlerin basit bir şekilde sonuçlandırılmasına ve bu sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılmasına yer verilecektir.

Sayın'ın yapmış olduğu deneyde toplamda üç adet malzeme türü kullanılmıştır. Malzemeler AISI 304, EN 10130 DC01 ve bakır olmakla beraber bu malzemelerin kimyasal özelliklerine, akma dayanımına, çekme dayanımına ve yüzde uzamasına yer verilmiştir. 75x50 mm ölçülerinde levhalara 60°, 90°, 120° kalıp açılarında V bükme işlemi uygulanmıştır. Her kalıp için 2 mm ve 4 mm olmak üzere iki farklı zımba uç yarıçapında uygulanan işlemlerde her levha örneğinden 3 adet kullanılmış ve toplamda 108 bükme işlemi ve her malzeme türü başına 12 adet olmak üzere toplam 36 adet bükme ve geri esneme sonucu elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde bu deneyin kullanılmasının sebebi kalıp ölçülerinin, malzemelerin akma dayanımlarının ve malzemelerin çekme dayanımlarının ayrıca deneyin yapılmasında ve ölçülmesinde kullanılan yöntem ve araçların açık bir şekilde belirtilmesidir [4].

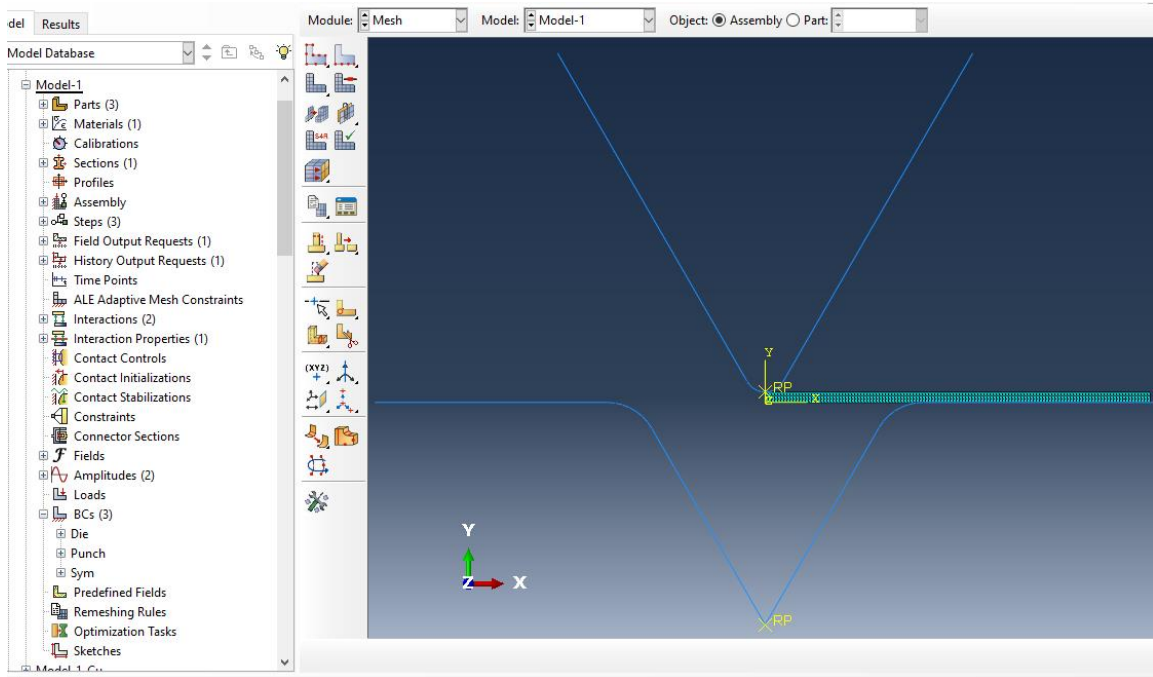
Deneyin analizi için kullanılan program ABAQUS sonlu elemanlar programıdır. Bükme işleminde dinamik açık çözücü kullanılmıştır. Geri esneme tespiti için ise bükme işlemi biten levha tekrar bir model oluşturularak ABAQUS/Standart çözücüye aktarılmıştır. Standart

çözücüde levha üzerinden zımba kaldırılıp malzeme kendi haline bırakılmış ve geri esneme gözlemlenmiştir.

Deneyin sonlu elemanlar programına aktarımı sırasında bazı kabuller yapılmıştır. Malzemelerin tamamıyla homojen olduğu düşünülmüştür. Bunun yanında deneyin oda sıcaklığında yapıldığı ve sonuçlarının doğru olduğu kabul edilmektedir. Yüzey temas koşulları için sürtünme katsayısı 0,1 alınmıştır.

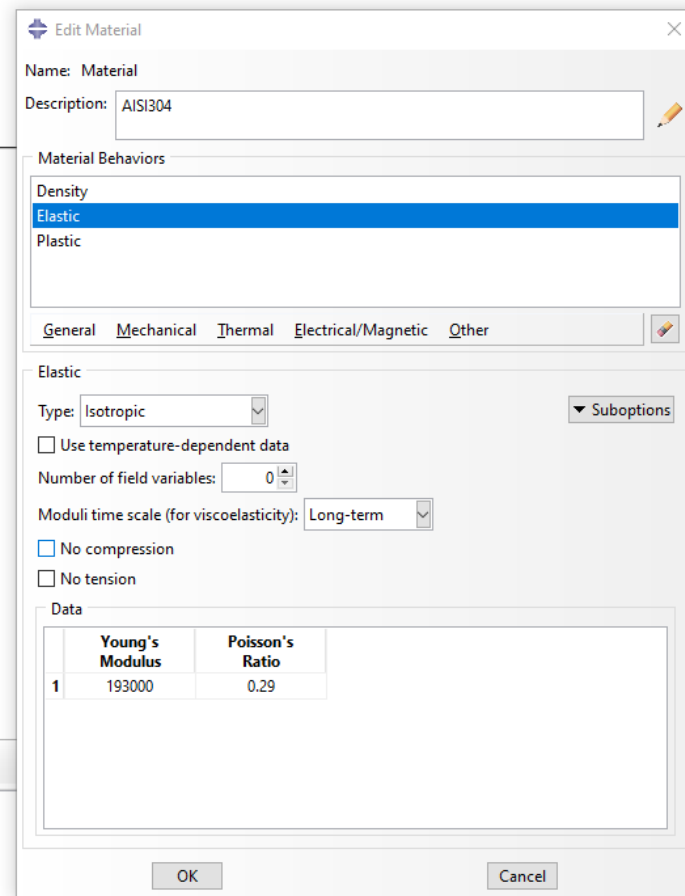
Deney, ABAQUS/CAE programında 2D düzlem gerinim şartlarında çözülmüştür. Kuvvetin dik bir şekilde uygulanmasından ve levha genişliğinden dolayı düzlemsel gerinim şartları uygulanabilir bir seçenektir. Ayrıca bu yöntemin seçilmesinin en önemli nedenlerinden birisi simülasyon süresini kısaltmaktır.

Arayüzü Şekil 4.1’de görülen ABAQUS/CAE’de deneyde olduğu gibi toplamda 36 bükme analizi gerçekleştirilmiştir. Her model için aynı yöntem izlenmiştir. İlk olarak levha 37,5 mm olacak şekilde yarı uzunluğunda ve deforme olabilecek şekilde oluşturulmuştur. Levhanın yarı uzunlukta oluşturulması ile hem analiz süresinin kısılmasını sağlamak hem de mesh bölümünde daha esnek davranabilmek amaçlanmaktadır. Daha sonra zımba ve kalıp rijit olacak biçimde oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. ABAQUS/CAE arayüzü

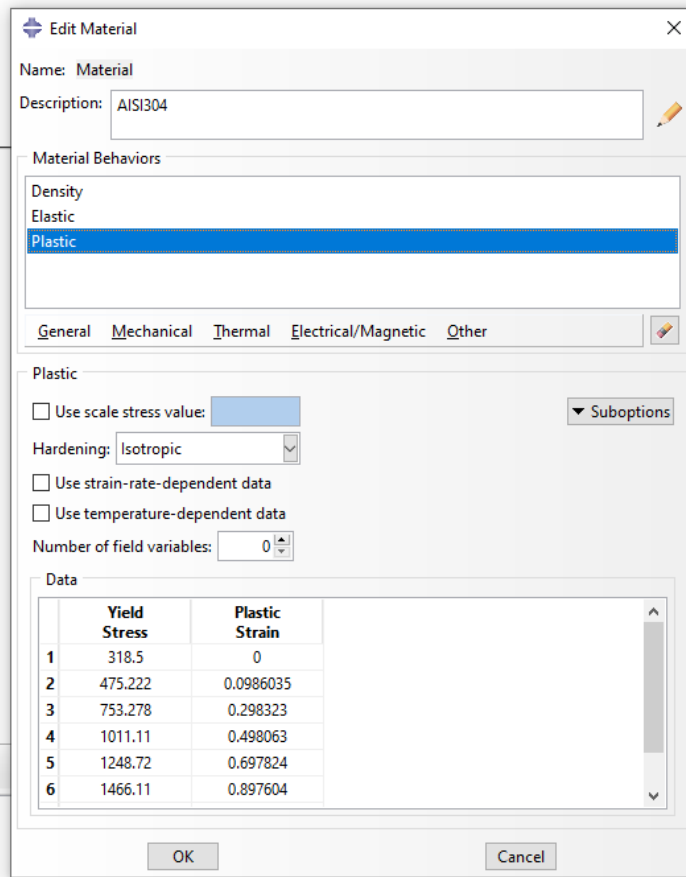
Malzemelerin tanımlanması ABAQUS yazılımında en önemli adımlardan birisidir. Öncelikle analiz için gerekli olan malzeme bilgileri tespit edilmelidir. Elasto-plastik olarak düşünülen V bükme işlemi için yoğunluk, elastik bölge ve plastik bölge değerleri gereklidir. Literatürde bulunan bükme işlemi uygulanan deneylerin çoğunda levhaların malzeme özelliklerinin detayları verilmemiştir. Bundan dolayı önceki V bükme deneyi çalışmalarının birçoğu ABAQUS sonlu elemanlar programına aktarılamayacak durumda eksik veriye sahiptir. Analizi yapılacak olan deneyin seçilmesinin sebeplerinden birisi de malzemelerin belli bir aralıkta akma ve çekme dayanımlarının, uzama miktarlarının belirtilmiş olmasıdır. Böylece programa malzeme aktarımı diğer deneylerdekinden nispeten daha kolay bir şekilde yapılabilecektir. Ancak bu bilgiler de düzlem gerinim koşullarının esas alındığı bir çalışmada malzeme özelliklerini tam olarak bilgisayar ortamına aktarmak için yeterli değildir. Bundan dolayı malzeme tanımları yapılırken yoğunluk, elastik bölge, plastik bölge değerleri literatürden benzer malzemeler kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.2’de ABAQUS ortamında elastik bölge tanımına yer verilmektedir. Her malzeme için elastik bölge tanımında bu yol izlenmiştir.



Şekil 4.2. Elastik bölge değerlerinin programda tanımlanması

ABAQUS programında birimler kullanıcının girdiği değerler üzerinden belirlenmektedir. En başta kalıp ve levhalar oluşturulurken birim olarak milimetre kullanıldığı için tüm adımlarda gerilme değerleri MPa cinsinden tanımlanmalıdır. Young Modülü değeri girilirken de buna dikkat edilmiştir.

ABAQUS yazılımı plastik bölgeyi tanımlarken gerçek gerilme-gerçek gerinim grafik değerlerinden faydalanmaktadır. Bu yüzden malzemelerin plastisitesi tanımlanırken deneyde kullanılan malzemelerin akma ve çekme verilerine uygun olarak gerilme-gerinim grafikleri önceki çalışmalardan elde edilmiştir. Gerilme-gerinim grafiğinden alınan değerler eğrilere karşılık gelen noktalardan elde edilmiştir. Gerilim değeri karşılığında gerinim değeri olacak şekilde alınan veriler programa Şekil 4.3'teki gibi tanımlanmıştır. Plastik değerlerin tanımında da her malzeme için uygun grafik seçilip programa tanımlama sırasında aynı yol izlenmiştir.



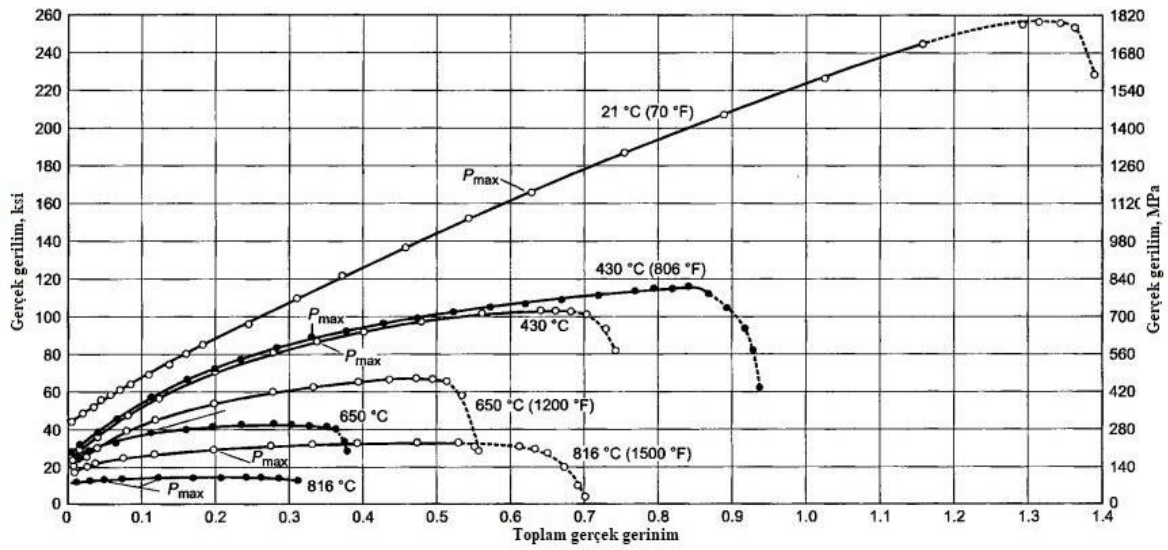
Şekil 4.3. Plastik bölge değerlerinin programda tanımlanması

AISI 304 için sisteme girilen elastik bölge değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Ek olarak yoğunluk değerine de yer verilmiştir.

Çizelge 4.1. AISI 304 için kullanılan malzeme özellikleri [46]

AISI 304	
Yoğunluk	8,0 g/cm ³
Elastisite modülü	193 GPa
Poisson oranı	0,3

AISI 304 paslanmaz çelik tanımlanırken deneyde kullanılan malzemenin akma ve çekme dayanımları, uzama miktarı ve kimyasal yapısı göz önünde bulundurulmuştur. MPa cinsinden plastik değerlerin alındığı gerilme-gerinim eğrisi de Şekil 4.4’te verilmiştir.



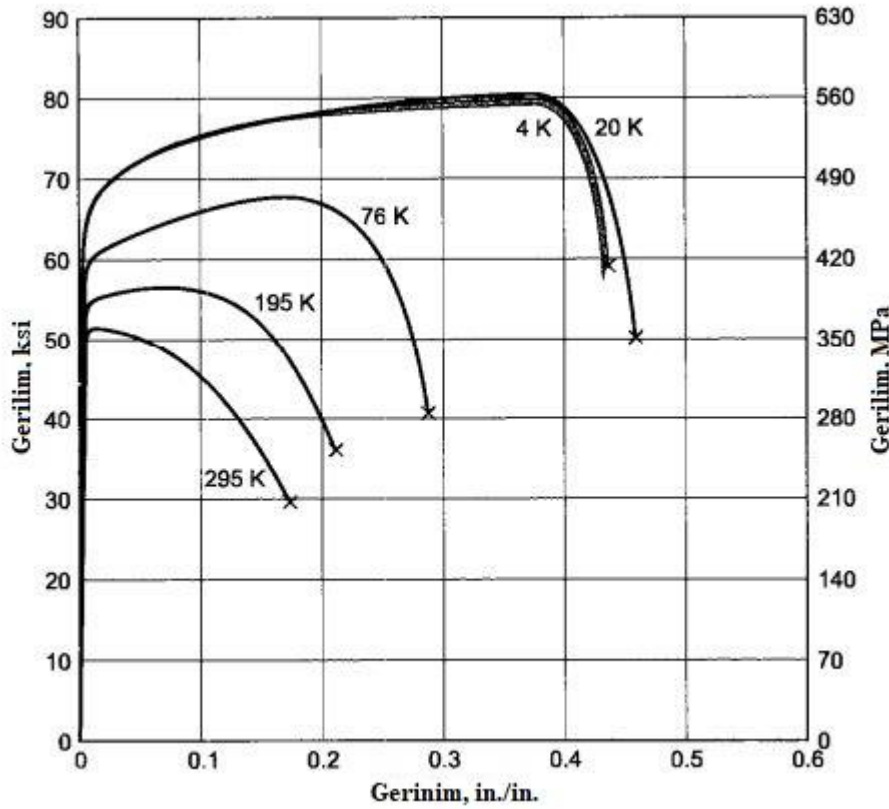
Şekil 4.4. AISI 304 için kullanılan gerilme-gerinim eğrisi [47]

Deneyde kullanılan bakır malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı ve kimyasal yapısı göz önünde bulundurularak literatürden soğuk çekilmiş akma mukavemeti yüksek saf bakır özelliklerine uygun bir gerilme-gerinim eğrisi seçilmiştir. Seçilen bakırın grafiği Şekil 4.5’te gösterilmiş olup programa aktarım sırasında MPa değerlerinden yararlanılmıştır. Bu grafik mühendislik gerilimi ve mühendislik gerinimi verilerine göre hazırlanmıştır. Veriler bu koşulda ABAQUS/CAE’ye aktarılamaz. Basit eşitlikler ile mühendislik değerleri gerçek değerlere dönüştürülmüş ve gerinim değeri sıfır olacak şekilde ayarlanarak plastik bölge

değerleri girilmiştir. Bakır için plastik bölgenin yanı sıra elastik bölge için girilen değerler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Bakır için kullanılan malzeme özellikleri [48]

Cu	
Yoğunluk	8,94 g/cm ³
Elastisite modülü	115 GPa
Poisson oranı	0,33

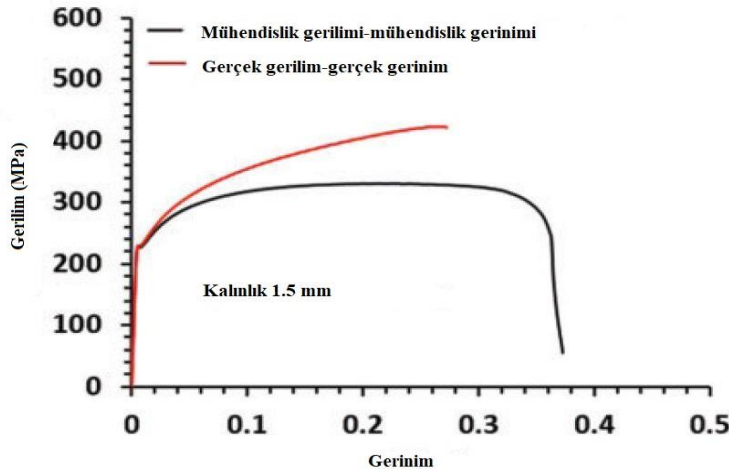


Şekil 4.5. Bakır için kullanılan gerilme-gerinim eğrisi [47]

DC01 malzeme için de akma ve çekme dayanımına uygun gerilme-gerinim eğrisi Şekil 4.6’da belirtilmiştir. Elastisite modülü, poisson oranı gibi elastik bölge tanımında kullanılan değerler düşük karbonlu çelik özelliklerinden elde edilmiştir. Bu özellikler Çizelge 4.3’te belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. DC01 için kullanılan malzeme özellikleri [49]

DC01	
Yoğunluk	7,87 g/cm ³
Elastisite modülü	200 GPa
Poisson oranı	0,3

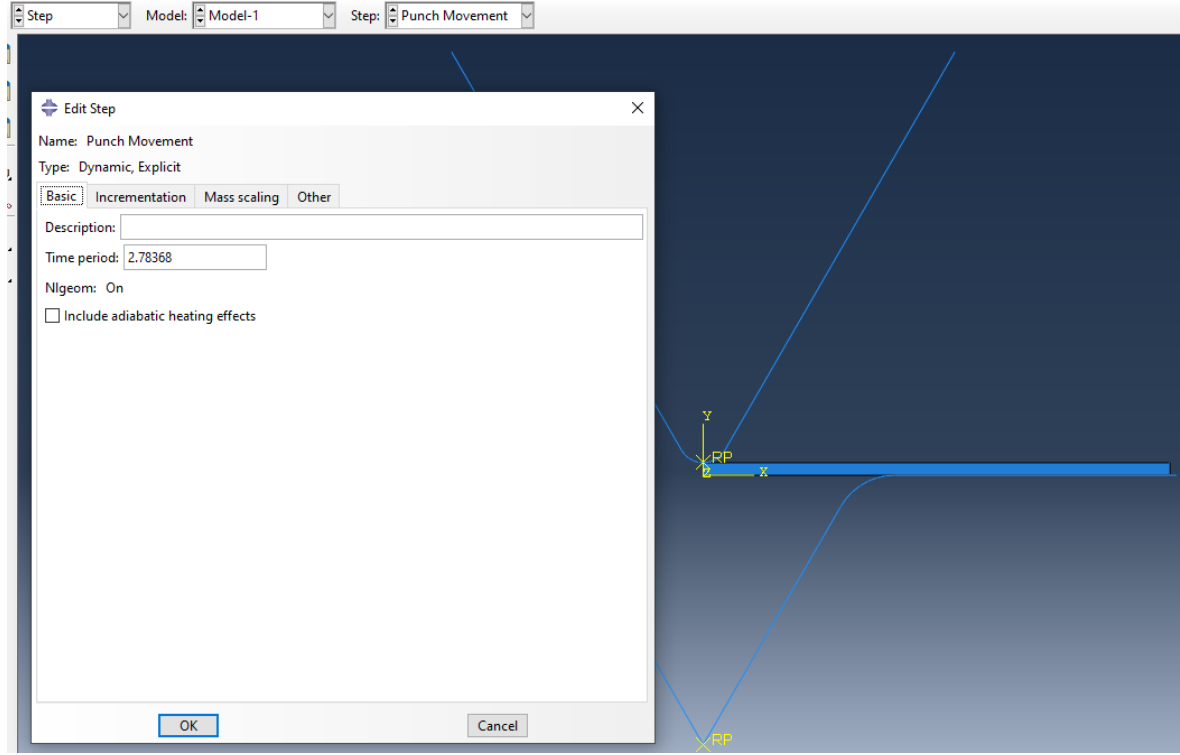


Şekil 4.6. DC01 için referans kullanılan gerilme-gerinim eğrisi [50]

Plastik bölge tanımlanırken sertleşme modeli olarak her malzeme için izotropik sertleşme modeli seçilmiştir. Bu model en çok kullanılan sertleştirme modellerinden birisidir. İzotropik sertleşme modelinin kullanımı basittir. Belirtilen bilgilerin (Yoğunluk, elastisite modülü, poisson oranı, gerilme-gerinim eğrisi) kullanılması bu modelin tanımlanmasında kullanılmıştır. Özetle; hem analizin basit olması hem de analizin uygulanmasında gerekli olan malzeme bilgilerine nispeten daha kolay ulaşılması izotropik malzeme modelinin sonlu elemanlar analizi için uygun görülmesine neden olmuştur. Malzeme özellikleri programa aktarıldıktan sonra tüm bu veriler levhaya Section komutu yardımıyla tanımlanmıştır.

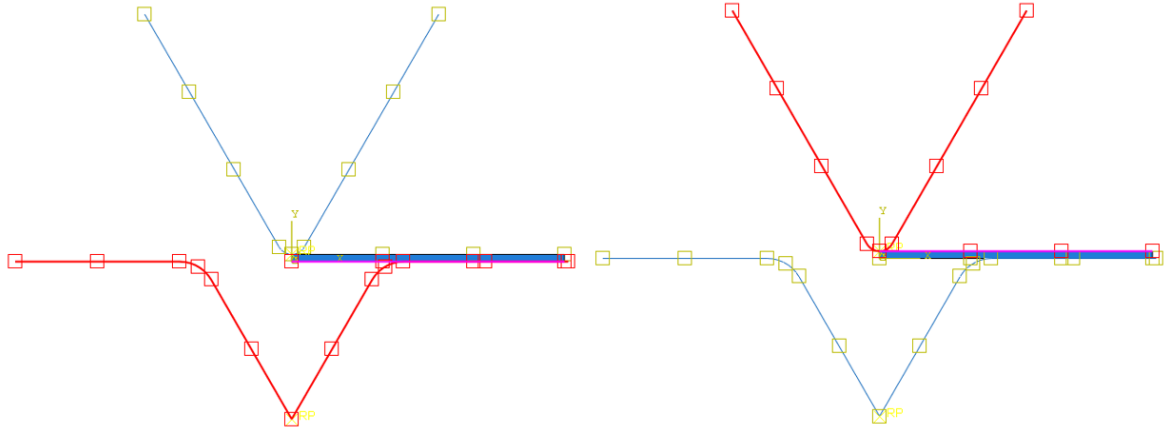
Malzeme tanımlandıktan sonra zımba, kalıp ve levha montaj bölümünde birleştirilmiştir. Levha kalıba yerleştirilmiştir ve zımba levhaya temas edecek şekilde konumlandırılmıştır. Zımba, kalıp ve levha için ileride yapılacak olan sınır koşullarının tanımlanması aşamasının, montaj bölümünde referans noktalarının atanmasıyla temeli oluşturulmuştur. Sonraki adımda zımbanın ilerleme süresinin belirlenmesi için her bükme işleminde farklı olan y yönlü yer değiştirme, deneyde sabit olarak uygulanan 6,7 mm/s pres hızına bölünerek

hesaplanmıştır. Ayrıca bu adımda Şekil 4.7’de görüleceği üzere çözücü tanımı Dynamic, Explicit yapılmıştır.



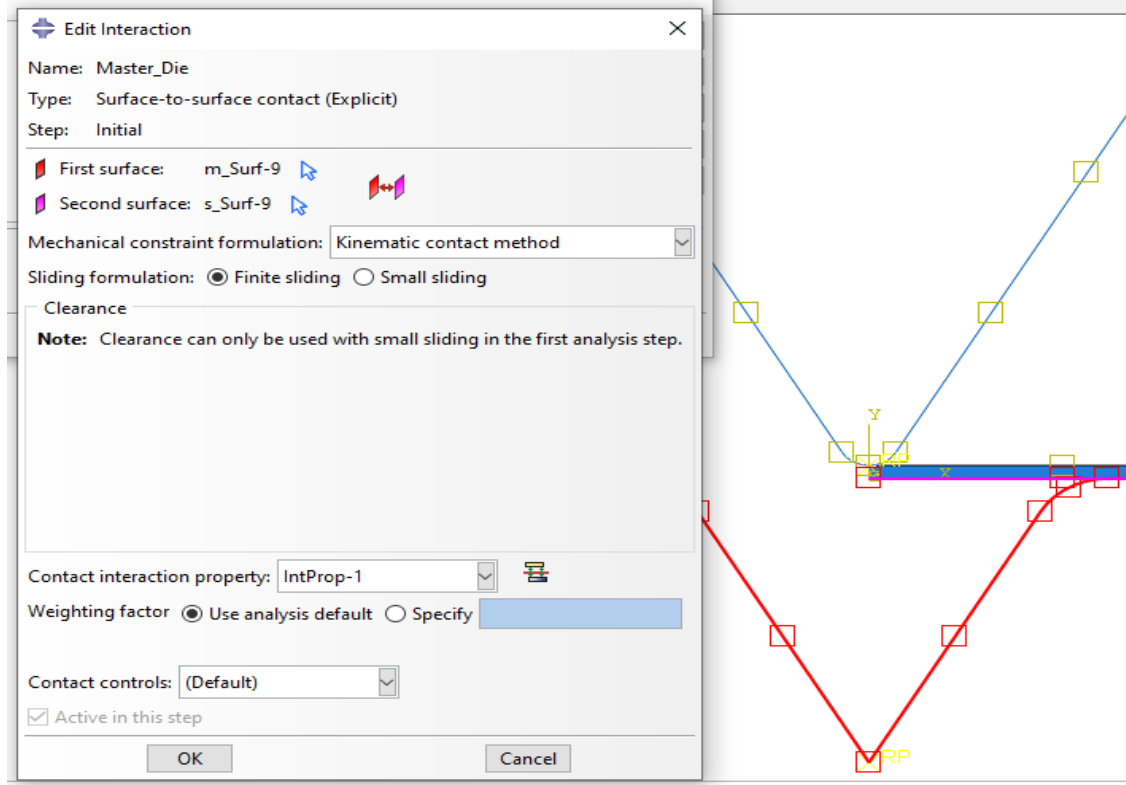
Şekil 4.7. Çözücü tipi, zaman ve artış bölümü

Yüzeylerin teması, kalıp yüzeyi-levha alt yüzeyi, zımba yüzeyi-levha üst yüzeyi olacak şekilde tanımlanmıştır. Şekil 4.8’de tüm bu tanımlamalar kırmızı renklerle gösterilmiştir. Temas yüzeyleri seçilirken ilk olarak kalıp seçilmiştir. Levha alt yüzeyi ise ikinci olarak seçilmiştir. Böylece kalıp master (efendi) olarak tanımlanırken levha alt yüzeyi ona bağlı olarak değişen slave (köle) olarak tanımlanmış olur. Zımba ve levha üst yüzeyinin teması sırasında da zımba ilk seçilerek master olarak tanımlanırken levha üst yüzeyi ikinci seçilerek slave olarak tanımlanmıştır.



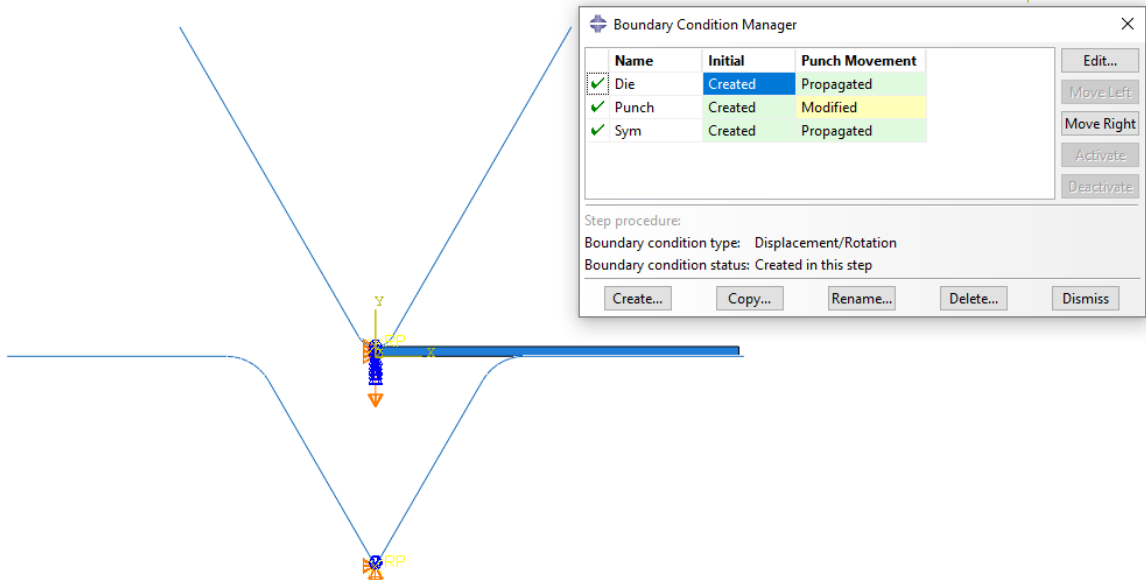
Şekil 4.8. Temas yüzeyleri

Yüzey temas koşulları Normal Behavior ve Hard Contact olarak tanımlanmıştır. Hard Contact bir sonlu eleman analizi simülasyonunda etkileşim halindeki iki veya daha fazla cisim arasındaki bir tür temas davranışını ifade eder. Bu davranış temas yüzeyleri arasında geçişe izin vermez. Böylece temas halindeki cisimlerin üst üste binmesi veya birbirinin içine girmesi engellenmiş olur. ABAQUS bu engellemeyi yaparken itici kuvvet uygular ve penetrasyonu önler. Hard Contact genel olarak bu çalışmada da olduğu üzere deforme olabilen parçaların rijit parçalarla birbirine nüfuz etmemesi gereken durumlarda kullanılır. Yüzey temas koşulları Interaction Properties bölümünde yapılmış olup iş parçalarının teması sırasında bağlantı özelliği olarak Şekil 4.9'daki gibi "Intprop-1" olarak eklenmiştir. Ayrıca bu şekilde temas tipi için açık çözücüde yüzeylerin teması tipi kullanıldığı da görülmektedir. Bunun yanında kinematik düzeltici algoritması seçilerek hiçbir penetrasyona izin verilmemiştir.



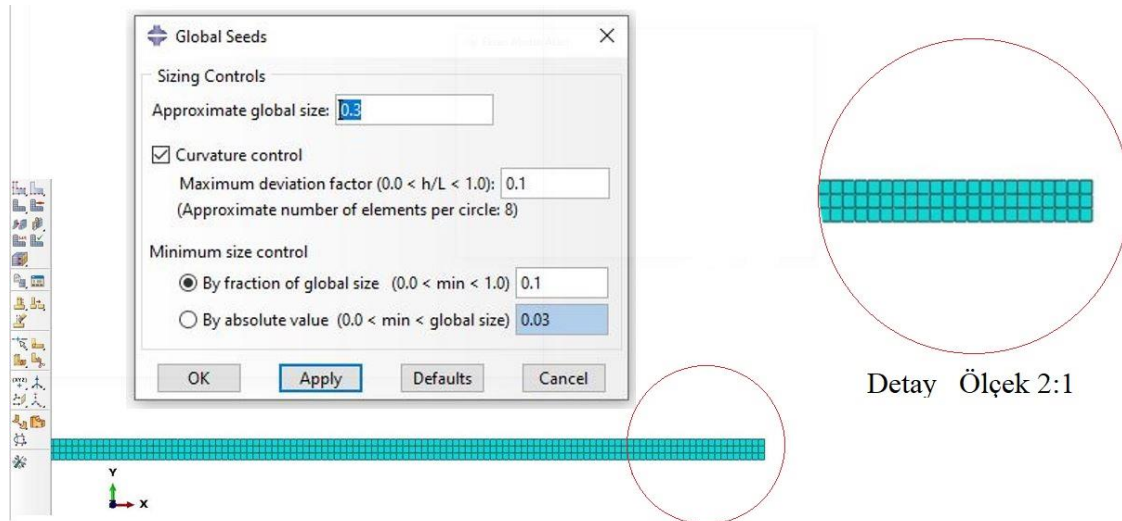
Şekil 4.9. Yüzey temas koşullarının detay gösterimi

Yüzey temasları tanımlandıktan sonra sınır koşulları belirlenmelidir. Farklı kalıp açılarında, farklı zımba açılarında, farklı zımba uç yarıçaplarında ve farklı levha kalınlıklarında uygulanan bükme işlemlerinde her açı ve kalınlık için belirlenen zımbanın ineceği en son konum, yer değiştirme miktarları bölümünde girilerek sınır koşullarında tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra kalıp hareket etmeyecek şekilde tanımlanmıştır. Yarım levhanın simetrik olarak işlem görebilmesinin belirtilmesi de yine sınır koşullarında tanımlanan başka bir adımdır. Sınır koşullarının genel gösterimi Şekil 4.10'da verilmektedir.

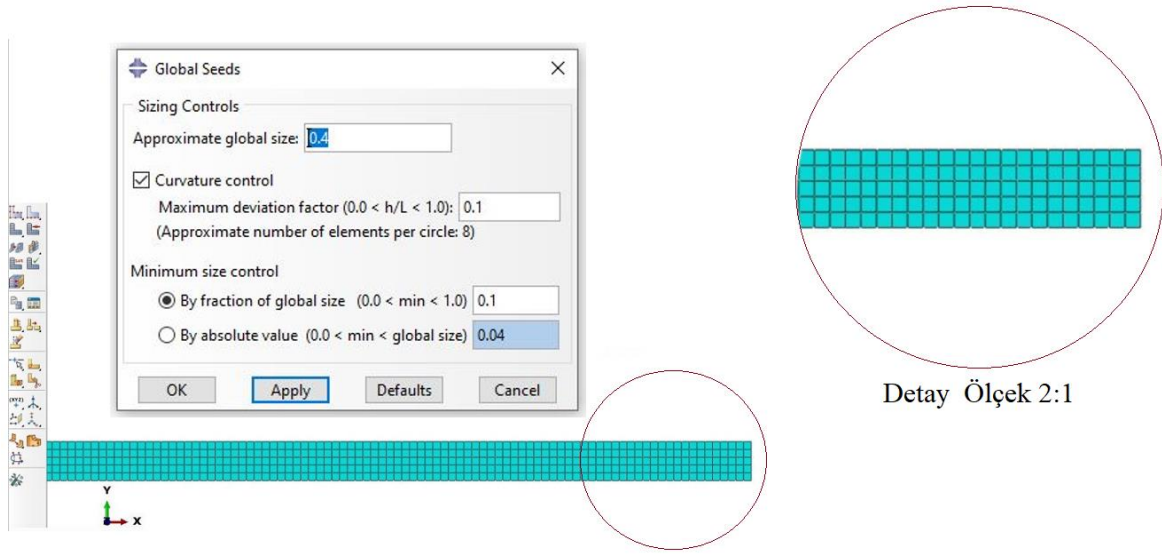


Şekil 4.10. Sınır koşulları adımı

Sınır koşullarının tanımlanmasından sonra çözücünün başlaması için öncelikle mesh tanımlı yapılmıştır. Farklı kalınlıklarda levhalar için mesh tanımları izin verilen maksimum sayıda uygulanmıştır. Analizlerde dört düğümlü çift doğrusal düzlem gerinim dörtgeni, azaltılmış entegrasyon süreklilik ögesi (CPE4R) kullanılmıştır. 1 mm levhalar için 375 element sayısı kullanılırken 2 mm levha kalınlığında 470 element sayısı kullanılmıştır. Mesh yapısı 1 mm levhalar için Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



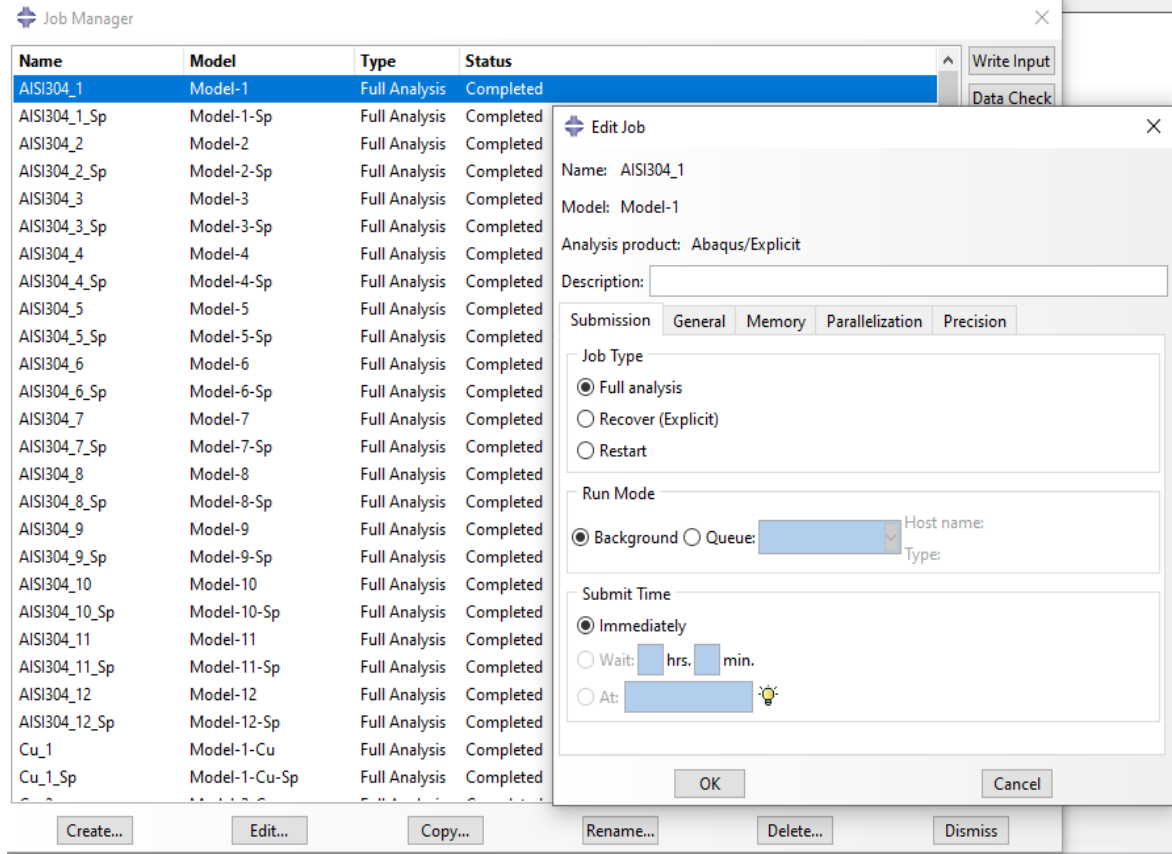
Şekil 4.11. 1 mm kalınlıktaki levhalar için mesh yapısı



Şekil 4.12. 2 mm kalınlıktaki levhalar için mesh yapısı

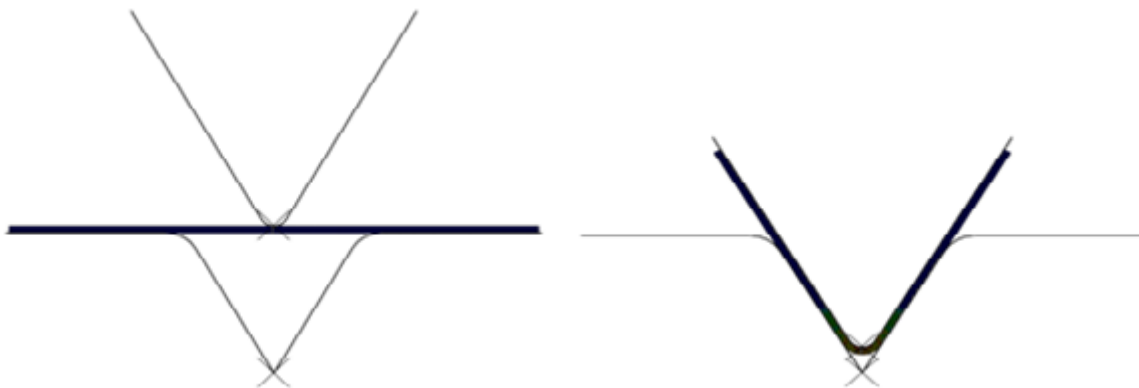
2 mm levha kalınlığı için mesh yapısı Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Mesh işlemi sırasında büyüklüklerin belirlenmesinin yanı sıra teknik olarak Structured tip seçilmiştir. Böylece daha basit, sınır koşullarına daha uygun bir ağ yapısı hedeflenmektedir. Ancak mesh bölümünde ABAQUS programının “Learning Edition” sürümü kullanılması nedeniyle maksimum 1000 düğüme kadar mesh yapısına izin verilmektedir. Bu durum mesh yapısının sınırlı koşullarda oluşturulmasına neden olmuştur.

Mesh bölümünün de tamamlanmasıyla beraber çözücünün başlatılması için Job oluşturulmalıdır. Şekil 4.13’te görülebilen Job adımı tüm adımlar bittikten sonra analizin başlatılması görevini yapmaktadır. Analiz başlamadan önce her bükme için yeni bir Job oluşturulmuştur. Daha sonra sırasıyla Data Check ve Submit adımlarına geçilmiştir. Submit sonucunda çözücü çalışmaktadır.



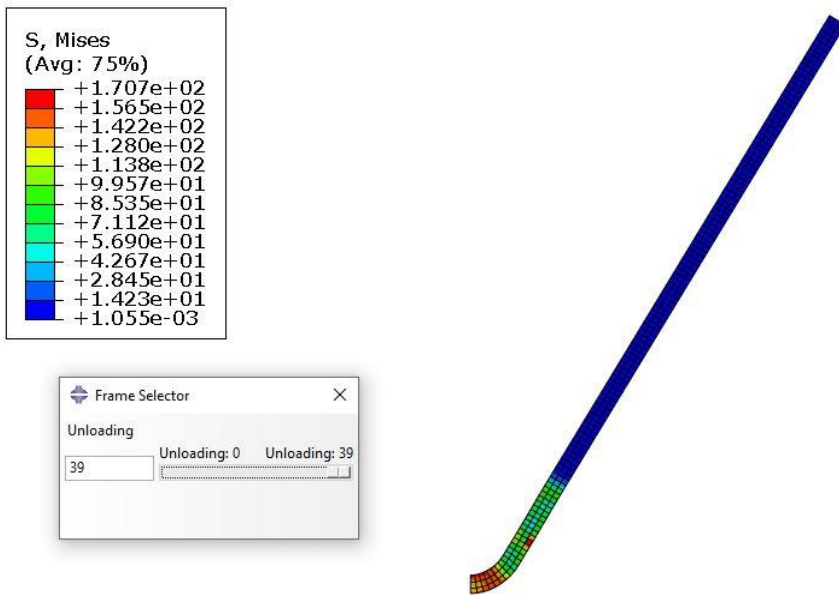
Şekil 4.13. Job bölümü

Analizin tamamlanmasıyla birlikte bükme işlemi yapılmış olur. Bükme işleminin başlangıcı ve son durumu Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



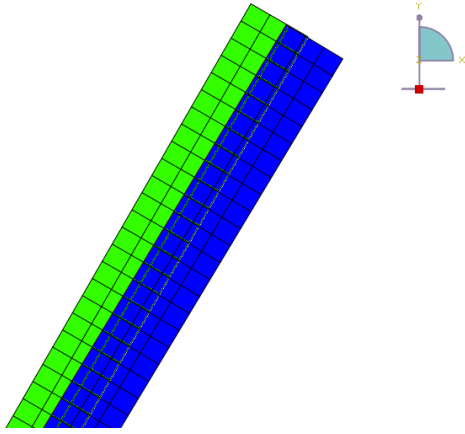
Şekil 4.14. V-kalıpta bükme işleminin ABAQUS programında gösterimi

Levhalar büküldükten sonra geriye geri esnemelerini incelemek kalmaktadır. Geri esnemenin belirlenmesi için bükülen levhalar, tam olarak büküldükleri anın başlangıç adımı olması şartıyla yeni bir çözücüye aktarılmıştır. Bu adımın tanımlanması için montaj, zaman ve artış, yüzey temas koşulları son olarak da sınır şartları bölümleri güncellenmiştir. Bükülmüş levhanın yeni modele aktarımı ve yapılan güncelleştirmelerden sonra Predefined Fields bölümüne bükülme sırasında kullanılan Job ismi girilmiştir. Son olarak ABAQUS/Standart çalıştırılıp malzeme serbest bırakılmıştır ve geri esnemesi gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. Yük boşaltımından sonraki durum

Kapalı çözücü Şekil 4.15'teki gibi tamamlandıktan sonra geri esneme açıları belirlenen düğüm noktalarının koordinatlarından hesaplanmıştır. Koordinatlar 2 düğüm noktasından Query komutuyla alınmıştır. Bu düğüm noktaları levhanın en dış uç noktasından zımba yarıçapına göre şekillenen kısmın birkaç düğüm sonrasına kadar olan arayı tanımlayacak şekilde belirlenmiştir. Koordinatlar AutoCAD programına aktarılarak son durumdaki açı değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.16. Geri esneme durumu

Şekil 4.16’da yeşil renkli kısım geri esneme öncesi mavi renkli kısım ise geri esneme sonrası levha konumunu göstermektedir. Geri esnemenin etkisi net bir şekilde görülebilmektedir. ABAQUS yazılımının Results bölümünde geri esneme değerlerinin yanında gerilme değerleri de gözlemlenebilmektedir.

5. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde geri esneme değerleri için deney sonuçlarının ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılmış olup simülasyonlar sırasında meydana gelen gerilmeler genel olarak yorumlanmıştır.

5.1. Deney ve Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çizelge 5.1. AISI 304 levha için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kalıp Açısı [°]	Sac Kalınlığı [mm]	Bükme Radyüsü [mm]	Geri Esneme [°] (Deney)	Geri Esneme [°] (Analiz)
60	1	2	2,16	1,96
		4	3,29	2,25
	2	2	2,00	1,26
		4	3,15	1,29
90	1	2	0,93	1,39
		4	2,66	1,51
	2	2	0,72	0,51
		4	1,18	0,56
120	1	2	0,70	0,44
		4	1,84	0,58
	2	2	0,40	-0,29
		4	1,16	-0,02

Çizelge 5.2. Bakır levha için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kalıp Açısı [°]	Sac Kalınlığı [mm]	Bükme Radyüsü [mm]	Geri Esneme [°] (Deney)	Geri Esneme [°] (Analiz)
60	1	2	5,23	1,22
		4	8,19	4,54
	2	2	1,49	1,63
		4	2,15	2,99
90	1	2	2,54	0,57
		4	5,95	3,79
	2	2	1,53	1,97
		4	2,55	2,75
120	1	2	2,43	-0,30
		4	4,65	2,72
	2	2	1,79	-0,35
		4	3,46	2,09

Çizelge 5.3. DC01 levha için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Kalıp Açısı [°]	Sac Kalınlığı [mm]	Bükme Radyüsü [mm]	Geri Esneme [°] (Deney)	Geri Esneme [°] (Analiz)
60	1	2	1,32	1,34
		4	2,26	1,42
	2	2	1,04	0,90
		4	1,77	0,82
90	1	2	1,59	1,07
		4	2,56	0,98
	2	2	0,19	-0,03
		4	0,30	0,31
120	1	2	0,60	0,63
		4	0,69	0,41
	2	2	0,38	-0,01
		4	0,56	-0,01

Deney sonuçlarının ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar incelendiğinde genelde analiz sonuçlarının deney sonuçlarına oranla geri esnemeyi daha az hesapladığı ancak sonuçların çoğunlukla aynı eğilimde olduğu görülmektedir.

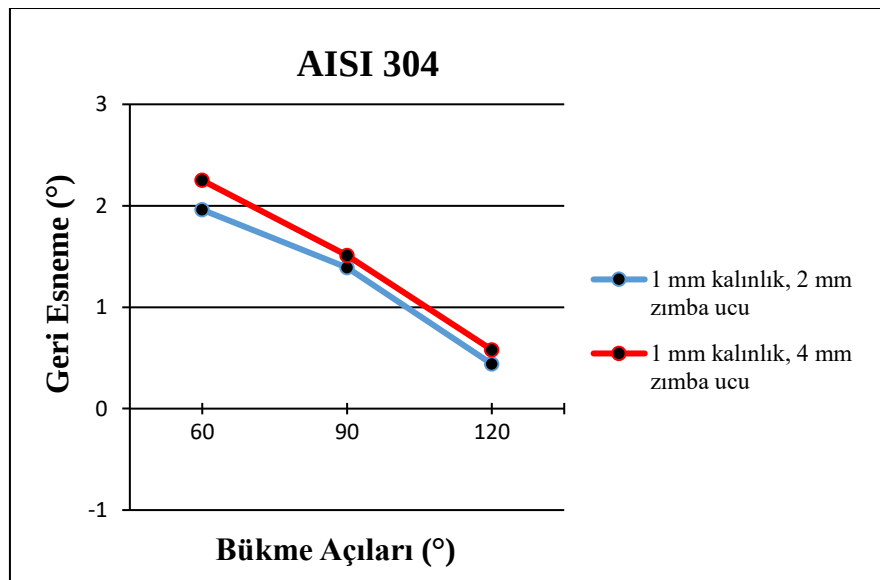
Meydana gelen farklılıkların nedeni simülasyon adımlarında meydana gelebilecek sapmalar olabilir. Ayrıca SEY ile bükme işleminde geri esnemenin tespiti için malzeme özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Mevcut deneyde kullanılan AISI 304, bakır ve DC01 malzemelerin elastik ve plastik davranışlarının hesaplanması için gerekli deneylerin bizzat yapılamaması ve bu nedenle gerilme-gerinim eğrilerinin hesaplanamayıp literatürdeki benzer grafiklerin kullanılması sonuçların birbir benzer olmamasındaki en büyük etkenlerdendir.

Analiz sonuçlarında deney sonuçlarına aykırı olarak esneme yönünde farklı bir durum gözlemlenmiştir. Küçük geri esneme açılarının hesaplandığı bazı analizlerde geri esneme değerleri yerine ileri esneme sonuçları bulunmuştur. Bunun nedeni malzemeler için analiz sonuçlarının genel olarak deney sonuçlarına paralel ancak daha düşük açılarda seyretmesidir. Yüksek akma mukavemeti ve düşük elastisite modülüne sahip bakır malzeme için literatüre uygun olarak hem deneyde hem de analizde yüksek geri esneme açıları elde edilmiştir. Ancak AISI 304 ve DC01'e oranla bakır malzeme analiz sonuçları deney sonuçlarına daha uzak kalmıştır.

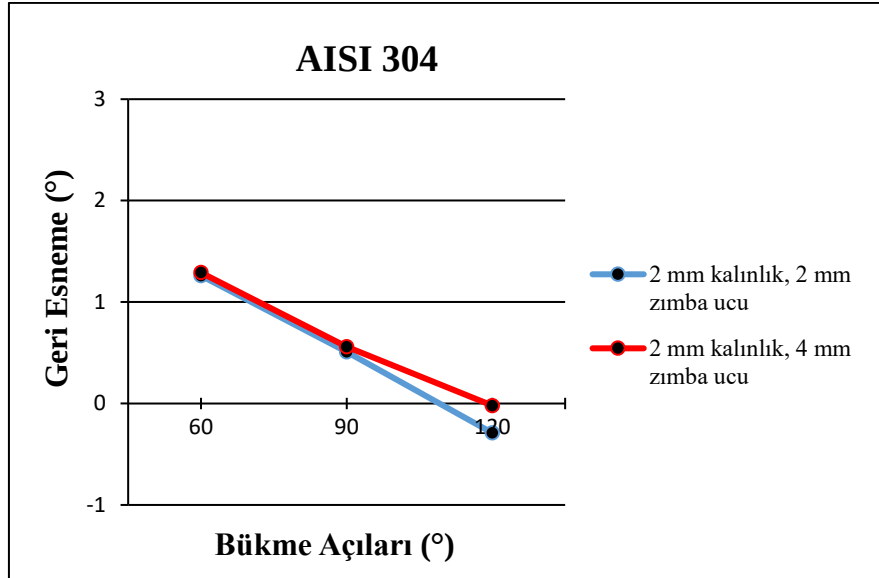
Zımbanın bükme yarıçapının artmasıyla beraber geri esneme miktarının artması durumu, yüksek akma dayanımı ve düşük elastisite modülüne sahip bakır malzemede diğer malzeme tiplerine kıyasla hem deneyde hem de analiz sonuçlarında daha net bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte deney sonuçlarında her malzeme tipi için levha kalınlığı arttıkça geri esnemenin azalacağı sonucuna varılmıştır. Analizler, levha kalınlıklarının etkisini içeren bu deneysel çıkarımı bakır levhalardaki birkaç bükme dışında sonuçların hepsinde desteklemektedir.

5.2. AISI 304 Levhalar İçin Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Analizlerden yola çıkılarak Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de levha kalınlıklarına göre geri esneme miktarları AISI 304 levha için gösterilmiştir. Geri esneme değişimlerinin bükme açısı doğrultusunda görülebilmesi için sonuçlar grafik haline getirilmiştir. Genel karşılaştırmalar sırasında da belirtildiği üzere zımba uç yarıçapının arttıkça geri esnemenin arttığına ulaşılmıştır. Bu durum literatürdeki bazı çalışmalarla tutarlıdır [2, 21, 43]. Bazı çalışmalar ise bu duruma terstir [24]. Grafiklerdeki eğimlerden de anlaşılabileceği üzere bükme açısının arttıkça geri esnemenin azaldığına ulaşılabilir. Yine bu ifade de bazı çalışmalar ile uygundur [2]. Bazı çalışmalar ise bu sonucu desteklememektedir [23, 25].

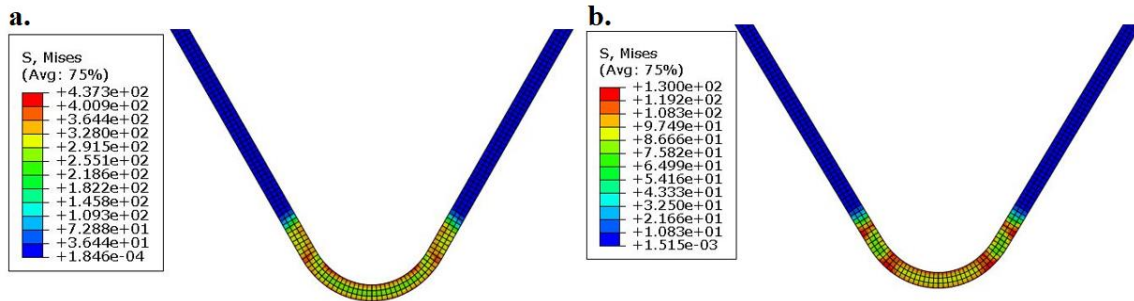


Şekil 5.1. 1 mm kalınlıkta AISI 304 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu

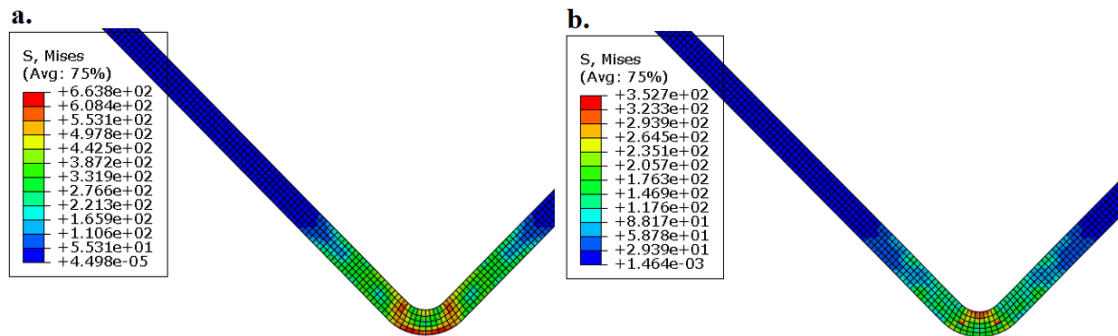


Şekil 5.2. 2 mm kalınlıkta AISI 304 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu

Levhaların esneme miktarları dışında geri esneme öncesi ve geri esneme sonrası gerilme dağılımları simülasyonlar yardımıyla MPa cinsinden gösterilmektedir.



Şekil 5.3. a) AISI 304 için minimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası



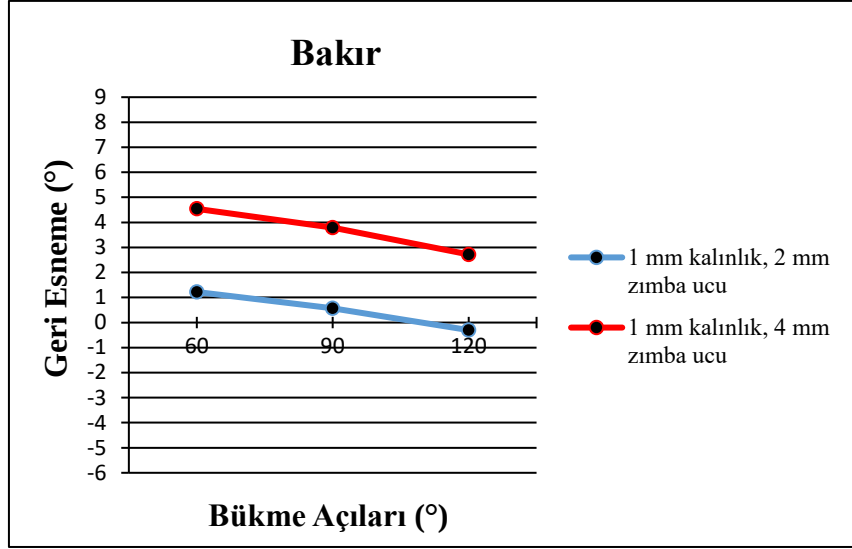
Şekil 5.4. a) AISI 304 için maksimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası

1 mm kalınlıktaki AISI 304 levhanın 4 mm zımba uç yarıçapında, 60° kalıp açısında tam bükülme ve geri esneme sonrası gerilme dağılımı Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Bu bükme şartlarında minimum gerilme değerlerine ulaşılırken 2 mm kalınlıktaki AISI 304 levhanın 2 mm zımba uç yarıçapında, 90° kalıp açısında tam bükülme ve geri esneme sonrası gerilme dağılımının gösterildiği Şekil 5.4'te ise maksimum gerilme değerine ulaşılmıştır. En az Von Misses gerilmelerinin gözlemlendiği Şekil 5.3'te malzeme kalınlığının 1 mm ve zımba uç yarıçapının 4 mm olması olağan bir durumdur. Şekil 5.4'te malzemenin 2 mm kalınlıkta olması ve bükme işleminin 2 mm zımba uç yarıçapında yapılması yüksek gerilme sonucu için bir fikir verebilir.

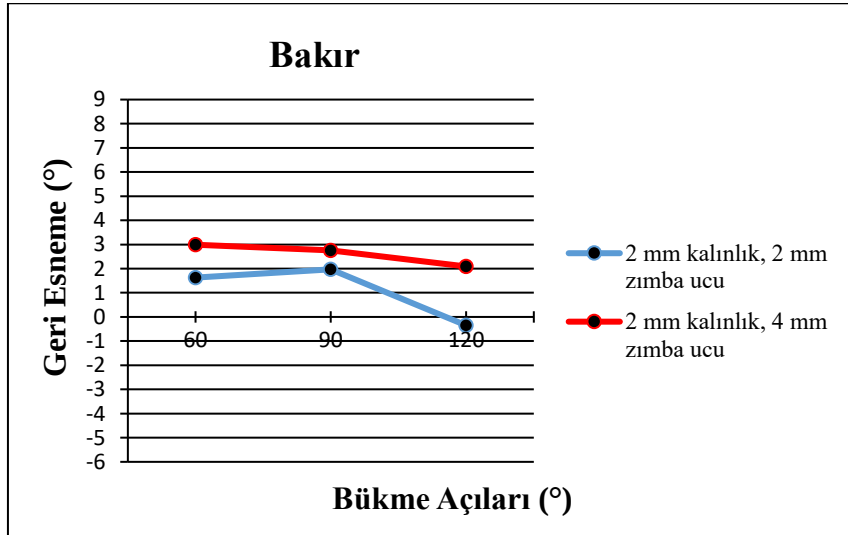
AISI 304 için Von Misses gerilme dağılımları incelendiğinde 2 mm kalınlıktaki levhalardaki maksimum gerilmelerin 1 mm kalınlıktaki levhalardaki maksimum gerilmelerden daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca zımba uç yarıçapı büyük olan durumlar için hem maksimum gerilme hem de nominal gerilmeler daha düşüktür. Bunun nedeninin gerilmelerin büyük zımba uç yarıçapında daha çok yayılması olarak düşünülebilir. Geri esneme sonrasındaki gerilme düşüşü oldukça fazladır. Geri esneme sonrası levhadaki dağılımlarda esnemedenden önceki dağılımlara oranla farklılıklar görülebilmektedir.

5.3. Bakır Levhalar İçin Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Bakır levha için analiz sonucunda elde edilen geri esneme açıları bükme durumlarının genelinde AISI 304 ve DC01 levhaların geri esneme açılarına oranla daha yüksektir. Geri esneme sonuçları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da levha kalınlıklarına göre gösterilmiştir.

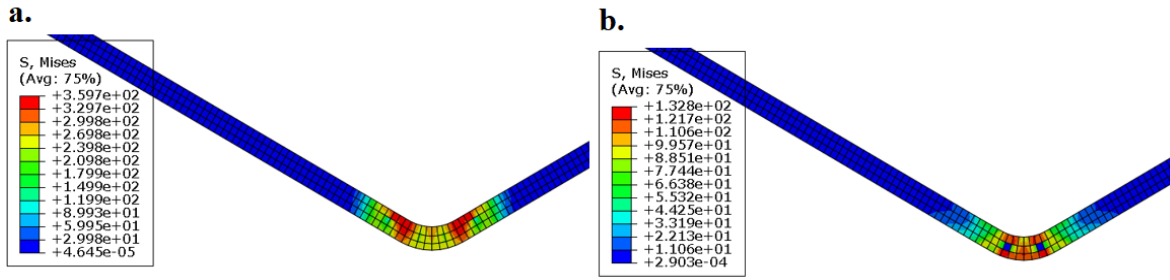


Şekil 5.5. 1 mm kalınlıkta bakır levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu

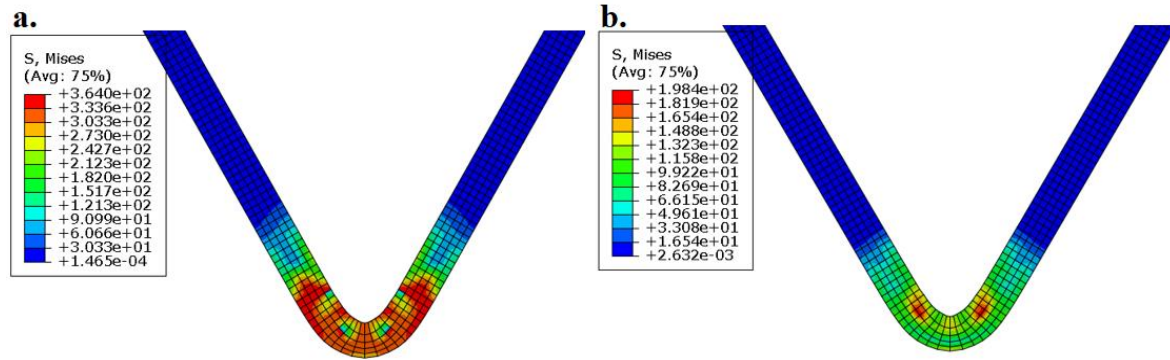


Şekil 5.6. 2 mm kalınlıkta bakır levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu

Bakır için sonuçlar incelendiğinde zımba uç yarıçapı arttıkça geri esneme miktarının arttığına ulaşılabilir. Çoğu durumda kalıp açısı büyüdükçe geri esneme azalma görülmektedir. Levha kalınlığı gözetmeksizin 120° kalıp açısı ve 2 mm bükme radyüsü durumlarında ileri esneme görülmüştür. Bakır levhalar için de gerilme dağılımları MPa cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 5.7. a) Bakır için minimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası



Şekil 5.8. a) Bakır için maksimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası

1 mm kalınlıktaki bakır levhanın 2 mm zımba uç yarıçapında, 120° kalıp açısında tam bükülme ve geri esneme sonrası gerilme dağılımı Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Bu bükme durumunda bakır için minimum gerilme değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 5.8’de 2 mm kalınlıktaki bakır levhanın 2 mm zımba uç yarıçapında, 60° kalıp açısında tam bükülme ve geri esneme sonrası gerilme dağılımı görülmektedir. Bu durumda bakır için maksimum gerilmelere ulaşılmıştır. Bakır levhada ulaşılan maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki farklar AISI 304 ve DC01 levhalarda meydana gelen farklardan oldukça azdır. Hatta bakır için bu gerilme değerlerinin birbiriyle neredeyse aynı olduğu söylenebilir. Sonuçta bakır için bükme şartlarındaki değişimin gerilmeler üzerindeki etkisinin diğer malzeme tiplerine oranla oldukça küçük olduğu sonucuna varılabilir.

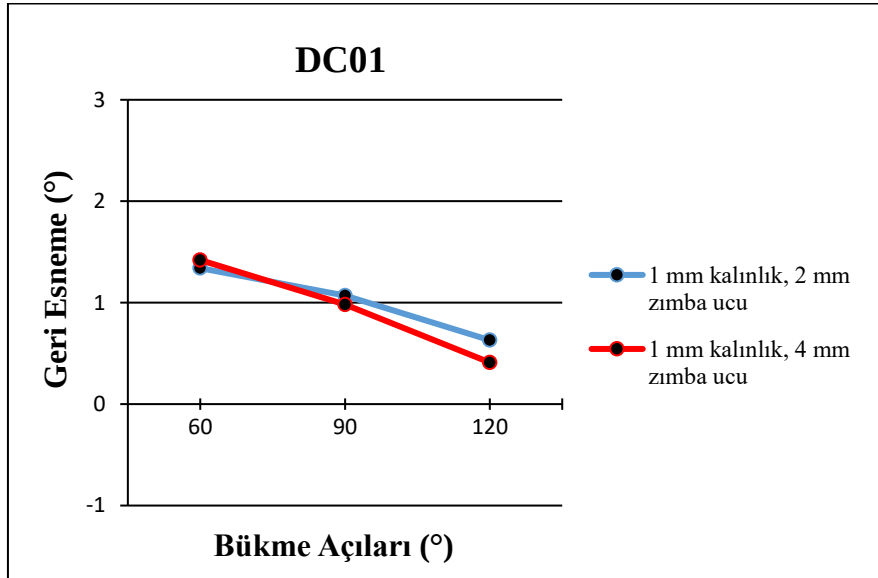
Tam bükme sonrası bakır levhalarda meydana gelen maksimum gerilme dağılımları AISI 304’e oranla daha düşüktür. Geri esneme sonrasında da bakır levhadaki gerilmeler AISI 304’e göre oldukça az gözükmemektedir.

Analizler sonucunda bakır levha için de bükme ve geri esneme sonrasındaki değişim kolayca gözlemlenebilmektedir. Genel olarak nominal gerilmeler büyük zımba uç yarıçapındaki

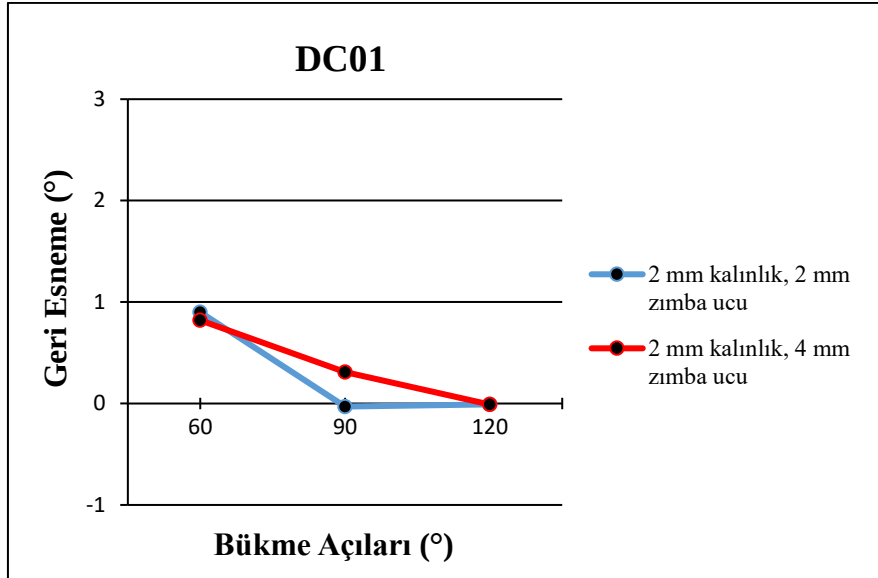
durumlar için daha düşüktür. 2 mm kalınlıktaki bakır levhaların kalıp şeklini tam olarak almadığı dikkat çekmektedir. Bu durum bakırın akma ve çekme değerlerinden kaynaklanabilir. AISI 304 ve DC01 malzemede böyle bir aykırılık gözlemlenmemiştir.

5.4. DC01 Levhalar İçin Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

DC01 levhalar için geri esneme sonuçlarının geneli AISI 304 ve bakır malzemeye oranla daha düşüktür. Bu durumun en büyük nedeninin DC01 malzemenin diğer malzemelere kıyasla elastisite modülünün büyük ve akma dayanımının daha küçük olması şeklinde açıklanabilir. DC01 malzeme sonuçlarının bükme açısına göre durumu Şekil 5.9 ve 5.10’da grafik halinde gösterilmektedir.

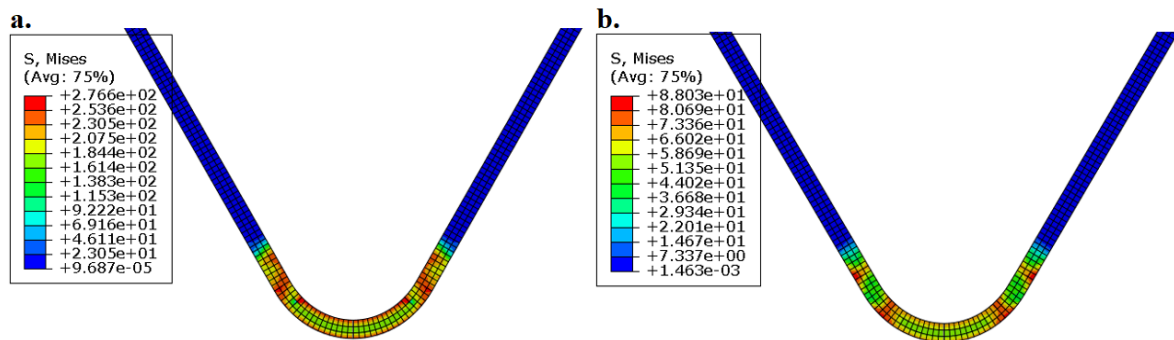


Şekil 5.9. 1 mm kalınlıkta DC01 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu

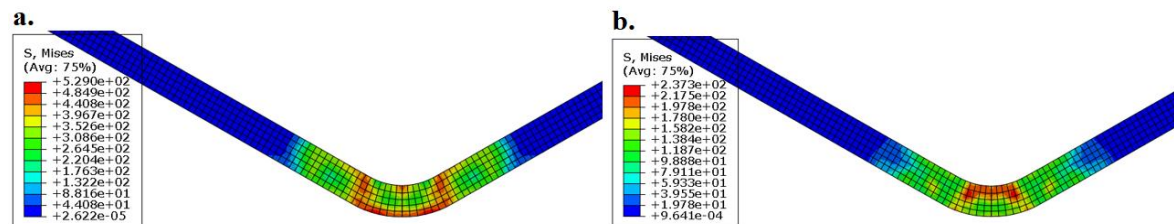


Şekil 5.10. 1 mm kalınlıkta DC01 levhanın farklı zımba uç yarıçapı ve farklı açılardaki geri esneme durumu

Sonuçlara bakıldığında DC01 için geri esnemenin artıp azalması ile zımba uç yarıçapı büyüklükleri arasında belli bir oran bulunmamaktadır. Grafiklerden de anlaşılabileceği üzere genel olarak bükme açıları arttıkça geri esnemede azalma görülmüştür. 90° ve 120° bükmelerde ileri esneme görülmektedir. DC01 için de gerilme durumları MPa cinsinden simülasyonlar yardımıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.11. a) DC01 için minimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası



Şekil 5.12. a) DC01 için maksimum gerilmeye ulaşılan bükme, b) geri esneme sonrası

1 mm kalınlıktaki DC01 levhanın 4 mm zımba uç yarıçapında, 60° kalıp açısında tam bükölme ve geri esneme sonrası gerilme dağılımı Şekil 5.11’de görölmektedir. Bu bükme şartlarında minimum gerilme değeerlerine ulaşılırken 2 mm kalınlıktaki DC01 levhanın 4 mm zımba uç yarıçapında, 120° kalıp açısında tam bükölme ve geri esneme sonrası gerilme dağılımının gösterildiğı Şekil 5.12’de ise maksimum gerilme değeerine ulaşlmıştır.

Genel olarak DC01 malzemedeki gerilme yapısı AISI 304’e benzese de gerilme büyüklükleri bakırda ulaşlan büyüklüklerden bile daha aşağıda kalabilmektedir. Geri esneme sonrasındaki maksimum gerilmeler incelendiğinde ise DC01 malzeme için bu değeer diğeer iki malzemeye oranla daha düşük kalabilmektedir. Genel olarak bükme sonrası ve geri esneme sonrasındaki maksimum gerilmeler arasındaki fark AISI 304 malzemedeki farklara göre daha azdır. 4 mm zımba uç yarıçapında bükölen levhalar 2 mm zımba uç yarıçapında yapılan işlemlere oranla daha düşük maksimum gerilme değeerlerine sahiptir. Çünkü gerilme dağılımları daha geniş bir alana yayılmış ve nominal gerilmeler daha düşük kalmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, deneysel olarak V bükme yöntemiyle şekil verilen ve geri esneme miktarı ölçülen AISI 304, bakır, DC01 malzeme levhaların analiz ve simülasyonları yapılmıştır. SEY analiz sonuçları doğrultusunda elde edilen geri esneme miktarları ve gerilme dağılımları incelenmiştir. Geri esneme miktarları deney sonucunda elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca simülasyonlar yardımıyla incelenebilen gerilme dağılımları hakkında yorumlara yer verilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Literatürdeki gerilme-gerinim eğrileri ve elastik bölge için tanımlanması gerekli değerler kullanılarak elde edilen analizler sonuçları, deney sonuçları ile bazı bükme senaryoları açısından yakinken bazı sonuçlar için uzak kalmıştır.
- Sonuçların aynı eğilimde çıktığı düşünüldüğünde izotropik malzeme modeli seçiminin bu tip analizlerde kullanılabilir bir model olduğu fikrine varılmıştır.
- Tüm sonuçlar beraber düşünüldüğünde birbirine en yakın değerlerin AISI 304 ve DC01 malzeme levhalarda meydana geldiği söylenebilir. Bakır malzeme levhalarda ise yakınsama oranı daha düşüktür.
- Deney ve analiz sonuçlarının geri esneme büyüklüğü açısından en yakın olduğu durum 1 mm kalınlıktaki DC01 levhanın 60° kalıp açısında 2 mm zımba uç yarıçapında yapılan analizdir.
- Geri esneme başlamadan önce ve geri esneme sonrasında en büyük gerilme değerine AISI 304 levhada ulaşılırken en düşük gerilme değerine DC01 levhada ulaşılmıştır. Geri esneme sonrası gerilme miktarlarında düşüş görülmektedir. Ayrıca levha kalınlığı arttıkça eş değer gerilmeler de artmaktadır.
- Geri esneme miktarının levha kalınlığı değiştikçe değiştiği genel olarak kalınlığın arttıkça esneme miktarının azaldığı sonucuna varılmıştır.
- AISI 304 ve bakır levhalar için zımba uç yarıçapı arttıkça geri esneme miktarı artmaktayken bazı DC01 levhalar için bu durum terstir.
- Birçok bükme durumu için bükme açısı arttıkça geri esneme miktarında azalma görülmektedir.
- Geri esneme miktarının tahmini ve bükme işlemi sırasında meydana gelen gerilme durumları açısından analiz programlarının bir fikir verebileceğine ulaşılmıştır.

Bu çalışma sonucunda devam edilebilecek çalışma önerilerinde bulunulmuştur.

- Levhanın boyutlarında değişiklik yapılarak geometrik büyüklüğün geri esneme üzerine tespiti.
- Kullanılan bakır, AISI 304, DC01 gibi malzemeler dışındaki malzemelerin V-kalıpta bükme işlemi yapılarak geri esneme tespitinin analiz programlarıyla yapılması. Bu malzemelerin sahip olduğu özelliklerin geri esnemeye etkisi.
- V-kalıpta bükme dışındaki bir bükme yöntemiyle (U-kalıpta bükme, serbest bükme, kenar bükme) geri esnemenin SEY ile tespiti.
- V-kalıpta bükme işleminde sıcaklığın etkisiyle geri esneme miktarındaki değişimin sonlu elemanlar analizi yardımıyla yorumlanması.
- Farklı malzeme modelleri kullanılarak geri esneme tespitinde bulunulması.

KAYNAKLAR

1. Carden, W.D., Geng, L.M., Matlock D.G. and Wagoner R.H. (2002). Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(1), 79-101.
2. Gürün, H., Çavuşoğlu, O., Çaydaş, U., Özek, C. ve Çelik, M. (2018). AA2024 alaşımının V-bükme işlemi sonrasında geri esneme davranışlarının incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 1-8.
3. Aslan, Y. ve Karaağaç, İ. (2014). V bükmede geri esneme davranışları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(3), 255-263.
4. Sayın L. (2019). *AISI 304, EN 10130 DC01, bakır sac levhaların V bükme yöntemi ile şekillendirilmesi sonucunda oluşan geri yaylanma miktarının deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Burdur, 1-75.
5. Gupta, T. (2019). *Predicting and reducing springback in bending of an aluminum alloy and selected advanced high strength steels (AHSS)*. Master's Thesis, The Ohio State University, USA.
6. Boljanovic, V. (2004). *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. New York: Industrial Press, 45-46.
7. Kalpakjian, S. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology* (Sixth edition). New York: Prentice Hall, 397-400.
8. Suchy, I. (2006). *Handbook of Die Design* (Second edition). USA: McGraw-Hill Book Company, 335-336.
9. Fu, Z., Mo, J., Chen, L. and Chen, W. (2010). Using genetic algorithm-back propagation neural network prediction and finite-element model simulation to optimize the process of multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal. *Materials and Design*, 31(1), 267-277.
10. Kazan, R., Fırat, M. and Tiryaki, A.E. (2009). Prediction of springback in wipe-bending process of sheet metal using neural network. *Materials and Design*, 30(2), 418-423.
11. Marciniak, Z., Duncan, J. L., and Hu, S. J. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming* (Second edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 82-86.
12. Şahin Ç. (2013). *Sac levhaların v-bükme sonucu geri yaylanma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-25.
13. Tseng, A. A., Müller, J. and Hahn, Y. H. (1996). Mechanical and bending characteristics of invar sheets. *Materials and Design*, 17(2), 89-96.

14. Tseng, A. A., Jen, K. P., Chen, T. C., Kondetimmamhalli, R. and Murty, Y. V. (1995). Forming properties and springback evaluation of copper beryllium sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A. Physical Metallurgy And Materials Science*, 26(8), 2111-2121.
15. 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.
16. Wang, J., Verma, S., Alexander, R. and Gau J. T. (2008). Springback control of sheet metal air bending process. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(1), 21-27.
17. Arslan, B. (2007). *Geri esnemenin sac parçaların biçim tamlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları ile değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-19.
18. Cinar, Z., Asmael, M., Zeeshan, Q. and Safaei, B. (2021). Effect of springback on A6061 sheet metal bending; a review. *Jurnal Kejuruteraan*, 33(1), 13-26.
19. Verma, R.K and Halder, A. (2007). Effect of normal anisotropy on springback. *Journal of Materials Processing Technology*, 190(1), 300-304.
20. Yuen, W. Y. D. (1996). A generalised solution for the prediction of springback in laminated strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(3), 254-264.
21. Wang, L., Huang, G., Zhang, G., Wang, Y. and Yin, L. (2013). Evolution of springback and neutral layer of AZ31B magnesium alloy V-bending under warm forming conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6), 844-850.
22. Tekaslan, Ö., Şeker, U. ve Gerger, N. (2007). Bükme kalıplarında 0.75 mm kalınlığındaki çelik sac malzemenin geri esneme miktarlarının belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 15-22.
23. Tekaslan, Ö., Gerger, N. ve Şeker, U. (2008). V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 231-238.
24. Ötü, R. (2012). *V bükme kalıplarında alüminyum alaşımlı sacların şekillendirilmesi ve geri esneme miktarlarının tespiti*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-89.
25. Tekaslan, Ö. ve Şeker, U. (2009, 13-15 Mayıs). *Pirinç sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
26. Tekaslan, Ö., Şeker, U. and Özdemir, A. (2006). Determining springback amount of steel sheet metal has 0,5 mm thickness in bending dies. *Materials and Design*, 27(3), 251-258.
27. Burchitz, I.A. (2008). *Improvement of springback prediction in sheet metal forming*. Phd Thesis, University of Twente, Enschede.

28. Yenice, M. M. (2006). *Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 53-83.
29. İnternet: Implicit vs Explicit Finite Element Method (FEM): What Is the Difference, URL: <https://www.simscale.com/blog/implicit-vs-explicit-fem/>. Son Erişim Tarihi: 30.05.2023
30. İnternet: Sonlu Elemanlar Yönteminde Implicit vs Explicit Yaklaşımı, URL: <https://yasincapar.com/tr/sonlu-elemanlar-yontemde-implicit-vs-explicit-yaklasimi/>. Son Erişim Tarihi: 30.05.2023
31. Gürsoy, K. Ö. ve Esener, E. (2019). Malzeme modellerinin sac metal sonlu elemanlar analizi tahmin performansına etkisinin değerlendirilmesi. *BSEU Journal of Science*, 6(1), 1-11.
32. Esener, E. (2020). Plastisite Modellerinde Pekleşme Etkisinin Sonlu Elemanlar Analizi İle Tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(1), 171-181.
33. Demirel, T. (2019). *Kılavuzla vida açmada kesme parametrelerine bağlı kesici takımlarda oluşan gerilmelerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16-17.
34. Nilsson, A., Melin, L. and Magnusson, C. (1997). Finite-element simulation of V-die bending: a comparison with experimental results. *Journal of Materials Processing Technology*, 65(1), 52-58.
35. Uemori, T., Okada, T. and Yoshida, F. (1998). Simulation of springback in V-bending process by elasto-plastic finite element method with consideration of Bauschinger effect. *Metals and Materials*, 4(3), 311-314.
36. Sousa, L. C., Castro, C. F. and António, C. A. C. (2006). Optimal design of V and U bending processes using genetic algorithms. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 35-41.
37. Wang, L., Wang, Z. L. Zhang, S. Y., Lin, Y. C. and Fu, M. Y. (2022 December). *Springback prediction model of Ti-6Al-4V tube warm bending based on modified JC model considering variable temperature field*. The 19th International Conference on Metal Forming, Online.
38. İnternet: SIMULIA Why Abaqus, URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>. Son Erişim Tarihi: 30.05.2023
39. Suyuti, M. A., Nur, R. and Asmeati (2015). The influence of punch angle on the spring back during V-bending of medium carbon steel. *Advanced Materials Research*, 1125, 157-160.
40. Gautam, B., Kumar, P., Chandra, V. and Rawat, K. (2016). Analysis of springback variation in V bending. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(2), 555-560.

41. Gau, J. T. and Kinzel, G. L. (2001). An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on springback predictions. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(3), 569-575.
42. Shu, J. S. and Hung, C. (1996). Finite element analysis and optimization of springback reduction: the "double-bend" technique. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(4), 423-434.
43. Bakhshi-Jooybari, M., Rahmani, B., Daezadeh, V. and Gorji, A. (2009). The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes. *Materials and Design*, 30(7), 2410-2419.
44. Esat, V., Darendeliler, H. and Gokler, M.I. (2002). Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets. *Materials and Design*, 23(2), 223-229.
45. Ling, Y. E., Lee, H. P. and Cheok, B. T. (2005). Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(2), 296-302.
46. Harvey, P. D. (1982). *Engineering Properties of Steel*. USA: ASM International, 273-274.
47. *Atlas of Stress--strain Curves* (2002) . USA: ASM International, 184, 517.
48. Davis, J. R. (2001). *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*. USA: ASM International, 458.
49. İnternet: Overview of materials for Low Alloy Steel, URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1bdbccde4da4da4a9d5bb8918d783b29>. Son Erişim Tarihi: 30.05.2023
50. Kumar, A. and Digavalli, R., K. (2021). Formability prediction of tailor-welded blanks in hydraulic bulging using flow curves from biaxial tensile tests. *Materials: Design and Applications*, 235(4), 853-867.



Gazili olmak ayrıcalıktır