

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

**SAC BÜKMEDE GERİ YAYLANMANIN SONLU
ELEMEN YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Anıl HEKİM

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

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN**

**KASIM 2016
ÇORUM**

Anıl HEKİM tarafından hazırlanan "Sac Bükmede Geri Yaylanmanın Sonlu Eleman Yöntemi ile İncelenmesi" adlı tez çalışması 03/11/2016 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emin ERDİN

Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZGEDİK

Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17.11.2016 tarih ve 2016/216 sayılı kararı ile Anıl HEKİM'in Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans / Doktora derecesi alması onanmıştır.



Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

TEZ BEYANI

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



Anıl HEKİM

SAC BÜKMEDE GERİ YAYLANMANIN SONLU ELEMAN YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Anıl HEKİM

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2016

ÖZET

Bu tez çalışmasında sac şekillendirme yöntemlerinden biri olan V bükme işleminde en çok karşılaşılan sorunlardan biri olan geri yaylanma davranışı incelenmiştir. Geri yaylanmanın tahmini ve telafisi nihai parça geometrisini etkileyen, aynı zamanda zaman ve maliyet açısından kazanç sağlayan önemli bir unsurdur. Çalışmada Al 1050 H14 sac malzemenin V bükme kalıbında sıkıştırma kuvveti ve hadde doğrultusuna bağlı olarak geri yaylanma davranışı incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Kullanılan sac numune 150x50 mm ebatlarında olup kalınlığı 3 mm olarak seçilmiştir. Kalıp bükme açısı 60° olarak seçilmiştir. Sac parçaların uzunluk doğrultusu hadde doğrultusu ile 0°, 45° ve 90° açı yapacak şekilde V bükme numuneleri belirlenmiştir. Sıkıştırma kuvvetleri 2 kN, 3 kN, 4 kN, 5 kN ve 6 kN olarak seçilmiştir. Zimba uç yarıçapı 5 mm, alt kalıp uç yarıçapı ise 8 mm olarak seçilmiştir. Çalışmada artan sıkıştırma kuvvetine bağlı olarak hem deneysel çalışmalarda hem de sonlu eleman analizlerinde geri yaylanmanın azaldığı tespit edilmiştir. Sacın hadde yönüne bağlı olarak en az geri yaylanmanın 45° hadde yönünde, en fazla geri yaylanmanın ise 90° hadde yönünde olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alüminyum sac, geri yaylanma, V bükme, sıkıştırma kuvveti, hadde yönü, sonlu eleman yöntemi

INVESTIGATION OF SPRING BACK IN SHEET BENDING USING FINITE ELEMENT METHOD

Anıl HEKİM

HİTİT UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2016

ABSTRACT

In this thesis study; one of the most common problems in V bending process, which is a sheet forming method, was investigated. Prediction and compensation of springback is an important factor which effects the geometry of the final part and yields in terms of time and cost. In the study, springback behavior of Al 1050 H14 sheet material is investigated depending on holding force and rolling direction between V bending dies. Results obtained from finite element analyses are compared with experimental results and it is seen that the results are compatible. Dimensions of the sheet specimen are 150x50 mm and thickness is chosen to be 3 mm. Bending angle of the die is chosen to be 60°. V bending specimens were determined making 0°, 45° and 90° with the rolling direction in longitudinal direction of the sheet. Holding force are chosen to be 2 kN, 3 kN, 4 kN, 5 kN and 6 kN. Tip radius of the punch is taken 5 mm, tip radius of the matrix is taken 8 mm. It is determined from both experimental studies and finite element analyses that springback decreases with increasing holding force. It is also observed that lowest springback occurs in the direction making 45° and highest springback occurs in the direction making 90° with the rolling direction depending on the rolling direction of the sheet.

Keywords : Aluminum sheet, springback, V bending, holding force, rolling direction, finite element method.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca yardımlarını, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, değerli yardım ve katkılarıyla daha iyi bir çalışma yapmam için beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Emin Erđin'e, NETFORM Mühendislik Makina Metal firmasına ve Sayın Mert Aygen'e, maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen aileme teşekkür eder saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. BÜKME.....	4
2.1. Bükme İşlemi.....	4
2.2. Bükme İşlemi Çeşitleri.....	5
2.2.1. V bükme.....	6
2.2.2. Serbest bükme.....	7
2.2.3. Kenar bükme.....	8
2.3. Sac Bükme İşleminin Matematiksel Analizi.....	8
2.3.1. Farklı malzeme modellerinde bükme.....	12
2.3.1.1. Elastik bükme.....	12
2.3.1.2. Rijit-mükemmel plastik bükme.....	15
2.3.1.3. Elastik-mükemmel plastik bükme.....	16
2.3.1.4. Deformasyonla sertleşen malzemede bükme.....	18
3. GERİ YAYLANMA.....	20
3.1. Geri Yaylanmanın Matematiksel Analizi.....	22
3.1.1. Elastik mükemmel plastik malzemede geri yaylanma.....	23
3.2. Geri Yaylanmanın Telafisi.....	25
3.3. Geri Yaylanma Davranışına Etki Eden Faktörler.....	26
3.3.1. Kalınlık.....	27
3.3.2. Bükme radyüsü.....	27
3.3.3. Kalıp açıklığı.....	28

3.3.4. Anizotropi.....	28
3.3.5. Akma dayanımı	29
3.3.6. Elastiklik modülü	30
3.3.7. Sıcaklık.....	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
5. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ	36
5.1. Eksplisit (Açık) Yöntem.....	37
5.2. İmplicit (Kapalı) Yöntem	38
5.3. Mevcut Sac Şekillendirme Simülasyon Algoritmaları	39
5.3.1. Rijit plastik ve elastik plastik yöntem	39
5.3.2. Statik kapalı yöntem.....	39
5.3.3. Statik açık yöntem	40
5.3.4. Dinamik açık yöntem	40
5.4. Sonlu Eleman Yazılımı	40
5.4.1. Simufact.forming programında analiz aşamaları	41
5.4.2. Sonlu eleman yazılımı ile V bükme analizi	43
5.5. Deney Sonuçları ile Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	57
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Bükme işlemi (Duncan ve Marciniak, 1992).....	5
Şekil 2.2. Çeşitli sac bükme işlemleri (Uzun ve Erişkin, 1983)	6
Şekil 2.3. V bükme olayı (Suchy, 2006)	7
Şekil 2.4. Serbest bükme (Fei ve Hodgson, 2006).....	8
Şekil 2.5. Kenar bükme (Ling ve ark., 2005).....	8
Şekil 2.6. Bükme bölgesinde karşılaşılan lif geometrileri (Marciniak ve ark., 2002).....	9
Şekil 2.7. Birim deformasyon dağılımının şematik gösterimi (Marciniak ve ark., 2002).....	10
Şekil 2.8. Yeterince geniş levhada bükme bölgesinde karşılaşılan birim şekil değişimi ve gerilme durumu (Marciniak ve ark., 2002).....	11
Şekil 2.9. Malzeme modelleri: (a) elastik-mükemmel plastik, (b) rijit-mükemmel plastik, (c) deformasyonla sertleşen malzeme (Marciniak ve ark., 2002)..	12
Şekil 2.10. Elastik bükmede birim şekil değişimi (a) ve gerilme dağılımı (b) (Marciniak ve ark., 2002).....	13
Şekil 2.11. Elastik bükmede moment-eğrilik grafiği (Marciniak ve ark., 2002).	14
Şekil 2.12. Rijit mükemmel plastik bükmede gerilme dağılımı (Marciniak ve ark., 2002).....	15
Şekil 2.13. Rijit-mükemmel plastik bükmede moment-eğrilik grafiği (Marciniak ve ark., 2002).....	16
Şekil 2.14. Elastik-mükemmel plastik malzemede gerilme dağılımı (Marciniak ve ark., 2002).....	16
Şekil 2.15. Elastik-mükemmel plastik bükmede moment-eğrilik grafiği (Marciniak ve ark., 2002).....	18
Şekil 2.16. Deformasyonla sertleşen modelde bükmede gerilme dağılımı (Marciniak ve ark., 2002).....	18
Şekil 2.17. Deformasyonla sertleşen malzemede moment-eğrilik diyagram.....	19
Şekil 3.1. Sünek bir metaldeki geri yaylanmanın akma diyagramı üzerinde gösterilişi	20
Şekil 3.2. Momentin kaldırılmasıyla birlikte karşılaşılan geri yaylanma (Marciniak ve ark., 2002).....	22
Şekil 3.3. Elastik-mükemmel plastik malzemede moment-eğrilik grafiği.....	24

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 0° açI yapan sac metalde sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisi.....	57
Şekil 5.2. Uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 45° açI yapan sac metalde sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisi.....	58
Şekil 5.3. Uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 90° açI yapan sac metalde sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisi.....	58

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deneyleerde kullanılan sac numune	32
Resim 4.2. V bükme kalıp modeli	33
Resim 4.3. V bükme işlemi	34
Resim 5.1. Simufact.forming yazılımında V bükmeye ait zımba, sac ve alt kalıbın görünümü	44
Resim 5.2. Simufact.forming yazılımında analiz türünün seçilmesi	44
Resim 5.3. Simufact.forming yazılımında sacın ve kalıpların tanımlanması	45
Resim 5.4. Simufact.forming yazılımında malzeme özelliklerinin tanımlanması	45
Resim 5.5. Simufact.forming yazılımında barlat anizotropi parametrelerinin tanımlanması	46
Resim 5.6. Simufact.forming yazılımda 0° hadde doğrultusunun tanımlanması	47
Resim 5.7. Simufact.forming yazılımda 45° hadde doğrultusunun tanımlanması	47
Resim 5.8. Simufact.forming yazılımda 90° hadde doğrultusunun tanımlanması	48
Resim 5.9. Simufact.forming yazılımında hidrolik presin tanımlanması	48
Resim 5.10. Simufact.forming yazılımında sürtünme şartlarının tanımlanması	49
Resim 5.11. Simufact.forming yazılımında kalıp sıcaklıklarının tanımlanması	49
Resim 5.12. Simufact.forming yazılımında iş parçası sıcaklığının tanımlanması	50
Resim 5.13. Simufact.forming yazılımında X, Y ve Z koordinatlarına göre iş parçasının pozisyonlanması	50
Resim 5.14. Simufact.forming yazılımında X, Y ve Z koordinatlarına göre zımbanın pozisyonlanması	51
Resim 5.15. Simufact.forming yazılımında sac parçanın ağ yapısının oluşturulması	52
Resim 5.16. Simufact.forming yazılımında sac parçanın ağ yapısının görünümü	52
Resim 5.17. Simufact.forming yazılımında zımbanın ilerleme miktarının ve sıkıştırma kuvvetinin tanımlanması	53
Resim 5.18. Simufact.forming yazılımında işlem aşamalarının seçilmesi	53
Resim 5.19. Simufact.forming yazılımında sonuç parametrelerinin seçilmesi	54
Resim 5.20. Simufact.forming yazılımında çözüm adım sayısının belirlenmesi	54
Resim 5.21. Netfabb Studio Basic ölçüm programına ait görünüm	55

Resim	Sayfa
Resim 5.22. Simufact.forming yazılımında sac parçanın bükülme anındaki görüntüsü	55
Resim 5.23. Simufact.forming yazılımında zımbanın sacın üzerinden kalktıktan sonraki görüntüsü	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Al 1050 H14 alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi.....	32
Çizelge 4.2. Al 1050 H14 alüminyum malzemenin mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 4.3. Deneysel sonuçlar	35
Çizelge 5.1. Analiz sonuçları	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
$\Delta\theta$	Açısal geri yaylanma miktarı
σ_0, σ_y	Akma dayanımı
I	Alan atalet momenti
I'	Birim genişlikteki alan atalet momenti
ε	Birim şekil değişimi
θ	Bükme açısı
m	Bükme eğrilik oranı
M	Bükme momenti
ΔM	Bükme momentinde meydana gelen değişim
ε_b	Bükme sırasında karşılaşılan birim şekil değişimi
R	Bükme yarıçapı
K	Dayanım sabiti
E'	Düzlem birim şekil değişim halinde elastiklik modülü
K'	Düzlem birim şekil değişim halindeki dayanım sabiti
S	Düzlem birim şekil değişiminde akma dayanımı
$1/\rho$	Eğrilik
ε_w	Genişlikte meydana gelen birim şekil değişimi
$\Delta(1/\rho)$	Geri yaylanma miktarı
σ	Gerilme
$\Delta\sigma$	İç gerilme dağılımı
l_0	İlk boy
ε_t	Kalınlıkta meydana gelen birim şekil değişimi
R_d	Kalıp radyüsü
M_e	Limit elastiklik moment
E	Malzemenin elastiklik modülü

ε_a	Merkezdeki birim şekil değişimi
n	Pekleşme üsteli
ε_p	Plastik birim şekil değişimi
ν	Poisson oranı
w	Sac genişliği
s, t	Sac kalınlığı
l_s	Son boy
l	Şekillendirilmiş lif boyu
M_p	Tam plastik moment
ρ	Tarafsız eksen radyüsü
y_e	Tarafsız eksenden elastik sınıra kadar olan uzaklık
y	Tarafsız eksene olan uzaklık
R_p	Zımba radyüsü
C	Zımba ve matris arasındaki boşluk

Kısaltmalar

Açıklama

ark	Arkadaşları
IFUM	Institute of Metal Forming and Metal-Forming Machines
max	Maximum
min	Minimum
SEA	Sonlu eleman analizi

1. GİRİŞ

Şekillendirilmiş sac metal levhalar endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Sac metal kullanımı özellikle teknolojinin üst seviyede olduğu uçak ve otomotiv sektöründen günlük hayatta kullandığımız mutfak eşyalarına ve beyaz eşyalara kadar farklı malzeme türleri, çeşitli şekillendirme yöntemleri ile karşımıza çıkmaktadır (Şahin, 2013). Sanayide uygulanan soğuk sac şekillendirme ve kalıpcılık tasarım teknikleri ampirik esaslı ve yüksek maliyetli yöntemlerdir (Arslan, 2007). Bu tez çalışmasında esas itibariyle, sac şekillendirme işlemlerinde ortaya çıkan geri yaylanma davranışı üzerinde durulmuştur.

Sac şekillendirmede birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak, bir kâğıt yaprağının özelliklerine benzer yapıdaki sac malzemelerin, istenen forma sahip daha rijit nesnelere yardımıyla şekillendirilmesini esas alırlar. Bunlardan en yaygın, birbirini tamamlayan, genelde erkek kalıp ve dişi kalıp olarak adlandırılan uygun formlu dökme demir veya çelik malzemeden imal edilmiş parçalar arasına sacın konulup, orta kısımda bir çekme kuvveti ve kenarlarda yüksek bir basma kuvveti uygulanması ile yapılan şekillendirmedir. Uygulanan şekil verme yöntemi ile parçaya istenilen form verilirken, bu yöntemin gereği olarak parçada deformasyonlar ortaya çıkmaktadır. Uygulanan yük kaldırıldıktan sonra elastik toparlanma nedeniyle ortaya çıkan geri yaylanmanın önceden tahmin edilip, bunun işleme yansıtılarak başarılı bir imalat yapılabilmesi önemlidir. Geri yaylanma telafisi için birçok yöntem söylenebilir. Fakat her önlem için geri yaylanma miktarının önceden bilinmesi gereklidir. Geri yaylanmanın önceden tahmini hem zaman hem de maliyet açısından önemli kazançlar sağlamaktadır. Sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılan analizler sonucu geri yaylanma miktarı bulunabilir. Değişen teknoloji ile sürekli gelişim gösteren sonlu eleman analiz yazılımları sayesinde değişik malzeme türleri ile değişik boyutlardaki sac parçalarda şekil verme esnasında meydana gelen gerilme, birim şekil değişimi gibi değerler bulunabilmektedir (Arslan, 2007). Ayrıca sonlu eleman analizi (SEA) sayesinde sac malzemenin son şekli şekillendirme öncesinde tahmin edilebilmektedir (Şahin, 2013).

Son yıllarda sonlu eleman metodu, metal şekillendirme işlemlerinin analizinin ve simülasyonunun en etkili bir yolu olarak ön plana çıkmıştır. Sac metal şekillendirme konusunda; iş parçasında deformasyon, gerilme ve birim şekil değişim dağılımı, kalıntı gerilmeler ile ilgilenen çok sayıda araştırma bulunmaktadır (Arslan, 2007).

Sonlu eleman tabanlı çalışmalar, yöntemin geri yaylanmanın hesaplanmasının yanı sıra kalıp elemanlarının analizinde kullanılabileceğini ortaya koymuş ve deneysel verilerle desteklenmiştir (Pourboghrat ve Chandorkar, 1992; Forcellese ve ark., 1996.; Micari ve ark., 1997; Papeleux ve Ponthot, 2002). Bakır-berilyum sacların geri yaylanma davranışlarını tüm prensipleriyle açıklamak için V kalıpları ile çalışılmıştır (Tseng ve ark., 1995). Sacın serbest bükmedeki davranışını modelleyerek deneysel ve matematiksel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçları birbiriyle karşılaştırarak değerlendirmiş ve tablolar şeklinde sunmuşlardır (Vin ve ark., 1996). Malzeme plastik deformasyona uğradıktan sonra, yükün kaldırılmasıyla malzeme içindeki gerilmelerin yeniden elastik toparlanmasıyla, geri yaylanma azaltılmaya çalışılmıştır. Mühendislikte kompozit sac malzemelerin kullanımının artmasıyla birlikte, bunlar üzerindeki geri yaylanmayı tespit etmek için yaklaşık bir matematiksel model çözümü araştırılmış ve sunulmuştur (Yuan, 1996). Sinterlenmiş bakır sacların V bükme işleminin deneysel ve teorik olarak karşılaştırmalarını yapmışlardır (Sriram ve ark., 1997). Serbest bükmedeki geri yaylanma değerlerini sonlu eleman analizi ile karşılaştırmış ve elde edilen sonuçları yapay sinir ağlarında geri yayılım algoritması kullanarak hesaplayacak bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Tahmin sonuçlarının uygunluğunu kanıtlamış ve bükmeye etki eden faktörleri incelemişlerdir (Inamdar ve ark., 2000). 6022-T4 alüminyum sac parçasının gererek şekillendirme ile geri yaylanma ölçümlerini yapmışlardır (Wagoner ve ark., 2002). Farklı kalınlıklarda farklı mekanik özelliklere sahip alüminyum malzemelerin geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Bu çalışmada, akma gerilmesi arttıkça geri yaylanmanın da arttığı gözlemlenmiştir (Esat ve ark., 2002). Yapılan farklı bir çalışmada 1,5 mm; 2 mm; 2,5 mm kalınlığındaki Al 1050 sac malzemelerin geri yaylanma davranışı ABAQUS sonlu eleman analiz programı ile incelenmiş ve deneysel olarak 84° lik V şekilli kalıp kullanılarak bükme işlemi yapılmıştır. Analizi yapılan alüminyum sac parçaların geri yaylanma ile şekil değiştirme davranışı

sunulmuştur. Sonlu eleman analizi sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde geri yaylanma açılarının 2° ile 4° arasında olduğu saptanmıştır. Ayrıca çalışmaların devamında derin çekme işlemi de yapılmıştır (Arslan, 2007). Yapılan bir çalışmada geri yaylanmayı önlemek için kalıp tasarım yöntemleri araştırılmış ve uygun kalıp yapımı ile geri yaylanmanın en aza indirilebileceği tespit edilmiştir (Gan ve Wagoner, 2004). Sac parçaların L bükme işleminde geri yaylanma analizi sonlu eleman yöntemi kullanarak ABAQUS programı yardımıyla incelenmiştir. Analiz sonucunda geri yaylanmayı etkileyen faktörler ortaya konmuştur (Ling ve ark., 2005). Farklı malzemelerin geri yaylanma davranışları incelenmiş ve deneysel çalışmalar sonlu eleman yöntemi ile karşılaştırılmıştır (Anderson, 2005). Alüminyum malzemedeki anizotropinin geri yaylanma üzerindeki etkileri U kanal büküm problemi üzerinden incelenmiştir. Yapılan çalışmada haddeleme yönünde geri yaylanmanın en az olduğu gösterilmiştir (Gomes ve ark., 2005). En sık kullanılan sac şekillendirme yöntemlerinden biri olan V bükme operasyonu ile elde edilen deney parçaları için, sac parçanın hadde yönü ile kalıp ve malzeme değişkenlerine bağlı olarak geri yaylanma davranışı incelenmiştir. Deneylerde DP600, FeE355 ve FeP04 malzemeler; 80° , 90° ve 100° kalıp açıları ve 2 mm, 4 mm ve 6 mm bükme yarıçapları kullanılarak bükülmüştür. Sac malzemeler üç ayrı hadde yönünde kullanılmıştır. Geri yaylanma açılarının pozitif ve negatif yönde olduğu saptanmıştır (Yenice, 2006). Bükme kalıplarında geri yaylanmanın deneysel olarak tespiti için çalışma yapılmıştır. Dört değişik bükme yöntemi kullanılarak üç farklı kalınlıktaki pirinç sac malzemeler bükülüp bilgisayar ortamında değerlendirilerek geri yaylanma grafikleri çıkarılmış, farklı bükme yöntemlerinin geri yaylanmaya etkileri ve elde edilen grafiklerin kullanılabilirliği tartışılmıştır. Literatürde yaygın kullanılan dört farklı bükme yönteminden iki yöntemin geri yaylanma açısından kullanılamayacağı tespit edilmiştir. Ayrıca zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilmesinin geri yaylanmayı azalttığı, artan malzeme kalınlığının ve bükme açısının geri yaylanma değerlerini artırdığı tespit edilmiştir (Tekaslan ve Şeker, 2009).

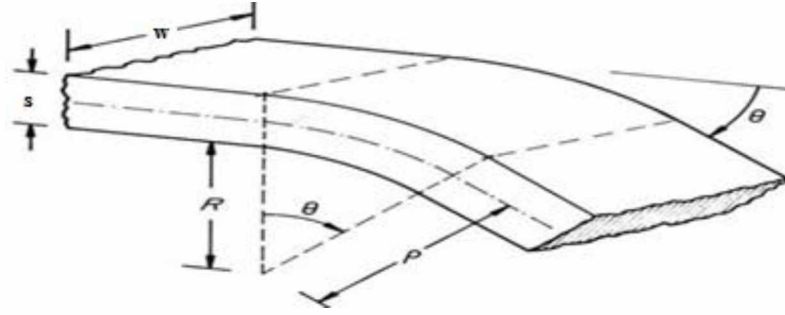
2. BÜKME

Sanayi devriminden sonra mekanizasyonun süreçlere dâhil edilmesiyle birlikte üretim kavramı farklı bir boyut kazanmaya başlamıştır. Mevcut üretim adımları işlev kazanmış ve bunun yanı sıra birbirinden farklı imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Bu durum, oldukça geniş kullanım alanına sahip sac malzemelerin şekillendirme işlemlerine de yansımıştır (Turan, 2009).

Bükme işlemi modern endüstride özellikle de otomotiv ve beyaz eşya sektöründe yaygın olarak sac parçaların şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Bükme işlemi; malzemenin talaş kaldırmaksızın bir eksen etrafında şekillendirilmesi işlemi olarak tarif edilebilir. Bükme işleminde sacın belirli bir bölgesi deformasyona uğrar. Bu operasyonla sac parça üzerinde plastik ve elastik şekil değişimi meydana gelir (Arslan, 2007).

2.1. Bükme İşlemi

Bükme işleminde sacın dış kısmındaki lifler uzamakta ve kesit daralmakta (çekmeye zorlanmakta), iç kısmındaki lifler kısalıp kesit genişlemektedir (basmaya zorlanmaktadır). Böylelikle bükülen malzemenin iç kısmında basma gerilmeleri, dış kısmında da çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Bükülen kısımda sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse nötr eksen sacın ağırlık merkezinden geçer. Bu eksen çekmeye ve basmaya zorlanan kısımları ayırır. Nötr ekseninde bir değişiklik olmadığından dolayı bu eksenindeki lif uzunluğu değişmez (Arslan, 2007). Sacların plastik olarak şekillendirilmesinde kullanılan bükme işleminin görünümü Şekil 2.1'de verilmiştir. Burada; s , sac parçası kalınlığı; R , bükme yarıçapı; ρ , nötr eksen yarıçapı; θ , bükme açısı ve w , sac malzeme genişliğidir.

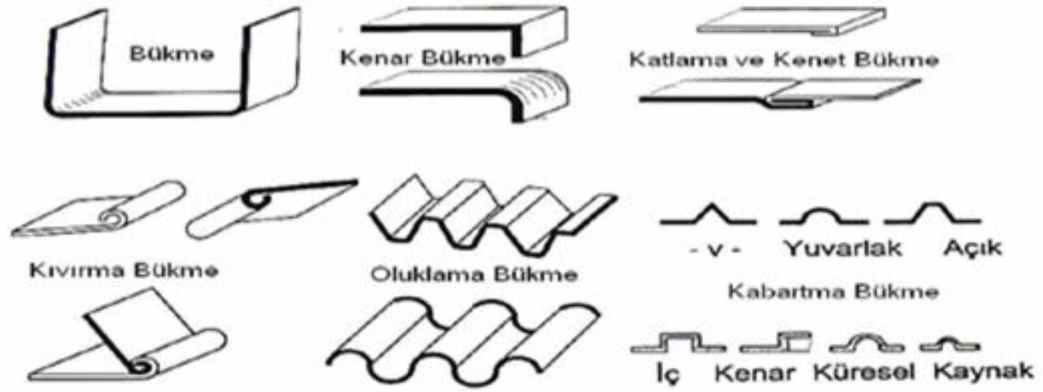


Şekil 2.1. Bükme işlemi (Duncan ve Marciniak, 1992)

Bükülen malzeme kesitinde meydana gelen değişimler genel olarak malzeme kalitesine, malzeme kalınlığına, bükme açısına, bükme yarıçapına ve bükme kuvvetine bağlıdır. Bükme işleminde malzemeye uygulanan kuvvet; malzeme elastisitesini yenmeli, kesin olarak bir yön değiştirme yapabilmesi için yeterli büyüklükte olmalıdır. Bükme kuvveti, malzemenin gösterdiği dirençten büyük ama kalıbın uyguladığı karşı kuvvetten küçük olmalıdır (Arslan, 2007).

2.2. Bükme İşlemi Çeşitleri

Ürünün şekline bağlı olarak Şekil 2.2'de çeşitli bükme işlemleri gösterilmiştir (Uzun ve Erişkin, 1983). Sac parçalarının bükme işleminde yaygın olarak kullanılan yöntem V ve U bükmedir. V bükme işlemi serbest bükme, kenar bükme, açısız bükme gibi alt gruplara ayrılabilir. Bükme işleminde parça önce elastik ardından plastik şekil değiştirdiğinden, yük kalktıktan sonra elastik toparlanma nedeniyle parça orijinal şekline geri dönmeye çalışır ve bükülmüş parça kısmen geri yaylanmaya maruz kalır (Arslan, 2007).

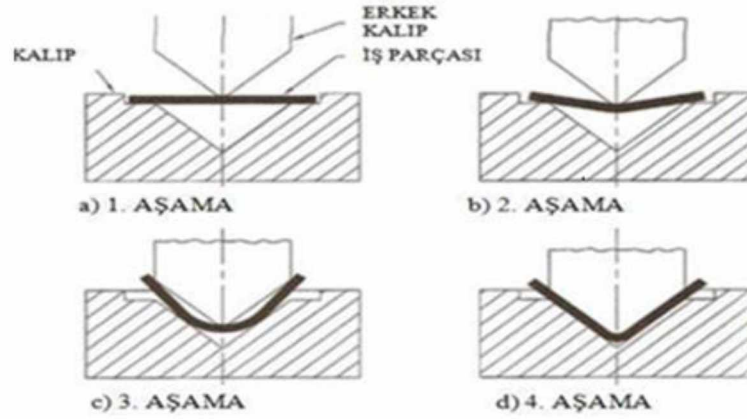


Şekil 2.2. Çeşitli sac bükme işlemleri (Uzun ve Erişkin, 1983)

Bükme işlemi günümüzde hidrolik veya mekanik preslerde gerçekleştirilmektedir. Kalıpları ise genelde iki parçadan oluşmaktadır. Çıkıntılı görünümüne sahip olan “erkek kalıp” zımba (ıstampa) adını almakta, buna karşı çalışan ve girintili şekle sahip olan “dişi kalıp” ise matris (kalıp) olarak adlandırılmaktadır. Bazı bükme işlemlerinde şekillendirilecek sacı sabitlemek için veya işlem sırasında kırışmasını önlemek için baskı plakası (pot çemberi) kullanımına ihtiyaç duyulur (Arslan, 2007). Pot çemberinin saca basması ya pnömatik sistemlerin veya çift tesirli kalıpların kullanılması ile sağlanır. Kalıpların birbirine göre konumları yapılan işin hassasiyeti açısından son derece önemli olduğundan uygun şekilde eksenlenmeleri gerekmektedir (Arslan, 2007).

2.2.1. V bükme

V bükme süresince zımba aşağı doğru inerken ilk olarak sacın desteksiz orta kısmı ile temas eder. Zımba iş parçasının merkezinden, malzeme kalınlığı gözönünde bulundurularak aşağı bastırılır. Bu durumda bükme kollarının uçları yukarıya doğru döner ve kalıp radyüsleri etrafında çok az bir miktar hareket ederek reaksiyon gösterirler (Arslan, 2007). V bükmeye ait kalıplar ve iş parçasının şematik görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.

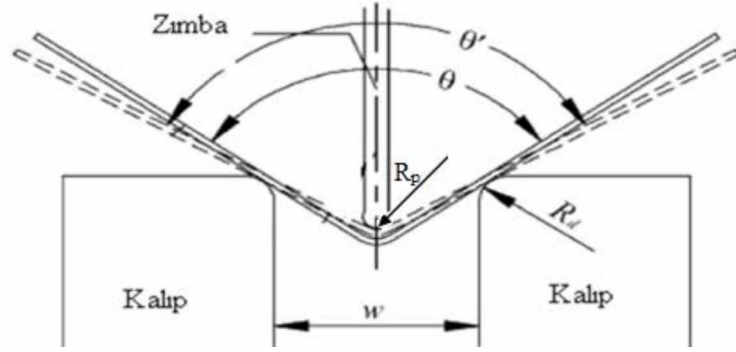


Şekil 2.3. V bükme olayı (Suchy, 2006)

Malzemenin kalıp radyüslerindeki hareketi salınma değil, sürüklenme ve kayma hareketi olmaktadır. Bükme olayı ilerledikçe sürüklenme ve dolayısı ile malzemenin reaksiyonu daha da artmaktadır. Bu durumda kollar sürekli olarak daha da yukarıya kalkmış bulunmaktadır. Son safhada artık yalnız zımba ucu değil, yan yüzeylerde temas halinde olup zımba parçayı kalıp içine sıkıştırmış durumdadır (Arslan, 2007).

2.2.2. Serbest bükme

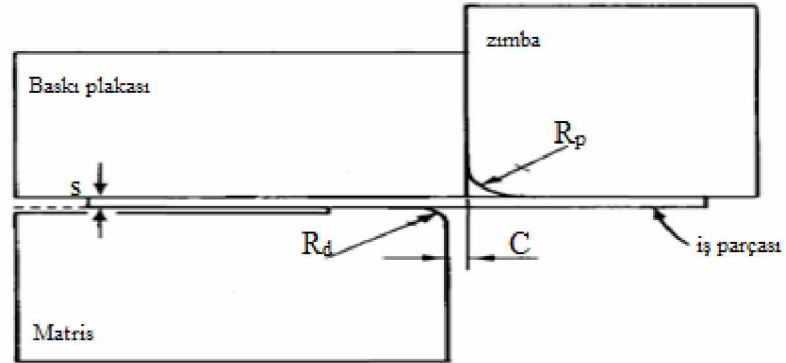
Serbest bükmede sac parça altta yer alan kalıbın kenarları tarafından desteklenirken zımbanın aşağı doğru inmesi ile istenen bükme açısı elde edilir. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere; w , kalıp açıklığı; R_p , zımba radyüsü, R_d , kalıp radyüsü; Θ , bükme açısı ve Θ' , kuvvet kalktıktan sonraki bükme açısıdır. Sac parçanın aldığı şekil itibari ile V bükmeye benzemesine rağmen sac parçanın kenarları bükme işlemi boyunca serbest haldedir (Arslan, 2007).



Şekil 2.4. Serbest bükme (Fei ve Hodgson, 2006)

2.2.3. Kenar bükme

Kenar bükme işleminde sac baskı plakası tarafından sabit pozisyonda tutulur. Hareketli ıstampa aşağı doğru inerek sacı şekillendirir. Bükülecek sacın uzunluğu sacın diğer kısımlarına nazaran çok kısa olduğunda kenar bükme tercih edilir. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere; R_p , zimba yarıçapı; R_d , matris yarıçapı, C , ıstampa ve matris arasındaki boşluk; s ise sac kalınlığıdır (Arslan, 2007).

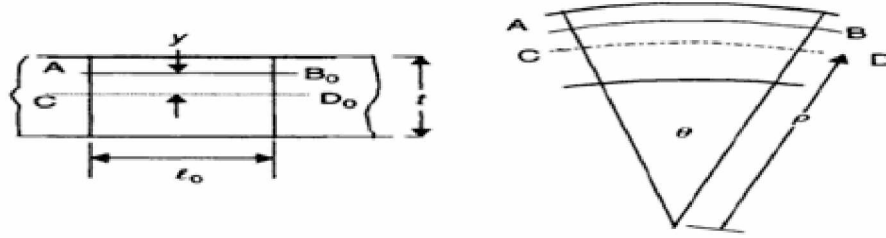


Şekil 2.5. Kenar bükme (Ling ve ark., 2005)

2.3. Sac Bükme İşleminin Matematiksel Analizi

Bükme işleminin oluşumu, malzeme bünyesindeki liflerde meydana gelen birim şekil değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Bükme işleminin oluşumu sırasında, Şekil

2.6'da bükme bölgesinde karşılaşılan lif geometrileri ve bunlardaki değişimler görülmektedir (Şahin, 2013).



Şekil 2.6. Bükme bölgesinde karşılaşılan lif geometrileri (Marciniak ve ark., 2002)

Şekil 2.6'da verilen \overline{CD}_0 doğru parçası, sac malzeme kalınlığının orta düzleminden geçmekte ve bükme öncesi tarafsız eksenler çakışmaktadır. Bükme işlemi ile birlikte, tarafsız eksen iç yüzeye doğru kaymakta, \overline{CD}_0 doğru parçası ise konumunu korumakla birlikte uzayarak CD halini almaktadır. Burada; ilk boy, l_0 ve son boy ise l_s olarak tanımlanmaktadır (Şahin, 2013);

$$l_s = \rho\theta \quad (2.1)$$

Sac malzeme bükme kesitinin merkezinden y birim uzaklıktaki \overline{AB}_0 doğru parçası ise AB halini alarak boyu l değerine eşit olmaktadır (Şahin, 2013).

$$l = \theta(\rho + y) = \rho\theta\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (2.2)$$

Eş. 2.1, Eş 2.2'de yerine yazılırsa,

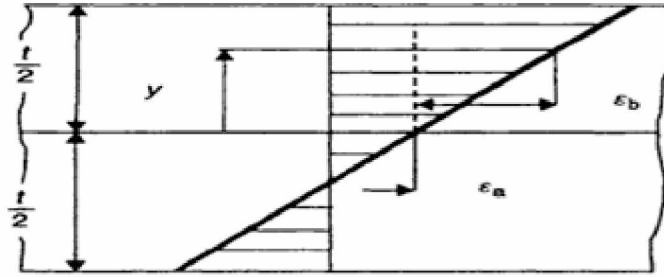
$$l = l_s\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (2.3)$$

elde edilir (Şahin, 2013).

Eş. 2.4'te çekme gerilmesine maruz AB yayında meydana gelen aksenal birim şekil değişim miktarı verilmiştir (Şahin, 2013).

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_o} = \ln \frac{l_s}{l_o} + \ln \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (2.4)$$

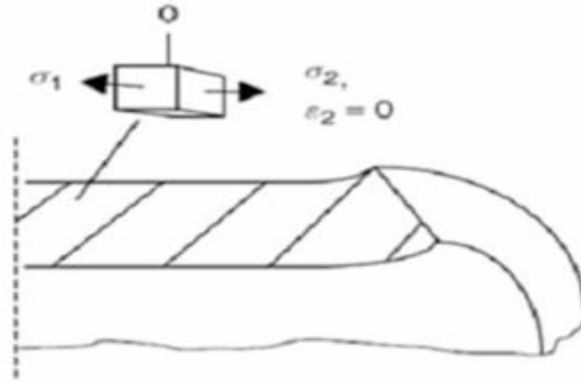
Şekil 2.7'deki ε_a değeri merkezdeki birim şekil değişim miktarını, ε_b değeri ise bükme sırasında karşılaşılan birim şekil değişimini ifade etmektedir (Şahin, 2013). Bükme yarıçap değeri, sac malzeme kalınlığına göre büyük olduğundan, bükme işleminden kaynaklanan birim şekil değişim miktarı Eş. 2.5'teki hali almaktadır (Marciniak ve ark., 2002).



Şekil 2.7. Birim deformasyon dağılımının şematik gösterimi (Marciniak ve ark., 2002)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_b = \ln \left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \approx \frac{y}{\rho} \quad (2.5)$$

Sac metal malzemelerde, genişlik kalınlıktan çok büyük olduğundan, genişlikte meydana gelen şekil değişimleri ihmal edilebilir seviyelerde kalmaktadır (Hosford ve Caddel, 1993). z doğrultusunda levha boyutları büyük ve cisim boyunca elemanlar dik kuvvetle yüklenmiş olduğundan bükme kuvveti sabittir. Bu nedenle, bükme ile şekillendirme işleminde, Şekil 2.8'de görüldüğü üzere düzlem birim şekil değişimi hali esas alınmaktadır (Wang ve ark., 2008).



Şekil 2.8. Yeterince geniş levhada bükme bölgesinde karşılaşılan birim şekil değişimi ve gerilme durumu (Marciniak ve ark., 2002)

Sac malzemede bükme işlemi sırasında düzlem birim şekil değişimi hali meydana gelmektedir. Şekil 2.8'de sac malzeme genişliği doğrultusunda şekil değişim miktarının sıfır olduğu görülebilmektedir (Şahin, 2013). Buna göre;

$$\varepsilon_1; \varepsilon_2 = 0; \varepsilon_3 = -\varepsilon_1 \quad (2.6)$$

$$\sigma_1; \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}; \sigma_3 = 0 \quad (2.7)$$

Bu şekil değişim hali göz önünde bulundurulduğunda von Mises akma kriterine göre yeni akma dayanımı değeri Eş. 2.10'da görülmektedir. Burada; S, düzlem birim şekil değişimi durumundaki akma dayanımını göstermektedir (Şahin, 2013).

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (2.8)$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right]} \quad (2.9)$$

Eş. 2.6 ve 2.7, Eş. 2.8 ve 2.9'da yerine yazıldığında malzeme akma sınırındaysa $\bar{\sigma}$ (akma gerilmesi) σ_f ile eşittir (Şahin, 2013). Buradan;

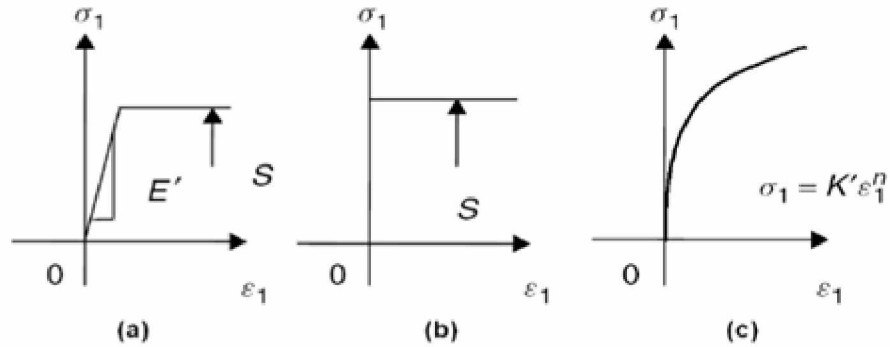
$$\sigma_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)\sigma_f = S \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{\varepsilon} \quad (2.11)$$

elde edilir. Buradan S , düzlem birim şekil değişimi akma gerilmesidir. Eş. 2.7 ve 2.8, von Mises akma kriteri kabulü ile yazılmıştır (Şahin, 2013).

2.3.1. Farklı malzeme modellerinde bükme

Çelik gibi sac metallerin büyük bir kısmı, elastik deformasyonla sertleşen plastik davranış sergiler. Ancak şekillendirme işlemlerinin analizinde uygulamada kolaylık sağlaması bakımından daha basit malzeme modelleri tercih edilebilmektedir (Marciniak ve ark., 2002). Bu malzeme modellerine uygun olarak, bükme işleminde Şekil 2.9'da görüldüğü üzere farklı yaklaşımlarla karşılaşılmaktadır (Şahin, 2013).

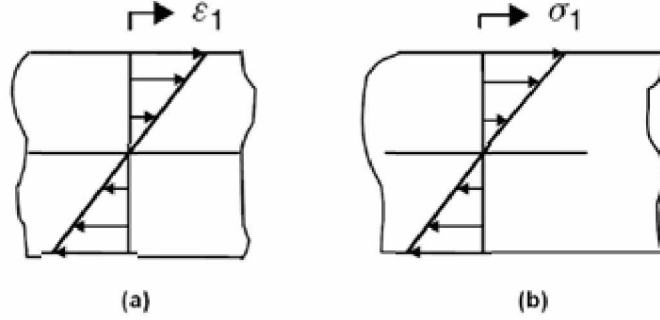


Şekil 2.9. Malzeme modelleri: (a) elastik-mükemmel plastik, (b) rijit-mükemmel plastik, (c) deformasyonla sertleşen malzeme (Marciniak ve ark., 2002)

2.3.1.1. Elastik bükme

Şekillendirilecek malzemeye akma dayanımının üzerinde bir gerilme değeri uygulandığında, malzemede plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Uygulamada karşılaşılan şekillendirme işlemleri genellikle plastik deformasyonla

sonuçlanmaktadır. Uygulanan gerilme değerinin akma dayanımından küçük olduğu durumlarda ise herhangi bir plastik deformasyon görülmemekte olup Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, deformasyonlar elastik sınırlarda kalmaktadır (Şahin, 2013).



Şekil 2.10. Elastik bükmede birim şekil değişimi (a) ve gerilme dağılımı (b) (Marciniak ve ark., 2002)

Eş. 2.5'ten $\varepsilon_1 = \varepsilon_b = \frac{y}{\rho}$ olduğundan (Şahin, 2013);

$$\sigma_1 = E' \varepsilon_b = E' \frac{y}{\rho} \quad (2.12)$$

Burada E' , düzlem birim şekil değişim halindeki elastiklik modülünü ifade etmektedir ve Eş. 2.13 ile tanımlanmaktadır (Şahin, 2013).

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (2.13)$$

Elastik bükme sırasında, uygulanan bükme momentinin değeri ise Eş. 2.14'te verilmektedir (Şahin, 2013).

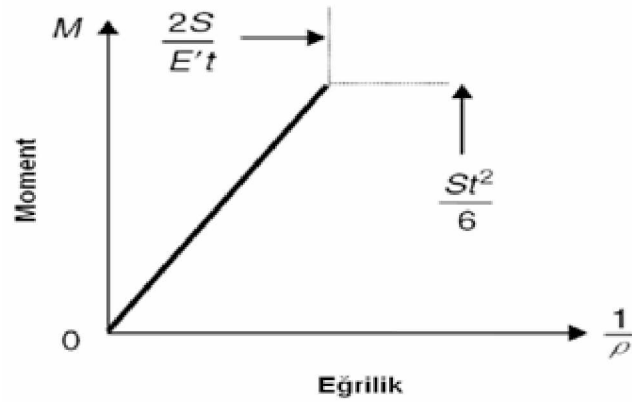
$$M = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} E' \frac{y}{\rho} y dy = 2 \frac{E'}{\rho} \int_0^{\frac{t}{2}} y^2 dy = \frac{E' t^3}{\rho 12} \quad (2.14)$$

Eş. 2.12'de $\frac{E'}{\rho} = \frac{\sigma_1}{y}$ olduğundan;

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma_1}{y} = E' \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (2.15)$$

elde edilir. Burada; $I = \frac{t^3}{12}$, birim genişlikteki alan atalet momentini ifade etmektedir.

Eş. 2.15'te geçen $\frac{1}{\rho}$ değeri ise, eğrilik olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.11'de elastik bükme işlemi için momentin eğrilik ile değişimi görülmektedir (Şahin, 2013).



Şekil 2.11. Elastik bükmede moment-eğrilik grafiği (Marciniak ve ark., 2002)

Elastik bükme, en dış lifin düzlem birim şekil değişimi sırasında akma dayanımına ulaşmasıyla ($y = \frac{t}{2}$) sınırlanmaktadır (Şahin, 2013). Limit elastik moment;

$$M_e = \frac{St^2}{6} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir (Şahin, 2013). Bu moment değerinde eğrilik ise;

$$\left(\frac{1}{\rho} \right)_e = \frac{2S}{E't} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edildiğinden;

$$\frac{M}{1} = \frac{\frac{St^2}{E't}}{2S} \quad (2.18)$$

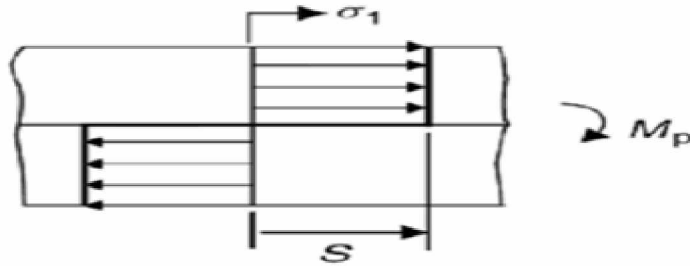
şeklinde elde edilir (Şahin, 2013). Buradan M, bükme momenti;

$$M = \frac{E't^3}{12} \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan birim genişlik için bükme katılığı $\frac{E't^3}{12}$ şeklinde elde edilir (Şahin, 2013).

2.3.1.2. Rijit-mükemmel plastik bükme

Bükmede göz önünde bulundurulabilecek yaklaşımlardan biri de rijit-mükemmel plastik malzemede bükme modelidir. Bükme sırasında oluşan eğrilik, elastik eğri sınırından çok büyük olduğunda rijit-mükemmel plastik model tercih edilmektedir (Marciniak ve ark., 2002). Şekil 2.12'de görüldüğü üzere bu malzeme modelinde şekillendirme işleminde herhangi bir elastik deformasyonla karşılaşmadığı varsayılmaktadır (Şahin, 2013).

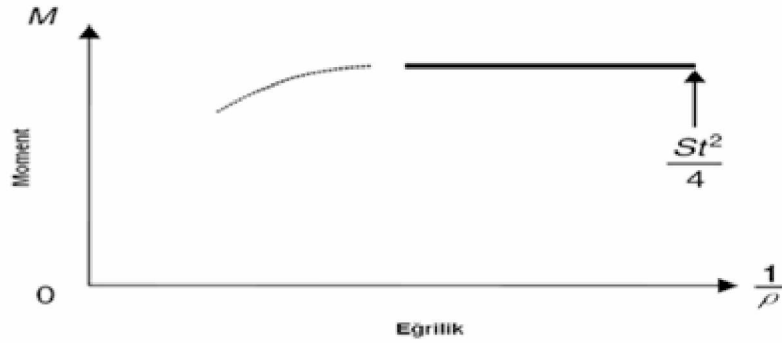


Şekil 2.12. Rijit mükemmel plastik bükmede gerilme dağılımı (Marciniak ve ark., 2002)

Tam plastik moment Eş. 2.20 ile ifade edilir.

$$M_p = \frac{St^2}{4} \quad (2.20)$$

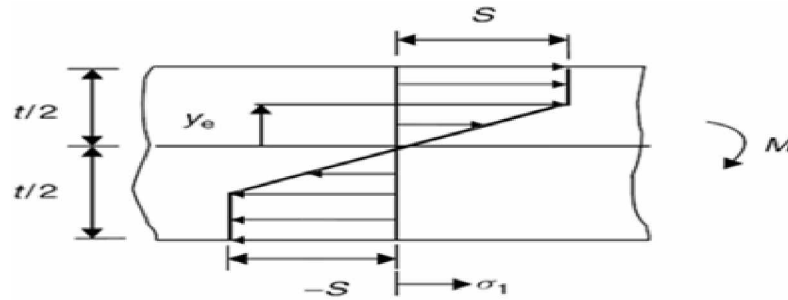
Şekil 2.13'teki moment-eğrilik grafiğinden de görüldüğü üzere rijit-mükemmel plastik bükmede, şekillendirme işlemi esnasında eğrilik sürekli değişmesine rağmen, bükme momenti sabit kalmaktadır (Şahin, 2013).



Şekil 2.13. Rijit-mükemmel plastik bükmede moment-eğrilik grafiği (Marciniak ve ark., 2002)

2.3.1.3. Elastik-mükemmel plastik bükme

Moment değerinin plastik bükme momentinin altında kaldığı sınır elastik eğriyi aşan eğrilerin görüldüğü durumlarda, Şekil 2.14'teki davranışı gösteren elastik-mükemmel plastik malzeme modeli tercih edilmektedir (Şahin, 2013).



Şekil 2.14. Elastik-mükemmel plastik malzemede gerilme dağılımı (Marciniak ve ark., 2002)

Düzlem birim şekil değişimi hali için gerilme değeri Eş. 2.21 ile elde edilmektedir (Şahin, 2013).

$$\sigma_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) \sigma_o = S \quad (2.21)$$

y değeri, y_e sınırını aştığında, malzeme S, akma dayanımında plastik davranış sergilemeye başlamaktadır. Eğriliğin artmasıyla birlikte y_e değeri giderek azalmaktadır (Marciniak ve ark., 2002).

$$(\varepsilon_b)_{y=y_e} = \frac{y}{\rho} = \frac{S}{E'} \quad (2.22)$$

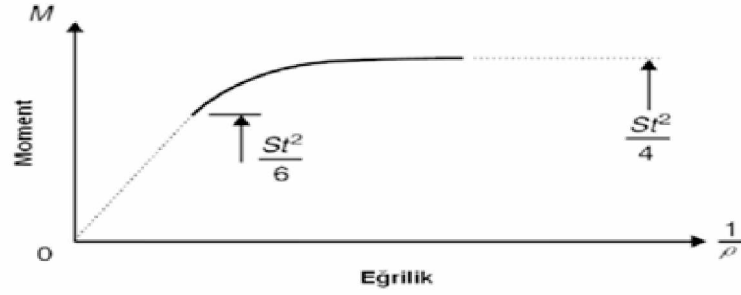
$$y_e = \frac{S}{E'} \frac{1}{\frac{1}{\rho}} = m \frac{t}{2} \quad (2.23)$$

$$m = \frac{\left(\frac{1}{\rho} \right)_e}{\left(\frac{1}{\rho} \right)} \quad (2.24)$$

Burada, $1 \geq m \geq 0$ olup, bu noktada moment denklemi, elastik ve plastik kısımları içerecek şekilde iki kısımdan oluşmaktadır (Şahin, 2013).

$$M = 2 \left\{ \int_0^{y_e} E' \frac{y}{\rho} y dy + \int_{y_e}^{\frac{t}{2}} S_y dy \right\} = \frac{St^2}{12} (3 - m^2) \quad (2.25)$$

Şekil 2.15'de görüldüğü üzere elastik-mükemmel plastik malzeme modelinde, uygulanan moment değeri elastik sınırı aşmakta ve maksimum plastik sınıra ulaşmaktadır (Şahin, 2013). Bu noktada maksimum plastik moment değeri, elastik moment değerinin yaklaşık 1.5 katı olmaktadır (Marciniak ve ark., 2002).



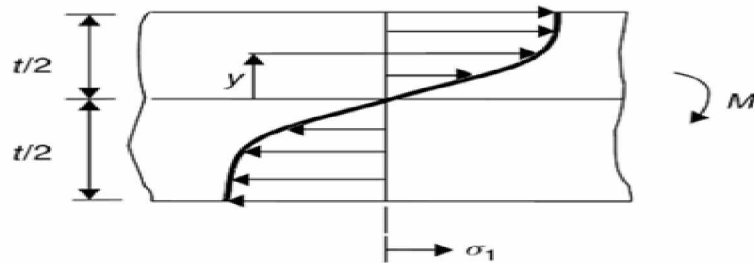
Şekil 2.15. Elastik-mükemmel plastik bükmede moment-eğrilik grafiği (Marciniak ve ark., 2002)

2.3.1.4. Deformasyonla sertleşen malzemede bükme

Malzemelerin büyük bir çoğunluğunda akma dayanımı aşıldıktan sonra, malzeme üzerine uygulanan yük değeri artarak, malzeme üniform şekilde deforme olmaya devam etmektedir. Metallerin ve alaşımların büyük çoğunluğunda görülen bu olay, deformasyon sertleşmesi ya da diğer adıyla pekleşme olarak adlandırılmaktadır (Hosford, 2005). Şekil 2.16'da deformasyonla sertleşen malzemenin bükme işleminde sergilediği davranış görülmektedir (Şahin, 2013). Deformasyona bağlı olarak malzemenin akma dayanımındaki artış;

$$\sigma_1 = K' \varepsilon_1^n \approx K' \left(\frac{y}{\rho} \right)^n \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; n, pekleşme üstelidir.



Şekil 2.16. Deformasyonla sertleşen modelde bükmede gerilme dağılımı (Marciniak ve ark., 2002)

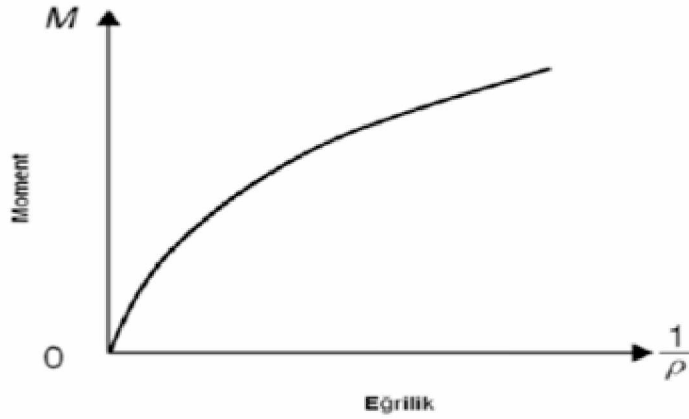
Deformasyonla sertleşen malzeme modelinde denge denklemi Eş. 2.27 ile ifade edilmektedir (Şahin, 2013).

$$M = 2K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \int_0^t y^{1+n} dy = K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \frac{t^{n+2}}{(n+2)2^{n+1}} \quad (2.27)$$

Burada; $I_n = \frac{t^{n+2}}{(n+2)2^{n+1}}$ olmak üzere;

$$\frac{M}{I_n} = \frac{\sigma_1}{y^n} = K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \quad (2.28)$$

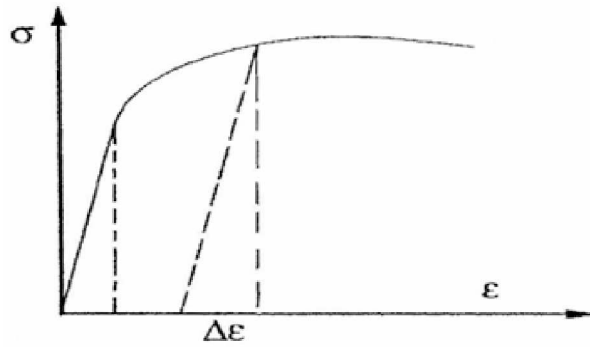
yazılabilir. Bunun sonucunda, elde edilen moment diyagramı Şekil 2.17'de görülmektedir (Şahin, 2013).



Şekil 2.17. Deformasyonla sertleşen malzemede moment-egrilik diyagram

3. GERİ YAYLANMA

Sac malzeme; yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri altında almış olduğu formu; bu kuvvetler üzerinden kalktıktan sonra, malzemenin elastik özelliklerinden dolayı parça geometrisinde meydana gelen büyük oranda elastik ender olarak da elastik-plastik değişim olarak tanımlanan bir geometrik değişim gerçekleştirerek kaybeder (Lange, 1985). Bu olaya geri yaylanma denir. Bu duruma örnek olarak sünek bir metalin gerilme-birim şekil değişimi eğrisinde yükleme kaldırıldıktan sonra malzemenin uzama miktarındaki düşüş Şekil 3.1'de görülmektedir (Arslan, 2007).



Şekil 3.1. Sünek bir metaldeki geri yaylanmanın akma diyagramı üzerinde gösterilişi

Bükme, boyutsal kontrolün problem yarattığı bir sac şekillendirme yöntemidir (Marciniak ve ark., 2002). Sac malzemelerin bükülerek şekillendirilmesinde karşılaşılan bu en temel problem, geri yaylanmadır. Malzeme girdisinin büyük bir bölümünü özellikle sac metal malzemelerin oluşturduğu üretim kollarında, bükme ve benzeri şekillendirme yöntemleri neticesinde karşılaşılan geri yaylanma problemi, büyük maddi kayıplara neden olabilmektedir. Öyle ki, Amerika Birleşik Devletleri'nde, sadece otomotiv sektöründe, üretim gecikmeleri, takım yenileme maliyetleri, reddedilen hurda malzemeler gibi geri yaylanma problemlerinin maliyet üzerine etkisi, yıllık 50 milyon doları aşmaktadır (Gan ve Wagoner, 2004).

Sac malzemeleri şekillendirirken uygulanan yük kaldırıldığında, malzeme elastik olarak toparlanmaya ve böylelikle şekillendirme işlemi öncesi formuna dönmeye çalışmaktadır (Tekiner, 2004). Bu noktada; geri yaylanma, sac malzemenin

şekillendirme sırasında sac malzemeye uygulanan bükme momentinden kurtulmasıyla sonuçlanan elastik toparlanma olarak tanımlanabilmektedir (Yi ve ark, 2008). Geri yaylanma, sac metal malzemelerin özellikle soğuk şekillendirilmeleri sırasında önem kazanmaktadır (Lazim, 2003).

Sac malzemelerin şekillendirilmesi sonrasında, malzemede elastik toparlanma meydana gelmekte ve sonuç olarak malzeme bünyesinde kalıntı gerilmelerle karşılaşmaktadır (Hosford ve Caddell, 1993). Ayrıca; geri yaylanmayı, şekillendirme kalıplarının malzeme üzerinden kalkmasından sonra karşılaşılan, gerilmelerin malzemeye dağılması olayı olarak da görmek mümkündür (Zhang ve ark., 2007).

Geri yaylanma, bitmiş parçada boyut ve şekil doğruluğunu etkileyen en önemli faktördür (Altan ve ark., 1994). Bükme ve benzeri şekillendirme işlemleri sonrasında karşılaşılan geri yaylanma problemi, sac malzemelerde kalıntı gerilmeler yaratarak, şekillendirilmiş parçada boyutsal doğruluğu etkilemektedir (Mkaddem ve Saidane, 2007). Sonuç olarak, malzeme bünyesinde karşılaşılan bu kalıntı gerilme dağılımları belirginleştikçe, şekillendirme sonrası geri yaylanma ön plana çıkmakta ve arzu edilen son parça geometrisinden uzaklaşmaktadır. İmalat süreci sonunda ise, önceden belirlenen tolerans aralığı dışında kalan mamuller ortaya çıkmaktadır (Axinte ve ark, 2008).

Bükme ile şekillendirilen parçaların, arzu edilen tolerans sınırlarında kalabilmesi ve nihai geometrinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için geri yaylanma davranışının önceden tahmin edilmesi gerekmektedir (Tekiner, 2004). Bu tahminin de sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi, ancak sac malzemedeki iç gerilme dağılımının etkin bir şekilde belirlenmesi ile mümkün olmaktadır (Gau, 1999; Zeng ve Xia, 2007).

Geri yaylanma, geometri ve yükleme ile ilgili parametreler tarafından yaratılan gerilme durumunun bir fonksiyonudur ve basit matematiksel yaklaşımla Eş. 3.1 kullanılarak ifade edilmektedir (Livatyalı ve Ergeldi, 2006). Dolayısıyla, geri yaylanma, elastik toparlanmadaki moment değerinin kullanılmasıyla

belirlenebilmektedir (Gau, 1999). Bu noktada, elastik bükme momentinin artmasıyla, geri yaylanmanın artış göstereceği söylenebilir (Turan, 2009).

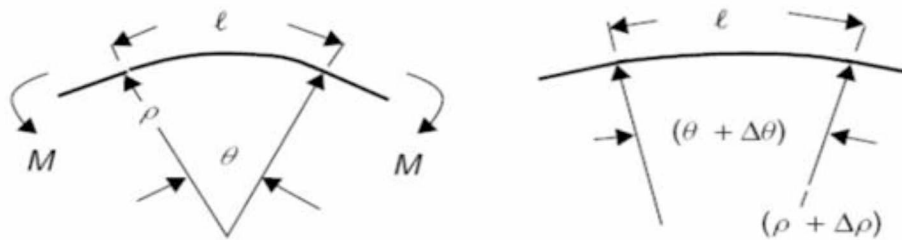
$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} = M \frac{(1 - \nu^2)}{IE} \quad (3.1)$$

Burada; M, bükme momentini, ν , poisson oranını, I, kesit alanının atalet momentini, E, malzemenin elastiklik modülünü, ρ ve ρ' , bükme işlemi öncesi ve sonrasındaki radyüs değerlerini ifade etmektedir (Turan, 2009).

Geri yaylanma, malzeme bünyesinde bulunan kalıntı gerilmelerden kaynaklanan bir deformasyon olayıdır ve bu olay gerilme dağılımlarındaki farklılıklarla doğrudan ilişkilidir (Chen ve Ko, 2006). Bu gerilme dağılımlarındaki farklılıklar ise çok sayıda parametreden etkilenmektedir (Turan, 2009).

3.1. Geri Yaylanmanın Matematiksel Analizi

Sac malzemenin şekillendirilmesi sonrasında yükün kaldırılmasıyla birlikte, bükme bölgesinin açısı ve eğriliğinde değişiklik oluşmaktadır (Marciniak ve ark., 2002). Bu durum, Şekil 3.2'de görülmektedir (Şahin, 2013).



Şekil 3.2. Momentin kaldırılmasıyla birlikte karşılaşılan geri yaylanma (Marciniak ve ark., 2002)

Şekil 3.2'de bükme bölgesinin uzunluğu;

$$l = \rho\theta \quad (3.2)$$

olduğundan geri yaylanma açısının bükme açısına oranı;

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)}{\left(\frac{1}{\rho}\right)} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir (Şahin, 2013).

3.1.1. Elastik mükemmel plastik malzemede geri yaylanma

Elastik-mükemmel plastik malzemelerde, bükme işlemi sırasında birim genişlikteki malzeme için uygulanan moment değeri Eş. 2.20'den elde edilmektedir. Genişlikte göz önünde bulundurulduğunda bu moment değeri Eş. 3.4 ile ifade edilmektedir (Şahin, 2013).

$$M = w \frac{st^2}{4} \quad (3.4)$$

Eş. 2.5 ve 2.12 diferansiyel formda yazılırsa,

$$\Delta\sigma = E'\Delta\varepsilon \quad (3.5)$$

$$\Delta\varepsilon = y\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right) = y\cdot\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'}\right) \quad (3.6)$$

Eş. 3.5, Eş. 3.6'da yerine yazılırsa momentteki değişim Eş. 3.7'deki gibi elde edilir (Şahin, 2013).

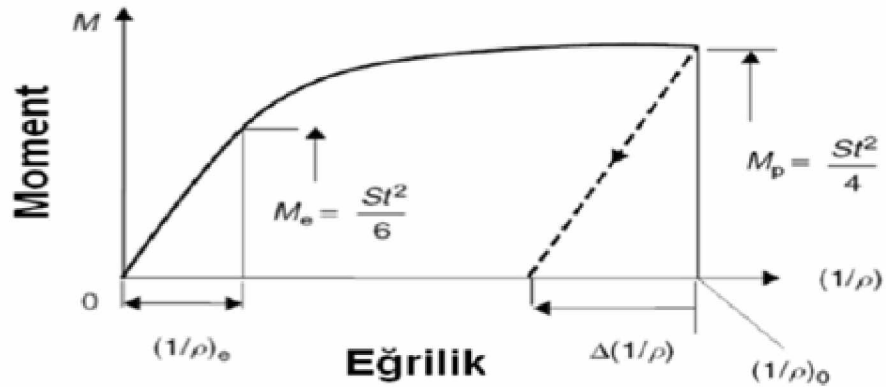
$$\Delta M = 2w \int_0^{\frac{t}{2}} \Delta \sigma_y dy = 2w \int_0^{\frac{t}{2}} E' \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} \right) y^2 dy \quad (3.7)$$

$$\Delta M = \frac{wE't^3}{12} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} \right) \quad (3.8)$$

Geri yaylanma ile birlikte, bükme momenti ve şekillendirme sonrası momentte karşılaşılan değişim birbirine eşitlenmektedir (Şahin, 2013).

$$\frac{wE't^3}{12} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} \right) = w \frac{St^2}{4} \quad (3.9)$$

Bükme momentindeki değişim Şekil 3.3'te görülmektedir (Şahin, 2013).



Şekil 3.3. Elastik-mükemmel plastik malzemede moment-eğrilik grafiği

Bu noktada, geri yaylanma miktarı Eş. 3.10 halini almaktadır. Şekillendirme sonrasında karşılaşılan geri yaylanma açısı olarak Eş. 3.9'da verilmektedir (Şahin, 2013).

$$\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} \right) = \frac{3S}{tE'} \quad (3.10)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\rho}\right)}{\frac{1}{\rho}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{3S\rho}{tE'} \quad (3.12)$$

$$\Delta\theta \approx \frac{3S\rho}{tE'}\theta \quad (3.13)$$

Eş. 3.13 incelendiğinde, elastik-mükemmel plastik malzemede geri yaylanmanın ρ/t oranı ile değiştiği gözlemlenmektedir (Marciniak ve ark., 2002). Ayrıca, geri yaylanma θ bükme açısına bağlı olarak artmaktadır (Şahin, 2013).

3.2. Geri Yaylanmanın Telafisi

Sac malzemelerin şekillendirilmesi işleminde, şekillendirme sonrası arzu edilen parça geometrisini etkilediğinden, geri yaylanmanın telafisi gerekmektedir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak geri yaylanma miktarı ne kadar yüksek olursa olsun, uygun kalıp tasarımları ile geri yaylanmaya müdahale etmek mümkün olmakla birlikte (Gan ve Wagoner, 2004) tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir (Tekiner, 2004).

Bükme işlemi sonrası karşılaşılan geri yaylanmayı telafi etmede en sık kullanılan yöntemlerden biri aşırı bükmedir (Carden ve ark, 2002). Bu yöntemde, geri yaylanma miktarı önceden tahmin edilmekte ve tahmin edilen bu açı değerine göre sac malzeme gereğinden fazla bükülmektedir. Böylece, bükme momentinin kaldırılmasının ardından parça tahmin edilen açı değeri kadar geri yaylanmakta ve arzu edilen nihai parça geometrisi elde edilmektedir (Tekiner, 2004).

V bükme işleminde, geri yaylanma telafisi amacıyla uygulanabilecek bir diğer yöntem ise bükme bölgesinin ezilmesidir. Bu yöntemde ıstampa geometrisi farklılık

göstermekte ve bükme bölgesinde malzeme ezilerek daha fazla kalıcı deformasyon yaratılmasına imkân tanımaktadır (Schey, 1987).

Gererek bükme işlemi de en sık kullanılan geri yaylanma telafi yöntemlerinden bir diğeridir. Bu yöntemde; sac, bükme işlemi sırasında ya da sonrasında çekme gerilmesine maruz bırakılmakta ve böylece geri yaylanma miktarı minimize edilmektedir (Chen ve Koç, 2007).

Kenar bükmenin söz konusu olduğu durumlarda, geri yaylanmayı telafi etmenin bir diğer yolu da ters bükme işlemidir. Bu yöntemde öncelikle sac malzeme V bükme işlemine maruz bırakılmaktadır. Daha sonra sac malzeme ters çevrilmekte ve ters yönde gerçekleştirilen düz kenar bükme işlemi uygulanmaktadır. Böylece sac malzeme bünyesindeki gerilme dağılımları ile oynanmakta ve geri yaylanma belirli ölçüde telafi edilmektedir (Chen ve Koç, 2007).

3.3. Geri Yaylanma Davranışına Etki Eden Faktörler

Geri yaylanma, malzemelerin mekanik özellikleri, işlem parametreleri ve boyutsal faktörler gibi birçok değişkenin çoklu etkileşiminin söz konusu olduğu karmaşık bir şekillendirme problemidir. Yükleme ve boşaltma sırasında malzemede gerilme oluşumuyla ilgili olan değişkenler de şekillendirilmiş parçaların geri yaylanma davranışlarını etkilemektedir. Ayrıca, parça geometrisi ve malzeme türüne bağlı olduğundan, geri yaylanmanın telafi edilmesinde genel bir kuraldan söz edilememektedir (Yi ve ark, 2008).

İşlem parametreleri, malzemenin mekanik ve boyutsal özellikleri gibi faktörler etkileşerek, geri yaylanmayı etkileyecek gerilme dağılımında değişikliğe yol açmaktadırlar (Chen ve Koç, 2007). Bu değişiklikler, geri yaylanma miktarının tahmini ve telafisinin uygulanabilirliğini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, geri yaylanma davranışının incelenmesinin istendiği durumlarda, sağlıklı çözümlerlerin yapılabilmesi için, bu değişkenlerin bağımsız etkilerinin yanı sıra, çoklu etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Zira, çoklu etkileşim nedeniyle,

parametreler ve geri yaylanma arasında lineer olmayan ilişkilerle karşılaşmak mümkün olmaktadır (Wei ve ark., 2009).

3.3.1. Kalınlık

Kalınlık, geri yaylanma davranışını belirgin şekilde etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Mevcut çalışmalar içinde kalınlık daha çok R/t ifadesi içinde yer almış, yani bükme radyüsünün parçanın kalınlığına oranı şeklinde ifade edilmiştir. Mevcut çalışmalar incelendiğinde, bükme radyüsünün sac malzeme kalınlığına oranının artmasıyla geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmektedir (Tekiner, 2004). Yine sac malzeme kalınlığı azaldıkça geri yaylanma miktarı artış göstermektedir (Turan, 2009).

3.3.2. Bükme radyüsü

Sac malzemelerin bükülerek şekillendirilmesinde önemli parametrelerden biri de bükme radyüsüdür. Çünkü bükülebilirlik takım geometrisinden etkilenmektedir (Leu, 1997). Malzemenin hasara uğramadan bükülebileceği en küçük radyüs değeri, o malzemenin bükülebilirliğini ifade etmektedir. Genellikle çok küçük radyüs değerlerinde bükme işlemleri gerçekleştirilememektedir. Bükme radyüsünün çok küçük tutulması durumunda şekillendirilen malzemenin en dış liflerinde aşırı miktardaki birim şekil değişimi neticesinde hasar gözlemlenmektedir (Hosford ve Caddell, 1993). Dolayısıyla bükme ile şekillendirmede, malzemedeki yırtık yada çatlak oluşumlarını önlemek için büyük bükme radyüsleri tercih edilmektedir (Schuler, 1998). Kalınlık değeri arttıkça da sac malzemenin bükülebileceği minimum bükme radyüsünün arttığı görülmektedir (Leu, 1997). Bükme radyüsü aynı zamanda temel olarak geri yaylanma davranışını da belirlemektedir. Mevcut çalışmalar incelendiğinde, radyüs değerinin artmasıyla birlikte geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmektedir (Kim ve Koç, 2008).

3.3.3. Kalıp açıklığı

Bükme ile şekillendirilen sac malzeme ile zımba arasındaki boşluk kalıp açıklığı olarak tanımlanmaktadır. Mevcut çalışmalar incelendiğinde, kalıp açıklığının artmasıyla, geri yaylanma miktarının arttığı gözlemlenmektedir (Gau, 1999). Kalıp açıklığının sac malzeme kalınlığına oranında meydana gelen % 10'luk bir artış, geri yaylanmayı % 10 civarında artırabilmektedir (Livatyalı ve Altan, 2001). Kalıp açıklığı ne kadar küçülürse, geri yaylanma da o kadar azalmaktadır (Turan, 2009). Dolayısıyla kalıp açıklığı değeri ile oynayarak geri yaylanma telafi edilebilir. Kalıp açıklığının daralması nedeniyle, bükme bölgesinde plastik deformasyonlar artmakta, dolayısıyla şekillendirme sonrası geri yaylanma azalmaktadır (Livatyalı ve Altan, 2001).

3.3.4. Anizotropi

Yöne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik gösteren malzemelere anizotropik malzeme denilmektedir. Özelliklerin yöne bağlı olarak değişmediği durumda ise malzemeler izotropik olarak adlandırılır. Sac malzemelerin mekanik özellikleri, yöne bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Zhang ve ark., 2007). Bu durum malzemelerin, plastik olarak şekillendirilmesine yansımaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, anizotropinin geri yaylanma üzerine etkisi bulunduğu anlaşılmaktadır (Chen ve Koç, 2007). Anizotropi değeri arttıkça, malzemenin deformasyona karşı direnci artmaktadır. Bu durum, doğrultulara göre farklılık göstermektedir. Bükme eksenini hadde doğrultusuna dik gelecek şekilde gerçekleştirilen bükme işleminde malzemenin bükülebilirliği, haddeye paralel doğrultuya göre iyileşmektedir (Leu, 1997). Haddeye paralel doğrultuda alınan parçalarda şekillendirme sonrasında karşılaşılan geri yaylanma miktarı ise, haddeye dik doğrultudaki geri yaylanmaya göre fazla olmaktadır (Mkaddem ve Saidane, 2007).

İzotrop malzemelerde minimum oranda geri yaylanma miktarına rastlandığı söylenebilir (Verma ve Haldar, 2007). Anizotropinin geri yaylanma üzerine etkisini,

rulo halindeki malzemelerden elde edilen numunelerde farklı bir şekilde görmek mümkündür. Burada, sac malzemenin geçmişinin ön plana çıktığı söylenebilir. Rulo açıcılardan elde edilen sac malzemenin şekillendirme işlemine tabi tutulması sırasında, konveks ve konkav etki söz konusu olmaktadır (Mkaddem ve Saidane, 2007).

Konkav bükme işlemi, sac malzemenin rulo halindeki iç yüzeyine bakan tarafa bükülmesi ile oluşmaktadır. Malzeme geçmişinde bulunan kalıntı gerilmeler nedeniyle konkav bükme işleminde geri yaylanma miktarının daha fazla olduğu söylenebilir (Mkaddem ve Saidane, 2007).

Konveks bükme işleminde ise sac malzeme rulo halindeki dış yüzeyine bakan tarafa doğru şekillendirilmektedir. Konveks bükme işleminde geri yaylanma miktarı, daha az kalıntı gerilme bulunduğundan, daha az olmaktadır. Dolayısıyla uygun parça geometrisin elde edilmesinde konveks bükme işleminin tercih edilmesi daha doğru olacaktır (Mkaddem ve Saidane, 2007).

Konkav bükme işlemi söz konusu olduğunda, malzemenin dış yüzeyinde mevcut olan çekme ve iç yüzeyinde mevcut olan basma kalıntı gerilmelerine bükme ile şekillendirme işlemi neticesinde, ilave çekme ve basma kalıntı gerilmeleri eklenmektedir. Bu durumda kalıntı gerilmeler büyümekte ve malzemede daha büyük geri yaylanma açılarının oluşmasına neden olmaktadır. Ancak, sac konveks olarak büküldüğünde, malzeme bünyesinde var olan kalıntı gerilmeler ile şekillendirme işleminden kaynaklanan kalıntı gerilmeler birbirlerinin etkilerini gidermekte ve bunun sonucunda da geri yaylanma miktarı azalmaktadır (Mkaddem ve Saidane, 2007).

3.3.5. Akma dayanımı

Sac malzemeleri karşılaştırmada kullanılacak en temel değişkenlerden biri de akma dayanımıdır. Malzemenin kalıcı şekil değişimine maruz kalmaya başladığı gerilme değeri akma dayanımı olarak ifade edilir. Geri yaylanma davranışı

malzemenin elastik ve plastik deformasyon davranışına bağlı olarak değişmektedir (Turan, 2009). Geri yaylanmanın küçük olması için, şekillendirilen malzemenin akma dayanımının düşük olması gerekmektedir (Gau, 1999). Malzemenin akma dayanımı arttıkça, geri yaylanma miktarı da artmaktadır (Tekiner, 2004). Yapılan çalışmalarda, yüksek dayanımlı çeliğin şekillendirilmesi sonrasındaki geri yaylanma miktarının düşük dayanımlı çelikte karşılaşılan geri yaylanmadan çok daha fazla olduğu görülmektedir (Chen ve Koç, 2007). Geri yaylanma miktarı akma dayanımının elastiklik modülüne oranının yüksek olduğu durumlarda artmaktadır. Geri yaylanma malzemenin elastik ve plastik deformasyon davranışına bağlı olarak değişmektedir (Turan, 2009).

3.3.6. Elastiklik modülü

Elastiklik modülü, mühendislik uygulamalarının büyük bir çoğunluğunda sabit bir değer olarak alınmaktadır. Ancak, artan deformasyona bağlı olarak elastiklik modülünün değeri düşmektedir (Yu, 2009). Deformasyonla birlikte elastiklik modülünde düşüşe plastik deformasyon sırasında karşılaşılan mikro yapı değişiklikleri ve iç gerilmeler neden olmaktadır (Yu, 2009). Bükme ile şekillendirme işleminde elastiklik modülü küçük olan sac malzemelerde geri yaylanma miktarı daha fazla olmaktadır (Livatyalı ve Altan, 2001). Diğer bir deyişle, elastiklik modülü arttıkça, elastik deformasyona direnç artarak geri yaylanma miktarı azalmaktadır (Tekiner, 2004).

3.3.7. Sıcaklık

Sıcaklığın şekillendirebilirliğe olan etkisinin yanı sıra geri yaylanma gibi işlem sorunlarının giderilmesinde de büyük etkisi vardır. Yükselen sıcaklık değerlerinde sac malzemelerin akma dayanımlarında belirgin düşüşlerle karşılaşmaktadır. Dolayısıyla bükme sonrası geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla işlemler yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmektedir (Tekiner, 2004). Sıcaklık arttıkça, bükme ile şekillendirilen malzeme bünyesinde, iç ve dış yüzeydeki çekme ve basma kalıntı gerilmeleri arasındaki fark azalmaktadır (Kim ve Koç, 2008). Sonuç olarak,

geri yaylanma da artan bu sıcaklık değerlerine paralel olarak azalmaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, şekillendirme sıcaklığını kontrol ederek geri yaylanmayı büyük ölçüde telafi etmenin mümkün olduğu anlaşılmaktadır (Kim ve Koç, 2008).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sac metal malzemelerde bükme işlemi sırasında oluşan geri yaylanma miktarının modellenmesi için deneysel çalışmalar yapılmış ve çalışmadan elde edilen veriler değerlendirilip bilgisayar ortamında analizlerde desteklenmiştir. Deneysel çalışmanın amacı, sac malzemenin V bükme işleminde sıkıştırma kuvveti ve hadde doğrultusuna bağlı olarak geri yaylanma davranışının incelenmesidir. Deney numuneleri endüstride sıklıkla kullanılan 1050 Al H14 malzemedan seçilmiştir. Alüminyum ve alaşımlarının artması bu malzemelere olan eğilimi arttırmış ve bu çalışmanın malzeme seçiminde öncü olmuştur. Numune kalınlığı 3 mm ve ebatları 150x50 mm'dir. Resim 4.1'de deneylerde kullanılan sac numunenin görünümünü verilmiştir.



Resim 4.1. Deneylerde kullanılan sac numune

Deney numunesi olarak kullanılan sacın kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

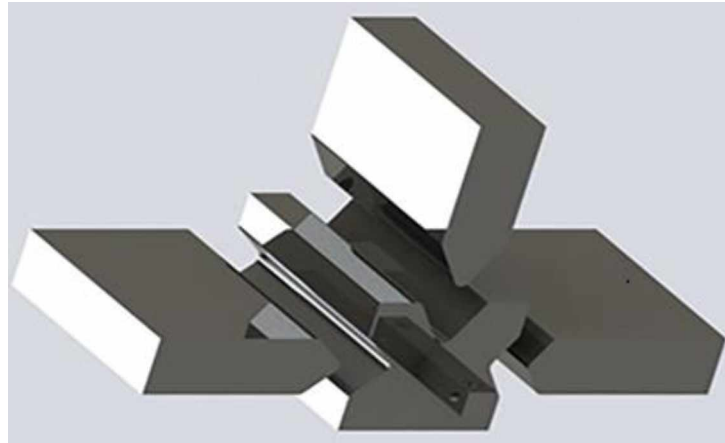
Çizelge 4.1. Al 1050 H14 alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi (Şahin, 2013)

Al 1050 H14 Standart Alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi							
Fe	Si	Zn	Ti	Mg	Mn	Cu	Al
0,4	0,25	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	99,5

Çizelge 4.2. Al 1050 H14 alüminyum malzemenin mekanik özellikleri (Şahin, 2013)

Al 1050 H14 Standart Alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi				
Temper [-]	Akma mukavemeti [MPa] min-max	Çekme mukavemeti [MPa] min-max	Uzama [% 50] [-]	Sertlik [Brinell] min-max
0/H111	20-35	65-80	38	20-21
HX2	60-85	90-100	-	30
HX4	90-105	110-115	9	35-36
HX6	120	0-130	-	39
HX8	110-140	130-150	5	43
HX9	130-170	100-180	3	48-51

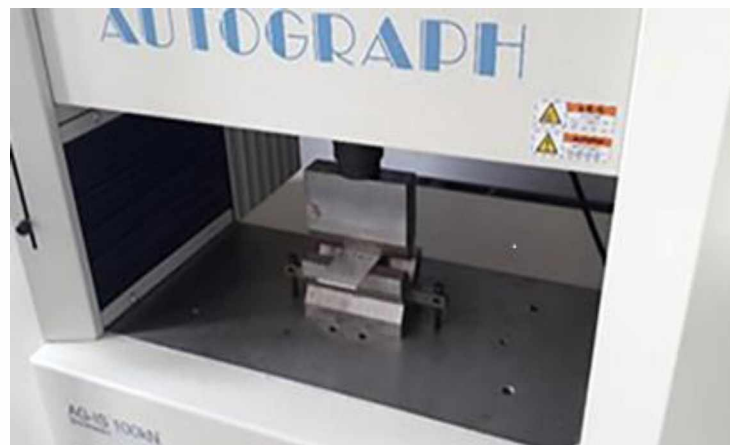
Kalıp bükme açısı 60° olarak seçilmiştir. Zımbanın uç yarıçapı 5 mm, alt kalıp uç yarıçapı ise 8 mm olarak seçilmiştir. Resim 4.2'de V bükme kalıp modelinin görünümü verilmiştir.



Resim 4.2. V bükme kalıp modeli (Erdin ve Atmaca, 2016)

Sac parçaların uzunluk doğrultusu hadde doğrultusu ile 0° , 45° ve 90° açı yapacak şekilde V bükme numuneleri belirlenmiştir. Sıkıştırma kuvvetleri 2 kN, 3 kN, 4 kN,

5 kN ve 6 kN olarak seçilmiştir. Deneylerde hidrolik pres kullanılarak zımbanın kuvveti presin aşağı-yukarı hareketi ile elde edilerek şekillendirme sağlanmıştır. Hidrolik presin ilerleme hızı sabit ve 0.5 mm/s olarak belirlenmiştir. Alüminyum malzemelere uygun olacak şekilde deformasyon hızı düşük tutulmuştur. Uygulamalarda en sık karşılaşılan bükme yöntemlerinden biri V bükme işlemidir. Bu deneysel çalışmada bükme yöntemleri içerisinde V bükme üzerinde durulmuştur. Deneye başlanmadan önce numune kalıba yerleştirilmiştir. Daha sonra pres ve prese bağlı olan bilgisayar çalıştırılarak deney başlar. Presin çalışması ile zımba malzemeye temas eder ve bükme işlemi başlar. Bükme işlemi istenen sıkıştırma kuvveti elde edilene kadar devam eder ve sıkıştırma kuvvetinin elde edilmesiyle birlikte V bükme işlemi tamamlanmaktadır. Daha sonra malzeme kalıp boşluğundan çıkarılmakta ve bir sonraki sac numuneye aynı işlemler istenen sıkıştırma kuvveti uygulanarak V bükme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bükme işleminde minimum 2 kN sıkıştırma kuvveti kullanılmıştır. Nedeni; deney şartlarında bükme işlemi için gerekli minimum kuvvetin 2 kN olmasıdır. Sac parçanın zımbanın kalktıktan sonraki geri yaylanma açısını belirlemek için açıl kumpas kullanılmıştır. Açıl ölçümünde kullanılan kumpasın hassasiyeti 1/6 derecedir. Ayrıca sonuçların sağlıklı yorumlanabilmesi için deneyler 3er kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Resim 4.3'de V bükme işlemi görülmektedir.



Resim 4.3. V bükme işlemi (Erdin ve Atmaca, 2016)

Çizelge 4.3'de deneysel sonuçlar verilmiştir. Burada; artan sıkıştırma kuvvetlerine bağlı olarak geri yaylanmanın azaldığı tespit edilmiştir. Sacın hadde yönüne bağlı olarak en az geri yaylanmanın 45° hadde yönünde, en fazla geri yaylanmanın ise 90° hadde yönünde olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. Deneysel sonuçlar

Sıkıştırma kuvveti [kN]	Geri yaylanma açısı [°]		
	Hadde yönü [0°]	Hadde yönü [45°]	Hadde yönü [90°]
2	3,92	3,30	5,25
3	3,20	2,76	4,25
4	2,48	2,22	3,25
5	1,75	1,67	2,25
6	1,53	1,39	2,02

5. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ

Karmaşık tasarım problemlerinin daha basit bölümlere ayrılıp belirli yük ve şartlarda simüle edilerek yaklaşık çözümün bulunduğu bir çözüm şekli sonlu eleman yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntemde karmaşık yapı sonlu elemanlar olarak ifade edilen geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içerdiğinden sonlu elemanlar tabiri kullanılır. Her eleman içindeki tanım denklemlerinin düğüm noktalarındaki değerlerinin elde edilmesi problemin çözümünde kullanılır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları polinomlardan seçilip interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılır. Polinomların derecesi de çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte veri iletim hızlarının sürekli olarak artmasına bağlı olarak bu yöntemle çözüm yapan paket programların sayısı her geçen gün artmaktadır. Sonlu eleman yazılımının kullanılmasıyla birlikte malzemelerin tasarım aşamasında mukavemet hesaplamaları kolaylıkla ve kısa zamanda yapılarak en uygun tasarım elde edilirken, zaman ve tasarım masraflarından tasarruf elde edilmektedir (Şahin, 2013).

Sonlu eleman yöntemini diğer sayısal yaklaşımlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir (Karataş, 2009):

- Bir cismin geometrisi kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği sayesinde tam olarak tanımlanabilir.
- Birden çok delik veya köşelere sahip bölgeler rahatlıkla incelenebilir.
- Farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip cisimler incelenebilir.
- Yükleme durumları, artık gerilmeler, ön gerilmeler, ısıl yükler, sınır koşulları göz önüne alınabilir.
- Lineer olmayan yapı problemleri çözülebilir.
- İzotrop olmayan ve süreksizlik içeren malzemeler kullanılabilir.

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenerek çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun nitelikte elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme kapasitesine bağlı olarak elde edilecek sonuçlar gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır (Çetin, 2007).

5.1. Eksplisit (Açık) Yöntem

Eksplisit sonlu eleman programlarının genel kullanım amacı aşağıdaki gibidir (Çetin, 2007):

- Dinamik geçiş analizleri,
- Her türlü lineer olmayan analizler,
- Yapısal temas veya kopma problemleri,
- Plastik veya elastik malzeme davranışları,
- Fazla uzayan veya fazla dönen geometriler.

Zamana bağlı analizlerde ivme ve hız kavramları zamana ve yer değiştirmeye bağlı fonksiyonlarla ifade edilmektedir. Eksplisit analizin zaman yaklaşımını kavrayabilmek için öncelikle statik analizlerde kullanılan implisit zaman integrasyonunu tanımak gerekir (Şahin, 2013).

Eksplisit iterasyon birçok sonlu eleman çözüm yönteminden çok daha hızlı çözüme ulaştığından çok sayıda eleman içeren ve zaman basamağı sık olan lineer olmayan problemlerde tercih edilir. Sonuçların tutarlılığı yapılan kabullere bağlı olsa da genelde gerilmeden ziyade, yer değiştirme sonuçları istenen problemlerde tercih edilir. Bu yöntemin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Şahin, 2013).

- Çözülmesi gereken denklem sistemleri yoktur.
- Bilgisayar işlemlerinde daha az bellek kullanılır.
- Her zaman basamağı için daha az analizle uğraşılır.
- Lineer ve lineer olmayan çözüm ayrımı yoktur.

Eksplisit programlarda izlenen yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Şahin, 2013).

- Kütle matrisi ile her düğüm noktasındaki kütle hesaplanır. Bu işlem yalnız bir kere en başta yapılır.
- Sağ vektörü (eski yer değiştirmeler) hazırlanır.
- Eski yer değiştirmelere göre birim şekil değiştirmeler, gerilmeler ve kuvvetler her eleman için hesaplanır.
- Yeni yer değiştirmeler, sağ vektörün düğüm noktalarındaki yüklere bölünmesi ile elde edilir.

5.2. İmplicit (Kapalı) Yöntem

Sabit ortalama ivme kabulüne dayanan bu integrasyon yönteminde zaman durağandır. Zaman basamağı değeri keyfi olarak geniş tutulabilir, fakat istenen sonuçlara uygun değerlerde seçilmelidir. Eğer lineer olmayan bir durum söz konusuysa zaman basamağının değeri yakınsamayı yakalayabilecek kadar küçük seçilmelidir (Çetin, 2007).

İmplicit programlarda izlenen adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Şahin, 2013).

- Elemanların yerel katılık matrisi hesaplanır.
- Tam (global) katılık matrisi oluşturulur.
- Katılık matrisinin tersi alınarak katsayılar matrisi elde edilir.
- Sağ vektörü (eski yer değiştirmeler) hazırlanır.
- Yeni yer değiştirmeler tersi alınmış katılık matrisi ile sağ vektör çarpılarak elde edilir.
- Birim şekil değiştirmeler, gerilmeler ve kuvvetler her eleman için yeni yer değiştirmelere göre hesaplanır.

5.3. Mevcut Sac Şekillendirme Simülasyon Algoritmaları

Sonlu eleman yöntemi kullanılarak sac şekillendirme işlemini simüle etmek amacıyla birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlar formülasyonlarındaki farklılıklara veya zaman parametresini ele alışlarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunduğundan farklı yazılımlar birini veya birkaçını esas alan çözümler sunmaktadır (Arslan, 2007).

5.3.1. Rijit-plastik ve elastik-plastik yöntem

Bu yöntem malzemenin rijit-plastik olduğu kabulünü yaparak sonlu eleman hesaplamalarını basitleştirip daha hızlı bir hesaplama yapmaya imkan sağlar. Bu kabul, malzemenin elastikliğinin ihmal edilmesiyle sağlanır. Ancak bu durum hesaplama zamanında azalma ve formülasyonda sadelik için bir takım kısıtlamalar getirir. Yerçekimi etkisindeki sacın pot çemberi veya dişi kalıp üzerine yayılırken yaptığı hareketlerin ve şekil vermenin hemen ardından oluşan geri yayılmanın hesaplanamaması bu kısıtlamaların sonuçlarındandır. Elastik-plastik bir malzeme modellemesi bu iki hesaplamayı yapabilir ancak çok daha karmaşık formülasyonlar kullanıldığından hesaplama zamanı fazlasıyla artar (Arslan, 2007).

5.3.2. Statik kapalı yöntem

Statik kapalı yöntemde sonlu eleman formülasyonu, quasi-statik denklemler kurularak oluşturulur. Bu kabul sac şekillendirmenin darbe etkisi içeren ve sacın dinamik hareketinden önemli ölçüde etkilenmeyen bir işlem olması nedeniyle yapılabilir. Bu yöntemde, karşıt dinamik etkiler hesaba katılmaz. Bununla beraber, bu yöntemde rijitlik (katılık) matrisi genelde diyagonal değildir. Bu durum, iteratif olarak çözümlenmeyi gerektirir. Ancak bu çözümlenme, sac ile takım arasında sürekli yenilenen temas koşulları mevcut olduğundan bazen iterasyonların çözümü mümkün olmaz. Özellikle sac şekillendikçe aldığı karmaşık formların ifadesi temas koşullarını oldukça karmaşık bir hale getirdiğinden simülasyon tamamlanamaz (Arslan, 2007).

5.3.3. Statik açık yöntem

Bu yaklaşım, kapalı yöntemde karşılaşılan çözüm iterasyonlarının sonuçlanamaması sorununu ortadan kaldırmak için uygulanır. Çok küçük bir zaman adımı tanımlanarak iterasyon gerekmeksizin çözülebilecek bir teğet rijitlik matrisi oluşturulur. Bu küçük zaman adımından dolayı, bir çekme operasyonunun sonuçlanması için yüksek sayıda artımsal adım oluşmaktadır. Çözüm hesaplamaları daha az hata içermekle birlikte, diğer yöntemlere göre hesaplama zamanı uzamaktadır (Arslan, 2007).

5.3.4. Dinamik açık yöntem

Dinamik açık yöntem, dinamik eşitlik denklemini her düğüm noktası için ve bütün zaman adımlarında çözümlenmektedir. Bu formülasyonun en temel avantajı, rijitlik matrisi oluşturmasına gerek olmaması ve her adımda doğrudan çözümün mümkün olmasıdır. Bu yüzden çözüm tek bir zaman adımı için kapalı yönteme göre çok daha hızlıdır. Ancak bunun yanında, zaman artımında girişim dalgasının hiçbir elemanı geçmemesi için zaman adımının kritik bir değerle sınırlandırılması gerekir. Bu genelde zaman adımının 10^{-6} saniye gibi bir değere eşitlenmesi demektir. Hesaplama zamanının azaltılması için, simülasyonlar genelde yüksek takım hızlarında gerçekleştirilir. Ancak bu durum gerçekçi olmayan şekillendirme modellerine neden olur (Arslan, 2007).

5.4. Sonlu Eleman Yazılımı

Bu çalışmada bükme operasyonunun sonlu eleman analizinde Simufact.forming yazılımı kullanılmıştır. Simufact programları ile soğuk, ılık ve sıcak kütleli şekillendirme, sac metal şekillendirme, ısıl işlem, mekanik birleştirme ve kaynak işlemleri gerçeğe en yakın şekilde analiz edilebilir. Simufact.forming, metal şekillendirme sektörü için özel olarak geliştirilmiş bir sayısal simülasyon yazılımıdır.

Simufact.forming ile aşağıdaki işlemler simüle edilebilir:

- Soğuk, ılık ve sıcak dövme işlemleri
- Dövme kalıplarının sıkı geçme montajı (öngerilme)
- Kütleli profil haddeleme
- Sac profil haddeleme
- Yüzük haddeleme
- Gererek haddeleme
- Sac şekillendirme
- Mekanik birleştirme (perçinleme ve punta kaynağı)
- Statik yükleme
- Isıl işlem

Simufact.forming ile aşağıdaki parametreleri incelemek mümkündür:

- Şekillendirme kuvveti ve momenti
- Malzeme akışı (katlanma, doldurmama, çapak, akış çizgileri)
- Sıcaklık dağılımı
- Geri yaylanma
- Artık gerilmeler
- Sünek kırılma
- Tane büyüklüğü ve faz dönüşümleri
- Sertlik
- Aşınma dağılımı

5.4.1. Simufact.forming programında analiz aşamaları

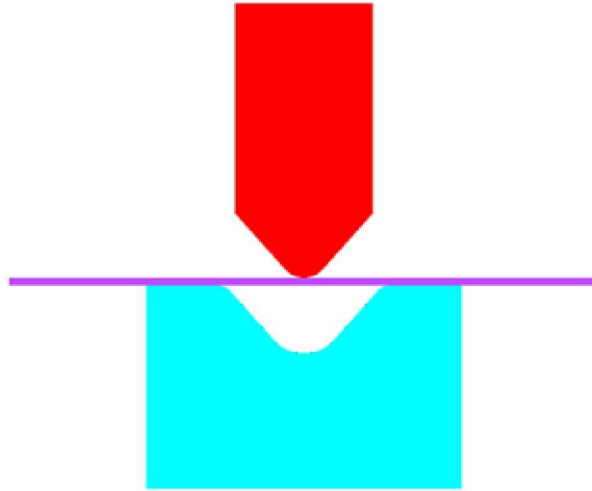
Simufact.forming programında malzeme özellikleri, sınır koşulları, temas yüzeyleri, çözüm adımları, geometrik özellikler gibi bilgilerin girilmesi ile analizin ilk kısmı (ön işleme) tamamlanır. İkinci adım ise verilen bu girdileri çözüme yollamak ve çözüm sonunda elde edilen sonuçları incelemektir (son işleme).

Simufact.forming yazılımında analize başlamadan önce analiz türünün seçilmesi gerekmektedir. Analiz türleri olarak; 2 boyutlu analiz, 3 boyutlu analiz, mekanik analiz ve eşlenik analiz gibi seçenekler bulunmaktadır. 2 boyutlu analiz türü kendi içinde aksenal simetrik, düzlem şekil değişimi, düzlem gerilme olarak ayrılmaktadır. Uygun olan analiz türü başlangıçta seçilmelidir. Parça ve kalıp geometrileri katı modelleme programlarında modellenerek uygun formatta (step, igs, stl gibi) programa aktarılabilir. Yazılımda birçok malzeme çeşidi kullanılabilir. Bunlar izotropik, ortotropik ve anizotropiktir. İzotropik malzemelerde tüm özellikler tüm doğrultularda aynıdır. Tanımı için basitçe akma eğrisi, yoğunluk, elastisite modülü ve poisson oranı yeterlidir. Sac şekillendirmede kullanılan çelikler genellikle anizotropiktir. İzotropi ve anizotropi malzeme cinsine değil, hammaddenin üretim yöntemine bağlıdır. İnce saclar haddeleme ile üretildiği için anizotropi oluşur. Anizotropik malzemeler ise 21 bağımsız sabit ve yoğunluk ile ifade edilir. Diğer malzeme çeşitlerinden ortotropik malzemeler; dokuz bağımsız sabit ve yoğunluk ile tanımlanır. Ortotropik malzemeler bir koordinat sistemine göre tanımlanır. Yazılımda malzeme kütüphanesinden uygun malzeme seçilebilmektedir. Yazılımında birçok pres çeşidi kullanılabilir. Pres çeşidi olarak mekanik pres, hidrolik pres, friksiyon presi gibi pres türleri bulunmaktadır. Pres özellikleri olarak ise krank uzunluğu, rod uzunluğu, dakikadaki vuruş sayısı, vurucu hızı, toplam enerji, maksimum vurucu hızı, pres verimi gibi parametreler program bünyesinde bulunmaktadır. Uygun olan pres çeşidi programdan seçilmelidir. Yazılımında birçok sürtünme kriteri bulunmaktadır. Sürtünme; yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, normal gerilme ve izafi hız gibi birçok parametreye bağlı karmaşık bir fiziksel konudur. Sürtünme kriterleri olarak Coulomb, kayma, birleşik ve IFUM (Institute of Metal Forming and Metal-Forming Machines) bulunmaktadır. Analizde kullanılacak sürtünme kriteri programdan seçilmelidir. Simufact.forming yazılımında analiz yaparken dikkat etmemiz gereken diğer bir unsurda kalıp ve parçaya sıcaklık tanımlamaktadır. Yazılımda parça ve/veya kalıp(lar) ısıtılabilir. Yazılımda yukarıda tanımlanan parametreler işlem ağacında uygun olan konumlara aktararak problem modeli oluşturulur. Yazılımda programa eklenen parça ve kalıpların konumlama ayarları ve analizi hangi konumda başlayacağı ayarlanabilmektedir. Yazılımda kalıplar sabit parçalar olarak kabul edilmiştir. Tüm serbestlik dereceleri

kısıtlanarak sadece zımbanın aşağıya inmesine olanak sağlanmıştır. Malzeme ise elastik-plastik malzeme olarak tanımlandığından zımba aşağı doğru inerken alt kalıba sürtünerek şekillendirme başlamaktadır. Alt kalıp sabitlenerek üst kalıp ise düşey yönde hareket ettirilerek kalıpların parçaya şekil vermesi sağlanmıştır. Yazılımda zımba aşağıya doğru inerek malzemeyi sabit olan alt kalıbın içine doğru iter. Bu esnada zımba, parça ve alt kalıp arasında etkileşimler gerçekleşir. Bu olayları modelleyebilmek için temas yüzeyleri tanımlanmalıdır. Simufact.forming yazılımında parça küçük elemanlara ayrılarak hesaplamalar yapılmaktadır. Bu durum programa has olmayıp sonlu eleman çözüm yönteminin genel bir özelliğidir. Bu sayede parçanın ağ yapısının oluşturulması sağlanır. Yazılımda eleman boyutu girilerek ağ yapısı oluşturulur. Ağ yapısında eleman sayısını artırmak çözümün hassaslaşmasını sağlamakla birlikte çözüm süresini uzatmaktadır. Simufact.forming yazılımında strok (zımbanın ilerleme miktarı), işlem aşamalarının seçilmesi, sonuç parametrelerinin belirlenmesi, çözüm adım sayısının tanımlanması gibi parametreler oluşturularak tüm giriş ve çıkış parametreleri tanımlanır ve analiz işlemi gerçekleştirilir.

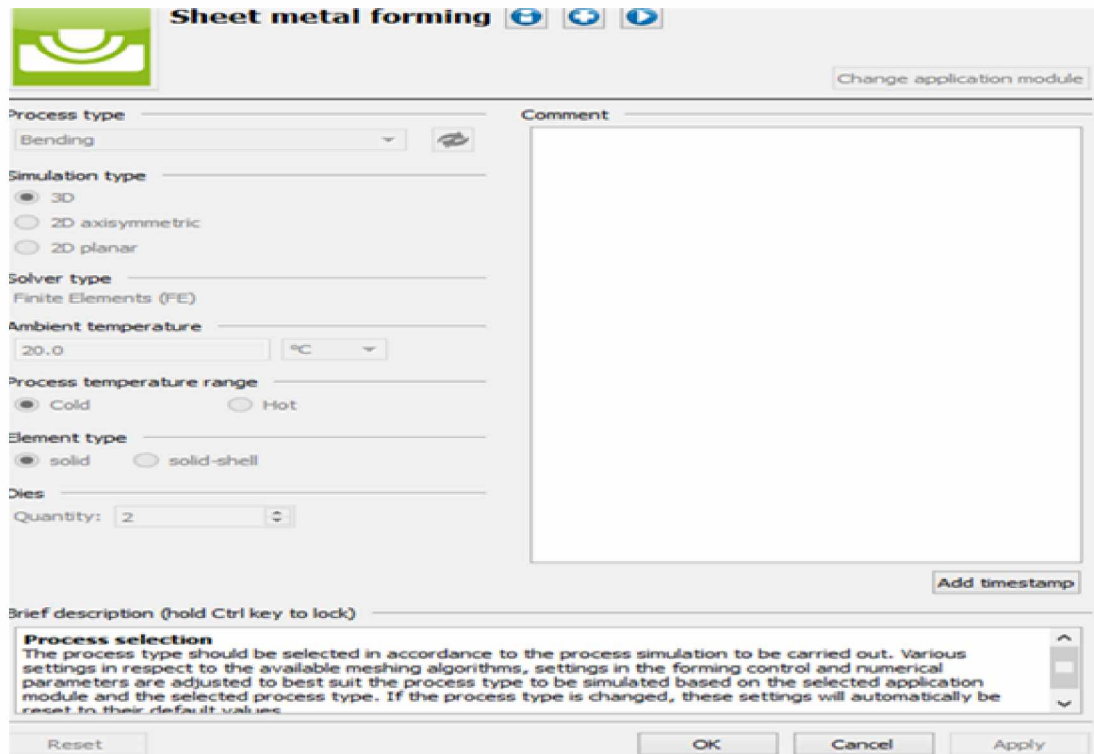
5.4.2. Sonlu eleman yazılımı ile V bükme analizi

Analizlerde kullanılan kalıplar Solidworks 2013 katı modelleme paket programı ile 3 boyutlu (3B) olarak modellenmiştir. Kalıp sistemi; dişi kalıp, sac ve zımbadan oluşmaktadır (Resim 5.1). Çalışma kapsamında kullanılan yöntemde; dişi kalıp sabit kalırken, zımba parçayı şekillendirmektedir. Sistemin ağ yapısının oluşturulması Simufact.forming yazılımında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tüm parçalar ayrı ayrı step formatında kaydedilerek Simufact.forming programına aktarılmıştır.



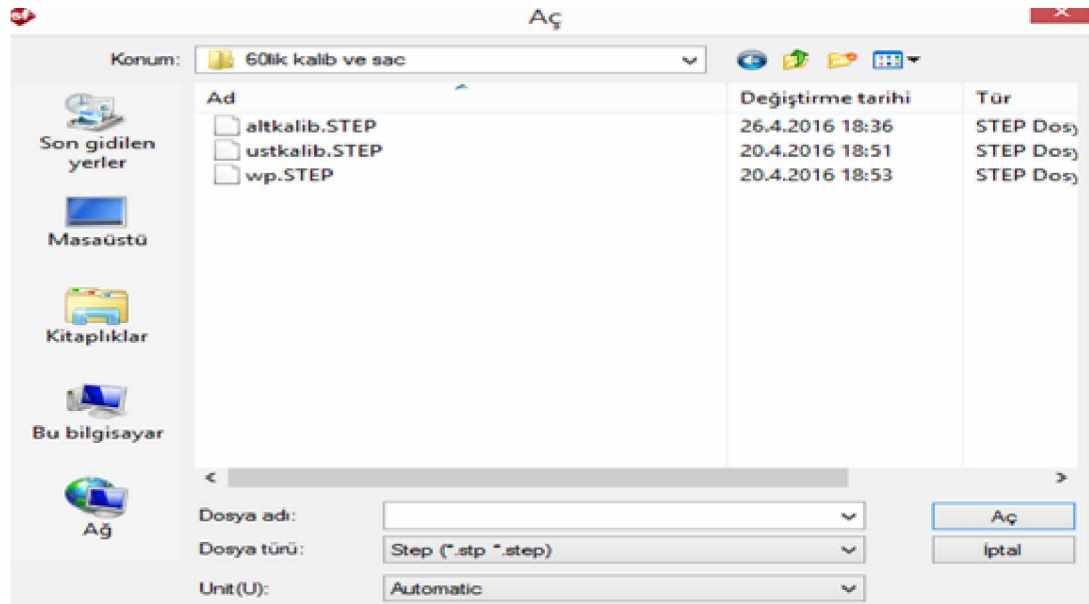
Resim 5.1. Simufact.forming yazılımında V bükme için zımba, sac ve alt kalıbın görünümü

İlk olarak analizde kullanılacak yöntem olan 3B sac metal şekillendirme komutu ve bu komutun altında bulunan bükme işlemi seçilmiş ve yeni proje dosyası oluşturulmuştur (Resim 5.2). Burada 3B seçilmesinin amacı anizotropinin geri yaylanmaya etkisini görmektir.



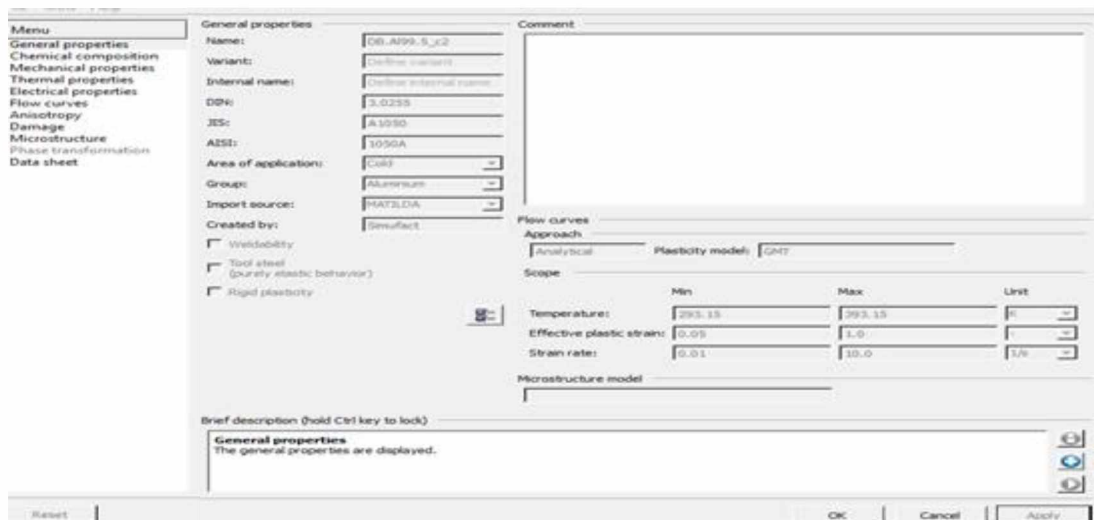
Resim 5.2. Simufact.forming yazılımında analiz türünün seçilmesi

Analiz türü belirlendikten sonra step formatında kaydedilen zımba, kalıp ve sac parça dosyaları yazılıma aktarılmıştır (Resim 5.3).



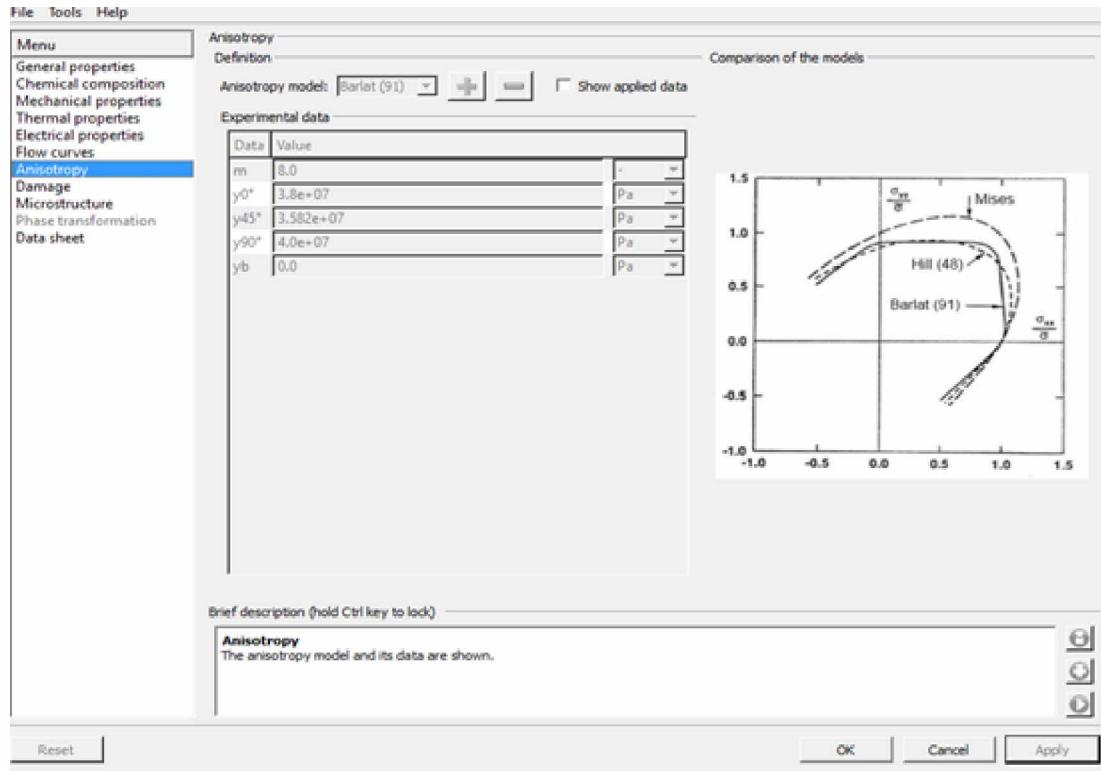
Resim 5.3. Simufact.forming yazılımında sacın ve kalıpların tanımlanması

Bu aşamada sac metalin malzemesi tanımlanmıştır. Sac metalin malzemesi olarak Al 1050 H14 seçilmiştir (Resim 5.4). Dişi kalıp ve zımba rijit kabul edilmiş ve malzeme seçimi yapılmamıştır.



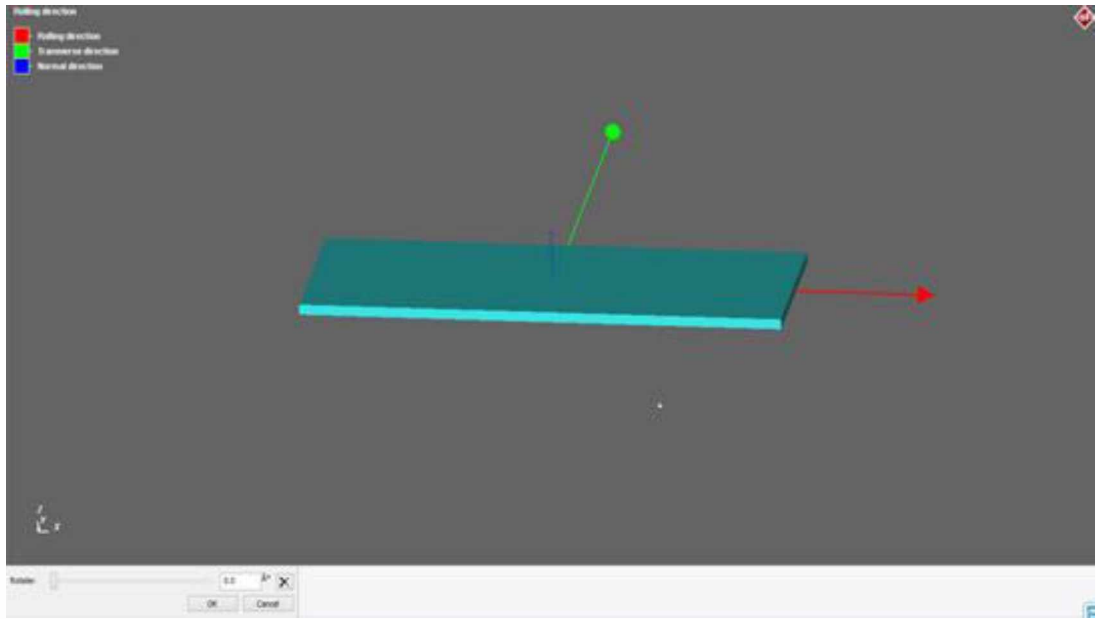
Resim 5.4. Simufact.forming yazılımında malzeme özelliklerinin tanımlanması

Malzeme tanımlanması yapıldıktan sonra Al 1050 H14 için anizotropi parametreleri belirlenmiştir. Anizotropinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak için burada Barlat anizotropi modeli seçilmiştir. Bu model özellikle alüminyum alaşımları için tercih edilir. Çekme testinden elde edilen veriler programa girilmiştir. Buradaki y değerleri akma gerilmesini belirtir. Akma gerilmesi parametrelerinin değerleri daha önce yapılan çalışmadan revize edilerek alınmıştır (Ertan, 2007). Burada y_b değeri ise çift eksenli bir test uygulanarak bulunur. Eğer bilinmiyorsa programa 0 değeri girilir. Buradaki m değeri ise bir üs olup alüminyum için 8, çelik için 6 alınır (Resim 5.5).

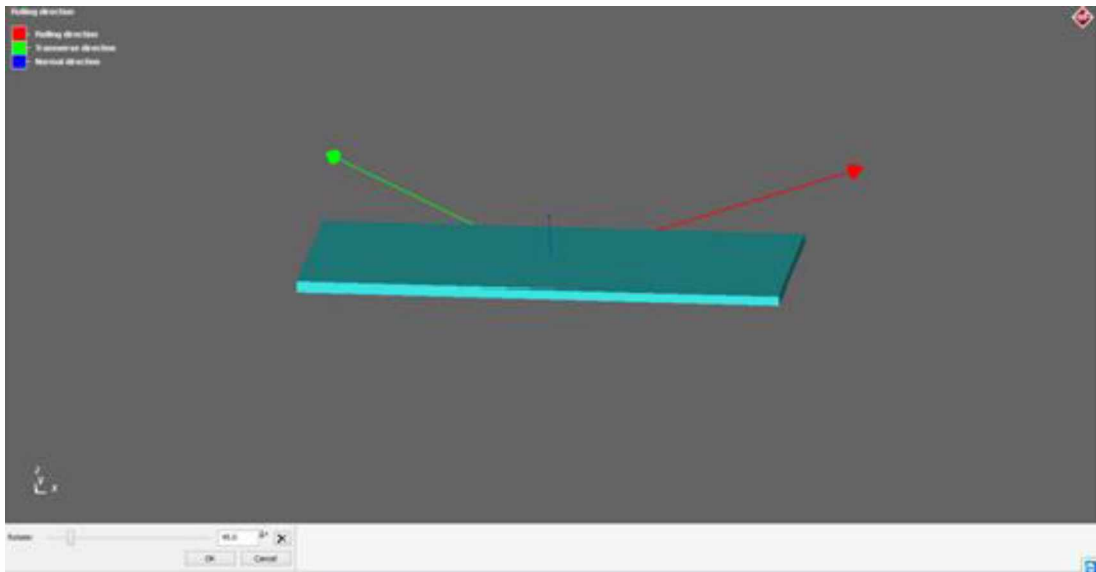


Resim 5.5. Simufact.forming yazılımında barlat anizotropi parametrelerinin tanımlanması

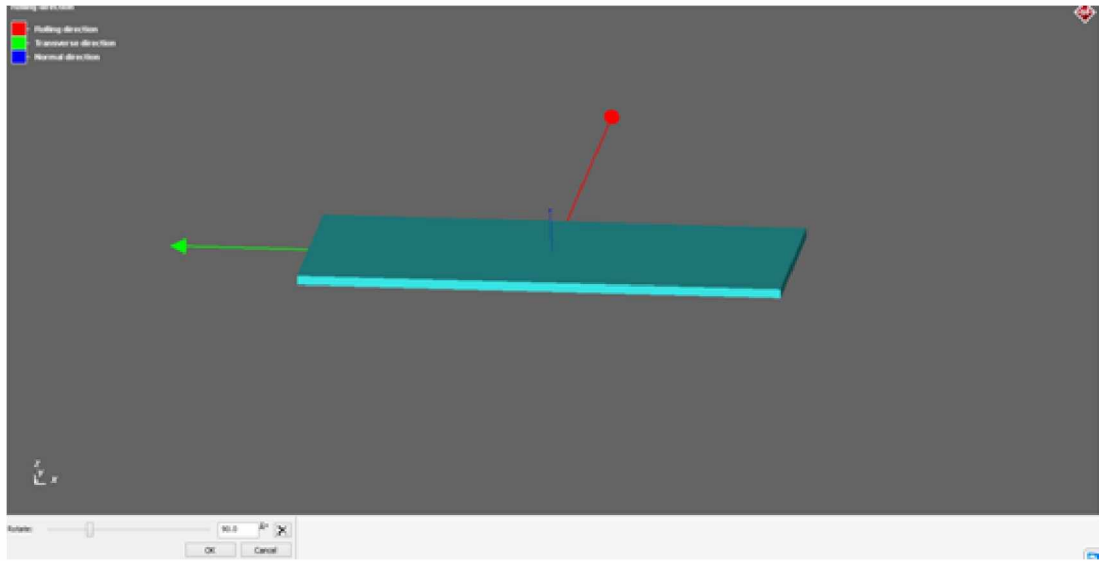
Sac malzemenin yöne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik gösterdiği için hadde yönünün tanımlanması gerekmektedir. Sac metalin geri yaylanmasına etki eden farklı hadde yönleri 0° , 45° ve 90° yazılımda tanımlanmıştır (Resim 5.6-5.8).



Resim 5.6. Simufact.forming yazılımında 0° hadde doğrultusunun tanımlanması

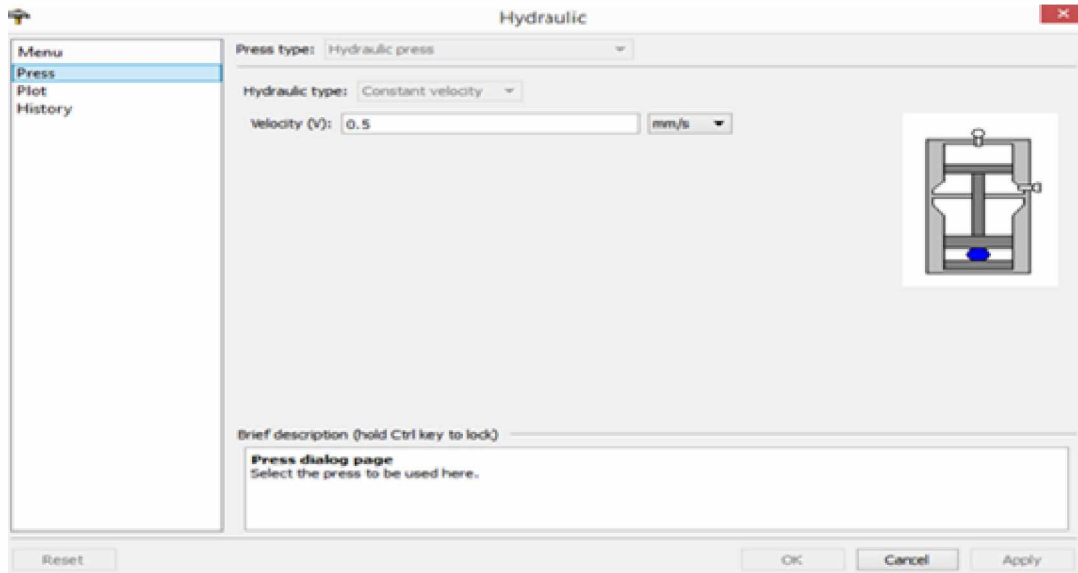


Resim 5.7. Simufact.forming yazılımında 45° hadde doğrultusunun tanımlanması



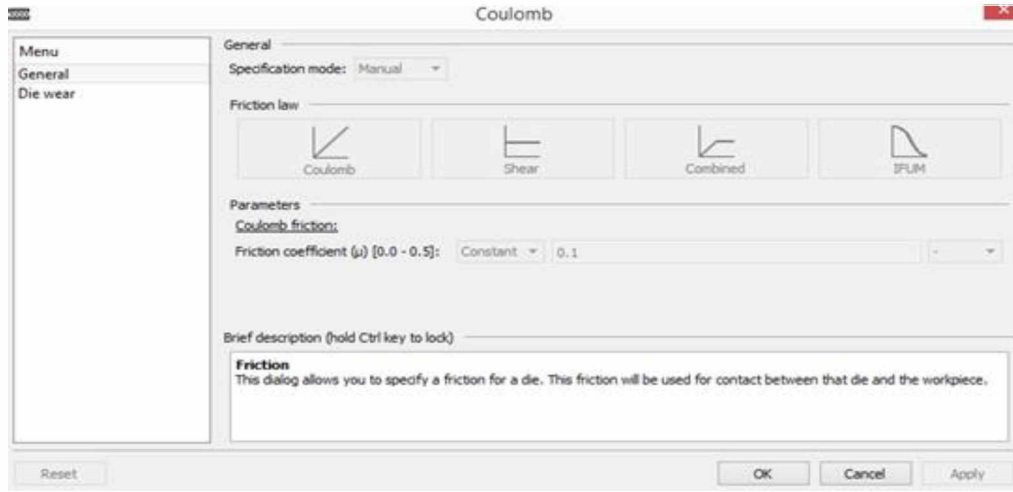
Resim 5.8. Simufact.forming yazılımında 90° hadde doğrultusunun tanımlanması

Analizde kullanılacak pres tipi olarak hidrolik pres seçilmiş ve ilerleme hızı sabit ve 0.5 mm/s olarak belirlenmiştir (Resim 5.9). Alüminyum malzemelere uygun olacak şekilde deformasyon hızı düşük tutulmuştur.



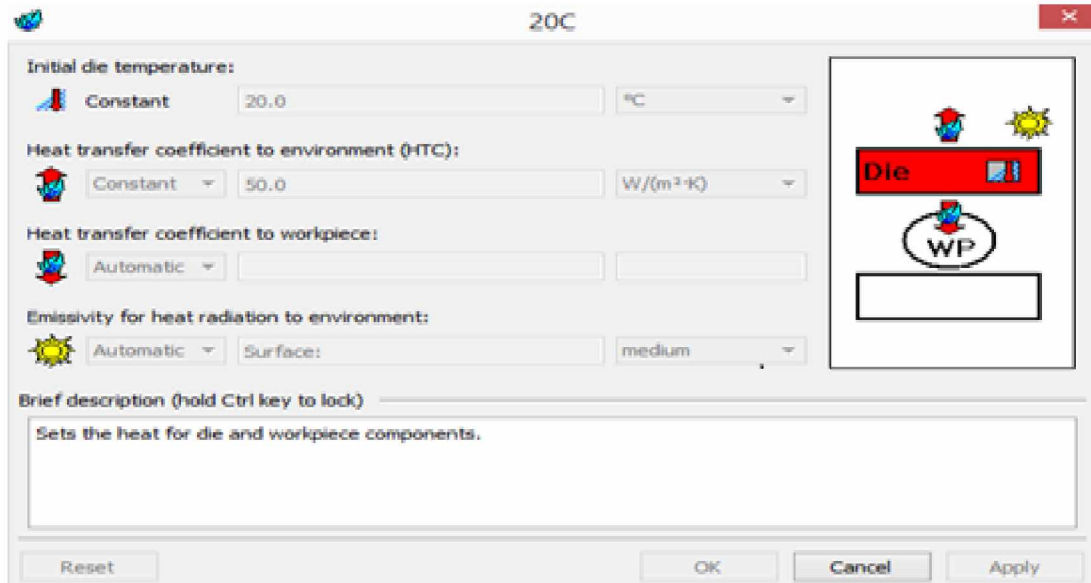
Resim 5.9. Simufact.forming yazılımında hidrolik presin tanımlanması

Sürtünme modeli olarak soğuk şekillendirme için kullanılan Coulomb sürtünme modeli seçilmiş ve sürtünme katsayısı olarak 0,1 değeri girilmiştir (Resim 5.10).

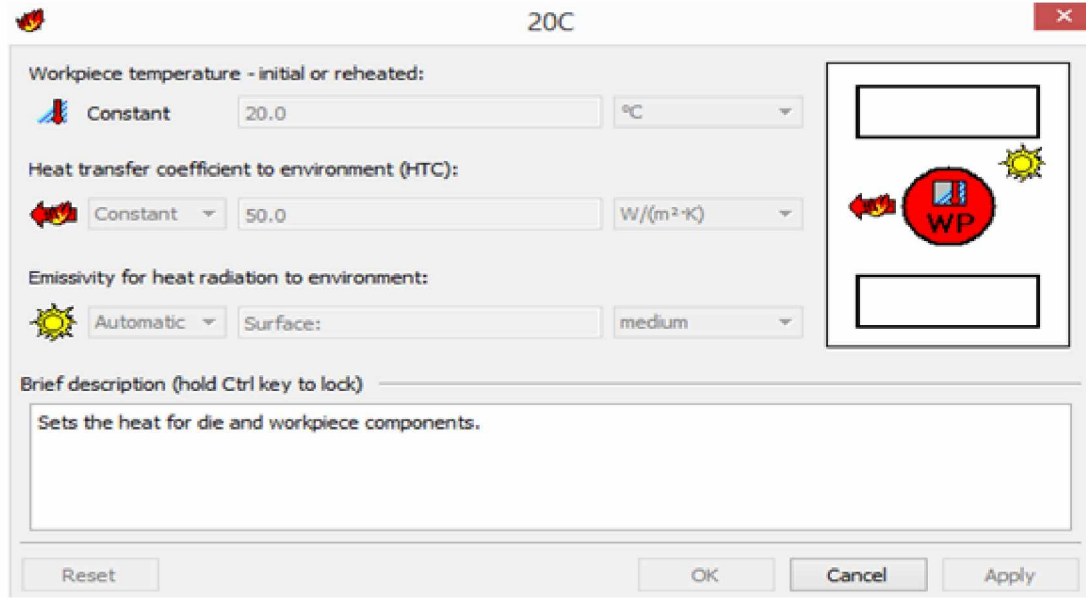


Resim 5.10. Simufact.forming yazılımında sürtünme şartlarının tanımlanması

Bükme işlemi soğuk şartlarda gerçekleştirilmiş olup kalıp sıcaklıkları ve iş parçası sıcaklığı; dışarıdan herhangi bir şekilde ısı transferi olmadığı için ortam sıcaklığı olan 20 °C olarak belirlenmiştir (Resim 5.11-5.12).

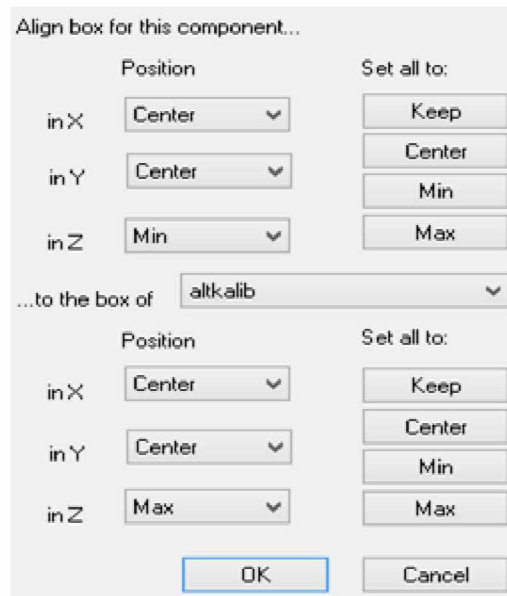


Resim 5.11. Simufact.forming yazılımında kalıp sıcaklıklarının tanımlanması

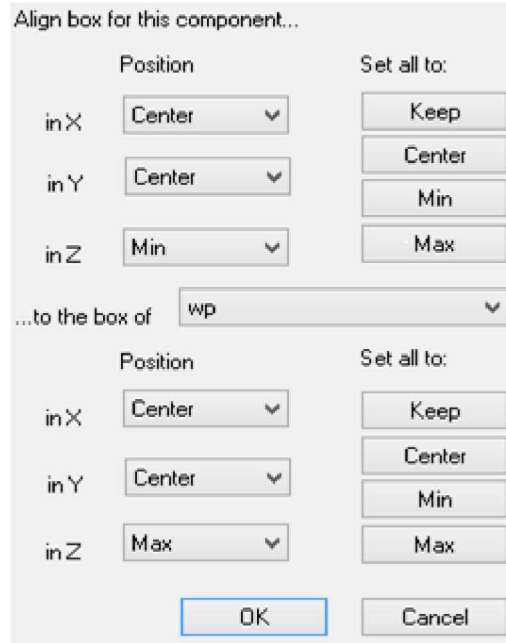


Resim 5.12. Simufact.forming yazılımında iş parçası sıcaklığının tanımlanması

Bu aşamada programa eklenen parçaların pozisyonlama ayarları yapılmış ve analize hangi konumda başlayacakları ayarlanmıştır (Resim 5.13-5.14).

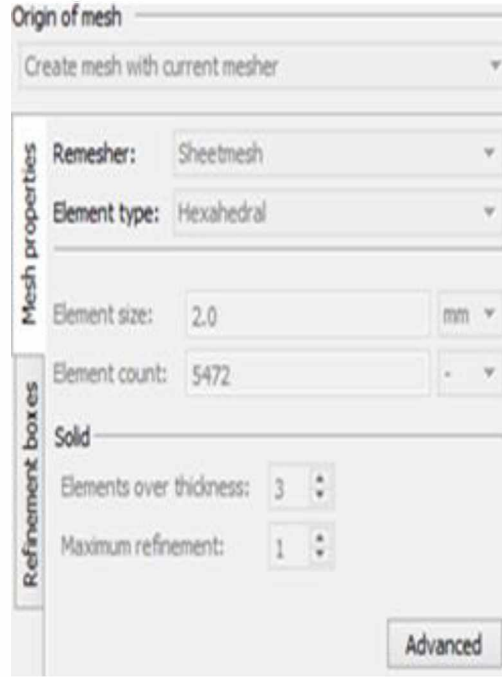


Resim 5.13. Simufact.forming yazılımında X, Y ve Z koordinatlarına göre iş parçasının pozisyonlanması



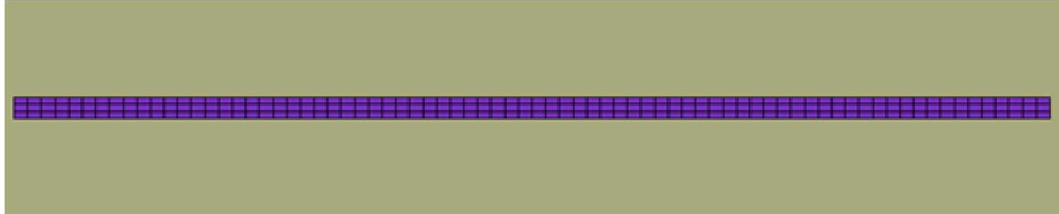
Resim 5.14. Simufact.forming yazılımında X, Y ve Z koordinatlarına göre zımbanın pozisyonlanması

Simufact.forming yazılımında sac metal şekillendirme işlemleri için kullanılan Sheetmesh özelliği bulunmaktadır. V bükme işleminde sac parçanın ağ yapısı için Sheetmesh özelliği kullanılmıştır. Eleman tipi olarak Hekzahedral (içi dolu küp) seçilmiştir. Sac parçanın, 2 mm eleman boyutuna ve 5472 eleman sayısına sahip ağ yapısı oluşturulmuştur (Resim 5.15). Kalınlık yönünde 3 eleman tanımlanmış olup böylece deformasyon sırasında kalınlık yönündeki değişimlerin hassas bir şekilde hesaplanması hedeflenmiştir.



Resim 5.15. Simufact.forming yazılımında sac parçanın ağ yapısının oluşturulması

Resim 5.16'da Simufact.forming yazılımında sac parçanın ağ yapısının görünümü verilmiştir.

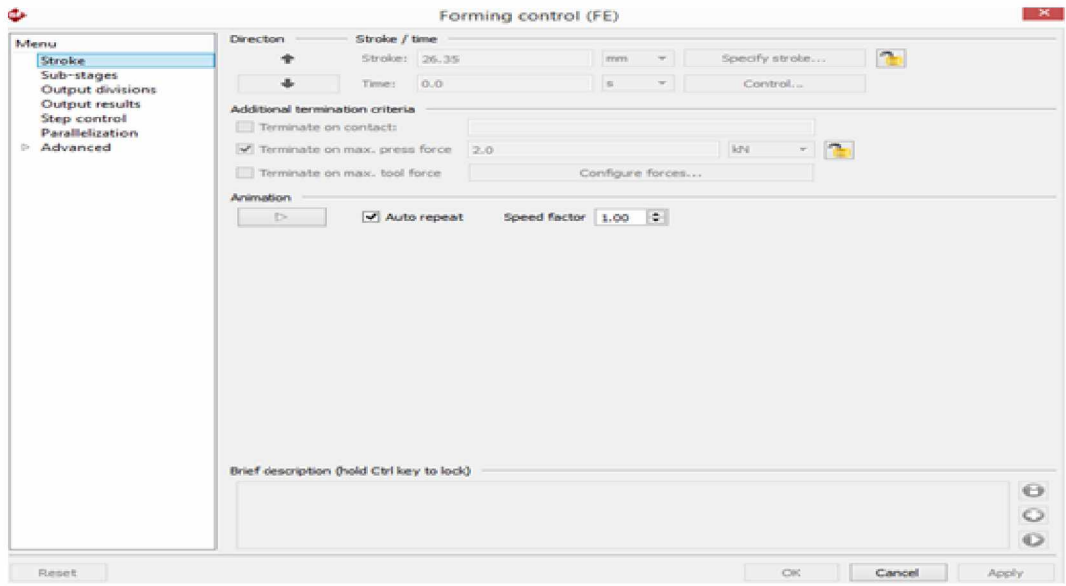


Resim 5.16. Simufact.forming yazılımında sac parçanın ağ yapısının görünümü

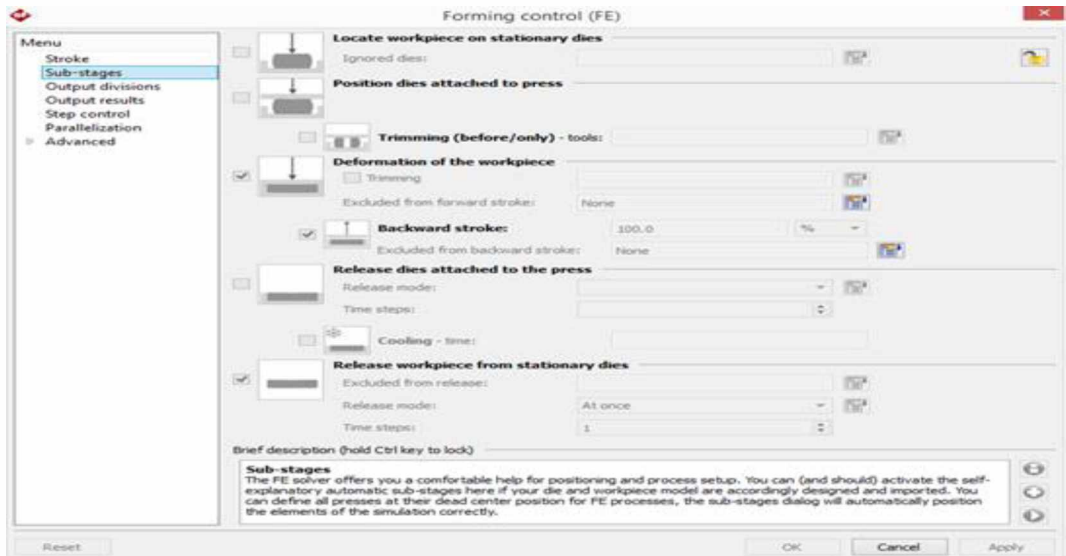
Zımbanın ilerleme miktarı, işlem aşamalarının seçilmesi, sonuç parametrelerinin seçilmesi, çözüm adım sayısının tanımlanması gibi parametreler oluşturularak tüm giriş ve çıkış parametreleri tanımlanır ve analiz işlemi gerçekleştirilir (Resim 5.17-5.20).

İlk olarak zımbanın ilerleme miktarı 26,35 mm olarak; sıkıştırma kuvveti ise 2 kN olarak tanımlanmıştır (Resim 5.17). Daha sonraki aşamada ise sırasıyla sac parçanın deformasyonunu görmek, pres hamilinin geri hareketini tanımlamak ve hamilin geri

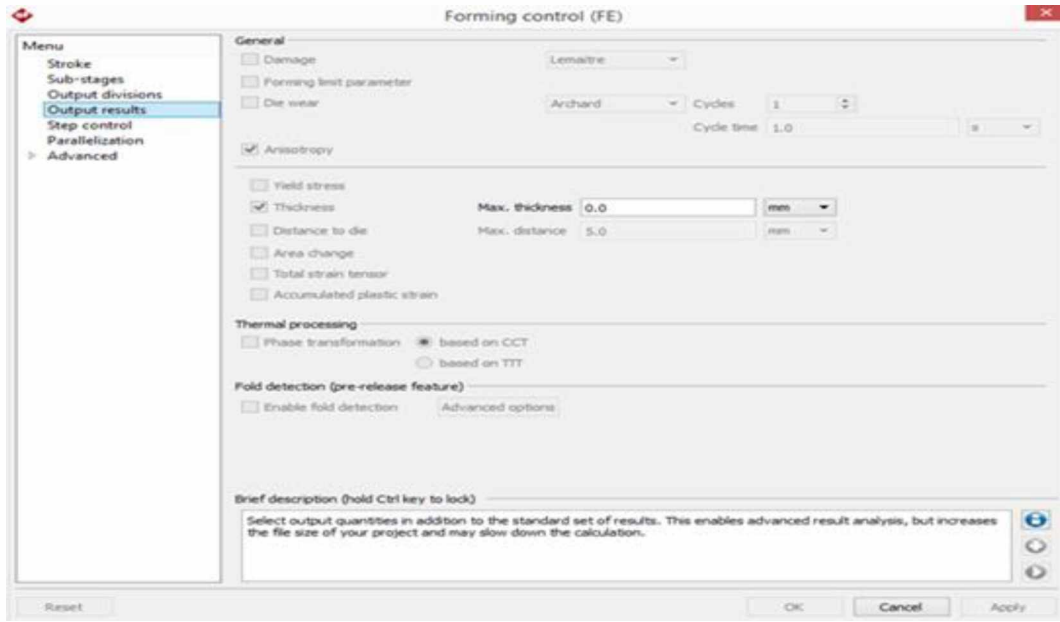
çekilmesi ile parça üzerindeki yükler kaldırıldıktan sonra parça kalıptan çıkarılarak parça üzerindeki gerilmelerin serbest durumda denge konumuna ulaşması sağlanır. Bu sayede parça üzerinde meydana gelen geri yaylanma gerçekçi bir şekilde hesaplanır (Resim 5.18). Bir sonraki aşamada ise anizotropinin etkisini görmek için anizotropi kutucuğu seçilmiştir (Resim 5.19). Son aşamada ise çözüm adım sayısı otomatik seçilmiştir (Resim 5.20).



Resim 5.17. Simufact forming yazılımında zımbanın ilerleme miktarının ve sıkıştırma kuvvetinin tanımlanması



Resim 5.18. Simufact forming yazılımında işlem aşamalarının seçilmesi



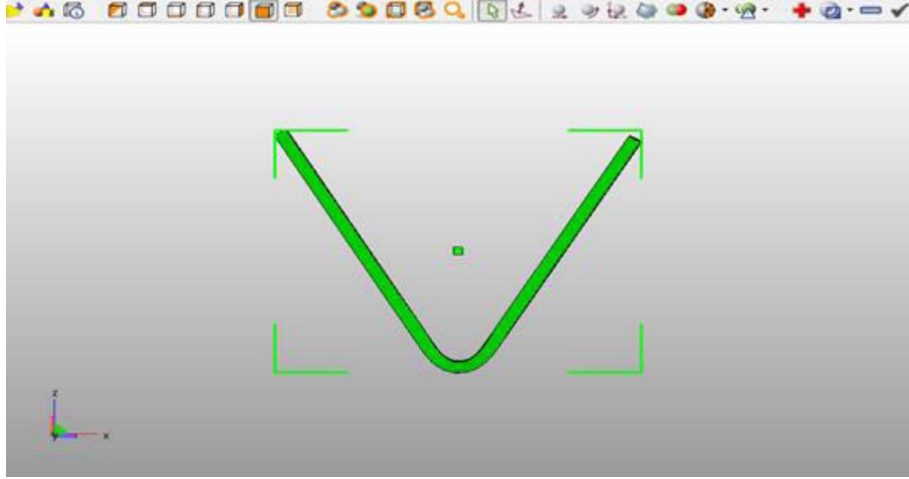
Resim 5.19. Simufact.forming yazılımında sonuç parametrelerinin seçilmesi



Resim 5.20. Simufact.forming yazılımında çözüm adım sayısının tanımlanması

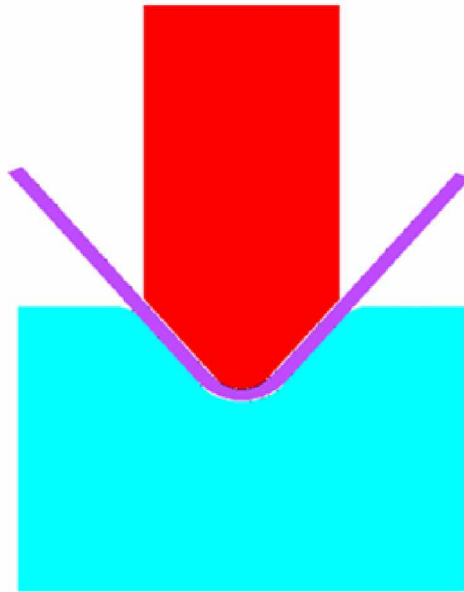
Tanımlanan giriş parametreleri modele uygulandıktan sonra analiz aşaması başlatılmıştır. Bu modelleme aşamaları 2 kN, 3 kN, 4kN, 5 kN ve 6 kN sıkıştırma kuvvetleri için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Farklı hadde doğrultuları (0°, 45° ve 90°) için analizler ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Son olarak sac parçanın zımbanın kalktıktan sonraki geri yaylanma açısını belirlemek için sac parça “.stl” formatında

kaydedilmiş ve Netfabb Studio Basic ölçüm programında geri yaylanma açısı belirlenmiştir. Netfabb Studio Basic ölçüm programına ait görünüm Resim 5.21'de verilmiştir.

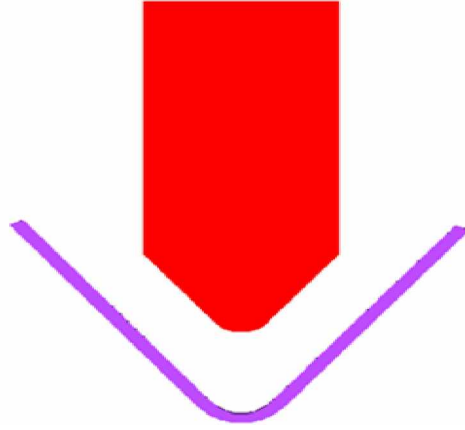


Resim 5.21. Netfabb Studio Basic ölçüm programına ait görünüm

Simufact.forming yazılımında sac parçanın V bükme işlemi esnasındaki görüntüsü Resim 5.22'de verilmiştir. Ayrıca zımbanın sacı büküp sacın üzerinden kalktıktan sonraki görüntüsü Resim 5.23'de verilmiştir.



Resim 5.22. Simufact.forming yazılımında sac parçanın bükülme anındaki görüntüsü



Resim 5.23. Simufact.forming yazılımında zımbanın sacın üzerinden kalktıktan sonraki görüntüsü

Çizelge 5.1'de analiz sonuçları verilmiştir. Burada; artan sıkıştırma kuvvetlerine bağlı olarak geri yaylanmanın azaldığı tespit edilmiştir. Sacın hadde yönüne bağlı olarak en az geri yaylanmanın 45° hadde yönünde, en fazla geri yaylanmanın ise 90° hadde yönünde olduğu görülmüştür.

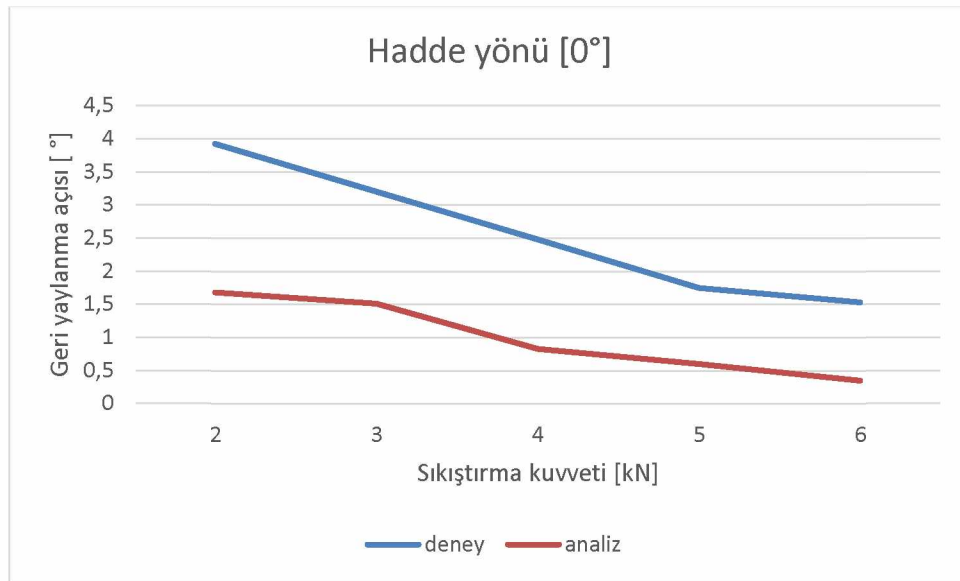
Çizelge 5.1. Analiz sonuçları

Sıkıştırma kuvveti [kN]	Geri yaylanma açısı [$^\circ$]		
	Hadde yönü [0°]	Hadde yönü [45°]	Hadde yönü [90°]
2	1,68	1,55	2,01
3	1,51	1,47	1,59
4	0,83	0,70	0,92
5	0,60	0,48	0,69
6	0,35	0,27	0,40

5.5. Deney Sonuçları ile Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

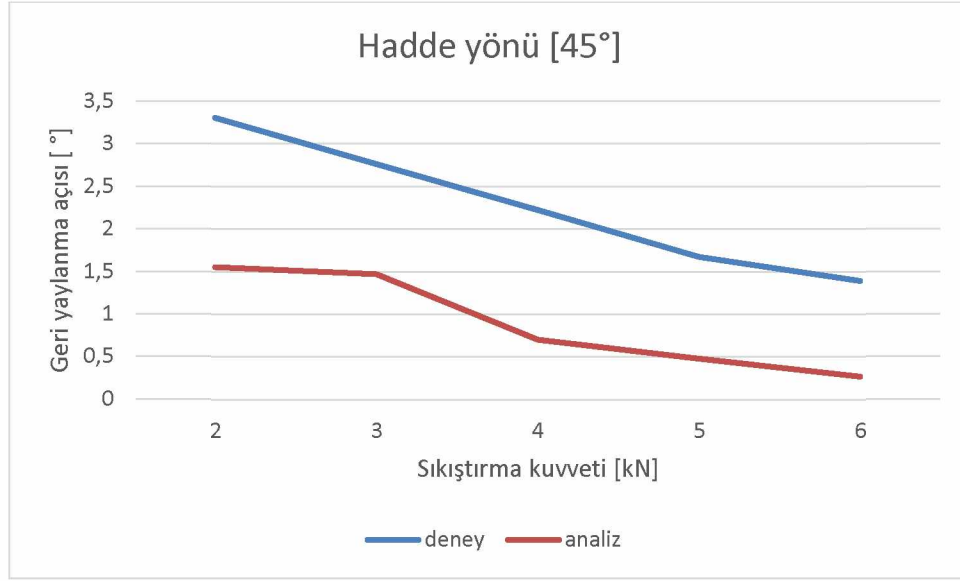
Bu simülasyonlarda hesaplanan geri yaylanma miktarları ile deneylerden elde edilen geri yaylanma miktarları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu simülasyonlarda hesaplanan geri yaylanma ile gerçek parçalardaki geri yaylanmanın bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de hadde yönünü dikkate alarak sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanma davranışına etkisi görülmektedir. Burada; uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 0° , 45° ve 90° açı yapan sac metalde görüldüğü üzere artan sıkıştırma kuvvetlerine bağlı olarak geri yaylanmanın azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca; en fazla geri yaylanmanın 2 kN değerindeki sıkıştırma kuvvetinde ve en az geri yaylanmanın 6 kN değerindeki sıkıştırma kuvvetinde olduğu görülmektedir.



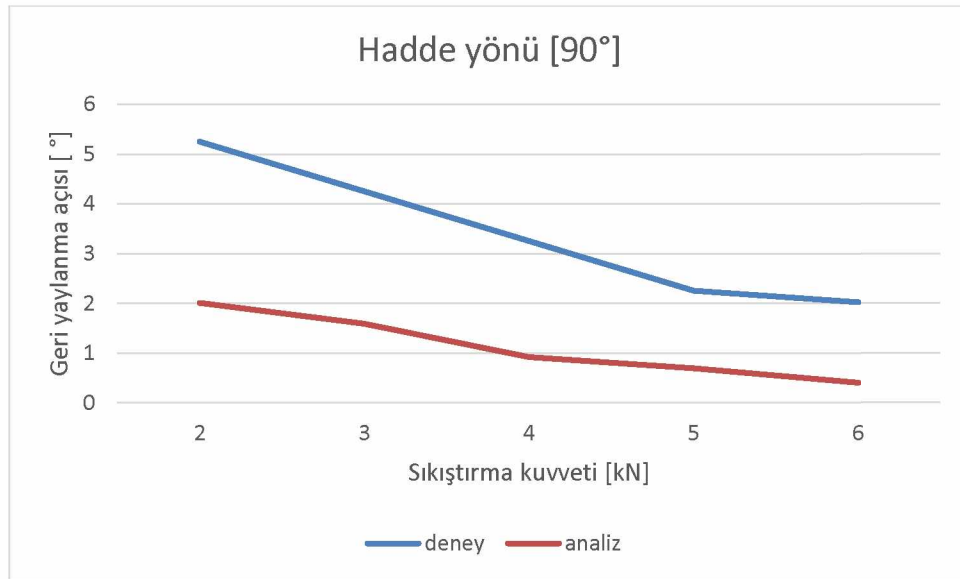
Şekil 5.1. Uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 0° açı yapan sac metalde sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisi

Şekil 5.1'de uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 0° açı yapan sac metal dikkate alındığında analiz sonucu deney sonucunun 2 kN sıkıştırma kuvveti için %43, 3 kN sıkıştırma kuvveti için % 47, 4 kN sıkıştırma kuvveti için % 33, 5 kN sıkıştırma kuvveti için % 34 ve 6 kN sıkıştırma kuvveti için % 23'lük kısmına karşı gelmektedir.



Şekil 5.2. Uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 45° açı yapan sac metalde sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisi

Şekil 5.2'de uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 45° açı yapan sac metal dikkate alındığında analiz sonucu deney sonucunun 2 kN sıkıştırma kuvveti için %47, 3 kN sıkıştırma kuvveti için % 53, 4 kN sıkıştırma kuvveti için % 31, 5 kN sıkıştırma kuvveti için % 29 ve 6 kN sıkıştırma kuvveti için % 20'lik kısmına karşı gelmektedir.



Şekil 5.3. Uzunluk doğrultusu hadde yönünüyle 90° açı yapan sac metalde sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisi

Şekil 5.3'de uzunluk doğrultusu hadde yönüyle 90° açı yapan sac metal dikkate alındığında analiz sonucu deney sonucunun 2 kN sıkıştırma kuvveti için %38, 3 kN sıkıştırma kuvveti için % 37, 4 kN sıkıştırma kuvveti için % 28, 5 kN sıkıştırma kuvveti için % 31 ve 6 kN sıkıştırma kuvveti için % 20'lik kısmına karşı gelmektedir.

Deney ve analiz sonuçları göz önüne alındığında anizotropinin geri yaylanma davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Şekillerde görüldüğü üzere en az geri yaylanma değeri 45° hadde yönünde iken en fazla geri yaylanma değeri 90° hadde yönünde olduğu tespit edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sac şekillendirme işlemlerinden V bükme operasyonunda farklı sıkıştırma kuvvetleri ve farklı hadde yönleri için alüminyum sac parçaların geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Sac şekillendirmede yaygın olarak kullanılan sonlu eleman programlarından biri olan Simufact.forming ticari yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Artan sıkıştırma kuvvetleri ve farklı hadde yönleri için Simufact.forming yazılımında bükme analizleri yapılmış ve geri yaylanma olayı simüle edilmiştir. Bu simülasyonlarda hesaplanan geri yaylanma miktarları ile deneylerden elde edilen geri yaylanma miktarları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu simülasyonlarda hesaplanan geri yaylanma ile gerçek parçalardaki geri yaylanmanın bir uyum içinde olduğu görülmekle birlikte deney sonuçları ile analiz sonuçları arasında fark oluşmuştur. Bu farkın başlıca sebepleri; malzeme özelliklerinin ve deney şartlarının simülasyonlarda kullanılan parametrelerle birebir örtüşmemesi ve simülasyonlarda kullanılan anizotropi parametrelerinin tam olarak deney numunesini temsil etmemesidir. Deney ve simülasyonlarda artan sıkıştırma kuvveti ile geri yaylanmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Sac metale sıkıştırma kuvveti uygulanması ile bükme bölgesinde plastik şekil değişimine bağlı olarak meydana gelen pekleşme artışı geri yaylanmada önemli ölçüde azalma sağlamıştır. Ayrıca anizotropinin de geri yaylanmaya etkisi görülmüştür. En az geri yaylanma değeri 45° hadde yönünde olup, en fazla geri yaylanma değeri 90° hadde yönündedir.

Birçok paket program sac şekillendirme üzerine bilgisayar destekli çözümler sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında sac şekillendirme için Simufact.forming programı kullanılmıştır.

Bu araştırmanın ardından yapılması mümkün çalışmalar şöyle sıralanabilir:

- Farklı kalıp açılarında artan sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak,
- Farklı kalıp açılarında anizotropinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak,

- Farklı malzemeler kullanarak artan sıkıştırma kuvvetinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak,
- Farklı malzemeler kullanarak anizotropinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak,
- Farklı sıkıştırma kuvvetleri için tutma süresinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak,
- Anizotropiye bağlı olarak tutma süresinin geri yaylanmaya etkisini araştırmak.

KAYNAKLAR

- Anderson, A., 2005. Numerical and experimental evaluation of springback in front side member. *Journal of Material Processing Technology*, 169, 352-356.
- Arslan, B., 2007. Geri Esnemenin Sac Parçaları Biçim Tamlığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulamaları ile Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Axinte, C., Chirita, B., Cristea I., Schnakovszky C., 2008. Optimization procedure for the springback reduction in sheet metal forming. *Metalurgia International*, 3, 11, 27-34.
- Bhupatiraju, M.K., Shvpuri, R., Altan, T., 1994. An Investigation of Bend Angle and Springback Control in Straight Line Bending. Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, ERC/NSM-S-94-13, The Ohio State University, Columbus, OH.
- Carden, W.D., Geng, L.M., Matlock, D.K., Wagoner, R.H., 2002. Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 79-101.
- Chen, F.K., Ko, S.F., 2006. Deformation analysis of springback in L-bending of sheet metal. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18, 339-342.
- Chen, P., Koç, M., 2007. Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 189-198.
- Çetin, M.S., 2007. Derin Çekme ile Soğuk Şekillendirmenin Sonlu Elemanlar Metodu Yardımıyla Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Erdin, M.E., Atmaca, A., 2016. Effects of holding force on the springback behavior of annealed aluminum plates. *Procedia Engineering*, 149, 56-61.
- Ertan, S., 2007. AA1050A ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarında Termomekanik Proseslerin Şekillendirilebilirliğe Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Esat, V., Darendeliler, H., Gokler, M.I., 2002. Finite element analysis of springback in bending of aluminum sheets. *Materials and Design*, 23(2), 223-229.
- Fei, D., Hodgson, P., 2006. Experimental and numerical studies of springback in air V-bending process for cold rolled TRIP steels, 236, 1847-1851.

- Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F., Micari, F., 1996. Computer aided engineering of the sheet bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 60, 1-4, 225-232.
- Gan, W., Wagoner, R.H., 2004. Die design method for sheet springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 1097-1113.
- Gau, J.T., 1999. A Study of the Influence of the Bauschinger Effect on Springback in Two-Dimensional Sheet Metal Forming. PhD Thesis, The Ohio State University, Columbus, OHIO, 42-52.
- Gomes, C., Onipede, O., Lovell, M., 2005. Investigation of springback in high strength anisotropic steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 91-98.
- Hosford, W.F., and Caddell, R.M., 1993. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Prentice Hall, New Jersey , 42-45.
- Hosford, W.F., 2005. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press, Cambridge, 23-25.
- Inamdar, M.V., Date, P., Desai, U.B., 2000. Studies on the prediction of springback in air V bending of metallic sheets using an artificial neural network. *J. Mater. Process Tech.*, 108(1), 45-54.
- Karataş, E., 2009. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sac Metalin Büküm Şekillerine Göre Deformasyonun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Kim, H.S., Koç, M., 2008. Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 370-383.
- Lange, K., 1985. *Handbook of Metal Forming*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Lazim, D., 2003. Springback after V-bending. *Journal of Zhejiang University Science A*, 8, 2, 237-244.
- Leu, D.K., 1997. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 66, 9-17.
- Ling, Y.E., Lee, H.P., Cheek, B.T., 2005. Finite element analysis of springback in L bending of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 296-302.

- Livatyalı, H., Altan, T., 2001. Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods Part 1. Experimental investigations. *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 262-268.
- Livatyalı, H., Ergeldi, M.M., 2006. Design of over-crown in sheet metal stamping using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 173, 14-20.
- Mkaddem, A., Saidane, D., 2007. Experimental approach and RSM procedure on the examination of springback in wiping-die bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 325-333.
- Marciniak, Z., Duncan, J.L., 1992. *The Mechanics of Sheet Metal Forming*. Edward Arnold, London.
- Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S.J., 2002. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 82-107.
- Micari, F., Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F., Alberti, N., 1997. Springback evaluation in fully 3-D sheet metal forming process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 46, 1, 167-170.
- Papeleux, L., Ponthot, J.P., 2002. Finite element simulation of springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 785-791.
- Pourboghrat, F., Chandorkar, K., 1992. Springback calculation for plane strain sheet forming using finite element membrane solution. *Symposium on Numerical Methods for Simulation of Industrial Metal Forming Processes, ASME WAM'92*, 8-13 November, Anaheim.
- Schey, J.E., 1987. *Introduction to Manufacturing Processes*. McGraw-Hill, New York.
- Schuler GmbH, 1998. *Metal Forming Handbook*. Springer, Berlin, 38-48.
- Sriram, S., Jothi, N., 1997. V bending studies on sintered copper powder metallurgical perform sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 70, 1, 156-162.
- Suchy, I., 2006. *Handbook of Die Design*, 2nd Ed., Inc. McGraw-Hill Book Company, 86-88.
- Şahin, Ç.Ö., 2013. *Sac Levhaların V Bükme Sonucu Geri Yaylanma Davranışlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Tekaslan, Ö., Şeker, U., 2009. Pirinç sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, IATS'09, 13-15 Mayıs, Karabük.
- 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, 109-117.
- Tseng, A.A., Chen, T.C., Jen, K.P., Kondeti Amhali, R. Morty, T.V., 1995. Forming properties and springback evaluation of copper beryllium sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A. Physical Metallurgy and Material Science, USA*, 26(8), 2111-2121.
- Turan S.E., 2009. Düz Kenar Bükme Ve Döner Kalıpla Kenar Bükme İşlemlerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Topçu, M., Taşgetiren, S., 1998. Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ders Kitapları Yayın 007, Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli 33-40.
- Uzun, İ., Erişkin, Y., 1983. Sac Metal Kalıpcılığı, M.E.B., Ankara, 253-286.
- Verma, R.K., Haldar, A., 2007. Effect of normal anisotropy on springback. *Journal of Materials Processing Technology*, 190, 300-304.
- Vin, L.J., Streppel, A.H., Singh, U.P., Kals, H.J.J., 1996. A process model for air bending. *J. Mater Process Technol*, 57, 48-54.
- Wang, J., Verma, S., Alexander, R., Gau, J.T., 2008. Springback control of sheet metal air bending process. *Journal of Manufacturing Processes*, 10, 21-27.
- Wei, L., Yuying, Y., Zhongwen, X., Lihong, Z., 2009. Springback control of sheet metal forming based on the response-surface method and multi-objective genetic algorithm. *Materials Science and Engineering A*, 499(1-2), 325-328.
- Yenice, M.M., 2006. Bükme İle Şekillendirilen Saclarda Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yi, H.K., Kim, D.W., Van Tyne, C.J., Moon, Y.H., 2008. Analytical prediction of springback based on residual differential strain during sheet metal bending. *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, 222(2), 117-129.
- Yu, H.Y., 2009. Variation of elastic modulus during plastic deformation and influence on springback. *Materials and Design*, 30, 846-850.

- Yuan, W.Y.D., 1996. Generalized solution for the prediction of springback in laminated strip. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(3), 254-264.
- Zeng, D., Xia, Z.C., 2007. A modified mroz model for springback prediction. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16(3), 293-300.
- Zhang, D., Cui, Z., Chen, Z., Ruan, X., 2007. An analytical model for predicting sheet springback after V-bending. *Journal of Zhejiang University Science A*, 8(2), 237-244.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : HEKİM, Anıl
Uyruğu : T. C.
Doğum tarihi ve yeri : 24.08.1992 - Ordu
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 531 226 78 93
e-mail : anilhekim@outlook.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Hitit Üniversitesi Makina Müh. Bölümü	2014
Lise	Ordu Lisesi	2010

Yabancı Dil

İngilizce