T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI KALINLIKLARA ve ÇELİK KALİTESİNE SAHİP SACLARIN BUKMEDE GERİ YAYLANMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan EREN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mahmut Cüneyt FETVACI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Ağustos, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Serkan EREN tarafından, **Prof. Dr. Mahmut Cüneyt FETVACI** danışmanlığında hazırlanan **" FARKLI KALINLIKLARA ve ÇELİK KALİTESİNE SAHİP SACLARIN BUKMEDE GERİ YAYLANMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **16/08/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Cüneyt FETVACI İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. C. Erdem İMRAK İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet PALABIYIK İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Yüksel HACIOĞLU İstanbul Üniversitesi- Cerrahpaşa Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Öğrenci Adı SOYADI
Serkan EREN

Eşim Merve ve kızım Eylül'e ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

FARKLI KALINLIKLARA ve ÇELİK KALİTESİNE SAHİP SACLARIN BUKMEDE GERİ YAYLANMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bana bu tez konusunda çalışma olanağı verip, her zaman ve her konuda destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cüneyt FETVACI'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmalarım sırasında en büyük destek ve motivasyon kaynağım olan hayat arkadaşım Merve EREN'e en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos 2022 Serkan EREN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ii
BEYAN iii
BÜTÇE DESTEKLERİ v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
ABSTRACT xv
1. GİRİŞ 1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 2
3. YÖNTEM 3
3.1 Bükme İşlemi 3
3.2 Bükme Mekaniği 4
3.2.1 Gerinim Tahmini 4
3.2.2 Gerilme Tahmini 7
3.3 Geri Esneme Mekaniği 9
3.4 Geri Esneme Kontrolü ve Telafisi 11
3.4.1 Geri Esneme Kontrol Yöntemleri 11
3.4.1.2 Tasarım Yolu ile Kontrol 11
3.4.1.3 Üretim Yolu ile Kontrol 12
3.4.2 Geri Esneme Telafi Yöntemi 13
4. BULGULAR 15
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 15
4.2 NX Programı ile Geri Yaylanma Analizinde Kullanılan Malzeme ve Özellikleri 16
4.3 Bükme ve Geri Yaylanma Analizi 18
4.3.1 1.4016 Paslanmaz Çelik Geri Yaylanma Analiz Sonuçları 21

4.3.1.1 0.8 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları ……...22

4.3.1.2 0.7 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları……...23

4.3.1.3 0.6 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları……...…24

4.3.1.4 0.5 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları……...25

4.3.1.5 0.8 mm, 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm Sac Kalınlıklarında ve 4 mm ve 2 mm Köşe Radyüs Değerlerinde Geri Yaylanma Analiz Sonuçları……..26

4.3.2 DX52 Düşük Karbon Çelik Geri Yaylanma Analiz Sonuçları……30

4.3.2.1 0.8 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları.....30

4.3.2.2 0.7 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları.....31

4.3.2.3 0.6 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları….....32

4.3.2.4 0.5 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları…….....33

4.3.2.5 0.8 mm, 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm Sac Kalınlıklarında ve 4 mm ve 2 mm Köşe Radyüs Değerlerinde Geri Yaylanma Analiz Sonuçları……..34

5. TARTIŞMA.....39

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 40

KAYNAKLAR.....42

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 44

ETİK KURUL İZİN YAZISI 45

KURUM İZNİ YAZILARI.....46

ÖZGEÇMİŞ 47

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: V kalıp üzerinde bükme işlemi……...…3

Şekil 3.2 Sac bükme mekaniğini şeması [7]……...4

Şekil 3.3 Sac bükme analizinde kullanılan geometrik değişkenler, (a) genel ölçüler, (b) bükme analizinde kullanılan ölçüler (T. Altan, E. Tekkaya, 2012)……...…….5

Şekil 3.4 Temel eğilme teorisinde gerilme gerinim dağılımları (T. Altan, E. Tekkaya, 2012)…….…..7

Şekil 3.5 Sac büküm sonrasında ortaya çıkan geri esne (Z. Cedric Xia, Jian Cao, 2014)……..9

Şekil 3.6 Geri yaylanma öncesi ve sonrası sac'daki gerilim dağılımları (Z. Cedric Xia, Jian Cao, 2014)……...…..10

Şekil 3.7 Sac üzerine eklenmiş kabartmanın geri yaylanma miktarını azaltmadaki etkisi……..11

Şekil 3.8 Sac üzerine eklenmiş kabartmanın geri yaylanma miktarını azaltmadaki etkisi……..12

Şekil 3.9 Geri yaylanma telafisi ……..….13

Şekil 4.1 3 düğüm noktasına sahip 2 boyutlu kabuk üçgen eleman tipi……...15

Şekil 4.2 Pres kalıpta basılmış bulaşık makinesi dış kapısı ……...……..18

Şekil 4.3 Geri esneme analizi yapılan kesit …….18

Şekil 4.4 Sürekli yüzeye indirgenmiş tek boyutlu model…….…19

Şekil 4.5 Deforme olmayan sabit yüzey……...19

Şekil 4.6 Geri esneme eşleşme kısıtlama noktaları……..….20

Şekil 4.7 Bükme yönünün tanımlanması……..20

Şekil 4.8 Analiz öncesinde mesh işlemi yapılan parça…….21

Şekil 4.9 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacda meydana gelen geri esneme miktarı ……...22

Şekil 4.10 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu……..22

Şekil 4.11 0.7 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacda meydana gelen geri esneme miktarı……..……..…23

Şekil 4.12 0.7 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu……23

Şekil 4.13 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı ……...24

Şekil 4.14 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu…….……..24

Şekil 4.15 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı ……25

Şekil 4.16 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu …….….25

Şekil 4.17 0.8 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı ……...……26

Şekil 4.18 0.8 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı …….…..26

Şekil 4.19 0.7 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı ……..…..…27

Şekil 4.20 0.7 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı ……...……27

Şekil 4.21 0.6 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……28

Şekil 4.22 0.6 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……....28

Şekil 4.23 0.5 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……29

Şekil 4.24 0.5 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……29

Şekil 4.25 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı…….30

Şekil 4.26 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu……..31

Şekil 4.27 0.7 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı…….31

Şekil 4.28 0.7 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu……...32

Şekil 4.29 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı…….32

Şekil 4.30 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu……..33

Şekil 4.31 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı…….33

Şekil 4.32 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu……..34

Şekil 4.33 0.8 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……34

Şekil 4.34 0.8 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……35

Şekil 4.35 0.7 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……35

Şekil 4.36 0.7 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……36

Şekil 4.37 0.6 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……36

Şekil 4.38 0.6 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……37

Şekil 4.39 0.5 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……37

Şekil 4.40 0.5 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı……38

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Bazı malzeme ve gerilim/gerilme durumu konfigürasyonları için akma indeksleri....8

Tablo 4.1 Pres kalıp sac baskı kuvveti …….…….16

Tablo 4.2 DX52 karbon çeliğin mekanik, kimyasal özellikleri ve sac kalınlıkları ….……..17

Tablo 4.3 1.4016 paslanmaz çeliğin mekanik, kimyasal özellikleri ve sac kalınlıkları ….....17

Tablo 4.4 1.4016 paslanmaz çeliğin analizde kullanılan mekanik özellikleri …….……21

Tablo 4.5 DX52 paslanmaz çeliğin analizde kullanılan mekanik özellikleri ……21

Tablo 6.1 Her iki çelik sınıfı ve sac kalınlıkları için geri esneme analiz sonuçları…….40

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ε	: Deformasyon
υ	: Poison oranı
σ	: Gerilme
E	: Elastisite modülü
U_{zb}	: Geri esnemeden dolayı ortaya çıkan parçanın boyutsal ölçülerinin geri kazanımı
U_{part}	: Geri esnemenin sonucunda ortaya çıkan nihai parça şekli
U_{die}	: Form işleminin sonunda, ancak takımlar çıkarılmadan önce, kalıp geometrisine göre sacın aldığı şekil

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI KALINLIKLARA ve ÇELİK KALİTESİNE SAHİP SACLARIN BUKMEDE GERİ YAYLANMA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan EREN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Mahmut Cüneyt FETVACI

Farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin şekillendirilmesi için farklı kalıplar yerine maliyeti düşürmek için ortak bir pres kalıbı kullanılmaktadır. Bu durum beraberinde farklı malzeme ve kalınlıklardan dolayı yük uygulanan sac büküm kenarlarında yükü kaldırdıktan sonra farklı geri yaylanma oranlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır ve ölçüsel sapmalardan dolayı istenilen tolerans aralıklarında nihai ürün elde edilmesini de zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, 0.8 mm, 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm kalınlıklarda DX52 karbon çelik ve 1.4016 paslanmaz çelik sacların 6 mm, 4 mm ve 2 mm köşe büküm radyüs değerlerinde 90° bükümü ve sonrasında ortaya çıkan geri yaylanma durumu karşılaştırmalı olarak bir simülasyon programı yardımı ile yapılarak incelenmektedir. Farklı malzeme çeşitleri ve kalınlıklarda ortaya çıkan geri yaylanma miktarlarını tespit edebilmek için NX programından faydalanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına kapsamında geri yaylanma miktarları göre tasarımsal optimizasyonu sağlayabilmek için ortak tolerans aralıklarını belirlenmesi amaçlanmıştır.

Ağustos 2022 , 62. sayfa.

Anahtar kelimeler: Sac şekillendirme, geri yaylanma, sonlu elemanlar metodu

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF SPRING BACK EFFECTS ON SHEET METAL BENDING WITH DIFFERENT THICKNESSES AND STEEL GRADE

Serkan EREN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Programme

Supervisor : Prof. Dr. Mahmut Cüneyt FETVACI

In the white goods sector, outer doors with the same design in dishwasher products are produced in different steel classes and thicknesses according to customer expectations. Instead of using different sheet metal press tools to form sheets with different mechanical properties, a common press tool is used to reduce the cost. This situation causes different spring back rates after removing the load on the bending edges of the sheet metal, which is loaded due to different materials and thicknesses, and makes it difficult to obtain the final product within the desired tolerance ranges due to dimensional deviations.

In this study, spring back condition has been examined comparatively with the help of a simulation software that occurs after the 90° bending of DX52 carbon steel and 1.4016 stainless steel sheets with 0.8mm, 0.7 mm, 0.6 mm and 0.5 mm thicknesses and 6 mm, 4 mm and 2 mm bending radius. Within the scope of the simulation results, it is aimed to determine the common tolerance ranges in order to provide design optimization according to the amount of spring back.

August 2022, 62. pages.

Keywords: Metal forming, Spring back, Finite element method

1. GİRİŞ

Dayanıklı olması, istenilen tüm renklerde boyanabilmesi ve estetik bir görünüm elde edebilmek için istenilen şekle girebilme kabiliyeti gibi birçok avantaja sahip olan saclar sanayinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlardan birisi olan beyaz eşya sektöründe, bulaşık makinesi ürünlerinde müşteri beklentilerine göre aynı tasarıma sahip ön panel sacları farklı çelik sınıflarında ve kalınlıklarda teknolojik anlamda gelişmiş press kalıp yardımı ile şekil verilerek üretilmektedir.

Metal şekillendirmede, istenilen nihai şeklin verilebilmesi için press kalıp içerisine yerleştirilen ve baskı ile sabitlenen sac basitçe zımba yardımı ile bir yönde kuvvet uygulanarak bükülmektedir. Tasarıma bağlı olarak istenilen toleranslar dâhilinde sac malzemeye hedeflenen şeklin verilmesi için malzemenin mekanik özelliklerinin, üretim yöntem ve sürecinin anlaşılması gerekmektedir. Metal şekillendirme işleminde karşılaşılan en önemli zorluklardan birisi nihai ürünün ölçüsel olarak tutarlılığına etki eden büküm bölgelerinde ortaya çıkan geri yaylanma etkisidir. Bükülen kenarın açısı, bükmeyi yapan zımba geometrisinden ve malzemenin özelliklerinden etkilenir. Geri yaylanma etkisinin kontrol altında tutularak istikrarlı bir üretimin sağlanması için deneme yanılma yöntemleri yüksek maliyet getirmektedir ayrıca uzun zaman almaktadır. Bu nedenle geri esneme kontrolünü için istenilen parçayı elastik ve plastik faktörlere bağlı olarak doğrusal olmayan bir etkileşim içerisinde ele almak ve bu zorluğu aşarak kısa zamanda doğru bir şekilde yüksek üretkenlik ile üretmek için FEA simülasyon yaklaşımları kullanılmaktadır [1].

Şekillendirme sırasında kalıcı deformasyona neden olmak için malzeme akma dayanımı üzerinde gerilmeye uğrar. Yük kaldırıldığı zaman Bauchigner etkisi dolayısı ile gerilme elastik modül eğrisine paralel bir şekilde tekrar sıfırlanmaktadır [2]. Bunun sonucunda geri yaylanma etkisi nedeniyle deformasyon beklenenden daha az olmaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Literatürde metal şekillendirmede geri yaylanma etkisini malzeme tipi, kalınlık ve sıcaklık gibi kriterlere göre deneysel olarak ve simülasyon yardımı ile inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

M.Arunkumar ve arkadaşları 45 derece bükme açısında çelik ve alüminyum malzemelerinin FEA simülasyon yaklaşımı ile geri yaylanma özelliklerini karşılaştırmalı olarak incelemiş ve geri esneme etkisinin sac malzemenin değişen kalınlığına, akma gerilmesi, young modülü, gerinim sertleşmesine bağlı olarak değiştiğini ve ayrıca kalınlığın artması ve büküm açısının azalması ile geri esnemenin azaldığını ileri sürmüştür [1].

Dametew ve Gebresenbet ‘da sac bükme işleminde geri yaylanmanın optimizasyonu sağlamak için alüminyum, bakır ve farklı mukavemete sahip çelik saclar üzerinde kalınlık, sürtünme, takım yarıçapına bağlı olarak matematiksel analizi yapılarak düşük mukavemetli sacların ve düşük sürtünme kuvvetlerinin geri yaylanma oranını azaltabileceğini göstermiştir[2].

Hong Seok Kim ve Muammer Koç ise hafif malzemelerin sıcak şekillendirilmesinde sıcaklık gradyanlarının geri yaylanma açısından nihai parça kalitesi üzerine etkisi inceleyerek termomekanik olarak birleştirilmiş bir FEA analizi ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu sonuçlar kapsamında özellikle 200 C üzerinde yüksek sıcaklıklarda malzeme mukavemetinin azalması nedeni ile geri esneme miktarının büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermişlerdir[4].

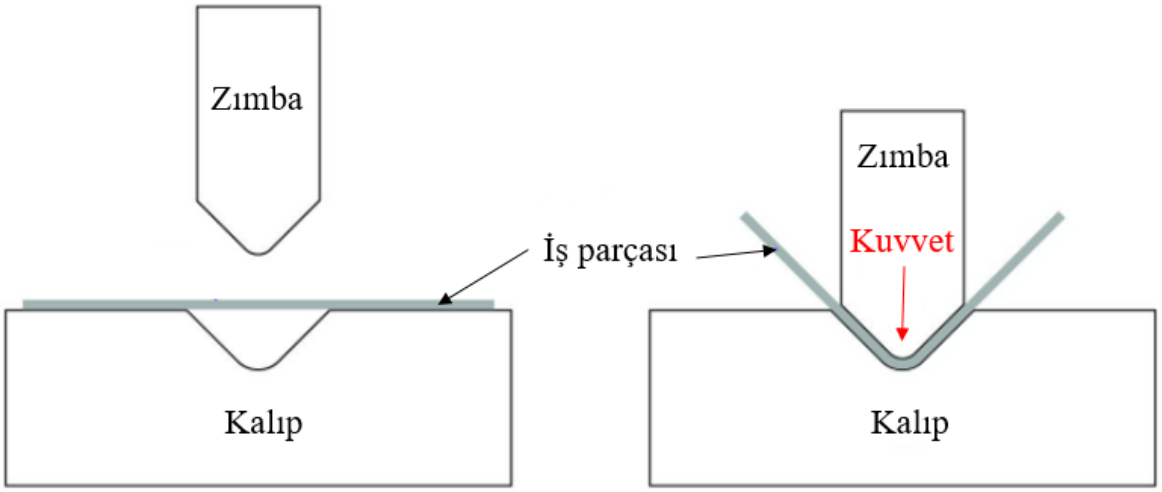
I-Nan Chou ve Chinghua Hung ‘da geri esnemenin üstesinden gelmek için geleneksel büküm yönteminin yerine çift büküm tekniğinin geri yaylanma üzerinden etkisini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmiş ve geri yaylanma miktarını düşürdüğünü belirten çalışmalarda bulunmuştur[5].

Emin Uslu ve Nihat Tosun ise yaptıkları çalışmada DC serisi metal malzemeden sacların kalınlık, haddeleme yönü ve kalıp açısına bağlı olarak geri yaylanma davranışını deneysel olarak incelemişler, artan kalıp açılarının ve kalınlığın geri yaylanmayı azalttığını göstermişlerdir[6].

3. YÖNTEM

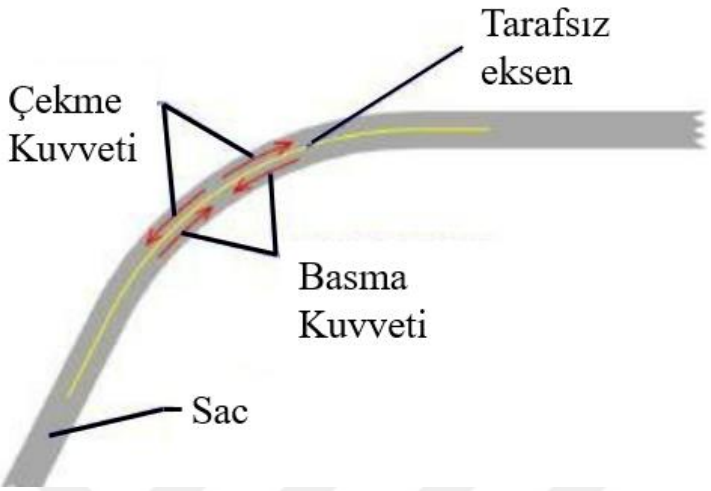
3.1 BÜKME İŞLEMİ

Bükme işlemi parçaların farklı formlarda bükülmüş profiller gerektirdiği sac metal üretiminde yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu işlemde metal sac parçasının üzerine istenilen şekle getirebilmek ve belirli bir açıda bükmek için kuvvet uygulanmaktadır. Bu işlem sırasında bir eksen boyunca ortaya çıkan plastik deformasyon sonucu malzeme kalıcı şekil değişikliğine uğramaktadır. Şekil 3.1'de kalıp üzerinde bulunan iş parçası (a) durumunda iken üzerine zımbanın baskı kuvveti uygulaması sonrasın V şeklindeki kalıbın bükülerek şeklini almaktadır (b).



Şekil 3.1 V kalıp üzerinde bükme işlemi.

Sac malzemelerin sünekliğine, kalınlığına, bükme açısına ve yükleme koşullarına bağlı olarak çok küçük yarıçaplarda bükülebilmektedir. Bükülme şiddeti genellikle R/t oranı ile ifade edilmektedir. Burada R bükme yarıçapı ve t ise sac malzemenin kalınlığıdır. Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik saclar çok düşük değerde R/t oranında bükülebilmektedirler. Ancak yüksek dayanımlı çeliklerde düşük değerli R/t bükme oranında kırılma ortaya çıkmaktadır.



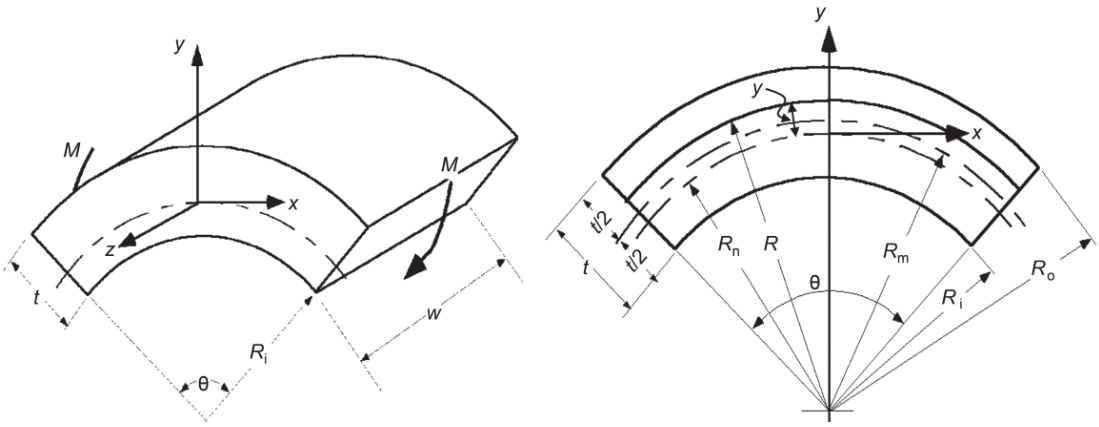
Şekil 3.2 Sac bükme mekaniğini şeması [7]

3.2 BÜKME MEKANİĞİ

Bükme işlemi sırasında sac malzeme üzerinde tarafsız eksenin üst tarafında kalan dış kısımda gerilme ortaya çıkarken iç kısımda ise sıkışma oluşmaktadır. Bununla beraber bükme sırasında çekme ve kesme gerilmeleri gibi ek deformasyon oluşumları ortaya çıkmaktadır. Basitleştirilmiş eğilme teorisi ortaya çıkan gerilmeleri, gerinimleri ve geri esneme durumunu tahminsel olarak belirleyen bir yaklaşım olarak kullanılabilmektedir.

3.2.1 Gerinim Tahmini

Şekil 3.4’ de M eğilme momentine maruz kalan kesiti alınmış bir numune gösterilmektedir [9]. Belirtilen yükleme koşullarında tarafsız eksenden “*y*” uzaklığında bir fiber üzerindeki eğilme şekil değiştirmesi şu şekilde ifade edilmektedir.



(a) (b)

Şekil 3.3 Sac bükme analizinde kullanılan geometrik değişkenler, (a) genel ölçüler, (b) bükme analizinde kullanılan ölçüler (T. Altan, E. Tekkaya, 2012)

$$\varepsilon_b = ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = ln\left(\frac{R}{R_n}\right) \tag{3.1}$$

Burada "ε_b" bükmeden dolayı oluşan gerinim, "l" ise tarafsız eksenden "y" uzaklığında fiberin uzunluğu, "R" fiberin bükme yarıçapı ve "R_n" ise fiberin tarafsız eksen üzerinde değişme olmayan uzunluğunun olduğu yerde bükme yarıçapıdır. Eğer "R" "y" cinsinden ifade edilirse bükme gerinimi;

$$\varepsilon_b = ln\left(1 \pm \frac{y}{R_n}\right) \tag{3.2}$$

Daha yüksek (R/t) bükme oranları için "R_n" yaklaşık olarak "R_m" eşit olmaktadır.

$$R_n \approx R_m = R_i + \frac{t}{2} \tag{3.3}$$

Eşitlik 3.2 için Taylor serisi kullanılarak;

$$\varepsilon_b = \frac{y}{R_m} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{R_m}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{y}{R_m}\right)^3 - \cdots = \frac{y}{R_n}\left(1 - \frac{y}{2R_m}\right) \tag{3.4}$$

Daha yüksek bükme yarıçapı için gerçek gerinim ve mühendislik gerinim birbirlerine çok yakındır ve “y” radyal uzaklığı ile doğrusal orantılı hale gelir.

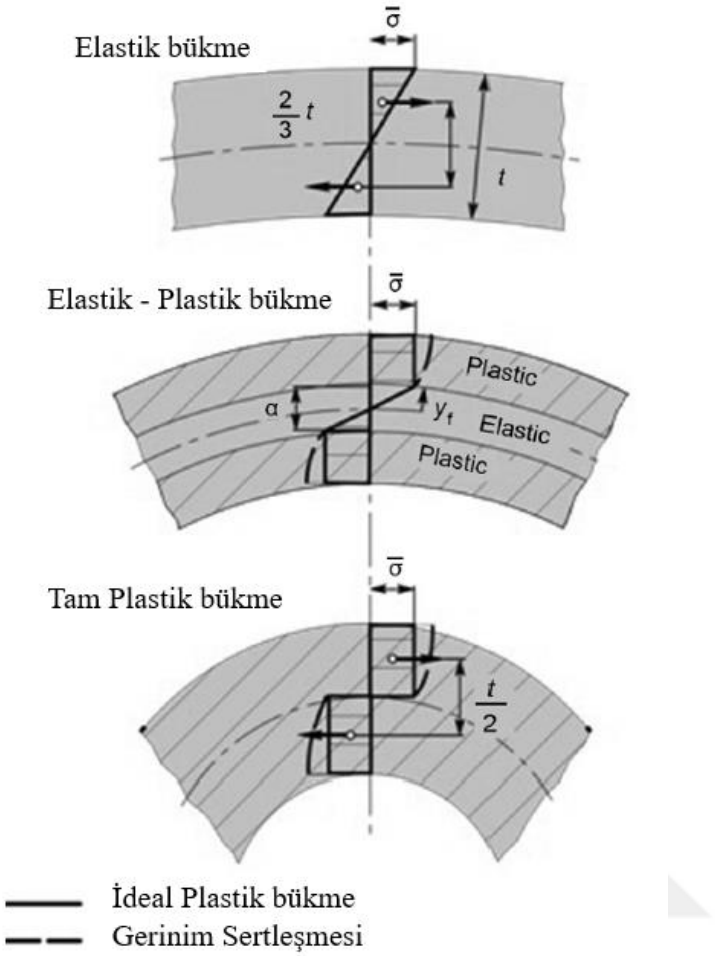
$$\varepsilon_b \approx e_b = \frac{y}{R_m} \tag{3.5}$$

Sonuç olarak, en dış katmanda fiberde ortaya çıkan maksimum gerinim;

$$\varepsilon_b^{maks} = \ln\left(1 \pm \frac{\frac{t}{2}}{R_m}\right) = \ln\left(1 \pm \frac{t}{2R_i + t}\right) \tag{3.6}$$

Veya

$$\varepsilon_b^{maks} = e_b^{maks} = \pm \frac{t}{2R_i + t} \tag{3.7}$$



Şekil 3.4 Temel eğilme teorisinde gerilme gerinim dağılımları (T. Altan, E. Tekkaya, 2012)

3.2.2 Gerilme Tahmini

Gerilme durumu sac genişliğinin ve kalınlığının bir birine oranı ile hesaplanmaktadır. Örneğin çubuk gibi genişliği kalınlığına göre daha kısa olan bir parçada eğilme durumunda enine gerilmeler oluşmaz ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) ve böylelikle tek eksenli olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Enine ve boyuna şekil değiştirmeler birbiri ile ilişkilidir. ($\varepsilon_2 = -1/2\ \varepsilon_1$) bu durum da sıkıştırma alanı bölgesinde genişlikte bir artışa ve çekme alanındaki genişlikte bir azalışa neden olmaktadır.

Levha yeterince geniş olması durumunda ise düzlem-gerilme durumu yalnızca kenar kısımlarında meydana gelir ve ayrıca bu bölgelerde enine bir eğrilik oluşmaktadır. Geniş parçaların merkezinde ve ayrıca serbest kenarlardan uzakta kalan diğer yerlerde enine eğrilik sıfırdır ve dolayısı ile $\varepsilon_2 = 0$'dır. Bu duruma düzlem gerinim koşulu denilmektedir.

Von Mises tarafından önerilen bozulma enerjisi kriterine göre akma şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$\bar{\varepsilon} = F\ \varepsilon_1 \tag{3.8}$$

$$\sigma_1 = F\ \bar{\sigma} \tag{3.9}$$

Burada $\bar{\sigma}$ ve $\bar{\varepsilon}$ =Fε sırasıyla akış gerilmesi ve gerinimdir. F ise malzeme akmasını tanımlayan bir indekstir. Gerilme ve anizotropi durumlarını tanımlamak için Hill, F indeksinin aşağıdaki tabloda belirtildiği gibi kullanılmasını önermektedir.

Tablo 3.1 Bazı malzeme ve gerilim/gerilme durumu konfigürasyonları için akma indeksleri

F (Hill'in akma indeksi)	Anizotropi ve Gerilme/gerinim durumu
1	İzotropik ve tek eksenli gerilme
$2/\sqrt{3}$	İzotropik ve düzlem gerilme
$\frac{1+\overline{R}}{\sqrt{1+2\overline{R}}}$	Normalde anizotropik ve düzlem gerinim

İzotropik malzeme ve düzlem- gerinim koşulları için;

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_1 \text{ ve } \sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} \tag{3.10}$$

Şekil 3.4 temel bükül teorisinde gerilme dağılımını göstermektedir. Düzlem-şekil değiştirme koşulu altında elastik deformasyona neden olan gerilme bileşeni $\sigma_{b,e}$ Hook yasası kullanılarak bulunmaktadır.

$$\sigma_{b,e} = \frac{E}{(1-\vartheta^2)}\varepsilon_b = \pm\frac{E}{(1-\vartheta^2)R_n}\ 0 < \varepsilon_b < \varepsilon_{e,0} \tag{3.11}$$

E: Young modülü

ϑ: Poisson oranı

$\varepsilon_{e,0}$: Elastik limit

Plastik gerilim bileşenleri malzeme-sertlik modelinin karmaşıklığına bağlıdır. Rijit olarak mükemmel bir malzeme için Hill'in akma indeksi F kullanılarak, bükme gerilmesi şu şekilde olmaktadır.

$$\sigma_{b,p} = F\overline{\sigma}, \varepsilon_{e,0} < \varepsilon_b \tag{3.12}$$

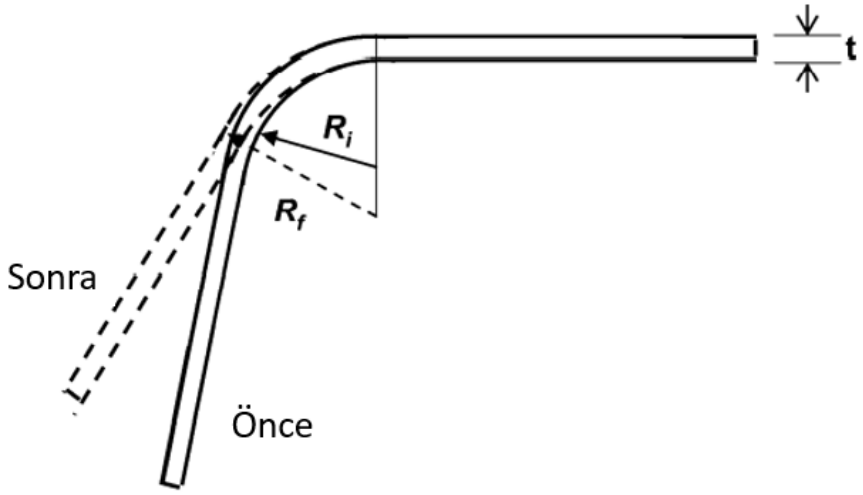
Genelleştirilmiş "power law" yasasına göre, bükme gerilmesi;

$$\sigma_{b,p} = KF^{n+1}\left[\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{e,0}}{F} + \varepsilon_b\right]^n = KF^{n+1}\left[\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{e,0}}{F} + ln\left(1 \pm \frac{y}{R_n}\right)\right]^n, \varepsilon_{e,0} < \varepsilon_b \tag{3.13}$$

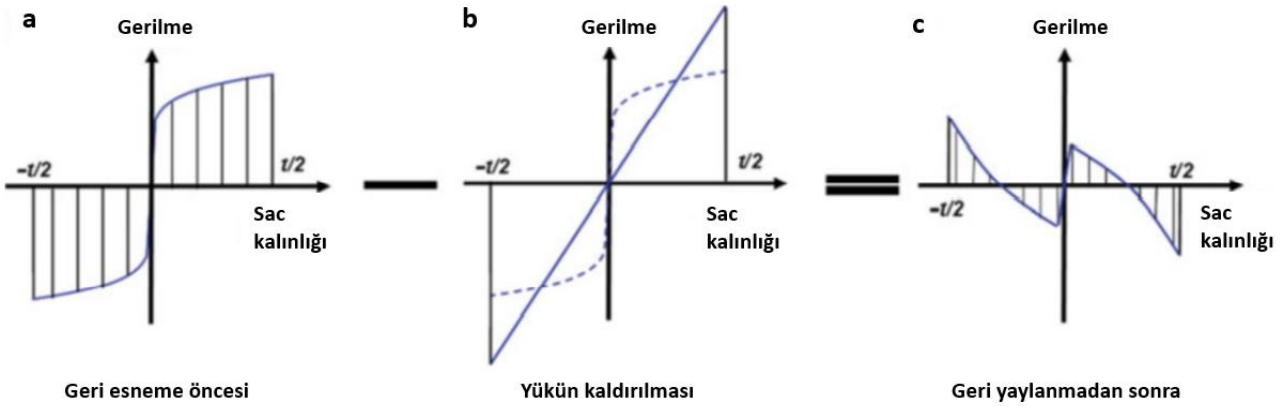
3.3 GERİ ESNEME MEKANİĞİ

Geri esneme, parçanın öncelikle elastik toparlanmasının meydana gelmesi ile birlikte, yükün kaldırılması ırasında meydana gelen boyutsal bir değişiklik olarak düşünülebilir. Geri yaylanmadan sonra parça, belirli bir sürede dış kuvvetlerin yokluğunda bir iç dengeye ulaşmaktadır.

Şekil 3.5'de belirtilen bükme durumunu ele aldığımızda yüklü eğilme durumunda iç yüzey sıkışma gerilmesi altında iken üst yüzey çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Malzeme üzerinde meydana gelen gerilmelerin Şekil 3.6'de (a) yüklü durumda, (b) yükün kaldırılması sırasında eş değer bir ters moment uygulandığı düşünülebilir ve (c) yük kaldırıldıktan sonra artık gerilimlerin sacın kalınlığı boyunca ortaya çıktığı gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Sac büküm sonrasında ortaya çıkan geri esne (Z. Cedric Xia, Jian Cao, 2014)



Şekil 3.6 Geri yaylanma öncesi ve sonrası sac'daki gerilim dağılımları (Z. Cedric Xia, Jian Cao, 2014)

Bükülmüş sacın yarıçapı Ri 'den (yük boşaltmadan önce) Rf 'ye (yük boşaltmadan sonra) değişir. Bir saf bükme durumunda yarıçapın değişimi kabaca şu şekilde tahmin edilmektedir.

$$\frac{R_i}{R_f} \cong 4\left(\frac{R_i Y}{Et}\right)^3 - 3\left(\frac{R_i Y}{Et}\right) + 1 \tag{3.14}$$

E: Young modülü

Y: Akma gerilmesi

t: Sac kalınlığı

Yukarıdaki denklem, basit bir bükme durumu için makul bir şekilde çalışır ve bazı temel malzeme özelliklerine göre geri esnemenin büyüklüğü hakkında birinci dereceden bilgiler sağlar. Bununla birlikte, genel bir üç boyutlu durumda geri esneme, şekillendirilmiş bir parçadaki gerilim dağılımı oldukça düzensiz olduğundan ve deformasyon geçmişine bağlı olduğundan çok daha karmaşıktır. Geri esneme miktarını doğru bir şekilde yakalamak için sonlu elemanlar yöntemleri yaygın olarak benimsenir.

Elde edilmek istenilen nihai parça formu aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$U_{part} = U_{die} + U_{zb} \tag{3.15}$$

U_{die}: Form işleminin sonunda, ancak takımlar çıkarılmadan önce, kalıp geometrisine göre sacın aldığı şekil

U_{zb}: Geri esnemeden dolayı ortaya çıkan parçanın boyutsal ölçülerinin geri kazanımı

U_{part}: Geri esnemenin sonucunda ortaya çıkan nihai parça şekli

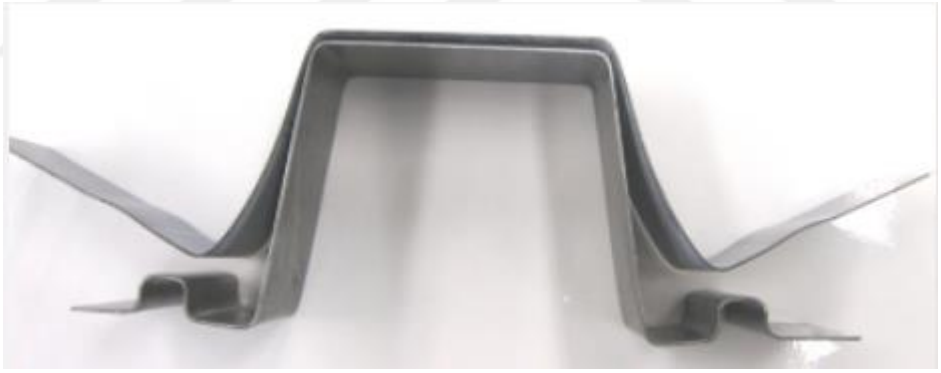
Yük boşalması genellikle lineer elastik bir işlemdir ve geri esnemede dikkate alınması gereken önemli bir kriterdir. Tasarımcı için önemli olan hedef U_{part} mümkün olduğunca U_{design} yakın olmasıdır.

3.4 GERİ ESNEME KONTROLÜ VE TELAFİSİ

3.4.1 Geri Esneme Kontrol Yöntemleri

3.4.1.2 Tasarım Yolu ile Kontrol

Geri yaylanma kontrolü yöntemleri genel olarak iki kategoriye ayrılır. İlk yöntem, parça tasarımı yoluyla geri esnemeyi en aza indirmeye çalışır. Geri esnemenin büyüklüğü, bir parçanın sertliği ile ters orantılıdır, eğer bir parça yerel olarak veya bir bütün olarak daha sert hale getirilebiliyorsa, geri esneme azaltılabilir. Bu genellikle, parçanın işlevselliğini değiştirmeden yerel veya küresel sertliği güçlendirmek için zayıf olabilecek yerlere takviye feder, kabartmalar eklenerek ve birleştirilerek elde edilir.



Şekil 3.7 Sac üzerine eklenmiş kabartmanın geri yaylanma miktarını azaltmadaki etkisi

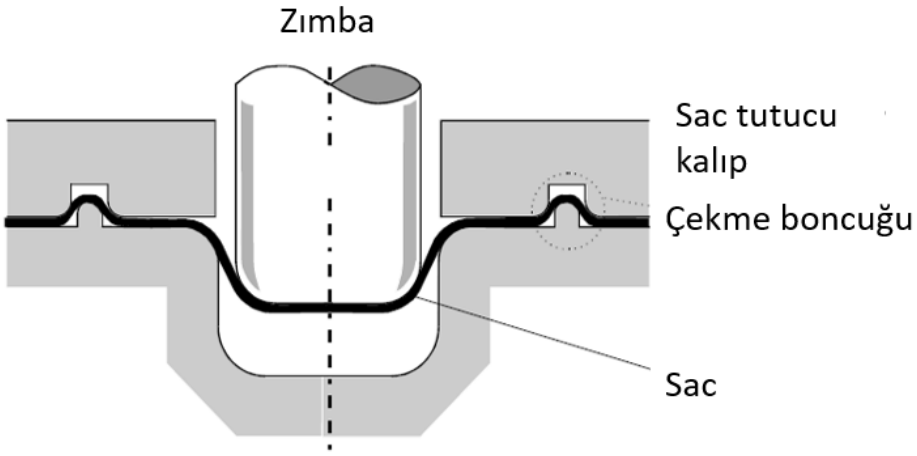
Şekil 3.7' de görüldüğü üzere kabartma geometrisi, zımba baskısının son aşamalarında yan duvarları gererken metal akışını kısıtlamada önemli bir rol oynar ve sınırlı metal hareketi sacın her iki yüzey arasında gerilme farkını en aza indirerek geri esnemenin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır [11].

3.4.1.3 Üretim Yolu ile Kontrol

Geri yaylanma kontrolü için bir diğer yöntem ise, geri yaylanmayı azaltmak için şekillendirme sürecini optimize etmektir. En bilinen yöntemlerden birisi ise "Post -Strech" veya "Shape Set" 'dir. Bu yöntem pres alt ölü noktaya ulaşmadan önce zımba kilitlenmektedir ve kalıp üzerinde malzemenin gerilerek bir form aldığı tekniktir [12]. Bu teknikte parçaya küçük bir eksenel çekme gerilmesinin uygulandığını varsayılmakta ve üst yüzey plastik yüklemesini gerilim altında sürdürecek ve malzemenin sertleşmesi nedeniyle çekme gerilimi az miktarda artmaktadır.

ShapeSet konseptini uygulamak için çeşitli mekanizmalar önerilmektedir. Bunlardan bazıları patentli proseslerdir. Örnek olarak Owens (Owens 2001) tarafından geliştirilen prosesi incelendiğinde, ilk adımda, malzeme akışını önleyen çekme boncuğu kullanılmaz ve zımba penetrasyonu istenen parça derinliğinden daha az bir mesafeye kadar inmektedir [10]. İstenilen ön şekli elde etmek için metalin kalıp içerisinde kolayca akmasına izin verilmektedir. Bu adımdan sonra geri esneme miktarı çok fazla durumdadır. Bir sonraki adımda ise nihai şeklin verilmesi için kısmen şekillendirilen yapılan parça başka bir kalıba yerleştirilmektedir. Bu adımda şekil 3.8'da belirtilen metal malzeme akışını önleyen çekme boncuğu ile sıkıca kitlenmektedir ve malzemeyi gerdirme işlemi için baskın deformasyon uygulanmaktadır ve ortaya çıkan geri esneme miktarı daha düşüktür [13]. Şekillendirme sırasında kısıtlayıcı kuvvet kademeleri gerilme ve eğilme momentlerinde oluşan dağılımları empoze etmektedir.

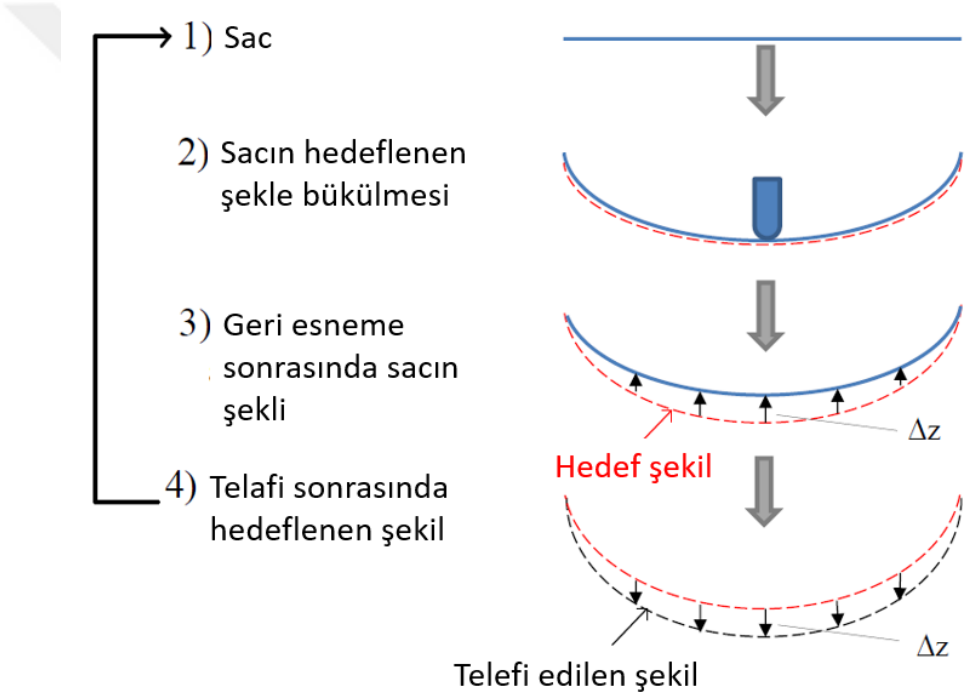
Kalıp boşluğuna doğru akan malzemeye izin verildiğinde bükme baskın olacaktır; tersine, kalıp boşluğuna malzeme akışı kısıtlandığında germe baskın olacaktır.



Şekil 3.8 Sac üzerine eklenmiş kabartmanın geri yaylanma miktarını azaltmadaki etkisi

3.4.2 Geri Esneme Telafi Yöntemi

Boyutsal doğruluğu sağlamak için diğer bir yöntem ise geri yaylanma telafisidir. Bu yöntemde geri esnemeyi en aza indirmeye çalışmak yerine, amaç bükme sürecini geri esnemeden sonraki parça şekli, tasarım hedefini karşılayacak şekilde ayarlamaktır. Şekil 3.9'de geri yaylanma telafi konsepti açık bir şekilde belirtilmektedir [14]. İlk olarak sac tasarlanan bükme takım yolunu izleyerek hedeflenen şekle bükülmektedir. Sonrasında sac Δz kadar geri esneme yapmaktadır. Ancak takım bükme mesafesi Δz kadar daha da arttırılırsa bu bu sefer geri esnemeden sonra ~Δz kadar geri geleceğinden dolayı hedeflenen şekle telafi yapılarak çok fazla yaklaşılmaktadır.



Şekil 3.9 Geri yaylanma telafisi

Geri esneme kompanzasyonu yönteminin başarılı olması için iki temel bileşen gereklidir. Birincisi girdi olarak geri esnemenin büyüklüğü ve telafi edilmiş takım yüzeyini hesaplamak için etkili bir algoritmadır. Geri esnemenin büyüklüğünü elde etmenin iki yolu vardır.

Biri, şekillendirme denemelerinin yapıldığı fiziksel denemedir ve bu denemeler ile geri yaylanma miktarı ölçülmektedir. Deneme yöntemi genellikle maliyetlidir ve zaman alıcı olan şekillendirme araçlarının fiziksel olarak oluşturulmasını gerektirir. Alternatif yol ise şekillendirme işlemlerinin sayısal simülasyonu ile geri esneme miktarını tahmin etmektir.

Simülasyon teknolojisindeki son gelişmeler bu yaklaşımı daha uygulanabilir kılsa da, geri yaylanma tahmininin doğruluğu büyük ölçüde şekillendirilmiş parçanın karmaşıklığına ve şekillendirme işlemine ve sac malzemenin sürtünme davranışını ve mekanik davranışını doğru bir şekilde modelleme yeteneklerine bağlıdır.

Etkili geri esneme telafisi için algoritmaların geliştirilmesi, geri esneme mekaniğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını ve karmaşık parçalar için bile geri esnemeyi tamamen telafi etme yeteneğine sahip olmayı gerektirir.

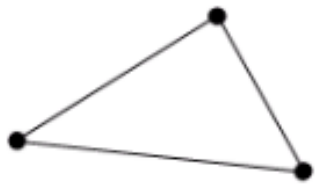
4. BULGULAR

4.1 SONLU ELEMANLAR YONTEMİ

Geleneksel analitik yöntemlerle metal şekillendirmede çok sayıda parametre ve şekillendirme koşulları nedeniyle çok doğru ve ayrıntılı sonuçlar elde etmek zordur. Teknolojideki ve bilgi işlem gücündeki ilerleme ile sonlu elemanlar yöntemi, geleneksel analiz yöntemlerinin çekici bir alternatifi haline geldi. Geri yaylanma, sac metal bileşenin şeklini etkileyen kilit faktörlerden biridir. Sonlu Elemanlar (FE) analizi, sıkıcı deneysel denemelerden kaçınmak için sac metal imalat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geri esneme, sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan farklı işlem parametrelerine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterir.

Bu çalışma içeriğinde aynı kalıpta 0.8, 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm kalınlıklarda ve 6 mm, 4 mm ve 2 mm köşe radyüsü değerlerinde DX52 karbon çelik ve 1.4016 paslanmaz çelik sacların 90° bükümü ve sonrasında ortaya çıkan geri yaylanma durumu karşılaştırmalı olarak bir simülasyon programı yardımı ile yapılarak incelenmektedir. Farklı malzeme çeşitleri ve kalınlıklarda ortaya çıkan geri yaylanma miktarlarını tespit edebilmek için NX programından faydalanılmıştır.

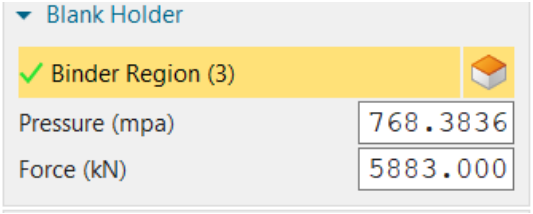
Sınır şartları açısından Şekil 4.1'de belirtilen mesh eleman tipi olarak iki boyutlu 3 düğüm noktasına sahip kabuk üçgenler elemanlar ağı kullanılmıştır. Bu hücre şekli 3 kenardan oluşur ve en basit ağ tiplerinden biridir. Üçgen bir yüzey ağı oluşturmak her zaman hızlı ve kolaydır.



Şekil 4.1 3 düğüm noktasına sahip 2 boyutlu kabuk üçgen eleman tipi

Tablo 4.1'de belirtildiği gibi pres sac baskı kuvveti 600 ton olarak tanımlanmıştır.

Tablo 4.1 Pres kalıp sac baskı kuvveti



Simülasyon sonuçlarına kapsamında geri yaylanma miktarları göre tasarımsal optimizasyonu sağlayabilmek için ortak tolerans aralıklarını belirlenmesi amaçlanmıştır. Simülasyon da, iş parçası, temas halinde olan baskı ve kalıp çelikleri arasında bulunmaktadır. Kalıp zımbası iş parçasını bükmek için aşağı hareket etmektedir. Bükme işleminden sonra iş parçası-kalıp teması ve iş parçası-zımba teması kaldırılır. Daha sonra metalin geri esnemesine izin verilir. Simülasyon da, iş parçasının sol üst ve sol alt kısımları x ve y yönleriyle sınırlandırılmıştır. Bu, iş parçasının simülasyon sırasında sayısal hatalara neden olacak herhangi bir rijit gövde hareketini önlemek içindir.

4.2 NX PROGRAMI İLE GERİ YAYLANMA ANALİZİNDE KULLANILAN MALZEME VE ÖZELLİKLERİ

NX programı ile yapılan geri yaylanma analizlerinde malzeme olarak DX52 karbon çeliği ve 1.4016 paslanmaz çelik serileri ve her bir malzemeye ait üç farklı kalınlık kullanılmıştır.

DX52 çeliği sürekli sıcak daldırma metodu ile galvaniz kaplanmış yassı çeliklerdir. Yassı çelik malzemelerin korozyondan korunması amacı ile yüzeylerine çinko / galvaniz kaplama uygulaması yapılmaktadır. Yassı çelik ısıtılarak ergiyik çinko potasına girer ve çinko / galvaniz kaplama yüzeye kimyasal bir bağ oluşturarak bağlanır. Galvaniz kaplama çeliğe korozyon direnci ve katodik koruma sağlar.

1.4016 ferritik gruba giren temel alaşımdır. Korozif ortamlarda veya atmosferik maruziyetlerde ve ayrıca kükürtlü gazlarda iyi direnç gösterir. Tavlanmış durumda sünektir ve haddeleme, katlama veya çekme işlemleriyle oluşturulabilir. Soğuk işlem sırasında aşırı sertleşmez.

Bir malzemenin şekillendirilebilirliği gerilme, akma dayanımı, pekleşme üsteli elastiklik modülü v.b. gibi özelliklerine bağlıdır [16]. Sırası ile DX52 karbon çeliği özellikleri çelik üreticileri tarafından DIN EN 10346 standardına göre ve 1.4016 paslanmaz çeliği özellikleri Tablo 4.2'de ve Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.2 DX52 karbon çeliğin mekanik, kimyasal özellikleri ve sac kalınlıkları

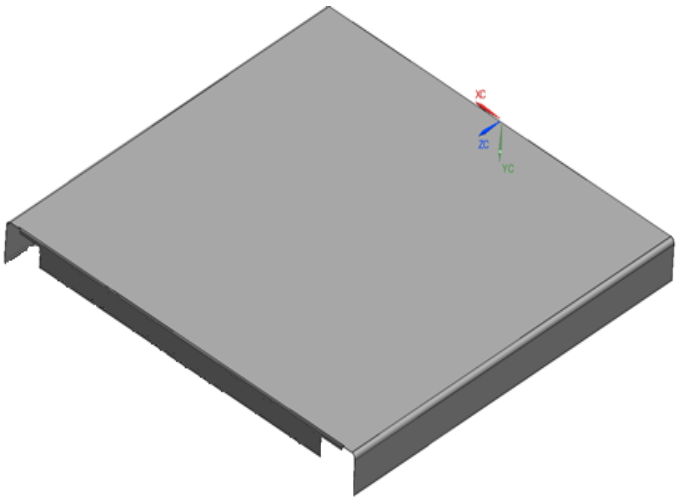
Çelik Kimyasal Kompozisyonu %					
C	Si	Mn	P	S	Ti
0.12	0.50	0.60	0.10	0.045	0.30
Mekanik özellikler					
Akma Mukavemeti Re	Çekme Mukavemeti Rm		Kopma Uzaması A80		
EN 10130	EN 10130		EN 10130		
(N/mm2)	(N/mm2)		%		
140-300	270-420		26		
Sac malzeme kalınlıkları (mm)					
0.5, 0.6, 0.7, 0.8					

Tablo 4.3 1.4016 paslanmaz çeliğin mekanik, kimyasal özellikleri ve sac kalınlıkları

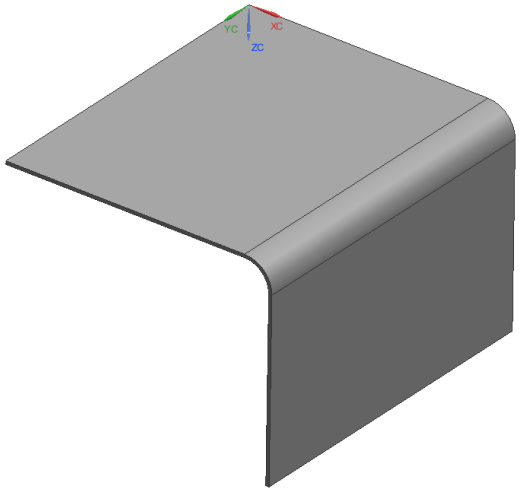
Çelik Kimyasal Kompozisyonu %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	N
≤0.08	≤1.00	≤1.00	≤0.040	≤0.015	16:00-18:00	≤0.045
Mekanik özellikler						
Akma Mukavemeti Re	Çekme Mukavemeti Rm		Kopma Uzaması A80			
(N/mm2)	(N/mm2)		%			
>240	450-600		>20			
Sac malzeme kalınlıkları (mm)						
0.5, 0.6, 0.7, 0.8						

4.3 BÜKME VE GERİ YAYLANMA ANALİZİ

Şekil 4.2'de belirtilen bulaşık makinesi dış kapısı yan büküm geri esneme analizi, şekil 4.3'de gösterildiği kesit üzerinde farklı malzeme tipi ve kalınlıklarında gerçekleştirilmektedir

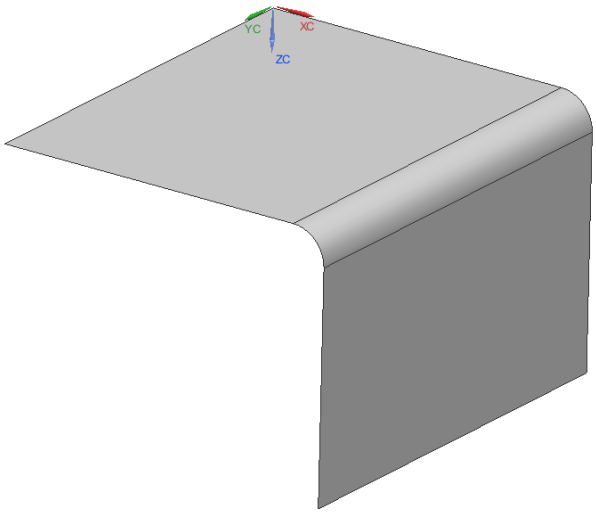


Şekil 4.2 Pres kalıpta basılmış bulaşık makinesi dış kapısı



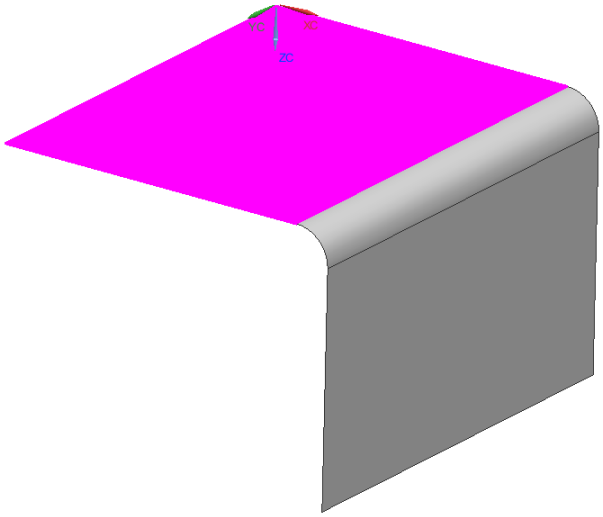
Şekil 4.3 Geri esneme analizi yapılan kesit

Analizi yapılacak kesit, analiz öncesinde öncelikle sürekli yüzey özellikleri sağlayan ve sac kalınlığının tam ortasını referans alacak şekilde tek boyuta indirgenmektedir



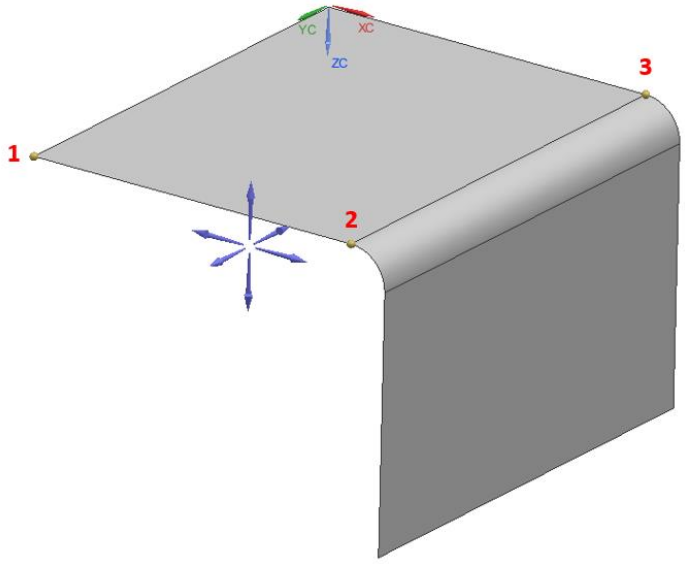
Şekil 4.4 Sürekli yüzeye indirgenmiş tek boyutlu model

Analiz sınır şartları için şekil 4.5'de belirtilen pembe ile belirtilen yüzey kalıp tutucu yüzeyler arasında kalan ve deforme olmayan sabit yüzey alanı olarak seçilmektedir.



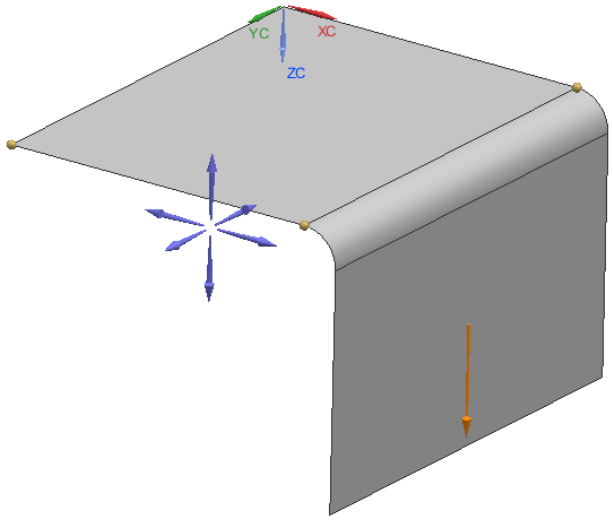
Şekil 4.5 Deforme olmayan sabit yüzey

Bir sonraki adımda geri esneme eşleşme kısıt noktaları 3 adet seçilmektedir. Kısıtlanan noktalar altı serbestlik derecesinde tamamen sınırlandırılmaktadır.



Şekil 4.6 Geri esneme eşleşme kısıtlama noktaları

Büküm analizi yapılacak yüzey için bükme yönü tayin edilmektedir.



Şekil 4.7 Bükme yönünün tanımlanması

Son adım olarak malzeme özelikleri tanımlanmaktadır ve analiz işlemi gerçekleştirilmektedir.

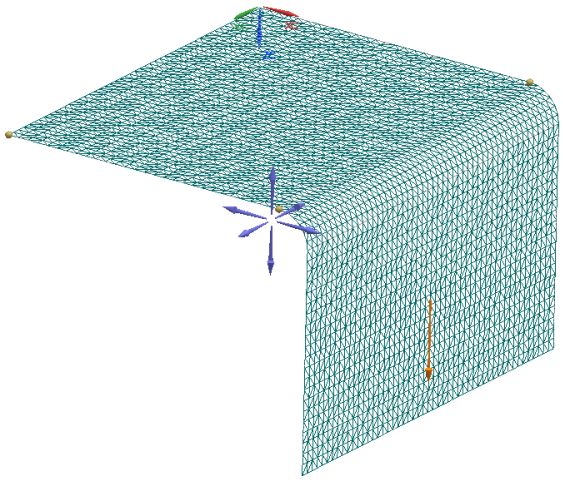
4.3.1 1.4016 Paslanmaz Çelik Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

1.4016 Malzeme özellikleri;

Tablo 4.4 1.4016 paslanmaz çeliğin analizde kullanılan mekanik özellikleri

Material	Mesh	Solver	Report
E(Elastic Modulus)	206940.0		
Density	7829.000		
Poisson's Ratio	0.2880		
Yield Stress	240.0000		
n(Hardening Exponent)	0.2000		
Initial Strain	0.0200		
K(Strength Coefficient)	550.0000		
r0(Anisotropy Coefficient)	1.3000		
r45(Anisotropy Coefficient)	1.3000		
r90(Anisotropy Coefficient)	1.3000		

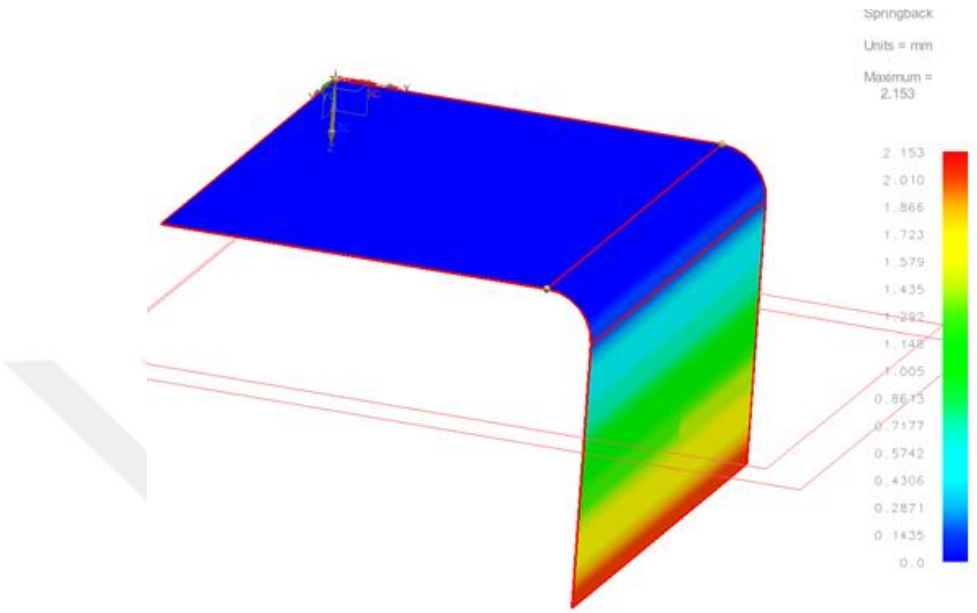
Analiz gerçekleştirilmeden önce parçada mesh işlemi gerçekleştirilmektedir.



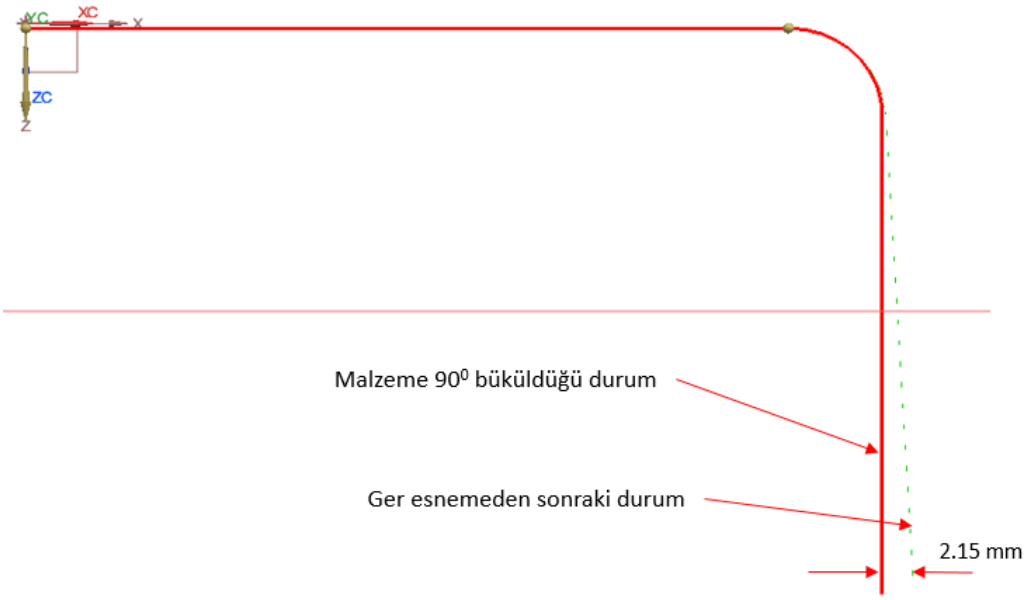
Şekil 4.8 Analiz öncesinde mesh işlemi yapılan parça

4.3.1.1 0.8 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.9'da analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 2.153 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır



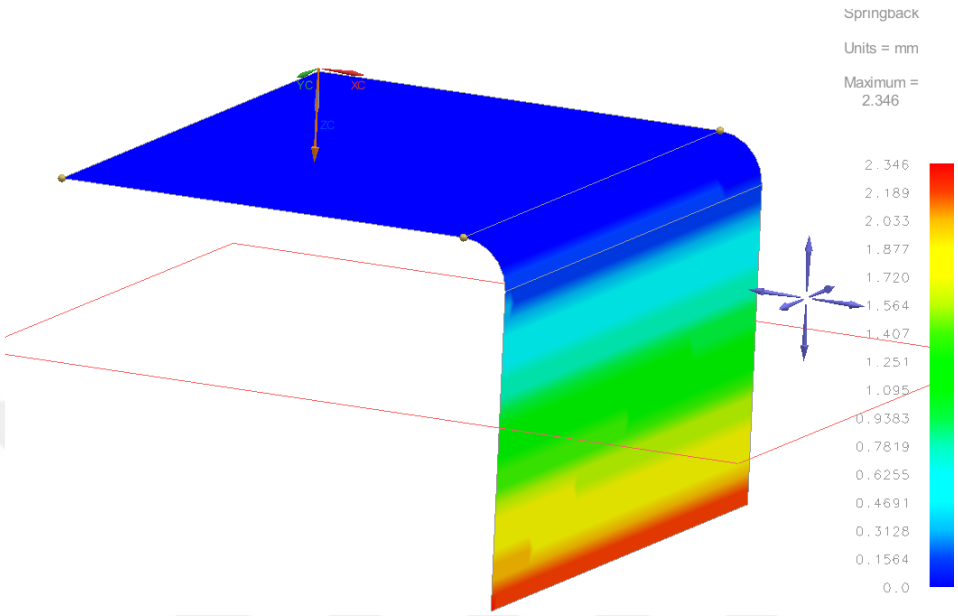
Şekil 4.9 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacda meydana gelen geri esneme miktarı



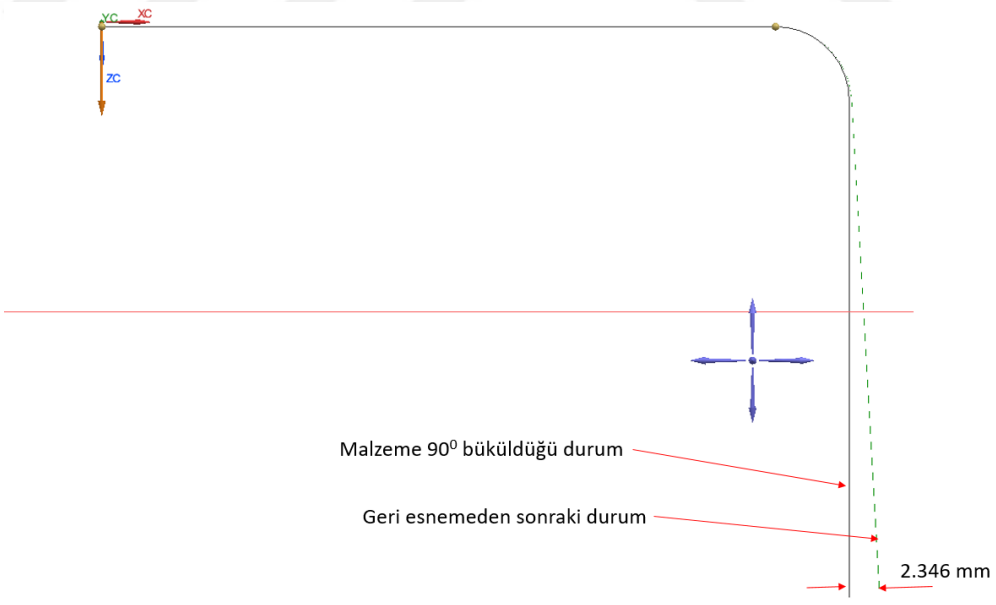
Şekil 4.10 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

4.3.1.2 0.7 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.11'de analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 2.346 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır



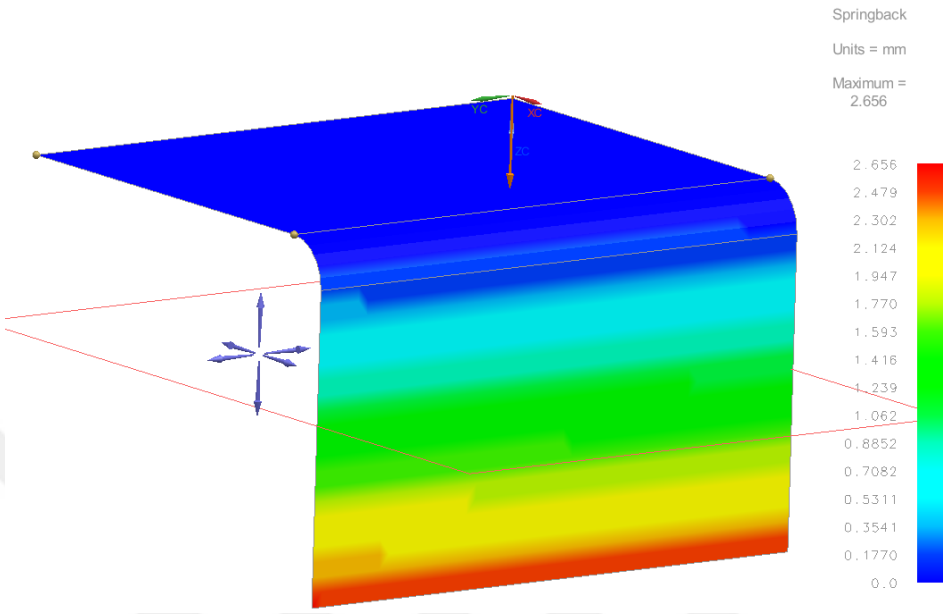
Şekil 4.11 0.7 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacda meydana gelen geri esneme miktarı



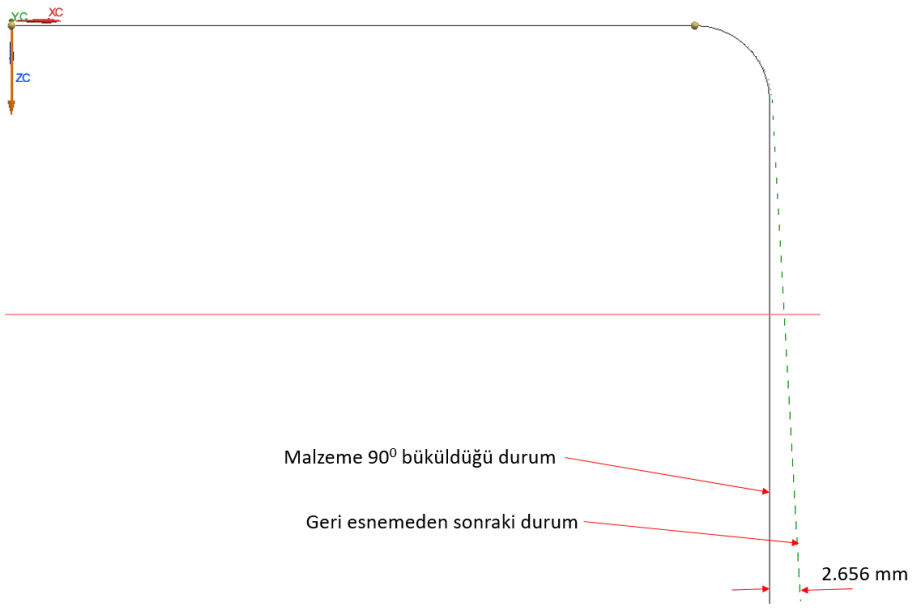
Şekil 4.12 0.7 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

4.3.1.3 0.6 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.13'de analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 2.656 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır



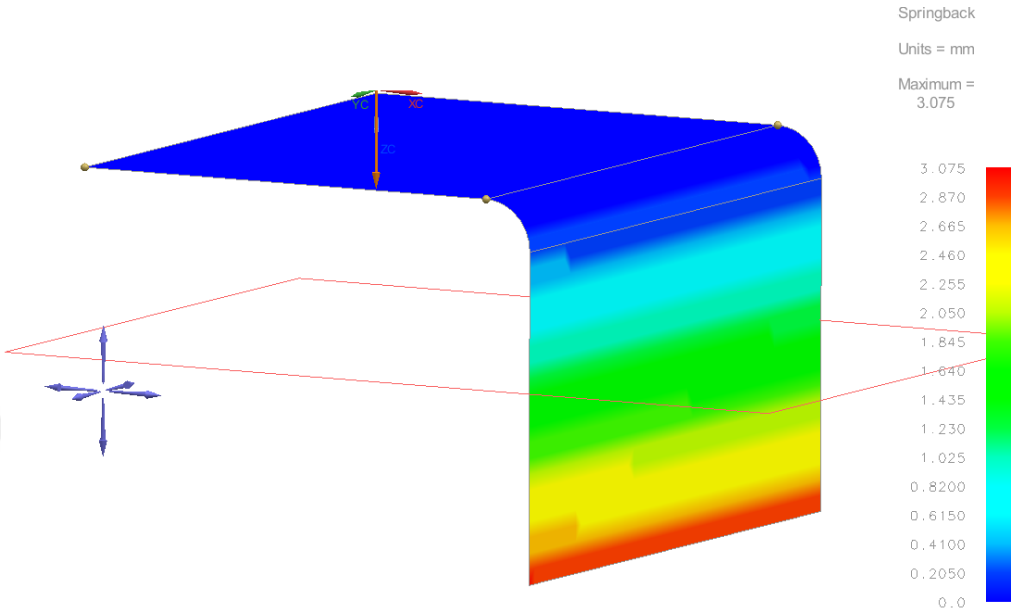
Şekil 4.13 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



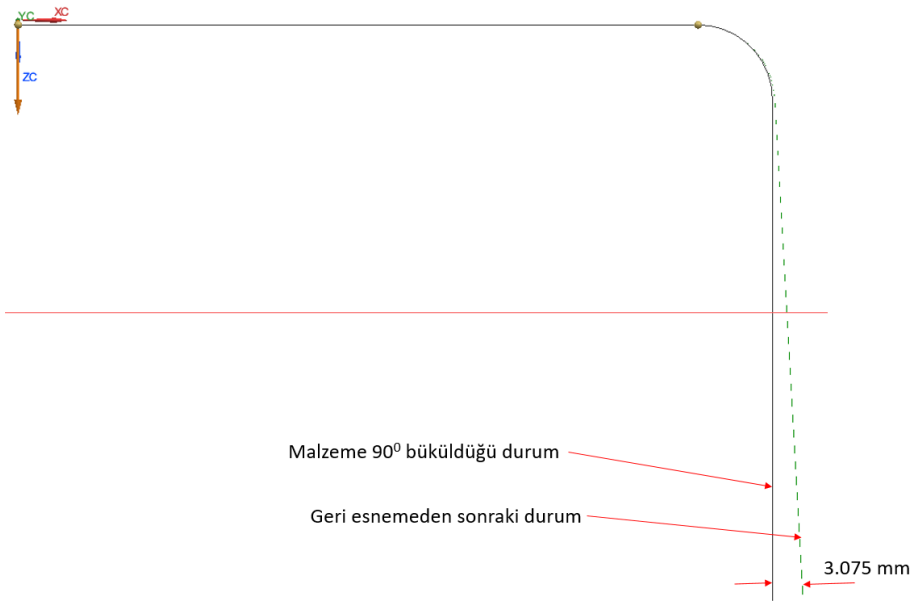
Şekil 4.14 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

4.3.1.4 0.5 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.15'de analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 3.075 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır.

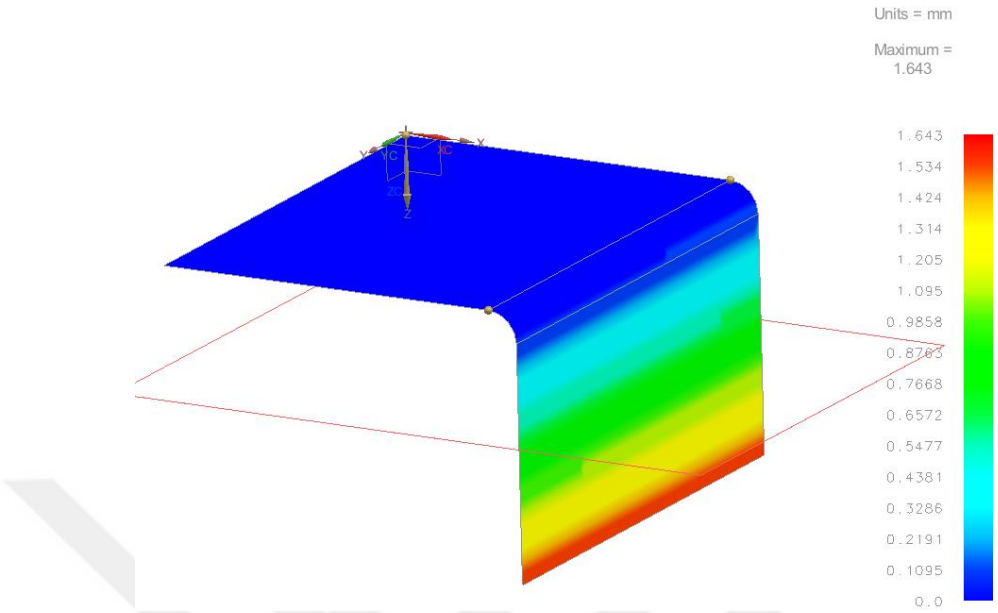


Şekil 4.15 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı

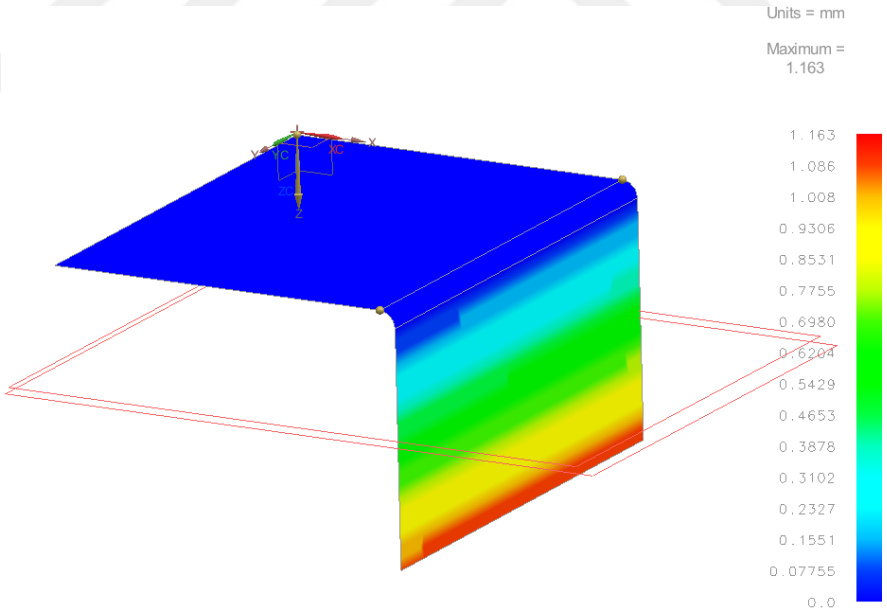


Şekil 4.16 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm köşe radyüs değerlerinde 1.4016 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

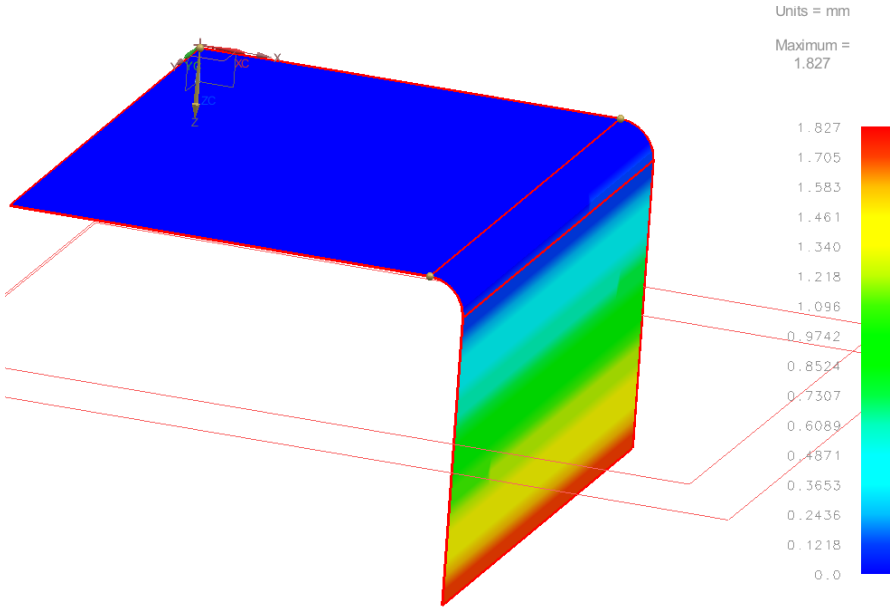
4.3.1.5 0.8 mm, 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm Sac Kalınlıklarında ve 4 mm ve 2 mm Köşe Radyüs Değerlerinde Geri Yaylanma Analiz Sonuçları



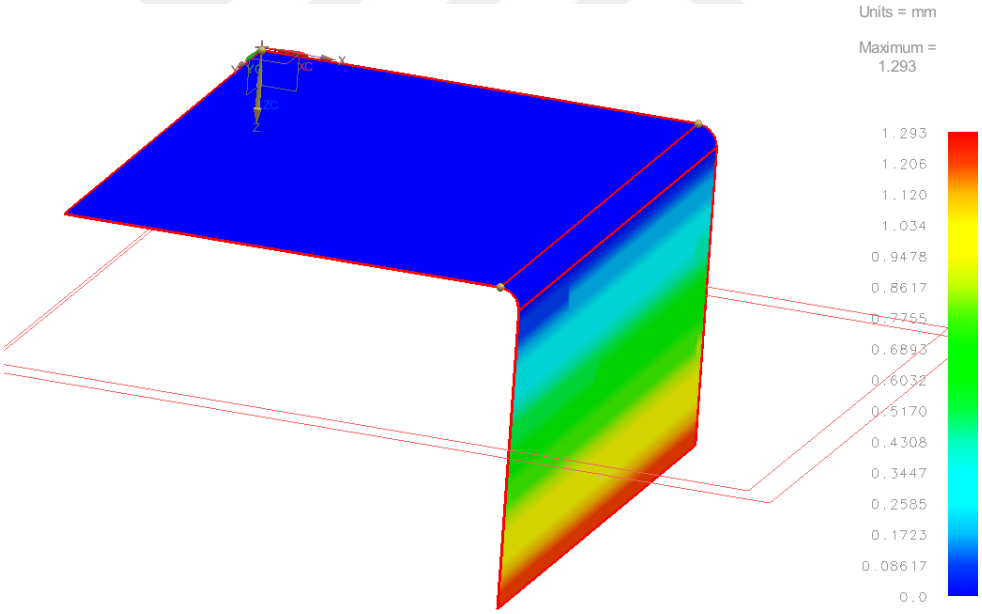
Şekil 4.17 0.8 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



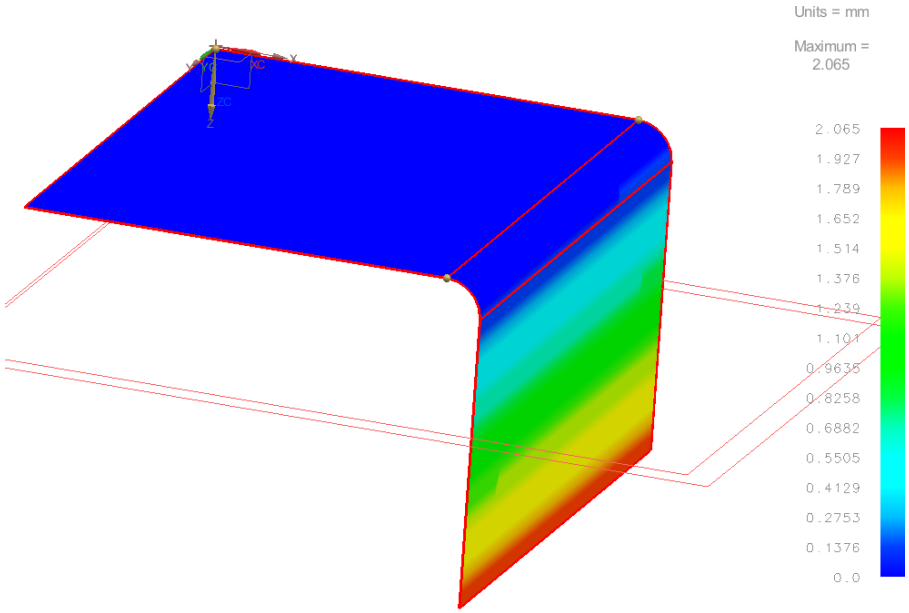
Şekil 4.18 0.8 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



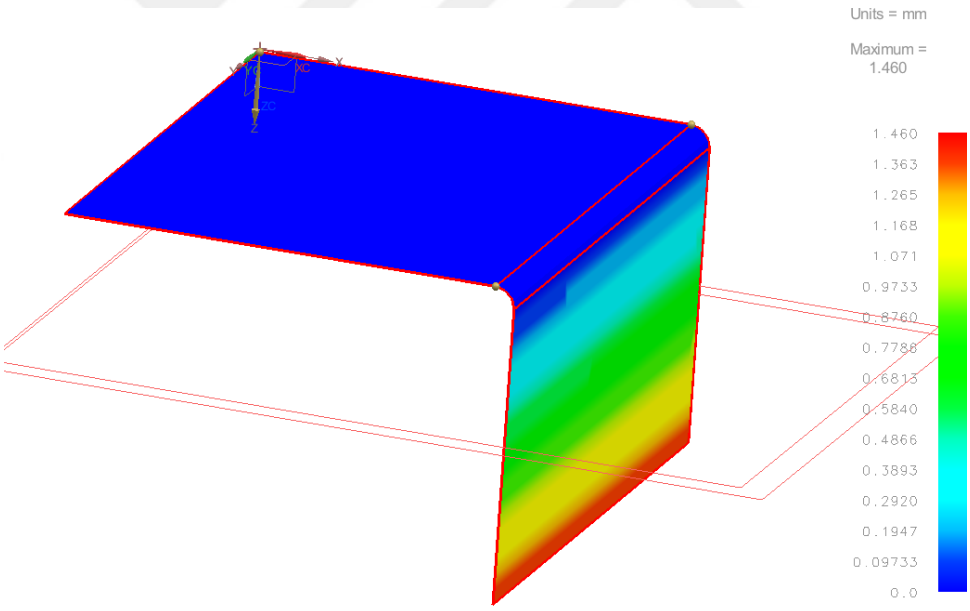
Şekil 4.19 0.7 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



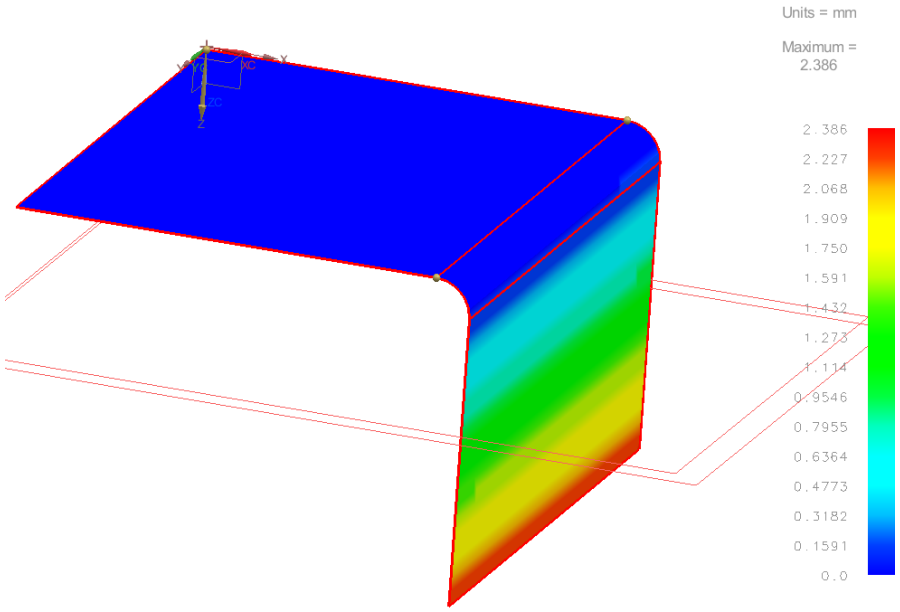
Şekil 4.20 0.7 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



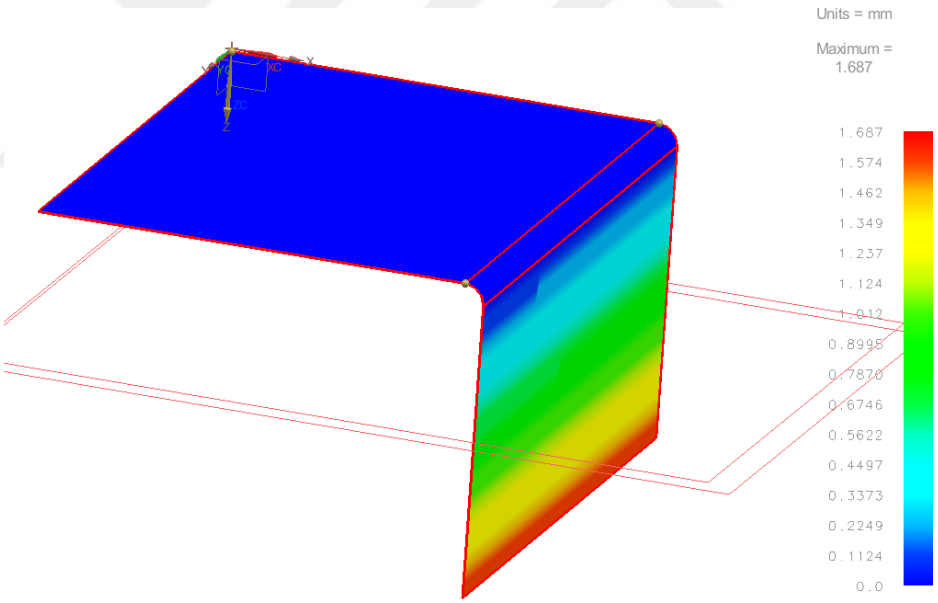
Şekil 4.21 0.6 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.22 0.6 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.23 0.5 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.24 0.5 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde 1.4016 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı

4.3.2 DX52 Düşük Karbon Çelik Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

DX52 Malzeme özellikleri;

Tablo 4.5 DX52 çeliğinin analizde kullanılan mekanik özellikleri

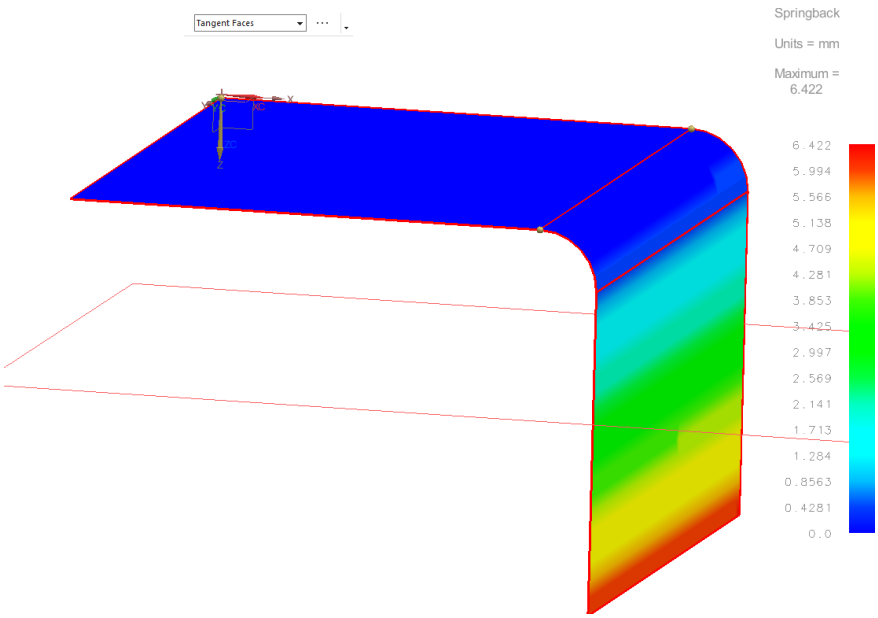
Settings

Material	Mesh	Solver	Report

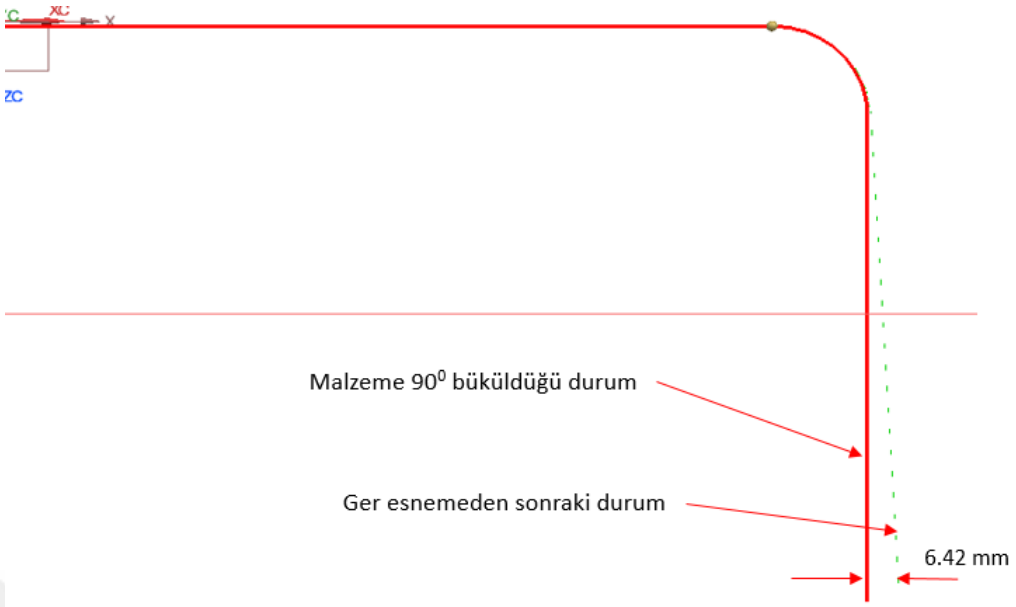
E(Elastic Modulus)	200000.0
Density	7872.000
Poisson's Ratio	0.2900
Yield Stress	226.0000
n(Hardening Exponent)	0.2200
Initial Strain	0.0200
K(Strength Coefficient)	1738.649
r0(Anisotropy Coefficient)	1.0000
r45(Anisotropy Coefficient)	1.0000
r90(Anisotropy Coefficient)	1.0000

4.3.2.1 0.8 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.25'de analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 6.42 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır



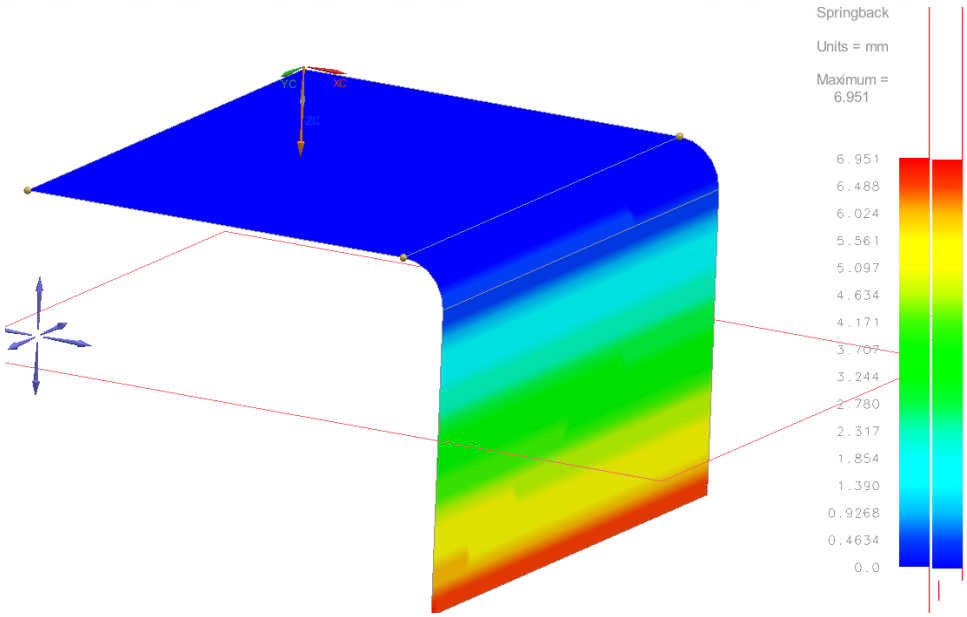
Şekil 4.25 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı



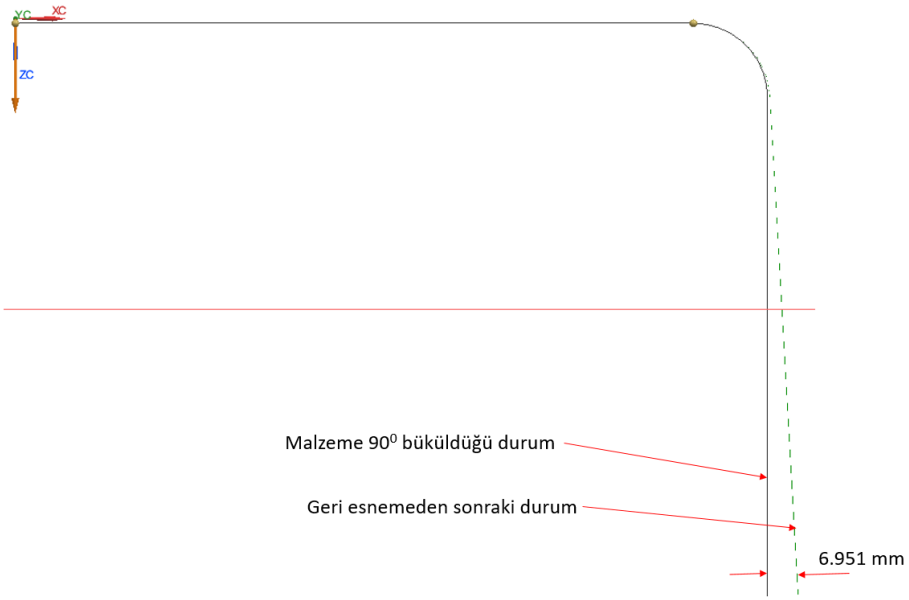
Şekil 4.26 0.8 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

4.3.2.2 0.7 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.27'de analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 6.951 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır.



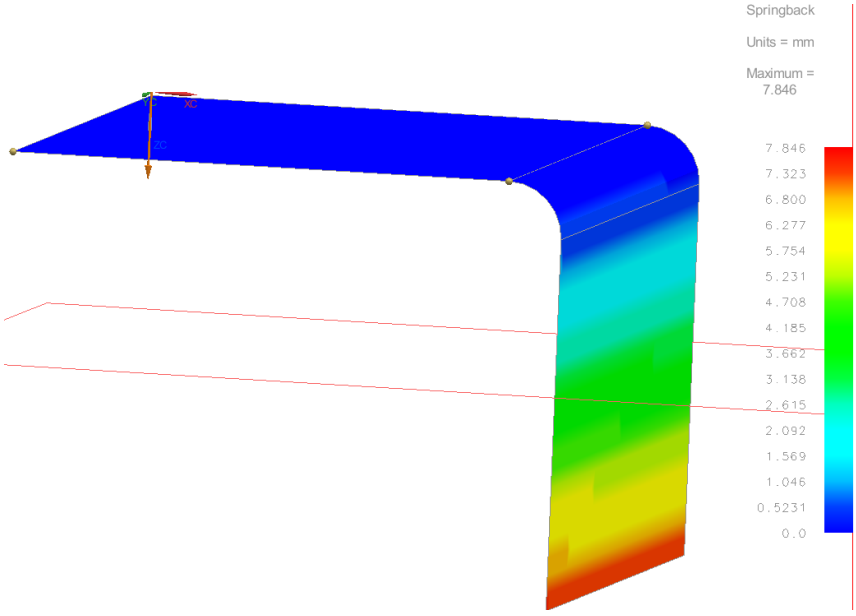
Şekil 4.27 0.7 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.28 0.7 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

4.3.2.3 0.6 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Sac Kalınlığı Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.29'da analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 7.846 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır



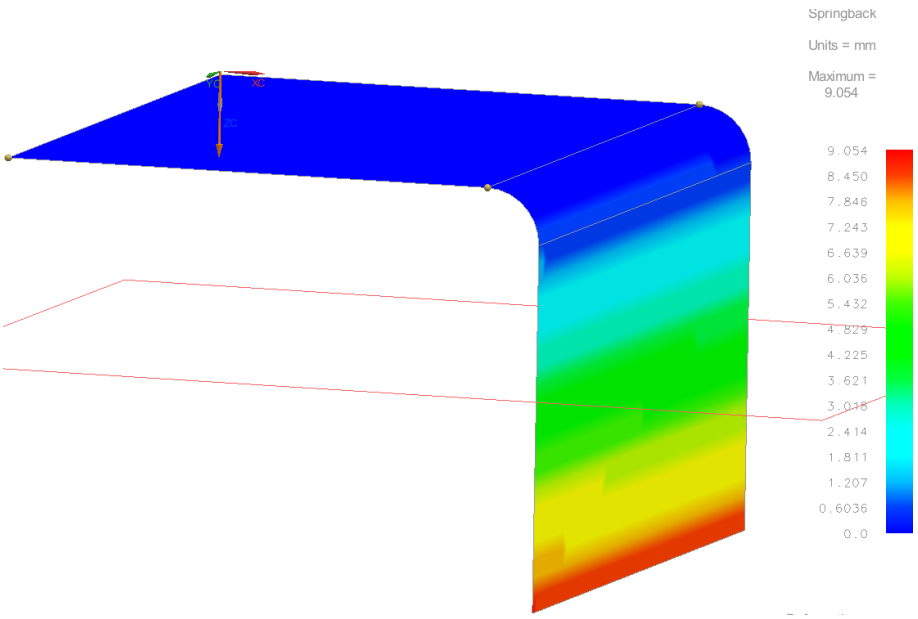
Şekil 4.29 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı



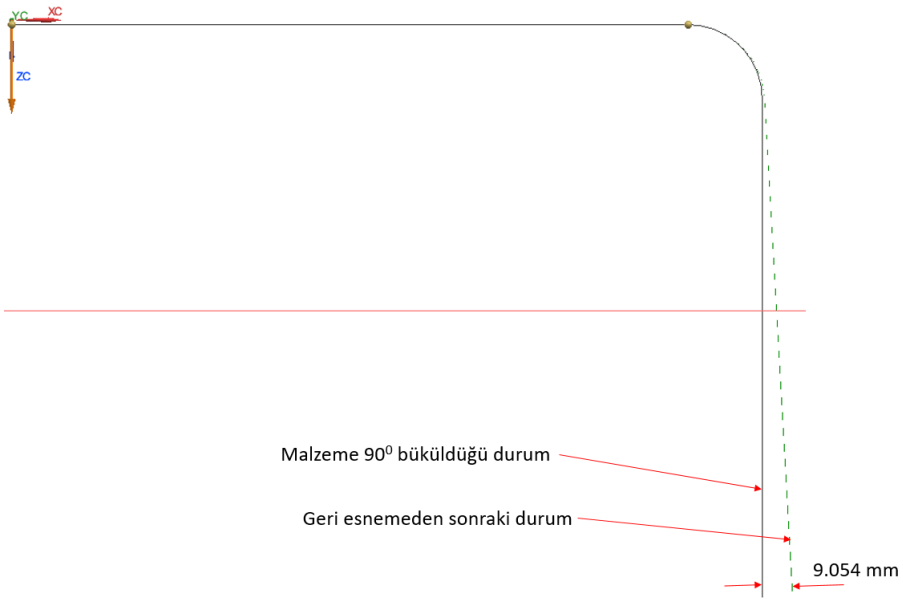
Şekil 4.30 0.6 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

4.3.2.4 0.5 mm Sac Kalınlığı ve 6 mm Köşe Radyüs Geri Yaylanma Analiz Sonuçları

Şekil 4.31'de analiz sonucunda kırmızı ile gösterilen kısımda 9.054 mm kadar geri esneme miktarı ortaya çıkmaktadır.

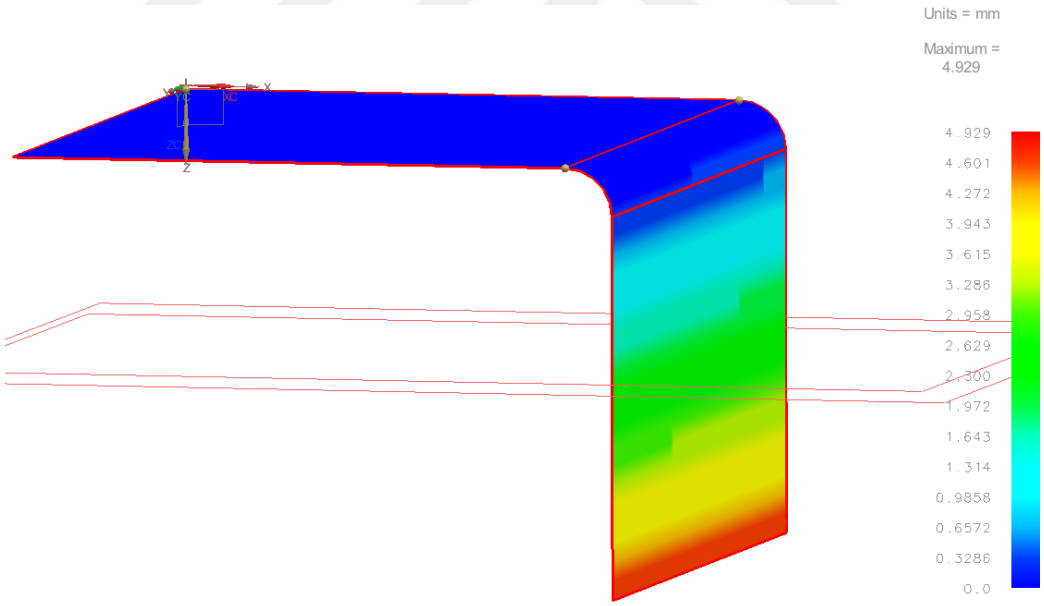


Şekil 4.31 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacda meydana gelen geri esneme miktarı

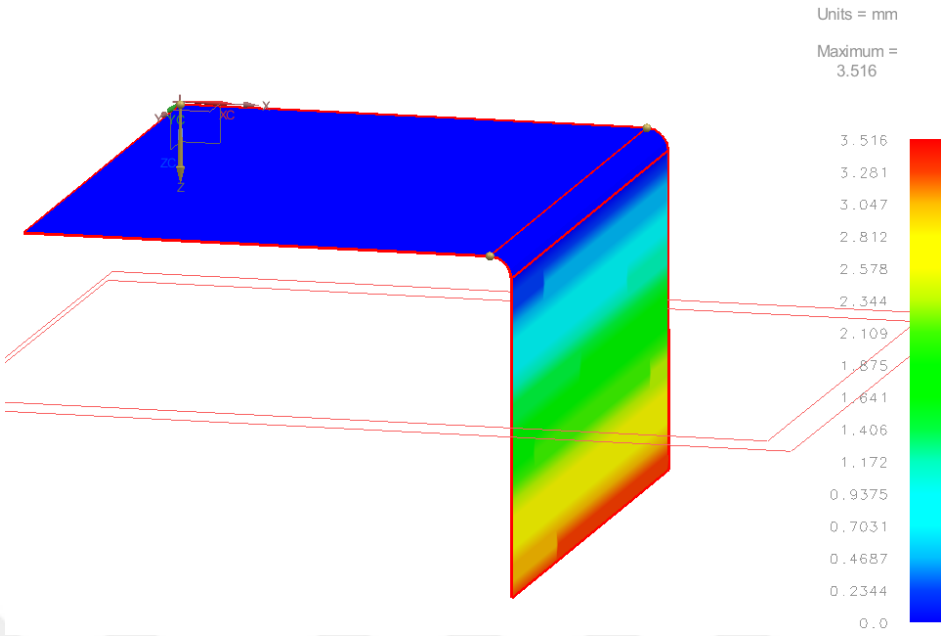


Şekil 4.32 0.5 mm sac kalınlığı ve 6 mm radyüs değerlerinde DX52 sacın yüklü ve yükün kaldırılması sonrası ortaya çıkan esneme durumu

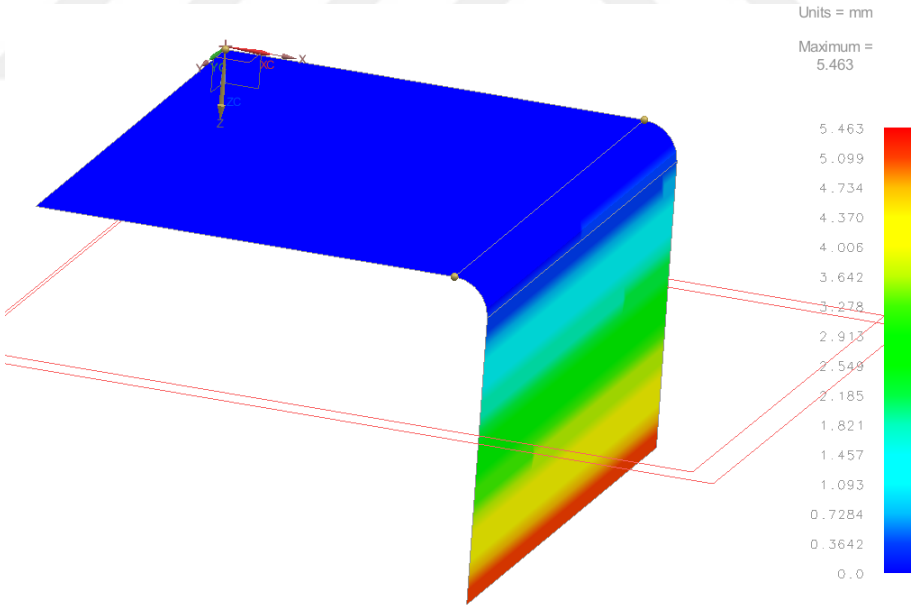
4.3.2.5 0.8 mm, 0.7 mm, 0.6 mm ve 0.5 mm Sac Kalınlıklarında ve 4 mm ve 2 mm Köşe Radyüs Değerlerinde Geri Yaylanma Analiz Sonuçları



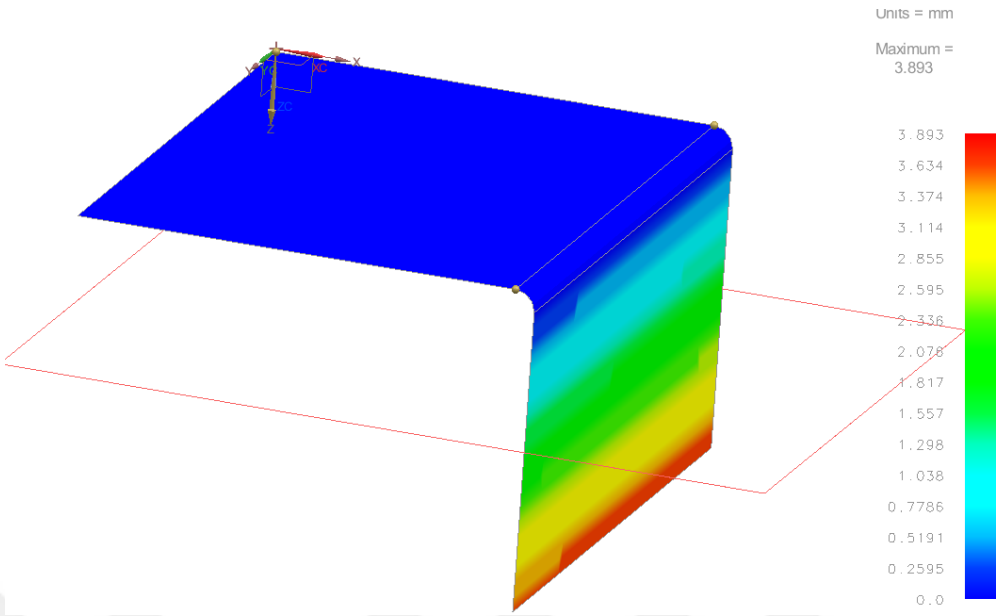
Şekil 4.33 0.8 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



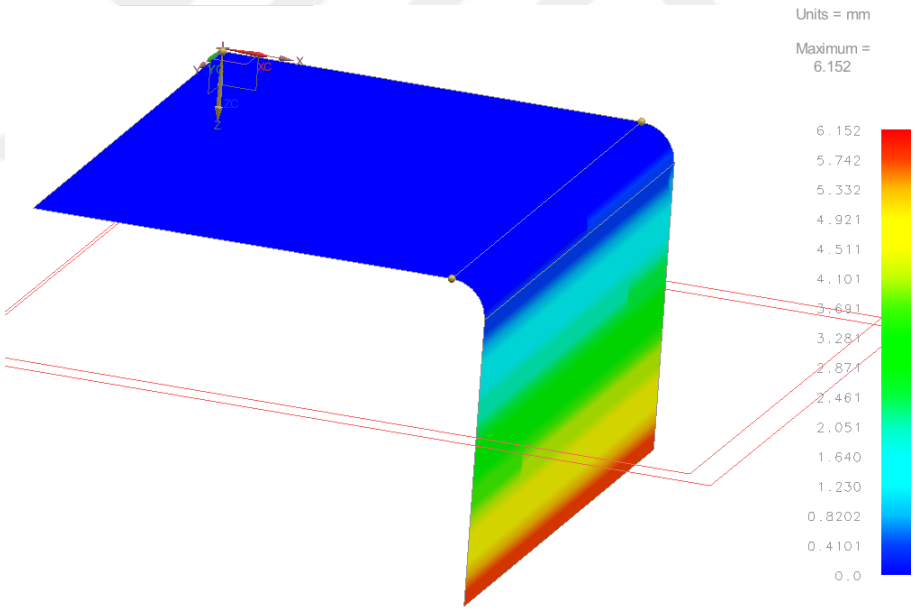
Şekil 4.34 0.8 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



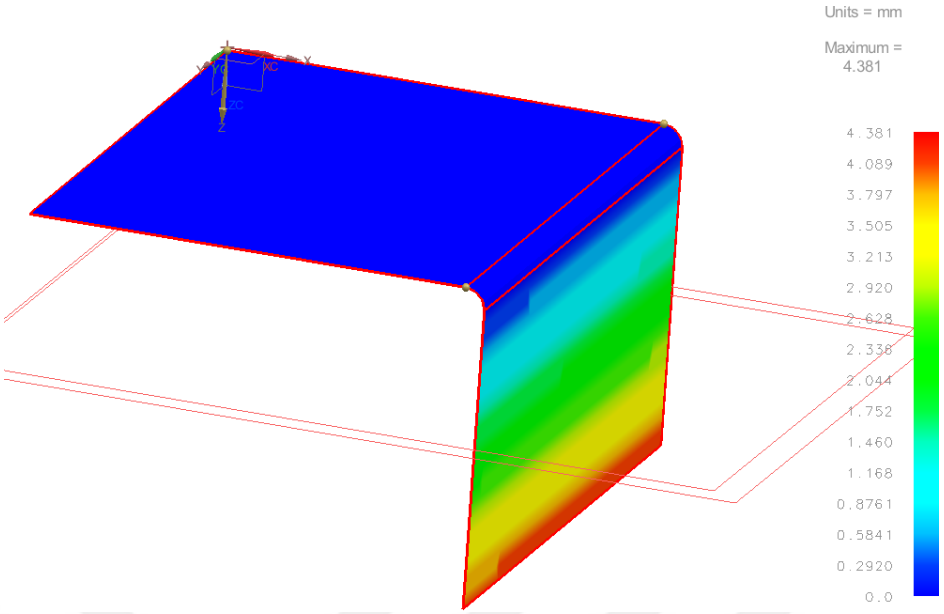
Şekil 4.35 0.7 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



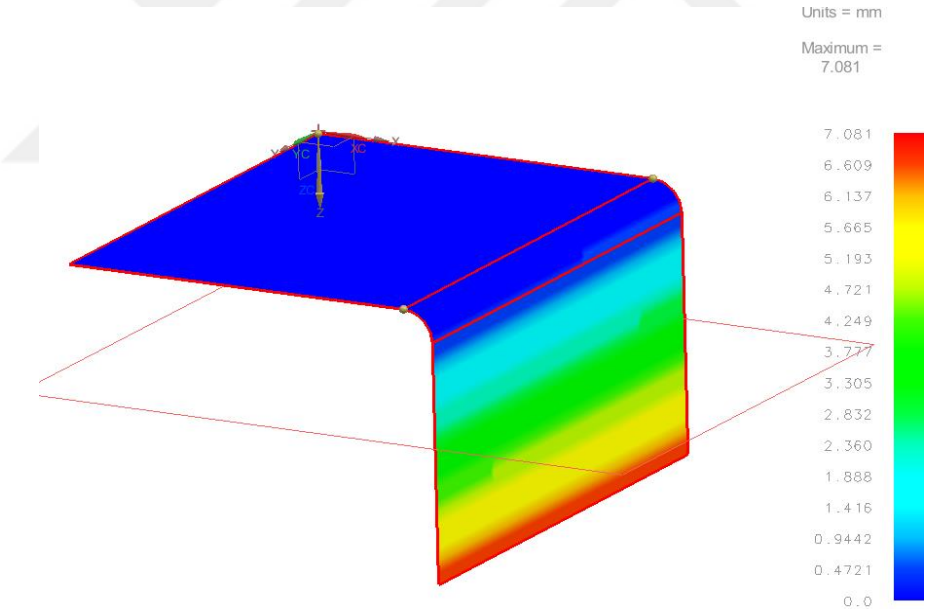
Şekil 4.36 0.7 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



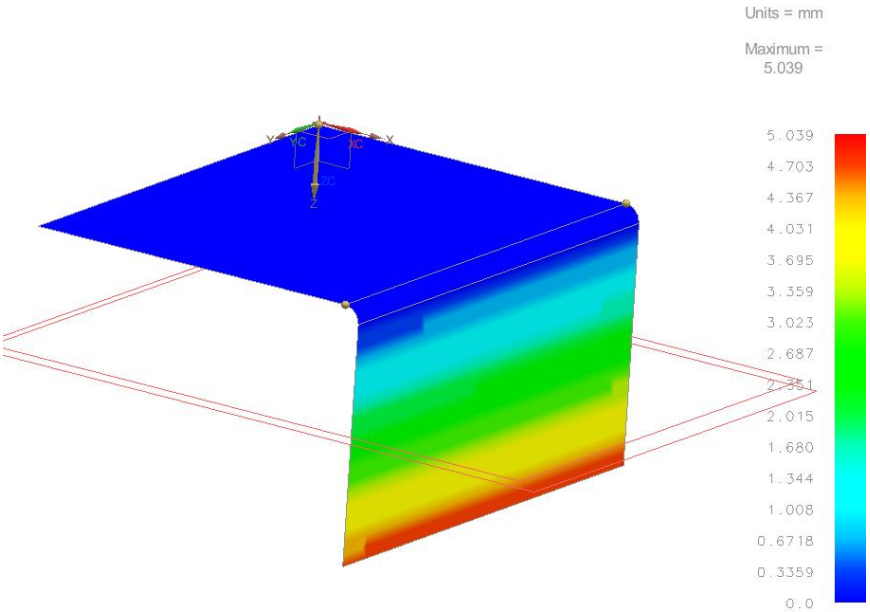
Şekil 4.37 0.6 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.38 0.6 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.39 0.5 mm sac kalınlığı ve 4 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı



Şekil 4.40 0.5 mm sac kalınlığı ve 2 mm radyüs değerlerinde DX52 malzemede meydana gelen geri esneme miktarı

5. TARTIŞMA

Üretim yapan firmalar fiyat ve müşteri beklentilerine göre farklı mekanik özelliklere sahip üzerine boya işlemi uygulanan DX sınıfı karbon çelikler ve parmak izi tutmayan paslanmaz çelikleri şekillendirmek için farklı kalıplar yerine maliyeti düşürmek için ortak bir pres altında aynı kalıbı kullanmaktadır.

Sac kalınlığına ve çelik sınıfına göre aynı kalıp üzerinde yapılan şekillendirmede parça üzerinde ortaya çıkan farklı geri esneme miktarları sabit tasarıma sahip diğer parçalar ile montajını güçleştirmekte ve kalite sorunları ile birlikte yüksek hurda maliyetlerine neden olabilmektedir. Kalite maliyetlerinin önlenmesi için farklı malzemelerin geri esneme davranışları aynı koşullar altında incelenerek her iki malzeme için ortak bir tolerans geliştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada bulaşık makinesi dış kapılarında çoğunlukla kullanılan 0.5, 0.6, 0,7 ve 0.8 mm sac kalınlığına 6 mm, 4 mm ve 2 mm büküm radyüs değerlerine sahip karbon çelik sınıfından DX52 ve paslanmaz çelik sınıfından 1.4016 malzemeleri dış kapı yan bölgesinde pres kalıp büküm sonucunda meydana gelen geri esneme davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Büküm işlemi analizinde yan bölge analizler için aynı koşullar altında 90^0 olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan analizi yapılan DX52 malzemesi DIN EN 10346 standardına bağlı olarak ve ayrıca 1.4016 malzemesi çelik üreticileri tarafından farklı akma ve çekme mukavemetleri aralığında üretilebilmektedir. Farklı mukavemet değerlerinde geri esneme davranışı değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle ortak bir tolerans için kullanımı tercih edilen malzemenin sınıfı ve üretici firmanın hangi mukavemet değerleri arasında üreteceği tasarım öncesinde sorgulanarak gerekli değerlendirmeler yapılmalıdır. Tasarımın gerektirdiği tolerans aralıklarının dışında olabilecek mukavemet değerleri için gerektiğinde çelik üreticileri hemfikir kalınarak mukavemet değerlerine limit koyarak üretimin yaptırılması değerlendirilmelidir. Büküm radyüs değerlerinin değişmesi geri esneme davranışını etkileyen en önemli kriterlerden birisidir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kapsamda yapılan analiz sonuçları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Tablo 6.1 Her iki çelik sınıfı ve sac kalınlıkları için geri esneme analiz sonuçları

	Malzeme Tipi			Sac kalınlığı [mm]
	Radyüs [mm]	**1.4016**	**DX52**	
Geri esneme Miktarı [mm]	6	2.153	6.422	0.8
	4	1.643	4.929	
	2	1.163	3.516	
	6	2.346	6.951	0.7
	4	1.827	5.463	
	2	1.293	3.893	
	6	2.656	7.846	0.6
	4	2.065	6.152	
	2	1.46	4.381	
	6	3.075	9.054	0.5
	4	2.386	7.081	
	2	1.687	5.039	

Bir paslanmaz çelik sınıfı olan 1.4016 malzemesi için sonuçlar incelendiğinde sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Karbon çelik sınıfında olan DX52 malzeme için ise aynı durum geçerli olup sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azalttığı tespit edilmiştir.

DX52 malzemesi mekanik özellikleri açısından paslanmaz çelikten daha düşük mukavemetli bir malzeme olduğundan dolayı aynı analiz şartları altında geri esneme miktarı paslanmaz çeliğe göre daha yüksek çıkmaktadır.

Her iki malzeme tipi için geri esneme miktarının azaltılmasında önemli kriterlerden birisi büküm radyüs değeridir. Analiz sonuçlarında büküm radyüs değerlerinin 6 mm den 2 mm ye azalması ile birlikte geri esneme miktarı da önemli oranda azalmaktadır.

Aynı kalıpta farklı tip malzeme ile aynı tasarıma sahip parçalar üretilmek istenildiği durumda parçaların montaj etkileşimlerini de göz önüne aldığımızda, maksimum esneme payı olan DX52 malzemesi dikkate alınarak ortaya çıkan bu esneme payı limitleri arasında montaj edilebilirlik değerlendirilmelidir. Sac malzemenin seçimi montaj kısıtı oluşturan kalınlıkta ve mukavemet değerleri dikkate alınarak yapılmalıdır.

Tasarım açısından farklı sac kalınlıkları ve büküm radyüs değerlerinde 90^0 büküm yapılarak analiz sonuçlarının tümü değerlendirildiğinde 1.4016 ve DX52 için seçilen malzeme mekanik özellikleri dolayısı ile tam olarak ortak bir geri esneme toleransına gelmediği görülmektedir.

Büküm yapan zımbanın kalıp üzerinde yüklü durumda farklı bekleme süreleri denenerek ve farklı mukavemet değerleri referans alınarak en az geri esnemeyi veren yüklü bekleme süresi araştırılabilir. Büküm sonrasında ortak bir tolerans aralığında parçanın şekillendirilebilmesi için ve boyutsal doğruluğu sağlamak için geri yaylanma telafisi ve “Post –Strech” yöntemlerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Arunkumar, M., Munusami, V., Karthik, R., Ashok Kumar, V., 2016, Design And Analysis of a Spring Back Effect In Sheet Metal Forming, International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology, Volume 4, Issue 2.

[2] Dametew, AW., Gebresenbet, T., (2017), Study the Effects of Spring Back on Sheet Metal Bending using Mathematical Methods. J Material Sci Eng 6: 382. doi: 10.4172/2169-0022.1000382.

[3] Springback in sheet metal forming (baileymetalprocessing.com), Accessed March 2022

[4] 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.

[5] Chou, N., Hung, C. (1993), Finite element analysis and optimization on springback reduction, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.39, pp.517-536.

[6] Uslu, E., Tosun, N., (2019), Expeimental Investigation of Springback of DC Series Steel Sheet in V-Bending Process, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Cilt 2, Sayı 2.

[7] http://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html , Accessed February 2022

[8] Akinlabi, S.A., Fatoba,O.S., Mashinini, P.M, and Akinlabi, E.T., (2018), Effect of Bottoming on Material Property during Sheet Forming Process through Finite Element Method, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.

[9] Altan, T., Tekkaya, E., (2012), Sheet Metal Forming Processes and Applications, ASM International.

[10] Xia Z.C., Cao J. (2014) Springback. In: The International Academy for Production Engineering, Laperrière L., Reinhart G. (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.

[11] correcting springback Archives - AHSS Guidelines (ahssinsights.org), Accessed April 2022

[12] High_Strength_Steel_Stamping_Design_Manual https://www.a-sp.org/wp, Accessed February 2022

[13] Meinders, T., Geijselaers, H.J.M, Huétink, J., (1998), Implementation of Plastic Thickness Strain in an Equivalent Drawbead Model based on a Penalty Constraint Method, January

[14] LI, W., Sun, Z-G., HE. K., Zuo, Q-Y., Liu, Q-Y., DU, R-X., (2017), Study On Tool Path Design for a Novel Incremental Sheet Metal Bending Process: Selected Papers from CSMA2016.

[15] Ling, Y.E., Lee, H.P., Cheok, B.T., (2005) "Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal" Journal of Materials Processing Technology 168 296–302.

[16] **Çetin, H.,** (2005), Alüminyum Alaşımı Hafif Metal Levhaların Prizmatik Derin Çekmede Biçimlendirilebilirdik Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

4801200139-Serkan EREN

ORİJİNALLİK RAPORU

%10	%8	%0	%6
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%5
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%1
3	acikerisim.btu.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
4	d-nb.info İnternet Kaynağı	<%1
5	imim.pl İnternet Kaynağı	<%1
6	aaltodoc.aalto.fi İnternet Kaynağı	<%1
7	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<%1
8	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	<%1
9	acikerisim.isikun.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☐ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Öğrenci Adı SOYADI
(İmza)

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☐ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Öğrenci Adı SOYADI
(İmza)