

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ SAC METAL MALZEMELERİN  
FARKLI DEFORMASYON PARAMETRELERİ ALTINDAKİ GERİ  
ESNEME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**İREM YALÇIN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. NURİ ŞEN**

**DÜZCE, 2023**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ SAC METAL MALZEMELERİN FARKLI**  
**DEFORMASYON PARAMETRELERİ ALTINDAKİ GERİ ESNEME**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

İrem Yalçın tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Nuri ŞEN

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Nuri ŞEN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Oktay ELKOCA

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ömer SEÇGİN

Sakarya Uyg. Bilimler Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 28/07/2023

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar 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 beyan ederim.

28 Temmuz 2023

İrem Yalçın

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Nuri ŞEN'e ve Arş. Gör. Tolgahan CİVEK'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma ve eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili anne ve babama sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması için, Düzce Üniversitesi Araştırma Fonu [Proje No: 2017.06.05.653] tarafından sağlanan destek minnetle kabul edilmiştir.

28 Temmuz 2023

İrem Yalçın



# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|  |      |
|--|------|
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | vii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....   | viii |
| KISALTMALAR.....   | ix   |
| ÖZET.....  | x    |
| ABSTRACT.....  | xi   |
| 1. GİRİŞ.....  | 1    |
| 2.1. LİTERATÜR ÖZETİ.....  | 3    |
| 2.2. TEZİN AMAÇLARI.....   | 5    |
| 2. YÜKSEK MUKAVEMETLİ SAC MALZEMELER.....  | 6    |
| 2.1. MARTENZİTİK ÇELİKLER.....   | 7    |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....   | 8    |
| 3.1. MATERYAL.....   | 8    |
| 3.2. BÜKME DENEYLERİ.....  | 9    |
| 3.3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....  | 12   |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....   | 14   |
| 4.1. YAĞLAMA KOŞULLARININ GERİ ESNEME VE YAN DUVAR YARIÇAPI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....     | 14   |
| 4.2. KUVVET TUTMA SÜRESİNİN GERİ ESNEME VE YAN DUVAR YARIÇAPI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....   | 18   |
| 4.3. BASKI PLAKASI KUVVETİNİN GERİ ESNEME VE YAN DUVAR YARIÇAPI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ..... | 20   |
| 4.4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE GERİLME DAĞILIMI ANALİZİ.....                         | 22   |
| 5. SONUÇLAR.....   | 25   |
| 6. KAYNAKLAR.....  | 27   |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 30   |

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa No

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1. Geri Esnemenin Şematik Gösterimi [7].....   | 2  |
| Şekil 2.1. Sac Malzemelerin Çekme Mukavemeti (MPa) ve Uzama (&)<br>Değerlerine Göre Sınıflandırılması [2].....   | 7  |
| Şekil 2.1.1. Martenzitik Çelik Mikroyapısı [18].....   | 7  |
| Şekil 3.2.1. Bükme İşlemi İçin Kalıp Tasarımının Şematik Görünüşü .....  | 10 |
| Şekil 3.2.2. Bükme İşlemi İçin Deneysel Kalıp Tasarımının Görünümü .....   | 10 |
| Şekil3.2.3. Sacların Flanş Bölgelerinde Oluşan Farklı Yağlama Koşulları; a) Grafit,<br>b) Teflon film, c) Grafit + Teflon film .....                                 | 11 |
| Şekil 3.2.4. Geri Esneme ve Yan Duvar Yarıçapı İçin Ölçüm Noktaları. ....  | 11 |
| Şekil 3.3.1. Bükme İşlemi Sırasında Oluşan Gerilme Değerlendirmeleri İçin<br>Kullanılan Simülasyon Modeli .....  | 13 |
| Şekil 4.1.1. Sürtünme Koşullarının a) duvar geri esneme $\theta_1$ , b) flanş geri<br>esneme $\theta_2$ , c) yan duvar yarıçapı $\rho$ .....                         | 16 |
| Şekil 4.1.2. Farklı Sürtünme Koşulları İçin U Bükümlü Sac Profilleri a)<br>MART1200, b) MART1400.....  | 16 |
| Şekil 4.1.3. Bükme İşlemi Sırasında Farklı Sürtünme Koşullarında Oluşan Kuvvet<br>Değerleri a) MART1200 b) MART1400 Çelikleri. ....                                  | 17 |
| Şekil 4.2.1. MART1200 ve MART1400 Çelikleri İçin Sürtünme Koşullarının<br>a,b) duvar geri esnemesi c,d) flanş geri esnemesi e,f) yan duvar yarıçapı .....            | 19 |
| Şekil 4.3.1. MART1400 Çelikleri İçin Baskı Plakası Kuvvetinin Etkisi<br>a) duvar geri esnemesi, b)flanş geri esnemesi, c) yan duvar yarıçapı .....                   | 21 |
| Şekil 4.3.2. U-Bükülmüş MART1400 Çelikleri İçin Farklı Baskı Plakası<br>Kuvvetlerinde Sac Metal Profilleri.....  | 21 |
| Şekil 4.4.1. Bükme İşlemi Sırasında Oluşan Gerilme Dağılımları a) bükme,<br>b) düzleştirme, c) dip aşamaları d) c)alt bölgesinin büyütülmüş görüntüsü... ..          | 23 |
| Şekil 4.4.2. Çeşitli Sürtünme Katsayıları İçin Bükme Saclarının Alt Tarafındaki<br>Kalınlık Gerilme Dağılımı <b>a)</b> bükme aşaması <b>b)</b> dip aşaması. ....     | 24 |
| Şekil 4.4.2. Çeşitli Baskı Plakası Kuvvetleri İçin Bükme Saclarının Alt Tarafındaki<br>Kalınlık Gerilme Dağılımı <b>a)</b> bükme aşaması <b>b)</b> dip aşaması. .... | 24 |

# ÇİZELGE LİSTESİ

## Sayfa No

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 2.1. Yüksek Mukavemetli Sac Malzemelerin Sıflandırılması [2]. .....         | 6  |
| Çizelge 3.1.1. MART1200 ve MART1400 Çeliklerinin Kimyasal Bileşimi. ....            | 8  |
| Çizelge 3.1.2. MART1200 ve MART1400 Çeliklerinin Mekanik Özellikleri. ....          | 8  |
| Çizelge 3.3.1. MART1400 Çeliği İçin Voce Sertleştirme Modelinin Parametreleri. .... | 13 |



## KISALTMALAR

|      |  |
|------|--|
| AHSS | Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Saclar  |
| CP   | Kompleks Fazlı Saclar                    |
| DP   | Çift Fazlı Saclar                        |
| HSLA | Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar |
| HSS  | Yüksek Mukavemetli Saclar                |
| MART | Martenzitik Saclar                       |
| TRIP | Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar  |
| UHSS | Ultra Yüksek Mukavemetli Saclar          |



## ÖZET

### YÜKSEK MUKAVEMETLİ SAC METAL MALZEMELERİN FARKLI DEFORMASYON PARAMETRELERİ ALTINDAKİ GERİ ESNEME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İrem YALÇIN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nuri ŞEN

Temmuz 2023, 29 Sayfa

Sac malzemelerin şekillendirilmesinde sıkça kullanılan yöntemlerden biri bükme işlemidir. Sacın büküm işlemi tamamlandıktan sonra geri esnemesi imalat verimini önemli ölçüde düşürmektedir. Geri esneme davranışını etkileyen faktörler, şekillendirilmiş metal levhalar üzerindeki geri esnemeyi kontrol etmek ve sınırlamak için iyi araştırılmalıdır. Bu çalışmada MART1200 ve MART1400 Ultra Yüksek Mukavemetli Çelikler üzerinde şapka şeklinde bükme deneyleri yapılmıştır. Farklı yağlama koşullarının geri esneme üzerindeki etkisini araştırmak için yapılan deneylerde üç farklı yağlayıcı türü (Teflon film, Grafit ve Teflon film + Grafit) kullanılmıştır. Kuvvet tutma süresinin geri esnemeye etkisini gözlemlemek için bükme darbesinin sonunda 6.5 tonluk sabit bir dip kuvveti uygulanmış ve numuneler üzerinde kuvvet 0, 10s ve 60s tutulmuştur. Ek olarak MART1400 çeliğinin baskı plakası kuvvetinin geri esneme üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Baskı plakası kuvveti ve kalıp ile sac arayüzleri arasındaki sürtünmenin azalmasının, yan duvarlar ve flanş bölgelerindeki geri esnemeyi önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Ek olarak yan duvar kıvrılmasını da azalttığı görülmüştür. Ancak kuvvet tutma süresi geri esneme için anlamlı bir fark yaratmamıştır. Bu çalışmada sac tabanının daha düşük sürtünme koşullarında ve baskı plakası kuvvetinde daha büyük bir deformasyona uğradığı ve geri esnemenin azalmasına neden olduğu sonlu elemanlar analizi ile ortaya konulmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Geri Esneme, Mart Çelikleri, Şapka Şeklinde Bükme, FEA, Gerilme Analizi

# ABSTRACT

## INVESTIGATION OF THE SPRING-BACK BEHAVIOUR OF HIGH STRENGTH STEELS UNDER VARIOUS FORMING PARAMETERS

İrem YALÇIN

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nuri ŞEN

July 2023, 29 Pages

Bending operations are one of the most commonly used methods to form sheet metals to a desired shape. However, spring-back of the sheet metal after the completion of the bending process significantly impairs the productivity of the workshop. Thus, assessing the critical factors that influence the spring-back behaviour needs to be well investigated to control and limit the spring-back on the formed sheet metals. In this study, hat-shaped bending experiments have been conducted on MART1200 and MART1400 Ultra-High-Strength Steels (UHSS). To investigate the influence of different lubrication conditions, on the spring-back, three different lubricant types (Graphite, Teflon film and Teflon film + Graphite) have been used in the experiments. A constant 6.5 tons of bottoming force has been applied at the end of the bending stroke and the force has been held on the samples for 0, 10s and 60s to observe the effect of force holding time on the spring-back. In addition, the effect of blankholder force on the spring-back has also been investigated for MART1400 steel. It has been found that the decrease of blankholder force and the friction between the die and sheet interfaces has considerably reduced the spring-back in the sidewalls and flange regions and also lowered the side wall curl. However, force holding time has not resulted in a meaningful difference for the spring-back. It has been revealed through finite element analysis that the sheet bottom has suffered a larger deformation in lower friction conditions and blankholder forces and caused in the reduction of spring-back.

**Keywords:** Spring-back, Mart steels, Hat-shaped bending, FEA, Stress analysis

# 1. GİRİŞ

Yüksek yağ tüketiminin ve yakıt emisyonlarının çevre üzerindeki sürekli artan etkilerinden dolayı, çoğu orijinal ekipman üreticisi (OEM) parçalarında geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikleri (AHSS) kullanmaya başlamıştır [1]-[4].

Sac malzemeler; otomotiv sektörü, havacılık sanayisi, endüstriyel araç gereçler, makine imalatı, inşaat sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Sac malzemeler; bükme, derin çekme, delme gibi birçok yöntemle şekillendirilebilir. Bu yöntemlerin genel amacı, malzemenin istenen forma sahip daha rijit nesnelere ile şekillendirilmesidir. Bükme işlemi, birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır ve V bükme, U bükme, kenar bükme ve serbest bükme gibi çeşitleri vardır. Bu işlemde bazen malzeme özelliklerinden, bazen de imalattan kaynaklı sorunlarla karşılaşılabilir. Bu sorunlar sonrasında da parça kullanılamamakta ya da maddi kayıplar ortaya çıkabilmektedir [2].

AHSS'leri şekillendirmenin ana zorluklarından biri, yüksek mukavemetlerinden dolayı önemli ölçüde geri esneme davranışı göstermeleri olmuştur [5]. Bu nedenle, AHSS'leri şekillendirirken görülen yüksek geri esnemeyi telafi etmek için ekstra önlemler almak gerekir.

Gerekli baskı plakası kuvveti ve sürtünme koşulları gibi doğru şekillendirme koşullarının oluşturulması şekillendirilmiş saclardaki geri esnemeyi önemli ölçüde değiştirebilir.

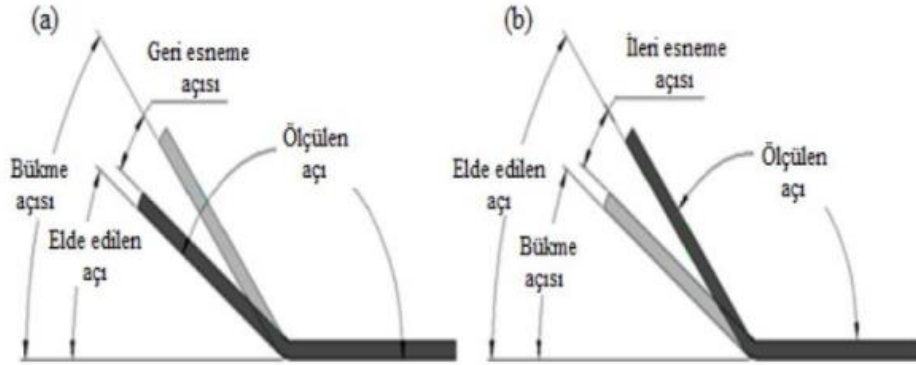
Sac metal üzerinde şekillendirme kuvvetinin belirli bir süre tutulması, gerilim gevşeme etkisinden dolayı geri esnemenin azalmasına da neden olabilir.

Mart çelikleri AHSS'ler arasında en yüksek mukavemete sahip çeliklerdir. Bu nedenle kalıp tasarımı sürecinde, yüksek üretim maliyetlerine neden olan geri esneme sorunuyla sıkça karşılaşılır. Kalıp tasarımı sırasında karşılaşılan ekstra maliyetler yağlama tipi, kuvvet tutma süresi ve baskı plakası kuvveti gibi şekillendirme parametreleri kontrol edilerek en aza indirilebilir.

Bu nedenle bu tür şekillendirme parametrelerinin MART çelikleri üzerindeki geri esneme etkileri için, bükme işlemlerinin optimum koşullarda gerçekleştirilmesi ve en düşük geri esnemeyi sağlamak için kapsamlı bir şekilde araştırma yapılması gerekir.

Bükme işlemlerinde, istenilen kusursuz bükme profilini elde etmek için gerilim-gerinim dağılımları önemlidir. Malzemelerin elastikiyet sınırı aşılmakta, ancak maksimum çekme gerilmeleri aşılamamaktadır. Bu yüzden de malzeme, üzerine uygulanan yük ortadan kalktığı anda eski halini almaya çalışarak bir miktar esneyerek geriye doğru açılır. Sac malzemenin büküldüğü açı değeri ile şekillendirmeden sonraki gerçek açı değeri arasındaki fark olarak tanımlanan geri esneme, (Şekil 1.1) sac levhanın kalınlık yönündeki eşit olmayan gerilim dağılımından kaynaklanır. Sac levhadaki eşit olmayan gerilimler, gerilim dağılımına bağlı olarak malzemenin geri ya da ileri esnemesine neden olan eğilme momentlerini oluşturur [6]. Geri esneme malzemenin cinsi, kalınlığı, bükme açısı, deformasyon hızı, sıcaklık miktarı gibi birçok parametreye bağlıdır.

Literatürde sac metal üzerindeki eşit olmayan gerilim dağılımını ve ardından geri esnemeyi azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Geri Esnemenin Şematik Gösterimi [7]

U bükme işleminde gözlemlenen geri esneme davranışında proses parametrelerinin büyük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bükme işlemi MART çeliklerinin şekillendirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. MART çelikleri yüksek mukavemet seviyeleri nedeniyle fazlaca geri esneme sorunu yaşar ve bu da imalatta önemli dezavantajlara sebep olur. Bu nedenle MART çeliklerinin bükme işlemi için

doğru proses parametrelerinin oluşturulması, şekillendirme maliyetlerinin en aza indirilmesinde önemli bir rol oynar.

Bu çalışmada MART1200 ve MART1400 çeliklerinin geri esneme davranışına üç çeşit sürtünme tipinin (Teflon film, Grafit, Teflon film + Grafit) ve kuvvet tutma süresinin (0,10 ve 60s) etkileri incelenmiştir.

## 1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Lawanwong ve diğerleri [6], büküm işleminin son aşamasında, negatif bükme momentleri oluşturmak için, alt plakada ters zımba kullandıkları yeni bir U-bükme yöntemi önermişlerdir. Yöntemlerinde 980Y HSS çeliğin geri esnemesini ortadan kaldırmayı başarmışlardır. Ancak önerilen yöntemin sacın alt kısmında bazı geometrik kusurlara neden olabileceğini de belirtmişlerdir. Lawanwong ve diğerleri [8], daha sonra 980Y HSS çeliğinde şapka şeklindeki üretimlerde yanak kıvrılmasını, flanşı ve duvar geri esnemesini ortadan kaldırmak için çift etkili bükme (DAB) yöntemini önermişlerdir. Yöntemlerinde, ters zımbanın hareketine ek olarak, U bükümlü sacın flanş bölgelerini hafifçe bükme için bir dış zımba kullanmışlardır. Önerilen yöntemin flanş bükme için yalnızca alt itme kuvvetini ve dış zımba vuruşunu kontrol ederek U-bükme operasyonları için geri esnemeyi önemli ölçüde azaltabileceğini sonucuna varmışlardır. Majidi ve diğerleri [9], DP780 çelikleri için gerilim gevşemesinin, U-bükme işlemindeki geri esnemeyi azaltması üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yaptıkları çalışmayı, U-bükme işlemini önceden tanımlanmış şekillendirme mesafelerinde 30 sn tutarak tanımlamışlardır. Bununla birlikte DP780 çelikleri için gerilme gevşeme oranının, geri esnemeyi büyük ölçüde değiştirme konusunda önemsiz olduğu sonucuna varmışlardır. Liu ve diğerleri [10], geri esnemeyi ortadan kaldırmak için U-bükme deformasyonu sırasında değişken bir baskı plakası kuvveti uygulamayı önermişlerdir. Yöntemlerinde, başlangıçta düşük bir baskı plakası kuvveti uygulamışlar ve ardından levha kalınlığı boyunca çekme gerilmeleri oluşturmak için önceden tanımlanmış bir deformasyondan sonra baskı plakası kuvvetini arttırmışlardır. Sonuç olarak kullandıkları yöntemle geri esnemeyi azaltmayı başarmışlardır. Samuel [11], üç farklı malzeme için, U-bükme işleminde geri esneme üzerindeki baskı plakası kuvveti, sürtünme katsayısı, kalıp ve zımba köşe yarıçapının etkilerini araştırmak için sonlu elemanlar analizini (FEA)

kullanmıştır. Baskı plakası kuvveti ve sürtünmedeki artışın yan duvarlarda daha yüksek gerilim oluşturduğu, dolayısıyla daha az geri esneme ve yan duvar kıvrılmasına neden olduğu sonucuna varmıştır. Nanu ve Brabie [12], baskı plakası kuvveti ve sürtünme katsayısını arttırmanın geri esneme yoğunluğunun azalması üzerindeki etkisini yaptıkları çalışmada gözlemlemiştir. Wang ve diğerleri [13], farklı kalınlıklara sahip özel kaynaklı boşluklardan (TWB) yapılmış bir otomotiv zemin takviye parçasındaki geri esnemeyi telafi etmek için FEA'yı kullanmışlardır. Çizim aracı özelliklerini tekrarlayan bir şekilde değiştirerek geri esnemeyi tolerans değerlerinde telafi edebildiler. Zajkani ve Hajbarati [13], 8%'i önceden gerdirilmiş DP780 çeliği için U-bükme işlemindeki geri esnemenin doğru tahminine ilişkin analitik ve FEM yöntemlerini karşılaştırdılar. Elastik modülün değişimini dikkate alan FEM modelinin analitik modele göre daha doğru verilere sahip olduğunu sonucuna varmışlardır. Lee,S.W. ve Yang [15],[16]; D.Y. geri esnemeyi etkileyen sayısal faktörleri Taguchi yöntemi kullanılarak değerlendirmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemi aynı anda birden fazla faktörün göz önünde bulundurulmasını sağlamakla birlikte daha az deney yapılarak en optimum sonucun elde edilmesini sağlamaktadır. Her bir faktörün etkisini netleştirmek için, büyük geri esnemesi nedeniyle U-çekme bükme işlemi seçilmiştir. Sayısal deneyler, sayısal faktörlerin çeşitli kombinasyonları altında gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından, geri esneme için önemli olan faktörler değerlendirilmiştir. Çalışma ile, U çekme prosesinde sonlu elemanlar analiz sonuçlarının, Taguchi tabloları kullanılarak belirlenebileceği sonucuna varılmıştır. Özgür Tekaslan ve diğerleri [16],[17]; gerçekleştirmiş olduğu çalışmada deneyleri dört farklı yöntem kullanarak gerçekleştirmişlerdir. 1. ve 2. yöntemde, baskı sonrası zımba ile kalıp arasına sac kalınlığı kadar mesafe tanımlanmıştır. 3. ve 4. yöntemlerde ise, baskı sonrası zımba ile kalıp arasında mesafe bırakılmamıştır. 1. ve 3. yöntemlerde zımba sac üzerinde bekletilmiştir. Çalışma sonucunda, zımbanın bükülmüş malzeme üzerinde daha uzun süre tutulmasının geri esnemeye azalttığını, en çok kullanılan dört farklı büküm yönteminden ikisinin geri esneme için kullanılamayacağını ve kalınlık ile bükme açısının geri esnemeyi doğru oranda etkilediği belirtilmiştir. Bekleme süresindeki 10 saniyelik artışın geri esneme açısında ortalama 0.181 derece azalmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Van-Canh Tong ve Duc-Toan Nguyen [18], DP350 yüksek dayanımlı çelik sacın U bükülmesinde geri esnemeyi tahmin etmek için sayısal bir model sunmuştur. U-çekme bükme sürecini simüle etmek için bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Geri esneme tahminlerinin mevcut deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Zımba

profil yarıçapı, kalıp profil yarıçapı, baskı plakası kuvveti ve zimba-kalıp boşluğu gibi çeşitli takım ve işlem parametrelerinin geri esneme üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

## 1.2. TEZİN AMACI

U bükme işleminde gözlemlenen geri esneme davranışında proses parametrelerinin büyük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bükme işlemi MART çeliklerinin şekillendirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bununla birlikte MART çelikleri yüksek mukavemet seviyeleri nedeniyle fazlaca geri esneme sorunu yaşar ve bu da imalatta önemli dezavantajlara sebep olur. Bu nedenle MART çeliklerinin bükme işlemi için doğru proses parametrelerinin oluşturulması, şekillendirme maliyetlerinin en aza indirilmesinde önemli bir rol oynar.

Bu tezin amacı, birçok alanda kullanılan yüksek mukavemetli sac metal malzemelerin şekillendirilmesi sırasında sıkça rastlanan sorunlardan biri olan geri esneme davranışının farklı baskı plakası kuvvetleri, bekleme süreleri ve sürtünme katsayıları ile yapılan deneyler ile belirlenerek sağlanmasıdır. Bu sayede malzemelerin kullanım alanı genişleyecek ve imalatta karşılaşılan geri esneme sorunu en aza indirgenmeye çalışılacaktır. Bu işlem maliyet açısından da oldukça önemli bir etkidir.

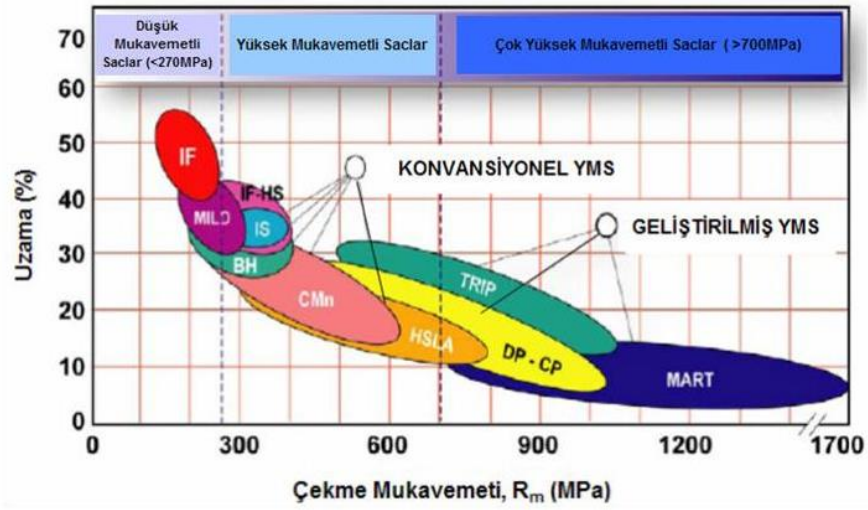
## 2. YÜKSEK MUKAVEMETLİ SAC MALZEMELER

Sac malzemelerde çekme mukavemeti arttıkça uzama değerinin düştüğü bilinmektedir. En yüksek uzama değerleri düşük mukavemetli çelik sac malzemelerde elde edilmektedir. Yüksek mukavemetli sac malzemelerin sınıflandırılması Çizelge 2.1.'de, çekme mukavemeti değerleri ve bu değerlere göre uzama yüzdeleri de Şekil 2.1.'de görülmektedir. [2].

Çelikleri birbirinden ayıran en önemli özellik mikroyapısal farklılıklarıdır. HSLA çelikleri tek ferrit fazından oluşan çelik türleri iken, AHSS çelikleri birden fazla farklı faz yapısının bir arada bulunduğu çelik türleridir. DP çift fazlı çelikler, CP kompleks fazlı çelikler, TRIP dönüşümle oluşturan çelikler, MART çelikleri ise geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler arasında yer almaktadır. [19]

Çizelge 2.1. Yüksek Mukavemetli Sac Malzemelerin Çekme Mukavemeti ve Uzama Değerleri [2]

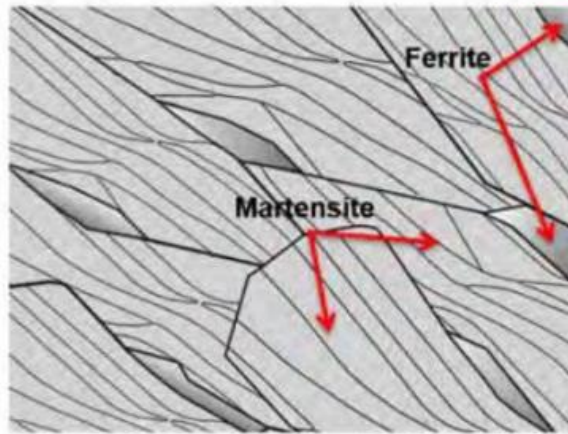
| SAC MALZEMELER   | Çekme Mukavemeti (Mpa) | Uzama Değeri (%) |
|--|------------------------|------------------|
| Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar (High Strength Low Alloy Steels- HSLA)          | 300-800                | 10-25            |
| Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar (Transformation Induced Plasticity Steels- TRIP) | 500-1200               | 10-33            |
| Çift Fazlı Saclar (Dual Phase Steels- DP)  | 450-1000               | 6-30             |
| Kompleks Fazlı Saclar (Complex Phase Steels- CP)   | 450-1200               | 6-30             |
| Martenzitik Saclar (Martenzitic Steels- MS)  | 720-1650               | 3-12             |



Şekil 2.1. Sac Malzemelerin Çekme Mukavemeti (MPa) ve Uzama (%) Değerlerine Göre Sınıflandırılması [2]

## 2.1. MARTENZİTİK ÇELİKLER

Martenzitik çelikler geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler arasında yer alan çelik türleridir. Yapısında sadece martenzit yapısı bulunan, geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler arasında en yüksek mukavemete sahip olan çelik türüdür. Bu sebeple şekillendirilebilirlikleri oldukça zordur. Östenit fazından hızlı soğutma ile östenitin büyük çoğunluğunu martenzite dönüştürerek üretilirler. Ek olarak şekillendirme işlemi sonrasında uygulanan ısıl işlemle de elde edilebilirler. Martenzitik çelikler 1700 MPa'a kadar çekme dayanımlarına ulaşabilmektedir. Martenzitik çeliklere sünekliğin artırılması için su verme sonrası temper işlemi, sertleşebilirliğin ve martenzitin dayanımının artırılması için ise karbon ilavesi yapılabilir [19].



Şekil 2.1.1. Martenzitik Çelik Mikroyapısı [18]

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. MATERYAL

Bu çalışmada, şapka şeklindeki bükme deneyleri için 1,5 mm kalınlığındaki MART1200 ve MART1400 çelikleri kullanılmıştır. Çeliklerin kimyasal bileşimleri Çizelge 3.1.1.'de verilmiştir.

Her iki çeliğin de mekanik özellikleri Zwick/Roell Z600 test cihazında, 0,005 s-1 gerinim oranında TS EN ISO 6892-2 standardına göre haddeleme yönü boyunca yapılan çekme testi deneyleri ile elde edilmiştir. Çeliklerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1.1. MART1200 ve MART1400 Çeliklerinin Kimyasal Bileşimi

| Malzeme  | Fe   | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Al    | Ti    | Nb    | V     |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MART1200 | 97,8 | 0,097 | 0,202 | 1,593 | 0,010 | 0,003 | 0,045 | 0,037 | 0,002 | 0,014 |
| MART1400 | 98,1 | 0,179 | 0,168 | 1,201 | 0,010 | 0,004 | 0,038 | 0,032 | 0,001 | 0,018 |

Çizelge 3.1.2. MART1200 ve MART1400 Çeliklerinin Mekanik Özellikleri

| Malzemeler | Akma Gerilmesi (MPa) | Çekme Gerilmesi (MPa) | Birim Uzama | Toplam Uzama | Pekleşme Üsteli |
|------------|----------------------|-----------------------|-------------|--------------|-----------------|
| MART1200   | 1137                 | 1246                  | 0.03        | 0.07         | 0.05            |
| MART1400   | 1385                 | 1455                  | 0.016       | 0.018        | 0.08            |

### 3.2. BÜKME DENEYLERİ

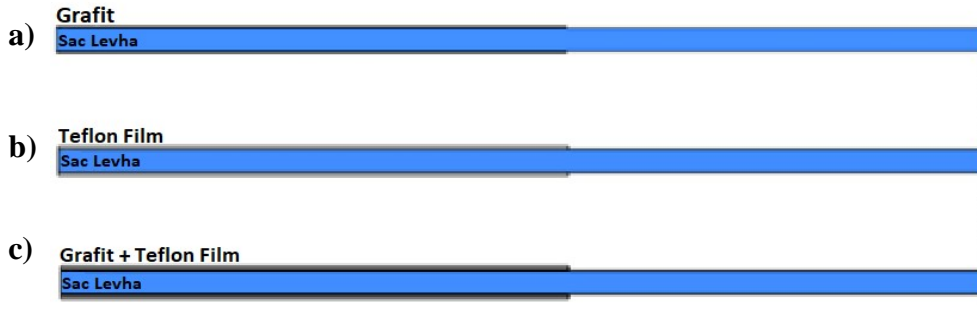
Bu çalışmada, deneyler için 130 x 38 mm'lik dikdörtgen şeklinde plakalar kullanılmıştır. Numuneleri hadde yönünde kesmek ve herhangi bir ısı etkisinden kaçınmak için su jeti ile kesme yöntemi kullanılmıştır. Bükme testleri çift etkili 50/20 tonluk hidrolik pres makinesinde gerçekleştirilmiştir. Bükme kalıp aparatının şematik ve gerçek görüntüsü sırasıyla Şekil 3.2.1. ve Şekil 3.2.2.'de gösterilmiştir.

Zimba genişliği boyutu  $W_p$ , kalıp boşluğu genişliği  $W_d$ , zimba yarıçapı  $r_p$ , kalıp yarıçapı  $r_d$ , kalıp boşluğu derinliği  $h$  Şekil 3.2.1.'de verilmiştir. Levhalar, 5 tonluk sabit bir baskı plakası kuvveti altında sabitlenmiş ve 10 mm/sn'lik sabit bir zimba hızıyla bükülmüştür. Büküm işleminin son aşamasında 6.5 ton alt kuvvet uygulanmıştır. Nihai bükme mesafesine ulaştıktan sonra, numuneler üzerinde gerilim gevşemesi oluşturmak için saclar 0,10s ve 60s yük altında tutulmuştur.

Yağlayıcıların geri esneme üzerindeki etkilerini araştırmak için sac yüzeylerin alt ve üstüne üç farklı yağlayıcı tipi (Grafit, Teflon film ve Teflon film + Grafit) uygulanmıştır. Üç tip için yağlama koşulları Şekil 3.2.3'te şematik olarak gösterilmiştir.

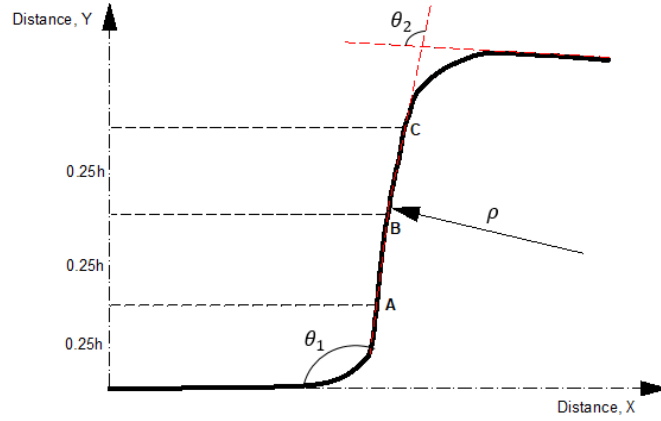
Baskı plakası kuvvetinin geri esneme üzerindeki etkisi, MART1400 çelikleri için üç farklı baskı kuvveti (1, 2.5, 5 ton) altında U germe-bükme ile incelenmiştir. Bükülmüş levhalar, flanş ve duvarlardaki geri esnemenin yanı sıra yan duvar yarıçapını ölçmek için 3D olarak taranmıştır. Bükülmüş saclardaki ölçüm noktaları Şekil 3.2.4.'de gösterilmiştir. Duvarlardaki geri esneme AB çizgisi ile X eksenini arasındaki  $\theta_1$  açısı ile ölçülürken, flanş yüzeyindeki geri esneme BC çizgisi ile onu takip eden doğrusal çizgi arasındaki  $\theta_2$  açısı ile ölçülmüştür. Eğilme yarıçapı  $\rho$ ; A, B ve C noktalarını takip eden dairenin yarıçapı ile ölçülmüştür.





Şekil 3.2.3. Sacların Flanş Bölgelerinde Oluşturulan Farklı Yağlama Koşulları;

a) Grafit, b) Teflon film, c) Grafit + Teflon film



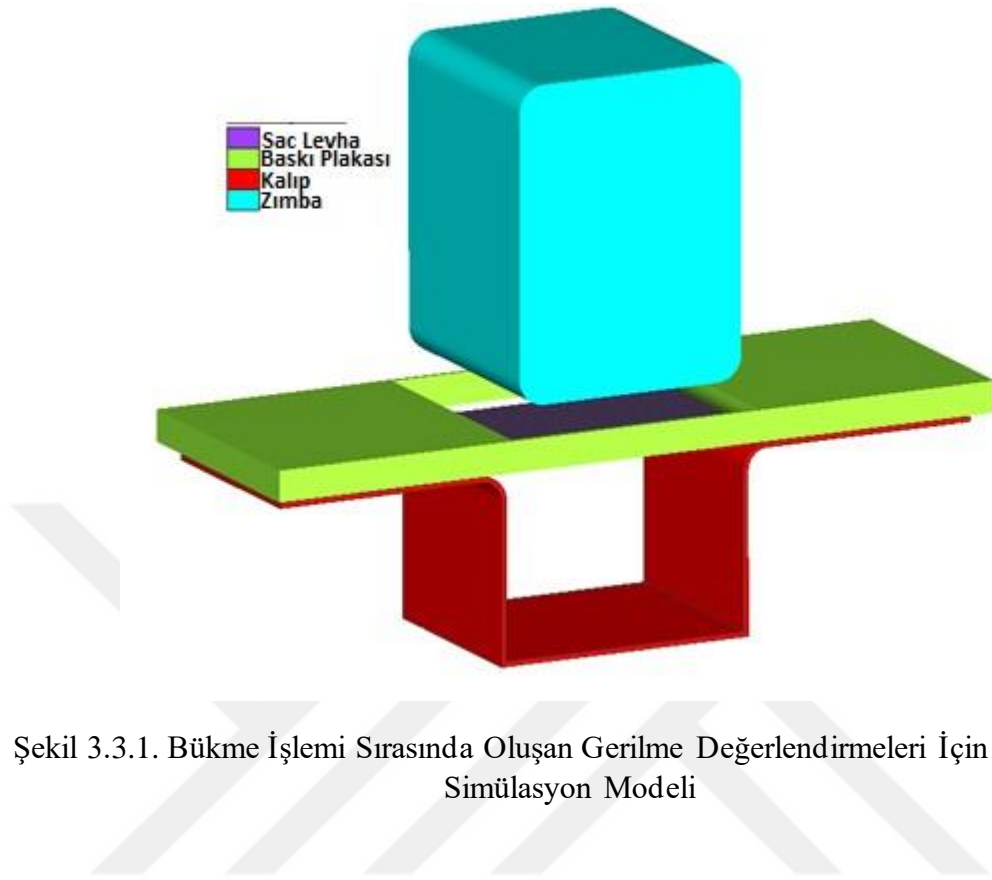
Şekil 3.2.4. Geri Esneme ve Yan Duvar Yarıçapı İçin Ölçüm Noktaları

### 3.3. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Sac metalde meydana gelen eşit olmayan gerilim dağılımlarının, geri esneme olayının ana nedeni olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bükme işlemi sırasındaki gerilme dağılımlarının analiz edilmesi, geri esneme mekanizmasının anlaşılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Farklı yağlama tiplerinde ve baskı plakası kuvvetlerinde meydana gelen geri esneme mekanizmalarını ortaya çıkarmak ve gerilme dağılımlarını analiz etmek için FEA'dan yararlanılmıştır.

FEA simülasyonları, Simufact Şekillendirme 22 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kalıplar rijit gövdeler olarak aktarılmış ve saclar 0.3 mm boyutunda 7 kat kalınlık boyunca sac ağ yapısıyla sarılmıştır. Simülasyonun model görünümü Şekil 3.3.1.'te gösterilmiştir. MART1200 sacı için de benzer sonuçlara ulaşılacağı için simülasyonlar sadece MART1400 sacı üzerinde yapılmıştır.

Malzeme modeli olarak Denklem 1'de gösterilen Voce tipi sertleştirme modeli kullanılmıştır. Voce sertleştirme modelinin parametreleri çok değişkenli regresyon analizleri ile bulunmuş ve Çizelge 3.3.1.'te verilmiştir. Simülasyonda kullanılan sürtünme katsayıları Grafit, Teflon ve Teflon + Grafit türleri için sırasıyla 0.15, 0.01 ve 0.05'tir.



Şekil 3.3.1. Bükme İşlemi Sırasında Oluşan Gerilme Değerlendirmeleri İçin Kullanılan Simülasyon Modeli

$$\sigma = \sigma_0 + V_1 [1 - \exp(-V_2 \varepsilon)] \quad (\text{Denklem 1})$$

Çizelge 3.3.1. MART1400 Çeliği İçin Voce Sertleştirme Modelinin Parametreleri

| Sertleştirme Modeli | Parametreler |       |        |
|---------------------|--------------|-------|--------|
|                     | $\sigma_0$   | $V_1$ | $V_2$  |
| Voce                | 1396.88      | 90.20 | 244.93 |

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1.YAĞLAMA KOŞULLARININ GERİ ESNEME VE YAN DUVAR YARIÇAPI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Şapka şeklindeki bükme işlemi sırasında flanş bölgelerindeki sac, kalıp yarıçapı boyunca çekilirken bükülme ve tersine bükülmeye uğrar. Bu karmaşık oluşum dizisi nedeniyle zımba-sac bölgesi boyunca çekme gerilmeleri ve sac-kalıp bölgesi boyunca basma gerilmeleri meydana gelir [20].

Eşit olmayan gerilim dağılımı, sacın esnemesine ve yan duvarların belirli bir yarıçapta kıvrılmasına neden olur. Kalıp ve sac yüzeyleri arasında sürtünme kuvvetleri oluşur. Bu ek sürtünme kuvveti yan duvarlardaki gerilimi artırır ve basma gerilmelerini tamamen çekme gerilmeleri ile değiştirerek, yan duvarlar boyunca eşit olmayan gerilim dağılımını azaltır [14]. Böylece, kalıp ve sac yüzeyleri arasındaki sürtünmenin artması, eşit olmayan gerilim dağılımını ve dolayısıyla da geri esnemeyi azaltır.

Ancak bu çalışmada sürtünmenin geri esneme ve yan duvar kıvrılması üzerinde ters etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.1.1.'de yağlama koşullarının yan duvarlarda ve flanşta geri esneme ve yan duvar yarıçapına etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.1.1. a)'da Teflon film veya Teflon film + Grafit kullanımında sürtünmenin azalmasını, Grafite kıyasla yan duvarlardaki geri esnemeyi önemli ölçüde azalttığı görülebilir.

Ancak Teflon ve Teflon + Grafit yağlama koşulları karşılaştırıldığında, Teflon + Grafit koşulunun Teflon filme göre geri esneme daha fazla azalmaya neden olmadığı görülmüştür. Aksine MART1400 çeliği için daha yüksek duvar geri esnemesine bile neden olmuştur. Bu davranışın nedeni, Teflon filmin Grafit tabakasının altında kayma eğiliminin artmasından kaynaklanmış olabilir, bu da levha yüzeyini kalıpla doğrudan temas maruz bırakmış olabilir ve sonuç olarak levhanın açıkta kalan bölgelerinde sürtünmeyi arttırmış olabilir.

U bükülmüş sacın flanş bölgelerindeki geri esneme  $\theta_2$  açısının  $90^\circ$ 'den küçük olmasına neden olur. Ancak Şekil 4.1.1. b)'de gösterildiği gibi Teflon film veya Teflon film + Grafit yağlama türleri kullanılarak sürtünmenin azalması flanş bölgelerinin geri esneme yerine ileri esnemesine neden olmuştur. Bununla birlikte Grafit koşulu flanş bölgelerinin her bir çelik için geri esnemesine neden olmuştur.

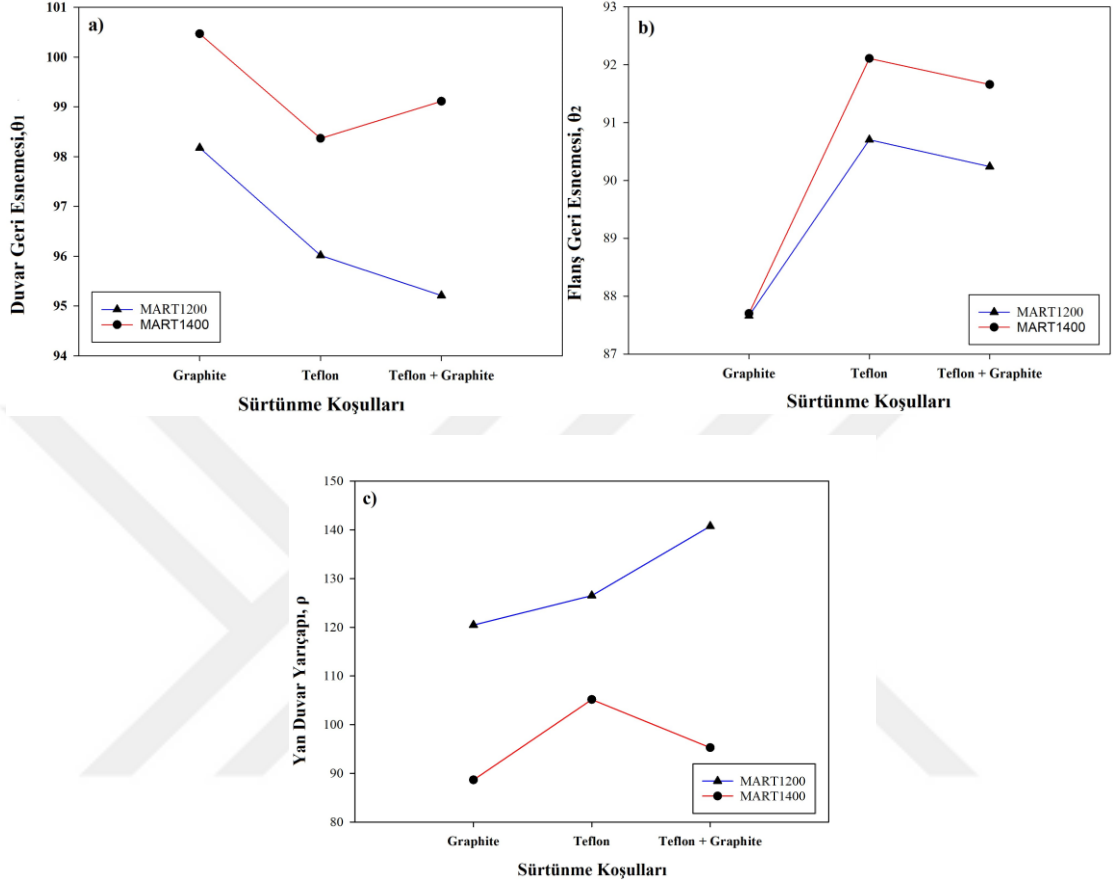
Teflon ve Teflon + Grafit yağlama türlerinin sağladığı düşük sürtünme de yan duvar yarıçapının artmasına neden olmuş ve böylece Şekil 4.1.1. c)'de gösterildiği gibi yan duvarın düzlüğünü iyileştirmiştir. Bununla birlikte Teflon + Grafit durumunda yan duvar yarıçapı biraz azalmıştır, bu Teflon filmin kalıp ve levha yüzeyi arasında kaymasından kaynaklanmış olabilir.

U bükülmüş MART1200 ve MART1400 çeliklerinin farklı sürtünme koşullarındaki sac profilleri Şekil 4.1.2. 'de gösterilmiştir. Kalıp ve sac ara yüzeylerindeki sürtünmenin azalması şekillendirme sırasında yan duvarlarda oluşan gerilimi azaltmış olabilir ve bu nedenle daha yüksek bir geri esneme beklenebilir. Ancak belirtilmelidir ki, bu çalışmada şekillendirme işlemi sonunda 6,5 ton sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. U bükümlü sacların sıkıştırma kuvveti, negatif momentlere neden olarak geri esnemeyi belirli bir derecede azaltabilir [21].

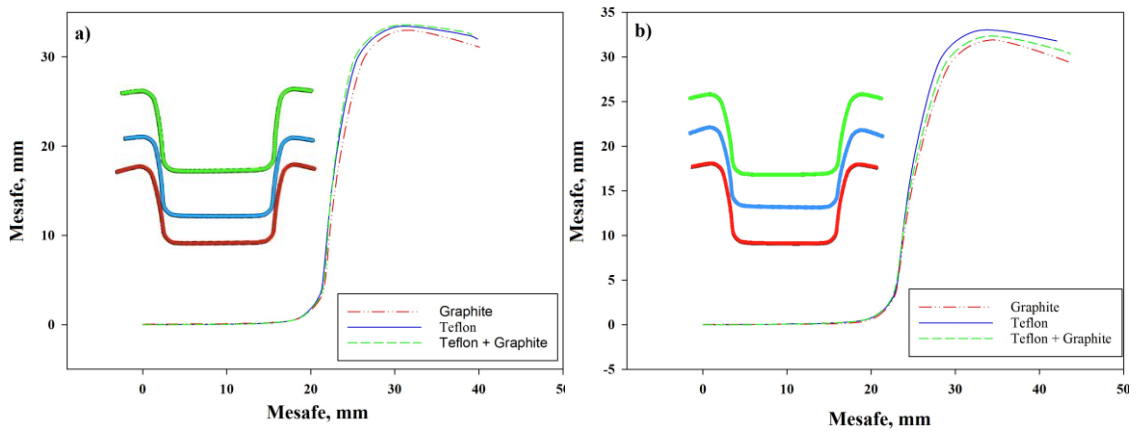
Bükme işlemi sırasında farklı sürtünme koşullarında oluşan kuvvet değerleri Şekil 4.1.3.'de gösterilmiştir. Sıkıştırma kuvveti bükülmüş saclara yaklaşık 32 mm mesafede uygulanmış ve Grafit durumunda Teflon ve Teflon + Grafit koşullarına göre sıkıştırma mesafesinden önce daha büyük bir şekillendirme kuvveti gözlemlendiği görülmüştür. MART1200 çeliği için 32 mm mesafede gözlemlenen şekillendirme kuvveti Grafit, Teflon ve Teflon + Grafit koşullarında sırasıyla 3.43, 3.18 ve 3.03 ton olmuştur. MART1400 çeliği için 32 mm mesafede gözlemlenen şekillendirme kuvveti Grafit, Teflon ve Teflon + Grafit koşullarında sırasıyla 4, 3.50 ve 3.71 ton olmuştur.

Böylece sürtünmenin azalmasıyla birlikte şekillendirme kuvvetinin azalması sıkıştırma kuvvetinin bükülmüş saclara uyguladığı negatif eğilme momentlerini arttırmış, bu şekilde de daha düşük geri esneme ve daha yüksek eğrilik yarıçapı gözlemlenmiştir. Teflon durumuna kıyasla MART1400 çeliği için Teflon + Grafit durumunda gözlemlenen daha

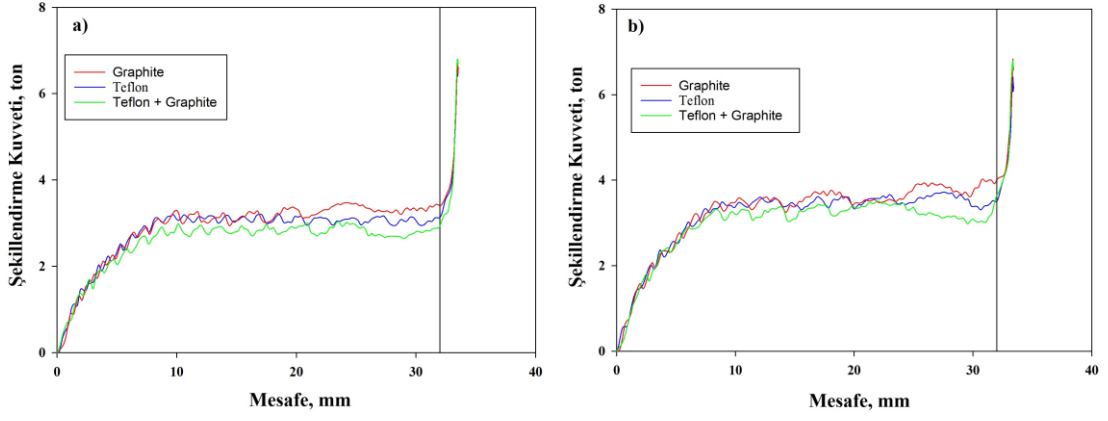
yüksek geri esneme ve daha düşük eğrilik yarıçapı, muhtemelen Teflon + Grafit durumunda gözlemlenen daha yüksek şekillendirme kuvvetinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.1.1. Sürtünme Koşullarının a) duvar geri esneme  $\theta_1$ , b) flanş geri esneme  $\theta_2$  c) yan duvar yarıçapı  $\rho$



Şekil 4.1.2. Farklı Sürtünme Koşulları İçin U Bükümlü Sac Profilleri  
a) MART1200, b) MART1400



Şekil 4.1.3. Bükme İşlemi Sırasında Farklı Sürtünme Koşullarında Oluşan Kuvvet Değerleri a) MART1200 b) MART1400 Çelikleri



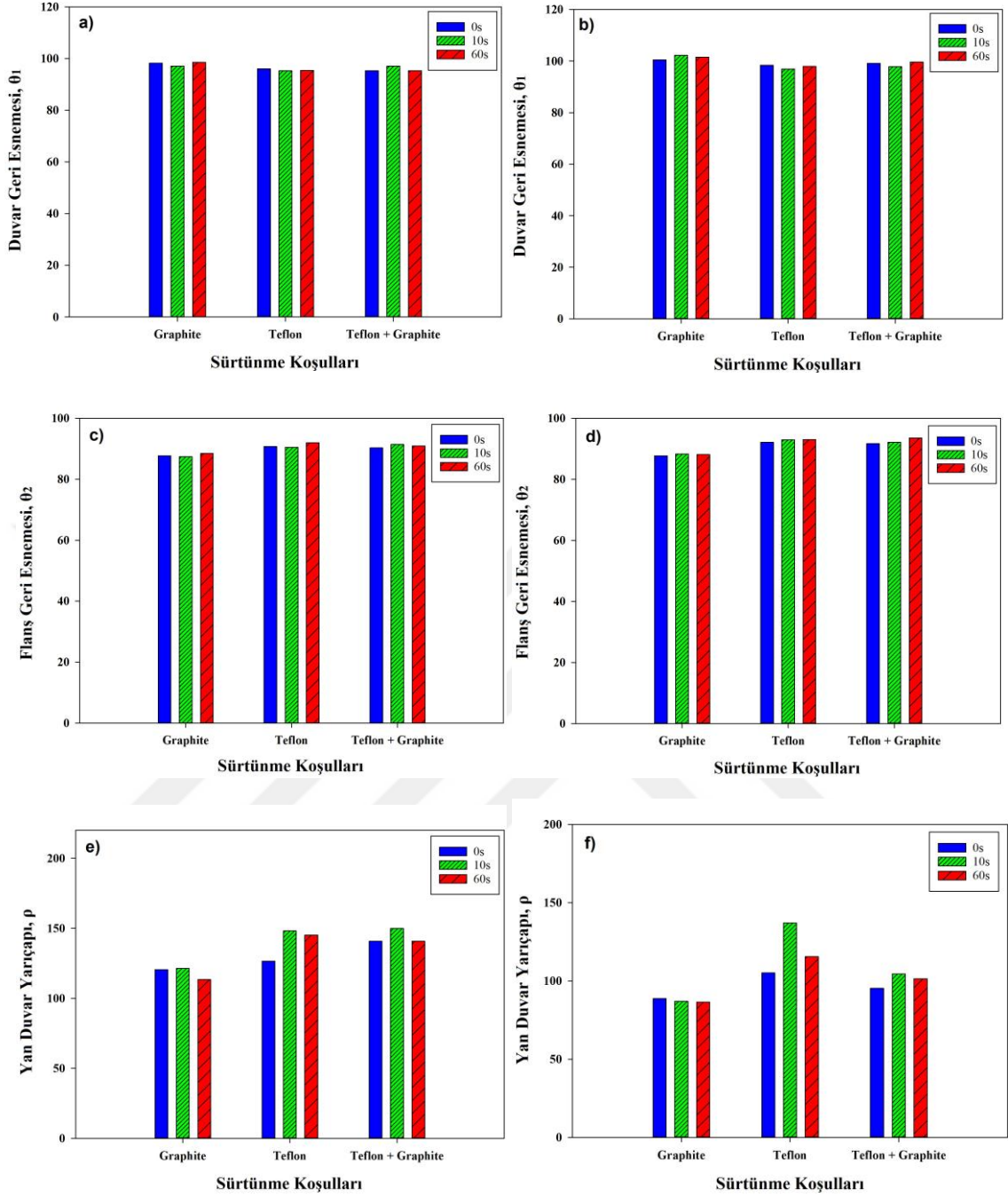
## 4.2.KUVVET TUTMA SÜRESİNİN GERİ ESNEME VE YAN DUVAR YARIÇAPI ÜZERİNDEN ETKİSİ

Yüksek geri esnemenin ana nedenleri, şekillendirilen numunelerin kalınlık yönü boyunca düzensiz gerilim dağılımından kaynaklanmaktadır. Gerilmeler eşit şekilde dağıtılabılır veya büyüklükleri azaltılabilirse, geri esnemenin büyüklüğü de azaltılabilir. Numuneleri belirli bir süre sabit bit yükte tutmak numunelerde sürünme gerinimi yaratır ve bu da gerilme gevşemesi ile sonuçlanır [22], [23]. Ancak bu çalışmada kuvvet tutma süresinin geri esneme ve yan duvar yarıçapı üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemiştir.

Şekil 4.2.1.'de kuvvet tutma süresinin duvar, flanş ve yan duvar yarıçapı üzerindeki geri esneme etkisi gösterilmiştir. Yan duvar yarıçapı, flanş ve duvar geri esneme değerlerinin benzer değerler etrafında dalgalandığı görülmektedir. Bu nedenle kuvvet tutma süresinin her bir çelik için geri esneme üzerinde önemli bir etkisi gözlemlenmemiştir.

MART1200 ve MART1400 çeliklerinin yüksek dayanımları nedeniyle, kalınlık boyunca yüksek gerilmeler oluşur. Bu yüzden numunelerin oda sıcaklığında 10 sn ve 60 sn boyunca yük altındaki gerilme gevşeme miktarı, geri esneme davranışında değişiklik yaratma açısından önemsiz olabilir.

Saito ve diğerleri [24], 980 Mpa yüksek dayanımlı çelikler için farklı sıcaklıklarda gerilme gevşeme testleri yapmışlar ve oda sıcaklığında gerilme gevşeme miktarının önemli ölçüde düşük olduğunu göstermişlerdir. Majidi ve diğerleri [9], DP780 çeliklerinin oda sıcaklığında geri esneme davranışı üzerindeki gerilme gevşeme etkisini araştırmışlar ancak benzer şekilde, oda sıcaklığındaki gerilme gevşemesinin geri esnemeyi azaltmak için yetersiz olduğu sonucuna varmışlardır. Bu nedenle oda sıcaklığında MART1200 ve MART1400 çeliklerinde yetersiz miktarda gerilme gevşeme etkisi, U bükme işleminde geri esnemeyi azaltamamış olabilir.



Şekil 4.2.1. MART1200 ve MART1400 Çelikleri İçin, sırasıyla, Sürtünme Koşullarının **a, b)** duvar geri esnemesi, **c, d)** flanş geri esnemesi **e, f)** yan duvar yarıçapı

### 4.3.BASKI PLAKASI KUVVETİNİN GERİ ESNEME VE YAN DUVAR YARIÇAPI ÜZERİNDEN ETKİSİ

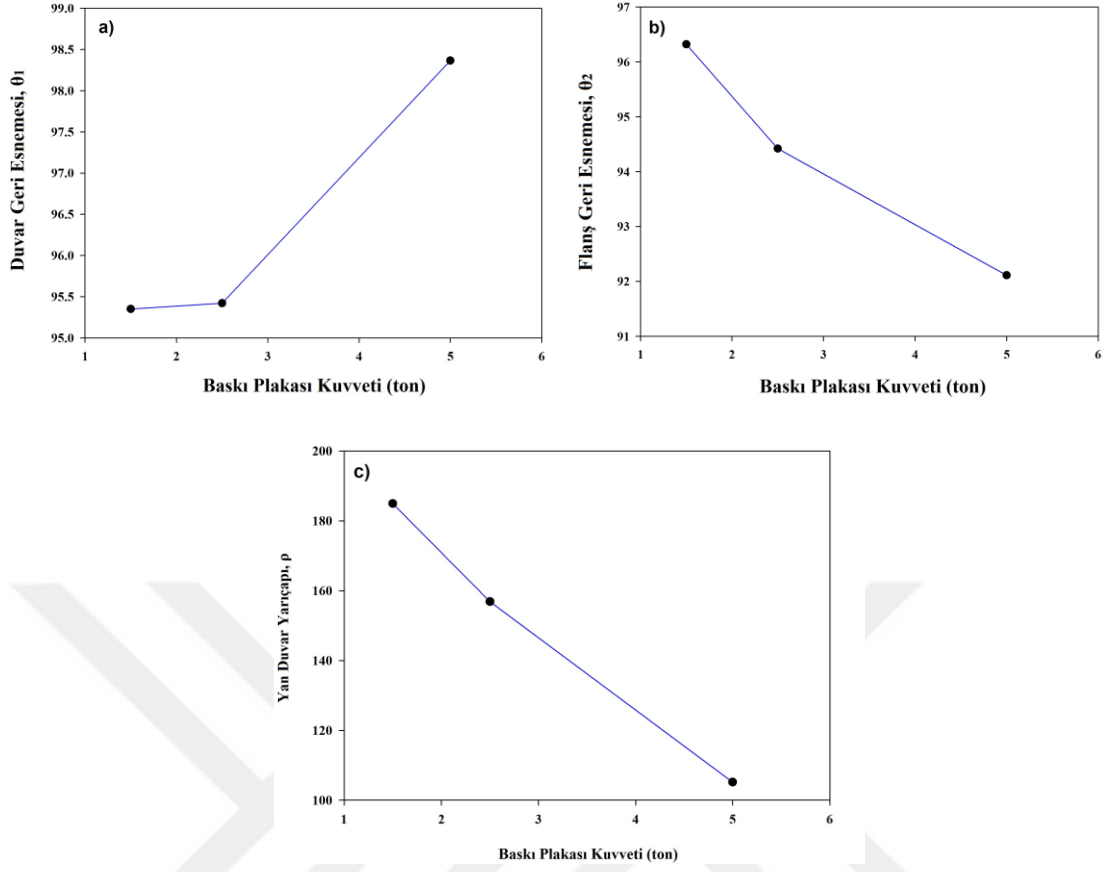
U bükme işlemi sırasında saca baskı plakası kuvvetinin uygulanması, sac duvarlarındaki gerilimi arttırır ve böylece sacın kalınlığı boyunca daha eşit bir gerilim dağılımı oluşturur [10], [25], [26]. Bununla birlikte bölüm 4.1 de, bükme darbesinin sonunda bir sıkıştırma kuvvetinin uygulandığı durumda şekillendirme kuvvetinin azalmasının geri esnemeyi azalttığı ve yan duvar yarıçapını iyileştirdiği gösterilmiştir.

MART1400 çeliğinin geri esneme ve yan duvar yarıçapına baskı plakası kuvvetinin etkisi Şekil 4.3.1.'de U bükülmüş MART1400 çeliklerinin farklı baskı plakası kuvvetlerindeki sac metal profilleri Şekil 4.3.2.'de gösterilmiştir.

Baskı plakası kuvvetinin azalmasının daha düz bir yan duvara yol açtığı ve ayrıca bükülmüş sacların duvarlarında ve flanş bölgelerindeki geri esnemeyi azalttığı görülebilir. Ancak, baskı plakası kuvvetinin 5 tondan 2.5 tona düşürülmesi ile geri esneme ve yan duvar yarıçapı değerlerinde önemli bir fark gözlemlenirken, baskı plakası kuvvetinin daha da azalmasıyla farkın oldukça düşük olduğu söylenebilir.

Ogawa ve Yoshida [27], sıkıştırma kuvvetindeki artışın geri esnemeyi azaltmasına rağmen, sıkıştırma kuvvetini belirli bir değere çıkardıktan sonra bükülmüş saclarda geri esneme farkının benzer olduğunu göstermişlerdir.

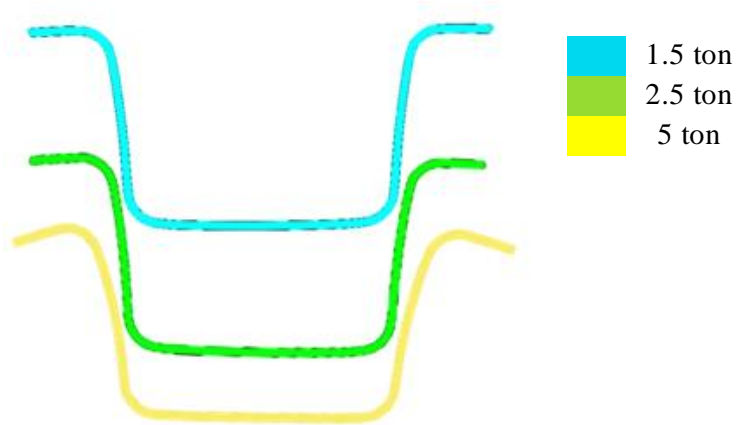
Bu çalışmada bükme işlemi için sabit bir sıkıştırma kuvveti uygulanmasına rağmen bükme sırasında şekillendirme kuvvetinin azalması, sıkıştırma kuvvetinin oluşturduğu eğilme momentlerinin artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte yan duvarlardaki çekme ve basma gerilmeleri nedeniyle, bükülmüş saclarda belirli miktarda geri esneme ve yan duvar kıvrılması hala mevcuttur.



Şekil 4.3.1. MART1400 Çelikleri İçin Baskı Plakası Kuvvetinin Etkisi

a) duvar geri esnemesi, b) flanş geri esnemesi

c) yan duvar yarıçapı



Şekil 4.3.2. U-Bükülmüş MART1400 Çelikleri İçin Farklı Baskı Plakası Kuvvetlerinde Sac Metal Profilleri

#### 4.4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE GERİLME DAĞILIMI ANALİZİ

FEA yöntemi; sac kalıbı tasarlamak, şekillendirme işlemi parametrelerini optimize etmek veya deformasyon işlemi sırasında oluşan gerilim ve gerinim dağılımlarını analiz ederek şekillendirme işlemi sırasında gözlenen bir olgunun nedenini ortaya çıkarmak için kullanılabilir.

Bölüm 4.1 ve 4.3'te sürtünme ve baskı plakası kuvvetinin azalmasının yan duvarlar boyunca daha düşük geri esnemeye ve daha yüksek eğrilik yarıçapına neden olduğu gösterilmiştir.

Bu bölümde, sürtünme ve baskı plakası kuvveti azalmaları ile daha düşük geri esnemeye neden olan mekanizmanın tam olarak anlaşılması için bükme işlemi sırasında oluşan gerilme dağılımları FEA yöntemi ile analiz edilmiştir.

Şekil 4.4.1.'de büküm işlemi sırasındaki bükme, düzleştirme ve dip aşamalarındaki gerilme dağılımları gösterilmiştir. Sacın alt kısmında bükme aşamasında bir yay oluşur. (Şekil 4.4.1.(a)). Bu yayın kalıba temas ederek bir miktar düzleştiği (Şekil 4.4.1.(b)) ve daha sonra da sıkıştırma kuvveti altında sıkıştırıldığı görülmektedir (Şekil 4.4.1.(c)).

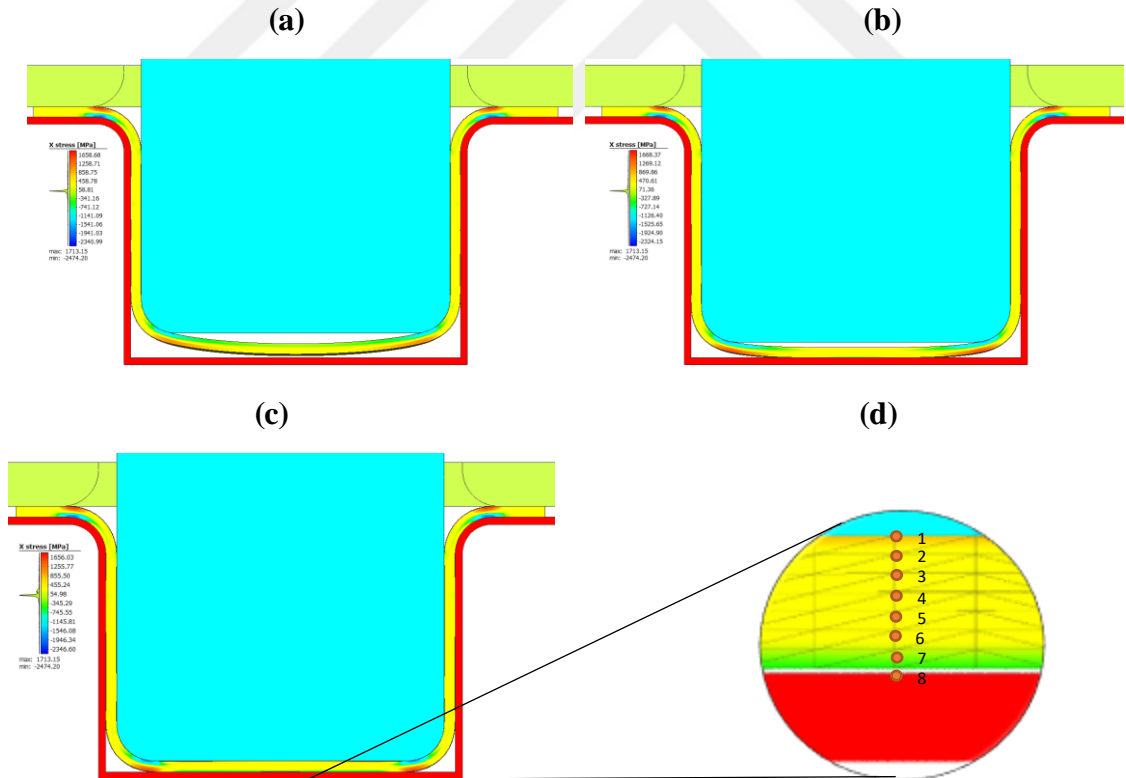
Bükme aşaması sırasında sırasıyla levhanın alt kısmının zımba ve kalıp tarafı boyunca basma ve çekme gerilmeleri meydana gelmiştir. Bununla birlikte sıkıştırma aşamasında, Şekil 4.4.1.(d)'de gösterildiği gibi sırasıyla kalıp ve zımba kenarlarında sıkıştırma ve çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olan sacın alt kısmında ters bir bükülme etkisine neden olmuştur.

Şekil 4.4.1.(d) 'de gösterilen numaralarda, eğilme ve tabana basma aşamalarındaki farklı sürtünme koşulları için oluşan gerilmeler Şekil 4.4.2.'de gösterilmiştir. Sıkıştırma aşamasında, sac ve zımba tarafında basma gerilimden çekme gerilimine, kalıp ve sac tarafında ise çekme geriliminden basma gerilimine dönüşür. Ancak sürtünme katsayısındaki azalmanın 1. ve 8. numaralarda daha yüksek çekme ve basma gerilmelerinin oluşmasına neden olduğu ve bu da sac üzerinde daha büyük bir negatif eğilme momentine neden olmuştur. Böylece sıkıştırma aşamasında, sacın alt bölgesinin

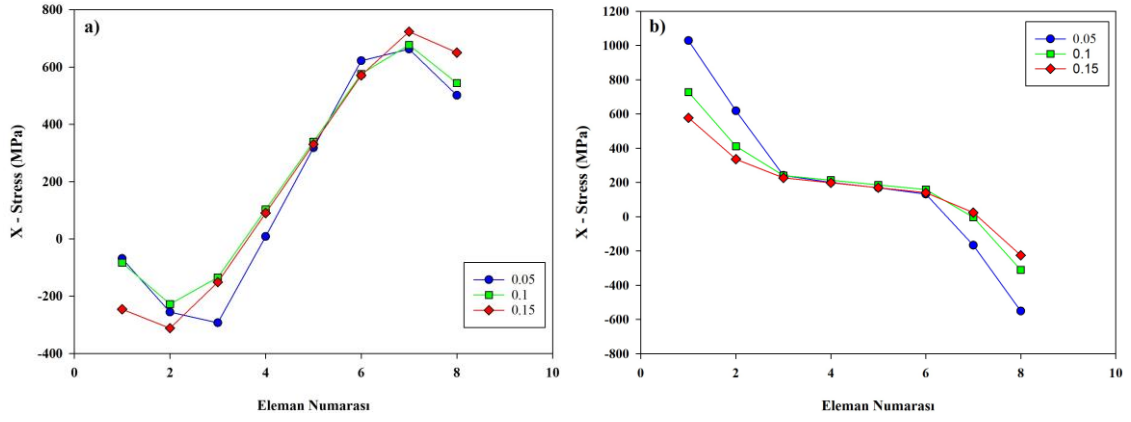
daha yüksek deformasyonu nedeniyle daha düşük sürtünme katsayısı koşullarında daha düşük geri esneme ve iyileştirilmiş yan duvar eğri yarıçapı elde edilmiştir.

Lawanwong ve diğerleri [8], levhanın altını yukarı doğru iterek levha üzerinde negatif momentler oluşturmuş ve bu sayede de geri esnemenin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir.

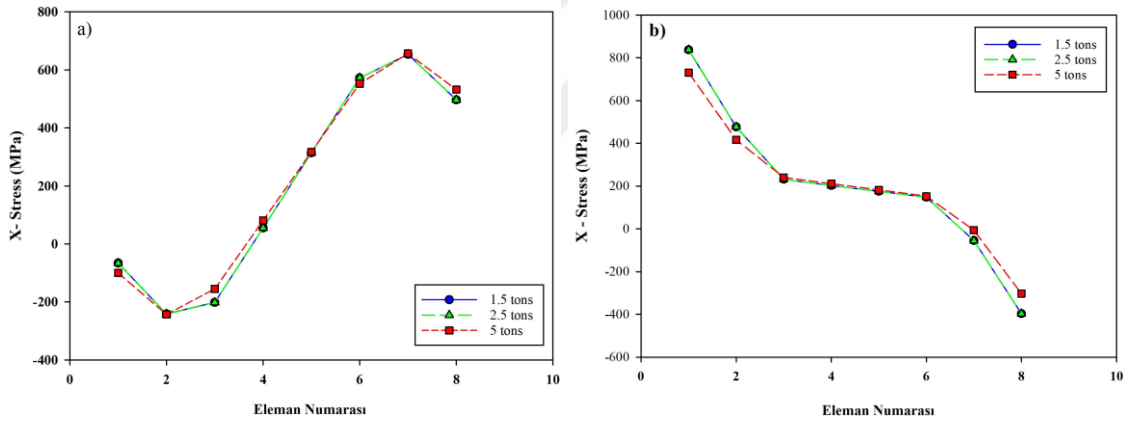
Levhaların alt kısmındaki gerilim dağılımı üzerinde baskı plakası kuvvetinin etkisi Şekil 4.4.3. 'de gösterilmiştir. Benzer şekilde, baskı plakası kuvvetinin 5 tondan 2.5 veya 1.5 tona düşürülmesi sacın alt kısmında daha yüksek deformasyona neden olarak 1. numarada daha büyük çekme gerilimine yol açmıştır. Bununla birlikte 1.5 ve 2.5 tonluk baskı plakası kuvveti için hemen hemen aynı gerilme dağılımı gözlemlenmiş, bu da aralarında benzer şekilde gözlenen duvar geri esnemesini açıklamıştır.



Şekil 4.4.1. Bükme İşlemi Sırasında Oluşan Gerilme Dağılımları a) bükme, b) düzleştirme c) dip aşamaları d) c) alt bölgesinin büyütülmüş görünümü



Şekil 4.4.2. Çeşitli Sürtünme Katsayıları İçin Bükme Saclarının Alt Tarafındaki Kalınlık Gerilme Dağılımı **a)** bükme aşaması **b)** dip aşaması



Şekil 4.4.3. Çeşitli Baskı Plakası Kuvvetleri İçin Bükme Saclarının Alt Tarafındaki Kalınlık Gerilme Dağılımı **a)** bükme aşaması **b)** dip aşaması

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada MART1200 ve MART1400 çelikleri için sürtünme koşulları, baskı plakası kuvveti ve kuvvet tutma süresinin geri esneme üzerindeki etkileri incelenmiştir. FEA, sac üzerindeki gerilim dağılımlarını analiz ederek farklı sürtünme koşullarında ve baskı plakası kuvvetlerinde meydana gelen geri esneme mekanizmasını ortaya çıkarmak için gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır;

- Teflon veya Teflon + Grafit yağlama tipleri kullanılarak sürtünmenin azaltılması, geri esnemeyi önemli ölçüde azaltmış ve yan duvar eğri yarıçapını iyileştirmiştir. Ancak Teflon + Grafit koşulunda grafit tabakasının eklenmesi, Teflon film koşuluna kıyasla geri esneme veya yan duvar yarıçapı açısından önemli gelişmelere neden olmamıştır.
- Kuvvet tutma süresinin her iki çelik için de geri esneme ve yan duvar eğri yarıçapı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olmuştur. 10sn ve 60sn tutma sürelerinin stres gevşeme etkisinin önemsiz olduğu ve önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.
- Baskı plakası kuvvetinin 5 tondan 2.5 ve 1.5 tona düşürülmesi ile yan duvarlardaki geri esneme sırasıyla 2,94% ve 3,09% oranında azalmış, yan duvar yarıçapı 17,90% ve 75,88% oranında artmış, flanşlardaki ileri esneme 1,97% ve 4,37% oranında artmıştır.
- Üç farklı yağlama tipi karşılaştırıldığında (Grafit, Teflon, Teflon + Grafit) en yüksek geri esneme yan duvarlar ve flanşlarda, en düşük yan duvar yarıçapı Grafit tipi yağlamada meydana gelmiştir.
- MART1200 ve MART1400 çeliklerinde Teflon film yağlama ile yan duvarlardaki geri esneme sırasıyla 2,21% ve 2,09% oranında azaltılmış ve yan duvar yarıçapı 5,02% ve 18,62% oranında artırılmıştır.

- Bükme darbesi sonunda uygulanan dip kuvvetinin (6.5 ton) şekillendirme kuvvetlerinin düşük olduğu durumda sacların alt kısmında daha fazla deformasyona neden olduğu tespit edilmiştir. Böylece daha düşük bir baskı plakası kuvvetinin uygulanmasıyla, Teflon veya Teflon + Grafit yağlama tiplerinin kullanılmasıyla sağlanan daha düşük şekillendirme kuvvetleri MART çeliklerinin yan duvarlarında daha düşük geri esnemeye yol açmıştır.
- FEA sonuçları bükme işleminin dip aşamasının sacların alt kısmının hafifçe yukarı doğru bükülmesine neden olduğunu, bunun da daha düşük sürtünme katsayısı koşullarında veya daha düşük baskı plakası kuvvetlerinde daha yüksek negatif eğilme momentlerinin oluşmasına sağladığı ortaya konulmuştur.



## 6. KAYNAKLAR

- [1] C. D. Horvath, "Advanced steels for lightweight automotive structures", *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing Limited, ss. 35–78, 2010.
- [2] E. Uslu, "Sac malzemelerin bükülmesinde geri yaylanma davranışının araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, 2014.
- [3] Ö. N. Cora ve M. Koç, "Promises and problems of ultra/advanced high strength steel (u/ahss) utilization in automotive industry", *7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (OTEKON 2014)*, ss. 1–8, 2014.
- [4] M. Y. Demeri, "Advanced high-strength steels: science, technology, and applications", *Ohio: ASM International*, 2013.
- [5] R. H. Wagoner, H. Lim, ve M. G. Lee, "Advanced issues in spring-back", *Int. J. Plast.*, vol. 45, ss. 3–20, 2013.
- [6] K. Lawanwong, H. Hamasaki, R. Hino, ve F. Yoshida, "A novel technology to eliminate u-bending spring-back of high strength steel sheet by using additional bending with counter punch", *Procedia Engineering*, cilt 81, sayı Ekim, ss. 957–962, 2014.
- [7] K. Aydın, İ. Karaağaç, "Lazer kaynaklı hsla sac malzemelerde geri esnemenin deneysel araştırılması" *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 17, ss. 29-37, 2019.
- [8] K. Lawanwong, H. Hamasaki, R. Hino, ve F. Yoshida, "Double-action bending for eliminating spring-back in hat-shaped bending of advanced high-strength steel sheet", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, c. 106, sayı 5–6, ss. 1855–1867, 2020.
- [9] O. Majidi, M. G. Lee, ve F. Barlat, "U-draw bending of dp780 in non-conventional drawing mode using direct-drive digital servo-press", *Procedia Engineering*, c. 81, sayı Ekim, ss. 987–992, 2014.
- [10] G. Liu, Z. Lin, Y. Bao, ve J. Cao, "Eliminating spring-back error in u-shaped part forming by variable blankholder force", *Journal of Materials Engineering Performance*, c. 11, sayı 1, ss. 64–70, 2002.
- [11] M. Samuel, "Experimental and numerical prediction of spring-back and side wall curl in u-bendings of anisotropic sheet metals", *Journal of Materials Process Technology*, c. 105, sayı 3, ss. 382–393, 2000.
- [12] N. Nanu ve G. Brabie, "Analytical model for prediction of spring-back parameters in the case of u stretch-bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness", *International Journal of Mechanical Sciences*, c. 64, sayı 1, ss. 11–21, 2012.
- [13] H. Wang, J. Zhou, T. S. Zhao, L. Z. Liu, ve Q. Liang, "Multiple-iteration spring-back compensation of tailor welded blanks during stamping forming process", *Journal of Materials Design*, c. 102, ss. 247–254, 2016.

- [14] A. Zajkani ve H. Hajbarati, "Investigation of the variable elastic unloading modulus coupled with nonlinear kinematic hardening in spring-back measuring of advanced high-strength steel in u-shaped process", *Journal of Manufacturing Processes.*, c. 25, ss. 391–401, 2017.
- [15] S.W Lee ve D.Y Yang, "An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 80- 81, ss. 60-67, 1998.
- [16] E.Sönmez, "Metal Şekillendirme İşleminde Geri Esneme Tahmininin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2015.
- [17] Ö. Tekaslan, N. Gerger, U. Şeker, "Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “v” bending dies", *Materials and Design Journal*, c.29, sayı 5, ss.1043-1050, 2008.
- [18] V. Tong , D. Nguyen "A study on spring-back in u-draw bending of dp350 high-strength steel sheets based on combined isotropic and kinematic hardening laws", *Advancec in Mechanical Engineering* 10(9), 2018.
- [19] T. Civek, "Yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerin ılık şekillendirme sıcaklıklarındaki deformasyon davranışlarının karakterize edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, 2022.
- [20] T. Yoshida, K. Hashimoto, T. Katayama, ve Y. Kuriyama, "Shape control techniques for high strength steel in sheet metal forming", *Nippon Steel Technical*, sayı 88, ss. 27–32, 2003.
- [21] J. Lee, K. Lee, D. Kim, H. Choi, ve B. Kim, "Spring-back and spring-go behaviors in bending of thick plates of high-strength steel at elevated temperature", *Computational Materials Science Journal*, c 100, sayı PA, ss. 76–79, 2015.
- [22] K. Prasad, B. Venkatesh, H. Krishnaswamy, D. K. Banerjee, ve U. Chakkingal, "On the interplay of friction and stress relaxation to improve stretch-flangeability of dual phase (dp600) steel", *CIRP Journal Manufacturing Science Technology*, c. 32, ss. 154–169, 2021.
- [23] İ. Karaağaç, "The experimental investigation of spring-back in v-bending using the flexforming process", *Arabian Journal Science and Engineering*, c. 42, sayı 5, ss. 1853–1864, 2017.
- [24] N. Saito, M. Fukahori, D. Hisano, H. Hamasaki, ve F. Yoshida, "Effects of temperature, forming speed and stress relaxation on spring-back in warm forming of high strength steel sheet", *Procedia Engineering*, c. 207, ss. 2394–2398, 2017.
- [25] A. Quadfasel, J. Lohmar ve G. Hirt, "Investigations on spring-back in high manganese twip-steels using u-profile draw bending", *Procedia Engineering*, c. 207, ss. 1582–1587, 2017.
- [26] M. Zhang, J. Zhang, Y. X. Ning, T. Wang ve Z. Wan, "Spring-back behavior of advanced high strength steel(ahss) cp800", *Advanced Materials Research*, c. 820, sayı Eylül, ss. 45–49, 2013.
- [27] T. Ogawa ve F. Yoshida, "Spring-back analysis of u-bending with bottoming", *AIP*

*Conference Proceedings*, c. 1383, ss. 1129–1136, 2011.

- [28] S. Keeler, M. Kimchi, R. Kuziak, R. Kawalla, S. Waenger, ve Y. G. Yuqing Weng, Han Dong, “Introduction to advanced high-strength steels (ahss)”, *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines* Version 5.0, c. 8, sayı 5, ss. 2, 2014.
- [29] Y. Şen, “Dp600, dp800, ms1200, ms1400 tipi yüksek mukavemetli sacların cmt kaynak yöntemiyle birleştirilmesi ve mekanik/mükroyapı özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, 2019.



# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İrem YALÇIN

Yabancı Dili : İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                | Okul/Üniversite     | Mezuniyet Yılı |
|-----------|---------------------|---------------------|----------------|
| Y. Lisans | Makine Mühendisliği | Düzce Üniversitesi  | 2023           |
| Lisans    | Makine Mühendisliği | Düzce Üniversitesi  | 2019           |
| Lise      |                     | Bolu Anadolu Lisesi | 2014           |

## YAYINLAR

- [1] N. Sen, T. Civek, I. Yalcin, "Investigation of the effects of lubrication type, blankholder force and force holding time on the spring-back behaviour for hat-shaped mart steels", *Journal of Ironmaking & Steelmaking Journal*, ss. 1-10, 2023.