

**SAC MALZEMELERİN BÜKÜLMESİNDE
GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI**

Emin USLU

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Nihat TOSUN
Ocak - 2014**

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

**SAC MALZEMELERİN BÜKÜLMESİNDE GERİ YAYLANMA
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emin USLU

(091120107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 25.12.2013

Tezin Savunulduğu Tarih: 10.01.2014

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nihat TOSUN (F.Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Niyazi ÖZDEMİR (F.Ü.)

Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (F.Ü.)

Ocak-2014

ÖNSÖZ

Hazırladığım bu çalışmada bana çalışma konumu öneren, çalışmalarında beni her zaman büyük özveriyle destekleyen ve çalışmamın bütün aşamalarında her türlü yardımı gösteren kıymetli hocam ve danışmanım sayın Doç. Dr. Nihat TOSUN'a, lisans döneminden itibaren her türlü çalışmamda bana yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR'a çalışmamdaki değerli katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamda ve normal hayatta göstermiş oldukları sabır ve maddi - manevi yardımlarından dolayı Hakan ÇELİK, İbrahim UYAR, Bora BAYRAM, Recep ÇATAR ve ismini sayamadığım birçok arkadaşına; bu çalışmanın sayısal kısmının hazırlanmasında ve teknik destek konusundaki yardımlarından dolayı Grup Otomasyon firmasından Engin ZİREK ve Nihat KURTULUŞ'a teşekkür ederim.

Her koşulda beni destekleyen, en zor anlarımda yanımda olan, maddi ve manevi desteğini asla unutmayacağım eşime ve aileme kelimelerle ifade edemediğim minnet ve şükranlarımı sunmak isterim.

Emin USLU

Elazığ-2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR.....	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konu ile İlgili Literatür Araştırması.....	2
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	9
2. GENEL BİLGİLER.....	11
2.1. Çelik Sac Metal Malzemeler.....	11
2.1.1. Çelik Sac Malzemelerin Sınıflandırılması.....	12
2.1.1.1. Üretim Yöntemine Göre Sınıflandırma.....	12
2.1.1.2. Metalürjik Özelliklerine Göre Sınıflandırma.....	18
2.2. Sac Malzemelerin Şekillendirme Yöntemleri.....	27
2.3. Bükme.....	30
2.4. Geri Yaylanma.....	40
2.4.1. Geri Yaylanmayı Etkileyen Faktörler.....	42
2.4.2. Geri Yaylanmanın Telafisi.....	45
2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	47
2.5.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin İşlem Basamakları.....	49
2.5.2. Sac Şekillendirmede Kullanılan Simülasyon Algoritmaları.....	52
2.5.2.1. Rijit Plastik ve Elastik Plastik.....	52
2.5.2.2. Statik Kapalı Yöntem.....	53
2.5.2.3. Statik Açık Yöntem.....	53
2.5.2.4. Dinamik Açık Yöntem.....	53
2.5.3. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Paket Programlar.....	54
2.5.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Sac İmalatındaki Uygulamaları.....	57
3. MATERYAL VE METOT.....	59
3.1. Deneysel Çalışma.....	62
3.2. Sayısal Çalışma.....	66
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	75
4.1. Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi.....	85
5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	90
ÖZGEÇMİŞ.....	96

ÖZET

Sac metal malzemeler, otomotiv ve beyaz eşya gibi sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler bükme kalıplarıyla şekillendirilmektedir. Kalıplardan çıkan ürünün ölçü, biçim ve konum açısından belli toleranslar içerisinde olması gerekmektedir. Bu tolerans değerlerini yakalamada karşılaşılan en önemli problem, geri yaylanma davranışdır. Bu çalışmada, sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri olan V kalıpla bükme işleminde meydana gelen geri yaylanma davranışı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Geri yaylanma davranışı, 45x90 mm ebatlarında, 1, 1.5 ve 2 mm kalınlıklarında farklı kalitelerde sac malzemeler (DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05) ve 60, 90 ve 120°'lik kalıp açılarına sahip V bükme kalıpları kullanılarak incelenmiştir. Autoform programı kullanılarak sonlu elemanlar analiz yöntemiyle geri yaylanma davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, lineer olmayan regresyon analiz yöntemiyle geri yaylanma açısı matematiksel olarak modellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri Yaylanma, Sac, V bükme, Sonlu Elemanlar Analizi, Autoform, Regresyon Analizi.

SUMMARY

Investigation of Springback Behaviour in Sheet Metal Bending

Sheet metal materials have a wide usage area in automotive and white goods industries. These materials are generally formed by bending dies. The formed product need to be in defined tolerances with respect to measurement, position and form. Springback behavior is the most common problem of ensuring these tolerances. In this study, springback behavior caused by the mostly used method of V die bending in sheet metal forming, is investigated both numerically and experimentally. Springback behavior is investigated by using V bending dies which have 45x90 mm dimensions, 1, 1.5 and 2 mm thickness, different qualities (DP800, DP600, DC01, DC04 and DC05) and 60, 90 and 120° die angles. Numerical study of springback behavior is investigated with finite element method by using Autoform software. Experimental results are compared with numerical results. In addition, the springback angle is mathematically modeled by using nonlinear regression analysis method.

Keywords: Springback, Sheet, V bending, Finite Element Analysis, Autoform, Regression Analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Çelik sac üretimde kullanılan bir tesisin genel olarak üretim akışı	11
Şekil 2.2. Çelik sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması..	19
Şekil 2.3. Çift fazlı çelik sacın mikro yapısı	22
Şekil 2.4. DP ve HSLA çelik saclarının gerilim - gerinim grafikleri.....	23
Şekil 2.5. TRIP sacların mikro yapısı	24
Şekil 2.6. TRIP ve HSLA malzemelerinde delik uzamasının karşılaştırılması.....	25
Şekil 2.7. DP, TRIP ve HSLA saclarının gerilim - gerinim grafikleri	26
Şekil 2.8. Kesme işleminin şematik çizimi	27
Şekil 2.9. Giyotin makasta kesme işleminin aşamaları	28
Şekil 2.10. Gererek şekillendirme işlemi	29
Şekil 2.11. Silindirik bir kabın derin çekme işlemi	29
Şekil 2.12. Sıvama yönteminin aşamaları	30
Şekil 2.13. Çeşitli sac bükme işlemleri	31
Şekil 2.14. V bükme işleminin safhaları	31
Şekil 2.15. Serbest bükme işlemi	32
Şekil 2.16. Kenar bükme işlemi	32
Şekil 2.17. a) Çift etkili bükme işlemi, b) Ezerek bükme işlemi	33
Şekil 2.18. Döndürerek bükme işlemi	33
Şekil 2.19. U kalıpta bükme işlemi	34
Şekil 2.20. Bükme işleminde oluşan gerilmeler ve nötr (tarafsız) eksen	34
Şekil 2.21. Bükme işlemindeki parametreler	35
Şekil 2.22. Bükmedeki gerilme - gerinme dağılımı	36
Şekil 2.23. Bükme işlemindeki sac kalınlığı ile parça eninin değişmesi	36
Şekil 2.24. V bükme operasyonun şematik görünümü.....	36
Şekil 2.25. AB yayının bükme sonrası oluşan deformasyonu.....	37
Şekil 2.26. Haddelme yönü ve bükme işlemi	39
Şekil 2.27. Sünek bir metaldeki geri esnemenin akma diyagramı üzerinde gösterilişi.....	40
Şekil 2.28. Bükme işlemi sonrasında oluşan geri yaylanma	41
Şekil 2.29. R/t oranı ile geri yaylanma faktörü arasındaki bağıntı	43
Şekil 2.30. Tasarımdan imalata geçiş sürecinde simülasyonların görevleri.....	58

Şekil 3.1. Çekme test cihazı	61
Şekil 3.2. Çekme testi numune ölçüleri.....	61
Şekil 3.3. Catia V5 programından alınan kalıpların tasarımı a)60° b)90° c)120°	62
Şekil 3.4. Kalıp elemanlarının ölçüleri.....	63
Şekil 3.5. Çelik sac malzemelerin kesme işleminde kullanılan giyotin makas.....	63
Şekil 3.6. Bükme deneyi düzeneği	64
Şekil 3.7. Bükme işleminin basamakları a)Sacın yerleştirilmesi b)Bükmenin başlaması c)Zımbanın son noktası d) Zımbanın kalkması ve işlemin sonlanması.....	65
Şekil 3.8. Dijital açı ölçer yardımıyla açı ölçümünün yapılması	65
Şekil 3.9. Kalıp elemanlarının ve sac malzemenin pozisyonu	66
Şekil 3.10. Autoform yazılımının ara yüzü	67
Şekil 3.11. a) New file penceresi b) Mesh penceresi c) Geometri generator penceresi	68
Şekil 3.12. Yüzey modellerinin mesh görünümü	68
Şekil 3.13. Simulation type penceresi	69
Şekil 3.14. Title ve Blank kartları	69
Şekil 3.15. Tools ve Lube kartları	70
Şekil 3.16. Process ve Control kartları	71
Şekil 3.17. Bükme operasyonunun simülasyon aşamaları	72
Şekil 3.18. Geri yaylanma sonucunun yazılım üzerinde gösterilmesi	72
Şekil 3.19. Şekillendirme Sınır Diyagramının genel açıklaması.....	73
Şekil 3.20. Autoform'da şekillendirme sınır diyagramının gösterimi	74
Şekil 3.21. Kuvvetin zamanla değişimi ve eleman sayısının zamanla değişimi grafikleri .	74
Şekil 4.1. Bükme işlemi uygulanan deney numuneleri	75
Şekil 4.2. Numunelerin hadde yönünün gösterimi	75
Şekil 4.3. DC05 sacının geri yaylanma grafiği	76
Şekil 4.4. DC04 sacının geri yaylanma grafiği	77
Şekil 4.5. DC01 sacının geri yaylanma grafiği	78
Şekil 4.6. DP600 sacının geri yaylanma grafiği.....	79
Şekil 4.7. DP800 sacının geri yaylanma grafiği.....	80
Şekil 4.8. Şekil değişimine uğrayan bölgelerin gösterimi.....	81
Şekil 4.9. Farklı kalınlıklardaki sacın ŞSD grafikleri	82
Şekil 4.10. 1.5 mm kalınlığındaki numunelerin deneysel sonuçları	83
Şekil 4.11. 1.5 mm kalınlığındaki numunelerin sayısal sonuçları	83
Şekil 4.12. 1.5 mm kalınlığındaki numunelerin deneysel ve sayısal sonuçları.....	84

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Sıcak haddelenmiş çelik sac malzeme standartları	13
Tablo 2.2. Soğuk haddelenmiş çelik sac malzeme standartları	16
Tablo 2.3. Metalürjik özelliklerine bağlı olarak çelik sac malzemelerin sınıflandırılması	18
Tablo 2.4. Farklı kalitelerdeki yüksek mukavemetli sacların mekanik özellikleri	21
Tablo 2.5. Çift fazlı çelik sacların kimyasal bileşimi	24
Tablo 2.6. Açınım hesabı için T düzeltme faktörü	38
Tablo 2.7. Sonlu elemanlar ile analiz yapan mevcut yazılımlar	55
Tablo 3.1. V kalıpla bükme işleminde kullanılan işlem parametreleri	59
Tablo 3.2. Bükme işleminde kullanılan deney tasarımı.....	60
Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan çelik sac malzemelerin mukavemet özellikleri	62
Tablo 3.4. Çelik sac malzemelerin kimyasal bileşimleri	62
Tablo 4.1. DC05 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri	76
Tablo 4.2. DC04 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri	77
Tablo 4.3. DC01 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri	78
Tablo 4.4. DP600 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri.....	79
Tablo 4.5. DP800 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri.....	80

KISALTMALAR

ABS	: American Bureau of Shipping
AISI	: American Iron and Steel Industry
AHSS	: Advanced High Strength Steels
API	: American Petroleum Institute
ASM	: American Society for Metals
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BH	: Fırında Sertleşebilen Saclar (Bake Hardenable Steels)
BS	: British Standards
C	: Karbon
CAD	: Computer Aided Design
CIMNE	: Uluslar Arası Mühendislikte Sayısal Yöntemler Merkezi
CMn	: Karbon Manganezli Saclar (Carbon Manganese Steels)
CNC	: Computer Numerical Control
CP	: Kompleks Fazlı Saclar (Complex Phase Steels)
Cr	: Krom
CQ	: Commercial Quality (Ticari Kalite)
DFE	: Die Face Engineering
DIN	: Deutsches Institut für Normung
DMS	: Düşük Mukavemetli Saclar
DP	: Çift Fazlı Saclar (Dual Phase Steels)
DQ	: Drawing Quality (Derin Çekme Kalitesi)
DQSK	: Drawing Quality Special Killed
EN	: Euronorm
Fe	: Demir
GYMÇ	: Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar High Strength Low Alloy Steels
HSS	: High Strength Steels
IF	: Arayer Atomsuz Saclar (Intersititial - Free Steels)
IF-HS	: Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar High Strength Intersititial - Free Steels
IS	: İzotropik Çelikler (Isotropic Steels)
ISO	: International Organization for Standardization
JIS	: Japanese Industrial Standards
LSS	: Low Strength Steels
MART	: Martenzitik Saclar (Martenzitic Steels)
MILD	: Yumuşak Saclar (Mild Steels)
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden

N	: Azot
Nb	: Niyobyum
P	: Fosfor
S	: Kükürt
SAE	: Society of Automotive Engineers
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
Si	: Silisyum
ŞSD	: Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram, FLD)
Ti	: Titanyum
TRIP	: Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar Tranformation Induced Plasticity Steels
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TWIP	: Twinning Induced Plasticity
UNI	: Ente Nazionale Italiano di Unificazione
YMS	: Yüksek Mukavemetli Saclar
V	: Vanadyum

SEMBOLLER LİSTESİ

b	: Parça genişliği
c	: Zımba ile kalıp arasındaki boşluk
C	: w/t oranına bağlı katsayı
E	: Elastisite (Young) Modülü
K	: Geri yaylanma faktörü
l	: AB yayının uzunluğu,
l_n	: Nötr eksen uzunluğu
l_b	: Sacın bükülecek kısmının bükmeden önceki uzunluğu
n	: Pekleşme üsteli
P_v	: V bükme kuvveti
R	: Bükme yarıçapı
R_d	: Kalıp yarıçapı
R_p	: Zımba yarıçapı
t	: Sac kalınlığı
T	: Düzeltme Faktörü
ν	: Poisson oranı
w	: Kalıp ağız genişliği
y	: AB yayının nötr eksene uzaklığı
ε	: Birim şekil değiştirme
$\Delta\theta$	: Geri yaylanma açısı
θ	: Bükme açısı
θ_g	: Geri yaylanma açısı
$\theta_{g(0)}$	: Haddelemeye paralel yöndeki geri yaylanma açısı
$\theta_{g(90)}$	: Haddelemeye dik yöndeki geri yaylanma açısı
ρ	: Nötr eksen yarıçapı
σ	: Gerilme
σ_{ak}	: Akma mukavemeti
σ_{ζ}	: Çekme mukavemeti

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile başlayan ve günümüz itibariyle artan teknolojik gelişmeler, diğer sektörlerde olduğu gibi sac metal malzeme işleme sektöründe de kullanıcı gereksinimlerinin artmasına neden olmaktadır. Sac malzemeler, başta otomotiv sektörü olmak üzere havacılık sanayinde, mutfak eşyalarında, endüstriyel araç - gereçlerde, makine imalatında, inşaat sektöründe ve sayamadığımız daha birçok alandaki uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Üretim işlemlerinde çok çeşitli sac metal malzemeler kullanılmaktadır. Üretimi yapılacak olan parçanın şekline ve istenilen özelliklerine bağlı olarak malzemeler, en basit sac malzemelerinden yüksek mukavemetli sac malzemelerine kadar geniş bir yelpazede tercih edilebilmektedir.

Sac malzemelerin şekillendirilmesi; derin çekme, bükme, delme ve kesme gibi birçok yöntemi kapsamaktadır. Sac metal şekillendirilme yöntemlerinden biri olan bükme işlemi, sanayide mutfak eşyalarından uçak gövdesine kadar her alanda yaygın olarak kullanılmakta olup, V bükme, U bükme, kenar bükme ve serbest bükme gibi çeşitleri vardır. Bükme işlemi, ısıtılarak veya ısıtılmadan ve talaş kaldırma işlemi yapılmadan malzemenin bir eksen etrafında şekillendirilmesi işlemidir. Bükme işleminde, bazen malzeme özelliklerinden, bazen de imalat parametrelerinden kaynaklı çeşitli sorunlarla karşılaşılabilir. Ölçüsel hatalar, bu sorunların en önemlilerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bükme işlemi sonrasında, böyle bir hata durumunda, istenilen nihai parça boyut ve geometrisine ulaşamadığı için parçanın montajı gerektiği gibi gerçekleştirilememektedir. Bu durumda parça hurda olarak atılmakta ve maddi kayıplar ortaya çıkmaktadır.

Bükme işleminde en sık karşılaşılan ölçüsel hata türü geri yaylanmadır. Büküm sırasında uygulanan kuvvetin kalkmasıyla malzeme eski halini almaya çalışır ve malzeme bir miktar esner. Sac malzemenin, büküldüğü açı değeri ile şekillendirilmeden sonraki gerçek açı değeri arasındaki fark olarak ifade edilen geri yaylanma, malzemenin elastik davranışından kaynaklanmaktadır. Geri yaylanma, sac metal malzemelerin montaj sürecinde birtakım problemlere neden olarak imalatı zorlaştırmakta ve ürün maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle geri yaylanmanın önceden tahmin edilmesi ve kontrolü, bükme işleminin kalitesini artırmak ve düşük maliyetli parçalar meydana getirmek açısından çok önemlidir.

Sac metal malzemelerin bükme ile şekillendirilmesinin araştırılmasında deneysel ve sayısal olmak üzere iki temel yöntem bulunmaktadır. Deneysel yöntemlerle gerçekleştirilen araştırmalarda elde edilen sonuçlar gerçek verileri oluşturmaktadır. Fakat bu yöntem zaman alıcı ve oldukça maliyetli bir yöntemdir. Sayısal yöntemlerle yapılan araştırmalar ise maliyetten ve zamandan kazanç sağlamaktadır. Sac şekillendirmede kullanılan matematiksel ifadelerin çözümünün bulunması oldukça zordur. Bu zorluğun aşılmasında bilgisayar kullanılması mecburiyet arz etmektedir. Temeli sonlu elemanlar metoduna dayalı bilgisayar analiz yazılımları sayesinde, değişik malzeme çeşitleri ile farklı malzeme boyutlarındaki sac parçaların bükülmesinde meydana gelen geri yaylanma olayı tahmin edilebilmektedir. Günümüzde ihtiyaca bağlı olarak çeşitli sonlu elemanlar analiz yazılımları bulunmaktadır.

1.1. Konu ile İlgili Literatür Araştırması

Bükme işleminin, zaman ve maliyet kaybı oluşturan en önemli problemlerinden birisi olan sac malzemelerin geri yaylanma davranışının farklı malzemeler üzerinde belirlenmesine ve telafisine yönelik olarak birtakım araştırmalar yapılmış olup bunlar aşağıdaki bölümde sunulmuştur.

Geri yaylanma ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde;

Wang vd. (1993), serbest bükme ve kalıpla bükme işlemleri ile U kalıp, V kalıp ve silme (sıyırma) kalıplarının simülasyonu için Bend adında bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yuan (1996) tarafından yapılan bir çalışmada, malzeme plastik deformasyona maruz kaldıktan sonra, yükün kaldırılmasıyla malzeme içindeki gerilmelerin yeniden elastiki dağılımıyla, geri yaylanma azaltılmaya çalışılmıştır. Mühendislikte kompozit sac malzemelerin kullanımının artmasıyla, bu malzemeler üzerindeki geri yaylanmayı tespit etmek için bir matematiksel model ile çözümü araştırılmıştır.

Micari vd. (1997), üç boyutlu presleme işlemlerinin bazılarında geri yaylanmanın etkisini araştırmışlardır. Malzeme olarak 6 mm kalınlığında alüminyum alaşımı sac malzeme kullanılmış ve bu malzemeye de V kalıp ve U kalıp bükme işlemleri uygulanmıştır. Nilsson vd. (1997), V bükmedeki geri yaylanmanın telafisini çeşitli kalınlıklardaki sekiz farklı malzeme için sonlu elemanlar metodu ile test etmişlerdir.

Simülasyondan elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçları kıyaslayıp bu sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir. Leu (1997), basit bükmede maksimum bükme momentini, bükülebilirliği ve geri yaylanmayı tahmin etmek için normal anizotropik değerini ve pekleşme üstelini içeren bir yaklaşım geliştirmiştir. Tahmin edilen değerler ve yayınlanmış çalışmaların sonuçları arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Sriram vd. (1997), sinterlenmiş bakır levhaların üzerindeki V bükme prosesinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırmalarını yapmışlardır. Zhang vd. (1997), çelik, pirinç ve bakır olmak üzere üç farklı sac malzemenin V kalıp bükme işlemi sonucu oluşan geri yaylanma miktarlarını bir dizi deneysel çalışmalar yaparak incelemişlerdir. Çalışmada bükme açısı, panç radyüsü, kalıp radyüsü ve malzeme kalınlığı değişken parametreler olarak kullanılmıştır.

Forcellese vd. (1998), sonlu elemanlar metodu ile 90°'lik bir V kalıp bükme işlemini analiz etmişlerdir. Malzeme olarak AA5083 alüminyum alaşımı sac malzeme kullanılmıştır. Analiz sonuçları ile deneylerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Tekaslan ve Şeker (1998), bükme kalıplarının tasarlanması ve geri yaylanmanın azaltılması için son yıllarda yapılan çalışmaları incelemişler ve bir durum değerlendirmesi yaparak bu konuda yapılacak araştırmalara ışık tutmaya çalışmışlardır. Tekaslan (1998) çalışmasında, bükme kalıplarında geri yaylanmanın deneysel olarak tespiti hakkında bir araştırma yapmak için modüler "V bükme" kalıbı tasarlamıştır. Farklı bükme açılarında, çeşitli sac malzemelerin geri yaylanma miktarlarını tespit etmiştir.

Asnafı (2000), 7.9 mm ile 31.3 mm aralığında değişen farklı paslanmaz çelik levhaların geri yaylanması ve kırılması üzerine çalışmıştır. Çeşitli kalınlıklarda dokuz farklı paslanmaz grubunu test etmiştir. İstikrarlı bir matematiksel modeli geri yaylanmanın tahmini için oluşturmuş ve deneysel verilerle karşılaştırarak sonuçların iyi bir ilişki içinde olduğunu görmüştür. Ayrıca bükme operasyonlarının hiçbirinde kırılma oluşmadığını gözlemlemiştir. Gau ve Kinzel (2001), kenar bükme operasyonlarında geri yaylanma tahminlerine Bauschinger etkisinin belirlenmesi için bir deneysel araştırma yürütmüşlerdir.

Inamdar vd. (2002), farklı takım geometrisi kombinasyonlarını kullanarak beş farklı malzemenin serbest V bükme işlemini yapmışlardır. Yapılan deney sonuçları kullanılarak istatistiksel modeller yardımıyla geri yaylanma analizleri gerçekleştirmişlerdir. Önemli faktörler olan malzemenin özelliklerini ve geometrik parametrelerin etkileşimlerini saptamışlardır. Ayrıca bu sonuçları fiziksel olarak yorumlamışlardır. Keum ve Han (2002), farklı alüminyum alaşımlarının bükme sonrası geri yaylanma değerlerinin farklı

şekillendirme sıcaklıklarındaki etkilerini incelemişler ve sıcak şekillendirmenin geri yaylanma miktarlarını azalttığını tespit etmişlerdir. Esat (2002) çalışmasında, düşey ve dönel zımbayla açısız bükme, kenar bükme, serbest ve kalıpla V bükme işlemlerinde, alüminyum ve çelik sacların benzetimini yapmak, geri yaylanma miktarlarını, toplam eşdeğer plastik gerinimleri ve Von Mises gerilmelerini belirlemek için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla deneysel ve literatürde bulunan formüllerden elde edilen sonuçların iyi bir uyum içinde olduğunu gözlemlemiştir. Li vd. (2002) çalışmalarında, malzeme katılma modelinin, serbest V bükme işleminde meydana gelen geri yaylanma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Esat vd. (2002), farklı kalınlıktaki 2000 ve 6000 serisi alüminyum malzemelerin farklı açılardaki kalıplarda geri yaylanmasını deneysel ve sonlu elemanlar programı ile karşılaştırmışlardır. Kalınlık arttıkça geri yaylanmanın bu malzemeler için azaldığını tespit etmişlerdir. Akma mukavemeti arttıkça geri yaylanmanın arttığını da vurgulamışlardır.

Chan vd. (2004), alüminyum sac malzemede V bükme işleminden sonra oluşan geri yaylanmanın farklı panç - kalıp parametrelerine göre nasıl değiştiğini sonlu elemanlar yazılımı paket programı ile belirlemişlerdir. Geri yaylanmanın panç radyüsü, panç açısı ve kalıp kenar radyüsüne bağlı olduğunu göstermişlerdir. Tekiner (2004) çalışmasında, farklı kalınlık, malzeme ve kalıp açılarındaki geri yaylanma miktarlarını farklı metotlar kullanarak incelemiştir. Kullandığı malzemeler için bükme açısı arttıkça geri yaylanmanın arttığını vurgulamıştır.

Yanagimoto vd. (2005), yüksek mukavemetli saclar üzerinde bir dizi sıcak ve ılık sac şekillendirme deneyleri gerçekleştirmişler ve geri yaylanma miktarı üzerinde şekillendirme sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Şekillendirme sıcaklığı 750 K'den daha yüksek olduğunda geri yaylanma miktarının önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir. Andersson (2005) yaptığı çalışmasında, farklı malzemelerin geri yaylanma davranışlarını incelemiş ve deneysel çalışmaları sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmıştır. Ling vd. (2005), sac parçaları L bükme prosesinde geri yaylanma analizini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak Abaqus programı yardımıyla incelemişlerdir. Analiz sonucunda geri yaylanmayı etkileyen faktörleri tespit etmişlerdir.

Tekaslan vd. (2006), çelik sac malzemelerin V bükme kalıplarında geri yaylanmasının deneysel olarak araştırmasını yapmışlardır. Çalışmalarında 15 farklı kalıpta 150'den fazla numune bükülmüş ve geri yaylanma miktarlarını elde etmişlerdir. Bruni vd. (2006), sıcak ve soğuk olarak şekillendirilmiş AZ31 magnezyum alaşımı malzemesinin

serbest bükmedeki geri yaylanmalarını tespit etmişlerdir. Uysal (2006) çalışmasında, örnek seçilmiş bir parça üzerinde farklı malzemeler kullanarak, soğuk şekillendirme ve geri yaylanma simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Simülasyonlarda farklı tür çelik sac malzeme kullanılarak yüzey basınçları, form verilebilirlik, geri yaylanma davranışlarını karşılaştırmıştır. Fei ve Hodgson (2006), soğuk haddelenmiş TRIP çeliğinin, V bükme işlemiyle deneysel ve sayısal olarak geri yaylanmasını incelemişlerdir. Ayrıca değişken ve sabit elastisite modülü ile sürtünmenin geri yaylanma analizleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Abaqus programı kullanarak simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yenice (2006) çalışmasında, DP600, HSLA350, FeP04 malzemelerinin farklı açılarda, farklı radyüslerle ve farklı hadde yönlerinde V bükme operasyonunda bükülerek geri yaylanma miktarlarını deneysel olarak incelemiştir.

Garcia-Romeu vd. (2007), paslanmaz çelik ve alüminyum sac malzemelerin çekme deneyleri ile malzeme tanımları yaparak, serbest V bükme işleminde bükme testleri neticesinde oluşan geri yaylanma davranışlarını incelemişlerdir. Mori vd. (2007), ultra yüksek mukavemetli çelik sacların bükme işlemindeki geri yaylanma davranışını bir CNC pres kullanarak incelemişlerdir. Malzemenin etkisinin, kalınlıkta bitirme ezmesinin, şekil verme hızının ve alt ölü bölgede tutma zamanının V şekilli bükmede geri yaylanma miktarı üzerine etkisini araştırmışlardır. Gau vd. (2007), mikro sac metal şekillendirme işleminde pirincin geri yaylanma davranışını incelemek için etkili ve düşük maliyetli bir üç nokta bükme deneyi yapmışlardır. Yapılan deneyler boyunca kalınlık/ortalama tane çapı oranı ile geri yaylanma miktarı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Tekaslan vd. (2007), bükmede geri yaylanma miktarının tespiti için bir "V" kalıbı tasarlamışlar ve bu kalıpta 0.75 mm kalınlıktaki çelik sac malzemelerin farklı açılarda ne kadar geri esneyebileceklerini tespit etmişlerdir.

Mete (2007) çalışmasında, seçilen şekillendirme parametrelerine bağlı olarak, şekillendirme ve sonrasında oluşan geri yaylanma deformasyonlarının sonuçlar üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için U-kanal çekme modeli kullanmıştır. Yöntemin uygulanma şeklinden kaynaklanan değişkenlikler ve fiziksel sürecin tanımlanmasında ihtiyaç duyulan parametreler birbirinden bağımsız olarak incelenmiştir. Arslan (2007) çalışmasında, Al1050 malzemesinin geri yaylanma değerlerini deneysel olarak inceleyip Abaqus yazılımında sonlu elemanlar analizi yaparak karşılaştırmış ve geri yaylanma grafiklerini elde etmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının deneysel verilerle uyumluluğunu kanıtlamaya çalışmıştır.

Behrouzi vd. (2008), bükme teorisi kullanılarak ters geri yaylanma için bir optimizasyon algoritması ve sonlu elemanlar modelini sunmuşlardır. V bükme işlemi ile yapılan deneylerle sunulan algoritmanın doğruluğunu incelemişlerdir. Tekaslan vd. (2008a), bükme kalıplarında geri yaylanmanın deneysel olarak tespiti hakkında bir çalışma yapmışlardır. Modüler bir "V bükme" kalıbı tasarlayarak, bakır sac malzemelerin farklı bükme açılarındaki geri yaylanma miktarlarını tespit etmişlerdir. Zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilmesinin geri yaylanmayı azalttığını, artan malzeme kalınlığının ve bükme açısının geri yaylanma değerlerini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Kahraman (2008) çalışmasında, Dynaform yazılımı kullanarak otomotiv endüstrisinde kullanılan plastik deformasyon ile şekillendirilen üç parçanın simülasyonunu yapmış ve gerçek parçalardan alınan verilerle kıyaslamıştır. Erhuy (2008) çalışmasında, tek eksenli çekme deneyinde yük boşaltma süreci için tanımlanan efektif modülün deformasyona bağlı değişimi ve bu değişimin geri yaylanma tahminleri üzerine etkisini incelemiştir. H320LA kalitesinde ve 1.01 mm kalınlığında çelik sac malzeme kullanmıştır. Kenarı konkav formlarda bükülen saclarda ölçülen ve PamStamp 2G kodu ile yapılan simülasyonlardan tahmin edilen geri yaylanma açılarını karşılaştırmıştır. Sarıkaya (2008) çalışmasında, ısıtılma işlemi alüminyum malzemenin geri yaylanma karakteristiğine olan etkisini sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanarak sayısal ve deneysel olarak belirlemiştir. 1.6, 2 ve 2.5 mm kalınlıklarındaki iki farklı alüminyum sac malzemeye değişik ısıtılma işlemleri uygulandıktan sonra, 60, 90 ve 120° bükme işlemlerini yapmıştır.

Tekaslan vd. (2008b), bükme işleminden sonra oluşan geri yaylanma miktarının tespiti için "V" kalıbı tasarlamış ve farklı kalınlıklarda paslanmaz sac malzemelerin farklı açılarda geri yaylanma değerlerini tespit etmişlerdir. Asgari vd. (2008), iki farklı çeliğin Dynaform ve Autoform sonlu elemanlar yazılımlarında geri yaylanma davranışlarını belirlemiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Ayrıca yapılan analizleri farklı elastisite modülü ve sürtünme katsayısına göre yaparak bu özelliklerin geri yaylanma sonuçları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Autoform'un geri yaylanma tahminlerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu belirlemişlerdir. Wang vd. (2008), malzemenin geri yaylanma özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir metot kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, malzemenin özelliklerine göre bükme işlemi sonunda malzeme üzerinde elde edilen yükün ve geri yaylanma miktarının ilişkilendirilmesine çalışılmıştır. Sonuç olarak malzemenin geri yaylanma davranışı bu yöntem ile daha iyi tespit edilmiştir.

Toros vd. (2009), Al-Mg alaşımlarından 5754-O alaşımının V şekilli kalıpta geri yaylanma davranışını incelemişlerdir. Malzemelere ön gerilmeler uygulayarak malzemelerin akma noktalarını değiştirmiş ve bu ön gerilmelerin geri yaylanma üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Ön gerilmenin geri yaylanmaya pozitif etkisinin olmadığını görmüşlerdir. Ayrıca ETA-Dynaform programında analizler yapmışlar ve sonuçların deney sonuçlarına göre kabul edilebilir yakınlıkta olduğunu tespit etmişlerdir. Tekaslan ve Şeker (2009), V bükme kalıbı tasarlayarak, pirinç sac malzemelerin farklı bükme açılarındaki geri yaylanma miktarlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Üç farklı kalınlıktaki pirinç sacları büküp bilgisayar ortamında değerlendirerek geri yaylanma grafiklerini çıkarmışlar ve grafiklerin kullanılabilirliğini tartışmışlardır. Ayrıca zımbanın bükülen malzeme üzerinde bekletilmesinin geri yaylanmayı azalttığını, artan malzeme kalınlığının ve bükme açısının geri yaylanma değerlerini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Turan (2009) çalışmasında, buzdolabı kapı ve yan panellerinin şekillendirilmesinde sıklıkla kullanılan düz kenar bükme ve döner kalıpla kenar bükme işlemlerinin, farklı parametreler göz önüne alınarak, geri yaylanma üzerine etkilerini araştırmıştır. Her bir yöntem için, karbon sacı ve paslanmaz sac malzemelerinde, bükme radyüsü, kalıp açıklığı, hadde yönü ve flanş yükseklikleri değişkenlerini kullanarak, geri yaylanma davranışlarını incelemiştir. Öztürk vd. (2009), 5083 alüminyum malzemenin sıcak ve soğuk şekillendirmede geri yaylanma miktarlarını araştırmışlardır. Negatif sıcaklıkta ve 200C°'de oda sıcaklığına göre geri yaylanmanın arttığını ve 300C°'de ise geri yaylanma miktarının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Kılıç (2009) çalışmasında, DP600 malzemenin farklı hız, kalınlık ve genişlikteki geri yaylanma davranışlarını V kalıp kullanarak deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarda sac kalınlığının artmasıyla geri yaylanma miktarının önemli ölçüde azaldığı, genişliğin ise önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Sonlu elemanlar simülasyonlarında elde edilen sonuçlar bütün durumlarda deneysel sonuçlara göre daha düşük bulunmuştur. Kılıç vd. (2009) tarafından yapılan bir araştırmada ise, yüksek mukavemetli DP800 çelik sacının deformasyon hızına bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişimini ve V şekilli kalıpla bükme operasyonlarında geri yaylanma durumlarını incelemişlerdir. Ayrıca ETA-Dynaform simülasyon programını kullanarak şekillendirme işleminin analizlerini yapmışlar ve deneysel verilerle kıyaslamışlardır. Buna bağlı olarak, sayısal veriler ile deneysel verilerin uyumluluk göstermediğini tespit etmişlerdir.

Oya vd. (2010), Ls-Dyna yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemini kullanarak V bükme maruz kalan katmanlı çelik levhaların geri yaylanması üzerinde geometrinin etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarla analiz sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Yilamu vd. (2010), serbest V bükmede paslanmaz çelikle kaplı alüminyum sacın bükülmesi ve bükme sonrası oluşan geri yaylanmanın belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarla bükme boyunca sac kalınlıklarının değişimi, bükme açısı ve geri yaylanma gibi bükme karakteristikleri araştırılmış ve sonra sonlu elemanlar analizi ile geri yaylanmanın doğru tahmini tartışılmıştır. Sac takımı olarak 0.51 mm kalınlığında 430SS paslanmaz çelik ve 1.05 mm kalınlığında alüminyum kullanılmıştır. Zohir (2010) çalışmasında, 60° serbest V bükme işlemini 1 mm kalınlığında yumuşak çelik sac malzemesine uygulamıştır. Bu işlemi hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar yazılımlarından olan Abaqus programı yardımıyla sayısal olarak yapmış ve elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır.

Özdemir (2010) çalışmasında, serbest bükme kalıplarında geri yaylanmanın deneysel olarak tespitini ve sonlu elemanlar yöntemi ile tahminini yapmıştır. Modüler serbest V bükme kalıbı tasarlayarak, DKP ve paslanmaz çelik (AISI/SAE 304) sac malzemelerini kullanmıştır. Optik projeksiyon cihazı ile geri yaylanma miktarlarını tespit etmiş ve bu değerlerin sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan Marc-Mentat programında yapılan analizlerle karşılaştırmasını yapmıştır. Osman vd. (2010), serbest bükme işlemi için teorik bir model geliştirmişler ve V kalıp bükme deneylerini yürütmüşlerdir. Bu model ile V kalıp bükme deneylerini kıyaslamışlar ve buna dayalı V kalıp bükme işleminde geri yaylanmanın tahmini için yarı ampirik formülü önermişlerdir. Formülün doğruluğunu diğer iki bağımsız deneyin sonuçları ile kıyaslamasının yanı sıra sonlu elemanlar simülasyonu kullanarak onaylamışlardır.

S. Kim ve Lee (2011), bir dizi V bükme testleri boyunca soğuk haddelenmiş TRIP çelik sacların geri yaylanma üzerinde kalıntı östenit fazın etkilerini incelemişlerdir. Kalıntı östenit faz fonksiyonu artıkça TRIP sac çeliğinde geri yaylanma miktarının azaldığını göstermişlerdir. Özer (2011) çalışmasında, sac şekillendirme işlemlerinde bünye modellerin etkisini incelemiş ve bu amaçla eksenel simetrik ve kare levha çekme ile V bükme işlemlerinin simülasyonlarını yapmıştır. Sayısal analizleri 1 mm kalınlığında üç farklı sac malzeme kullanarak gerçekleştirmiştir. Simülasyon sonuçlarını değerlendirmek için çeşitli deneyler gerçekleştirmiş ve analitik hesaplamalar yapmıştır. Işıklı (2011) çalışmasında, DKP ve paslanmaz sac malzemelerinin geri yaylanma miktarlarını

belirleyebilmek için bir "V" bükme kalıbı tasarlamıştır. Deneylerden çıkan geri yaylanma değerlerinin yapılacak olan bükme kalıplarının tasarımına ışık tutmasını sağlamış ve bu problemin kısmen ortadan kaldırılmasına çalışmıştır.

Uçan (2011) çalışmasında, geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde oluşan geri yaylanmanın sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilmesini ve telafisini araştırmıştır. Geri yaylanma davranışını analiz edebilmek için, üç farklı büküm işlemini incelemiştir. DP, TRIP ve TWIP çeliklerinin geri yaylanma davranışlarını, pekleşme katsayısı ve pekleşme üstelinin geri yaylanma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bekar (2011) çalışmasında, DP600 çeliklerinde iki farklı problem için, U-büküm ve 7-flanşlı şekil vermeden sonra oluşan geri yaylanma miktarının ve varyasyonunun bir gürbüz optimizasyon çerçevesinde en aza indirilmesini incelemiştir.

Ötü ve Demirci (2012), AA5754 ve Al1050 alüminyum sac malzemelerini 60°'lik V kalıpta bükerek ön gerilmelerin geri yaylanmaya olan etkilerini incelemişlerdir. Geri yaylanma değerlerini bilgisayar ortamında değerlendirmişler ve grafiklerini çıkarmışlardır. Kullanılan zımbaların uç yarıçaplarının artması ile zımbanın malzeme üzerinde bekletilme süresinin ve sac malzeme kalınlığının artmasının geri yaylanmayı azalttığını tespit etmişlerdir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, geri yaylanmayı azaltmak için bahsedilen yöntemlerde, kalıp açısının, malzemenin geri yaylanma miktarına bağlı olarak değiştirilmesi ön görülmektedir. Bu amaçla, çeşitli sac malzemeler için deneysel çalışmalarla elde edilmiş geri yaylanma grafiklerinden yararlanılmaktadır. Fakat bu tür grafiklerin sayısı literatürde sınırlı sayıda malzeme için mevcuttur. Bu çalışma ile belirtilen eksikliği kısmen gidermek için, DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05 kalitelerindeki, 1, 1.5 ve 2 mm kalınlıklarındaki sac malzemelerin, hadde yönünde ve hadde yönüne dik olarak 60, 90 ve 120° kalıp açılarında yapılan bükme işlemleri sonucunda geri yaylanma miktarları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Literatür incelendiğinde, bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkı, bu çalışmada kullanılan deney parametrelerinin hepsinin bir arada kullanılarak yapıldığı çalışmaların çok az sayıda olması ve DC05 kalitesindeki sac malzemenin geri yaylanma davranışına

yönelik çalışmaların bulunmaması olarak vurgulanabilir. Ayrıca kullanılan diğer sac malzemelerin birbiriyle karşılaştırılmasına ve geri yaylanma açısının, malzemenin akma mukavemeti, kalıp açısı ve sac malzeme kalınlığına bağlı olarak matematiksel modellenmesine rastlanılmamıştır.

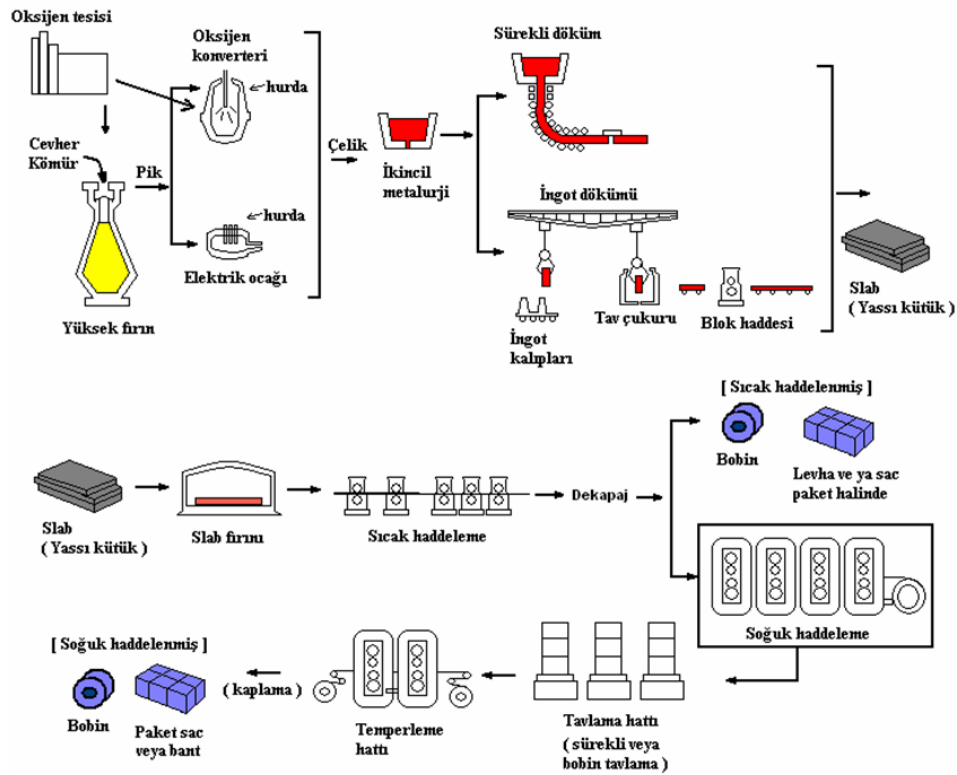
Bu tezin temel amacı; sac şekillendirme yöntemlerinden biri olan bükme operasyonları sonucunda form verilen çelik sac malzemelerde oluşan geri yaylanmanın doğru ve hassas bir şekilde tahmin edilmesidir. Bu sayede üretilen parçaların montajında yaşanacak problemlerin azaltılması veya ortadan kaldırılması, kalıp maliyetlerinin azaltılması ve ölçü tamlığına yaklaşılması sağlanacaktır. Ayrıca yapılan çalışmanın kalıp tasarımlarına ışık tutmasının yanı sıra kullanılan Autoform programının bükme işlemi simülasyonlarında kullanılabilirliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Tez kapsamında, geri yaylanmanın belirlenebilmesi için sonlu elemanlar simülasyonları yapılmış ve bu simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlarla simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu tezde yapılan çalışma beş ayrı bölümde hazırlanmıştır. İlk olarak giriş kısmında çalışma hakkında genel bilgiler verilmiş ve konuyla ilgili yapılan çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur. Ayrıca tezin amacına ve içeriğine de değinilmiştir. İkinci bölümde, çelik sac malzemeler, şekillendirme yöntemleri ve sonlu elemanlar yönteminden bahsedilmiştir. Burada bükme işlemi ve temel ölçüsel problem olan geri yaylanma konusundan detaylı olarak bahsedilmiştir. Bu aşamada geri yaylanmanın matematiksel ifadesi, telafisi ve bu problemi etkileyen parametreler aktarılmaktadır. Üçüncü bölümde, deneysel ve sayısal çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Deneysel çalışma kısmında çekme testleri ve bükme deneyleri anlatılmıştır. Sayısal çalışma kısmında ise, sonlu elemanlar analizinin yapıldığı Autoform yazılımı ve simülasyonun işlem basamakları anlatılmıştır. Ayrıca bu bölümde çalışmada kullanılan deney parametrelerinden (malzeme kalitesi, malzeme kalınlığı, kalıp açısı ve hadde yönü) bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise, sayısal ve deneysel çalışmaların sonuçları tablolar halinde verilmiş ve iki türde yapılan çalışma sonucunda elde edilen geri yaylanma verilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Son olarak, sonuçlar ve öneriler bölümü oluşturulmuştur. Burada sonuçlar tartışılmış ve gelecek dönemlerde benzer çalışma yapacak araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Çelik Sac Metal Malzemeler

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, sac metal malzemeler günlük hayatta, hava, kara ve deniz araçlarında, beyaz eşyalarda, mutfak eşyalarında, radyatörlerde, kazanlarda ve daha birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Kullanım alanlarına göre istenilen mekanik özelliklerde çok çeşitli sac metal malzemelerin üretimi yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, sac malzemelerin çelik türünde olanlarının araştırmaları yapılmıştır. Çelik sac malzemeler, ingot döküm veya sürekli döküm tesislerinden elde edilen dikdörtgen kesite sahip, slab adı verilen ara mamul çeliğin haddelenmesi ile üretilir. Üretim, demir cevherinden çelik saca kadar çok aşamalı olup sayıları oldukça fazla olan, birbirlerinden farklı üretim yapan tesislerin, organizasyonlarının yardımıyla gerçekleştirmektedir. Bunun için devasa büyüklükte bir fabrikaya ihtiyaç duyulmaktadır. Çelik sac üretimi için gerekli olan aşamalar Şekil 2.1'de verilmiştir (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.1. Çelik sac üretimde kullanılan bir tesisin genel olarak üretim akışı (Değirmenci, 2006)

2.1.1. Çelik Sac Malzemelerin Sınıflandırılması

Çelik sac malzemeler, gelişen endüstride beklenen ihtiyaçları karşılamak amacıyla günden güne çeşitlendirilmektedir. Bu çeşitlilikten kaynaklanan tanım karmaşasına yol açmamak için, her alanda olduğu gibi çelik sac malzemelerde de standardizasyona gidilmektedir.

Çelik sac malzemelerin sınıflandırılması, Avrupa standartlarındaki gibi ülkeler topluluğu bazında olabildiği gibi, ülke standartları ve hatta şirketlerin oluşturduğu standartlar olarak da karşımıza çıkmaktadır. Ülkemizin standartlarından TSE çelik sac malzemeler konusunda, çoğu ülkenin de uyguladığı gibi, Avrupa standardı EN'yi baz almaktadır. Diğer ülkelerde kullanılan standartlardan bazıları; Amerikan standartları (ASTM, AISI, SAE), Alman standardı (DIN), İngiliz standardı (BS), Japon standardı (JIS), İtalyan standardı (UNI) şeklindedir. Çelik sac malzemelerin şirket standartlarına Toyota, Renault, Ford vb gibi otomotiv imalatçılarının standartları; çelik sac malzeme üreten firmaların standartlarına da Erdemir, Arcelor, Corus kalite standartları örnek verilebilir. Bu standartların genelinde, birbirlerine göre küçük farklılıklar göze çarpsa da, temelde çelik sac malzemeler, üretim türü ve metalürjik özelliklerine göre sınıflandırılırlar (Değirmenci, 2006).

2.1.1.1. Üretim Yöntemine Göre Sınıflandırma

Üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmada çelik sac malzemeleri, sıcak haddelenmiş çelik sac malzemeler ve soğuk haddelenmiş çelik sac malzemeler olmak üzere iki bölüme ayırmak mümkündür.

Sıcak haddelenmiş çelik sac malzemelerin kimyasal içerik, üretim türü ve kullanım amaçlarına göre ayrılan çeşitlerinin EN standardına göre düzenlenmiş hali ve eşdeğer bazı standartları Tablo 2.1'de verilmiştir (Değirmenci, 2006).

Soğuk şekillendirmeye ve derin çekme işlemine uygun çelik sac malzemeler, azami akma, azami çekme dayanımı ve asgari uzama değerleriyle garanti edilirler. Düşük oranda karbon ihtiva ederler ve çok iyi kaynak kabiliyetleri vardır. Otomotiv sanayisi, çeşitli ev ve endüstri eşyaları, başlıca uygulama alanları olarak verilebilir (Değirmenci, 2006).

Tablo 2.1. Sıcak haddelenmiş çelik sac malzeme standartları (Değirmenci, 2006)

Çelik sac türü	İlgili Standart	Eşdeğer standartlar
Soğuk şekillendirme ve derin çekmeye uygun çelikler	EN 10111:1998	TS EN 10111:2001 ASTM A1011-01a
Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelikler	EN 10149-2:1996	TS EN 10149:1999 ASTM A1011-01a
Yapı çelikleri	EN 10025:1993 EN 10113-2(-3):1993	TS EN 10025:2006 TS EN 10113-2(-3):1996 ASTM A1011-01a
Atmosferik korozyon dayanımı iyileştirilmiş çelikler	EN 10155:1993	TS EN 10155:2002 ASTM A242 / A606
Yüksek karbonlu çelikler	EN 10083-1:1997 EN 10132-4:2000	TS EN 10132-1(-4):2002 DIN 17200
Su verilebilir bor alaşımlı çelikler	EN 10083-3:1995	DIN 1654 Teil 4
Sementasyon çelikleri	EN 10084:1998	ISO 683-11:1987
Boru çelikleri	EN 10208-2:1996	TS 6047 EN 10208-2:2005 API 5L:2000
Basıncılı kap ve kazan çelikleri	EN 10028-2:2003 EN 10207:2005 EN 10028-3:2003 EN 10028-5:2003	TS EN 10028:2003 TS EN 10273:2003 ASTM A285 / A414 / A299
LPG tüp çelikleri	EN 10120:1996	TS EN 10120:1999 JIS G3116:1991
Gemi yapım çelikleri	-	ABS-P2-00

Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelik sac malzemeler, iyi ölçüde süneklik, kontrollü içyapı temizliği, ince taneli içyapı ve düşük karbon içeriği özellikleriyle nitelendirilirler. Üstün mekanik özellikleri (yüksek dayanım, sertlik, yorulma dayanımı), iyi şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirlik özellikleriyle birleşir. Yük taşıma makinelerinin ana gövdeleri, tarım makineleri, jantlar, hava yastığı parçaları, köprü inşaatları, konteyner imalatları başlıca kullanım alanlarıdır. Bu çelik sac malzemelerin kullanılmalarındaki amaç ağırlık tasarrufu sağlamaktır (Değirmenci, 2006).

Yapı çelikleri sınıfındaki sıcak haddelenmiş çelik sac malzemeler, çok iyi kaynak edilebilme kabiliyetlerinin yanı sıra, asgari akma ve çekme dayanımları garanti edilen, tatmin edici sünekliğe sahip karbon-mangan çelikleridir. İnşaat endüstrisi ve makine konstrüksiyonlarında çeşitli bina parçaları, konteynerler, depolama tankları başlıca kullanım alanlarını oluşturur. Kaynak edilebilir ince taneli sıcak haddelenmiş yapı çelikleri, EN standartlarında diğer yapı çeliklerinden ayrı standart numaralarıyla ifade edilirler (Değirmenci, 2006).

Atmosferik korozyon dayanımı iyileştirilmiş çelik sac malzemeler, EN 10155:1993 standardına göre gösterilse de mekanik özellikler bakımından EN 10025-5:2004

standardının özelliklerini taşımaktadır. Asıl itibarıyla ince taneli yüksek dayanımlı yapı çelikleridir ve iyileştirilmiş şekillenebilme özelliklerine, atmosferik korozyona maruz kalan alanlarda kullanılabilme özelliği eklenmiştir. Bu tip çelik sac malzemelerin mekanik özellikleri bahsedilen standardın S355 kalitesine uymaktadır (Değirmenci, 2006).

Yüksek karbonlu çelik sac malzemeler, ısıt işlemlerinden sonraki yüzey sertlikleri ile ifade edilirler. Yüksek dayanımlıdır ve yorulma dayanımları oldukça iyidir. Bu yüzden yüksek dayanım gerektiren (örneğin tarım makinelerinin toprak işleyen kısımlarının imalatı gibi) yoğun darbeli uygulama alanlarında kullanılırlar. Kullanılacakları yerlere göre soğuk haddelenebilir veya ısıt işleme tabi tutulabilirler. Başlıca kullanım alanları, mekanik parçalar, kavramalar, testere ve tarım bıçaklarından oluşmaktadır. Yeniden haddelendiklerinden veya ısıt işlem gördüklerinden dolayı, mekanik özellikleri çok çeşitlenmektedir. Bu yüzden çelik sac malzeme üreten firmalar bu tip saclar için mekanik özellikleri garanti edememektedir. Kimyasal içeriklerindeki karbon oranları, en az karbon oranlı kalitesinde (C40E) %0.37 iken en yüksek karbon içeren kalitesinde (C100S) %1.050'ye kadar çıkabilmektedir. Cr, Ni, Mo gibi elementleri de kimyasal bileşimlerinde bulundurmaktadır (Değirmenci, 2006).

Su verilebilir bor alaşımlı çelik sac malzemeler, bileşimlerindeki bor elementi sayesinde sertleşmeye müsait sac malzemelerdir. Kontrollü ergitme, tazeleme ve termomekanik sıcak haddeleme sayesinde bu tip çelik sacların, sertliklerinde olağanüstü değerlerle beraber çok iyi tek biçim mikro yapıya ulaşmaları ve bu saclardan imal edilen parçaların ısıt işlemlerinden sonra mükemmel mekanik zorlanma performansına sahip olmaları sağlanır. Yapı ve otomotiv parçalarında kullanılmaları, örneğin ince taneli yüksek dayanımlı çeliklerle karşılaştırıldıklarında bile %50'ye varan, kayda değer bir şekilde ağırlık azalmasına yol açmaktadır (Değirmenci, 2006).

Sementasyon çelikleri sınıfındaki çelik sac malzemeler, ısıt işleme uygun çelikler grubundan olmakla beraber iyi derin çekilebilme özelliklerinin yanında, yüzey sertlik değerlerinin yüksek olduğu çelikler şeklinde ifade edilirler. Yüzeyleri sertleşirken mekanik özelliklerinde değişim olmamaktadır. Isıt işleminden sonra yüzeyde kazanılan yüksek sertlik sayesinde, aşınma direncinin iyi olması aranan niteliklerdendir. Çarpışma bariyerleri, şanzıman ve çeşitli dişli çark parçaları gibi mekanik aşınma ve güç iletimi gerektiren uygulamalar başlıca kullanım alanlarını oluşturur (Değirmenci, 2006).

Boru çelikleri, en belirgin özellikleriyle, düşük sıcaklıklarda yüksek dayanımlarını koruyan, şekillendirme özelliklerinden ziyade kaynak edilebilirlik özellikleri iyi olan çelik

sac malzemelerdir. Bu yüzden karbon eşdeğerlikleri düşük olacak şekilde kimyasal bileşimleri seçilir. Dünya genelinde Amerikan API standardına göre sınıflandırılırlar da bu standardın EN standartlarındaki karşılığı, EN 10208-2:1997 olarak ifade edilir (Değirmenci, 2006).

Basınçlı kap ve kazan imalatı amaçlı kullanılan çelik sac malzemelerin temel özellikleri, farklı sıcaklıklar içeren farklı atmosferler altında yüksek basınçlara dayanabilmeleridir. Yüksek basınçlara, standart yapı çeliklerden daha iyi dayanım gösteren bu tip çelik sac malzemeler, özel karbon-mangan çelikleridir. Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir, normalizasyon ile gerilme giderme tavlamalarının uygulanmasına ve mekanik şekillendirmeye elverişli malzemelerdir. Buhar kazanları, variller, basınçlı buhar içeren borular, ısı değiştirgeçleri gibi alanlarda kullanılırlar. Belirtilmiş yüksek sıcaklıklarda belli özelliklerini koruyan çelikler, basit basınçlı kap çelikleri, kaynak edilebilir ince taneli normalize edilmiş çelikler ve kaynak edilebilir ince taneli termomekanik haddelenmiş çelikler olmak üzere EN standartlarında sırasıyla; EN 10028-2:2003 (P235GH, P265GH, P295GH, P355GH) , EN 10207:2005 (P235S, P265S, P275SL), EN 10028-3:2003 (P275NH/NL1/NL2, P355N/NH/NL1/NL2) ve EN 10028-5:2003 (P420M/ML1) standart numaralarıyla gruplanmışlardır (Değirmenci, 2006).

LPG tüp çelikleri sınıfında olan çelik sac malzemeler, basınçlı kap çeliklerinin özel bir kategorisine dahildirler. Temel özellikleri derin çekilebilir olmaları ve yaşlanmamaları olarak ifade edilebilir. Çok iyi kaynak edilebilme özelliklerinin yanı sıra, kaynak bölgesinin ısıtılmasından sonra mukavemetlerini muhafaza etme özellikleri de bulunmaktadır (Değirmenci, 2006).

Gemi yapım çelikleri tüm dünya genelinde ABS P2-00 standardına göre, A ve B kaliteleri olmak üzere iki kalite halinde üretilirler. Gemi yapımı için sıcak haddelenmiş yapı çeliklerinin çok iyi kaynak edilebilirlik özelliklerine sahip olmaları gerekmektedir (Değirmenci, 2006).

Soğuk haddelenmiş çelik sac malzemelerin kimyasal bileşim, üretim türü ve kullanım amaçlarına göre ayrılan çeşitlerinin EN standartlarına göre düzenlenmiş standart numaraları ve eşdeğer bazı standartları Tablo 2.2'de verildiği gibidir (Değirmenci, 2006).

Soğuk şekillendirme ve derin çekme işlemlerine uygun soğuk haddelenmiş çelik sac malzemeler, alaşımsız ve düşük karbonlu çeliklerdir. En yüksek akma ve çekme dayanımı, en düşük süneklik (kopma uzaması) değerleri ile sınırlı olarak garanti edilirler.

Tablo 2.2. Soğuk haddelenmiş çelik sac malzeme standartları (Değirmenci, 2006)

Çelik sac türü	İlgili Standart	Eşdeğer standartlar
Soğuk şekillendirme ve derin çekmeye uygun çelikler	EN 10130:1999	TS 3813 EN 10130:2003 ASTM A366 CQ, A619 DQ, A620 DQSK, DIN 1623-1
Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelikler	EN 10268:1999	TS EN 10268:2005 ASTM 607:1993
Yapı çelikleri	EN 10130:1999	ARCELOR B30 SAE, CORUS CA(200-260), DIN 1623-2:1986

Şekillendirilebilirlik değerleri çok iyi olduğundan her türlü soğuk şekillendirme işlemlerine oldukça uyumlu olan sac grubudur. Otomotiv endüstrisi, çeşitli ev, ofis ve sanayi eşyaları, beyaz eşya endüstrisi, radyatörler ve vantilatörler başlıca kullanım alanlarını oluşturur. Kaplamasız olanları yiyecek ve içeceklerle ilgili alanlarda kullanılmaktadır. Yığın ve sürekli tavlama olmak üzere her iki tavlama yöntemiyle de üretilmiş çeşitleri vardır (Değirmenci, 2006).

Düşük karbonlu, alaşımsız, soğuk haddelenmiş çelik sac malzemeleri, ASTM standartlarına göre iki sınıfa ayırmak mümkündür. 1. sınıf (temper haddelenmiş), yüzey görünümünün önemli olduğu ve belirli bir yüzey kalitesi ve yüzey düzlüğü şartının sağlanmasının gerektiği uygulamalarda tercih edilir. 2. sınıf (son işlem olarak tavllanmış) ürünler ise tümüyle tavllanmış bir ürün sınıfı olup, görünümün daha az önemli olduğu, yüzey dokusu, süreksizlikler, düzlük ve Lüders bantları oluşum eğilimi konularında sınırlandırmaların uygun olmadığı durumlarda tercih edilir (Değirmenci, 2006).

Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik sac malzemelerin ASTM standardına göre diğer bir sınıflandırma şeklinde ise ticari kalite, derin çekme kalitesi ve özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesi olmak üzere üç grup mevcuttur (Değirmenci, 2006).

Ticari kalitedeki (CQ) düşük karbonlu çelik sac ve şeritler orta dereceli şekillendirmelere uygundur. Bu malzemeler, oda sıcaklığında ve bütün yönlerde, eğme bölgesinin dış yüzeyinde bir çatlak oluşmaksızın kendi üzerinde 1800 kez katlanabilme sünekliğine sahiptirler. Bu kalitedeki malzemeler, diğer hiçbir mekanik deney gereksinimine maruz bırakılmamakta ve bunlardan istisnai tekbiçim bir kimyasal bileşim ile mekanik özellikler beklenmemektedir. Belirli bir zaman içinde yaşlanmaları söz konusudur. Lüders bantlarının oluşumu istenmiyorsa, şekillendirmeden hemen önce bir germe veya temper haddeleme işlemine tabi tutulması gerekmektedir (Değirmenci, 2006).

Ticari kalitedeki elik sac malzemelerin sağlayamadığı daha yüksek süneklik ve daha tek biçim özellikler gerektiğinde derin çekme kalitesindeki (DQ) saclara başvurulur. Bu kalitedeki saclar, derin çekilmesi gereken parçaların imalatı için uygundur. Derin ekme kalitesindeki saclar da ticari kaliteye dahil olan saclar gibi yaşlanma özelliğine sahiptirler ve Lüders bantlarının oluşumu istenmiyorsa, şekillendirmeden hemen önce benzer işlemlere tabi tutulması gerekmektedir (Değirmenci, 2006).

şekillendirilen parçanın deformasyon derecesi daha yüksek ise ve Lüders bantlarının oluşumuna karşı direnç isteniyorsa, özel dinlendirilmiş derin çekme kalitesindeki (DQSK) düşük karbonlu elik sac malzemeler kullanılmaktadır. Bu kalitedeki saclar, özellikle yüksek derin ekilebilirliğin gerektiği parçaların imalatında ve bunun için gereken sünekliğin de derin çekme kalitesindeki saclar tarafından sağlanamadığı durumlarda tercih edilirler. Bu kalitedeki sacların şekillendirilebilirlik özellikleri kalıcı olmakta ve zamanla sac malzemenin mekanik özelliklerinde yaşlanma sonucu belirgin bir değişim görülmemektedir (Değirmenci, 2006).

Yüksek dayanım-düşük alaşımlı çelikler grubundan soğuk haddelenmiş elik sac malzemeler, içerdikleri düşük oranda mikro alaşım elementlerinin yanında, aynı zamanda düşük karbon oranlarıyla da nitelendirilirler. Bu zellik, bu grup elik saclara iyi derecede kaynak edilebilirlik ve kaplanabilirlik özellikleri sağlar. İnce taneli yapısı sayesinde yüksek dayanımlı olmaları, iyi derecede yorulma ve darbe dayanımı göstermeleri, zor şekillendirme işlemleri gerektirmeyen yapı parçalarının imalatında kullanılmalarını mümkün kılmaktadır. Otomotiv yapı parçaları, endüstriyel raf düzenekleri, mobilya ve mekanik yapı imalatı başlıca kullanım alanlarını oluşturur. Yığın ve sürekli tavlama olmak üzere her iki tavlama yöntemiyle de üretilmiş eşitleri vardır (Değirmenci, 2006).

Soğuk haddelenmiş yapı çelikleri, en düşük akma ve çekme dayanımı değerleriyle sınırlı olarak garanti edilen karbon-mangan elikleridir. Birçok yaygın uygulama için elverişlidir. Bu nedenle kalınlık ve genişlik bakımından piyasada en fazla çeşidi olan soğuk haddelenenmiş elik sac malzeme türüdür. Dayanımın şekillendirme ve süneklik özelliklerinden daha önemli olduğu yapı elemanları, depolama tankları veya konteynır imalatı gibi uygulamalarda genellikle kullanılırlar (Değirmenci, 2006).

2.1.1.2. Metalürjik Özelliklerine Göre Sınıflandırma

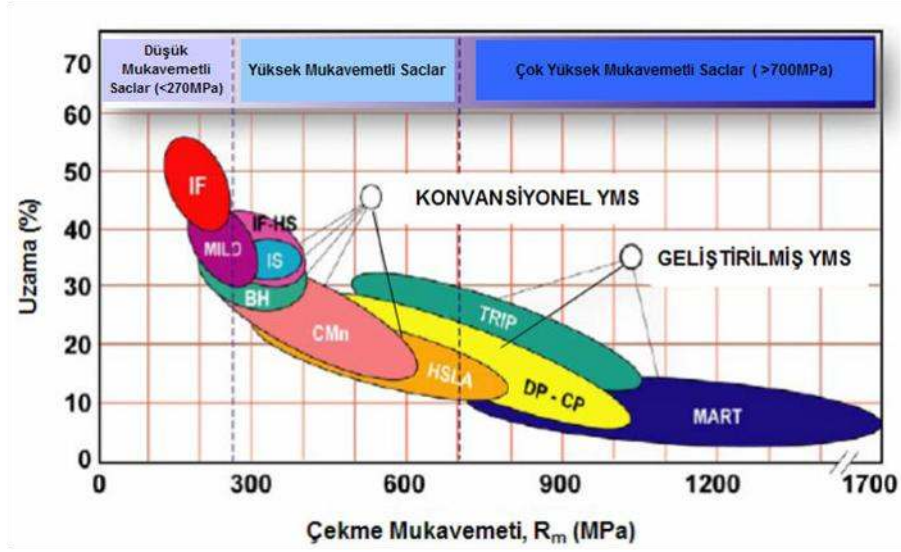
Çelik sac malzemelerin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan bir diğer yöntem ise metalürjik özelliklerine göre yapılan sınıflandırma sistemidir. Bu tip sac malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılan ifadeler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Metalürjik özelliklerine bağlı olarak çelik sac malzemelerin sınıflandırılması

Düşük Mukavemetli Saclar (DMS) Low Strength Steels (LSS)	Arayer Atomsuz Saclar Intersititial - Free Steels (IF)
	Yumuşak Saclar Mild Steels (MILD)
Yüksek Mukavemetli Saclar (YMS) High Strength Steels (HSS)	Fırında Sertleşebilen Saclar Bake Hardenable Steels (BH)
	İzotropik Çelikler Isotropic Steels (IS)
	Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar High Strength Intersititial - Free Steels (IF-HS)
	Karbon Manganezli Saclar Carbon Manganese Steels (CMn)
	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar High Strength Low Alloy Steels (HSLA)
Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler – (GYMÇ) Advanced High Strength Steels (AHSS)	Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar Transformation Induced Plasticity Steels (TRIP)
	Çift Fazlı Saclar Dual Phase Steels (DP)
	Kompleks Fazlı Saclar Complex Phase Steels (CP)
	Martenzitik Saclar Martenzitic Steels (MART)

Çelik sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması Şekil 2.2'de verilmiştir. Çekme mukavemet değerinin arttıkça önemli bir şekillendirme parametresi olan uzama değerinin hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. En yüksek uzama değerleri düşük mukavemetli çelik sac malzemelerde elde edilmektedir. Yüksek mukavemetli çelik sacların (HSLA) maksimum 800 MPa çekme mukavemet değerlerinde kullanılmaları dikkat çekicidir. Aynı çekme mukavemet değerine sahip HSLA, DP ve TRIP sacları bakıldığında, DP ve TRIP çelik sacların uzama değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Yenice, 2006).

Düşük mukavemetli çelik saclar, çekme mukavemet değer aralığı yaklaşık 200 - 300 MPa arası olan saclardır. Bu sac tipleri, kaliteleri IF, MILD olarak ifade edilen arayer atomsuz saclar ve yumuşak saclardır. Malzeme kısa tanımlarında belirtilen değerler, minimum akma mukavemet değerleridir. Örnek olarak IF 300 arayer atomsuz çelik sacın minimum akma mukavemeti 300 MPa'dır (Yenice, 2006).



Şekil 2.2. Çelik sac malzemelerin çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması (AHSS Application Guidelines, 2005)

Arayer atomsuz çelik saclar, düşük akma mukamevetleri, yüksek uzama ve iyi derin çekilebilirlik özellikleri nedeniyle çok iyi şekil verilebilirlik özellikleri gösterirler. Bu tür saclar vakum gaz giderme ekipmanları yardımıyla üretilirler. Karbonitür oluşturu elementlerin ilave edilmesiyle derin çekilebilirlik ve yaşlanmama özellikleri daha da geliştirilebilir. Bu amaçla katılan niyobyumun (Nb) etkisi, düzlemsel anizotropiyi geliştirme ve kulaklanma olayını azaltma yönündedir. Bunun nedeni soğuk haddeme işleminden daha önce sıcak haddelenmiş yapının küçük tane boyutlu olmasıdır. Niyobyumun etkisini artırmak amacıyla malzemeye titanyum (Ti) ilavesi de yapılabilir. Ayrıca arayer atomsuz sacların akma mukavemetlerini artırmak için fosfor (P) kullanılabilir. Fosfor genel olarak bilenen en etkili katı - eriyik sertleşmesine yol açan elementtir. Bu malzemeler fosforlu IF sacları olarak adlandırılırlar. IF sacları fosfor elementinin de eklemesi ile 260 MPa'lık bir akma mukavemetine ulaşabilir. IF 180, IF 220 ve IF 300 örnek çelik sac malzeme kaliteleridir.

Yumuşak çelik saclar, ferritik yapıdadırlar. Yüksek normal anizotropi değerine sahip olduklarından dolayı derin çekmeye uygundurlar. Akma mukavemetleri 100 MPa seviyelerinde olan yumuşak sac kaliteleri mevcuttur, bunlar özellikle çekilmesi çok zor olan parçalarda kullanılırlar. Çekme mukavemetleri ise 400 MPa seviyelerine ulaşmaktadır. XES, DC04 ve St12 örnek çelik sac malzeme kaliteleridir.

Yüksek mukavemetli saclar (konvansiyonel), çekme mukavemet değer aralığı yaklaşık 270 - 700 MPa'dır. Bu sac tipleri BH, IS, IF-HS, CMn ve HSLA sac kaliteleri olarak ifade edilen fırında sertleşebilen saclar, izotropik çelikler, yüksek mukavemetli

arayer atomsuz saclar, karbon manganezli saclar ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı saclardır. Malzeme kısa tanımlarında belirtilen değerler minimum akma mukavemet değerleridir. Örnek olarak Arcelor 300BH fırında sertleşebilen elik sacın minimum akma mukavemeti 300 MPa'dır, HSLA 400 yüksek mukavemetli düşük alaşımlı sacın minimum akma mukavemeti 400 MPa'dır. Alternatif olarak kısa malzeme tanımında minimum akma ve çekme mukavemet değerleri beraber de verilebilir. Örnek verilecek olursa, HSLA 350/450 elik sacı için minimum akma mukavemet değeri 350 MPa, minimum çekme mukavemet değeri ise 450 MPa'dır (Yenice, 2006).

Fırında sertleşebilen elik saclar, otomotiv imalatçılarının preslerinde kolayca şekil verilebilen ve düşük mukavemetli çeliklerdir. Bu tip elik sac malzemelere Arcelor 160BH ve Arcelor 300BH sac kaliteleri örnek verilebilir. Vakumla gazı giderilmiş sac malzemeler özel yaşlanma (bir çeşit akma mukavemetinde artış) karakteristikleri olan ürünler verir. Bu otomotiv sac ürünleri fırında sertleşebilir sac olarak bilinirler. Sac malzemeler preslerde form verilerek otomotiv gövdesi parçaları haline getirilmeden önce normal depolama sırasında yaşlanmaya dirençli olarak dizayn edilirler. Bununla beraber şekil vermede yaşlanmaya başlarlar ve boya pişirme fırınlarında ısıtıldıktan sonra malzeme tamamen yaşlanır. Orijinal sac özelliklerine göre yaklaşık 34 - 70 MPa'lık bir akma mukavemeti artışı nihai parçada elde edilir. Bu tür sac malzemeler form verilebilirlikten ödün verilmeden ezilmeye dirençli parçaların üretilebilmesini sağlarlar.

İzotropik elik saclar, ferritik mikro yapıdadırlar. Düzlemsel anizotropi değeri 0 olduğu için çekme operasyonu sırasında kulaklanma riski çok küçüktür. Gererek ve çekilerek form verilebilirlik değerleri yüksektir. Bu tip elik sac malzemelere Isotropic E220i ve Isotropic E260i sac kaliteleri örnek verilebilir.

Yüksek mukavemetli arayer atomsuz elik saclar, çekme mukavemetleri 400 MPa'ya kadar ulaşabilen saclardır. IF saclarının akma mukamevetleri genellikle düşüktür, akma mukavemetleri 150 MPa, ekme mukamevetleri ise 300 MPa civarındadır. IF saclarına fosfor, silikon ve mangan eklenerek mukavemetleri artırılmıştır. Çekme ve akma mukavemet değerleri IF saclarından yüksek olduğu için şekil verilebilirlikleri IF'ye göre daha düşüktür fakat diğer yüksek mukavemetli saclara göre oldukça yüksektir.

Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı elik saclar, 280 - 550 MPa arası yüksek akma mukavemet değerlerine sahiptir. Bu sac grubu küçük taneli ferrit yapıya sahiptir ve sacın sertleşme mekanizması genel olarak kimyasal yapılarında içerdikleri mikro alaşım elementlerinin (Ti, V, Nb vb.), karbon (C) ve/veya azot (N) ile oluşturduğu ökeltilerdir.

Tablo 2.4. Farklı kalitelereki yüksek mukavemetli sacların mekanik özellikleri (Yenice, 2006)

SAC MALZEME	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Pekleşme Üsteli	Anizotropi Değeri	Mukavemet Katsayısı (MPa)
BH 210/340	210	340	34-39	0.18	1.8	582
BH 260/370	260	370	29-34	0.13	1.6	550
DP 280/600	280	600	30-34	0.21	1	1082
IF 300/420	300	420	29-36	0.2	1.6	759
DP 300/500	300	500	30-34	0.16	1	762
HSLA 350/450	350	450	23-27	0.14	1.1	807
DP 350/600	350	600	24-30	0.14	1	976
DP 400/700	400	700	19-25	0.14	1	1028
TRIP 450/800	450	800	26-32	0.24	0.9	1690
DP 500/800	500	800	14-20	0.14	1	1303
CP 700/800	700	800	10-15	0.13	1	1380
DP 700/1000	700	1000	12-17	0.09	0.9	1521
Mart 950/1200	950	1200	5-7	0.07	0.9	1678
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6	0.065	0.9	2021

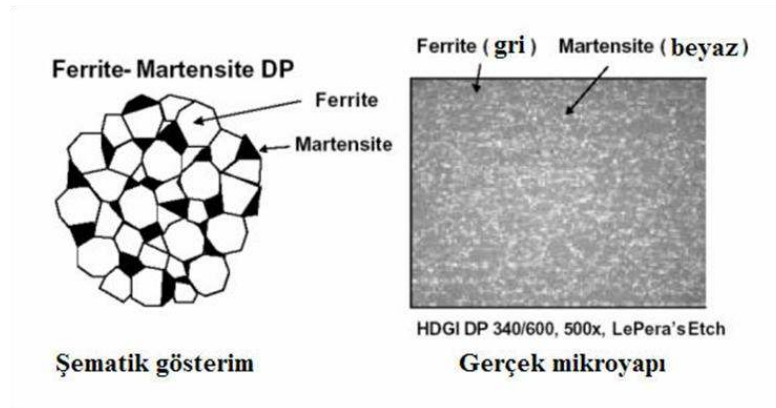
Yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmesini sağlayan alaşım elementleri olduğu için, bu saclara mikro alaşımlı çelik saclar da denir. Kimyasal bileşim içerisine mangan (Mn), fosfor (P) veya silisyum (Si) eklemek mukavemet değerini daha da artırır fakat form verme kabiliyetini düşürür. Bu tip çelik sac malzemelere HSLA 240, HSLA 400, HSLA 500, HSLA 700 sac kaliteleri örnek verilebilir.

Tablo 2.4'de farklı kalitelere bazı yüksek mukavemetli çelik sacların mekanik özellikleri verilmiştir. Koyu renkte verilen kaliteler konvansiyonel yüksek mukavemetli sacların, diğer kaliteler ise geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik sacların mekanik özelliklerini göstermektedir (Yenice, 2006).

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik saclar, çekme mukavemet değer aralığı yaklaşık 450 - 1700 MPa'dır. Bu sac tipleri, kaliteleri DP, TRIP, CP ve MART olarak ifade edilen çift fazlı saclar, dönüşümle oluşturulan plastisite saclar kompleks saclar ve martenzitik saclardır. Malzeme kısa tanımlarında belirtilen değerler minimum çekme mukavemet değerleridir. Örnek olarak DP 600 çift fazlı sacın minimum çekme mukavemeti 600 MPa'dır, TRIP 800 dönüşümle oluşturulan plastisite sacının minimum çekme mukavemeti 800 MPa'dır. Alternatif olarak kısa malzeme tanımında minimum akma ve çekme mukavemet değerleri beraber de verilebilir. Örnek olarak DP 350/600

sacının, minimum akma mukavemet değeri 350 MPa, minimum çekme mukavemet değeri ise 600 MPa'dır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacların gerek deformasyon sertleşebilirlikleri gerekse form verilmiş durumda sahip oldukları çekme mukavemet değerleri çok yüksektir. Sac malzeme mukavemeti artıkça absorbe edeceği enerji miktarı da artmaktadır. Bu yüzden bu tarz sacların araçlarda kullanılması güvenlik açısından önem teşkil etmektedir. Ayrıca araç gövdelerinin yüksek mukavemetli saclardan yapılmasıyla düşük sac kalınlığından dolayı araç ağırlığı da hafifleyecektir (Yenice, 2006).

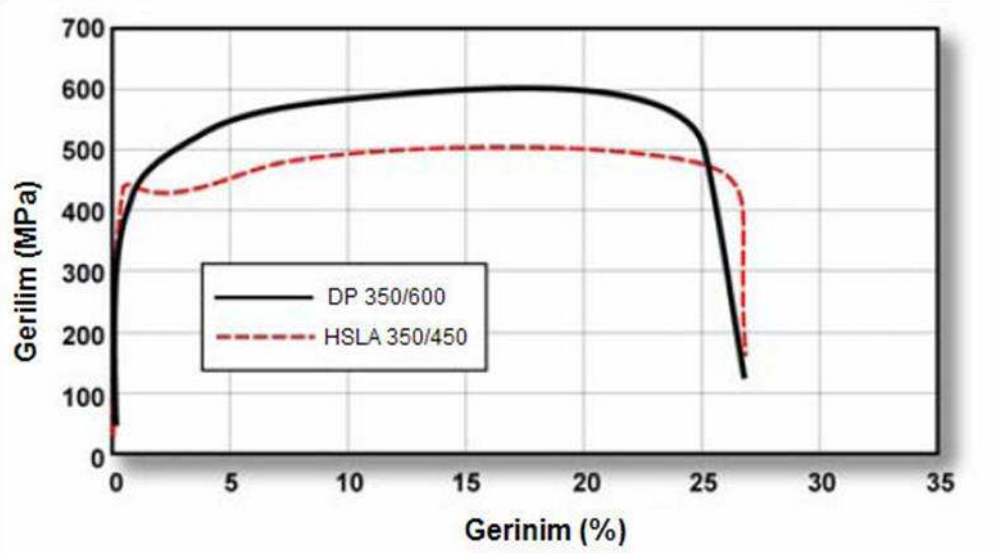
Çift fazlı çelik saclar, günümüzde kullanım oranları diğer geliştirilmiş yüksek mukavemetli saclara oranla daha fazladır ve giderek kullanım alanları artmaktadır. Bu çelik saclar ferritik (yumuşak) bir yapı içerisinde, ikincil bir yapı olan sert martenzit adacıkları içerirler. İkincil bir faz olan martenzit tüm yapının yaklaşık %20'sini oluşturur. Bu oran, çift fazlı sacların mukavemet değerlerini belirleyen en önemli etkidir. Martenzit oranı artıkça sacın mukavemeti artarken form verilebilirlik özelliği düşer.



Şekil 2.3. Çift fazlı çelik sacın mikro yapısı (ULSAB-AVC, 2001)

Yapı içerisinde ferrit ve martenzit ile birlikte düşük oranlarda kalıntı östenit ve malzemenin kenarlarına yakın bölgelerinde malzemenin yırtılmadan uzayabilme direncini artıran beynit fazları da bulunabilir, özellikle delik kenarlamalarda ve kesilen kenarların iç bükey bükmelerinde kenar uzama yeteneği çok önemlidir. Çift fazlı çelik sacın mikro yapısı Şekil 2.3'te verilmiştir. Yumuşak ferritik yapı yüksek mukavemet değerlerine rağmen mükemmel sayılabilecek bir form verilebilirliği sağlarken, martenzitik yapı ise hem malzemenin yüksek mukavemet özelliğinin hem de yüksek deformasyon sertleşebilirliğinin ana kaynağıdır. Yüksek deformasyon sertleşmesi ve yüksek deforme edilebilirlik özelliklerinin birleşimi konvansiyonel yüksek mukavemetli saclara oranla daha yüksek akma değerlerine ulaşılabilmesini mümkün kılar.

Şekil 2.4'te aynı akma mukavemet değerlerine sahip çift fazlı çelik sac (DP) ile, yüksek mukavemet düşük alaşımlı çelik sacın (HSLA) gerilim - gerinim grafikleri verilmiştir. Her iki sacında akma mukavemet değeri aynı olmasına rağmen çift fazlı sacın çekme mukavemet değeri daha fazladır.



Şekil 2.4. DP ve HSLA çelik saclarının gerilim - gerinim grafikleri (AHSS Application Guidelines, 2005)

Bir sac malzeme için akma/çekme mukavemet oranı ne kadar düşükse form verilebilirlik de o kadar yüksektir, bu oranın çift fazlı çelik sac için daha küçük olduğu görülmektedir. DP ve HSLA saclarının, kalıpta form verme sırasında gösterdikleri deformasyon sertleşmesi karakteristikleri farklıdır. HSLA sacı için, kalıpta form verme başladığı andan itibaren sacın form verilebilirlik özelliği düşmeye baslar. DP sacının içerdiği yumuşak ferrit yapısı sayesinde, saca form verme esnasında uzun süre form verilebilirlik karakterinde bir değişme olmaz ve yüzeyde daha iyi bir gerinim dağılımı gözlenir. Çift fazlı ve diğer geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik sacların konvansiyonel sert saclara karşı bir üstünlükleri de fırında sertleşebilme özelliklerinin olmasıdır. Bu özellik zaten yüksek olan deformasyon sonrası akma mukavemet değerini daha da artırır, akma mukavemet değerinin yüksek olması özellikle araç güvenlik parçaları için çok önemlidir (Yenice, 2006).

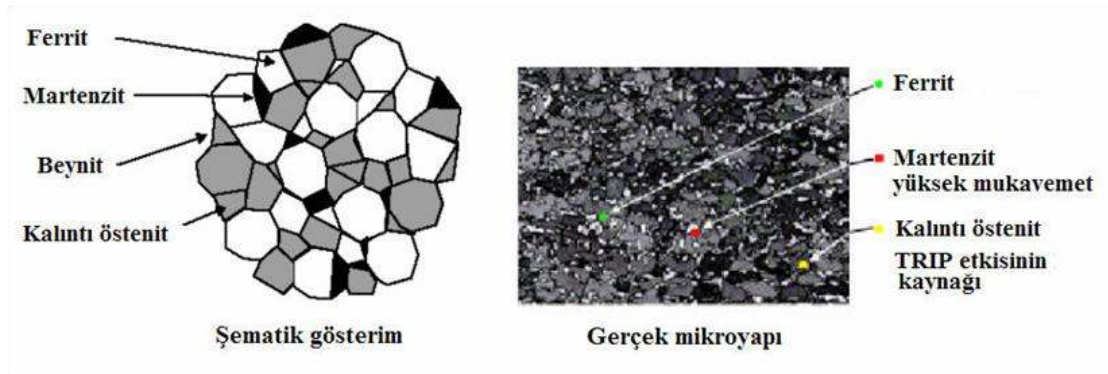
Çift fazlı çelik sacların tipik kimyasal bileşimleri Tablo 2.5'te verilmiştir. Genel olarak bu saclar %0.1'den daha az karbon içerirler ve bu sayede punta kaynak edilebilme kabiliyetlerine sahip olurlar. Sacın üretimi sırasında, tavlamaı takip eden hızlı soğutma sonucunda mikro yapıdaki martenzitin %20'si oluşur. %1 ile %1.4 arasındaki manganez,

Tablo 2.5. Çift fazlı çelik sacların kimyasal bileşimi (Uysal, 2011)

Üretim Yöntemi	Bileşim (%)						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	N
Sürekli tavlama, soğuk haddelenmiş	0.11	1.43	0.61	0.12	0.08	0.06	0.01
Sürekli tavlama, sıcak haddelenmiş	0.11	1.20	0.40	-	-	-	-
Kuru tavlama	0.12	2.10	1.40	-	-	-	-
Haddelenmiş halde	0.06	0.90	1.35	0.50	0.35	-	-

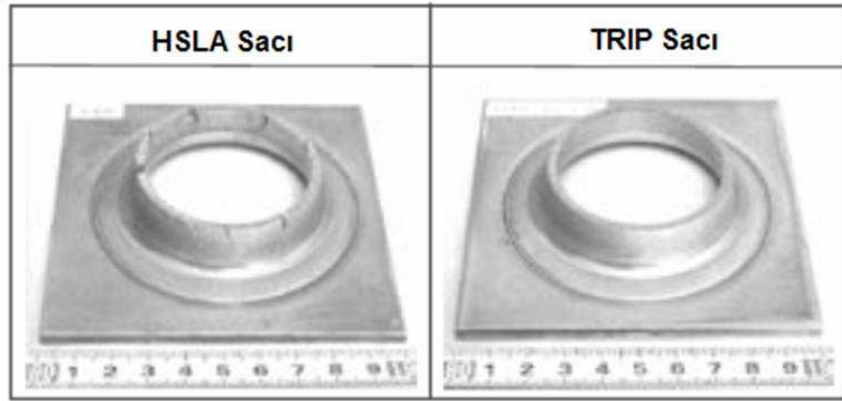
hızlı soğutmada martenzitin oluşmasını sağlar. Konvansiyonel sert çelik saclarınkine benzer bir uygulama ile silisyum, katı eriyik sertleşmesi amacıyla ilave edilirken, vanadyum, niobyum, titanyum gibi alaşım elementleri çökelme sertleşmesi ve/veya tane boyutu kontrolü için ilave edilebilir. Kimyasal bileşimi değiştirerek ve kritik sıcaklıktan soğutma hızını kontrol ederek çift fazlı çelik saclarda çok sayıda farklı mukavemet değerlerinde malzeme elde edilebilir. Aynı akma mukavemet değeri için, çift fazlı DP sacının çekme mukavemet değeri, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı HSLA sacının mukavemet değerinden daha büyüktür, bunun anlamı DP sacının enerji emme kapasitesinin diğer bir ifade ile DP kalitesi kullanılan aracın çarpışma performansının daha yüksek olacağıdır. Aynı araç çarpışma performansı için HSLA yerine DP kullanımı çelik sac kalınlığında yaklaşık %10 azalma anlamına gelir (Fekete, 2001). Otomotivde kullanım alanlarına tampon takviyeleri, kriko destekleri, alternatör fanları, iç ve dış kapı panelleri örnek olarak verilebilir.

Dönüşümle oluşturulan plastisite çelik saclar, ferrit bir yapının içerisinde minimum %5 kalıntı östenit ile sert yapılara sahip martenzit ve beynitin oluşturduğu sac malzemelerdir (Yenice, 2006). TRIP sacının şematik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. TRIP sacların mikro yapısı (ULSAB-AVC, 2001)

Plastik deformasyon esnasında, çift fazlı çelik saclarda olduğu gibi, yumuşak yapı içerisindeki ikincil sert fazlar yüksek miktarlarda deformasyon sertleşmesine neden olurlar. Fakat çift fazlı saclarda görülmeyen özellik, malzemedeki deformasyon ile beraber kalıntı östenit yapının martenzite dönüşümü ile elde edilen deformasyon sertleşmesidir. DP sacı için belirtilen, beynit yapının kesilen kenarlardaki uzama kapasitesini artırıcı etkisi TRIP sacları için çok daha fazladır. Yapıdaki beynit oranı artırılarak kesme kenar uzama kapasitesi artırılır (Şekil 2.6). Yüksek ferrit - beynit içeren TRIP sacları kullanılarak form verilen parçalar, döküm ve dövme ile üretilen parçalara alternatif olmuşlardır.

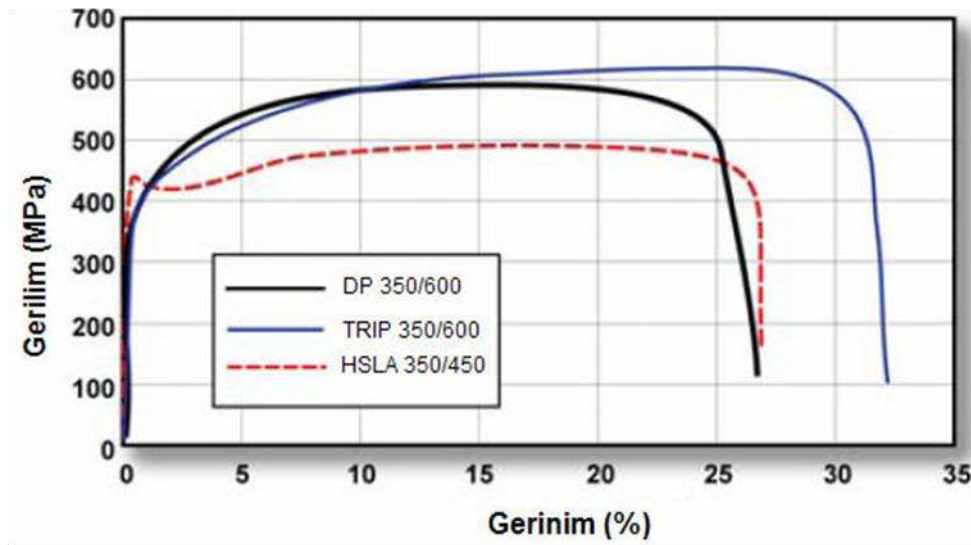


Şekil 2.6. TRIP ve HSLA malzemelerinde delik uzamasının karşılaştırılması (Yenice, 2006)

Aynı akma mukavemet değerlerine sahip 3 farklı sacın gerilim – gerinim grafikleri Şekil 2.7'de verilmiştir. Görüleceği üzere en küçük deformasyon sertleşmesi HSLA çelik sacında gözlenmiştir. TRIP sacının başlangıç deformasyon sertleşme değeri, DP sacından küçüktür. Fakat deformasyonun ileriki safhalarında özellikle kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile TRIP daha yüksek deformasyon sertleşebilirliği gösterirken DP çelik sacında düşüş gözlenmektedir.

TRIP saclarının deformasyon sertleşebilirliğinin, benzer akma mukavemet değerlerine sahip, konvansiyonel yüksek mukavemetli çelik saclara oranla oldukça yüksek olması malzemenin gerekerek şekil verilebilme ve form verilebilirlik özelliklerinin yüksek olmasını sağlar. TRIP sacları, martenzit oluşum sıcaklığını oda sıcaklığının altına çekerek östenit fazı oluşturabilmek için bileşimlerinde DP saclarına oranla daha fazla karbon içerirler. Silisyum ve alüminyum kullanımı ise beynit bölgelerinde çökelti karbürlerin oluşumunu önler. Kalıntı östenit yapının martenzite dönüşümünün deformasyonun hangi safhasında başlayacağı bileşimdeki karbon oranı ile belirlenir. Düşük karbon oranlarında

bu dönüşüm deformasyonun ilk safhalarında başlar ve deformasyon sürdükçe malzemede deformasyon sertleşmesine neden olur. Yüksek karbon oranlarında, kalıntı östenit çok daha stabil yapıdadır, deformasyonun daha ileriki aşamalarında martenzite dönüşmeye başlar, form verilmiş parçada dahi martenzite dönüşmemiş kalıntı östenit oranları yüksek olabilir. Bunun amacı kaza anında deforme olan parçanın deformasyon sertleşebilirliğini yükselterek çok yüksek miktarlarda enerji absorbe edebilmesidir. Yüksek karbon seviyesinin en önemli dezavantajı ise kaynak edilebilme yeteneğinin ciddi miktarda düşmesidir. Fakat kaynak parametreleri üzerinde çalışılarak bu sorun giderilebilir.



Şekil 2.7. DP, TRIP ve HSLA saclarının gerilim - gerinim grafikleri (AHSS Application Guidelines, 2005)

Kompleks fazlı çelik saclar, TRIP ve DP sacları ile MART sacları arasında bir geçiş pozisyonundadır. CP saclarının yapıları DP ve TRIP saclarına benzerdir, ikincil sert faz oranı daha yüksektir ve az oranlarda niobyum, titanyum ve/veya vanadyum içerir. Bu elementler mukavemet artışını sağlayan düzenli çökelti oluşumunu sağlarlar. Aynı çekme mukavemetine sahip DP ve TRIP saclarına göre akma mukavemetleri biraz daha yüksektir, bunun sonucu olarak deforme edilebilirlikleri daha az fakat deformasyon sertleşebilirlikleri daha fazladır. Ana kullanım alanları, enerji emme kapasitelerinin çok yüksek olması ve form verilebilirlik değerlerinin sınırlı olması nedeniyle, basit formlu, güvenlik parçalarıdır (Yenice, 2006).

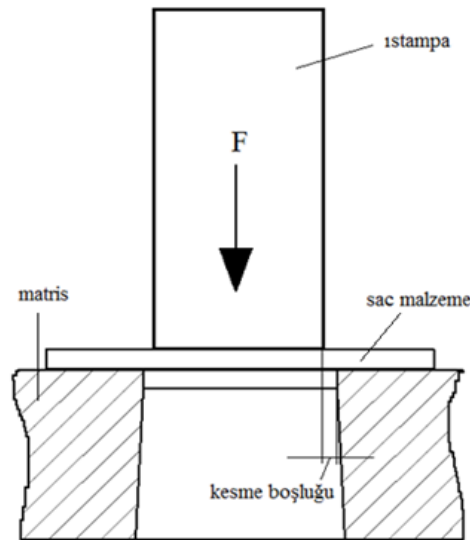
Martenzitik çelik saclar, sıcak haddeleme veya tavlama sırasında mevcut olan östenit yapının hızlı soğutulması ile çok büyük oranda martenzite dönüşmesi ile oluşurlar. Bu yapı genelde çok sert olduğu için ek bir meneviş operasyonundan geçirilerek form

verilebilirliği artırılır. Çekme mukavemet değeri 2000 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Mukavemet seviyeleri bu denli yüksek olmasına rağmen yine de orta seviyede de olsa form verilebilir malzemelerdir. Örnek olarak 1500 MPa çekme mukavemet değeri sahip bir MART sacı yaklaşık %4 - 6 uzama seviyelerine ulaşabilir. Ana kullanım alanları kompleks fazlı (CP) saclar ile benzerdir, enerji emme kapasitelerinin çok yüksek olması ve form verilebilirlik değeri'nin sınırlı olması nedeniyle, basit formu, güvenlik parçaları örnek uygulama alanlarındandır (Yenice, 2006).

2.2. Sac Malzemelerin Şekillendirme Yöntemleri

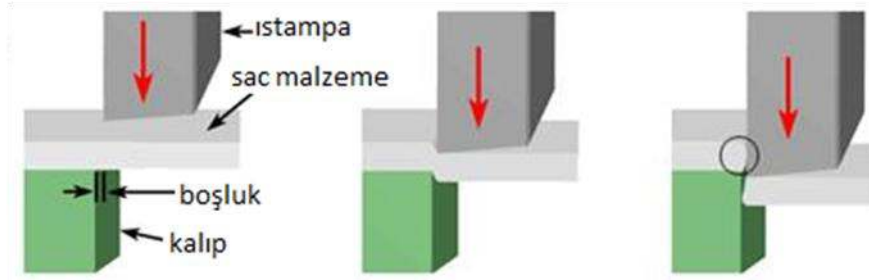
Şekillendirme amaçlı imal edilen sıcak veya soğuk haddelenmiş sac metal malzemeler, belli ölçülerde plakalar halinde veya rulo halinde temin edilir. Daha sonra bu sac malzemelerden belirli ölçülerde ve çevre şeklinde taslak parçalar kesilir ve gerekli şekillendirme metotları kullanılarak, çeşitli biçimlerdeki istenilen parçalar şekillendirilmiş olur. Talaşsız imalat olarak bilinen sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde kesme, bükme, gererek şekillendirme, derin çekme ve sıvama yöntemleri bulunmaktadır.

Rulo veya plaka şeklinde temin edilen sac metal malzemelere uygulanan ilk şekillendirme yöntemi kesme işlemidir. Kesme işlemi ile sac malzemeler kesilerek istenen çevre şeklinde parçalar elde edilir. Sac malzeme kesme kalıpları en basit şekilleriyle Şekil 2.8'de görüldüğü gibi bir kesme matrisi ve bir ıstampa oluşmaktadır.



Şekil 2.8. Kesme işleminin şematik çizimi

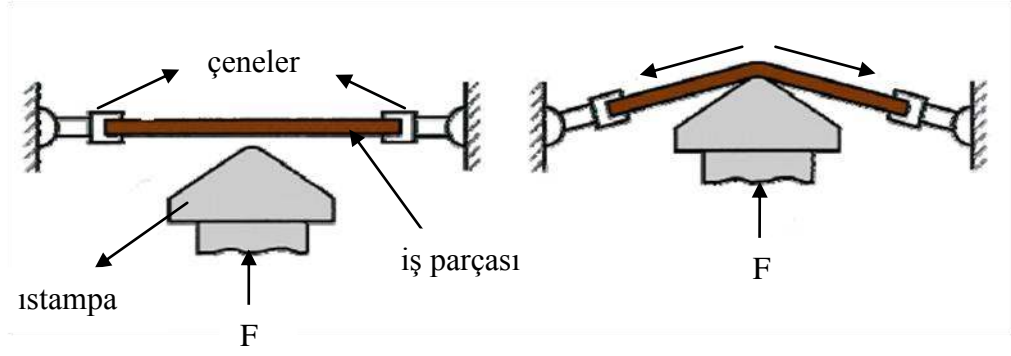
Sac metal malzemelerin kesilmesi sırasında, matris ve ıstampa tarafından malzemeye eşit fakat ters yönde ve aralarında kesme boşluğu kadar uzaklık bulunan kesme gerilmeleri uygulanır. Böylece matris deliğinin ve ıstampa'nın çevresi şeklinde sac malzeme kesilmiş olur. Ayrıca giyotin makaslarda düz bir çizgi boyunca sac malzemenin kesim işlemi yapılabilir. Giyotin makasta kesme işleminin aşamaları Şekil 2.9'da şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.9. Giyotin makasta kesme işleminin aşamaları

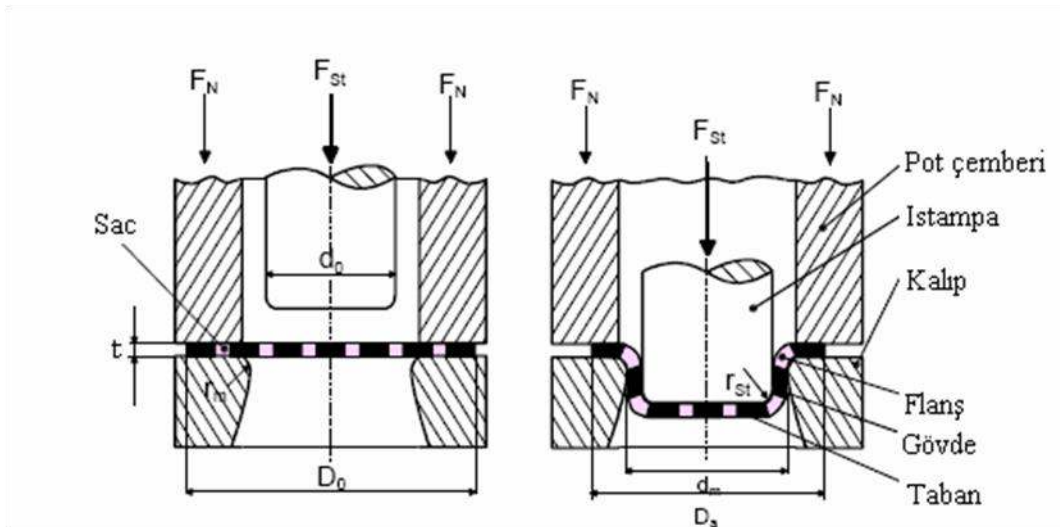
Bükme, sac malzeme şekillendirme işlemleri içinde en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Basit şekillendirme işlemlerinden biri olan bükme işlemi, sac malzemenin bir eksen çizgisi etrafında döndürülerek şekillendirilmesidir. Bükme işleminin, serbest bükme, V kalıpta bükme, kenar bükme gibi sac malzemenin şekline ve üretim durumuna göre çeşitli operasyonları vardır.

Gererek şekillendirme yöntemi, özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde yaygın kullanılan bir sac metal şekillendirme yöntemidir. Otomobillerin tavan sacları ve çamurlukları ile uçak kanatları gererek sac metal şekillendirme yöntemi kullanılan parçaların önde gelenleridir. Özellikle üretim miktarı düşük veya üretimi yapılacak parçanın boyutu büyük olduğu takdirde normal preslerin kullanılması üretim açısından ekonomik olmamaktadır. Bu gibi durumlarda, takım ve tezgâhın maliyete etkileri üretim yönteminin belirlenmesinde ön plana geçmekte ve üretilecek parçanın ölçüleri göz önüne alındığında takım ve tezgâh masraflarının az olması nedeniyle gererek sac metal şekillendirme işlemi uygulanmaktadır. Şekil 2.10'da gererek şekillendirme işlemi şematik olarak verilmiştir. Sac malzeme genellikle karşılıklı iki ucundan veya tüm çevresi boyunca çenelere bağlandıktan sonra ıstampa ilerleyerek gererek şekillendirme işlemi gerçekleştirilir (Çapan, 2003).



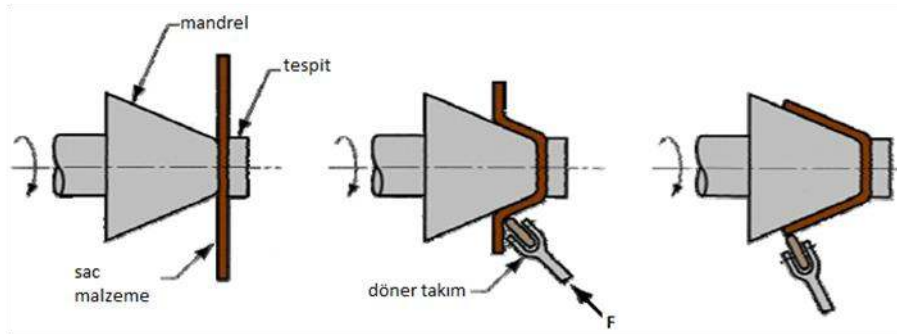
Şekil 2.10. Gererek şekillendirme işlemi

Sac metal şekillendirme işlemlerinin bir başkası da derin çekme yöntemidir. Bu sac metal şekillendirme işleminin, paketlenme, otomotiv, beyaz eşya ve mutfak gereçleri gibi endüstrinin değişik alanda yaygın kullanımı bulunmaktadır. Derin çekme yöntemi, içecek kutuları, derin kaplar, tencereler, tepsiler, koruyucu kaplar, otomobil gövde parçaları gibi kap şeklindeki parçaların üretiminde kullanılan bir sac şekillendirme işlemidir. DIN 8584 standardına göre derin çekmenin tanımı şöyledir: Derin çekme, düz bir sacın, sac kalınlığında kasti bir değişim beklenmeden, bir tarafı açık oyuk bir yapıya, çekme-basma gerilme esaslı şekillendirilmesi işlemidir. Derin çekmenin uygulandığı temel teorik yöntemde dairesel metal sac, çembersel kalıp boşluğunun üst kısmında yer alır ve pot çemberi denilen bir üst kalıp ile belli bir kuvvetle sıkıştırılır. Düz silindirik ıstampa, sıkıştırılan sacı kalıp boşluğuna doğru iterek silindirik bir kap oluşturur. Şekil 2.11'de silindirik bir kabın derin çekme işleminin şematik görünümü verilmiştir (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.11. Silindirik bir kabın derin çekme işlemi (Değirmenci, 2006)

Diğer bir sac metal şekillendirme metodu ise, sıvama yöntemidir. Sıvama, sac metal malzemelerin, kendi eksenleri etrafında döndürülürken, çeşitli takımlar ile uygulanan radyal ve/veya aksel yönde kuvvetler neticesinde şekillendirilmesidir. Sıvama ile işlenecek parçalar dönme eksenine göre simetriklerdir. Sıvama, bu tanıma uygun olan fakat birbirinden farklı birçok yöntemi kapsar. İşlem esnasında, sıvama tipine göre, malzeme belirli bir kalıbın üzerine sıvanarak şekillendirilebileceği gibi belirli bir kalıp geometrisi olmadan, boşlukta da şekillendirilebilir. Şekillendirme, işlemin gereklerine göre soğuk veya sıcak olarak yapılır. Sıvama ile imalat, talaş kaldırılmaması ve imalat hızının yüksek olması, sıvamayı cazip kılan temel etmenlerdir. Şekil 2.12'de sıvama yöntemine ait örnek verilmiştir.

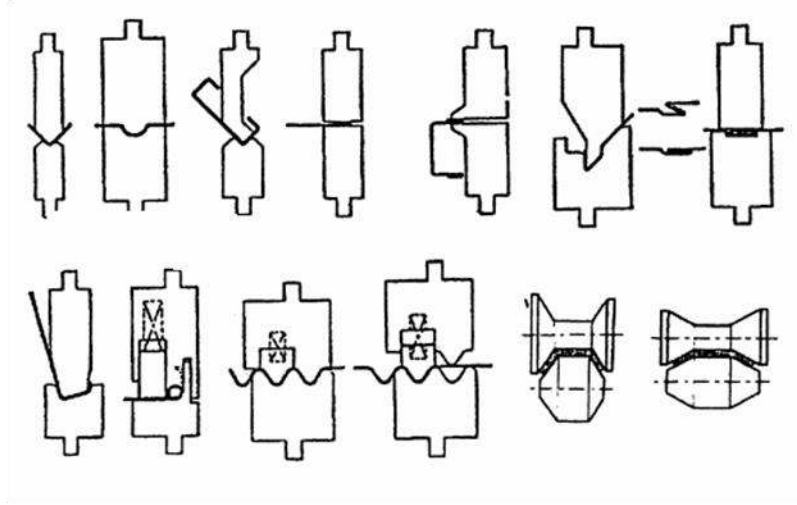


Şekil 2.12. Sıvama yönteminin aşamaları

2.3. Bükme

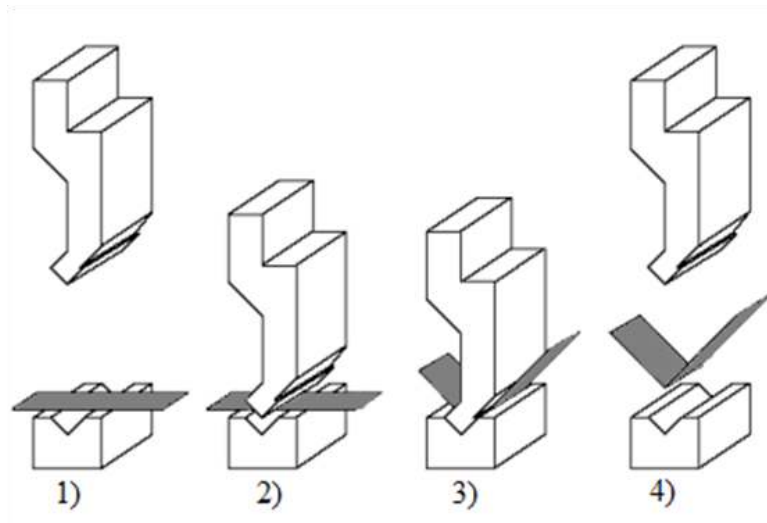
Bükme ile sac metal şekillendirme, endüstride özellikle de otomotiv ve beyaz eşya sektöründe yaygın olarak kullanılan şekillendirme yöntemidir. Bükme, sac malzemenin ısıtılarak veya ısıtılmadan ve talaş kaldırma işlemi yapılmadan bir eksen etrafında döndürülerek şekillendirilmesi olarak ifade edilebilir. Bükme işleminde sac malzemenin belirli bir bölgesi deformasyona maruz kalır. Bu işlemle uygulanan kuvvet sonucu sac malzeme üzerinde plastik deformasyon ve elastik şekil değişimi oluşur.

Sac malzemenin bükülmesinde parçanın şekline, malzeme özelliklerine ve üretim sayısına bağlı olarak çeşitli bükme yöntemleri bulunmaktadır. Şekil 2.13'te çeşitli bükme işlemleri verilmiştir (Tekiner, 2004). Bükme işleminin çeşitleri V bükme, serbest bükme, kenar bükme, çift etkili bükme, ezerek bükme, döndürerek bükme ve U bükme olarak sıralanabilir.



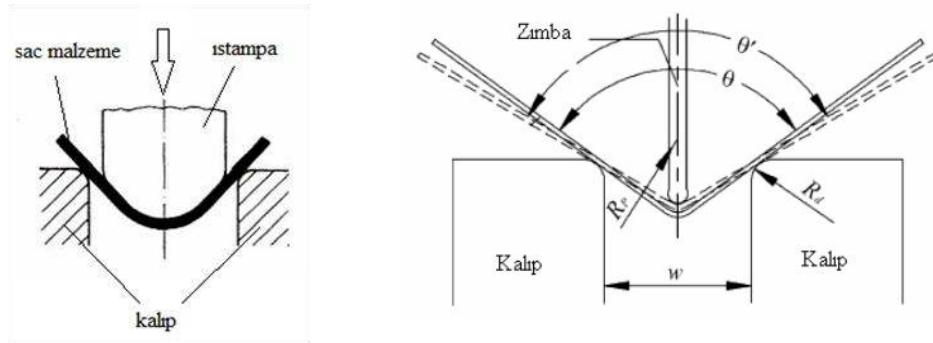
Şekil 2.13. Çeşitli sac bükme işlemleri (Tekiner, 2004)

V bükme işleminde zımba (ıstampa - erkek kalıp) aşağı doğru inerken ilk olarak sac malzeme ile temas eder. Zımba iş parçasının merkezinden, malzeme kalınlığı kadar aşağı bastırır. Bu durumda bükme kollarının uçları yukarı esneyerek kalıp radyüsleri etrafında çok az miktarda hareket ederek reaksiyon gösterirler. Malzemenin kalıp radyüslerindeki hareketi sallanma değil, sürüklenme ve kayma hareketi olmaktadır. Bükme olayı ilerledikçe sürüklenme ve dolayısı ile malzemenin reaksiyonu daha da artmaktadır. Bu durumda kollar bir öncekine göre daha da yukarıya kalkmış bulunmaktadır. Son safhada yalnız zımba ucu değil, artık yan yüzeyleri de temas halinde ve zımba parçayı kalıp içine yatırmış durumdadır (Arslan, 2007). Şekil 2.14'te V bükme olayı yer almıştır.



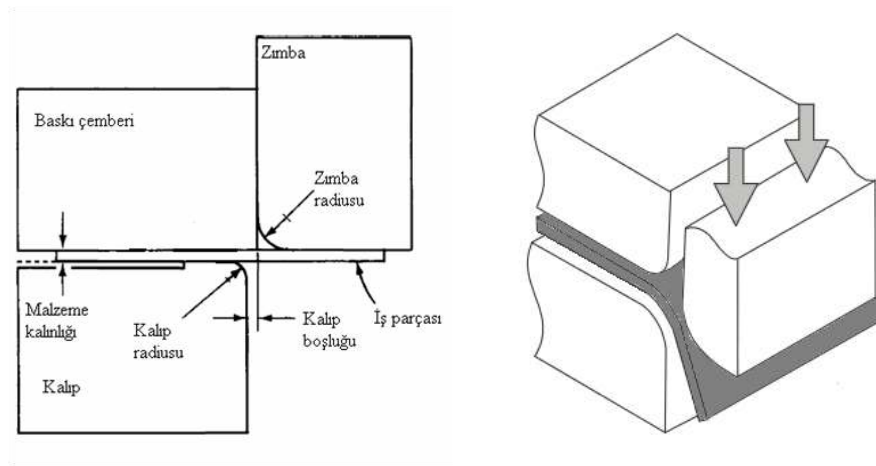
Şekil 2.14. V bükme işleminin safhaları (Kılıç, 2009)

Havalı bükme olarak da bilinen serbest bükme, sac parça altta yer alan kalıbın kenarları tarafından desteklenirken zımbanın aşağı doğru inmesi ile gerekli bükme açısı oluşur. Şekil 2.15'te görüldüğü üzere R_p zımba radyüsü, R_d kalıp radyüsü, θ bükme açısı ve θ' ise büküm öncesi zımba açısıdır. $\Delta\theta$ ise geri yaylanma açısıdır. Sac parçanın aldığı şekil itibari ile V bükmeye benzemesine rağmen sac parçanın kenarları bükme işleminin başlangıcında ve bitiminde serbest haldedir (Arslan, 2007).



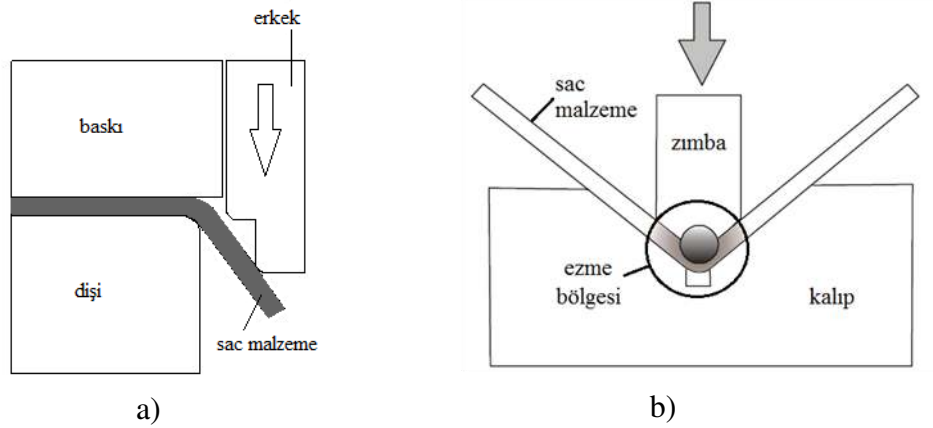
Şekil 2.15. Serbest bükme işlemi (Arslan, 2007)

Diğer bir bükme yöntemi olan kenar bükme metodunda sac, baskı çemberi tarafından sabit pozisyonda tutulur. Şekillendirici ıstampa aşağı doğru inerek sacı şekillendirir. Bükülecek sacın uzunluğu sacın diğer kısımlarına nazaran çok kısa ise bu tip bükme tercih edilir. Şekil 2.16'da verilen terimlere göre zımba radyüsü R_p , kalıp radyüsü R_d , zımba ve kalıp arasındaki boşluk c , sac kalınlığını ise t parametreleriyle ifade edilir (Ling vd., 2005).



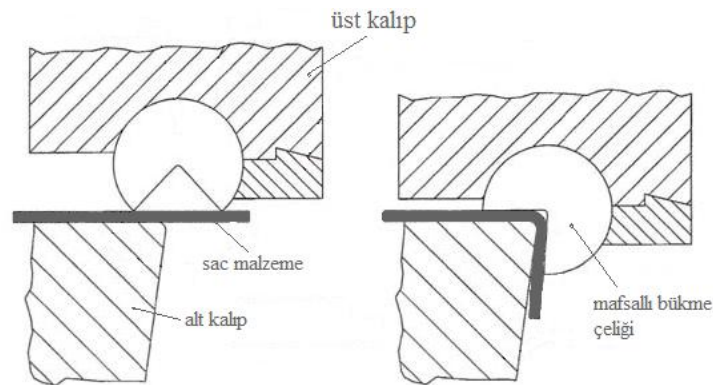
Şekil 2.16. Kenar bükme işlemi (Ling vd.,2005; URL-1, 2013)

Bükme operasyonlarında geri yaylanma etkisini azaltmak ve bükme açısını kontrol edebilmek için kullanılan en yaygın yöntemler çift etkili bükme, ezerek bükme ve döndürerek bükmedir. Şekil 2.17.a'da verilen çift etkili bükme işlemi, arka arkaya etki eden iki kenar bükme işlemi gibi düşünülebilir. Geri yaylanmayı azaltmada etkili bir yöntemdir. Ezerek bükme operasyonunda dişi ve erkek kalıbın bükmeyi gerçekleştiren bölgeleri bası gerilmesi altında parçayı bir miktar ezer (Şekil 2.17.b). Bu işlem, geri yaylanmayı azaltmakta fakat ezme işleminden dolayı daha fazla kuvvete ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca pres hareketli (vurucu) başlığının kurs boyu iyi ayarlanmalıdır (Yenice, 2006).



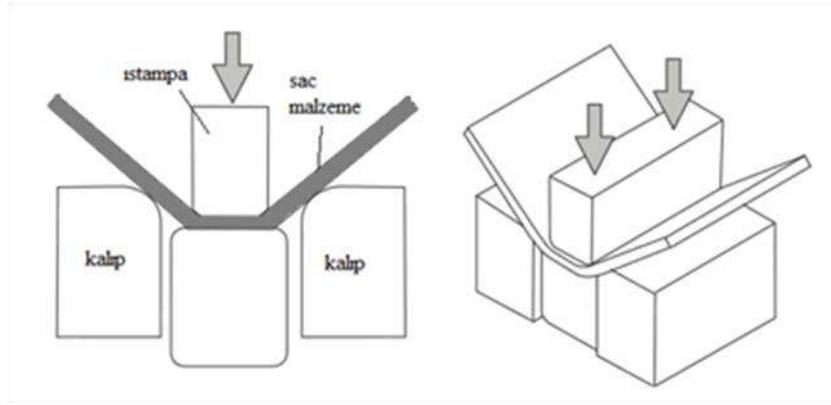
Şekil 2.17. a) Çift etkili bükme işlemi, b) Ezerek bükme işlemi (URL-1, 2013)

Döndürerek bükme işleminde kullanılan mafsallı bükme çeliği, parçayı tutar ve aynı zamanda da bükerek (Şekil 2.18). Mafsallı bükme çeliği parçaya bir baskı plakası gibi basar, sıkıca tutarak 90°'den daha fazla bükerek, böylece geri yaylanma da telafi edilebilir. Bu operasyon 90°'den küçük açılardaki parçaları bükerek oluşturma işleminde daha etkin kullanılır ve erkek kalıp kuvvetini de azaltır (Yenice, 2006).



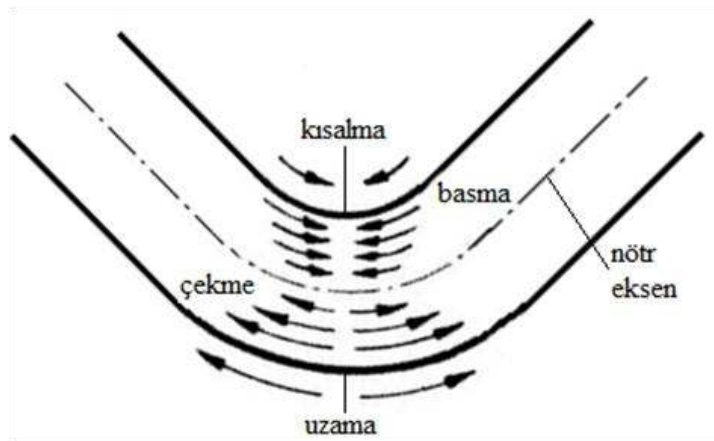
Şekil 2.18. Döndürerek bükme işlemi (Sarıkaya, 2008)

Diğer bir bükme yöntemi olan U-kalıpta bükme işlemi ile tek bir kalıpta U şeklini almış sac parçalar üretmek mümkündür. Şekil 2.19'da bu büküm işleminin şematik hali verilmiştir. V-kalıpta bükme kolları olarak adlandırılan malzeme kısımları, U-kalıpta bükme işleminde şekillendirilmiş parçanın yan duvarlarını oluşturmaktadır. U-kalıpta bükme işlemi, uygulanan kuvvetin, bükme yarıçapının, kalıp açıklığının, kalıp derinliğinin ve kalıp yarıçapının fonksiyonu olarak tanımlanabilir.



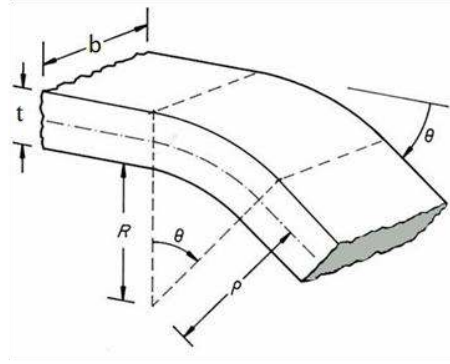
Şekil 2.19. U kalıpta bükme işlemi (URL-1, 2013)

Bükme işleminde sac malzemenin dış yüzeyi çekmeye ve iç yüzeyi basmaya zorlanmaktadır (Şekil 2.20). Yani malzemenin dış kısmında çekme gerilmeleri, iç kısmında ise basma gerilmeleri oluşmaktadır. Sacın dış yüzeyindeki liflerde (ipçiklerde) oluşan gerilme akma gerilmesini aştığı için uzamakta ve kesit daralması gerçekleşmektedir. Sacın iç kısmındaki lifler ise basma gerilmesinden dolayı kısalıp, kesiti genişlemektedir (Esat, 2002).



Şekil 2.20. Bükme işleminde oluşan gerilmeler ve nötr (tarafsız) eksen (URL-2, 2013)

Çekme ve basmaya zorlanan kısımları ayıran çizgiye nötr (tarafsız) eksen denir. Bu çizgi üzerindeki birim şekil değiştirme ve gerilmeler sıfırdır. Bükülen bölgede sac malzeme kalınlığının değişmediği kabul edilirse nötr eksen sacın ağırlık noktasından geçer. Bu eksen çekmeye ve basmaya zorlanan kısımları ikiye ayırır. Nötr ekseninde bir değişiklik olmadığı için bu eksenindeki lif uzunluğu değişikliğe uğramaz.



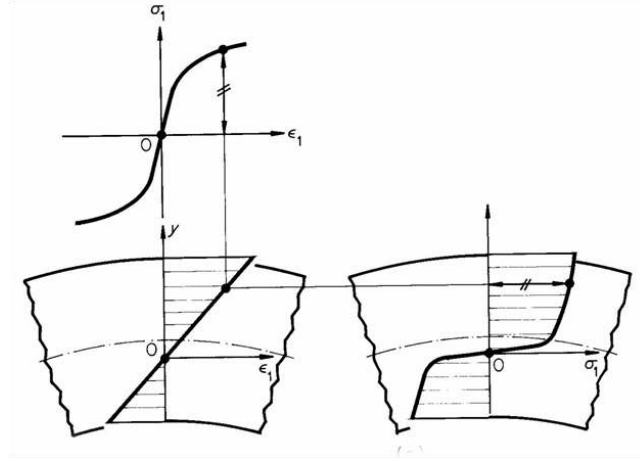
Şekil 2.21. Bükme işlemindeki parametreler (Kılıç, 2009)

Sac malzemenin bükme sonucu dış ve iç yüzeylerindeki birim şekil değiştirmeleri mutlak değer olarak birbirine eşittir ve Eşitlik 2.1'deki bağıntı ile hesaplanır. Şekil 2.21'de bükme işlemindeki parametreler belirtilmiştir. Şekilde bulunan ρ nötr eksen yarıçapını, R bükme yarıçapını, t sac malzeme kalınlığını, θ bükme açısını, ve b parça genişliğini verir (Kılıç, 2009).

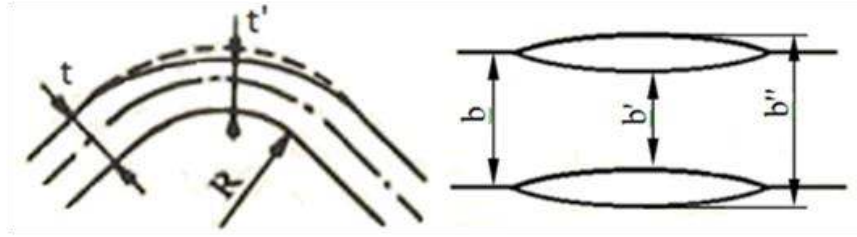
$$t_{du} = -t_{iç} = \frac{b}{(2R/t) + 1} \quad (2.1)$$

Şekil 2.22'den de görüldüğü üzere gerçek bir bükme işleminde sacın dışında bulunan liflerdeki şekil değiştirme miktarı içte bulunan liflerdeki şekil değiştirme miktarından daha fazladır. Bu yüzden Eşitlik 2.1'deki denklemden $t_{iç}$ için elde edilen değerle deney sonuçları birbirine yakındır. Buna karşılık $t_{dış}$ değerleri ise deneysel sonuçlardan çok küçüktür. Plastik deformasyonla birlikte hacim sabitliği söz konusu olduğundan, bükülmüş bir sac parçada, bükülen bölgede sac kalınlığı t , t' değerine düşer, ayrıca bükmeden önceki parça eni olan b de, içte artarak b' , dışta azalarak b'' değerini alır (Şekil 2.23). Bu boyut değişimleri nötr eksenin iç yüzeye doğru kaymasına neden olur. Bunun sonucunda da teorik olarak sac kalınlığının değişmediği varsayılarak geliştirilen

Eşitlik 2.1'den elde edilen $t_{dış}$ değerleri deneysel değerlerle uyum göstermez. $t_{dış}$ ve $|t_{iç}|$ değerleri arasındaki fark R/t oranı küçüldükçe artar (Çapan, 2003). Ancak sac malzemenin kalınlıkları çok küçük olduğundan nötr eksen kayması ihmal edilmektedir.

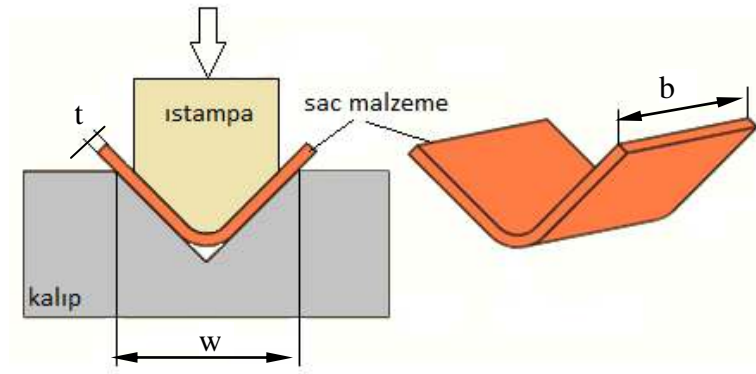


Şekil 2.22. Bükmedeki gerilme - gerinme dağılımı (Marciniak ve Duncan, 1992)



Şekil 2.23. Bükme işlemindeki sac kalınlığı ile parça eninin değişmesi (Çapan, 2003)

Bu çalışma kapsamında V bükme yöntemi incelendiği için burada sadece bu yöntemin kuvvet hesabından bahsedilmiştir. Şekil 2.24'te V bükme operasyonunun şematik görünümü ve gerekli parametreleri verilmiştir.



Şekil 2.24. V bükme operasyonunun şematik görünümü (Kılıç, 2009)

V bükme kalıbındaki kuvvet hesabı için her araştırmacı farklı eşitlikler ortaya koymuştur. Bu eşitlikler her ne kadar farklı olsa da, çıkan sonuçlar arasında çok büyük farklar bulunmamaktadır. Bunun için bükme kuvveti hesabı Eşitlik 2.2'de ifade edilmiştir (Cerit, 1976; Güneş, 1989).

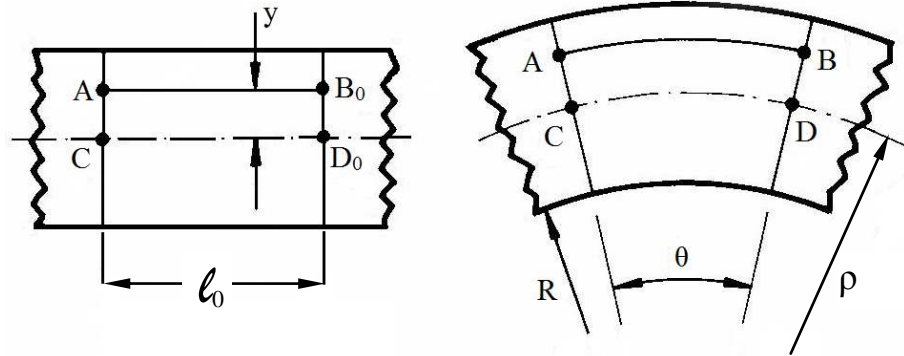
$$P_v = C \times \frac{b \times t^2 \times \sigma_{\epsilon}}{w} \times 10 \quad (2.2)$$

C ifadesi w/t oranına bağlı bir katsayı olup Eşitlik 2.3'teki ifade ile bulunur.

$$C = 1 + \frac{4 \times t}{w} \quad (2.3)$$

Bu eşitliklerde; P_v , V bükme kuvvetini (N); b , sac malzeme genişliğini (mm); t , sac malzeme kalınlığı (mm); σ_{ϵ} , malzeme çekme mukavemeti (N/mm^2); w , kalıp ağız genişliğini (mm) verir.

Sac malzeme üzerinde bir AB_0 çizgisinin bükme işlemi sonrasında deformasyonla birlikte bir AB yayına dönüşümü Şekil 2.25'te verilmektedir (Kılıç, 2009).



Şekil 2.25. AB yayının bükme sonrası oluşan deformasyonu (Kılıç, 2009)

Nötr ekseninde bir değişiklik olmadığından dolayı AB_0 çizgisinin uzunluğu l_0 'a eşittir ve Eşitlik 2.4'te gösterilmiştir. Bükme sonrası uzunluk AB yayının karşılığı olan l değeri Eşitlik 2.5 ile ifade edilmektedir.

$$l_0 = \rho \theta \quad (2.4)$$

$$l = \theta(\rho + y) = \rho\theta\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) = l_0\left(1 + \frac{y}{\rho}\right) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.6)$$

Burada θ bükme açısı, ρ eğrilik yarıçapı, y AB yayının nötr eksene olan uzaklığını göstermektedir. Eşitlik 2.6'da verilen şekil değişimi denklemine Eşitlik 2.4 ve Eşitlik 2.5 ifadeleri yerine konulup gerekli işlemler yapıldıktan sonra çıkan sonuç Eşitlik 2.7 ifadesinde verilmiştir.

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho} \quad (2.7)$$

Hook kanuna göre Eşitlik 2.8'de verilen elastik alandaki gerilme - gerinme arasındaki bağıntı sayesinde istenilen gerilme değerlerine ulaşılabilir.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.8)$$

Bir sac malzemenin bükülecek kısmının bükmeden önceki uzunluğu Eşitlik 2.9 formülüyle hesaplanır ve buna açınım hesabı denir. Bu ifadede uzunluk birimi mm, R bükme yarıçapı, t sac kalınlığı, T ise Tablo 2.6'dan alınacak bir düzeltme faktörüdür (Çapan, 2003).

$$l_b = 0,0175\theta\left(R + \frac{tT}{2}\right) \quad (2.9)$$

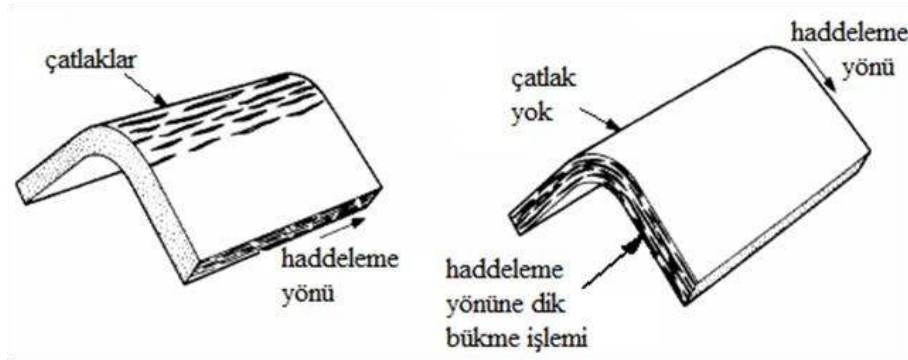
Tablo 2.6. Açınım hesabı için T düzeltme faktörü (Çapan, 2003)

R/t	5.0	3.0	2.0	1.2	0.8	0.5
T	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5

Bükülen sac malzemenin kesitinde oluşan deformasyonlar ve gerilmeler genel olarak malzemenin kalitesi, malzemenin kalınlığı, uygulanan kuvvet, bükme yarıçapı, bükme açısı gibi parametrelere bağlıdır.

Bükme işleminde malzemeye uygulanan kuvvet, malzemenin esnekliğini yenmeli ve kesin olarak bir yön değiştirme yapabilmesi için yeterli büyüklükte olmalıdır. Bükme kuvveti malzemenin gösterdiği dirençten büyük, kalıbın gösterdiği karşı kuvvetten küçük olmalıdır. Aksi takdirde kalıbın kırılması söz konusudur. Akma gerilmesinin yüksek oluşu daha büyük bükme kuvvetlerinin uygulanmasını gerektirir. Şekillendirme güçlüğü ve kırılmalık gibi sakıncaları doğurur.

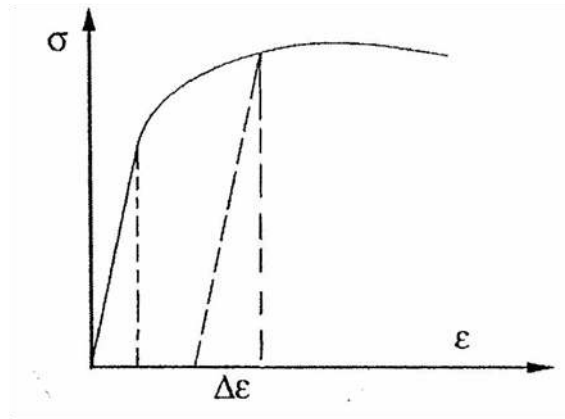
Anizotropi bükülebilirliği etkileyen önemli bir faktördür. Soğuk haddelenmiş saclarda katıtkı, kalıntı ve boşlukların haddeleme doğrultusunda uzaması ve sıralanmasıyla oluşan bantlı yapı malzemede anizotropi meydana getirir. Bantlı bir içyapı, haddeleme doğrultusuna dik doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotropiktir ve bu doğrultuda süneklik düşüktür. Bu yüzden bükme işleminde haddeleme yönü önemli bir etkindir. Bükme kıvrımı sacın haddeleme yönüne dik olmalıdır, aksi takdirde bükme sırasında sac malzemede çatlaklar oluşur (Şekil 2.26). Dolayısıyla bükülecek bir sac ilk aşamada levha ve rulodan kesilirken bu nokta kesinlikle unutulmamalıdır. Bir parçada birbirine dik iki bükme kıvrımı olması durumunda, kıvrımlarla haddeleme doğrultusu arasındaki açının 45° olmasına çalışılmalıdır (Çapan, 2003).



Şekil 2.26. Haddeleme yönü ve bükme işlemi (Çapan, 2003)

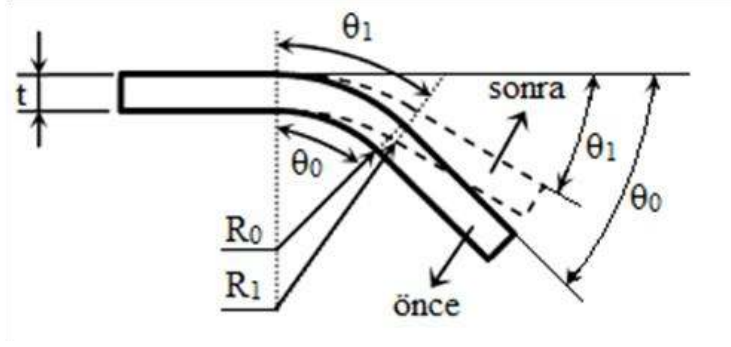
2.4. Geri Yaylanma

Sac malzeme yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri altında almış olduğu formu bu kuvvetler üzerinden kalktıktan sonra, malzemenin elastik özelliklerinden dolayı parça geometrisinde meydana gelen büyük oranda elastik ender olarak da elastik-plastik değişim olarak tanımlanan bir geometrik değişim gerçekleştirir. Bu duruma örnek olarak sünek bir metalin akma diyagramında yükleme kaldırıldıktan sonra malzemenin uzama miktarındaki düşüş gösterilebilir (Şekil 2.27) (Arslan, 2007).



Şekil 2.27. Sünek bir metaldeki geri esnemenin akma diyagramı üzerinde gösterilişi (Arslan, 2007)

Bütün sac malzemelere ait sınırlı bir elastisite modülü olduğundan, plastik deformasyon, uygulanan yük kaldırıldığı zaman, bir miktar elastik geri dönüş ile takip edilmektedir. Genelde sac malzemedeki basınç yönündeki gerinim, çekme yönündeki gerinimden daha büyüktür. Parçaya uygulanan kuvvet ile parçanın dış kısmı deforme olurken, iç kısmı henüz akma noktasına ulaşmamıştır. Parçanın üzerinden kuvvet çekildiğinde, malzemenin basılmaya çalışan tarafı uzamaya, malzemenin çekilmeye çalışan tarafı ise kısalmaya çalışmaktadır. Sonuç olarak sac malzeme ilk halini alma eğilimi göstermekte ve bükülen malzeme bir miktar esneyerek geri açılmaya sebep olmaktadır. Malzemenin bu durumu *geri yaylanma* olarak tanımlanır. Sac malzemenin bu davranışı şematik olarak Şekil 2.28'de parametreleriyle birlikte gösterilmiştir. Burada dikkat edilecek olursa, geri yaylanmadan sonraki son bükme açısı daha küçük ($\theta_1 < \theta_0$) ve son bükme yarıçapı öncekine göre daha büyüktür ($R_1 > R_0$). Bükmedeki elastik kısım, bükme işleminden sonra elastikiyetini geri almaya çalışır (Güneş, 1989; Lange, 1985).



Şekil 2.28. Bükme işlemi sonrasında oluşan geri yaylanma (Garcia- Romeu vd., 2007)

Geri yaylanma miktarını belirlemek için bir nicelik tanımlamak gerekir. Geri yaylanmayı karakterize eden bu nicelik *geri yaylanma faktörü* olarak adlandırılır. Nötr eksenin bükmeden önceki ve bükmeden sonraki uzunluğu birbirine eşittir ve bu ilişki Eşitlik 2.10'da verilmiştir. Burada R_0 ve θ_0 bükmeden önceki bükme yarıçapını ve bükme açısını R_1 ve θ_1 ise bükmeden sonraki bükme yarıçapını ve bükme açısını ifade eder (Sarıkaya, 2008).

$$l_n = \theta_0 \left(R_0 + \frac{t}{2} \right) = \theta_1 \left(R_1 + \frac{t}{2} \right) \quad (2.10)$$

Bu bağıntıdan yola çıkarak geri yaylanma faktörü Eşitlik 2.11'deki denklemden bulunabilir (Sarıkaya, 2008).

$$K = \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{R_0 + t/2}{R_1 + t/2} = \frac{2R_0/t + 1}{2R_1/t + 1} \quad (2.11)$$

Geri yaylanma faktörü (K) bükme yarıçapının kalınlığa oranına (R/t) bağlıdır. $K=0$ olduğu zaman kalıcı şekil değişimi olmadığını, $K=1$ olduğunda geri yaylanma olmadığını ifade eder.

Geri yaylanma miktarını hesaplayan formüllerin birçoğu kompleks plastisite denklemlerine dayanmakta ve genellikle başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Ancak sac malzeme özellikleri, takım parametreleri bükme işleminde değişikliğe yol açar. Bu da yüksek hassasiyette ve doğrulukta denklemleri geliştirmeyi ve sağlamayı zorlaştırır. Bunun bir nedeni de elastik - plastik davranışların sac bükme işleminde olmasıdır ki bu da teorik bir şekilde açıklamayı ve modellemeyi oldukça karmaşıktır.

Geri yaylanma parametreleri için yaklaşık sonuçlar veren denklemler bulunmaktadır. Düzlemsel gerilme koşullarında Eşitlik 2.12'deki denklem ile geri yaylanma yaklaşık olarak hesaplanabilir (Sarıkaya, 2008; Kalpakjian and Schmid, 2003).

$$\frac{R_0}{R_1} = 4 \left(\frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right) + 1 \quad (2.12)$$

Düzlemsel bükme gerinmesi durumunda Eşitlik 2.13'deki formül kullanılabilir. Burada σ_{ak} akma mukavemetini, E elastisite modülünü ve ν poisson oranını ifade eder (Sarıkaya, 2008).

$$\frac{R_0}{R_1} = 4 \left(\frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} (1 - \nu^2) \right)^3 - 3 \left(\frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} (1 - \nu^2) \right) + 1 \quad (2.13)$$

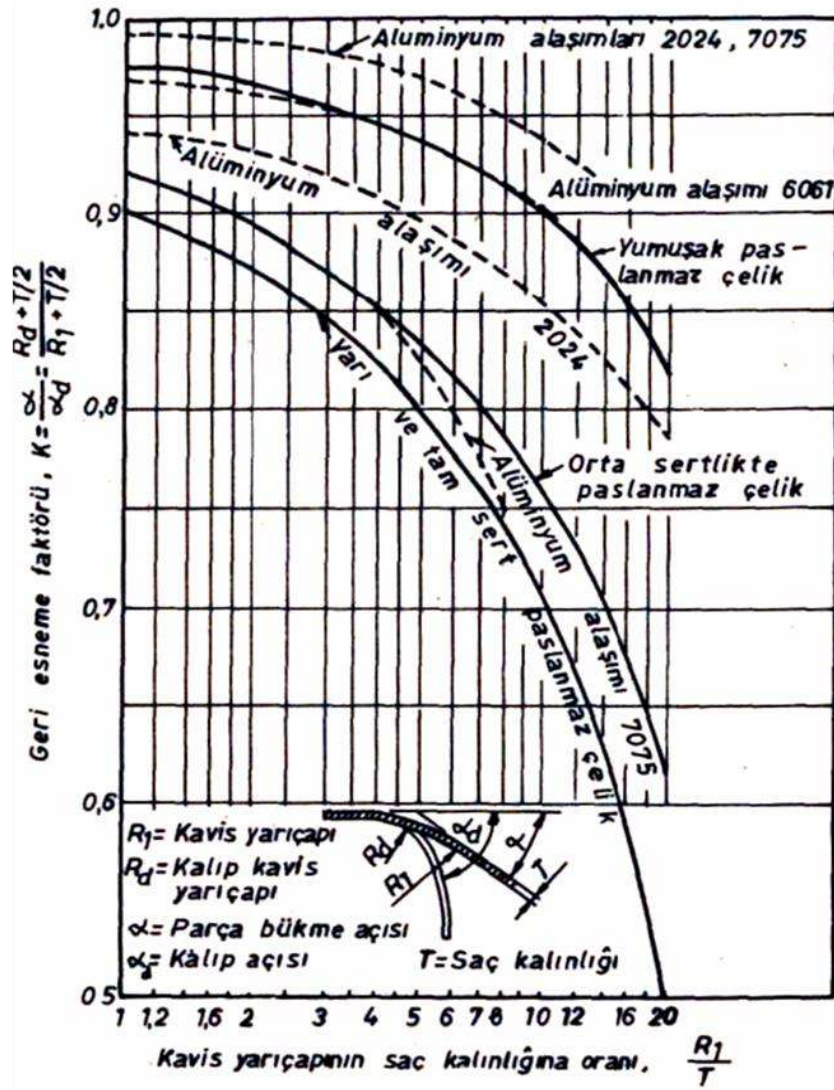
V bükme işleminde, sacın üzerinden yük kalktıktan sonra, geri yaylanma ile birlikte oluşan sacın yarıçapı (R) Eşitlik 2.14'deki formül ile tahmin edilebilir. Burada R_p zımbanın yarıçapını belirtir (Sarıkaya, 2008).

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R} + 3 \frac{\sigma_{ak}}{Et}} \quad (2.14)$$

2.4.1. Geri Yaylanmayı Etkileyen Faktörler

Geri yaylanma, sac malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri, işlem parametreleri, boyutsal faktörler gibi birçok değişkenden meydana gelen bir şekillendirme problemidir. Bu parametreler, sac malzeme üzerinde yükleme ve boşaltma sırasında oluşan gerilme dağılımında değişikliğe yol açarak, bükülmüş sac parçaların geri yaylanma davranışlarını etkilemektedir. Bu yüzden geri yaylanma miktarının tahmini ve telafisinin uygulanabilirliği güçleşmektedir. Dolayısıyla, geri yaylanma probleminin incelenmesinde, kaliteli sonuçlar elde edebilmek için, bu değişkenlerin bağımsız etkilerinin yanı sıra, çoklu etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Zira çoklu etkileşim nedeniyle, parametreler ve geri yaylanma arasında lineer olmayan durumlarla karşılaşmak mümkündür (Işıktaş, 2011).

Sac malzemelerin bükülmesinde, geri yaylanmayı etkileyen en önemli değişkenlerin başında malzeme kalınlığı gelmektedir. Bu durum, bükme yarıçapının kalınlığa oranı (R/t) olarak ifade edilebilir. Şekil 2.29'da R/t oranı ile geri yaylanma faktörü arasındaki bağıntının diyagramı verilmiştir. Bükme ve geri yaylanma davranışı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, bu oranın artmasıyla geri yaylanma miktarının arttığı gözlenmektedir. Yani, sac malzeme kalınlığı azaldıkça, geri yaylanma miktarının arttığı şeklinde de ifade edilebilir. Artan sac malzeme kalınlığı neticesinde, bükme bölgesinde oluşan kalıntı gerilme değeri azaldığı için geri yaylanma miktarının da azalması beklenir (Livatyalı ve Altan, 2001).



Şekil 2.29. R/t oranı ile geri yaylanma faktörü arasındaki bağıntı (URL-3, 2013)

Sac malzemelerin bükülmesi prosesinde, önemli parametrelerden biri de bükme yarıçapıdır. Sac malzemenin hasara uğramadan bükülebileceği minimum yarıçap değeri, o malzemenin bükülebilirliğini ifade etmektedir. Ekseri, çok küçük yarıçap değerlerinde bükme operasyonları gerçekleştirilememektedir. Bükme yarıçapı küçüldükçe, sac malzemedeki gerilmeler büyümekte ve bükme işlemi için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, bükülen sac malzemenin en dış lifinde meydana gelen aşırı miktardaki birim şekil değişimi sonucunda istenmeyen yüzey özellikleri ile karşılaşılabilir. Malzemenin kalınlık değeri arttıkça, bükülebileceği minimum bükme yarıçapı da artmaktadır. Ayrıca bükme yarıçapı, geri yaylanma davranışını da etkilemektedir. Yarıçap değeri arttıkça, geri yaylanma miktarı da artmaktadır. Bükme yarıçapının geri yaylanmaya etkisi, kalınlık faktörüne benzer olarak, R/t oranı ile belirtilmektedir. Buna istinaden R/t oranının artması, geri yaylanma miktarını artırmaktadır.

Alt ve üst kalıp arasındaki açıklık olarak tanımlanan kalıp boşluğu, geri yaylanma değerini etkileyen bir diğer parametredir. Kalıp boşluğunun küçülmesiyle, bükme bölgesindeki plastik deformasyonlar artmakta, dolayısıyla bükme sonrasında geri yaylanma miktarı azalmaktadır. Kalıp boşluğunun artmasıyla, geri yaylanma miktarının arttığı gözlenmektedir. Sac malzemelerin kalınlık toleransları göz önüne alındığında, endüstriyel uygulamalarda kalıp boşluğunun sac kalınlığına oranının 1.1 değerinde seçildiği söylenebilir (Livatyalı vd., 1997). Bu oranda meydana gelen %10'luk bir artış, geri yaylanma miktarını %10 civarında arttırabilmektedir (Livatyalı ve Altan, 2001). Böylece kalıp boşluğu değerinin değiştirilmesiyle geri yaylanma telafisinin yapılabileceği anlaşılmaktadır.

Bükme sonrası oluşan geri yaylanmayı, malzemenin özelliği olan anizotropi, akma dayanımı, pekleşme üsteli ve elastisite modülü özellikleri de etkilemektedir. Yöne bağlı olarak farklı mekanik özellik gösteren malzemelere anizotropik malzemeler denir ve çoğu sac malzemelerde anizotropiktir. Soğuk haddelenmiş saclarda boşluk, katışkı ve kalıntıların haddeleme doğrultusunda uzaması ve sıralanmasıyla oluşan bantlı yapı malzemedeki anizotropiyi doğurur. Anizotropi, sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini etkileyen önemli bir faktördür (Çapan, 2003). Anizotropi değeri arttıkça, sac malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnç de artmaktadır. Bütün bu durumlar geri yaylanma parametresini de etkilemektedir. Sac malzemelerin normal anizotropi değeri arttıkça geri yaylanma miktarı da artmaktadır (Işıktaş, 2011).

Sac malzemenin akma dayanımı arttıkça, geri yaylanma miktarı da artmaktadır. Bu yüzden geri yaylanma miktarının düşük olması isteniyorsa, bükme işlemi uygulanacak malzemenin de akma dayanımının düşük olması gerekir. Pekleşme üsteli de akma dayanımı gibi özellik göstermektedir. Artan pekleşme üsteli değeri, geri yaylanma miktarını da artırmaktadır. Fakat, malzemenin elastisite modülü geri yaylanma davranışını ters oranda etkiler. Yani elastisite modülünün artması, geri yaylanma miktarını azaltmaktadır (Işıktaş, 2011).

Sıcaklık ve şekillendirme hızı parametreleri de geri yaylanma problemini etkileyen faktörlerdir. Artan sıcaklık değerleri sac malzemelerin akma dayanımlarını düşürmektedir. Ayrıca sıcaklığın artması, şekillendirilen malzemelerin iç ve dış yüzeylerindeki çekme ve basma kalıntı gerilmeleri arasındaki farkı azaltmaktadır. Sonuç olarak, artan sıcaklık değerlerinde yapılan şekillendirme sonrasında oluşan geri yaylanma miktarı azalmaktadır (Kim ve Koç, 2008). Şekillendirme hızı, geri yaylanma miktarını belirgin bir şekilde etkilememektedir. Literatürdeki yapılan bir çalışmada, artan deformasyon hızına bağlı olarak geri yaylanma değerinin çok az miktarda azaldığı görülmüştür (Kılıç vd., 2009).

2.4.2. Geri Yaylanmanın Telafisi

Sac malzemelerin bükülmesi işleminde, şekillendirme sonrası istenilen bükme açısını yakalamak için, geri yaylanmanın telafi edilmesi gerekmektedir. Geri yaylanmayı telafi edebilmek amacıyla çeşitli yöntemlerden faydalanılmaktadır.

Arzu edilen açıdaki bükmenin elde edilebilmesi için bükme açısı geri yaylanma miktarı kadar artırılır. Buna, aşırı bükme de denilmektedir ve geri yaylanmayı etkili bir şekilde azaltmaktadır. Bu yöntemde, geri yaylanma miktarı önceden tahmin edilmekte ve tahmin edilen bu açı değerine göre sac malzeme daha fazla bükülmektedir. Böylece, bükme momentinin kaldırılmasının ardından, parça tahmin edilen açı değeri kadar geri yaylanmakta ve arzu edilen nihai parça geometrisi elde edilmektedir (Turan, 2009). Bu serbest bükme de, zımbanın vuruşunu ayarlamak suretiyle yapılabilir. "V" bükme kalıplarında yapılan serbest bükme işlemlerinde, geri yaylanmayı engellemek için, aşırı bükme yöntemi uygulanmaktadır. Her ne kadar bu yöntemin geri yaylanma miktarını giderebileceği söylene de, verimli bir sonuç elde edilmesi mümkün olmamakta, bu yöntemlerin bazı olumsuz yönleri de ortaya çıkmaktadır. Bükme açısının artırılması

malzeme cinslerine göre değişmektedir. Örneğin yumuşak çelik, alüminyum, bakır, pirinç için geri esneme 0° ile 1° arasında herhangi bir değer olabilir. Sert malzemeler için ise 12° ile 15° arasında değişmektedir. Bu rakamlar yaklaşık değerler olduğu için tam sonuç elde etmek mümkün olmamaktadır. Ancak geri yaylanma tam olarak bilindiği takdirde, kalıp geri yaylanma miktarı kadar büyük yapılarak istenen bükme sağlanabilir (Tekaslan vd., 2007).

V kalıpta bükme işleminde, geri yaylanma telafisi amacıyla uygulanabilecek bir diğer yöntem de, bükme bölgesinin ezilmesidir. Bu yöntemde, ıstampa geometrisi farklılık göstermekte ve ıstampa radyüs bölgesini ezerek daha fazla basma gerilmesi ve kalıcı deformasyon oluşmasına imkan sağlamaktadır (Turan, 2009). Böylece geri yaylanma miktarı ortadan kalkacaktır. Ancak bu tip bükme işlemlerinde çok büyük kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca pres kurs boyunun da çok hassas ayarlanması gerekir. Aksi takdirde kalıba ve sac malzemeye zarar verilebilir. Eğer pres kurs boyu iyi ayarlanamazsa, fazla kurs boyundan dolayı kalıbın çatlaması ve sac malzemenin bükme alanlarında ezilmesine neden olacaktır. Ezilmenin bükmeyi ve parçayı zayıflatacağı da göz önünde bulundurulur. Ezilmeden dolayı malzemede elde edilmek istenen gerçek yayın oluşmayacağı da düşünülürse, bu yöntemin pek sağlıklı olacağı söylenemez. Ayrıca kalıbın ve sac malzemenin zarar görmesi maliyeti ve zamanı artıracaktır (Tekaslan vd., 2007).

Gererek bükme işlemi de yaygın kullanılan geri yaylanma telafi yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, bükme işlemi sırasında ya da sonrasında sac çekme gerilmesine maruz bırakılmakta ve böylece geri yaylanma miktarı azaltılmaktadır (Turan, 2009).

Açık kalıpta bükme işleminde de geri yaylanma telafisi istenebilmektedir. Bu amaçla, ıstampa konumu kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Böylece, geri yaylanma açısına bağlı olarak, daha fazla ya da daha az bükme yapılması gerektiğinde ıstampanın pozisyonu ayarlanmaktadır. Bu noktada, açık kalıpta bükme işleminin geri yaylanmayı telafi etmek amacıyla, fazladan bükmeye izin verdiği söylenebilir (Wang vd., 2008).

Kenar bükmenin söz konusu olduğu durumlarda, geri yaylanmayı telafi etmenin bir diğer yolu da ters bükme işlemidir. Bu yöntemde öncelikle, sac malzeme V-kalıpta bükme işlemine maruz bırakılmaktadır. Daha sonra sac malzeme ters çevrilmekte ve ters yönde gerçekleştirilen düz kenar bükme işlemi uygulanmaktadır. Böylece, sac malzeme bünyesindeki gerilme dağılımları ile oynanmakta ve geri yaylanma belirli ölçüde telafi edilmektedir (Turan, 2009).

Geri yaylanmayı azaltmanın bir diğer yöntemi de zımbanın sac malzeme üzerinde bekletilme süresi arttırılmasıdır. Bu işlem geri yaylanma miktarını azaltmasına karşın zamanı artırdığından, maliyeti de artırır bu da istenmeyen bir durumdur.

Ayrıca bükme işlemlerinde geri yaylanma etkisini azaltmak için çift etkili bükme ve döndürerek bükme yöntemleri de kullanılabilir.

2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Tasarım adımlarında tanımlanan ödevin belirli istekler doğrultusunda tasarlanması için analiz ve optimizasyon çalışmaları yapılır. Analiz sonuçlarının belli istekleri ve sınırlamaları sağlamaması durumunda tasarımın önceki adımlarına dönülerek gerekli düzeltmeler yapılır. Test işlemleri tekrarlanır ve gerekirse tasarımın yeniden düzenlenmesi için bir çevrim yapısı kurulur. 1950'li yıllardan önce mühendislik uygulamalarında analiz işlemleri sınırlı kalmıştır. Karmaşık yapıdaki mühendislik problemlerinde çoğunlukla analitik çözümler elde etmek mümkün değildir. Çoğu kez problemin analitik çözümü elde edilecek şekilde basitleştirilmesi yöntemi benimsenmiştir. Sonlu elemanlar metodu (SEM), tasarımın analiz ve test aşamalarında tasarımcıya yardımcı olan bilgisayar destekli analiz tekniklerinden birisidir. Karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde kolaylıkla uygulanabilmesi ve sonuca yaklaşımdaki doğruluk açısından analiz işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

SEM; karmaşık tasarım problemlerinin daha basit alt problemlere ayrılarak belirli yük ve sınır koşullarında her birinin kendi içinde çözülmesiyle simule edilip tam sonucun bulunduğu bir çözüm şeklidir. Tasarımın modellenmesi, karmaşık bölgenin sonlu elemanlar olarak ifade edilen geometrik basit alt bölgelere yani elemanlar denen parçalara ayrılmasıyla yapılır. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içerir. Her elemanın yüklemeye vereceği tepkiyi belirten bir denklemi vardır. Bu elemanların tepkilerinin toplamı, tasarımın vereceği tepkiyi oluşturur. Her eleman içindeki tanım denklemlerinin düğüm noktalarında bulunan değerlerin elde edilmesi, problemin çözümünde yeterlidir. Tercih edilen yaklaşım fonksiyonları, interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise, iki unsura göre değişir: Çözülecek problemin tanım denklemlerinin derecesi ve çözülmesi hedeflenen elemandaki düğüm sayısı (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Sonlu elemanlar yöntemi modern çağın bir ürünüdür. Sonlu elemanlar yöntemi ile farklı analizler yapan paket programlar son dönemde hayli artmış ve daha geniş kitleler tarafından kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanılan programlar maliyeti artırabilecek malzeme, zaman, işçilik gibi unsurlardan tasarruf etmeye imkân sağlamaktadır. Ortaya çıkması hedeflenen ürünün öngörülen hesaplamaları daha kısa sürede ve daha kolay yapılarak istenilen düzeyde bir tasarım ortaya konmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemini diğer nümerik yöntemlerden farklı kılan kimi özelliklerini şu şekilde ifade edilebilir (Topçu ve Taşgetiren, 1998):

- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir parçanın geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- Birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolay bir şekilde incelenebilir.
- Farklı malzeme ve geometrik özellikleri bulunan parçalar analiz edilebilir.
- Sebep-sonuç ilişkisi olan problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Bu nitelikte birlikte problemlerin anlaşılması ve çözülmesi basitleşir.
- Sınır şartlarının uygulanabilirliği kolaydır.

Sonlu elemanlar yönteminin bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Örneğin çatlama, kırılma davranışı ve temas problemleri gibi bazı karmaşık olaylara uygulanmasında zorluklarla karşılaşmaktadır. Malzeme parametreleri gibi giriş bilgileri iyi tanımlanırsa gerçeğe yakın sonuçlar alınabilir. Yani programın verileri hatasız olmalı ve iyi kontrol edilmelidir. Sonlu elemanlar analizlerinden doğru sonuçlar alabilmek için özellikle sürekli ortamın çok sayıda elemana bölünmesi gereklidir. Bu metottan elde edilen sonuçlar dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Ayrıca bu yöntemin kullanılmasında, genellikle büyük bilgisayar belleğine ve zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemler çıkarılır, bütün sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemleri birleştirilir, böylece sisteme ait lineer denklem takımı elde edilir. Bu sonlu elemanlar metodunun temel prensibi olarak düşünülebilir. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemlerin içerisinde yaygın olarak kullanılan dört temel yöntem şunlardır (Kılıç, 2009):

- I. **Direkt yaklaşım:** Bu yaklaşım genellikle tek boyutlu ve basit problemlerin çözülmesinde uygundur.

- II. **Varyasyonel yaklaşım:** Bir fonksiyonelin maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değer maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.
- III. **Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı:** Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamalarını minimize etme işlemine denir. Bu yaklaşım kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonellerin elde edilemediği problemlerde uygulanabilir olmasıdır.
- IV. **Enerji dengesi yaklaşımı:** Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliği ilkesine dayanır. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç göstermez.

2.5.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin İşlem Basamakları

Herhangi bir problemin analiz işleminde kullanılacak olan yaklaşım, sonlu elemanlar yöntemindeki çözüm işleminin izlenecek yolunu değiştirmez. Bu yöntemle yapılan analizdeki işlem basamakları şu şekilde sıralanabilir (Topçu ve Taşgetiren, 1998):

- Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- Eleman direngenlik matrisinin teşkili,
- Sistem direngenlik matrisinin hesaplanması,
- Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sistem denklemlerinin çözümü.

Analiz problemlerinin çözümünde sonlu elemanlar yönteminin ilk adımı, eleman tipinin tespit edilmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı tespit edilerek bu geometrik yapıya en uygun düşen eleman tipi seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme nispetinde, ulaşılan

sonuçların gerçek çözüme yaklaştığını ileri sürebiliriz. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört bölüme ayrılabilir:

- I. **Tek boyutlu elemanlar:** Bu eleman tipi tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır.
- II. **İki boyutlu elemanlar:** İki boyutlu yani düzlem problemlerinin çözümünde kullanılan eleman tipidir. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenen altı, dokuz veya daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri vardır. Üçgen eleman, çözüm bölgesini aslına uygun olarak temsil etmesi bakımından kullanışlı bir eleman tipidir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir. Dörtgen eleman çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman şeklinde kullanılır.
- III. **Dönel elemanlar:** Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşur. Esasında üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözmeye olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.
- IV. **Üç boyutlu elemanlar:** Bu grupta temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması veya daha genel olarak altı yüzeyle elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir. Genellikle mühendislik problemlerinin birçoğu üç boyutludur. Bu eleman tipinin çözümü, üçgen elemana oranla daha zordur. Fakat gerçeğe en yakın sonuçlara üç boyutlu elemanlar sayesinde ulaşılabilir.

İzoparametrik Elemanlar: Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa, kenarları doğru olan elemanlar bu bölgeyi kesin olarak ifade edemez. Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyette tanımlamak için elemanların ebatlarını küçültmek ve bu sayede sayılarını artırmak gerekmektedir. Böylece çözülmesi umulan denklem adedi artar, bununla birlikte ihtiyaç duyulan bilgisayar kapasitesi ve zamanın büyümesine neden olur. Ortaya çıkan bu tür olumsuzluklardan kurtulmak için, ihtiyaç duyulan elemanların başında çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlar gelmektedir. Bu sayede çözüm bölgesi daha doğru tanımlanmakta, ayrıca çözüm daha az sayıda eleman kullanılarak elde edilmektedir. Bu

elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile ifade edilir. İzoparametrik elemanın niteliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eşparametrelili elemanlar da denilmektedir.

İnterpolasyon fonksiyonu, alan değişkeninin eleman üzerindeki değişimini ifade etmektedir. İnterpolasyon fonksiyonunun tespit edilmesi belirlenen eleman tipine ve çözülmesi amaçlanan denklemin derecesine bağlıdır. Bununla birlikte interpolasyon fonksiyonları bazı şartları yerine getirmektedir. Bunlardan birincisi, interpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeni ve alan değişkeninin en yüksek mertebeden bir önceki mertebeye kadar olan kısmi türevleri eleman sınırlarında sürekli olmalıdır. İkincisi, interpolasyon fonksiyonunda bulunan alan değişkeninin bütün türevleri, eleman boyutları limitte sıfıra gitse bile alan değişkenini karakterize etmelidir. Üçüncüsü ise, seçilen interpolasyon fonksiyonu koordinat değişimlerinden etkilenmemelidir. Hem bu şartları sağlamaları hem de türev ve integral almadaki kolaylığından dolayı interpolasyon fonksiyonu olarak genelde polinomlar seçilir. Seçilen polinom, yukarıdaki şartların gerçekleşmesi için uygun terimleri ihtiva etmelidir.

Elemana etki eden dış etkenler ile alan değişkenleri arasında ilişki kurmayı ifade eden eleman direngenliği elde edilirken birden çok faktör dikkate alınmalıdır: Çözülecek problemin konusu, seçilen eleman tipi, alan değişkeni, eleman özelliklerini belirlerken benimsenen metot, seçilen interpolasyon fonksiyonu... Bu faktörlere göre eleman direngenliğinin elde edilmesinde farklı yollar izlenir.

Sistem direngenlik matrisinin tespit edilmesinde, sistemin düğüm sayısı ve her düğümdeki serbestlik derecesi rol oynar. Elemanlar için hesaplanan direngenlik matrisleri, elemanın üzerindeki düğüm numaralarına bağlı olarak genel direngenlik matrisinde ilgili satır ve sütununa yerleştirilir. Farklı elemanlar tarafından ortak kullanılan düğümlerdeki terimler genel direngenlik matrisinin ilgili satır ve sütununda üst üste toplanmalıdır. Elemanların her bir düğüm noktasının numaralaması belirli bir sistematığe göre yapılırsa, genel direngenlik matrisinde elemanlar diyagonal üzerinde üst üste toplanır. Direngenlik matrisi genellikle simetriktir.

Bir problemde sistemi etkileyen farklı kuvvetler bulunur. Tekil kuvvetler, yayılı kuvvetler ve kütle kuvvetleri buna örnek gösterilebilir. Tekil kuvvetler hangi elemanın hangi düğümünü nasıl etkiliyorsa genel kuvvet vektörünün de etki ettiği düğüme karşılık gelen satıra yerleştirilir. Problemin türüne göre tekil yük kavramı değişebilir. Yayılı

kuvvetler, bir kenar boyunca ya da bir alanda etki gösterirler. Kütle kuvvetleri ise, eleman hacmi için geçerli olan merkezkaç kuvveti ve ağırlık kuvvetleri gibi kuvvetlerdir.

Her problemin doğal ya da yapay sınır şartları bulunur ve problemin çözümü adına bu sınır şartlarının tespit edilmesi gerekir. Sınır şartlarının sağlayacağı referans, cismin çeşitli kısımlarındaki elastik yer değiştirmelerin ölçülebilmesini mümkün kılar.

Direngenlik matrisinin tersini almak, sistemin sınır şartları da göz önünde bulundurularak sistem denkleminin çözümü için yeterlidir. Ancak bu tersine alma işlemi bilgisayar kapasitesi ve zaman açısından çok büyük matrislerin çözümünde uygun görülmemektedir. Bunun yerine Gauss Eliminasyon Metodu'ndan istifade etmek, daha az kapasitede daha hızlı işlem yapmaya olanak sağlamaktadır.

2.5.2. Sac Şekillendirmede Kullanılan Simülasyon Algoritmaları

Sac şekillendirme işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonunu yapmak için birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemleri sınıflandırmak için bunların formülasyonlarındaki farklılıkları veya zaman parametresini ele alışlarını dikkate almak gerekir. Bu yöntemlerin birbirlerine nazaran avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bundan dolayı bu yöntemlerin birini veya birkaçını esas alan çözümler farklı yazılımlar tarafından sunulmaktadır. Bahsettiğimiz yöntemlere ait bilgiler aşağıda verilmektedir (Kahraman, 2008):

2.5.2.1. Rijit Plastik ve Elastik Plastik

Malzemenin rijit-plastik olduğunu kabul etmek sonlu elemanlar hesaplamalarını kolaylaştırdığı için daha hızlı bir hesaplama olanağı sağlar. Bu kabul, malzemenin elastikliğinin göz ardı edilmesiyle sağlanır. Lakin malzemedeki elastikliğin ihmal edilmesi, hesaplama zamanında azalma ve formülasyondaki sadelik kimi kısıtlamaları da beraberinde getirir. Şekil verme işleminin sonrasında meydana gelen geri yayılmanın ve yerçekimi etkisindeki sacın pot çemberi veya dişi kalıp üzerine yayılırken yaptığı hareketlerin belirlenememesi bu kısıtlamaların başında gelir. Elastik plastik bir malzemenin modellenmesi bu iki hesaplamayı yapabilir, fakat daha karmaşık formülasyon kullanıldığından hesaplama zamanı önemli ölçüde artar.

2.5.2.2. Statik Kapalı Yöntem

Statik kapalı yöntem, quasi-statik denklemler kurarak sonlu elemanlar formülasyonunu meydana getirir. Bu durum sac metal şekillendirmenin darbe etkisi içeren ve sacın dinamik hareketinden kayda değer miktarda etkilenen bir proses olmaması dolayısıyla mantıklıdır. Bu yöntemle yapılan hesaplama, karşıt dinamik etkilerin hesaplanmasını kapsamaz. Bu teknikle rijitlik matrisi genel olarak diyagonal değildir, bu durum iteratif olarak çözümleme yapmayı gerektirir. Yalnız bu çözümleme işleminde, sac malzeme ile kalıp arasında sürekli değişen temas koşullarından dolayı kimi zaman iterasyonlarının bir kesişime varması, bir çözüm ortaya konması olası değildir. Özellikle sac malzemenin şekillenmesiyle aldığı karmaşık formların ifadesi temas koşullarını hayli karışık hale getirdiğinden simülasyonun tamamlanması mümkün değildir.

2.5.2.3. Statik Açık Yöntem

Bu metot, iterasyon gerektirmeksizin çözülebilecek bir teğet rijitlik matrisinin ortaya çıkmasına sebebiyet veren, hayli küçük bir zaman adımı tanımlar. Bu sayede kapalı yöntemin karşılaştığı çözüm iterasyonlarının sonuçlanmaması problemini ortadan kaldırmak amaçlanır. Bu küçük zaman adımından dolayı, bir çekme operasyonunun sonuçlanması için oldukça fazla sayıda artımsal adım oluşmaktadır. Çözüm hesaplamaları daha az hata içerir. Ancak diğer yöntemlere nazaran hesaplama zamanı çok daha fazladır.

2.5.2.4. Dinamik Açık Yöntem

Bu yöntem, bütün zaman adımlarında ve her düğüm noktası için dinamik eşitlik denklemini çözümlenmektedir. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, rijitlik matrisi oluşturulmasına duyulan ihtiyacı ortadan kaldırması ve her adımda doğrudan çözümü mümkün kılmasıdır. Bundan dolayı sadece bir zaman adımı için çözüm kapalı yöntemle göre oldukça hızlıdır. Yalnız zaman adımının, zaman artımında dinamik kararlı bir çözüm elde etmesi ve girişim dalgasının hiçbir elamanı geçmemesi için kritik bir değerle sınırlandırılması gerekir. Bu durum genelde zaman adımının $10E-6$ saniye gibi bir değere eşitlenmesi anlamına gelir. Çözümleme zamanının azaltılması için, simülasyonlar genelde

artırılmış takım hızlarında gerçekleştirilir, fakat bu durumda gerçekçi olmayan şekillendirme modelleriyle karşılaşılabılır.

2.5.3.Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Paket Programlar

Sonlu elemanlar teknolojisinin gelişmesi, süper bilgisayarların gelişmesine paralel olarak gerçekleşmiştir. Paralel sayısal algoritmalar, programlama stratejileri ve programlama dilleri, bu çeşit bilgisayarların özelliklerinden azami ölçüde istifade edebilmek için geliştirilmiştir. Özel problemlerin çözümü için genel bir programın kullanılabiliyor olması, sonlu elemanlar metodunun güçlü ve çok amaçlı bir araç olmasına neden olmuş ve çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan bazıları oldukça genel amaçlı olup, farklı mühendislik alanlarındaki problemlerin çözümü için çok az, hatta hiç bir değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir.

Sadece bir sınıflandırmaya tabi tutsak bile yukarıda bahsetmiş olduğumuz yöntemlerin birbirlerine kıyasla farklılıkları bulunmaktadır. Kimi ticari yazılımlar yüksek bir kararlılığa sahip olup kullanıcıya daha çok yarar sağlamaktadır. Kimi yazılımlarsa hala gelişme sürecindedir. Bunlar konunun uzmanları tarafından kullanıldığında simülasyon yapabilirler. Ayrıca üç boyutlu şekillendirme analizi yapabilen pek çok yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımların bir kısmı, düzlem uzama ve asimetrik kabulleri temel almasından dolayı, yalnız iki boyutlu takım kesitlerini kullanarak genel şekil değiştirmeyi tahmin etmeyi hedefler.

Tek adımda sac malzemenin şekillendirilmesini hesaplamaya yönelik hızlı fakat güvenilirliği daha az, yazılımlar bulunmaktadır. Kimi algoritmalar şekillenmiş parçadan açınım yapılmış sac malzemeye giderek çözümleme yapar. Yalnız bu durumda simülasyon bakımından önemli olan sürtünme, kırılma gibi etkenleri hesaplamak mümkün olmaz. Bu tür uygulamalar hızlıdır ve özellikle sac malzemenin açınım hesabında oldukça faydalıdır. Sac şekillendirmesini mümkün olduğunca gerçeğe yakın tahmin edebilmek ve daha fazla parametre ile ifade edebilmek, günümüzde sonlu elemanlarla analiz gerçekleştiren paket program yazılım firmalarının benimsedikleri bir yaklaşımdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu yazılımlar Tablo 2.7'de verilmiştir (Özçelik,2008).

Tablo 2.7. Sonlu elemanlar ile analiz yapan mevcut yazılımlar (Özçelik, 2008)

PROGRAM ADI	ORGANİZASYON	ÜLKE	SINIFLANDIRMA
SHEET-3	Ohio State University	ABD	Rijit- Visko-Plastik
MFP2D	University Of Catalunya	İSPANYA	
MFP3D	University Of Catalunya	İSPANYA	
FORMSYS-SHEET	KAIST	KORE	
CASHE	KAIST	KORE	
MILFRM	Ford Motor	ABD	Elasto-Plastik Statik- Kapalı Yöntem
Dieka	University Of Twente	HOLLANDA	
LAGAMINE	University Of Liege	BELÇİKA	
CAEMBOUR	Ecole Centrsl Paris	FRANSA	
ABAQUS	H.S.K İnc.	ABD	
FLECHE	University Tech. Compiègne	FRANSA	
NIKE 3D	Livermore Software	ABD	
AUTOFORM	ETH Zwrich	İSVİÇRE	
BENDI	Ford Motor	ABD	
INDEED	INPRO	ALMANYA	
PROFIL	Inst. National Sci.	FRANSA	
MARC	Marc Analysis	ABD	
ROBUST	Osaka University	JAPONYA	
ITAS-3D	RIKEN Ins.	JAPONYA	Elasto-Plastik Statik Açık Yöntem
ITAS-2D	RIKEN Ins.	JAPONYA	
LS-DYNA/DYNAFORM	Livermore Software	ABD	
STAMPAK	Quantech ATZ	İSPANYA	Elasto-Plastik Dinamik Açık Yöntem
PAM-STAMP	E.S.I	FRANSA	
RADIOSS	MECALOG	FRANSA	
ABAQUS/Explicit	H.S.K. Inc.	ABD	
OPTRIS	E.S.I.	FRANSA	
CES-3D	University Of Catalunya	İSPANYA	

Abaqus, çok daha geniş amaçlı kullanımlar için tercih edilen bir yazılımdır. Sac şekillendirmede gerilme analizinden, ısı transfer analizleri, yapısal, sivil, tıbbi alanlardaki diğer mühendislik analizlerine kadar geniş bir kullanım sahasına sahiptir. Yazılım, kullanım alanlarındaki çeşitlilikten dolayı pek çok eleman tipine sahiptir. Araştırma projelerinde ve büyük devlet kurumlarında kullanımı yaygındır (Özçelik, 2008).

Autoform İsviçre kökenli bir yazılım olup, statik implisit yöntemle çalışır. Kullanımı kolay, hassasiyeti yüksek ve çok hızlı sonuç veren bir sac şekillendirme simülasyonu ve çevre yüzeyleri geliştirme yazılımıdır. One step ve incremental

hesaplamalar yapabilir. Kabuk eleman kullanıldığı için iki boyutlu mesh yapısı kullanılır. Bu yazılımda CAD programına ihtiyaç duymadan die - design modülü ile yardımcı çekme yüzeyleri meydana getirilebilir. Ayrıca bu yüzeyler ıges çıktı olarak alınabilir.

Dinamik açık yöntemle simülasyon hesaplaması yapan Dynaform yazılımı Amerika kökenlidir. Sacın plastik şekillendirme analizi eksplisit ve sacın geri esneme hesabını implisit olarak hesaplar. Çok çeşitli simülasyon için elaman yapıları kullanılır. Örneğin: Kabuk, zar vs. Die Face Engineering (DFE) modülü ile yardımcı çekme yüzeyleri bu program içerisinde bir CAD programına ihtiyaç duymadan oluşturulabilir. Farklı yazılımlarda açılmak üzere geometrik verilerin dosya uzantıları değiştirilerek bu çekme kalıbı için oluşturulmuş yüzeyler, program dışına kaydedilebilir (Kahraman, 2008).

Pek çok uygulama alanında kullanılan Ls-Dyna yazılımı, geniş bir elaman kütüphanesine sahip olup ısı transferi ve gerilme analizi yapabilmesi gibi özellikleriyle öne çıkar. Daha ziyade üniversitelerde araştırma amaçlı tercih edilir. Son zamanlarda düşme testi modülü de yenilik olarak ilave edilmiştir. Sonlu elemanlarla analiz yapabilen en eski yazılımlardan biridir.

ESI grubuna son yıllarda katılmış olan Optris programı, dinamik açık bir yazılımdır. Ayrıca Optris'te hidroform ve tüp simülasyonlarını da yapmak mümkündür.

Pam-Stamp, geliştirilmeye başlandığı 1987 yılından itibaren BMW, Fiat, General Motors, Hyundai, Renault gibi pek çok otomotiv üreticisinin kullanımına dahil olmuştur. Çoğu CAD sistemi ile uyumlu olan bu yazılım ıges veya vda formatında dosya transferi yapabilir. Analiz yaparken kabuk eleman yanında üç boyutlu cidar eleman da kullanılabilir. Ters aç kontrolü, otomatik kalıp pozisyonlaması, otomatik eleman boyut ve sayı ayarlaması, geri yaylanma modülü ve malzeme kütüphanesi mevcuttur (Alıcı, 2001).

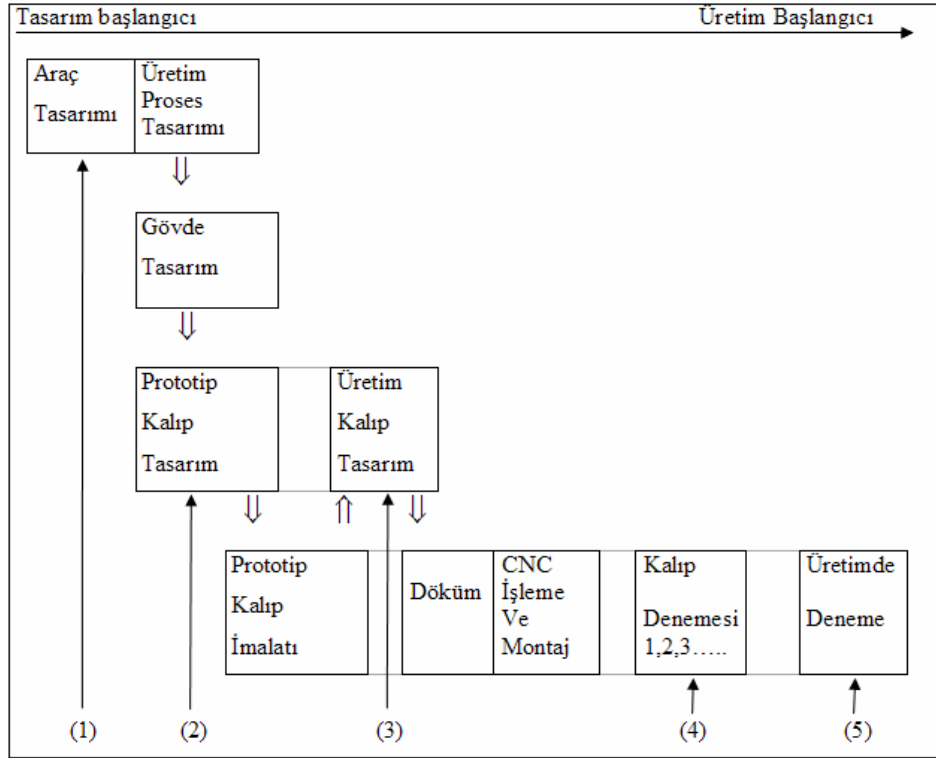
Stampack yazılımı, İspanya'da bulunan Uluslar Arası Mühendislikte Sayısal Yöntemler Merkezi (CIMNE) tarafından geliştirilmiş bir metal şekillendirme yazılımıdır. Explicit ve implisit çözüm yöntemlerine dayalı olan Stampack; derin çekme, ütüleme, gererek şekil verme, esnek şekillendirme, hidro-forming, profillerin şekillendirmesi, kalınlıklı şekillendirme, geri yaylanma ve geri yaylanma telafisi gibi genel ve özel metal şekillendirme işlemleri için geliştirilmiş bir metal şekillendirme yazılımıdır.

2.5.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Sac İmalatındaki Uygulamaları

Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla yapılan simülasyonların, sac imalat proseslerinin belirlenmesinde ne şekilde kullanılabileceği Şekil 2.30'da gösterilmiştir (Kahraman, 2008). İlk aşamada simülasyonlar, sacın mevcut geometrisine uygun olarak şekillendirilmesinin mümkün olup olmadığını incelemek üzere gerçekleştirilir. Şekillendirme mümkün değilse, sacın geometrisi değiştirilebilir. Bununla birlikte bu aşamada imalat bilgisinin az olması ve takım geometrilerinin henüz belirlenmemiş olması nedeniyle tam anlamıyla bir simülasyon yapılmaz.

Simülasyonların gerçekleştirilmesinin yararlı olacağı diğer bir aşama, şekil verilecek sac bilgisinin daha çok detay içerdiği ve prototip kalıplarının yapımının mümkün olmasıdır. Fakat simülasyonlar öncelik prototip olması nedeniyle tam olarak gerçek çelik kalıpların imalatına yönelik değildir. Bir sonraki aşamada, şekil verilecek sac bilgisi bilgisayar ortamında bulunmaktadır. Bu sayede simülasyonlar yardımıyla çelik kalıpların tasarımına başlamak için gerekli olan çekme, kesme, flanş bükme, ütüleme gibi bazı proses aşamaları belirlenebilir. Bu aşamada yüzey geometrilerini belirleyebilmek mümkündür. Bu noktada simülasyon sistemlerinin ve bilgisayar destekli tasarım araçlarının birbiriyle ilişkisi önem kazanır. Eğer iteratif bir şekilde çok sayıda simülasyon yapıp buradaki öngörüler, bilgisayar destekli tasarım araçlarındaki geometriler hızla değiştirilebilirse hem zaman hem de emek açısından kayda değer bir kazanç elde edilebilir. Bu durum bir benzeri dördüncü ve beşinci aşamalarda yani kalıpların denenmesi sonucunda elde edilen verilerin esnasında da söz konusu olur. Yani herhangi bir aşamada öngörülen geometrik değişikliklerin olabildiğince hızlı şekilde onaylanıp kalıpların yüzeylerine uygulanması gerekir.

Simülasyon sonuçlarının doğruluğunun güvenilir olması çok önemlidir. Zira, bu durum form verilecek sacın geometrisini değiştirmek gibi ciddi bir sonuç doğuracaktır. Bu simülasyon programı kodlarının ne kadar iyi olduğundan, kullanıcının deneyimine kadar pek çok parametreye bağlıdır. Mevcut yazılımlar birbirine oranla bazı konularda güçlü bazı konularda ise zayıftır. Dolayısıyla çoğu otomobil üreticisi bir değil birden fazla yazılımı aynı anda kullanmakta, simülasyon sonuçlarını birden çok şekilde doğrulamaktadır.



Şekil 2.30. Tasarımdan imalata geçiş sürecinde simülasyonların görevleri (Kahraman, 2008)

Sac malzeme endüstrinde, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan simülasyon işlemi, çok gerçekçi avantajlar sunmaktadır. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Önemli ölçüde tasarım ve geliştirme işlemlerinde sürelerin kısaltılması,
- Geliştirme işlemlerinde kullanılan malzeme miktarındaki azalma,
- Tasarım esnasında geçiş zaman aralarının azaltılması,
- Bu durumların sonucu olan ve endüstri için en önemlisi olan ürün kalitesindeki artıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, farklı kalitedeki sac malzemelerin bükme işlemiyle şekillendirilmesinde meydana gelen geri yaylanma davranışı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneylerde, iş parçası malzemesi, iş parçası kalınlığı, hadde yönü, kalıp açısı değişken olarak alınmıştır. Deneylerde kullanılan değişken işlem parametreleri Tablo 3.1'de verilmiş olup, bu parametreler dikkate alınarak full faktöriyel olarak deney tasarımı ($5 \times 2 \times 3 \times 3 = 90$) yapılmış ve bu tasarım Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. V kalıpla bükme işleminde kullanılan işlem parametreleri

İşlem Parametreleri	Değerleri
Malzeme	DP800, DP600, DC01, DC04, DC05
Kalınlık (mm)	1, 1.5, 2
Hadde Yönü	Hadde Yönünde, Hadde Yönüne Dik
Kalıp Açısı (°)	60, 90, 120

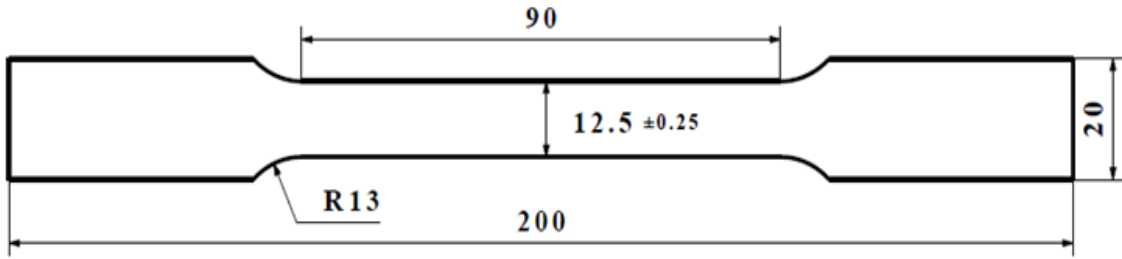
Deneysel çalışmalarda, piyasada kullanımı giderek artan DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05 çelik sac malzemeleri kullanılmıştır. DP800 ve DP600 çelik sac kaliteleri, yüksek mukavemet ve üstün şekillenebilirlik gerektiren uygulamalarda mükemmel bir performans göstermesi bakımından, otomotiv endüstrisinin vazgeçilmez çelik sac malzemeleri haline gelmiştir. Bu saclar genellikle dayanımı sert saclar olarak tanımlanır. DC01, DC04 ve DC05 çelik sac kaliteleri, bükme, çekme ve derin çekme ile soğuk şekillendirme için uygundur. Bu ürünler, otomotiv sektöründe, dayanıklı ev aletleri sektöründe, mutfak eşyaları, radyatör ve havalandırma ekipmanları imalatında, mukavemet, sağlamlık ve şekillendirme isteyen tüm uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu saclar genellikle düşük karbonlu ve yumuşak saclar olarak ifade edilir. Sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere çelik sac malzemelere ait mekanik özelliklerin belirlenmesi için laboratuvar ortamında çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri, Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında, Şekil 3.1'de gösterilen 100 kN kapasiteli Shimadzu marka çekme deneyi cihazında 5 mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneylerinde kullanılan test numuneleri ASTM-E8 standardına göre hazırlanmıştır (Şekil 3.2).

Tablo 3.2. Bükme işleminde kullanılan deney tasarımı

Deney No	Malzeme Kalitesi	Hadde Yönü (°)	Kalıp Açısı (°)	Kalınlık (mm)	Deney No	Malzeme Kalitesi	Hadde Yönü (°)	Kalıp Açısı (°)	Kalınlık (mm)
1	DP800	0	60	1	46	DC01	0	60	1
2				1.5	47				1.5
3				2	48				2
4			90	1	49			90	1
5				1.5	50				1.5
6				2	51				2
7			120	1	52			120	1
8				1.5	53				1.5
9				2	54				2
10		90	60	1	55	DC04	0	60	1
11				1.5	56				1.5
12				2	57				2
13			90	1	58			90	1
14				1.5	59				1.5
15				2	60				2
16			120	1	61			120	1
17				1.5	62				1.5
18				2	63				2
19	DP600	0	60	1	64	DC04	90	60	1
20				1.5	65				1.5
21				2	66				2
22			90	1	67			90	1
23				1.5	68				1.5
24				2	69				2
25			120	1	70			120	1
26				1.5	71				1.5
27				2	72				2
28		90	60	1	73	DC05	0	60	1
29				1.5	74				1.5
30				2	75				2
31			90	1	76			90	1
32				1.5	77				1.5
33				2	78				2
34			120	1	79			120	1
35				1.5	80				1.5
36				2	81				2
37	DC01	0	60	1	82	DC05	90	60	1
38				1.5	83				1.5
39				2	84				2
40			90	1	85			90	1
41				1.5	86				1.5
42				2	87				2
43			120	1	88			120	1
44				1.5	89				1.5
45				2	90				2



Şekil 3.1. Çekme test cihazı



Şekil 3.2. Çekme testi numune ölçüleri

Yapılan çekme testleri sonucunda çelik sac malzemelerin belirlenen mekanik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Her kalite çelik sac malzeme için birden fazla deney yapılarak, elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Çalışmada kullanılan çelik sac malzemelerin kimyasal bileşimleri teknik destek sağlayan firmalardan alınarak Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Deneylerde kullanılan çelik sac malzemelerin mukavemet özellikleri

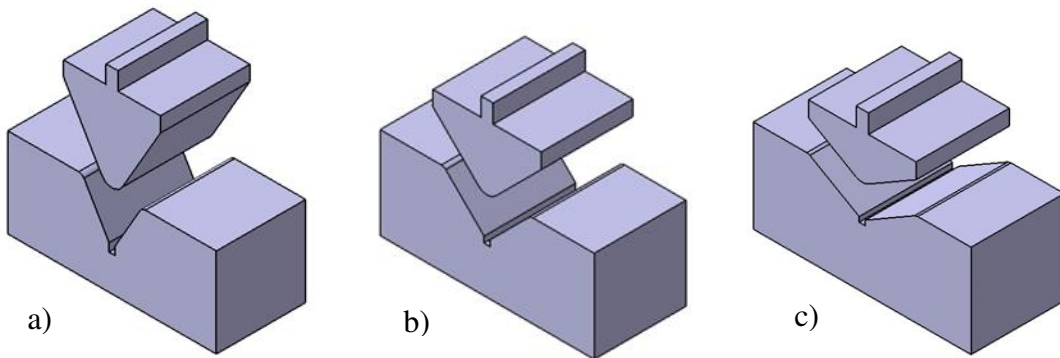
Malzeme	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Uzama (%)
DP800	808	512	18
DP600	612	396	24
DC01	345	254	28
DC04	311	177	38
DC05	297	148	40

Tablo 3.4. Çelik sac malzemelerin kimyasal bileşimleri

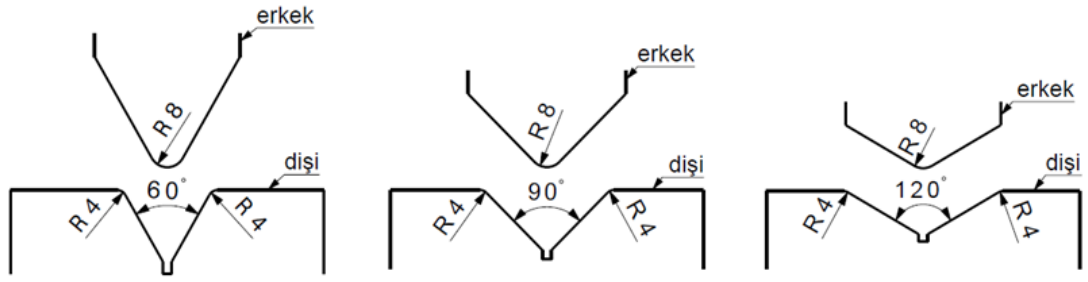
Numune	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	Cr
DC05	0.060	0.035	0.025	0.025	-	-	-	-
DC04	0.080	0.040	0.030	0.030	-	-	-	-
DC01	0.120	0.600	0.045	0.045	-	-	-	-
DP600	0.090	1.600	0.015	0.004	0.180	0.020	0.015	0.120
DP800	0.120	1.500	0.013	0.002	0.200	0.040	0.015	0.020

3.1. Deneysel Çalışma

Deneyisel çalışmalarda, V kalıpla bükme yöntemi kullanılarak bir dizi sac şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, kalıplar literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Tasarımlar CAD programlarından biri olan Catia V5 yazılımında yapılmıştır. Şekil 3.3'te tasarımı yapılan kalıpların resimleri verilmiştir.

**Şekil 3.3.** Catia V5 programından alınan kalıpların tasarımı a)60° b)90° c)120°

Tasarımı yapılan kalıplar St37 malzemesinden imal edilmiştir. İlk olarak, malzeme CNC oksijen kesim makinesiyle şablon halinde kesilmiştir. Daha sonra ham ölçülerine düşürülen malzeme CNC freze kullanılarak Şekil 3.4'te verilen ölçülere uygun olarak işlenmiştir.



Şekil 3.4. Kalıp elemanlarının ölçüleri

Bükme işleminde kullanılacak olan sac deney numuneleri, 90x45 mm ölçülerinde Şekil 3.5'te gösterilen giyotin makas yardımıyla kesilmiştir. Kesme işlemi, deney parametrelerinden biri olan haddeleme yönü dikkate alınarak yapılmıştır. Daha hassas bir bükme işlemi gerçekleştirmek için kesmeden sonra numunelerde oluşan çapaklar zımpara yapılarak alınmıştır.



Şekil 3.5. Çelik sac malzemelerin kesme işleminde kullanılan giyotin makas

Deneylerin kaliteli bir şekilde yapılabilmesi için, her bir deney numunesinin kalıp üzerinde düzgün ve aynı biçimde konumlanması gerekmektedir. Bu yüzden dişi kalıp üzerine markalama işlemi yapılmıştır. Bu işlem yapıldıktan sonra kalıplar 100 kN kapasiteli elektromekanik yüklemeli çekme basma test cihazına Şekil 3.6'daki gibi bağlanmış ve böylece deney düzeneği oluşturulmuştur.

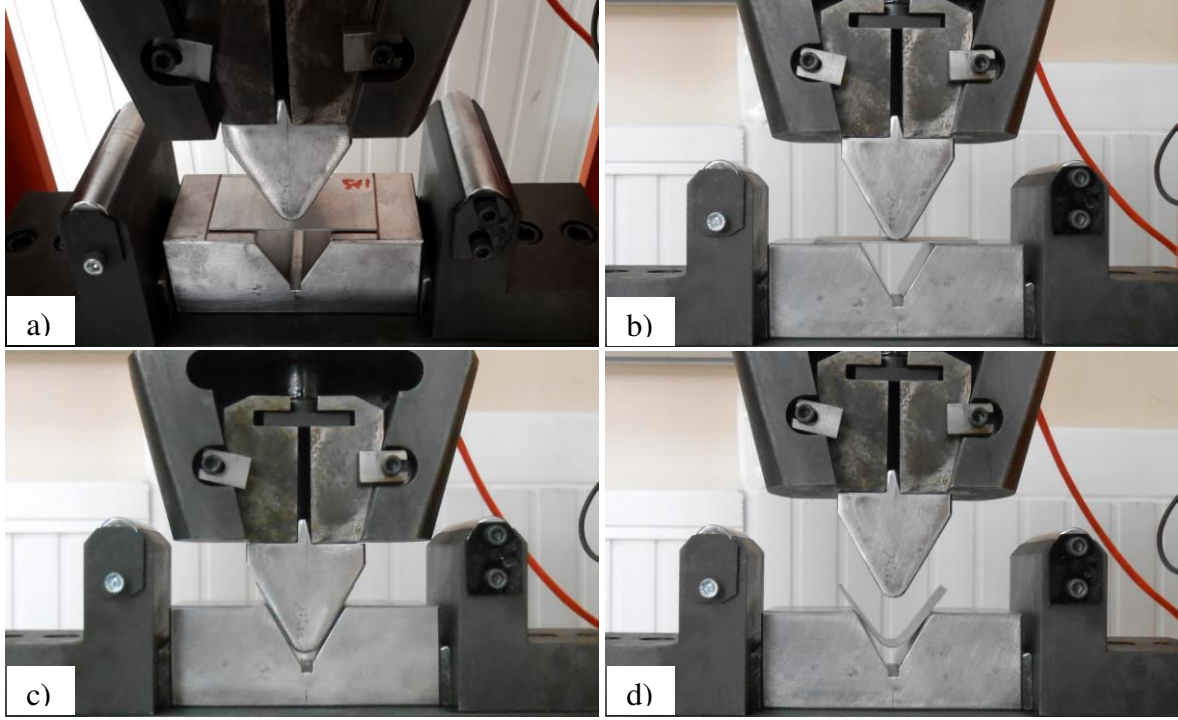


Şekil 3.6. Bükme deneyi düzeneği

Deney numuneleri dişi kalıp üzerinde belirlenen alana yerleştirildikten sonra V bükme işlemi bilgisayar destekli olarak 125 mm/dak deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Her deney şartı için bükme deneyleri üçer defa tekrarlanmış ve toplamda 270 adet numuneye bükme işlemi yapılmıştır. Bükme işlemi, erkek kalıp ile dişi kalıp arasındaki boşluğun sac malzeme kalınlığına eşitlenmesine kadar devam ettirilmiştir. Kalıpların sac malzemeyi ezerek geri yaylanma davranışını etkilememesi için, kalıplar arasındaki mesafenin sac kalınlığı kadar bırakılması gerekmektedir. V kalıpla bükme deneyinin aşamaları Şekil 3.7'de verilmiştir. Erkek kalıp en son noktaya iner inmez sac üzerinden yük kaldırılmış, yani erkek kalıp sac malzeme üzerinde hiç bekletilmemiştir.

Bükme deneyleri tamamlandıktan sonra, sac malzemelerin geri yaylanma miktarları kalıp açısından ne kadar saptığının tespit edilmesiyle belirlenmiştir. Şöyle ki geri yaylanma olmadığı takdirde, 60°'lik kalıpla yapılan bükme işlemi sonrasında sac malzemesinin ölçülen bükme açısının 60° olması gerekir. Bu açının kalıbın bükme açısından farklı olması

geri yaylanma davranışı gösterdiğinin belirtisidir. Deney numunelerinin bükme işlemi sonrası bükme açılarının ölçülmesi Şekil 3.8'de gösterilen dijital açı ölçer yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Bükme işleminin basamakları a) Sacın yerleştirilmesi b) Bükmenin başlaması c) Zımbanın son noktası d) Zımbanın kalkması ve işlemin sonlanması

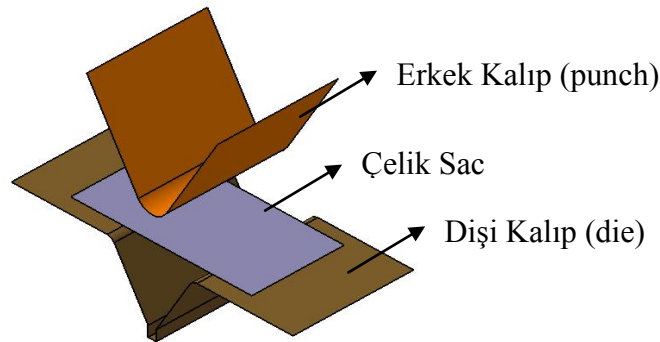


Şekil 3.8. Dijital açı ölçer yardımıyla açı ölçümünün yapılması

3.2. Sayısal Çalışma

Sayısal çalışmada, sac malzemede meydana gelen geri yaylanma davranışı Autoform yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İsviçre kökenli olan Autoform programı, sac şekillendirme ile uğraşan bir çok firma tarafından tercih edilen bir yazılımdır. Autoform'un kullanımı, planlamadaki güvenilirliği artırır, kalıp deneme sayısı ve alıştırma zamanlarını azaltır, sonuçta güvenle üretilen en kaliteli parça imalatını ve kalıp tasarımlarının oluşmasını sağlar. Bunların yanında, üretimde preslerin boşa geçirdikleri zaman ve parçaların red oranları önemli ölçüde azalır. Sonuçların doğruluğu, hız ve kullanım kolaylığının toplamı büyük maliyet ve zaman kazancı sağlamıştır (URL-4, 2013). Autoform yazılımı ile sac metal şekillendirme yöntemlerinin tamamı analiz edilebilmektedir. Autoform yazılımı birden çok modülden oluşmakta ve her modül farklı bir şekillendirme işlemini gerçekleştirmektedir. Autoform ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla kıyaslandığında yaklaşık %95 uyum göstermektedir (Anket, 2011).

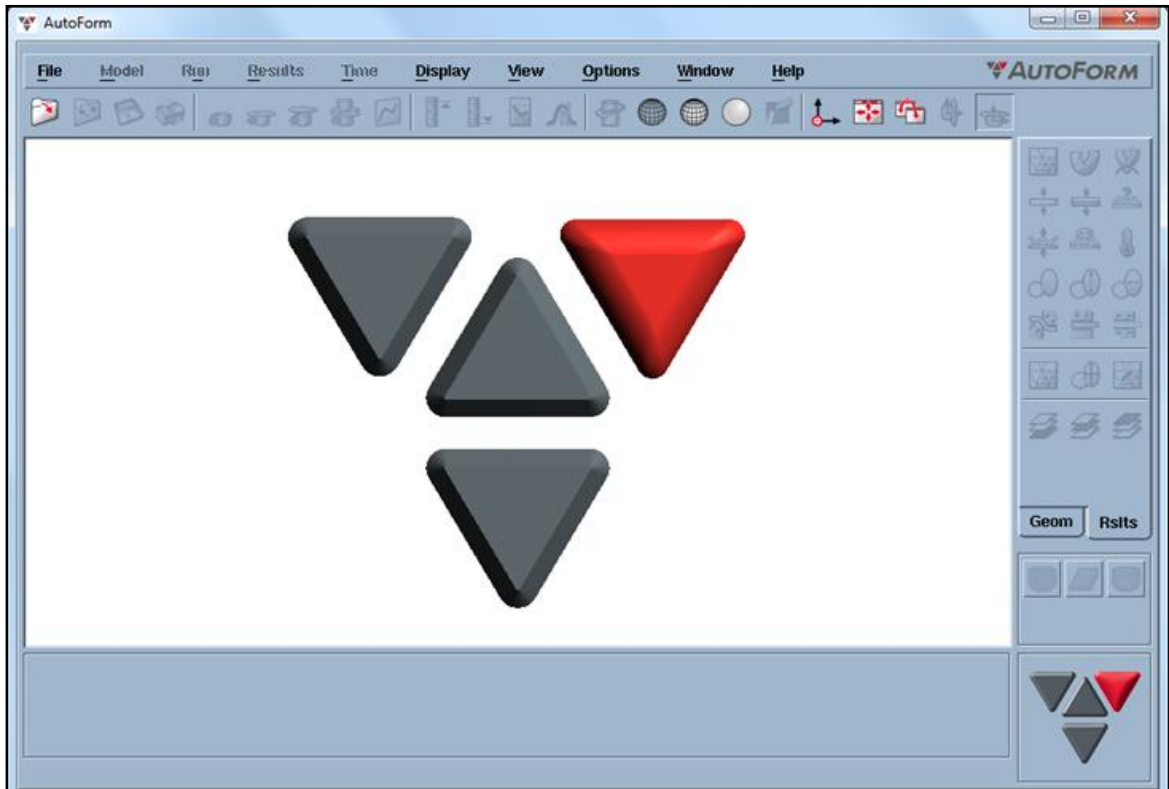
Autoform programı kabuk eleman kullandığı için kalıp elemanlarının yüzey olarak modellenmesi gerekir. Bu yüzden, Catia V5 yazılımı ile katı model olarak tasarlanan kalıp elemanları, yüzey modellere çevrilerek IGES (Initial Graphics Exchange Specification) formatında kaydedilmiştir. Bükme işlemi için gerekli yüzey modelleri Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Kalıp elemanlarının ve sac malzemenin pozisyonu

Bükme işlemi analizinin yapıldığı Autoform programının açılış sayfası ve genel görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir. Analizler, yazılımın basamak basamak çözüm yapan

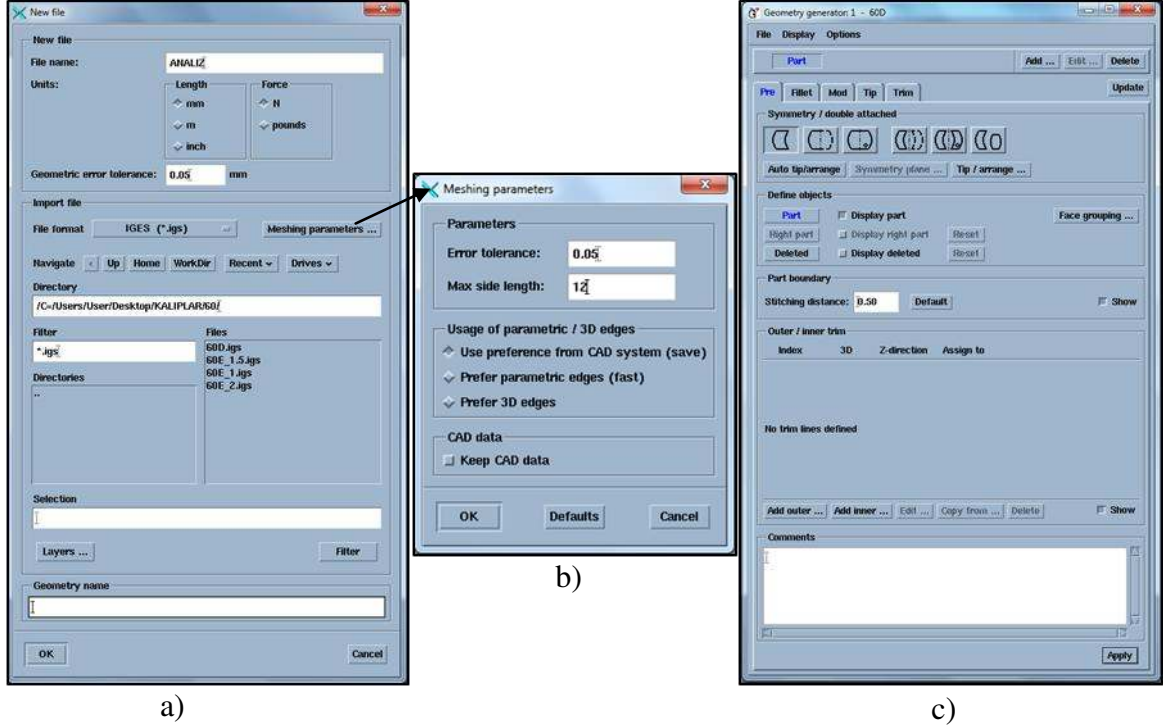
Incremental Solver modülünde yapılmıştır. New file penceresinde, dosya ismi, birim sistemi ve mesh değişkenleri belirlenmektedir (Şekil 3.11). Catia V5 programında hazırlanan alt kalıbın veya üst kalıbın IGES formatında yüzey modelleri Autoform programına New file penceresinden aktarılır. Autoform yazılımı girilen mesh değerlerine karşılık otomatik olarak üçgen mesh tipi kullanarak elemanlara bölme işlemi yapmaktadır. Şekil 3.12'de yüzey modellerinin mesh yapılmış hali verilmektedir. Ayrıca yazılım simülasyon esnasında gerekli gördüğü yerde mesh sayısını artırmaktadır. Mesh parametrelerinin seçimi şekil verme süresini doğrudan etkilediğinden uygun değerler girilmelidir. Küçük değerler seçerek eleman sayısını artırmak analiz süresini de artırmaktadır. Büyük değerlerin seçilmesi analiz süresini kısaltırken çözümün güvenilirliğini azaltmaktadır. Literatürdeki yapılan çalışmalar göz önüne alınarak yapılan ön değerlendirme sonucunda elde edilen optimum mesh değerleri programa uygulanmıştır.



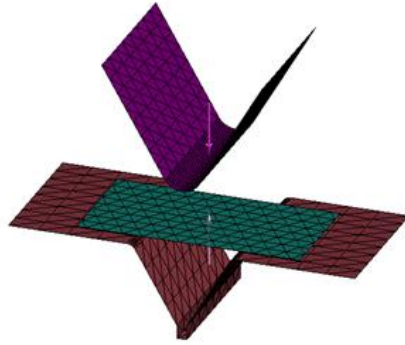
Şekil 3.10. Autoform yazılımının ara yüzü

New file penceresi onaylandıktan sonra, Geometri generator penceresi açılır. Bu pencerede, model üzerinde form ekleme-çıkarma ve delikleri kapatma, radyüsleri kontrol etme ve modelin uygun konumunu ayarlama gibi işlemler yapılabilmektedir. Yazılıma

birkaç model farklı isimlerde birbirinden bağımsız olarak alınabilir. Bu yüzden ayrıca bu pencere aracılığıyla başka modellerin yazılıma aktarılması işlemi de yapılabilinmektedir.

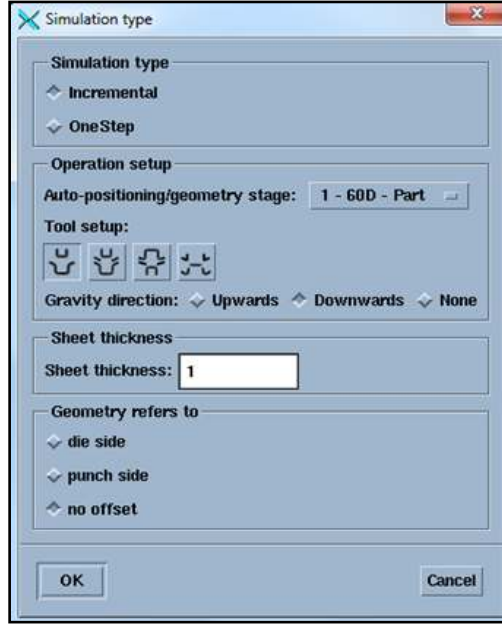


Şekil 3.11. a) New file penceresi b) Mesh penceresi c) Geometri generator penceresi



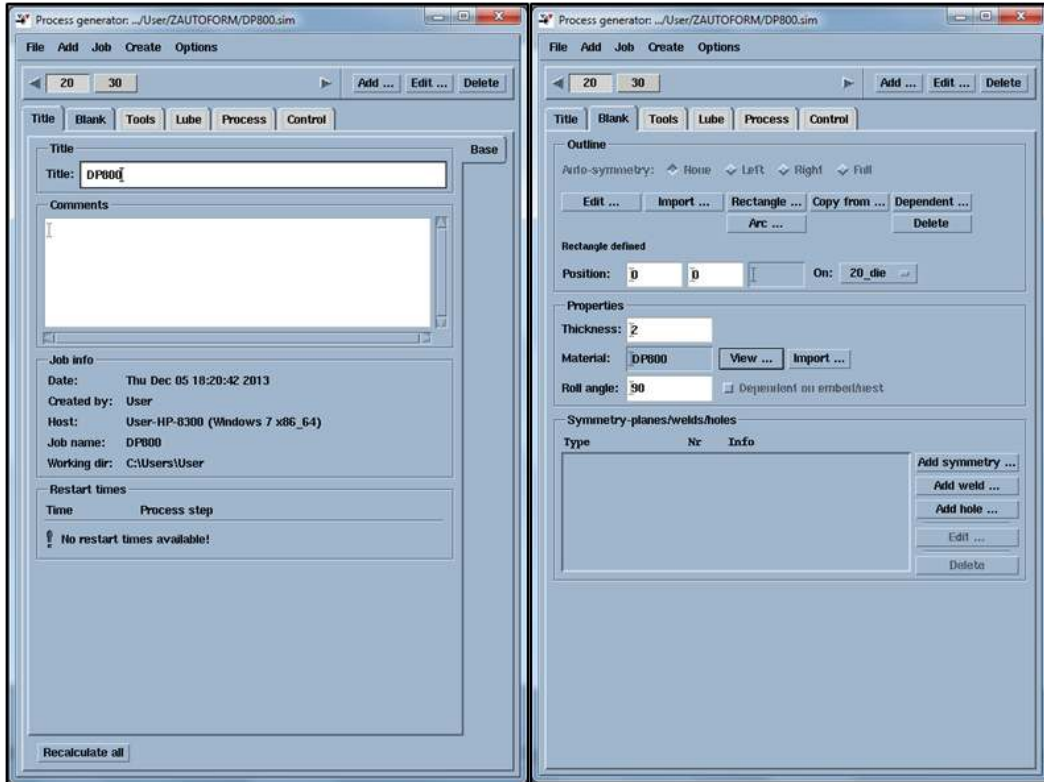
Şekil 3.12. Yüzey modellerinin mesh görünümü

Kalıp modelleri yazılım içerisine başarıyla alınıp gerekli işlemler yapıldıktan sonra, sıra simülasyon ayarlarının yapılmasına gelir. Bu işlemler Autoform içindeki Process generator penceresi ile gerçekleştirilir. İlk önce Process generator ikonu tıklanır ve açılan Simulation type penceresinde, simülasyon tipi ile modelin ofset yönü belirlenir ve sac kalınlığı değeri girilir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Simulation type penceresi

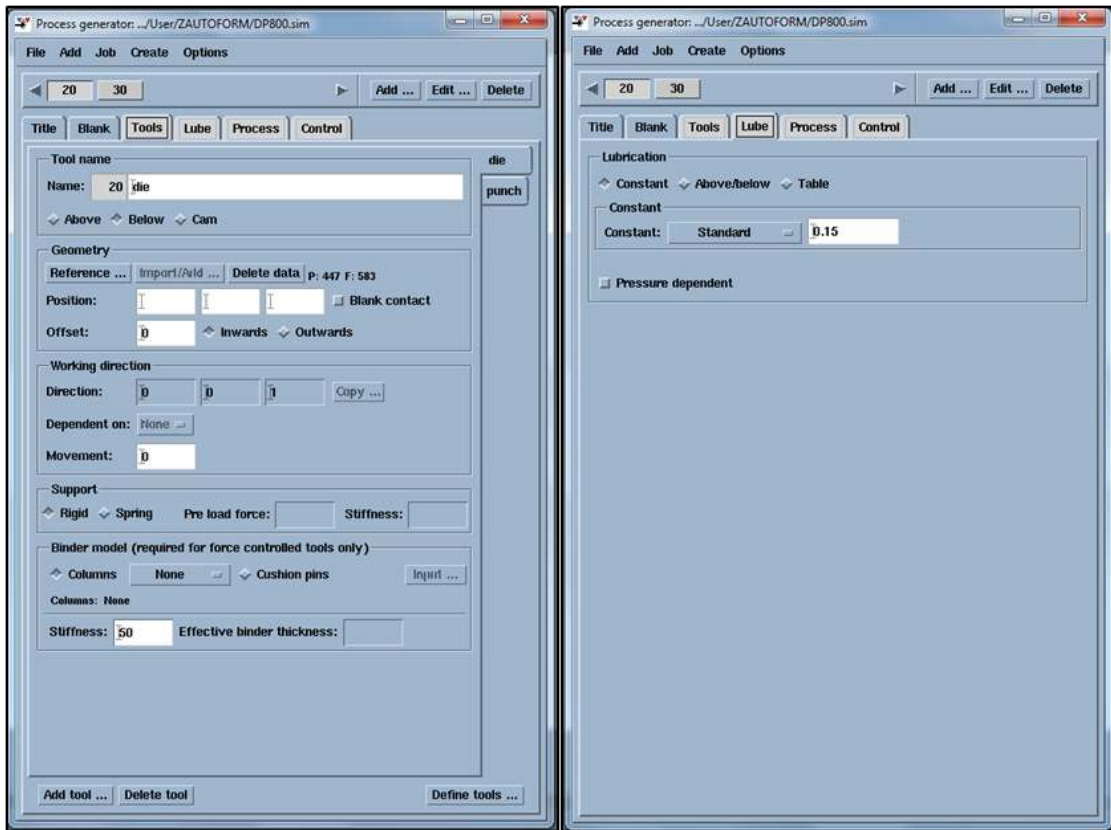
Simulation type penceresi onaylandıktan sonra, altı farklı kartı bulunan Process generator penceresi açılır. Birincisi simülasyon ile ilgili bilgilerin yer aldığı Title kartıdır (Şekil 3.14). İkincisi sac malzeme modeli ile sac malzemenin kalınlığı, kalitesi ve hadde yönünün belirleneceği Blank kartıdır (Şekil 3.14).



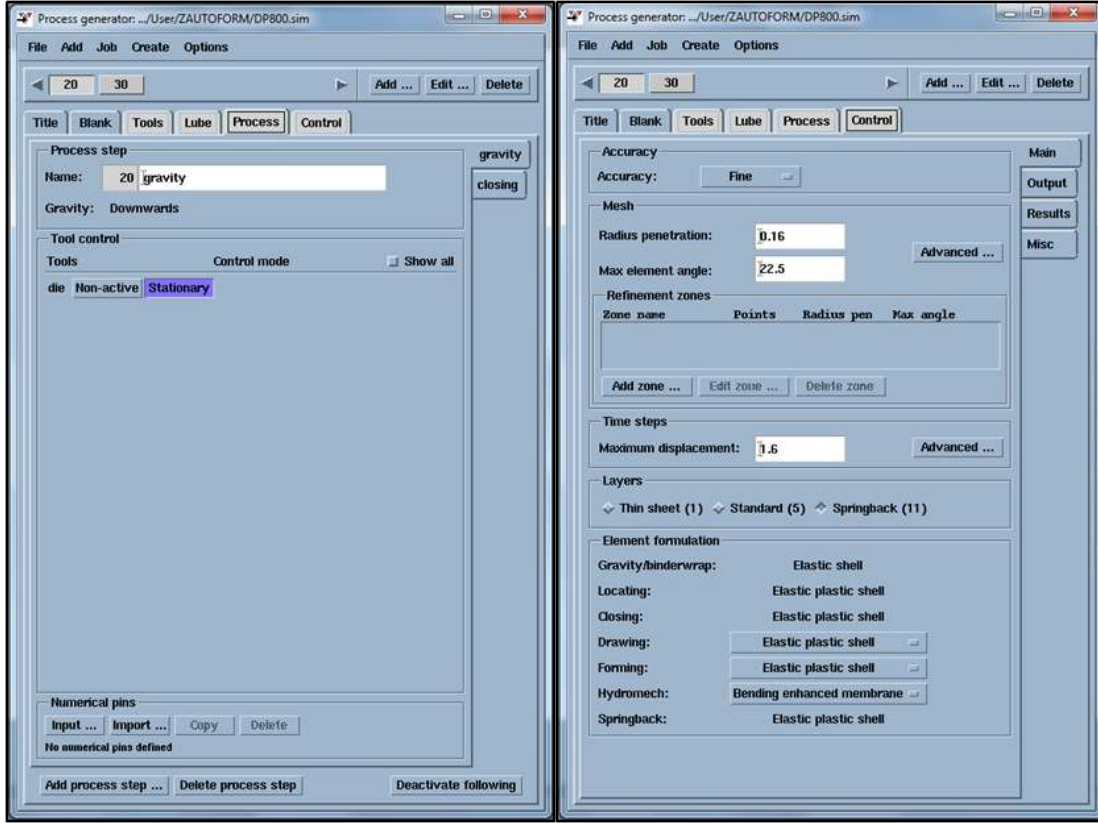
Şekil 3.14. Title ve Blank kartları

Autoform programının malzeme kütüphanesi oldukça geniştir. Çoğu sac kalitelerini bulmak mümkündür. Fakat bu çalışmada, yazılımın daha doğru sonuçlar vermesi için, programın kendi malzeme modülleri yerine, deneylerde kullanılan malzemelerin yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri girilerek, malzeme modülleri tanımlanmıştır.

Process generator penceresinin üçüncü kartı Tools kartıdır (Şekil 3.15). Bu kart ile daha önceden yazılıma import edilen modellerin, simülasyonda kullanılacak kalıp elemanlarına tanıtılması sağlanır. Ayrıca Tools kartındaki modüller ile geometrilerin çalışma yönü, pozisyonu ve hareket miktarı belirtilir. Burada kalıp elemanlarının veri girişleri dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Hatalı girişlerin yapılması durumunda simülasyon gerçekleştirilemez. Dördüncüsü ise, kalıp içinde oluşturulan yağlama derecesinin belirlenmesini sağlayan Lube kartıdır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Tools ve Lube kartları

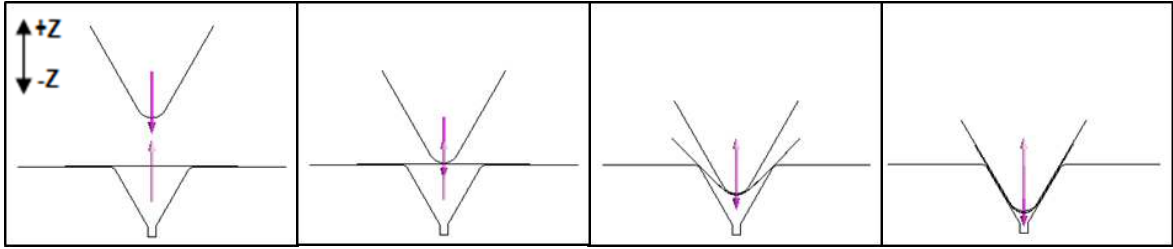


Şekil 3.16. Process ve Control kartları

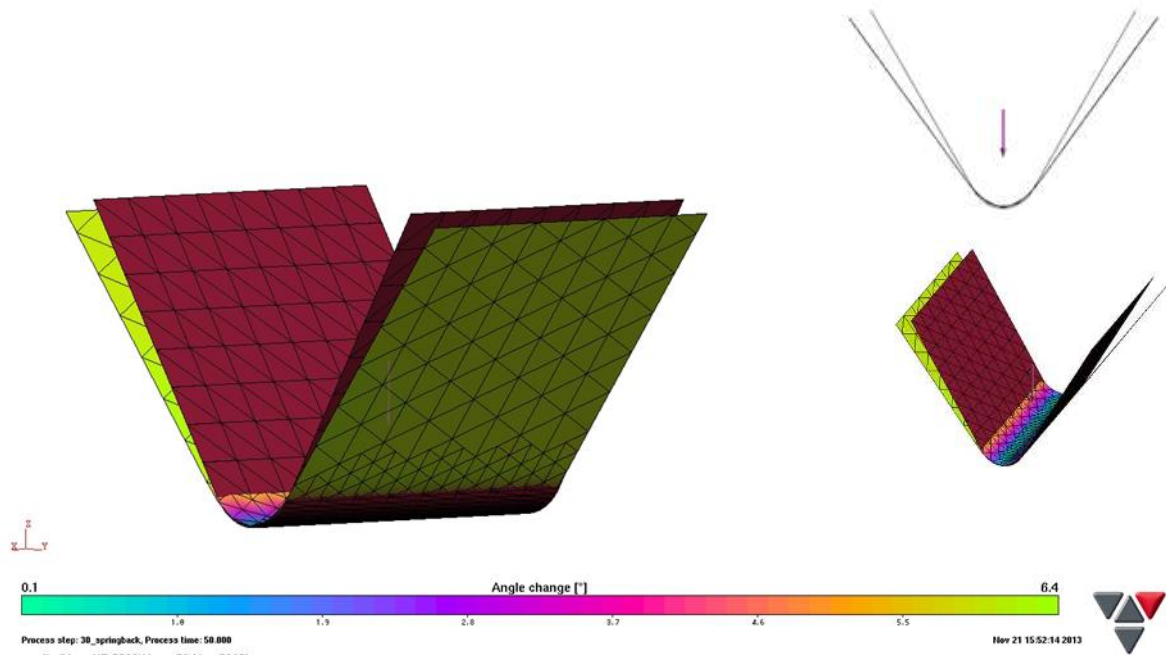
Beşinci kart, simülasyonun ana kısmını oluşturan Process kartıdır (Şekil 3.16). Kalıbı oluşturan elemanların hareketlerinin ve yapılacak olan simülasyon işlemlerinin belirlenmesi bu karttaki modüller vasıtasıyla yapılır. Process generator kartının sonuncusu ise Control kartıdır (Şekil 3.16). Bu kart ile simülasyonun kalitesini ayarlama ve simülasyon sonuçlarının incelenmesinde kullanılacak parametrelerin seçilmesi işlemleri yapılır. Son olarak Process kartında bulunan Job ikonuna tıklanır ve çözücü arayüzü ekrana gelir. Buradan da Start ikonuna basılarak simülasyon başlatılmış olur.

Bükme işleminin simülasyon safhaları Şekil 3.17'de gösterildiği gibi yapılmıştır. İlk olarak zımba, sac ve dişi kalıp sıfır konumdadır. Daha sonra dişi kalıp sabit kalırken erkek kalıp -z yönünde ilerleyerek sac malzemeye temas eder. Erkek kalıbın ilerlemesinin devam etmesiyle sac malzeme şekillenmeye başlar. Bu ilerleme, kalıplar arasındaki mesafe sac malzeme kalınlığına eşit oluncaya kadar devam eder. Erkek kalıbın yukarı doğru (+z) hareket etmesiyle bükme operasyonu ve buna bağlı olarak simülasyon tamamlanmış olur. Şekillendirme sonrası sac malzemedeki Şekil 3.18'de gösterildiği gibi geri yaylanma durumu meydana gelir. Yazılımın ara yüzünde bulunan sırasıyla Results ve Springback ikonları tıklanarak Springback penceresinin açılmasıyla geri yaylanma sonuçlarına ulaşılır.

Autoform programındaki şekillendirme öncesi (Şekil 3.12) ve şekillendirme sonrası (Şekil 3.18) modeller karşılaştırıldığında, şekillendirme sırasında sac malzemenin şekil aldığı bölgede daha hassas çözüm için, programın modeli daha küçük elemanlara bölerek mesh sayısını artırdığı görülmektedir.



Şekil 3.17. Bükme operasyonunun simülasyon aşamaları

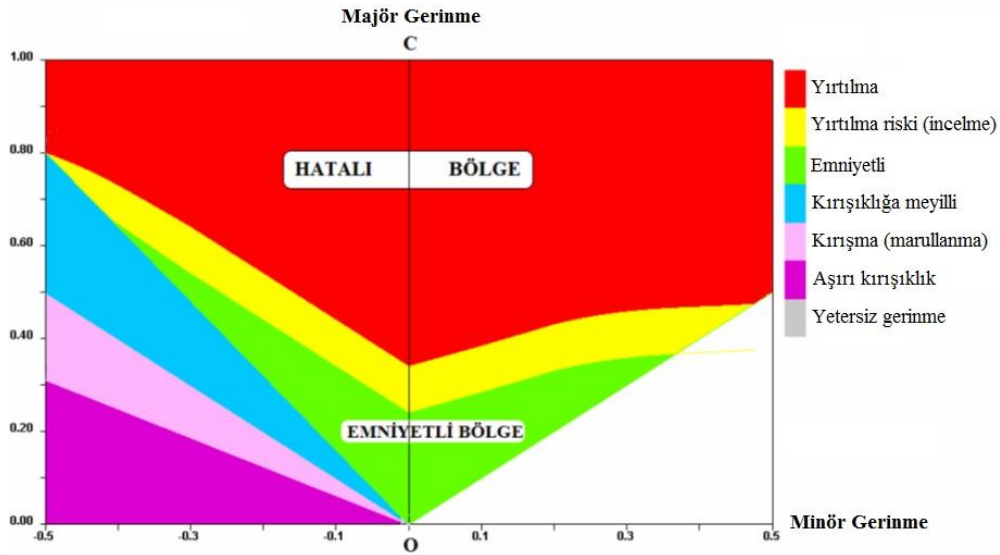


Şekil 3.18. Geri yaylanma sonucunun yazılım üzerinde gösterilmesi

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek amacıyla birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerinden birisi olan Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD), malzemenin farklı şekil değiştirme durumlarında şekillendirilebilirlik sınırlarını büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranları cinsinden ifade eden diyagram olarak tanımlanmaktadır. Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram, FLD), basit çekme deneyinden başlayarak, düzlem birim şekil değiştirme ve iki eksenli gerdirmeye

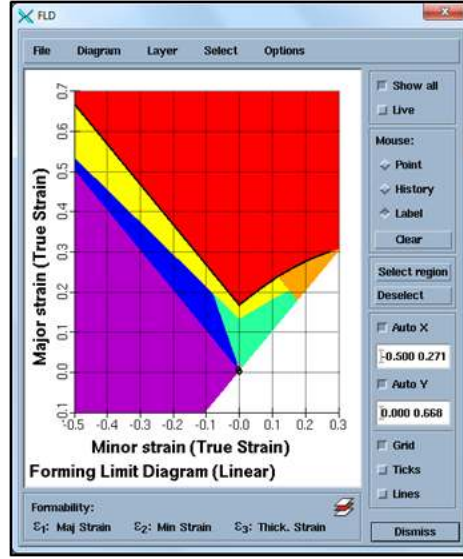
hallerinin hepsini içermektedir. Bu diyagramlar genellikle, metallerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmede ve şekil verme sırasında meydana gelen yırtılma, kırılma, incelme gibi problemlerin analizi ve çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Şekillendirme sınır diyagramı, kalıp tasarımında yapılacak değişiklikler ve optimizasyon çalışmalarını değerlendirmek için çok önemli bir araçtır (Uysal, 2011).

Şekil 3.19'da verilen şekillendirme sınır diyagramında renklendirilmiş olan her bir alan farklı durumları ifade etmektedir. Kırmızı alan, şekillendirme sınır diyagramının limit çizgisinin üst kısmını ifade eder ve majör-minör gerinme açısından yırtılma oluşabilecek yerleri gösterir. Sarı renkle ifade edilen bölge, sac malzemenin incelmesini ve yırtılma riskinin çok yüksek olduğunu ifade eder. Yeşil renkle gösterilen alanlar, sac malzemenin şekillenmesi sırasında problemsiz bir akma sağlanarak şekillendirilmiş olduğunu gösterir. Kısacası yeşil alan emniyetli bölge olarak tanımlanabilir. Mavi renkle ifade edilen alan, yoğunlaşmanın başladığını yani kırışıklığa meyilli olan bölgeyi ifade eder. Pembe renkle gösterilen alan ise, kırışıklık (marullanma) oluşan bölgeyi ifade eder. Mor ile ifade edilen alanlar, aşırı derecede kırışıklık oluşacağını belirtir. Gri bölge ise, yetersiz gerinme olan yerleri yani sacın pekleşemediğini ifade eder (Kahraman, 2008).



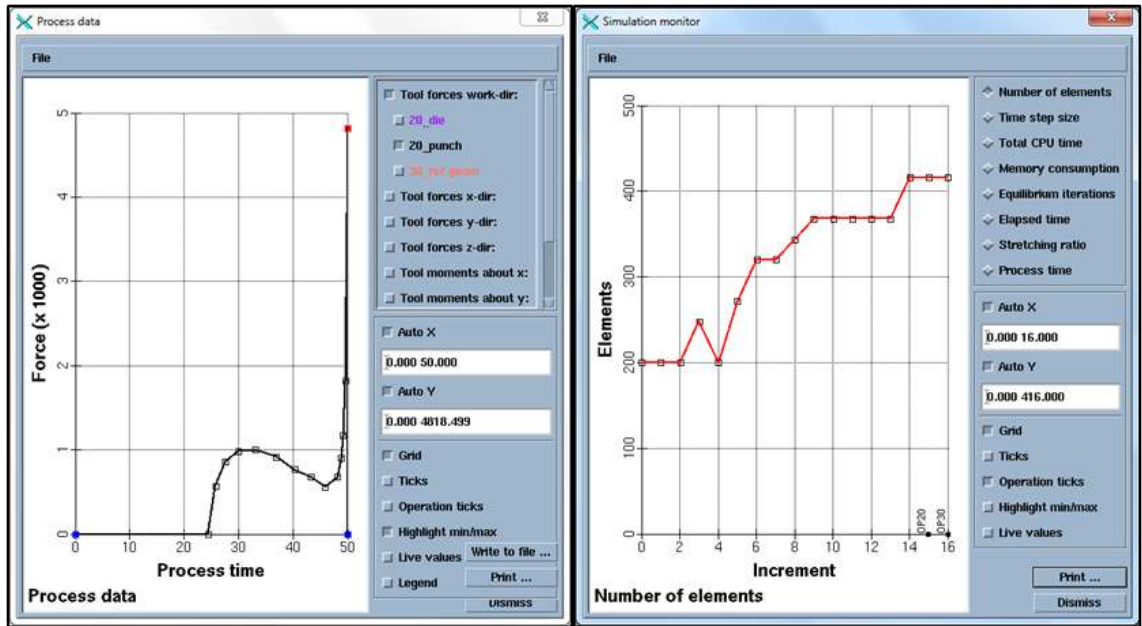
Şekil 3.19. Şekillendirme Sınır Diyagramının genel açıklaması (Kahraman, 2008)

Autoform yazılımı, sac malzemenin şekillendirilebilirliğini kontrol etmek için kullanılan şekillendirme sınır diyagramını da vermektedir. Bunun için yazılımın arayüzünde bulunan FLD ikonu tıklanarak Şekil 3.20'de gösterilen FLD penceresi açılır ve böylece şekillendirme sınır diyagramına ulaşılmış olunur.



Şekil 3.20. Autoform'da şekillendirme sınır diyagramının gösterimi

Yazılım, geri yaylanma ve şekillendirme sınır diyagramının yanında, sac kalınlığındaki incelme ve kalınlaşma gibi değişimler, kırışma değerleri, yüzey gerilmeleri, baskı kuvveti gibi birçok sonucu kullanıcıya vermektedir. Bu sonuçlara, yazılımın ara yüzünde veya Results menüsü altında bulunan ikonlar sayesinde kolay bir şekilde ulaşılabilir. Şekil 3.21'de diğer analiz sonuçlarından olan kuvvetin ve eleman sayısının zamanla değişim grafikleri örnek olarak verilmiştir. Ayrıca bu sonuçlar çıktı olarak da alınabilmektedir.



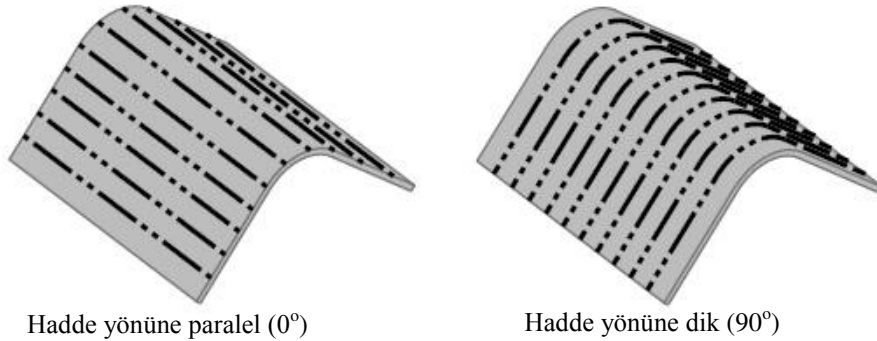
Şekil 3.21. Kuvvetin zamanla değişimi ve eleman sayısının zamanla değişimi grafikleri

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Malzeme kalitesi, malzeme kalınlığı, malzemenin hadde yönü ve kalıp açısı (bükme açısı) gibi değişken işlem parametrelerine bağlı olarak bükme deneyleri yapılmıştır. 60, 90 ve 120° kalıp açılarında bükülen deney numuneleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarındaki belirtilen hadde yönleri 0° hadde yönüne paralel yapılan bükme işlemini, 90° ise haddeleme yönüne dik yapılan bükme işlemini belirtmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Bükme işlemi uygulanan deney numuneleri



Hadde yönüne paralel (0°)

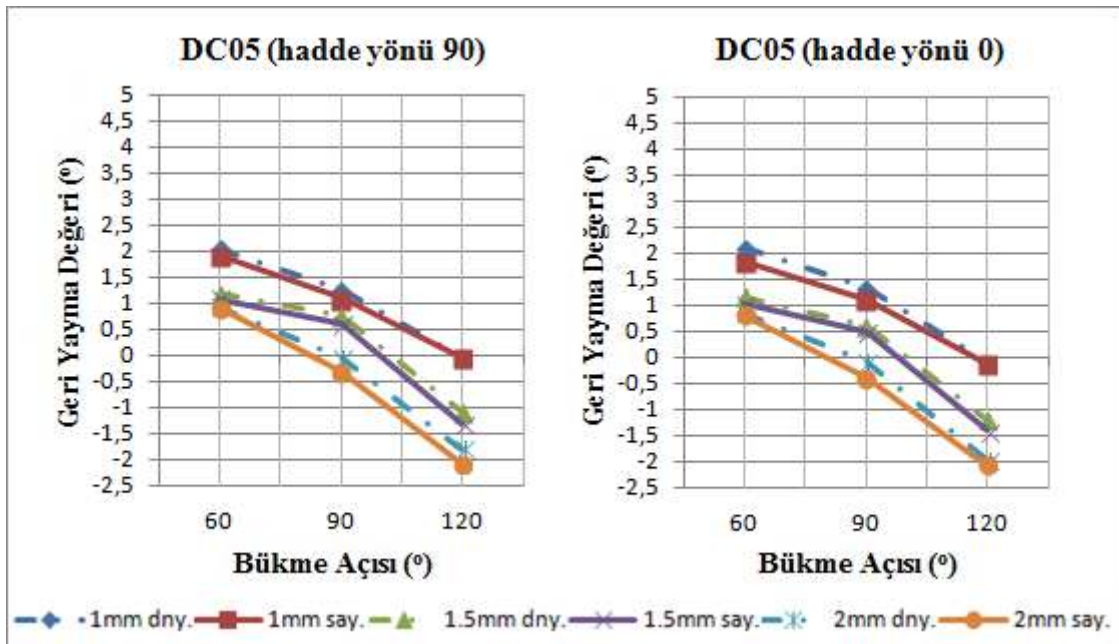
Hadde yönüne dik (90°)

Şekil 4.2. Numunelerin hadde yönünün gösterimi

DC05 sac malzemesi kullanılarak yapılan bükme deneyleri sonucunda elde edilen geri yaylanma sonuçları derece cinsinden Tablo 4.1 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.3 incelendiğinde, 60° kalıp açısında bütün kalınlık ve hadde yönü parametreleri için geri yaylanma değerleri "+" yönde (>kalıp açısı) gerçekleşmiş yani malzeme açılma eğilimi göstermiştir. 90° kalıp açısında malzemenin 1 ve 1.5 mm kalınlıklarında geri yaylanma değerleri "+" yönde gerçekleşirken 2 mm kalınlık değerinde "-" yönde (<kalıp açısı) gerçekleşmiştir. 120° kalıp açısında ise, malzemenin bütün kalınlık parametreleri için geri yaylanma davranışı "-" yönde gerçekleşmiş yani malzeme kapanma eğilimi göstermiştir. DC05 malzemenin, 1 mm kalınlığında ve 60° kalıp açısında en yüksek geri yaylanma değerini verdiği, 2 mm kalınlığında ve 120° kalıp açısında ise en düşük geri yaylanma değerini verdiği görülmüştür.

Tablo 4.1. DC05 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri

DC05												
Kalıp Açısı (°)	60				90				120			
Had. Yön (°)	90		0		90		0		90		0	
Kalınlık	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.
1 mm	2.04	1.91	2.1	1.82	1.26	1.09	1.34	1.11	-0.04	-0.05	-0.11	-0.13
1.5 mm	1.17	1.08	1.15	1.02	0.77	0.6	0.61	0.49	-1.1	-1.32	-1.21	-1.41
2 mm	0.92	0.9	0.84	0.8	-0.06	-0.31	-0.11	-0.4	-1.81	-1.96	-1.99	-2.08

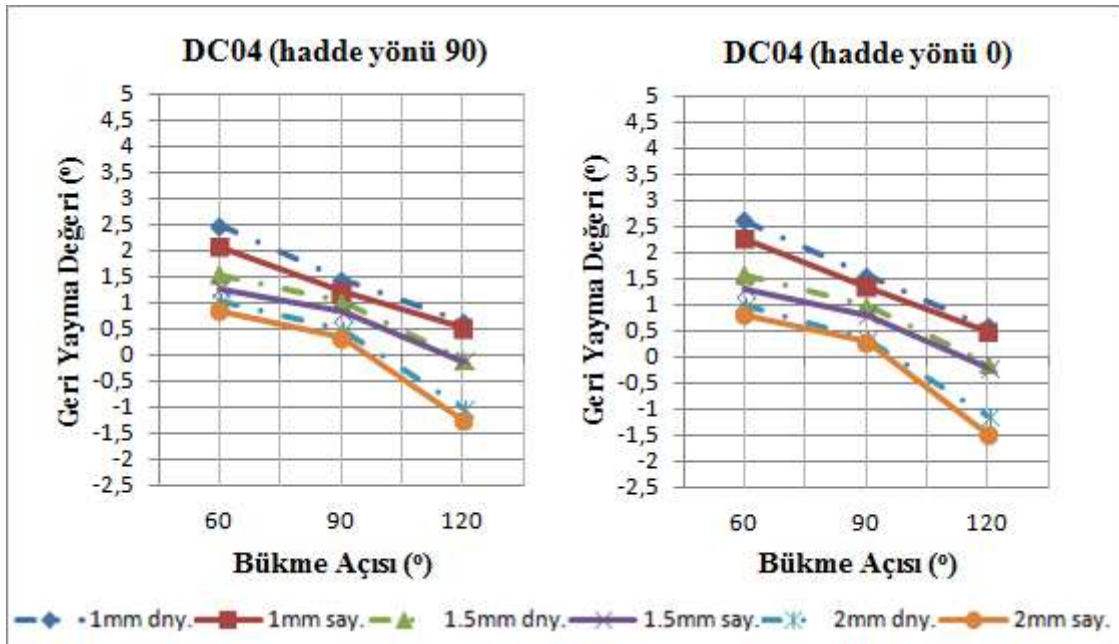


Şekil 4.3. DC05 sacının geri yaylanma grafiği

Tablo 4.2 ve Şekil 4.4'te DC04 çelik sac malzemesinin geri yaylanma deney sonuçları verilmiştir. Tablo 4.2 ve Şekil 4.4'teki değerler incelendiğinde, 60° ve 90° kalıp açılarında bütün kalınlık ve hadde yönü parametreleri için geri yaylanma değerleri "+" yönde gerçekleşmiş yani malzeme açılma eğilimi göstermiştir. 120° kalıp açısında ise malzemenin 1 mm kalınlığında geri yaylanma değerleri "+" yönde gerçekleşirken 1.5 ve 2 mm kalınlık değerlerinde "-" yönde gerçekleşmiştir. 1.5 mm kalınlığındaki sacın geri yaylanma davranışı "-" yönde gerçekleşmesine rağmen sıfıra çok yakın olmasından dolayı 0 olarak kabul edilebilir. Şekil 4.4'te geri yaylanma miktarlarının kalıp açısının artmasıyla azaldığı ve malzeme kalınlığının artmasıyla da geri yaylanma miktarlarının azaldığı görülmüştür.

Tablo 4.2. DC04 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri

DC04												
Kalıp Açısı (°)	60				90				120			
Had. Yön (°)	90		0		90		0		90		0	
Kalınlık	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.
1 mm	2.48	2.08	2.61	2.26	1.45	1.23	1.56	1.34	0.64	0.51	0.58	0.48
1.5 mm	1.54	1.27	1.57	1.31	1.01	0.84	0.98	0.81	-0.09	-0.12	-0.14	-0.2
2 mm	1.15	0.96	1.06	0.95	0.49	0.32	0.33	0.29	-1.03	-1.23	-1.12	-1.48

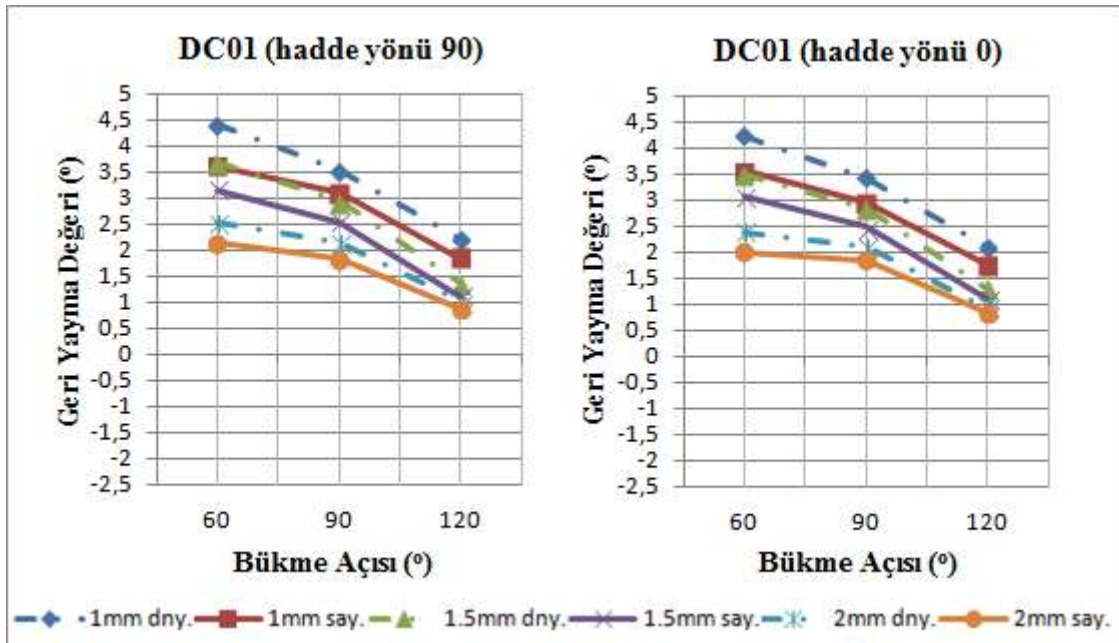


Şekil 4.4. DC04 sacının geri yaylanma grafiği

Bükme uygulanarak basılan DC01 çelik sac malzemelerine ait geri yaylanma miktarları Tablo 4.3 ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Tablo 4.3 ve Şekil 4.5'e göre 60, 90 ve 120° kalıp açılarında bütün kalınlık ve hadde yönü parametreleri için geri yaylanma değerleri "+" yönde gerçekleşmiş yani malzeme açılma eğilimi göstermiştir. 60° kalıp açısındaki geri yaylanma değerlerinin 90 ve 120° kalıp açılarındaki geri yaylanma değerlerinden yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Her bir kalıp açısı sabit tutulduğunda ise 1 mm kalınlığındaki geri yaylanma değerlerinin 1.5 ve 2 mm kalınlığındaki geri yaylanma değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3. DC01 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri

DC01												
Kalıp Açısı (°)	60				90				120			
Had. Yön (°)	90		0		90		0		90		0	
Kalınlık	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.
1 mm	4.4	3.61	4.23	3.55	3.53	3.1	3.43	2.95	2.23	1.85	2.11	1.75
1.5 mm	3.67	3.16	3.47	3.07	2.93	2.54	2.82	2.48	1.36	1.12	1.28	1.11
2 mm	2.53	2.14	2.38	1.99	2.14	1.85	2.09	1.84	1.01	0.89	0.92	0.82

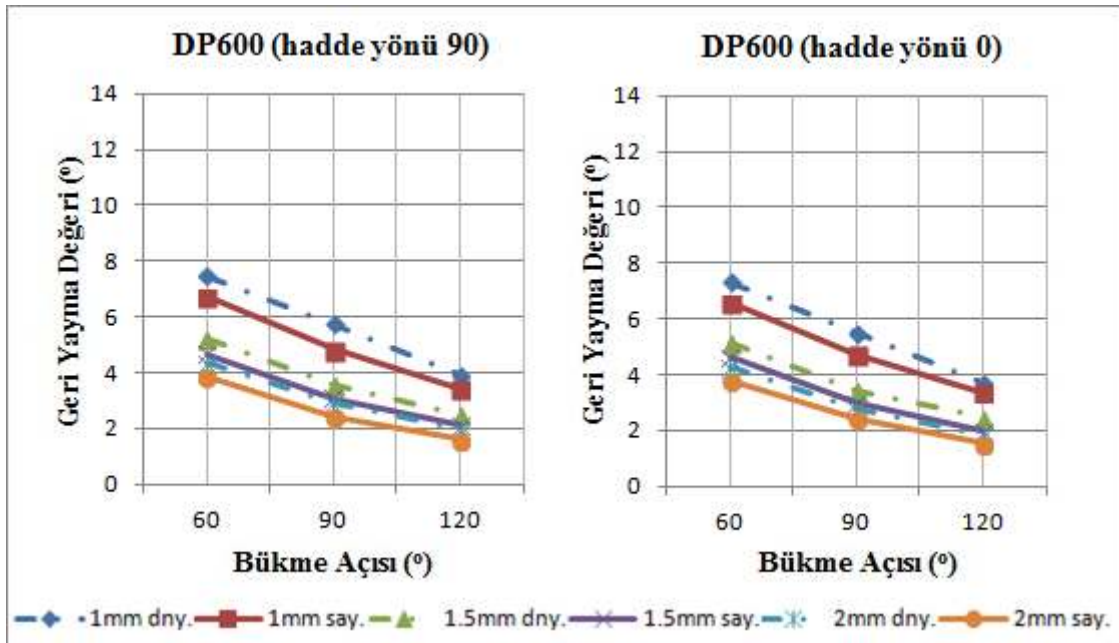


Şekil 4.5. DC01 sacının geri yaylanma grafiği

Tablo 4.4 ve Şekil 4.6'da DP600 sac malzemesinin geri yaylanma miktarları verilmiştir. Tablo 4.4 ve Şekil 4.6 incelendiğinde, 60, 90 ve 120° kalıp açılarında bütün kalınlık ve hadde yönü parametreleri için geri yaylanma değerleri "+" yönde gerçekleşmiş yani malzeme açılma eğilimi göstermiştir. DP600 malzemenin bütün kalıp açılarında geri yaylanma değerlerinin "+" yönde gerçekleşmesine rağmen en düşük değerin 120°'de en yüksek değerin 60°'de olduğu tespit edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki numunelerin geri yaylanma değerleri her bir kalıp açısında en yüksek değeri verirken 2 mm kalınlığındaki numunelerin ise en düşük geri yaylanma değerlerini verdiği görülmektedir.

Tablo 4.4. DP600 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri

DP600												
Kalıp Açısı (°)	60				90				120			
Had. Yön (°)	90		0		90		0		90		0	
Kalınlık	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.
1 mm	7.45	6.69	7.33	6.56	5.74	4.82	5.51	4.74	3.89	3.42	3.71	3.38
1.5 mm	5.21	4.67	5.12	4.61	3.56	3.08	3.44	3.01	2.49	2.14	2.45	1.99
2 mm	4.32	3.85	4.27	3.76	2.91	2.44	2.79	2.42	1.97	1.59	1.86	1.52

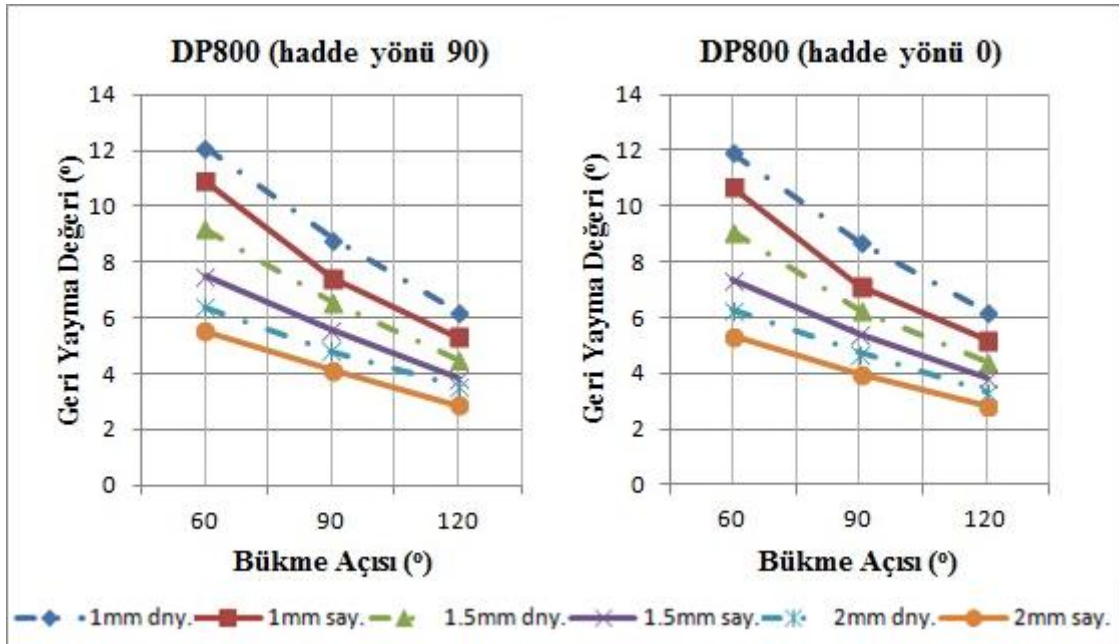


Şekil 4.6. DP600 sacının geri yaylanma grafiği

DP800 sac malzemeye ait geri yaylanma değerleri Tablo 4.5 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Tablo 4.5 ve Şekil 4.7'ye göre 60, 90 ve 120° kalıp açılarında bütün kalınlık ve hadde yönü parametreleri için geri yaylanma değerleri "+" yönde gerçekleşmiş yani malzeme açılma eğilimi göstermiştir. 60° kalıp açısında basılan deney numunelerinin geri yaylanma değerleri 90° ve 120° kalıp açılarında basılan deney numunelerinkinden daha yüksek çıkmış ve 120° kalıp açısında geri yaylanmanın en düşük olduğu tespit edilmiştir. DP800 malzemesinin kalınlık olarak geri yaylanma davranışına bakıldığında en yüksek geri yaylanma miktarı 1 mm kalınlığında en düşük geri yaylanma değerinin 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür.

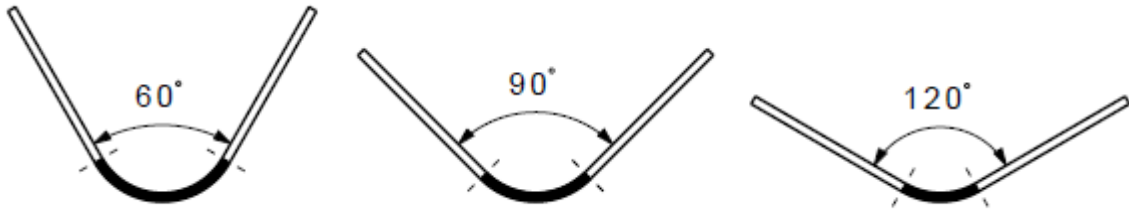
Tablo 4.5. DP800 sacının şekillendirme sonrası ölçülen geri yaylanma değerleri

DP800												
Kalıp Açısı (°)	60				90				120			
Had. Yön (°)	90		0		90		0		90		0	
Kalınlık	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.	Dny.	Say.
1 mm	12.1	10.9	11.9	10.7	8.85	7.43	8.71	7.18	6.22	5.31	6.18	5.18
1.5 mm	9.17	7.49	9.06	7.34	6.57	5.58	6.28	5.43	4.49	3.83	4.42	3.85
2 mm	6.4	5.51	6.28	5.32	4.81	4.14	4.76	3.98	3.53	2.87	3.35	2.85



Şekil 4.7. DP800 sacının geri yaylanma grafiği

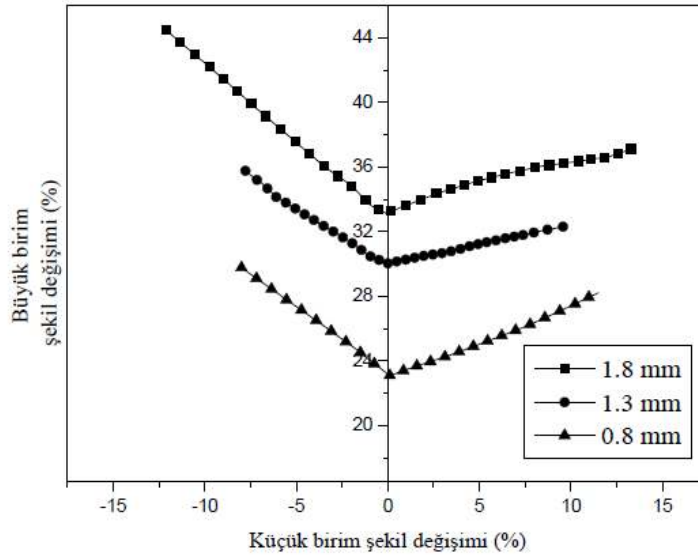
Şekil 4.3'ten Şekil 4.7'ye kadar olan grafikler incelendiğinde, bütün deney parametreleri sabit olmak kaydıyla, kalıp açısı arttıkça geri yaylanma miktarlarının azaldığı görülmektedir. Literatürde de benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Özdemir, 2010). En büyük geri yaylanma davranışı 60° kalıp açısında elde edilirken, en küçük geri yaylanma davranışı 120° kalıp açısında elde edilmiştir. Örneğin 1 mm kalınlığındaki DP800 sac malzemesinin deneysel olarak bükme işlemi sonucunda 60° kalıp açısında 12.1° , 90° kalıp açısında 8.85° ve 120° kalıp açısında 6.22° geri yaylandığı görülmüştür. Kalıp açısının artmasıyla geri yaylanma miktarının azalmasının nedeni, bükme açısının artmasıyla sacın dış yüzeylerinde şekil değişimine uğrayan bölgenin ve uzama miktarının azalması olarak ifade edilebilir (Özdemir, 2010). Şekil 4.8'de koyu renkle gösterilen kısımlar şekil değişimine uğrayan bölgeleri göstermekte olup, 60° 'den 120° 'ye giderek bu bölgelerin azaldığı görülmektedir. Kalıp açısı ile ilgili benzer sonuçlar Autoform programında yapılan analizler sonucunda da elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Şekil değişimine uğrayan bölgelerin gösterimi

Şekil 4.3'ten Şekil 4.7'ye kadar olan grafikler incelendiğinde, sac malzeme kalınlığının artmasıyla birlikte geri yaylanma miktarının azaldığı görülmektedir (Fei and Hodgson, 2006; Kılıç, 2009). En büyük geri yaylanmanın miktarı 1 mm kalınlığında elde edilirken en düşük geri yaylanma miktarı ise 2 mm kalınlığında elde edilmiştir. Örneğin 60° kalıp açısında, hadde yönüne dik seçilen DP600 deney numunesine deneysel olarak bükme işlemi yapılması sonucunda 1 mm kalınlıktaki malzemede 7.45° , 1.5 mm kalınlıktaki malzemede 5.21° ve 2 mm kalınlıktaki malzemede 4.32° geri yaylandığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu durum geri yaylanma faktörünün kalınlıkla ters orantılı olduğunu belirten $K=R/t$ formülünün ispatını ortaya koymaktadır (Ötö ve Demirci, 2012). Sac malzeme kalınlığının artmasıyla geri yaylanma miktarının azalmasının sebebi bükme bölgesinde oluşan kalıntı gerilme değerinin azalması olarak ifade edilebilir (Livatyalı ve Altan, 2001). Şekillendirme sınır diyagramı (SSD) yükseldikçe şekillendirilebilme daha iyi

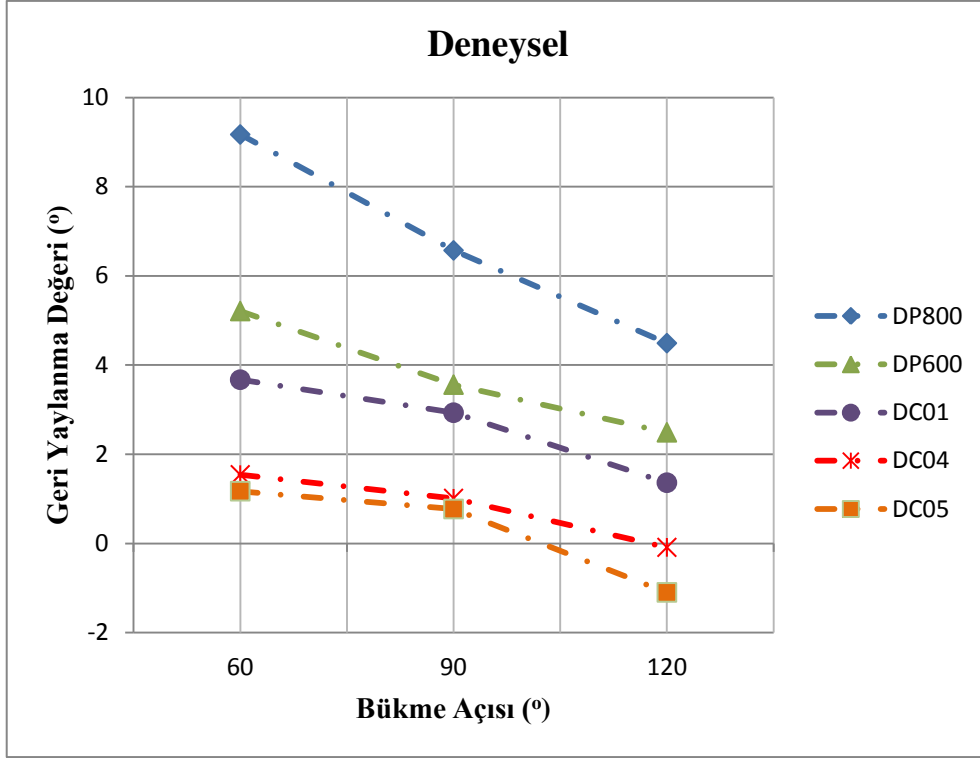
olmaktadır. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere, sac kalınlığının artmasıyla ŞSD yükselmektedir (Çapan, 2003). Kalınlığın artmasıyla şekillendirilebilmenin daha iyi olması neticesinde geri yaylanma miktarının da azalacağı söylenebilir. Malzeme kalınlığı ile ilgili benzer sonuçlar Autoform programında yapılan analizler sonucunda da elde edilmiştir.



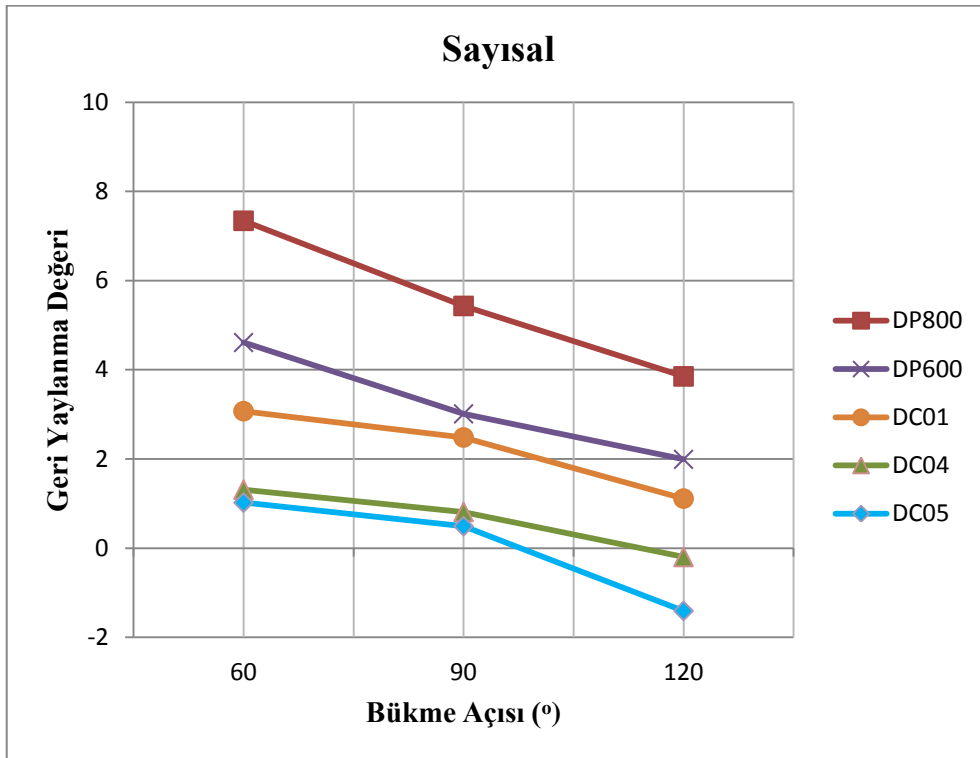
Şekil 4.9. Farklı kalınlıklardaki sacın ŞSD grafikleri (Uysal, 2011)

Deneylerde kullandığımız tüm sac malzemeler için haddeleme yönüne paralel ve haddeleme yönüne dik olarak aynı şartlar altında yapılan bükme işlemlerindeki geri yaylanma sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle, aşağıda yapılan değerlendirmelerde sadece hadde yönüne dik olarak elde edilen deney sonuçları ele alınmıştır. Örneğin 1 mm kalınlığındaki DP600 sac malzemeye 60° kalıp açısında bükme işlemi uygulanması neticesinde geri yaylanma miktarları, hadde yönüne dik olan numunede 7.45° , hadde yönüne paralel olan numunede ise 7.33° olduğu tespit edilmiştir.

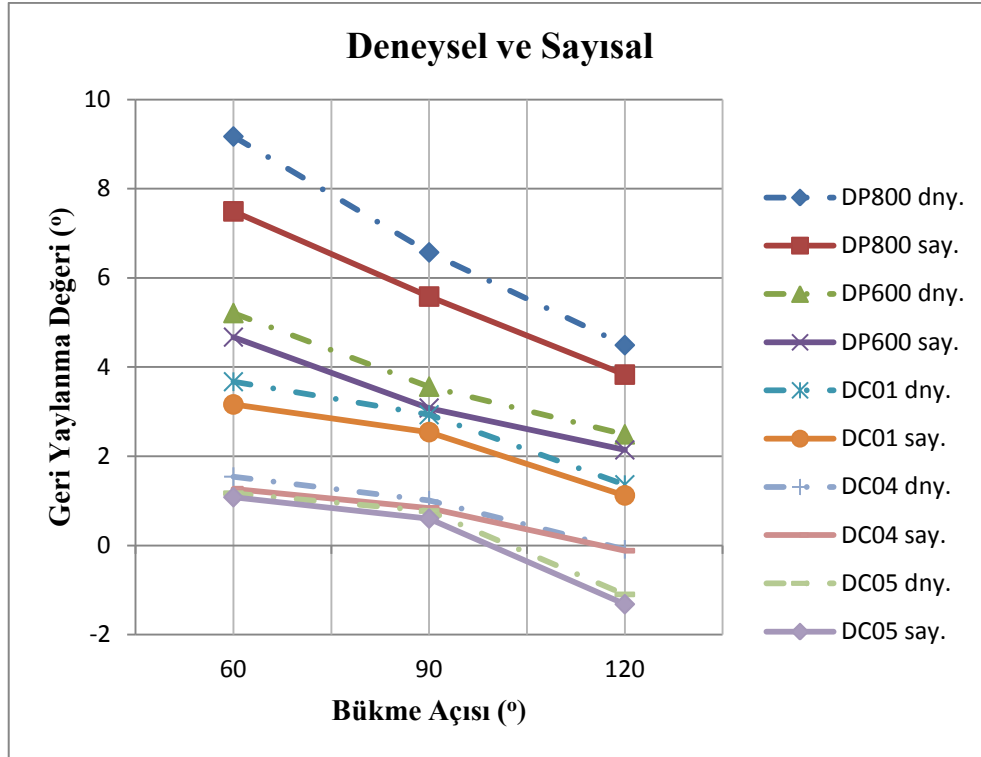
1.5 mm kalınlığında ve hadde yönüne dik olarak yapılan bükme deneyleri neticesinde malzeme kalitesinin geri yaylanma davranışlarına etkisi Şekil 4.10'da, sayısal analiz sonuçları Şekil 4.11'de ve deneysel ve sayısal sonuçlar birlikte Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.10. 1.5 mm kalınlığındaki numunelerin deneysel sonuçları



Şekil 4.11. 1.5 mm kalınlığındaki numunelerin sayısal sonuçları



Şekil 4.12. 1.5 mm kalınlığındaki numunelerin deneysel ve sayısal sonuçları

Şekil 4.10'dan Şekil 4.12'ye kadar olan grafikler incelendiğinde, hem deneysel hem de sayısal sonuçlardan DP800 çelik sac malzemesinin en yüksek geri yaylanma davranışını, DC05 sac malzemesinin de en düşük geri yaylanma davranışını sergilediği tespit edilmiştir. Bunun nedeni DP serisi çelik sacların akma mukavemetinin DC serisi çelik saclara oranla yüksek olmasıdır (Tablo 3.3). Yani Şekil 4.10'dan Şekil 4.12'ye kadar olan grafiklerden, akma mukavemeti yüksek olan malzemelerde daha yüksek geri yaylanma davranışı gösterdiği, akma mukavemeti düşük olan malzemelerin ise daha az geri yaylanma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir (Esat vd., 2002; Işıktaş. 2011). DC04 ile DC05 çelik saclarının mekanik özelliklerinin benzer olması ve yumuşak sac grubunda olmalarından dolayı hemen hemen aynı geri yaylanma davranışını göstermişlerdir. DC01 sac malzemesi de DC grubunda olmasına rağmen DC04 ve DC05 malzemelerine göre akma mukavemeti fazla olduğundan dolayı geri yaylanma değerleri bu iki malzemedan daha yüksek elde edilmiş ve bütün deney parametrelerinde "+" yönde geri yaylanma yani açılma eğilimi göstermiştir. Çift fazlı çelik saclardan olan DP800 ve DP600 malzemelerine bakıldığında ise, DP800 malzemenin akma mukavemeti DP600 malzemedan daha yüksek olduğu için geri yaylanma miktarının da daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.10-Şekil 4.12).

Geri yaylanmanın deney sonuçları ve sayısal sonuçları karşılaştırıldığında ise, ortalama %80 ila %90 oranında sayısal sonuçların deneysel sonuçlara yaklaştığı görülmektedir. Burada sonuçların birebir örtüşmemesinin sebepleri olarak imalat aşamasındaki hatalar, ölçüm yapılırken oluşan hatalar ve simülasyondan kaynaklanan hatalar gösterilebilir.

Tüm deney şartları göz önüne alındığında; en düşük geri yaylanma davranışı 2 mm sac kalınlığında, 120° kalıp açısında, hadde yönündeki DC05 kalitesinde sac malzemesi kullanıldığında elde edilmiş olup, geri yaylanma miktarı -2.08° olarak elde edilmiştir. En büyük geri yaylanma davranışı 1 mm sac kalınlığında, 60° kalıp açısında, hadde yönüne dik DP800 kalitesinde sac malzemesi kullanıldığında elde edilmiş olup, geri yaylanma miktarı 12.1° olarak elde edilmiştir.

Bükme işlemlerinde seçtiğimiz malzemeleri kullanacak olan tasarımcı ve araştırmacılar, tasarım aşamasındayken kalıplarını çalışma sonucunda elde edilen geri yaylanma miktarı kadar ters yönde düzenleyerek geri yaylanma problemini telafi etmiş olacaklardır.

4.1. Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi

Bu çalışmada, lineer olmayan regresyon analiz yöntemi yardımıyla geri yaylanma davranışı ile ilgili deneysel sonuçların matematiksel modellemesi yapıldı. Matematiksel model oluşturulurken, sac malzeme kalınlığı, malzemenin akma mukavemeti ve kalıp açısı gibi işlem parametrelerine bağlı olarak, hadde yönüne dik ve hadde yönüne paralel olmak üzere sac malzemede bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma davranışının matematiksel modellemesi yapıldı.

Sac malzemede bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma açısı (θ_g) ait matematiksel model elde edilirken; malzemenin akma mukavemeti (σ_{ak}), kalıp açısı (θ) ve sac malzeme kalınlığına (t) bağlı olarak lineer olmayan regresyon modeli:

$$\theta_g = a_0 + \sigma_{ak}^{a1} \cdot \theta^{a2} \cdot t^{a3} \quad (4.1)$$

güç fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemin her iki tarafının logaritması alınarak lineer hale dönüştürülerek lineer çoklu regresyona göre çözüm yapıldı. Daha sonra hadde yönüne dik olarak yapılan bükme neticesinde geri yaylanma açısına ait a katsayıları

hazırlanan bir program yardımıyla elde edildi. Hazırlanan program yardımıyla a katsayıları:

$$a_0 = -3.08$$

$$a_1 = 0.834$$

$$a_2 = -0.619$$

$$a_3 = -0.533$$

ve korelasyon katsayısı;

$$R = 0.98$$

şeklinde elde edildi. Bu katsayılar Eşitlik (4.1) yerine konur ve düzenlenirse sac malzemede hadde yönüne dik olarak yapılan bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma açısına ait matematiksel model:

$$\theta_{g(90)} = -3,08 + \sigma_{ak}^{0,834} \cdot \theta^{-0.619} \cdot t^{-0.533} \quad (4.2)$$

$$\theta_{g(90)} = -3,08 + \frac{\sigma_{ak}^{0,834}}{\theta^{0.619} \cdot t^{0.533}} \quad (4.3)$$

şekilde elde edilir.

Benzer şekilde; Eşitlik (4.1) kullanılarak sac malzemede hadde yönüne paralel olarak yapılan bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma açısına ait matematiksel model katsayıları ise:

$$a_0 = -3.106$$

$$a_1 = 0.831$$

$$a_2 = -0.617$$

$$a_3 = -0.537$$

ve korelasyon katsayısı;

$$R = 0.98$$

şeklinde elde edildi. Bu katsayılar Eşitlik (4.1) yerine konur ve düzenlenirse Eşitlik (4.4.) ve Eşitlik (4.5)'teki gibi sac malzemede hadde yönüne paralel olarak yapılan bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma açısına ait matematiksel model:

$$\theta_{g(0)} = -3,106 + \sigma_{ak}^{0,831} \cdot \theta^{-0.617} \cdot t^{-0.537} \quad (4.4)$$

$$\theta_{g(0)} = -3,106 + \frac{\sigma_{ak}^{0,831}}{\theta^{0.617} \cdot t^{0.537}} \quad (4.5)$$

şekilde elde edilir.

Görüldüğü gibi her iki haddeleme yönünde elde edilen katsayılar ve hatalar birbirine çok yakındır. Korelasyon değerlerinin (R) büyüklüğü ise formülasyonda öngörülen güç fonksiyonunun uygun bir model olduğunu göstermektedir.

Yapılan bu matematiksel modeller kullanılarak, sac malzemede haddeleme yönüne dik ve haddeleme yönüne paralel olarak yapılan bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma açısı (θ_g) önceden yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu matematiksel modellerden yola çıkarak, deney yapmaya ihtiyaç duymadan, arzu edilen sac malzemesi için uygun olan işlem parametrelerini seçmek mümkün olacaktır.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sac şekillendirme metotlarından biri olan V kalıpla bükme işleminde meydana gelen geri yaylanma probleminin deneysel ve sayısal olarak araştırması yapılmıştır. Çalışmalarda, üç farklı kalınlıktaki DP800, DP600, DC01, DC04 ve DC05 çelik sac malzemelerin hadde yönleri de dikkate alınarak üç değişik bükme açılarında geri yaylanma davranışları incelemiştir. Sayısal analizler, sac şekillendirme analiz programlarından biri olan Autoform yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sac malzemede haddeleme yönüne dik ve haddeleme yönüne paralel olarak yapılan bükme sonrası meydana gelen geri yaylanma açısı matematiksel olarak modellendi. Yapılan çalışmalar neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Geri yaylanma davranışının, kalıp ve malzeme parametrelerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.
2. Kalıp açısının artmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni kalıp açısının artmasıyla sacın dış yüzeylerinde şekil değişimine uğrayan bölgenin ve uzama miktarının azalmasıyla açıklanabilir.
3. Malzeme kalitesine bağlı olarak numunelerde oluşan geri yaylanma davranışı değişkenlik göstermektedir. Akma mukavemeti düşük sac malzemelerde geri yaylanma daha az oluşurken, yüksek mukavemete sahip sac malzemelerde daha fazla meydana gelmiştir.
4. Malzeme kalınlığının artmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca bu durum geri yaylanma faktörünün kalınlıkla ters orantılı olduğunu belirten $K=R/t$ formülünün ispatını ortaya koymaktadır.
5. Autoform programı ile yapılan geri yaylanma davranışına ait sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Böylece deneysel çalışma yapılmadan arzu edilen işlem parametreleri için maliyet ve zaman tasarrufu açısından sonuçları elde etmek mümkündür. Buna istinaden sonlu elemanlar yazılımı olan Autoform programının sac şekillendirme simülasyonunda gerçeğe yakın sonuçlar vermesi, hızlı ve kolay kullanımının yeterli ve güvenilir olduğu söylenebilir.

6. Yapılan bu matematiksel modeller yardımıyla, deney yapmaya ihtiyaç duymadan geri yaylanma açısı önceden yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Bu çalışmanın ardından gelecekteki diğer araştırmacılara önerilebilecek çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

- Farklı bükme yöntemlerinde geri yaylanma davranışlarının analizini yapmak,
- Farklı analiz programları kullanılarak yazılımların güvenilirliklerini karşılaştırmak amaçlı deneyler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Advanced High Strength Steel Application Guidelines**, International Iron and Steel Institute-Committee on Automotive Applications, January 2005.
- Alıcı, İ.**, 2001. Derin çekme saclarının deformasyon davranışının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Andersson, A.**, 2005. Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member, *Journal of Material Processing Technology*, **169**, 352-356.
- Anket, O.**, 2011. DC04 Otomotiv sacının hidromekanik yöntem ile şekillendirilebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel olarak incelenmesi, *Doktora Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Arslan, B.**, 2007. Geri esnemenin sac parçaların biçim tamlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi uygulamaları ile değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Asgari, S.A., Pereira, M., Rolfe, B.F., Dingle, M. and Hodgson, P.D.**, 2008. Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, **203**, 129-136.
- Asnafi, N.**, 2000. Springback and fracture in v-die air bending of thick stainless steel sheets, *Materials and Design*, **21**, 217-236.
- Behrouzi, A., Shakeri, M. and Dariani, B.M.**, 2008. Inverse analysis of springback in sheet metal forming by finite element method”, *International Conference on Engineering Optimization*, Rio de Janeiro, Brazil, June 01-05.
- Bekar, D.**, 2011. Çift fazlı çeliklerde şekil verme operasyonları sonucunda oluşan geri yayılmanın gürbüz optimizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bruni, C., Forcellese, A., Gabrielli, F. and Simoncini, M.**, 2006. Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, **177**, 373-376.
- Cerit, A., M.**, 1976. Makine Mühendisliği El Kitabı, 8-458-489, Maya Matbaacılık Yayıncılık, Ankara.
- Chan, W.M., Chew, H.I., Lee, H.P., and Cheok, B.T.**, 2004. Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, **148**, 15-24.
- Çapan, L.**, 2003. Metallere Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

- Değirmenci, H.**, 2006. Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve nedenleri ile bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erhuy, C.G.**, 2008. Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik sac üzerinde geri esnemenin şekillendirmeye etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Esat, V.**, 2002. Finite element analysis of springback in bending process, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Esat, V., Darendeliler, H. and Gökler, M.I.**, 2002. Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets, *Materials and Design*, **23**, 223-229.
- Fei, D. and Hodgson, P.**, 2006. Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels, *Nuclear Engineering and Design*, **236**, 1847-1851.
- Fekete, J., Stibich, A. and Shi, M.A.**, 2001. Comparison of the Response of HSLA and Dual Phase Sheet Steel in Dynamic Crash Society of Automotive Engineers (SAE), 01-3101.
- Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F. and Micari F.**, 1998. The evaluation of springback in 3D stamping and coining processes, *Journal of Materials Processing Technology*, **80-81**, 108-112.
- Garcia-Romeu, M.L., Ciurana, J. and Ferrer, I.**, 2007. Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work, *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, 174-177.
- Gau, J.T. and Kinzel, G.L.**, 2001. A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered, *International Journal of Mechanical Sciences*, **43**, 1813-1832.
- Gau, J.T., Principe, C. and Yu. M.**, 2007. Springback behavior of brass in micro sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, **191**, 7-10.
- Güneş, A., T.**, 1989. Pres İşleri Tekniği, **1**, 184-241, Erk Yayıncılık, Ankara.
- Inamdar, M.V., Date, P.P. and Sabnis, S.V.**, 2002. On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending, *Journal of Materials Processing Technology*, **123**, 459-463.
- Işıktaş, A.**, 2011. Farklı kalınlıklardaki Dkp ve paslanmaz sacların farklı açılarda yapılan V-bükme işlemindeki geri yaylanmalarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Kahraman, M.**, 2008. Levha malzemelerin sonlu elemanlar yöntemiyle geri esnemesinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kalpajian, S. and Schmid, S.R.**, 2003. Manufacturing Processes for Engineering Materials, 4 Edition, Prentice Hall, USA.
- Keum, Y.T. and Han, B.Y.**, 2002. Springback of FCC sheet in warm forming, *Journal of Ceramic Processing Research*, **3**, 159-165.
- Kılıç, S.**, 2009. DP600 çeliğinin geri esneme davranışının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Kılıç, S., Öztürk, F. ve Toros, S.**, 2009. DP800 çeliğinin mekanik özelliklerinin ve geri esneme davranışının incelenmesi, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, **11**, 1, 40-45.
- Kim, H. S., and 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.
- Kim, S. and Lee, Y.**, 2011. Effect of retained austenite phase on springback of cold-rolled TRIP steel sheets, *Materials Science and Engineering A*, **530**, 218-224.
- Lange, K.**, 1985. Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Leu, D.**, 1997. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals, *Journal of Materials Processing Technology*, **66**, 9-17.
- Li, X., Yang, Y., Wang, Y., Bao, J. and Li, S.**, 2002. Effect of the material-hardening mode on the springback simulation accuracy of V-free bending, *Journal of Materials Processing Technology*, **123**, 209-211.
- Ling, Y.E., Lee, H.P. and Cheok, B.T.**, 2005. Finite Element Analysis of Springback in L-Bending of Sheet Metal, *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, 296-302.
- Livatyah, H., and Altan, T.**, 2001. Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods Part 1. Experimental investigations, *Journal of Materials Processing Technology*, **117**, 262-268.
- Livatyah, H., Müderrisoğlu A., Akgerman, N., and Altan, T.**, 1997. Bending, flanging and hemming of aluminum and steel sheets progress report II, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, ABC/ERC/NSM-97-R-017, The Ohio State University, Columbus, OH.
- Marciniak, Z. and Duncan, J., L.**, 1992. The Mechanics of Sheet Metal Forming, Edward Arnold, London.
- Mete, O.H.**, 2007. Sac levhaların şekillendirilebilirliğine etki eden değişkenliklerin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Micari, F., Forcellese, A., Fratini, L., Gabrielli, F. and Alberti, N.,** 1997. Springback evaluation in fully 3-D sheet metal forming processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **46**, **1**, 167-170.
- Mori, K., Akita, K. and Abe, Y.,** 2007. Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo pres, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **47**, 321-325.
- Nilsson, A., Melin L., and Magnusson C.,** 1997. Finite element simulation of V-die bending: a comparison with experimental results, *Journal of Materials Processing Technology*, **65**, 52-58.
- Osman, M.A., Shazly, M., El-Mokaddem, A. and Wifi, A.S.,** 2010. Springback prediction in V-die bending: modelling and experimentation, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **38**, 179-186.
- Oya, T., Tiesler, N., Kawanishia, S., Yanagimoto, J. and Koseki, T.,** 2010. Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending, *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 1926-1933.
- Ozturk, F., Toros, S., Kilic, S. and Bas, M.H.,** 2009. Effects of cold and warm temperatures on springback of aluminium-magnesium alloy 5083-H111, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, **223**, 427-431.
- Ötü, R. ve Demirci H.İ.,** 2012. 60°'lik V bükme kalıbında AA 5754 ve Al 1050 sac malzemelerin farklı bükme metotları kullanılarak geri esneme miktarlarının tespiti, *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, Türkiye, 02-04 April.
- Özçelik, G.,** 2008. Derin çekme işleminin simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özdemir A.,** 2010. Sac metal ürünlerde geri esneme miktarının deneysel ve sonlu elemanlarla tespiti, yapay sinir ağlarıyla tahmini, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özer, F.,** 2011. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde şekil verme operasyonları sonucu oluşan geri yaylanmanın doğru tahmini ve telafisi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sarıkaya, O.T.,** 2008. Analysis of heat treatment effect on springback in V-bending, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sriram, S., Jothi, N., Kumar, N.L.L.N. and Venugopal, P.,** 1997. V-bending studies on sintered copper powder metallurgical preform sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, **70**, 156-162.
- Tekaslan, Ö. ve Şeker, U.,** 1998. Bükme işlemlerinde geri esneme, *Teknoloji*, **1**, 78-90.

- Tekaslan, Ö.,** 1998. Bükme kalıplarında farklı kalınlık ve özellikteki sac malzemelerin geri esneme durumlarının incelenmesi üzerine deneysel bir çalışma, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tekaslan, O., Seker, U. and Ozdemir, A.,** 2006. Determining springback amount of steel sheet metal has 0,5 mm thickness in bending dies, *Materials and Design*, **27**, 251-258.
- Tekaslan, O., Seker. U. and Gerger, N.,** 2007. Bükme kalıplarında 0.75 mm kalınlığındaki çelik sac malzemenin geri esneme miktarlarının belirlenmesi, *Journal of Engineering Sciences*, **13**, 15-22.
- Tekaslan, O., Gerger, N. and Seker. U.,** 2008a. V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **23**, 231-238.
- Tekaslan, O., Gerger, N. and Seker. U.,** 2008b. Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies, *Materials and Design*, **29**, 1043-1050.
- Tekaslan, O. ve Şeker. U.,** 2009. Pirinç sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs.
- Tekiner, Z.,** 2004. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies, *Journal of Materials Processing Technology*, **145**, 109-117.
- Topçu, M. ve Taşgetiren, S.,** 1998. Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Matbaası, Ders Kitapları Yayın No:007, Denizli.
- Toros, S., Ece, R.E., Öztürk, F. ve Alkan, M.,** 2009. 5754-O Al-Mg alaşımında ön gerilmenin geri esnemeye etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **6**, 1-9.
- Turan, S.E.,** 2009. Düz kenar bükme ve döner kalıpla kenar bükme işlemlerinin geri yaylanma üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uçan, M.,** 2011. Effect of constitutive modeling in sheet metal forming, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- ULSAB-AVC Engineering Report, October 2001.
- URL-1, <http://www.mechanicaldesignforum.com/forum/images/kb/bendworks/bending.pdf>, BendWorks, 10 Eylül 2013.
- URL-2, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/E%C4%9Fme-B%C3%BCkme.pdf, Eğme Bükme, 18 Eylül 2013.

- URL-3, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/makine_tek/moduller/bukme_kaliplari1.pdf, Bükme Kalıpları 1, 18 Eylül 2013.
- URL-4, www.grupotomasyon.com.tr/sayfam/1611/autoform.htm, Autoform, 5 Ekim 2013.
- Uysal, E.**, 2011. DP600 çeliklerin şekillendirme hızı ve sac kalınlığına bağlı olarak şekillendirme sınır diyagramlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Uysal, G.**, 2006. Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli sacların şekillendirilebilme özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Wang, C., Kinzel, G. and Altan, T.**, 1993. Process simulation and springback control in plane strain sheet bending, *Sheet Metal and Stamping Symposium SAE Special Publications*, Ohio State Univ., OH., USA, **944**, 45-54.
- Wang, J., Verma, S., Alexander, R. and Gau, J.T.**, 2008. Springback control of sheet metal air bending process, *Journal of Manufacturing Processes*, **10**, 21-27.
- Yanagimoto, J., Oyamada, K. and Nakagawa, T.**, 2005. Springback of high-strength steel after hot and warm sheet formings, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **54**, 213-216.
- Yenice, M.M.**, 2006. Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yilamu, K., Hino, R., Hamasaki, H. and Yoshida, F.**, 2010. Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 272-278.
- Yuan, W.Y.D.**, 1996. Generalized solution for the prediction of Springback in laminated strip, *Journal of Materials Processing Technology*, 61, **3**, 254-264.
- Zhang, L.C., Lu, G. and Leong, S.C.**, 1997. V-shaped sheet forming by deformable punches, *Journal of Materials Processing Technology*, **63**, 134-139.
- Zohir, M.Z.B.M.**, 2010. Springback prediction of mild steel sheet on 60° air bending, *Yüksek Lisans Tezi*, Malaysia Pahang University.

ÖZGEÇMİŞ

1986 tarihinde Bursa'da doğdu. İlköğretimini Hürriyet İlköğretim Okulu'nda, ortaöğretimini Çelebi Mehmet Lisesi'nde tamamladı. 2005 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'ne yerleşti. 2007-2008 eğitim-öğretim yılının güz yarıyılında Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne yatay geçiş yaptı ve 2009 yılında bu okuldan mezun oldu. Aynı yılın güz döneminde Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilimi üzerine yüksek lisansa başladı. 2010 yılında Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı ve halen aynı üniversitede görevine devam etmektedir.