



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE GERİ ESNEME KABİLİYETİNİN  
FARKLI PEKLEŞME MODELLERİ İÇİN TAHMİN EDİLMESİ

BERKAN İŞERİ

EYLÜL 2019



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE GERİ ESNEME KABİLİYETİNİN  
FARKLI PEKLEŞME MODELLERİ İÇİN TAHMİN EDİLMESİ

BERKAN İŞERİ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Serkan TOROS

EYLÜL, 2019

Berkan İŞERİ tarafından Doç. Dr. Serkan TOROS danışmanlığında hazırlanan “Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Geri Esneme Kabiliyetinin Farklı Pekleşme Modelleri İçin Tahmin Edilmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan : Prof. Dr. Yusuf CÜNEDİOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Serkan TOROS, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Dr. Öğretim Üyesi Süleyman KILIÇ, Ahi Evran Üniversitesi

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../....../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...


**Prof. Dr. Murat BARUT**

**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

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

Berkan İŞERİ



## ÖZET

### YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERDE GERİ ESNEME KABİLİYETİNİN FARKLI PEKLEŞME MODELLERİ İÇİN TAHMİN EDİLMESİ

İŞERİ, Berkan

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Serkan TOROS

Eylül 2019, 54 Sayfa

Yapılan çalışmada DP 600 ve DP 1000 çelikleri ele alınarak geri esneme kabiliyetleri belirlenmiştir. V kalıp ve U kalıplarda presleme işlemi sonrasında, oluşan geri esneme davranışları araştırılmıştır. Eş zamanlı olarak DynaForm programı yardımı ile simülasyon ortamına aktarılmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan simülasyonlarda üç farklı pekleşme modeli kullanılmış ve modellerin doğruluk oranları karşılaştırılmıştır. Simülasyonlarda Yoshida Uemori, Armstrong-Frederick ve Chaboche kinematik pekleşme modelleri kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, yüksek mukavemetli çelikler için geri esnemeyi en iyi tahmin eden pekleşme modeli Yoshida Uemori olmuştur.

*Anahtar Sözcükler:* Yüksek mukavemetli çelikler, pekleşme modeli, DP 600, DP 1000 yoshida uemori, geri esneme, dynaform

## SUMMARY

### PREDICTION OF SPRINGBACK CHARACTERISTICS OF HIGH STRENGTH STEELS FOR DIFFERENT HARDENING MODELS

ISERI, Berkan

Nigde Omer Halisdemir Universty

Graduate School of Natural And Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Serkan TOROS

September 2019, 54 Pages

In this study, the springback capabilities were determined by focusing on DP 600 and DP 1000. After the pressing process in V and U moulds, the emergent springback behaviours were researched. At the same time, they were transferred to simulation stage via DynaForm program and the results were compared. Three different strain-hardening models were used in these simulations and the accuracy rates were of the models were compared. These models which were used in the simulations are Yoshida Uemori, Armstrong-Frederick and Chaboche kinematic strain-hardening models. As a result of the comparison, Yoshida Uemori became the best strain-hardening model which estimated the springback for high strength steels.

*Keywords:* High strength steels, kinematic hardening models, dp600, dp1000, yoshida uemori, springback, dynaform

## ÖN SÖZ

Şekillendirilebilme kabiliyetlerinden dolayı büyük avantaja sahip yüksek mukavemetli çelikler; otomotiv endüstrisinde her geçen gün daha fazla kullanılmaktadır. Yüksek mukavemetli çeliklerin şekillendirme sonrası oluşan boyutsal bozulmanın yani; geri esneme davranışının, bilgisayar ortamında belirlenmesi sağlanmaktadır. Bu sayede kalıp revizyonları esnasında daha olumlu sonuçlar alınarak gerek vakit kaybının gerekse oluşacak maddi kayıpların önüne geçilmesi öngörülmektedir.

Yapılacak tasarımlar ile; belirlenen geometrinin en uygun şekilde kalıplarda şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu esnada bilgisayar ortamında yapılacak simülasyonlar sayesinde en uygun kalıp şekli belirlenebilecektir. Gerçek pres ortamında şekillendirilmesi esnasında çekme ve bükme tarzı deformasyonlar sıralı olarak meydana gelebilmektedir. Bu anlamda parçaların pekleşme özelliği ile farklı karakterlerde gerilme değerlerinin oluşması aşikâr olmaktadır. Bu değerlerin de doğru olarak tahmin edilmesi ile simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara yaklaştırılabilmekte sonraki kalıp revizyon işlemlerini azaltabilmektedir.

Bu kapsamlar göz önünde bulundurularak yapılan bu çalışmada farklı pekleşme modelleri ile DP600 ve DP1000 malzemesinde geri esneme tahminleri yapılmıştır. Yapılan bu tahminler ile literatüre katkı sağlanarak yapılacak tasarım çalışmalarında daha doğru sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma süresince, desteklerinden ve yardımlarından dolayı değerli danışmanım Doç. Dr. Serkan TOROS'a ve Arş. Gör. Habip Gökay KORKMAZ'a, benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, Yurdagül İŞERİ ve Hülya İŞERİ'ye en içten duygularıyla teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
1.1 Çift Fazlı Yüksek Mukavemetli Çelik Malzeme ve Yapısal Özellikleri .....	3
1.2 Geri Esneme .....	5
1.3 Geri Esneme ve Anizotropi İlişkisi .....	7
1.4 Bauschinger Etkisi .....	9
1.5 Malzeme Modelleri .....	10
1.5.1 Armstrong ve Frederick modeli .....	11
1.5.2 Chaboche modeli .....	12
1.5.3 Yoshida Uemori modeli .....	14
1.6 Tezin Amacı .....	17
BÖLÜM II DENEY ÇALIŞMALARI .....	19
2.1 Deneysel Yöntemler .....	19
2.1.1 Anizotropi ve çekme deneyi .....	19
2.1.2 Çekme – basma deneyi (cyclic) .....	23
2.1.3 U ve V bükme deneyi .....	25
2.2 Deney Koşulları ve Kullanılan Ekipmanlar .....	30
BÖLÜM III DENEY SONUÇLARI .....	32
3.1 Çekme Deneyi Sonuçları .....	32
3.2 Cyclic Deney Sonuçları .....	35
3.3 U ve V Bükme Deney Sonuçları .....	36
BÖLÜM IV MODEL PARAMETRELERİ VE ANALİZ SONUÇLARI .....	38
4.1 Pekleşme Model Parametrelerinin Belirlenmesi .....	38

BÖLÜM V GERİ ESNEME MODELLEMESİ .....	45
BÖLÜM VI SONUÇLAR .....	48
KAYNAKLAR .....	49
ÖZ GEÇMİŞ .....	54



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. DP 600 ve DP 1000 malzemelerin mekanik özellikleri .....	4
Çizelge 3.1. DP 600 belirlenen, malzeme mekanik özellikleri.....	33
Çizelge 3.2. DP 600 mekanik özellikleri .....	33
Çizelge 3.3. DP 1000 belirlenen, malzeme mekanik özellikleri.....	34
Çizelge 3.4. DP 1000 mekanik özellikleri .....	34
Çizelge 3.5. DP 600 malzeme için geri esneme miktarlarının deneysel sonuçları.....	37
Çizelge 3.6. DP 1000 malzeme için geri esneme miktarlarının deneysel sonuçları.....	37
Çizelge 4.1. DP 600 malzeme için Frederick-Armstrong model parametreleri .....	38
Çizelge 4.2. DP 600 malzeme için Chaboche model parametreleri .....	39
Çizelge 4.3. DP 600 malzeme için Yoshida-Uemori model parametreleri .....	40
Çizelge 4.4. DP 1000 malzeme için Frederick-Armstrong model parametreleri .....	41
Çizelge 4.5. DP 1000 malzeme için Chaboche model parametreleri .....	42
Çizelge 4.6. DP 1000 malzeme için Yoshida-Uemori model parametreleri .....	43
Çizelge 6.1. Farklı pekleşme modellerine göre DP 600 ve DP 1000 malzemelerin geri esneme miktarları.....	48

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Araçlardaki bazı parçaların kuvvet dayanımları.....	2
Şekil 1.2. Düşük mukavemetli (Low strength Steel-LSS), yüksek mukavemetli çelik (High Strength Steel-HSS), ultra yüksek mukavemetli çelik (Ultra High Strength Steel-UHSS) çekme gerilmesi dayanımı ve toplam uzama miktarı... 2	
Şekil 1.3. Çift fazlı çeliklerin otomotiv sektöründe kullanılma miktarı .....	3
Şekil 1.4. SEM görüntüleme yöntemi ile ferritik ve martensitik yapının malzeme üzerindeki dağılımı .....	4
Şekil 1.5. Presleme esnasında malzeme geometrisi (a) ve presleme sonrası malzeme geometrisi (b).....	5
Şekil 1.6. Geri esneme yer değişimi gösterimi .....	6
Şekil 1.7. Haddeme yönüne göre anizotropi yönlerinin belirlenmesi.....	8
Şekil 1.8. Bauschinger etkisinin grafiksel olarak gösterimi .....	10
Şekil 1.9. Non-linear pekleşme modeli.....	12
Şekil 1.10. Dengelenmiş çevrimsel gerilme – gerinim eğrisi .....	14
Şekil 1.11. Çift yüzeyli model gösterimi .....	15
Şekil 1.12. Yoshida modeli ile malzeme davranış tahmini.....	15
Şekil 2.1. ASTM E8 standartlarına uygun numune ölçüleri.....	19
Şekil 2.2. Ekstensiyometre ile uzama miktarının ölçülmesi sistemi.....	20
Şekil 2.3. Gerilim-gerinim grafiği .....	21
Şekil 2.4. Elastisite modülünün grafik üzerinde gösterimi .....	22
Şekil 2.5. Bükme prosesi esnasında oluşan gerilmeler .....	25
Şekil 2.6. Bükme işlemi gösterimi.....	26
Şekil 2.7. Bükme şekilleri gösterimi.....	26
Şekil 2.8. V bükme kalıbı ifade gösterimi .....	27
Şekil 2.9. Bükme esnasında, AB yayında gerçekleşen deformasyon .....	28
Şekil 2.10. Bükme esnasında gerçekleşen deformasyon dağılımı .....	29
Şekil 2.11. V kalıp ölçüleri .....	29
Şekil 2.12. U kalıp ve ölçüleri .....	30
Şekil 3.1. DP 600 mühendislik gerinim-gerilim grafiği .....	32
Şekil 3.2. DP 1000 mühendislik gerinim-gerilim grafiği .....	33

Şekil 3.3. DP 600 malzeme için çevrimsel basma-çekme grafiği .....	35
Şekil 3.4. DP 1000 malzeme için çevrimsel basma-çekme grafiği .....	36
Şekil 4.1. DP 600 malzeme için MATLAB üzerinden, Frederick-Armstrong için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi .....	39
Şekil 4.2. DP 600 malzeme için MATLAB üzerinden, Chaboche için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi .....	40
Şekil 4.3. DP 600 malzeme için MATLAB üzerinden, Yoshida-Uemori için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi .....	41
Şekil 4.4. DP 1000 malzeme için MATLAB üzerinden, Frederick-Armstrong için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi .....	42
Şekil 4.5. DP 1000 malzeme için MATLAB üzerinden, Chaboche için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi .....	43
Şekil 4.6. DP 1000 malzeme için MATLAB üzerinden, Yoshida-Uemori için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi .....	44
Şekil 5.1. Dynaform programı üzerinden gösterilmiş geometri detayları .....	45
Şekil 5.2. Zimba, kalıp ve numuneye uygulanmış ağ yapısı .....	46
Şekil 5.3. Şekillendirme işlemi sonrası parçada oluşan mesh dağılımı .....	47

## FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Basma-çekme deney aparatı.....	24
Fotoğraf 2.2. Çekme-basma deneyi yardımcı aparat bağlantısı.....	25
Fotoğraf 2.3. Shimadzu Autograph 100 kN çekme deney cihazı .....	31



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
$t$	Kalınlık (mm)
$\sigma_{akma}$	Akma dayanımı
$\sigma_{mak}$	Maksimum çekme dayanımı
$E_0$	Elastisite modülü
$\varepsilon_{max}$	Maksimum uzama miktarı
Fe	Demir
C	Karbon
$\theta$	Açı
R	Yarıçap
$\nu$	Poisson oranı
$\varepsilon_w$	Gerinim miktarı genişlik
$\varepsilon_t$	Gerinim miktarı kalınlık
$R_0$	Haddeleme yönü "0" derece paralel
$R_{45}$	Haddeleme yönü "45" derece diyagonal
$R_{90}$	Haddeleme yönü "90" derece transvers
$\alpha$	Öteleme tensörü
dp	Eş değer plastik gerinim artımı
$\varepsilon^p$	Plastik gerinim
C	Malzeme katsayısı
$\gamma$	Malzeme katsayısı
$c^{(i)}$	Tensörlerin skalar parametresi
$r^{(i)}$	Tensörlerin skalar parametresi
$X^{(i)}$	Tensörlerin skalar parametresi
$\underline{\underline{L}}^{(i)}$	Öteleme tensörü bileşeni
$\alpha^*$	Akma yüzeyi merkezi
$\beta$	Akma yüzeyi ve sınır yüzeyi arasındaki ilişki
Y	Akma yüzeyi boyutu
$\varphi(\sigma)$	Anizotropik akma kriteri

$\bar{\alpha}_*$	Akma yüzeyindeki kinematik hareket eşleniği
$\xi$	Elastisite modülü artış oranı
$E_0$	Başlangıç elastisite modülü
$E_A$	Plastik deformasyon sonrası elastisite modülü
$\sigma_g$	Gerçek gerinim
$\varepsilon_g$	Gerçek uzama
$e_{dış}$	Dış uzama (bükme)
$e_{iç}$	İç uzama (bükme)
$P_v$	Newton cinsinden eğme
$\sigma_{UTS}$	Maksimum çekme kuvveti

### Kısaltmalar

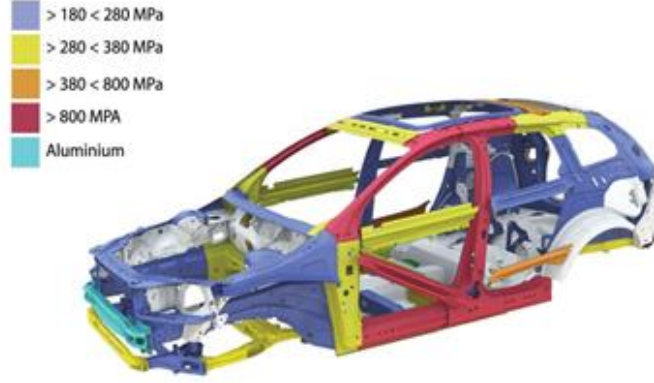
### Açıklama

ASTM E8	Çekme Numunesi Standartı
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DP	Çift Fazlı
FB	Ferritik Beynitik
FE	Sonlu Elemanlar Yöntemi
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli
HSS	Yüksek Mukavemetli Çelik
LSS	Düşük Mukavemetli Çelik
MPa	Mega Pascal
MS	Martensitik
SEM	Scanning Electron Microscope
TRIP	Üç Fazlı
UHSS	Ultra Yüksek Mukavemetli Çelik
ULSAB-AVC	Ultra Light Steel Auto Body Advanced Vehicle Concept

# BÖLÜM I

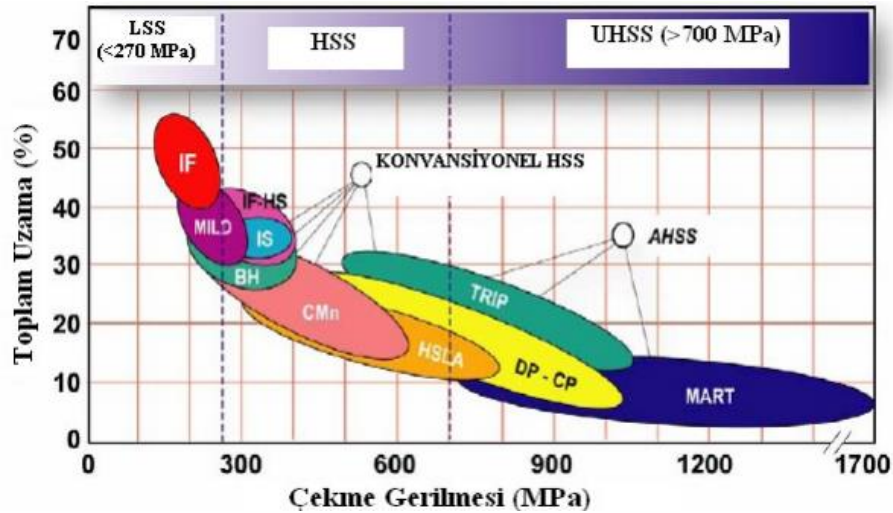
## GİRİŞ

Özellikle ulaşım araçlarında ihtiyacımız olan enerjinin büyük bir kısmını; tükenbilir ve yanma reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan ısı ve atık gazların sera etkisine sebep olduğu kaynaklar oluşturmaktadır. Bu kaynakların üretilmesi oldukça büyük maliyetlere sebep olmaktadır. Maddi kaygıların yanında çevreye zararları da göz önüne alındığında her geçen gün daha verimli ve çevreci araçlar geliştirilmesi gerekmektedir. Yapılan araç geliştirme çalışmalarının başında, genellikle motor sistemlerinin geliştirilerek daha yüksek yanma verimlerine ulaşılması gelmektedir, düşük enerji tüketimi ve daha yüksek torklar da güç üretilmesi amaçlanmaktadır. Diğer bir yandan araçlarda rüzgâr direncinin minimize edilmesi için aerodinamik tasarımlarda iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Farklı alanlarda yapılan bütün bu çalışmaların sonucunda daha verimli, konforlu, güvenli ve ekonomik araçların üretilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda çalışılmış ve önemli geri dönüşlerin sağlandığı diğer bir alan ise malzeme geliştirme çalışmalarıdır. Günümüz endüstri dünyasında 3500 farklı çeşidin üzerinde farklı fiziksel ve kimyasal kompozisyonlara sahip çelik bulunmaktadır, mevcut çeliklerin %75'i son 20 yılda geliştirilmiştir (World Steel Association,2018). Yapılan her çalışma ile daha uygun maliyetli, yüksek mukavemete sahip, hafif ve şekillendirilebilme kabiliyeti yüksek çelikler elde edilmesi amaçlanmaktadır. Yüksek Mukavemetli çelikler bu yapılan çalışmaların sonucunda geliştirilmiş; yaklaşık 270 Mpa ile 700 Mpa arasında mukavemet dayanımına sahip çeliklerdir. Bunun yanında 700 Mpa üzerinde mukavemet dayanımı gösteren çelikler ise Ultra Yüksek Mukavemetli Çelikler olarak isimlendirilmektedir. Özellikle gelişen otomotiv endüstrisinde güvenlik önlemleri, enerji maliyetleri ve çevreci yaklaşımların etkisi altında yürütülen iyileştirme çalışmalarının bir sonucu olan Ultra Yüksek Mukavemetli Çelikler birçok noktada otomotiv sektörünün sorunlarına çözüm getirmektedir. Şekil 1.1 ile araçlardaki parçalardaki kuvvet dayanımı gösterilmiştir. Bu gösterimde olduğu gibi turuncu ve kırmızı ile gösterilmiş hassas bölgelerde kullanılmaktadır.



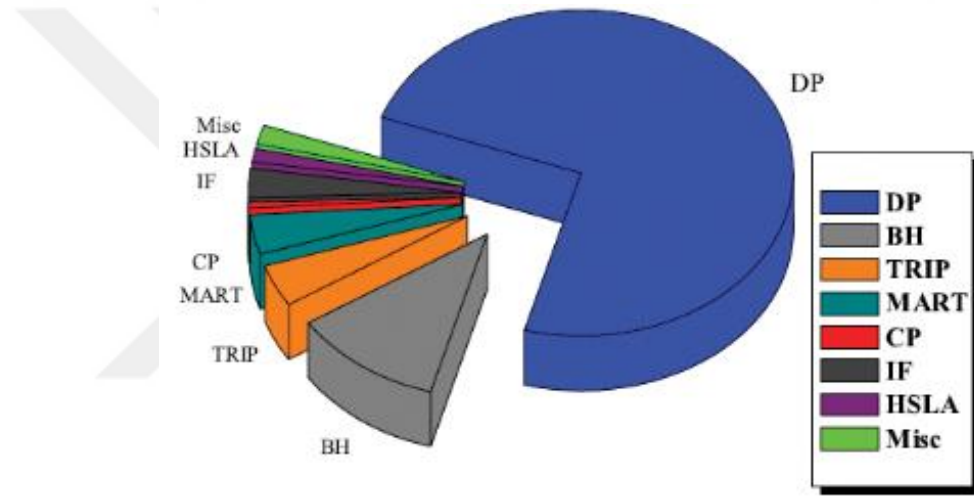
**Şekil 1.1.** Araçlardaki bazı parçaların kuvvet dayanımları (steeldata.com, Gelişmiş Çelik Uygulamaları, 2016)

Ultra Yüksek Mukavemetli Çeliklerin hafif olması daha hafif araçlar tasarlanmasını sağlar ve bunun sonucu olarak da düşük yakıt tüketilmesi avantajını ortaya çıkarır. Yakıt tüketiminin düşmesi ile daha çevreci araçlar kullanıma sunulmaktadır. Bunlara ek olarak yüksek mukavemet dayanımları sayesinde de araçlarda güvenlik seviyesini üst noktaya taşımıştır. Ultra Yüksek Mukavemetli Çeliklerden bazıları şu şekilde gruplandırılmaktadır; Çift Fazlı (Dual Phase- DP), Karışık Fazlı (Complex Phase - Cp), Ferritik-Beynitik (Ferritic-Bainitic-FB), Matensitik (Martensitic-MS), Dönüşümün Sağladığı Plastisite (Transformation-Induced Plasticity-TRIP) gibi çeliklerdir. Şekil 1.2’de Ultra yüksek mukavemetli çeliklerin sınıflandırılması gösterilmektedir.



**Şekil 1.2.** Düşük mukavemetli (Low strength Steel-LSS), yüksek mukavemetli çelik (High Strength Steel-HSS), ultra yüksek mukavemetli çelik (Ultra High Strength Steel-UHSS) çekme gerilmesi dayanımı ve toplam uzama miktarı, (ULSAB-AVC Overview report, Ocak 2002)

Çift fazlı çelikler, dayanım ve süneklik özellikleriyle yüksek mukavemetli çelikler (HSS) ailesindedirler. Yüksek gerilme mukavemeti ve süneklik kombinasyonunun bir arada bulunduğu çift fazlı çelikler; şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirlik gibi imalat özelliklerinin yanı sıra, otomotiv sanayisinde yakıt ekonomisini etkileyen araç ağırlığının azaltılması gibi avantajlarından dolayı cazip hale gelmiştir (Sarwar vd, 2007). ULSAB-AVC (Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts) topluluğunun raporunda belirttiği üzere; bir aracın gövdesi yaklaşık olarak %85 oranında HSLA malzemelerinden oluşmasıyla araçlarda %25 oranında ağırlık azalması sağlanmıştır, (ULSAB-AVC Overview report, Ocak 2002). Şekil 1.3’de Araç gövdesinde bulunan çift fazlı çelik miktarını göstermektedir.

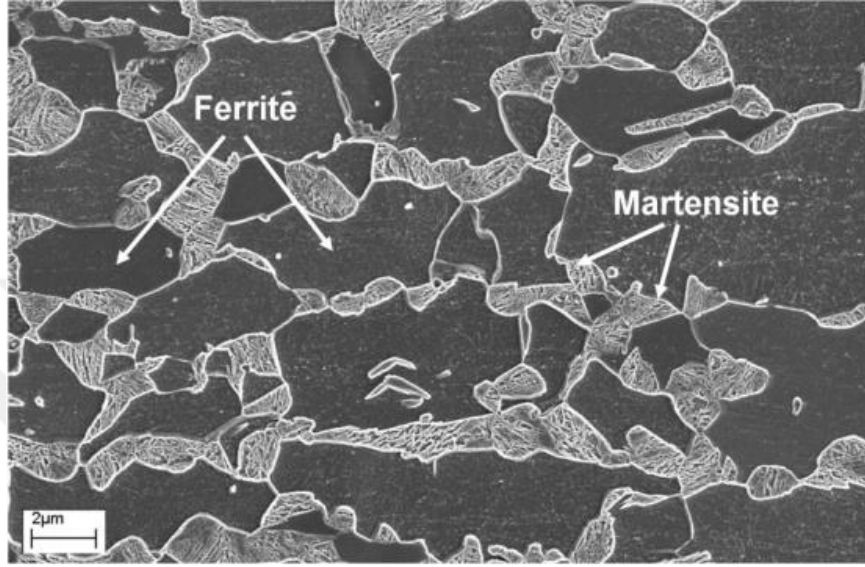


**Şekil 1.3.** Çift fazlı çeliklerin otomotiv sektöründe kullanılma miktarı, (ULSAB-AVC Overview report, Ocak 2002)

### 1.1 Çift Fazlı Yüksek Mukavemetli Çelik Malzeme ve Yapısal Özellikleri

İki farklı fazın birleşmesi ile oluşan çift fazlı çelikler yüksek mukavemetli çelikler grubunun bir parçasıdır. Ferritik bir ana faz yapısının içine ikinci faz olarak martenzitik yapının dağılması ile oluşmaktadır. 1970’li yıllarda geliştirilen bu çelikler otomotiv sektörünün ihtiyacı olan; yüksek mukavemet dayanımını karşılaması, şekillendirilebilme kabiliyetlerinin yüksek olması, parça tasarımlarında esneklik sağlaması ve üretim maliyetlerini düşüren etkileri önemli avantajlarıdır. Fe-C diyagramından anlaşılacağı gibi kritik seviyelere kontrollü olarak ısıtılarak mikro yapısı östenit/ferrit ikili fazına dönüşen malzememiz, uygun bekleme süreleri ve soğutma

işlemi sonrasında östenit yapı tamamen martenzite dönüşürken, ferrit yapı herhangi bir dönüşüme girmeden yapısını korumaktadır. Bu işlemin sonucunda; malzemeye sınırlarda oluşan martenzitik yapı sertliği sağlarken, ferritik yapı ise ana faz olarak şekillendirilebilme kabiliyetini artıracak yumuşaklığı ve sünekliği sağlayacaktır. (Granbom, 2010)



**Şekil 1.4.** SEM görüntüleme yöntemi ile ferritik ve martenzitik yapının malzeme üzerindeki dağılımı (Granbom, 2010)

Miklós Tisza ve arkadaşlarıyla yaptığı deneysel döngüsel basma ve çekme deneyi (cyclic test) sonucunda DP 600 ve DP 1000 malzemeler için belirledikleri mekanik özellikler Çizelge 1.1 de gösterilmiştir (Miklós Tisza vd., 2014).

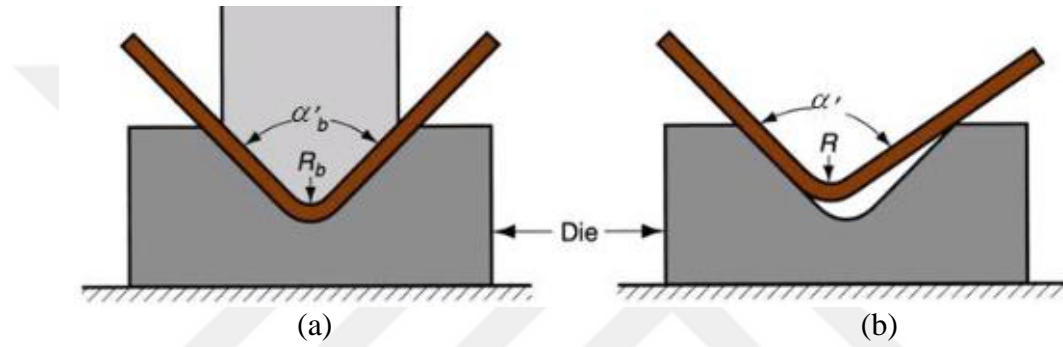
**Çizelge 1.1.** DP 600 ve DP 1000 malzemelerin mekanik özellikleri (Miklós Tisza vd., 2014)

Malzeme	t [mm]	$\sigma_{akma}$	$\sigma_{mak}$	Martenzit %	$E_0$ [GPa]
DP 600	1.0	351	670	18	206
DP 1000	1.0	780	1004	50	206

Yapılan bu çalışmada DP 600 malzeme için maksimum uzama miktarı  $\epsilon_{max}=0,12$  olarak ölçülürken DP 1000 malzeme için  $\epsilon_{max}= 0,08$  olarak belirlenmiştir (Miklós Tisza vd., 2014).

## 1.2 Geri Esneme

Birçok alanda kullanılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden olan preslemede, önemli problemlerden bir tanesi de geri esnemedir. Geri esneme pres ile şekillendirme esnasında ürüne verilmek istenen şeklin kalıplama esnasındaki geometrisini kalıplama sonrasında koruyamamasıdır. Diğer bir açıdan dile getirecek olursak, geri esneme, şekil verme işlemini takiben yük boşaltımı sırasında bir metal levhanın şeklinin elastik olarak değişime uğraması olarak tanımlanmaktadır (Naceur vd., 2006). Şekil 1.5’de geri esneme esnasında malzeme geometrisinin değişimi gözlenmektedir.

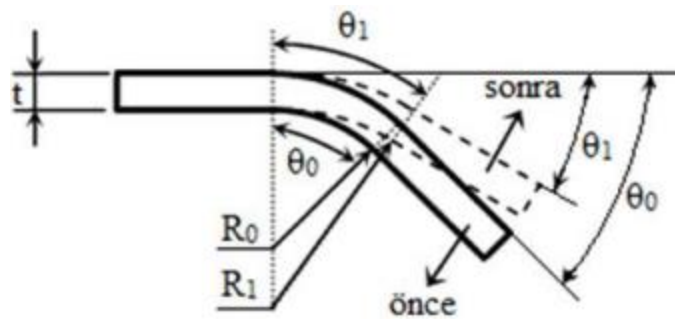


Şekil 1.5. Presleme esnasında malzeme geometrisi (a) ve presleme sonrası malzeme geometrisi (b), (Heidarshenas, 2015)

Geri esnemeye; tahmin edilemeyen seviyede uğrayan malzemeler, üretim esnasında malzemenin sonraki montajlarında toleransları artırırken zaman kaybı ile maliyetlerde artışa sebep olmaktadır. Bu probleme karşı şu şekilde çözüm yöntemleri denenmektedir; presleme esnasında yüksek çene kuvveti, şekillendirilecek parça için hazırlanan kalıplarda büküm açısının artırılması, gerdirerek bükme işlemi, büküm malzemesinin ısıtılması, büküm esnasında kullanılan takım ve kalıbın ısıtılması vb. yöntemlerdir. Geri esnemenin giderilmesi için yapılan çalışmalar genellikle takımların şekillerinin revize edilmesi ile yapılmaktadır. Takımların tasarım aşamalarında geri esnemenin tahmin edilmesi ve yapılacak ilk tasarımların bu bilgiler doğrultusunda yapılarak, hata toleransı düşük daha doğru sonuç veren kalıplar yapılmalıdır. Aksi durumlarda takımlar üzerinde yapılacak revizyon işlemleri hem yüksek maliyetlere sebep olurken hem de vakit kaybı oluşturmaktadır. Günümüzde en uygun yöntem takım şekillerinin ayarlanmasıdır. Önceden yapılan modelleme çalışmaları ile üretilen kalıplarda, istenilen geometrideki ürünlere daha çok yaklaşılmaktadır (Lana, F. vd., 2006). Günümüz

mühendislik çalışmalarında önemli bir analiz yöntemi olan sonlu elemanlar (FE) sayesinde birçok çalışma ile geri esneme modellemeleri yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Genellikle analiz çalışmalarında ABAQUS, Marc-Mentat gibi yazılımlar kullanılırken, Barlat 89, Barlat 96, Hill 48, Yld-2000 gibi malzeme modelleri kullanılmaktadır. Yapılan sonlu elemanlar (FE) analiz çalışmalarında orijinal bilgisayar destekli tasarımların (CAD) kullanılarak, şekillendirilen parçalar arasındaki hataların değerlendirilmesine imkân tanınmaktadır, geri esnemesine göre takım yüzeyini ötelemek, daha düzgün takım yüzeyleri oluşturmak ve diğer sonlu elemanlar yöntemleri için takım yüzey tanımları girmek için sistemler geliştirilmektedir (Zhang, D. vd.,2018).

Bütün sac malzemeler belirli oranlarda elastisite modülüne sahiptir. Sac malzemeye uygulanan yük, plastik deformasyon bölgesinde malzemeyi şekillendirmektedir. Uygulanan yük sac malzemenin üzerinden kaldırıldığında elastik geri dönüşe sebep olur, bu olaya geri esnemenin diğer bir tanımıdır. Geri esnemenin hangi miktarlarda oluştuğunu belirlenmesi için nicelik tanımlanmıştır. Bu nicelik geri esneme faktörü olarak ifade edilmektedir. Şekil 1.6'da geri esneme sonrası oluşan yer değiştirmeler gösterilmektedir.  $\theta_0$ , ile kuvvet kaldırılmadan önceki verilmek istenen geometrinin açısını göstermektedir.  $\theta_1$ , kuvvet kaldırıldıktan sonra geri esnemeye uğrayan malzemenin belirlenen dikey eksene uzaklığı olarak ifade edilmektedir.  $R_0$ , başlangıçtaki bükme açısının merkeze uzaklığını gösterirken,  $R_1$ , geri esneme sonrası bükülme açısının merkeze uzaklığını ifade etmektedir.  $t$ , sac malzemenin et kalınlığıdır.



**Şekil 1.6.** Geri esneme yer değişimi gösterimi (Sarıkaya, 2008)

Denklem (1.1)'de geri esneme faktörü ifade edilmektedir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

$$K = \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{R_0+t/2}{R_1+t/2} = \frac{2R_0/(t+1)}{2R_1/(t+1)} \quad (1.1)$$

Yazılan bu ifade ile  $K = 1$  olduğunda geri esnemenin olmadığı ve  $K = 0$  olduğu zaman kalıcı şekil değişimi olmadığı sonucuna varılmaktadır. Geri esneme faktörü bükme yarıçapı ile sac malzemenin kalınlığına oranı olarak da ifade edilebilmektedir (Topçu ve Taşgetiren, 1998). Geri esneme parametrelerinin belirlenebilmesi için geliştirilmiş denklemler bulunmaktadır Denklem (1.2) ile gerilme koşullarındaki geri esnemeyi ifade ederken denklem (1.3) ile gerilme durumundaki geri esneme koşulları ifade edilmektedir. Her iki denklemde de  $E$  elastisite modülünü,  $\sigma_{ak}$ , akma dayanımını ve  $\nu$  poisson olarak ifade edilmiştir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

$$\frac{R_0}{R_1} = 4 \left( \frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right)^3 - \left( \frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right) + 1 \quad (1.2)$$

$$\frac{R_0}{R_1} = 4 \left( \frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} (1 - \nu^2) \right)^3 - 3 \left( \frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right) (1 - \nu^2) + 1 \quad (1.3)$$

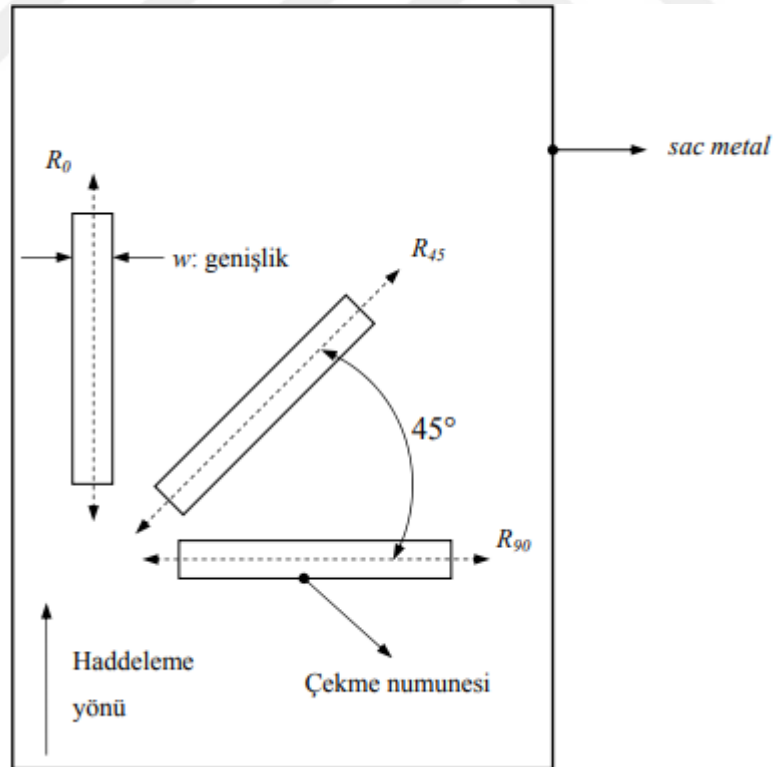
### 1.3 Geri Esneme ve Anizotropi İlişkisi

Sac malzemelerin yöne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik göstermektedir. Yöne bağlı olarak mekanik özelliklerinde değişiklik gösteren malzemelere anizotropik malzeme denirken, özelliklerinin yönle ilişkili herhangi bir değişikliğe uğramadığı malzemeler içinde izotropik malzemeler denilmiştir (Leu, 1997). Yüksek orandaki anizotropik malzemelerin deformasyon dirençleri de yüksektir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda bükme yönü ile hadde yönü arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır. Hadde yönü doğrultusunda yapılan bükme işlemleri, hadde yönüne dik yapılan bükme işlemlerine göre daha etkin şekillendirme sağlamaktadır (Cinar, 2005).

Anizotropinin değeri formülde  $R$  ile tanımlanmaktadır.  $R$  genişlik ile kalınlık yönündeki plastik gerilme oranıdır. Denklem (1.4) ile ifade edilmektedir.

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (1.4)$$

$\varepsilon_w$  ile gösterilen genişlik boyunca oluşan gerinim,  $\varepsilon_t$  ile gösterilen kalınlık boyunca oluşan gerinimdir. Her iki gerinimin birbirine eşit olması durumunda malzeme izotropik olarak değerlendirilmektedir. Tüm sac malzemeler haddeleme ile üretildikleri gerçeğini göz önünde bulundurursak izotropik malzeme durumu bir kabuldür. R değeri bizlere malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti ile ilgili bilgi verirken aynı zamanda incelmeye karşı oluşan direncinde bir ölçüsüdür. Genişlik geriniminin, kalınlık geriniminden büyük olması durumunda malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti ve yırtılma direnci yüksektir. Tam tersi oranlarda ise plastik şekil vermeye dayanımı düşüktür. Yırtılma ve kopma olasılığı vardır (Yakou vd., 2005). Haddelemeden çıkmış sac üzerinde üç ayrı anizotropi tanımlanmaktadır. Bunlar haddeleme yönü referans alınarak belirlenmektedir. Haddeleme yönüne paralel olan anizotropi değeri  $R_0$ , haddeleme yönü ile 45 derecelik bir açı yapan anizotropi değeri  $R_{45}$  (diyagonal) ve haddeleme yönüne dik olan anizotropi değeri ise  $R_{90}$ (tranvers) olarak isimlendirilmektedir. Sacdan alınacak 3 farklı numune ile anizotropi belirlenmektedir. Şekil 1.7’de anizotropi yönleri gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Haddeleme yönüne göre anizotropi yönlerinin belirlenmesi

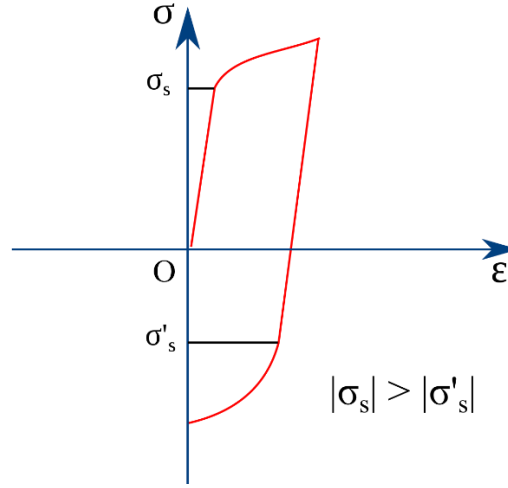
Tek eksenli yapılan çekme deneyleri sonucunda bulunan değerlerin ortalamalarının alınması ile normal anizotropi bulunmaktadır Denklem (1.5) ile ifade edilmektedir.

$$R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (1.5)$$

Gerek sac malzemelerin şekillendirme kabiliyetlerinin tayininde gerekse yırtılma dirençlerinin belirlenmesi açısından anizotropinin belirlenmesi oldukça büyük önem taşımaktadır. Yapılacak modelleme çalışmalarda kullanılan önemli bir parametredir.

#### **1.4 Bauschinger Etkisi**

Metal bir numuneye belirli oranlarda çekme kuvveti uyguladığımız da malzemede bir miktar sertleşme meydana gelecektir. Bunun sebebi, dislokasyonların hareketleri sonucu, önlerindeki engellere takılarak bir yığın oluşturmaları ve çoğalıp tanecikli yapı oluşturmalarıdır. Bu numune için çekme işlemine devam edilmesi durumunda akma dayanımı yükseldiği için daha fazla çekme kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. Numuneye tam tersi yönde yapılan basma işleminde ise aynı uzama miktarları için akma dayanımının daha düşük olduğu gözlemlenmiş ve çekme işleminde uygulanan kuvvetten daha düşük kuvvette ihtiyaç duyduğu gözlemlenmiştir. Akma dayanımındaki düşüş şu şekilde açıklanmaktadır; çekme işlemi esnasında dislokasyonların hareketleri sonucunda belirli bir düzen oluşturmuşlardır, tam aksi hareket söz konusu olduğunda ise, önlerinde engelle karşılaşmadıkları için daha rahat hareket edebilmektedirler ki; bu sebepten dolayı ters yönde uyguladığımız daha düşük kuvvetler ile aynı uzama miktarı sağlanmaktadır (Matsui vd, 2002; Watanabe1 vd., 2010, Prager vd., 1956). Şekil 1.8'de Bauschinger etkisi grafik üzerinde gösterilmiştir.



**Şekil 1.8.** Bauschinger etkisinin grafiksel olarak gösterimi

Bauschinger etkisinin geri esneme karakterinin etkisi üzerine ilk modelleme Prager tarafından yapılmıştır (Frederick ve Armstrong, 2007), ve daha sonra bu modelleme Ziegler tarafından düzenlenmiştir. Bu modeller sertleşme mekanizmasının yalnızca lineer kinematik kısmını ele almaktadır. Birçok uygulamada, kalıcı olmayan malzeme davranışları lineer sertleşme mekanizmasına uymaz, bu sebepten dolayı Armstrong ve Frederick tarafından lineer olmayan kinematik sertleşme kuralları önerilmektedir (Chaboche, 1986), daha sonraki çalışmalarda Chaboche tarafından, Armstrong ve Frederick 'in geliştirdikleri lineer olmayan sertleşme modeli de kalıcı olmayan malzeme davranışlarının tahmin kapasitesi artırılarak geliştirilmiştir (Zhang vd., 2018). Çoğu sonlu elemanlar analiz simülasyonlarında bu modelden faydalanılmaktadır.

### 1.5 Malzeme Modelleri

Bilgisayar teknolojisinin hızla geliştiği günümüzde, tasarımsal geliştirmeler yapılırken bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları sıklıkla kullanılmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan en etkili yöntemlerin başında sonlu elemanlar analizi gelmektedir. Sac metal malzemeler için yapılacak sonlu eleman analizleri büyük deformasyon sayıları ve temas problemleri gibi konular içerdiğinden lineer olmayan problemlerdir (Kim vd., 2017). Bunun gibi problemlerde yüksek tahmin hassasiyetlerine ulaşılması önemlidir. Karar verme sürecinde ve deneme yanılma sürelerini doğrudan etkilemektedir. Sonlu elemanlar analizi çalışmalarında tahmin hassasiyetine yönelik çalışmalara literatürde yer verilmektedir (Panthi, 2007; Turon vd.,

2007). Araştırmalar genellikle eleman boyutu üzerine yoğunlaşmaktadır (Kuwabara vd., 2011). Yapılan son çalışmalarda elemanların boyutsal modellemelerinden çok, plastik davranışlarının modellenmesinin daha etkili olduğu görülmüştür (Kuwabara vd., 2011; Chaboche vd., 1979). Modellemelerin, sonlu elemanlar programları üzerinde etkileri olduğu gibi performanslarını da etkilemektedir. Bu kapsamda yapılan simülasyon çalışmalarında en etkili sonucu almak için işleyişe en uygun modellemenin seçilmesi gerekir.

### 1.5.1 Armstrong ve Frederick modeli

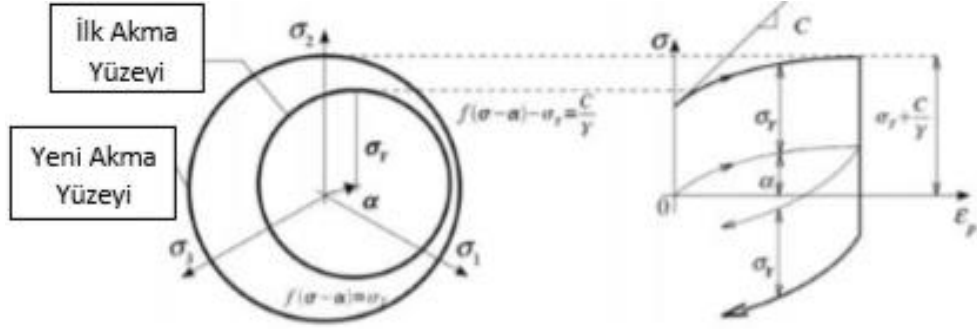
Armstrong ve Frederick tarafından yapılan modelleme çalışmasında çok eksenli Bauschinger etkisi simülasyon edilmektedir. Armstrong ve Frederick tarafından yapılan modelleme deneysel sonuçlarla kıyaslandığında Pragers ve Mises'in yaptığı eksenel döngüsel yükleme (cyclic) ve ince bakır tüplerde burulma çalışmalarına göre doğruluğu daha fazladır (Yoshida ve Uemori, 2002).

Armstrong ve Frederick tarafından ortaya atılan kinematik pekleşme modellemesi için geliştirdikleri matematiksel ifade şu şekilde verilmiştir; Denklem (1.6)

$$d\underline{\alpha} = \frac{2}{3} \cdot C \cdot d\underline{\varepsilon}^p - \gamma \cdot \underline{\alpha} \cdot dp \quad (1.6)$$

Bu denklemde “ $\gamma$ ” ve “C” ile ifade edilmek istenen malzeme parametreleridir, ayrıca “dp” eş değer plastik gerinim artımı olarak ifade edilmiştir (Halama, R., 2012). yazılan bu matematiksel ifade non-linear kinematik pekleşme modeli olarak isimlendirilmektedir (Chaboche ve Rousselier, 1983). Diğer bir yandan “ $\alpha$ ” öteleme tensörü ve “ $\varepsilon^p$ ” ise plastik gerinim olarak ifade edilmektedir. Eş değer plastik gerinim artırımının matematiksel ifade edilişi de denklem (1.7)’de verilmiştir (Halama, 2012). şekil 1.9’da non-linear pekleşme modeli grafiksel olarak gösterilmiştir.

$$dp = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot d\underline{\varepsilon}^p \cdot d\underline{\varepsilon}^p} \quad (1.7)$$



Şekil 1.9. Non-linear pekleşme modeli (Chaboche ve Rousselier, 1983)

### 1.5.2 Chaboche modeli

Malzemelerin plastik analizlerinde, yorulma bozunumunun da önemli etkisi vardır. Kinematik sertleşme teorileri ve izotropik davranış teorileri plastik analizlerinde kullanılmaktadır. Chaboche ve arkadaşları tarafından geliştirilen Chaboche kinematik sertleşme modeli, yorulma bozunumunu etkili bir şekilde modellemektedir (Chaboche, 1986 ve Chaboche vd., 1979). Chaboche ve arkadaşları tarafından önerilen bu model, Armstrong ve Frederick tarafından önerilen lineer olmayan kinematik sertleşme modelini temel alarak analiz etmektedir (Armstrong ve Frederick, 1966).

Chaboche ve Rousselier, 1983 yılında Frederick ve Armstrong'un kinematik pekleşme modelinde yaptığı seri açılım ile matematiksel ifadeyi denklemler (1.8) ile denklem (1.9)'da ifade etmiştir (Toros, 2016).

$$\underline{\underline{\alpha}} = \sum_{i=1}^m \underline{\underline{\alpha}}^{(i)} \quad (1.8)$$

$$d\underline{\underline{\alpha}}^{(i)} = \frac{2}{3} \cdot C \cdot d\underline{\underline{\epsilon}}^p - \gamma \cdot \underline{\underline{\alpha}} \cdot dp \quad (1.9)$$

Bu ifade de “C” ve “γ” malzeme katsayıları olarak gösterilirken  $\underline{\underline{\alpha}}^{(i)}$  ise öteleme tensörü bileşenidir (Halama, 2012).

Yapılan bu matematiksel ifadenin metaller için doğru sonuç verebilmesi için en az beş adet öteleme tensörü kullanılması gerekmektedir (Halama, 2012). Bu kapsamda Jiang ve Şehitoğlu'nun yapmış olduğu çalışmada tele tensörü artırımı şu ifade ile denklem (1.10) matematiksel işleme dökülmüştür (Halama, 2012).

$$d\underline{\alpha}^{(i)} = c^{(i)} \cdot r^{(i)} \cdot \left[ \underline{n} - \left( \frac{H\underline{\alpha}^{(i)}H}{r^{(i)}} \right)^{X^{(i)+1}} \cdot \underline{L}^{(i)} \right] \cdot dp ; (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.10)$$

Bu ifade ile " $c^{(i)}$ ", " $r^{(i)}$ " ve " $X^{(i)}$ " tensörlerin skalar parametreleridir,  $\underline{L}^{(i)}$  ise öteleme tensör bileşenlerinden birinin birim tensörüdür ifadesi şu şekilde verilmiştir. (Halama, 2012).

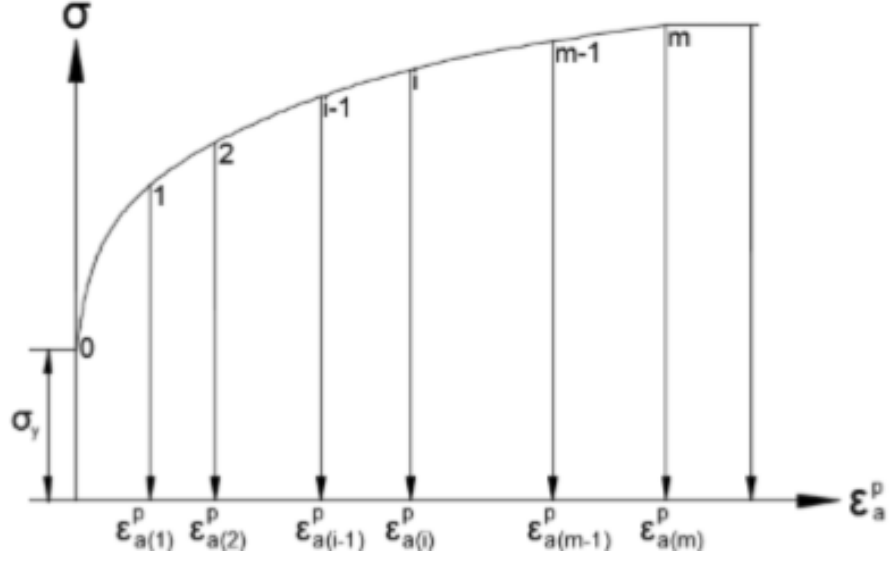
$$\underline{L}^{(i)} = \frac{\underline{\alpha}^{(i)}}{\sqrt{\underline{\alpha}^{(i)} : \underline{\alpha}^{(i)}}} ; (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.11)$$

Diğer yandan plastik pekleşmenin modül fonksiyonu şu şekilde ifade edilir.

$$h = \sum_{i=1}^m c^{(i)} \cdot r^{(i)} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{H\underline{\alpha}^{(i)}H}{r^{(i)}} \right)^{X^{(i)+1}} \cdot \underline{L}^{(i)} : \underline{n} \right] \cdot dp ; (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.12)$$

Bu ifadede yer alan  $X^{(i)}$  parametresi “çevrimsel gerinim birikim üsteli” olarak ifade edilmektedir. “ $c^{(i)}$ ” ve “ $r^{(i)}$ ” parametrelerini hesaplamak için çekme – basma deneyleri datalarından elde edilen ve grafiğe dökülen dataların oluşturduğu, eğrilerin tepe noktalarının birleştirilmesi ile oluşan doğrunun eğimi şu şekilde hesaplanır (Halama, 2012). Şekil 1.10’da Dengelenmiş çevrimsel gerilme – gerinim eğrisi ile uzama miktarı ve gerinim miktarı görülmektedir.

$$H_{(i)} = \frac{\sigma_{a(i)} - \sigma_{a(i-1)}}{\varepsilon_{a(i)}^p - \varepsilon_{a(i-1)}^p} ; (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.13)$$



Şekil 1.10. Dengelenmiş çevrimsel gerilme – gerinim eğrisi (Halama, 2012)

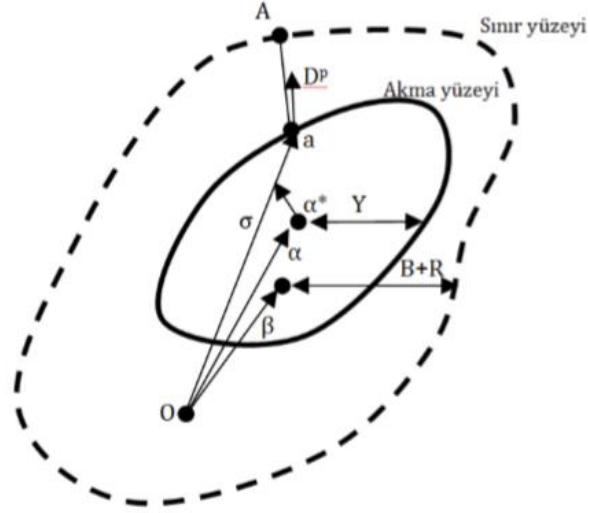
Buradaki “ $c^{(i)}$ ” ve “ $r^{(i)}$ ” parametreleri şöyle hesaplanmaktadır.

$$c^{(i)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{a(i)}^p} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.14)$$

$$r^{(i)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{H^{(i)} - H^{(i+1)}}{c^{(i)}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1.15)$$

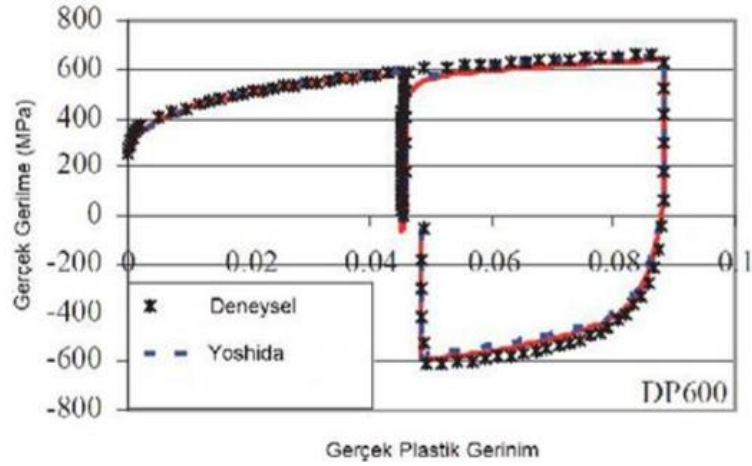
### 1.5.3 Yoshida Uemori modeli

Kinematik pekleşme kabulü yapan ve günümüzde en sık kullanılan modellerden bir diğeri ise Yoshida-Uemori kinematik pekleşme modelidir. Pekleşmeyi tanımlayabilmek için, bu modelde sınır yüzeyi ve akma yüzeyi olmak üzere iki yüzeye gereksinim vardır. Şekillendirmede akma yüzeyi boyutsal bir değişime uğramazken deformasyon esnasında akma yüzeyi merkez noktası hareket eder. Sınır yüzeyi de şekil ve konum olarak değişir. Şekil 1.11 ‘de gösterildiği üzere 0 noktası akma yüzeyinin merkezini temsil etmektedir,  $\alpha^*$  akma yüzeyinin mevcut merkezidir,  $\alpha$  ise sınır yüzeyi merkezidir,  $\beta$  her iki yüzey arasındaki mesafe ilişkisini göstermektedir,  $Y$  deformasyon boyunca değişmeyen akma yüzey boyutudur.  $B+R$  ile temsil edilen ise sınır yüzeyi ve  $\beta$  arasındaki ilişkidir,  $R$  izotropik pekleşmenin bir fonksiyonudur (Ls-Dyna Theoretical Manual, 1998).



Şekil 1.11. Çift yüzeyli model gösterimi (Shi vd., 2008)

Bu modelleme Bauschinger etkisini, lineer olmayan pekleşme modelini ve sac metal şekillendirme esnasındaki malzeme parametrelerini belirlemekte oldukça etkili bir modeldir. Yüksek mukavemetli çelikler için başarılı sonuçlar vermektedir. Şekil 1.12’de Yoshida modeli ile tahmin edilmiş gerilim gerinim eğrisi gösterilmiştir (Ls-Dyna Theoretical Manual, 1998). Deneysel veriler ve Yoshida modeli arasındaki farkın oldukça az olduğu görülmektedir.



Şekil 1.12. Yoshida modeli ile malzeme davranış tahmini (Firat, 2003)

Yoshida Uemori modeli akma yüzeyini veya akma fonksiyonunu denklem (1.16) ile açıklamaktadır.

$$f_0 = \varphi(\sigma) - Y = 0 \quad (1.16)$$

Bu denklemde  $\varphi(\sigma)$  ile anizotropik akma kriterini tanımlamaktadır,  $\sigma$  ise Cauchy gerilme tensörüdür,  $Y$  malzemelerin başlangıçtaki akma dayanımıdır. Kinematik sertleşme için tanımlanan sonraki denklem ise şu şekildedir (Kılıç, 2009).

$$f_0 = \varphi(\sigma - \alpha) - Y = 0 \quad (1.17)$$

$\alpha$  ters gerilme dayanımı olarak ifade edilmektedir,  $F$  ile tanımlanan sınır yüzeyinde  $\beta$  sınır yüzeyi merkezini tanımlamaktadır (Kılıç, 2009).

$$F = \varphi(\sigma - \beta) - (B + R) = 0 \quad (1.18)$$

$B$  ve  $R$  ile ifade edilen sınır yüzeyinin başlangıç boyutu ve izotropik sertleşme bileşenidir.  $B+R$  ise sınır yüzeyinin boyutunu göstermektedir. Akma yüzeyindeki kinematik harekete bağlı olarak sınır yüzeyi denklem (1.18) ile tanımlanmıştır (Kılıç, 2009).

$$\alpha_* = \alpha - \beta \quad (1.19)$$

$\alpha$  ile  $\beta$  şu şekilde açıklanmaktadır.

$$\alpha = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{22} \\ a_{12} \end{pmatrix}; \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{12} \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

$$\dot{\alpha}_* = C \left[ \left( \frac{\alpha}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{a}{\alpha_*}} \alpha_* \right] \dot{\epsilon} \quad (1.21)$$

$\bar{\alpha}_*$  ile tanımlanmak istenen, akma yüzeyindeki kinematik hareketin eşleniğidir. Diğer bir ifade ile  $\bar{\alpha}_* = \varphi(\alpha_*)$  olarak tanımlanmaktadır. Denklemde geçen  $a$  ise şu şekilde ifade edilmiştir (Kılıç, 2009).

$$a = B + R - Y \quad (1.22)$$

Bu denklemde  $Y$  ile ifade edilmek istenen akma yüzeyinin sınırlandırmasıdır. Diğer bir eşitlikte ise gerinim miktarı verilmiştir (Kılıç, 2009).

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p} \quad (1.23)$$

Geçici sınır yüzeyi tahmini şu şekilde yapılmaktadır:

$$\dot{R} = k(R_{sat} - R)\dot{\bar{\epsilon}} \quad (1.24)$$

$$\dot{\beta}_* = m \left[ \left( \frac{b}{B+R} \right) (\sigma - \beta) - \beta \right] \dot{\bar{\epsilon}} \quad (1.25)$$

Akma yüzeyi elastisite modülü şu şekilde tanımlanmıştır:

$$E = E_0 - (E_0 - E_A)(1 - \exp(-\xi \bar{\epsilon})) \quad (1.26)$$

$E_0$  Başlangıç elastisite modülüdür.  $E_A$  Plastik deformasyon sonrasında oluşan en düşük değerdir.  $\xi$  Elastisite modülünün artış oranı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca bu oran deformasyonla  $\bar{\epsilon}$  ile birlikte tanımlanmıştır. Yoshida Uemori modellemesi ile 9 farklı parametre tanımlanmaktadır ( $Y, B, C, R_{sat}, k, b, m, E_A, \xi$ ) (Kılıç, 2009).

## 1.6 Tezin Amacı

Otomotiv endüstrisinde oldukça sıklıkla kullanılan geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin U ve V kalıplar ile şekillendirme sonrası oluşan boyutsal bozulmanın yani geri esneme davranışının, bilgisayar ortamında belirlenmesi hedeflenmektedir. Böylelikle kalıp imalat sürecinde kalıp revizyonları için harcanan sürelerin azaltılması sağlanmış olacaktır. Diğer bir yandan ise gereksiz maliyetlerin önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Yüksek mukavemetli çeliklerin gerçek pres ortamında şekillendirilmesi esnasında çekme ve bükme tarzı deformasyonlar sıralı olarak meydana gelebilmektedir. Bu anlamda parçaların pekleşme özelliği ile farklı karakterlerde gerilme değerlerinin oluşması aşikar olmaktadır. Bu değerlerin de doğru olarak tahmin edilmesi ile simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara yaklaştırılabilmekte sonraki kalıp revizyon

işlemlerini azaltabilmektedir. Deneysel olarak malzeme parametreleri belirlenmiş DP 600 ve DP 1000 çift fazlı yüksek mukavemetli çelikleri için V kalıp ve U kalıplarda şekillendirilerek geri esneme oranları belirlenecektir. Belirlenen bu geri esneme oranları yapılacak simülasyonlar ile karşılaştırılacaktır. DynaForm programı yardımı ile yapılacak simülasyon için üç farklı malzeme modeli kullanılacaktır. Bunlar; Yoshida-Uemori, Chaboche ve Frederick ile Armstrong'un literatürdeki malzeme modelleridir. Yapılacak simülasyonların sonuçları deneysel olarak yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmasının yanı sıra, DP 600 ve DP 1000 yüksek mukavemetli çeliklerde geri esnemesini en iyi tahmin eden malzeme modeli de belirlenmiş olacaktır.



## BÖLÜM II

### DENEY ÇALIŞMALARI

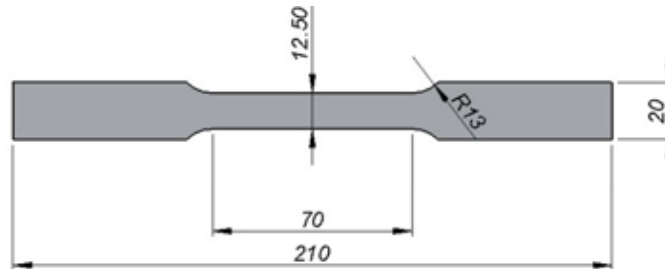
#### 2.1 Deneysel Yöntemler

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için ampirik çalışmalar yapılmaktadır. Bunların başında çekme deneyi, basma deneyi ve bükme deneyi gibi daha çok sac malzemelere uygulanan yöntemler aklı gelmektedir. Bu yöntemler sayesinde malzemelerin sıcaklık, hız ve zamana göre verdiği tepkiler tespit edilebilmektedir. Çalışma kapsamında yapılan deney yöntemlerinden bu bölümde bahsedilecektir.

##### 2.1.1 Anizotropi ve çekme deneyi

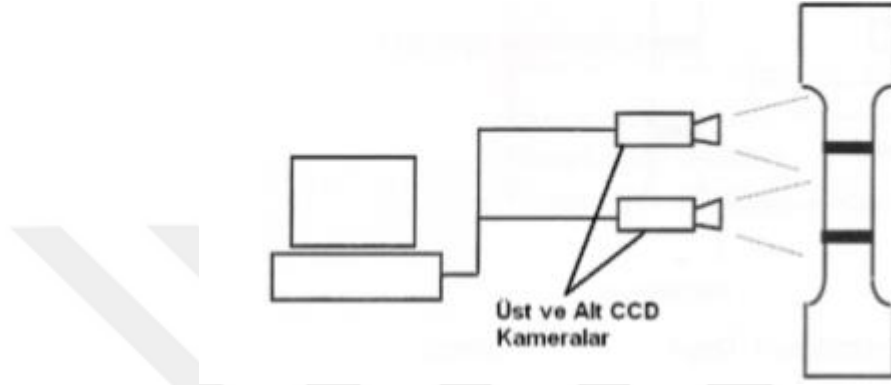
Çekme deneyi malzemelerin mekanik özelliklerini özellikle aksel yükler altında belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Aksel olarak uygulanan kuvvet sonucu ortaya gerilim ve gerinim eğrisi ortaya çıkmaktadır. Gerilim ve gerinim eğrisi sayesinde uzama, pekleşme, akma dayanımı, çekme dayanımı, elastisite, rezilyans, tokluk ve mukavemet katsayıları gibi malzemenin mekanik davranışı hakkında bilgi veren özellikleri belirlenmektedir (Korkmaz, 2018).

ASTM E8 standartlarında belirtilen ölçü ve özelliklerdeki malzeme numuneleri kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de ASTM E8 standartlarına uygun malzeme ölçüleri gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** ASTM E8 standartlarına uygun numune ölçüleri (Kim ve Thomas, 1981)

Bu numuneler aksel yük uygulayabilen iki adet çeneye bağlanılarak aksel yüke maruz bırakılmaktadır. Malzeme kopana kadar uygulanan yük sonucu gerinim – gerilim grafiği elde edilmektedir. Yapılan çekme deneyi esnasında hız kontrolü veya deney koşulları istenen sıcaklıklarda belirlenebilir. Malzemedeki uzama miktarı ise ekstensiyonmetre aracılığı ile numunelerin üzerinde belirlenen çizgilerin hareketine göre takip edilebilmektedir. Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Ekstensiyonmetre ile uzama miktarının ölçülmesi sistemi (Korkmaz, 2018)

Yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen datalar gerilim – birim deformasyon formülleri yardımı ile hesaplanmaktadır. Mühendislik gerilmesi  $\sigma$  denklem (2.1)’de gösterilmiştir.  $F$  Numune kesitine uygulanan dik kuvveti göstermektedir.  $A_0$  Numunenin ilk kesit alanı ( $mm^2$ ) olarak gösterilmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Mühendislik uzama miktarı  $\varepsilon_m$  ise denklem (2.2 ) ile gösterilmiştir. Bu denklemde ise  $l_0$  numunenin ilk boyu ve  $l_i$  kuvvet uygulandıktan sonraki boyu olarak ifade edilmektedir.

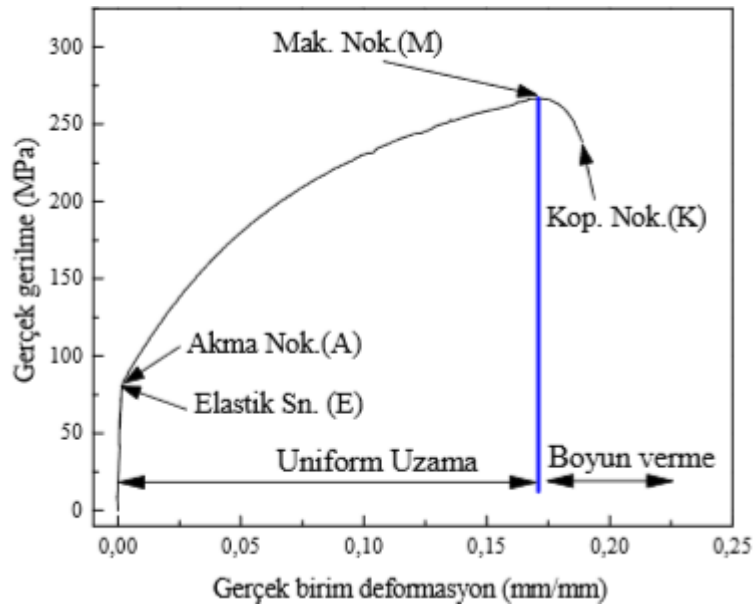
$$\varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (2.2)$$

Bu denklemlerden yararlanılarak gerçek gerilme Denklemi 2.3’de ve gerinim Denklemi 2.4’de şu şekilde verilmiştir;

$$\sigma_g = \sigma_m (1 + \varepsilon_m) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (2.4)$$

Burada  $\sigma_g$  gerçek gerinimi göstermektedir.  $\varepsilon_g$  ise gerçek uzama miktarını göstermektedir. Şekil 2.3’de gerçek gerinme ve gerçek birim deformasyon grafiği gösterilmiştir. Elde edilen bu grafik ile; Maksimum Nokta (M), Akma Noktası (A), Elastikiyet Sınırı (E), Kopma Noktası (K), Üniform Uzama Bölgesi ve Boyun Verme Bölgeleri tasvir edilmiştir (Kılıç, 2009).



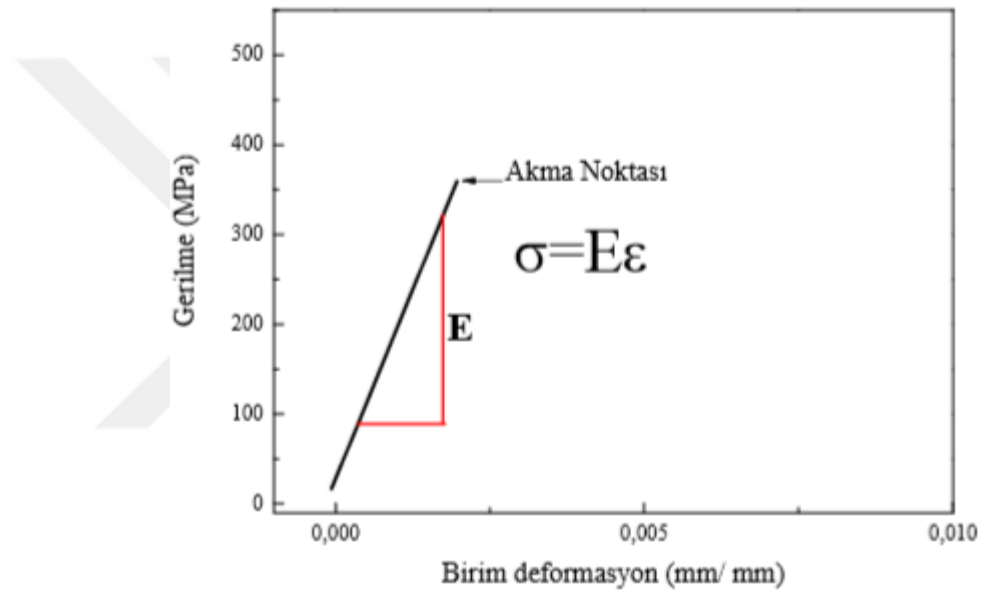
Şekil 2.3. Gerilim-gerinim grafiği (Kılıç, 2009)

Grafikte gösterildiği gibi maksimum noktaya kadar numunede üniform bir uzama gerçekleşirken, maksimum noktadan sonra numunede uzama kuvvet azalmasına karşın artarak ilerlemektedir. Bu bölgede numune boyun vererek moleküler boyutta bağlarını koparmaktadır. Diğer bir yandan malzeme maksimum kuvvet öncesinde üniform uzarken iki farklı bölgeye ayrılmaktadır, bunlar elastik ve plastik bölgelerdir. Elastikiyet sınırına kadar gerçekleşen deformasyonda malzeme arası bağlar kopmadığı için malzeme üzerine etki eden kuvvet kaldırılmasına karşın herhangi bir deformasyon oluşmayacak ve numune başlangıç ölçülerini koruyacaktır. Plastik bölgeye geçilmesinden sonra malzeme deformasyona uğramaya başlar ve maksimum noktaya kadar üniform bir uzama göstermektedir. Her iki bölge için gerilme dayanımı hesabı

farklı yapılmaktadır. Elastik bölgede Hook kanunu olarak bilinen Denklem (2.5)'de gösterilen bağıntı kullanılır.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.5)$$

Bu bağıntıda verilen  $E$  Elastisite modülü olarak isimlendirilir ve malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetini ve rijitliğini belirlememizi sağlar. Şekil 2.4'de elastisite modülü açıklanmıştır. Gerilim gerinim grafiğinde elastik bölgede kalan doğrunun eğimi bizim için elastisite modülünü vermektedir.



Şekil 2.4. Elastisite modülünün grafik üzerinde gösterimi (Kılıç, 2009)

Hollaman bağlantısı ile plastik bölgedeki mukavemet ve pekleşme üstelini bulmamızı sağlamaktadır. Hollaman bağlantısı denklem (2.6) ile açıklanmıştır bu denklemde  $n$  ile gösterilen pekleşme üstelidir.  $K$  ile gösterilen ise mukavemeti temsil etmektedir.

$$\sigma_g = K\varepsilon^n \quad (2.6)$$

Çift fazlı çelikler ile yapılan çekme deneyleri sonucu elde edilen bulgular Kim ve Thomas tarafından düzenlenmiş ve şu sonuçlara değinmişlerdir, ferrit ve martenzitin özelliklerinin ve morfolojisinin çekme dayanımını etkilediği ayrıca martenzit hacimsel

oranının ve martenzitin içerisindeki karbon miktarının da çekme deney sonuçlarını etkilediğini gözlemlemişlerdir (Gülmez, 2011).

Farklı hadde yönlerinde kesilen numuneler ile yapılan deneysel çalışmalar aynı zamanda anizotropinin de etkisini göstermektedir. Metal üretici firma tarafından belirtilmiş hadde yönü doğrultusunda, üç farklı açı ile anizotropinin etkisi de incelenmiştir.  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$  olmak üzere üç farklı şekilde ifade edilecektir.  $R_0$ , üretici firmanın belirttiği yönde çekilmiş sacın hadde yönüdür ve hadde yönüne paralel kesildiği için numuneden paralel kesilmiş numune olarak da bahsedilecektir.  $R_{45}$ , hadde yönü ile 45 derece açı yapacak şekilde kesilen numune için diyagonal kesim denmektedir. Hadde yönü ile tam dik kesişen ve 90 derece açı ile kesilen numune ise transvers numune olarak isimlendirilmektedir.

### **2.1.2 Çekme – basma deneyi (cyclic)**

Çevrimsel olarak belirli oranlardaki çekme kuvvetini numuneye uygulayıp, ardından basma kuvveti uygulanması işleminin, çevrimsel bir süreç içerisinde, defalarca tekrarlanarak uygulanması olayıdır. Cyclic deneyi çekme deneyinde olduğu gibi SHIMADZU-Autograph 100 kN makinasında gerçekleştirilmiştir.



**Fotoğraf 2.1.** Basma-çekme deney aparatı

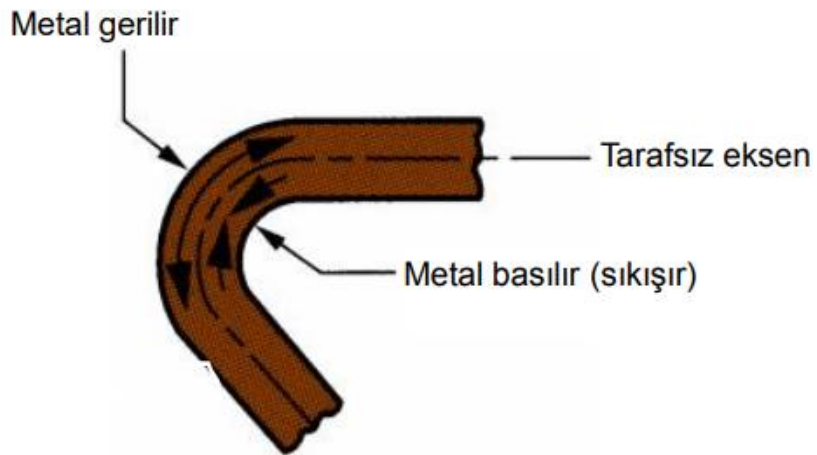
Çekme numunelerinin sabitlenebilmesi ve basma işlemi sırasında eksenden kaçmaması için Fotoğraf 2.1’de gösterilen sandviç plaka kullanılmıştır. Fleksiglas malzemedен tasarlanmıştır. Plakanın şeffaf olması sayesinde ekstensometrenin ölçüm aralıklarını (gauge marks) takip etmesi sağlanmıştır. Fotoğraf 2.2’de gösterildiği gibi bağlantısı yapılmış ve çekme-basma deneyleri gerçekleştirilmiştir.



**Fotoğraf 2.2.** Çekme-basma deneyi yardımcı aparat bağlantısı

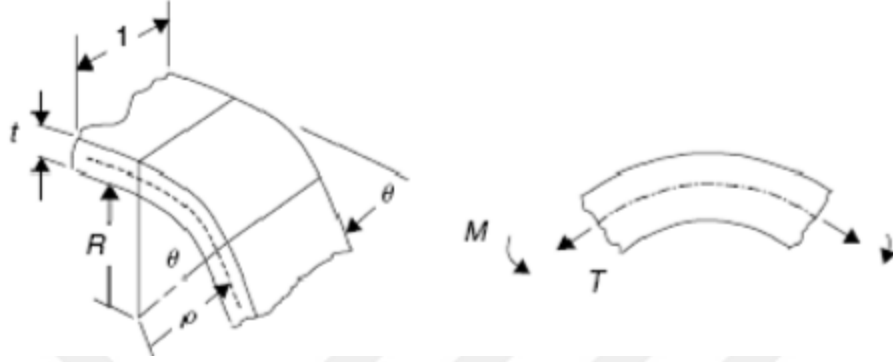
### 2.1.3 U ve V bükme deneyi

Sac metal şekillendirme usullerinden diğeri ise bükme işlemidir. Metallerin kalıcı şekil verilebilmesi için plastik bölgeye kadar kuvvet uygulanarak şekillendirilmesi işlemine bükme denir. Yapılan şekillendirme işlemi sırasında iç bükey noktalarda, basma kuvveti oluşurken, dış bükey noktalarda çekme kuvveti oluşturmaktadır. Her iki deformasyonun oluştuğu sınır bölgeye ise nötr eksen denmektedir. Şekil 2.5 ile bölgeler tarif edilmiştir.



**Şekil 2.5.** Bükme prosesi esnasında oluşan gerilmeler (Cerit, 1976)

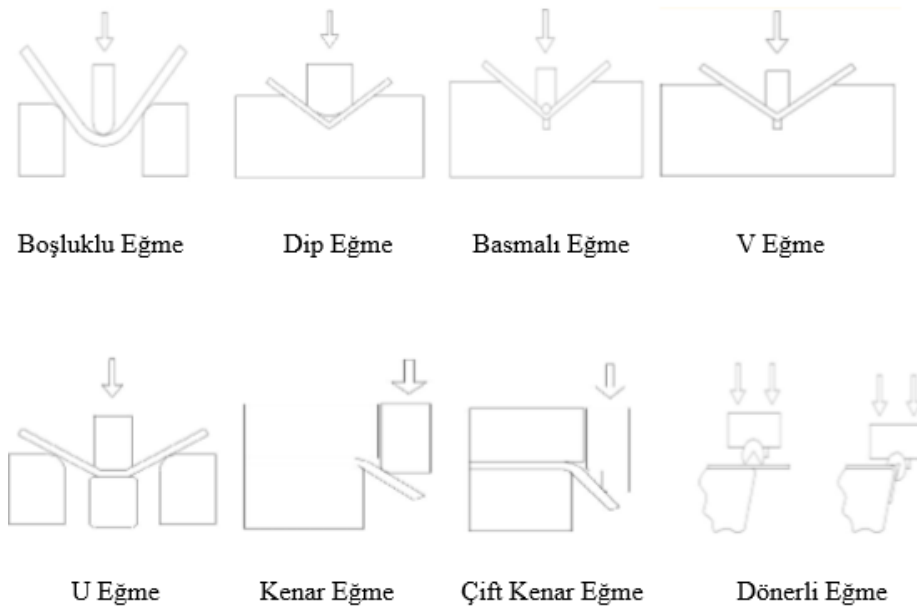
Şekil 2.6'da bükme işlemi için bazı notasyonlar verilmiştir, denklem (2.7)'de bu notasyonlar ile birim şekil değiştirme miktarı hesaplanmasını açıklamaktadır. Denklemde ifade edilen  $R$  eğilme yarı çapını gösterirken,  $t$  et kalınlığını,  $\theta$  eğilme açısını ve  $l$  parça genişliğini göstermektedir.



Şekil 2.6. Bükme işlemi gösterimi (Marciniak vd., 2002)

$$e_{dış} = -e_{iç} = \frac{1}{\left(\frac{2R}{t}\right)+1} \quad (2.7)$$

Bükme işlemi kalıplar ve prosesin şekiline göre farklı gruplara ayrılmaktadır, bunlardan bazıları Şekil 2.7'de gösterilmektedir. V Bükme, Basmalı Bükme, Dip Bükme, Boşluklu Bükme, U Bükme, Kenar Bükme, Çift Kenar Bükme, Dönerli Bükme.



Şekil 2.7. Bükme şekilleri gösterimi (Satorres, 2005)

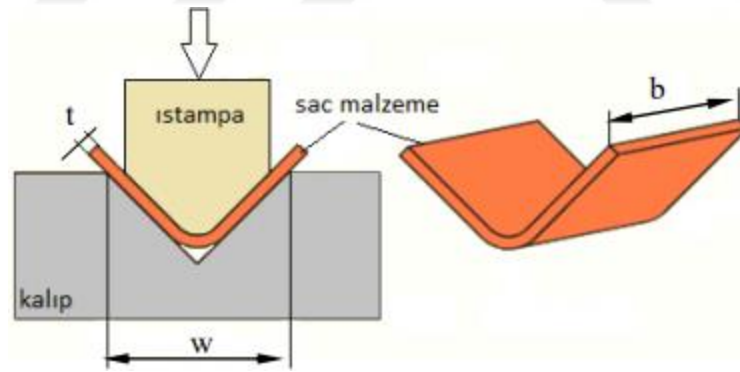
Bükme kuvveti için birçok farklı kaynakta farklı hesaplamalara rastlansa da çıkan sonuçlar birbirine yakın olmaktadır. Bu çalışmada eşitlik denklem (2.8)'deki gibi verilmiştir (Kılıç vd., 2009).

$$P_v = C \times \frac{b \times t^2 \times \sigma_c}{w} \times 10 \quad (2.8)$$

C ifadesi katsayı olup w/t oranına bağlı olarak değişmektedir. Denklem (2.9) ile bulunur.

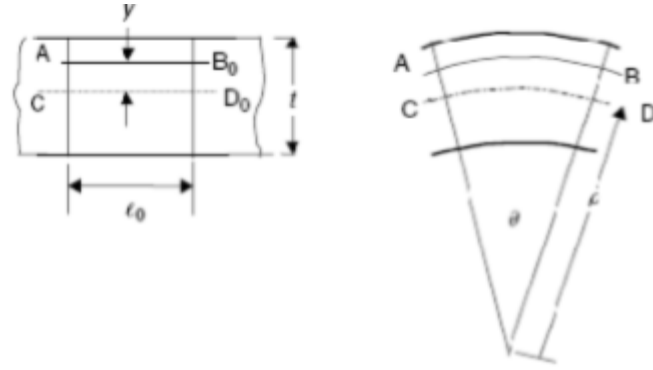
$$C = 1 + \frac{4 \times t}{w} \quad (2.9)$$

Denklem (2.8)'de,  $P_v$  Newton cinsinden eğme kuvvetini göstermektedir.  $b$ , şekillendirilecek malzemenin genişliğini (mm) ve  $t$  malzemenin et kalınlığını (mm) göstermektedir.  $\sigma_c$ , Newton cinsinden çekme kuvveti miktarını ifade etmektedir ( $N/mm^2$ ).  $w$  ise malzemenin oturduğu dişi kalıbın ağız genişliğini ifade etmektedir (mm). Şekil 2.8'de açıklanan ifadelerin gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.8. V bükme kalıbı ifade gösterimi (Marciniak, 2002)

Bükme kalıplarında malzemeye şekil verebilmek için uygulanan kuvvetin büyüklüğü, elastik bölge sınırını aşacak büyüklükte malzemeye uygulanması gerekmektedir. Uygulanan kuvvetin elastik bölgede kalması durumunda malzeme şekillendirilemeyecektir. Uygulanan kuvvetin plastik deformasyon bölgesini aşması durumunda malzemede istenmeyen deformasyonlar gözlemlenecektir. Malzemenin şekillendirilme kabiliyetini şu parametreler etkileyecektir; bükme açısı, bükme kuvveti, bükülme yarıçapı ve et kalınlığı etkileyecektir.



**Şekil 2.9.** Bükme esnasında, AB yayında gerçekleşen deformasyon (Marciniak, 2002).

Şekil 2.9 ile gösterilen AB yayının bükme sonrası deformasyonu şematik olarak gösterilmiştir. Denklem (2.10) ile (2.11)'de uzunluk değişim ilişkisi verilmektedir.

$$l_s = \rho\theta \quad (2.10)$$

$$l = \theta(\rho + \gamma) = \rho\theta\left(1 + \frac{\gamma}{\rho}\right) = l_s\left(1 + \frac{\gamma}{\rho}\right) \quad (2.11)$$

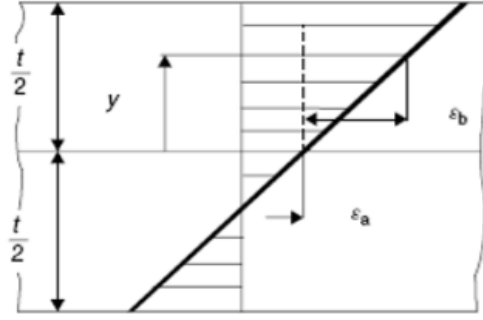
$\theta$ , bükme açısı,  $\rho$  ise nötr eksenin yarıçapıdır. AB yayının nötr eksene uzaklığı ise  $\gamma$  ile ifade edilmektedir.

Denklem (2.12) ve (2.13) şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_s}{l_0} + \ln\left(1 + \frac{\gamma}{\rho}\right) = \varepsilon_a + \varepsilon_b \quad (2.12)$$

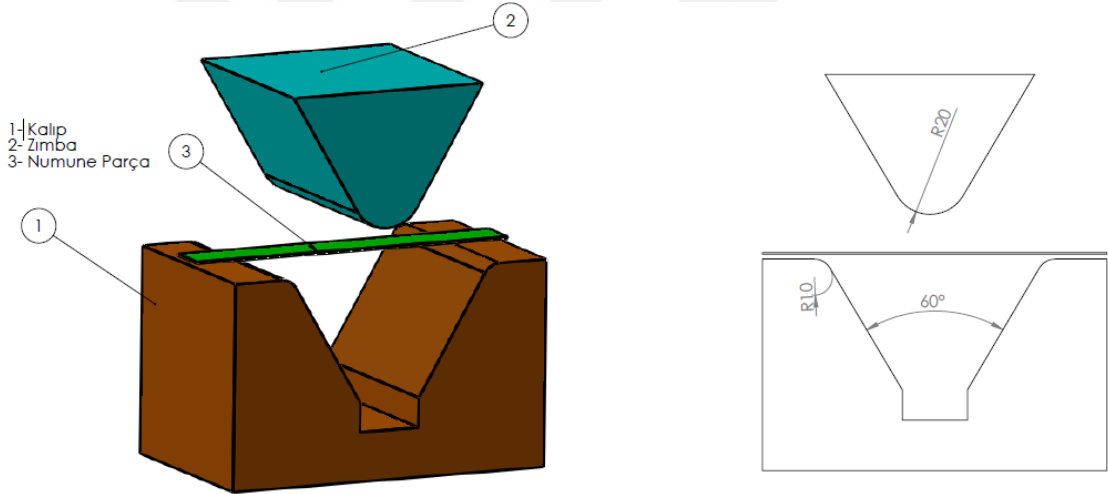
$$\varepsilon_b = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\gamma}{\rho} \quad (2.13)$$

Şekil 2.10 ile sac üzerinde meydana gelen plastik ve elastik deformasyon bölgelerinin dağılımı gösterilmektedir.



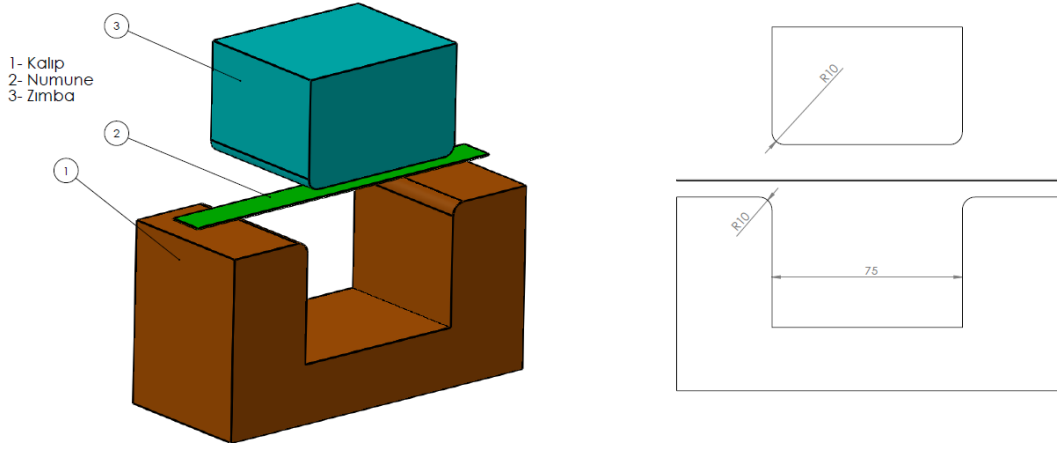
**Şekil 2.10.** Bükme esnasında gerçekleşen deformasyon dağılımı (Garcia-Romeu vd., 2007)

Yapılan çalışma kapsamında kullanılan V kalıp ve ölçüleri Şekil 2.11’de gösterilmiştir. 60° açı ile şekillendirilmek istenen numune için tasarlanmıştır. Yapılan şekillendirme işlemi sonrasında numune tekrar ölçülerek geri esneme miktarları deneysel olarak tespit edilecektir.



**Şekil 2.11.** V kalıp ölçüleri

Sac metal şekillendirme kalıpları içerisinde sıklıkla kullanılan diğer bir kalıp ise U şeklindeki kalıplardır. Yapılan çalışma kapsamında 80 kN yük ile U kalıplarda şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda numunelerin ampirik olarak şekillendirme sonrası oluşan geri esneme miktarları belirlenmiştir. Şekil 2.12’de U kalıp ölçüleri gösterilmektedir.



Şekil 2.12. U kalıp ve ölçüleri

## 2.2 Deney Koşulları ve Kullanılan Ekipmanlar

Yapılan bu çalışma kapsamında çift fazlı yüksek mukavemetli çelikler grubundan DP 600 ve DP 1000 çekme numuneleri kullanılmıştır. Bu numuneler ASTM E8 standartlarına uygun olarak kesilmiş 1 mm kalınlığı vardır.

Deneyler Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Metal Şekillendirme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Shimadzu Autograph 100 kN çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 2.3'de gösterilmektedir. Çekme numunelerinin üzerine çizilen çizgiler ve ekstensiyometre yardımıyla uzama miktarları %0,1 hassasiyet ile belirlenmiştir. Mekanik mesafe ölçüm yöntemlerine göre hassasiyeti daha yüksek ölçümler yapılabilmektedir.



**Fotoğraf 2.3.** Shimadzu Autograph 100 kN çekme deney cihazı

1,25 milisaniye aralıklarla veri işleme kapasitesine sahip deney cihazı aldığı bilgileri üç farklı sütunda tanımlamaktadır. Kuvveti N cinsinde, çeneler arasındaki mesafeleri mm cinsinden ve uzamayı da mm cinsinden belirlemekte ve .txt dosyası olarak çıkış alınmaktadır.

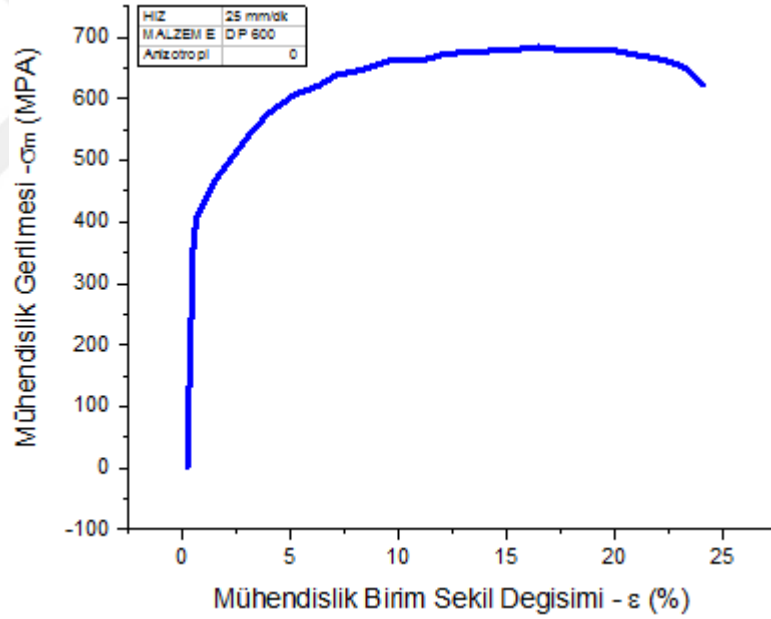
## BÖLÜM III

### DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde yapılan deney çalışmalarının sonuçları paylaşılacaktır. Çekme deneyi için DP 600 ve DP 1000 malzemelerin gerilim-gerinim grafik değerleri verilmiştir. Sonuç olarak elde edilen malzemelerin mekanik özellikleri modelleme esnasında kullanılacaktır.

#### 3.1 Çekme Deneyi Sonuçları

DP 600 malzeme için yapılan çekme deneyi sonucunda hesaplanmış mühendislik gerilim-gerinim eğrisi, Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. DP 600 mühendislik gerinim-gerilim grafiği

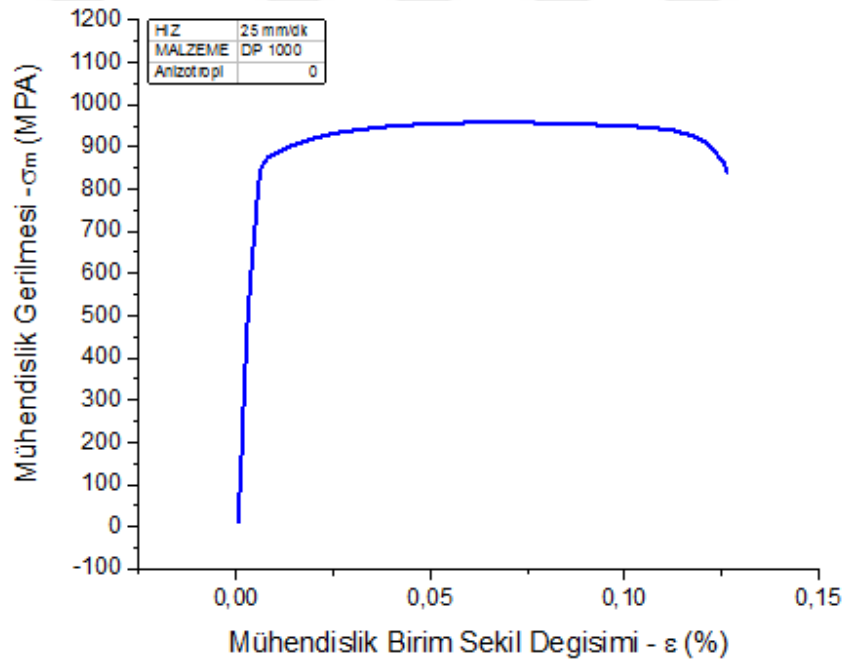
DP 600 malzeme için belirlenen malzemenin mekanik özellikleri çizelge 3.1’de gösterilmiştir. “ $\sigma_{akma}$ ” ile verilen değer malzemenin elastik bölgeden plastik bölgeye geçtiği diğer bir değişle, malzemede kalıcı değişimlerin başladığı akma bölgesi başlangıcını göstermektedir. “ $K$ ” ve “ $n$ ” daha önce bahsettiğimiz gibi Hollaman denklemi ile açıklanmıştır.  $K$ , mukavemet katsayısı ve  $n$ , ise pekleşme üstelidir.

$\sigma_{UTS}$ , ile çekme numunesine maksimum yüklenen kuvveti gösterilmektedir.  $\varepsilon_{max}$ , ile maksimum uzama miktarı gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** DP 600 belirlenen, malzeme mekanik özellikleri

DP 600 Malzeme Mekanik Özellikleri				
$\sigma_{akma}$	$K$	$n$	$\sigma_{UTS}$	$\varepsilon_{max}$
409,2025	270,87	0,0533	684,0374	0,2407

DP 1000 malzeme için yapılan çekme deneyi sonucunda hesaplanmış mühendislik gerilim gerinim eğrisi grafik 3.2’de gösterilmiştir. Gösterilen grafik plastik deformasyon bölgesi için verilmiştir.



**Şekil 3.2.** DP 1000 mühendislik gerinim-gerilim grafiği

DP 600 malzeme için anizotropi etkisi incelenmiştir. Üç farklı yönde yapılan deneyler sonucunda, Çizelge 3.2’deki değerler elde edilmiştir.

**Çizelge 3.2.** DP 600 mekanik özellikleri

Hadde Yönü	$\sigma_{akma}$	$\sigma_{UTS}$	$\varepsilon_{max}$
0	409,2025	684,0374	0,2407
45	408,0523	680,4575	0,2235
90	400,378	678,2695	0,2165

Farklı hadde yönlerindeki numune ile yapılmış çekme deneyleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekillendirilebilme kabiliyetleri açısından birbirine yakın davranışlar sergilenmiştir. Hadde yönüne paralel olan numunelerin uzama miktarının yüksek olduğu gözlemlenirken, hadde yönüne dik olan transvers numunelerin daha az uzadıkları gözlemlenmiştir. Diğer bir yandan ise paralel numuneler elastik bölgede daha fazla kalırken transvers numuneler elastik bölgede daha az kalmaktadır. En yüksek çekme dayanımı ise paralel numunelerde ölçülmüştür. Diyagonal numuneler ile yapılan deneme sonuçları paralel ve transvers numunelerin sonuçlarının arasında değerler vermiştir.

DP 1000 malzeme için belirlenen malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir. " $\sigma_{akma}$ " ile verilen değer malzemenin elastik bölgeden plastik bölgeye geçtiği diğer bir değişle, malzemede kalıcı değişimlerin başladığı akma bölgesi başlangıcını göstermektedir. " $K$ " ve " $n$ " daha önce bahsettiğimiz gibi Hollaman denklemi ile açıklanmıştır.  $K$ , mukavemet katsayısı ve  $n$ , ise pekleşme üstelidir.  $\sigma_{UTS}$ , ile çekme numunesine maksimum yüklenen kuvveti gösterilmektedir.  $\epsilon_{max}$ , ile maksimum uzama miktarı gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3.** DP 1000 belirlenen, malzeme mekanik özellikleri

DP 1000 Malzeme Mekanik Özellikleri				
$\sigma_{akma}$	$K$	$n$	$\sigma_{UTS}$	$\epsilon_{max}$
795,5902	901,84	0,2061	958,0108	0,12636

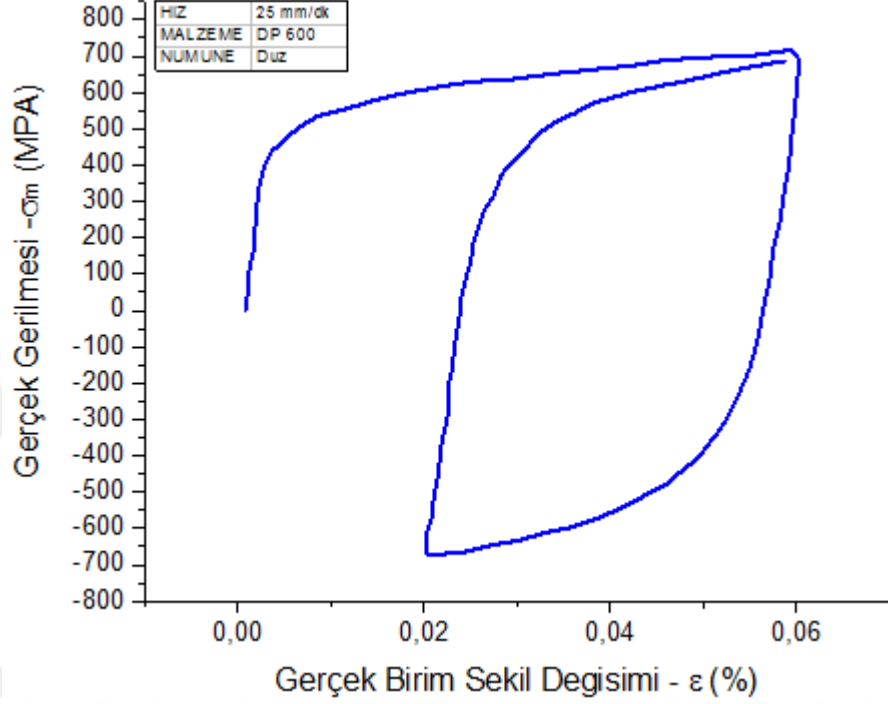
**Çizelge 3.4.** DP 1000 mekanik özellikleri

Hadde Yönü	$\sigma_{akma}$	$\sigma_{UTS}$	$\epsilon_{uni}$
0	737,5923	1052,1645	0,1031
45	709,9612	1006,3289	0,0827
90	742,9256	1061,2678	0,0830

DP 1000 malzeme numuneleri ile yapılan anizotropi deneyi sonuçları Çizelge 3.4'de verilmiştir. Bu çalışma sonucunda malzeme şekillendirme davranışları birbirine yakınlık göstermektedir. En düşük akma değerleri diyagonal kesim malzemede çıkarken en yüksek akma dayanımı transvers numunede gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, yapılacak modelleme çalışmaları paralel numuneler ile yapılacaktır.

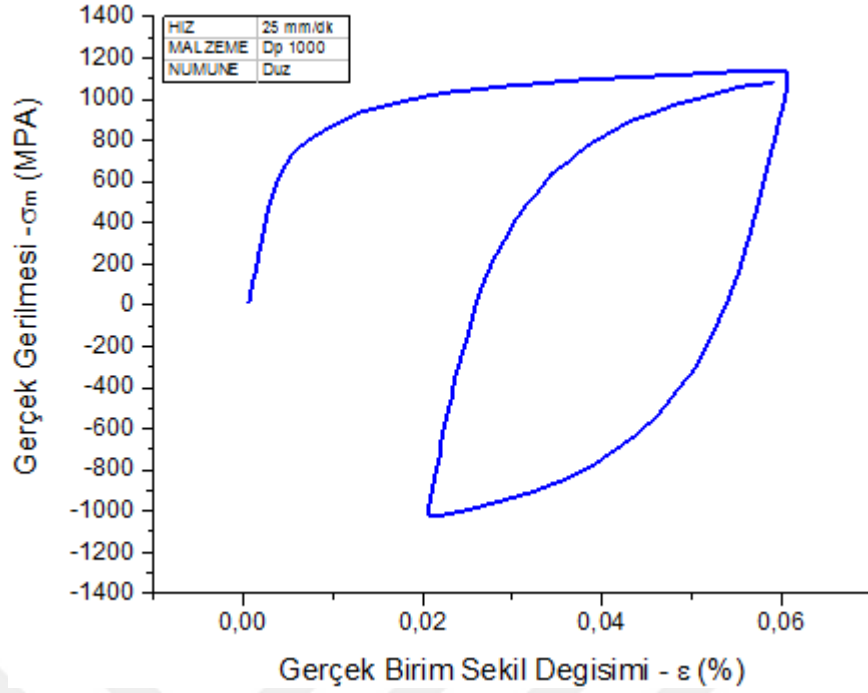
### 3.2 Cyclic Deney Sonuçları

Yapılan çevrimsel basma ve çekme deneyi sonucunda elde edilen gerçek gerilim-gerinim grafiği DP 600 malzeme için Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. DP 600 malzeme için çevrimsel basma-çekme grafiği

DP 600 malzeme için yapılan çevrimsel basma-çekme deneyi sonucunda malzeme kontrollü olarak yaklaşık maksimum 716 MPa kuvvetle plastik deformasyon bölgesi içerisinde çekiliyor ve tam tersi yönde 670 MPa kuvvet ile basma işlemi uygulanıyor. Yapılan çevrimsel basma ve çekme deneyi sonucunda elde edilen gerçek gerilim-gerinim grafiği DP 1000 malzeme için Şekil 3.4’de verilmiştir.



**Şekil 3.4.** DP 1000 malzeme için çevrimsel basma-çekme grafiği

DP 1000 Malzeme için yapılan çevrimsel basma-çekme deneyi esnasında 1137 MPa kuvvet ile çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. 1022 MPa kuvvetle basma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonucunda elde edilen malzeme parametreleri modelleme esnasındaki hesaplamalarda kullanılacaktır.

### 3.3 U ve V Bükme Deney Sonuçları

Daha öncede kalıp ölçülerini paylaşmış olduğumuz U kalıp ve V kalıp bükme işlemleri için yapılan deneyde 80 kN yük altında malzemelerin uğradığı geri esneme miktarı gösterilmiştir. DP 600 malzeme için 25 mm/dk hızda yapılmış ve 1 mm kalınlıkta kullanılan numuneler ile şekillendirilebilme kabiliyetleri ve geri esneme miktarları belirlenmiş sonuçlar Çizelge 3.5'de ve Çizelge 3.6'da gösterilmiştir. Yapılan deneme çalışmaları sonucunda malzeme kalınlığının artması ile geri esneme miktarının da azaldığı gözlenmektedir.

**Çizelge 3.5.** DP 600 malzeme için geri esneme miktarlarının deneysel sonuçları

Hız (mm/dk)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Geri Esneme ( $\Theta$ )
25	1.3	25	13,38

**Çizelge 3.6.** DP 1000 malzeme için geri esneme miktarlarının deneysel sonuçları

Hız (mm/dk)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Geri Esneme ( $\Theta$ )
25	1.0	25	15,6

Yapılan deney sonucunda elde edilen malzeme özellikleri ve geri esneme değerleri yapılacak modelleme çalışmalarında kullanılacaktır.

## BÖLÜM IV

### MODEL PARAMETRELERİ VE ANALİZ SONUÇLARI

#### 4.1 Pekleşme Model Parametrelerinin Belirlenmesi

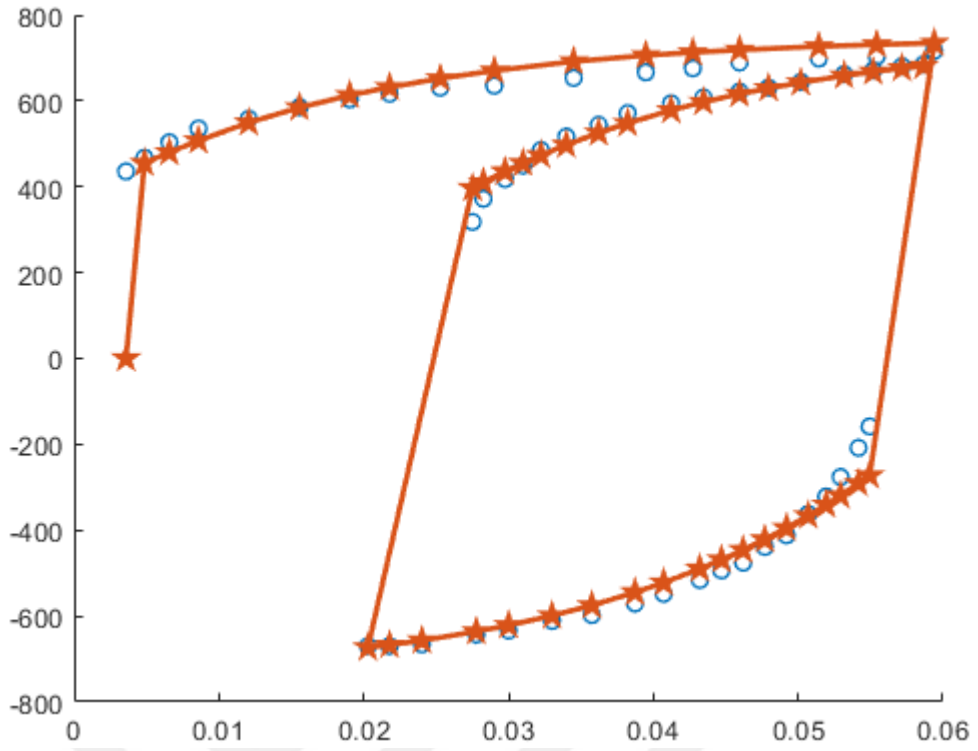
DP 600 ve DP 1000 malzemeleri için yapmış olduğumuz çalışmada, parametrelerin belirlenme aşamaları bu bölümde anlatılacaktır. Parametreler Yoshida-Uemori, Frederick-Armstrong ve Chaboche modellerinde kullanılmıştır. Deneysel olarak elde ettiğimiz verilerimizi kullanarak model parametreleri belirlenmiştir. Birçok matematiksel işlemin çözümlenmesinde kullanılan MATLAB programı yardımıyla hesaplamalar yaptırılmıştır. Her bir model için yazılan matematiksel ifadelerin döngüsel olarak MATLAB programında çalıştırılması sonucunda her bir model için ayrı sonuçlar elde edilmiştir.

DP 600 Malzeme için belirlenen model parametreleri Çizelge 4.1'de Frederick-Armstrong, Çizelge 4.2'de Chaboche ve Çizelge 4.3'de Yoshida-Uemori olacak şekilde gösterilmiştir.

Parametreleri belirlenen DP 600 malzeme için elde edilmiş grafikler; Frederick-Armstrong için Şekil 4.1 'de, Chaboche için Şekil 4.2'de ve Yoshida-Uemori için Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1.** DP 600 malzeme için Frederick-Armstrong model parametreleri

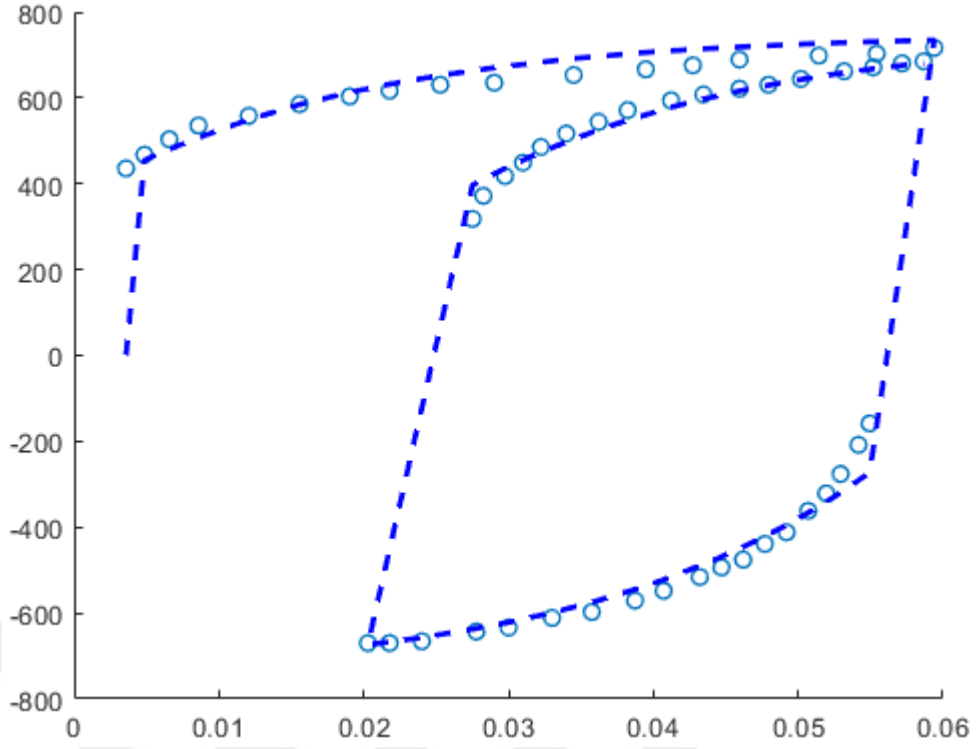
DP 600 Frederick-Armstrong Model Parametreleri	
c	$1,5736 \times 10^4$
$\gamma$	50,2002



**Şekil 4.1.** DP 600 malzeme için MATLAB üzerinden, Frederick-Armstrong için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi

**Çizelge 4.2.** DP 600 malzeme için Chaboche model parametreleri

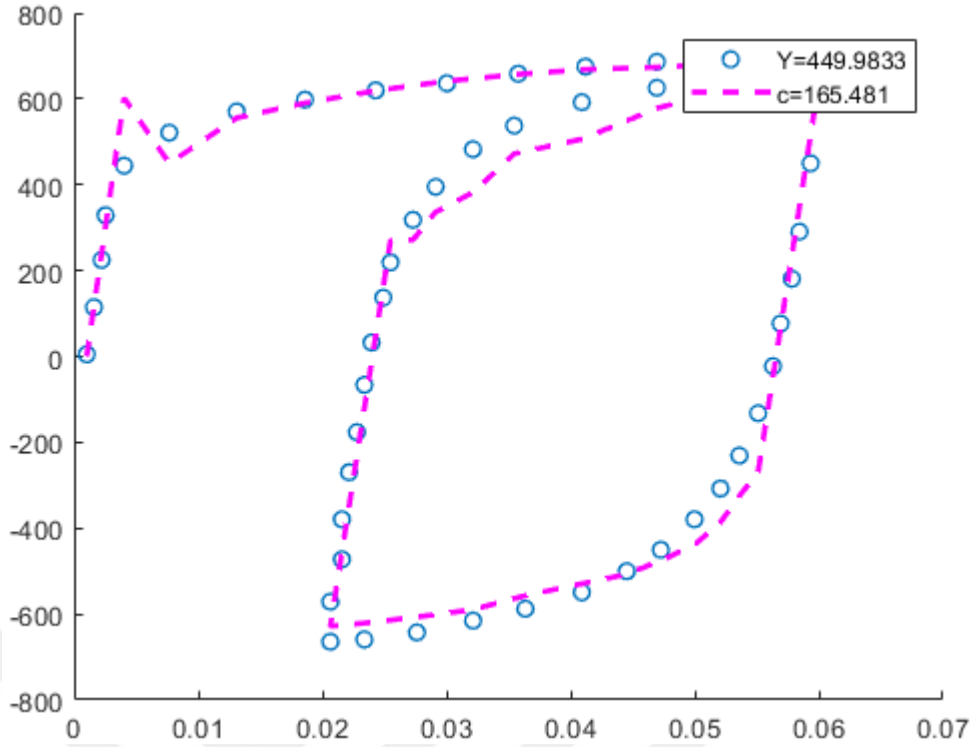
DP 600 Chaboche Model Parametreleri					
$c_1$	$\gamma_1$	$c_2$	$\gamma_2$	$c_3$	$\gamma_3$
$5,2545 \times 10^3$	50,2002	$5,2269 \times 10^3$	50,2002	$5,2545 \times 10^3$	50,2002



**Şekil 4.2.** DP 600 malzeme için MATLAB üzerinden, Chaboche için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi

**Çizelge 4.3.** DP 600 malzeme için Yoshida-Uemori model parametreleri

DP 600 Yoshida-Uemori Model Parametreleri					
$y$	$c$	$B$	$R_{sat}$	$b$	$K$
405,8878	188,3418	529,8286	899,9967	39,9975	28,0965
$E_a$	$\xi$	$c_1$	$c_2$	$h$	
$2,055 \times 10^5$	17,7807	3,4834	0,8503	0,2	



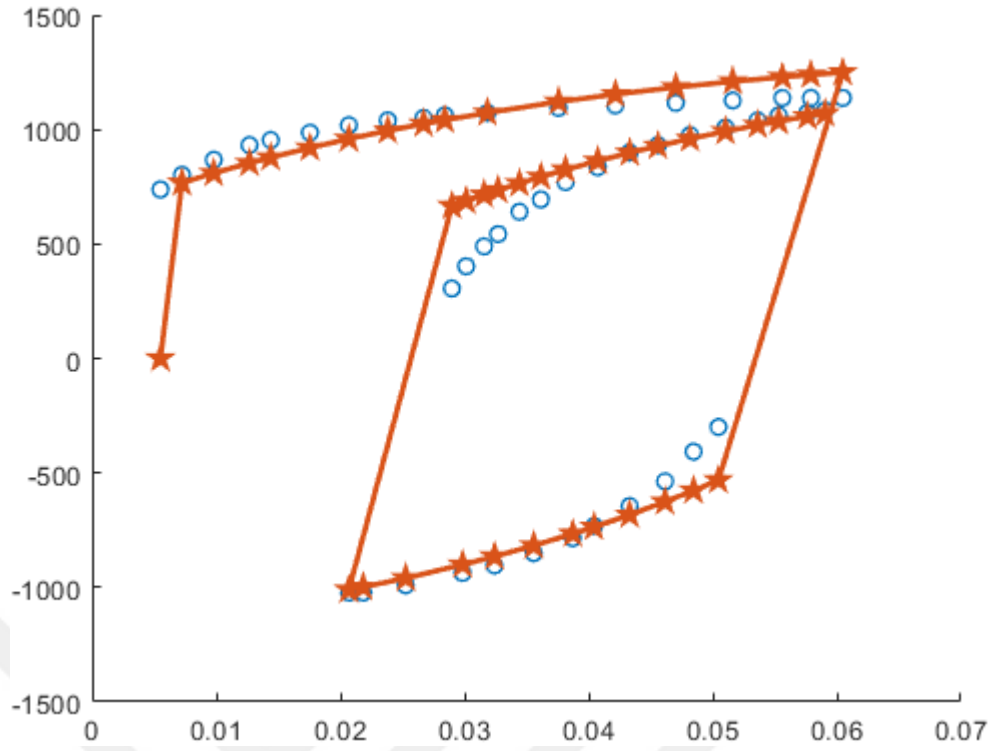
**Şekil 4.3.** DP 600 malzeme için MATLAB üzerinden, Yoshida-Uemori için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi

DP 1000 Malzeme için belirlenen model parametreleri Çizelge 4.4’de Frederick-Armstrong, Çizelge 4.5’da Chaboche ve Çizelge 4.6’de Yoshida-Uemori olacak şekilde gösterilmiştir.

Parametreleri belirlenen DP 1000 malzeme için elde edilmiş grafikler; Frederick-Armstrong için Şekil 4.4 ‘de, Chaboche için Şekil 4.5 ’de ve Yoshida-Uemori için Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.4.** DP 1000 malzeme için Frederick-Armstrong model parametreleri

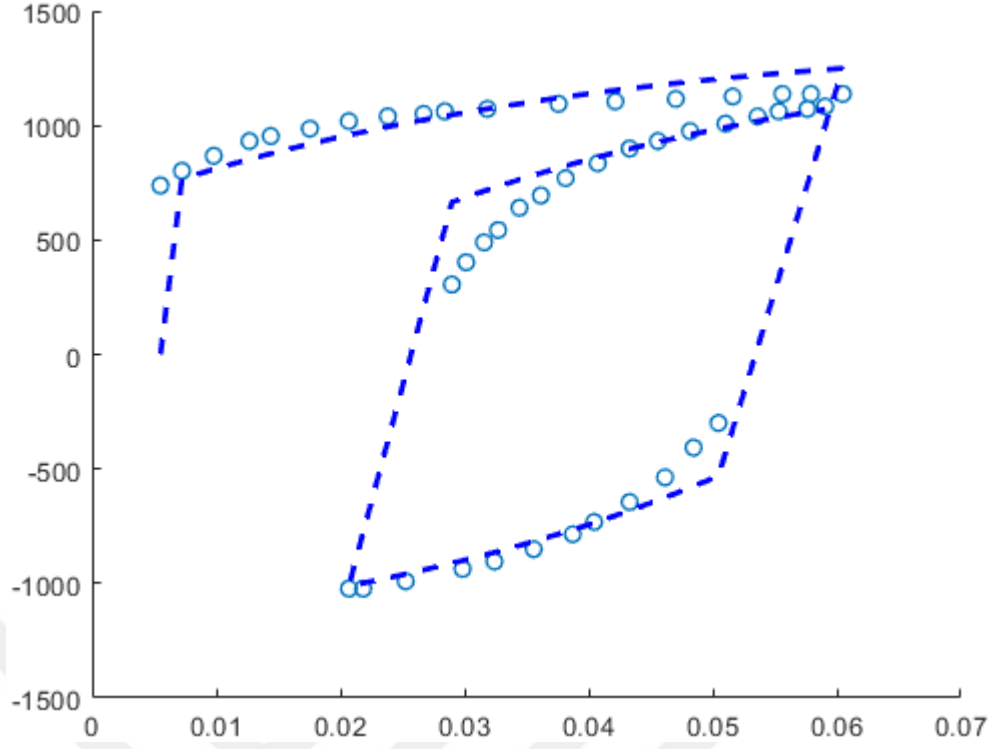
DP 1000 Frederick-Armstrong Model Parametreleri	
c	$1,7131 \times 10^4$
$\gamma$	26,0561



**Şekil 4.4.** DP 1000 malzeme için MATLAB üzerinden, Frederick-Armstrong için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi

**Çizelge 4.5.** DP 1000 malzeme için Chaboche model parametreleri

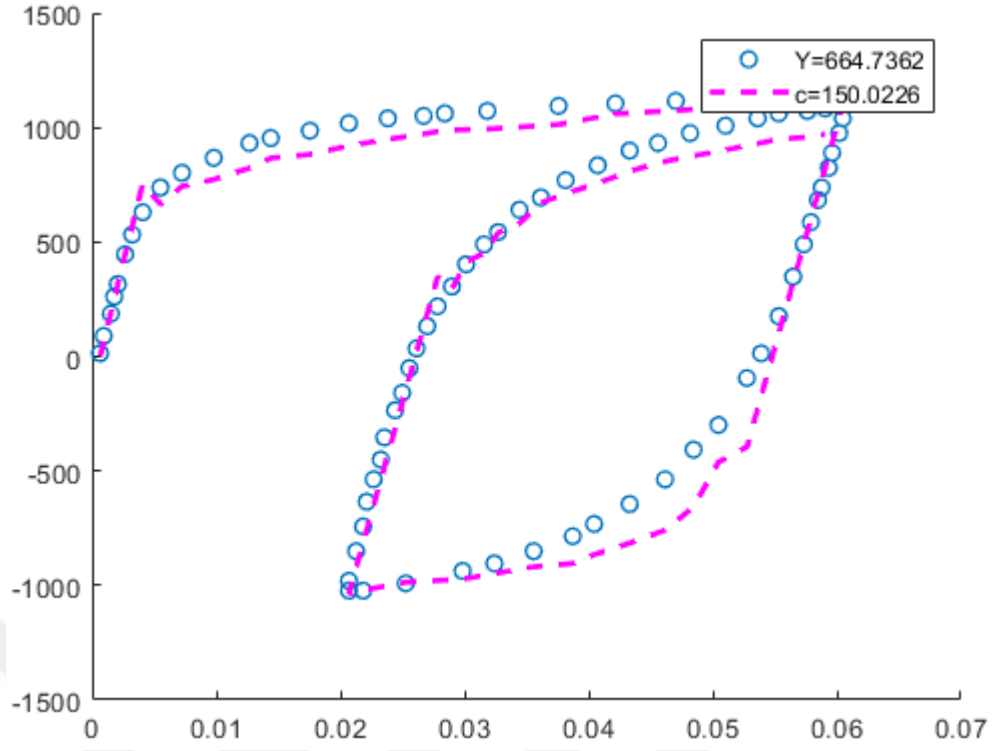
DP 1000 Chaboche Model Parametreleri					
$c_1$	$\gamma_1$	$c_2$	$\gamma_2$	$c_3$	$\gamma_3$
$4,26 \times 10^3$	26,1098	$8,666 \times 10^3$	26,1098	$4,2603 \times 10^3$	26,1098



**Şekil 4.5.** DP 1000 malzeme için MATLAB üzerinden, Chaboche için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi

**Çizelge 4.6.** DP 1000 malzeme için Yoshida-Uemori model parametreleri

DP 1000 Yoshida-Uemori Model Parametreleri					
$y$	$c$	$B$	$R_{sat}$	$b$	$K$
449,9833	165,4810	517,5492	899,9547	39,9840	31,8013
$E_a$	$\xi$	$c_1$	$c_2$	$h$	
$1,8555 \times 10^5$	149,5205	2,6759	0,5476	0,2	



**Şekil 4.6.** DP 1000 malzeme için MATLAB üzerinden, Yoshida-Uemori için belirlenen parametrelerin grafiksel gösterimi

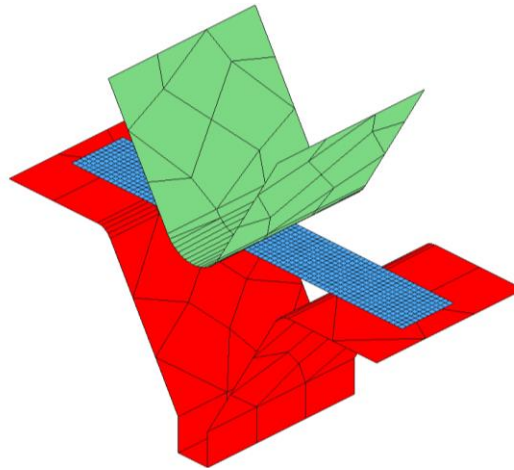
## BÖLÜM V

### GERİ ESNEME MODELLEMESİ

Yüksek mukavemetli çeliklerde yapılan modelleme çalışmaları ile sanayide iş ve zaman kaybının önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Tasarım aşamasında mukavemet hesaplarının hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılarak tasarımların doğru sonuçlar vermesi sağlanmaktadır. Sonlu elemanlar analizi yöntemleri kullanılan bu çalışmalarda kompleks çözümlere ihtiyacı olan problemler, küçük parçacıklara ayrılarak tam olarak simülasyonu yapılmaya çalışılmaktadır. Belirli sayıdaki bilinmeyen için kullanılan çözüm denklemleri aracılığı ile her bir düğüm noktasındaki değerler bulunmaktadır. (Topçu ve Taşgetiren, 1998)

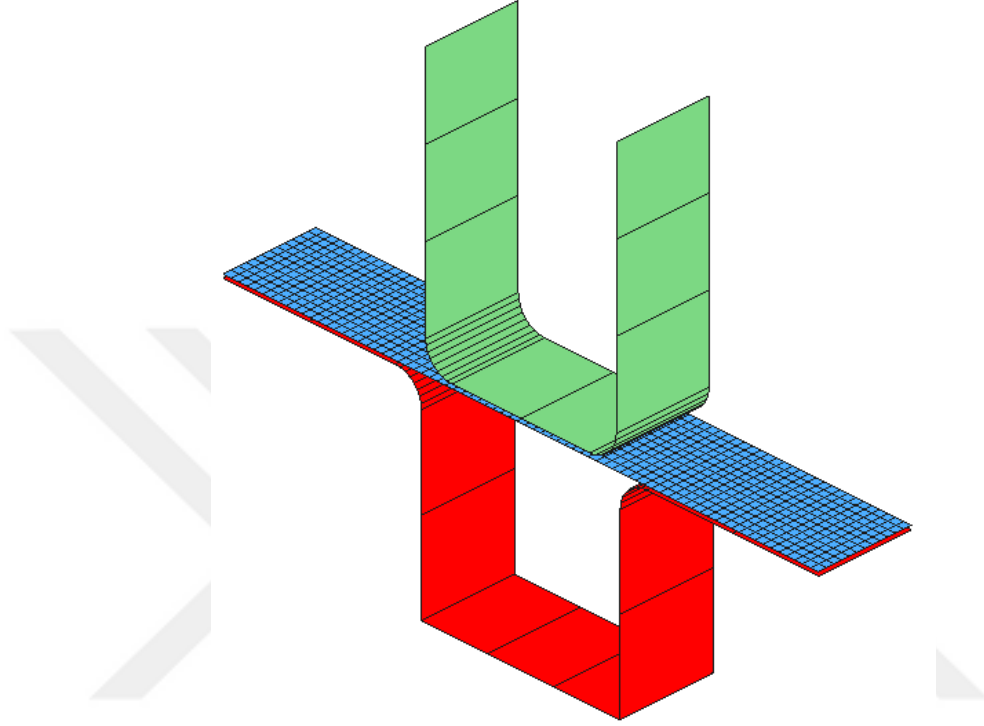
Sonlu elemanlar yöntemi diğer nümerik yöntemlerle kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Yapılacak analizler için kullanılan tasarımlar bütün geometrik detayları ile ifade edilebilmektedir. Hesaplanması problem olan delik, köşe ve büküm noktaları gibi geometriler daha iyi tanımlanarak net bir şekilde modellenmektedir. Yer değiştirmeler kuvvet oranları, sınır şartları ve mesh yapısı gibi çözüme direkt etkisi olan niceliklerin rahatlıkla uygulanabilmektedir. Tez kapsamında DP 600 ve DP 1000 malzeme üzerinde yapılan modelleme çalışmaları kıyaslanacaktır.

Yapılan çalışma ile bütün geometriler yüzey olarak Solidworks Programı üzerinde katı modelleri oluşturulmuştur. Şekil 5.1’de geometri detayları gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Dynaform programı üzerinden gösterilmiş geometri detayları

Programın geometrileri algılayabilmesi ve ağ yapılarına ayırarak her bir düğüm için hesaplama yapılacaktır. Bu işlem öncesinde geometrimiz DynaForm programı yardımcılığı ile mesh (sistemin ağ yapısı) oluşturulmuştur. Şekil 5.2’de oluşturulmuş mesh yapısı ve U kalıp geometrisi gösterilmiştir.



**Şekil 5.2.** Zımba, kalıp ve numuneye uygulanmış ağ yapısı

Şekil 5.3’de şekillendirilmiş parça üzerinde hesaplama adımlarını iyileştirmek amacı ile kullanılan mesh dağılımı rahatlıkla görülebilmektedir. Genel manada parça kalıp temas yüzeylerinde bu mesh incelme süreci yoğun olarak elde edilmekte olup parçaların analiz boyunca birbirlerini görmeleri ve penetrasyon problemlerinin bertaraf edilmesini kolaylaştırmaktadır.



(a)



(b)

**Şekil 5.3.** Şekillendirme işlemi sonrası parçada oluşan mesh dağılımı V-kalıp (a), U-kalıp (b)

## BÖLÜM VI

### SONUÇLAR

Yapılan çalışmalar sonunda DP600 ve DP1000 malzemelerimizin geri esneme kabiliyetleri farklı model parametreleri için hesaplanmıştır. Çizelge 6.1’de her iki malzememiz içinde sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

**Çizelge 6.1.** Farklı pekleşme modellerine göre DP 600 ve DP 1000 malzemelerin geri esneme miktarları

Malzeme	Model	Deneysel Sonuçlar (°)	Simülasyon
DP600	Frederick-Armstrong	13,38°	11,18
	Chaboche		12,08
	Yoshida-Uemori		13,46
DP1000	Frederick-Armstrong	15,6°	17,21
	Chaboche		13,89
	Yoshida-Uemori		14,86

Her iki malzememiz için geri esneme miktarlarının deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında; Yoshida-Uemori pekleşme modelini kullanarak çözümlemesini gerçekleştirdiğimiz simülasyonlar deneysel verilere daha çok yaklaşmıştır. Diğer sonuçlar karşılaştırıldığında en iyi ikinci tahmini Chaboche pekleşme modellemesinin kullanıldığı simülasyonda elde edilmiştir. Frederick-Armstrong pekleşme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş simülasyonda ise diğer iki pekleşme modeline göre tahmin kapasitesi düşük kalmıştır. Bu sonuçlar benzer olarak malzemelerin çevrimli yükleme durumlarından elde edilen gerilme-birim şekil değişimi grafiklerinden de görülebilmektedir. Temelde sadece lineer kinematik pekleşmeye dayanan Frederick-Armstrong ve lineer olmayan Chaboche modelinin tahmin kabiliyetleri izotropik ve kinematik pekleşme kabiliyetlerinin birlikte modellenebildiği ve ikili yüzey plastisite modeli olarak da isimlendirilen Yoshida-Uemori pekleşme modelinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

Armstrong, P. J. and Frederick, C. O., A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect, CEGB Report, RD/B/N731, *Berkeley Nuclear Laboratories*, 1966.

Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani, P. F., Brosius, A., Cao, J., and Tekkaya, A. E. "Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming". *CIRP Annals* 63 (2), 727-749, 2014.

Cerit, A., M., Makine Mühendisliği El Kitabı, *Maya Matbaacılık Yayıncılık* Ankara, 1976.

Chaboche, J. L., "Constitutive-Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity". *Int J Plasticity* 5, 247-302, 1986.

Chaboche, J. L., "Time-Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity". *Int J Plasticity* 2, 149-188. 1989.

Chaboche, J. L., "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity". *International Journal of plasticity* 2, 149–188, 1986.

Chaboche, J. L., Dang-Van, K. and Cordier G., "Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel." *Proceedings of the 5th International Conference on SMiRT*, Div. L, Berlin, Germany, 1979.

Chaboche, J. L., Dang-Van, K. and Cordier, G., "Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening of 316 Stainless Steel", *L - Materials Modeling and Inelastic Analysis of Metal Structures* L11 (3), 1979.

Chaboche, J. L. and Rousselier, G., “On the plastic and viscoplastic constitutive equations, part 2: Application of interval variable concepts to the 316 stainless steel”. *Journal of Pressure Vessel Technology* 105, 159-164, 1983.

Cinar, G., Effects of anisotropy on formability in sheet metal forming, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2005.

Firat, M., Lineer olmayan kinematik pekleşme bünye denklemlerinin yorulma ömrü tahmininde uygulanması. Doktora tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2003.

Frederick, C. O. and Armstrong, P. J., “A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect”. *Mater High Temp* 24, 11-26, 2007.

Garcia-Romeu, M. L., Ciurana, J. and Ferrer, I., “Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work”, *Journal of Materials Processing Technology* 191, 174-177, 2007.

Granbom Y., Structure and mechanical properties of dual phase steels, Doctoral thesis, *Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management Materials Science*, Sweden, 2010.

Gülmez, T., Mak3 351 İmal Usulleri Ders Sunumu, *Ders Notu*, İstanbul, 2011.

Halama, R., Sedlák, J. and Šofer, M., “Phenomenological Modelling of cyclic plasticity”. *Numerical Modelling InTech* 15, 329-354, 2012.

Heidarshenas, B., Principles of Major Manufacturing Processes Prepared, *Sheet Metal Forming Lecture 6, Doğu Akdeniz Üniversitesi*, Kıbrıs, 2015.

Kılıç, S., DP 600 Çeliğinin Geri Esneme Davranışının İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2009.

Kılıç, S., Öztürk, F. ve Toros, S., “DP 800 çeliğinin mekanik özelliklerinin ve geri esneme davranışının incelenmesi”, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 11 (1), 40-45, 2009.

Kim, J. H., Lee, M. G., Kang, J. H., Oh, C. S. and Barlat, F., “Crystal plasticity finite element analysis of ferritic stainless steel for sheet formability prediction”. *International Journal of Plasticity* 93, 26-45, 2017.

Kim, N. J. and Thomas, G., “Effects of morphology on the properties of a Dualphase Fe/2Si/0.1C/steel”, *Met. Trans.* 12 (A), 483-489, 1981.

Korkmaz, H. G., Sac Hidro-Kesmede Proses Parametrelerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2018.

Kuwabara, T., Hashimoto, K., Iizuka, E. and Yoon, J. W., “Effect of anisotropic yield functions on the accuracy of hole expansion simulations”. *Journal of Materials Processing Technology* 211(3), 475-481, 2011.

Lana, F., Chena, J. and Linb, J., “A Method of Constructing Smooth Tool Surfaces for FE Prediction of Springback in Sheet Metal Forming”, *Journal of Materials Processing Technology* 177, 382–385, 2006.

Leu, D. K., “A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals”. *Journal of Materials Processing Technology* 66, 9-17, 1997.

LS-DY-NA, LS-OPT and LS-Pre-Post are reg-istered trade-marks of LSTC, <http://www.lstc.com>, LSTC, 2019.

Marciniak, Z., Duncan, J. L. and Hu S. J., Mechanics of Sheet Metal Forming, *Butterworth-Heinemann*, Great Britain, 2002.

Matsui, K., Terada, K., Akiyama, M., Kuboki, T. and Oikawa, K., “Trans. Numerical re-examination of the micro-scale mechanism of the Bauschinger effect in carbon Steels”, *Japan Soc. Mach. Eng. A.* 68 (675), 71-78, 2002.

Naceur, H., Guo, Y.Q. and Ben-Elechi, S., “Response Surface Methodology for Design of sheet Forming Parameters to Control Springback Effects”, *Computers and Structures*, 84, 1651– 1663, 2006.

Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Pathak, K. K. and Chouhan, J. S. “An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM)”. *Journal of Materials Processing Technology* 186 (1-3), 120-124, 2007.

Prager, W., “A New Method of Analyzing Stresses and Strains in Work Hardening Plastic Solids”. *ASME J. App. Mech* 23, 493-496, 1956.

Sarıkaya, O. T., Analysis of heat treatment effect on springback in V-bending, Yüksek lisans tezi, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2008.

Sarwar, M., Ahmad, E., Qureshi, K. A. and Manzoor, T., “Influence of epitaxial ferrite on tensile properties of dual phase steel”, *Materials and Design* 28, 335–340, 2007.

Satorres, A., Bending simulation of high strength steel By finite elements, Master’s thesis, *University of Oulu Department of Mechanical Engineering*, 2005.

Shi, M. F., Zhu, X., Xia, C. and Stoughton, T., Determination of nonlinear isotropic/kinematic hardening constitutive parameters for AHSS using tension and compression tests. *In NUMISHEET Conference*, Interlaken, Switzerland, Sept, 1-5, 2008.

Tisza, M., and Lukács, Z., “Springback analysis of high strength dual-phase Steels”, *Procedia Engineering* 81, 975 – 980, 2014.

Topçu, M. ve Taşgetiren, S., Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Matbaası**, Ders Kitapları Yayın No:007, Denizli, 1998.

Toros S., “Parameters Determination of Yoshida Uemori Model Through Optimization Process of Cyclic Tension-Compression Test and V-Bending Springback, Latin American”, **Journal of Solids and Structures** 13, 2016.

Turon, A., Davila, C. G., Camanho, P. P. and Costa, J., “An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models”. **Engineering fracture mechanics** 74 (10), 1665-1682, 2007.

Watanabel, K. and Natoril, K., “Study on the Bauschinger effect with increasing of tensile strength in dual phase steel sheets”, **High Performance Structures and Materials** V, 119, 2010.

Yakou, T. and Hasegawa, T., “Tetsu-to-Hagane, Study on the Bauschinger effect with increasing of tensile strength in dual phase steel sheets”, **High Performance Structures and Materials** ,70 (11), pp.51-58, 1984.

Yoshida, F., and Uemori, T., “A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening Stagnation”. **International journal of plasticity** 18 (5-6), 661-686, 2002.

Zhang, D., Cui, Z., Chen, Z. and Ruan, X., “An analytical model for predicting sheet springback after V-bending”. **Journal of Zhejiang University Science A** 8 (2), 237-244. 2007.

Zhang, R., Shao, Z. and Lin, J., “A review on modelling techniques for formability prediction of sheet metal forming”. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture** 1 (3), 115-125, 2018.

## ÖZ GEÇMİŞ

Berkan İŞERİ 18.05.1991 tarihinde Nevşehir’de doğdu. 2009 yılında Nevşehir Anadolu Lisesinde lise öğrenimini tamamladı. 2015 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2015 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı yıl içerisinde özel sektör içerisinde pompa-vana sektöründe üretim mühendisi olarak çalışmaya başladı. Devam eden yıllar içerisinde dökümhane kurulumu ve işletmesi, terfi merkezi güncelleme, laboratuvar kurulumu, AVM- Otel şantiyesinde mekanik tesisat gibi çeşitli projeleri tamamlamıştır. 2017 yılında Doğa Tohumculuk Gıda San. ve Tic. A.ş. firmasındaki işletme mühendisliği görevine başlamıştır. İlgili alanları malzeme, imalat ve imal usulleri, otomotiv ve üretim sistemleri, gıda makinaları, gıda işleme tesisleri işletmesi ve sistem geliştirme mühendisliğidir.

