



**SCGADUB1180 YÜKSEK MUKAVEMETLİ
SACININ FARKLI DUVAR AÇISI VE FARKLI
KALIP RADYÜSLERİNDEKİ
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL VE SONLU
ELEMENLAR METODU İLE İNCELENMESİ,
GERİ YAYLANMA TAHMİNİ VE GİDERİLMESİ**

Samet KARABULUT

**2022
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**SCGADUB1180 YÜKSEK MUKAVEMETLİ SACININ FARKLI DUVAR
AÇISI VE FARKLI KALIP RADYÜSLERİNDEKİ
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR
METODU İLE İNCELENMESİ, GERİ YAYLANMA TAHMİNİ VE
GİDERİLMESİ**

Samet KARABULUT

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İsmail ESEN**

**KARABÜK
Eylül 2022**

Samet KARABULUT tarafından hazırlanan “SCGADUB1180 YÜKSEK MUKAVEMETLİ SACININ FARKLI DUVAR AÇISI VE FARKLI KALIP RADYÜSLERİNDEKİ ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR METODU İLE İNCELENMESİ, GERİ YAYLANMA TAHMİNİ VE GİDERİLMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsmail ESEN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 30/09/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Akif KOÇ (SUBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Selami SAĞIROĞLU (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. İbrahim ÇAYIROĞLU (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. İsmail ESEN (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep KILIÇ (SUBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Samet KARABULUT

ÖZET

Doktora Tezi

**SCGADUB1180 YÜKSEK MUKAVEMETLİ SACININ FARKLI DUVAR
AÇISI VE FARKLI KALIP RADYÜSLERİNDEKİ
ŞEKİLLENDİRİLMESİNİN DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR
METODU İLE İNCELENMESİ, GERİ YAYLANMA TAHMİNİ VE
GİDERİLMESİ**

Samet KARABULUT

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İsmail ESEN

Eylül 2022, 145 sayfa

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacların geri yaylanma davranışı istenmeyen bir durumdur ve kalıp imalat süreçlerinden önce bilinmelidir. Kalıp imalat süreçlerinden önce simülasyon çalışmalarının doğrulukla yapılması deneme yanılma sürelerini ve maliyetleri azaltmaktadır. Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan 1,2 mm kalınlığındaki SCGADUB1180 geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacının U bükme ve V bükmesi farklı proses parametrelerinde gerçekleştirilerek, şekillendirme sonrası geri yaylanma davranışları deneysel ve sonlu elemanlar methodu ile incelenmiştir. Bu amaçla, sac levhaların 0°, 45° ve 90° hadde yönlerinde çekme testleri yapılarak, mikro yapısı incelenmiş ve Autoform yazılımı için tanımlanacak mekanik özellikleri belirlenerek K ve n parametrelerinin değerleri hesaplanmıştır. U büküm ve V büküm

deneyleri yapılarak farklı zımba yarıçaplarında, farklı bükme açıları, farklı hadde yönleri ve farklı malzeme modelleri tanımlanarak, bu parametrelerin etkisi gözlemlenmiştir. Ayrıca, Hill-48 ve Barlat-89 akma kriterleri, Power (Ludwik) akma eğrisi fonksiyonu ve kinematik pekleşme kuralı uygulanarak yüksek mukavemetli çeliklerin bükülmesinde deneysel sonuçlar ile belirtilen modellerin kıyaslaması yapılarak en yakın model belirtilmiştir. Yapılan incelemenin sonucunda, Hill-kinematik pekleşme modeli ve Barlat-kinematik pekleşme modeli ile yapılan analizlerin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu görülmüştür. U bükmelerde U parçanın tabanında form bozuklukları gözlenmiştir. R3 zımba yarıçapında U bükmede telafi çalışması yapılarak geri yaylanma giderilmiştir.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde; SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının yüksek akma ve çekme mukavemet değerlerine rağmen düşük uzama değerlerine sahip olduğu, mikroyapısını incelediğimizde, yüksek oranda martenzit yapıya sahip olduğu görülmüştür.

V bükme deneysel ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda, neredeyse bütün analizlerde, geri yaylanmalar görülmüştür. Zımba yarıçapı ve kalıp açısının değişiminin sacın geri yaylanma davranışına önemli derecede etkisi olduğu görülmüştür. Küçük zımba yarıçapı ve küçük bükme açılarında hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi vardır. Özellikle küçük zımba yarıçaplı bükme prosesinde bükme açısı arttıkça hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi azalmaktadır. Zımba yarıçapları arttıkça geri yaylanma değerleri artmıştır. R3, R6 ve R9 zımba yarıçaplarında, bükme açılarının 60° ve 90° durumda yakın geri yaylanma değerleri ölçülmüş, bükme açısının 120° olduğu durumda geri yaylanma değerleri azalmıştır. Proses parametrelerinin etkisini görmek için varyans analizi yapılarak, zımba radyusu % 83, bükme açısı % 8,52, hadde yönü % 0,16 geri yaylanmaya etkisi olduğu görülmüştür.

U bükme deneysel ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda, U bükme prosesinde deneysel verilerden elde edilen geri yaylanma değerlerini incelediğimizde R3 zımba yarıçapında parça içeri yöne kapanmaya çalışarak, ileri yaylanma davranışı göstermiştir. R5 zımba yarıçapında 93° duvar açısında geri yaylanma, 97° duvar

açısında ileri yaylanma davranışı göstermiştir. R8 zimba yarıçapında ise her iki duvar açısında geri yaylanma meydana gelmiştir.

Anahtar Sözcükler : Yüksek mukavemetli çelikler, SCGADUB1180, Geri yaylanma, U bükme, V bükme.

Bilim Kodu : 91420



ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE FORMING OF SCGADUB1180 HIGH-STRENGTH SHEET AT DIFFERENT WALL ANGLES AND DIFFERENT PUNCH RADII, ESTIMATION AND ELIMINATION OF SPRINGBACK

Samet KARABULUT

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İsmail ESEN

September 2022, 145 pages

The springback behavior of the developed high-strength sheets is undesirable and must be known before the die manufacturing processes. Accurate simulation studies before die manufacturing processes reduce trial and error times and costs. In this study, U bending and V bending of 1,2 mm thick SCGADUB1180 developed high strength sheet used in the automotive industry were performed at different process parameters, and the springback behaviors after forming were investigated by experimental and finite element method. For this purpose, tensile tests of sheet metals in 0°, 45° and 90° rolling directions were performed, microstructure was examined and the values of K and n parameters were calculated by determining the mechanical properties to be defined for Autoform software. U bending and V bending experiments were carried out and the effects of these parameters were observed by defining different bending

angles, different rolling directions and different material models at different punch radii. In addition, by applying Hill-48 and Barlat-89 yield criteria, Power (Ludwik) yield curve function and kinematic hardening rule, the closest model is determined by comparing the experimental results and the models specified in the bending of high strength steels. As a result of the examination, it was seen that the analyzes made with the Hill-kinematic hardening model and the Barlat-kinematic hardening model were closer to the experimental results. In U bends, deformities were observed at the base of the u part. Springback is eliminated by performing compensating work in U bending at R3 punch radius.

When the tensile test results are examined; Despite its high yield and tensile strength values, SCGADUB1180 high strength sheet has low elongation values, and when we examine its microstructure, it is seen that it has a high martensite structure.

As a result of V bending experimental and finite element analysis, springbacks were observed in almost all analyses. It was observed that the variation of punch radius and die angle had a significant effect on the springback behavior of the sheet. At small punch radius and small bending angles, the rolling direction has an effect on springback. Especially in small punch radius bending process, the effect of rolling direction on springback decreases as the bending angle increases. As the punch radii increased, the springback values increased. In R3, R6 and R9 punch radii, close springback values were measured at 60° and 90° bending angles, and the springback values were decreased when the bending angle was 120°. Variance analysis will be performed to see the effect of process parameters, punch radius % 83, bending angle % 8,52, rolling direction % 0,16 effect on back publication was observed.

As a result of U bending experimental and finite element analyses, when we examined the springback values obtained from the experimental data in the U bending process, the part showed forward springing behavior by trying to close inward at the R3 punch radius. It showed springback behavior at 93° wall angle at punch radius R5 and forward springing behavior at 97° wall angle. In R8 punch radius, springback occurred in both wall angles.

Key Word : High strength steels, SCGADUB1180, Springback, U bending, V bending

Science Code : 91420



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. İsmail Esen'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde değerli bilgilerini ve önerilerini esirgemeyen Tkare Mühendislik Genel Müdürü Sayın Murathan Toktaş'a, Teknik Müdür Sayın Ümit Oruç'a, Tasarım Yöneticisi Sayın Muhammet Emre'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde kalıpların üretiminde ve parçaların basımında desteklerinden dolayı AD Kalıp Genel Müdürü Sayın Ahmet Dilek'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkı ve yardımlarından dolayı Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firmasında AR-GE Gövde Şefi Sayın Harun Aydın'a, Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firmasında Satın Alma Müdürü Sayın Onur Kınalı'ya, Ulaşım İç ve Dış Ticaret A.Ş. firmasında Satın Alma Uzmanı Erkan Güllek'e, Soylu Kalıp Genel Müdürü Emre Çakmak'a, Prolazer firması Genel Müdürü İbrahim Karabaş'a, Lines Metal firması Genel Müdürü Enes Turhan'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca desteklerini ve sevgilerini eksik etmeyen değerli aileme, eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	x
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
ÇİFT FAZLI ÇELİKLER	5
2.1. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN ÜRETİMİ.....	9
2.1.1. Sıcak Haddeme Sırasında Üretim.....	11
2.1.2. Sıcak Tavlama Hatları ve Çift Fazlı Çelik Üretimi	11
2.1.3. Kutu Tavlama	12
2.2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN MİKRO YAPISI	12
2.2.1. Ferrit	12
2.2.2. Martensit.....	13
2.2.3. Kalıntı Östenit.....	13
2.3. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERDE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ.....	14
2.3.1. Karbon (C).....	14
2.3.2. Alüminyum (Al)	14
2.3.3. Bakır (Cu).....	14
2.3.4. Kurşun (Pb).....	14
2.3.5. Bor (B).....	14

	<u>Sayfa</u>
2.3.6. Seryum (Ce).....	15
2.3.7. Krom (Cr)	15
2.3.8. Kalsiyum (Ca).....	15
2.3.9. Kobalt (Co).....	15
2.3.10. Magnezyum (Mg).....	15
2.3.11. Mangan (Mn).....	15
2.3.12. Molibden (Mo)	15
2.3.13. Nikel (Ni).....	15
2.3.14. Fosfor (P).....	15
2.3.15. Kükürt (S).....	16
2.3.16. Silisyum (Si).....	16
2.3.17. Vanadyum (V)	16
2.3.18. Hidrojen (H)	16
2.3.19. Volfram (W)	16
2.3.20. Niobyum (Nb).....	16
2.3.21. Titanyum (Ti)	16
2.3.22. Nitrojen (N)	16
 BÖLÜM 3	 17
SAC METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ	17
3.1. DERİN ÇEKME.....	17
3.2. DELME VE KESME KALIPLARI	18
3.3. BÜKME KALIPLARI	19
3.3.1. Bükme Olayının İncelenmesi	19
3.3.2. Bükme Kalıpları	19
3.3.3. Bükme Kuvvetinin Hesaplanması	22
3.4. GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ.....	24
 BÖLÜM 4	 27
GERİ YAYLANMA DAVRANIŞI	27
4.1. GERİ YAYLANMANIN TANIMI.....	27
4.2. LİTERATÜR TARAMASI	28

Sayfa

4.3. GERİ YAYLANMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	42
4.3.1. Akma Dayanımı.....	42
4.3.2. Anizotropi.....	42
4.3.3. Bauschinger Etkisi.....	43
4.3.4. Elastikiyet Modülü	44
4.3.5. Sıcaklık	45
4.3.6. Pekleşme.....	45
 BÖLÜM 5	52
AKMA KRİTERLERİ VE PEKLEŞME KURALI	52
5.1. GİRİŞ.....	52
5.2. AKMA KRİTERLERİ	53
5.2.1. Tresca Akma Kriteri	53
5.2.2. Von Mises Kriteri	53
5.2.3. Hill-48 Akma Kriteri	53
5.2.4. Barlat-89 Akma Kriteri.....	54
5.2.5. Power Law Akma Kriteri.....	55
5.3. PEKLEŞME KURALI	55
5.4. LİTERATÜR İNCELEMESİ	57
 BÖLÜM 6	60
MATERYAL VE YÖNTEM	60
6.1. GİRİŞ.....	60
6.2. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TANIMLANMASI	60
6.2.1. Çekme Testi.....	60
6.2.2. Mikro Yapı İncelemesi	68
6.2.3. Kimyasal Analiz Testi	69
6.2.4. Sertlik Testi.....	70
6.3. DENEYSEL YÖNTEM VE DENEY DÜZENİĞİNİN TANITILMASI	70
6.3.1. Deneysel Çalışma Metodu.....	70
6.3.1.1. U Bükme	71
6.3.1.2. V Bükme	73

Sayfa

6.3.2. Geri Esnemenin Ölçümü	76
6.3.3. Sayısal Çalışma Metodu	77
6.3.3.1. V Bükme Deneyi.....	80
6.3.3.2. U Bükme Deneyi.....	82
 BÖLÜM 7	86
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	86
7.1. DENEYSEL SONUÇLAR.....	86
7.1.1. V Bükme Deneysel Sonuçları.....	86
7.1.1.1. Kalıp Açısına Bağlı Olarak Geri Yaylanmanın Değerlendirilmesi	87
7.1.1.2. Zimba Yarıçaplarına Bağlı Olarak Geri Yaylanmanın	
Değerlendirilmesi.....	90
7.1.2. U Bükme Deneysel Sonuçları.....	93
7.2. SONLU ELEMENLAR ANALİZ SONUÇLARI	95
7.2.1. V Bükme Geri Yaylanma Değerleri	95
7.2.1.1. R3 Zimba Yarıçapında Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının	
Değerlendirilmesi.....	96
7.2.1.2. R6 Zimba Yarıçapında Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının	
Değerlendirilmesi.....	100
7.2.1.3. R9 Zimba Yarıçapında Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının	
Değerlendirilmesi.....	105
7.2.2. U Bükme Geri Yaylanma Değerleri	109
7.2.2.1. Zimba Yarıçapı R3 Durumunda Geri Yaylanmaların	
İncelenmesi	109
7.2.2.2. Zimba Yarıçapı R5 Durumunda Geri Yaylanmaların	
İncelenmesi	113
7.2.2.3. Zimba Yarıçapı R8 Durumunda Geri Yaylanmaların	
İncelenmesi	115
7.2.3. U Bükme Gerilme Değerleri.....	118
7.2.4. U Bükme Pres Kuvvetleri.....	121
7.3. GERİ YAYLANMANIN TELAFİSİ.....	123
7.3.1. R3 Zimba Yarıçapında Telafi Uygulanması.....	124

	<u>Sayfa</u>
7.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)	128
 BÖLÜM 8	131
SONUÇLAR	131
KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ	145



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Çeliklerin dayanım ve toplam uzama eğrisi	2
Şekil 1.2. Araçtaki metallerin kullanım yerlerinin gösterimi	3
Şekil 1.3. 2021 model Nissan Rogue modelinde yüksek mukavemetli sacların kullanımı	3
Şekil 2.1. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çeliklerin çekme dayanımı, uzama grafiği.....	6
Şekil 2.2. Farklı malzemelerin enerji emme miktarlarının karşılaştırılması	8
Şekil 2.3. 1180 MPa yüksek mukavemetli çeliğin eksenel çarpışmada enerji absorbe edebilme kabiliyeti	9
Şekil 2.4. Demir Karbon denge diyagramı.....	10
Şekil 2.5. Kutu ve sürekli tavlama işlemlerinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.6. Çift fazlı çelik iç yapısı	13
Şekil 3.1. Çekme kalıbı parçaları	17
Şekil 3.2. Kesme işlemi	18
Şekil 3.3. Kesme işleminin incelenmesi.....	18
Şekil 3.4. Bükme işleminin incelenmesi	19
Şekil 3.5. V Bükme	20
Şekil 3.6. Kenar bükme	20
Şekil 3.7. Bükme çeşitleri.....	21
Şekil 3.8. Bükme çeşitleri.....	22
Şekil 3.9. U büküm kalıp elemanları	23
Şekil 3.10. Çekme deney düzeneği	24
Şekil 3.11. Gerçek ve mühendislik gerilme şekil değiştirme eğrileri.....	25
Şekil 4.1. Geri yaylanmanın gösterimi	27
Şekil 4.2. Farklı mukavemet değerlerindeki parçaların geri yaylanma değerleri.....	28
Şekil 4.3. Şekillendirme parametreleri	34
Şekil 4.4. Simülasyon çalışması gerçekleştirilen yekpare A ve B direği parçası.....	36
Şekil 4.5. A direği parçasındaki B-B kesitindeki iyileştirme çalışması	37
Şekil 4.6. Yırtılma değerleri	37

Sayfa

Şekil 4.7. Hadde yönünün büküme etkisi.....	43
Şekil 4.8. Bauschinger etkisi	44
Şekil 4.9. Farklı sıcaklıklarda DP600 malzemesinin şekillendirilmesi sonucu geri yaylanmaların gösterimi.....	45
Şekil 4.10. Gerçek gerilim-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen logaritmik diyagram.....	46
Şekil 4.11. Pekleşme eğrileri.....	47
Şekil 4.12. Yüksek mukavemetli saclarda n değerinin kıyaslanması.....	48
Şekil 4.13. Bükme için malzeme modelleri	48
Şekil 4.14. Gerilimsiz sac bükmede deformasyonla sertleşen modelin gerilme dağılımı	49
Şekil 4.15. Moment eğrilik diyagramı.....	50
Şekil 5.1. Plastisite modelin kurulması	52
Şekil 5.2. Hill-48 malzeme modeli.....	54
Şekil 5.3. İzotropik pekleşme şematik gösterimi	56
Şekil 5.4. Kinematik pekleşme şematik gösterimi	56
Şekil 5.5. Farklı malzeme modellerinden elde edilen simülasyon sonuçları ile	57
deney sonuçlarının karşılaştırılması	57
Şekil 6.1. Çekme test numune ölçüleri.....	61
Şekil 6.2. Hadde yönleri.....	61
Şekil 6.3. Çekme test düzeneği	62
Şekil 6.4. Test sonrası numunelerin görünüşü	63
Şekil 6.5. Mühendislik gerilme birim uzama grafiği.....	64
Şekil 6.6. 0° hadde yönü Log true - Log strain eğrisi.....	65
Şekil 6.7. 45° hadde yönü Log true - Log strain eğrisi.....	66
Şekil 6.8. 90° hadde yönü Log true - Log strain eğrisi.....	67
Şekil 6.9. SCGADUB1180 malzemesinin iç yapısı	69
Şekil 6.10. SCGADUB1180 malzemesinin element dağılımı	69
Şekil 6.11. U büküm kalıp ölçüleri.....	71
Şekil 6.12. Kalıbın adaptör parça ile prese bağlanması.	72
Şekil 6.13. U bükme numuneleri.....	73
Şekil 6.14. V büküm kalıp ölçüleri.....	73
Şekil 6.15. Kalıbın adaptör parça ile prese bağlanması	75
Şekil 6.16. V bükme numuneleri.....	75

Şekil 6.17. Geri yaylanmanın şematik gösterimi	76
Şekil 6.18. Lazer optik projeksiyon cihazında geri yaylanmanın ölçümü	76
Şekil 6.19. Anizotropik ve kinematik sertleşme.....	79
Şekil 6.20. Autoformda V kalıp gösterimi	80
Şekil 6.21. Autoformda şekillendirilmiş parçanın gösterimi	81
Şekil 6.22. Autoformda şekillendirilmiş parçada geri yaylanma gösterimi	82
Şekil 6.23. Autoformda U bükme kalıbının gösterimi	83
Şekil 6.24. Autoformda U bükme kalıbında şekillendirilmiş parçanın gösterimi.....	84
Şekil 6.25. Autoformda U bükme kalıbında geri yaylanmanın gösterimi.....	85
Şekil 7.1. V Bükme kalıbında şekillendirilmiş numuneler	86
Şekil 7.2. R3 zımba yarıçapında geri yaylanma değerleri	88
Şekil 7.3. R6 zımba yarıçapında geri yaylanma değerleri	89
Şekil 7.4. R9 zımba yarıçapında geri yaylanma değerleri	90
Şekil 7.5. 60° bükme yarıçapında geri yaylanma değerleri	91
Şekil 7.6. 90° bükme yarıçapında geri yaylanma değerleri	92
Şekil 7.7. 120° bükme yarıçapında geri yaylanma değerleri	93
Şekil 7.8. U büküm şekillendirilmiş numuneler.....	93
Şekil 7.9. U büküm geri yaylanma değerleri.....	95
Şekil 7.10. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	96
Şekil 7.11. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	97
Şekil 7.12. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	98
Şekil 7.13. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	98
Şekil 7.14. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	99
Şekil 7.15. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	100
Şekil 7.16. Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	101
Şekil 7.17. Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	101
Şekil 7.18. Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	102

Şekil 7.19. Zimba yarıçapı R6, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	103
Şekil 7.20. Zimba yarıçapı R6, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	104
Şekil 7.21. Zimba yarıçapı R6, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	104
Şekil 7.22. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	105
Şekil 7.23. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	106
Şekil 7.24. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	107
Şekil 7.25. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	107
Şekil 7.26. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmanın gösterimi.....	108
Şekil 7.27. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.....	109
Şekil 7.28. Zimba yarıçapı R3 durumunda geri-ileri yaylanmaların gösterimi	110
Şekil 7.29. Zimba yarıçapı R3 durumunda geri-ileri yaylanma değerlerinin gösterimi (a) Duvar açısı 93° (b) Duvar açısı 97°	111
Şekil 7.30. R3 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre geri-ileri yaylanma değerleri	112
Şekil 7.31. Zimba yarıçapı R5 durumunda geri-ileri yaylanmaların gösterimi	113
Şekil 7.32. Zimba yarıçapı R5 durumunda geri-ileri yaylanma değerlerinin gösterimi (a) Duvar açısı 93° (b) Duvar açısı 97°	114
Şekil 7.33. R5 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre geri-ileri yaylanma değerleri	115
Şekil 7.34. Zimba yarıçapı R8 durumunda geri-ileri yaylanmaların gösterimi	116
Şekil 7.35. Zimba yarıçapı R8 durumunda geri-ileri yaylanma değerlerinin gösterimi (a) Duvar açısı 93° (b) Duvar açısı 97°	117
Şekil 7.36. R8 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre geri-ileri yaylanma değerleri	118
Şekil 7.37. R3 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre gerilme değerleri	119
Şekil 7.38. R5 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre gerilme değerleri	120
Şekil 7.39. R8 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre gerilme değerleri	121

Şekil 7.40. R3 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modelinde pres kuvveti	122
Şekil 7.41. R5 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modelinde pres kuvveti	122
Şekil 7.42. R8 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modelinde pres kuvveti	123
Şekil 7.43. Telifi uygulaması akış şeması	124
Şekil 7.44. R3 zımba yarıçapında barlat kinematik pekleşme model telifli yüzey	125
Şekil 7.45. R3 zımba yarıçapında barlat kinematik pekleşme model telifli yüzeylerle bükme işlemi başlangıcı	125
Şekil 7.46. R3 zımba yarıçapında barlat kinematik pekleşme model telifli yüzeylerle bükme işlemi	126
Şekil 7.47. R3 zımba yarıçapında barlat kinematik pekleşme model telifli yüzeylerle bükme işlemi sonucu şekillendirilmiş parça	126
Şekil 7.48. R3 zımba yarıçapında barlat kinematik pekleşme model telifli yüzeylerle bükme işlemi sonucu şekillendirilmiş parçanın geri yaylanma değerleri	127
Şekil 7.49. R3 zımba yarıçapında barlat kinematik pekleşme model telifli yüzeylerle bükme işlemi sonucu şekillendirilmiş parçanın deneysel sonuçlarla ve malzeme modelleri ile karşılaştırılması	128
Şekil 7.50. Geri yaylanma için ana etki grafikleri	130

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	7
Çizelge 4.1. Çift fazlı çelik sacların mekanik özellikleri	35
Çizelge 4.2. Farklı kalitelerde yüksek mukavemetli sacların mekanik özellikleri	51
Çizelge 6.1. SCGADUB1180 malzemesinin mekanik özellikleri.	62
Çizelge 6.2. SCGADUB1180 malzemesinin hadde yönlerine göre pekleşme üstü ve mukavemet katsayı değerleri.	68
Çizelge 6.3. SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacın kimyasal yapısı (%).....	70
Çizelge 6.4. U bükme proses parametreleri	72
Çizelge 6.5. V bükme proses parametreleri	74
Çizelge 6.6. V bükme sonlu elemanlar analiz proses parametreleri	81
Çizelge 6.7. U bükme sonlu elemanlar analiz proses parametreleri	83
Çizelge 7.1. V Bükme geri yaylanma ölçüm sonuçları.....	87
Çizelge 7.2. U Bükme geri yaylanma ölçüm sonuçları.....	94
Çizelge 7.3. R3 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri	111
Çizelge 7.4. R5 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri	114
Çizelge 7.5. R8 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri	117

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- σ : Gerçek stres
 K : Mukavemet katsayısı
 n : Deformasyon sertleşme üstü
 ε : Toplam gerilim
 ε_{pl} : Toplam gerinmenin plastik kısmı
 σ_0 : Akma gerilimi

KISALTMALAR

MS : Yumuşak çelikler

TS : Türk Standardı



BÖLÜM 1

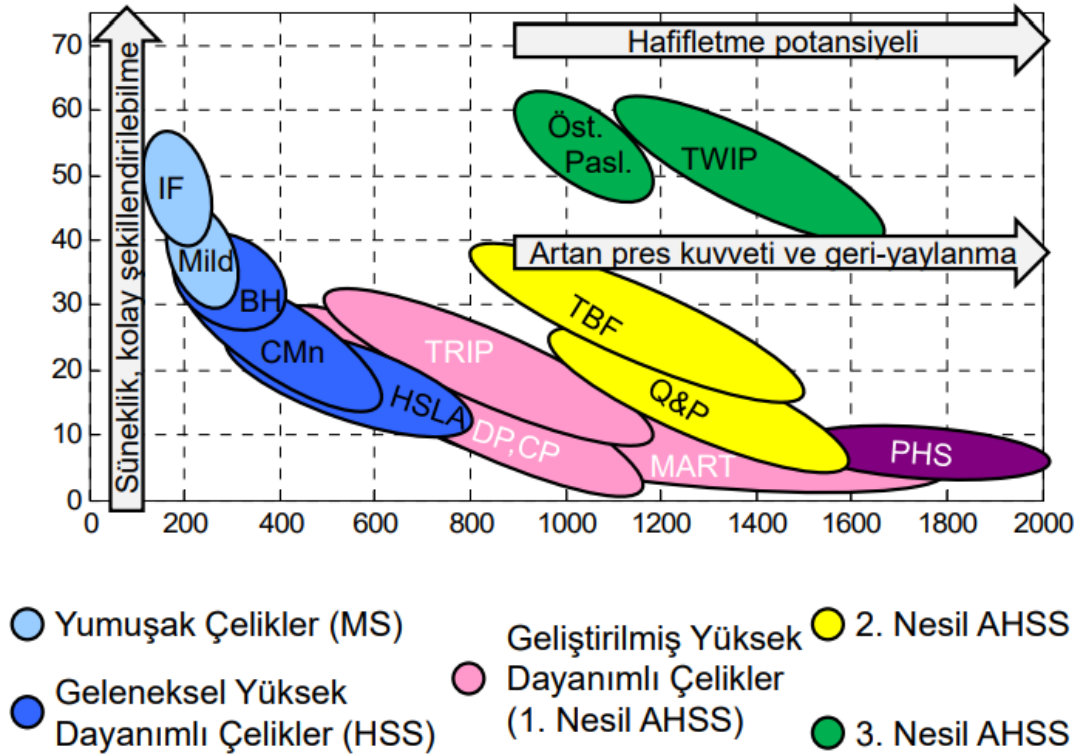
GİRİŞ

Sac metal parçalar beyaz eşya, havacılık, uzay ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac metal parçaların yaygın olarak kullanılmasının başlıca sebepleri; hammaddenin kolay bulunabilmesi, talaşlı imalata uygunluk, ucuz, kaynaklanabilirlik, boya tutma kabiliyeti, karmaşık geometriye sahip parçaların işlenebilirliği ve şekillendirilebilirlik olarak sıralanabilir. Çelik endüstrisi, araç hafifletme, mukavemet ve emisyon değerlerini karşılamak amacıyla sürekli yeni nesil çelikler geliştirmektedir. Özellikle, yüksek mukavemetli sacların şekillendirilmesinde geri yaylanma, yırtılma ve incelme kadar önemli bir problemdir. İncelme, parçanın mukavemet olarak göstermesi gereken performansını gösterememesine sebep olur. Buruşmanın oluşması ise, kalıplama prosesinden sonra elde edilecek parçada görüntü bozukluğu ve kalıp elemanlarında yüzey bozulmasına sebep olması sıralanabilir. Geri yaylanma, istenmeyen bir durum olup bir parçanın teoride istenilen form ile kalıplama sonrasındaki oluşan form arasındaki fark olarak adlandırılabilir.

Otomotiv endüstrisinde hafifletme, emisyonların azaltılması ve yakıt verimliliğini arttırmak için kritik öneme sahiptir. Kaza anında enerjinin absorbe edilebilmesi yolcuların hayatta kalabilmesi için hayati derecede önem taşır. Sektör, sürekli olarak ağırlık azaltma konusunda araştırmalara devam etmektedir [1][2].

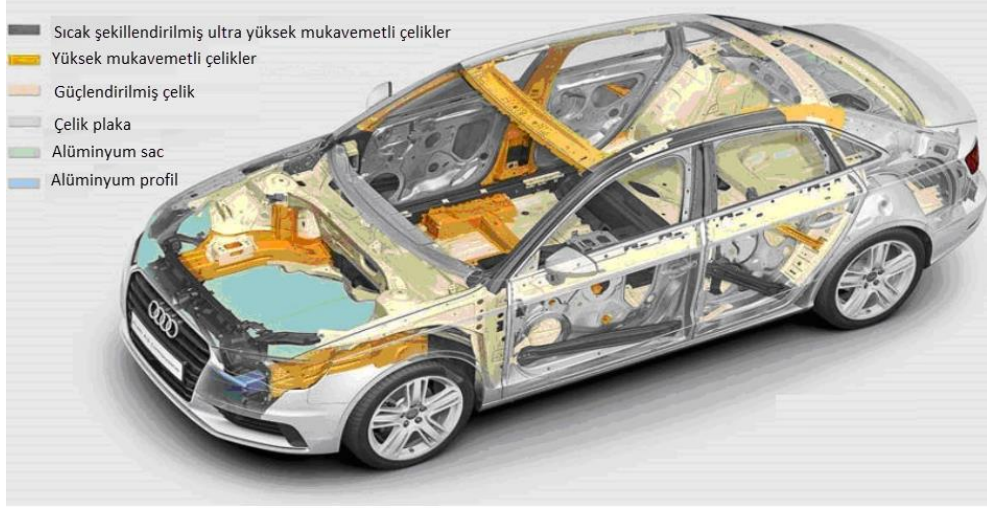
Bir araçta çelik, karbon fiber, alüminyum, cam, kauçuk, plastik olmak üzere binlerce parça bulunmaktadır. Bu parçaların tercih edilmesinde dayanımları ve estetik görünümleri yanısıra maliyetleride önemli bir faktördür. Bir araçta çelik saclar yaklaşık olarak aracın % 55'ini oluşturmaktadır. Çeliklerin tercih edilmesindeki en temel sebepler; yüksek dayanım, kaynaklanabilirlik, boyanabilirlik, maliyet, şekillendirilebilirlik tanımlanabilir [3].

Otomotiv endüstrisi, hafif, sünek ve mukavemetli geliştirilmiş yüksek mukavemetli saclar talep etmektedir. Şekil 1.1’de farklı çeliklerin mukavemet artışı ve hafifletme potansiyellerine rağmen, geri yaylanma potansiyelinin artması problem olarak görülmektedir. Elastik şekil değiştirmede deformasyon sertleşmesi, uygulanan gerilimin uniform dağılımını tanımlarken ve malzemenin uzama kabiliyeti boyunca vermeden önceki malzemenin şekil alabilirliği ifade etmektedir [4][5].



Şekil 1.1. Çeliklerin dayanım ve toplam uzama eğrisi [4].

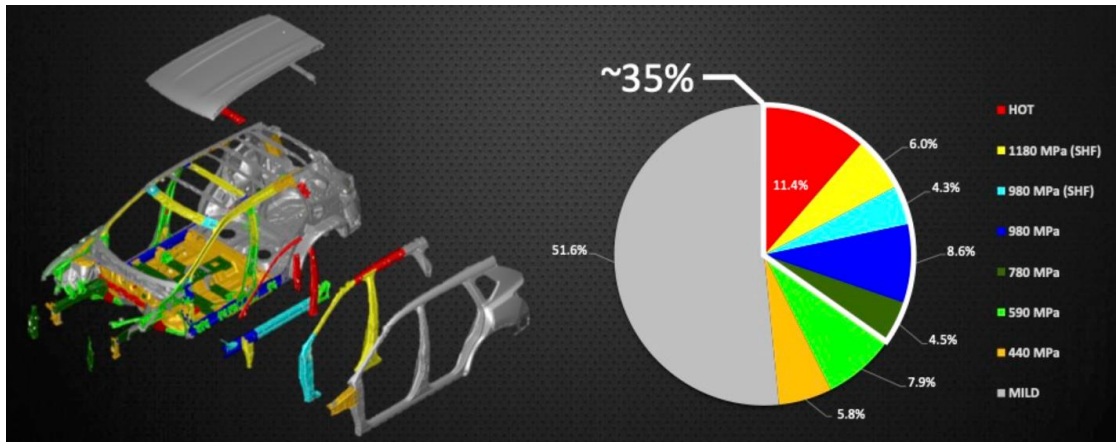
Modern otomotiv endüstrisi, başarılı Tesla örneğinde olduğu gibi alternatif enerji kaynaklarıyla tahrikli araçlar ve sürücüsüz akıllı araçlar üzerine çalışmalarına hızlı bir şekilde devam ettirmektedir. Araçların performansları her geçen gün artmaktadır. Daha etkili ve çevreci motorlar kullanılmakta, daha aerodinamik dış tasarımlar, sürtünme direnci düşük tekerlekler ve daha verimli transmisyonlar geliştirilmektedir. Yakıt sarfiyatı ve elektrikli araçların menzilleri bakımından araç hafifletme çalışmaları devam etmektedir. Yüksek mukavemetli çeliklerin araçlarda kullanım örnekleri aşağıdaki gibidir (Şekil 1.2) [6].



Şekil 1.2. Araçtaki metallerin kullanım yerlerinin gösterimi [6].

Yüksek mukavemetli sacların otomotiv endüstrisinde kullanımının incelendiği araştırmada, kalınlık azaltılması ile ağırlıkta % 24'lük bir kazanım elde etmek mümkün olabileceği belirtilmektedir. Gelecekte çift fazlı çeliklerin kullanımı daha artacağı, çift fazlı çeliklerin kullanımı ile yakıt tasarrufu ve gaz emisyonlarına katkısı fazla olacağı bilinmektedir [7].

2021 model Nissan Rogue modelinde yüksek mukavemetli sacların kullanımı gözükmemektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. 2021 model Nissan Rogue modelinde yüksek mukavemetli sacların kullanımı [8].

SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının şekillendirilebilme kabiliyeti ve geri yaylanma davranışları ile ilgili literatürde çalışma bulunmamıştır. Bu tez kapsamında, çekme testleri yapılarak malzemenin üç hadde yönünde mekanik özellikleri belirlenmiştir. Farklı proses parametrelerinde U bükme ve V bükme kalıpları tasarlanarak, numunelere mekanik pres ile büküm prosesi uygulanmıştır. Farklı malzeme modellerinde sonlu elemanlar analizleri yapılarak, SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının geri yaylanma davranışı incelenerek, deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar sonuçları karşılaştırılmıştır.



BÖLÜM 2

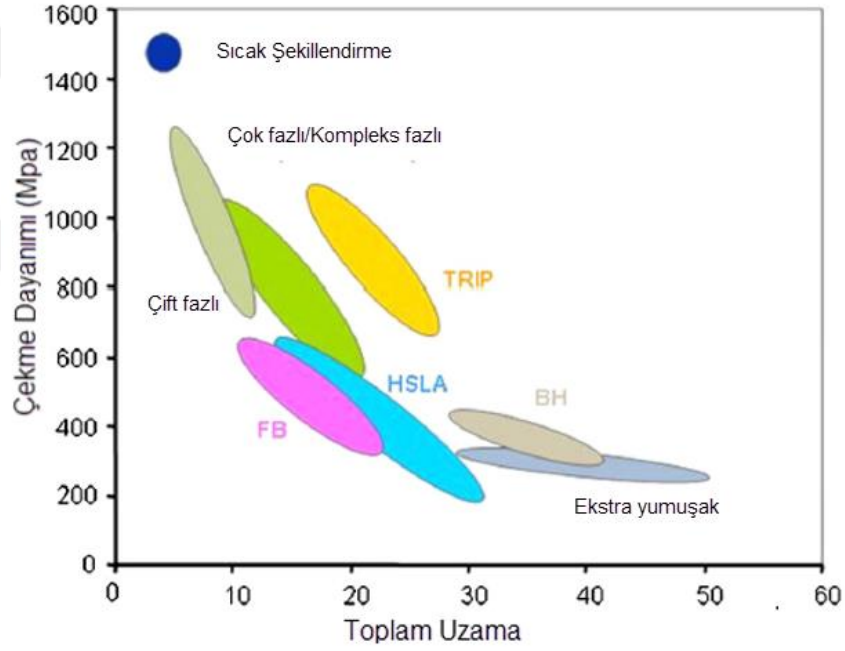
ÇİFT FAZLI ÇELİKLER

İki farklı fazın birleşmesiyle oluşan çift fazlı çelikler yüksek mukavemetli çelikler grubundandır. Malzemelerin akma mukavemetinin düşük olması deformasyonun düşük kuvvetle olmasını sağlar. Çift fazlı çeliklerden çekme mukavemetinin yüksek olması beklenir. Otomotiv üreticileri, hafif, yüksek dayanımlı, şekillendirme kabiliyeti yüksek malzemeler kullanmayı arzu etmektedirler. Özellikle otomotiv sektöründe taşıt ağırlığının azaltılması yakıt maliyetleri ve karbondioksit emisyon oranlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu isteklerin karşılanması maksadıyla üstün özelliklere sahip çift fazlı çelikler geliştirilmeye devam etmektedir.

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) ailesi üç nesile ayrılabilir. Öncelikle birinci AHSS nesli, çift fazlı (DP), karmaşık fazlı (CP), ferritik-bainitik (FB), martensitik (MS), transformasyon kaynaklı plastisite (TRIP) ve sıcak şekillendirilmiş (HF) çeliklerdir. İkinci AHSS nesli, esas olarak ikizlenme yoluyla plastisite kazanan çeliklerdir (TWIP). Birinci ve ikinci nesil AHSS, araç performans taleplerini karşılayacak niteliktedir. Üçüncü nesil AHSS araştırmaları devam etmektedir. Üçüncü nesil AHSS çelikler, karbür içermeyen beyritik çelikler, orta Mn çelikler ve Q&P çelikleri içermektedir. Üçüncü nesil AHSS ile daha yüksek mukavemet-süneklik kombinasyonları elde edilmesi amaçlanmaktadır [9].

Çift fazlı çelikler, yüksek mukavemet ve şekillendirilebilirlik kabiliyetleri ile otomotiv endüstrisinde yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerin yerini almıştır. Mikroyapıları yumuşak ferrit ve sert martensit fazlarından oluşmaktadır. 1970'lerin ortasından beri ferrit-martensit yapısı çift faz olarak adlandırılmaktadır. Mikroyapılarında az miktarlarda da olsa östenit, beyrit veya perlit içerebilmektedir. Dayanım miktarını martensit yapısı, sünekliği ise ferrit yapısı sağlamaktadır. Çift fazlı çelikler sürekli akma ve iyi pekleşme özelliğine sahiptir [10][11][12][13][14].

Araç güvenliğin artması isteği yüksek mukavemetli sacların kullanım ilgisini arttırmaktadır. Otomotiv endüstrisi, çarpışma direnci yüksek ve daha hafif çelikler talep etmektedir. Sertleşme mekanizmalarıyla malzemenin mekanik direnci artarken sünekliğin korunması beklenmektedir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çeliklerin çekme dayanımı, toplam uzama grafiği Şekil 2.1’de görülmektedir. 2020 yılında yeni Avrupa regülasyonlarında 95 g/km CO₂ emisyon değerleri belirlenirken 2030 yılında % 30 dahada azaltmayı hedeflemektedir. % 10 ağırlık azaltma % 5,5 oranında yakıt tasarrufu sağladığı düşünülürse, daha ince yüksek mukavemetli sacların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Araçların ağırlığının azaltılmasıyla yakıt tüketimi ve CO₂ değerlerinin düşmesi sağlanmaktadır [15][16][17].



Şekil 2.1. Otomotiv endüstrisinde kullanılan çeliklerin çekme dayanımı, uzama grafiği [16].

Artan pazar talebi, düşük maliyette yüksek mekanik mukavemette ve istenilen toklukta yüksek mukavemetli sacların üretimini talep etmektedir. İstenilen mekanik özelliklerin karşılanması uygun mikroyapının elde edilmesine bağlıdır [18][19]. Birçok araştırmacı çift fazlı çeliklerin mikro yapısı ile mekanik dayanımları arasındaki

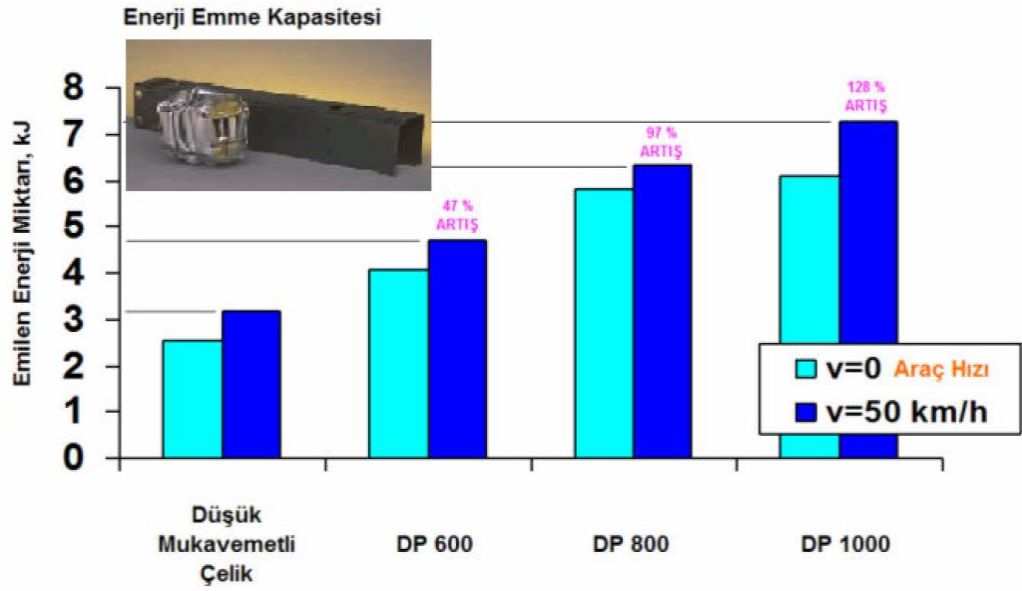
bağlantıyı tanımlamak için çalışma yapmıştır. Ferrit-beynit ve ferrit martensit fazındaki çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerinin karşılaştırıldığı çalışmada ferrit-beynit çift fazlı çeliğinin % 60-70 daha iyi mekanik özellik gösterdiği görülmüştür [20].

Çizelge 2.1’de otomotiv endüstrisinde kullanılan farklı malzemelerin mekanik özellikleri bulunmaktadır.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Özgül Sertlik (GPa/g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Özgül dayanım (MPa/g/cm ³)
Al Alaşımlar					
Al5754-O	2.7	70	26	215	80
Al5754-H26	2.7	70	26	290	107
Al6061-T6	2.7	70	26	310	115
Al7075-T651	2.8	71	25	570	204
Mg Alaşımlar					
Mg AZ31-H24	1.75	45	26	290	166
Çelikler					
Yumuşak Çelikler	7.8	211	27	300	38
DP600	7.8	211	27	600	77
DP980	7.8	211	27	980	126
DP1180	7.8	211	27	1180	151
Sıcak Şekillendirilmiş Çelikler	7.8	211	27	1700	218
3’üncü Nesil Çelikler	7.8	211	27	2000	256

Çizelge 2.1. Farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [5].

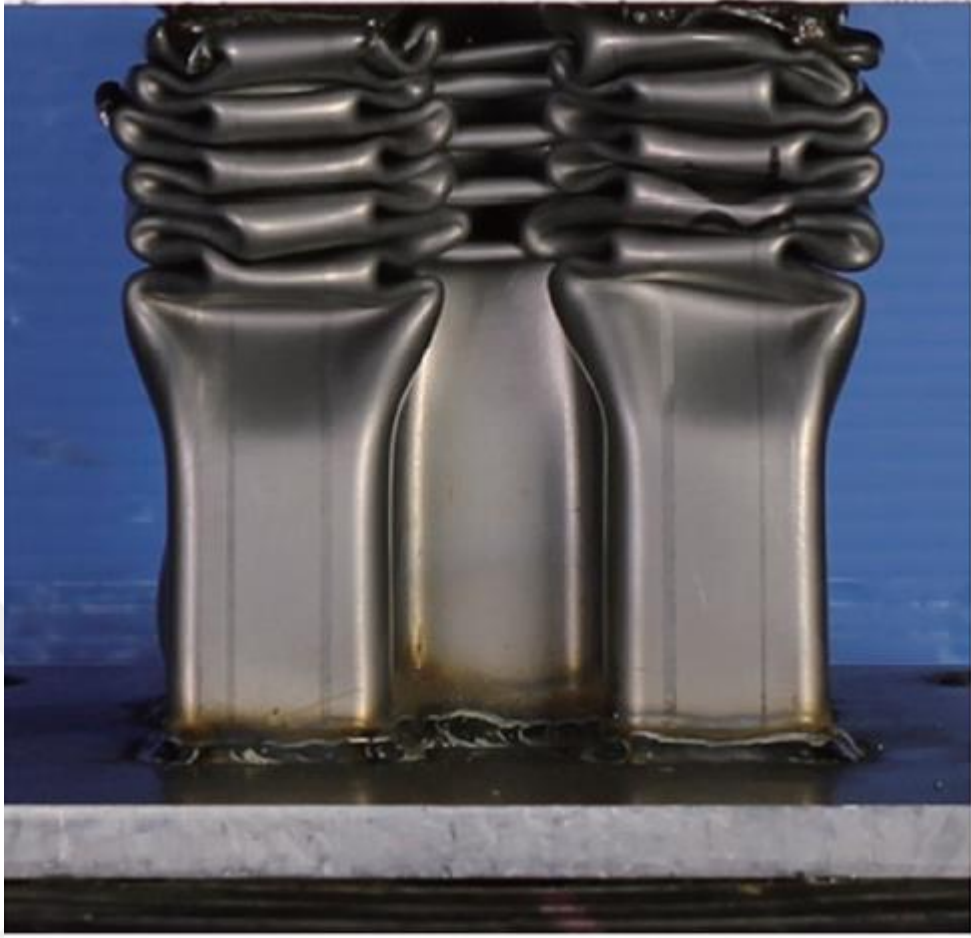
Çift fazlı çeliklerin kullanımı oldukça fazladır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli sacların deformasyon sertleşmesi ve çekme dayanımları yüksektir. Yüksek enerji sönümleme kabiliyetlerinden dolayı güvenlik açısından tercih edilmektedirler (Şekil 2.2). Araç gövdelerinin ince yüksek mukavemetli saclardan yapılmasıyla ağırlık azaltımında fayda sağlamaktadırlar. Çift fazlı çeliklerde akma/çekme oranı düşüktür, dolayısıyla form verilebilirlikleri yüksektir. Fırında sertleşebilirlik kabiliyetleri yüksektir [17].



Şekil 2.2. Farklı malzemelerin enerji emme miktarlarının karşılaştırılması [17].

Çift fazlı çelikler, yoğun olarak çarpışma bölgelerinde olan kaput, tampon, B direği, şase parçaları, jant, araç zemini, koltuk parçaları, tampon bileşenleri gibi yerlerde kullanılmaktadır [21].

Şekillenebilme kabiliyeti kadar enerji absorbe edebilme özelliğide yüksek mukavemetli çeliklerden beklenen özelliklerdendir. Şekil 2.3'de aksenal olarak ezilmiş çekme dayanımı 1180 MPa olan çeliğin görüntüsü gözükmemektedir. Çekme dayanımı 1180 MPa olan çelik çekme dayanımı, 590 MPa olan çeliğe nazaran 1,6 kez fazla enerji absorbe edebilme özelliği gösterirken, % 30 oranında ağırlık azaltılmasını sağlamaktadır [22].



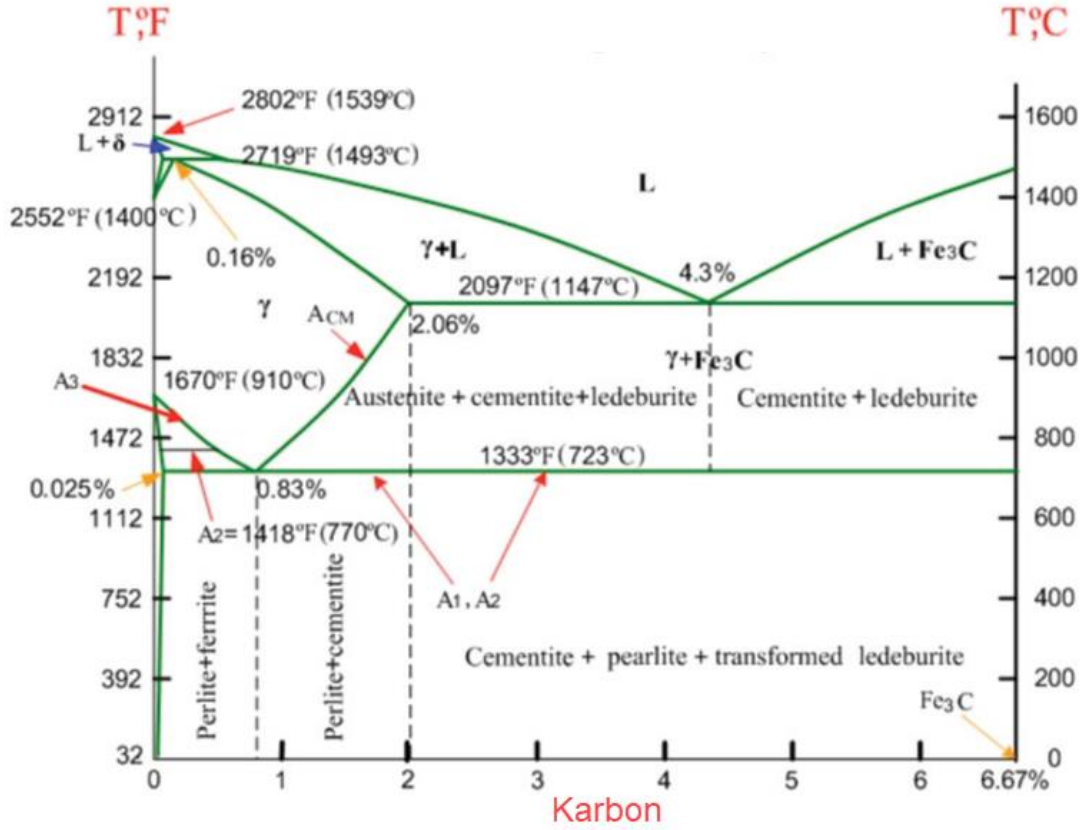
Şekil 2.3. 1180 MPa yüksek mukavemetli çeliğin aksenal çarpışmada enerji absorbe edebilme kabiliyeti [22].

2.1. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN ÜRETİMİ

İdeal çift fazlı çelik özelliklerini sağlamak için üretim şartları ve ısıl işlem rotalarının belirlenmesi gerekmektedir. Faz hacim oranlarının ayarlanabilmesi istenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi çift fazlı çelikleri ön plana çıkarmaktadır. Çift fazlı çeliklerin üretiminde temel hususu, kritik sıcaklıklarda tavlama ve su verme oluşturmaktadır [23][24].

Çift fazlı çelikler $Fe-Fe_3C$ denge diyagramında A_{c1} - A_{c2} sıcaklık aralığında (ferrit-östenit bölgesinden) belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp bekleme sonrasında östenitin martenzite dönüşebileceği hızlarda soğutulmasıyla üretilirler (Şekil 2.4). Çift fazlı çelikler düşük akma mukavemeti, yüksek pekleşme oranı, yüksek çekme mukavemeti,

eşdeğer uzama ve toplam uzama değerleri gösterirler. Pekleşme oranlarının yüksek olması şekillendirme sonrası mukavemetlerinin artmasını sağlamaktadır [23][14].



Şekil 2.4. Demir Karbon denge diyagramı [23].

Çift fazlı çeliklerin faz oranı kritik tavlama sıcaklığı, soğutma ortamına göre değişiklik göstermektedir. Yapılan araştırmada, kritik tavlama sıcaklığının artmasıyla martenzit oranının arttığı görülmektedir. Kimyasal kompozisyonda Mn ve Ni kullanılarak sertleşebilirlik artırılmıştır. Martenzit oranının en yüksek olduğu çift fazlı çelik örneklerinde en yüksek akma mukavemetli, en yüksek çekme mukavemet değeri ve uzamanın en düşük olduğu görülmektedir [25].

Çift fazlı çelikler üç şekilde üretilmektedir;

1. Sıcak haddeleme esnasında,
2. Sürekli tavlama,

3. Kutu tavlama.

İdeal çift fazlı çelik yapısının üretilmesinde kimyasal kompozisyon ile sertleşebilirlik, tavlama ve soğuma profilleri arasındaki ilişki önemlidir.

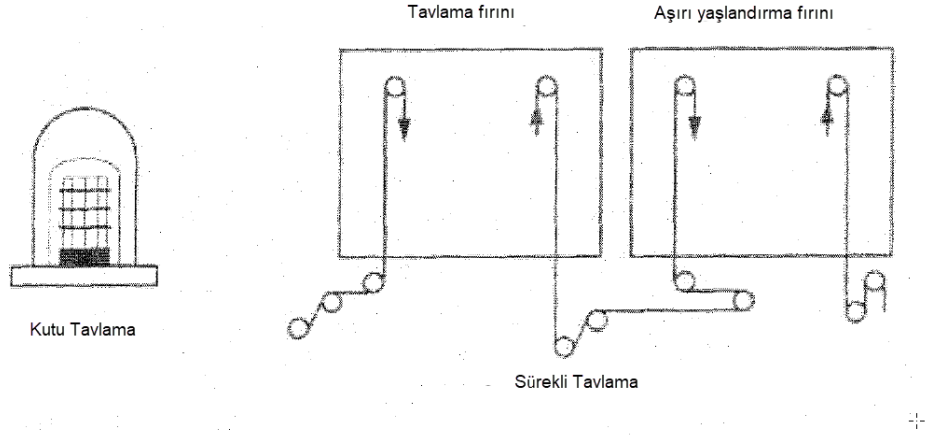
2.1.1 Sıcak Haddelme Sırasında Üretim

Daha ekonomik bir yöntem olduğundan dolayı ticari olarak tercih edilmektedir. Diğer imalat yöntemlerine göre basittir. Uygun ticari çift fazlı çeliğin elde edilebilmesi haddelme sonunda soğuma hızı ve uygun elementler ile alaşımlandırılmasıyla mümkündür [24].

2.1.2 Sürekli Tavlama Hatları ve Çift Fazlı Çelik Üretimi

Soğuk haddelenmiş çelik saclar kimyasal yada elektronik temizlenerek, 675-850°C’de tavllanır. Bu sıcaklıklarda yaklaşık 1 dakika tutularak hızlı soğutulur ve sonunda aşırı yaşlandırma işlemlerine tabi tutulur (Şekil 2.5). Çift fazlı çeliğin mekanik özellikleri fırın sıcaklığı kadar fırın içindeki hareket hızına bağlıdır [24].

Sıcak veya soğuk haddelenmiş sac, bobinlenmeden istenilen mikroyapıyı oluşturmak amacıyla $\alpha+\gamma$ bölgesinde tavllanır. Özellikle boyama performansı bakımından kutu tavlama ile üretilen çeliklere göre daha iyi yüzeyler elde edilir [24].



Şekil 2.5. Kutu ve sürekli tavlama işlemlerinin şematik gösterimi [24].

2.1.3 Kutu Tavlama

Çok az kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde soğuk haddelenen sac, istenilen kalınlığa geldikten sonra rulo sarılır. İstenilen sıcaklıklarda tavlanan rulo sac havada veya suda soğutulur. Rulonun iç kısmından dış kısmına doğru sıcaklık farklarının olması önemli bir dezavantaj olarak görülmektedir [26].

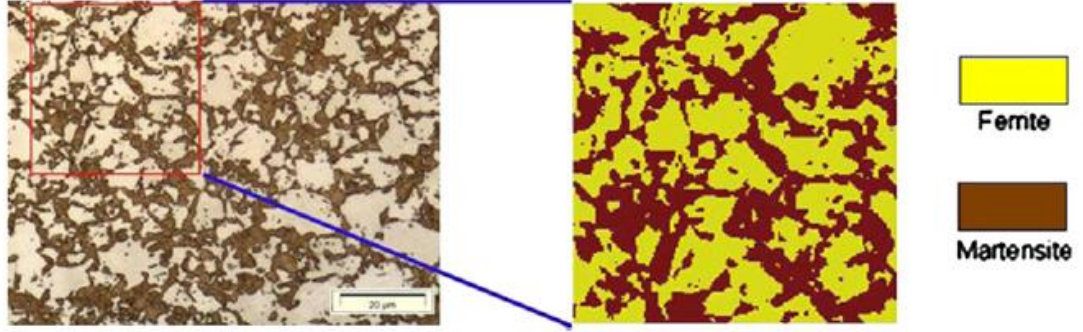
2.2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERİN MİKRO YAPISI

Yüksek mukavemetli sacların gelişimi son yıllarda hızla devam etmektedir. Çok fazlı çeliklerden beklenen yüksek süneklik ve yüksek mukavemet gibi farklı özellikler bu fazların uyumuna bağlıdır.

2.2.1. Ferrit

Ferrit, demirde (HMK) az miktarda karbonun erimesiyle oluşan bir arayer katı eriyiğidir. Demir-karbon denge diyagramında “ α ” işaretiyle gösterilen bölgede oluşur. Ferritte çözünebilen en fazla karbon miktarı % 0,008 karbon çözünür. Çelikteki en yumuşak fazdır. Çift fazlı çeliklerde ferrit morfolojisi ve ferrit tane boyutları önemlidir. Saf demirin oda sıcaklığındaki HMK yapısı α -demir veya ferrit olarak

adlandırılır. Yumuşak ferritik yapı, yüksek mukavemet değerlerine rağmen mükemmel bir form verilebilirliği sağlar (Şekil 2.6) [17][26][27].



Şekil 2.6. Çift fazlı çelik iç yapısı [28].

2.2.2. Martensit

Ostenitik yapı oluşana kadar ısıtılan Fe-C alaşımları su verme ile çok hızlı bir şekilde düşük sıcaklıklara soğutulursa tek fazlı iğnemsiz martensit faz meydana gelir. Bu yapının oluşumunda kafes yapısının hacim merkezli tetragonal yapıya dönüşümü etkilidir. Östenitin hızla soğutulması sonucu elde edilen iğneli ve sert bir yapıdır. Yaklaşık 200-250 °C civarında dönüşür. Çift fazlı çeliklerin mukavemetini ve sünekliğini çelikteki martensit oranı belirlemektedir. Martensit oranı arttıkça form verilebilirlik düşmektedir (Şekil 2.6) [17].

2.2.3. Kalıntı Östenit

Yapı içerisinde ferrit ve martensit ile birlikte düşük oranlarda kalıntı östenit veya malzemenin yırtılmadan uzayabilme kabiliyetini arttıran beynit fazları da bulunabilir [17].

2.3. ÇİFT FAZLI ÇELİKLERDE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Topraktan çeşitli bileşikler halinde çıkartılan demir filizleri, yüksek fırınlarda redüklenir. Elde edilen ham demir, çelik ve dökme demir elde etmek için üretim fırınlarına gönderilir. % 2'nin altında kalan karbon içeren malzemeler çelik, üstünde ise dökme demir olarak adlandırılmaktadır. Çeliklerin alaşım elementleri ve etkileri aşağıda belirtilmiştir.

Kimyasal birleşimi değiştirilerek veya kritik sıcaklıklarda soğutma hızını kontrol ederek farklı mukavemet değerlerine sahip çift fazlı çelikler elde edilebilmektedir. Örneğin farklı üreticilerin ürettiği DP 800 çeliğinin farklı mikroyapı ve mekanik özellikleri gösterdiği görülmüştür. Anizotropi değerlerinin farklı olmasından dolayı, özellikle hadde yönüne dik yönde farklı süneklik ve akma dayanımı görülmüştür. Daha yüksek Mn ve Cr ilavesi martensit faz yapısını arttırmaktadır, bunun sonucunda da pekleşme üstü artmaktadır [29].

2.3.1. Karbon (C): Çeliğin temel alaşım elemanıdır. Çeliğin içindeki sertliği karbon sağlar. Çekme dayanımı artırır. Çelikteki sertlik değeri karbon miktarına göre değişiklik göstermektedir. Yüksek karbon miktarı sünekliği, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. Şekillendirilmeleri zor olan yüksek karbonlu çelikler (% 1-1,7 arasında) ise yüksek mukavemete sahiptir [30][31].

2.3.2. Alüminyum (Al): En güçlü oksijen ve nitrojen giderici eleman olarak çelik üretiminde kullanılır. Yaşlanma direncini artırır. Çelik üretiminde taneleri inceltir [31].

2.3.3. Bakır (Cu): Çeliğin dayanımını ve sertliğini artırır, sünekliği düşürür. Korozyon dayanımını iyileştirir [31].

2.3.4. Kurşun (Pb): Çelikte çözünmez [31].

2.3.5. Bor (B): Düşük ve orta karbonlu çeliklerin sertleşebilirliğini artırır. Kaynak yapılma imkanını azaltır [31].

2.3.6. Seryum (Ce): Temizleyici etkisi vardır.

2.3.7. Krom (Cr): Sertleştirilebilirliği arttırmaktadır. Darbe dayanımını artırır. Korozyon dayanımı için % 13'ün üzerinde kalması gerekir. Süneklik ve sertlik arasında optimum bir denge oluşmasını sağlar. Yüksek sıcaklıklarda dayanımı sağlar. Paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementidir [31].

2.3.8. Kalsiyum (Ca): Silisle birlikte oksijen gidermede kullanılır.

2.3.9. Kobalt (Co): Sertleşebilmeyi azaltır. Manyetik özelliklere olumlu katkısı vardır. Sıcaklığa dayanımını artırır [31].

2.3.10. Magnezyum (Mg): Dökme demirlerde grafitleri küreselleştirme amacıyla kullanılır.

2.3.11. Mangan (Mn): Çeliğin dayanımını iyileştirir, bir miktar sünekliği azaltır. Çeliklerde % 1,6'ya kadar ilave edilir. Kritik soğuma hızını düşürerek sertleştirilebilirliği iyileştirebilir. Çeliğin yüzey kalitesini iyileştirir. % 3 Mn miktarına kadar, her % 1 Mn artışı ile çekme dayanımı 100 MPa artar. Manganın iyi yöndeki etkisi karbon oranının artmasıyla birlikte artar. Çeliğin kaynak edilebilme özelliğini artırır [31].

2.3.12. Molibden (Mo): Karbür yapıcı elementtir. Kritik soğuma hızını düşürür, sertleşebilirlik ve sertlik özelliklerini geliştirir. Gevrekliği engeller [31].

2.3.13. Nikel (Ni): Çeliğin darbe dayanımını geliştirir. Paslanmaz çeliklerde kromla birlikte en önemli elementtir, sıcağa karşı dayanımı iyileştirir [31].

2.3.14. Fosfor (P): Ferritin dayanımını en fazla arttıran elementtir. Çeliğin dayanımı ve sertliğini artırıcı, buna rağmen şekillendirme yönünde süneklik ve darbe dayanımını azaltıcı etki yapar, gevrek kırılmaya neden olmaktadır. Talaşlı imalat kabiliyetini artırır [31].

2.3.15. Kükürt (S): İstenmeyen bir elementtir ve azaltılmaya çalışılır. Çeliği gevrekleştirir ve kaynak çatlama eğilimi yüksektir. Kükürt miktarı yükseldikçe şekillendirmeye dik doğrultuda süneklik ve darbe dayanımı düşer. Mangan ile dengelenmediğinde kırılmalığa neden olmaktadır. Mangan oranının, kükürt oranının 2 ile 8 katı olması beklenir [31].

2.3.16. Silisyum (Si): Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılan bir elementtir. Akma dayanımını, çekme dayanımını ve sertliği artırır, aşınma dayanımını iyileştirir [31].

2.3.17. Vanadyum: Sertliği ve kaynak yapılma özelliğini geliştirir. Çentik dayanımınıda kuvvetlendirir. Çeliğin yüksek sıcaklıklara dayanımını artırır [31][32].

2.3.18. Hidrojen (H): Gevrekliğe sebep olmaktadır. Çeliğin yorulma direncini azaltır.

2.3.19. Volfram (W): Çeliğin dayanımı artırır. Tokluğu iyileştirir. Aşınma dayanımını artırır [31].

2.3.20. Niobyum (Nb): Güçlü bir karbür yapıcı ve ferrit oluşturunusudur. Sertliği ve akma sınırını yükseltir [31].

2.3.21. Titanyum (Ti): Titanyum mukavemet artışı sağlar. Kaynak esnasında ısı tesiri altındaki bölgede tane kabalaşmasını engeller. Şekillendirmeye olumsuz etkisi olabilir [32].

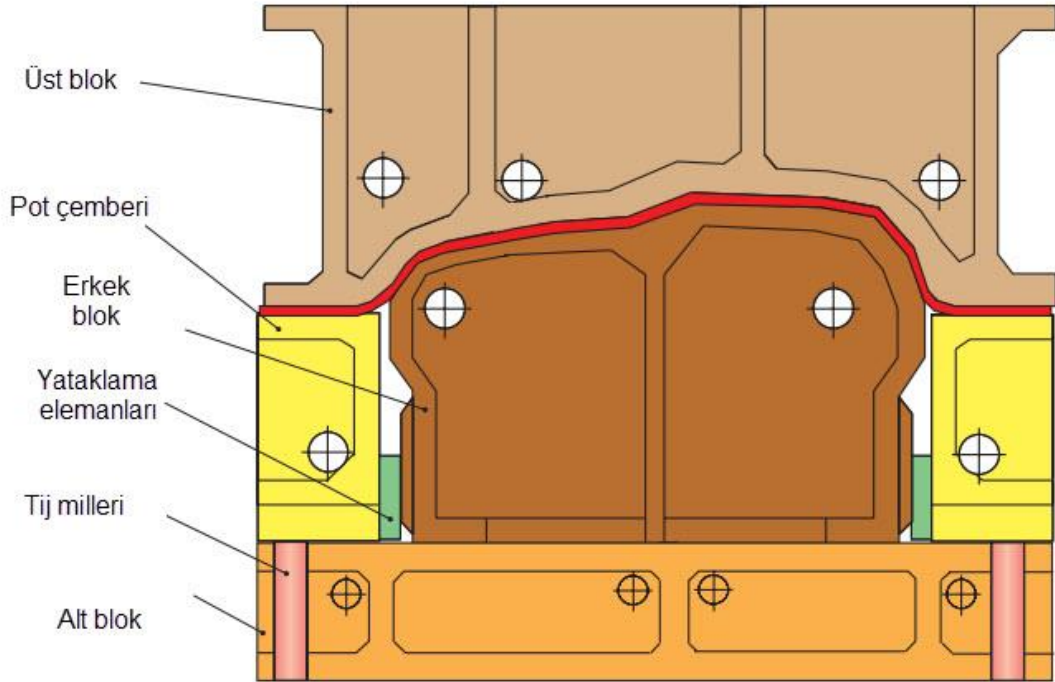
2.3.22. Nitrojen (N): Kızıl sertliği arttırmak ve tane büyümesini engellemek amacıyla kullanılmaktadır.

BÖLÜM 3

SAC METAL ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

3.1. DERİN ÇEKME

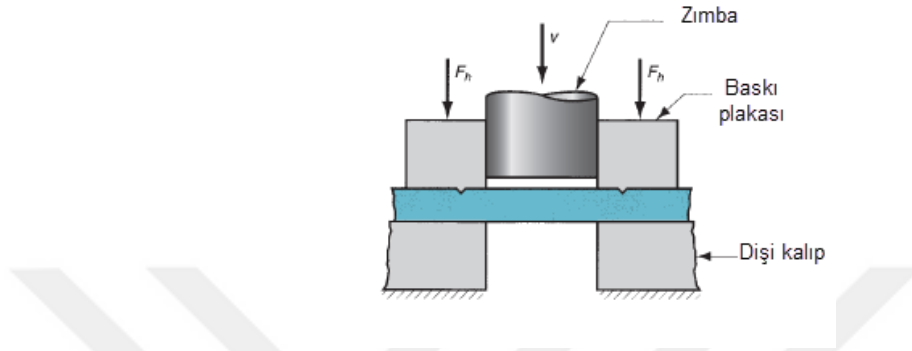
Saç malzemenin pot çemberi yardımıyla erkek blok üzerine sıvanarak istenilen geometriye getirilme işlemidir. İyi bir çekme kalıbın yapılabilmesi için, proses planı, gerekli çekme kuvvetinin hesaplanması, malzemenin mekanik davranışının bilinmesi, kalıp yüzeylerinin pürüzlülüğü, sac acınımı gibi parametrelerin düşünülmesi gerekmektedir. Şekil 3.1’de çekme kalıp elemanları görülmektedir.



Şekil 3.1. Çekme kalıbı parçaları [33].

3.2. DELME VE KESME KALIPLARI

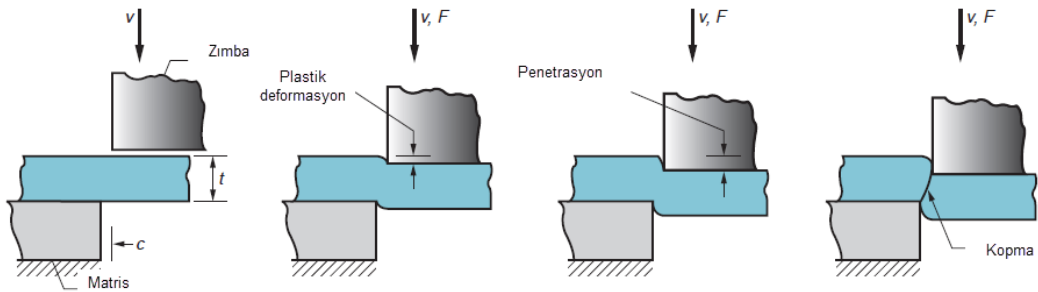
Kesici zımba ile talaş kaldırmadan malzemenin belli bir geometriye göre ayrılması olarak tanımlanır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kesme işlemi

Zımba ile sac metaldan yapılan kesme sonucu kesilen parça iş parçası olarak kullanılacaksa kesme kalıbı, kesilen parça kullanılmayacak, hurda ise delme kalıbı olarak adlandırılır.

Kesme olayının aşamaları; plastik deformasyon, batma, kopma, ayrılma olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.3).



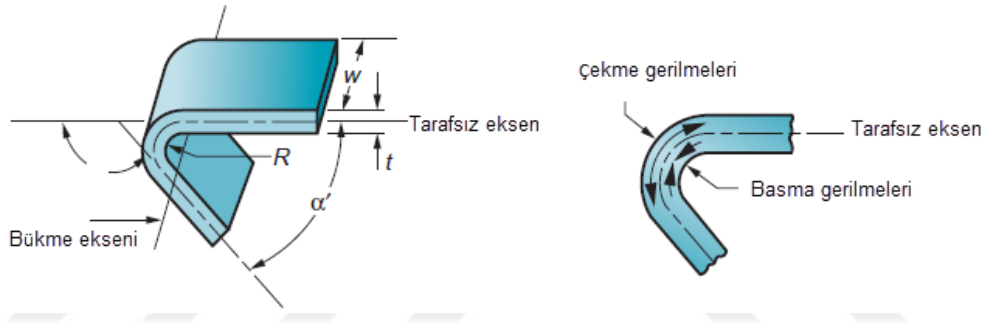
Şekil 3.3. Kesme işleminin incelenmesi

Kesme kuvveti $F = StL$ denkleminde hesaplanır.

3.3. BÜKME KALIPLARI

3.3.1. Bükme Olayının İncelenmesi

Bükme; metallerin, yüzeylerinde çok az veya hiç değişiklik olmadan doğrusal bir eksen boyunca plastik deformasyona uğraması olarak tanımlanmaktadır. Bükme kalıpları sac metal kalıpcılığında önemli bir yere sahiptir. Bükülen parçanın iç yüzeyinde basma gerilimi, dış yüzeyinde ise çekme gerilimi meydana gelir (Şekil 3.4). İç yüzeyler kısaltmaya dış yüzeyler uzamaya çalışır. Bu nedenle, bükme işlemine tabi tutulan parça, kalıptan çıktıktan sonra bir miktar esner. Malzeme hacmi değişmez kabul edilir. Sacın tarafsız eksenini orinal uzunluğunu korumaktadır [34].

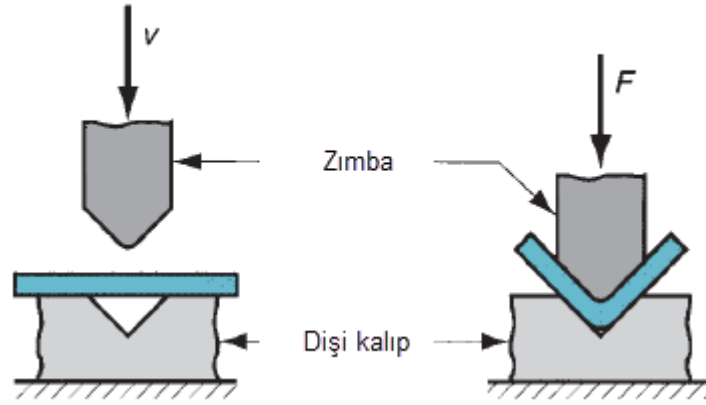


Şekil 3.4. Bükme işleminin incelenmesi [35].

Bükülen malzeme kesitinde meydana gelen değişimler, kalınlığa, malzemenin mekanik özelliklerine, bükme açısına, bükme yarıçapına, pres kuvvetine ve ütüleme süresi gibi parametrelere bağlıdır.

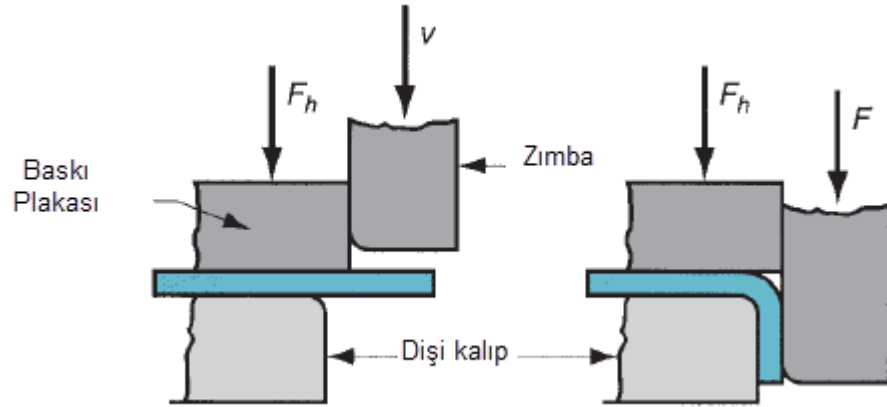
3.3.2. Bükme Kalıpları

Bükme kalıpları yaygın olmak üzere, V bükme ve kenar bükme olmak üzere olarak ikiye ayrılır. Sac bükme operasyonları içinde en yaygın kullanım alanlarından birisi V bükme prosesidir. V tip zımba ile V kalıpta pres kuvvetiyle parça plâstik şekil değişimine uğrar ve malzemede gerilimler oluşur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. V bükme [35].

Kenar bükme parçanın dayanımını arttırmak ve estetik görünüm sağlamak için yapılır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kenar bükme [35].

Kullanılacak parçaların fonksiyonlarına göre aşağıda tanımlandığı gibi diğer bükme kalıp örnekleri görülmektedir (Şekil 3.7-3.8).

c. düz flanşlama

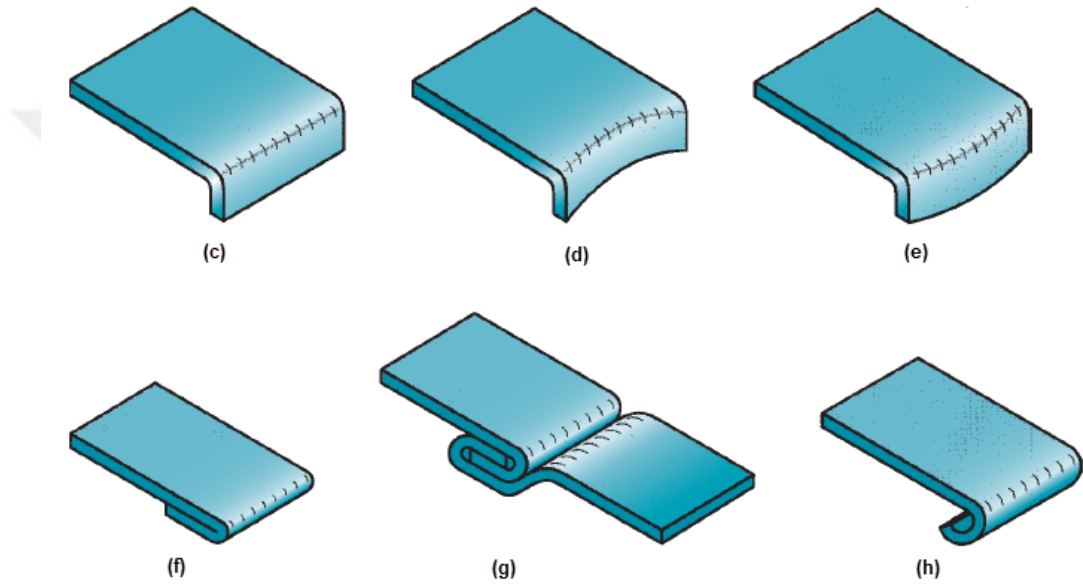
d. streç flanşlama

e. Büzme flanşlama

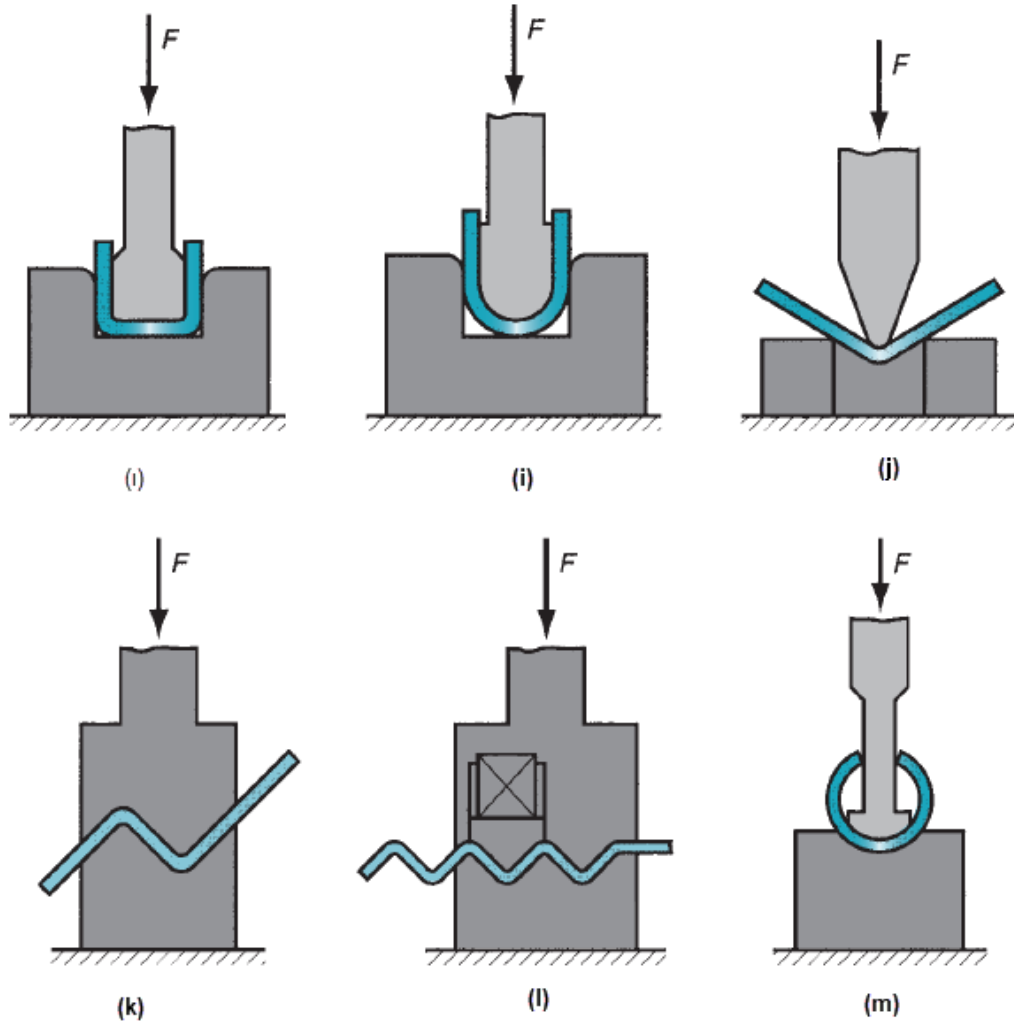
f. Kıvrırma

g. Katlama ve kenet bükme

- h. kıvrırma
- ı. Kanal bükme
- ı. U bükme
- j. Serbest bükme
- k. Ofset bükme
- ı. Oluklama bükme
- m. Tüp büküm



Şekil 3.7. Bükme çeşitleri [35].



Şekil 3.8. Bükme çeşitleri [35].

3.3.3. Bükme Kuvvetinin Hesaplanması

V Bükme kuvveti, Eşitlik 2.1'den hesaplanmıştır [36].

$$P_b = \frac{c\rho_b S^2 b}{w} \quad (2.1)$$

P_b : Bükme kuvveti (kg)

b: Parça genişliği (mm)

S: Parça kalınlığı (mm)

ρ_b : Malzemenin çekme gerilmesi (kg/mm^2)

w: Kalıp genişliği

c: Katsayı

U bükme kalıp elemanları Şekil 3.9’da gösterilmiştir. U bükme kuvveti aşağıdaki denklemden hesaplanır [34].

$$P_u = 0.666 \frac{\tau/k W T^2}{L} \quad (2.2)$$

P_u : U kalıbında bükme kuvveti

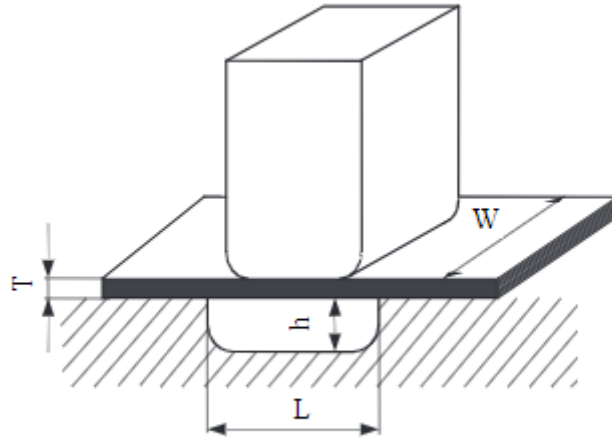
L : Kalıp genişliği

W : Bükülecek şerit genişliği

h : Bükme derinliği

T : Malzeme kalınlığı

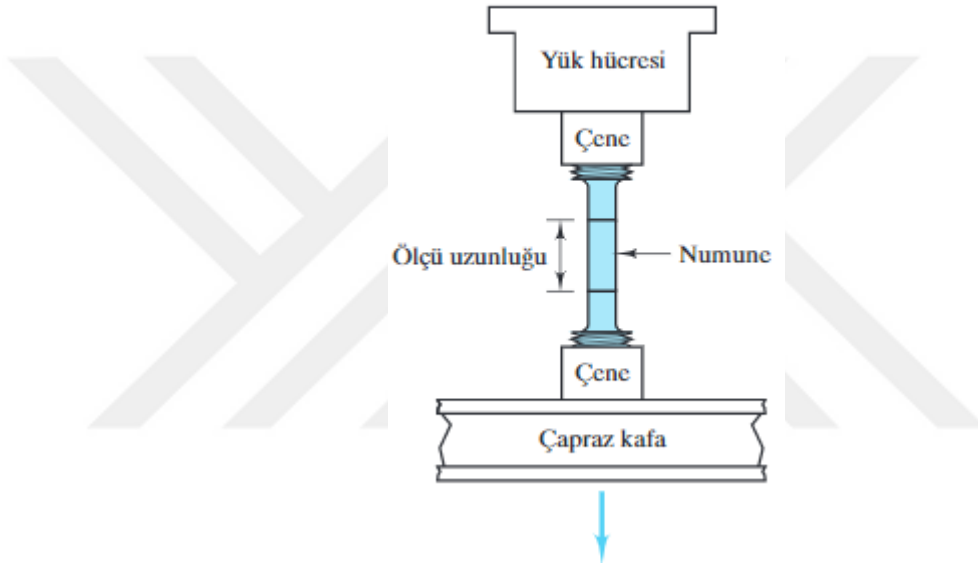
τ/k : Kayma gerilmesi



Şekil 3.9. U büküm kalıp elemanları [34].

3.4 GERİLME ŞEKİL DEĞİŞTİRME İLİŞKİSİ

Çekme deneyi metaller, alaşımlar, seramik ve kompozit malzemelere uygulanan mekanik deneydir. Malzemelerin mekanik özellikleri çekme deneyleriyle belirlenmektedir (Şekil 3.10). Numune belirli bir hızla çekildikçe, malzemenin uzaması için gereken yük belirlenir. Çekme testi sonucunda gerilme-birim şekillendirme eğrisi elde edilir.

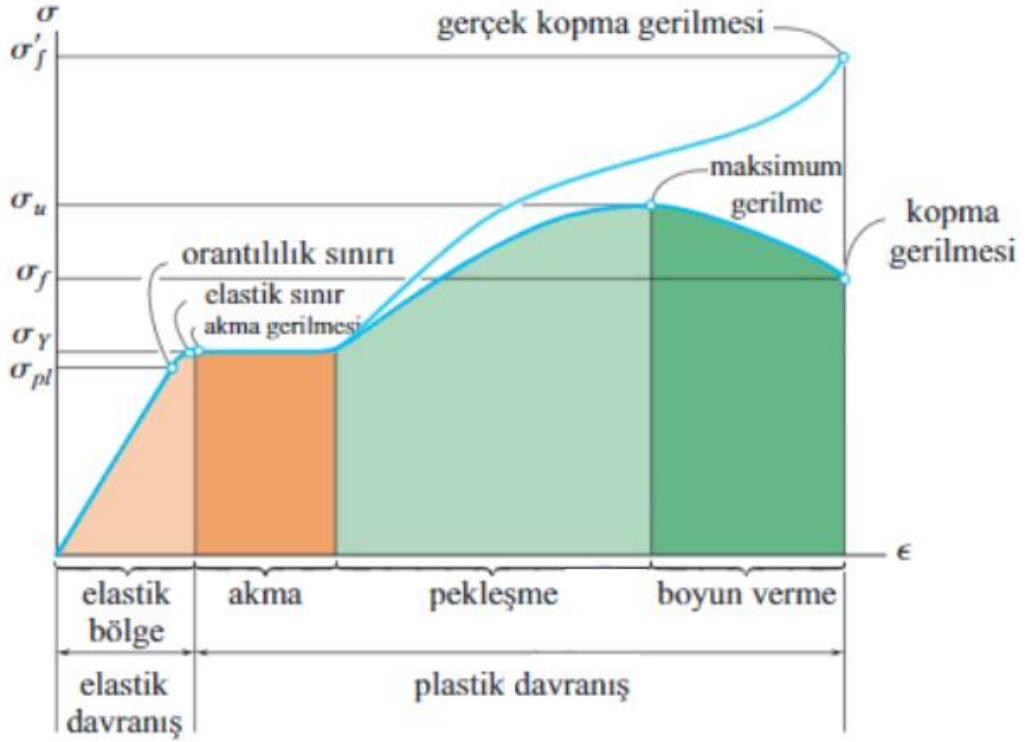


Şekil 3.10. Çekme deney düzeneği [37].

Gerilim gerinim eğrisi numuneye uygulanan yük ile bu yük neticesinde numunenin boyunda meydana gelen uzamayı gösterir. Malzeme kopmaya uğramadan önce uzamadan dolayı bir miktar kesit daralmasına uğrar. Eğer bu kesit daralması anlık olarak yansıtılırsa gerçek gerilme eğrisi elde edilir. Mühendislik gerilme eğrisinde ise kesitteki daralmalar dikkate alınmaz ve test başlangıcındaki kesit alanı dikkate alınır.

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi gerilme birim şekil değiştirme eğrisi elastik deformasyon ve plastik deformasyon bölgesi olmak üzere iki bölgeye ayrılır. Elastik bölgede numuneye etki eden gerilme ile birim şekil değiştirme arasında lineer bir ilişki vardır. Elastik bölgede numuneye uygulanan yük kaldırılırsa numune ilk haline geri döner.

Akma dayanımından daha fazla yük uygulandığında plastik şekil değişimi başlar, numune kalıcı olarak uzar. Numunenin üzerinden yük kalkarsa parça ilk haline dönmez. Plastik deformasyon bölümü pekleşme ve boyun vermenin olduğu kısım olmak üzere ikiye ayrılır. Plastik deformasyon bölgesi geniş olan malzemeler sünek malzeme olarak tanımlanır. Plastik deformasyon bölgesi dar olan malzemeler gevrek malzeme olarak tanımlanır.



Şekil 3.11. Gerçek ve mühendislik gerilme şekil değiştirme eğrileri [37].

Bu eğrideki mühendislik gerilmesi;

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

Mühendislik birim şekil değişimi;

$$(3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$$

Gerçek gerilme;

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + e) \quad (3.3)$$

Gerçek şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3.4)$$

denklemlerinden elde edilir.

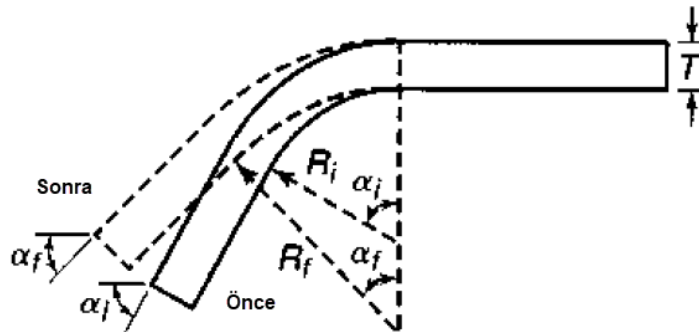
BÖLÜM 4

GERİ YAYLANMA DAVRANIŞI

4.1. GERİ YAYLANMANIN TANIMI

Sac metal şekillendirmede en önemli problemlerden bir tanesi geri yaylanmadır. Pres yükünün parça üzerinden kalktıktan sonra parçanın geometrisini koruyamaması olarak tanımlanabilir (Şekil 4.1). Diğer bir deyişle, sac malzemeye uygulanan bükme momentinin ortadan kalmasıyla sacın elastik toparlanması olarak adlandırılabilir. Geri yaylanmaya kalıp tasarımlarından önce tedbir alınmazsa, sonraki operasyonlarda montaj problemleriyle karşılaşabilmektedir. Sonlu elemanlar analizleri kullanılarak, geri yaylanmalar tahmin edilerek, üretimdeki hatalar en aza indirilmektedir. Özellikle yüksek mukavemetli sacların şekillenebilme davranışları bilinmelidir. Geri yaylanmayı aşağıdaki denklemden yaklaşık olarak hesaplayabiliriz. R/T oranı arttıkça geri yaylanma arttığı, akma dayanımı arttığında geri yaylanmanın arttığı görülmektedir [38].

$$\frac{R_i}{R_f} = 4\left(\frac{R_i Y}{ET}\right)^3 - 3\left(\frac{R_i Y}{ET}\right) + 1 \quad (4.1)$$

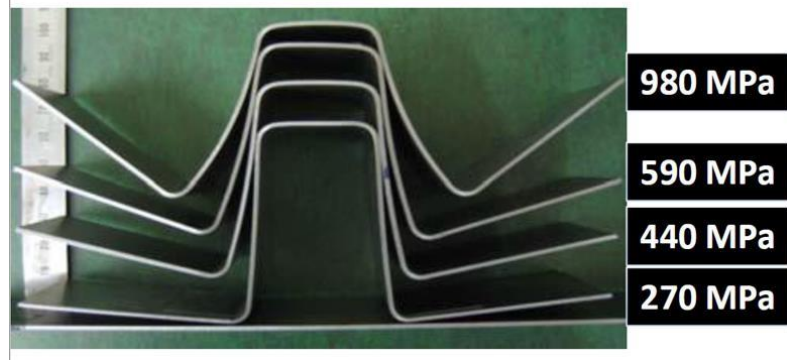


Şekil 4.1. Geri yaylanmanın gösterimi [39].

4.2. LİTERATÜR TARAMASI

Çift fazlı saclar, ferrit ve martenzit adalarından oluşmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı ultra yüksek mukavemetli saclar için bükülebilirlik önemli bir özelliktir. Sacların bükülebilirlik davranışları V bükme prosesinde veya sürtünmesiz bükme testlerinde incelenmektedir. İyi pekleşme özelliği gösteren sacların ve hadde yönüne paralel bükümlerde sacın daha iyi bükülebilirlik gösterdiği gözlenmiştir [40]. Kalıp açısının artması ile birlikte bükme momenti artmaktadır. Bunun sonucunda geri yaylanmalar artmaktadır. Ütöleme süresinin artmasıyla elastik geri kazanım azalmakta ve geri yaylanma değerleri azalmaktadır [41][42][43]. Sac kalınlığı, zımba yarıçapı, büküm açısı önemli büküm parametrelerindendir [44][45]. Sacın ileri veya geri yaylanması proses parametrelerinin tasarımına bağlıdır. Büküm açısının ve zımba yarıçapının artmasıyla geri yaylanma artmaktadır [44][46][47][48].

Sacların mukavemet değerleri yükseldikçe şekillendirilme zorlukları ortaya çıkmaktadır. Malzemenin mukavemeti arttıkça geri yaylanma değerleri artmaktadır (Şekil 4.2) [49].



Şekil 4.2. Farklı mukavemet değerlerindeki parçaların geri yaylanma değerleri [49].

Farklı tavlama sıcaklıklarında ve farklı tavlama sıcaklıklarda tutma sürelerinde A17075-T6 sac malzemesinin farklı büküm açılarında V büküm şekillendirilebilirliği ve geri yaylanma davranışı araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda tavlanan numunelerde düşük sıcaklıklarda tavlanan numunelere göre % 80-90 oranlarında daha az geri yaylanma meydana gelmiştir [50].

V bükmede proses parametrelerinin etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile etkisinin incelendiği çalışmada, hadde yönüne dik yapılan bükümlerde hadde yönündeki deneylere göre daha fazla geri yaylanma görülmüştür. 5 integrasyon noktalı simülasyon minimum zamanda ve en doğru geri yaylanmayı tahmin etmiştir. Sürtünme katsayısının değişiminin geri yaylanma üzerinde etkisi görülmüştür [51].

Aydın ve Karaağaç, DP600 ve HSLA300 saclarını farklı ütüleme süresi ve farklı kalıp açılarında sacların geri yaylanma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ütüleme süresinin artmasıyla geri yaylanma miktarı azalmıştır. Kalıp açısının artmasıyla her iki malzemede geri esneme miktarı önce artmış, daha sonra azalmıştır. DP600 sacında HSLA300' e göre daha fazla geri yaylanma meydana geldiği görülmüştür [52]. Ayrıca sacların V büküm prosesi sonundaki deformasyon ve kırılma davranışları bilinerek kalıp imalatı öncesi tedbir alınmalıdır [53]. Proses parametreleri tasarım esnasında belirleyici rol oynamaktadır. U bükme prosesinde zımba hızının artmasıyla geri yaylanma değerleri artmaktadır [54]. Farklı yüksek mukavemetli sacların deformasyon davranışlarının incelendiği çalışmada, çift fazlı sacların daha iyi şekillendirilebilirlik davranışı gösterdiği ve V bükme prosesinde farklı büküm açılarında zımbanın saca temas ettiği kısımlarda sacların kırılma davranışı gösterdiği görülmüştür. Bu durum sacların mikro yapılarından kaynaklanmaktadır [55]. Wasif vd. bükme operasyonunda JSC440 ve JSC590 yüksek mukavemetli çeliklerinin, kalınlık, genişlik, büküm açısı ve pres parametrelerine bağlı olarak V bükme operasyonunda geri yaylanma davranışlarını incelemişlerdir. Yüksek mukavemetli çelikler, yüksek artık gerilmelerinden dolayı büküm ile birlikte negatif geri yaylanma davranışı sergilemektedir. 90° kalıp açısında 60° ve 120°'ye nazaran daha fazla geri yaylanma görülmüştür [56].

Sac malzeme kalınlığının artması geri esneme miktarını arttırdığı, zımbanın sac üzerinde bekletilmesi geri esnemeyi azalttığı, yüksek mukavemetli sacların yüksek gerinim değerlerinden dolayı geri esneme değerlerinin yüksek olduğu, ılık şekillendirmede sıcaklık artışı ile parçanın şekillenebilme kabiliyetinin arttığı geri esnemesinin azaldığı, büküm radyüsünün azalmasının geri esnemeyi azalttığı, akma

dayanımının ve pekleşme artışının geri esneme miktarını arttırdığı yapılan araştırmalardan elde edilmiştir [57].

DP800 yüksek mukavemetli sacının mekanik özelliklerinin deformasyon hızına bağlı olarak değişimi ve geri esneme davranışları incelenmiştir. Power law plastik, anizotropik elastik model ve Barlat-Lian modelleri kullanılarak, V bükme deneyleri yapılarak, deney sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Deformasyon hızının artmasıyla akma ve çekme dayanımı artmış, toplam uzama ve pekleşme katsayısı değerleri azalmıştır. Deformasyon hızının artmasıyla geri yaylanma değerleri az miktarda azalmıştır [58].

Şen vd. çalışmalarında, farklı kalınlıklardaki ve büküm radyüslerindeki U tipi, L tipi ve Hood tipi DP600 sac parçaların şekillendirmesi sonrasında oluşacak geri esnemeyi telafi edebilmek amacıyla sac kalınlıklarına bağlı olarak uygun büküm radyüslerinin (R) tespiti için Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) gerçekleştirmişlerdir. CAD programlarıyla çizilen kalıp elemanları simülasyon programına tanıtılmıştır. Yapılan analizler sonucunda; aynı sac kalınlığındaki parçanın büküm radyüsü arttıkça geri yaylanmanın arttığı, büküm radyüsünün azaldığında incelenmenin arttığını ve sac kalınlığı arttıkça geri yaylanma değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir [59].

Parçanın, istenilen formda elde edilebilmesi için şekillendirilecek malzemenin geri ve ileri yaylanma davranışları bilinmelidir. Şekillendirilme sonrası zımba yükünün sactan kalkması sonucu oluşan geri yaylanmanın yanlış tahmin edilmesi kalıp maliyetlerini arttırıcı faktör olarak gözükmektedir. Geri yaylanma malzemenin elastik olarak geri kazanımı olarak adlandırılmakta ve istenmeyen bir durumdur. Malzemenin mekanik özelliklerine, geometrisine göre değişkenlik göstermektedir [60].

Tisza ve Czinege, otomotiv endüstrisinin gelişmiş ülkelerin ekonomisinde belirleyici bir role sahip olduğunu belirterek, araçların hafif konstrüksiyon uygulaması, müşterilerin taleplerini ve artan yasal gereklilik ihtiyaçlarını karşılamasının önemine değinmişlerdir. Bu beklentileri karşılamak için, yüksek mukavemetli malzemelerin uygulanması en umut verici olasılıklardan biri olarak kabul edilir. Yüksek mukavemetli ince saclar kütle azaltımında önemli katkı sağlamaktadır. DP1000,

TRIP780 gibi yüksek mukavemetli çeliklerin yanında son zamanlarda alüminyum alaşımlar, rneğin, AA7021 ve AA7075’ında kullanım örnekleri görülmektedir. Bu çalışmada, otomotiv endüstrisindeki son malzeme gelişmeleri hakkında hem de yeni nesil yüksek mukavemetli çeliklerin hem de hafif metallerin kullanımı ile ilgili olarak alüminyum alaşımlarına vurgu yapılmıştır. elik ve alüminyum uygulamaları arasında bir karşılaştırma yapılarak otomotiv endüstrisine çeşitli bakış açıları kazandırılmıştır [61].

Gomes et al. emniyet, konfor, araç ağırılık azaltımı gibi gerekliliklerden dolayı yüksek mukavemetli aynı zamanda daha hafif malzemelerin kullanımını özellikle çift fazlı çeliklerin kullanımının ne çıktığını belirtmişlerdir. Ancak bu çeliklerin özellikleri ve karışık sac metal prosesi geri yaylanmaya bağlıdır. alışmalarında sapmaları en aza indirmeyi ve simülasyonlar sayesinde şekillendirmeyi tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Matematik bir modelin simülasyonlarını yapmışlar ve geri yaylanmaları gözlemlemişlerdir. Takım telafileri ile takım hazırlama maliyetleri ve zaman kaybını dikkate değer şekilde düşürmüşlerdir [62].

Radonjic ve Liewald, yüksek mukavemetli sacların toplam ağırılık azaltma, yolcu emniyeti gibi konular dikkate alındığında araç imalatında avantajlar sağladığını belirtmişlerdir. Ancak, geri yaylanma sac metal şekillendirmede en büyük problemidir. Başlangıç simülasyonlarında küçük takım radyüslerinin kullanımı geri yaylanmayı azalttığını belirtmişlerdir. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için aynı parametreler deney düzeneğine uygulanmıştır. Kalıp radyüsünün değişikliği parçanın kesitlerinde farklı etkisi olmuştur. Sacın optimize edilmesinin geri yaylanmaya etkisi olmuştur [63].

Hattalli ve Srivatsa, sac metal endüstrisinin geçen yüzyıldan beri daha fazla teknolojik gelişmeler gösterdiğini belirtmişler ve sac şekillendirme parametreleri hakkında bilgi vermişlerdir. El ile şekillendirmeden sonlu eleman tabanlı proseslere geçişin teknolojik olarak gerekli olduğunu, zaman kaybının azaltılması, deneme yanılmaların azaltılması, işleme maliyetlerinin düşürülmesi önemli unsurlardır. Sac metaller, bükme, derin çekme, kesme ve delme operasyonlarını içeren operasyonlar ile biçimlendirilir. Proses parametreleri olarak zımba radyüsü, sac sıcaklığı, pot çemberi

kuvveti, takım ölçüleri, sac kalınlığı önemlidir. Yırtılma, buruşma, geri yaylanma gibi istenmeyen hatalar, deneysel ve simülasyon teknikleri ile analiz edilerek tolere edildiğini belirtmişlerdir [64].

Sulaiman et al. ABAQUS programı ile sayısal metodu kullanarak farklı parametrelerde sac metal şekillendirme prosesinde geri yaylanmayı incelemişlerdir. Simülasyonlarda sac kalınlığı ve malzeme farklı parametre olarak belirlenmiştir. AISI 15B48H çeliği ve karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit malzemenin, geri yaylanmaları incelenerek kompozitlerdeki geri yaylanmanın çeliklere göre daha az olduğunu tespit etmişler ve bilgisayar destekli simülasyonların gerekli olan fiziki testlerin azalmasına sebep olacağını belirtmişlerdir [65].

Sigvant et al. sac metal parçalarının kalıplama sürecinde etkin sonuç alınabilmesi için, tribolojik durumlara, sürtünme koşullarına, yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Sürtünme koşullarının, kaplama ve takımların yüzey pürüzlülüğünün, yağlama ve proses koşullarının önemli olduğunu, fakat sürtünmenin kilit öneme sahip olmasına rağmen, sac şekillendirme simülasyonlarında ayrıntılı olarak düşünülmediğini belirtmişlerdir. Yazarlar, çalışmalarında yeni bir sürtünme modeli geliştirerek bu modeli tanıtmışlardır. Farklı sertliklerdeki kalıp elemanları ve farklı kaplamalarla simülasyon yapmışlardır. Düzgün olmayan takım yüzey pürüzlülüğü, parça üretimi denemesi sırasında hatalı denemeler veya ek denemeler gerektirebildiğini, çinko magnezyum gibi kaplamaların, çelik maliyetlerini azalttığını, çelik yüzey pürüzlülüğüne etki edebildiğini belirtmişlerdir [66].

Tang et al. gelişmiş yüksek mukavemetli sacların şekillendirilmesi sırasında, şiddetli geri yaylanmaya uğradıklarını belirtmişlerdir. Geri yaylanmanın nonlinear özellikleri ve pahalı hesaplama maliyetlerinden dolayı sonlu elemanlar analizi temelli geri yaylanma tahminine bazen engel olabilmektedir. Araştırmacılar, geri yaylanmanın doğrusal olmayan özellikleri ve pahalı maliyetlerinden dolayı geri yaylanmayı en aza indirmek için projeksiyon tabanlı sezgisel genel arama yöntemini (P-HGS) geliştirmişlerdir. Bu yöntemle pot çemberi kuvvetleri optimize edilerek geri yaylanma azaltılmıştır. U biçimli parçalarda geri yaylanmayı tahmin etmek için önerilen metot

kullanılabilir. Tasarım değişkenleri iki kritik zaman ve üç fazda pot çemberi kuvvetleri seçilmiştir. Farklı süzdürücü tasarımları denenmiştir [67].

Aslan ve Karaağaç, sonlu elemanlar analizi, geri yaylanma ve telafi üzerine yaptıkları araştırmalarda; ütüleme süresinin artmasının geri esnemeyi azalttığı, yüksek mukavemetli sac malzemelerin şekillendirilme prosesleri süresince, malzemelerin yüksek gerilimlerden dolayı geri esneme miktarlarının yüksek olduğu, bükme açısının artması geri yaylanma miktarını arttırdığını, bükme radyüsünün azalmasının geri yaylanmayı azalttığı, akma dayanımındaki ve pekleşmedeki artışın geri yaylanmayı arttırdığı, yüksek mukavemetli çeliklerin şekillendirilmesinde sıcaklık artışı ile geri yaylanmanın azaldığını tespit etmişlerdir [57].

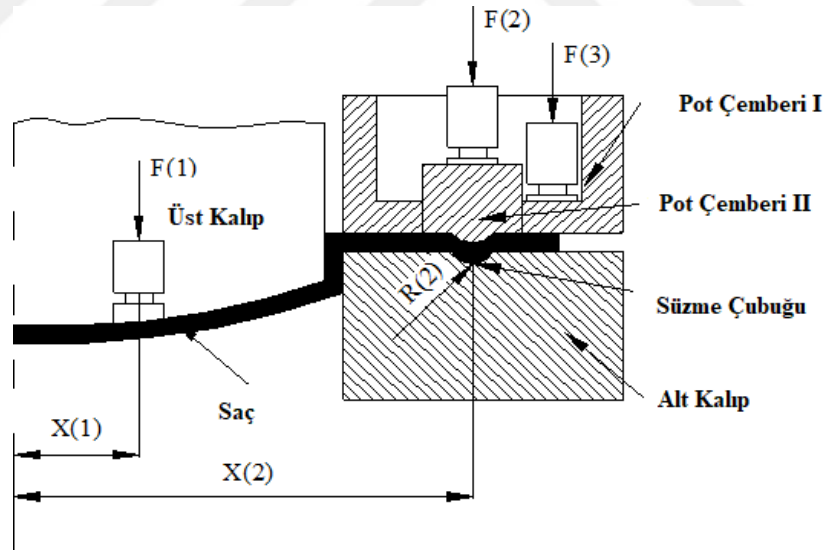
Esener vd. 0,8 mm kalınlığındaki DP600 malzemesini deneysel tasarım ile parametre hassasiyet analizi yaparak geri yaylanmayı azaltmayı amaçlamışlardır. Sonlu elemanlar analizlerinde DYNAFORM yazılımı kullanılmıştır. Eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı, parça tutucu kuvveti ve sürtünme katsayıları parametreleri seçilerek deneysel tasarım yapılmıştır. Elde edilen yeni parametrelerle yapılan simülasyonlarda geri esnemenin azaldığı tespit edilmiştir [68].

Çavuşoğlu ve Gürün çalışmalarında DP600 ve DP780 sac malzemelerin derin çekme işleminde deformasyon hızının etkilerini incelemek için, farklı deformasyon hızlarında tek eksenli çekme testlerini yaparak malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sac malzemelerin farklı deformasyon hızlarında derin çekme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda;

- Deformasyon hızı arttıkça, her iki malzemede de akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama miktarı artmıştır.
- DP780 sac malzemesinde DP600 sac malzemesine göre şekillendirme işlemi sonrasında daha fazla geri yaylanma gözlemlenmiştir.
- DP780 sac malzemenin DP600 sac malzemeye göre daha yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı daha fazla kalıplama kuvvetine ihtiyaç bulunmaktadır.

Deformasyon hızı arttıkça parçaların etek kısımlarında kalınlaşma meydana geldiği görülmüştür [69].

Kayabaşı, geri yaylanma, buruşma ve kalınlık hatalarını en aza indirmek için üç yaklaşım incelemiştir. İlk yaklaşımda çift pot çemberi kullanılmıştır (Şekil 4.3). İkinci yaklaşımda, parametrelere bağlı olarak optimizasyon yöntemiyle, en uygun şekillendirilme parametreleri tespit edilmiştir. Uygun değerleri bulmada sonlu elemanlar analizi, tepki yüzey metodolojisi ve genetik algoritma beraber çalıştırılmıştır. Üçüncü yaklaşımda ise, kalıp arızalarını öngörebilmek için bir olasılık geliştirilmiştir. Genetik algoritma ile yapılan optimizasyon işlemi sonucunda geri yaylanma, kırışıklık ve kalınlık azalması değerlerinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Optimizasyon sonuçlarından, optimizasyon kriterleri değiştiğinde X (2), R (2) ve F (1) 'in işlem parametrelerinin değişmediği, F (3)'ün çok az değiştiği görülmüştür. Yazar, yapılan araştırma sonucunda, önerilen optimizasyon metodolojisinin, otomotiv endüstrisinde şekillendirme proseslerinde, başarılı bir şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir [70].



Şekil 4.3. Şekillendirme parametreleri.

Geri yaylanmanın tahmini ve telafi edilmesi akademik ve endüstri açısından önemlidir. Sıcak şekillendirme ve kalıp üzerinde teleflerin verilmesi oldukça maliyetlidir. Sonlu elemanlar analizleri kullanarak proses parametrelerinin etkileri görülerek uygun tolerans değerinde parçaların üretilmesi sağlanmaktadır [71].

Tisca vd. otomotiv endüstrisinde daha az yakıt tüketimi, konfor, daha az zararlı emisyon, emniyet ve daha iyi performans gibi istekler doğrultusunda yüksek mukavemetli çeliklerin gelişmeye devam ettiğini belirtmişlerdir. Özellikle çift fazlı çelikler gelişmeye devam etmektedir. Ancak yüksek mukavemetli sacların şekillendirmesinde her zaman problemler bulunmaktadır. Yazarlar yeni bir deney metodu hazırlayarak DP600, DP800, DP1000 çift fazlı çeliklerin mekanik özelliklerini inceleyerek, çift fazlı yüksek mukavemetli sacların geri yaylanma davranışında, γ ve K parametrelerinin simülasyon için çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çizelge 4.1’de deneyde kullanılan çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri belirtilmiştir. Test edilen malzemenin geri yaylanma davranışının nasıl değiştiğini görmek için, farklı γ , χ , K , E değerler yansıtılarak çeşitli sayısal simülasyonlar yapmışlardır [72].

Çizelge 4.1. Çift fazlı çelik sacların mekanik özellikleri [72].

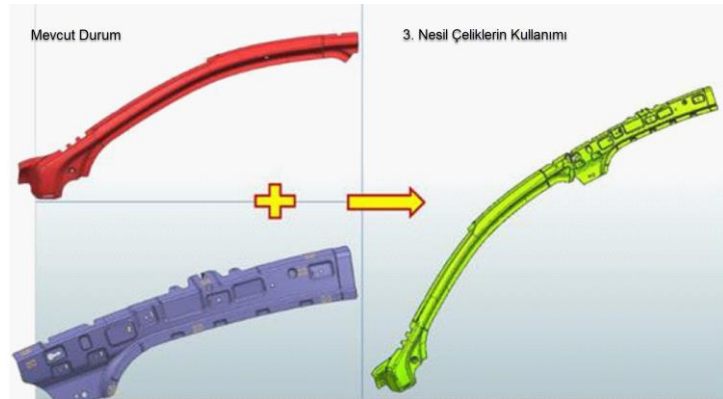
	DP600				DP800				DP1000			
	I.	II.	III.	IV.	I.	II.	III.	IV.	I.	II.	III.	IV.
γ	0,22	0,177	0,154	0,123	0,22	0,161	0,131	0,113	0,20	0,146	0,117	0,094
χ	49	45	30	37	82	65	54	46	80	68	60	57
E , GPa	160	170	174	180	160	173	179	183	165	176	182	187

Galdos vd. kalıplama koşulları altında, üçüncü nesil çeliklerden Fortiform 1050 çeliğini U çekme operasyonunda sayısal ve deneysel olarak inceleyerek, final geri yaylanma değerlerini tahmin etmişlerdir. Yazarlar, geri yaylanma tahminlerinde sürtünme katsayısının, elastik modülü ve deformasyon sertleşmesinin önemini göstermiştir. Yeni tribolojik çalışma ile DP çeliklerinde görülen benzer kontak davranışlar görülmüştür [73].

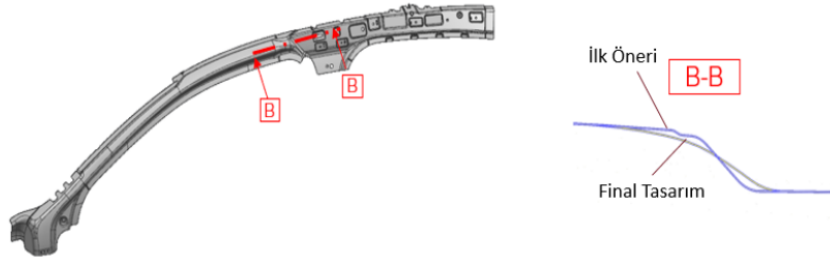
Radonjic ve Liewald, yüksek mukavemetli sacların yolcu emniyeti ve ağırlık azaltma konusunda üstün özellikler kazandırdıklarını belirtip ancak şekillendirme sırasında geri yaylanmanın ciddi bir problem olduğunu belirtmişlerdir. U biçimli DP980 malzemeli sacın farklı parça radyüslerindeki geri yaylanma değerlerini incelemişlerdir. Daha küçük takım çeliklerinde geri yaylanma miktarlarının azaldığını belirtmişlerdir. Pot kuvveti 300 kN’dan 1500 kN’a yükseldiğinde deneylerde duvar açısı değişimi, duvar kenarı bükümü ve sac kenarı bükümü azalmıştır. Sonuçlar,

simülasyonlar ile doğrulanmıştır. Pot kuvveti 300 kN'dan 1500 kN'a yükseldiğinde duvar açısı değişimi, duvar kenarı bükümü % 20 azalmıştır. YU modeli ile simülasyonlar duvar açısı sonuçlarını doğrularken duvar kenarı bükümünü doğrulamamıştır. Hill-48 modeli deney sonuçlarını vermemiştir. Simülasyonlarda max. pad kuvveti ile duvar açısı sapmalarının % 15 azaldığı görülmüştür. Orijinal 202 GPa Elastikiyet modülü ile yapılan simülasyonlarla karşılaştırıldığında, küçük bir 140 GPa'lık Elastikiyet modülü ve 300 kN'lık BHF kuvveti ile daha büyük geri yaylanmalar, 1500 kN'luk BHF ile daha az geri yaylanma görülmüştür [74].

Karabulut vd. çalışmalarında 1. nesil çeliklere göre dayanımı daha yüksek, daha iyi formlanabilir, 2. nesil çeliklere göre daha ucuz, araç hafifletme kapsamında mevcut kullanılan saclar yerine daha mukavemetli saclar ve daha ince sacların kullanılabilirliğini araç içinde göstermeyi amaçlamışlardır. Autoform programı ile, 3. Nesil TBF çeliği kullanılarak A direği, B direği ve C direği tekrar tasarlanarak kritik radyüs değerleri, duvar açıları revize edilerek üretilebilirlik limitleri değerlendirilmiştir (Şekil 4.4). Parçaların kritik kesitlerinde öneriler sunmuşlardır. (Şekil 4.5) 3. Nesil TBF çeliğinin mekanik özelliklerinin kalıplamaya uygun olduğunu, parça tasarımında kademeli geçişler yerine büyük radyüsler olması gerektiğini, ters açıda kesit kalmaması gerekliliği belirtmişlerdir [75].



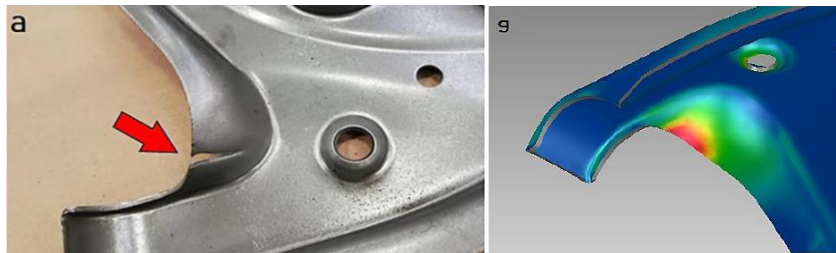
Şekil 4.4. Simülasyon çalışması gerçekleştirilen yekpare A ve B direği parçası [75].



Şekil 4.5. A direği parçasındaki B-B kesitindeki iyileştirme çalışması [75].

Karaağaç ve Aydın, DP600 ve HSLA300 sac malzemelerin farklı kalıp açılarında ve farklı ütüleme sürelerinde geri yaylanmalarını gözlemlemek maksadıyla deneysel olarak V bükme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, DP600 sac malzemesinde HSLA300'e göre % 12 daha fazla geri yaylanma gözlenmiştir. Ütüleme süresinin artmasıyla birlikte geri yaylanmanın azaldığı görülmüştür. Kalıp açısının artmasıyla her iki malzemede geri yaylanma açısı artmış, daha sonra azalmıştır [52].

Tuyan ve Demirer, araçlarda kullanılan salıncak kolu parçasının kalıplama prosesinde meydana gelen yırtılma problemini ele alarak çeşitli çözüm önerileri sunmuşlardır (Şekil 4.6). Çalışmada, DD13 ve S355MC sacları kullanılarak Autoform yazılımı ile sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kalıptan elden edilen parçalar karşılaştırıldığında yazılımda riskli görülen bölgelerde yırtılmalar gerçekleşmiştir. Yırtılan bölgeler için geometri değişikliği uygulanarak, riskli olan bölgelerde parlatma, sürtünmeyi azaltmak için 0,25 mm kalınlığında teflon ve ısıtma işlemi uygulanmıştır. Araştırmacılar, parçadaki problemi çözmek için operasyon sayısı arttırmadan çözüm önerileri sunmuşlardır. Kalıptan çıkan parçalar yorulma testine sokularak parçalarda herhangi bir yırtılma olmadığı tespit edilmiştir [76].



Şekil 4.6. Yırtılma değerleri [76].

DP450 ve DP800 çeliklerinin 4 farklı deformasyon hızında 3 farklı haddeleme yönünde (0°, 45°, 90°) çekme testleri yapılarak, malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Araştırma sonucunda, deformasyon hızı artarken mukavemet artmış, uzama değerleri düşmüştür. DP450 malzemesinde deformasyon hızının belirgin etkisi vardır, ayrıca soğuk şekillendirme esnasında parçanın deforme olmamasına dikkat edilmelidir. Her iki malzemede de 45° hadde yönünde daha yüksek mukavemet değerleri görülmüştür. Deformasyon hızının etkisinin, hadde yönü etkisinden daha fazla mukavemet değerleri üzerinde etkisi olduğu görülmüştür [77].

Billur vd. TWIP 980, TBF 1050 ve Q&P 1180 çeliklerinin servo pres ile sağlanan iki farklı kurs profilinde, V bükme yaparak, büküm sonrası geri yaylanmalarını tahmin edebilmek için sonlu eleman analizi ve deneysel analiz yapmışlardır. Analizler sonucunda; TWIP 980 çeliği üstün şekillendirilebilirlik sağladığı görülmüştür. TWIP 980, TBF 1050 çeliklerinde simülasyon ve deney sonuçları uyumlu çıkmıştır. Q&P 1180 çeliği diğer çeliklere göre yüksek geri yaylanma göstermiştir. Çalışılan geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerde kalıntı östenit olabileceğini, plastik şekil değiştirmeden dolayı elastikiyet modülü sabit olmayabileceği değerlendirilmiştir. Ek olarak faz değişimleri homojen olmayacağı için parçanın her yerinde mekanik özellikleri aynı olmayabilir [78].

Özdemir vd., HX220YD, DX54D, DX52D, S500MC, HCT600X, HX340LAD çelik sacların şekillendirilebilirlik analizlerini sonlu elemanlar methodu ile incelemişlerdir. 1,6 mm sac kalınlığında malzemeler Autoform yazılımı ile analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, şekillendirme sınır diyagramları üzerinden parçaların şekillendirilebilme yetenekleri yorumlanmıştır. Niyobyum, titanyum, vanadyumun, karbon, manganez ve bakırın, çeliklerde ortalama tane boyutu küçültücü etkisinden dolayı malzemelerin akma ve çekme mukavemetlerini arttırdığı ancak şekillendirilebilirliğini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Alüminyumun ise şekillendirmeye olumlu yönde etkisi olmuştur [79].

Sac metal şekillendirmede kalıp takım ömrü, ürün formu, sacın kalıba akışı gibi sebeplerden dolayı sürtünme önemli bir parametredir. Özellikle sonlu elemanlar analizleri sonuçlarının doğruluğu açısından malzeme mekanik özellikleri, sürtünme

koşulları, kontak değerleri önemlidir. Kalkan vd., radyal çekme bölgesinde ve gerdirmeye bölgesindeki sürtünme katsayılarını tespit etmek için yeni bir sürtünme katsayısı belirleme methodu geliştirmişlerdir. Gerdirmeye bölgesinde, derin çekme derinliği arttıkça azda olsa sürtünme katsayısı artmış, parafinin yağlayıcı olarak kullanılması sürtünme katsayısının düşmesine sebep olmuştur. Radyal çekme bölgesinde, grafit yağlayıcı sürtünme katsayısını düşürmüştür [80].

Kılıç ve Öztürk, TWIP900 çeliğinin şekillendirilmesini ve geri yaylanma değerlerini deneysel olarak inceleyerek, akma yüzeylerini ve şekillendirilebilirlik sınır diyagramlarını piyasada yoğun olarak kullanılan DP600 çeliği ile kıyaslama yapmıştır. V kalıplarda bükme işlemi gerçekleştirilerek, TWIP900 çeliğinde DP600 çeliğine göre daha fazla geri yaylanmanın olduğu görülmüştür. Kalıplarda deneme yanılma zamanlarını en aza indirmek için simülasyon malzeme modelleri doğru olarak tanımlanmalı, sınır şekillendirme değerleri tam olarak tanımlanmalıdır. Elde edilen sonuçlara göre, TWIP900 çeliğinin hafifletmeye büyük katkı sağlayacağı, yüksek şekillendirilebilirlik oranları ve enerji sönümlmeleri büyük avantaj sağlayacağı ancak geri yaylanmanın büyük bir problem olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar programlarında TWIP çelik analizi için Swift modelinin kullanılması uygun olacağı değerlendirilmiştir [81].

Taşdemir, düz, kavisli, elipstik ve 45 derece eğimli olmak üzere 4 farklı kalıp ağız geometrisi kullanılarak, farklı kalıp ağız geometrilerinin derin çekme prosesine etkilerini sonlu elemanlar metodu ile analiz etmiştir. Dış kalıp ağız formlarının sacın şekillendirilmesinde, sacın kalıba akış kontrolü için kritik öneme sahip olduğu görülmüştür. Düz formda sacın yırtıldığı, kabul edilebilir değerlerin R6 ağız yapısında elde edilmiştir [82].

16Mo3 sac malzemesinin, ısıtma işlemi uygulanmadan, normalize edilerek ve (13 ve 30 dak.) menevişleme işlemine tabi tutularak 3 farklı tipte V bükülerek geri-ileri yaylanma değerleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, zımbanın saca form verdikten sonra 30 sn. bekletilmesi geri ve ileri yaylanmayı azalttığı görülmüştür. Zımbanın sacın üzerinde uzun süre kalması ile malzemenin iç yapısındaki gerilmeler

azalmaktadır. Isıl işlemsiz ve normalize işleminde ileri esneme, menevişleme işleminde ise geri esneme meydana geldiği tespit edilmiştir [83].

U-kanal şekillendirme işleminde geri esneme ve maksimum incelme oluşumunda mekanik özelliklerin değişkenliğinin etkisi üzerine sayısal bir çalışma yapılmıştır. Young modülü, izotropik sertleşme kanunu parametreleri, anizotropi katsayıları ve sac metalin kalınlığı gibi proses parametreleri değişken olarak seçilmiştir. Pot çemberi kuvveti önemli şekillendirme parametrelerindendir. Swift sertleştirme kanununda C ve n parametreleri, geri esneme ve maksimum incelmede en etkili faktörlerdir [84].

Leu, yüksek dayanımlı çeliklerin performansını görmek için asimetrik V bükme kalıpları üzerinde sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Sürtünme ve bükme prosesi arasındaki ilişki ve yağlama ile malzeme özelliklerine göre geri esnemeleri deneysel olarak incelenmiştir. Kalınlık, zımba yarıçapı, yağlama ve malzeme mukavemeti gibi proses parametreleri nedeniyle, geri esneme ve sapma değişiklik gösterebildiği belirtilmiştir [85].

Fee355, FeP04, DP600 olmak üzere üç farklı malzeme kullanılarak, proses parametreleri olarak büküm açısı, zımba yarıçapı ve üç ayrı hadde yönün V büküm prosesi uygulanarak sacların geri yaylanma davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, Fee355 ve FeP04 saclarının kalıp açılarında göre geri yaylanma değerleri benzerlik göstermiştir. DP600 saclarda sadece büküm açısına bağlı kalmayıp zımba yarıçaplarına göre de değişiklik görülmüştür. Hadde yönüne bağlı olarak numunelerde geri yaylanma davranışları benzerlik göstermiştir [17].

DP780 ve TRIP590 yüksek mukavemetli saclarının V bükme prosesinde, sürtünme katsayısı, kalıp derinliği, zımba yarıçapı, malzeme kalınlığı ve integrasyon sayısının geri yaylanmaya etkileri incelenmiştir. Zımba yarıçapının değerine göre geri yaylanmalar ve ileri yaylanmalar görülmüştür. Kompleks parçaların geri yaylanmalarının tahmininde sonlu elemanlar analizi ve istatistik analizler parça üretiminden önce geri yaylanmanın tahmininde fayda sağlayabileceği belirtilmiştir [86].

Titanyum Grade 1 sac parçasının V büküm prosesinde farklı kalıp açısı, farklı zımba yarıçapı ve farklı ütüleme sürelerinde geri yaylanmaları incelediği çalışmada, kalıp açısı ve zımba yarıçapı artışı ile birlikte geri yaylanmaların arttığı görülmüştür. Kalıp açısının artmasıyla, büküm bölgesinde gerilmelerin arttığından dolayı, şekillendirme sonrası bu gerilmelerin sac malzemede geri yaylanmaya sebep olduğu görülmüştür. Zımba yarıçapının artmasıyla büküm bölgesindeki gerilmeler daha geniş alana yayıldığı için geri yaylanmanın artmasına sebep olduğu görülmüştür [87].

Baskı plakalı ve baskı plakasız U büküm prosesinde, kanal genişliği, sac kalınlığı, büküm açısı, zımba yarıçapı, sac genişliği parametrelerinin geri yaylanmaya etkisi deneysel ve sonlu elemanlar methodu ile analiz edilmiştir. Baskı plakası kullanıldığında, kanal genişliğinin ve sac parça uzunluğunun geri yaylanmaya nadir etkisi görülmüştür. Baskı plakası kullanılmadığında sac parçanın uzunluğunun etkisi çok az olmuştur. Anova kullanılarak parametrelerin önem sırası belirtilmiştir. Baskı plakası kullanıldığında geri yaylanmaya en çok etki büküm açısı daha sonra malzeme kalınlığı ve zımba yarıçapı ile olmuştur. Baskı plakası kullanılmadığında en büyük etkinin kanal genişliği değişiminde olduğu görülmüştür. Daha sonra en büyük etki malzeme kalınlığı ve zımba yarıçapında olduğu görülmüştür [88].

Hafiflik ve emninet araç parçalarının gelişiminin gerekliliklerindendir. Bundan dolayı yüksek mukavemetli ince saclar otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Üçüncü nesil yüksek mukavemetli Mn çeliğin V bükme kalıbında farklı proses parametrelerinde geri yaylanma davranışı deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Bükme açısı artmasıyla geri yaylanmalar azalmıştır. Zımba yarıçapı artışıyla geri yaylanma artmıştır. Bükme açısı 60°'den 120°'ye arttığında geri yaylanmalar pozitif geri yaylanmadan negative yaylanmaya dönüşmüştür [89].

V bükmede DKP sacında proses parametrelerinin etkisinin incelendiği çalışmada, malzeme kalınlığının artması ile geri esneme değerinin azaldığı, bükme açısının artması ile de geri esneme değerinin azaldığı tespit edilmiştir [90].

4.3. GERİ YAYLANMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

4.3.1. Akma Dayanımı

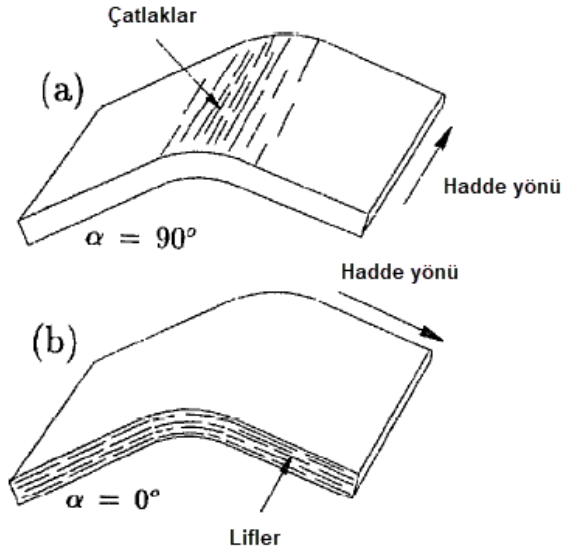
Elastisite teorisine göre; akma gerilmesinin altında bir malzemeye yük uygulandığında, elastik deformasyon meydana geldiği bilinmektedir. Akma dayanımının üstünde yük uygulandığında ise plastik şekil değiştirme başlamaktadır. Plastik şekil değiştirmenin başlaması için gerekli olan bağlantıya akma kriteri denilmektedir. Geri yaylanmanın oluşumunda akma dayanımı önemlidir. Akma dayanımı arttıkça geri yaylanmalar artmaktadır.

4.3.2. Anizotropi

Sac metal şekillendirmede malzeme anizotropisi önemli bir parametredir. Sac malzemeler haddeleme ile üretildiği için, taneler haddeleme yönünde uzar. Bunun sonucunda malzemenin farklı yönlerinde farklı mekanik özellikler görülür. Hadde yönüne bağlı olarak mekanik özellikleri değişiklik gösteren malzemelere anizotropik malzeme denir. Haddeleme sonucunda R₀, R₄₅ ve R₉₀ olmak üzere üç farklı anizotropi mevcuttur. Üç gerinim ortalaması ile normal anizotropi değeri elde edilir

$$R = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (4.2)$$

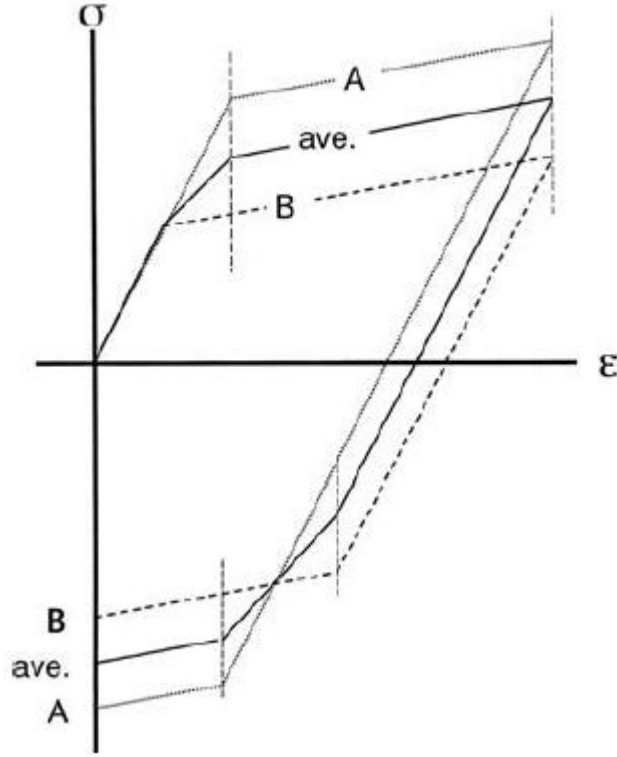
Bükme ekseninin hadde yönüne dik gerçekleşen bükmelemlerin yüzey kalitesi iyi olmaktadır (Şekil 4.7) [34].



Şekil 4.7. Hadde yönünün büküme etkisi [91].

4.3.3. Bauschinger Etkisi

Malzeme başlangıçta çekme yüküne maruz bırakılıp daha sonra ters yönde uygulanan basma yüküne maruz kalırsa malzeme daha düşük gerilmelerde akmaktadır (Şekil 4.8). Buna Bauschinger etkisi denmektedir. Malzeme üzerinden yük kaldırıldığında diskolasyonlar konumlarını korumaya devam eder ve kararlı konumdadırlar. Malzeme üzerinde ters yönde gerilim uygulandığında malzemenin akma dayanımında düşme görülmektedir. Diskolasyonlar ters yönde engelle karşılaşmadan rahatça hareket edebilmektedir. A ve B noktalarındaki farklı akma dayanımları bundan kaynaklanmaktadır [92].



Şekil 4.8. Bauschinger Etkisi [92].

4.3.4. Elastikiyet Modülü

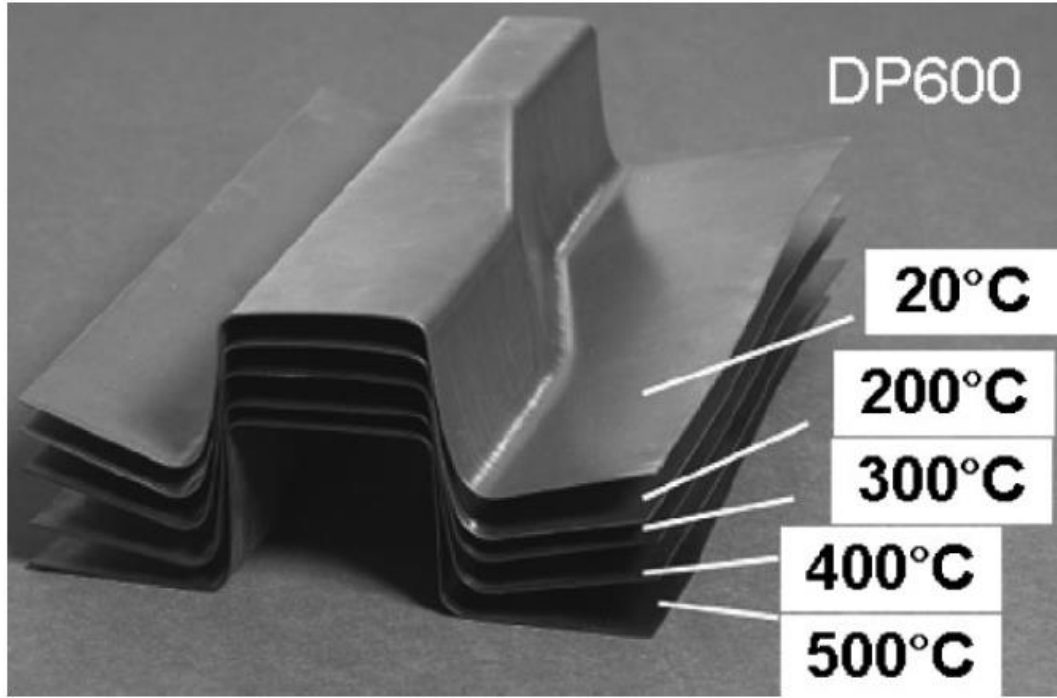
Elastik şekil değiştirmeye karşı direnç Elastikiyet modülü ile belirlenir. Elastik modülü büyük olan malzemelere zor şekil değiştiren, küçük olanlara kolay şekil değiştiren malzeme denir. Elastikiyet modülü arttıkça geri yaylanma değerleri artar. Elastik bölgede gerilmeler ile şekil değiştirmeler orantılıdır. Hooke kanunu geçerlidir.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.3)$$

Elastikiyet modülü, malzeme şekillendirilmesi esnasında dikkate alınması gereken önemli parametrelerden biridir. Malzeme şekillendirme esnasında elastiklik modülü çoğunlukla sabit olarak analizlere dâhil edilse de elastiklik modülünün deformasyon arttıkça azalmaktadır. Bu nedenle geri yaylanmanın isabetli bir şekilde tahmin edilebilmesi için değişken elastiklik modülünün de göz önünde bulundurulması önemlidir.

4.3.5. Sıcaklık

Yüksek sıcaklıklarda malzemenin akma dayanımını, elastikiyet modülünü ve çekme dayanımını düşürmekte, sünekliği artmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla geri yaylanma miktarları düşmektedir. Sıcaklığın artmasıyla malzemede pekleşme gerilmelerini azaltmaktadır [93]. Sıcaklık arttıkça bükme prosesinde iç ve dış yüzeydeki çekme ve basma kalıntı gerilmeleri arasındaki fark azalmaktadır. DP600 malzemesinin farklı sıcaklıklardaki şekillendirilmesinde geri yaylanma davranışı Şekil 4.9’da gösterildiği gibidir.



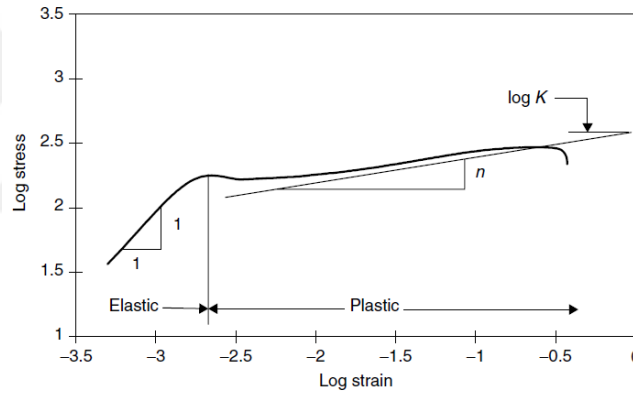
Şekil 4.9. Farklı sıcaklıklardaki DP600 malzemesinin şekillendirilmesi sonucu geri yaylanmaların gösterimi [94].

4.3.6. Pekleşme

Metallerin şekillendirilebilirliği, pekleşme davranışı ile ilgilidir. Malzemeye yük uygulandığında akma dayanımı aşıldıktan sonra, plastik deformasyon başladığında, malzemeye uygulanan yük değeri artarak malzeme şekil değiştirmeye devam etmektedir. Malzemeye yük uyguladıkça malzemenin mukavemeti artmaktadır,

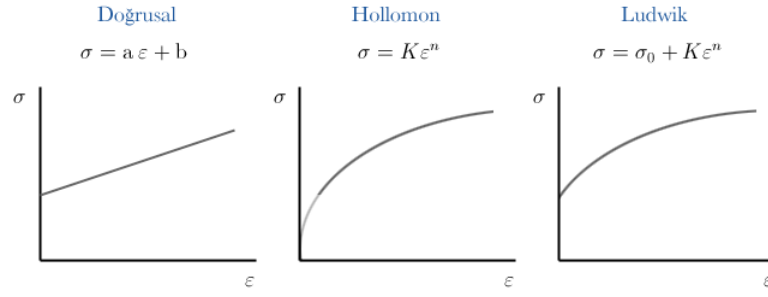
sünekliği artmaktadır. Pekleşme üsteli 'n' ile ifade edilir. Plastik bölgedeki yük şekil değiştirme ilişkisi gerinim sertleşmesi sebebiyle nonlineardir [92].

Deformasyon sertleşmesi, metallere soğuk deformasyon bölgesinde uygulanan plastik deformasyonla oluşur. Deformasyon sertleşmesi sadece diskolasyonların parçacıklara takılmasıyla gerçekleşmez. Kayma düzlemine dik olan diskolasyonlarda kaymaya çalışan diskolasyonların hareketlerini zorlarlar. Diskolasyonların birbirini kesmesi malzemenin mukavemetinin artmasına sebep olur. Deformasyon oranı arttıkça, akma ve çekme dayanımları artar. 'n' değeri logaritmik olarak çizilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisinin eğimine eşittir (Şekil 4.10). Pekleşme katsayısı arttıkça akma dayanımı artar, geri yaylanma artar. Holloman denkleminde göre çizilen grafiğin eğimi deformasyon sertleşmesi (n) değerini vermektedir.



Şekil 4.10. Gerçek gerilim-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen logaritmik diyagram [95].

Gerçek gerilme ile gerçek şekil değiştirme arasında aşağıdaki bağıntılar verilmiştir. Hollomon ve Ludwik denklemlerinde yer alan K katsayısına mukavemet sabiti, n katsayısının da gerinim sertleşmesi katsayısı denir. Gerinim sertleşmesi katsayısının düşük olması malzemenin fazla pekleşmeden kopacağını, yüksek olması ise sünek olduğunu göstermektedir. Ludwik denkleminde akma dayanımında gözönüne alır. ϵ şekil değiştirir.



Şekil 4.11. Pekleşme eğrileri [92].

Holloman tarafından;

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (4.4)$$

$$\log \sigma_g = \log K + n \log \varepsilon \quad (4.5)$$

Ludwig tarafından;

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (4.6)$$

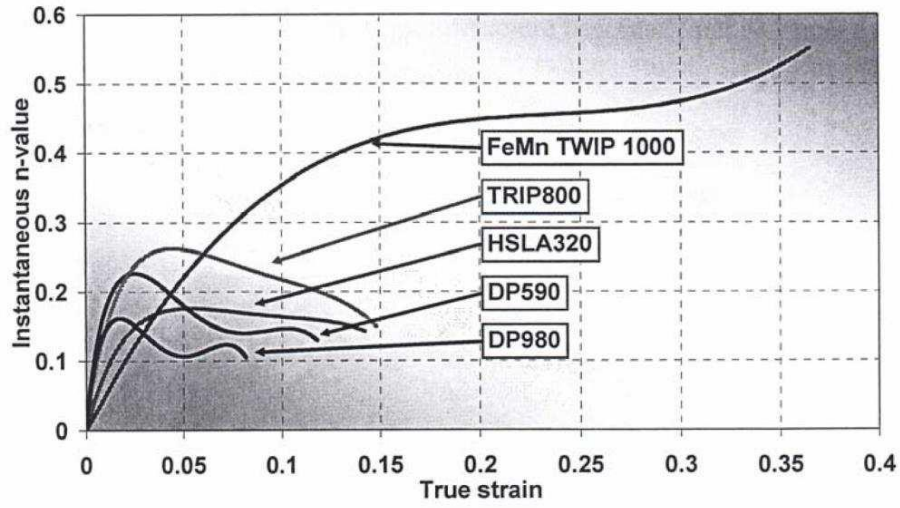
Ludwigson tarafından;

$$\sigma = K\varepsilon^n + \exp(K_1 + n_1\varepsilon) \quad (4.7)$$

Swift tarafından (Power Law);

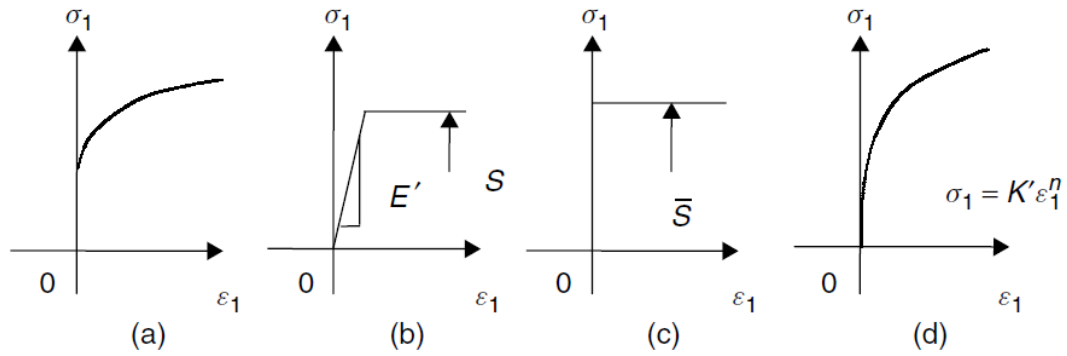
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + K\sigma^n \quad (4.8)$$

denklemleri türetilmiştir.



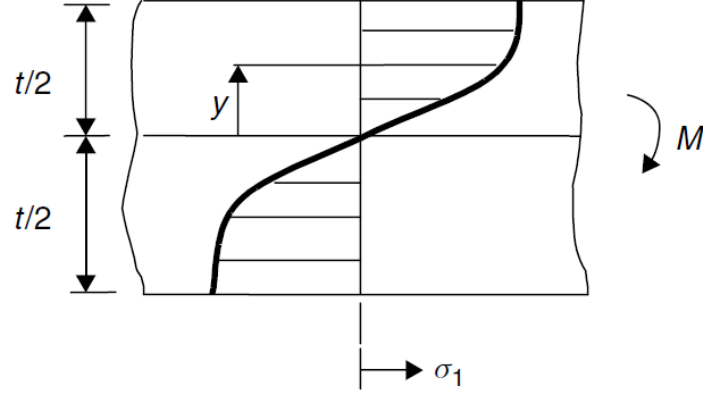
Şekil 4.12. Yüksek mukavemetli saclarda n değerinin kıyaslanması [96].

Şekil 4.12’de yüksek mukavemetli sacların ‘n’ değeri kıyaslanması görülmektedir. Şekil 4.13’de malzeme modelleri görülmektedir. Deformasyonla sertleşmenin olmadığı bükme operasyonlarında elastik-mükemmel plastik modeli ve rijit-mükemmel plastik modeli kullanılabilir.



Şekil 4.13. Bükme için malzeme modelleri: (a) Gerilme şekil değiştirme eğrisi (b) elastik-mükemmel plastik model (c) rijit-mükemmel plastik model (d) deformasyonla sertleşen malzeme modeli.

Deformasyonla sertleşen malzeme modelinde denge denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir. Tüm kesitin plastik olarak deforme olduğu ve gerilim orta yüzeyden y kadar uzaklıkta olduğu farz edilmektedir (Şekil 4.14) [95].



Şekil 4.14. Gerilimsiz sac bükmede deformasyonla sertleşen modelin gerilme dağılımı [95].

$$\sigma_1 = K' \varepsilon_1^n \sim K' \left(\frac{y}{\rho} \right)^n \quad (4.9)$$

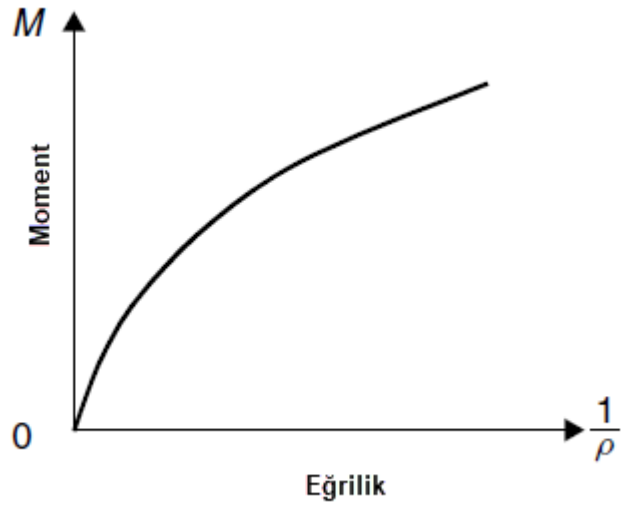
$$M = 2K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \int_0^{\frac{t}{2}} y^{1+n} dy = K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \frac{t^{n+2}}{(n+2)2^{n+1}} \quad (4.10)$$

Linear olmayan malzeme için denklemler birleştirilirse,

$$\frac{M}{I_n} = \frac{\sigma_1}{y^n} = K' \left(\frac{1}{\rho} \right)^n \quad (4.11)$$

$$I_n = \frac{t^{n+2}}{2^{n+1}(n+2)} \quad (4.12)$$

Moment eğrilik diyagramı elde edilir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Moment eğrilik diyagramı.

Çizelge 4.2’de gösterilen mavi renkli saclar geleneksel, yeşil renkli saclar geliştirilmiş yüksek mukavemetli saclardır.

Çizelge 4.2. Farklı kalitelere yüksek mukavemetli sacların mekanik özellikleri [17].

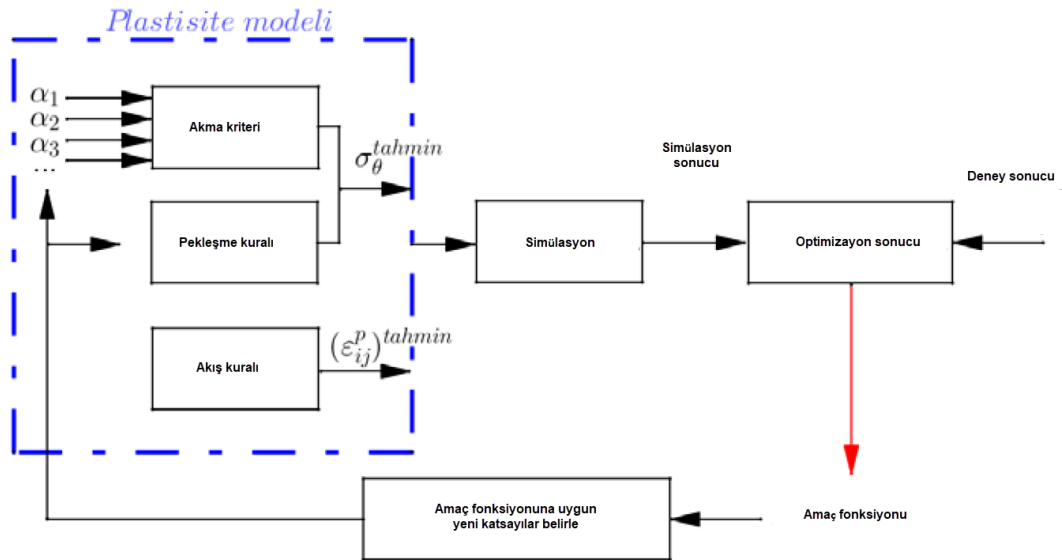
Sac malzeme	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Akma/Çekme Mukavemeti	Uzama (%)	n Değeri	r Değeri	K değeri (Mpa)
8H 210-340	210	340	0,62	34-39	0,18	1,8	582
8H 260-370	260	370	0,7	29-34	0,13	1,6	550
DP 280/600	280	600	0,47	30-34	0,21	1	1,082
IF 300/420	300	420	0,71	29-36	0,2	1,6	759
DP 300/500	300	500	0,6	30-34	0,16	1	762
HSL 350/450	350	450	0,78	23-27	0,14	1,1	807
DP 350/600	350	600	0,58	24-30	0,14	1	976
DP 400/700	400	700	0,57	19-25	0,14	1	1,028
TRIP 450/850	450	800	0,56	26-32	0,24	0,9	1,69
DP 500/800	500	800	0,63	14-20	0,14	1	1,303
CY 700/800	700	800	0,88	10-15	0,13	1	1,308
DP 700/1000	700	1000	0,7	12-17	0,09	0,9	1,521
Mart 950/1200	950	1200	0,79	5-7	0,07	0,9	1,678
Mart 1250/1520	1250	1520	0,82	4-6	0,065	0,9	2,021

BÖLÜM 5

AKMA KRİTERLERİ VE PEKLEŞME KURALI

5.1. GİRİŞ

Sac metal şekillendirme işlemlerinin problemsiz yapılabilmesi için sonlu elemanlar analizinde malzeme davranışlarının doğru ve eksiksiz tanımlanması gerekmektedir. Malzeme üzerine farklı yönde gerilmeler uygulandığında akma davranışını ifade edebilmek için akma yüzeyleri ve akma kriterleri kullanılmaktadır. Pek çok plastisite modeli mevcuttur. Akma kriteri, akış kuralı ve pekleşme modeli birlikte bütün olarak anlam ifade etmektedir (Şekil 5.1). Bundan dolayı plastisite modellerinin uygunluğu simülasyonların doğruluğu bakımından önemlidir.



Şekil 5.1. Plastisite modelin kurulması [97].

5.2. AKMA KRİTERLERİ

5.2.1. Tresca Akma Kriteri

Bu kritere göre bir malzemenin herhangi bir noktasında akma olmasının şartı, o noktadaki maksimum kayma gerilmesinin, basit çekme halinde akma sınırındaki kayma gerilmesine eşit veya büyük olmasıdır.

$$\text{Akma olmasının şartı: } \sigma_{max} \geq \sigma_{ak} \quad (5.1)$$

5.2.2. Von Mises Akma Kriteri

Von Mises akma kriteri izotropi kabulü yapmaktadır. Bu kriter çok eksenli gerilme durumunu tek eksenli gerilme durumuna indirgemektedir. Tüm gerilmeler yerine bir tane eşdeğer gerilme tanımlanır. Bu gerilme akma gerilmesini aşarsa akma oluşur.

$$\text{Akma olmasının şartı: } \sigma_{eş} \geq \sigma_{ak} \quad (5.2)$$

5.2.3. Hill-48 Akma Kriteri

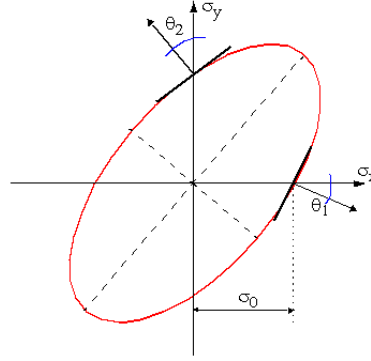
Sac malzemeler haddelemekten dolayı farklı yön uzama ve tane yapılarından dolayı anizotropik özellik göstermektedir. Pekleşme etkisini dikkate almamaktadır. Malzemenin üç orthogonal simetri düzeleminde anizotropiye sahip olması gerekmektedir.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (5.3)$$

Burada, F, G, H, L, M, N anizotropi katsayılarıdır ve x, y, z asal anizotropik eksenlerdir. Hill-48 akma kriteri düzlem gerilme durumu için aşağıdaki halini alır.

$$2f(\sigma_{ij}) = (G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (5.4)$$

Hill-48'e göre akma yüzeyi, gerilme uzayında ikinci dereceden bir fonksiyon olarak hesaplanır. Akma yüzeyi, r_0, r_{45}, r_{90} ve akma gerilimi σ_0 kullanılarak tanımlanır. Hill-48 malzeme modeli, malzemenin anizotropisini dikkate alan malzemeyi basit biçimde tanımlayan bir modeldir (Şekil 5.2). Hill-48 modeli pekleşme etkisinin dikkate almaz. Hassas simülasyonlar için pekleşme modelleri ile birlikte kullanılmalıdır [98].



Şekil 5.2. Hill-48 malzeme modeli [98].

5.2.4. Barlat-89 Akma Kriteri

Barlat akma kriteri genellikle alüminyum alaşımlarından yüksek anizotropiye sahip malzemeler için kullanılmaktadır. Hosford akma kriterinin izotrop malzemeler için asal eksenlerle çakışık olma zorunluluğu olmayan x, y, z koordinat sisteminde önermişlerdir. İki eksenli yükleme durumları için doğru sonuç vermemektedir [99].

$$f = a|k_1 + k_2|^M + |k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (5.5)$$

Barlat-89 modelinde, Akma yüzeyi, r_0, r_{45}, r_{90} , hadde yönlerindeki gerilmelere ve M değerine göre hesaplanır. Akma yüzeyi ikinci dereceden olmayan bir fonksiyon olarak tanımlanır.

5.2.5. Power Law Akma Kriteri

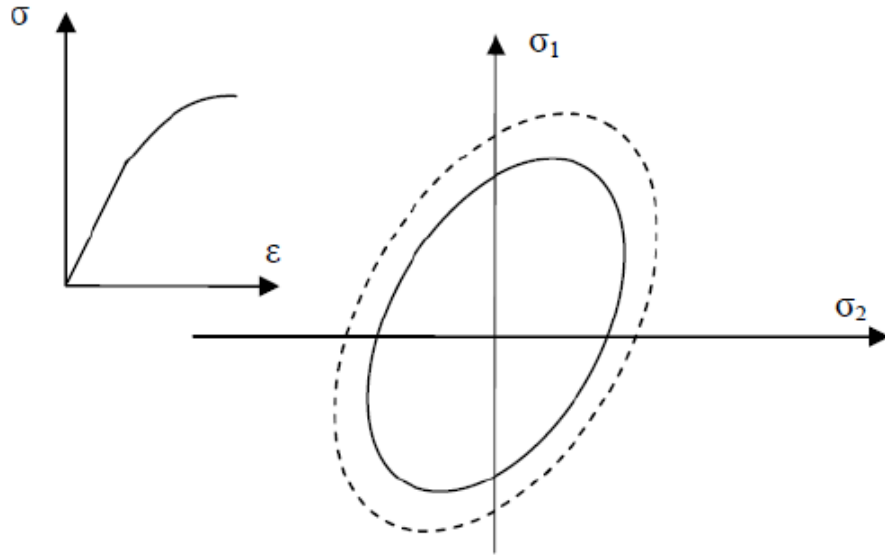
İzotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralını kabul yapan Holloman ifadesi ile temsil edilmektedir. Gerilme ve plastik gerinim arasındaki aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n \quad (5.6)$$

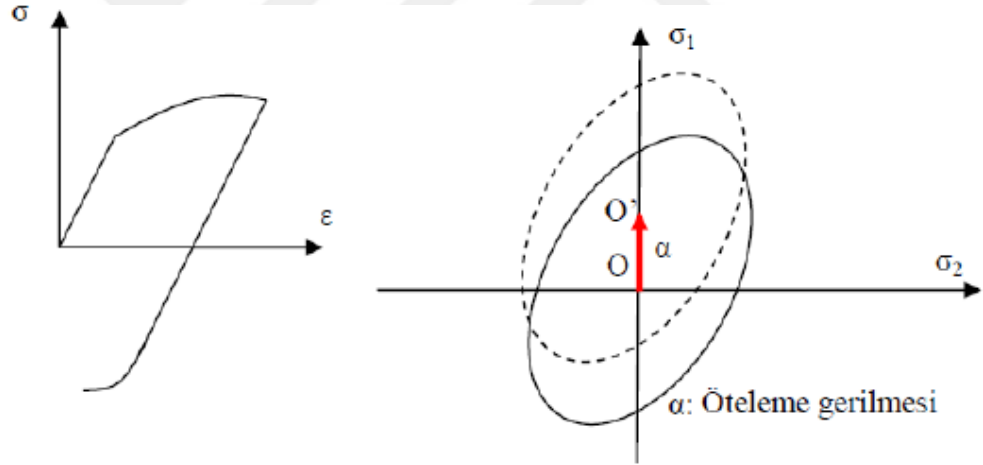
5.3. PEKLEŞME KURALI

Metallere uygulanan yük akma dayanımını aşmazsa malzeme üzerinden yük kaldırılırsa malzeme eski haline geri döner ve lineer bir değişim olur. Uygulanan yük akma dayanımını aşarsa plastik deformasyon başlar. Pekleşme akma dayanımından boyun vermeye kadar devam eder. Akma yüzeyleri pekleşme davranışı ile birlikte değişim sergiler. Eğer akma yüzeyi orantısal genişliyorsa izotropik pekleşme, boyutsal değişiklik olmadan sadece konum değişikliği oluyorsa bu duruma kinematik pekleşme denilmektedir (Şekil 5.3-5.4). İzotropik pekleşmede akma davranışı çekme ve basma durumlarında aynı olduğu için yeterli görülmemektedir. Bauschinger etkisinin de dikkate alındığından dolayı, kinematik pekleşme modeli çekme ve basma durumlarında malzeme davranışını tanımlamaktadır. Akma kriterleri akmanın olduğu andaki gerilme ilişkilerini açıklar. Akış kuralı ise gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi tanımlar [100].

Deformasyonun plastik kısmının belirlenmesi bir akma kriteri, bir pekleşme modeli ve bir akış kuralı ile uygulanması gerekmektedir. Pekleşme kuralı, akma yüzeyi fonksiyonunun, plastik deformasyon sırasında değişip değişmediğini, eğer değişiyorsa nasıl değiştiğini tanımlar. Bauschinger etkisinin görüldüğü malzemelerde pekleşme miktarları çekme ve basma bölgelerinde aynı olmamaktadır. Bundan dolayı izotropik pekleşme kuralı yetersiz kalabilir. Kinematik pekleşme modeli bu eksikliği giderebilir ancak kombine kuralların uygulanması daha doğru sonuç vermektedir [101][102].



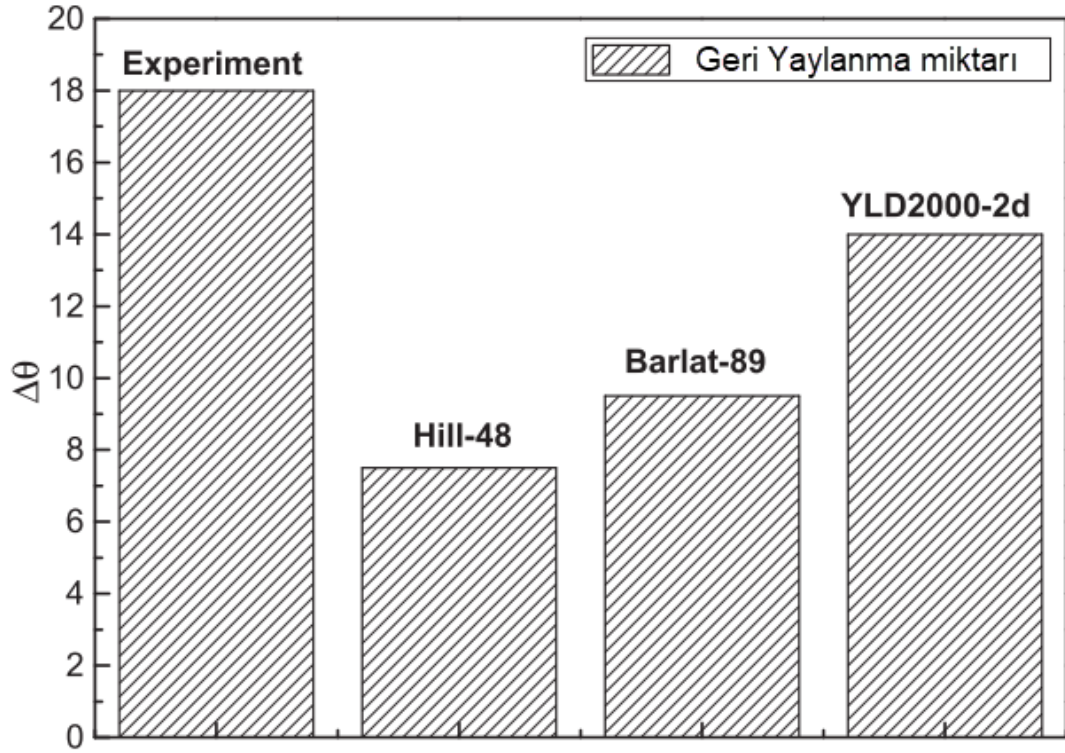
Şekil 5.3. İzotropik pekleşme şematik gösterimi [100].



Şekil 5.4. Kinematik pekleşme şematik gösterimi [100].

5.4. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Malzeme modelinin doğru seçimi; analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyen parametrelerin başında gelmektedir. Hill-48, Barlat-89 ve YLD 2000 malzeme modelleri tanımlanarak TRIP çelik sac malzemesinin geri esneme davranışları sonlu elemanlar analizleri ile de incelenmiştir. Geri esneme analizlerinde, YLD 2000-2d malzeme modelinin deney sonuçlarına en yakın tahmini yaptığı görülmüştür (Şekil 5.5) [103].



Şekil 5.5. Farklı malzeme modellerinden elde edilen simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması [103].

Houa vd. sonlu elemanlar methodu ile geri yaylanma tahmini elde etmek için malzemenin mekanik testlerinin yapılarak elde edilen sonuçlara göre yapıldığında daha net sonuçlar alındığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, MP980 sac çeliğin, akma dayanımı davranış modeli Hill-48, Barlat-89, Barlat-2000 akma kriterlerine göre uygulanıp karşılaştırılmıştır. U biçimli parçaların, sonlu elemanlar analizlerini farklı

takım radyüslerinde (R6,R8,R12) LS-DYNA programında yapılarak, uygun akma kriteri kullanılarak, doğru geri yaylanma tahmini elde ettiklerini belirtmişlerdir [104].

Esener ve Gürsoy, sonlu elemanlar analizlerinde malzeme modellerinin hassasiyetlerini ölçmek amacıyla DP600, DP980, DC05 VE AA5754 malzemeleri ile derin çekme, kare kutu çekme ve V büküm kalıplarını modelleyerek, izotropik malzeme-izotropik pekleşme kabulü yapan (Power Law), anizotropik malzeme-izotropik pekleşme kabullü Hill-48, Barlat-89 ve anizotropik malzeme kinematik pekleşme kabullü (Yoshida - Uemori) olmak üzere dört farklı malzeme modeliyle analizler yapmışlardır. Yapılan analizler sonucunda kinematik pekleşme malzeme modeli ile diğer malzeme modellerine kıyasla daha uygun sonuçlar elde edilmiş ve kinematik pekleşme malzeme modelinde daha fazla parametreye ihtiyaç olduğu görülmüştür [105].

Esener, DP600 malzemesini Ls-Dyna yazılımı ile Power Law plastisite modeli, Hill-48 plastisite modeli ve Yoshida-Uemori plastisite modeli kullanarak sac şekillendirme performans analizini gerçekleştirmiştir. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarını karşılaştırılarak, Power Law plastisite modelinin tahmin performansının düşük olduğunu, kinematik pekleşme modellerinin sac metal kalıplarındaki şekillendirmede etkili olduğunu görülmüştür [101].

Ultra yüksek mukavemetli çelikler, kinematik sertleşmeyi açıkça gösterir. DP980 çeliği, proses kuvvetleri uygulanarak doymamış kinematik (NSK) kullanılarak simüle edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre doymamış kinematik (NSK) ile izotropik sertleştirme modeline göre daha doğru sonuçlar elde edilmiştir [106].

U bükme prosesinde malzeme modellerinin geri yaylanmaya etkisinin incelendiği çalışmada, Hill-48 akma kriteri ve düzlem gerilme koşullarında izotropik, kinematik ve her iki pekleşmeyi de içeren karma pekleşme modelleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, izotropik sertleşme uygulandığında geri yaylanmalar fazla, kinematik sertleşme uygulandığında eksik tahmin olduğu belirtmişlerdir. Tersine yük durumlarında karma pekleşme kullanıldığında geri esnemenin daha doğru biçimde tahmin edilebildiği belirtilmiştir [107].

Sac metal şekillendirme simülasyonlarında geri yaylanmanın tahmini simülasyonun doğru kurulması ile bağlantılıdır. Geri yaylanma, şekillendirmenin tamamlanmasından sonra meydana gelen artık gerilmelerden oluşmaktadır. Pekleşme kuralı, doğru geri yaylanma tahmininde önemli parametredir. Araştırmada, izotropik, karışık, Armstrong-Frederick, Geng-Wagoner ve Yoshida-Uemori modeli pekleşme kuralı incelenmiştir. Ayrıca Hill-48, Barlat-Lian (YLD89) ve Banabic / Aretz modelleri olmak üzere üç farklı malzeme modeli ile analizler yapılmıştır. Geri yaylanma tahmininde, malzeme modellerine nazaran, pekleşme kuralının daha fazla etkili olduğu görülmüştür [108].

BBC2000-8P, BBC2003-8P, BBC2005-8P, BBC2008-8P ve BBC2008-16P akma kriterlerinin farklı seri alüminyum alaşımlarındaki tahmin performanslarının incelendiği çalışmada, BBC2000-8P, BBC2003-8P akma kriterleri her iki malzeme içinde tahminde kötü sonuçlar verdiği, BBC2005-8P, BBC2008-8P ve BBC2008-16P her iki malzemede de benzer tahminler yaptığı görülmüştür. Analiz sonuçlarında, başarılı sonuçlar alınması için daha fazla parametrelerin kullanıldığı modellerin tercih edilmesi gerektiği görülmüştür [109].

Paslanmaz çelik, St14 çeliği, 5182-O, Ti-6Al-4V ve AA6181-T4 malzemelerinde izotropik akma kriterleri olarak von Mises ve Tresca, anizotropik akma kriterinden Hill-48, Barlat-89 ve Hu2003 incelenmiştir. Performans kapsamında akma yüzeyleri, akma mukavemeti ve anizotropinin açıyla değişim tahminleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak Hu2003 akma kriterinin bütün malzemeler için başarılı tahminler yaptığı tespit edilmiştir. Karmaşık davranışlara sahip malzemelerin davranışlarının hassas tahmin edilebilmesi için girilen parametre sayılarında artmaktadır [110].

BÖLÜM 6

MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. GİRİŞ

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, uygulanan deney yöntemleri ve sonlu elemanlar analizleri tanıtılacaktır. Bu çalışmada, 1,2 mm kalınlığındaki SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının üç hadde yönünde, çekme testleri yapılarak malzemenin mekanik özellikleri tanımlanmış sırasıyla kimyasal analizleri, mikroyapı analizleri ve sertlik testleri yapılmıştır. Daha sonra farklı proses parametrelerinde, U bükme ve V bükme testleri yapılarak geri yaylanma değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, sonlu elemanlar analizleri yapılarak elde edilen deneysel geri yaylanma değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Yüksek mukavemetli sacların şekillendirilmesinde, malzeme modellerinin etkisi incelenmiştir.

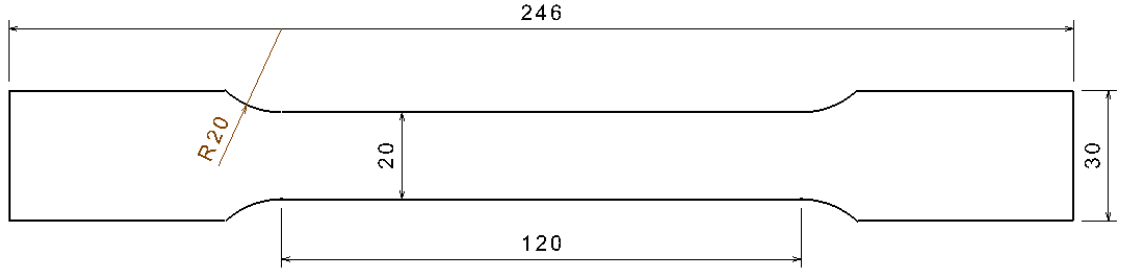
6.2. MEKANİK ÖZELLİKLERİN TANIMLANMASI

SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi, mikro yapı incelemesi, kimyasal analiz testi, sertlik testi yapılmıştır.

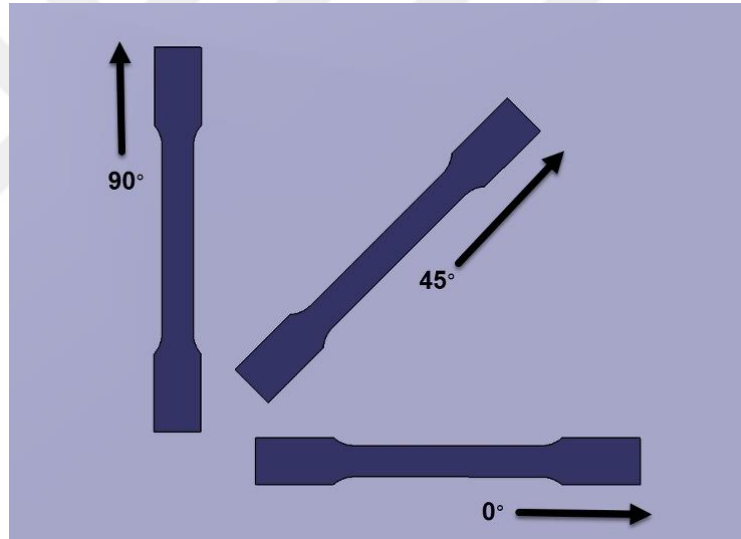
6.2.1. Çekme Testi

Otomotiv endüstrisinde çift fazlı çeliklerin kullanımı oldukça yaygındır. Deneysel araştırma için, otomotiv sektöründe kullanılan 1,2 mm kalınlığındaki SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacı seçilmiştir. Malzemenin 0°, 45° ve 90° hadde yönündeki mekanik özelliklerini tanımlamak için üç hadde yönünde çekme testine tabi tutulmuştur. Plakadan kesilen hadde yönleri Şekil 6.2’de gösterildiği gibidir. Çekme testleri MTS-100 kN, servohidrolik test cihazı ile 0,05 mm/s hızında TS EN ISO 6892-

1 standartlarına göre uygulanmıştır (Şekil 6.3). Çekme testi numuneleri, resimdeki ölçülerde, CNC lazer tezgahında hazırlanmıştır (Şekil 6.1). Lazer kesimden sonra numunelerin kenarlarında çapak kalmaması için eğe ile pürüzsüz hale getirilmiştir.



Şekil 6.1. Çekme test numune ölçüleri.

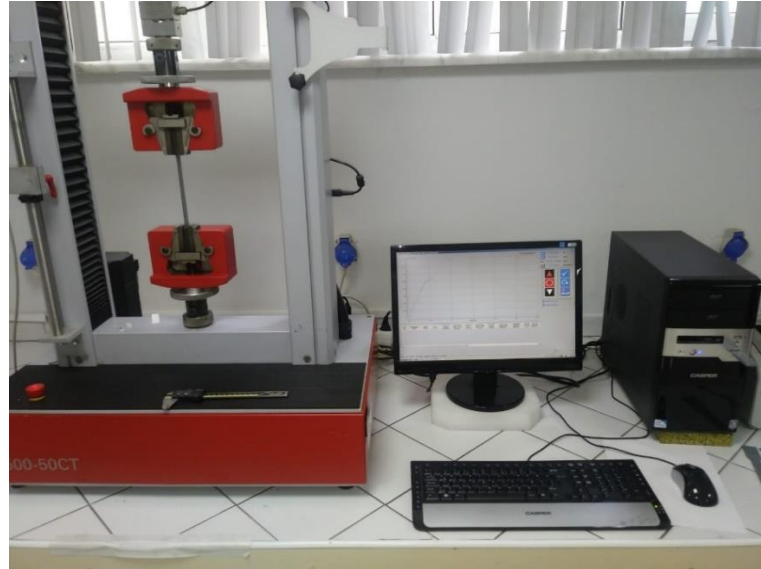


Şekil 6.2. Hadde yönleri.

Çizelge 6.1. SCGADUB1180 malzemesinin mekanik özellikleri.

Hadde yönü	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	δ (%)	r değeri
0°	904,84	1217,74	6,34	0,78
45°	911,55	1202,01	4,88	0,76
90°	909,71	1221,23	5,73	0,78

Çekme testlerinin tamamlanmasından sonra numunelerin son hali Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre, üç farklı hadde yönündeki gerilme ve şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.5’de elde edilmiştir. Çekme test sonuçlarına göre, malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 6.1’de elde edilmiştir. Üç farklı hadde yönündeki mekanik özellikleri birbirine çok yakındır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen mühendislik gerilme ve mühendislik şekil değiştirme verileri, aşağıdaki formüller kullanılarak gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme verilerine dönüştürülmüştür. Grafiktende görüldüğü gibi 45° hadde yönündeki uzama miktarı diğer hadde yönlerine göre daha düşüktür.



Şekil 6.3. Çekme test düzeneği.



Şekil 6.4. Test sonrası numunelerin görünüşü.

Gerçek gerilme (σ_g) ve gerçek birim şekil değişimi (ϵ_g) değerleri, mühendislik gerilme (σ_m) ve mühendislik birim şekil değişimi (ϵ_m) değerlerinden hesaplanır.

$$\sigma_g = \sigma_m(1 + e) \quad (6.1)$$

$$\epsilon_g = \ln(1 + e) \quad (6.2)$$

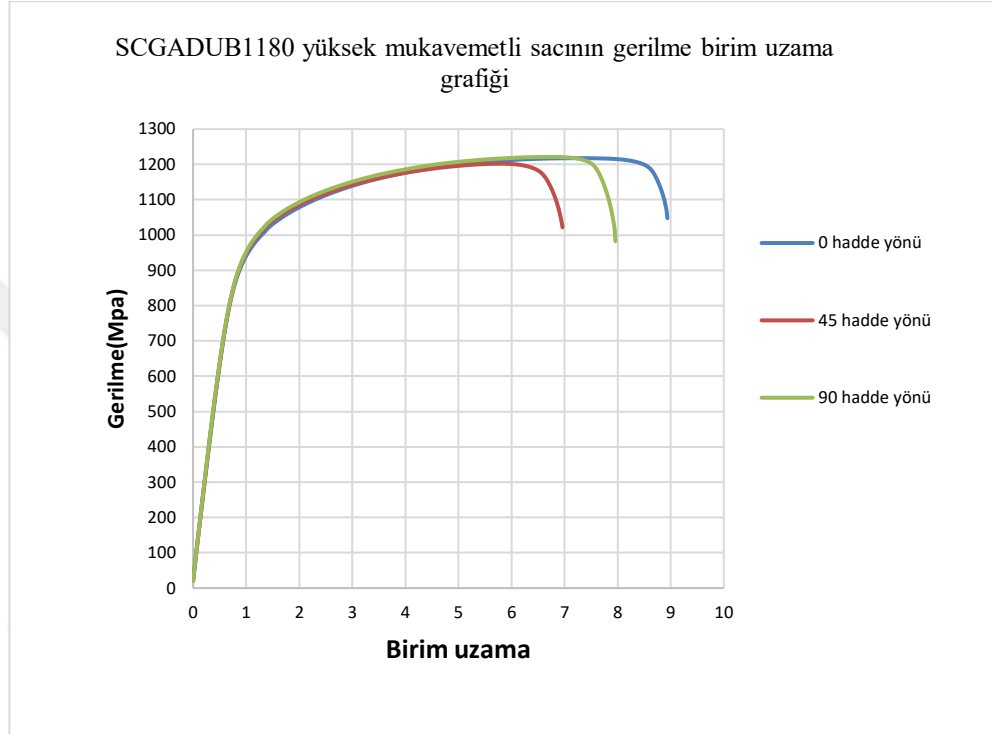
Gerçek gerilme şekil değişimi eğrilerinden deformasyon sertleşmesi üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) elde edilir. Bu iki değer hesaplanmasında Holloman bağıntısından yararlanılır. Hollomon bağıntısı,

$$\sigma_g = K\epsilon^n \quad (6.3)$$

şeklindedir.

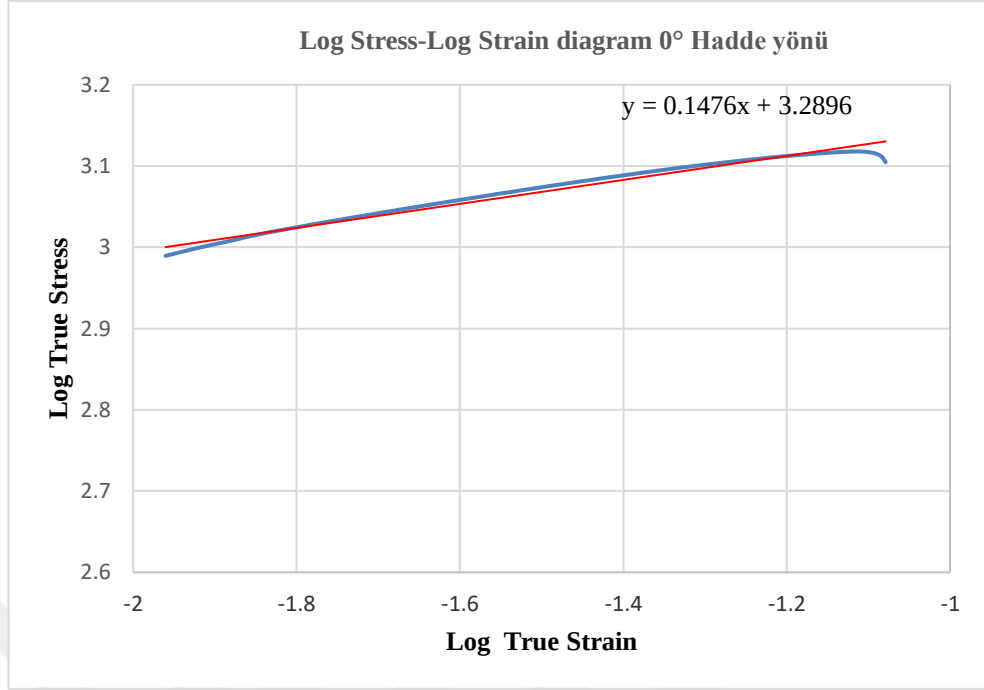
Holloman bağıntısının her iki yanın logaritması alınırsa lineer bir doğru denklemi elde edilir.

$$\log \sigma = \log K + n \log \epsilon \quad (6.4)$$



Şekil 6.5. Mühendislik gerilme birim uzama grafiği.

Gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerlerinin logaritmaları alınarak elde edilen eğride, doğrunun eğimi deformasyon sertleşme üssünü, bu doğrunun y eksenini kestiği nokta ise mukavemet katsayısı (K) değerini verir.



Şekil 6.6. 0° hadde yönü Log true - Log strain eğrisi.

Log True Stress, Log True Strain eğri grafiğinden (Şekil 6.6) 0° hadde yönündeki deformasyon sertleşme üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

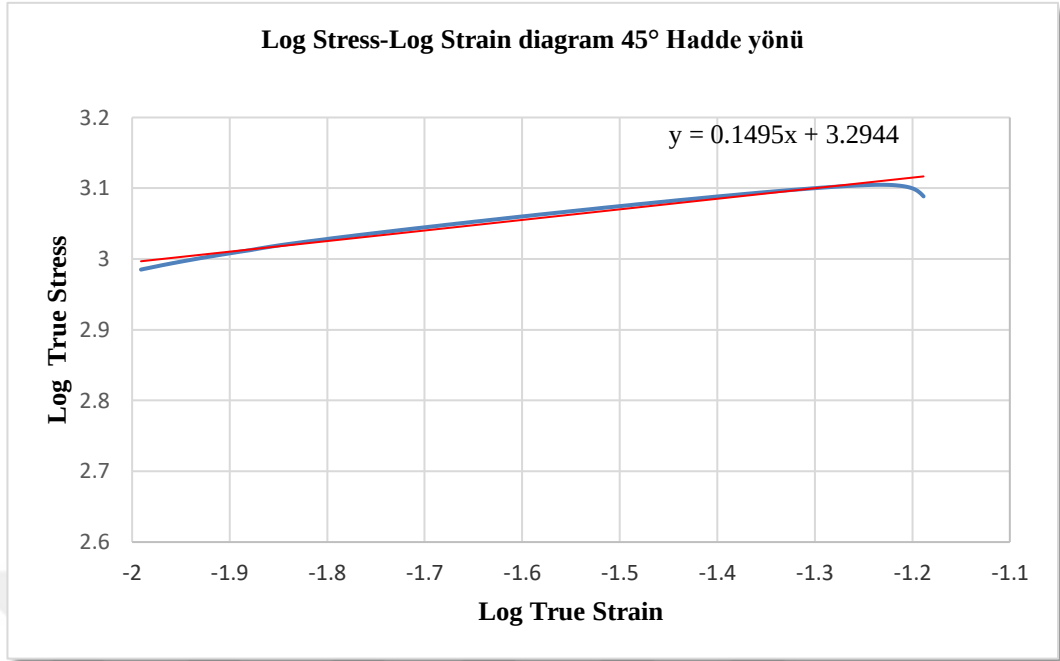
$$y = 0,1476x + 3,2896$$

$$n = 0,1476$$

$$y = \log K = 3,2896$$

$$10^{\log K} = 10^{3,2896}$$

$$K = 1948 \text{ MPa}$$



Şekil 6.7. 45° hadde yönü Log true - Log strain eğrisi.

Log True Stress, Log True Strain eğri grafiğinden (Şekil 6.7) 45° hadde yönündeki deformasyon sertleşme üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

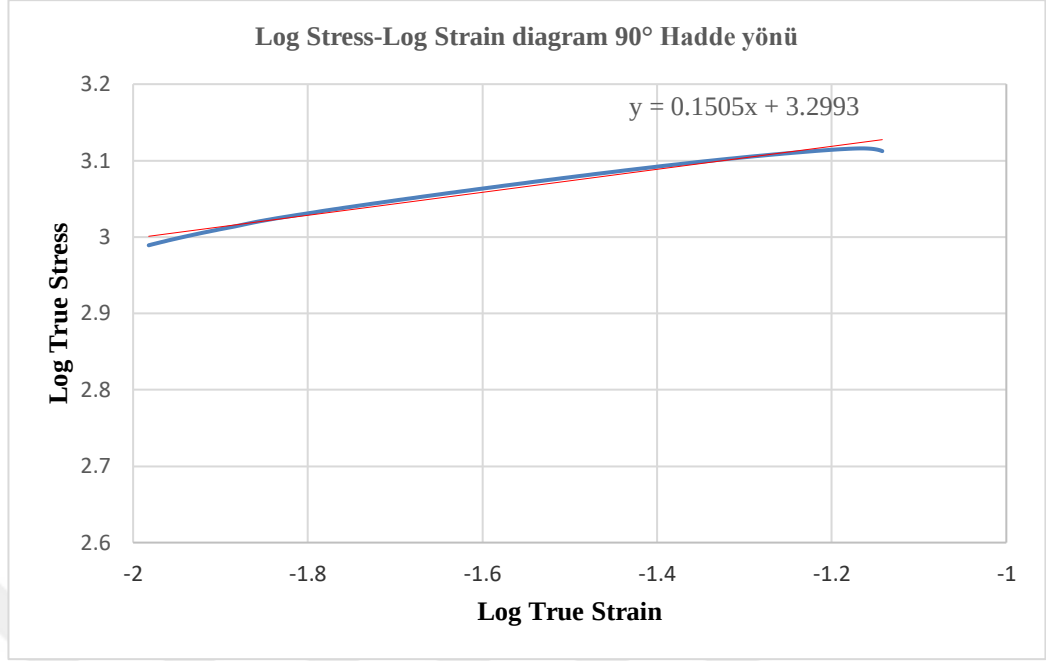
$$y = 0,1495x + 3,2944$$

$$n = 0,1495$$

$$y = \log K = 3,2944$$

$$10^{\log K} = 10^{3,2944}$$

$$K = 1969,6 \text{ MPa}$$



Şekil 6.8. 90° hadde yönü Log true - Log strain eğrisi.

Log True Stress, Log True Strain eğri grafiğinden (Şekil 6.8) 90° hadde yönündeki deformasyon sertleşme üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$y = 0,1505x + 3,2993$$

$$n = 0,1505$$

$$y = \log K = 3,2993$$

$$10^{\log K} = 10^{3,2993}$$

$$K = 1992 \text{ MPa}$$

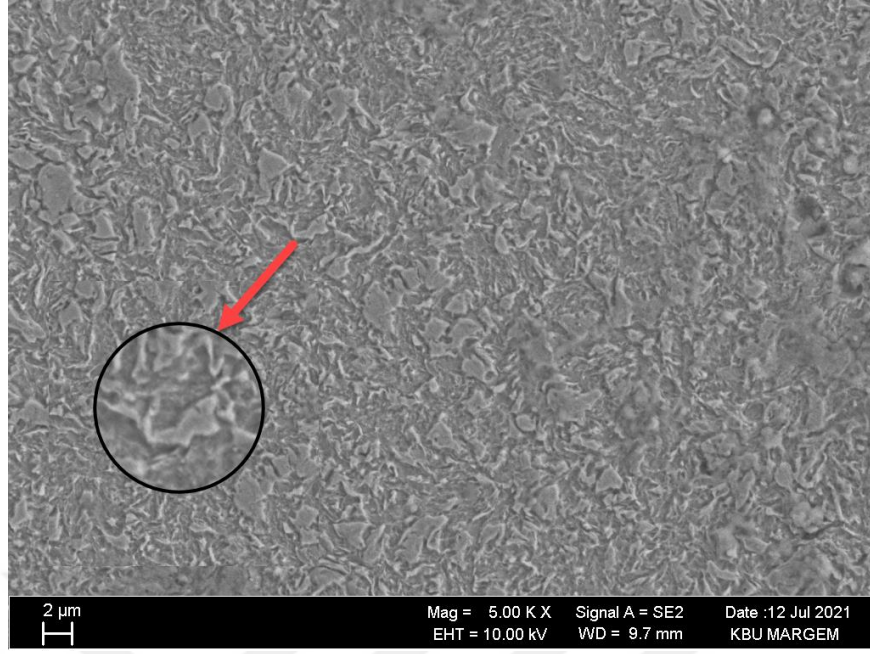
3 hadde yönündeki mukavemet katsayısı değeri ve deformasyon sertleşmesi üssü değeri Çizelge 6.2’de belirtilmiştir. Hesaplanan değerler Autoform yazılımına tanımlanmıştır.

Çizelge 6.2. SCGADUB1180 malzemesinin hadde yönlerine göre pekleşme üstü ve mukavemet katsayı değerleri.

Hadde önü	n	K(MPa)
0°	0,1476	1948
45°	0,1495	1969,6
90°	0,1505	1992

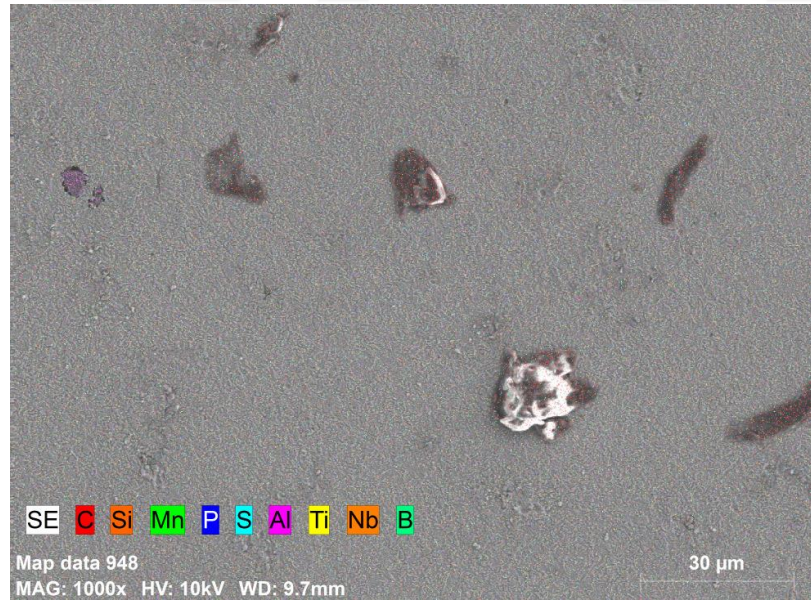
6.2.2. Mikro Yapı İncelemesi

SCGADUB1180 malzemesinin mikroyapısını incelediğimizde Şekil 6.9’da görüldüğü gibi ferrit ve martenzit fazından oluşmaktadır. Beyaz adalar ferrit yapıyı, koyu gri kısımlar martenzit yapıyı temsil etmektedir. SCGADUB1180 malzemesinde ferrit yapı ortalama % 81,8, martenzit yapı % 18,2 civarındadır [111]. DU580 malzemesi ile kıyaslandığında, yüksek mukavemetli SCGADUB1180 malzemesinin daha yüksek martenzit yapıya sahiptir. Çift fazlı çelikler mikroyapılarında ferrit ve martenzit yapıyı bir arada tutmakta olup, ferrit yapı yüksek süneklığe, martenzit yapıdan dolayı yüksek mukavemete sahiptir. Ayrıca, martenzit yapı yüksek deformasyon sertleşmesinin ana kaynağıdır. Deformasyon sertleşmesi geleneksel çeliklere göre daha yüksek akma mukavemet değerlerine ulaşmasına sebep olmaktadır. Akma gerilmesinin yüksek olması, daha yüksek bükme kuvveti ihtiyacına sebep olur. Ayrıca geri yaylanma ve kırılabilirlik gibi şekillendirme problemlerine sebep olmaktadır.



Şekil 6.9. SCGADUB1180 malzemesinin iç yapısı.

6.2.3. Kimyasal Analiz Testi



Şekil 6.10. SCGADUB1180 malzemesinin element dağılımı.

Şekil 6.10’da element dağılımı görülmektedir. SCGADUB1180 malzemesinin iç yapısı Çizelge 6.3’ de görüldüğü gibidir. Malzeme içindeki kimyasal yapıyı incelediğimizde, Karbon (C), Mangan (Mn), Bor (B) elementinin yüksek oranda olduğu görülmektedir. Çeliğin karbon artışı mukavemet artışı sağlarken sacın formlanabilmesini ve kaynaklanabilirliği düşürmektedir.

Çizelge 6.3. SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacın kimyasal yapısı (%).

B	C	Al	Si	P	S	Ti	Mn	Nb
13,82	50,16	0,49	2,49	0,11	0,64	2,83	29,33	0,13

6.2.4. Sertlik Testi

Numunelerin zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden sonra, sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her numune için, 5 farklı bölgeden mikro sertlik değeri alınmıştır. Rockwell yüzey sertlik ölçüm cihazında yapılan ölçümde sertlik değeri ortalama olarak 37-38 Rockwell ölçülmüştür.

6.3. DENEYSEL YÖNTEM VE DENEY DÜZENİĞİNİN TANITILMASI

6.3.1. Deneysel Çalışma Metodu

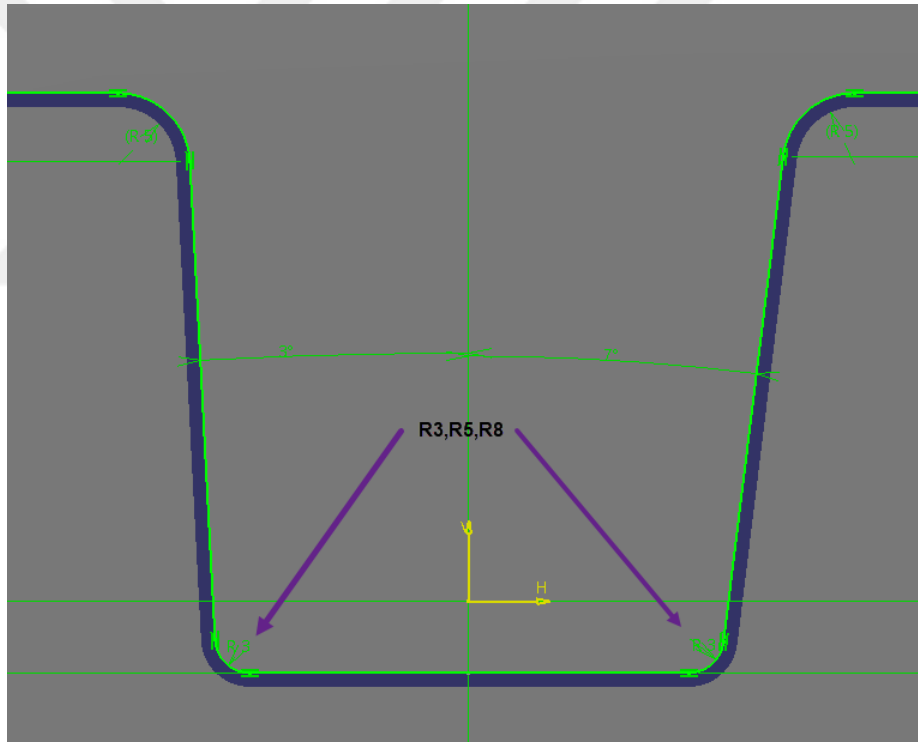
Bükme prosesi, sac metal kalıpcılığında en önemli uygulama alanlarından bir tanesidir. Sac metaller şekillendirme esnasında, zımba şekillendirilmiş sactan kaldırıldığında, elastik geri dönüşten dolayı sac başlangıç formuna geri dönmeye çalışmaktadır. Bu çalışmada, V bükme ve U bükme prosesinde SCGADUB1180 malzemesinin şekillendirilmesi sırasında geri yaylanma davranışları incelenmiştir. V bükme prosesinde; üç farklı hadde yönünde, üç farklı zımba yarıçapı ve üç farklı bükme açısında, U bükme prosesinde; iki farklı duvar açısında, üç farklı zımba yarıçapında geri yaylanma davranışları araştırılmıştır. Bükme prosesinde, herhangi bir yağlayıcı kullanılmamıştır. V bükme prosesinde 81 numuneye, U bükme prosesinde 12 numuneye bükme işlemi yapılmıştır. V bükme deneyleri 3 tekrar, U bükme deneyleri 4 tekrar edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, ortalamalar alınarak

grafikler değerlendirilmiştir. Zimba ile matris arasında sac kalınlığı kadar boşluk bırakılmıştır.

6.3.1.1. U Bükme

Kalıp Tasarımı

Kalıp elemanları AISI 1045 çeliğinden imal edilmiştir. 3 farklı zimba radyüsünde (R3, R5, R8) kalıplar tasarlanmıştır. Kalıp yüzeyleri CATİA yazılımı ile tasarlanmıştır. Tasarımın tamamlanmasına müteakip, kalıp parçaları dik işlem freze tezgahında imal edilmiştir. Kalıp ölçüleri belirtildiği gibidir (şekil 6.11).



şekil 6.11. U büküm kalıp ölçüleri.

Deney Parametreleri

U bükme prosesinde; iki farklı duvar açısında, üç farklı zimba yarıçapında geri yaylanma davranışları araştırılmıştır. U bükme parametreleri Çizelge 6.4'deki gibidir.

Çizelge 6.4. U bükme proses parametreleri.

U bükme parametreleri	
Zimba yarıçapı (mm)	Duvar açısı (derece)
R3	3
	7
R5	3
	7
R8	3
	7

Deneysel Çalışma Ortamı

Deneylerde kullanılan malzemeye ısıtıl işlem uygulanmamıştır. Deneylerde 120 tonluk atölye tipi tezgah kullanılmıştır. U büküm prosesinde kalıp yağlayıcısı kullanılmamıştır. Üretimi yapılan zimba ve matrisin prese bağlanmış durumu Şekil 6.12’dedir.



Şekil 6.12. Kalıbın adaptör parça ile prese bağlanması.

U bükme numuneleri 50 x110 mm olarak giyotin makasta kesilmiştir (Şekil 6.13).

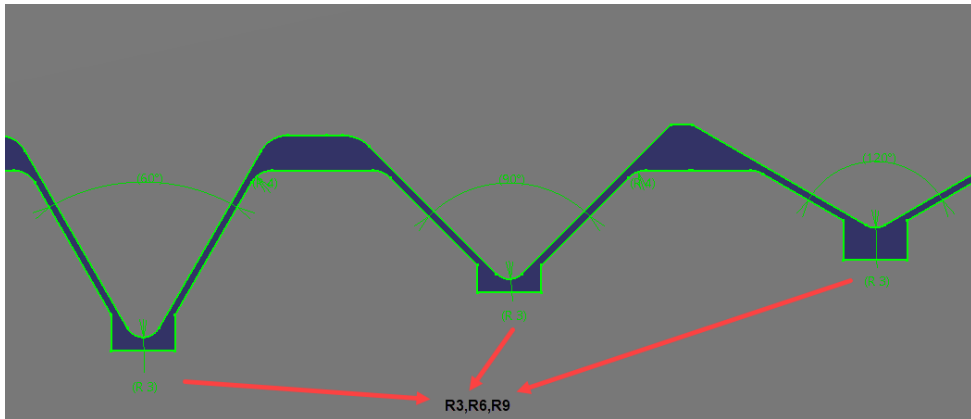


Şekil 6.13. U bükme numuneleri.

6.3.1.2. V Bükme

Kalıp Tasarımı

Kalıp elemanları AISI 1045 çeliğinden imal edilmiştir. Kalıp yüzeyleri CATİA yazılımı ile tasarlanmıştır. Aynı kalıp üzerine 3 farklı duvar açısı işlenmiştir. Duvar açıları ve zimba yarıçapları gösterimi aşağıdaki gibidir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. V büküm kalıp ölçüleri.

Deney Parametreleri

V bükme prosesinde; üç farklı hadde yönünde, üç farklı zımba yarıçapı ve üç farklı bükme açısında malzemenin geri yaylanma davranışları incelenmiştir.

Çizelge 6.5. V bükme proses parametreleri.

V bükme parametreleri	
Deney parametresi	Parametre değerleri
Kalıp açısı (derece)	60,90,120
Kalıp radyüsü (mm)	3,6,9
Hadde yönü (derece)	0,45,90

Deneyisel Çalışma Ortamı

Deneylerde kullanılan malzemeye ısıtıl işlem uygulanmamıştır. Deneylerde 120 tonluk atölye tipi tezgah kullanılmıştır. V büküm prosesinde kalıp yağlayıcısı kullanılmamıştır. Üretimi yapılan zımba ve matrisin prese bağlanmış durumu Şekil 6.15’dir.

Bükme kuvveti aşağıdaki bağılantıdan hesaplanmıştır.

$$P_b = \frac{c\rho_b S^2 b}{w} \quad (6.5)$$

P_b : Bükme kuvveti (kg)

b : Parça genişliği (mm)

S : Parça kalınlığı (mm)

ρ_b : Malzemenin çekme gerilmesi (kg/mm^2)

w : Kalıp genişliği

c : Katsayı



Şekil 6.15. Kalıbın adaptör parça ile prese bağlanması.

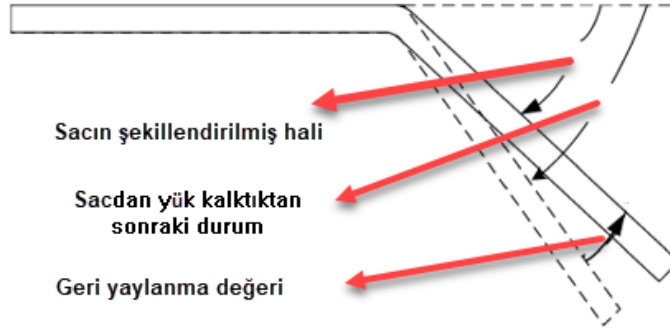
Deneyde kullanılacak, SCGADUB1180 numuneleri 60 x 20 mm olarak giyotin makas ile 0°, 45° ve 90° hadde yönlerinde kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplam 81 adet numuneye bükme işlemi yapılmıştır (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. V bükme numuneleri.

6.3.2. Geri Esnemenin Ölçümü

Lazer optik projeksiyon cihazında numunelerin eksene göre ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6.18). Numunelerin ölçümünden istenen ölçü çıkartılarak geri yaylanma değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.17).



Şekil 6.17. Geri yaylanmanın şematik gösterimi [56].



Şekil 6.18. Lazer optik projeksiyon cihazında geri yaylanmanın ölçümü.

6.3.3. Sayısal Çalışma Metodu

Sac metal şekillendirmede sonlu elemanlar yönteminin kullanımı, büyük avantajlar sağlamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir prototip veya parça üretimi olmadan, şekillendirilebilirlik analizlerinin yapılmasını mümkün kılar. Sonlu eleman analizi, incelme, yırtılma ve geri yaylanma davranışını tahmin ederek, imalat öncesinde tasarım aşamasında müdahale edebilme imkanı sunar. Böylece, ürünün tasarımdan araçta montaja kadar olan süreçte zamandan tasarruf sağlanır ve hatalı parça üretiminin önüne geçilebilir.

Sonlu elemanlar analizlerinde analiz tahmin hassasiyeti önemlidir. Yapılan çalışmada, TRIP600 malzemesine kare kutu çekme uygulanarak, simetri durumu, eleman boyutu, eleman formülasyonu, integrasyon nokta sayısı, adaptive ağ yapısı, şekillendirme hızı, plastisite modeli gibi proses parametrelerinin simülasyon doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Süreye en çok etki eden parametre simetri durumu görülmüştür. Hill-48 malzeme modelinin gerçeğe daha yakın sonuç verdiği görülmüştür. Eleman boyutundaki artışın, simülasyon süresini kısalttığı fakat hassasiyete olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Ağ adaptasyon seviyesinin hassasiyete etkisinin olmadığı belirtilmiştir [112].

Sonlu elemanlar analizi, uygulanan kuvvetler ve basınç altında bir parçanın davranışlarını inceleyen, uygulanan yükler altında gerçek bir nesne hakkındaki durumlar hakkında bilgi veren tekniktir. Sonlu elemanlar analizi ile parça üretilmeden parça davranışı tahmin edilebilir, hatalar giderilebilir [113]. Jadhav vd. geleneksel üretim planlama yönteminin çok zaman aldığından dolayı, sonlu eleman yönteminin (FEM), tasarım ve imalat süresini azaltmak için uygulandığını belirtmişlerdir. Sonlu eleman yöntemi (FEM), uygun malzeme modeli seçimine, giriş parametrelerinin doğruluğuna, gerçek operasyon değerleri ve diğer durumlara bağlıdır. Bu çalışmada, sac şekillendirmedeki yeni gelişmeler, sac şekillendirmeye etkileyen parametreler ve bu parametreler doğrulanmaya çalışılmıştır. İlk çalışmada, AlMgSi panel parçasının geri yaylanması incelenmiş, alüminyum paneldeki yaylanma birden fazla hesaplanmış ve başarıyla telafi edilmiştir. İkinci çalışmada, sıcak şekillendirme prosesinde

deformasyon ve kalınlık değişimi incelenmiştir [114]. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli saclar için geri yaylanma önemli bir problemdir. Bu problemin fizibilite çalışmalarında telafi edilmesi gerekmektedir. Sonlu elemanlar analiz yöntemi, bütün mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar deneme yanılma sürelerini arttırmaktadır, bunun sonucundada zaman, malzeme ve para israfına neden olmaktadır [57].

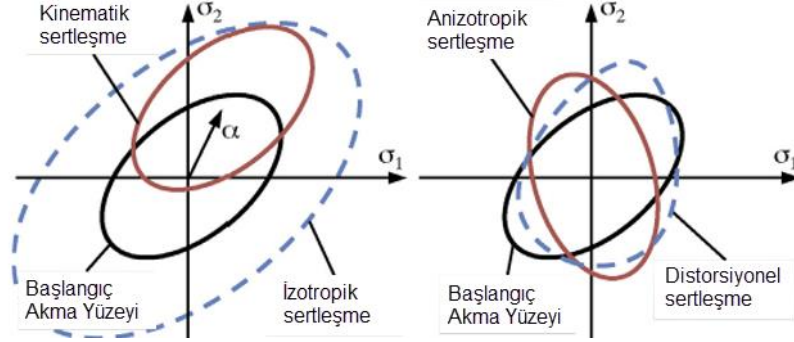
SCGADUB1180 sacının geri yaylanma davranışları Autoform R7 yazılımı ile incelenmiştir. Autoform R7 yazılımı sac metal kalıpcılık sektöründe yüksek doğrulukta ve hassasiyette çözüm sunan bir yazılımdır. Üretilcek parçaların analizlerin yapılması deneme yanılma sürelerini, maliyetleri ve gereksiz iş yükünü azaltır. Yazılım ortamında görülen yırtılma, incelme gibi şekillenme problemleri, gerekli düzenlemelerle giderilerek, proses ve kalıp yapım süreçlerinde hatasız olarak final parçanın alınmasına yardımcı olur. Kalıp yüzeyleri Catia programında tasarlanmıştır, daha sonra Autoform yazılımına aktarılmıştır. Sonlu elemanlar yazılımında proses parametrelerinin etkileri belirlenerek tasarım aşamasında ürün tasarımcılarına yüksek mukavemetli sacların şekillendirmesinde yardımcı olacaktır. Modellere, deneysel gerilme birim deformasyon eğrisinden elde edilen değerleri girilerek hesaplama yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizleri dört farklı malzeme modeli ile oluşturulmuştur.

- [1] Barlat-89 akma kriteri,
- [2] Barlat-89 akma kriteri +Power (Ludwik) akma eğrisi+ Kinematik Sertleşme,
- [3] Hill-48 akma kriteri,
- [4] Hill-48 akma kriteri + Power (Ludwik) akma eğrisi+ Kinematik Sertleşme.

Sac şekillendirme simülasyonlarında hassasiyetin artması malzemenin akışı ve sacın şekillendirilme sınırlarının tahmin edilmesine bağlıdır. Farklı eksenlerdeki gerilmelerin etkisi sac metal sacların şekillendirilmesinde akma yüzeyi ve sertleşme modelleri ile tanımlanır. İzotropik sertleşme, şekillendirme sırasında farklı yönde yük uygulanmadığında tanımlanması uygundur ve başlangıç akma yüzeylerinin genişlemesi olarak tanımlanır. Kinematik sertleşme, malzemenin akma yüzeyi form ve genişlik olarak değişmediğinde tanımlanır (Şekil 6.19). Sertleşme kuralları, akma

eğrisi fonksiyonu Hollomon [115], Swift [116] veya Ludvik [117] akma eğrisi fonksiyonlarına göre hesaplanır [118].



Şekil 6.19. Anizotropik ve kinematik sertleşme [118].

Autoform ticari yazılımında, gelişmiş kinematik sertleşme modeli; erken yeniden plastikleştirme, geçici yumuşatma, çalışma sertleşmesi durgunluğu olarak, üç ana başlık altında tanımlanır. Sertleşme eğrisi bir malzemenin sertleşme davranışını tanımlar. Gerilim gerinim diyagramını tanımlamak için alternatif seçenekler bulunmaktadır. Sertleşme eğrisi Ludwik yaklaşımına göre aşağıdaki formülle bulunur. Ludwik formülünde σ gerçek stres, K mukavemet katsayısı, n gerinim sertleşmesi üssü, ε toplam logaritmik gerinim, ε_{pl} toplam gerinimin plastik kısmı ve σ_0 akma gerilimidir [98].

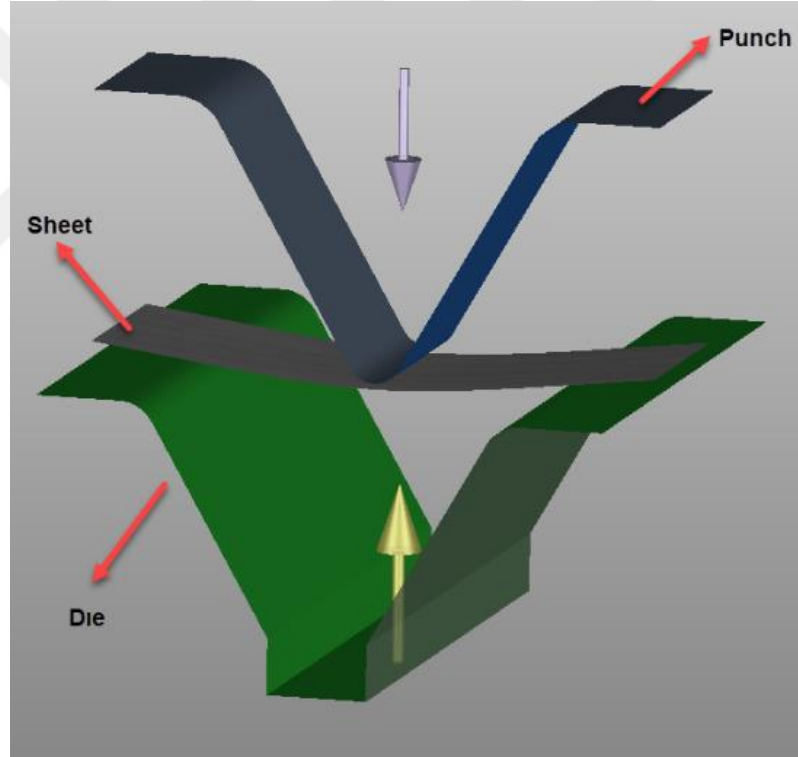
$$\sigma = K\varepsilon^n; \sigma(\varepsilon_{pl}=0) = \sigma_0 \quad (6.6)$$

Sonlu elemanlar programında geri esnemenin incelendiği çalışmada, şekillendirme sırasında ağ miktarının artmasıyla daha hassas sonuçlar alındığı tespit edilmiştir [119].

Sonuç olarak sonlu elemanlar modellemesi açısından malzemelerin plastisite modellerinin belirlenmesi parçaların şekillendirme tahminlerinde kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek mukavemetli sacların şekillendirilmesinde parametre seçimleri dikkatli yapılırsa telafili kalıp yüzeyleri daha az zamanda yapılabilir ve iyileştirmelere daha az ihtiyaç olur.

6.3.3.1. V Bükme Deneyi

V bükme deneyinde, Hill-48, Barlat-89, Hill-48 + kinematik pekleşme, Barlat-89 + kinematik pekleşme malzeme modelleri bükme prosesinde incelenmiştir. SCGADUB1180 geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğinin, 4 farklı malzeme modelinde, 30°,60°,90° kalıp açılarında, R3, R6, R9 kalıp radyüslerinde, 0°,45°,90° hadde yönlerinde geri yaylanma davranışı araştırılarak malzeme modellerinin kıyaslaması yapılmıştır. Toplam 108 adet analiz yapılmıştır. Yapılan her bir analiz sonucu Catia ortamına aktarılmıştır. Ölçümlerin tamamlanmasına müteakip yapılan analizler deneyden ölçülen geri yaylanma miktarı ile karşılaştırılmıştır. Matematik modelin gösterimi Şekil 6.20’ de gösterildiği gibidir.



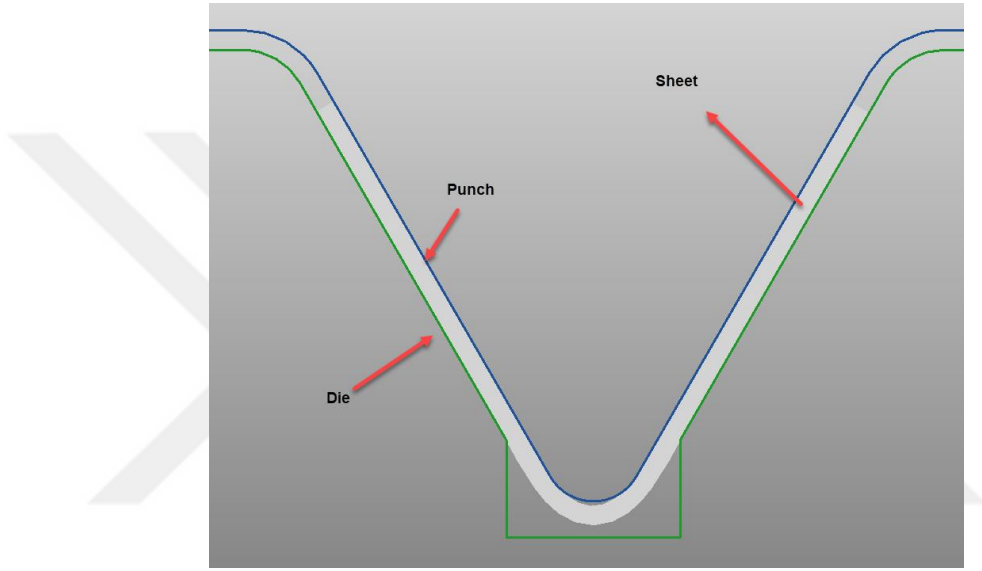
Şekil 6.20. Autoformda V kalıp gösterimi

Autoform yazılımında tanımlanan proses parametreleri Çizelge 6.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. V bükme sonlu elemanlar analiz parametreleri.

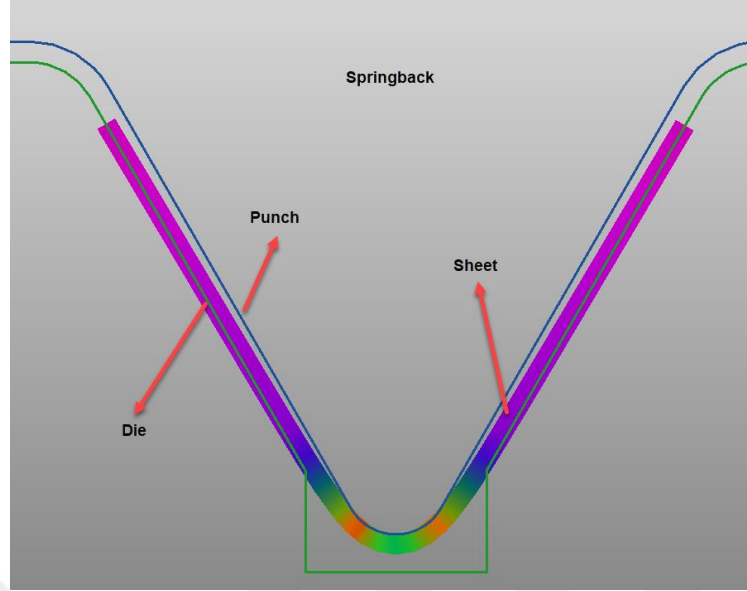
Kalıp hızı	233 mm/s
Sürtünme katsayısı	0,15
Pres stroğu	700 mm
Malzeme kalınlığı	1,2 mm

Şekil 6.21’de şekillendirilmiş sac malzemenin görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 6.21. Autoformda şekillendirilmiş parçanın gösterimi.

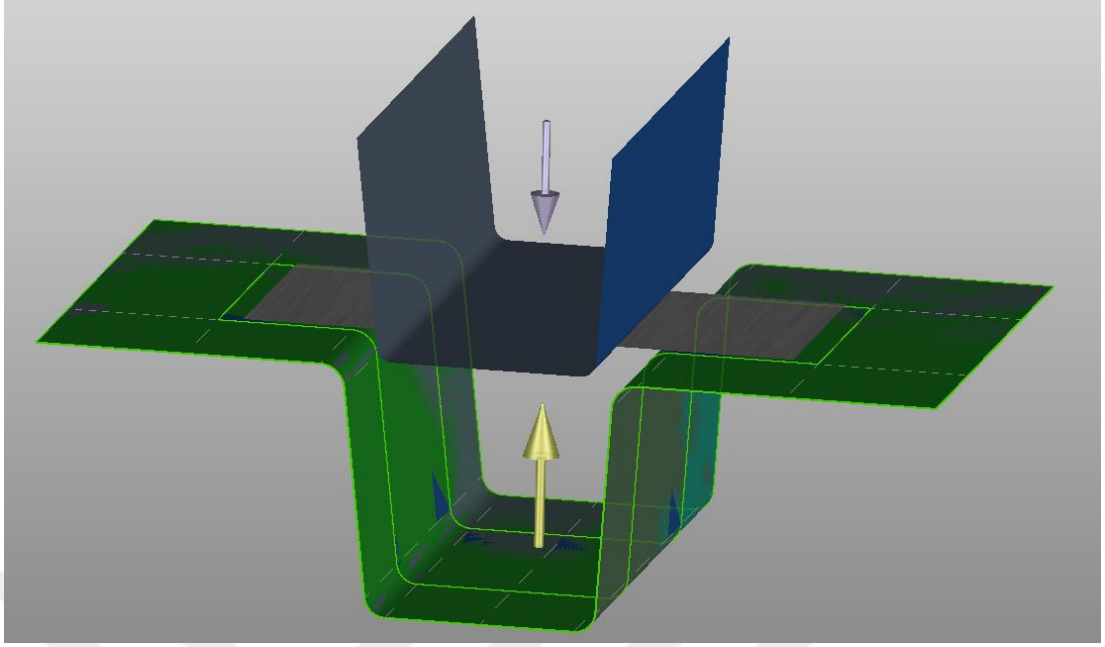
Şekil 6.22’da pres kuvvetinin parçadan kalktıktan sonraki geri yaylanmış durumu gözükmetedir. Her bir analiz sonucu Autuform yazılımından Catia yazılımına aktarılmıştır. Aktarılan her bir malzeme modelindeki sacın geri yaylanması elde edilmiş eğri ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.22. Autoformda şekillendirilmiş parçada geri yaylanma gösterimi.

6.3.3.2. U Bükme Deneyi

U bükme deneyinde, Hill-48, Barlat-89, Hill-48 + kinematik pekleşme, Barlat-89 + kinematik pekleşme malzeme modelleri bükme prosesinde incelenmiştir. SCGADUB1180 geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğinin, 4 farklı malzeme modelinde, 93° ve 97° duvar açılarında, R3, R5, R8 zımba radyüslerinde, 90° hadde yönünde geri yaylanma davranışı araştırılarak malzeme modellerinin kıyaslaması yapılmıştır. Toplam 12 adet analiz yapılmıştır. Yapılan her bir analiz sonucu Catia ortamına aktarılmıştır. Ölçümlerin tamamlanmasına müteakip yapılan analizler deneyden ölçülen geri yaylanma miktarı ile karşılaştırılmıştır. Matematik modelin gösterimi Şekil 6.23' de gösterildiği gibidir.

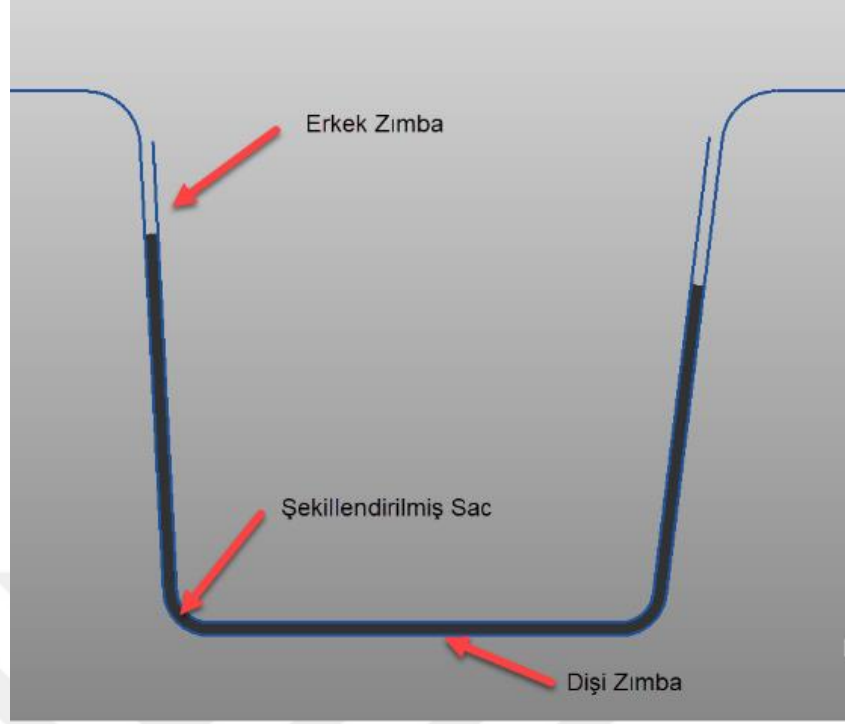


Şekil 6.23. Autoformda U bükme kalıbının gösterimi.

Autoform yazılımında tanımlanan U büküm proses parametreleri Çizelge 6.7’de gösterilmiştir.

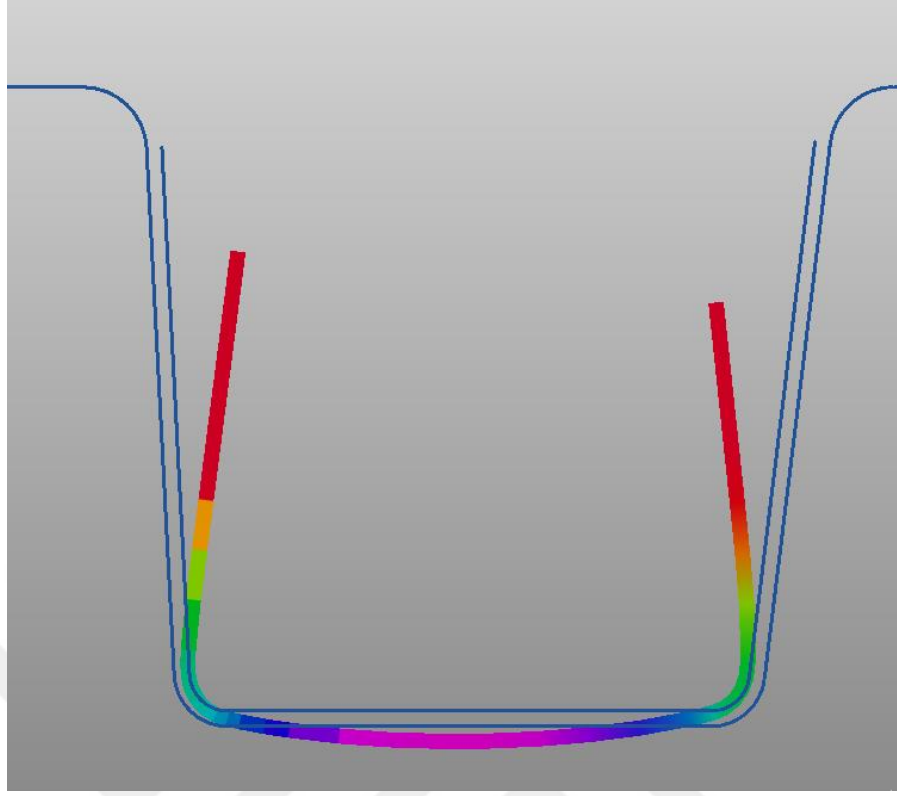
Çizelge 6.7. U bükme sonlu elemanlar analiz parametreleri.

Kalıp hızı	233 mm/s
Sürtünme katsayısı	0,15
Pres stroğu	700 mm
Malzeme kalınlığı	1,2 mm



Şekil 6.24. Autoformda U bükme kalıbında şekillendirilmiş parçanın gösterimi.

Şekil 6.24’de şekillendirilmiş sac malzemenin görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 6.25’de pres kuvvetinin parçadan kalktıktan sonraki geri yaylanmış durumu gözükmektedir. Her bir analiz sonucu Autuform yazılımından Catia yazılımına aktarılmıştır. Aktarılan her bir malzeme modelindeki sacın geri yaylanması elde edilmiş eğri ile deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.25. Autoformda U bükme kalıbında geri yaylanmanın gösterimi.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1.1. V Bükme Deneysel Sonuçları

Şekillendirilmiş parçalar Şekil 7.1’de görülmektedir. Her bir proseste 3 büküm yapılmıştır. Her bir bükümün aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 7.1. V bükme kalıbında şekillendirilmiş numuneler.

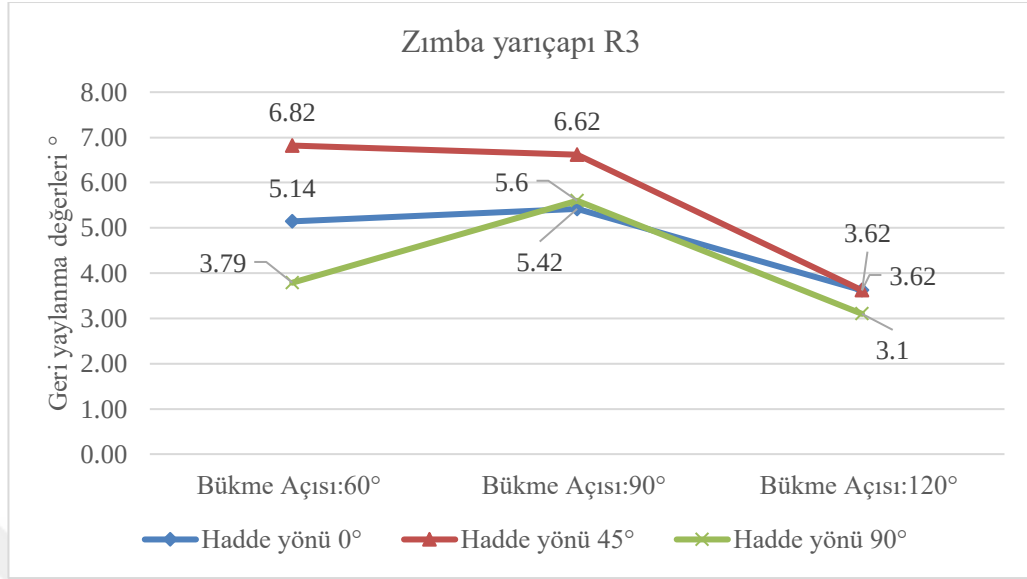
Çizelge 7.1’de aritmetik ortalamaları alınmış geri yaylanma değerleri gözükmemektedir.

Çizelge 7.1. V bükme geri yaylanma ölçüm sonuçları.

Test Numarası	Zımba radyüsü	Bükme açısı	Hadde yönü	Geri yaylanma değerleri
1	3 mm	60°	0°	5,14°
2	3 mm	60°	45°	6,82°
3	3 mm	60°	90°	3,79°
4	3 mm	90°	0°	5,42°
5	3 mm	90°	45°	6,62°
6	3 mm	90°	90°	5,6°
7	3 mm	120°	0°	3,62 °
8	3 mm	120°	45°	3,62°
9	3 mm	120°	90°	3,1°
10	6 mm	60°	0°	11,96°
11	6 mm	60°	45°	11,18°
12	6 mm	60°	90°	11,2°
13	6 mm	90°	0°	13,16°
14	6 mm	90°	45°	11,89°
15	6 mm	90°	90°	12,71°
16	6 mm	120°	0°	8°
17	6 mm	120°	45°	6,38°
18	6 mm	120°	90°	6,93°
19	9 mm	60°	0°	20,29°
20	9 mm	60°	45°	19,27°
21	9 mm	60°	90°	20,05°
22	9 mm	90°	0°	20,11°
23	9 mm	90°	45°	19,97°
24	9 mm	90°	90°	19,56°
25	9 mm	120°	0°	13,88°
26	9 mm	120°	45°	13,35°
27	9 mm	120°	90°	13,49°

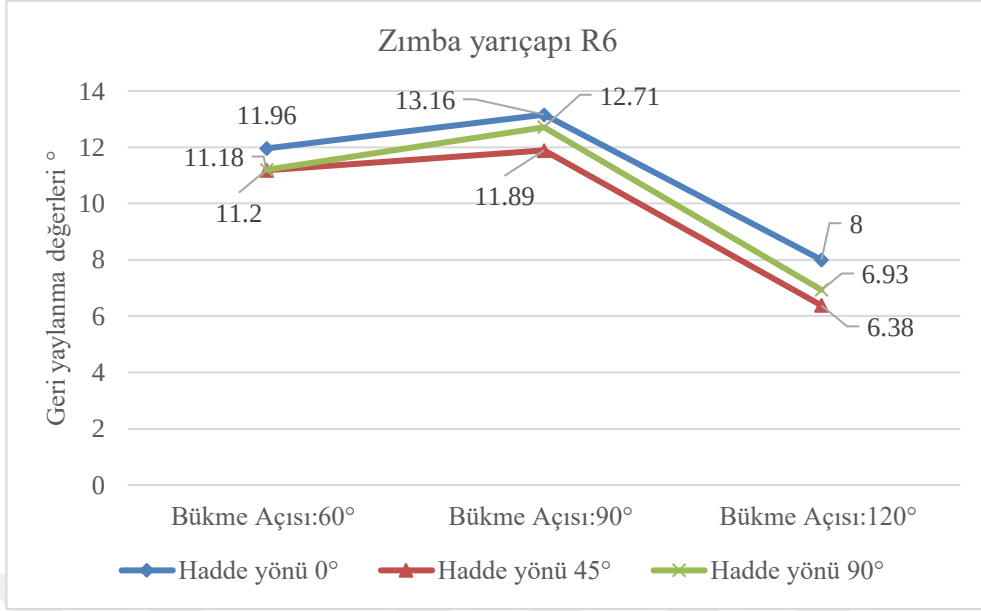
7.1.1.1. Kalıp Açısına Bağlı Olarak Geri Yaylanmanın Değerlendirilmesi

Şekil 7.2’de R3 zımba yarıçapında büküm açılarına göre geri yaylanma değerleri görülmektedir. 90° büküm açısında 60° büküm açısına göre 0° ve 90° geri yaylanma değerleri artmış, 45° hadde yönünde azalmıştır. 120° büküm açısında üç hadde yönünde geri yaylanma değerleri azalmıştır. Üç büküm açısında en yüksek geri yaylanmalar 45° hadde yönünde görülmüştür. Üç büküm açısında en düşük geri yaylanmalar 90° hadde yönünde görülmüştür. Küçük zımba yarıçapı ve küçük bükme açılarında hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi açıkça gözükmemektedir. Özellikle büküm açısı arttıkça hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi azalmaktadır.



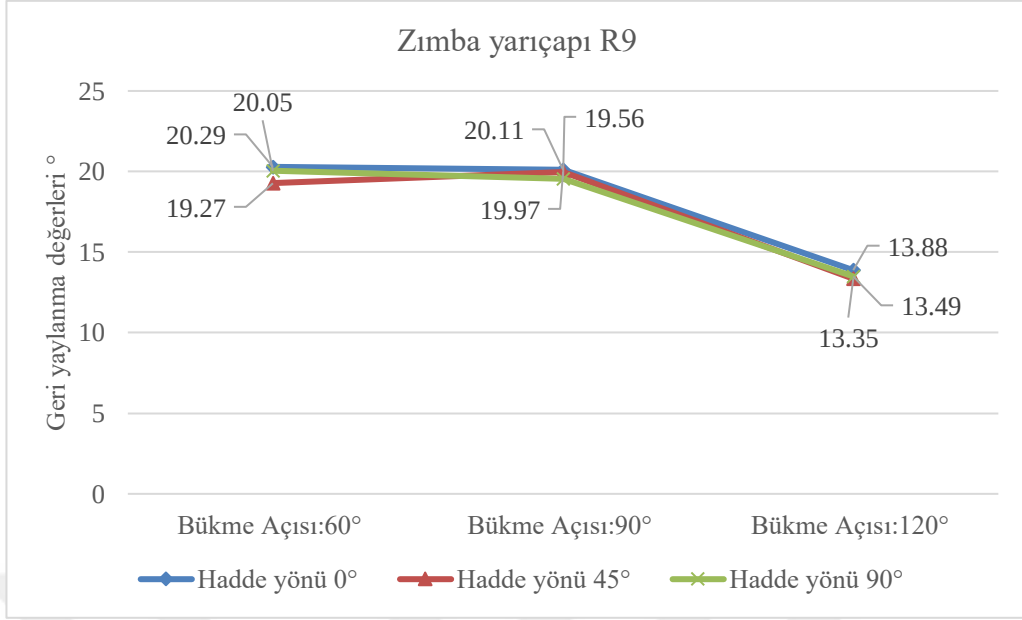
Şekil 7.2. R3 zımba yarıçapındaki geri yaylanma değerleri.

Şekil 7.3’de R6 zımba yarıçapında büküm açılarına göre geri yaylanma değerleri görülmektedir. 90° büküm açısında 60° büküm açısına göre üç hadde yönündeki geri yaylanma değerleri artmıştır. 120° büküm açısında üç hadde yönünde geri yaylanma değerleri azalmıştır. Üç büküm açısında en yüksek geri yaylanmalar 0° hadde yönünde görülmüştür. Üç büküm açısında en düşük geri yaylanmalar 45° hadde yönünde görülmüştür.



Şekil 7.3. R6 zimba yarıçapındaki geri yaylanma değerleri.

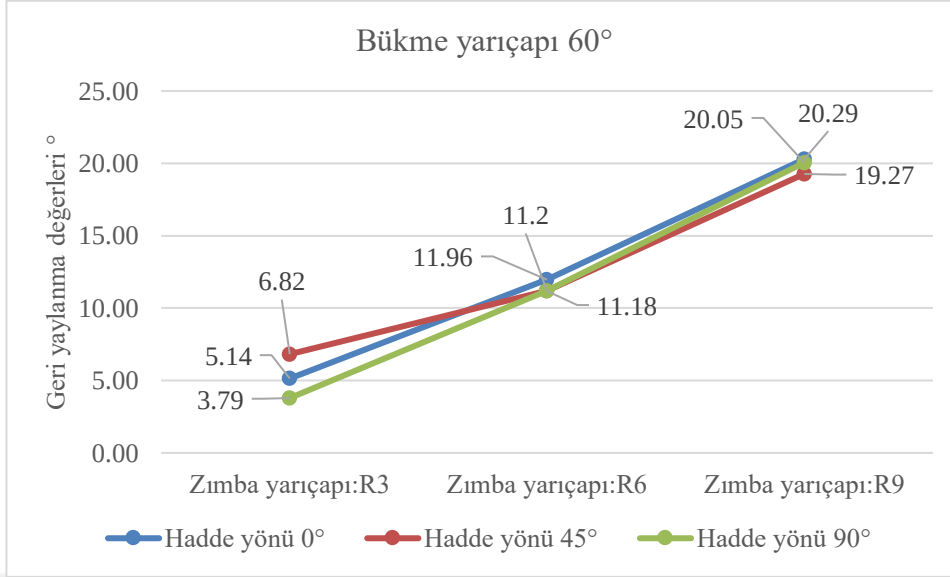
Şekil 7.4’de R9 zimba yarıçapında büküm açılarına göre geri yaylanma değerleri görülmektedir. 90° büküm açısında 60° büküm açısına göre 45° hadde yönündeki geri yaylanma değerleri artmış, 0° ve 90° hadde yönlerinde geri yaylanma değerleri oldukça yakındır. 120° büküm açısında üç hadde yönünde geri yaylanma değerleri azalmıştır. En düşük geri yaylanmalar 120° büküm açısında görülmüştür. Her üç büküm açısında da her üç hadde yönündeki geri yaylanmalar birbirine oldukça yakındır.



Şekil 7.4. R9 zimba yarıçapındaki geri yaylanma değerleri.

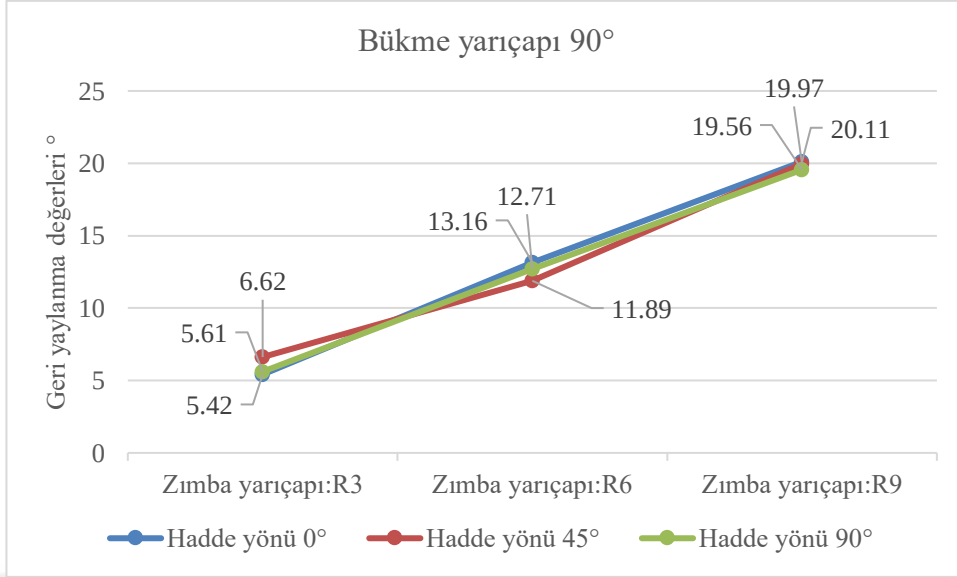
7.1.1.2. Zimba Yarıçaplarına Bağlı Olarak Geri Yaylanmanın Değerlendirilmesi

Şekil 7.5’de kalıp açısının 60°, bükme yarıçapların R3, R6 ve R9 olduğu durumdaki 0°, 45°, 90° hadde yönlerindeki, geri yaylanma değerleri gözükmemektedir. Bükme prosesi boyunca parçalarda herhangi kırılma, çatlak meydana gelmemiştir. Grafikteki geri yaylanma değerleri incelendiğinde bükme yarıçapının geri esneme üzerindeki etkisi oldukça fazla olduğu görülmüştür. Zimba yarıçapı arttıkça geri esneme değerleri artmaktadır. Zimba yarıçapının R3 olduğu durumda hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi açıkça görülmektedir, 90° hadde yönünde en az geri yaylanma değerleri görülmüştür. Zimba yarıçaplarının R6 ve R9 olduğu durumlarda 0°, 45°, 90° hadde yönünün etkisinin çok yakın olduğu görülmüştür. 0° hadde yönünde, zimba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 292 artmıştır. 45° hadde yönünde, zimba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 182 artmıştır. 90° hadde yönünde, zimba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 429 artmıştır.



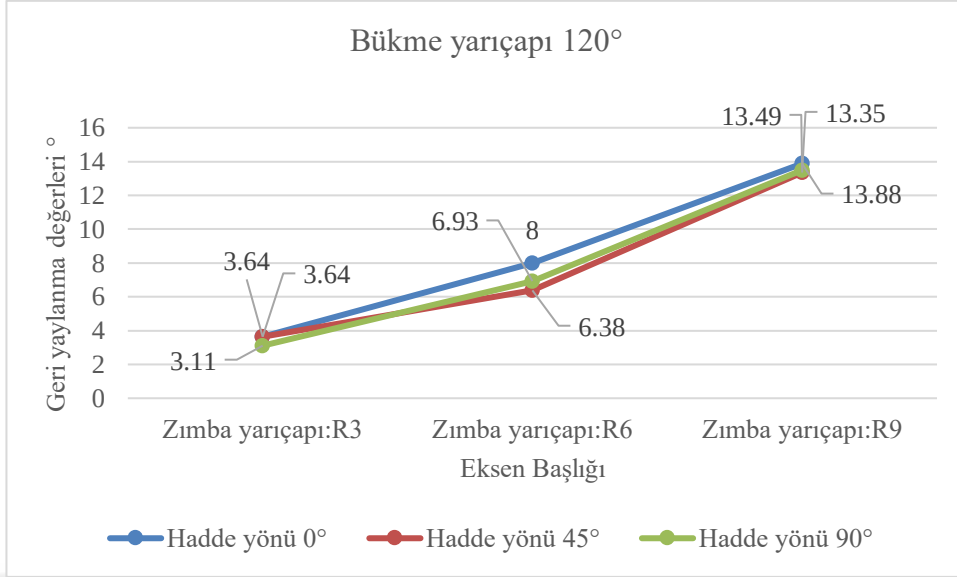
Şekil 7.5. 60° bükme yarıçapında geri yaylanma değerleri.

Şekil 7.6’da bükme açısının 90°, zımba yarıçapların R3, R6 ve R9 olduğu durumdaki 0°,45°,90° hadde yönlerindeki, geri yaylanma değerleri görülmektedir. Bükme prosesi boyunca parçalarda herhangi kırılma, çatlak meydana gelmemiştir. Grafikteki geri yaylanma değerleri incelendiğinde bükme yarıçapının geri esneme üzerindeki etkisi oldukça fazla olduğu görülmüştür. Zımba yarıçapı arttıkça geri esneme değerleri artmaktadır. Zımba yarıçapının R3 ve R6 olduğu durumda hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi açıkça görülmektedir, zımba yarıçapının R9 olduğu durumda ise hadde yönlerine göre geri esneme değerleri oldukça yakındır. 0° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 270 artmıştır. 45° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 256 artmıştır. 90° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 249 artmıştır.



Şekil 7.6. 90° bükme yarıçapında geri yaylanma değerleri.

Şekil 7.7’de kalıp açısının 120°, bükme yarıçapların R3, R6 ve R9 olduğu durumdaki 0°, 45°, 90° hadde yönlerindeki, geri yaylanma değerleri gözükmemektedir. Bükme prosesi boyunca parçalarda kırılma ve çatlak meydana gelmemiştir. Grafikteki geri yaylanma değerleri incelendiğinde bükme yarıçapının geri esneme üzerindeki etkisi oldukça fazla olduğu görülmüştür. Zimba yarıçapı arttıkça geri esneme değerleri artmaktadır. Zimba yarıçapının R9 olduğu durumda hadde yönüne göre geri yaylanma değerleri yakın olduğu görülmüştür. Zimba yarıçapı R6 durumunda, 45° hadde yönünde geri yaylanma değeri düşük görülmüştür. 0° hadde yönünde, zimba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 281 artmıştır. 45° hadde yönünde, zimba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 267 artmıştır. 90° hadde yönünde, zimba yarıçapı R3’den R9’a arttığında geri yaylanma % 334 artmıştır.



Şekil 7.7. 120° bükme yarıçapında geri yaylanma değerleri.

7.1.2. U Bükme Deneysel Sonuçları

Şekillendirilmiş parçalar Şekil 7.8’de görülmektedir. Her bir proseste 4 büküm yapılmıştır. Her bir bükümün aritmetik ortalaması alınmıştır.



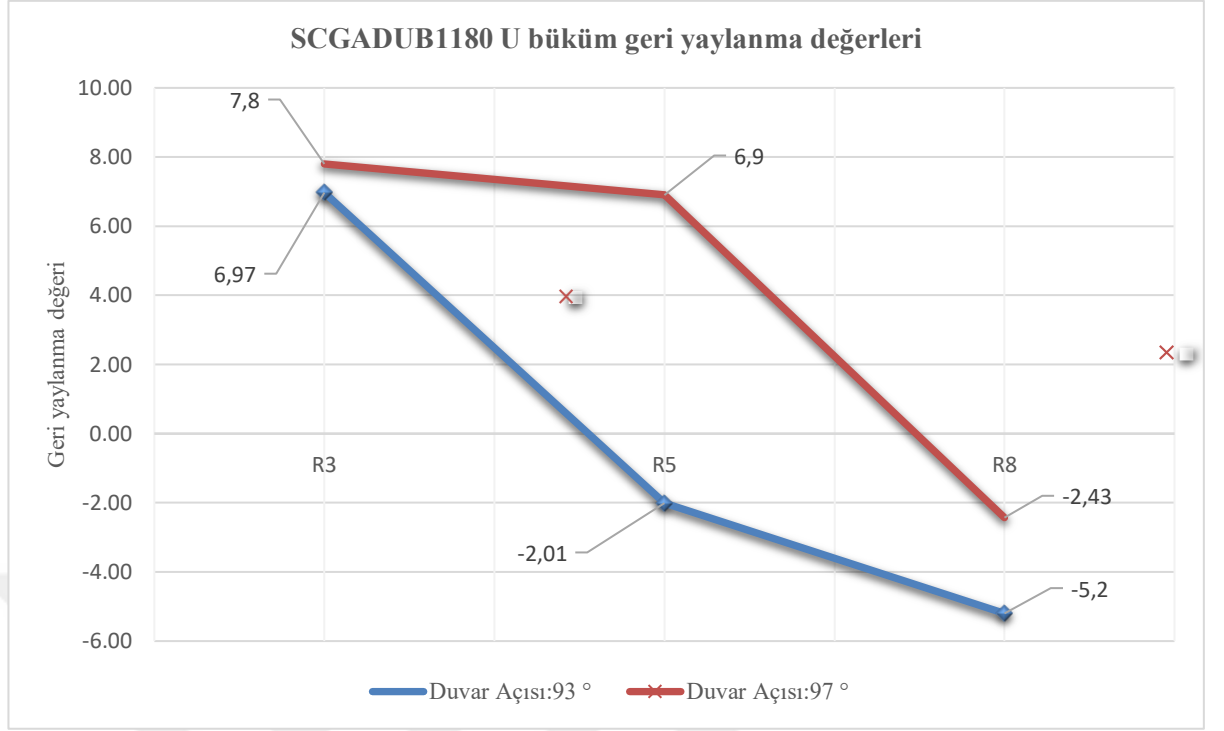
Şekil 7.8. U büküm şekillendirilmiş numuneler.

Çizelge 7.2’de üç farklı zımba yarıçapında ve iki farklı duvar açısında yapılan büküm sonucunda elde edilen geri yaylanma değerleri görülmektedir. R3 zımba yarıçapında parça içeri içeri yöne kapanmaya çalışarak, ileri yaylanma davranışı göstermiştir. R5 zımba yarıçapında 93° duvar açısında geri yaylanma, 97° duvar açısında ileri yaylanma davranışı göstermiştir. R8 zımba yarıçapında ise her iki duvar açısında geri yaylanma meydana gelmiştir.

Çizelge 7.2. U bükme geri yaylanma ölçüm sonuçları.

Zımba yarıçapı(mm)	R3		R5		R8	
Duvar Açısı (°)	93	97	93	97	93	97
1. Numune (°)	6,78	8,47	-3,57	8,24	-4,46	-3,08
2. Numune (°)	7,07	7,42	-3,14	7	-5,2	-2,5
3. Numune (°)	6,81	8,06	-0,49	5,95	-5,97	-2,04
4. Numune (°)	7,2	7	-0,86	6,14	-5,24	-2,1
Ortalama	6,97	7,8	-2,01	6,9	-5,2	-2,43

Şekil 7.9’da grafiği incelediğimizde, 93° duvar açısında zımba yarıçapları arttıkça geri yaylanma değeri azalmış ve parça geri yaylanma davranışı göstermeye başlamıştır. 97° duvar açısında, R3 ve R5 zımba yarıçaplarında parça ileri yönde yaylanma davranışı göstermiştir.



Şekil 7.9. U büküm geri yaylanma değerleri.

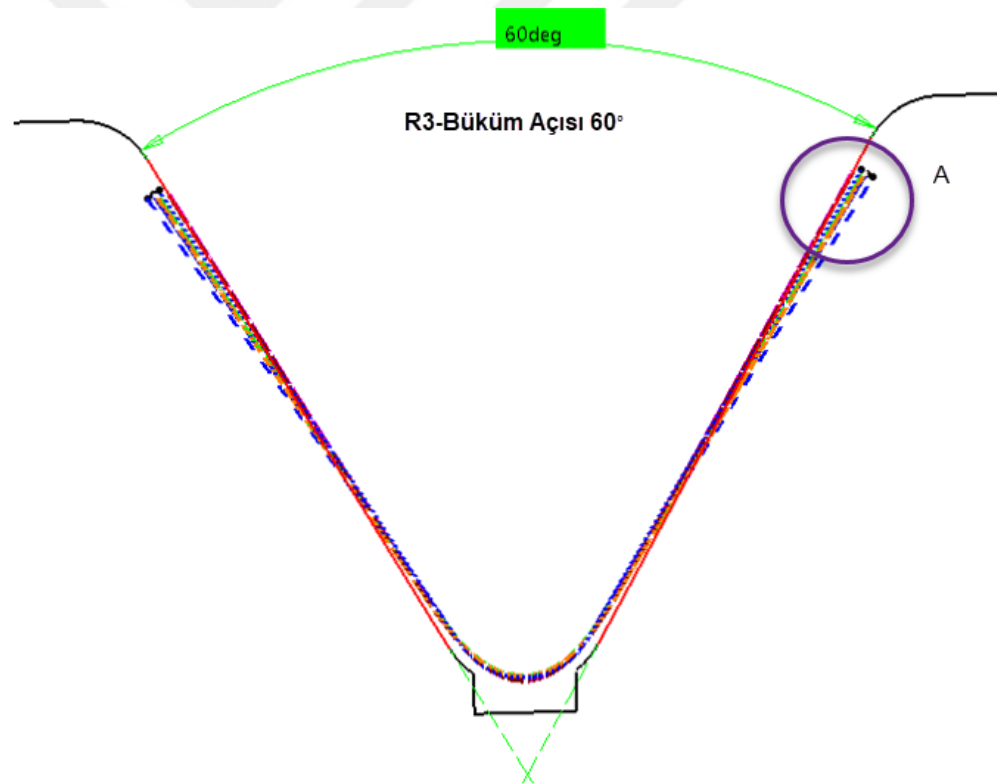
7.2. SONLU ELEMENLAR ANALİZ SONUCLARI

7.2.1. V bükme Geri Yaylanma Değerleri

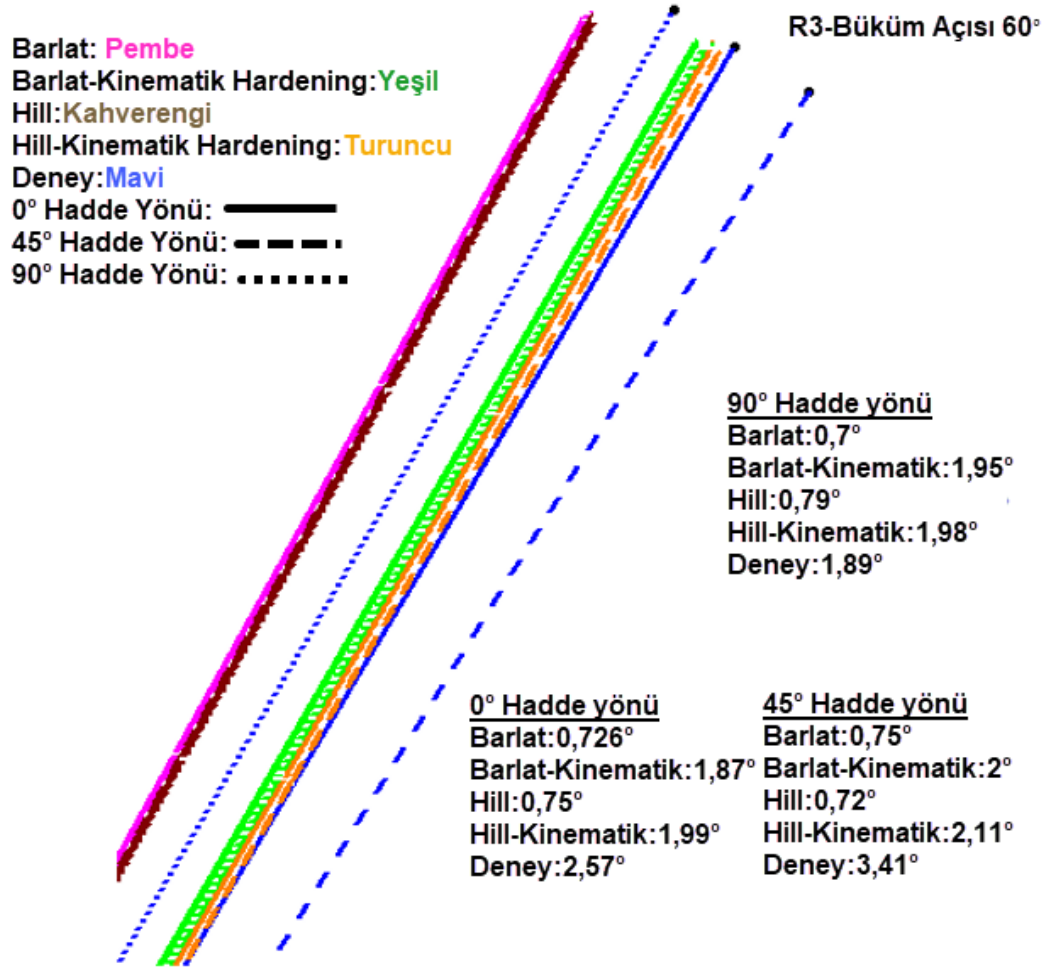
Simülasyonların tamamlanmasından sonra, sonuçlar malzeme modelleri bakımından deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak, malzeme modellerinin geri yaylanma tahminlerindeki hassasiyetleri incelenmiştir. Geri esneme değerleri, zımba stroğunun sonunda numune serbest kaldığında analizin en son adımında hesaplanmıştır.

R3 zımba yarıçapında, her üç büküm açısında 45° hadde yönünde geri yaylanmalar yüksek görülmüştür. Kinematik pekleşmenin olduğu plastisite modelleri deney sonuçlarına yakın değerleri öngörebilmiştir.

kinematik pekleşme ve Hill-48 kinematik pekleşme modellerinde görülmüştür. (Şekil 7.11).

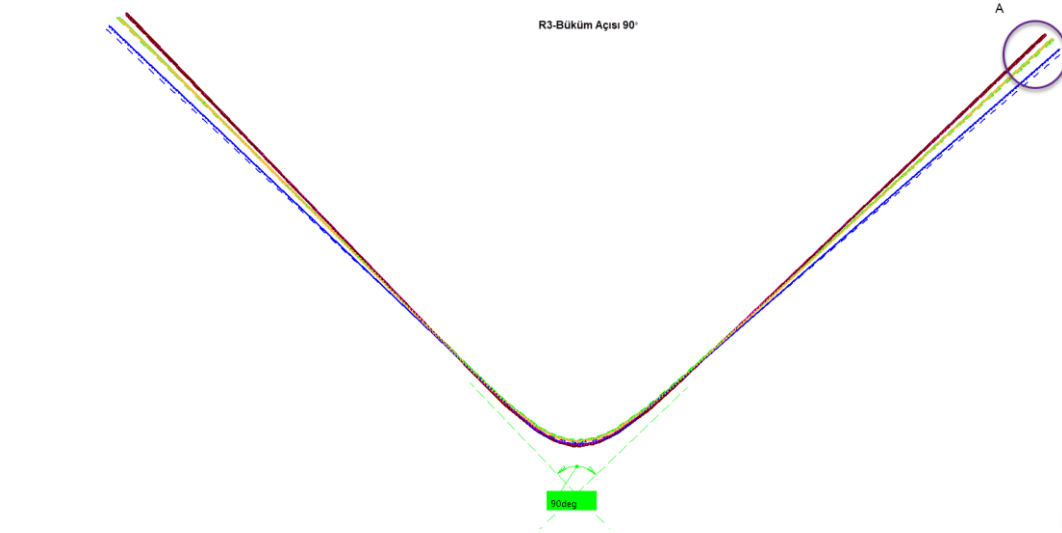


Şekil 7.10. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.

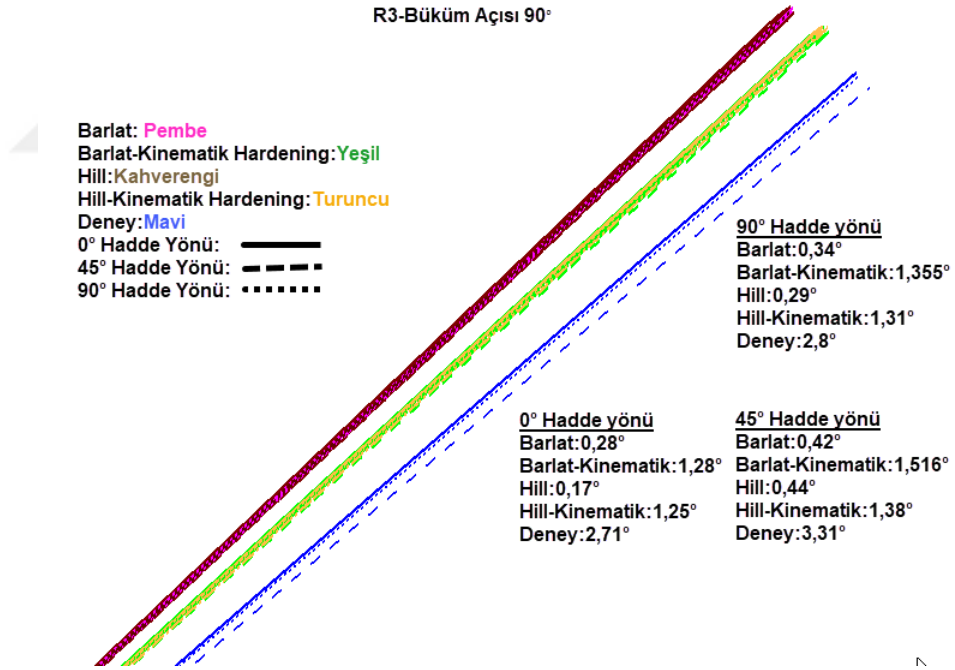


Şekil 7.11. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.

Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 90° olduğu durumda, (Şekil 7.12) 0° ve 90° hadde yönünde en az geri yaylanmalar görülmüştür. Barlat-89 ve Hill-48 modellerinin geri yaylanma değerleri birbirine çok yakındır ve geri yaylanma değerlerini uygun tahmin edememiştir. Deneysel sonuçlara en yakın sonuçların Barlat-89-kinematik pekleşme ve Hill-48 kinematik pekleşme modellerinde görülmüştür. Yaklaşık olarak simülasyon sonuçlarıyla deneysel sonuçlar arasında 3° fark görülmüştür. 45° hadde yönünde geri yaylanma değerlerinin en yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 7.13).

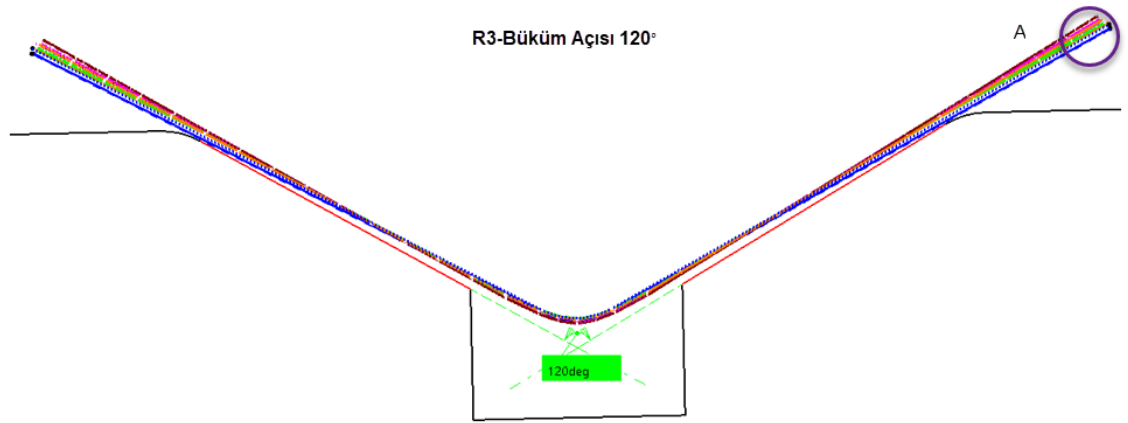


Şekil 7.12. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.

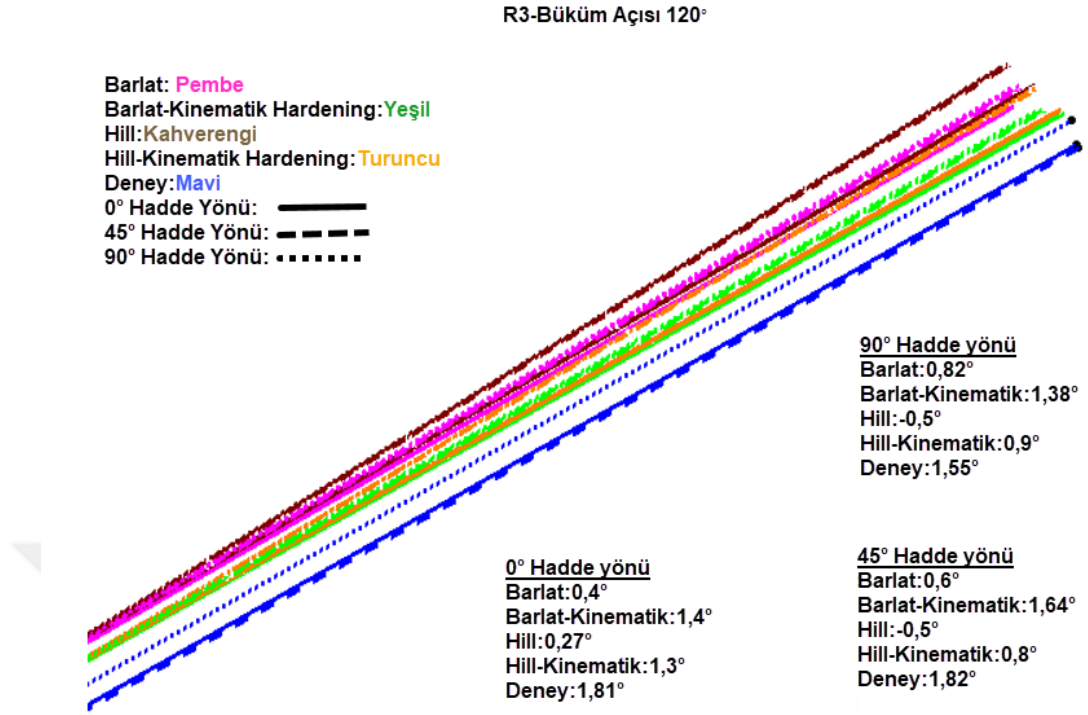


Şekil 7.13. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.

Zimba yarıçapı R3, büküm açısı 120° olduğu durumda, (Şekil 7.14) 90° hadde yönünde en az geri yaylanmalar görülmüştür. Barlat 89 - kinematik modeli deneysel sonuçlara en yakındır. Barlat-89 modeli üç hadde yönünde geri yaylanmanın hiç olmayacak kadar az öngörmüştür. Barlat-89 - kinematik modeli ile deneysel sonuçlar arasında $1-2^\circ$ fark görülmüştür. Hill plastisite modeli 90° ve 45° hadde yönünde ileri yaylanma öngörmüştür (Şekil 7.15).



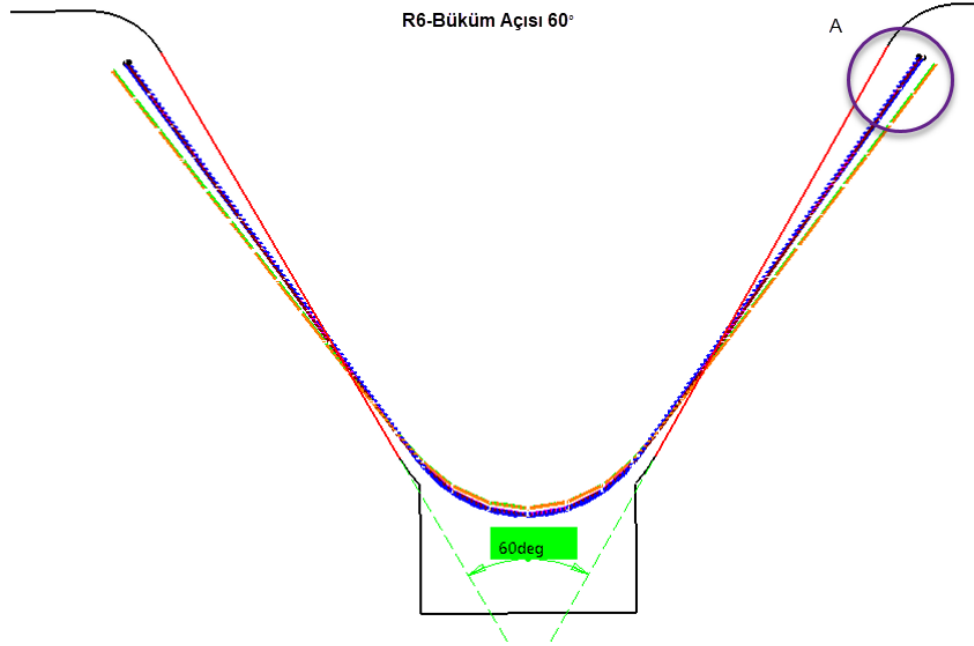
Şekil 7.14. Zimba yarıçapı R3, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.



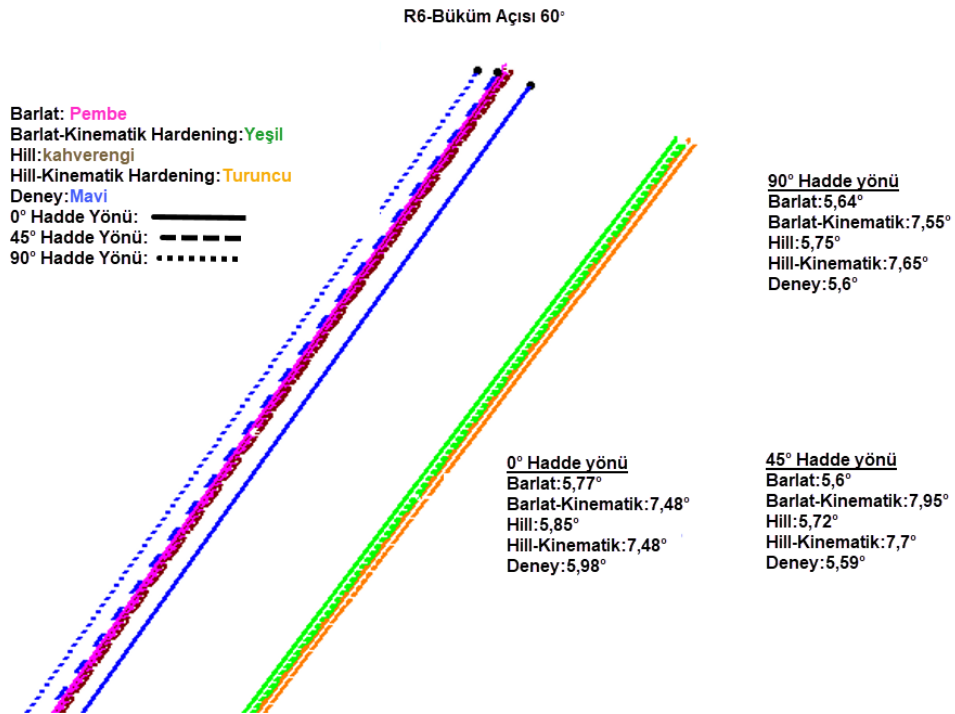
Şekil 7.15. Zımba yarıçapı R3, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.

7.2.1.2. R6 Zımba Yarıçapında Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 60° olduğu durumda, (Şekil 7.16) 45° ve 90° hadde yönünde geri yaylanmalar birbirine çok yakındır. Barlat-89 ve Hill-48 modeli deneysel sonuçlara en yakındır. Grafikte görüldüğü üzere, kinematik modeller yaklaşık olarak 4° fazla hesaplamıştır (Şekil 7.17).



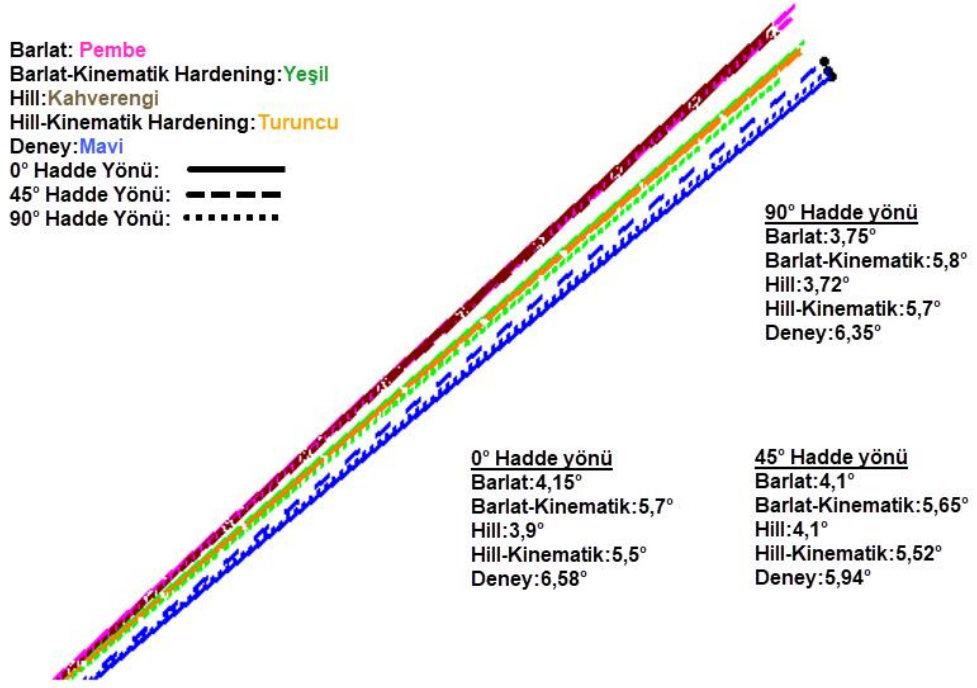
Şekil 7.16. Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.



Şekil 7.17. Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.

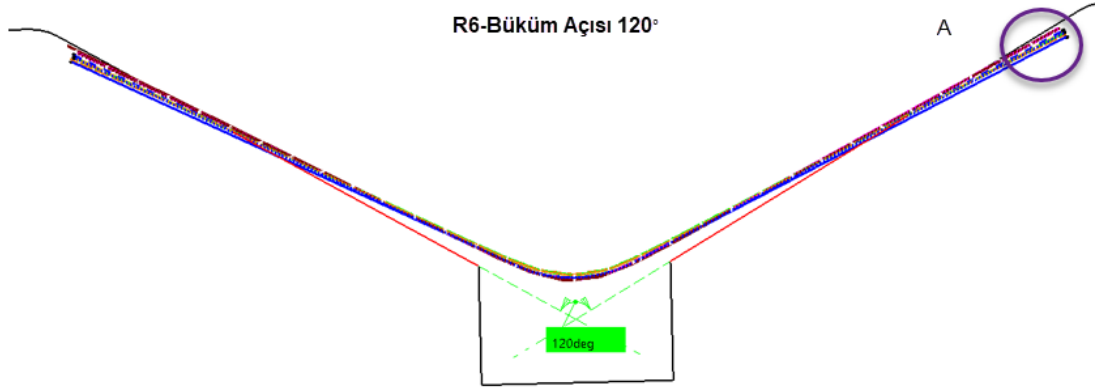
•

R6-Büküm Açısı 90°

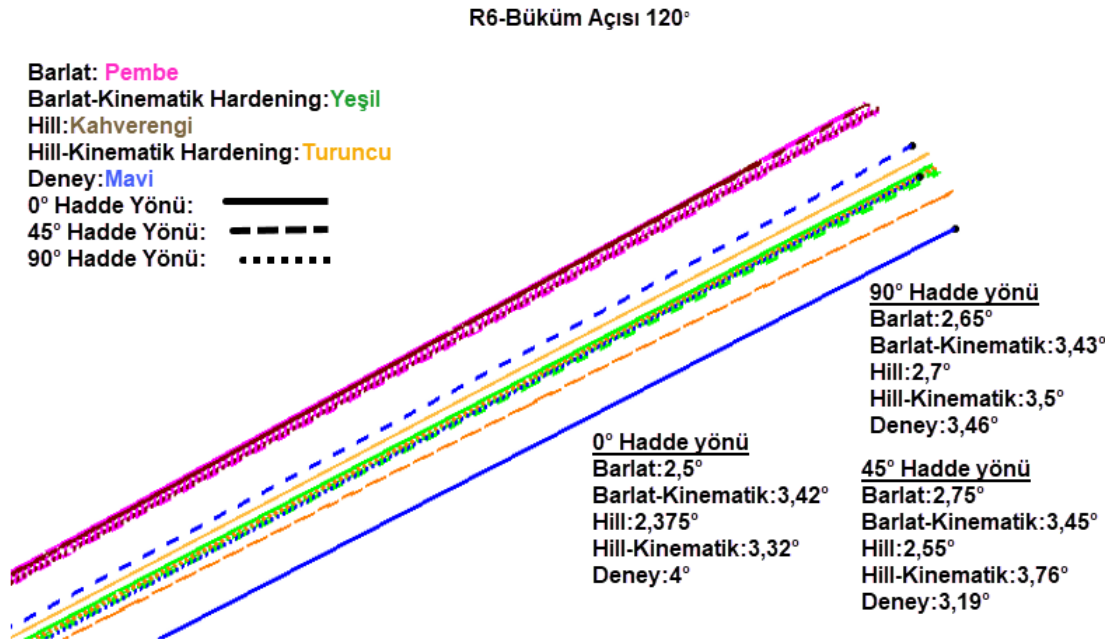


Şekil 7.19. Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların A detay gösterimi.

Zımba yarıçapı R6, büküm açısı 120° olduğu durumda, (Şekil 7.20) Barlat-89 kinematik pekleşme ve Hill-48 kinematik pekleşme modelleri geri yaylanma değerlerini deneysel sonuçlara yakın hesaplamıştır. Yaklaşık olarak Barlat-89 ve Hill-48 modelleri benzer sonuçlar hesaplamıştır. 0° hadde yönünde geri yaylama değeri en yüksek görülmüştür (Şekil 7.21).



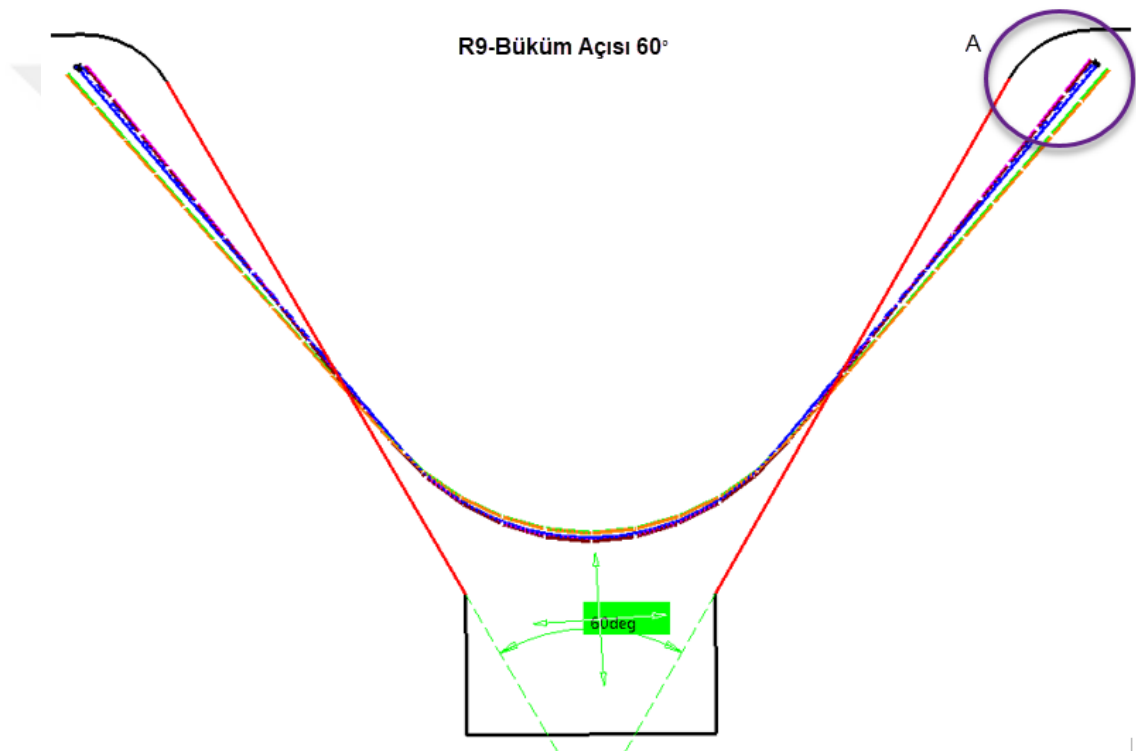
Şekil 7.20. Zimba yarıçapı R6, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.



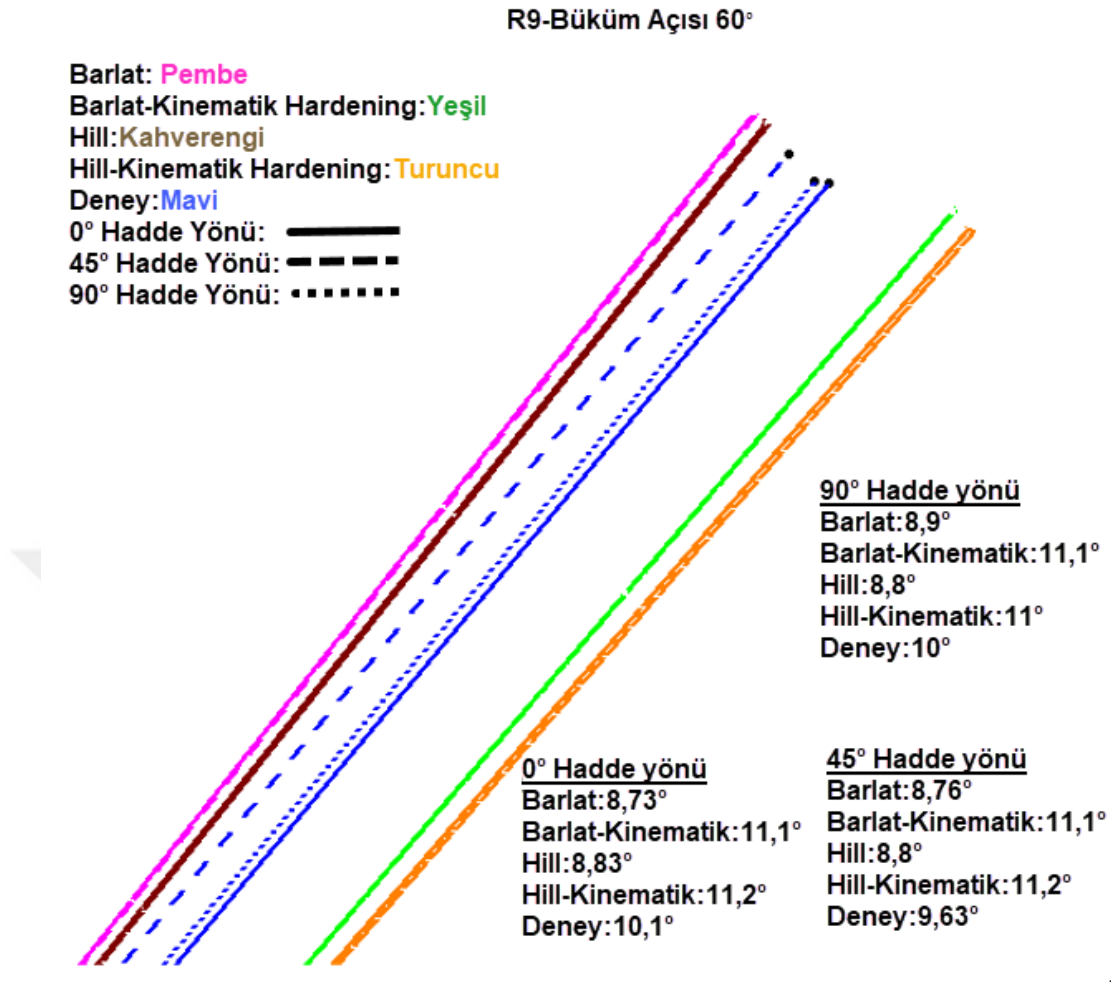
Şekil 7.21. Zimba yarıçapı R6, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre A detayının geri yaylanmaların gösterimi.

7.2.1.3. R9 Zimba Yarıçapında Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 60° olduğu durumda, (Şekil 7.22) deneysel sonuçlar, Barlat-89 kinematik pekleşme ve Hill-48 kinematik pekleşme modelleri ile Barlat-89 ve Hill-48 modellerinin tahminlerinin ortasındadır. Üç hadde yönündeki geri yaylanma değerleri çok yakındır. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında 2° fark vardır (Şekil 7.23).

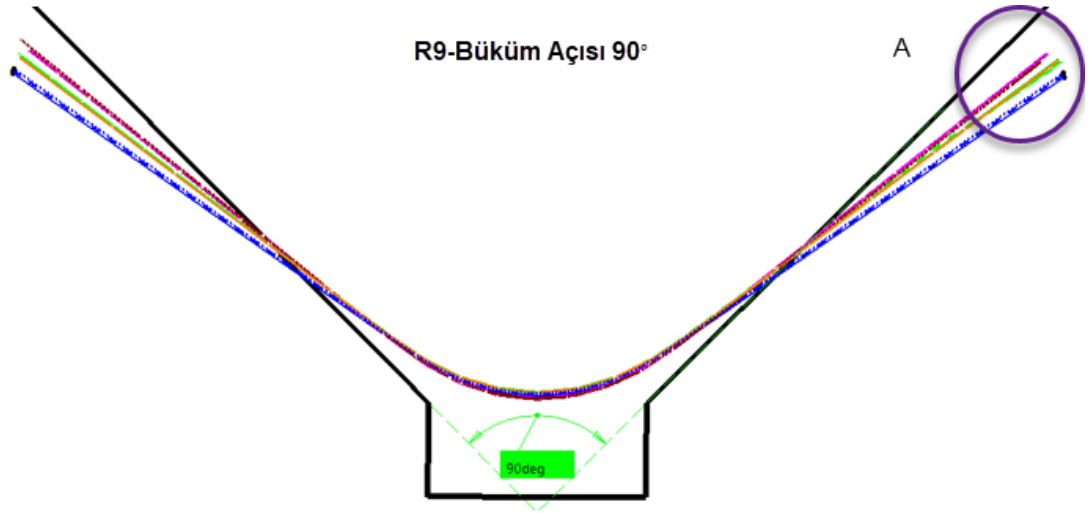


Şekil 7.22. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.

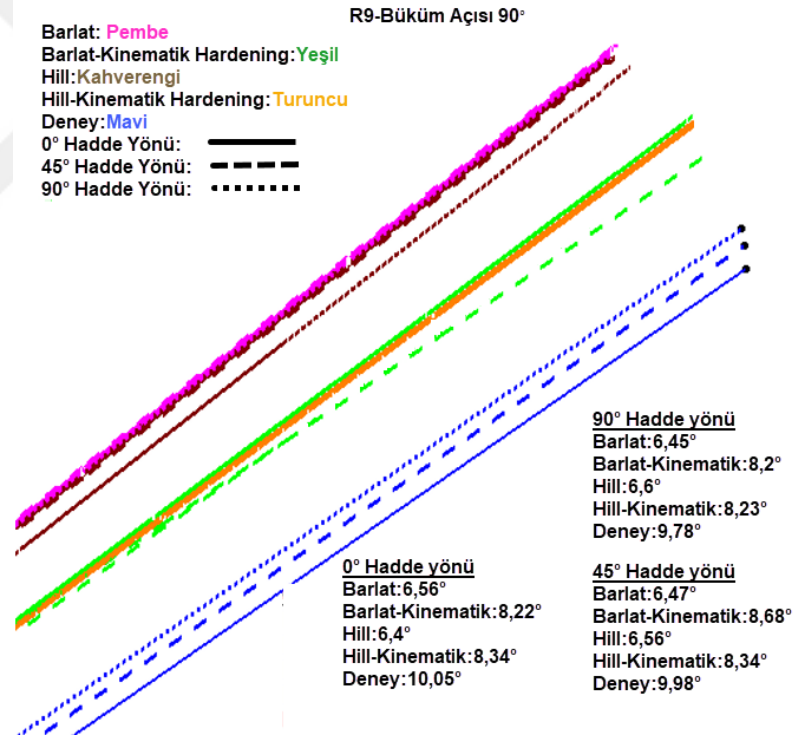


Şekil 7.23. Zımba yarıçapı R9, büküm açısı 60° olduğu durumda malzeme modellerine göre A detayının geri yaylanmaların gösterimi.

Zımba yarıçapı R9, büküm açısı 90° olduğu durumda, (Şekil 7.24) üç hadde yönündeki geri yaylanma değerleri çok yakındır. Barlat-89 kinematik pekleşme ve Hill-48 kinematik pekleşme modellerinin geri yaylanma tahminleri birbirlerine yakındır ve yakın değerlerde tahmin etmişlerdir. Barlat-89 ve Hill-48 geri yaylanma değerleri deneysel verilerden çok uzak değerler hesaplamıştır (Şekil 7.25).

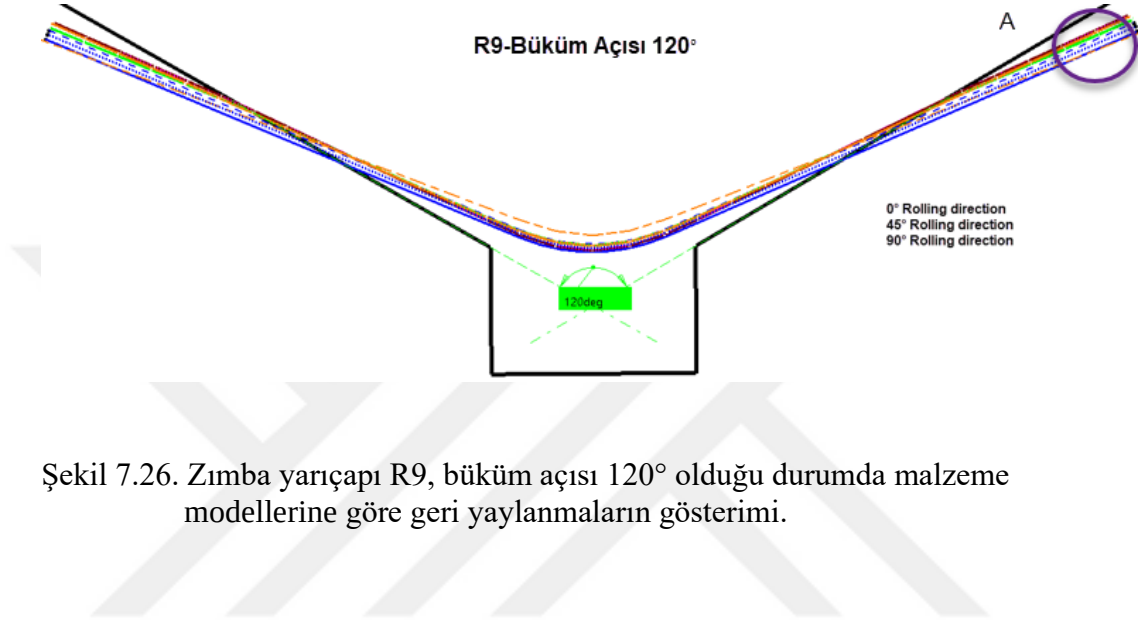


Şekil 7.24. Zımba yarıçapı R9, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.

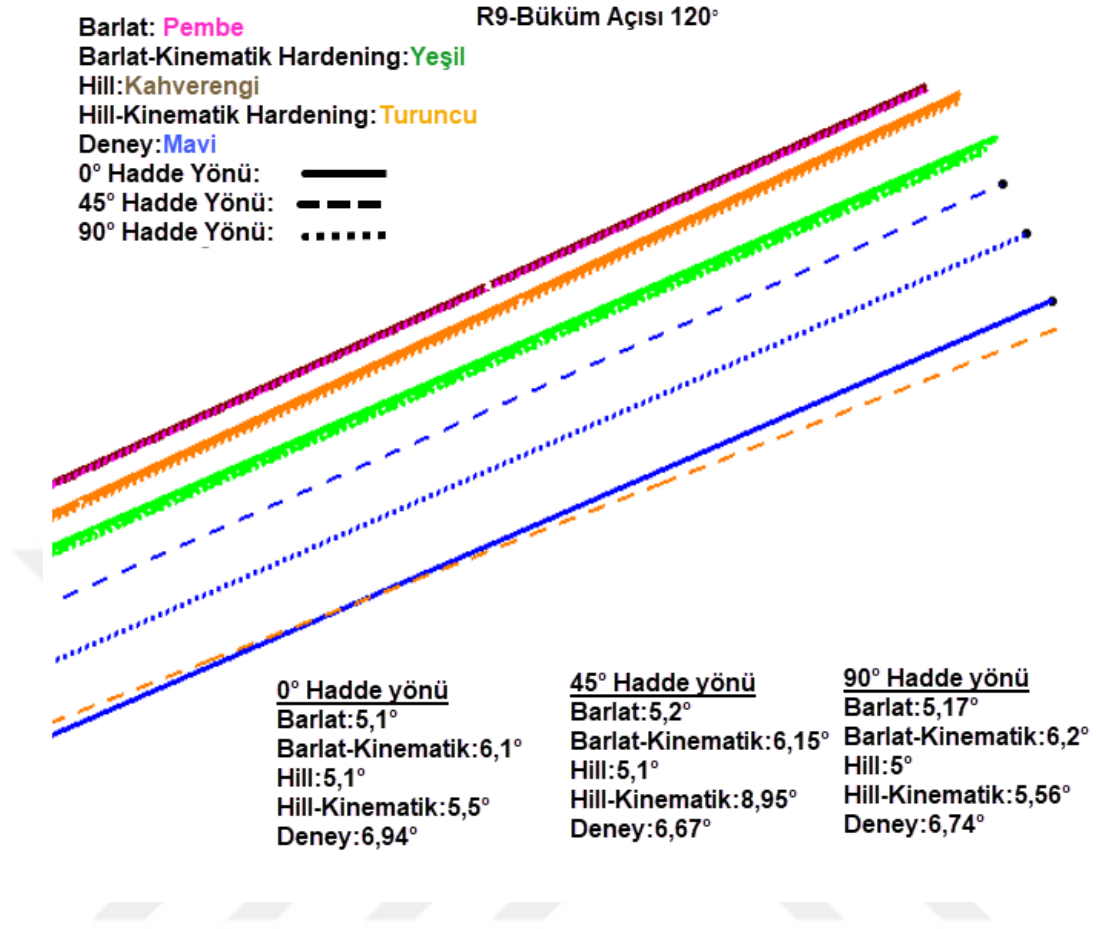


Şekil 7.25. Zımba yarıçapı R9, büküm açısı 90° olduğu durumda malzeme modellerine göre A detayının geri yaylanmaların gösterimi.

Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 120° olduğu durumda, (Şekil 7.26) üç hadde yönünde de yakın geri yaylanmalar görülmüştür. Barlat-89 ve Hill-48 modellerinin geri yaylanma değerleri birbirine çok yakındır ve geri yaylanma değerini yaklaşık olarak 3° az hesaplamıştır. Deneysel sonuçlara en yakın sonuçların Barlat-89 kinematik pekleşme modelinde görülmüştür (Şekil 7.27).



Şekil 7.26. Zimba yarıçapı R9, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre geri yaylanmaların gösterimi.



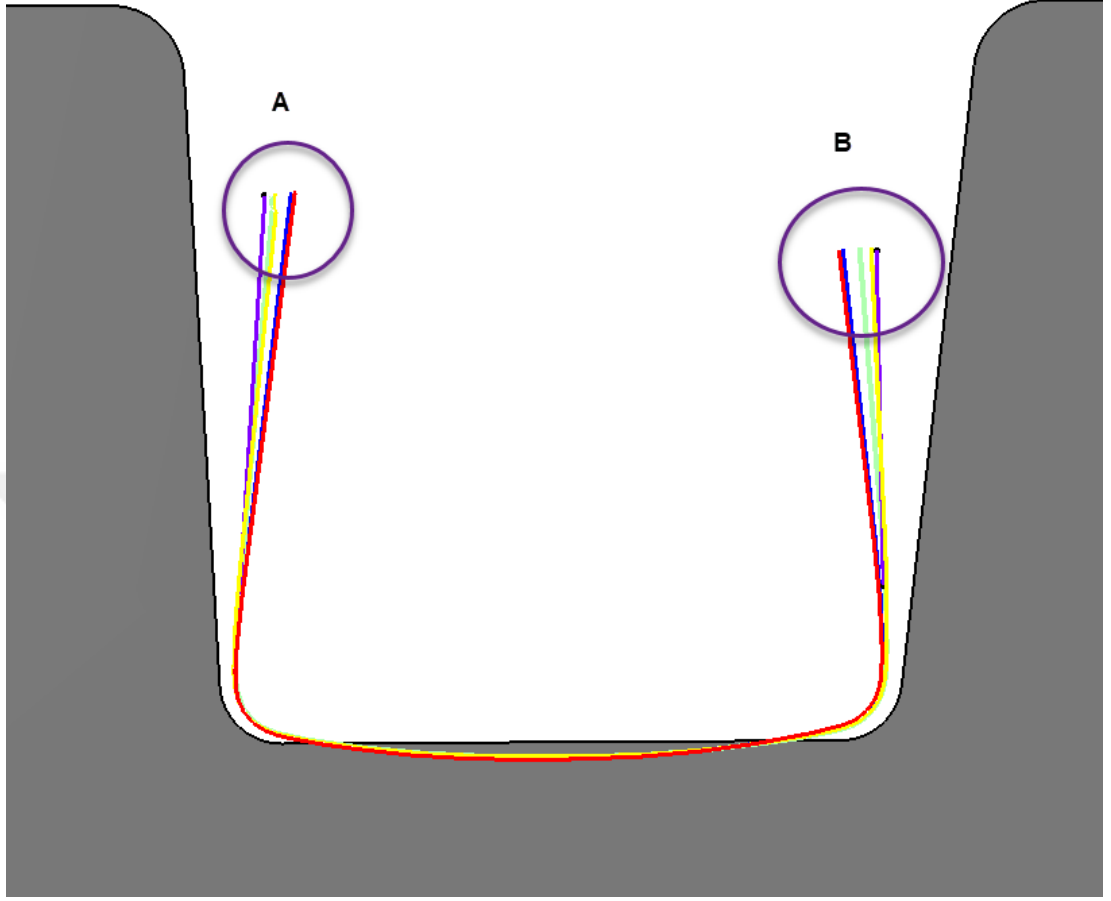
Şekil 7.27. Zımba yarıçapı R9, büküm açısı 120° olduğu durumda malzeme modellerine göre A detayının geri yaylanmaların gösterimi.

7.2.2. U bükme Geri Yaylanma Değerleri

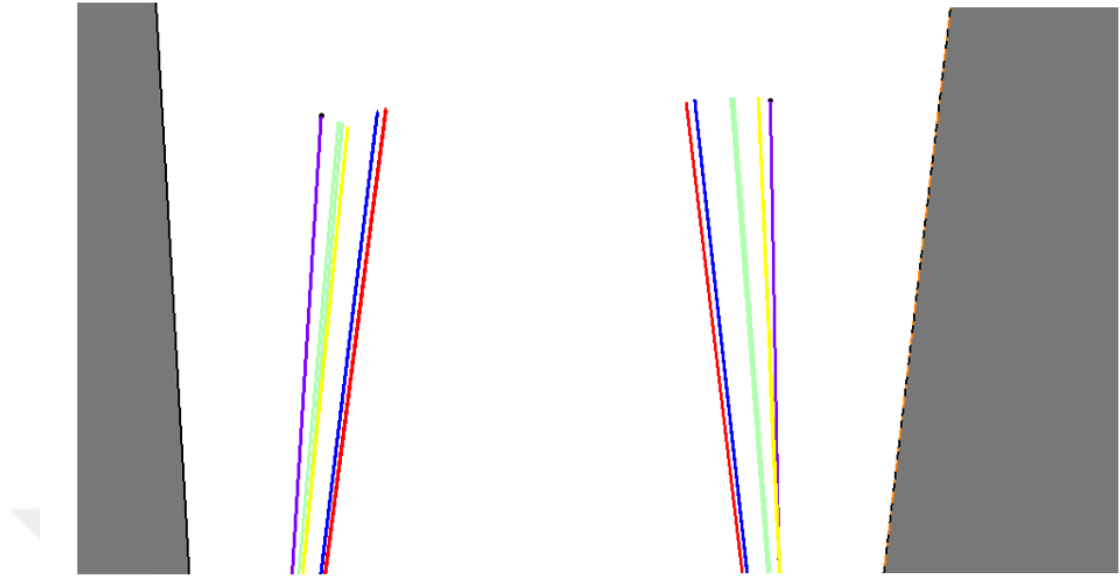
7.2.2.1 Zımba Yarıçapı R3 Durumunda Geri Yaylanmaların İncelenmesi

Şekil 7.28’de R3 zımba yarıçapında yapılan analiz ve deneyden elde edilen geri yaylanma değerleri gözükmemektedir. Çizelge 7.3’de plastisite modelleri ile deneyden elde edilen geri-ileri yaylanma değerleri karşılaştırılmıştır. Hill-kinematik ve Barlat-kinematik plastisite modelleri ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlara yakındır (Şekil 7.29). 97° duvar açısında 93° duvar açısına göre daha fazla ileri yaylanmalar görülmüştür.

Zimba yarıçapı R3



Şekil 7.28. Zimba yarıçapı R3 durumunda geri-ileri yaylanmaların gösterimi.

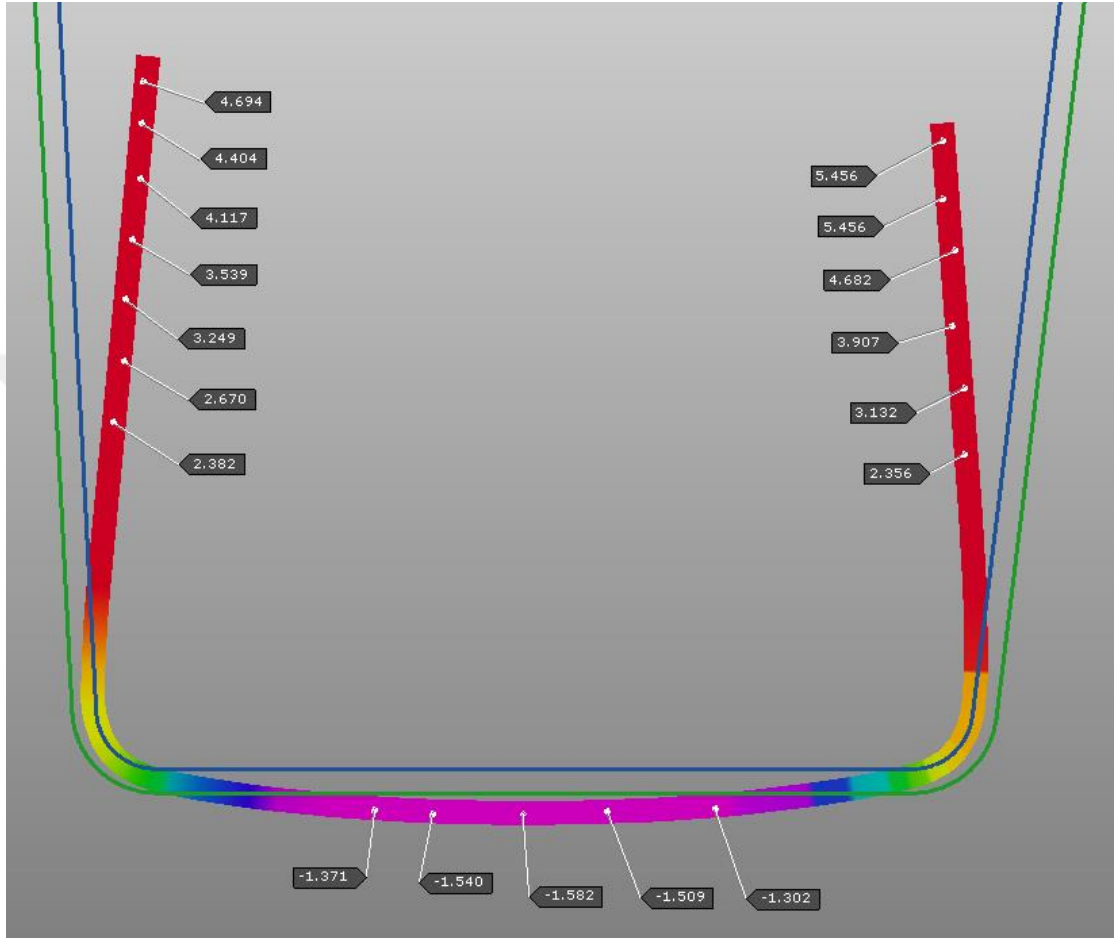


Şekil 7.29. Zımba yarıçapı R3 durumunda geri-ileri yaylanma değerlerinin gösterimi
(a) Duvar açısı 93° (b) Duvar açısı 97°.

Çizelge 7.3. R3 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri.

R3 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri yaylanma değerleri			
		Duvar açıları	
	Malzeme modeli	93°	97°
	Deney	+ 6,97°	+ 7,8°
	Barlat	+ 10,2°	+ 12,9°
	Hill	+ 10,8°	+ 13,5°
	Hill-Kinematik	+ 8,9°	+ 9,1°
	Barlat- Kinematik	+ 8,2°	+ 11,2°

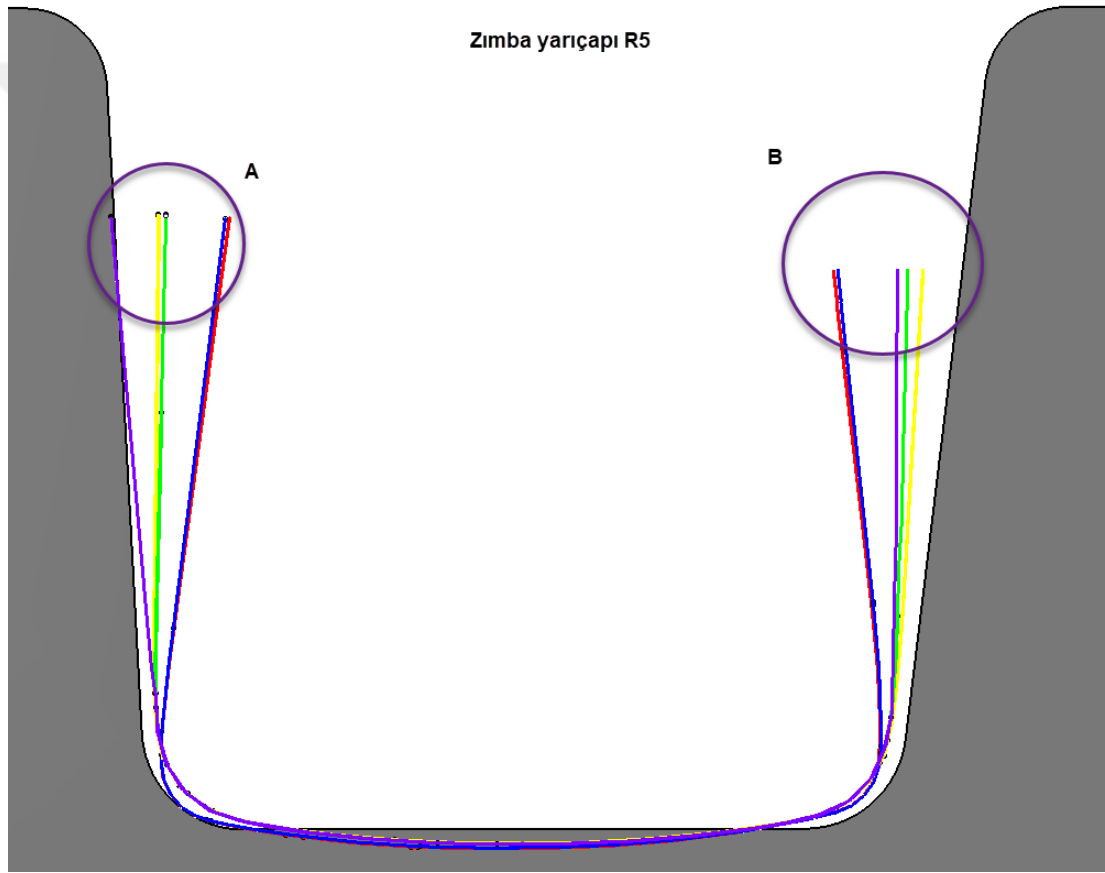
Şekil 7.30’da Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline ileri yaylanma değeri gözükmemektedir. 97° duvar açısında 93° duvar açısına göre daha fazla ileri yaylanmalar görülmüştür. Parçanın orta tabanında form bozukluğu -1,5 mm göçme oluşmuştur.



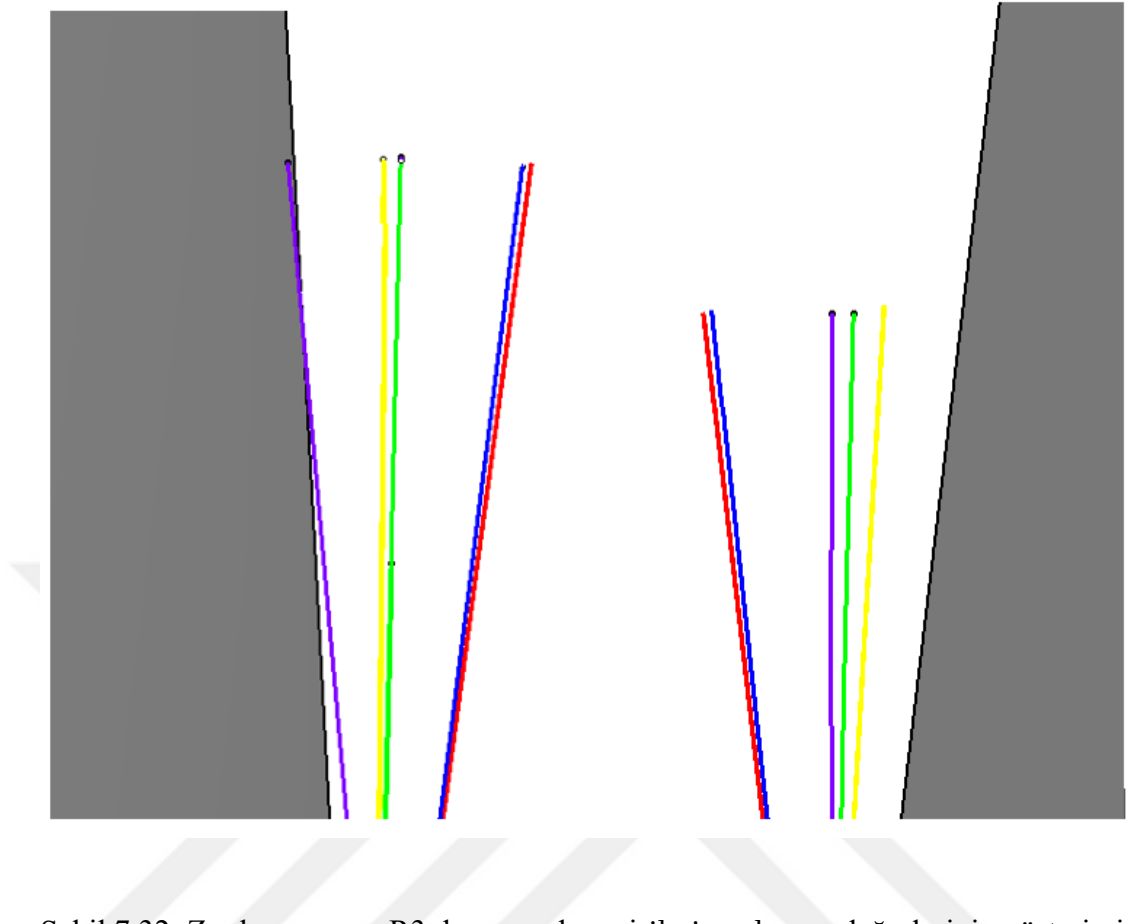
Şekil 7.30. R3 zımba yarıçapında Barlat - kinematik pekleşme malzeme modeline göre geri-ileri yaylanma değerleri.

7.2.2.2 Zimba Yarıçapı R5 Durumunda Geri Yaylanmaların İncelenmesi

Şekil 7.31’de R5 zimba yarıçapında yapılan analiz ve deneyden elde edilen geri yaylanma değerleri gözükmemektedir. Çizelge 7.4’de plastisite modelleri ile deneyden elde edilen geri yaylanma değerleri karşılaştırılmıştır. Hill-kinematic ve Barlat-kinematik plastisite modelleri ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar 97° duvar açısındaki analiz sonuçlarını yakın tahmin etmiştir. Ancak, 93° ’deki geri yaylanmayı ön görememişlerdir (Şekil 7.32). 97° duvar açısında 93° duvar açısına göre daha fazla ileri yaylanmalar görülmüştür.



Şekil 7.31. Zimba yarıçapı R5 durumunda geri-ileri yaylanmaların gösterimi.

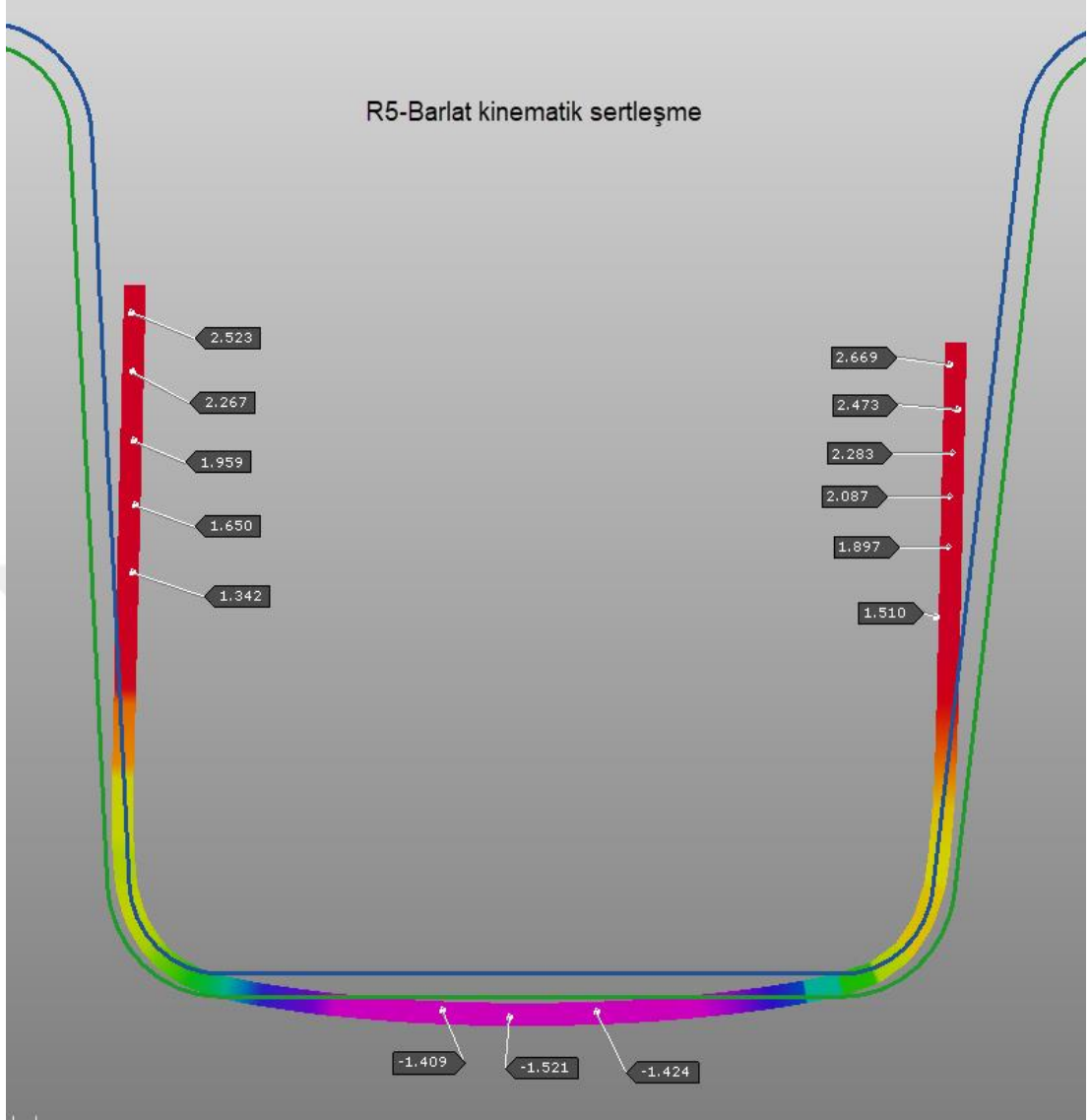


Şekil 7.32. Zımba yarıçapı R3 durumunda geri-ileri yaylanma değerlerinin gösterimi
(a) Duvar açısı 93° (b) Duvar açısı 97°.

Çizelge 7.4. R5 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri.

R5 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri yaylanma değerleri			
		Duvar açıları	
	Malzeme modeli	93°	97°
	Deney	- 2,01°	+ 6,9°
	Barlat	+ 10,3	+ 13,1
	Hill	+ 10,8	+ 13,5
	Hill-Kinematik	+ 3,6	+ 3,4
	Barlat- Kinematik	+ 4,4	+ 5,5

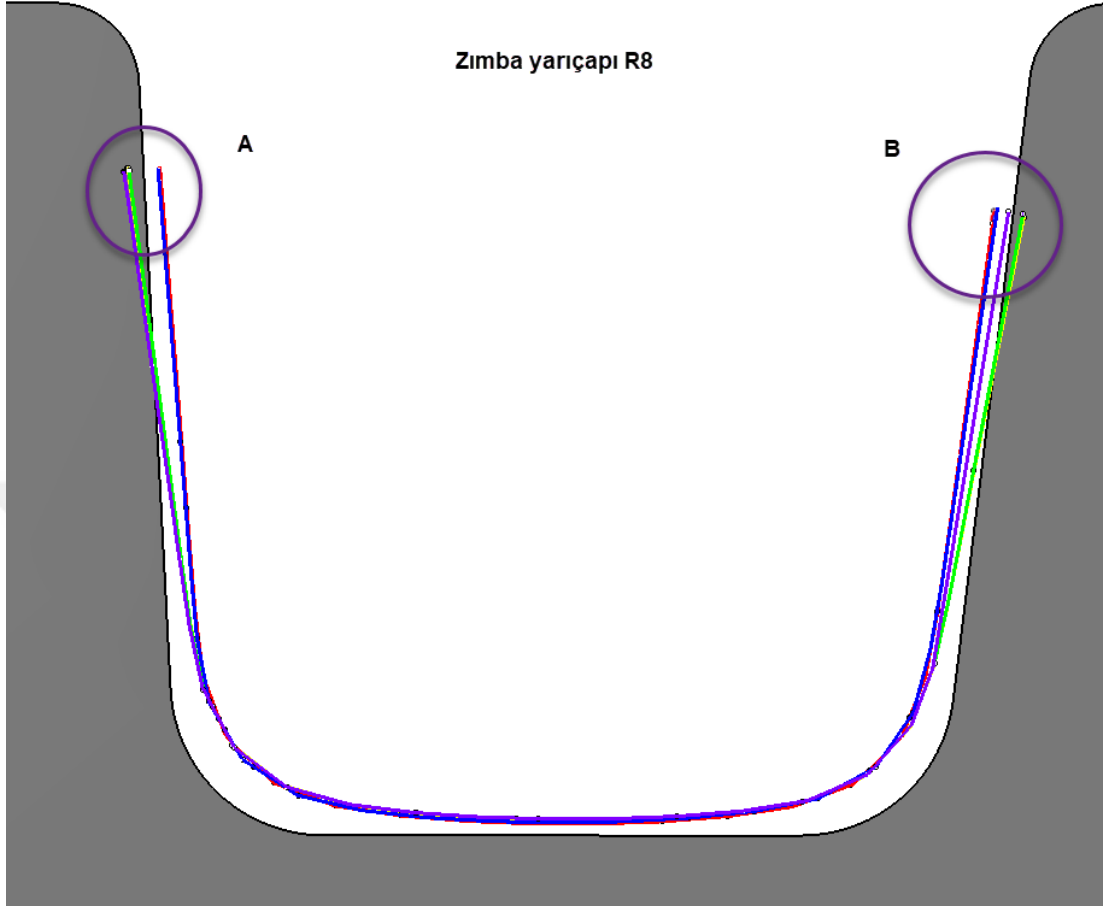
Şekil 7.33’de Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline ileri yaylanma değeri gözükmemektedir. 97° duvar açısında 93° duvar açısına göre daha fazla ileri yaylanmalar görülmüştür. Parçanın orta tabanında form bozukluğu -1,5 mm göçme oluşmuştur.



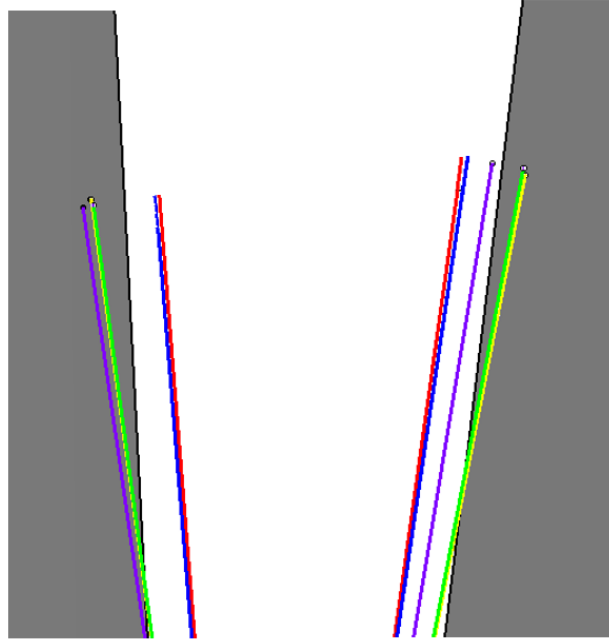
Şekil 7.33. R5 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre geri-ileri yaylanma değerleri.

7.2.2.3 Zımba Yarıçapı R8 Durumunda Geri Yaylanmaların İncelenmesi

Şekil 7.34’de R8 zımba yarıçapında yapılan analiz ve deneyden elde edilen geri yaylanma değerleri gözükmemektedir. Çizelge 7.5’de plastisite modelleri ile deneyden elde edilen geri yaylanma değerleri karşılaştırılmıştır. Hill-kinematik ve Barlat-kinematik plastisite modelleri ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar deney sonuçlarına yakın tahmin etmiştir (Şekil 7.35). 97° duvar açısında 93° duvar açısına göre daha fazla az geri yaylanmalar görülmüştür.



Şekil 7.34. Zimba yarıçapı R8 durumunda geri yaylanmaların gösterimi.

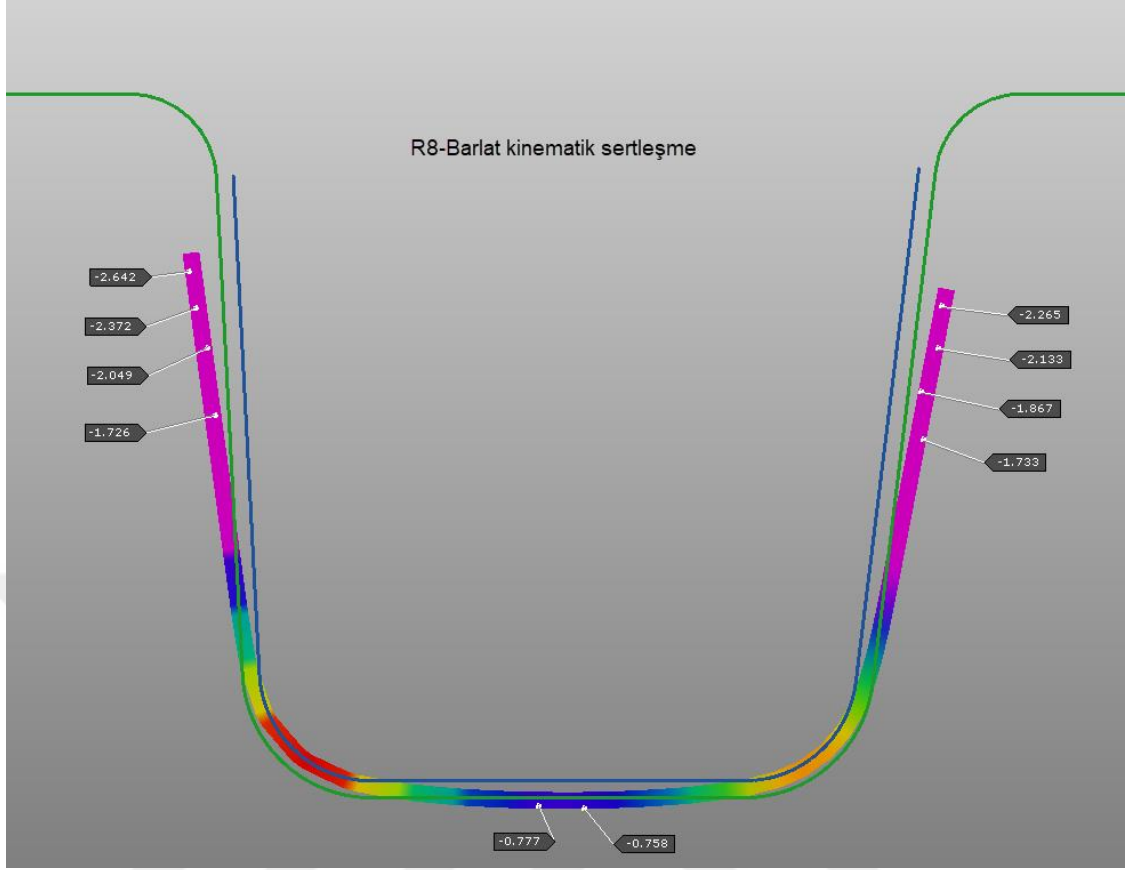


Şekil 7.35. Zımba yarıçapı R8 durumunda geri yaylanmaların gösterimi (a) Duvar açısı 93° (b) Duvar açısı 97°.

Çizelge 7.5. R8 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri.

R8 zımba yarıçapında malzeme modellerine göre geri-ileri yaylanma değerleri			
		Duvar açıları	
	Malzeme modeli	93°	97°
	Deney	- 5,2°	- 2,43°
	Barlat	- 1,7°	- 1,4°
	Hill	- 1,5°	- 1,01°
	Hill-Kinematik	- 4,8°	- 4,1°
	Barlat- Kinematik	- 4,8°	- 3,8°

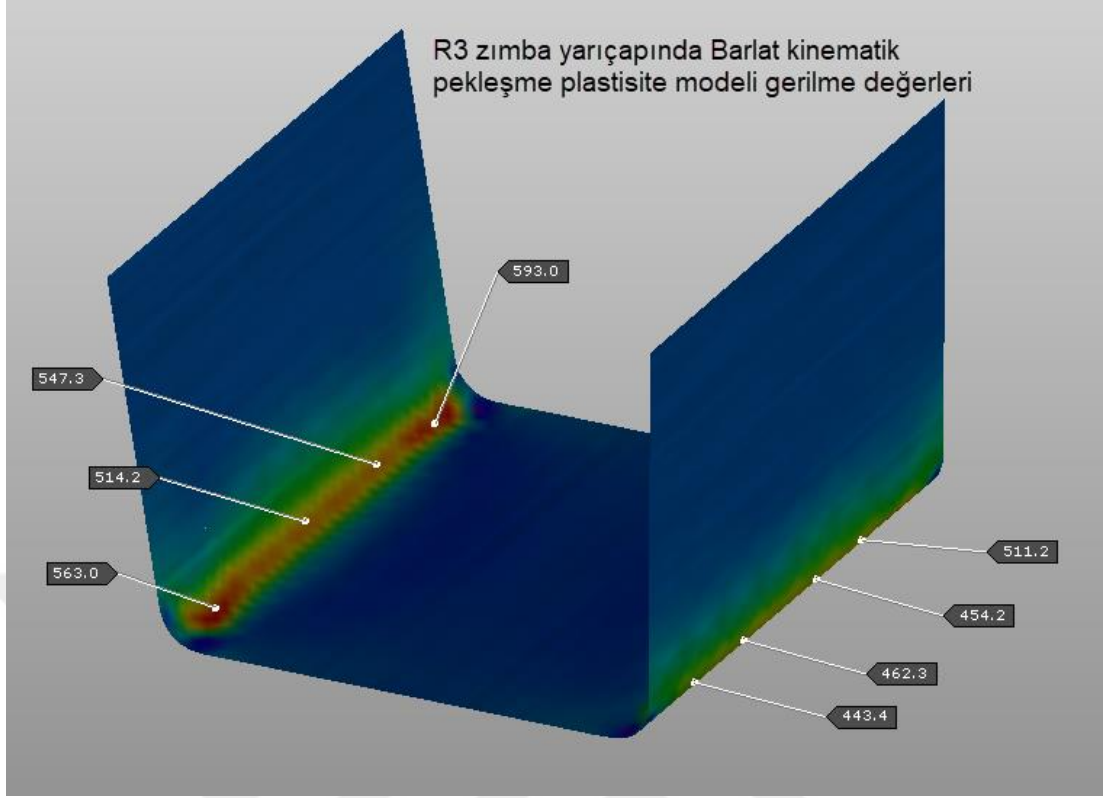
Şekil 7.36’de Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline ileri yaylanma değeri gözükmemektedir. 97° duvar açısında 93° duvar açısına göre daha az geri yaylanmalar görülmüştür. Parçanın orta tabanında form bozukluğu -0,7 mm göçme oluşmuştur.



Şekil 7.36. R8 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre geri-ileri yaylanma değerleri.

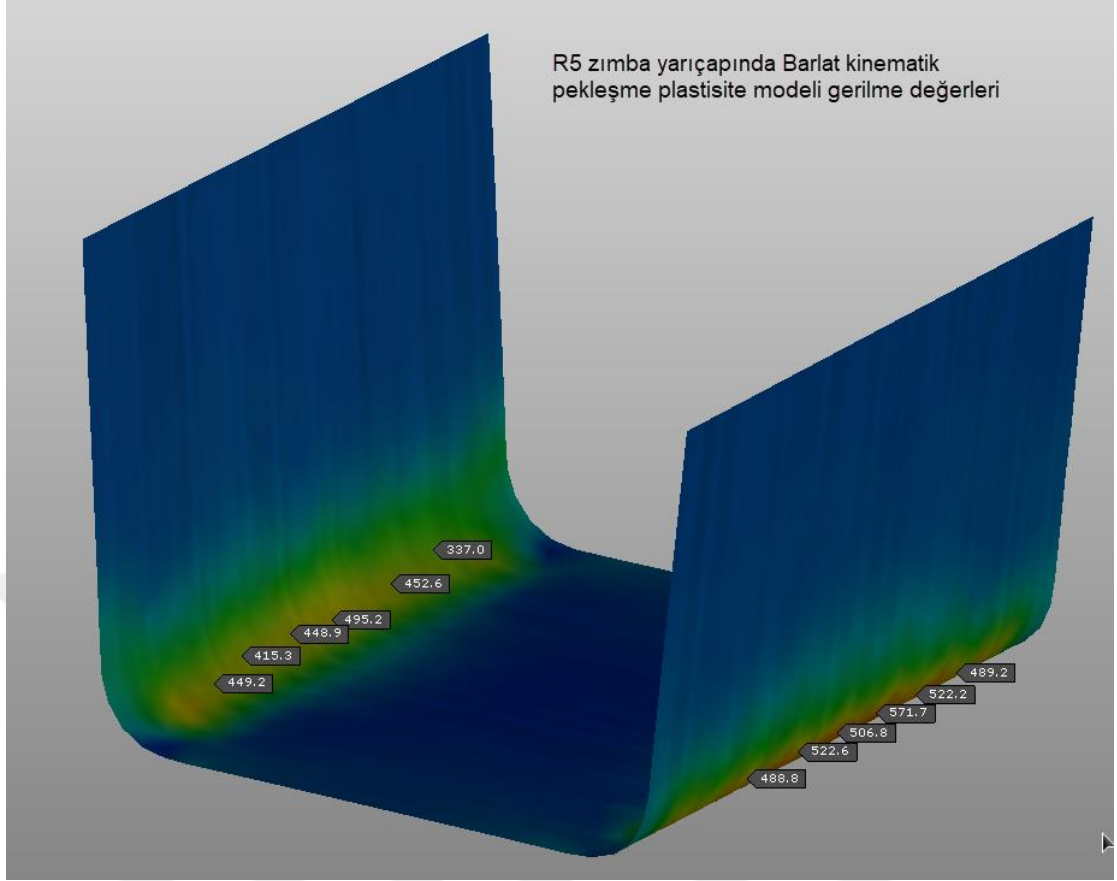
7.2.3. U bükme Gerilme Değerleri

U bükmede simülasyon sonuçlarını incelendiğinde, Barlat-kinematik pekleşme plastisite modelinin yakın geri-ileri yaylanma değerleri tahmin ettiği görülmüştür. Bundan dolayı R3, R5 ve R8 zımba yarıçaplarındaki gerilim değerleri incelenmiştir. R3 zımba yarıçapı, 93° duvar açısında ortalama zımba sacı şekillendirdiği andaki gerilme ortalama 550-595 MPa aralığındadır. R3 zımba yarıçapı, 97° duvar açısında ortalama zımba sacı şekillendirdiği andaki gerilme ortalama 440-510 MPa aralığındadır. 93° duvar açısında daha fazla gerilmeler oluşmuştur (Şekil 7.37).



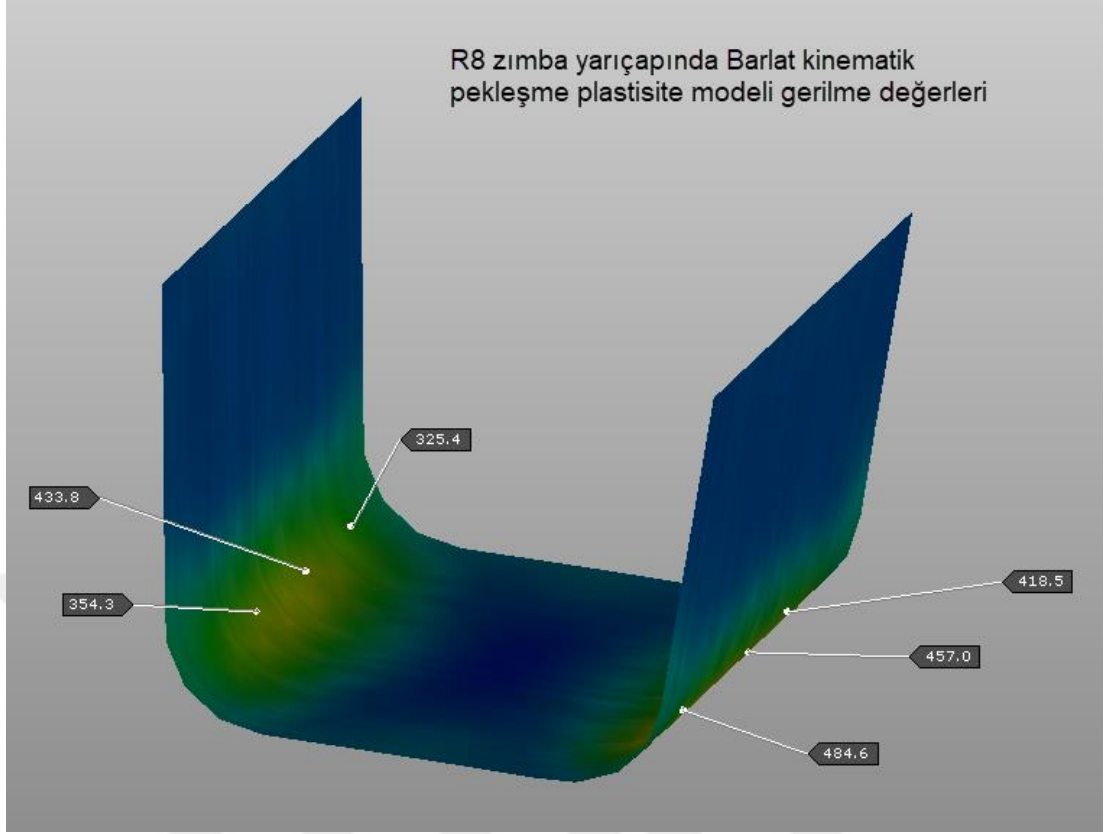
Şekil 7.37. R3 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre gerilme değerleri.

R5 zımba yarıçapı, 93° duvar açısında ortalama zımba sacı şekillendirdiği andaki gerilme ortalama 340-495 MPa aralığındadır. R3 zımba yarıçapı, 97° duvar açısında ortalama zımba sacı şekillendirdiği andaki gerilme ortalama 490-570 MPa aralığındadır. 97° duvar açısında daha fazla gerilmeler oluşmuştur (Şekil 7.38).



Şekil 7.38. R5 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre gerilme değerleri.

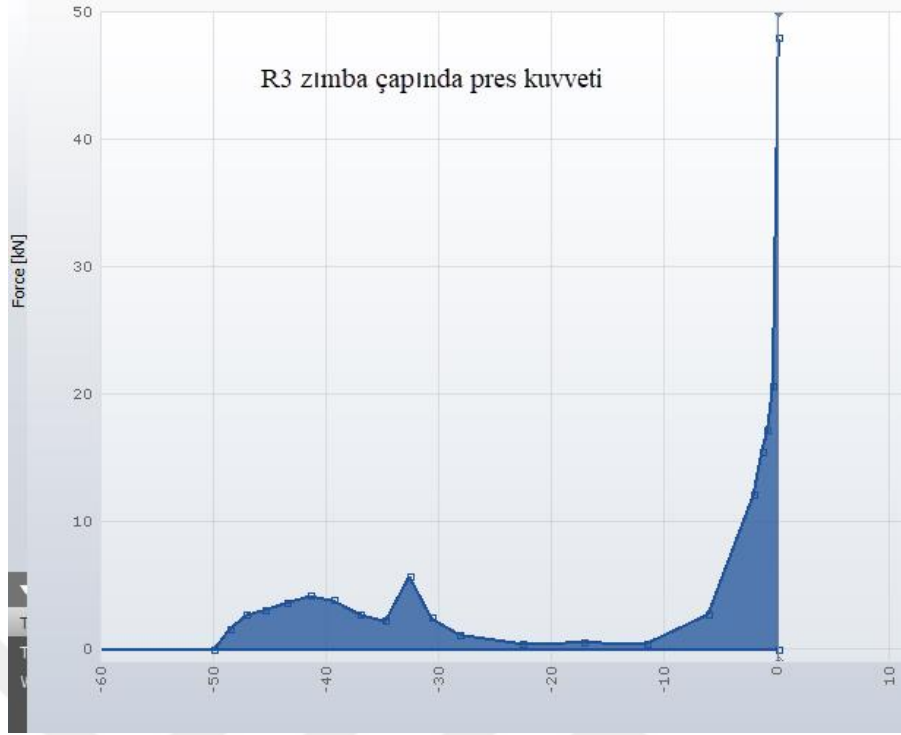
R8 zımba yarıçapı, 93° duvar açısında ortalama zımba sacı şekillendirdiği andaki gerilme ortalama 320-430 MPa aralığındadır. R3 zımba yarıçapı, 97° duvar açısında ortalama zımba sacı şekillendirdiği andaki gerilme ortalama 420-490 MPa aralığındadır. 97° duvar açısında daha fazla gerilmeler oluşmuştur (Şekil 7.39).



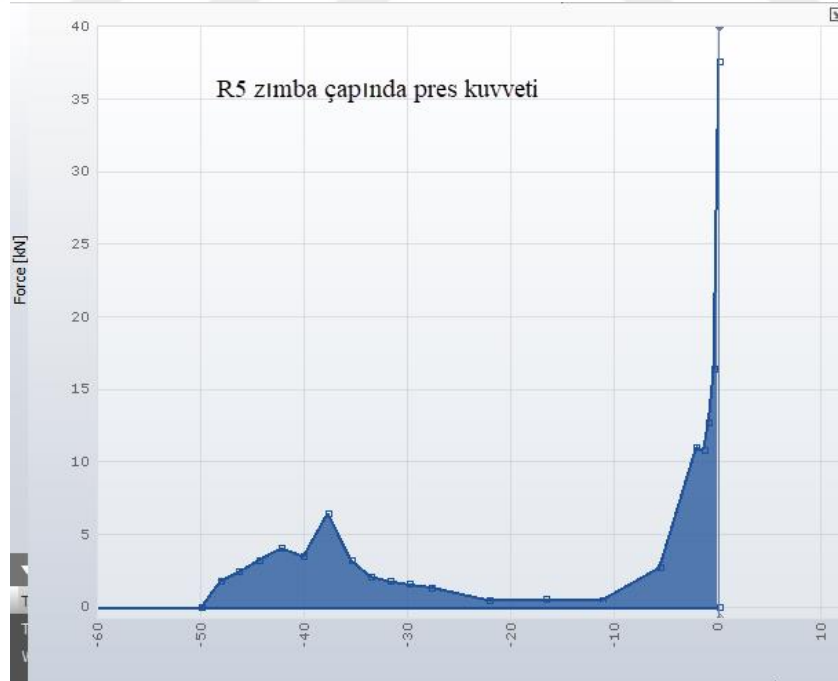
Şekil 7.39. R8 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre gerilme değerleri.

7.2.4. U Bükme Pres Kuvvetleri

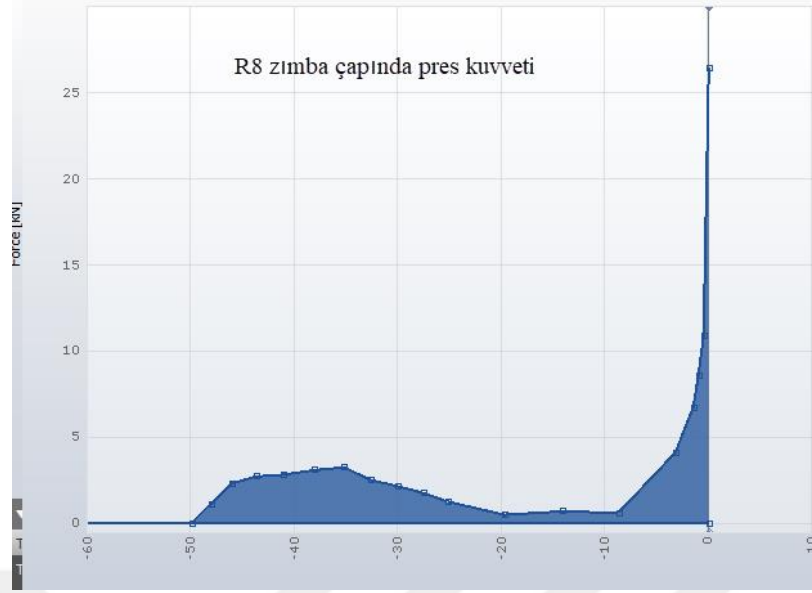
Autoform yazılımından Barlat-kinematik pekleşme malzeme modeline göre R3, R5 ve R8 zımba yarıçaplarında şekillendirme için gerekli pres kuvvetleri elde edilmiştir. R3 zımba yarıçapında 49 kN, R5 zımba yarıçapında 37 kN, R8 zımba yarıçapında ise 27 kN olarak görülmüştür (Şekil 7.40,41,42). Zımba yarı çapı arttıkça gerekli olan pres kuvveti azalmaktadır.



Şekil 7.40. R3 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modelinde pres kuvveti.



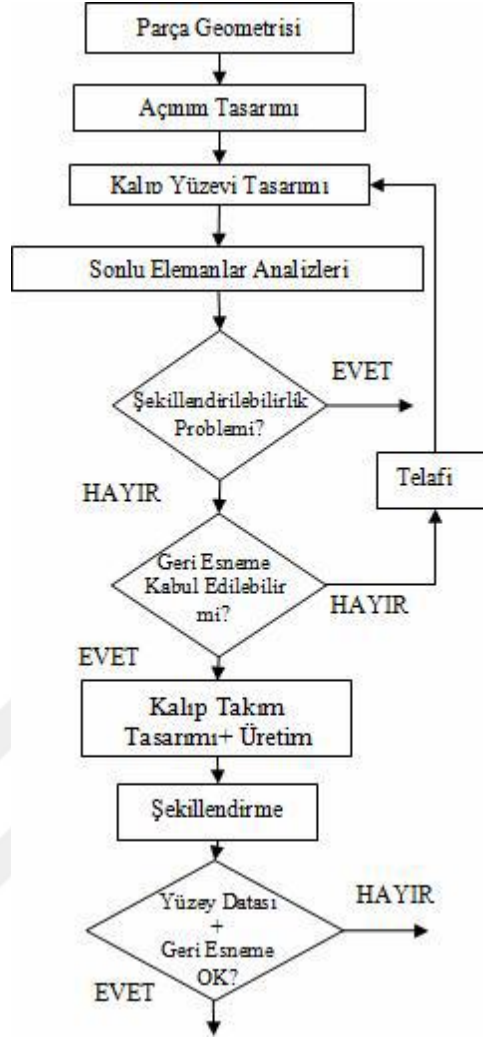
Şekil 7.41. R5 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modelinde pres kuvveti.



Şekil 7.42. R8 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme malzeme modelinde pres kuvveti.

7.3. GERİ YAYLANMANIN TELAFİSİ

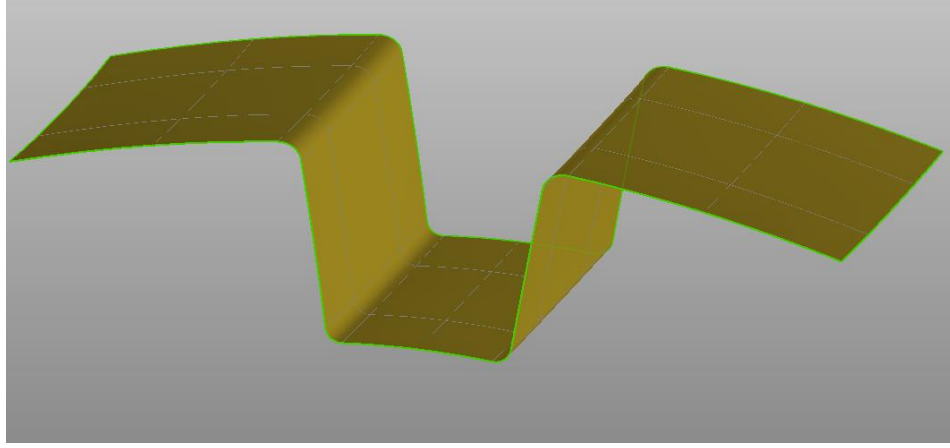
Geri yaylanmanın telafisi, kalıpta üretilen parçanın istenilen tolerans aralığında çıkmasını sağlamak maksadıyla proses parametrelerinin etkisini ortadan kaldırmak için uygulanmaktadır. Kalıp üretimine başlamadan önce kalıp dişi erkek yüzeyleri telafili yüzeyle işlenir. Genel prosesin akış şeması Şekil 7.43'dedir.



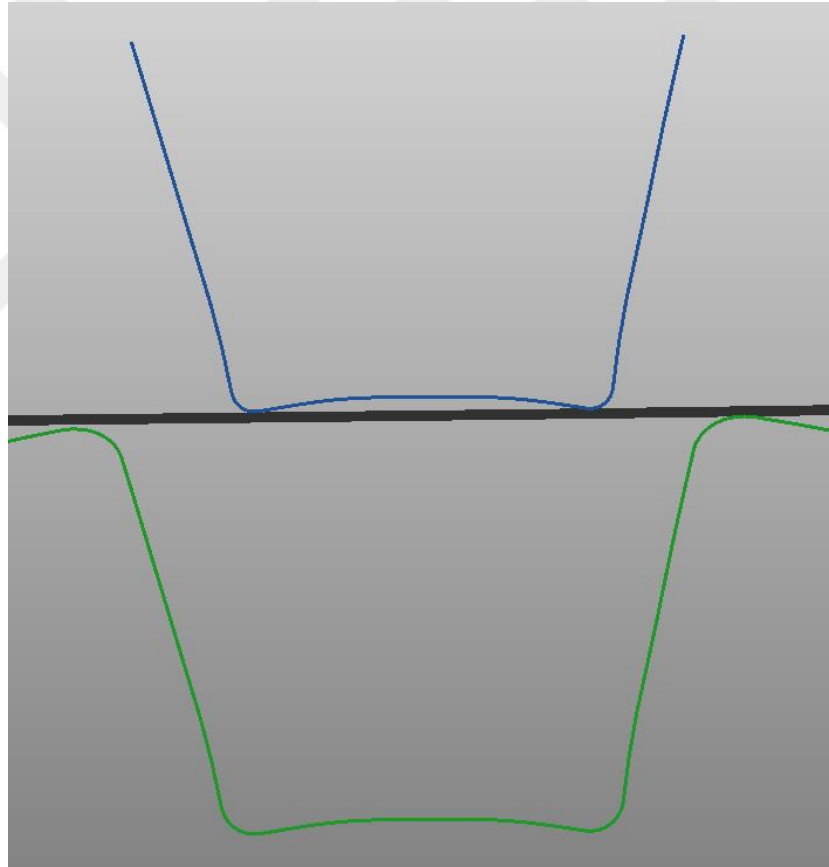
Şekil 7.43. Telafi uygulanması akış şeması [120].

7.3.1. R3 Zımba Yarıçapında Telafi Uygulanması

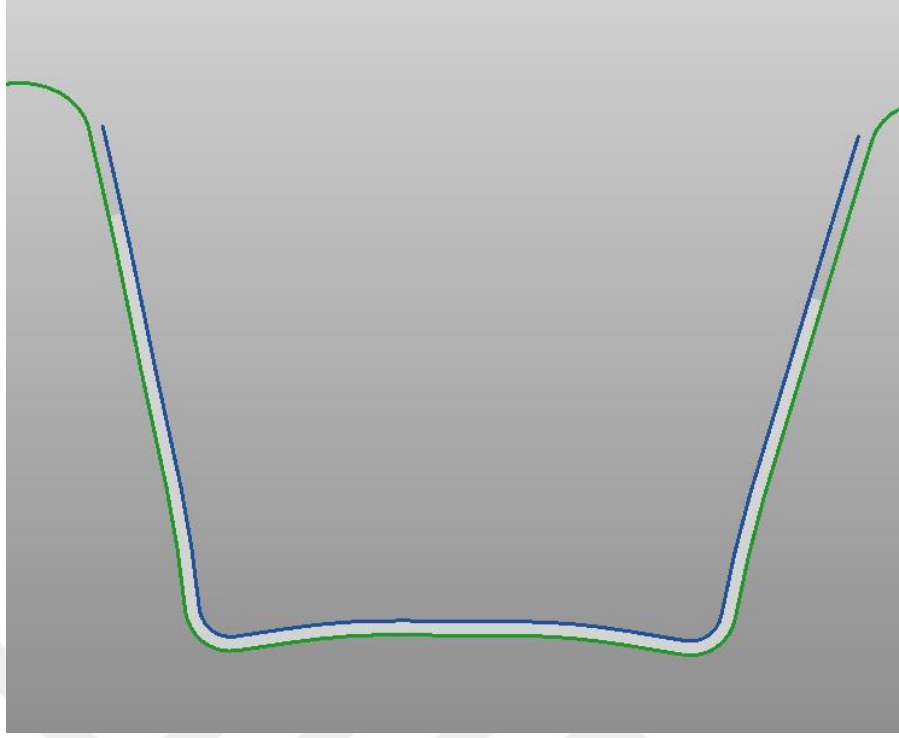
Compensation factor 0,9 yapılarak telafili yüzey elde edildi (Şekil 7.44). Elde edilen telafili yüzey ile dişi ve erkek kalıp yüzeyleri revize edildi. Şekil 7.45’de gösterildiği gibi elde edilen dişi ve erkek zımba ile bükme işlemi gerçekleştirildi.



Şekil 7.44. R3 zimba yarıçapında Barlat kinematik pekleşme model telafili yüzey.

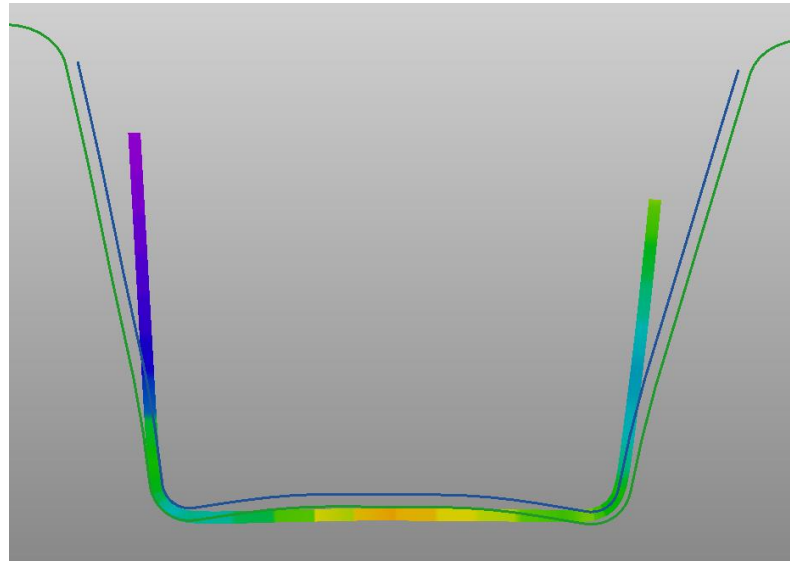


Şekil 7.45. R3 zimba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme model telafili yüzeylerle bükme işlemi başlangıcı.



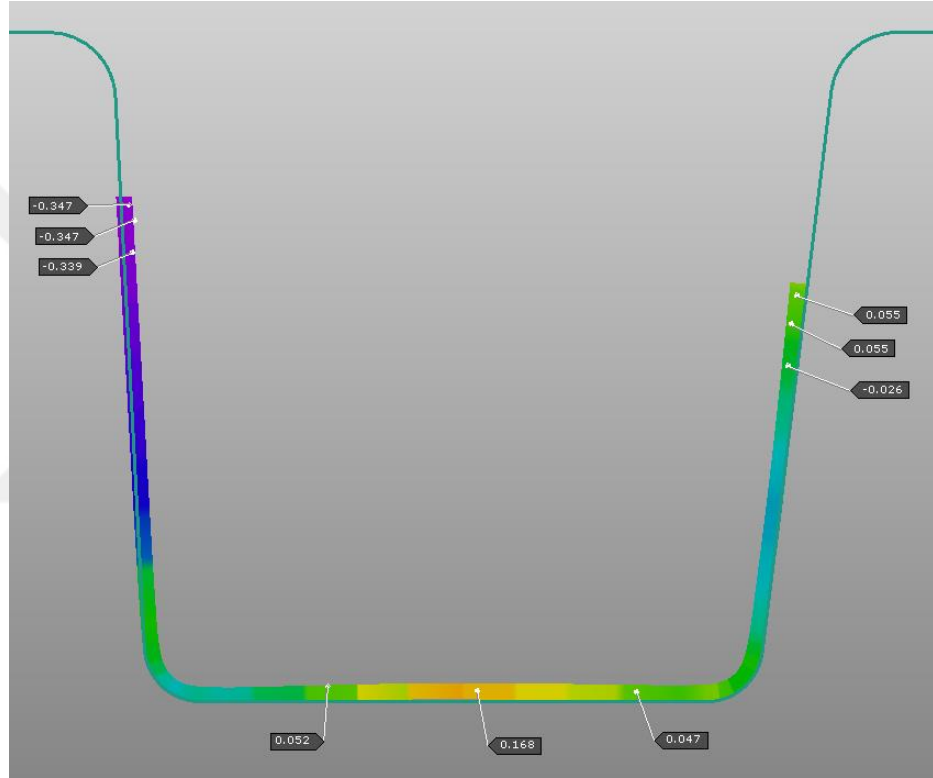
Şekil 7.46. R3 zımba yarıçapında Barlat-kinematik pekleşme model telafili yüzeylerle bükme işlemi.

Şekil 7.46'da şekillendirilmiş parça gözükmemektedir. Şekil 7.47'de zımbanın sactan ayrıldıktan sonraki geri yaylanmış durumu gözükmemektedir.

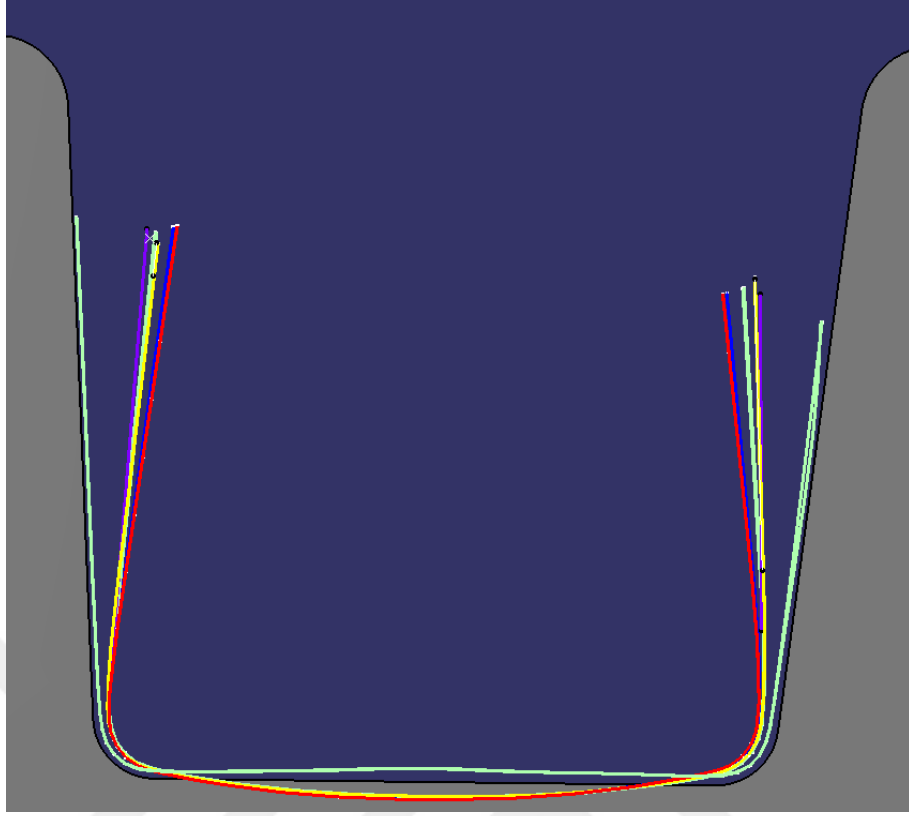


Şekil 7.47. R3 zımba yarıçapında Barlat kinematik pekleşme model telafili yüzeylerle bükme işlemi sonucu şekillendirilmiş parça.

Şekil 7.48’de kalıptan çıkmış parçanın son durumu gözükmemektedir. Telafili yüzeyler ile elde edilen parça $\pm 0,4$ mm aralığındadır. Parçanın tabanındaki form bozukluğuda giderilmiştir. Şekil 7.49’da diğer plastisite modelleri ve deneysel sonuçtan elde edilen yüzeylerin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.48. R3 zımba yarıçapında Barlat kinematik pekleşme model telafili yüzeylerle bükme işlemi sonucu şekillendirilmiş parçanın geri yaylanma değerleri.



Şekil 7.49. R3 zımba yarıçapında Barlat kinematik pekleşme model telafili bükme işlemi sonucu şekillendirilmiş parçanın deneysel sonuçlarla yüzeylerle ve malzeme modelleri ile karşılaştırılması.

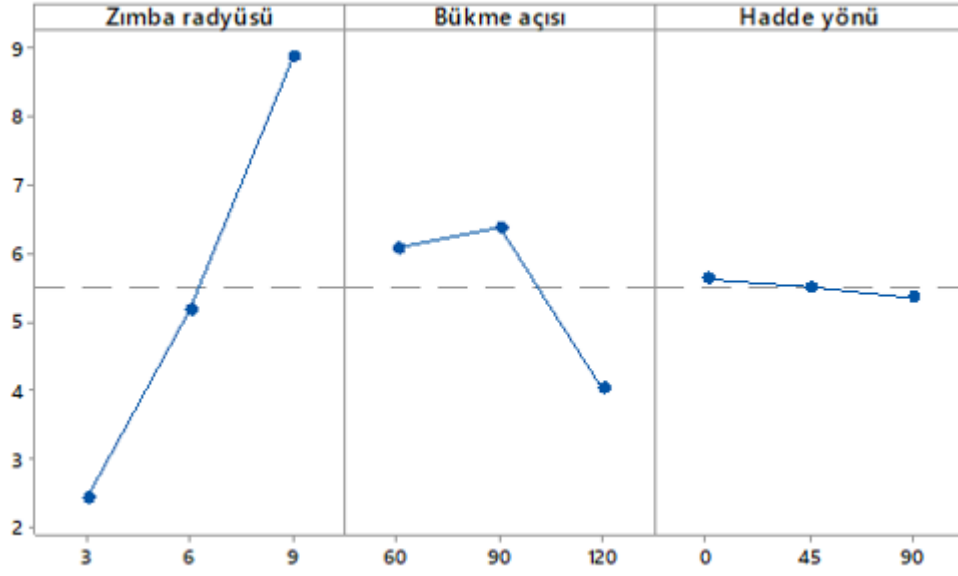
7.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Çalışmada gözönünde bulundurulan, zımba radyüsü (r), bükme açısı (b) ve hadde yönü (h) gibi parametrelerin geri yaylanma üzerinde etkilerini araştırmak için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, geri yaylanmaya etkileri yüzde (%) etki oranları hesaplanmıştır. Deneysel tasarım parametreleri Çizelge 7.1’de belirtilen geri yaylanma değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 7.6. Proses parametrelerinin geri yaylanması etkisi için ANOVA sonuçları.

Değişkenler kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F-değeri	P- değeri	%
r-Zımba radyusu	1	187,018	187,018	1096,82	0,000	83,03
b- Bükme açısı	1	19,199	19,199	112,60	0,000	8,52
h- Hadde yönü	1	0,367	0,367	2,15	0,161	0,16
r*r	1	1,300	1,300	7,63	0,013	0,58
b*b	1	10,711	10,711	62,82	0,000	4,76
h*h	1	0,001	0,001	0,00	0,956	0,00
r*b	1	3,730	3,730	21,87	0,000	1,66
r*h	1	0,007	0,007	0,04	0,847	0,00
b*h	1	0,002	0,002	0,01	0,912	0,00
Hata	17	2,899	0,171			1,29
Toplam	26	225,233				100

Çizelge 7.6’da Varyans analiz sonuçları verilmiştir. Varyans analizleri sonucunda; zımba radyusu (r) % 83, bükme açısı (b) % 8,52, hadde yönü (h) % 0,16 etkisi olmuştur. Hadde yönünün önemli bir etkisi olmamıştır. Herhangibir deneysel parametrenin sonuçlar üzerinde ne kadar etkili olduğu F değerinin yüksekliğine bağlıdır.



Şekil 7.50. Geri yaylanma için ana etki grafikleri

Ana etki grafikleri incelendiğinde, artan zimba yarıçapı ile geri yaylanmanın arttığı, büküm açısının 120° derecede en düşük 90° derecede en yüksek olduğu analiz edilmiştir (Şekil 7.50). Geri yaylanma için regresyon denklemi oluşturulmuştur. Bu denklemle oluşturulan model ve gerçek deney sonuçları yüzdelik olarak karşılaştırılarak, sonuçların birbirleri ile uyumlu çıktığı görülmüştür.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Bu çalışmada, SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının U büküm ve V büküm proseslerinde geri yaylanma davranışı deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak malzeme modellerinin ve proses parametrelerinin şekillendirmeye etkisi incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda;

- Çekme testi sonuçları incelendiğinde; SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacının yüksek akma ve çekme mukavemet değerlerine rağmen düşük uzama değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Üç hadde yönündede yakın akma ve çekme mukavemet değerleri elde edilmiştir. 45° hadde yönünde uzama değerleri, 0° ve 90° hadde yönüne göre daha düşüktür.
- SCGADUB1180 malzemesinin mikroyapısını incelediğimizde, yüksek oranda martenzit yapıya sahip olduğu görülmektedir. Martenzit yapı deformasyon sertleşmesine sebep olmaktadır. Akma mukavemeti, deformasyon sertleşmesi ile artmaktadır. Akma gerilmesinin yüksek olması, geri yaylanmayı arttıran bir sebep olarak ortaya çıkmaktadır.
- Sertlik değeri ortalama olarak, 37-38 Rockwell ölçülmüştür.
- V bükme prosesinde deneysel verilerden elde edilen geri yaylanma değerlerini büküm açılarına göre incelediğimizde, R3 zımba yarıçapında büküm açısı 60°'den 120° olduğunda geri yaylanma değerleri azalmıştır. 90° büküm açısında 0° ve 90° hadde yönünde geri yaylanma değerleri artmıştır. R3 zımba yarıçapında en büyük geri yaylanmalar 45° hadde yönünde görülmüştür. R6

zımba yarıçapında büküm açısı 60°'den 90°'ye arttığında geri yaylanma değerleri artmış, büküm açısı 120° olduğunda geri yaylanma değerleri azalmıştır. R6 zımba yarıçapında en düşük geri yaylanmalar 45° hadde yönünde görülmüştür. R9 zımba yarıçapında, büküm açısı 60°'den 90°'ye arttığında her iki büküm açısında da geri yaylanma değerleri birbirine yakındır, büküm açısı 120°'ye arttığında geri yaylanma değerleri azalmıştır. R9 zımba yarıçapında, üç büküm açısındaki, üç hadde yönündeki geri yaylanma değerleri birbirine yakındır.

- V bükme prosesinde deneysel verilerden elde edilen geri yaylanma değerlerini zımba yarıçaplarına göre incelediğimizde; zımba yarıçapı arttıkça geri yaylanma değerleri artmaktadır. Bükme yarıçapı 60° olduğunda, 0° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 292 artmıştır. 45° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 182 artmıştır. 90° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 429 artmıştır. R3 zımba yarıçapında, üç hadde yönünde farklı geri yaylanma değerleri elde edilmiştir. R6 ve R9 zımba yarıçapında ise üç hadde yönünde geri yaylanma değerleri birbirine yakındır. Sonuç olarak zımba yarıçapı büyüdükçe hadde yönünün geri yaylanmaya etkisi olmadığı sonucu çıkmaktadır. Bükme yarıçapı 90° olduğunda, 0° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 270 artmıştır. 45° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 256 artmıştır. 90° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 249 artmıştır. Zımba yarıçapının R9 olduğu durumda ise hadde yönlerine göre geri esneme değerleri oldukça yakındır. Bükme açısı 120° olduğunda, 0° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 281 artmıştır. 45° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 267 artmıştır. 90° hadde yönünde, zımba yarıçapı R3'den R9'a arttığında geri yaylanma % 334 artmıştır. Zımba yarıçapı R9 olduğunda, üç hadde yönünde geri yaylanma değerleri yakındır.

- U bükme prosesinde deneysel verilerden elde edilen geri yaylanma değerlerini incelediğimizde R3 zımba yarıçapında parça içeri içeri yöne kapanmaya çalışarak, ileri yaylanma davranışı göstermiştir. R5 zımba yarıçapında 93° duvar açısında geri yaylanma, 97° duvar açısında ileri yaylanma davranışı göstermiştir. R8 zımba yarıçapında ise her iki duvar açısında geri yaylanma meydana gelmiştir.
- Çekme deneyi sonucunda elde edilen mühendislik gerilme ve mühendislik şekil değiştirme verileri, gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme verilerine dönüştürülerek, K ve n değerleri hesaplanarak üç hadde yönündeki akma dayanımı ve çekme dayanım değerleri ile birlikte Autoform yazılımına tanımlanmıştır. Ayrıntılı olarak dört malzeme modeli ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her bir hadde yönü, zımba yarıçapı ve büküm açısı ile analizler yapılmıştır. İncelemenin sonucunda, Hill-kinematik pekleşme modeli ve Barlat-pekleşme modeli ile deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. U bükmelerde u parçanın tabanında form bozuklukları gözlenmiştir. R3 zımba yarıçapında U bükmede telafi çalışması yapılarak geri yaylanma giderilmiştir.
- Gerekli olan pres kuvvetleri incelendiğinde, R3 zımba yarıçapında 49 kN, R5 zımba yarıçapında 37 kN, R8 zımba yarıçapında ise 27 kN olarak görülmüştür. Zımba yarı çapı arttıkça gerekli olan pres kuvveti azalmaktadır.
- Sonlu elemanlar analizlerinden doğru sonuçlar alınması için, proses parametreleri, plastisite modelinin doğru tercihi, eleman tipi ve ağ yapısı gibi parametreler önem arz etmektedir.
- Proses parametreleri arasında etkileşimi ve proses parametrelerinin etkisini incelemek için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Varyans analizleri sonucunda; zımba radyusu % 83, bükme açısı % 8,52, hadde yönü % 0,16 etkisi olmuştur. Hadde yönünün önemli bir etkisi olmamıştır. Artan zımba

yarıçapı ile geri yaylanmanın arttığı, büküm açısının 120° derecede en düşük 90° derecede en yüksek olduğu tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Todor, M. P. and Kiss, I., "Systematic approach on materials selection in the automotive industry for making vehicles lighter, safer and more fuel-efficient", *Applied Engineering Letters*, 1 (4): 91–97 (2016).
2. Gonçalves, M., Monteiro, H., and Iten, M., "Life Cycle Assessment studies on lightweight materials for automotive applications - An overview", *The 8th International Conference On Energy And Environment Research ICEER 2021, Energy Reports*, 338–345 (2022).
3. Gupta, M. K. and Singhal, V., "Review on materials for making lightweight vehicles", *Materials Today: Proceedings*, 56: 868–872 (2022).
4. Billur, E., Çetin, B., ve Gurleyik, M., "Yeni nesil yüksek dayanımlı çelikler: Gelişmeler, Trendler ve Kısıtlar", *International Journal Of Scientific And Technological Research*, 2 (1): 50–62 (2016).
5. Hu, X. and Feng, Z., "Advanced High-Strength Steel- Basics and Applications in the Automotive", *Manufacturing Science Division Material Science & Technology Division/Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-20, Oak Ridge*, 1–31 (2021).
6. Hovorun, T. P., Berladir, K. V., Pererva, V. I., Rudenko, S. G., and Martynov, A. I., "Modern materials for automotive industry", *Journal Of Engineering Sciences*, 4 (2): 8–18 (2017).
7. Öztürk, F., Toros, S., Esener, E., ve Uysal, E., "Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımının incelenmesi", *Mühendis Ve Makina*, 50 (596): 44–49 (2009).
8. İnternet: "Repairer Driven News, Nissan Rogue makes greater use of AHSS, aluminum body panels to reduce mass", *Https://Www.Repairerdrivennews.Com/2022/06/01/Nissan-Rogue-Makes-Greater-Use-Of-Ahss-Aluminum-Body-Panels-To-Reduce-Mass* (2022).
9. Eroğlu, M., "Advanced High Strength Steels (AHSSs): Production and Applications", *UDCS'19 Fourth International Iron And Steel Symposium*, Karabük, 555–561 (2019).
10. Davies, R. G., "Influence of martensite content on the hydrogen embrittlement of dual-phase steels", *Scripta Metallurgica*, 17 (7): 889–892 (1983).

11. Davies, R. G., "Influence of martensite composition and content on the properties of dual phase steels", *Metallurgical Transactions A*, 9 (5): 671–679 (1978).
12. Rashid, M. S., "Dual phase steels", *Annual Review Of Materials Science*, 11 (1): 245–266 (1981).
13. Dulucheanu, C., Severin, T. L., Cerlinca, D. A., and Irimescu, L., "Structures and Mechanical Properties of Some Dual-Phase Steels with Low Manganese Content", *Metals*, 12 (2): 1–13 (2022).
14. Bilir, O. G., "Orta karbonlu dual fazlı çeliklerde faz dönüşümlerinin termodinamik modellenmesi", *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 5–19 (2014).
15. Ghassemieh, E., "Materials in Automotive Application", New Trends and Developments in Automotive Industry, M. Chiaber. Ed., *InTech*, Hindistan, 370–390 (2011).
16. Schmitt, J. H. and Iung, T., "New developments of advanced high-strength steels for automotive applications", *Comptes Rendus Physique*, 19 (8): 641–656 (2018).
17. Yenice, M., "Bükme ile şekillendirilen saclarda geri yaylanma davranışının incelenmesi", *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 5–50 (2006).
18. Basantia, S. K., Prusty, P. K., Das, D., and Khutia, N., "Micro-scale simulation of nanoindentation characteristics in dual-phase steel", *Materials Today: Proceedings*, 33: 5055–5060 (2020).
19. Lima, R. de M. C., Tereza dos Santos Fernandes Tolomelli, F., Clarke, A. J., Clarke, K. D., Spadotto, J. C., and Assunção, F. C. R., "Microstructural characterization of a 1100 MPa complex-phase steel", *Journal Of Materials Research And Technology*, 17: 184–191 (2022).
20. Kumar, A., Singh, S. B., and Ray, K. K., "Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels", *Materials Science And Engineering A*, 474 (1–2): 270–282 (2008).
21. Chatterjee, D., "Behind the Development of Advanced High Strength Steel (AHSS) Including Stainless Steel for Automotive and Structural Applications - An Overview", *Materials Science And Metallurgy Engineering*, 4 (1): 1–15 (2017).
22. Uenishi, A., "Development of Advanced High Strength Sheet Steel for NSafe™-AutoConcept", *Nippon Steel Technical Report*, 412 (122): 10–11 (2019).

23. Bilir, Y., "Çift fazlı çeliklerde mikroyapının mekanik özelliklere etkisi", **18. Uluslararası Metalurji Ve Malzeme Kongresi**, Proceedings Book, 942–944 (2016).
24. Demir, B., "Ereğli Demir Çelik Fabrikaları Sürekli Tavlama Hatlarında Çift Fazlı Çelik Üretilebilirliğinin İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4–43 (2003).
25. Salamcı, E. and Kabakçı, F., "Çift fazlı çeliğin çekme özelliklerine mikroyapının etkisi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 26 (2): 263–272 (2011).
26. Ulu, S., "Çift Fazlı Çelikler", **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 6 (3): 100–113 (2009).
27. Aydın, H., "Çelik sacların çift faz ısıtılma işlemi sonrası mekanik ve mikroyapı özelliklerinin değişimi", **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 6–27 (2006).
28. Ramazani, A., Mukherjee, K., Quade, H., Prahl, U., and Bleck, W., "Correlation between 2D and 3D flow curve modelling of DP steels using a microstructure-based RVE approach", **Materials Science And Engineering A**, 560: 129–139 (2013).
29. Davut, K., Simsir, C., and Cetin, B., "Strain Hardening Behavior Characterization of Dual Phase Steels", **Hittite Journal Of Science & Engineering**, 5 (4): 301–306 (2018).
30. Bargel, J. and Schulze, G., "Malzeme bilgisi", Güleç Ş. ve Aran A., **Tübitak-Gebze Araştırma Merkezi, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü**, Gebze, 17-28, (1985).
31. Topbaş, A., "Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı", 32–35 (1998).
32. Taş, Z., "Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çeliklerde metalürjik mukavemet artırma mekanizmaları", **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 28 (2): 97–101 (2012).
33. Altan, T., "Metal Forming Handbook", Schuler Springer, **Engineering Research Center For Net Shape Manufacturing The Ohio State University, USA**, 143–144 (1998).
34. Gavas, M., "Sac Metallerin Şekillendirilmesi", 2'inci basım, **Seçkin Yayıncılık**, 1–171 (2020).
35. Groover, M. P., "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems", 4th. Ed., **Wiley**, 443–457 (2010).
36. Altınışık S., "Sac Kalıpları", Bursa, 273–274 (1977).

37. Shackelford, J. F., "Mühendisler İçin Malzeme Bilimine Giriş", Baydoğan M., 8. Basım, *Literatür Yayınları*, İstanbul, (2018).
38. Tekiner, Z., "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 (1): 109–117 (2004).
39. Kalpakjian, S. and Schmid, S., "Bending Sheets, Plates and Tubes", Manufacturing Engineering and Technology, 6th Ed., *Pearson*, 388–400 (2013).
40. Arola, A. M., Kaijalainen, A., Kesti, V., Troive, L., Larkiola, J., and Porter, D., "The effect of mechanical behavior on bendability of ultrahigh-strength steel", *Materials Today Communications*, 26: 1–13 (2021).
41. Karaağaç, İ. ve Uluer, O., "V bükme prosesinde geri esnemeye etki eden proses parametrelerinin deneysel araştırılması", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (8): 990–993 (2017).
42. Tekaslan, Ö., Şeker, U., ve Gerger, N., "Bükme Kalıplarında 0,75 mm kalınlığındaki çeliklerin geri esneme miktarlarının belirlenmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13 (1): 15–22 (2007).
43. Özden, A. ve Demir, B., "Farklı sac gruplarının şekillendirilmesinde geri yaylanma ve deformasyonun mikro yapısal incelenmesi", *UDCS'19 Fourth International Iron And Steel Symposium*, Karabük, 544–547 (2019).
44. Thipprakmas, S. and Phanitwong, W., "Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique", *Materials And Design*, 32 (8–9): 4430–4436 (2011).
45. Phanitwong, W. and Thipprakmas, S., "Development of a new spring-back factor for a wiping die bending process", *Materials And Design*, 89: 749–758 (2016).
46. Gürün, H., Çavuşoğlu, O., Çaydaş, U., Özek, C., ve Çelik, M., "AA2024 alaşımının V-bükme işlemi sonrasında geri esneme davranışlarının incelenmesi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (1): 1–8 (2018).
47. Sayın, L. ve Basmacı, G., "Bakır sac levhaların "V" bükme yöntemi ile şekillendirilmesiyle oluşan geri esneme miktarının deneysel olarak incelenmesi", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 11 (3): 147–154 (2019).
48. Gattmah, J., Ozturk, F., and Orhan, S., "Numerical simulation of bending process for steel plate using finite element analysis", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 44 (12): 10285–10292 (2019).

49. Çetin, B., Billur, E., Baranoğlu, B., Muratoğlu, T., ve Yılmaz, M. M., "Yüksek dayanımlı çeliklerin bükümünde geri esneme açısının görüntü işleme ile belirlenmesi", *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 17 (1): 16–20 (2019).
50. Karaağaç, İ., Kabakçı, M. O., and Demirel, M. Y., "A17075-T6 sac malzemede tavlamanın şekillendirilebilirlik ve geri esnemeye etkilerinin araştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36 (3): 1319–1329 (2021).
51. Trzepieciniski, T. and Lemu, H. G., "Effect of computational parameters on springback prediction by numerical simulation", *Metals*, 7 (9): 1–14 (2017).
52. Aydın, O. ve İbrahim, K., "DP600 ve HSLA300 sac malzemelerde geri esneme davranışlarına proses parametrelerinin etkisinin deneysel araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 7 (3): 1456–1465 (2019).
53. Kale, A. B., Alluri, P., Singh, A. K., and Choi, S. H., "The deformation and fracture behavior of 316L SS fabricated by SLM under mini V-bending test", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 196: 1–14 (2021).
54. Choi, M. K. and Huh, H., "Effect of punch speed on amount of springback in U-bending process of auto-body steel sheets", *Procedia Engineering*, 81: 963–968 (2014).
55. Heibel, S., Dettinger, T., Nester, W., Clausmeyer, T., and Tekkaya, A. E., "Damage mechanisms and mechanical properties of high-strength multiphase steels", *Materials*, 11: 1–34 (2018).
56. Wasif, M., Iqbal, S. A., Tufail, M., and Karim, H., "Experimental Analysis and Prediction of Springback in V-bending Process of High-Tensile Strength Steels", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 73: 285–300 (2020).
57. Aslan, Y. ve Karaağaç, İ., "V bükmede geri esneme davranışları", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*, 2 (3): 255–263 (2014).
58. Ozturk, F. ve Toros, S., "DP800 çeliğinin mekanik özelliklerinin ve geri esneme davranışının incelenmesi", *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 11 (1): 40–45 (2009).
59. Şen, M., Yıldırım, E., Çebi, H., ve Özdemir, C., "Çift fazlı çeliklerden üretilen otomotiv sac parçalarının dizaynında geri esnemeyi optimize edebilmek için sac kalınlığına bağlı olarak büküm radyüslerinin belirlenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12 (2): 75–95 (2015).
60. Mishra, A. and Thuillier, S., "Investigation of the rupture in tension and bending of DP980 steel sheet", *International Journal Of Mechanical Sciences*, 84: 171–181 (2014).

61. Tisza, M. and Czinege, I., "Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts", **International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture**, 1 (4): 229–238 (2018).
62. Gomes, T., Silva, F. J. G., and Campilho, R. D. G. S., "Reducing the simulation cost on dual-phase steel stamping process", **Procedia Manufacturing**, 11: 474–481 (2017).
63. Radonjic, R. and Liewald, M., "New process design for reduction of springback by forming with alternating blank draw-in", **Procedia Manufacturing**, 29: 217–224 (2019).
64. Hattalli, V. L. and Srivatsa, S. R., "Sheet metal forming processes - recent technological advances", **Materials Today: Proceedings**, 5: 2564–2574 (2018).
65. Sulaiman, S., Ariffin, M. K. A. M., and Lai, S. Y., "Springback behaviour in sheet metal forming for automotive door", **AASRI Procedia**, 3: 224–229 (2012).
66. Sigvant, M., Pilthammar, J., Hol, J., Wiebenga, J. H., Chezan, T., Carleer, B., and van den Boogaard, T., "Friction in sheet metal forming: Influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results", **Procedia Manufacturing**, 29: 512–519 (2019).
67. Tang, L., Wang, H., and Li, G., "Advanced high strength steel springback optimization by projection-based heuristic global search algorithm", **Materials And Design**, 43: 426–437 (2013).
68. Esener, E., Süphan, E., Yenice, M., Kaya, M., ve Fırat, M., "Sac metal şekillendirme prosesinde deneysel tasarım yöntemi ile parametre hassasiyet analizi", **Makina İmalat Teknolojileri Kongresi**, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2–8 (2013).
69. Çavuşoğlu, O. and Gürün, H., "Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi", **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 29 (4): 777–784 (2014).
70. Kayabaşı, O., "Olasılık Tabanlı Yaklaşım Kullanarak Metal Şekillendirme İşleminde Geri Yaylanma, Buruşma Ve İncelme Problemini En Aza İndirecek Yeni Bir Tasarım Metodolojisi", **Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi**, 8 (1): 198–209 (2020).
71. Esener, E. ve Fırat, M., "Metal şekillendirme prosesi üzerinden geri yaylanma telafi yöntemlerinin incelenmesi", **The 16. International Conference On Machine Design And Production**, İzmir, (2014).

72. Tisza, M. and Lukács, Z., "Springback analysis of high strength dual-phase steels", *Procedia Engineering*, 81: 975–980 (2014).
73. Galdos, L., De Argandoña, E. S., Mendiguren, J., Gil, I., Ulibarri, U., and Mugarra, E., "Numerical simulation of U-Drawing test of Fortiform 1050 steel using different material models", *Procedia Engineering*, 207: 137–142 (2017).
74. Konzack, S., Radonjic, R., Liewald, M., and Altan, T., "Prediction and reduction of springback in 3D hat shape forming of AHSS", *Procedia Manufacturing*, 15: 660–667 (2018).
75. Karabulut, S., Erzincanlıoğlu, S., Ünal, C. U., Bilici, A. Y., ve Yılmaz, İ. Ö., "Üçüncü nesil çeliklerin otomotiv tasarımında kullanımı", *Mühendis Ve Makina*, 35–39 (2019).
76. Tuyan, M. ve Demirer, A., "Sac kalıplama prosesinde DD13 ve S355MC malzemelerin yırtılma probleminin incelenmesi ve çözümü", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (20): 872–880 (2020).
77. Aydın, H., Tuncel, O., Karpuz, M., ve Aydın, Ö., "Otomotiv endüstrisinde kullanılan DP450 ve DP800 saçlarında deformasyon hızının ve haddeleme yönünün çekme özelliklerine etkisi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (1): 323–335 (2019).
78. Billur, E., Çetin, B., Yılmaz, M. M., Onaylı, O., Atay, A., ve Oğuz, A. G., "Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin servo pres kullanılarak bükülmesi", *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 14 (2): 69–76 (2016).
79. Özdemir, A. O., Şirin, H., ve Karataş, Ç., "Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik saclardaki alaşım elementlerinin şekillendirmeye etkisinin araştırılması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (4): 109–119 (2017).
80. Kalkan, H., Hacaloğlu, T., ve Kaftanoğlu, B., "Sac şekillendirme işleminde sürtünmenin incelenmesi", *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 14 (2): 88–94 (2016).
81. Kılıç, S. ve Öztürk, F., "Ticari TWIP900 ve DP600 yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv endüstrisindeki performanslarının karşılaştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31 (3): 567–578 (2016).
82. Taşdemir, V., "Derin çekme işlemi üzerine kalıp geometrisinin etkisinin sonlu elemanlar analizi", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 43–47 (2013).
83. Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H., ve Yılmaz, V., "Farklı ısıtma işlemlerinin 16Mo3 (1.5415) sac malzemelerinin ileri - geri esneme miktarına etkisinin deneysel ve mikroyapısal olarak incelenmesi", *ISITES*, Karabük, 148–155 2014.

84. Prates, P. A., Adaixo, A. S., Oliveira, M. C., and Fernandes, J. V., "Numerical study on the effect of mechanical properties variability in sheet metal forming processes", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (1–4): 561–580 (2018).
85. Leu, D. K., "Position deviation and springback in V-die bending process with asymmetric dies", *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 79: 1095–1108 (2015).
86. Yoon, H., Lee, H. C., and Lee, Y. S., "Springback evaluation of automotive advanced high strength steel sheet", *Journal Of The Chinese Society Of Mechanical Engineers*, 37 (4): 377–386 (2016).
87. Önel, T. ve Karaağaç, İ., "Titanyum Grade 1 sac malzemede geri esnemenin deneysel araştırılması ve bulanık mantık ile tahmini", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*, 5 (3): 213–222 (2017).
88. Phanitwong, W., Boochakul, U., and Thipprakmas, S., "Design of U-geometry parameters using statistical analysis techniques in the U-bending process", *Metals*, 7 (7): (2017).
89. Chang, Y., Wang, N., Wang, B. T., Li, X. D., Wang, C. Y., Zhao, K. M., and Dong, H., "Prediction of bending springback of the medium-Mn steel considering elastic modulus attenuation", *Journal Of Manufacturing Processes*, 67 (2): 345–355 (2021).
90. Işıktaş, A. ve Ay, İ., "Farklı kalınlıklardaki Dkp sacın farklı açılarda yapılan V-bükme işlemindeki geri esnemelerinin incelenmesi", *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 17 (1): 59–69 (2015).
91. Leu, D. K., "A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals", *Journal Of Materials Processing Technology*, 66 (1–3): 9–17 (1997).
92. Hosford, W. F., "Mechanical behavior of materials", İkinci basım, *Cambridge University Press*, 30–91 (2010).
93. Gürün, H., "Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1–67 (2008).
94. Bouaziz, O., Zurob, H., and Huang, M., "Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications", *Steel Research International*, 84 (10): 937–947 (2013).
95. Marciniak, Z., Hu, J., and Duncan, J., "Mechanics of Sheet Metal Forming", *Butterworth Heinemann*, 1–107 (2002).

96. Krishna, S. A. P., "Analysis and prediction of springback – 3 point bending and U-bending", **Graduate Program In Industrial And Systems Engineering, The Ohio State University**, Ohio, 7–8 (2015).
97. Kacar, İ. and Kılıç, S., "Pekleşme Kuralları, Mühendislik Alanında Yenilikçi Yaklaşımlar", First Edit. Ed., **Gece Kitaplığı**, Ankara, 173–190 (2018).
98. Yield Surface, Materials Laws, Autoform user manuel R7 library
99. Ünlü, A., Kap, E., Esener, E., ve Fırat, M., "Finite element modeling of stretch drawing process using bake hardenable steels", **5th International Iron & Steel Symposium**, Karabük, 25–28 (2021).
100. Esener, E., "Plastisite Modellerinde Pekleşme Etkisinin Sonlu elemanlar analizi ile tespiti", **DÜMF Mühendislik Dergisi**, 11 (1): 171–181 (2020).
101. Esener, E., "Plastisite modellemenin sac metal şekillendirme sonlu elemanlar tahmin hassasiyetine etkisi", **9 Th International Automotive Technologies Congress, OTEKON**, Bursa, 356–362 (2018).
102. Yoshida, F., Hamasaki, H., and Uemori, T., "Modeling of anisotropic hardening of sheet metals including description of the Bauschinger effect", **International Journal Of Plasticity**, 75: 170–188 (2015).
103. Toros, S., Polat, A., and Ozturk, F., "Formability and springback characterization of TRIP800 advanced high strength steel", **Materials And Design**, 41: 298–305 (2012).
104. Hou, Y., Min, J., Lin, J., Liu, Z., Carsley, J. E., and Stoughton, T. B., "Springback prediction of sheet metals using improved material models", **Procedia Engineering**, 207: 173–178 (2017).
105. Gürsoy, Köleoğlu, Ö. ve Esener, E., "Malzeme modellerinin sac metal sonlu elemanlar analizi tahmin performansına etkisinin değerlendirilmesi", **Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 6 (1): 1–11 (2019).
106. Wang, Z., Hu, Q., Yan, J., and Chen, J., "Springback prediction and compensation for the third generation of UHSS stamping based on a new kinematic hardening model and inertia relief approach", **International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, 90: 875–885 (2017).
107. Zhang, D., Cui, Z., Ruan, X., and Li, Y., "An analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after U-bending", **Computational Materials Science**, 38 (4): 707–715 (2007).
108. Eggertsen, P. A. and Mattiasson, K., "On the modelling of the bending-unbending behaviour for accurate springback predictions", **International Journal Of Mechanical Sciences**, 51 (7): 547–563 (2009).

109. Kılıç, S. ve Toros, S., "Farklı alüminyum alaşımlarında Bbc2000, Bbc2003, Bbc2005 ve Bbc2008 akma kriterlerinin karşılaştırılması", **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 8 (2): 1073–1081 (2019).
110. Kılıç, S., Öztürk, F., ve Toros, S., "Çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarında Hu2003 akma kriteri performansının araştırılması", **Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi**, 3 (1): 1–18 (2019).
111. G. Özcan, A., Peşteli, V., ve Yöntem, O., "Yüksek mukavemetli çelik sacların kaynaklanabilirliği ve direnç spot kaynağı parametrelerinin taguchi metoduyla optimizasyonu", **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, 23 (2): 333–350 (2018).
112. Vatansever, H. ve Esener, E., "Sonlu elemanlar hesaplama parametrelerinin sac metal şekillendirme simülasyon süresi ve hassasiyetine etkisinin tespiti", **Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi**, (16): 92–108 (2019).
113. Aljibori, H. S. S. and Hamouda, A. M., "Finite element analysis of sheet metal forming process", **European Journal Of Scientific Research**, 33 (1): 57–69 (2009).
114. Jadhav, S., Schoiswohl, M., and Buchmayr, B., "Applications of finite element simulation in the development of advanced sheet metal forming processes", **BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte**, 163 (3): 109–118 (2018).
115. Hollomon, H., "Tensile deformation", **New York Meeting**, 268–288 (1945).
116. Swift H.W., "Plastic Instability Under Plane Stress", **Journal Of The Mechanics And Physics Of Solids**, 1 (1): 1–18 (1952).
117. Ludwik, P., "Elemente Der Technologischen Mechanik", **Springer**, Berlin, 12–22 (1909).
118. Bruschi, S., Altan, T., Banabic, D., Bariani, P. F., Brosius, A., Cao, J., Ghiotti, A., Khraisheh, M., Merklein, M., and Tekkaya, A. E., "Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming", **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 63 (2): 727–749 (2014).
119. Meinders, T., Burchitz, I. A., Bonte, M. H. A., and Lingbeek, R. A., "Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization", **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, 48 (5): 499–514 (2008).
120. Esener, E., Fırat, M., and Yenice, M., "Sac Metal Şekillendirme Proseslerinde Geri Esneme Telafisi", **7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi**, Bursa, 1–5 (2014).

ÖZGEÇMİŞ

Samet KARABULUT, ilk, orta ve lise eğitimini İzmir’de tamamladı. 2003-2007 yılları arasında Kaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği bölümünü tamamladı. 2008-2010 yılları arasında Karabük Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi programında yüksek lisansını tamamladı. 2014-2016 yılları arasında mühendislik tamamlama eğitimini tamamladı.