



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**OTOMOTİVDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ESASLI
SACLARDA GERİ YAYLANMA TAHMİN
DOĞRULUĞUNUN ARTTIRILMASI**

TANER KARAGÖZ

Yüksek Lisans Tezi



**OTOMOTİVDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ESASLI
SACLARDA GERİ YAYLANMA TAHMİN
DOĞRULUĞUNUN ARTTIRILMASI**

TANER KARAGÖZ



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİVDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ESASLI SACLARDA GERİ
YAYLANMA TAHMİN DOĞRULUĞUNUN ARTTIRILMASI**

Taner KARAGÖZ

Prof. Dr. Ali BAYRAM
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2017

TEZ ONAYI

Taner KARAGÖZ tarafından hazırlanan "Otomotivde Kullanılan Alüminyum Esaslı Saclarda Geri Yaylanma Tahmin Doğruluğunun Arttırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ali BAYRAM

Başkan: Prof. Dr. Ali BAYRAM
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

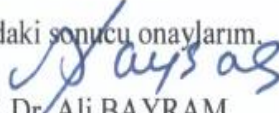
İmza 

Üye: Doç. Dr. Ali Durmuş
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza 

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Lekesiz
Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri,
Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza 

Yukarıdaki sonucu onaylarım,

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Enstitü Müdürü
7.../6...2019

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.././.....

İmza

Taner KARAGÖZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİVDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ESASLI SACLARDA GERİ YAYLANMA TAHMİN DOĞRULUĞUNUN ARTTIRILMASI

Taner KARAGÖZ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali BAYRAM

Bu çalışmada; alüminyum saclarda geri yaylanma değişkenlerinin incelenmesi, malzeme ve simülasyon parametrelerinin iyileştirilmesi ve geri yaylanma tahmin doğruluğunu arttıracak yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur.

Geri yaylanmanın alüminyum saclar üzerinde olan etkisini incelemek için otomotiv sektöründe sık kullanılan AA6016, AA5182 ve AA5754 malzemeleri seçilmiştir. Alüminyum saclarda geri yaylanma konusunda yapılan literatür araştırmasında Yoshida-Uemori modelinin iyi sonuçlar verebileceği öngörülerek çalışmanın temeli Y-U modeli üzerine kurulmuştur.

Yapılan çalışmalarda Y-U modelinin malzeme parametrelerini belirlemek için farklı hadde yönlerinde çekme testi, pekleşme etkisini görebilmek için çevrimli çekme basma testi (cyclic test) ve çevrimli 3 nokta eğme bükme testi gerçekleştirilmiştir. Deneylelerden elde edilen veriler ile Yoshida-Uemori model parametreleri elde edilmiştir. Autoform ve Ls-Dyna kullanılarak Barlat 89 ve Yoshida-Uemori modelleri ile kurulan simülasyonlar deneysel datalar ile karşılaştırılarak geri yaylanma tahmin doğrulukları incelenmiştir.

Çalışmalar sonucunda yapılan değerlendirmelerde Yoshida-Uemori modelinin alüminyum saclarda geri yaylanma davranışını daha doğru tahmin ettiği görülmüştür. Y-U modeli kullanılarak yapılan simülasyonlarda geri yaylanma tahmini konusunda belirgin bir iyileşme gerçekleşmiştir.

Bu çalışma; Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı SANTEZ Programı tarafından 0953.STZ.2015 kodu ile desteklenmiştir. Tasarım, imalat ve denemeler proje ortağı olan Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş 'de gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri yaylanma, alüminyum, Yoshida-Uemori, kinematik pekleşme

2017, xii + 84 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

IMPROVING SPRINGBACK PREDICTION ACCURACY OF ALUMINIUM BASED SHEET METALS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Taner KARAGÖZ

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali BAYRAM

In this study, springback variables in aluminum sheet metals, improvement of materials and simulation parameters, development of methods to increase springback prediction accuracy were investigated.

AA6016, AA5182 and AA5754 materials, which are frequently used in automotive industry, were selected to investigate the effect of springback on aluminum sheets. In literature survey on springback prediction, it was foreseen that Yoshida-Uemori model can give good result so this study based on the Y-U model.

In order to determine the material parameters of the Y-U model, tensile test with different rolling direction, cyclic tensile-compression test and three point bending-unbending test were carried out. Yoshida-Uemori model parameters were obtained from experimental data. Autoform and Ls-dyna simulations were carried out with Y-U and Barlat 89 models then its springback prediction accuracy were investigated by comparing experimental data.

As a result of this studies, it was seen that Yoshida-Uemori model predicted springback behaviour more accurately in aluminum sheet metals. Significant improvement has been achieved in the prediction accuracy of springback in simulations using the Y-U model.

This study is supported by Republic of Turkey Ministry of Science, Industry and Technology with SANTEZ program which code is 0953.STZ.2015. Design, production and try-out processes are performed in Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş, as project partner.

Keywords: Springback, aluminum, Yoshida-Uemori, kinematic hardening

2017, xii + 84 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecimde bana destek veren ve tez çalışmamın SAN-TEZ olarak gerçekleştirilmesi konusunda beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Ali Bayram'a, çalışmalarım sürecince bir çok konuda bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Serkan Toros'a, deneylerin gerçekleştirilmesinde teknik bilgi ve tecrübesiyle bana yardımcı olan Mümin Tutar'a ve çalışmanın gerçekleşmesi için bütün imkanları sağlayan Coşkunöz Kalıp Makina A.Ő. firması ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca proje kapsamında destekleri için Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TUBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu zorlu süreçte beni her zaman destekleyen ve hep yanımda olan hayat arkadaşım Cansu Karagöz'e ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Taner Karagöz
22/05/2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Malzemeler.....	3
2.1.1. Otomotivde Alüminyum Sac Malzemeler	4
2.1.2. AA5182 Malzeme Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	6
2.1.3. AA5754 Malzeme Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	6
2.1.4. AA6016 Malzeme Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	6
2.2. Malzeme Modelleri ve Malzeme Davranışları.....	7
2.2.1. Malzeme Modelleri	7
2.2.2. Akma Kriterleri	8
2.2.3. Tresca Akma Kriteri.....	8
2.2.4. Von Mises Akma Kriteri.....	9
2.2.5. Hill-48 Akma Kriteri.....	10
2.2.6. YLD2000 Akma Kriteri	10
2.2.7. Anizotropi	10
2.2.8. Pekleşme Modelleri.....	11
2.2.9. Bauschinger Etkisi	12
2.2.10. Elastisite Modülü	13
2.2.11. Yoshida-Uemori Modeli	15
2.3. Geri Yaylanma	17
2.3.1. Geri Yaylanmaya Etki Eden Faktörler.....	17
2.3.2. Geri Yaylanma Analizleri	18
3.MATERYAL VE YÖNTEM	20
3.1 Materyal	20
3.2. Proses Ve Kalıp Tasarımı.....	20
3.2.1. Sac Şekillendirme Simülasyonları	20
3.2.2. Sac Şekillendirme Kalıpları ve Operasyonlar	22
3.2.3. Kalıpta Telafi Uygulamaları	24
3.3. Test Aparatları.....	26
3.3.1. Test Kalıbı.....	26
3.3.2. Çevrimli Çekme-Basma Test Aparatı	33
3.3.3. Çevrimli Üç Nokta Eğme-Bükme Test Aparatı.....	35
4. BULGULAR.....	37
4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri	37
4.1.1. Autoform Yazılımı	37
4.2.2. Ls-Dyna Yazılımı.....	37
4.2. Testler ve Deneyler	39

4.2.1. Çekme Testi	39
4.2.2. Çevrimli Çekme Basma Testi	52
4.2.3. Üç Noktalı Eğme Bükme Testi	61
4.3. Malzeme Modellerinin Oluşturulması	69
4.4. Şekillendirilen Sac Malzemenin 3 Boyutlu Taranması.....	75
4.5. Sonlu Elemanlar Analizi ve Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	76
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	89



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

K	Pekleşme katsayısı
E	Elastisite Modülü
ϵ	Gerinme
L_0	İlk Boy
L	Son Boy
λ	Uzama Oranı
σ	Gerilme
Y	İlk akma gerilmesi
B	Akma sınırı yüzeyinin büyüklüğü
C	Her yük değişimi başlangıcında oluşan geçiş
m	Pekleşme üsteli
h	Pekleşme durağanlaşması
b	Kinematik pekleşme büyüklüğü
Rsat	İsotropic pekleşmenin doyma değeri

Kısaltmalar

Açıklama

Y-U	Yoshida-Uemori
BIW	Body In White
FLC	Forming Limit Curve

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Rulo Sac Ve Levha Sac Örnekleri	3
Şekil 2.2 Audi A8 Otomobilinde Malzemelerin Dağılım Oranları.....	4
Şekil 2.3 Doğrusal (Lineer) Ve Doğrusal Olmayan (Non-Lineer) Uzama	7
Şekil 2.4 Tresca Ve Von-Mises Kriterlerinde Gerilme Durumu	9
Şekil 2.5 Hadde Yönüne Göre Numune Yerleşimi.....	11
Şekil 2.6 İzotropik Pekleşme (A), Kinematik Pekleşme (B) Ve Hem İzotropik Hem Kinematik Pekleşme Durumlarında Akma Yüzeyi.....	12
Şekil 2.7 Çevrimli Yükleme Durumunda Gerilim-Gerinim İlişkisi (A) Ve Bükme Durumunda Meydana Gelen Yükleme Tipleri (B)	13
Şekil 2.8 Değişken Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Üzerine Etkisi.....	14
Şekil 2.9 Yoshida-Uemori Modelinde Akma Yüzeyi Kabulü	15
Şekil 2.10 Yoshida-Uemori Modeli İle Tanımlanan Çevrimsel Deformasyon Davranışı	17
Şekil 2.11 Şekillendirme Analizlerine Malzeme Model Parametrelerinin Etkisi	19
Şekil 2.12 Çevrimsel Eğrilere Parametrelerin Etkisi	19
Şekil 3.1 Bir Otomotiv Ön Kaput İç Sac Parçasının Proses Adımları.....	21
Şekil 3.2 Bir Otomotiv Ön Kaput İç Sac Parçasının Kalıpları.....	22
Şekil 3.3 Bir Sac Parçanın Şekillendirme Simülasyonu	23
Şekil 3.4 Fizibilite Değerlendirmesinde İncelenen Simülasyon Çıktıları	23
Şekil 3.5 Tasarlanan Parçanın Kanat Açılırları	25
Şekil 3.6 Çekme Operasyonu Ve Kesme Operasyonu Sonrası Sac Parça	26
Şekil 3.7 Şekillendirilebilirlik Değerlendirmesi	26
Şekil 3.8 Plastic Strain Değerlendirmesi.....	27
Şekil 3.9 İncelme Değerlendirmesi	28
Şekil 3.10 Deney Kalıbının Tasarımı.....	29
Şekil 3.11 Deney Kalıbın Alt Grup Fotoğrafı.....	29
Şekil 3.12 Deney Kalıbın Üst Grup Fotoğrafı	30
Şekil 3.13 Deney Kalıbı 3 Boyutlu Ölçümü (Alt Grup)	30
Şekil 3.14 Deney Kalıbı 3 Boyutlu Ölçümü (Üst Grup).....	30

Şekil 3.15 Kalıp Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	31
Şekil 3.16 Kalıp İle Üretilen Parçalar	31
Şekil 3.17 Saydam Malzemedden Üretilen Burkulma Önleyici Aparat	32
Şekil 3.18 Metal Malzemedden Üretilen Burkulma Önleyici Aparat.....	33
Şekil 3.19 Çevrimli Çekme Basma Test Düzeneği.....	34
Şekil 3.20 Çevrimli Üç Nokta Eğme-Bükme Test Aparatı Tasarımı.....	35
Şekil 3.21 Çevrimli Üç Nokta Eğme-Bükme Test Düzeneği	35
Şekil 4.1 Deney Parçasının Ls-Dyna Mesh Yapısı Ve Şekillendirme Araçları.....	37
Şekil 4.2 AA5182 Malzemenin Ls-Dyna İle Şekillendirilmesi	37
Şekil 4.3 AA5754 Malzemenin Ls-Dyna İle Şekillendirilmesi	38
Şekil 4.4 AA6016 Malzemenin Ls-Dyna İle Şekillendirilmesi	38
Şekil 4.5 Utest Marka Universal Çekme Testi Cihazı	39
Şekil 4.6 Çekme Testi Düzeneği.....	40
Şekil 4.7 AA5182 Malzemesine Ait Çekilmiş Test Numuneleri.....	40
Şekil 4.8 AA5754 Malzemesine Ait Çekilmiş Test Numuneleri.....	41
Şekil 4.9 AA6016 Malzemesine Ait Çekilmiş Test Numuneleri.....	41
Şekil 4. 10 AA5754 Malzemesinin 0° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	42
Şekil 4.11 AA5754 Malzemesinin 45° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	42
Şekil 4.12 AA5754 Malzemesinin 90° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	43
Şekil 4.13 AA5754 Malzemesinin Çekme Eğrileri	43
Şekil 4.14 AA5182 Malzemesinin 0° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	44
Şekil 4.15 AA5182 Malzemesinin 45° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	44
Şekil 4.16 AA5182 Malzemesinin 90° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	45
Şekil 4.17 AA5182 Malzemesinin Çekme Eğrileri	45
Şekil 4.18 AA6016 Malzemesinin 0° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	46
Şekil 4.19 AA6016 Malzemesinin 0° Hadde Yönündeki Akma Mukavemeti	46
Şekil 4.20 AA6016 Malzemesinin 45° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	47
Şekil 4.21 AA6016 Malzemesinin 45° Hadde Yönündeki Akma Mukavemeti	47
Şekil 4.22 AA6016 Malzemesinin 90° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi	48
Şekil 4.23 AA6016 Malzemesinin 90° Hadde Yönündeki Akma Mukavemeti	48
Şekil 4.24 AA6016 Malzemesinin Çekme Eğrileri	49
Şekil 4.25 AA5182, AA5754 Ve AA6016 Malzemelerinin Çekme Eğrileri.....	49

Şekil	4.26	Deney
Numunesi.....		50
Şekil 4.27 0.03 Gerinim Değeri İçin Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri		50
Şekil 4.28 0.06 Gerinim Değeri İçin Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri		51
Şekil 4.29 0.09 Gerinim Değeri İçin Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri		51
Şekil 4.30 0.12 Gerinim Değeri İçin Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri		52
Şekil 4.31 0.15 Gerinim Değeri İçin Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri		52
Şekil 4.32 AA5182-0° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		53
Şekil 4.33 AA5182-45° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		53
Şekil 4.34 AA5182-90° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		54
Şekil 4.35 AA5754-0° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		54
Şekil 4.36 AA5754-45° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		55
Şekil 4.37 AA5754-90° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		55
Şekil 4.38 AA6016-0° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		56
Şekil 4.39 AA6016-45° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		57
Şekil 4.40 AA6016-90° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri.....		57
Şekil 4.41 Üç Noktalı Eğme Bükme Test Numuneleri.....		58
Şekil 4.42 Üç Noktalı Eğme Bükme Test Düzenegi.....		58
Şekil 4.43 AA5182-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		59
Şekil 4.44 AA5182-45° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		59
Şekil 4.45 AA5182-90° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		60
Şekil 4.46 AA5182 Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafikleri		60
Şekil 4.47 AA5754-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		61
Şekil 4.48 AA5754-45° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		61
Şekil 4.49 AA5754-90° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		62
Şekil 4. 50 AA5754 Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafikleri		62
Şekil 4.51 AA6016-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		63
Şekil 4.52 AA6016-45° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		63
Şekil 4.53 AA6016-90° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		64
Şekil 4.54 AA6016-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği		64
Şekil 4.55 Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testleri Birleştirilmiş Grafiği.....		65
Şekil 4.56 AA5182-0° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği.....		66

Şekil 4.57 AA5182-45° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği...	67
Şekil 4.58 AA5182-90° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği...	67
Şekil 4.59 AA5754-0° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği.....	68
Şekil 4.60 AA5754-45° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği...	68
Şekil 4.61 AA5754-90° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği...	69
Şekil 4.62 AA6016-0° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği.....	69
Şekil 4.63 AA6016-45° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği...	70
Şekil 4.64 AA6016-90° Malzemesi İçin Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği...	70
Şekil 4.65 AA6016 Malzemesi Taranan Deneysel Parçalar	72
Şekil 4.66 AA5182 Malzemesi Taranan Deneysel Parçalar	72
Şekil 4.67 AA5754 Malzemesi Taranan Deneysel Parçalar	73
Şekil 4.68 AA5182 İçin Tarama Datası Ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Aligment)	74
Şekil 4.69 AA5182 İçin Tarama Datası Ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment).....	74
Şekil 4.70 AA5182 İçin Tarama Datası Ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Aligment)	75
Şekil 4.71 AA5182 İçin Tarama Datası Ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Aligment).....	75
Şekil 4.72 AA5754 İçin Tarama Datası Ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Aligment)	76
Şekil 4.73 AA5754 İçin Tarama Datası Ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment).....	76
Şekil 4.74 AA5754 İçin Tarama Datası Ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Aligment)	77
Şekil 4.75 AA5754 İçin Tarama Datası Ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment).....	77
Şekil 4.76 AA6016 İçin Tarama Datası Ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Aligment)	78
Şekil 4.77 AA6016 İçin Tarama Datası Ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment).....	78

Şekil 4.78 AA6016 İçin Tarama Datası Ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Aligment)	79
Şekil 4.79 AA6016 İçin Tarama Datası Ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Aligment).....	79
Şekil 4.80 AA5182 Y-U Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar	80
Şekil 4.81 AA5182 Barlat Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar	80
Şekil 4.82 AA5754 Y-U Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar	81
Şekil 4.83 AA5754 Barlat Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar	81
Şekil 4.84 AA6016 Y-U Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar	82
Şekil 4.85 AA6016 Barlat Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Alüminyum Malzemeler ve Kullanım Alanları.....	5
Çizelge 2.2 AA5182-O Ve AA5754-O Malzemelerin Kimyasal Bileşimleri.....	6
Çizelge 2.3 AA6016 Sac Malzemenin Kimyasal Bileşimleri.....	6
Çizelge 2.4 Yoshida Uemori Parametreleri ve Açıklamaları.....	16
Çizelge 3.1 Çalışmada Kullanılan Malzeme Türleri.....	20
Çizelge 4.1 Malzemelerin Her Bir Yönü İçin Y-U Model Parametreleri.....	71
Çizelge 4.2 Y-U Model Parametreleri Ortalama Değerleri.....	71

1. GİRİŞ

Otomotiv sektörünün; rekabet, çevre kirliliği ve hidrokarbon yakıtların temin edilmesindeki darboğazlar nedeniyle daha hafif araç üretme ve buna bağlı olarak yakıt tüketimini azaltma yönündeki araştırmaları hızla devam etmektedir. Bu amaçla otomotiv sektöründe bazı parçalarda malzeme tercihleri alüminyum, magnezyum ve kompozit malzeme yönüne kaymaktadır. Alüminyum tercih edilmesinin diğer bir nedeni de yolcu güvenliği konusunda alüminyum malzemelerin yüksek darbe emici özelliğine sahip olmasıdır. Özellikle alüminyum saclarda artan talep dolayısıyla kalıp ve otomotiv sektöründe alüminyum sac malzeme şekillendirme çalışmaları büyük önem kazanmıştır (Başer 2012).

Alüminyum sac parçalar genellikle dış yüzey ve astar-iç yüzey parçalarında kullanılmaktadır. Alüminyum kalıplarda uygulanan telafiler ve kaynaklı düzeltmeler sektörde müşteri firmalar tarafından kesinlikle istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle özellikle alüminyum dış yüzey kalıpları ilk seferde geometriye en uygun ve en doğru şekilde üretilmelidir. Bu noktada yapılan şekillendirme simülasyonlarındaki doğruluğun önemi ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda şekillendirme işlemlerinin başarısının tahmininde sonlu elemanlar yazılımlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Autoform, Pamstamp ve Ls-dyna (Dynaform) bu kapsamda en çok kullanılan yazılımlardandır.

Alüminyum saclarda çeliklerde uygulanan klasik soğuk şekillendirme metodunun uygulanması bazı şekillendirme ve kalite problemlerini de beraberinde getirmektedir. Alüminyum sac malzemenin şekillendirilmesinde en sık karşılaşılan problemlerden biri alüminyum alaşımlı sacların çekme prosesindeki mekanik davranışı ve geri yaylanma davranışının simülasyonu ile gerçek durumun farklı olmasıdır. Malzeme şekillendirme baskı kuvveti ortadan kalktıktan sonra serbest hale geçtiğinde eski formuna dönmek için bir miktar şekil değiştirmektedir. Bu değişim geri yaylanma olarak anılmaktadır. Özellikle sac şekillendirme operasyonlarında geri yaylanmanın doğru tahmin edilmesi çok kritik bir rol teşkil etmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dünyada sac metallerde geri yaylanma tahmini ve malzeme modelleri konusunda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Fakat bu modellerin performanslarının gerçek araç bileşenlerindeki uygulamaları ve bu modellerin performanslarının tayinine yönelik yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğunda çelik saclar ve ılık şekillendirme üzerinde durulmuştur. Az sayıda da olsa alüminyum sac malzemelerde farklı malzeme modelleri kullanılarak yapılan bazı şekillendirme çalışmaları da literatürde yer almaktadır.

PamStamp programının geliştiricisi ESIGROUP çelik malzemeli bir sac ürünüde geri yaylanmayı etkileyen parametreleri incelemiş ve farklı modeller kurarak (IH,LK,IH+NLK, YoshidaUemori) simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır. Bu çalışmaların sonucunda GM ve Hyundai Motor gibi firmalar geri yaylanmanın tahmini konusunda %85-%90 seviyelerine çıkmışlardır. Alüminyum sac malzemenin çelik sac malzemenin farklı bir mekanik davranışa sahip olması nedeniyle alüminyum saclarda henüz bu seviyeye ulaşılan bir çalışmaya rastlanmamıştır (Esi 2009).

Zhou (1999), yapmış olduğu çalışmada U profilde AA5754 ve AA5182 alüminyum malzemelerini incelemiş ve geri yaylanma tahmin doğruluğunu araştırmıştır. Hill ve Barlat akma kriterlerini karşılaştırmış ve Barlatın daha yakın sonuçlar verdiğini gözlemiştir (Zhou 1999).

Ghaei (2009), Modeling Springback in Stamped Automotive Structures isimli çalışmasında AA6022 ve DP600 malzemelerinde geri yaylanma çalışmaları yapmıştır. Çalışma sonucunda YU modelinin IH+NKH modeline göre alüminyum saclarda ve HSLA saclarda daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir (Ghaei 2010).

Yoshida, Uemori ve arkadaşları (2011), Experimental Observation of Elasto Plasticity Behavior of Type 5000 and 6000 Aluminum Alloy Sheets isimli makalesinde A5052 ve AA6016-T4 alüminyum malzemelerinde Elastoplastik davranış incelenmiştir. Bu çalışmada YU kinematik hardening modelinin anisotropik akma kriterleri için öncelikli

seçim olduğunu ve ayrıca Barlat ve YLD2000 fonksiyonlarının da bazı alüminyum saclarda iyi bir seçenek olabileceği sonucuna ulaşmıştır (Tamura ve ark. 2011).

Türkiyede sac metallerde geri yaylanma konusunda yapılan bazı çalışmalar ve sonuçları aşağıda yer almaktadır.

Öztürk, Toros ve ark. (2014) Effects of anisotropic yield functions on prediction of forming limit diagrams of DP600 advanced high strength steel isimli çalışmalarında DP600 dual fazlı çelik malzemeyi inceleyerek, Hill48, Barlat 89 ve YLD 2000 akma fonksiyonlarını karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda YLD 2000 modelinin deneysel verilerle en uyumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Ozturk ve ark. 2014).

2.1. Malzemeler

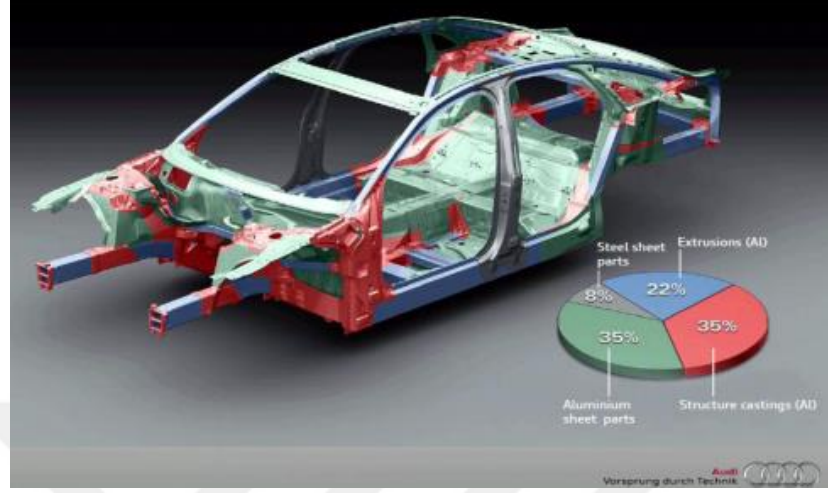
Sac malzemeler kalınlıkları 0,2 mm - 20 mm arasında değişen farklı özelliklere ve farklı alaşımlara sahip genellikle demir esaslı yada alüminyum alaşımlı yassı metal ürünlerdir. Sac malzemeler sıcak yada soğuk kalın blok malzemelerin silindirler arasından geçirilerek haddelenmesiyle üretilmektedir. Değişik alaşımlarda ve değişik kalınlıklarda olan bu saclar genellikle rulo halinde yada kesilmiş levhalar halinde stoklanmaktadır. Sac malzemelerin stoklanma biçimleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Rulo Sac Ve Levha Sac Örnekleri

Sac malzemelerin otomotiv sanayi, havacılık ve savunma sanayi, gemi parçaları, beyaz eşya gibi bir çok sektörde kullanım alanı mevcuttur. Özellikle otomotiv sektöründe ana ürün olan otomobil üretiminde çok farklı özelliklerde ve kalınlıklarda bir çok sac

malzeme kullanılmaktadır. Bir otomobil gövdesinde kullanılan malzemeler Şekil.2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Audi A8 Otomobilinde Malzemelerin Dağılım Oranları (Singh 2012)

2.1.1. Otomotivde Alüminyum Sac Malzemeler

Son yüzyılda gelişen sanayi, üretim hacminin ve kullanılan petrol yakıtlarının dünyaya etkileri araştırıldığında çevresel bir çok problem ortaya çıktığı görülmüştür. Uluslararası otoriteler ve ülkeler çevreye verilen zararı telafi edebilmek için küresel bazda bir çok yasal düzenlemeler ortaya koymuşlardır. Bu düzenlemeler ile birlikte artık üreticiler sadece üretim hacmini değil çevresel etkileri de gözönünde bulundurmaya zorundadır. Yasal düzenlemeler neticesinde araç hafifletmenin ve çevresel üretimin bir zorunluluk haline gelmesiyle birlikte alüminyum, kompozit malzemeler gibi hafifletme sağlayabilecek alternatif malzemelere olan ilgi artmıştır.

Otomotivde alüminyum sac konusunda artan ilgi aslında alüminyumun bir çok farklı acantajı olduğunu da ortaya koymuştur. Araçlarda alüminyum sac kullanımının son yıllarda giderek artmasının altında yatan avantajlar;

- Düşük karbondioksit salınımı
- Yasal düzenlemelere tam uyum
- Araç ağırlığında hafifletme
- Yüksek darbe sönümlenme kapasitesi ile artan güvenlik

- Aracın ön ve arka kısmındaki ağırlık dengelenerek ve ağırlık merkezi düşürülerek arttırılan sürüş güvenliği ve yol tutuşu
- Daha iyi yakıt ekonomisi
- Maliyet tasarrufu

Avrupa birliği karbon emisyon düzenlemelerinde izin verilen oranlar 2008 yılında 140g/km iken 2012 yılında 130g/km olarak belirlenmiştir. Bu oran 2020 yılında 95g/km olarak düzenlenecektir. Bu düzenlemeler otomotivde alüminyum malzeme kullanımının gittikçe daha da artacağını göstermektedir.

Alüminyum sacların alaşım serileri, alaşım elementleri, ısıt işlemler özellikleri ve uygulama alanları Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Alüminyum malzemeler ve kullanım alanları

Alaşım Serileri	Ana Alaşım Elementleri	Isıl İşlem Uygunluğu	Uygulamala Alanları
1XXX	%99 Saf Alüminyum	Uygulanamaz	<ul style="list-style-type: none"> • Yapısal olmayan parçalar • Isıl Değiştiriciler • Elektrik İletkenleri
2XXX	Bakır	Uygulanabilir	<ul style="list-style-type: none"> • Yapısal Elemanlar • Havacılık
3XXX	Mangan	Uygulanamaz	<ul style="list-style-type: none"> • İçecek kutuları • Yapısal olmayan elemanlar
4XXX	Silicon	Uygulanabilir	<ul style="list-style-type: none"> • Yapısal olmayan elemanlar • Dolgu Teli
5XXX	Magnezyum	Uygulanamaz	<ul style="list-style-type: none"> • Otomotiv Yapısal Parçalar • Denizcilik • Tanklar
6XXX	Magnezyum + Silisyum	Uygulanabilir	<ul style="list-style-type: none"> • Otomotiv dış yüzey parçaları
7XXX	Çinko	Uygulanabilir	<ul style="list-style-type: none"> • Yapısal Parçala • Havacılık
8XXX	Lityum	-	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrik İletkenleri

2.1.2. AA5182 Malzeme Özellikleri ve Kullanım Alanları

Magnezyum alaşımlı ve ısıtılma işlemine uygun olmayan AA5182 (AlMg4.5Mn0.4) malzemesi otomotiv sektöründe genellikle iç gövde parçalarında, astar parçalarda, ısı kalkanlarında, yapısal, kaynaklı parçalarda ve taban sacında kullanılmaktadır.

2.1.3. AA5754 Malzeme Özellikleri ve Kullanım Alanları

Magnezyum alaşımlı AA5754 (AlMg3) malzemesi otomotiv sektöründe genellikle iç gövde parçalarında, astar parçalarda, ısı kalkanlarında, yapısal, kaynaklı parçalarda, taban sacında ve BIW parçalarda kullanılmaktadır. Kullanım alanı bakımından AA5182 malzemesiyle oldukça benzer olan bu alaşım içeriğindeki alaşım elementleri açısından da oldukça benzer özelliklere sahiptir. Otomotiv sektöründe AA5754 malzeme yapısal parçalarda AA5182 malzeme ise iç astar parçalarda tercih edilmektedir. İki malzemenin de kimyasal bileşimleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. AA5182-O Ve AA5754-O Malzemelerin Kimyasal Bileşimleri

	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ti	Zn
AA5182-O	Bal	4.3	0.34	0.21	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
AA5754-O	Bal	3.0	0.24	0.26	0.03	0.02	<0.01	<0.01	<0.01

2.1.4. AA6016 Malzeme Özellikleri ve Kullanım Alanları

Yüksek oranda silisyum ve magnezyum içeriğine sahip AA6016 (AlSi1.2Mg0.4) malzemesi ısıtılma işlemine uygundur. İyi şekillendirme özelliği, kaynaklanabilirlik ve korozyon direncine sahiptir. Ayrıca şekillendirme sonrası çok iyi dış yüzey kalitesi ve iyi seviyede boyanabilirlik özelliklerine sahiptir. AA6016 sac malzemeler otomotivde kapı, kaput, tavan, kasa yanı gibi dış ve iç yüzey panel saclarda kullanılmaktadır. Özellikle otomotivde stil hattı adı verilen çok küçük radyuslu çizgilerin şekillendirilmesinde çok iyi sonuçlar verdiği için dış yüzey saclarda tercih edilmektedir.

Çizelge 2.3. AA6016 Sac Malzemenin Kimyasal Bileşimleri

Alloy	Al (wt%)	Si (wt%)	Fe (wt%)	Cu (wt%)	Mn (wt%)	Mg (wt%)	Cr (wt%)	Zn (wt%)	Si/Mg
AA6016	Bal.	1.03	0.17	0.08	0.08	0.32	0.01	0.01	3.2

2.2. Malzeme Modelleri ve Malzeme Davranışları

2.2.1. Malzeme Modelleri

Malzeme modelleri malzemelerin çeşitli şartlar altındaki davranışının temsil edilmesini sağlayan matematiksel ifadelerdir. Her malzeme özelliğini en iyi şekilde yansıtacak farklı malzeme modelleri vardır. Kauçuk ve elastomerik malzemeler için hiperelastik malzeme modelleri kullanılırken, sürünme gibi zamana bağlı değişimler için ise viskoelastik malzeme modelleri kullanılmaktadır.

Ana konumuz olan metal malzemelerde kullanılan modeller doğrusallık kabulüne göre lineer ve non-lineer malzeme modelleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Doğrusal (Linear) ve Doğrusal Olmayan (Non-Linear) Uzama

Lineer malzeme modellerinde gerilim-gerinim ilişkisi elastisite modülünün eğimine bağlı olarak doğrusal bir çizgide devam etmektedir. Bu ilişki aşağıda hooke kanunu ile ifade edilmiştir.

$$\sigma = E * \epsilon \text{ (Hook Kanunu)}$$

Non-lineer malzeme modelleri ise büyük deformasyonların olduğu doğrusal davranış göstermeyen malzemeler için kullanılmaktadır. Malzemenin elastisite modülü gerinime bağlı olarak değişmektedir.

Elastisite malzemenin şekil değişimden sonra eski haline dönmesini, plastisite ise malzeme yapısında geri döndürülemeyen deformasyonlar olması durumunu ifade etmektedir. Malzemenin akma noktasına kadar olan kuvvetler için genellikle elastik

model, akma noktasından sonraki davranışını temsil etmek için ise plastik model kullanılmaktadır.

Malzemenin akma gerilmesini aştıktan sonra kalıcı deformasyona uğraması elasto-plastik malzeme modeliyle temsil edilemektedir. Sac metal şekillendirmede hem elastik bölgeyi hem plastik bölgeyi ifade etmek için elastoplastik modeller kullanılmaktadır.

Bir malzeme modeli o malzemenin gerçek davranışını ne kadar yakından temsil edebilirse yapılan simülasyonlar da o kadar doğru olur. Bu nedenle malzeme modelleri konusunda çalışmalar sürekli devam etmektedir ve gelişen teknolojiyle birlikte malzeme modelleri de temsil kabiliyetini arttırabilmek için gelişmektedir.

2.2.2. Akma Kriterleri

Malzemenin tek eksenli gerilme durumunda plastik şekil değişiminin gerçekleştiği nokta akma noktası olarak adlandırılır. Malzeme üzerine çok yönlü gerilmeler uygulandığında akma davranışını ifade etmek için akma yüzeyleri ve akma kriterleri gibi kavramlar kullanılmaktadır.

2.2.3 Tresca Akma Kriteri

Akma kriteri ilk olarak 1864 yılında Fransız mühendis Henri Tresca tarafından ortaya atılmıştır. Aynı zamanda maksimum kayma gerilmesi kriteri olarak da bilinen Tresca akma kriteri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$
$$\tau_y = 0,5\sigma_y$$

Denklemden akmanın başlayacağı maksimum kayma gerilmesi değeri maksimum eksenel gerilme ve minimum eksenel gerilme farkının ikiye bölünmesiyle ifade edilmektedir. Tresca kriteri akma yüzeyini altıgen şekliyle temsil edilmektedir.

2.2.4 Von Mises Akma Kriteri

1913 yılında Richard Edler von Mises'e atfen literatüre kazandırılmıştır. Tresca kriterinden farklı olarak akma yüzeyini dairesel bir silindir ile ifade etmektedir. Von mises akma kriteri maksimum çarpılma enerjisi hipotezini temel almaktadır. Buna göre çok eksenli bir yükleme durumundaki sünek malzemedeki çarpılma enerjisi yoğunluğu o malzeme için kritik bir değere ulaştığında malzeme akma davranışı gösterecektir, diğer bir deyişle malzeme içindeki bir noktadaki eşdeğer gerilme malzemenin akma gerilmesini aştığında o noktada akma meydana geleceği ön görülmektedir.

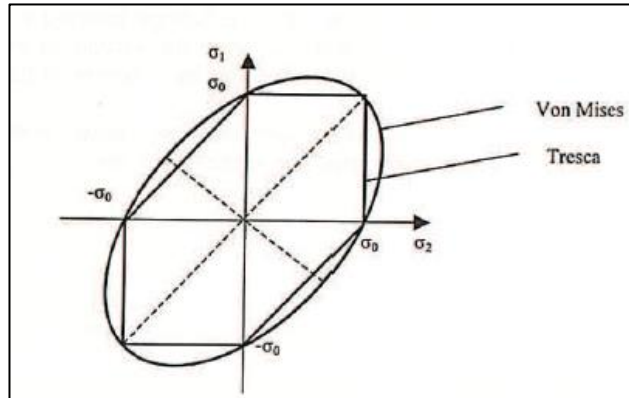
Düzlemsel gerilme durumunda eşdeğer gerilme asal gerilmeler cinsinden ifade edilirse;

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$$

$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{max}$ olması durumunda akma gerilmesini kayma cinsinden ifade edersek;

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = 0,577\sigma_y$$

Yukarıdaki denklemlerden görüleceği üzere Tresca ve Von Mises kriterlerinde düzlemsel gerilme durumunda hesaplanan akma gerilmelerinde farklılık bulunmaktadır. Bunun nedeni aşağıdaki grafik üzerinde görüleceği gibi iki akma kriterinin farklı geometriler ile temsil edilmesidir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Tresca ve Von-Mises Kriterlerinde Gerilme Durumu (Banabic 2010)

2.2.5 Hill-48 Akma Kriteri

Sonlu elemanlar yazılımlarında en sık kullanılan model olan Hill-48, Rodney Hill tarafından 1948 yılında geliştirilmiştir. Hill 48 modeli malzemenin anizotropisini de dikkate alan ve malzemeyi basit bir şekilde tanımlayabilen bir modeldir. Bu modelin eksik yönü ise pekleşme etkisini dikkate almamasıdır. Basit olduğu için sonlu eleman programlarınca tercih edilen bu model, daha hassas durumlar için pekleşme modelleriyle birlikte kullanılmalıdır. Malzemenin üç eksenli anizotropisine ve gerilme durumuna bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

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

Burada F,G,H,L,M ve N anizotropi katsayılarıdır.

Sac malzemelerde kalınlık yönünde oluşan gerilme ihmal edilerek, eşitlik düzlem gerilme halinde yazılırsa;

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

olarak ifade edilir.

2.2.6. YLD2000 Akma Kriteri

Barlat tarafından 2 boyutlu gerilme durumunu ifade etmek için geliştirilmiştir. Bu modelde anizotropi ve akma gerilmelerine bağlı olan 8 parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler 0,45 ve 90 derece yönlerindeki gerilmeler ve anizotropi katsayılarına ek olarak iki eksenli gerilme testinden elde edilen gerilme değeri ve anizotropi değeridir. Hesaplanması Hill-48 modeline göre çok daha zor olan bu model bazı durumlarda daha iyi sonuçlar verdiği için tercih edilmektedir.

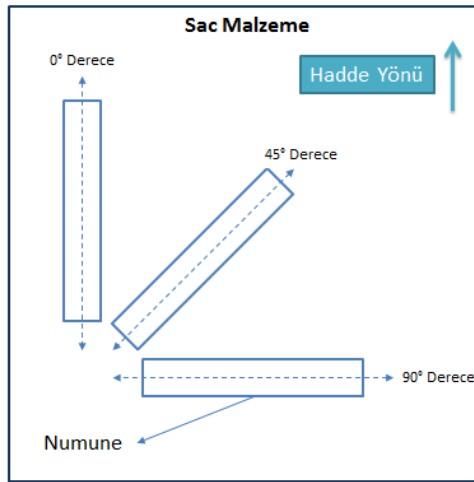
2.2.7. Anizotropi

Malzemelerin iç yapılarındaki durum ve mekanik özellikler genellikle yönden bağımsız yani izotropik olarak varsayılmaktadırlar. İzotropik olarak kabul edilen malzemelerde mekanik özellikler yönden bağımsızdır.

Sac malzemelerin üretiminde uygulanan haddeleme yöntemiyle malzemenin hadde boyunca uzamasıyla tane yapısı bozularak bir takım kusurlar meydana gelmektedir. Bu kusurlar malzemenin bütün doğrultularında farklı olduğundan malzemenin mekanik özelliklerini doğrultuya yani yöne bağlı olarak değiştirmektedir.

Bu durum anizotropi olarak adlandırılır. Anizotropik malzemelerde mekanik özellikler hadde yönüne göre değişmesi nedeniyle sacın hadde yönünde, hadde yönüne dik ve 45° açılı kesilen numuneler üzerinde yapılan testler ile anizotropi değerleri bulunmaktadır.

Anizotropi lankford parametreleri ile ifade edilmektedir. r_0, r_{45} ve r_{90} olarak bilinen Lankford parametreleri aşağıda belirtilen numuneler ile yapılan testlerden elde edilmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Hadde Yönüne Göre Numune Yerleşimi

2.2.8. Pekleşme Modelleri

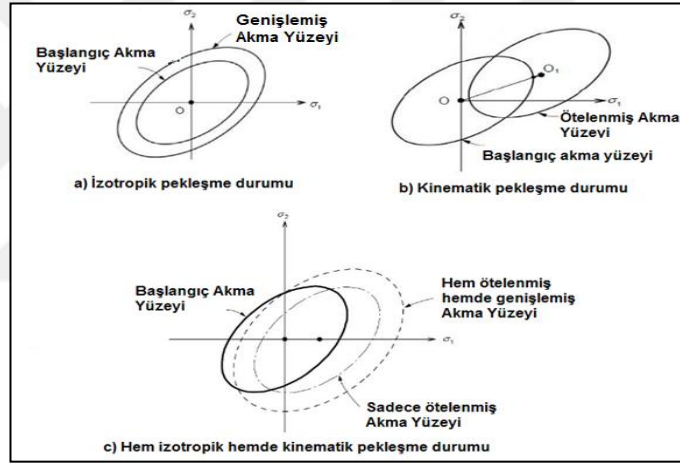
Malzemeler yükleme esnasında elastik limite kadar mekanik özelliklerinde değişim göstermezler fakat plastik bölgeye geçtikten sonra plastik şekil değişimi ile birlikte malzemenin mukavemet ve şekillendirilebilirlik gibi mekanik özellikleri değişmektedir. Malzemede oluşan bu değişime pekleşme adı verilir.

Malzemelerde genel olarak 3 tip pekleşme görülmektedir. Bunlar izotropik, kinematik ve hem izotropik hem kinematik özellik gösteren pekleşmedir.

İzotropik pekleşme durumunda başlangıç akma yüzeyi sabit kalarak yüzeyin genişleyerek büyüdüğü varsayılmaktadır. Bu kabule göre malzemenin çekme ve basma akma dayanımları eşit olmaktadır.

Kinematik pekleşme durumunda malzemenin başlangıç akma yüzeyi büyüklüğü sabit kalacak şekilde ötelenmektedir. Bu kabule göre malzemenin çekme sırasındaki akma dayanımı basma sırasındaki akma dayanımından yüksektir.

Hem izotropik pekleşme hem de kinematik pekleşme tek başına gerçek durumu temsil edemediğinden iki kabul birleştirilerek birleşik pekleşme modeli adını almıştır. Bu model kabulünde ilk akma yüzeyi hem genişlemekte hem de ötelenmektedir (Şekil 2.6).



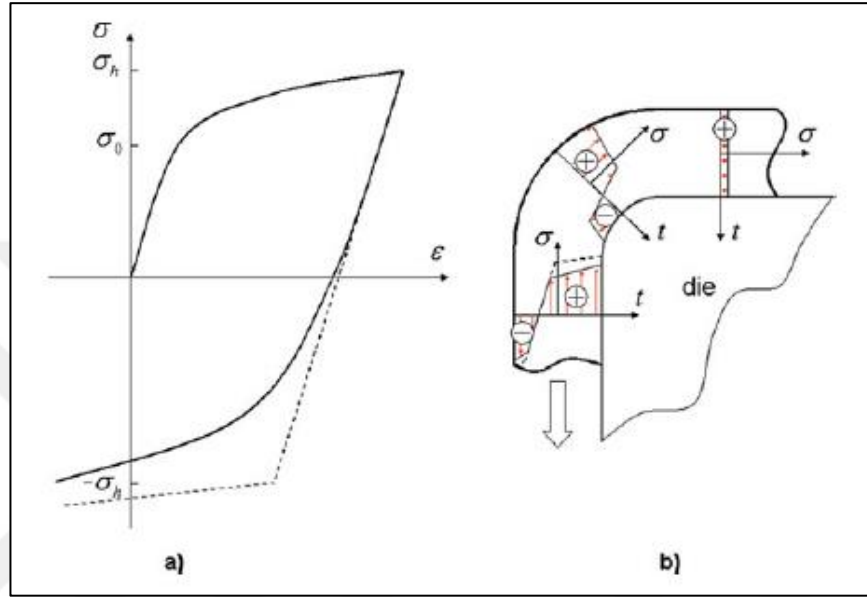
Şekil 2.6. İzotropik Pekleşme (a), Kinematik Pekleşme (b) ve Hem İzotropik Hem Kinematik Pekleşme Durumlarında Akma Yüzeyi

2.2.9. Bauschinger Etkisi

Sac şekillendirme işleminde malzeme çekme, bükme, tekrar bükme gibi fiziksel zorlamalara maruz bırakılarak deformasyonlar oluşturulur. Bu deformasyonlarda bir bölge çeki yönünde yüklenirken bir sonraki operasyonda aynı bölge bası yönünde yüklenebilir. Bu tarz yüklemeler çevrimli yüklemeler ile benzerlik göstermektedir.

Çevrimli yüklemelerde malzeme çeki yönünde yüklenirken daha sonra bası yönünde yüklenmektedir. Malzeme çeki yönünde yüklendikten sonra bası yönünde yüklemeye

maruz bırakılırsa, çeki yönünde yükleme altında akma noktasının bası yönünde akma noktasından daha büyük olduğu görülmektedir. Malzemede meydana gelen bu mekanik özellik farkına baushinger etkisi adı verilir. Bu farkın nedeni malzemenin çekme sırasında iç yapısında meydana gelen dislokasyon yığılmalarının basma sırasında daha kolay dağılmasıdır.



Şekil 2.7. Çevrimli Yükleme Durumunda Gerilim-Gerinim İlişkisi (a) ve Bükme Durumunda Meydana Gelen Yükleme Tipleri (b) (Banabic 2010)

Şekil 2.7-a'da örnek bir malzemenin çevrimsel yükleme altındaki gerinim-gerilim karakteristiği gösterilmektedir. Burada kesik çizgiyle belirtilen grafikte malzemede baushinger etkisi göz önüne alınmamaktadır. Fakat gerçek durumda malzeme baushinger etkisine maruz kaldığı için basma durumunda akma gerilmesinin azaldığı görülmektedir. Şekil 2.7-b'de ise bükmeye maruz kalan bir malzemenin iç yapısındaki pozitif ve negatif gerilim dağılımı görülmektedir (Banabic 2010).

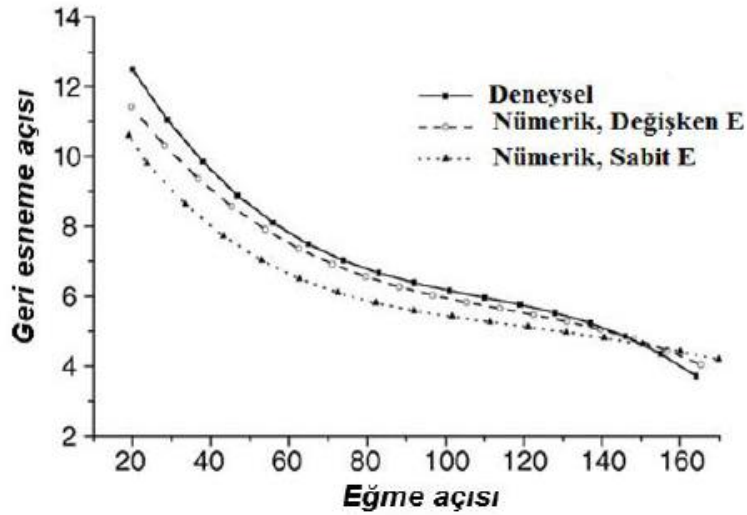
2.2.10. Elastisite Modülü

Alüminyum malzemeye ait çekme testi ile elde edilen bir çekme diyagramı üzerinde elastik ve plastik olmak üzere iki bölge bulunmaktadır. Elastik bölge malzemenin uygulanan yük kaldırıldıktan sonra başlangıç durumuna dönebildiği durumu ifade

etmektedir. Plastik bölgede ise malzemede geri dönülemez bir şekil değişimi meydana gelmektedir. Elastik bölgenin doğrusal olarak arttığı kabul edilir. Plastik bölgenin başlangıcına kadar devam eden doğrunun eğimi elastisite modülü yani diğer bir adıyla young modülünü ifade etmektedir. Buna göre elastisite modülü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_e} \text{ (Hook Kanunu)}$$

Elastisite modülü bir çok analizde sabit olarak alınmasına rağmen yapılan çalışmalar aslında elastisite modülünün deformasyon ile değiştiğini ve bu değişim dikkate alındığında çok daha yüksek doğruluklu analiz sonuçları elde edilebileceği gözlemlenmiştir (Kim H. ve ark. 2011). Elastisite modülü malzemenin atomik yapısına, kimyasal bileşimi, hadde yönü ve ısıl işlem gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Değişken elastisite modülünün geri yaylanma davranışının tahmini üzerine etkisi Şekil 2.8 üzerinden görülebilmektedir.



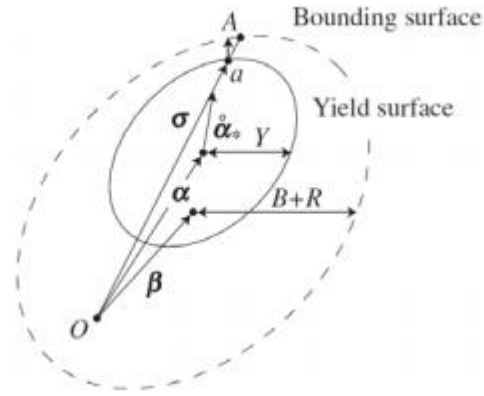
Şekil 2.8. Değişken Elastisite Modülünün Geri Yaylanma Üzerine Etkisi (Kim H. ve ark. 2011).

Genel olarak yapılan çalışmalarda elastisite modülünün yüksek olmasının geri yaylanma miktarını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

2.2.11. Yoshida-Uemori Modeli

Sonlu elemanlar analizlerinin daha iyi sonuçlar verebilmesi için malzeme ve pekleşme modellerinin geliştirilmesi çalışmaları günümüzde halen devam etmektedir. Bu bağlamda malzemenin sadece plastik yada elastik davranışını temsil eden modeller yerine deformasyon sırasında malzemedeki meydana gelen farklı mekanizmaları da göz önüne alan karma modeller tercih edilmektedir. Geri yaylanma konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde alüminyum saclar konusunda en iyi sonuç veren modellerden birinin Yoshida-Uemori (Y-U) olduğu gözlemlenmiştir.

Yoshida-Uemori modelinde Şekil 2.9 'da görüleceği gibi birleştirilmiş izotropik ve kinematik pekleşme kabulü ile iki akma yüzeyi tanımlanmıştır.



Şekil 2.9. Yoshida-Uemori Modelinde Akma Yüzeyi Kabulü

Pekleşme durağanlığı, bauschinger etkisi ve kalıcı yumuşama gibi deformasyon etkilerini göz önüne aldığından çevrimli yüklemeli testler ile elde edilmektedir. Y-U model parametrelerini elde etmek için, çevrimsel çekme-basma testi, çevrimsel 3 noktadan aşağı ve yukarı bükme testi, H numunesi ile kayma testi ve ikiz köprü (twin bridge) numunesi ile kayma testi kullanılabilir. Y-U modelinde malzemeyi tanımlamak için yedi farklı parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler Çizelge 2.4'de açıklanmıştır.

Çizelge 2.4. Yoshida Uemori Parametreleri ve Açıklamaları

Y	İlk akma gerilmesi
B	Akma sınırı yüzeyinin büyüklüğü
C	Her yük değişimi başlangıcında oluşan geçiş
m	Pekleşme üsteli
h	Pekleşme durağanlaşması
b	Kinematik pekleşme büyüklüğü
Rsat	İsotropik pekleşmenin doyma değeri

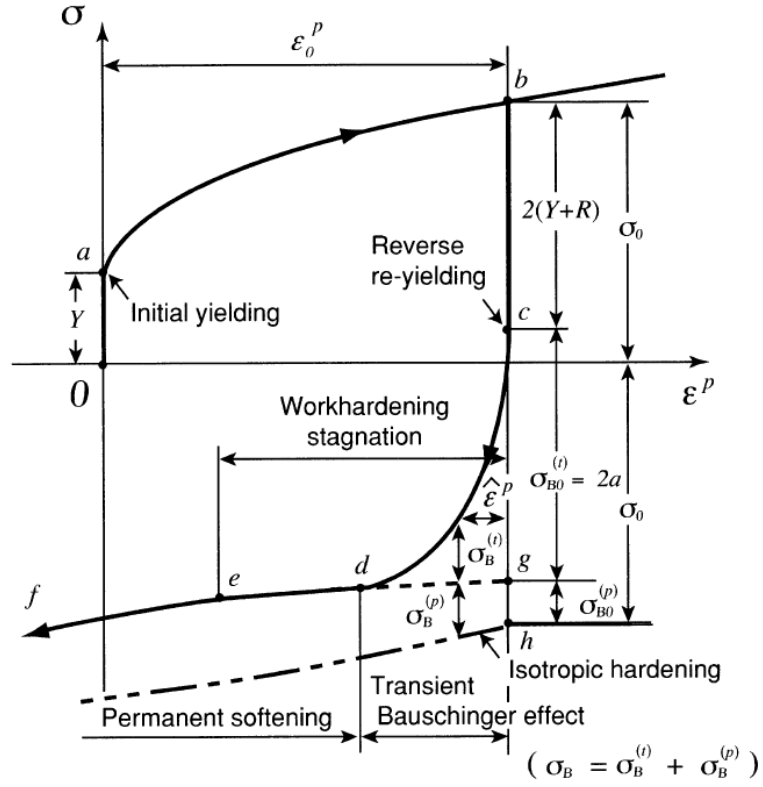
Bu parametrelere bağlı olarak tek eksenli çekme deneyinde akma gerilmesinin yüzey sınırları aşağıdaki denklem ile ifade edilebilmektedir.

$$\sigma_{\text{sınır}} = B + (R_{\text{SAT}} + b)(1 - e^{-m\varepsilon_p})$$

Y-U modelinde daha doğru tahminler yapabilmek için elastisite modülündeki değişimi de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu değişim aşağıdaki denklem ile ifade edilebilmektedir.

$$E = E_0 - (E_0 - E_A)(1 - \exp(-\xi\bar{\varepsilon}))$$

Çevrimli testlerde ileri-geri hareketin meydana getirdiği deformasyon ile malzemenin davranışı Şekil 2.10'da belirtilen eğri ile ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.10. Yoshida-Uemori Modeli ile Tanımlanan Çevrimsel Deformasyon Davranışı (Yoshida ve Uemori 2002)

2.3. Geri Yaylanma

2.3.1. Geri Yaylanmaya Etki Eden Faktörler

Sac malzemelerde şekillendirme operasyonunda meydana gelen geri yaylanma davranışını etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır. Geri yaylanma davranışını doğru tahmin etmek için bu parametreleri doğru belirlemek büyük önem taşımaktadır. Geri yaylanma davranışını tahmin etmek için gerekli parametreler malzemenin fiziksel özelliklerine ve sayısal analiz parametrelerine bağlı olmak üzere iki başlıkta sınıflandırılabilir.

Malzemenin fiziksel özellikleriyle ilgili parametreler malzemenin mekanik özellikleri, temas yüzeyi sürtünme katsayısı, uygulanan baskı miktarı, sac şekillendirme operasyonu için proses (metod) parametreleri, sac geometrisi ve değişen elastisite modülü olarak tanımlanabilir.

Geri yaylanma tahmini için kullanılan sonlu elemanlar analizi parametreleri ise element türü, akma fonksiyonu, pekleşme modeli, çözümlene metodları, temas tanımlama ve analize özel girdilerden oluşmaktadır.

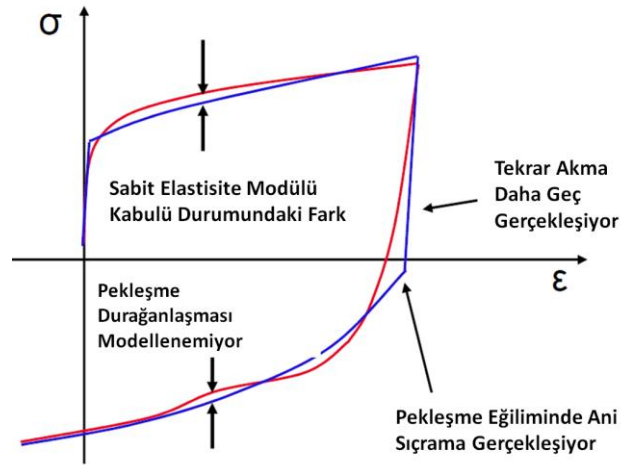
Yukarıdaki parametrelere göre kurulan simülasyon sonuçlarının deneysel geri yaylanma değerlerine yakın sonuçlar verebilmesi için bütün sistem parametrelerinin ve malzeme modellerinin iyi bir şekilde kurulması gerekmektedir.

2.3.2. Geri Yaylanma Analizleri

Sac şekillendirme operasyonlarında istenen parça toleranslarında üretim yapabilmek için malzemenin geri yaylanma davranışının göz önünde bulundurulması ve buna bağlı olarak telafi metoduyla form değişikliği uygulanması gerekmektedir. Kalıp yüzeyleri üretilecek parçanın cad modeline göre değil, geri yaylanma davranışını telafi edecek şekilde bir form değişikliği yapılarak üretilmektedir. Kalıp üretimi genellikle çok büyük kütlelerde yapıldığı için hatalı bir telafi yüzeyinin yeniden işlenmesi hem zaman hem de maliyet açısından büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle simülasyon ve deneysel verilerin birbirine yakın olması önem taşımaktadır.

Geri yaylanma analizlerinde basit bükme çalışmaları için matematiksel formüller ile sonuç elde edilebilmektedir. Fakat sac şekillendirme işleminde malzeme aynı zamanda çok eksenli çeki yönünde deformasyona uğrayarak gerinimi arttığı için daha kompleks modeller kullanılmaktadır. Bunlar için Autoform, Pamstamp ve Dynaform gibi sonlu elemanlar yazılımlarından faydalanılmaktadır. Bu programlar geri yaylanma Armstrong-Frederick Chaboche ve Yoshida Uemori gibi çeşitli plastisite modelleri kullanmaktadır.

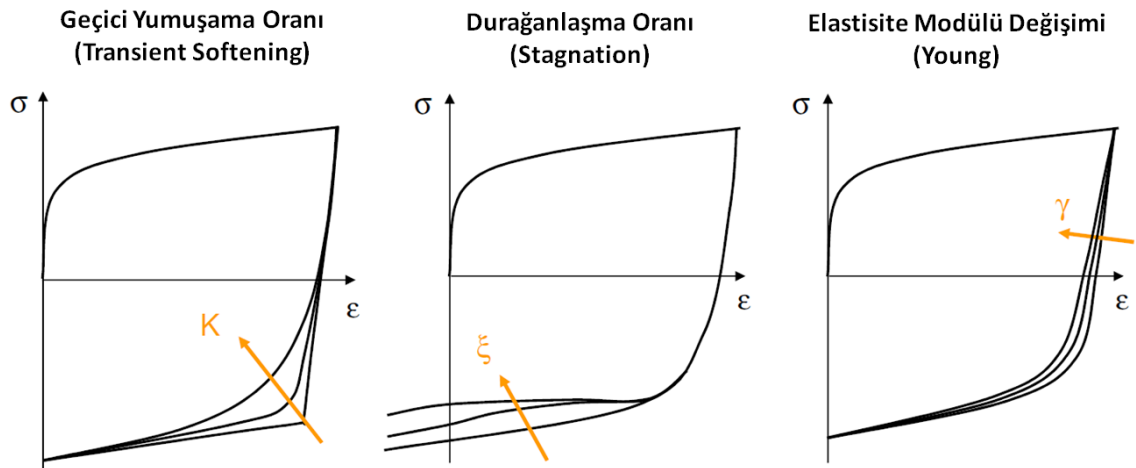
Analizlerde kullanılan plastisite modellerinin, parametrelerin etkisi aşağıdaki grafik ile açıklanabilir.



Şekil 2.11. Şekillendirme Analizlerine Malzeme Model Parametrelerinin Etkisi (Anonim 2008)

Şekil 2.11’de görülen mavi renkli eğri, pekleşme modeli olmadan gerçekleşen durumu kırmızı renkli eğri ise pekleşme modeli kullanıldığında elde edilen eğriyi temsil etmektedir. Elastisite modülün sabit olarak alınması, geçiş bölgesinin temsil edilememesi, pekleşme durağanlaşmasının belirgin olmaması simülasyon doğruluğunu azaltmaktadır.

Simülasyonda hangi parametrelerin eğri üzerine ne gibi etki ettikleri Şekil 2.12’de yer alan grafik ile açıklanabilmektedir.



Şekil 2.12. Çevrimsel Eğrilere Parametrelerin Etkisi (Anonim 2008)

3.MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Çalışmada kullanılan alüminyum malzemeler Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

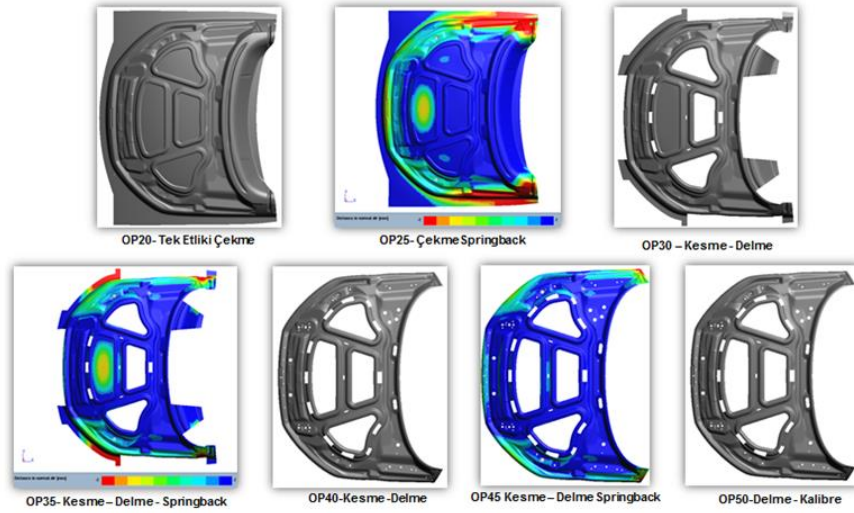
Çizelge 3.2. Çalışmada Kullanılan Malzeme Türleri

Malzeme Cinsi	Kalınlık
AA 5182 H0	1mm
AA 5754 H111	1mm
AA 6016 T4	0,9mm

3.2. Proses Ve Kalıp Tasarımı

3.2.1. Sac Şekillendirme Simülasyonları

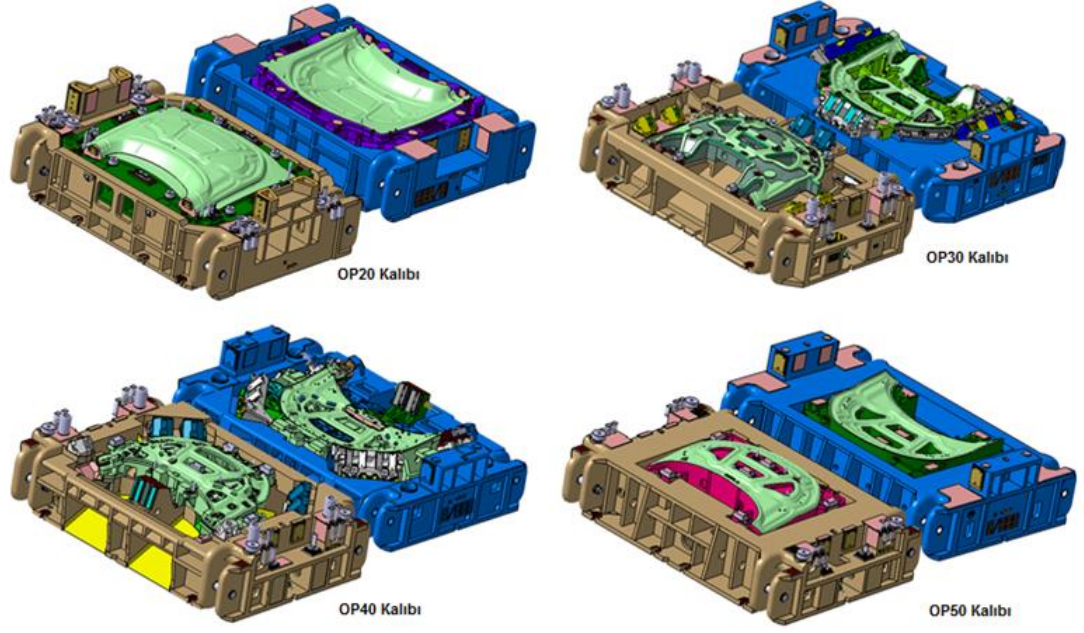
Otomotiv sektöründe bir otomobilin üretilmesi için öncelikle prototip kalıplardan faydalanılmaktadır. Bu kalıplar düşük maliyetli ve deneme amaçlı çok az sayıda parça üretebilen kalıplardır. Otomobil tasarımı tamamlandıktan sonra yani nihai tasarım datası dondurulmasıyla birlikte parçaları seri olarak üretebilecek kalıpların üretimine başlanmaktadır. Parçaların ortalama üretim adetleri 250.000-500.000 adet seviyelerinde olduğu ön görülürse bu kapasitede üretimi gerçekleştirmek için kalıplar ve presler vazgeçilmez bir seçenek olmaktadır. Bir otomotiv parçası olarak örneğin ön kaput iç sacını ele alırsak bu parçanın üretilmesi için toplamda 4 adet kalıp seti gerekli olmaktadır. Her kalıp seti ayrı bir operasyon olarak tanımlanmaktadır. Bu operasyonlar proses adı verilen parça fizibilite ve metod çalışmalarında belirlenmektedir. Şekil 3.1’de bir otomotiv iç kaput sacının proses adımları görülmektedir.



Şekil 3.1. Bir Otomotiv Ön Kaput İç Sac Parçasının Proses Adımları

Proses çalışmaları üretilecek otomotiv parçasının dondurulmasından hemen önce başlanan ve kalıp tasarımına kadar olan süreci oluşturmaktadır. Kaç adet kalıp üretileceği, hangi operasyonlar ile üretileceği, sac kalınlığı, parça geometrisi bu çalışmalardan sonra kesinleşmektedir.

Proses çalışmalarında öncelikle parça datasının geometrik olarak üretime uygunluğu değerlendirilmektedir. Şekil verme analizleri yapılarak parçanın gerinim miktarı, kırılma ve yırtılma bölgeleri adım adım izlenerek, belirlenir ve buna göre değişiklikler gerçekleştirilmektedir. Bu ilk operasyona çekme operasyonu adı verilir. Parça çekme operasyonu ile şekillendirildikten sonra son hale getirmek amacıyla kesme, bükme ve kalibre gibi operasyonlar uygulanmaktadır. Her işlem için ayrı kalıp üretileceği gibi bazı işlemler bir operasyon içinde birleştirilerek de gerçekleştirilebilir. Örneğin aynı kalıp içerisinde hem delme hem kesme hem bükme yapabiliriz. Yukarıda proses adımları belirtilen ön kaput sacı için kalıp tasarımları Şekil 3.2’de belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Bir Otomotiv Ön Kaput İç Sac Parçasının Kalıpları

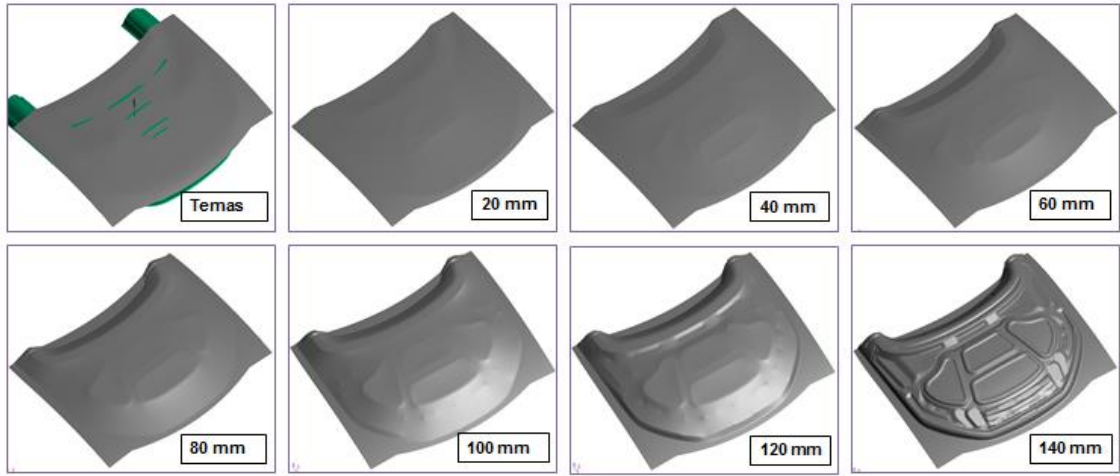
3.2.2. Sac Şekillendirme Kalıpları ve Operasyonlar

Çekme operasyonu sac levhanın kalıp üzerine bırakılarak önce pot çemberi adı verilen kalıp elemanının sacı çevresinden yada belirli bölgelerinden tutarak, alt ve üst kalıp elemanlarının sac levhaya baskı uygulayarak hem uzatması hem de şekillendirilmesi işlemidir. Pot üzerinde sacı tutmak için süzdürme çubuğu adı verilen formlar bulunmaktadır.

Çekme operasyonunda parçanın üretilebilirliği incelenerek şekillendirilebilirlik, kırışıklık ve inceleme gibi çıktılar izlenmektedir. Çekme operasyonunda şekillendirilecek sacın girdisini oluşturacak düz levha sacın şekli ve boyutu da bu operasyon ile belirlenir. Belirlenen sac açınım sacı olarak adlandırılır ve uygun ölçülerde daha önce kesilerek çekme operasyonuna girmektedir. Açınım sacı rulo sac üzerinden ayrı bir kalıpla üretilebileceği gibi düşük adetli üretim için lazer ile de kesilebilmektedir.

Şekillendirme simülasyonlarında parçanın üretilebilirlik açısından en uygun şartlara ulaşması için sonuçlar eş zamanlı değerlendirilerek proses parametreleri ve proses geometrisi değişiklikleriyle farklı simülasyonlar çalışılmaktadır.

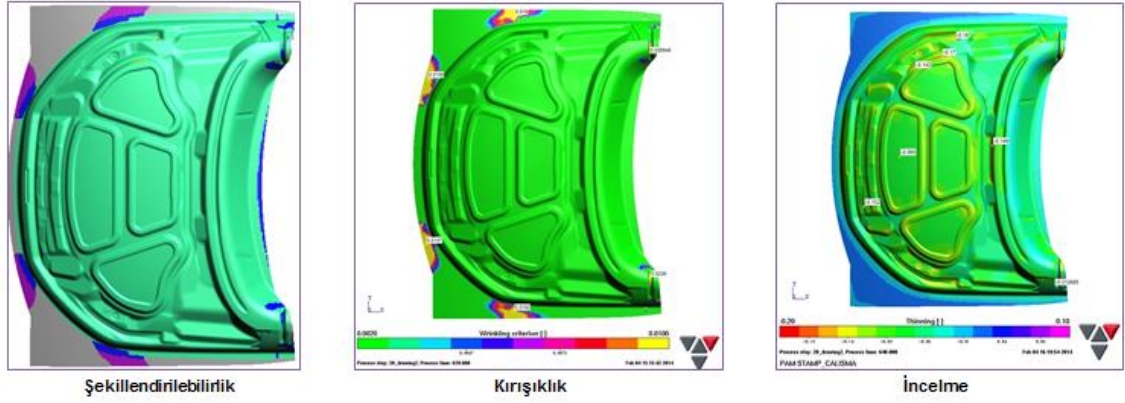
Şekil 3.3'de parçanın 0-140mm pres stroku arasında şekillendirilme adımlar görülmektedir.



Şekil 3.3. Bir Sac Parçanın Şekillendirme Simülasyonu

Şekillendirme simülasyonlarında parçada meydana gelen kırışıklık, incelme, gerinim ve deformasyon gibi çıktılar takip edilmektedir (Şekil 3.4).

Uygun olmayan durumlar meydana geldiğinde form değişikliği, pot tonajı yada süzdürme çubuğunun kuvveti ve şeklinin değiştirilmesi gibi çözümler uygulanabilmektedir.



Şekil 3.4 Fizibilite Değerlendirmesinde İncelenen Simülasyon Çıktıları

Kalıplarda kesme operasyonu şekillendirilen sacın fazlalık olan bölgelerinin kesilmesi için yapılmaktadır. Bu operasyon diğer operasyonlar ile içiçe yada ayrı olarak farklı stratejiler ile yapılabilmektedir.

3.2.3. Kalıpta Telafi Uygulamaları

Otomotiv sektöründe şekillendirme sorunlarının giderilmesi için bir çok telafi yöntemi uygulanmaktadır. Telafi yöntemleri kimi zaman benzer parçalardan elde edilen tecrübelerle kimi zaman da analiz ve nümerik hesaplamalar yoluyla yapılmaktadır. Telafi, kalıpta üretilen parçanın istenen tolerans aralığında çıkmasını sağlamak amacıyla geri yaylanmanın yanı sıra pres ve kalıpta meydana gelen esnemelerin etkisini ortadan kaldırmak için uygulanmaktadır.

Üretim öncesi telafi; kalıp üretimine başlanmadan önce kalıp yüzeyinin orjinal parça yüzeyinden farklı bir yüzey ile işlenmesiyle yapılmaktadır. İşleme yüzeyi sac parçanın şekillendirme analizlerinde hesaplanan geri yaylanma değeri kadar değiştirilmesi ve buna pres-kalıp esnemelerinin de dahil edilmesiyle elde edilmektedir.

Üretim sonrası telafi; kalıp üretimine başladıktan sonra ilk parça denemelerinde parçanın istenen doğrulukta üretilmemesi, gerçek durum ve analiz sonuçlarının birbiriyle tutarlı olmadığını göstermektedir. Bu durumda parçada yapılan ölçümler neticesinde kalıp yüzeyinden çoğu zaman elle talaş kaldırma işlemi yapılır. Parça kalitesinde büyük farklar meydana gelmesi durumunda ise talaş kaldırma işlemi önce

tezgahlarda yapılarak belirli bir seviyeden sonra elle devam edilmektedir. Kalıp üretim sürecinde en maliyetli ve en zahmetli telafi işlemi üretime başladıktan sonra yapılan telafidir. Bu nedenle üretim sonrası telafinin minimuma indirilmesi amacıyla simülasyonların doğruluk seviyeleri arttırılmalıdır.

Simülasyonun doğruluğunun arttırılması bir çok etkene bağlı olmasına rağmen, en sık karşılaşılan problemlerden biri malzemenin tam olarak temsil edilememesidir. Bu çalışmada malzeme modelinin geri yaylanma tahmin doğruluğuna etkisini incelenecektir.



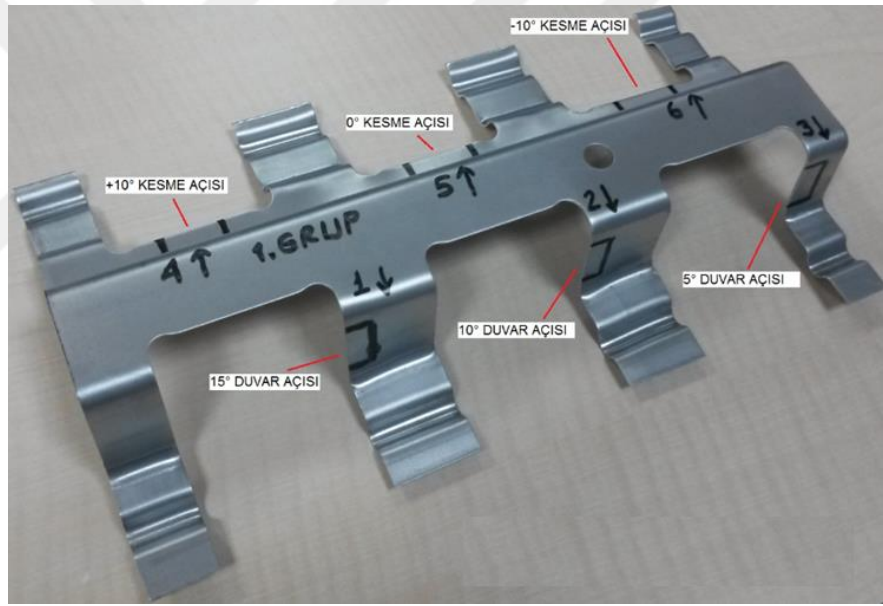
3.3. Test Aparatları

3.3.1. Test Kalıbı

Test kalıbı olarak daha önce 3140653 nolu TEYDEB projemiz kapsamında üretilen ve tezin bağlı olduğu 0953.STZ.2015 kodlu santez projesi kapsamında revize edilen iki operasyonlu kalıp kullanılmıştır.

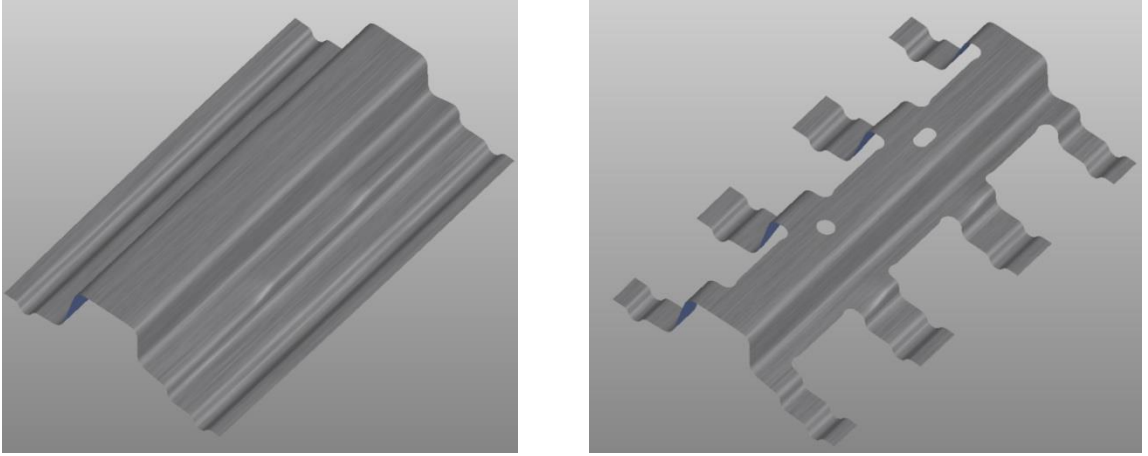
Kalıp tasarımı Catia V5 R19 versiyonunda yapılmıştır. Proses çalışmalarında sac şekillendirme simülasyonları için Autoform R7 kullanılmıştır.

Parça tasarımında farklı kesitler üzerinde çalışabilmek amacıyla 3 farklı açığa sahip formu olan bir çalışma parçası tasarlanmıştır (Şekil 3.5).

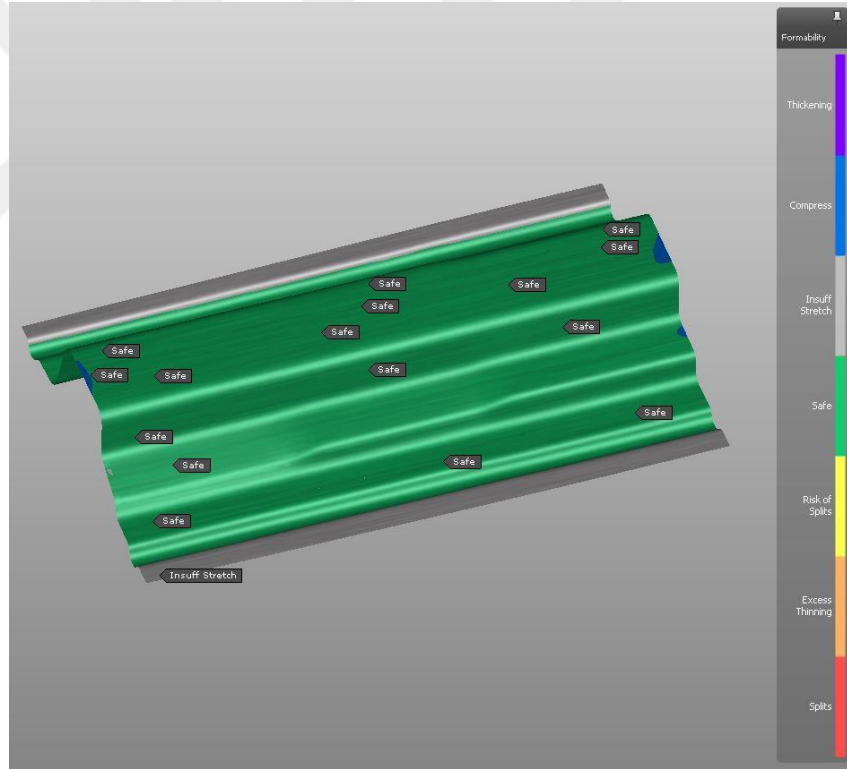


Şekil 3.5. Tasarlanan Parçanın Kanat Açılımları

Tasarlanan parçanın şekillendirme simülasyonları yapılarak üretilebilir bir tasarım ortaya çıkarılmıştır. Aynı kalıp içinde hem çekme operasyonuyla şekillendirme hem de kesme operasyonuyla kesme işlemi yapılmaktadır. Çekme ve Kesme operasyonuyla ilgili simülasyon sonuçları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Çekme operasyonundan çıkan sacın şekillendirilebilirlik, incelme ve plastic strain değerlendirmesi yapılmaktadır.



Şekil 3.6. Çekme Operasyonu ve Kesme Operasyonu Sonrası Sac Parça



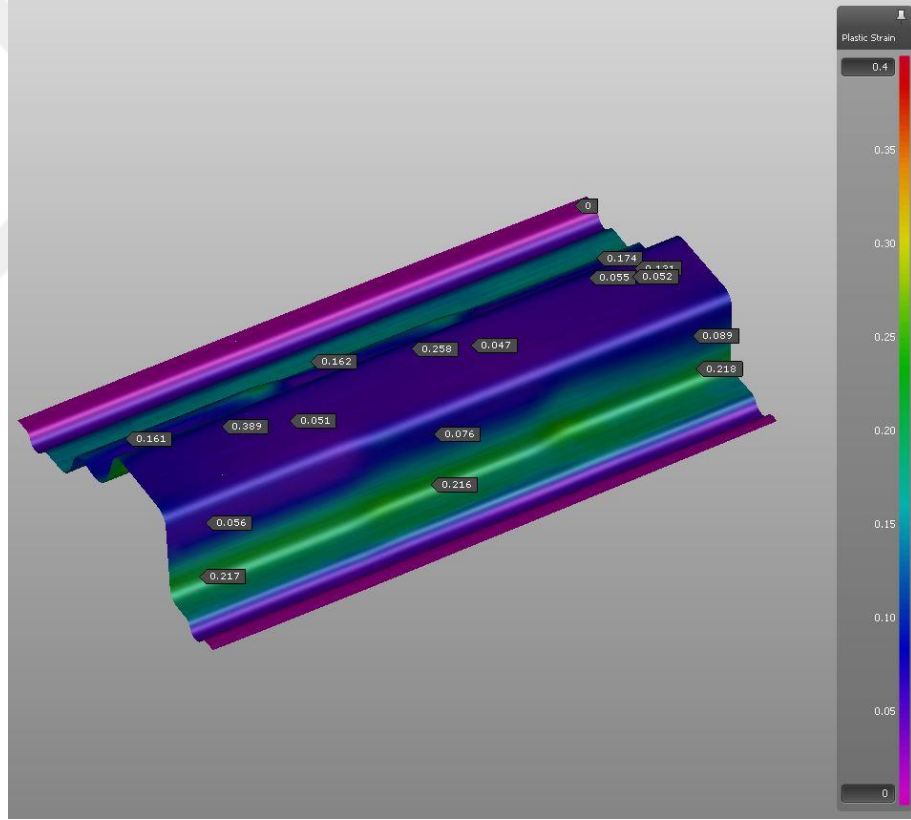
Şekil 3.7. Şekillendirilebilirlik Değerlendirmesi

Şekil 3.7'deki simülasyon sonucunda görüleceği üzere Autoform program FLC grafiğine göre değerlendirme yaparak güvenli ve riskli bölgeleri bize göstermektedir.

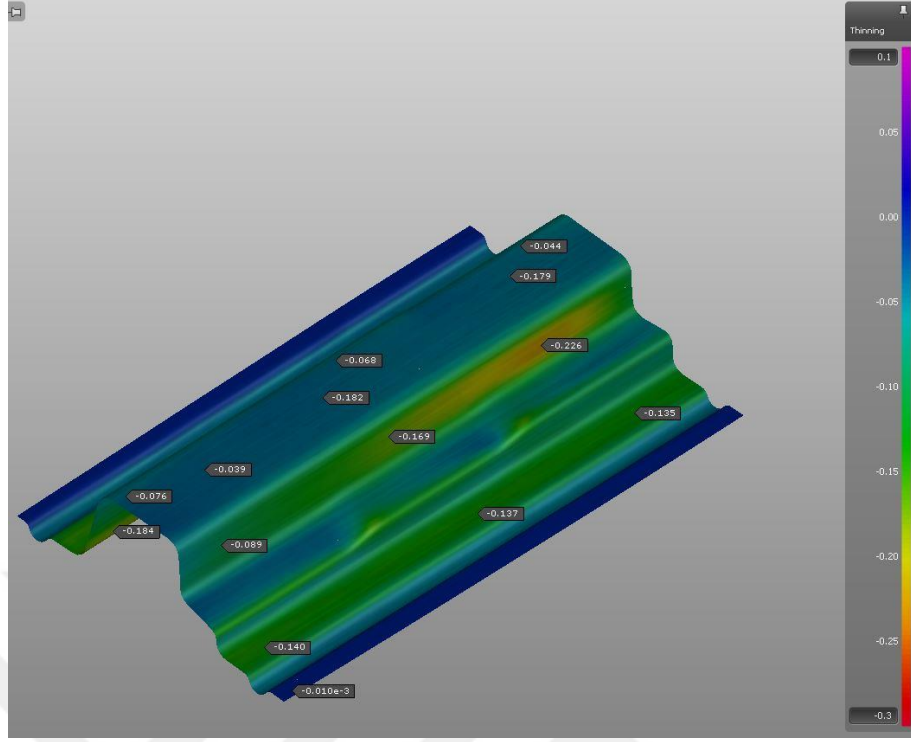
Yeşil renk güvenli bölgeleri, sarı renkli risk oluşturan bölgeleri ve kırmızı renk ise yırtılma öngörülen bölgeleri ifade etmektedir.

Parçada yırtılma olmaması şekillendirilebilirlik için tek başına yeterli kriter değildir. Parça şekil değişimiyle oluşan gerinim değerleri de belirli sınırlar içinde tutulmalıdır. Çok küçük strain değerleri parçada kırılmaya neden olmaktadır. Bu nedenle parçanın istenen gerinim aralığında olup olmadığı Şekil 3.8'de gösterilen plastic strain ile değerlendirilmektedir.

Çok yüksek plastic strain değerlerinde ise parçanın incilmesi dolayısıyla mukavemet kaybı oluşturabilmektedir. Bu nedenle inceme değerlerini parça kalınlığına göre Şekil 3.9'da gösterilen sonuç ile değerlendirebilmektedir.



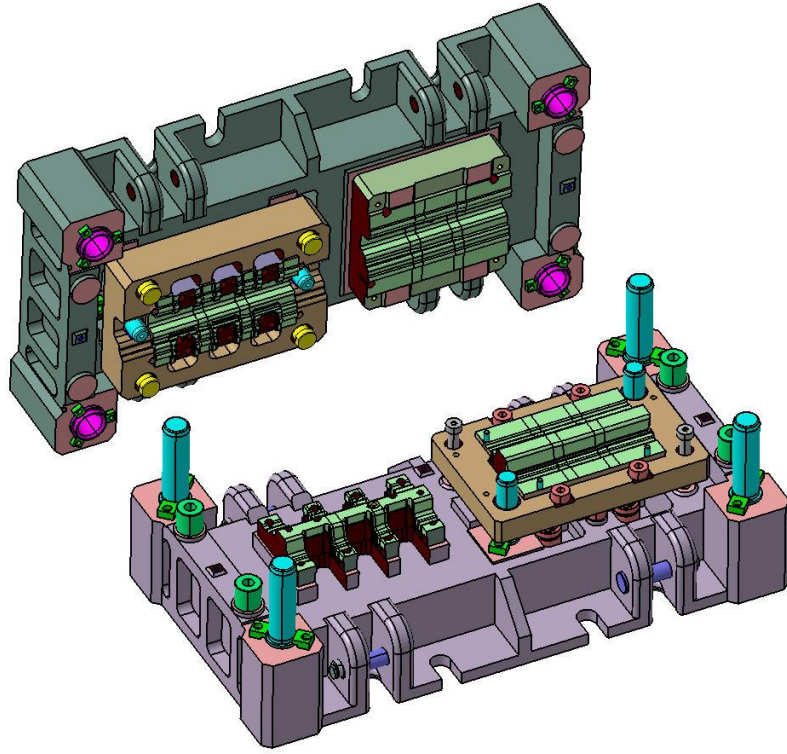
Şekil 3.8. Plastic Strain Değerlendirmesi



Şekil 3.9. İncelme Değerlendirmesi

Proses hazırlıkları tamamlandıktan sonra kalıp tasarım aşamasına geçilmiştir (Şekil 3.10). Kalıp tasarımında ana gövde parçaları olan alt ve üst blok GG25 döküm malzeme ile üretilmiş olup, pot çemberi , dişi blok ve erkek gövde parçalarda GGG70 malzemesi kullanılmıştır. Kesme çeliklerinde ısıl işlem görmüş 1.2379 çelik malzeme üzerine WC/C kaplama yapılmıştır. Diğer kalıp elemanları standart parçalardan seçilmiş olup, stoperlerde ve diğer parçalarda 1040 imalat çeliği kullanılmıştır (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12).

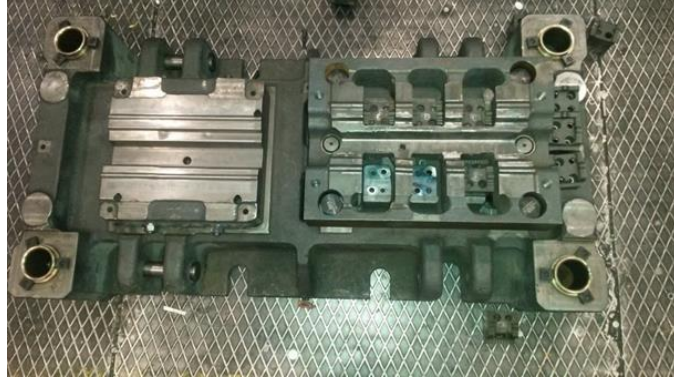
Kalıp üretiminden sonra kalıbın tasarıma göre doğruluğunu değerlendirmek amacıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te raporları görülen geometrik ölçüm yapılmıştır.



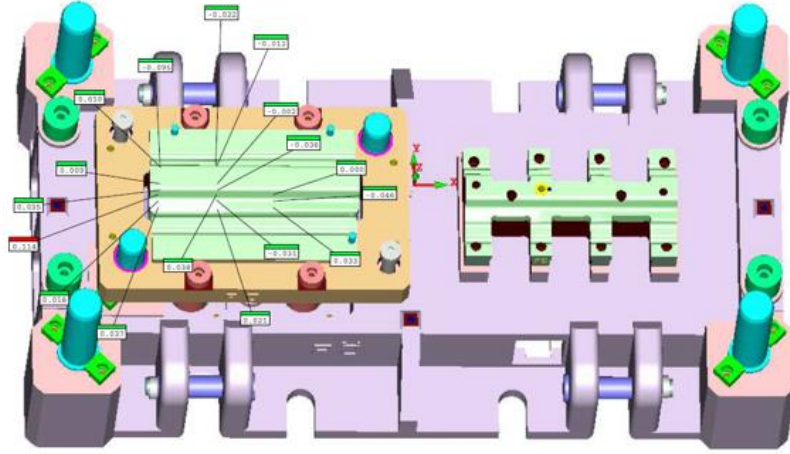
Şekil 3.10. Deney Kalıbının Tasarımı



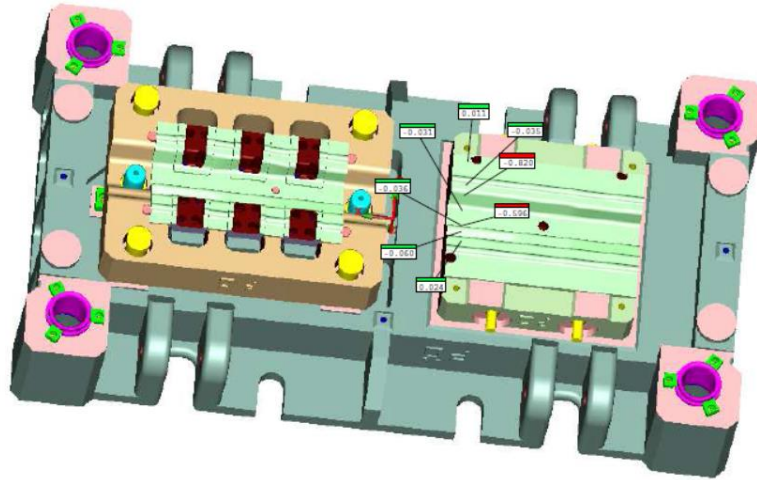
Şekil 3.11. Deney Kalıbın Alt Grup Fotoğrafi



Şekil 3.12. Deney Kalıbın Üst Grup Fotoğrafi

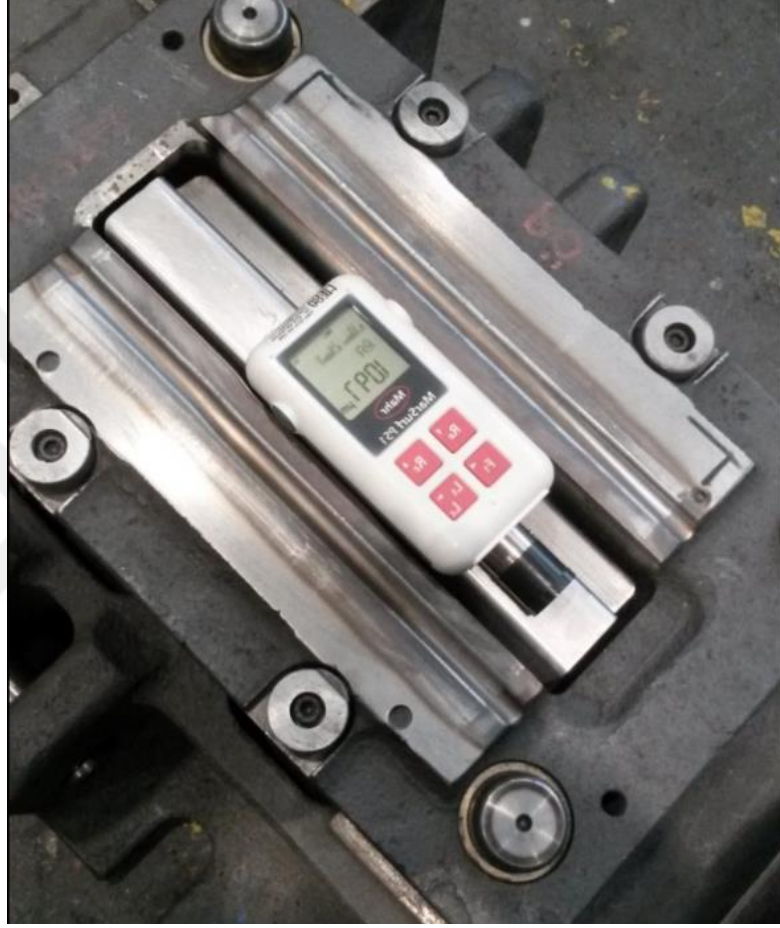


Şekil 3.13. Deney Kalıbı 3 Boyutlu Ölçümü (Alt Grup)

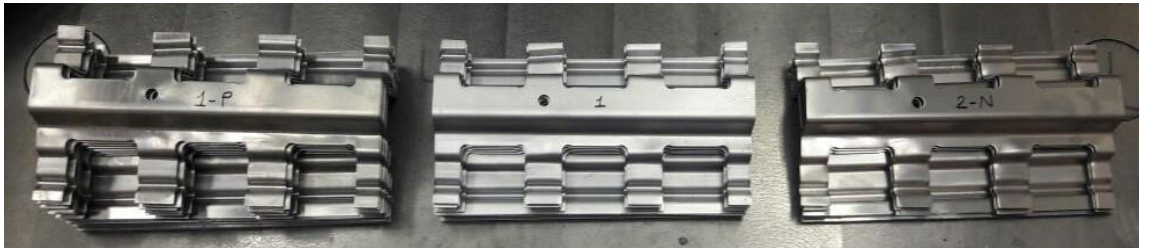


Şekil 3.14. Deney Kalıbı 3 Boyutlu Ölçümü (Üst grup)

Sac şekillendirmede kalıp yüzey pürüzlülüğü önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle kalıpta parça üretilmeden önce yüzey pürüzlülüğü Şekil 3.15'te belirtildiği gibi kontrol edilerek istenen değerlere getirilmektedir. Şekil 3.16'da ise kalıpta üretilen sac parçalar gösterilmiştir.



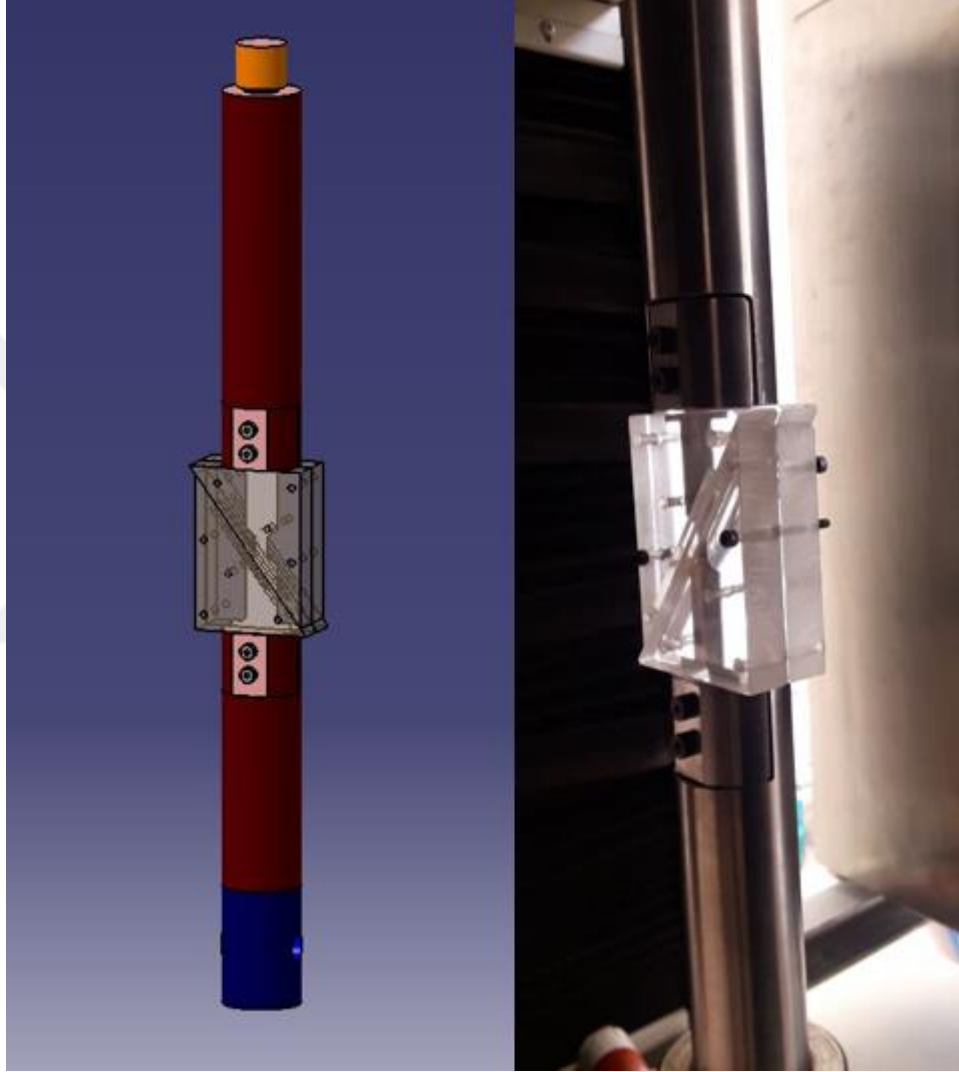
Şekil 3.15. Kalıp Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü



Şekil 3.16. Kalıp ile Üretilen Parçalar

3.3.2. Çevrimli Çekme-Basma Test Aparatı

Çevrimli çekme basma testi için iki farklı aparat kullanılmıştır. Şekil 3.17’de görülen burkulma önleyici aparat lazer ekstansiyometre için özel olarak şeffaf tasarlanmıştır. Tutucu çeneler basma yönünde de verimli çalışabilmesi için sabit olarak üretilmiştir.



Şekil 3.17. Saydam Malzemeden Üretilen Burkulma Önleyici Aparat

Şekil 3.18’de görülen burkulma önleyici aparat çelik malzemeden üretilmiş olup birbirine temas eden yüzeylerde sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcılar kullanılmıştır.

Mekanik ekstansiyometre ile ölçüm yapılabilmesi için özel kanatçıklı numuneler tasarlanmıştır. Deneyin gerçekleştirildiği sistem Şekil 3.19’da belirtilmiştir.



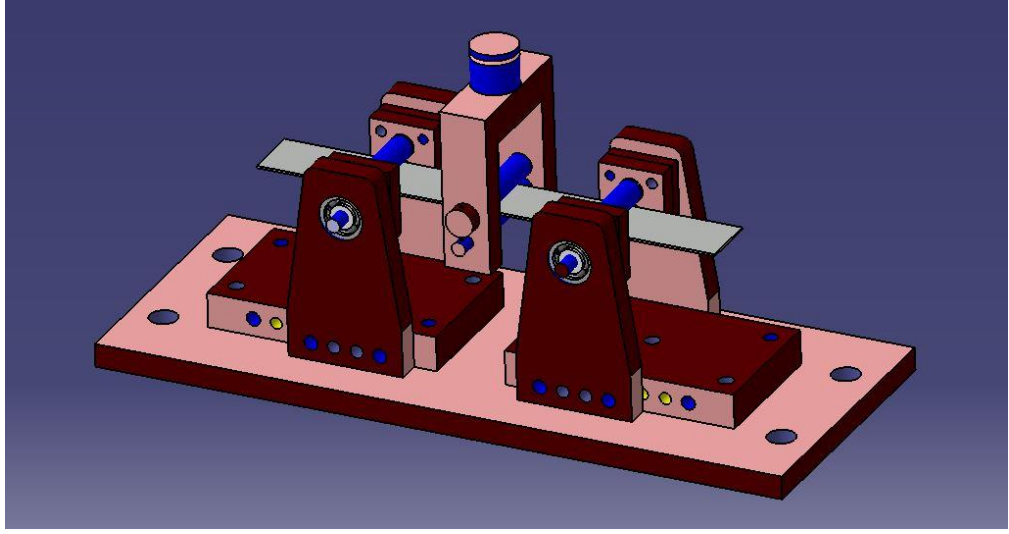
Şekil 3.18. Metal Malzemedan Üretilen Burkulma Önleyici Aparat



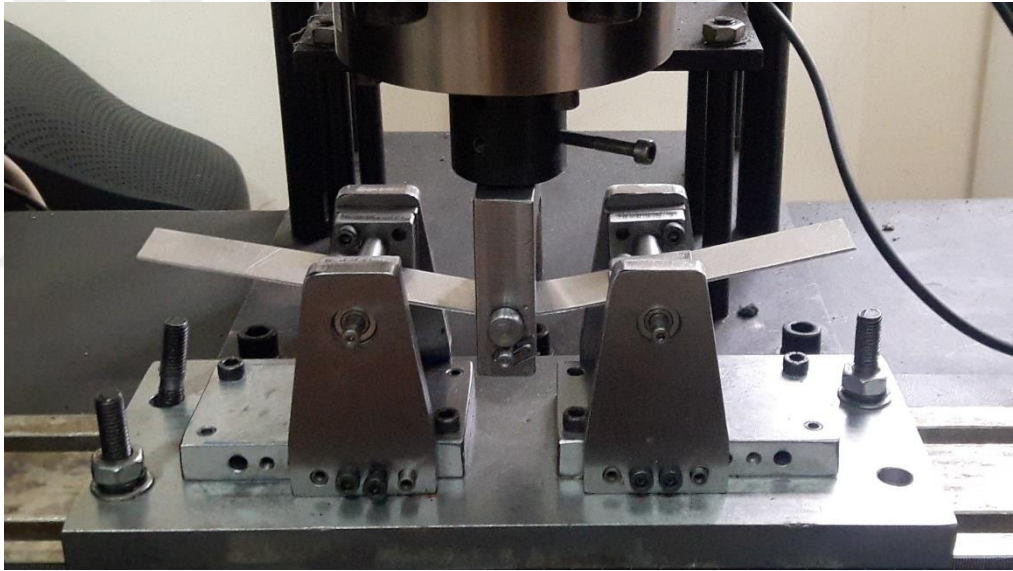
Şekil 3.19. Çevrimli Çekme Basma Test Düzenegi

3.3.3. Çevrimli Üç Nokta Eğme-Bükme Test Aparatı

Çevrimli üç nokta testi için Şekil 3.20’de tasarımı Şekil 3.21’de ise üretilmiş hali görülen bir düzenek tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu aparatın orta kısmındaki bölüm basma cihazına bağlanarak sac numuneyi aşağı ve yukarı yönlü bükmeye zorlamaktadır.



Şekil 3.20. Çevrimli Üç Nokta Eğme-Bükme Test Aparatı Tasarımı



Şekil 3.21. Çevrimli Üç Nokta Eğme-Bükme Test Düzeneği

4. BULGULAR

4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri

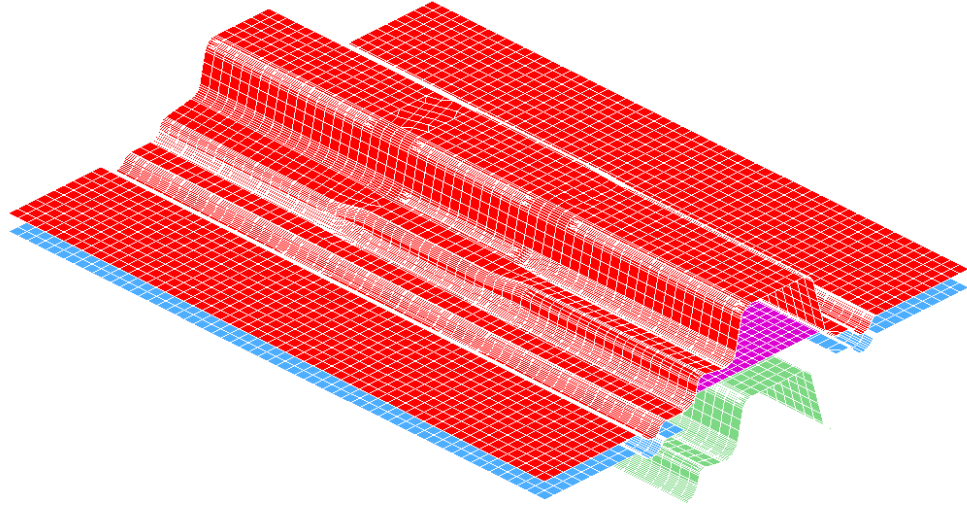
Çalışmada sonlu elemanlar analizleri Autoform ve Ls-Dyna ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel kalıbının üretim aşamasından önce gerçekleştirilen fizibilite ve şekillendirme çalışmalarında Autoform programından yararlanılmıştır. Geri yaylanma analizi çalışmalarında Autoform ve Ls-dyna eş zamanlı olarak kullanılmış olup, ayrıca malzeme model parametrelerinin belirlenmesi aşamasında da LS-Dyna programından yararlanılmıştır.

4.1.1. Autoform Yazılımı

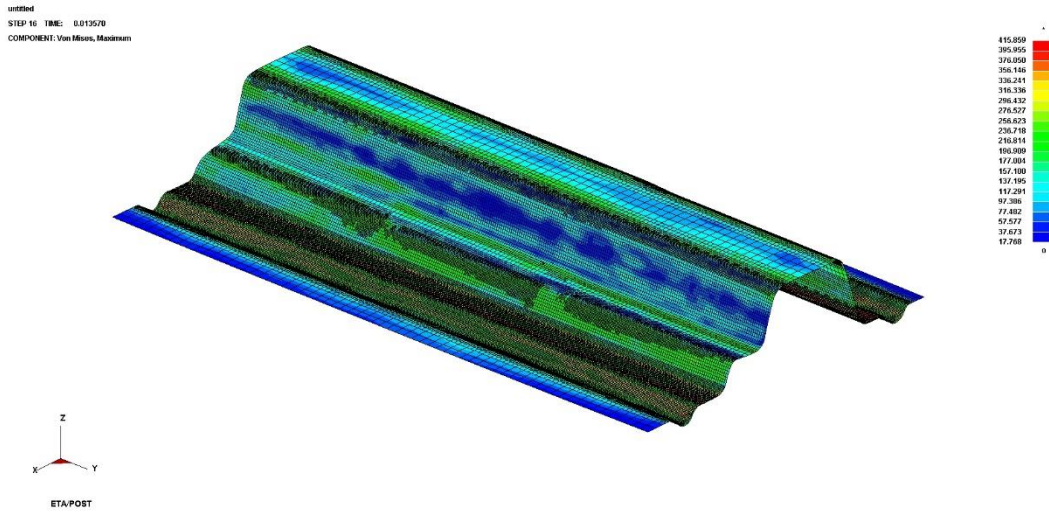
Autoform programı ile gerçekleştirilen geri yaylanma simülasyonları Autoform genel kütüphanesinde bulunan A5182, A5754 ve A6016 malzeme dosyaları ile kurulmuştur. Malzeme parametrelerinde akma yüzeyi Barlat 89 olarak tanımlanmıştır. Pekleşme davranışı için ise Autoform'un özgün kinematik modelinde 5000 ve 6000 serisi alüminyum sacların her biri için önerilen değerler kullanılmıştır. Şekillendirme simülasyonları sırasında parçanın kalınlığının orta yüzeyi referans olarak alınmış olup, geri yaylanma karşılaştırmaları için orta yüzeyin parça kalınlığının yarısı kadar offseti alınarak üst yüzey elde edilmiştir. Deneysel tarama datası ile yapılan kıyaslama değerlendirmelerinde üst yüzey kullanılmıştır.

4.2.2. Ls-Dyna Yazılımı

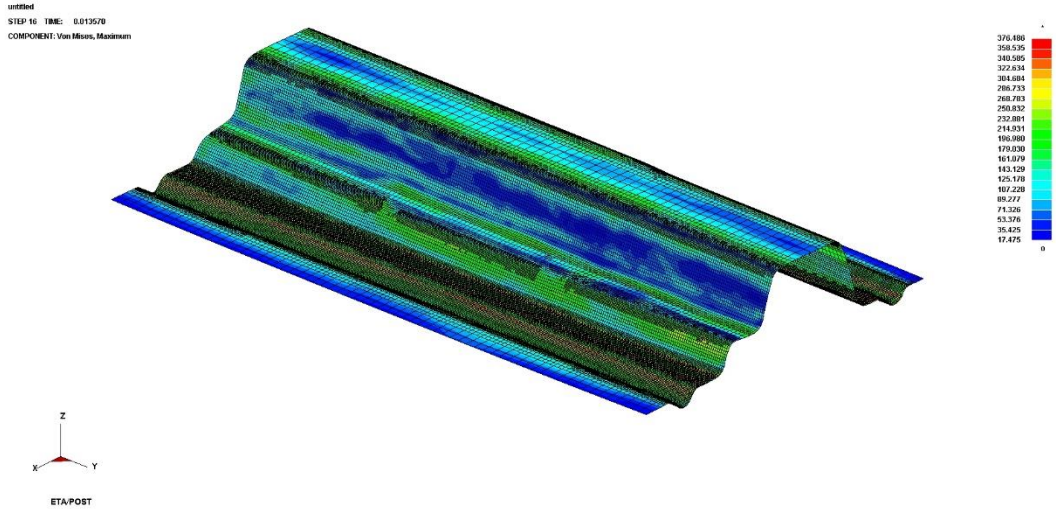
Ls-Dyna programı geri yaylanma analizlerinde kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak deneylerden elde edilen Yoshida-Uemori parametreleri kullanılarak, her üç malzeme için de geri yaylanma analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil4.4). Analizlerde sac şekillendirme proses girdileri Autoform ile aynı şartlarda tanımlanmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar deneysel tarama datası ile kıyaslanmıştır.



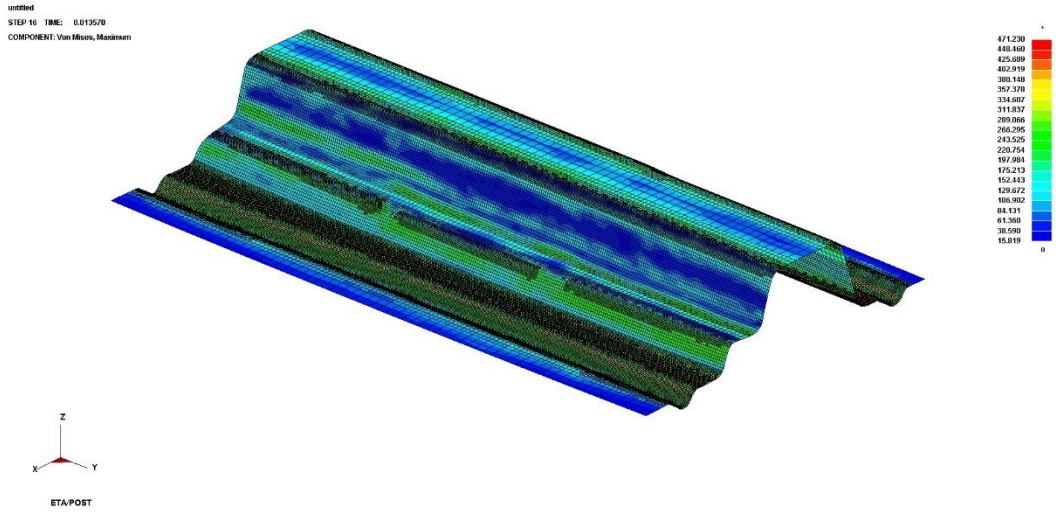
Şekil 4.1. Deney Parçasının Ls-Dyna Mesh Yapısı ve Şekillendirme Araçları



Şekil 4.2. AA5182 Malzemenin Ls-Dyna ile Şekillendirilmesi



Şekil 4.3. AA5754 Malzemenin Ls-Dyna ile Şekillendirilmesi



Şekil 4.4. AA6016 Malzemenin Ls-Dyna ile Şekillendirilmesi

4.2. Testler ve Deneyler

4.2.1. Çekme Testi

Çekme testleri için Uludağ Üniversitesi Makina Mühendisliği laboratuvarındaki Utest marka 10kN yük hücreğine sahip cihaz kullanılmıştır. AA5754, AA5182 ve AA6016

malzemeleri için 0° , 45° , 90° olmak üzere her bir hadde yönünde üçer tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde mekanik ekstansiyometre kullanılmıştır. Test sistemi Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

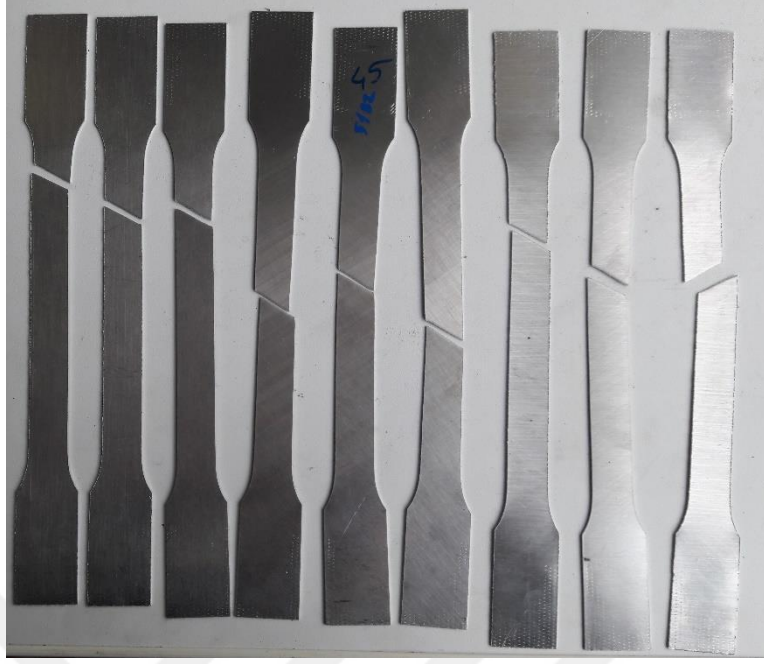


Şekil 4.5. Utest Marka Universal Çekme Testi Cihazı



Şekil 4.6. Çekme Testi Düzeneği

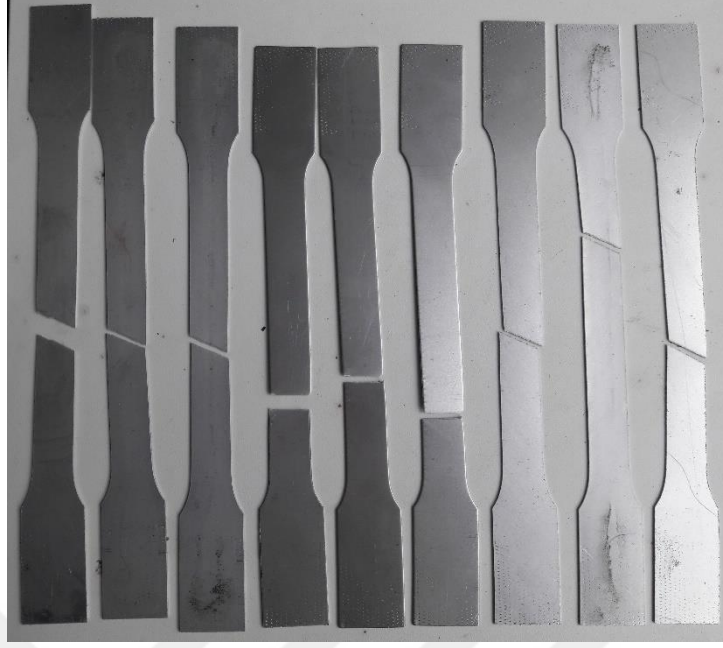
Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da çekme testi gerçekleştirilen numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.7. AA5182 Malzemesine Ait Çekilmiş Test Numuneleri

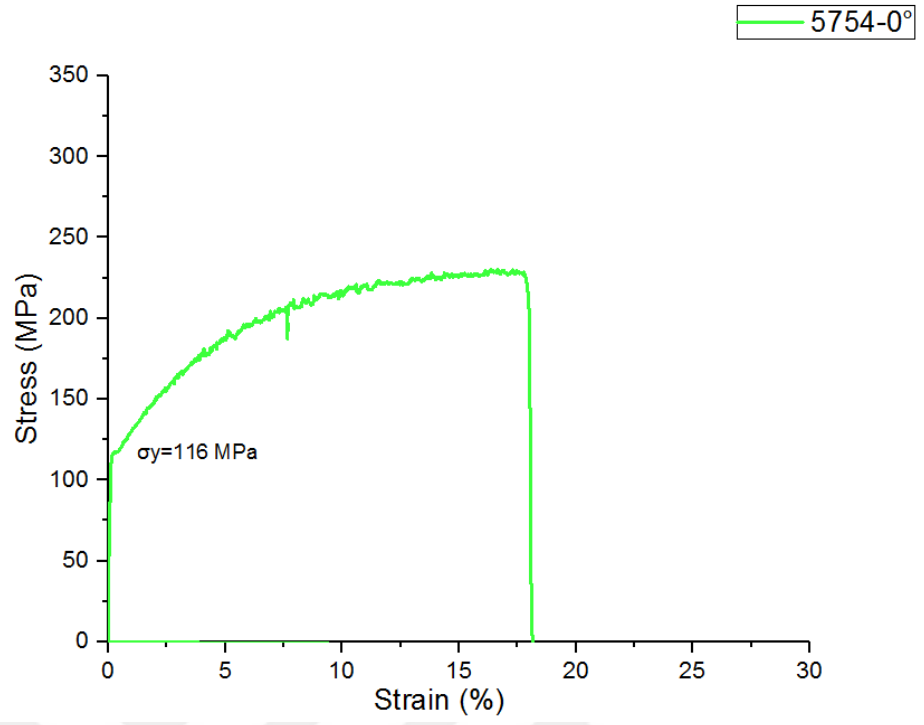


Şekil 4.8. AA5754 Malzemesine Ait Çekilmiş Test Numuneleri

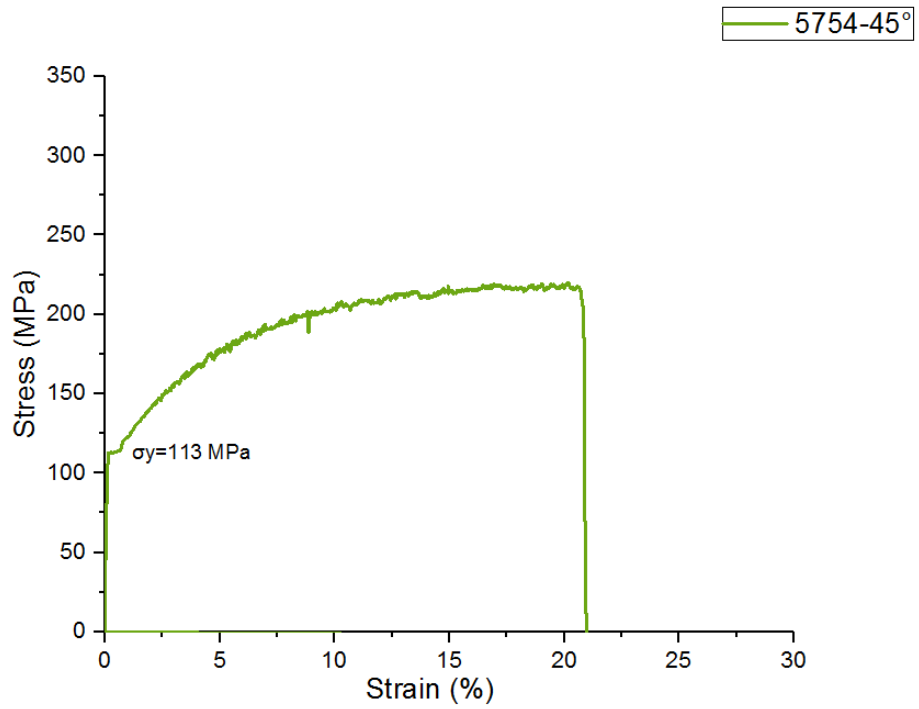


Şekil 4.9. AA6016 Malzemesine Ait Çekilmiş Test Numuneleri

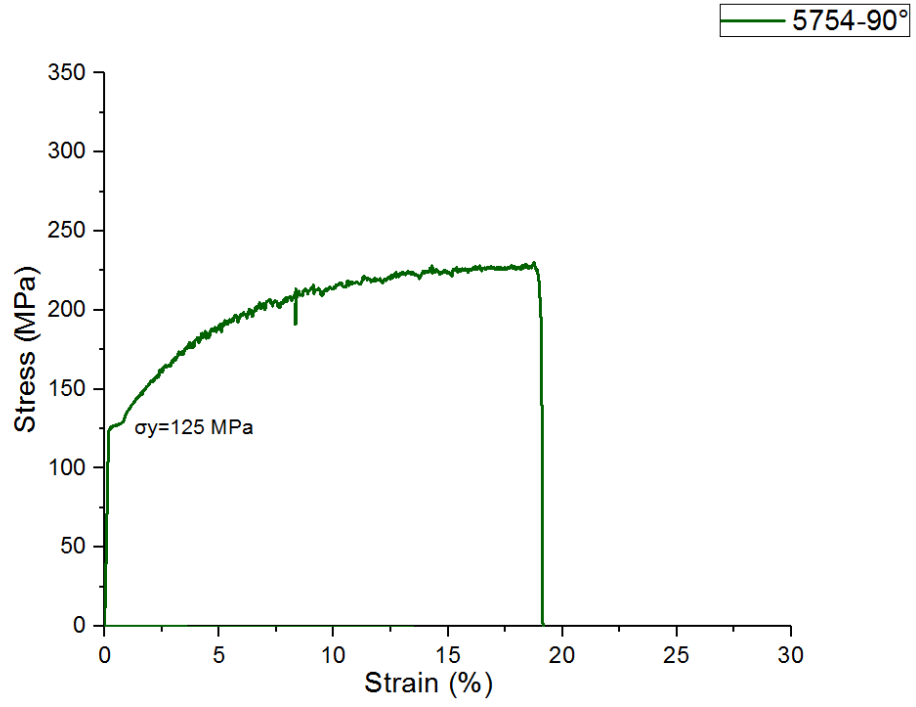
Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen AA5754 malzemenin çekme eğrileri Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



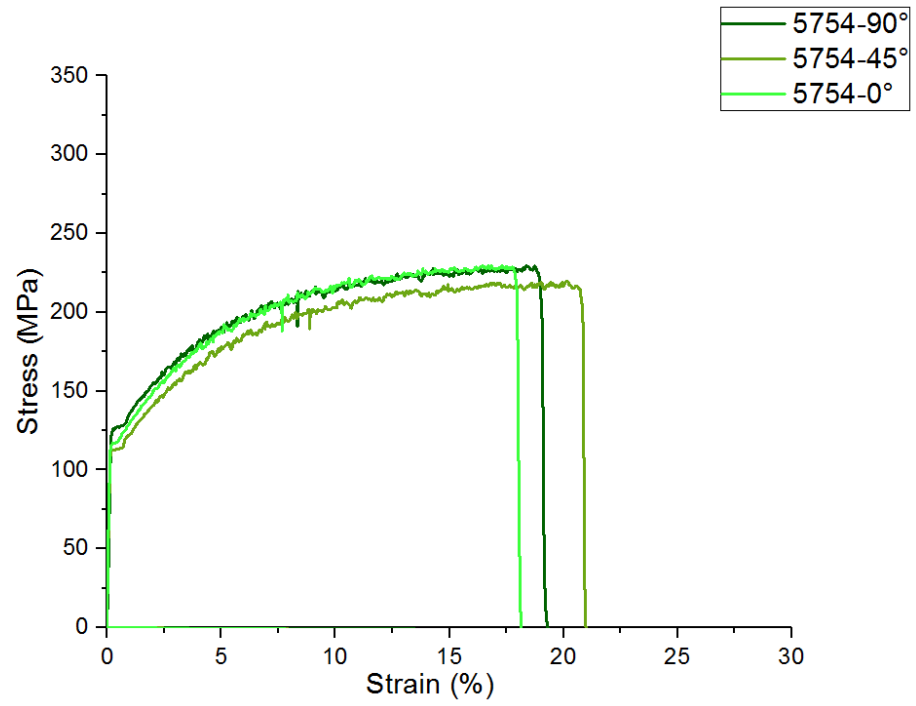
Şekil 4.10. AA5754 Malzemesinin 0° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi



Şekil 4.11. AA5754 Malzemesinin 45° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

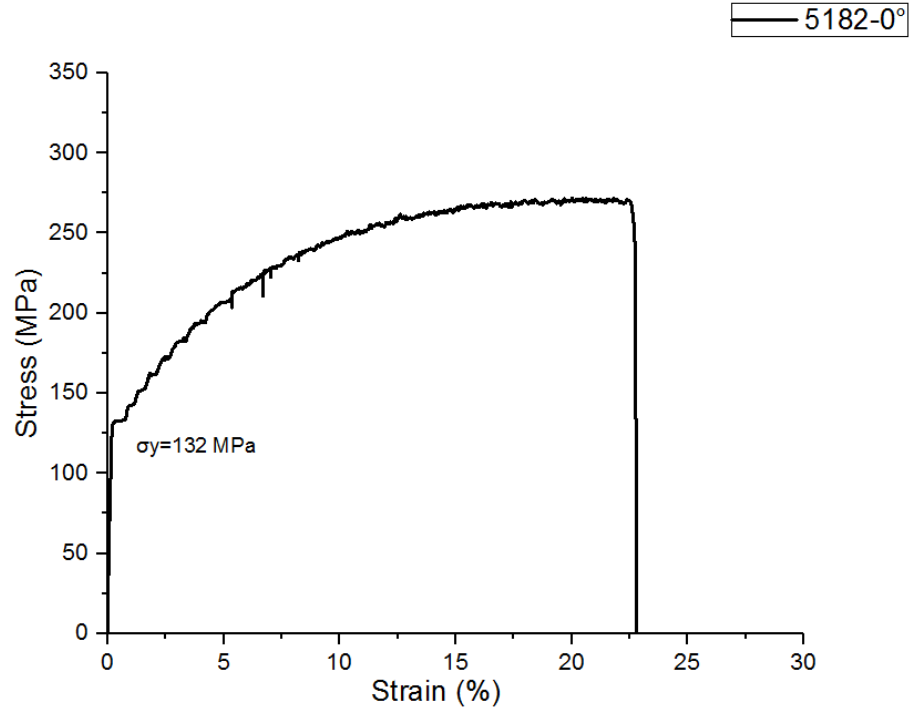


Şekil 4.12. AA5754 Malzemesinin 90° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

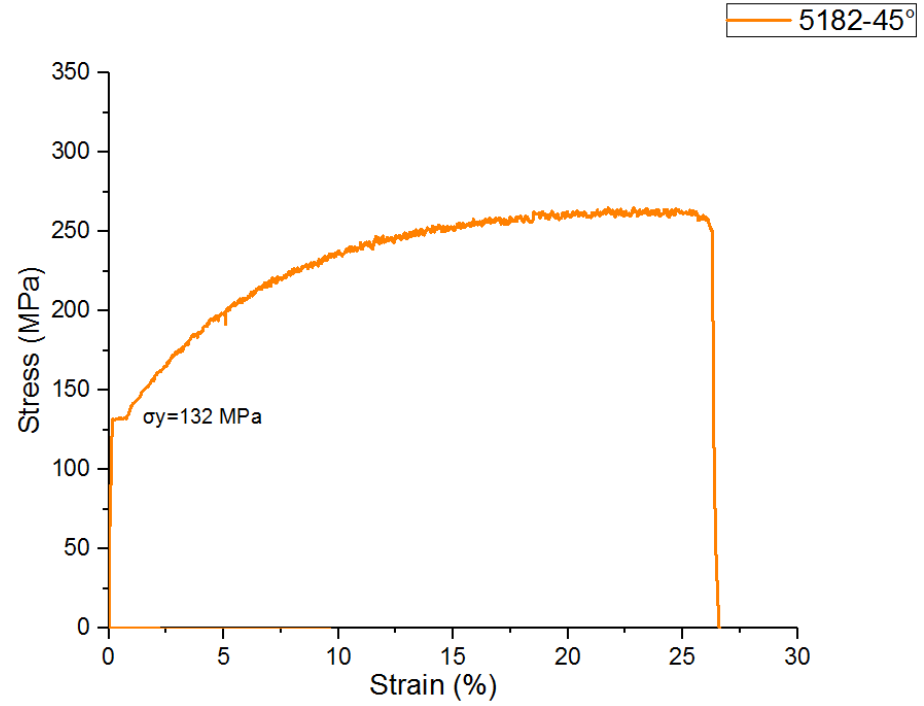


Şekil 4.13. AA5754 Malzemesinin Çekme Eğrileri

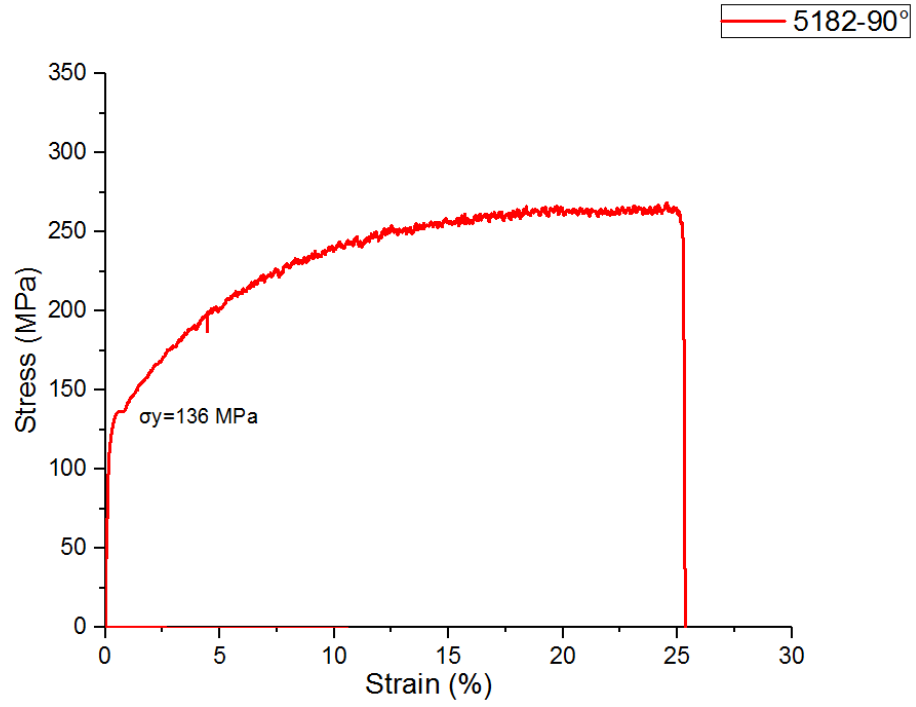
Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen AA5182 malzemenin çekme eğrileri Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



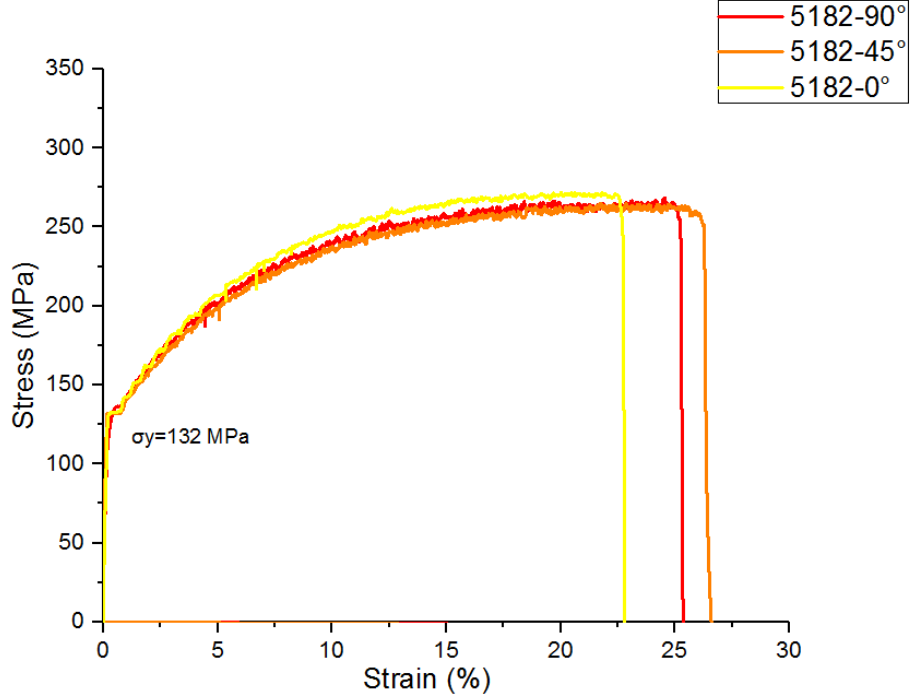
Şekil 4.14. AA5182 Malzemesinin 0° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi



Şekil 4.15. AA5182 Malzemesinin 45° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

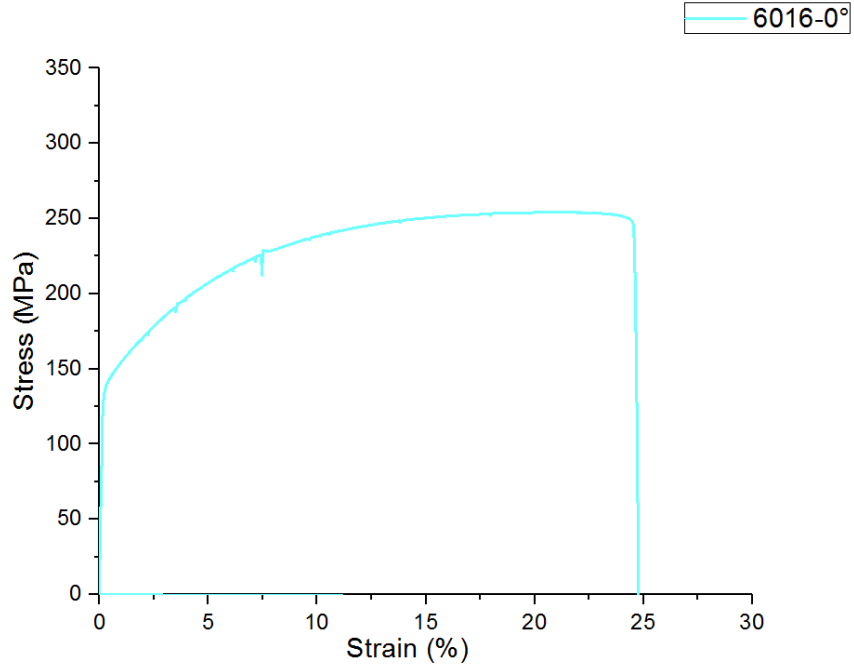


Şekil 4.16. AA5182 Malzemesinin 90° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

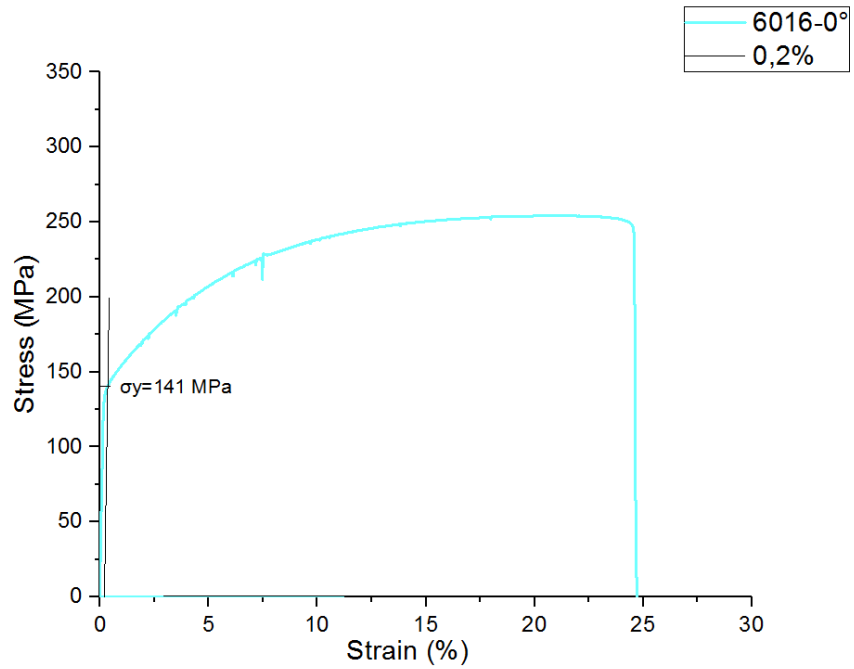


Şekil 4.17. AA5182 Malzemesinin Çekme Eğrileri

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen AA6016 malzemenin 0° yönünde çekme eğrisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Malzemede akma gerilmesinin hesaplanabilmesi için %0,2 offsetli eğim için çizilen grafik Şekil 4.19’da belirtilmiştir.

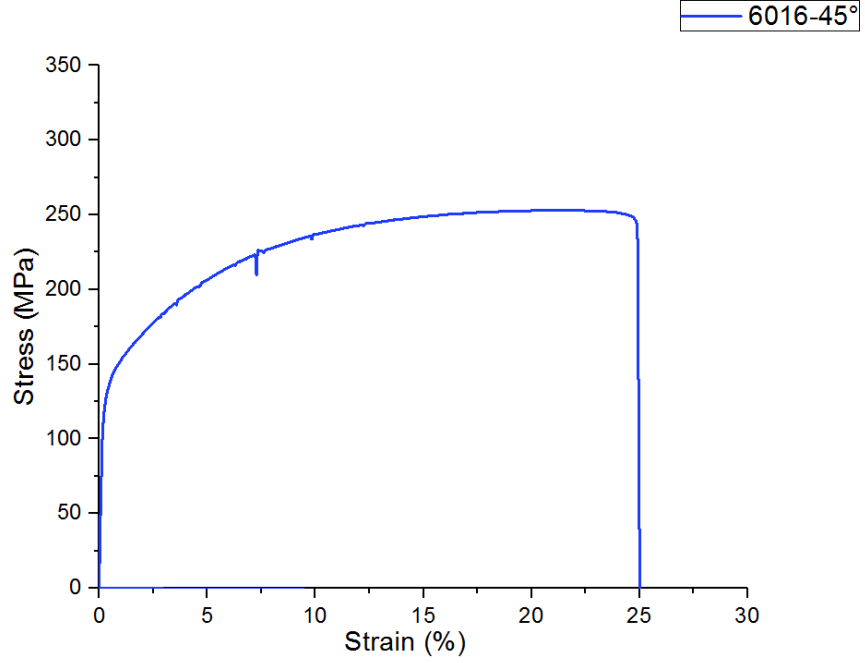


Şekil 4.18. AA6016 Malzemesinin 0° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

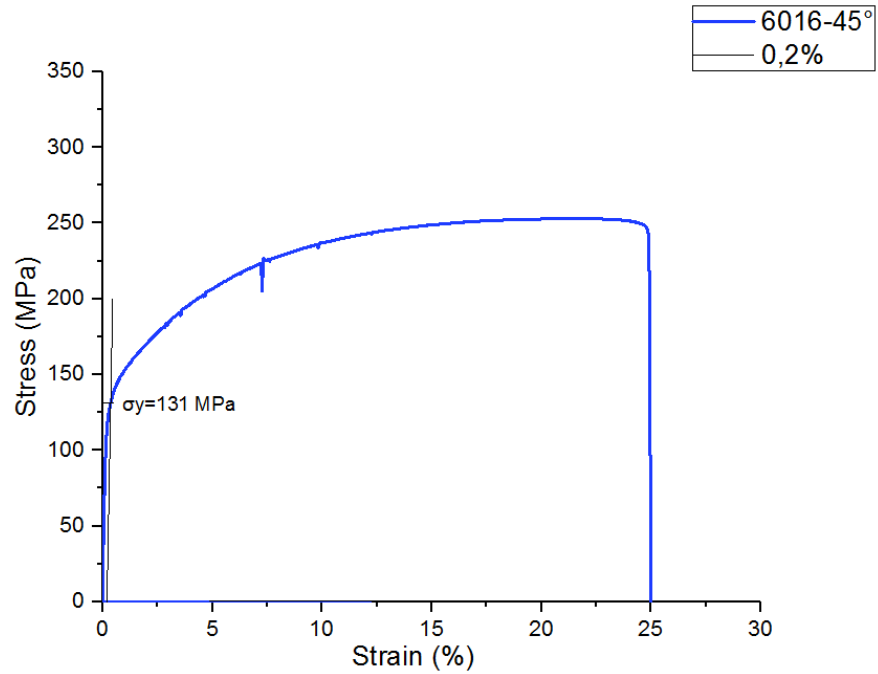


Şekil 4.19. AA6016 Malzemesinin 0° Hadde Yönündeki Akma Mukavemeti

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen AA6016 malzemenin 45° yönünde çekme eğrisi Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Malzemede akma gerilmesinin hesaplanabilmesi için %0,2 offsetli eğim için çizilen grafik Şekil 4.21’de belirtilmiştir.

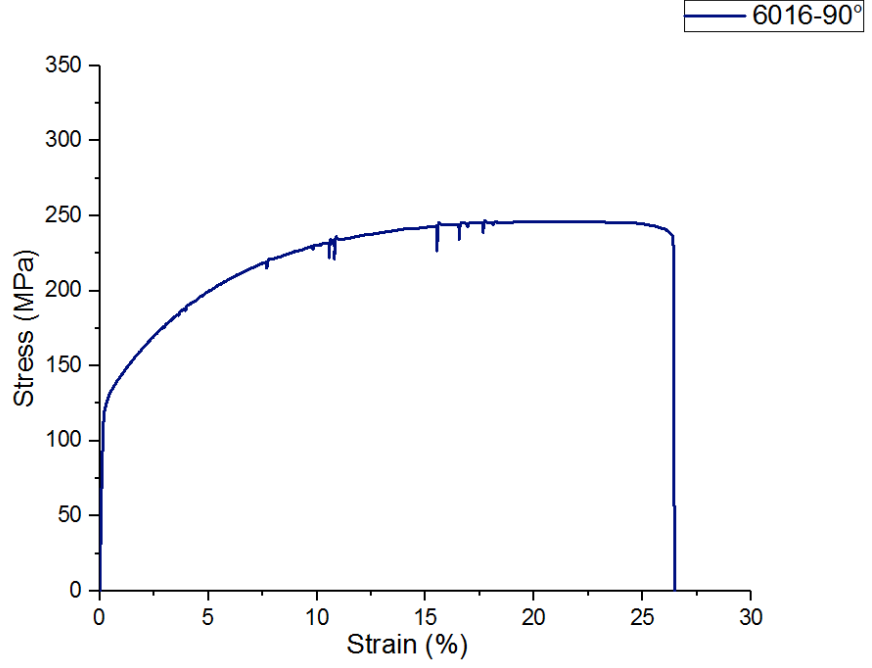


Şekil 4.20. AA6016 Malzemesinin 45° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

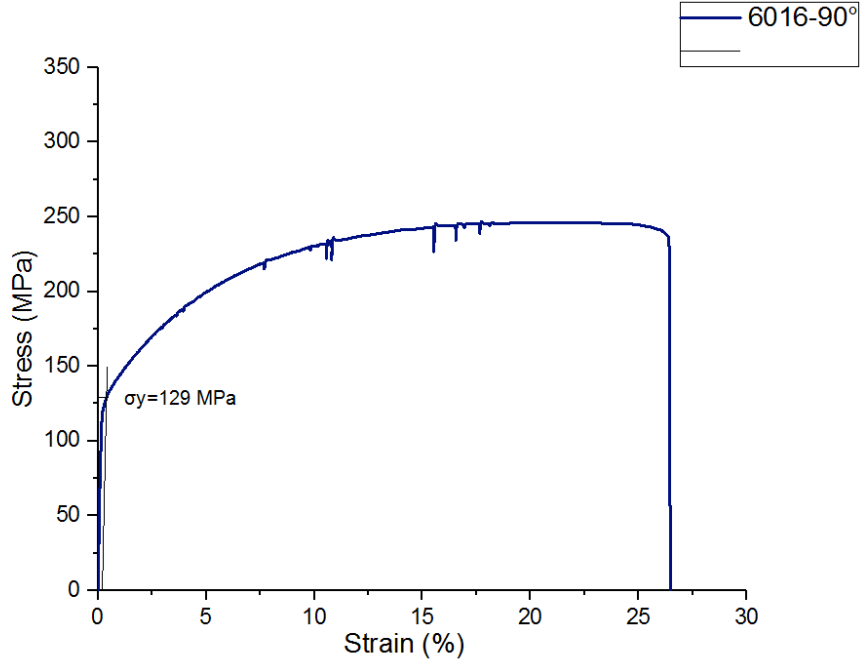


Şekil 4.21. AA6016 Malzemesinin 45° Hadde Yönündeki Akma Mukavemeti

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen AA6016 malzemenin 90° yönünde çekme eğrisi Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Malzemede akma gerilmesinin hesaplanabilmesi için %0,2 offsetli eğim için çizilen grafik Şekil 4.23’de belirtilmiştir.

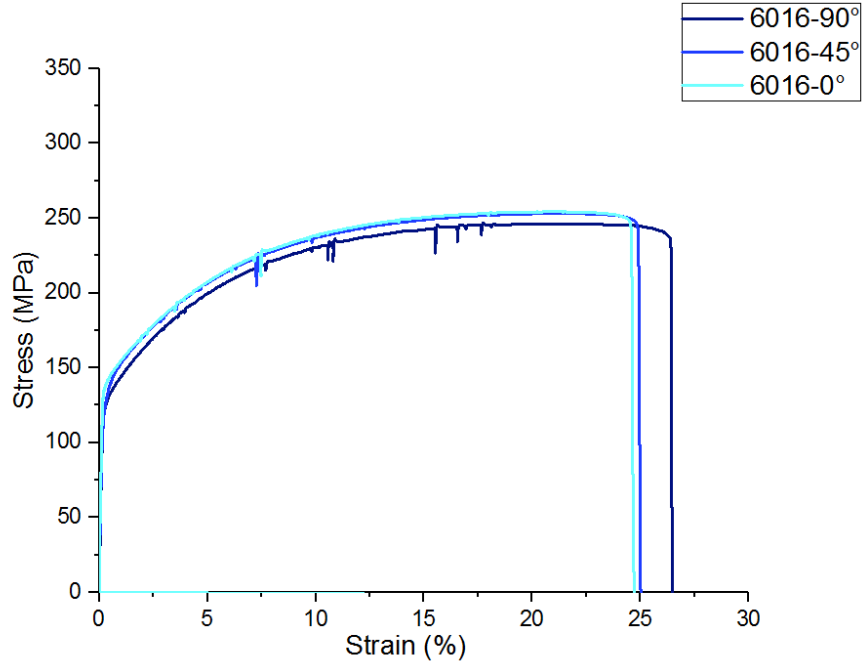


Şekil 4.22. AA6016 Malzemesinin 90° Hadde Yönünde Çekme Eğrisi

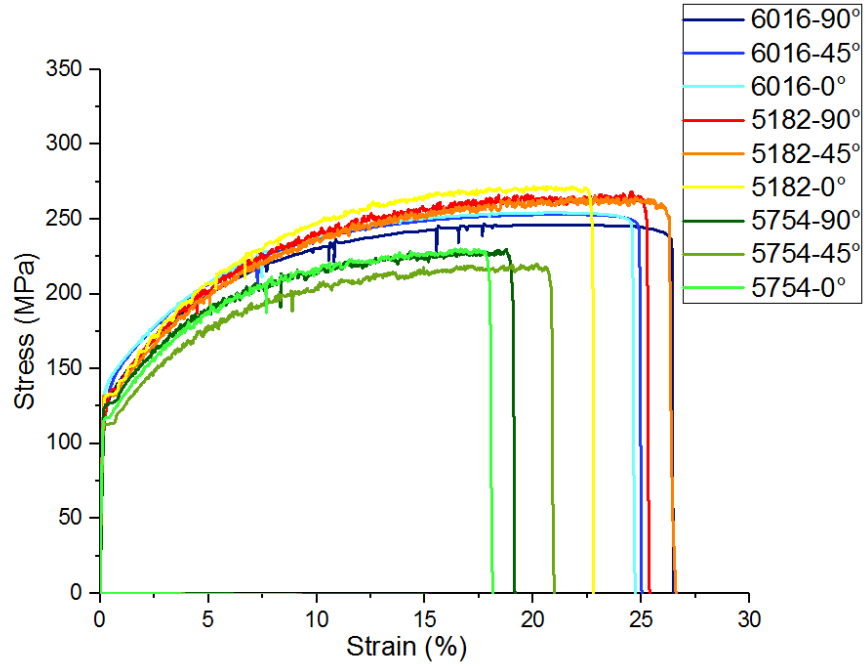


Şekil 4.23. AA6016 Malzemesinin 90° Hadde Yönündeki Akma Mukavemeti

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen AA6016 malzemenin her üç yöndeki çekme eğrileri Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Bütün malzemelerin çekme eğrileri toplu olarak Şekil 4.25’de belirtilmiştir.



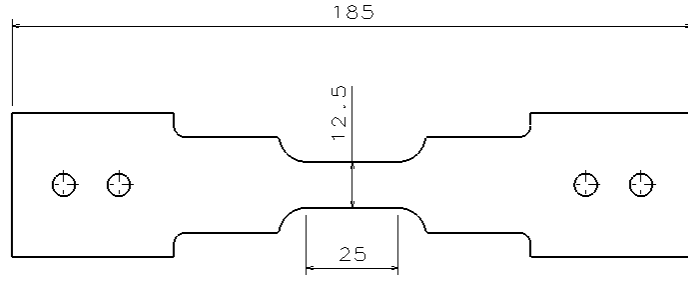
Şekil 4.24. AA6016 Malzemesinin Çekme Eğrileri



Şekil 4.25. AA5182, AA5754 ve AA6016 Malzemelerinin Çekme Eğrileri

4.2.2. Çevrimli Çekme Basma Testi

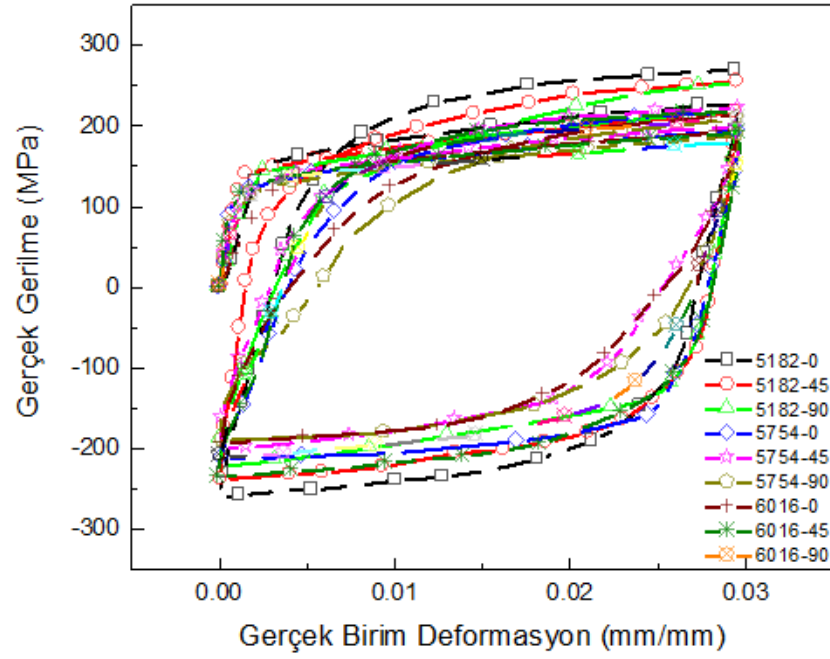
Çevrimli çekme basma testleri Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Çekme cihazında numune tutucu çenelerin basma yönünde verimli olmaması nedeniyle sabit çeneler tasarlanmıştır. Ayrıca basma durumunda malzemenin burkulmasını önlemek amacıyla iki farklı burkulma aparatı tasarlanarak üretilmiştir. Burkulma aparatlarından en iyi sonuç şeffaf aparat ile alınmıştır. Denemeler sonucu elde edilen uygun deney numunesi Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Deney Numunesi

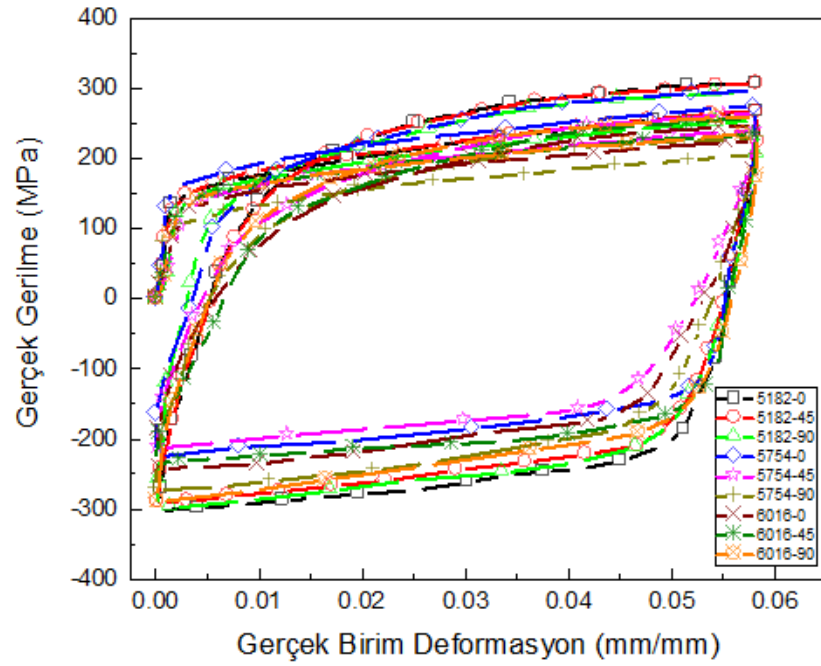
Her üç malzeme için de farklı gerinim çevrimlerinde testler gerçekleştirilmiştir.

0,03 gerinim değeri için çevrimsel çekme basma testi grafiği Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



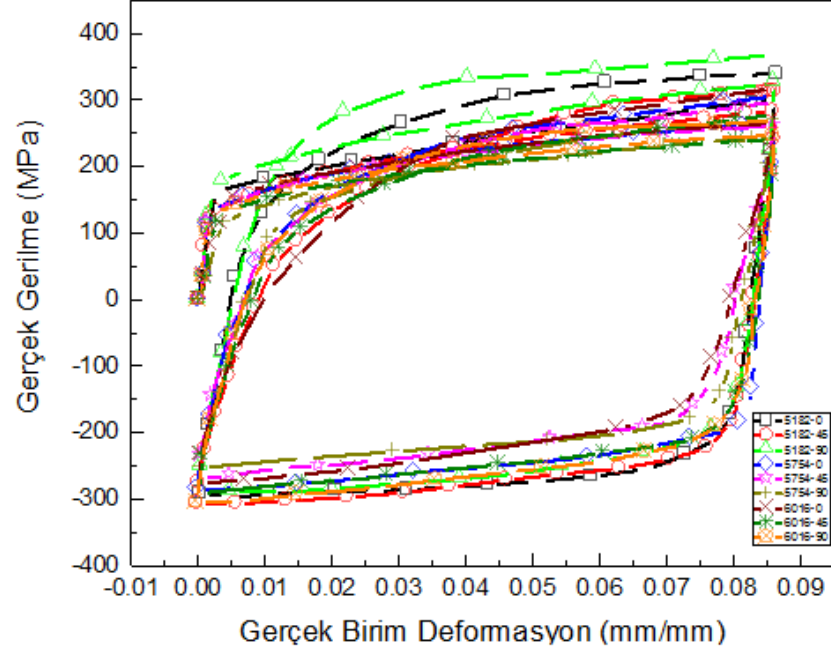
Şekil 4.27. 0.03 Gerinim Değeri için Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

0,06 gerinim değeri için çevrimsel çekme basma testi grafiği Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



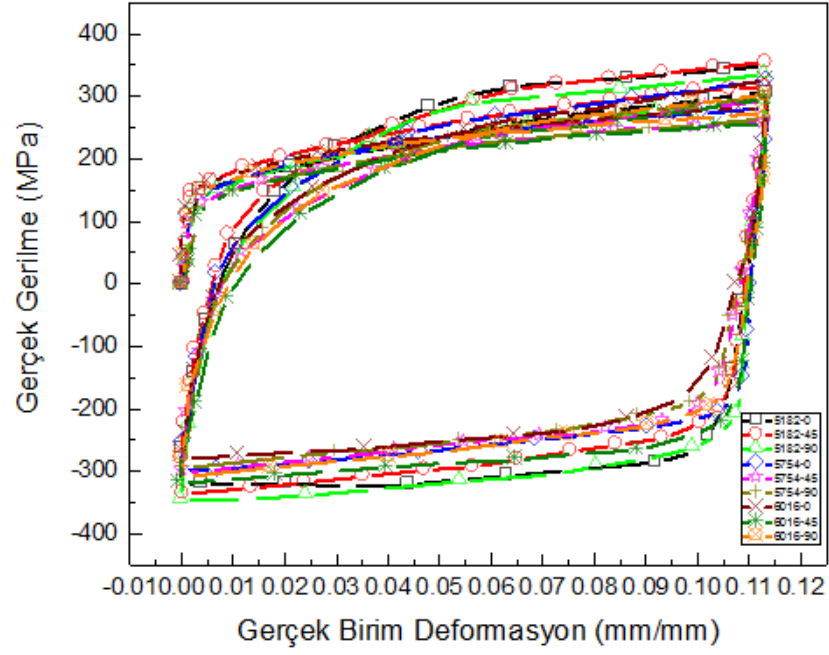
Şekil 4.28. 0.06 Gerinim Değeri için Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

0,09 gerinim değeri için çevrimsel çekme basma testi grafiği Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



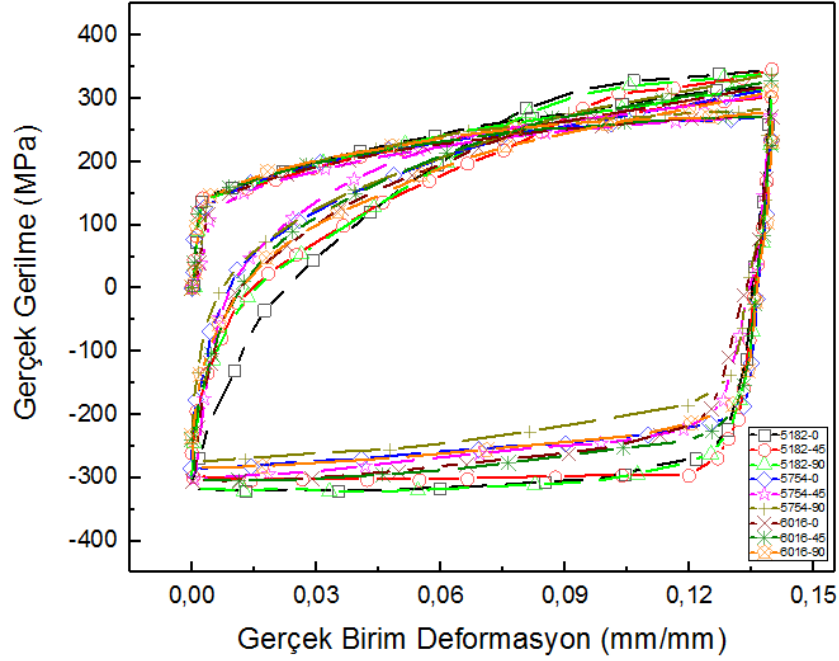
Şekil 4.29. 0,09 Gerinim Değeri için çevrimli ekme Basma Testi Eğrileri

0,12 gerinim değeri için çevrimsel çekme basma testi grafiği Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



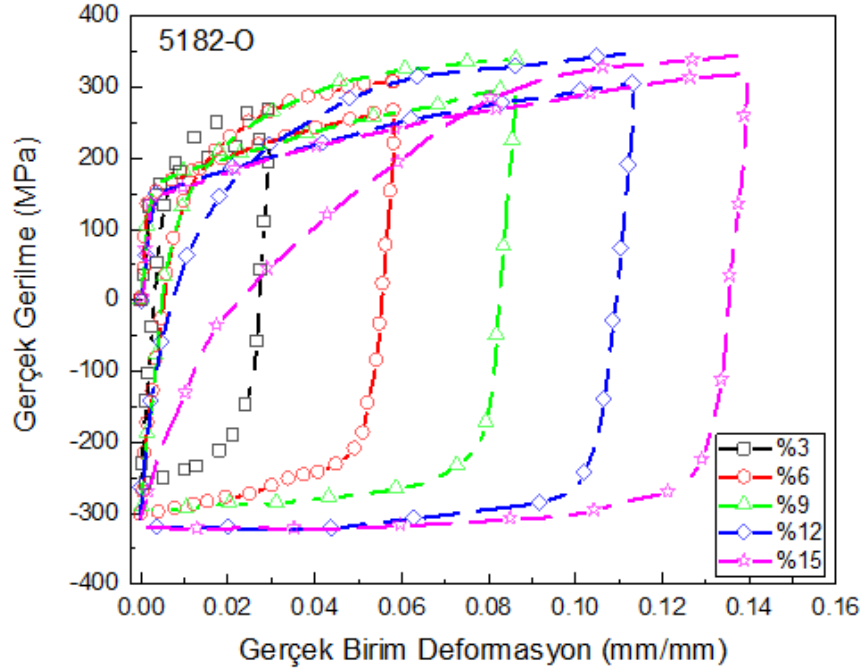
Şekil 4.30. 0.12 Gerinim Değeri için Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

0,15 gerinim değeri için çevrimsel çekme basma testi grafiği Şekil 4.31’de gösterilmiştir.

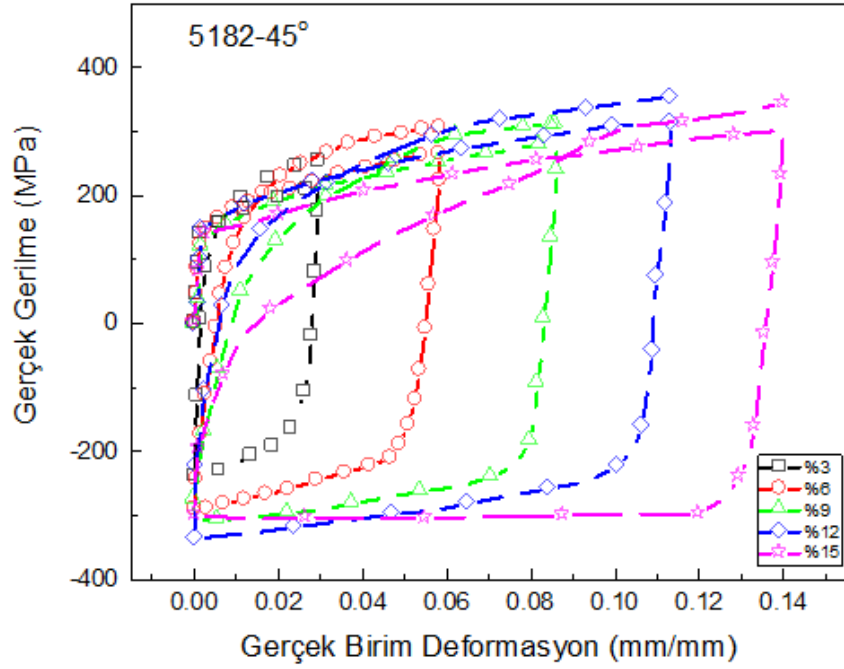


Şekil 4.31. 0.15 Gerinim Değeri için Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

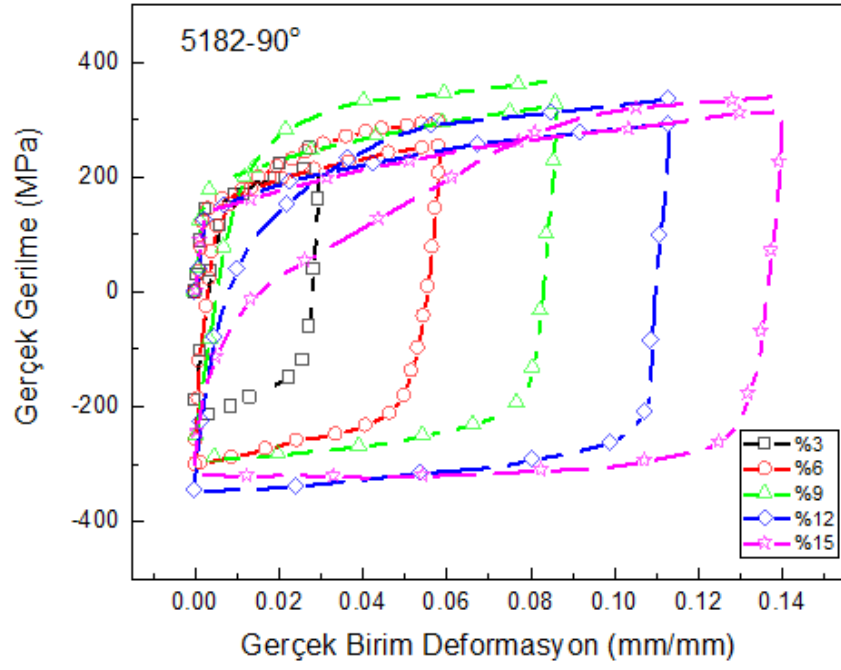
AA5182 malzemenin 0°,45° ve 90° yönleri için çevrimsel test eğrileri Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.32. AA5182-0° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

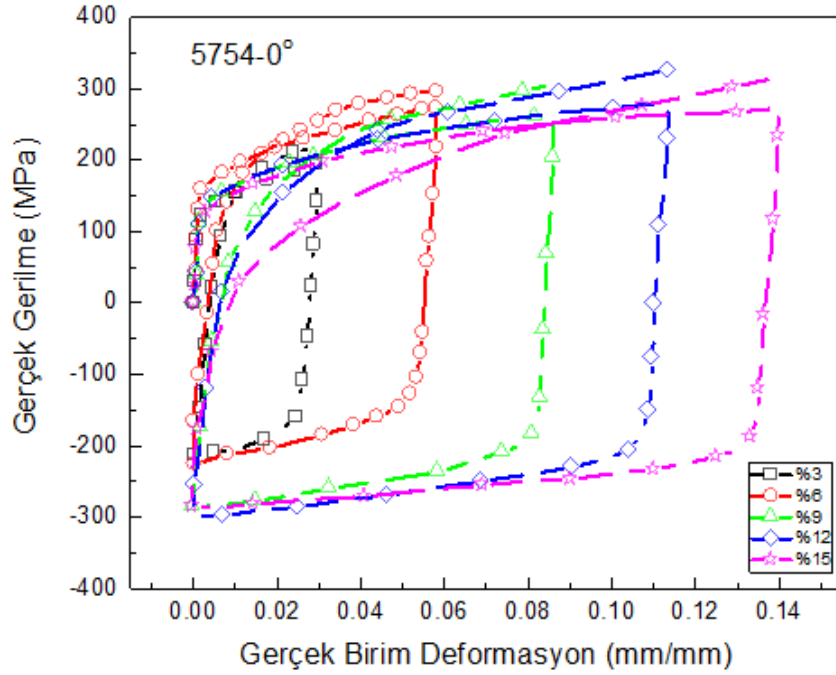


Şekil 4.33. AA5182-45° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

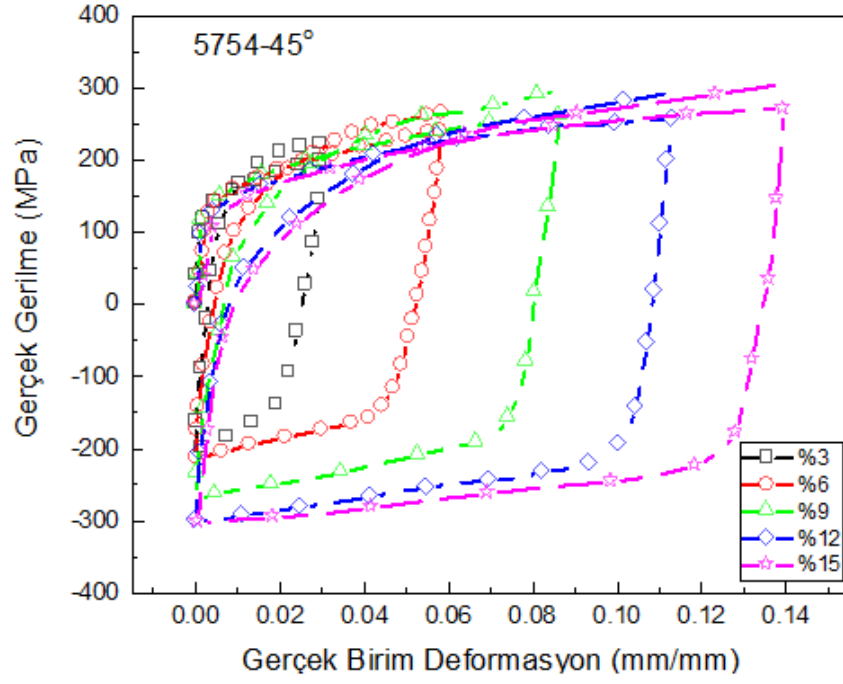


Şekil 4.34. AA5182-90° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

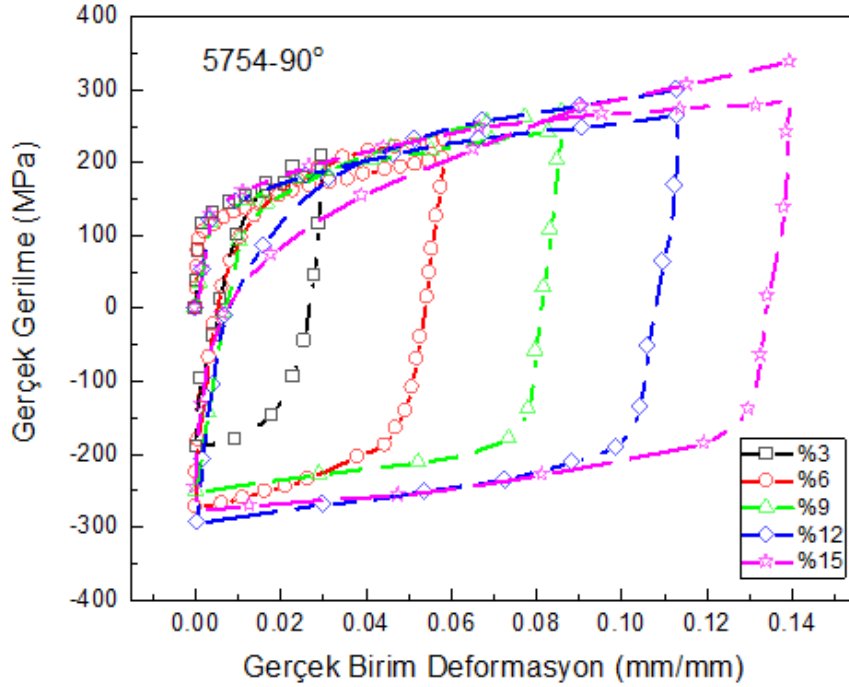
AA5754 malzemenin 0°,45° ve 90° yönleri için çevrimsel test eğrileri Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.35. AA5754-0° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

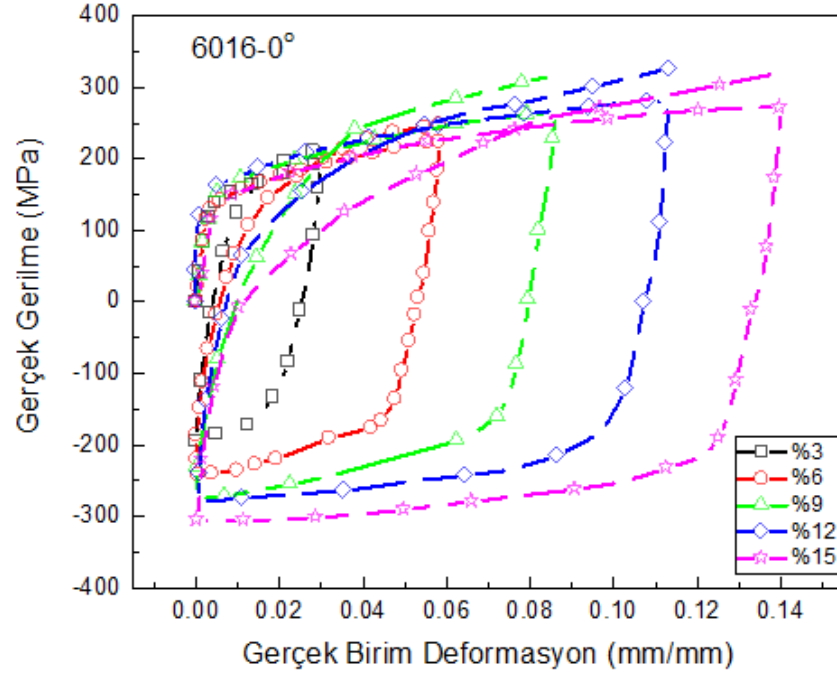


Şekil 4.36. AA5754-45° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

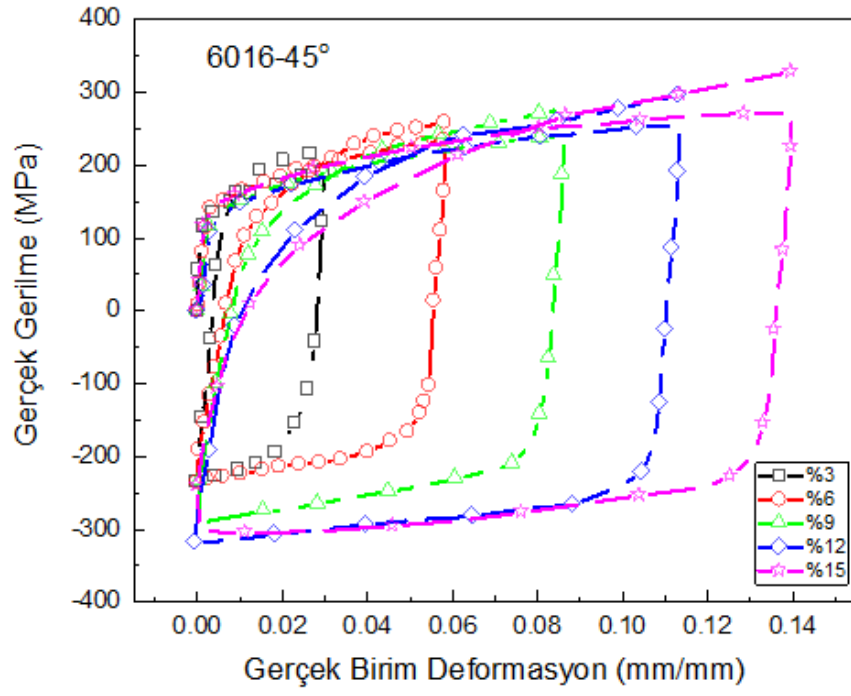


Şekil 4.37. AA5754-90° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

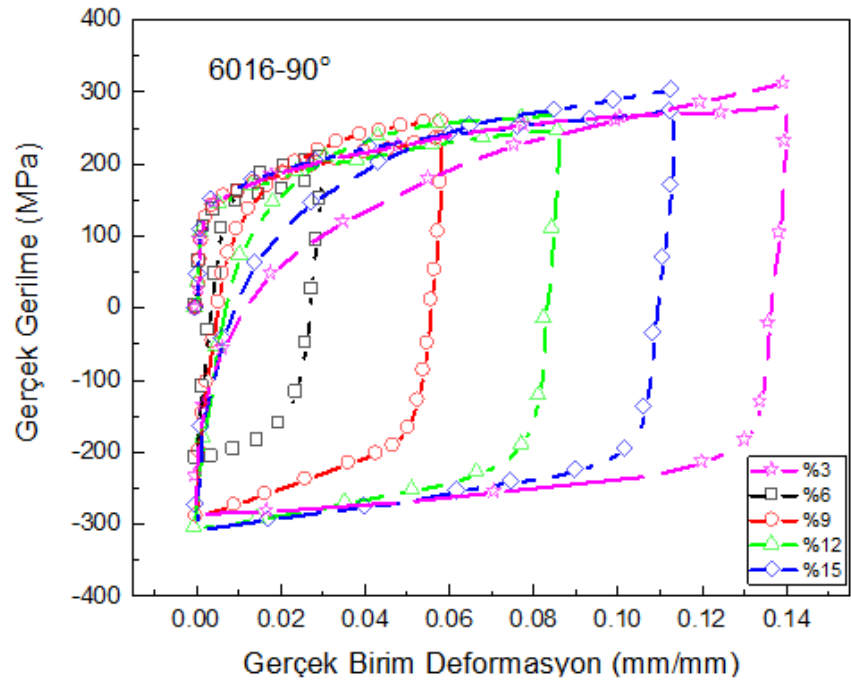
AA6016 malzemenin 0°,45° ve 90° yönleri için çevrimsel test eğrileri Şekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.38. AA6016-0° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri



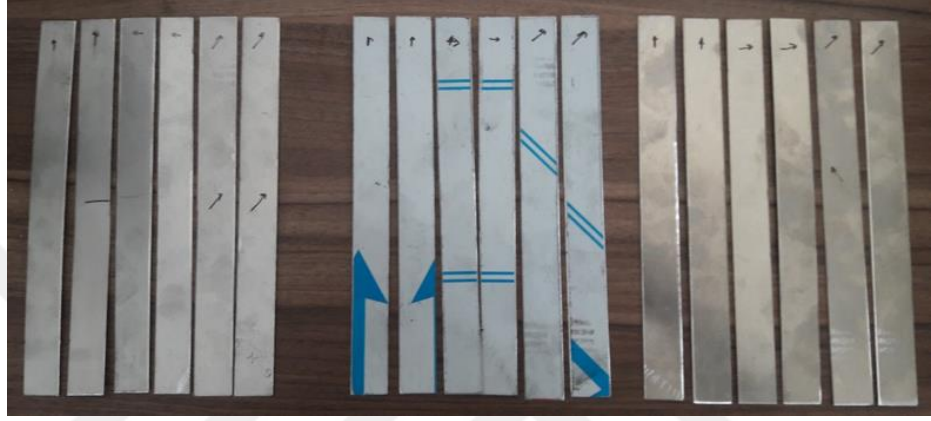
Şekil 4.39. AA6016-45° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri



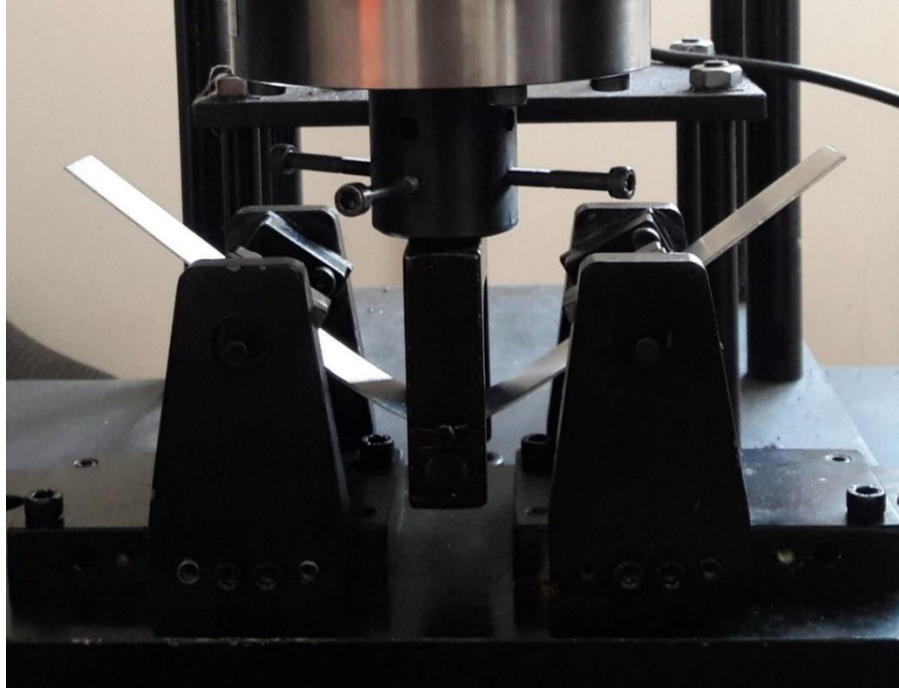
Şekil 4.40. AA6016-90° Gerinim Artımlı Çevrimli Çekme Basma Testi Eğrileri

4.2.3. Üç Noktalı Eğme Bükme Testi

Üç noktalı eğme bükme testi tasarlanan aparat yardımıyla Uludağ Üniversitesi'nde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.42'de görülmektedir. Her malzeme için 3 farklı hadde yönünde testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler çekme basma testinden elde edilen veriler ile kıyaslanarak malzeme parametrelerinin doğrulanmasında kullanılmıştır.

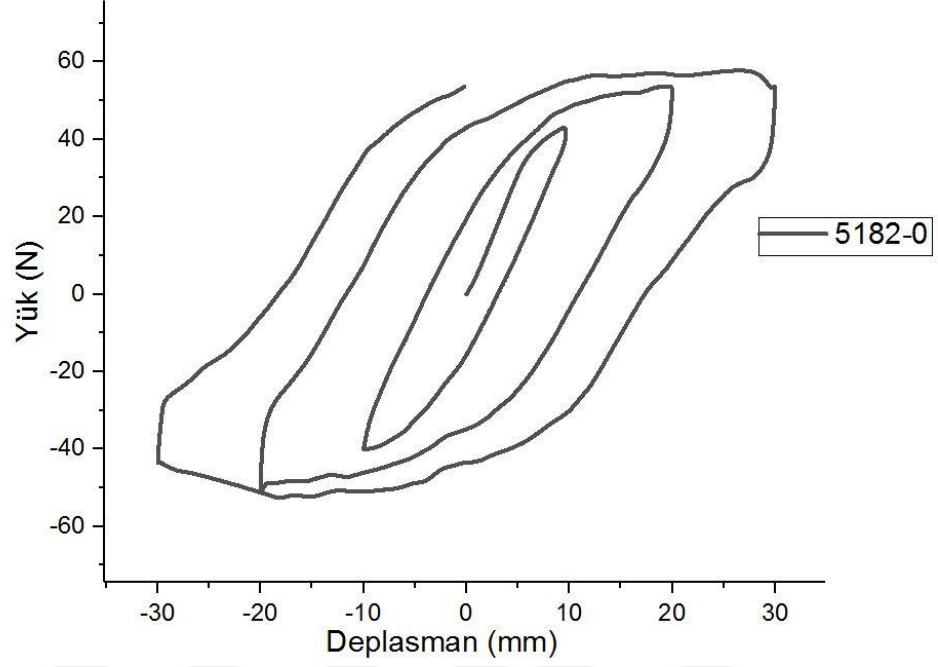


Şekil 4.41. Üç Noktalı Eğme Bükme Test Numuneleri

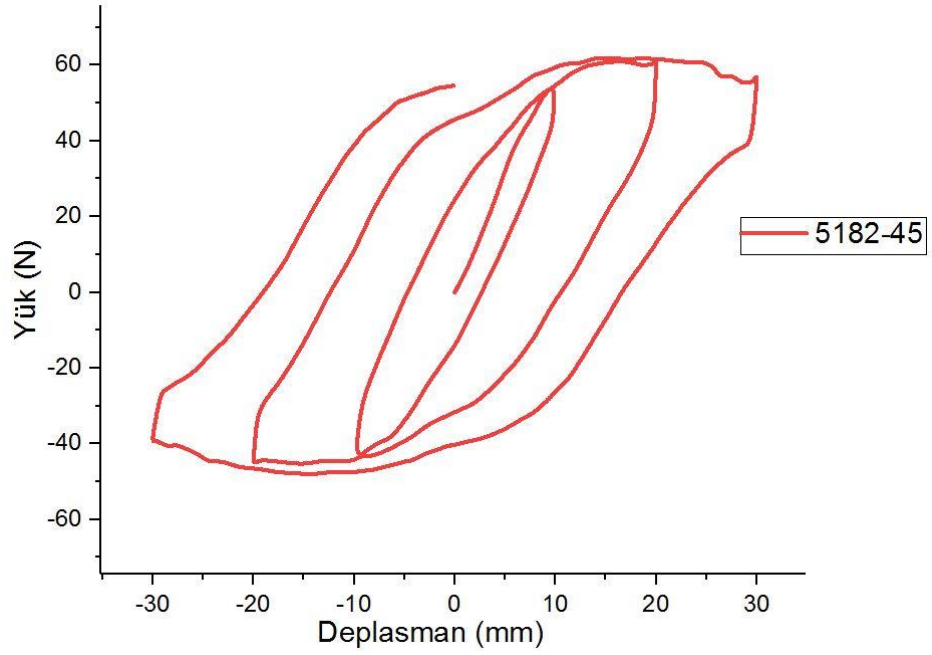


Şekil 4.42. Üç Noktalı Eğme Bükme Test Düzeneği

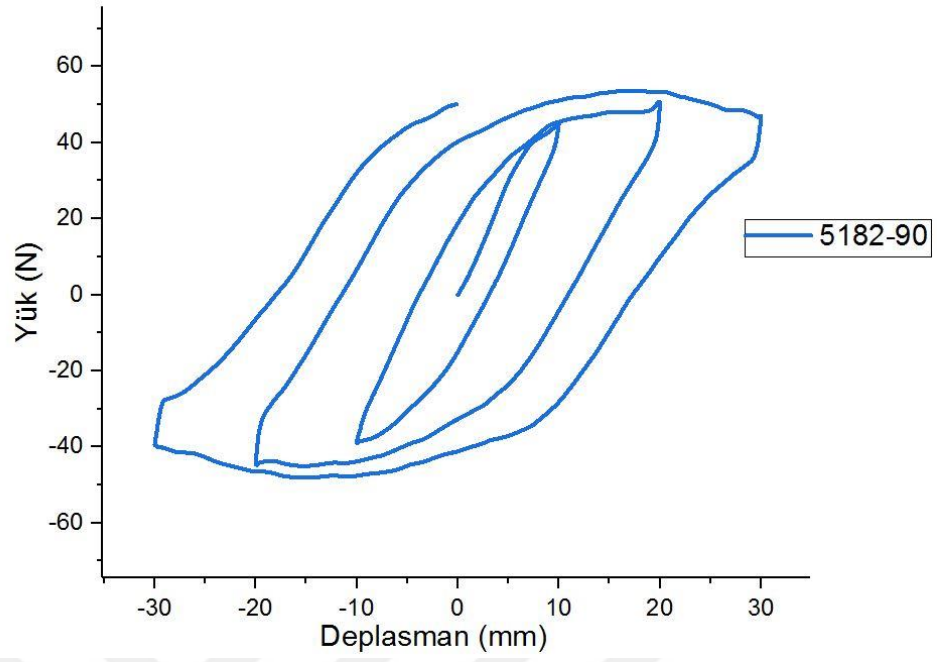
AA5182 malzemenin 0° , 45° ve 90° yönleri için üç nokta çevrimsel eğme bükme test eğrileri Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45 üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.46'da ise her üç malzeme için test verileri görülmektedir.



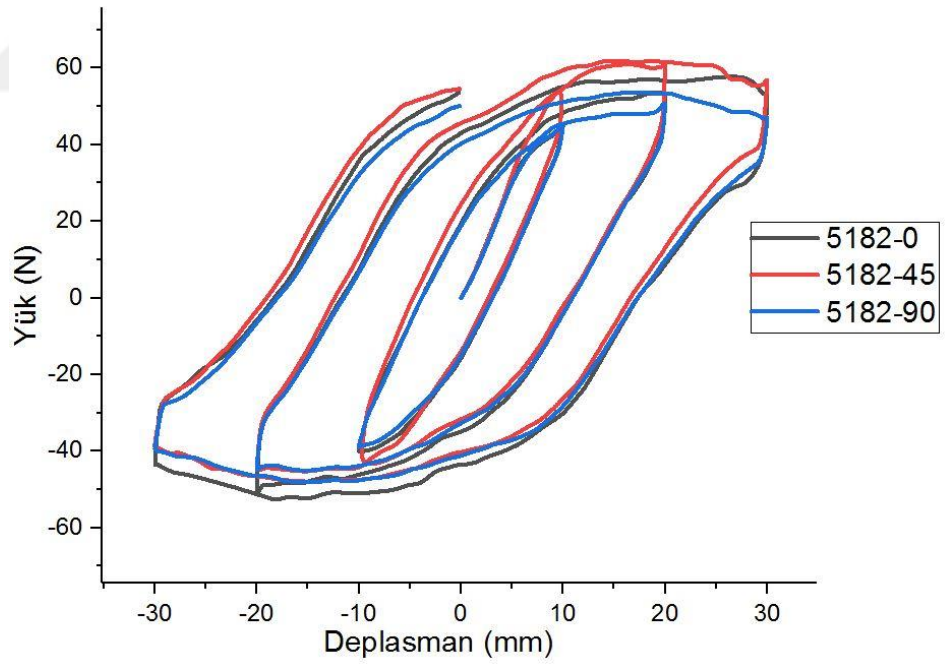
Şekil 4.43. AA5182-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği



Şekil 4.44. AA5182-45° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği

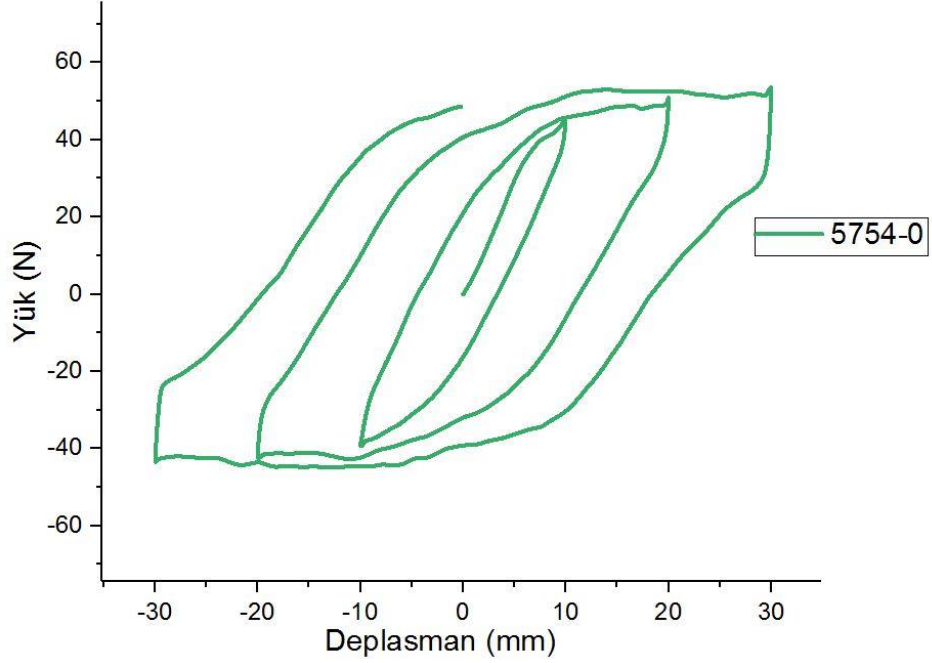


Şekil 4.45. AA5182-90° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği

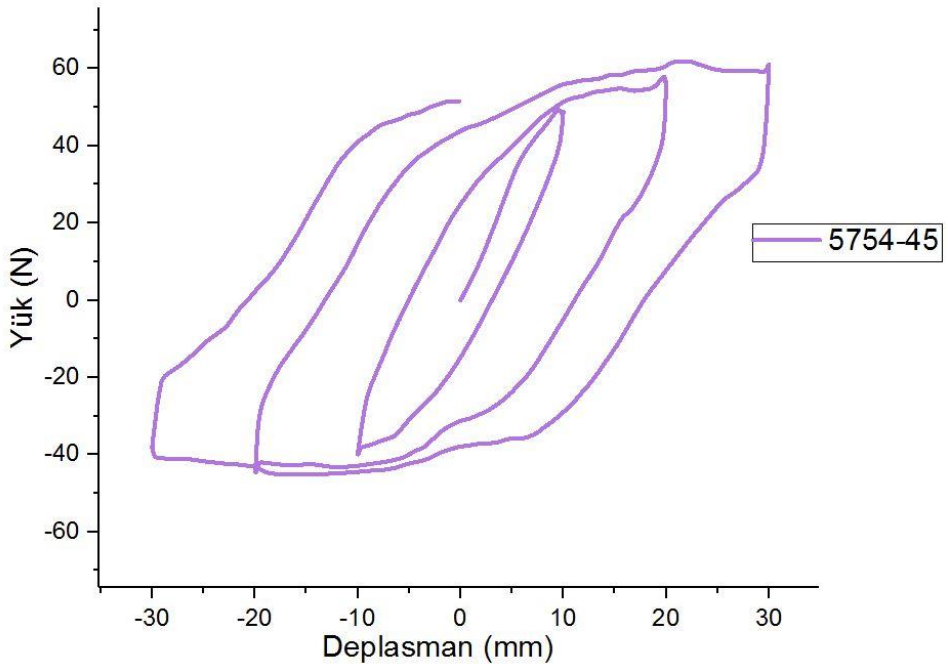


Şekil 4.46. AA5182 Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafikleri

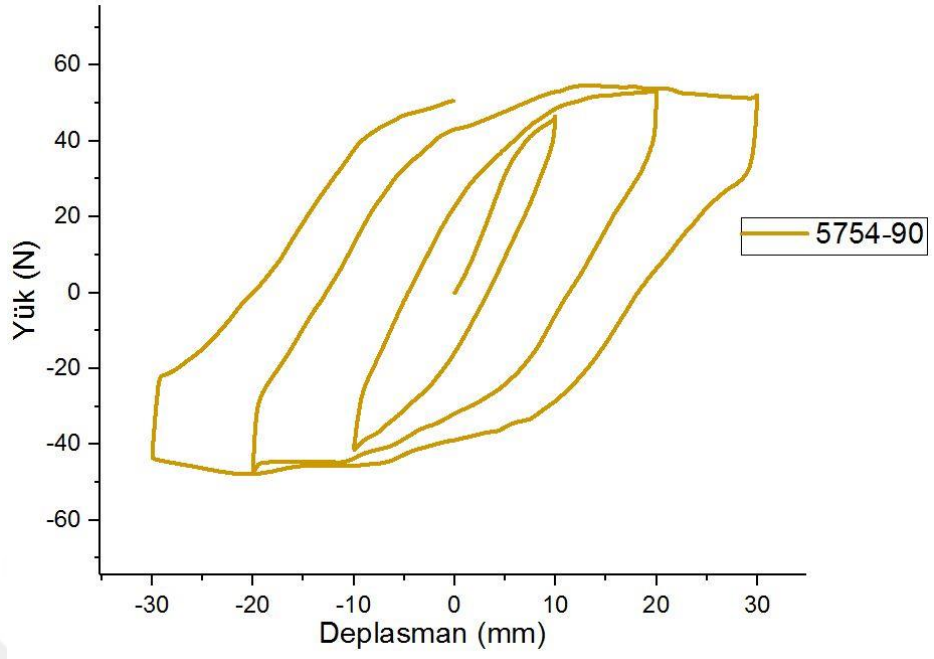
AA5754 malzemenin 0° , 45° ve 90° yönleri için üç nokta çevrimsel eğme bükme test eğrileri Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve Şekil 4.49 üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.50’de ise her üç malzeme için test verileri görülmektedir.



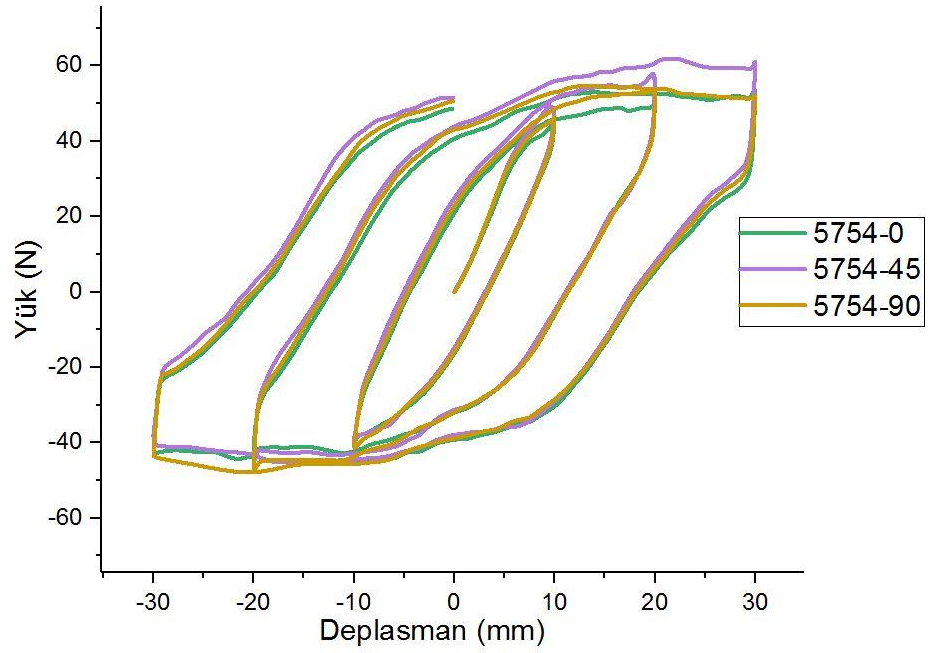
Şekil 4.47. AA5754-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği



Şekil 4.48. AA5754-45° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği

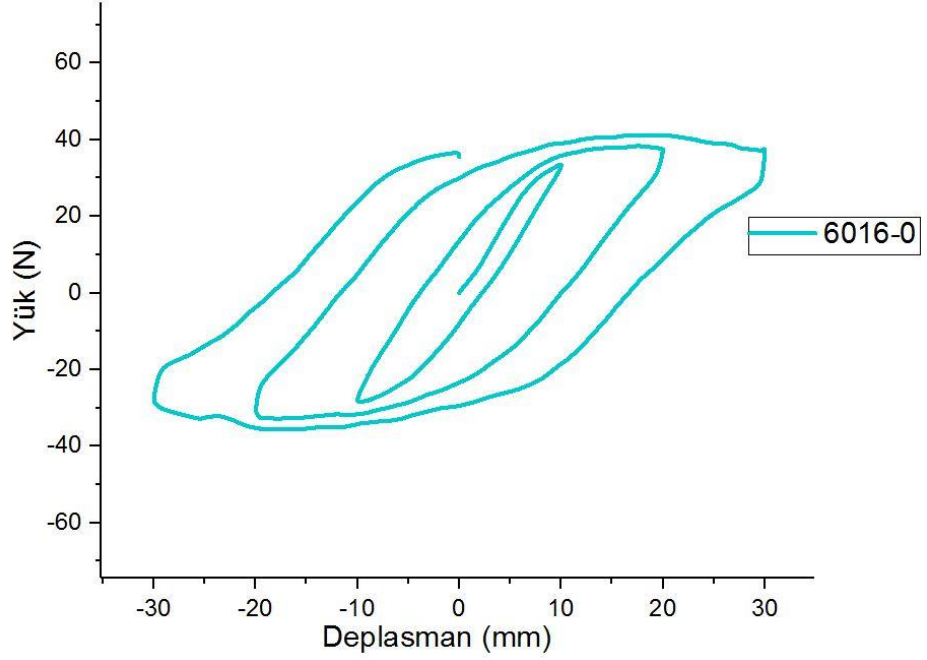


Şekil 4.49. AA5754-90° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği

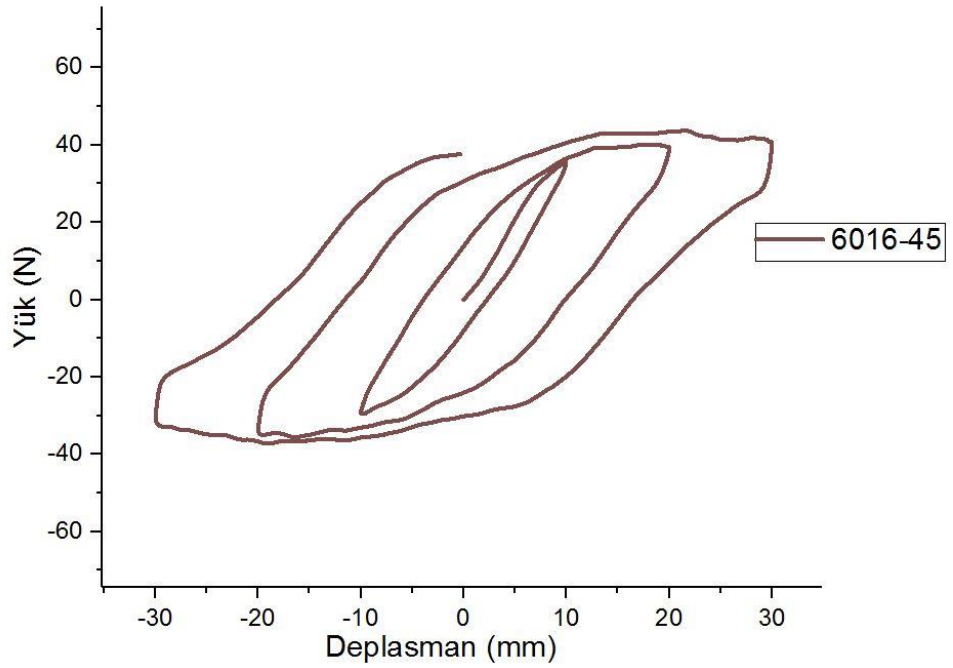


Şekil 4.50. AA5754 Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafikleri

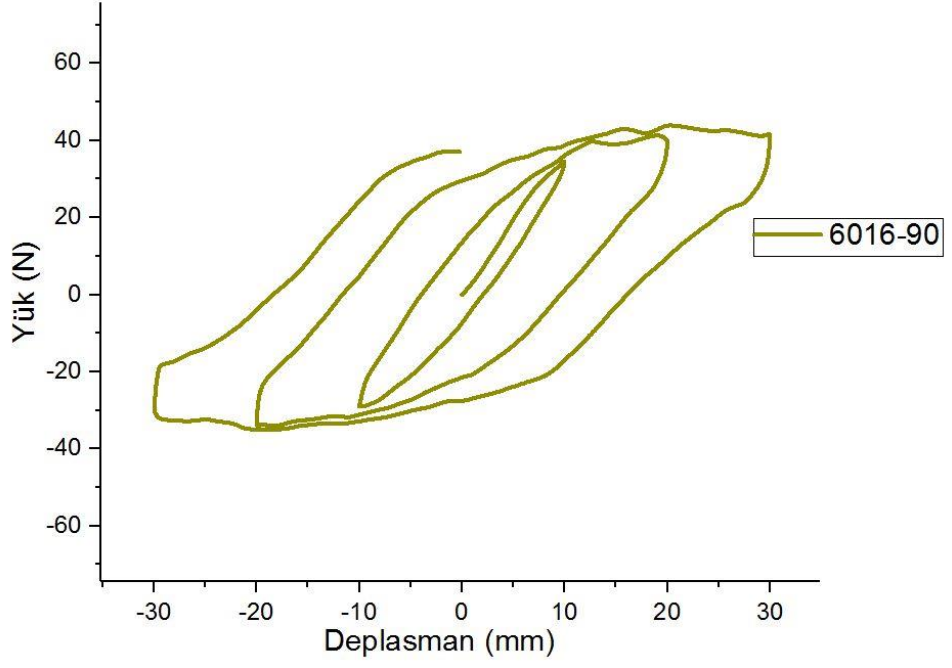
AA6016 malzemenin 0° , 45° ve 90° yönleri için üç nokta çevrimsel eğme bükme test eğrileri Şekil 4.51, Şekil 4.52 ve Şekil 4.53 üzerinde gösterilmiştir. Şekil 4.54’de ise her üç malzeme için test verileri görülmektedir.



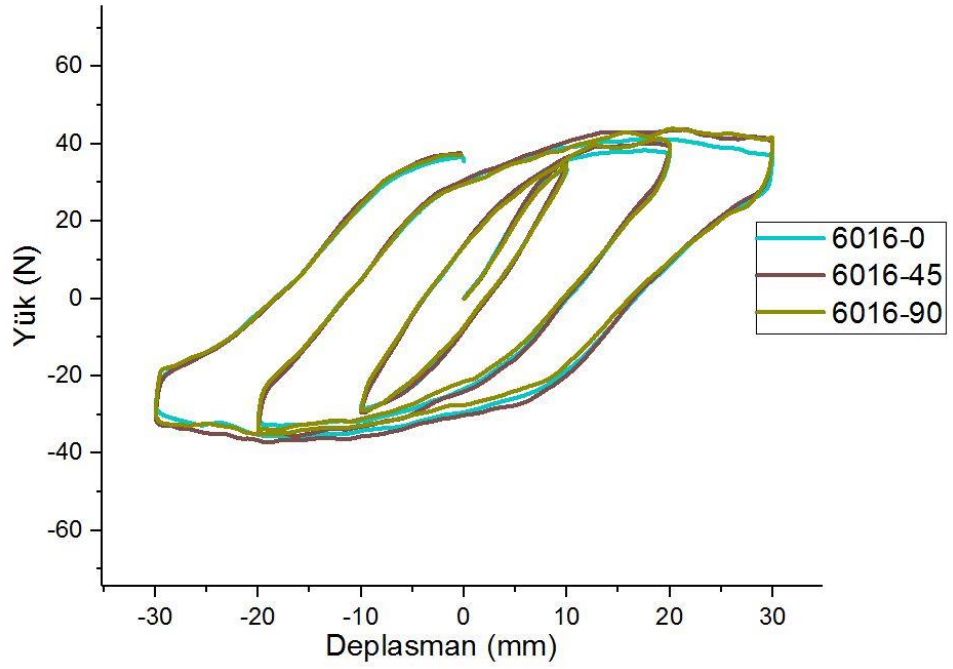
Şekil 4.51. AA6016-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği



Şekil 4.52. AA6016-45° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği

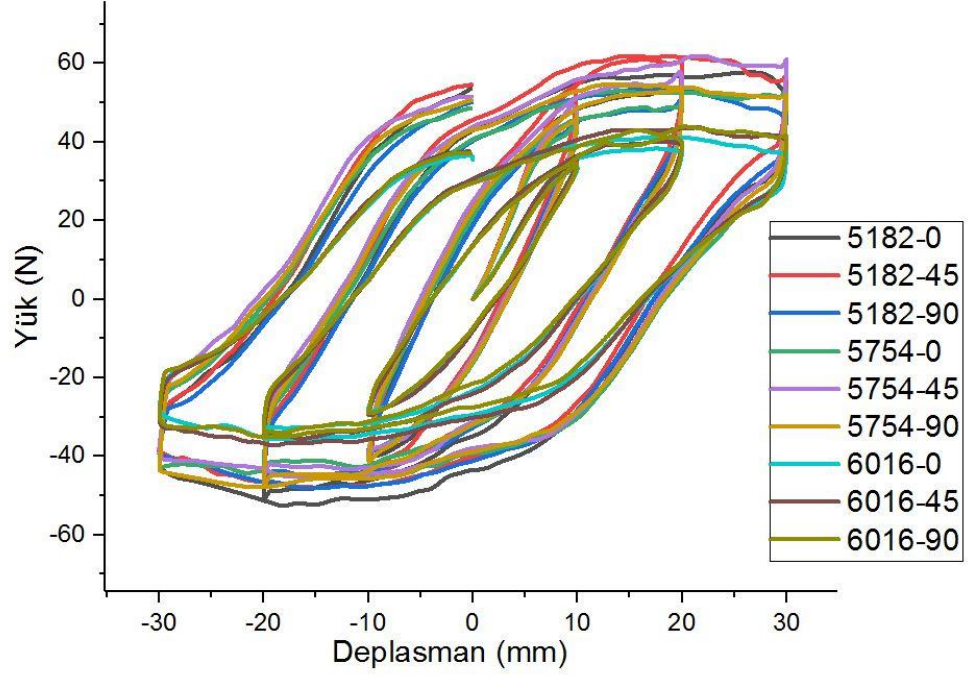


Şekil 4.53. AA6016-90° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği



Şekil 4.54. AA6016-0° Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testi Grafiği

Şekil 4.55 bütün malzemeler ve hadde yönleri için testlerden elde edilen verileri içermektedir.

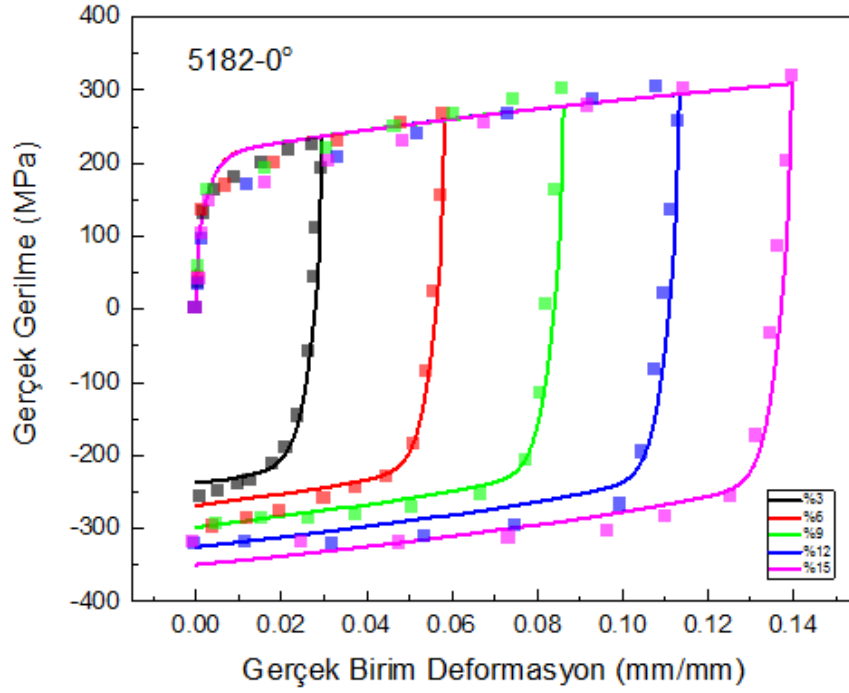


Şekil 4.55. Üç Noktalı Çevrimli Eğme Bükme Testleri Birleştirilmiş Grafiği

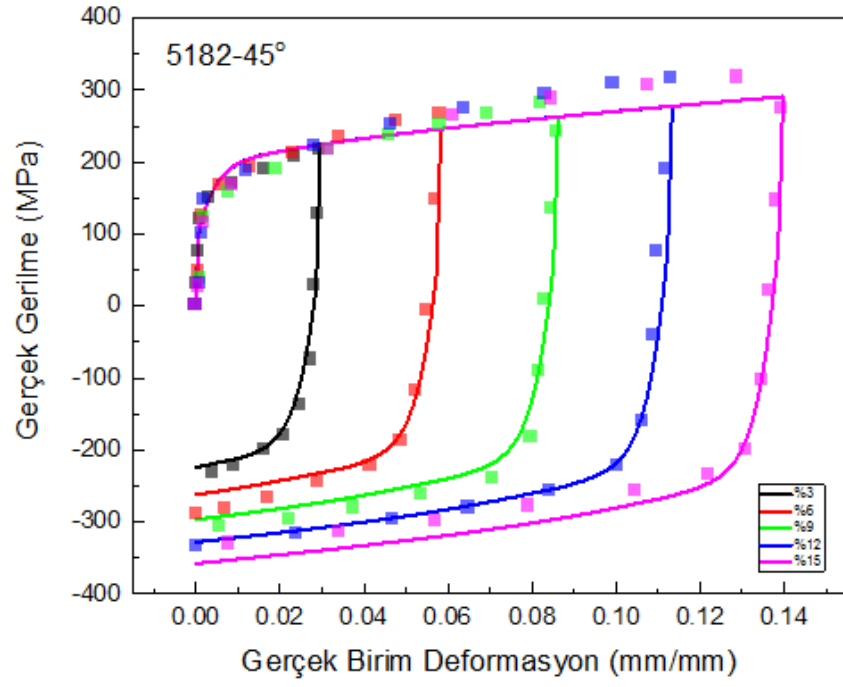
4.3. Malzeme Modellerinin Oluşturulması

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen çevrimsel eğriler üzerine yapılan Y-U model parametreleri iterasyonları sonucu deneysel verilere en çok yakınlaşan parametreler belirlenmiştir. Bu aşamada Ls-Opt programı ve Yrd. Doç. Dr. Serkan Toros tarafından yazılan yardımcı kod kullanılmıştır.

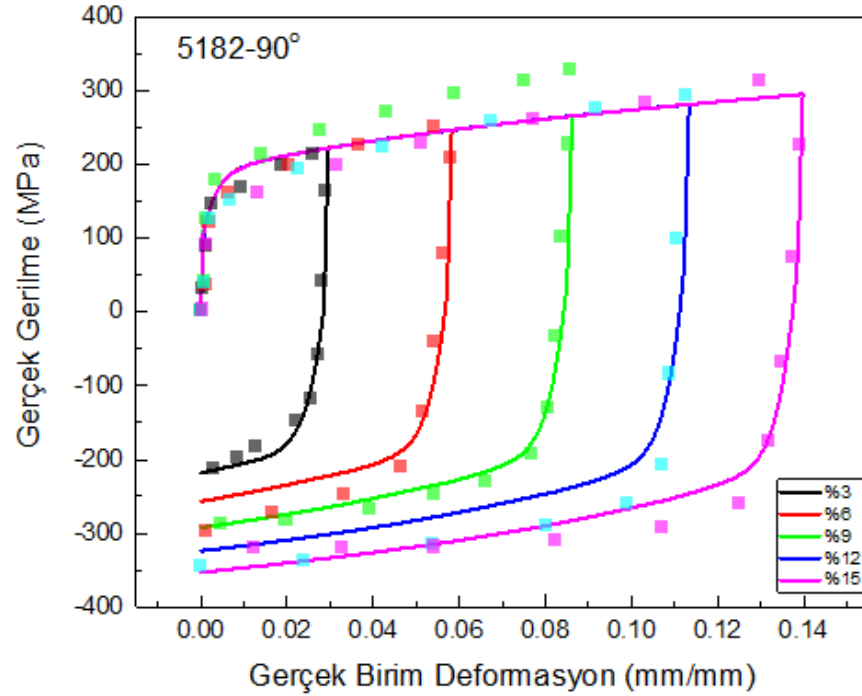
AA5182 malzemenin 0° , 45° ve 90° yönleri için testlerden elde edilen veriler ve yakınsayan parametre değerleri Şekil 4.56, Şekil 4.57 ve Şekil 4.58 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.56. AA5182-0° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

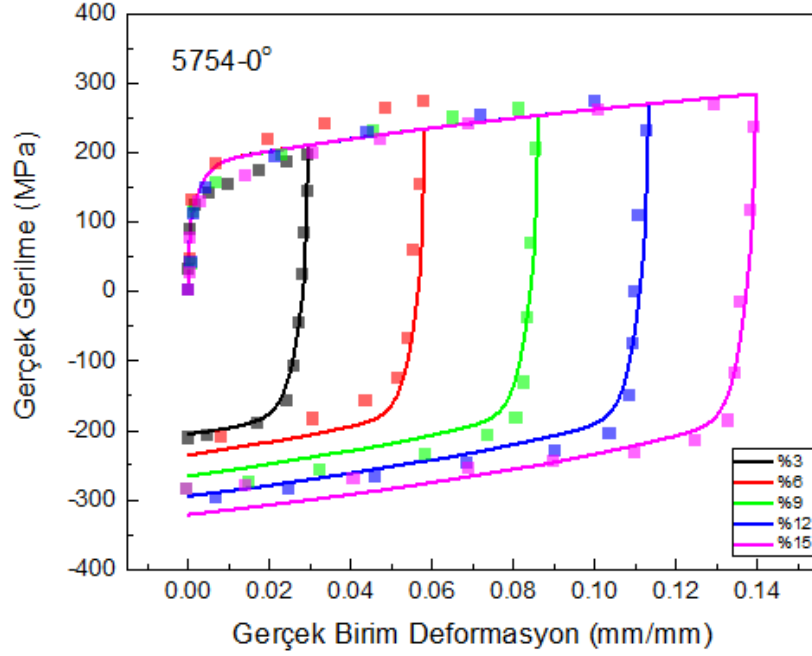


Şekil 4.57. AA5182-45° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

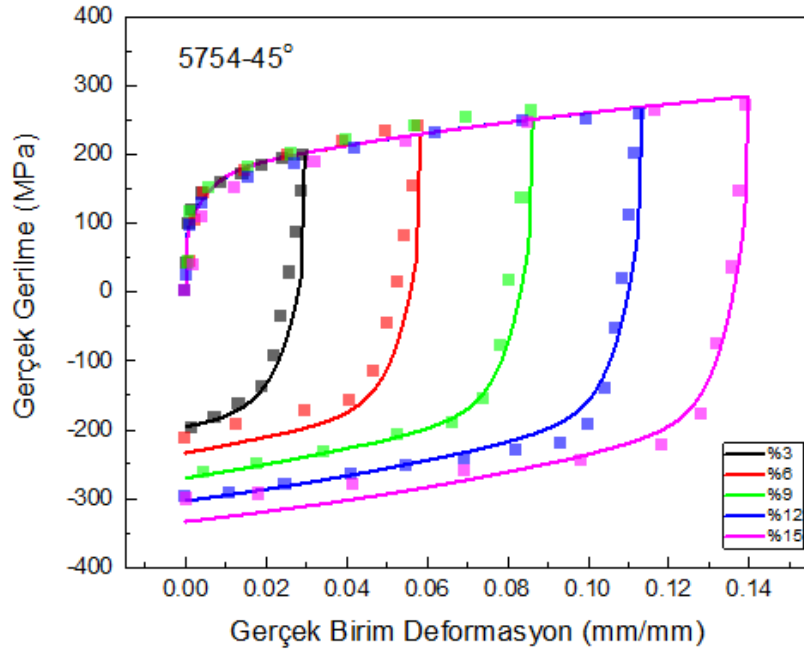


Şekil 4.58. AA5182-90° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

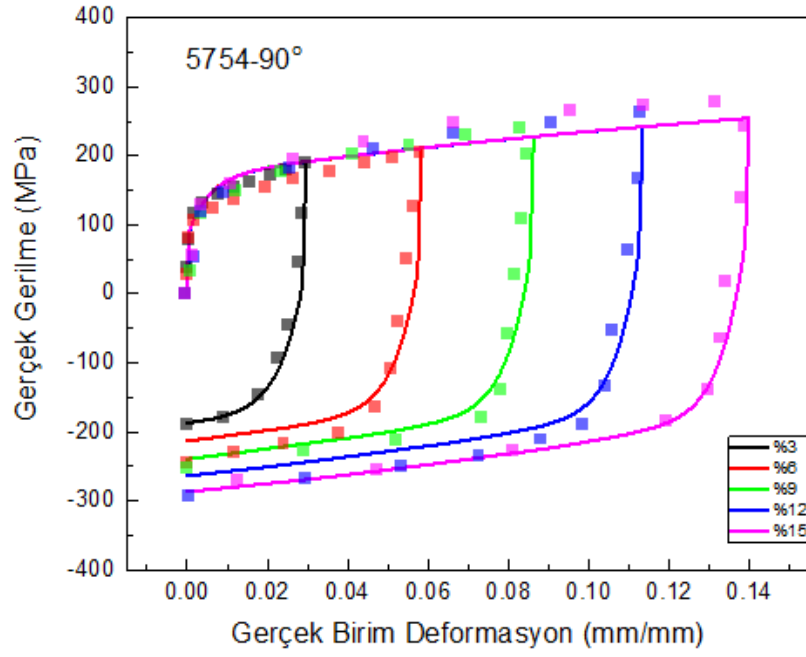
AA5754 malzemenin 0° , 45° ve 90° yönleri için testlerden elde edilen veriler ve yakınsayan parametre değerleri Şekil 4.59, Şekil 4.60 ve Şekil 4.61 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.59. AA5754-0° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

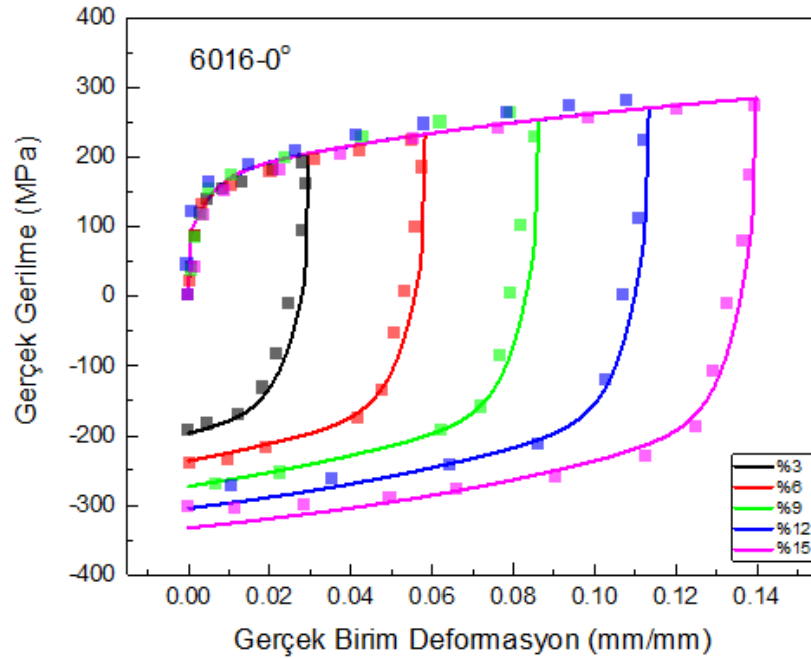


Şekil 4.60. AA5754-45° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

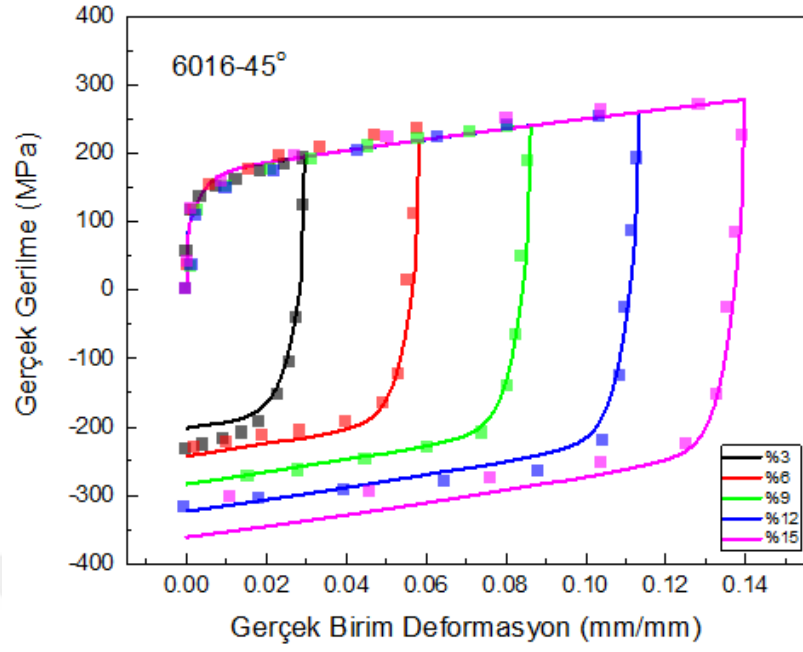


Şekil 4.61. AA5754-90° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

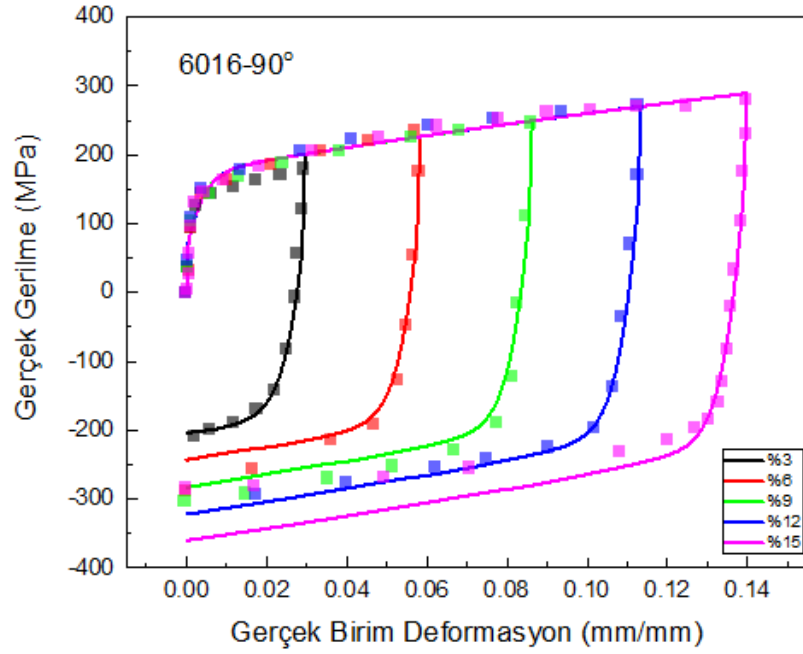
AA6016 malzemenin 0°,45° ve 90° yönleri için testlerden elde edilen veriler ve yakınsayan parametre değerleri Şekil 4.62, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.62. AA6016-0° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği



Şekil 4.63. AA6016-45° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği



Şekil 4.64. AA6016-90° Malzemesi için Deneysel Verilere Yakınsanan Eğri Grafiği

Çizelge 4.1’de yer alan her üç yöndeki malzeme parametrelerinin simülasyonlarda kullanılabilmesi için aşağıdaki denklem kullanılarak Çizelge 4.2’deki ortalama değerleri bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Malzemelerin Her Bir Yönü İçin Y-U Model Parametreleri

Malzeme	CB	SIGY	C	K	RSAT	SB	H	C1	C2
5182-0°	211.656	94.3178	391.8	10.5156	387.11	47.4266	1.16532	0.127432	0.679406
5182-45°	194.596	99.1562	293.201	25.3083	265.935	36.5965	0.6838	0.847085	1.83259
5182-90°	194.596	99.1562	341.453	25.3083	265.935	36.5965	0.381146	0.88324	1.61107
5754-0°	183.78	94.7907	400	10.863	367.736	66.5287	0.890295	1	0.988753
5754-45°	170	90	200	14.2476	381.265	67.6106	0.972334	0.983695	1.10754
5754-90°	170.001	90.0004	200.002	10.185	320.049	55.0678	0.523805	0.642774	1.00871
6016-0°	170.002	90.001	200.001	16.9487	324.834	68.6873	0.501903	0.992055	1.20555
6016-45°	170.002	90.001	300	14.3012	399.998	30	0.507325	1	1.48566
6016-90°	174.523	70.005	290.001	10.0013	399.993	49.3618	0.714586	0.949186	1.43185

Çizelge 4.1’de yer alan her üç yöndeki malzeme parametrelerinin simülasyonlarda kullanılabilmesi için aşağıdaki denklem kullanılarak Çizelge 4.2’deki ortalama değerleri bulunmuştur.

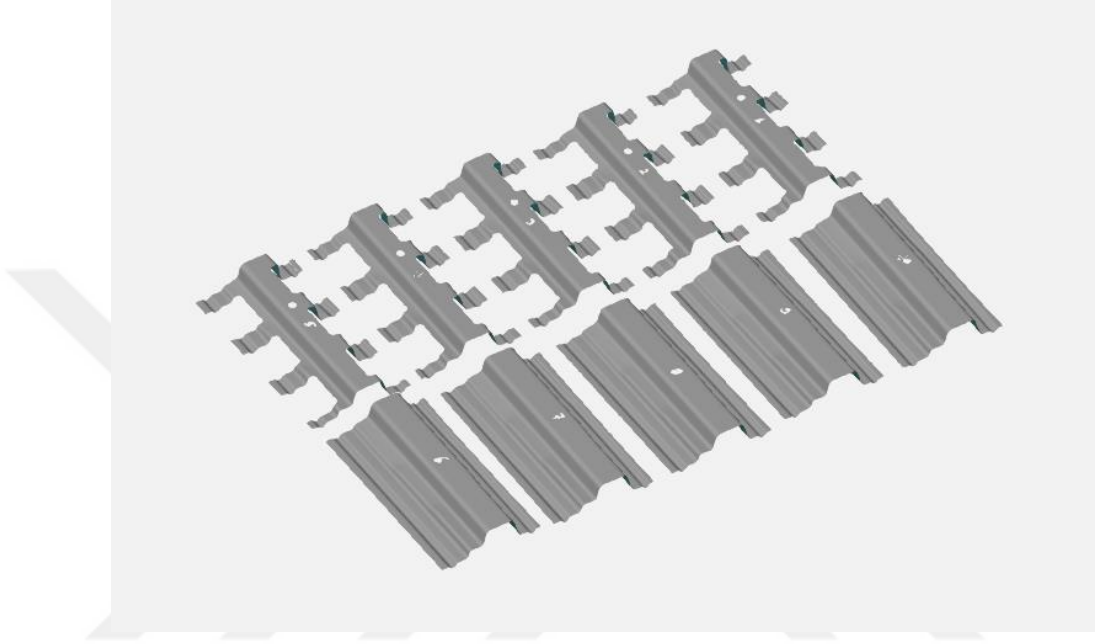
$$X_{\text{ort}} = \frac{X_0 + 2X_{45} + X_{90}}{4}$$

Çizelge 4.2. Y-U Model Parametreleri Ortalama Değerleri

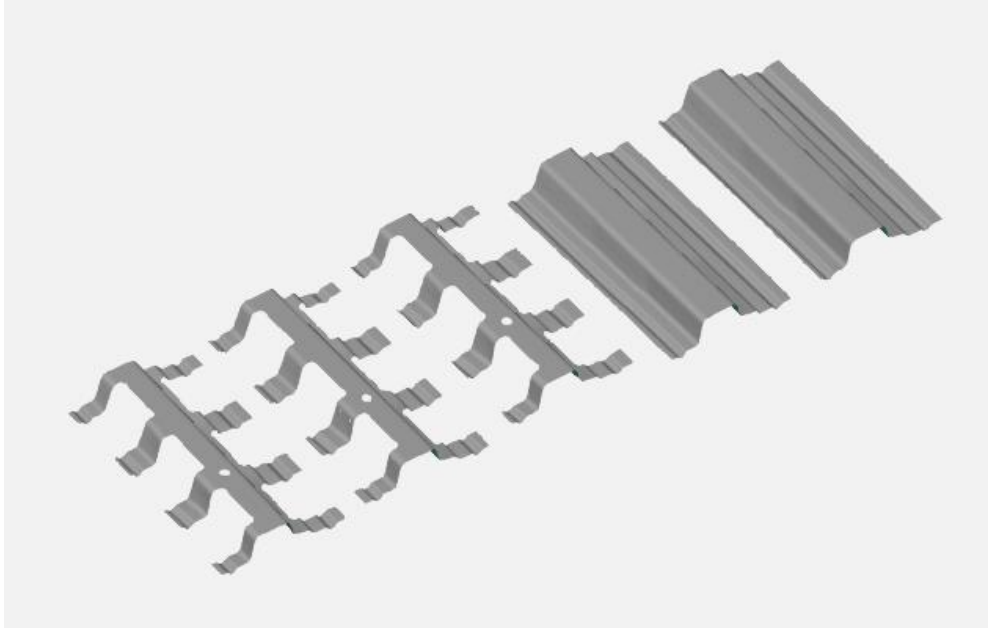
	CB	SIGY	C	K	RSAT	SB	H	C1	C2
5182-0°									
5182-45°	198.861	97.9466	329.913	21.6101	296.228	39.3040	0.72851	0.67621	1.48891
5182-90°									
5754-0°									
5754-45°	173.445	91.1977	250.000	12.385	362.578	64.2044	0.83969	0.90254	1.05313
5754-90°									
6016-0°									
6016-45°	171.132	85.002	272.500	13.888	381.205	44.5122	0.55778	0.98531	1.40218
6016-90°									

4.4. Şekillendirilen Sac Malzemenin 3 Boyutlu Taranması

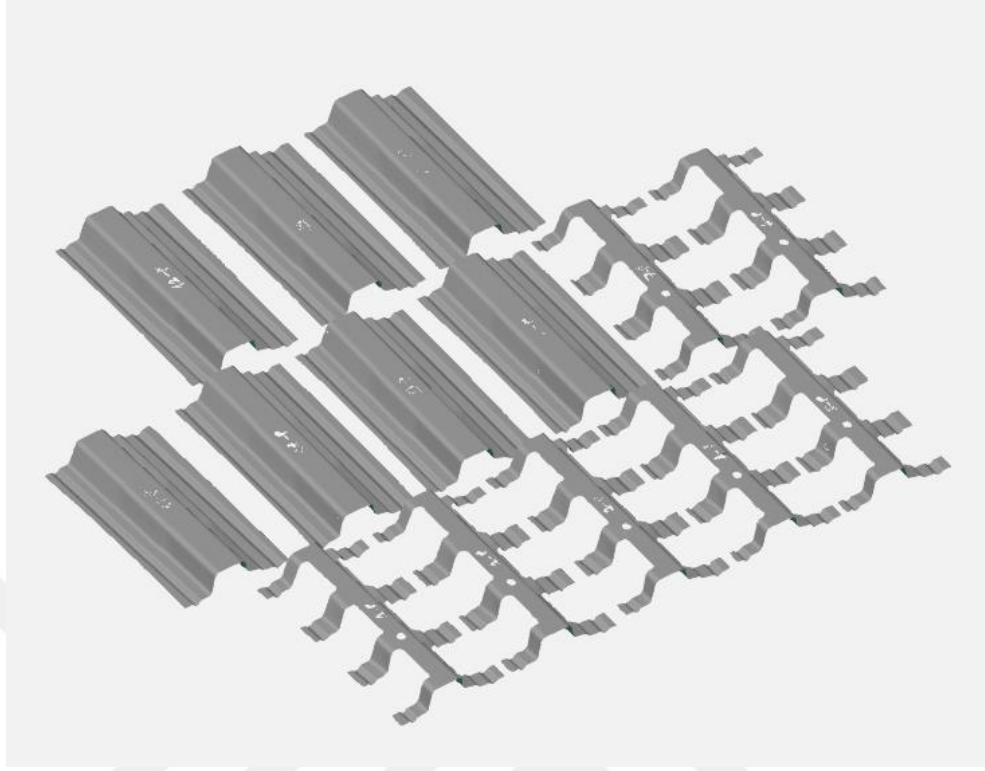
Deneysel veriler ile simülasyonların karşılaştırılabilmesi için üretilen sac parçalar Gom Atos tarama cihazı ile Coşkunöz firmasında üç boyutlu olarak taranmıştır (Şekil 4.65, Şekil 4.66 ve Şekil 4.67).



Şekil 4.65. AA6016 Malzemesi Taranan Deneysel Parçalar



Şekil 4.66. AA5182 Malzemesi Taranan Deneysel Parçalar

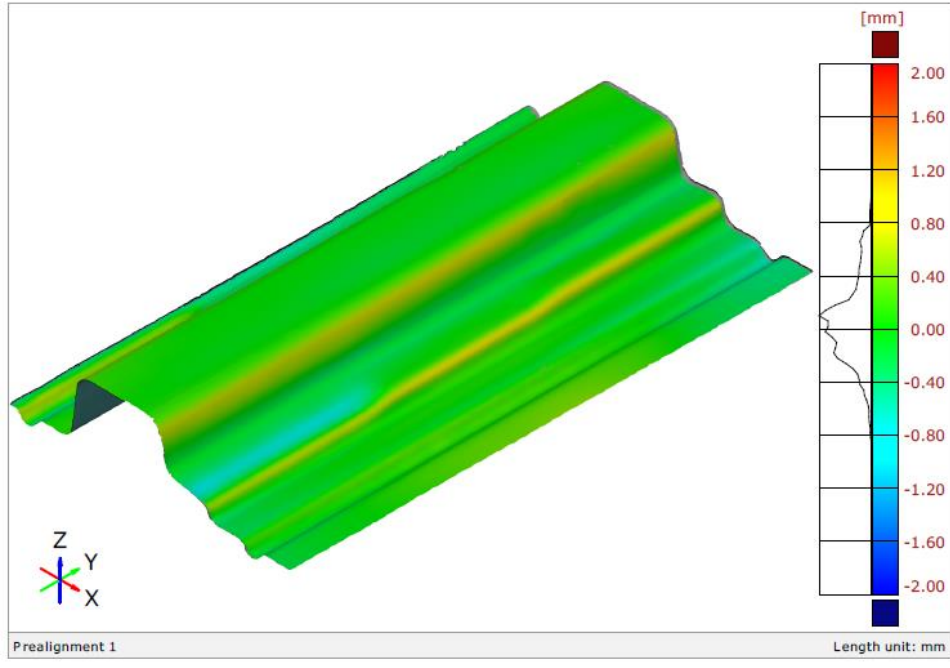


Şekil 4.67. AA5754 Malzemesi Taranan Deneysel Parçalar

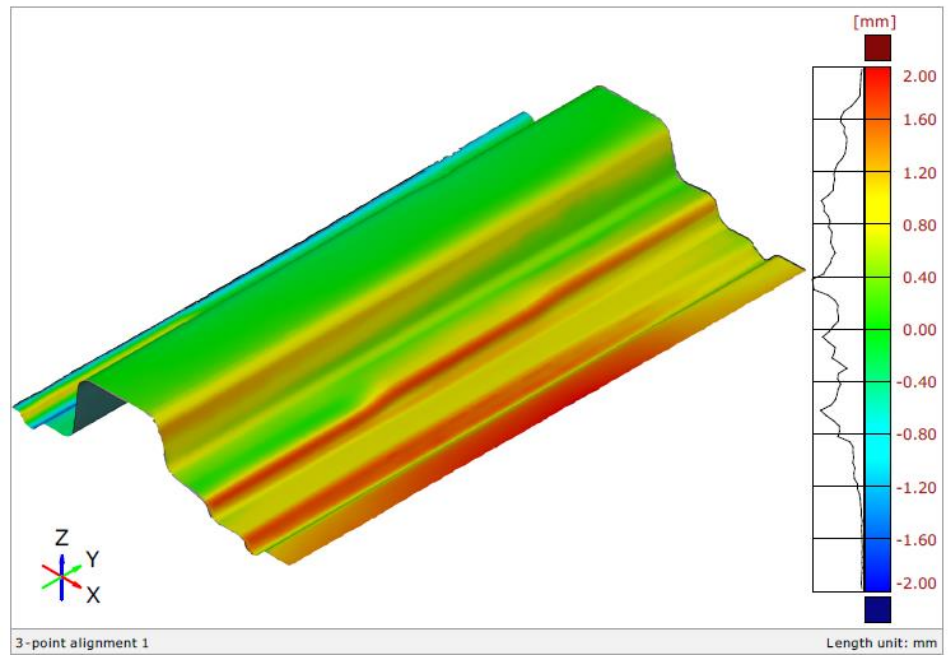
4.5. Sonlu Elemanlar Analizi ve Deneysel Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneysel tarama dataları ve simülasyon çıktıları sonucu ortaya çıkan iki sac parça datası Gom Inspect programı yardımıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma işleminde program tarafından gerçekleştirilen en uygun hizalama (Best-Fit Alignment) ve parçanın en üst yüzeyindeki düzlemsel bölge üzerinde 3 nokta belirlenerek bu noktaların karşılaştırılması yöntemleri (3 Point Alignment) kullanılmıştır. Her bir malzeme için Autoform'da yapılan simülasyon – tarama datası kıyaslaması ve Ls-Dyna'da Y-U modeli ile yapılan simülasyon – tarama datası kıyaslamaları yapılmıştır.

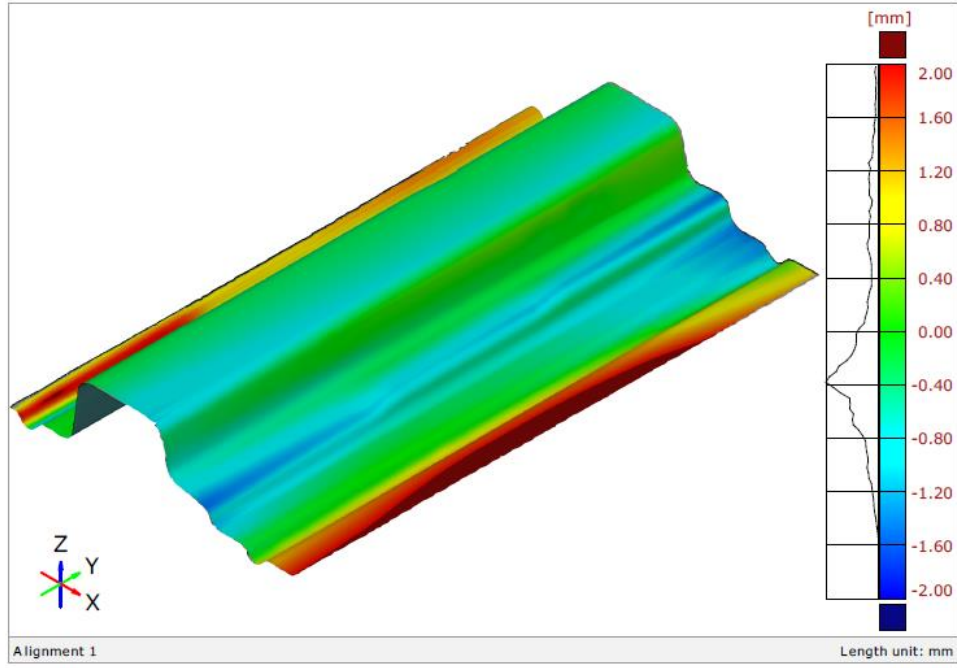
AA5182 malzemesi için yapılan kıyaslama çalışmaları Şekil 4.68, Şekil 4.69, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71'de sunulmuştur.



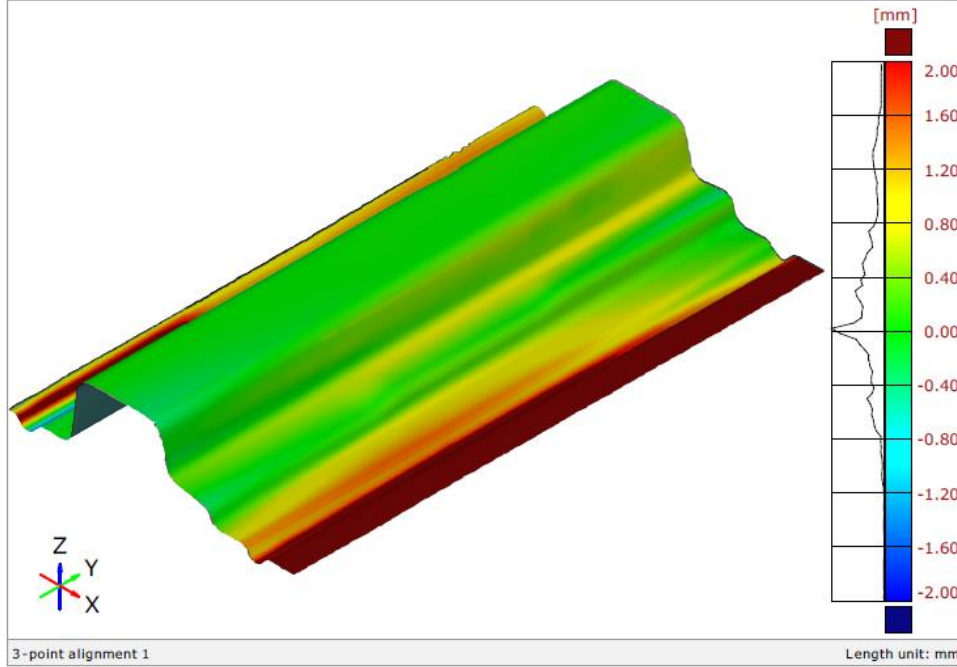
Şekil 4.68. AA5182 için Tarama Datası ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Alignment)



Şekil 4.69. AA5182 için Tarama Datası ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment)

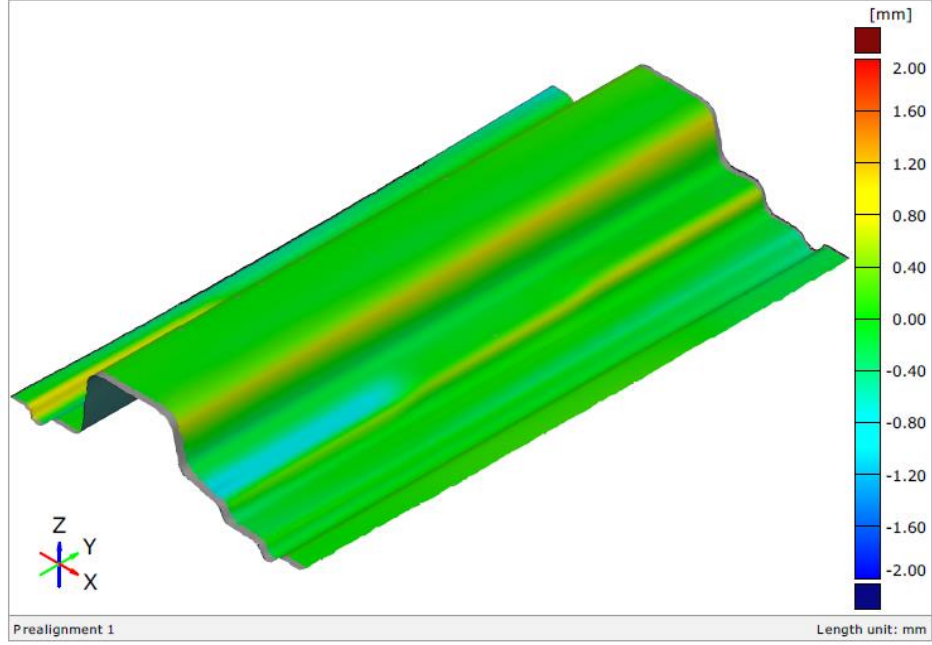


Şekil 4.70. AA5182 için Tarama Datası ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Alignment)

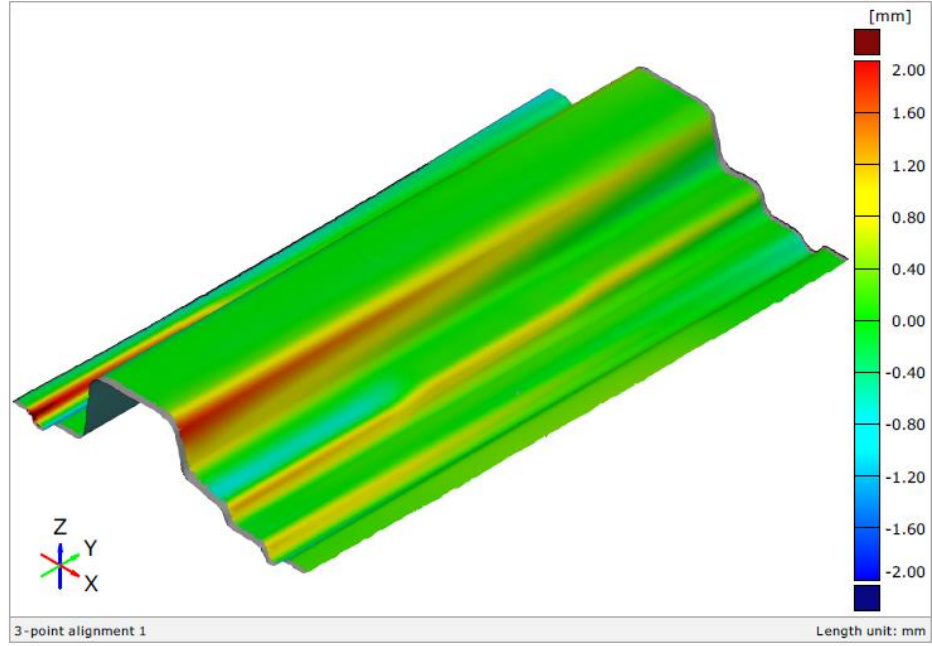


Şekil 4.71. AA5182 için Tarama Datası ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment)

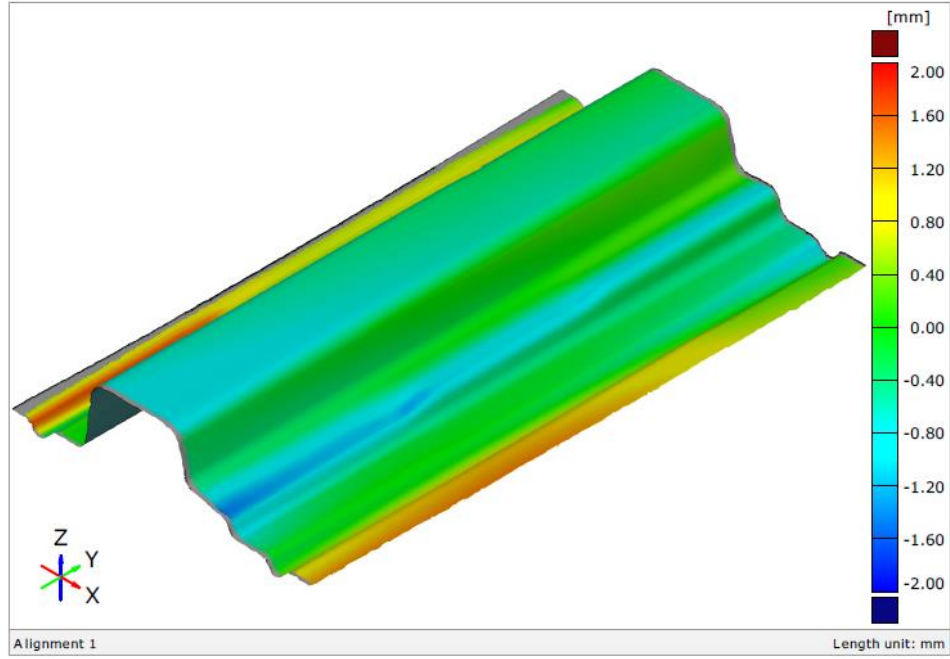
AA5754 malzemesi için yapılan kıyaslama çalışmaları Şekil 4.72, Şekil 4.73, Şekil 4.74 ve Şekil 4.75’de sunulmuştur.



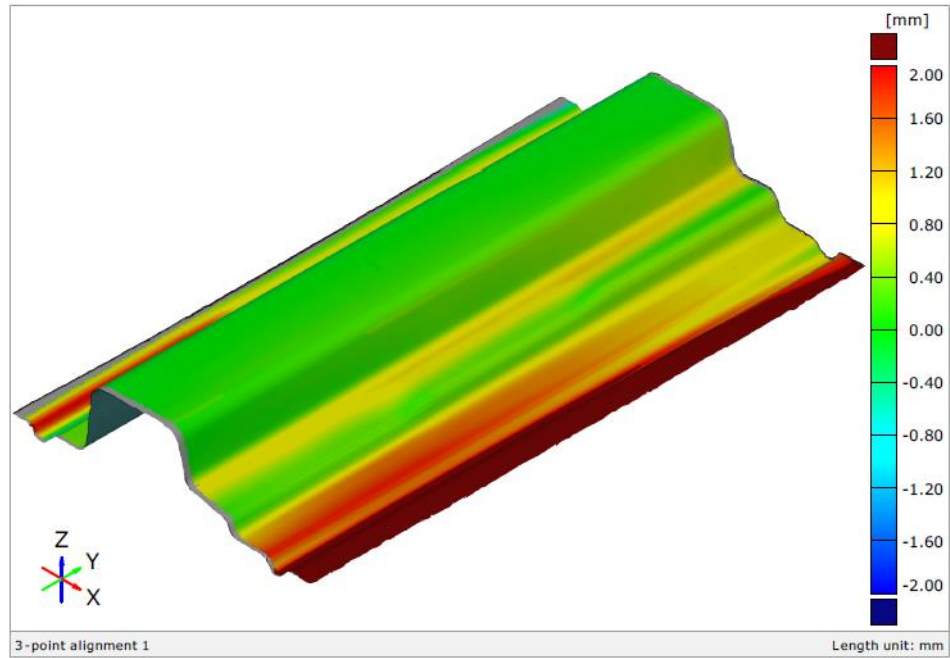
Şekil 4.72. AA5754 için Tarama Datası ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Alignment)



Şekil 4.73. AA5754 için Tarama Datası ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment)

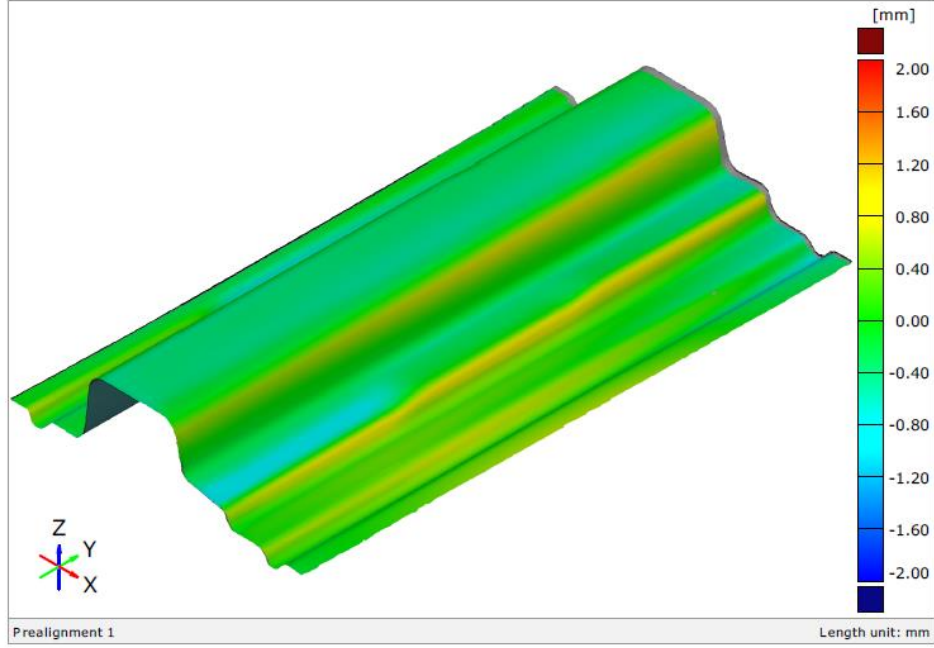


Şekil 4.74. AA5754 için Tarama Datası ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Alignment)

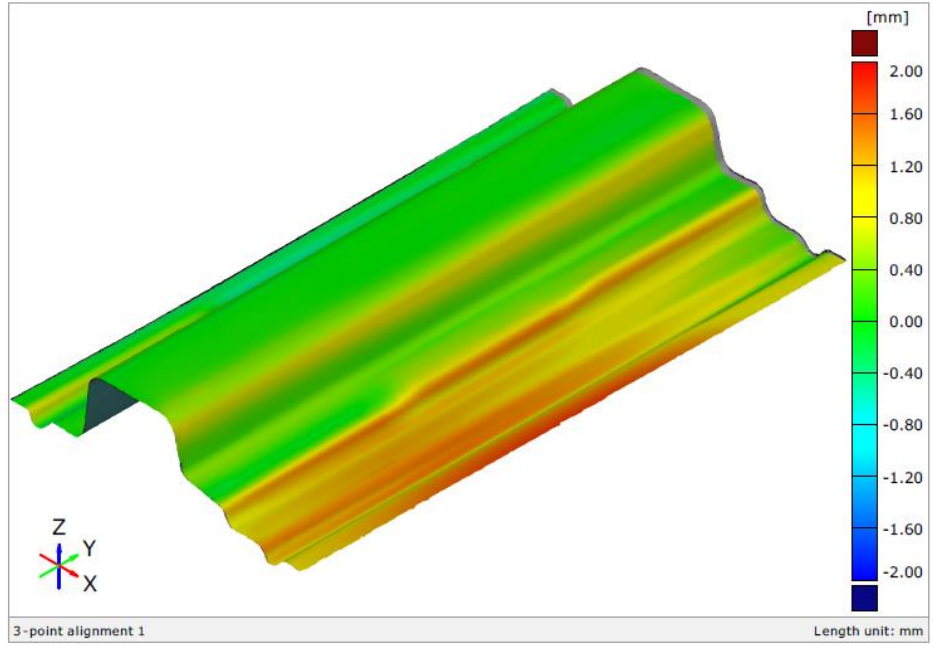


Şekil 4.75. AA5754 için Tarama Datası ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment)

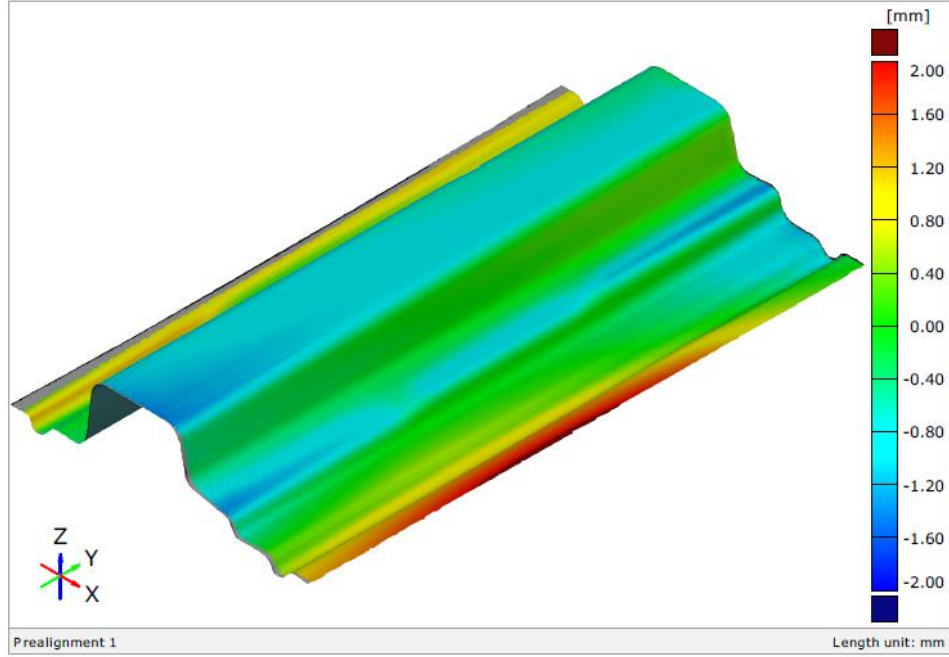
AA6016 malzemesi için yapılan kıyaslama çalışmaları Şekil 4.76, Şekil 4.77, Şekil 4.78 ve Şekil 4.79'da sunulmuştur.



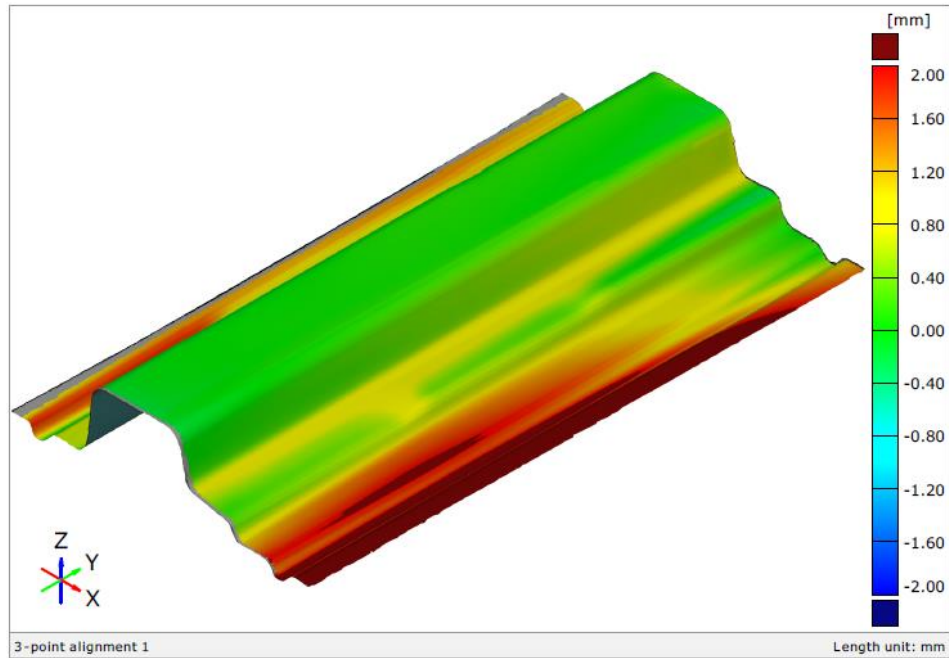
Şekil 4.76. AA6016 için Tarama Datası ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Alignment)



Şekil 4.77. AA6016 için Tarama Datası ve Y-U Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment)



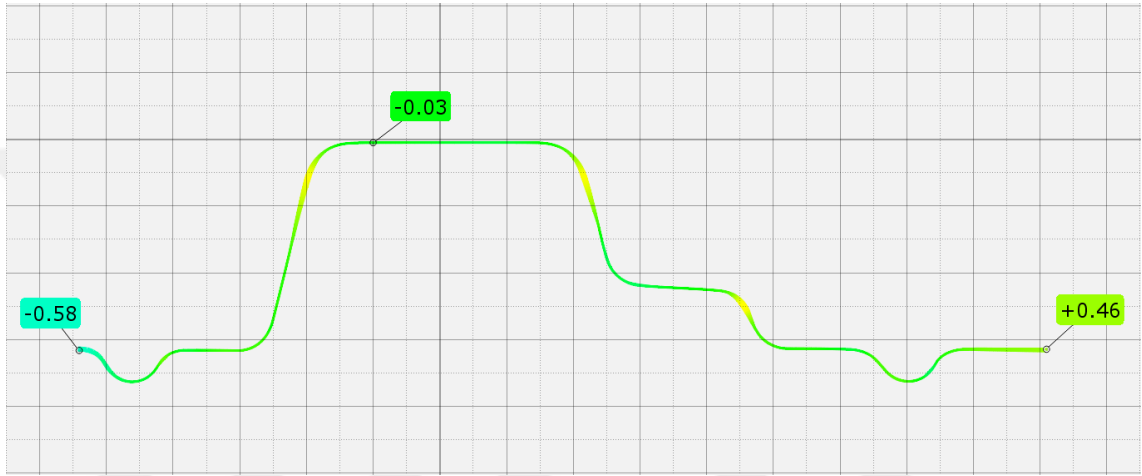
Şekil 4.78. AA6016 için Tarama Datası ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (Best-Fit Alignment)



Şekil 4.79. AA6016 için Tarama Datası ve Barlat89 Modeli Simülasyon Çıktılarının Kıyaslanması (3 Point Alignment)

Çalışma sonucunda elde edilen çıktıların daha basit incelenebilmesi amacıyla kıyaslama yapılan parçaların tam orta noktasından kesit görünüş alınarak iki kanat ucundaki geri yaylanma farkları ortaya konulmuştur. Bütün kesitlerde parçanın üst noktası referans olarak kabul edilmiştir.

AA5182 malzemenin Y-U modeli ve Barlat modeliyle yapılan analizlerin referans data ile kıyaslaması Şekil 4.80 ve Şekil 4.81’de sunulmuştur.

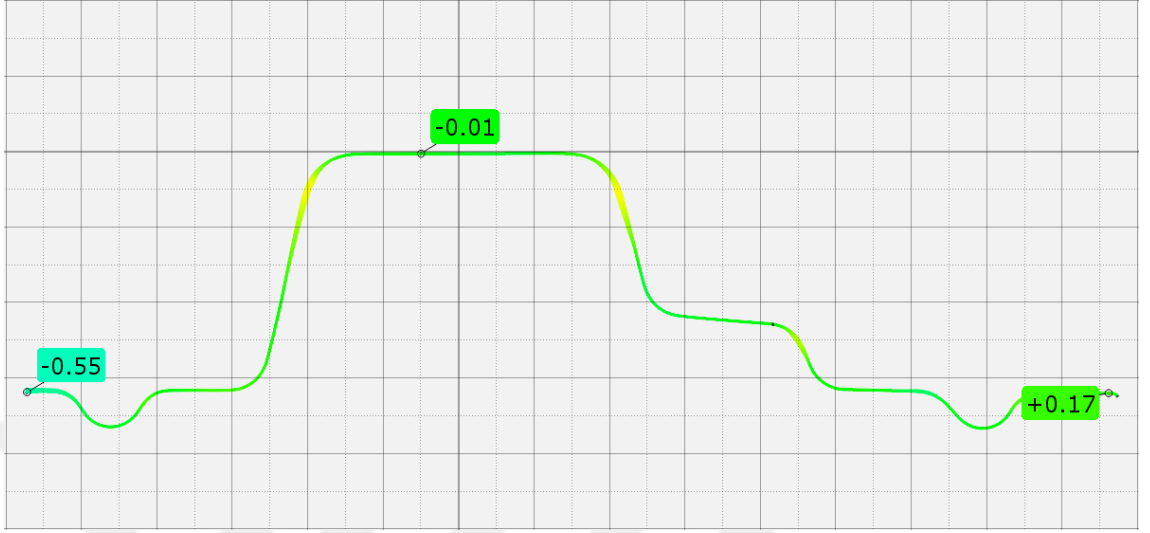


Şekil 4.80. AA5182 Y-U Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar

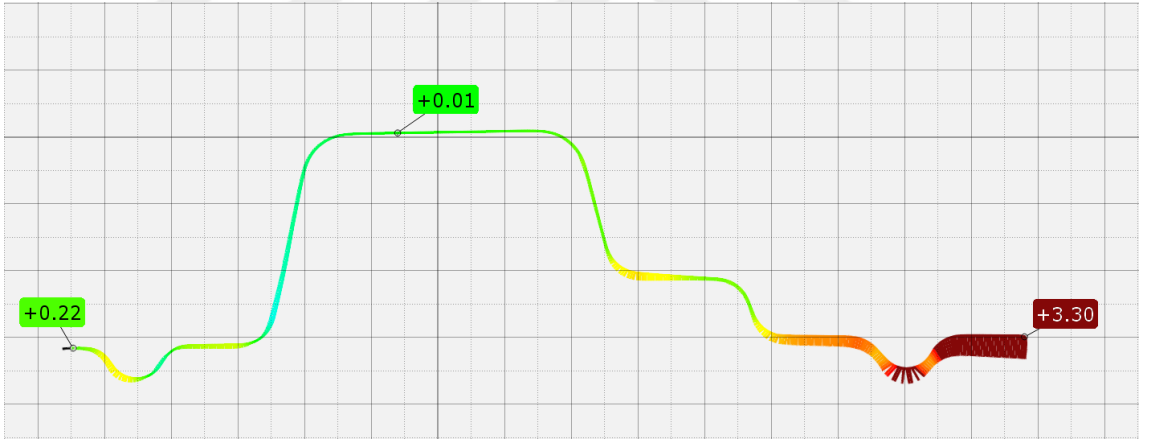


Şekil 4.81. AA5182 Barlat Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar

AA5754 malzemenin Y-U modeli ve Barlat modeliyle yapılan analizlerin referans data ile kıyaslaması Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’de sunulmuştur.

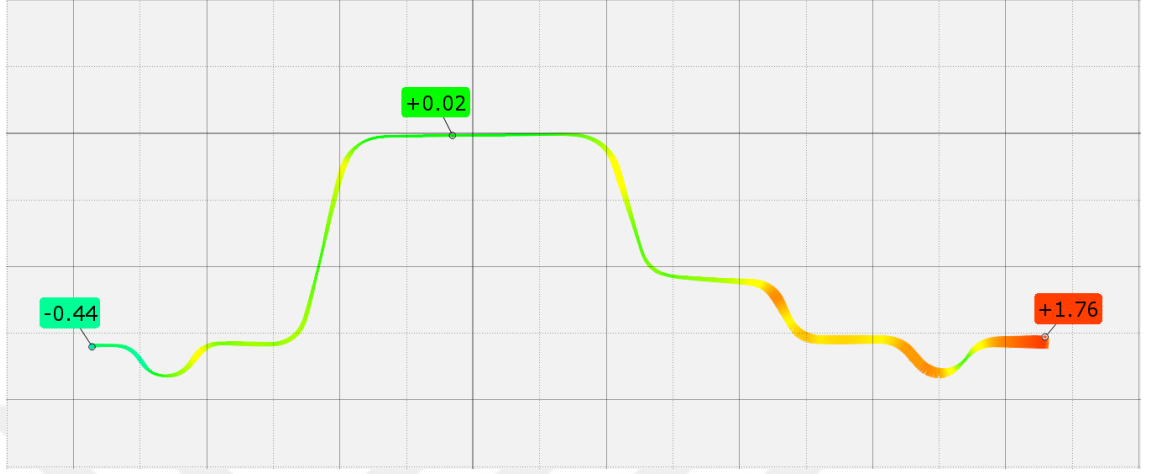


Şekil 4.82. AA5754 Y-U Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar

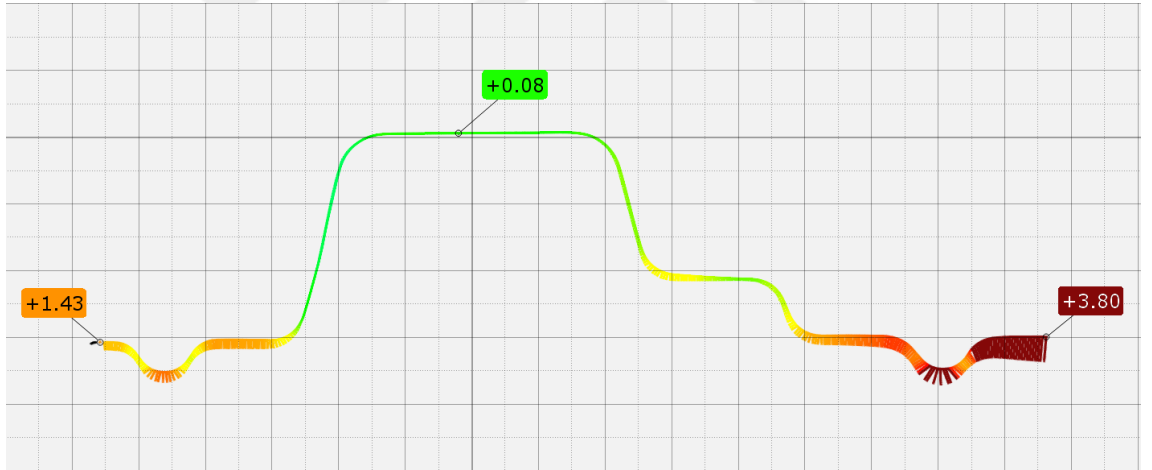


Şekil 4.83. AA5754 Barlat Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar

AA5182 malzemenin Y-U modeli ve Barlat modeliyle yapılan analizlerin referans data ile kıyaslaması Şekil 4.84 ve Şekil 4.85’de sunulmuştur.



Şekil 4.84. AA6016 Y-U Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar



Şekil 4.85. AA6016 Barlat Modeli Simülasyonu Geri Yaylanma Tahminindeki Sapmalar

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada alüminyum AA5182, AA5754 ve AA6016 malzemelerinin geri yaylanma davranışı ve simülasyonda kullanılan malzeme modellerinin tahmin doğruluğu incelenmiştir.

Y-U model parametreleri çevrimli çekme-basma testi ve üç noktalı eğme bükme testi ile yüksek doğruluklu olarak elde edilmiştir.

Sac şekillendirme simülasyonlarında yüksek doğruluk için malzeme parametreleri deneysel datalar ile belirlenmelidir.

Malzeme şekillendirme analizlerinde gerinim arttıkça geri yaylanma davranışının azaldığı gözlemlenmiştir.

Oluşturulan Y-U modeli ile Ls-Dyna'da yapılan simülasyon sonuçlarının Barlat 89 modeli ve Autoform kinematik pekleşme modülü ile yapılan simülasyonlara göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Şekil 4.81'de Barlat modeli ile standart malzeme parametreleri ile yapılan simülasyonlarda 5mm geri yaylanma farkı görülmüştür. Şekil 4.80'de ise Y-U modeli ve deneysel parametreler ile oluşturulan simülasyonda geri yaylanma tahminindeki sapma 0,46mm olarak bulunmuştur. Y-U modelinde geri yaylanma tahmin doğruluğunun hedeflenen değer olan %90'ın üzerinde sonuç verdiği görülmüştür.

Y-U modelinde parametreleri oluşturulurken beş farklı çekme-basma eğrisi kullanılmıştır. Barlat modelinde ise sadece bir eğri üzerinden parametreler belirlenmiştir. Bu nedenle Y-U modeli pekleşme karakteristiğini daha iyi ifade etmektedir.

Alüminyum sac parçalarda şekillendirme analizlerinde pekleşme durumunun mutlaka gözönüne alınarak uygun malzeme modellerinin deneysel veriler ile elde edilerek kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Anonim, 2008.** Process validation and springback. Autoform, Pfaffenhofen, Almanya.
- Banabic, D., 2010.** Sheet metal forming processes. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 301s.
- Başer, T. A., 2012.** Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635): 51–58.
- ESI GROUP., 2009.** Important influences on springback simulations with PAM-STAMP. <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE02110949> - (Erişim tarihi: 20.01.2017)
- Ghaei, A., 2010.** Modeling springback in stamped automotive structures. *PhD Thesis*, Faculty of Graduate Studies through Mechanical, Automotive & Materials Engineering, University of Windsor, Kanada.
- Ozturk, F., Toros, S., Kilic, S., 2014.** Effects of anisotropic yield functions on prediction of forming limit diagrams of DP600 advanced high strength steel, *Procedia Eng.*, 81(Ekim): 760–765.
- Singh, H., 2012.** Mass reduction for light-duty vehicles for model years 2017-2025 final report. NHTSA Rep. No. DOT HS 811 666, USA.
- Tamura, S., Sumikawa, S., Uemori, T., Hamasaki, H., Yoshida, F., 2011.** Experimental observation of elasto-plasticity behavior of type 5000 and 6000 aluminum alloy sheets. *Mater. Trans.*, 52(5):868–875.
- Yoshida, F., Uemori, T., Fujiwara, K., 2002.** Elastic – plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension – compression at large strain. *Int. J. Plast.*, 18:633–659.
- Zhou, X., 1999.** Numerical prediction of springback in u-channel forming of aluminum tailor welded blanks. Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Kanada.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Taner Karagöz

Doğum Yeri ve Tarihi : Burgaz 26/05/1987

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Gazi Anadolu Lisesi (2001 - 2005)

Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi – Makina Mühendisliği (2005 - 2010)

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Konstrüksiyon ve İmalat (2014 - Devam)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Coşkunöz Kalıp Makina A.Ş (2012 - Devam)

İletişim (e-posta) : tnrkrz@gmail.com

Yayınları* :

Karagöz, T., Toros, S., Yiğitoğlu, E., Karşı, A. 2016. 6016-T4 Al alaşımının şekillendirilebilme ve geri esneme özelliklerinin deneysel ve nümerik incelenmesi. Alus 17, 5-6 Ekim, 2016, İstanbul, Türkiye.

Karşı, A., Karagöz, T., Yenice, M. The effect of cutting tool angle and coating condition on burr formation of Al-6016 alloy. International Conference On Advances In Automotive Technologies 2016, 11-14 October 2016, Yıldız Technical University, İstanbul, Turkey.

Karagöz, T., Karşı, A., Yenice, M. Alüminyum sac metal kalıpları tasarımı ve üretimi. 15-16 Mart 2017, Uludağ Üniversitesi 6. Bilgilendirme ve Arge Günleri, 2017, Bursa, Türkiye.

Karagöz, T., Karşı, A., Toros, S., Yenice, M. 6016-T4 alüminyum alaşımında sac malzemenin kesme davranışının incelenmesi ve geliştirilmesi. 15-16 Mart 2017, Uludağ Üniversitesi 6. Bilgilendirme ve Arge Günleri, 2017, Bursa, Türkiye.

Karagöz, T., Karşı, A., Toros, S., Yenice, M. Al-Mg-Si alaşımında geri yaylanma miktarının farklı malzeme modelleriyle incelenmesi ve tahmin doğruluğunun geliştirilmesi. 15-16 Mart 2017, Uludağ Üniversitesi 6. Bilgilendirme ve Arge Günleri, 2017, Bursa, Türkiye.

Karagöz, T., Karşı, A., Yenice, M. Otomotiv sac metal şekillendirmede sanal analiz metodolojisi. 15-16 Mart 2017, Uludağ Üniversitesi 6. Bilgilendirme ve Arge Günleri, 2017, Bursa, Türkiye.