

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**KATMANLI SACLARDAN DERİN ÇEKİLEREK PARÇA
ÜRETİMİ VE ŞEKİL ALMA KABİLİYETİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Doktora Tezi

Cengiz Görkem DENGİZ

Danışman

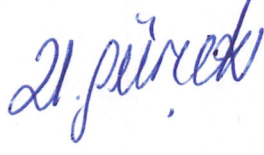
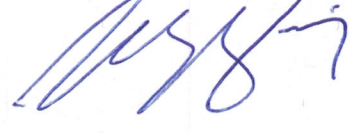

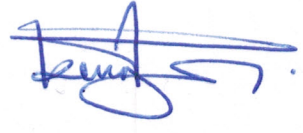

Doç. Dr. Kemal YILDIZLI

Bu tez TÜBİTAK 2211-A bursu, YÖK ÖYP ve OMU BAP tarafından desteklenmiştir.

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Cengiz Görkem Dengiz tarafından, Doç. Dr. Kemal YILDIZLI danışmanlığında hazırlanan “Katmanlı Saclardan Derin Çekilerek Parça Üretimi ve Şekil Alma Kabiliyetinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 26/02/2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Genççağ PÜRÇEK Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye (Danışman)	Doç. Dr. Kemal YILDIZLI Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Prof. Dr. Birol ELEVİLİ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
Üye	Doç. Dr. Serkan TOROS Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY
... /... / 2021
Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

22/01/2021
Cengiz Görkem DENGİZ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Katmanlı Saclardan Derin Çekilerek Parça Üretimi ve Şekil Alma Kabiliyetinin Araştırılması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 23/11/2020 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 5

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

22/01/2021
Doç. Dr. Kemal YILDIZLI

ÖZET

KATMANLI SACLARDAN DERİN ÇEKİLEREK PARÇA ÜRETİMİ VE ŞEKİL ALMA KABİLİYETİNİN ARAŞTIRILMASI

Cengiz Görkem DENGİZ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Şubat/2021

Danışman: Doç. Dr. Kemal YILDIZLI

Ara yüzeyleri yapıştırma, kaynak, haddeleme gibi yöntemler ile birleştirilerek iki farklı metal sacdan üretilmiş, birlikte yük taşıyan, şekil alabilen bileşik saclar çift katmanlı (bimetalik) sac olarak isimlendirilir. Bu tür katmanlı saclar, hafif ve dayanıklı olmaları sebebiyle son yıllarda otomotiv endüstrisinde taban, tavan ve kaput sacı olarak kullanılmaktadır. Bu sacların şekil alma kabiliyetlerinin otomotiv endüstrisi için düşük olması, kaynak edilememesi, şekillendirme sırasında veya sonrasında katmanlar arası ayrılmaların oluşması katmanlı sacların yaygınlaşması için aşılması gereken başlıca sorunlardır. Bu doktora tezinde, çelik (Çe) ve alüminyum (Al) saclar, poliüretan esaslı bir yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Çift katmanlı saca ve onu oluşturan tek saclara çekme testi yapılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Düzlem dışı gerdirme testleri ile saclara ait şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD) elde edilmiştir. Ayrıca tek ve çift katmanlı saclar derin çekilerek limit çekme oranları (LÇO) hesaplanmış ve tek saclarınkı ile karşılaştırılmıştır. Derin çekilen çift katmanlı parçalardan kesilen numunelere sertlik ölçümü yapılarak bölgesel olarak pekleşme durumları belirlenmiştir. Derin çekme işlemi, sonlu elemanlar metodu ile ABAQUS programında modellenerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, çift katmanlı sacların mekanik dayanımları, onu oluşturan iki metal sacın mekanik dayanımlarının arasında çıkmıştır. Kompozit malzemeler için kullanılan karışım kuralı ile çift katmanlı sacların mekanik özellikleri yaklaşık %3'lük bir hata payı ile hesaplanmıştır. Çift katmanlı sacın soyulma direnci 10 N/mm, kayma dayanımı ise yaklaşık 3.1 MPa olarak belirlenmiştir. Çift katmanlı sacların ŞSD'leri dış katmandaki sacın ŞSD'sine yakın çıktığı belirlenmiştir. Düzlem şekil değiştirme halinde, Çe sacın limit şekil değiştirme miktarı 0.310 iken, Al sacın 0.210 saptanmıştır. Çift katmanlı Al/Çe sac için (Al sac zımba ile temas halinde) 0.295, Çe/Al dizilimi için 0.267 bulunmuştur. Diğer taraftan çift katmanlı saclar derin çekilerek LÇO'ları belirlenmiş ve işlem pencereleri oluşturulmuştur. Çift katmanlı sacların LÇO'larının iç katmandaki sacın LÇO'suna yakın olduğu belirlenmiştir. Buna göre Çe sac için maksimum LÇO 2.14 iken, Al sac için bu değer 2.27 olarak belirlenmiştir. Çift katmanlı sacda ise Al/Çe dizilimde 2.25 iken, Çe/Al diziliminde 2.16 olarak saptanmıştır. ABAQUS ile çift katmanlı saclar 4 farklı çift katman tasarımı ile modellenerek gerçeğe en yakın sonucu veren çift katman modeli %8'lik bir hata payı ile belirlenmiştir. Çift katmanlı sacların maksimum 90 kN baskı plakası kuvveti altında, 1.9 LÇO ile hasar oluşmadan derin çekildiği tespit edilmiştir. Tek sacların hadde yönüne göre 0°-0° veya 0°-90° şeklinde dizilmesi ile oluşturulan Al/Çe çift katmanlı saclarda kulak yüksekliklerinde azalma görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: katmanlı sac, derin çekme, plastik şekil verme, sonlu elemanlar metodu, limit çekme oranı

ABSTRACT

MANUFACTURING OF CYLINDRICAL CUP BY DEEP DRAWING FROM BIMETALLIC SHEETS AND INVESTIGATION OF FORMABILITY

Cengiz Görkem Dengiz

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Ph. D., February/2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kemal YILDIZLI

Bimetallic sheets are made of two different sheet metals which are combined with methods such as bonding, welding, rolling. The bimetallic sheets carries loads together and it can take final desired form. Such layered sheets are used as floor, cladding, ceiling and hood sheets especially in the automotive industry in recent years due to their light weight and durability. The low formability, poor weldability, delamination between each metal sheet layers during forming are the fundamental problems that must be overcome in order to the layered sheets to become widespread for automotive industry. In this thesis, steel (St) and aluminium (Al) sheets were bonded using a polyurethane based adhesive. The mechanical properties of the bimetallic sheet and the monolithic sheets were determined by uniaxial tensile tests. Forming Limit Diagram (FLD) of the mono and bimetallic sheets were plotted with out-of-plane formability tests. In addition, monolithic and bimetallic sheets were deep drawn and their limit drawing ratios (LDR) were calculated and compared to monolithic sheets. Local hardening conditions were determined by hardness measurements on samples cut from deep drawn bimetallic sheet pieces. The deep drawing process was modelled via ABAQUS program. FEM analysis were compared with the experimental deep drawing results. As a result, it was determined that the mechanical strengths of double-layer sheets are between the mechanical strengths of the monolithic sheets. By the mixing rule used for metal composite layered materials, the mechanical properties of bimetallic sheets can be calculated by error of approximately 3%. The peel resistance of the double layer sheet was determined as 10 N/mm, and the shear strength was determined as almost 3.1 MPa. The FLDs of the bimetallic sheets are close to the FLD of the sheet in the outer layer. In case of plane strain, the limit strain for St was 0.310, while limit strain of Al sheet was determined as 0.210. For bimetallic sheets, it was found to be 0.295 for Al/St (Al inner layer) and 0.267 for St/Al. On the other hand, the LDRs of the bimetallic sheets and the processing windows were determined by deep drawing. The LDR of the bimetallic sheets were close to the LDR of the sheet in the inner layer. Accordingly, while the maximum LDR for St was 2.14, this value for Al was determined as 2.27. In the bimetallic sheet, it was determined as 2.25 in the Al/St lay-up and 2.16 in the St/Al lay-up. By ABAQUS, double-layer sheets were modelled with 4 different bimetallic sheet designs and the model that gives the most realistic deep drawn cup result with an error of approximately 8%. In addition, a decrease in ear heights was observed in the Al/St bimetallic sheets formed by arranging the monolithic sheets in the form of 0° - 0° or 0° - 90° depending on the rolling direction.

Keywords: Bimetallic sheet, Deep drawing, Formability, FEM, Limit drawing ratio

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Akademik hayatıma başladığım 2012 yılından buyana beni plastik şekil verme tekniklerine yönlendiren, tüm lisansüstü eğitim hayatım boyunca yardımlarını ve tecrübelerini benimle paylaşan ve bu süreçte bana her türlü desteği veren danışmanım Sayın Doç. Dr. Kemal YILDIZLI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın başından itibaren değerli fikirleri ve yönlendirmeleri ile tezimin kalitesinin artmasına katkı sağlayan, ayrıca çalışmada kullandığım test cihazlarını bölümümüze kazandıran Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı Başkanımız Sayın Prof. Dr. Erdem KOÇ'a teşekkür ederim. Tez izleme sürecim boyunca değerli fikirleri ile çalışmama katkı veren Sayın Prof. Dr. Birol ELEVLİ'ye teşekkür ederim.

Değerli fikirleri ve desteği için Sayın Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ'e; doktora süreci boyunca tecrübelerini paylaşan değerli arkadaşım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mahmut Can ŞENEL'e; doktora çalışmalarım sırasında karşılaştığım problemleri her daim dinleyerek değerli fikirlerini benimle paylaşan kıymetli arkadaşım Arş. Gör. Fevzi ŞAHİN'e; çalışmalarım zaman ayırarak katkı sağlayan değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Onur YONTAR'a ve Mak. Yük. Müh. Bilgehan Cem TURAN'a; çalışmalarım esnasında bana yardımcı olan değerli arkadaşım Mak. Yük. Müh. Cüneyt KARACA ve Oktay ÖZÜBEK'e teşekkür ederim.

Doktora sürecinde desteklerini benden esirgemeyerek, her zaman yanımda olan ve çalışmalarım için beni yüreklendiren değerli eşim ve meslektaşım Emine Özlem DENGİZ'e ve varlığıyla bize en büyük mutluluğu veren canım kızım İnci Deniz DENGİZ'e; beni bugünlere getiren ve her zaman yanımda olan değerli anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

Tez çalışmama desteklerinden dolayı Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bu tez TÜBİTAK tarafından 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı 2014/2 (Başvuru numarası: 1649B031405081) ile desteklenmiştir.

Bu tez çalışması, Yüksek Öğretim Kurulu (YÖK) Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında hazırlanmıştır.

PYO.MUH.1905.16.002 nolu Bilimsel Araştırma Projesi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

Cengiz Görkem DENGİZ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI.....	İ
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	İİ
ÖZET	İİİ
ABSTRACT.....	İV
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	İX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIV
TABLolar DİZİNİ	XX
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	3
1.2. Tez Kapsamı	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
2.1. Çift katmanlı (Bimetalik) Saclar Üzerinde Yapılmış Çalışmalar	6
2.2. Katmanlı Saclar Üzerine Yapılmış Çalışmalar	14
2.3. Sandviç Paneller Üzerine Yapılmış Çalışmalar	19
2.4. Elyaf-Metal Lamineler Üzerine Yapılmış Çalışmalar	25
2.5. Literatür Hakkında Genel Değerlendirme	26
3. KATMANLI SACLAR.....	30
3.1. Katmanlı Sacların Özellikleri.....	30
3.2. Katmanlı Sacların Üretim Yöntemleri	31
3.2.1. Kaynaklı Birleştirme.....	31
3.2.2. Şekil Bağlı Birleştirmeler	32
3.2.3. Yapıştırma	34
3.3. Ticari Olarak Katmanlı Saclar	36
3.4. Metal-Polimer Adhezyonu	39
3.5. Katmanlı Sacın Yapışma Dayanımlarının Belirlenmesinde Kullanılan Testler	41
3.5.1. T-Soyulma Testi	41
3.5.2. Tek Bindirme Bağlantısı Testi	43
4. DERİN ÇEKME.....	45
4.1. Derin Çekme Yöntemleri	48
4.1.1. Hidro Mekanik Derin Çekme	48
4.1.2. Hidro Şekillendirme	49
4.1.3. Kademeli Derin Çekme	50
4.1.4. Ters Çevirip Tekrar Çekme	50
4.2. Derin Çekmeyi Etkileyen Faktörler	51
4.2.1. Zımba ve Kalıp Kavisleri.....	52
4.2.2. Zımba ve Kalıp Arası Boşluk	52
4.2.3. Çekme Hızı.....	52
4.2.4. Arayüzeyde Sürtünme ve Yağlama Durumu	53
4.2.5. Sac Metalin Kalıp İçerisine Akışının Kontrolü.....	53
4.2.6. Metalik Malzeme Özellikleri	54
4.3. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar	55
4.3.1. Yırtılmalar	55
4.3.2. Kırışma	56
4.3.3. Yerel İncelmeler	57
4.3.4. Kulaklanma	58
4.3.5. Yanlış Merkezleme.....	59
4.3.6. Portakal Kabuğu Görünümü	59
4.4. Derin Çekme İşlemlerinde Kullanılan Pres Çeşitleri.....	60
4.4.1. Mekanik Presler	60
4.4.2. Hidrolik Presler	63

4.5. Derin Çekme Hesaplamaları	64
4.5.1. Limit Çekme Oranının Belirlenmesi	64
4.5.2. Şekillendirme Sınır Diyagramları	68
5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER	87
5.1. Çalışmada Kullanılan Sac Metaller	87
5.1.1. Çelik Sac	87
5.1.2. Alüminyum Sac	90
5.2. Çift Katmanlı Sacların Üretiminde Kullanılan Yapıştırıcı	92
6. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	93
6.1. Çift Katmanlı Sac Üretim Yöntemi	94
6.2. Sac Metallerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	95
6.2.1. Gerilme ve Şekil Değiştirme Diyagramları	96
6.2.2. Pekleşme Üstelinin Belirlenmesi	98
6.2.3. Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi	99
6.3. T-soyulma ve Bindirme bağlantısı testleri	102
6.4. Şekillendirme İşlemlerinde Kullanılan Hidrolik Pres	103
6.5. Düzlem Dışı Gerdirme Testleri	105
6.6. Derin Çekme İşlemi	110
6.7. V-Bükme İşlemi	114
6.8. Sertlik Ölçümü	116
7. DENEYSSEL BULGULAR.....	119
7.1. Çift Katmanlı Sacın Yapışma Özelliklerinin Belirlenmesi	119
7.1.1. T-Soyulma Testi	119
7.1.2. Tek Bindirme Bağlantısı Testi	120
7.2. Tek Sacların Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramları	122
7.3. Çift Katmanlı Sacların Gerilme-Şekil Değiştirme Diyagramları	127
7.4. Tek Sacların Pekleşme Üstelinin Belirlenmesi	130
7.5. Çift katmanlı Sacların Pekleşme Üstelinin Belirlenmesi	132
7.6. Tek Sacların Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi	136
7.7. Çift katmanlı Sacların Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi	138
7.8. Tek ve Çift katmanlı Sacların $\dot{\epsilon}$ SD'lerinin Belirlenmesi	141
7.9. Tek ve Çift katmanlı Sacların Derin Çekilmesi	144
7.9.1. Tek Sacların Derin Çekilerek Limit Çekme Oranlarının Belirlenmesi	145
7.9.2. Çe/Al Çift katmanlı Sacının Derin Çekilerek Limit Çekme Oranının Belirlenmesi	148
7.10. Tek ve Çift Katmanlı Sacların Geri Esneme Durumları	155
7.11. Derin Çekme Yöntemiyle Üretilmiş Ürünlerin Yüzey Sertlik Değerleri	158
8. ÇİFT KATMANLI SAACLARIN SONLU ELEMANLAR METODUYLA MODELLENMESİ.....	164
8.1. Sonlu Elemanlar Metodu ile Modelleme	166
8.1.1. Sacların Katı Modellenmesi	166
8.1.2. Adım Süresinin Belirlenmesi	167
8.1.3. Ağ Boyutunun Optimizasyonu	169
8.1.4. Yüzeyler Arası Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi	170
8.1.5. Sac Yüzeyler Arası Yapışma Modeli	171
8.1.6. Sonlu Elemanlar Metodu Modellerinin Doğrulanması	181
8.2. Derin Çekme İşleminin Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi	187
8.2.1. Çift katmanlı Saclarda Zimba ile Temas Eden Yüzeyin Sac Kalınlığına Etkisi	187
8.2.2. Çift Katmanlı Saclarda Zimba ile Temas Eden Yüzeyin Zimba Kuvvetine Etkisi	189
8.2.3. Çift katmanlı Saclarda Zimba ile Temas Eden Yüzeyin LÇO'ya Etkisi	190
8.2.4. Çift katmanlı Saclarda Zimba ile Temas Eden Yüzeyin ve Sacların Hadde Yönünün Birbirine Göre Açısal Pozisyonunun Kulaklanmaya Etkisi	196
9. TARTIŞMA.....	201

9.1. Çift Katmanlı Sac Üretimi	201
9.2. Çift Katmanlı Sacların Mekanik Özellikleri.....	204
9.3. Çift Katmanlı Sacların Şekillendirme Sınır Diyagramları	205
9.4. Çift Katmanlı Sacların Derin Çekilmesi.....	206
9.4.1. Limit Çekme Oranları.....	206
9.4.2. Çift Katmanlı Sacların Zimba Temas Yüzeyinin Sac Kalınlığına Etkisi	207
9.4.3. Çift Katmanlı Saclarda Kulak Yükseklikleri	208
9.5. Çift Katmanlı Sacların Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi.....	208
10. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	210
KAYNAKLAR	216
EKLER	229
ÖZ GEÇMİŞ	246

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

a	Elips uzun eksen	mm
A₀	Çekme numunesi ilk kesit alanı	mm ²
A_f	Çekme numunesi son kesit alanı	mm ²
Al	Alüminyum	-
b	Soyulma testi numunesi genişliği	mm
b	Elips kısa eksen	mm
C	Karbon	-
CO₂	Karbondioksit	-
Cr	Krom	-
Cu	Bakır	-
D	Batıcı uç bilya çapı	mm
d	Yüzey sertlik izinin çapı	mm
d₀	Markalama dairesinin çapı	mm
D₀	Sac numune çapı	mm
d₁	Elipsin uzun eksen	mm
d₂	Elipsin kısa eksen	mm
D_p	Pul çapı	mm
D_z	Zimba çapı	mm
e	Şekil değiştirme	mm/mm
E	Elastisite modülü	GPa
e_i	İlk şekil değiştirme	mm/mm
F	Kuvvet	N
Fe	Demir	-
F_{maks}	Maksimum soyulma kuvveti	N
G₁	1 yönünde Griffith kırılma enerjisi	J/m ²
G₁^C	1 yönünde kritik Griffith kırılma enerjisi	J/m ²
G₂	2 yönünde Griffith kırılma enerjisi	J/m ²
G₂^C	2 yönünde kritik Griffith kırılma enerjisi	J/m ²
G₃	3 yönünde Griffith kırılma enerjisi	J/m ²
G₃^C	3 yönünde kritik Griffith kırılma enerjisi	J/m ²
HB	Brinell sertliği	HB
HK	Knoob sertliği	HK
HR	Rockwell sertliği	HR
HV	Vickers sertliği	HV
I	Kesit atalet momenti	mm ⁴
k	Sabit	-
K	Mukavemet katsayısı	MPa

L	Sertlik izi köşegen uzunluğu	mm
l	Çekme numunesi uzunluğu	mm
l₀	Çekme numunesi ilk boyu	mm
l_s	Çekme numunesi son boyu	mm
Mg	Magnezyum	-
Mn	Mangan	-
n	Pekleşme üsteli	-
N	Azot	-
NO_x	Azot emisyonları	-
P	Batıcı uca uygulanan yük	N
P	Fosfat	-
P_a	Soyulma direnci	N
R	Anizotropi katsayısı	-
r	Yarıçap	mm
R₀	Hadde yönüne paralel anizotropi katsayısı	-
R₄₅	Diagonal yöndeki anizotropi katsayısı	-
R₉₀	Hadde yönüne dik yöndeki anizotropi katsayısı	-
\bar{R}	Ortalama anizotropi katsayısı	-
S	Kükürt	-
Si	Silisyum	-
ŞSE₀	Düzlem şekil değiştirme durumunda büyük şekil değiştirme miktarı	-
t	Sac et kalınlığı	mm
t₀	Sac ilk kalınlık	mm
Ti	Titanyum	-
V	Hacim	mm ³
w	Genişlik	mm
w₀	İlk genişlik	mm
x, y, z	Referans eksen takımı	-
x', y', z'	θ açısı kadar döndürülmüş eksen takımı	-
Zn	Çinko	-
1, 2, 3	Asal eksen takımı	-
Δl	Uzama miktarı	mm
ΔR	Düzlemsel anizotropi katsayısı	-
ε	Şekil değiştirme	mm/mm
ε_{ger}	Gerçek şekil değiştirme	mm/mm
ε_k	Kopma uzaması	mm/mm
ε_l	Uzunluk yönündeki şekil değiştirme	mm/mm
ε_{müh}	Mühendislik şekil değiştirmesi	mm/mm
ε_t	Kalınlık yönündeki gerçek şekil değiştirme	mm/mm
ε_w	Genişlik yönündeki gerçek şekil değiştirme	mm/mm
μ	Sürtünme katsayısı	-

$\sigma_{\text{ç}}$	Çekme dayanımı	MPa
σ_{ger}	Gerçek gerilme	MPa
$\sigma_{\text{müh}}$	Mühendislik gerilmesi	MPa
$\tau_{x'y'}$	x'y' yönlü kayma gerilmesi	MPa
τ_{xy}	xy yönlü kayma gerilmesi	MPa
τ_{xz}	xz yönlü kayma gerilmesi	MPa
τ_{yz}	yz yönlü kayma gerilmesi	MPa
α	2 yönlü asal gerilmenin 1 yönlü asal gerilmeye oranı	-
β	2 yönlü asal şekil değiştirmenin 1 yönlü asal şekil değiştirmeye oranı	-
ϵ_0	İlk gerçek şekil değiştirme	mm/mm
ϵ_1	1 yönünde asal şekil değiştirme	mm/mm
ϵ_2	2 yönünde asal şekil değiştirme	mm/mm
ϵ_3	3 yönünde asal şekil değiştirme	mm/mm
θ	Dönme açısı	radyan
θ_a	Asal eksenin normal eksenler ile yaptığı açı	radyan
σ	Gerilme	MPa
$\sigma_{0.2}$	%0.2 kalıcı şekil değişimine karşılık gelen akma gerilmesi	MPa
σ_1	1 yönünde asal gerilme	MPa
σ_1^0	1 yönünde akma gerilmesi	MPa
σ_2	2 yönünde asal gerilme	MPa
σ_2^0	2 yönünde akma gerilmesi	MPa
σ_3	3 yönünde asal gerilme	MPa
σ_3^0	3 yönünde akma gerilmesi	MPa
σ_{aa}	Akma gerilmesi alt sınırı	MPa
$\sigma_{üa}$	Akma gerilmesi üst sınırı	
σ_k	Kopma gerilmesi	MPa
σ_x	x eksenini doğrultusunda normal gerilme	MPa
$\sigma_{x'}$	x' eksenini doğrultusunda normal gerilme	MPa
σ_y	y eksenini doğrultusunda normal gerilme	MPa
$\sigma_{y'}$	y' eksenini doğrultusunda normal gerilme	MPa
σ_z	z eksenini doğrultusunda normal gerilme	MPa
$\sigma_{z'}$	z' eksenini doğrultusunda normal gerilme	MPa

KISALTMALAR

AA	The Aluminum Association
ABS	American Bureau of Shipping
AFNOR	Association Française de Normalisation
AISI	American Iron and Steel Institute
ARALL	Aramid Reinforced Aluminum Laminate
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BS	British Standards
CAE	Computer Aided Engineering
CARALL	Carbon Reinforced Aluminium Laminate
Çe	Çelik
CEN	European Committee for Standardization
CF	Carbon Fibre
CZM	Cohezive Zone Model
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDS	Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis
EN	Euronorm
FE	Finite Element
FEA	Finite Element Analysis
FLD	Forming Limit Diagram
FML	Fiber Metal Laminate
GB	Guobiao Standards
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics
GLARE	Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy
HB	Hardness Brinell
HMDÇ	Hidro Mekanik Derin Çekme
HR	Hardness Rockwell
HV	Hardness Vickers
IS	Indian Standards
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
KİTAM	Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi
LÇO	Limit Çekme Oranı
M-K	Marciniak-Kuczisynski
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PA	Poliamit
PE	Polietilen
PEE	Polietilen Epoksi
PEEK	Polietereterketon

PET	Polietilen Tereftalat
PLA	Polilaktik Asit
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil Klorür
RINA	Registro Italiano Navale
SAE	Society of Automotive Engineers
SDO	Standards Development Organizations
SEM	Scanning Electron Microscope
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
ŞSE	Şekillendirme Sınır Eğrisi
ŞSE₀	Şekillendirme Sınır Eğrisinin En Alt Noktası
TFML	Titanium-Based Fiber Metal Laminates
TS	Türk Standardı
TWIP	Twinning Induced Plasticity
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
XRD	X-Ray Diffraction
YB	Ytterbium Standard
YBM	Yapışkan Bölge Modeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çift katmanlı sacların uygulama örnekleri (a) Hylite ile üretilmiş velomobile (b) VW Lupo kaputu (Burchitz et al., 2005).	2
Şekil 2.1. Sac metalleri ile oluşturulmuş tabakalı kompozitlerin sınıflandırılması	6
Şekil 3.1. Kendiliğinden delerek perçinleme işlemi (Lathabai et al., 2011).....	33
Şekil 3.2. Katmanlı sacların ezdirme yöntemi ile birleştirilmesi (Lin et al., 2018)	34
Şekil 3.3. Yerel olarak desteklenmiş sandviç plaka örneği (Sokolova et al., 2011)	35
Şekil 3.4. Alucobond® firmasının ürettiği farklı ürünler (GmbH, 2020)	38
Şekil 3.5. Farklı malzemelerin yapıştırıcı ile yapıştırılması (Palkowski et al., 2013).....	40
Şekil 3.6. T-soyulma test numunesi (ASTM D1876-08, 2015)	42
Şekil 3.7. T-soyulma testi sonucunda elde edilen örnek grafik	43
Şekil 3.8. Tek bindirme bağlantısı test numunesi	44
Şekil 3.9. Tek bindirme bağlantısı testinden elde edilen grafik	44
Şekil 4.1. Çift etkili hidrolik preste derin çekme işlemi (a) Çift etkili hidrolik pres (b) Derin çekme kalıbı	46
Şekil 4.2. Sac metalin derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi (a) Sacın sıkıştırılması (b) Kalıp içine hareketi (c) İşlem sonucunda üretilen kupa	47
Şekil 4.3. Hidro mekanik derin çekme işleminin şematik gösterimi (Alizad-Kamran et al., 2018)	48
Şekil 4.4. Hidro şekillendirme işleminin şematik gösterimi (Anonim, 2009)	49
Şekil 4.5. Tekrar çekme yönteminin şematik gösterimi	50
Şekil 4.6. Ters çevirip tekrar çekme yönteminin şematik gösterimi	51
Şekil 4.7. Süzdürme çubuklarının şematik gösterimi (a) derin çekme sırasında (b) derin çekme sonrasında ürün kenarlarının durumu.....	54
Şekil 4.8. Derin çekme sonrası yırtılma hasarına uğramış sac parça	56
Şekil 4.9. Flanş bölgesinde kırışıklık olan derin çekilmiş parça (Afshin and Kadkhodayan, 2015)	57
Şekil 4.10. Yerel incelme oluşmuş derin çekme ürünü (Bakhshi Jooybari et al., 2012).....	58
Şekil 4.11. Derin çekme işleminde kulak oluşumu (Kishor and Ravi Kumar, 2002)	58
Şekil 4.12. Sacın kalıp üzerine yanlış merkezlenmesi sonucunda oluşan ürün	59
Şekil 4.13. Derin çekilmiş ürünlerdeki portakal kabuğu görüntüsü (Prasad et al., 2018)	60
Şekil 4.14. Mekanik presler (a) Eksantrik pres (b) Mafsallı presin şematik görünümü (Schuler GmbH, 1998; Haksan, 2016)	61

Şekil 4.15. C-tipi eksantrik presin modifiye edilerek servo mekanik prese dönüştürülmesi (Halicioğlu et al., 2016)	62
Şekil 4.16. (a) Tek etkili hidrolik pres (b) Çift etkili hidrolik pres (Keliwei, 2019; Hidroliksan, 2019)	63
Şekil 4.17. Kısmen derin çekilmiş bir parçanın şematik görünüşü (Hosford and M., 2007)	65
Şekil 4.18. Şematik olarak LÇO ve baskı plakası kuvvetinin değişiminin gösteren çalışma bölgesi grafiği (Zhong-qin et al., 2007)	68
Şekil 4.19. Birim eleman üzerindeki gerilmeler (a) üç boyutlu gerilmeler (b) üç boyutlu birim eleman üzerinde düzlem gerilme hali.....	68
Şekil 4.20. İki boyutlu birim eleman üzerinde (a) düzlem gerilme hali (b) θ kadar döndürüldüğünde oluşan gerilmeler (c) düzlem gerilme hali için asal gerilmeler (Beer et al., 2012).....	69
Şekil 4.21. Sac levhada deformasyon altında asal gerilme ve şekil değiştirmeler (a) çekme testi (b) sac şekillendirme işlemlerindeki düzlem gerilme durumu (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002) .	71
Şekil 4.22. Keeler ve Goodwin tarafından bulunan şekillendirme sınır diyagramı örneği (Chang, 2013)	72
Şekil 4.23. ŞSD üzerindeki özel deformasyon halleri (Paul et al., 2013).....	74
Şekil 4.24. Yüksek yerel şekil değiştirmelerin olduğu 1984 model bir otomobil parçası (Emmens, 2011)	77
Şekil 4.25. Çentikli ve çentiksiz dikdörtgen numuneler (Banabic, 2010b)	79
Şekil 4.26. Hidrolik kubbe testi şematik görünüşü (Banabic, 2010b).....	80
Şekil 4.27. Zimba ile gerdirme testi şematik gösterimi	80
Şekil 4.28. Keeler testinde kullanılan zımbalar ve ölçüleri (Banabic, 2010b).....	81
Şekil 4.29. (a) Marciniak testinin şematik görünüşü (b) Test numunesi (c) Ara parça (Banabic, 2010b)	82
Şekil 4.30. (a) Nakazima testinde kullanılan numunenin şematik görüntüsü (Banabic, 2010b) (b) Tamamlanmış ŞSD testine ait numuneler (Kami et al., 2017b)	82
Şekil 4.31. Hasek testinde kullanılan numuneler ve ölçüleri (Hasek, 1978).....	83
Şekil 4.32. Düzlem dışı gerdirme testinin kalıp ölçüleri (Yoshida et al., 1995; Raghavan, 1995).....	84
Şekil 4.33. Düzlem dışı gerdirme testinde kullanılan numuneler ve ölçüleri (Öztürk and Lee, 2005) .	85
Şekil 4.34. Limit şekil değiştirmelerin belirlenmesinde kullanılan yöntem (Banabic, 2010b)	86
Şekil 6.1. Ana hatları ile çalışmada izlenen yol	93
Şekil 6.2. Çift katmanlı sac üretimi (a) PLA kalıplar (b) Yapıştırılmış numunelerin kurutulması.....	94
Şekil 6.3. Çekme testi numuneleri (a) ASTM E8 standart numune ölçüleri (b) Numunelerin çıkartıldığı sac (c) Lazer ışını ile kesilmiş çekme numuneleri	95
Şekil 6.4. 100 kN yükleme kapasiteli çekme/basma test cihazı (KİTAM)	96

Şekil 6.5. Belirgin akma sınırı gösteren bir metalik malzeme için çekme diyagramı.....	97
Şekil 6.6. Belirgin akma sınırı göstermeyen malzeme için çekme diyagramı.....	98
Şekil 6.7. Gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrisinin logaritmik olarak çizilmesi (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002).....	99
Şekil 6.8. Anizotropi katsayılarının belirlenmesi için hadde yönüne göre farklı açılardaki numuneler.....	100
Şekil 6.9. Yapıştırma bağlantısı için mukavemet testleri (a) T-soyulma testi (b) Bindirme bağlantısı testi.....	103
Şekil 6.10. Derin çekme ve düzlem dışı gerdirmeye testlerinde kullanılan 800 kN yükleme kapasiteli çift etkili hidrolik pres.....	105
Şekil 6.11. Düzlem dışı gerdirmeye testi (a) Kalıp elemanları (b) Kalıp kapalı durum (c) Yırtılan numune.....	106
Şekil 6.12. ŞSD için hazırlanan numuneler (a) Lazer kesim sonrası (b) Daire ile markalanmış sac numune yüzeyleri.....	107
Şekil 6.13. Düzlem dışı gerdirmeye testinde hasara uğramış numuneler (a) Sacın kalıp tarafından kesilmesi (b) Yetersiz baskı plakası kuvveti sebebiyle flanş bölgesinde kırışma oluşmuş numune..	108
Şekil 6.14. Büyük ve küçük şekil değiştirmelerin belirlenmesi (a) Kamera ile fotoğrafçılık (b) Fotoğraflardan ölçüm alınması.....	109
Şekil 6.15. Deformasyon sonrası alüminyum sac numuneler.....	110
Şekil 6.16. Derin çekme işleminde kullanılan kalıp elemanlarının ölçüleri.....	111
Şekil 6.17. Derin çekme işlemi (a) Kalıp elemanları (b) İşlem öncesi (c) İşlem sonrası.....	112
Şekil 6.18. Baskı plakası kuvvetinin baskı çubuklarından baskı plakasına iletimi.....	113
Şekil 6.19. Bükme işleminde geri esneme durumu (CustomPartNet, 2009).....	114
Şekil 6.20. İmal edilen V-bükme kalıbı.....	115
Şekil 6.21. Bükme işleminin yapıldığı universal test düzeneği.....	115
Şekil 6.22. Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı.....	118
Şekil 7.1. T-soyulma testi (a) öncesi ve (b) sonrası çift katmanlı numune durumları.....	119
Şekil 7.2. Çe/Al çift katmanlı sacların soyulma kuvveti–soyulma mesafesi grafiği.....	120
Şekil 7.3. Bindirme bağlantısı test numuneleri (a) Test öncesi (b) Test sonrası.....	121
Şekil 7.4. Tek bindirme bağlantısı testinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma mesafesi grafiği ..	122
Şekil 7.5. Çekme testinde kopan numuneler (a) Düşük karbonlu çelik sac (DC01) (b) Al-Mg alaşımı sac (EN AW 5754).....	123
Şekil 7.6. Çalışmada kullanılan sac metallere ait mühendislik (deneysel) çekme eğrileri.....	124

Şekil 7.7. Sacları yapıştırırmada kullanılan poliüretan yapıştırıcının gerilme – şekil değiştirme grafiği	125
Şekil 7.8. Çalışmada kullanılan sac metallere ait gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrileri .	127
Şekil 7.9. Çekme testinde kopan EN AW 5754 – DC01 çift katmanlı sac numuneler	128
Şekil 7.10. EN AW 5754-DC01 sacların çekme testlerinden elde edilen gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme grafikleri	129
Şekil 7.11. Çekme numunesinin optik mikroskop ile alınmış kesit görüntüsü	130
Şekil 7.12. Çelik ve alüminyum sacların logaritmik gerçek gerilme ve şekil değiştirme eğrileri	131
Şekil 7.13. EN AW 5754 – DC01 çift katmanlı sacların K ve n değerlerinin karşılaştırılması.....	134
Şekil 7.14. Anizotropi katsayılarının belirlenmesi için boyun vermeden önce sonlandırılmış çekme testi numuneleri (a) DC01 (b) EN AW 5754	136
Şekil 7.15. Sac metallerin hadde yönüne göre anizotropi katsayıları ve kulaklanma yönleri	137
Şekil 7.16. Çekme cihazında % 15 uzama miktarına kadar çekilmiş çift katmanlı numuneler.....	138
Şekil 7.17. Hadde yönüne göre farklı şekillerde dizilmiş saclar (a) 0°-0° (b) 0°-90° (c) 0°-45°.....	139
Şekil 7.18. Çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları.....	141
Şekil 7.19. 1 mm kalınlığa sahip EN AW 5754 H111 sacının şekillendirme sınır diyagramı	142
Şekil 7.20. Çelik ve alüminyum sacların tek ve çift katmanlı ŞSE'leri	144
Şekil 7.21. DC01 çelik sacdan derin çekilen numuneler	146
Şekil 7.22. EN AW 5754 alüminyum alaşımı sacdan derin çekilen numuneler	147
Şekil 7.23. Tek sacların güvenli çalışma bölgeleri (a) DC01 çelik sacı (b) EN AW 5754 alüminyum sacı	148
Şekil 7.24. DC01/EN AW 5754 çift katmanlı sac ile çekilmiş numuneler	149
Şekil 7.25. EN AW 5754/DC01 çift katmanlı sac ile çekilmiş numuneler	150
Şekil 7.26. Çe/Al sacının güvenli çalışma bölgesi	152
Şekil 7.27. Al/Çe sacının güvenli çalışma bölgesi	153
Şekil 7.28. Çift katmanlı sacların güvenli çalışma bölgelerinin tek saclar ile karşılaştırılması	155
Şekil 7.29. Bükme açısına bağlı olarak tekil ve çift katmanlı sacların geri esneme oranları	156
Şekil 7.30. V kalıpta bükme işleminin şematik gösterimi (Kalpakjian and Schmid, 2007).....	157
Şekil 7.31. Bükme işleminin sonrası bazı numuneler (a) Al/Çe dizilimi (b) Çe/Al dizilimi	158
Şekil 7.32. (a) Derin çekilmiş numunenin şematik gösterimi (b) Sertlik ölçümü alınan bölgeler	159
Şekil 7.33. Tek ve çift katmanlı çelik sacların derin çekme işleminin sonrası sertlik değerleri.....	160

Şekil 7.34. Tek ve çift katmanlı alüminyum sacların derin çekme işlemi sonrası sertlik değerleri....	161
Şekil 7.35. Derin çekme işleminde oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler	163
Şekil 8.1. Çift katmanlı sacların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi.....	165
Şekil 8.2. Kalıp elemanlarının ¼ modelleri (a) Zimba (b) Baskı plakası (c) Dişi kalıp (d) Montaj görünüşü	167
Şekil 8.3. Belirlenen adım süresine (0.002 s) göre iç enerji ve kinetik enerjinin değişimi	168
Şekil 8.4. Ağ (mesh) boyutuna göre şekil değişimi ve hesaplama süresinin değişimi.....	169
Şekil 8.5. Yapışkan yüzey modelinde normal, birinci ve ikinci kayma doğrultuları.....	172
Şekil 8.6. T-soyulma testi (a) Şematik görünüşü (b) Sonlu elemanlar modeli	174
Şekil 8.7. YBM parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan algoritmanın akış şeması	176
Şekil 8.8. T-soyulma testi için yapılan tahminlerin değişimi	177
Şekil 8.9. Çift katmanlı sacın T-soyulma testi için deneysel ve numerik kuvvet–ayrılma mesafesi eğrileri	178
Şekil 8.10. Tek bindirme bağlantısı testi (a) Şematik görünüşü (b) Sonlu elemanlar modeli	179
Şekil 8.11. Tek bindirme bağlantısı için yapılan tahminlerin değişimi.....	180
Şekil 8.12. Deneysel ve sonlu elemanlar programından elde edilen kuvvet – kayma mesafesi eğrileri	181
Şekil 8.13. Çift katmanlı saclar için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin şematik görünüşü (a) Model-A (b) Model-B (c) Model-C (d) Model-D.....	182
Şekil 8.14. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların alüminyum tarafında simülasyonlarda meydana gelen kalınlık değişimlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması	184
Şekil 8.15. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların çelik tarafında simülasyonlarda ve deneylerde meydana gelen kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması	185
Şekil 8.16. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile yapılan derin çekme simülasyonlarından elde edilen zimba kuvvetleri ile deneysel zimba kuvvetinin karşılaştırılması.....	186
Şekil 8.17. Çift katmanlı saclarda zimbaya temas eden yüzeye göre çelik sacın kalınlığındaki şekil değişimi	188
Şekil 8.18. Çift katmanlı saclarda zimbaya temas eden yüzeye göre alüminyum sacın kalınlığındaki şekil değişimi	189
Şekil 8.19. Maksimum zimba kuvvetlerinin zimbaya temas eden yüzeye ve tek saclara göre değişimi	190
Şekil 8.20. Limit çekme oranı (a) Şematik olarak (b) Çift katmanlı sacların derin çekilmesi ile elde edilmiş farklı LÇO’lar	191
Şekil 8.21. Simülasyonlardaki maksimum LÇO’ların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.....	192

Şekil 8.22. Farklı limit çekme oranlarında simüle edilmiş kupa örnekleri (a) Al/Çe, LÇO=2.022 (b) Al/Çe, LÇO=2.134 (c) Çe/Al, LDR=2.134 (d) Çe/Al, LÇO=2.247	194
Şekil 8.23. Aynı zımba mesafesi için sacların dışı kalıp kavisi çevresindeki durumları a) Çe/Al b) Al/Çe (Deformasyon resimleri sacın hadde yönü ile 45° açı yaptığı pozisyonda alınmıştır.)	195
Şekil 8.24. Derin çekilmiş çelik bir kupada sacın düzlemsel anizotropisi sebebiyle oluşmuş kulaklanma durumu (Kalpakjian and Schmid, 2007)	196
Şekil 8.25. Zımba ile temas eden yüzeylerinin ve sacların hadde yönünün birbirine göre açısıl konumunun kulaklanmaya etkisi a) Alüminyum sac katman b) Çelik sac katman	198
Şekil 8.26. Derin çekme sonrası kulak oluşumları (a) Tek alüminyum (b) Tek çelik (c) Al/Çe çift katmanlı 0-45 dizilimi (d) Al/Çe 0-0 dizilimi.....	200
Şekil 9.1. Çalışmada üretilen çift katmanlı sacların ticari ürünler ile karşılaştırması (a) Soyulma direnci (b) Maksimum kayma gerilmesi (Harhash, 2017)	203
Şekil 9.2. Yırtılma hasarına uğramış saclarda katmanlar arası ayrılma	204

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Çift katmanlı saclar ile yapılmış önceki çalışmalar	13
Tablo 2.2. Katmanlı saclar ile yapılmış çalışmalar	18
Tablo 2.3. Sandviç paneller ile yapılmış çalışmalar	24
Tablo 2.4. Elyaf metal lamineler ile yapılmış çalışmalar	26
Tablo 2.5. Çalışmada kullanılan malzeme ve yöntemler	28
Tablo 3.1. Ticari katmanlı ürünler (Palkowski et al., 2013; Harhash, 2017).....	37
Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan çelik saca ait kimyasal içeriklerin ağırlıkça yüzdeleri ve standart değerleri.....	87
Tablo 5.2. Kullanılan çelik saca ait farklı standart gösterimler. (2018a; SAE, 1993; Peckner and Bernstein, 1977; Yüksel and Meran, 2010; The Aluminum Association Inc., 2006).....	88
Tablo 5.3. Çalışmada kullanılan alüminyum saca ait kimyasal içeriklerin ağırlıkça yüzdeleri ve standart değerleri.....	91
Tablo 5.4. Alüminyum sacın farklı standartlarda gösterimi	91
Tablo 5.5. Polymex 3002 yapıştırıcının teknik özellikleri (Polymex, 2020).....	92
Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan sac metallerin pekleşme üsteli (n) ve mukavemet katsayıları (K) ..	131
Tablo 7.2. Çalışmada kullanılan sac metallerin Swift pekleşme denklemi katsayıları	132
Tablo 7.3. Çekme testi sonucuna göre tek sacların ortalama mekanik özellikleri	132
Tablo 7.4. EN AW 5754–DC01 çift katmanlı sacının hadde yönüne farklı dizilimlerdeki K ve n değerleri	133
Tablo 7.5. Çekme testi sonucunda EN AW 5754/DC01 sacı için belirlenen mekanik özellikler.....	135
Tablo 7.6. Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin tahmini için önerilmiş modeller	135
Tablo 7.7. Çift katmanlı sacın mekanik özelliklerinin teorik değerler ile karşılaştırılması	136
Tablo 7.8. Sac metallerin anizotropi katsayıları.....	138
Tablo 7.9. Çift katmanlı saclardan kesilen çekme numunelerinin sac dizilimleri	140
Tablo 7.10. EN AW 5754 H111/DC01 çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları	141
Tablo 8.1. Yüzeyler arası sürtünme katsayıları (μ).....	171
Tablo 8.2. Yapışkan yüzey modeli (YBM) parametreleri	181
Tablo 8.3. Deney ve simülasyonlarda maksimum zımba kuvvetleri ve hata oranları.....	190

1. GİRİŞ

Katmanlı sac, iki veya daha fazla aynı veya farklı metal sacların soğuk haddeleme, basınç kaynağı, sıcak haddeleme veya yapıştırıcı ile yapıştırma gibi çeşitli yöntemler ile üretilir. Bu saclar, tek metal ile sağlanamayacak özellikleri sağlayabilmek amacıyla tercih edilmektedir. Geliştirilen çift katman metalik saclar ile istenilen elektriksel ve termal karakteristik, hafiflik, korozyon dayanımı ve şok emici yapı sağlanabilmektedir.

Metal-plastik-metal katmanlı saclar ise alt ve üst kısımda bulunan iki metalik tabaka ile bunların arasında çekirdek olarak bulunan polimerik malzemenin oluşmaktadır. Bu üç malzeme haddeleme, yapıştırma veya polimerik malzemenin eritilerek yapıştırılması ile bir arada tutulurlar. Dış katmanlar genellikle çelik veya alüminyum olurken ara (çekirdek) katman polipropilen veya polietilen olabilmektedir. Dış katmanları aynı olan bu tür çok katmanlı saclar “Sandviç panel” olarak adlandırılmaktadır. Tek metalik saclar ile karşılaştırıldığında, metal-plastik-metal katmanlı saclar düşük yoğunluk, yüksek eğilme rijitliği, daha iyi darbe dayanımı, daha iyi ses ve titreşim yalıtımı sağlarlar (DiCello, 1980; Miller, 1980; Yao vd., 2003).

Çok katmanlı sac uygulamalarının temel amacı, farklı metallerin üstün özelliklerini birleştirmek ve şekillendirilebilirliği düşük olan sacın şekil alma kabiliyetini yükseltmektir.

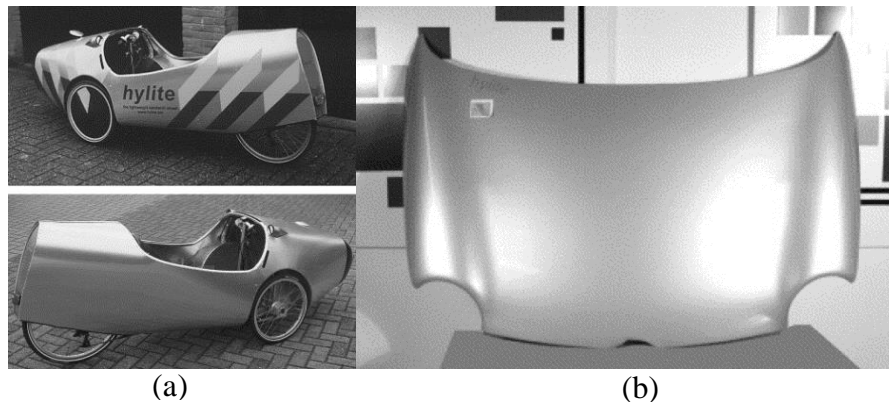
Sanayide kullanılan ilk katmanlı malzeme, uçakta kontrplak ve Balsa'dan (bir ağaç türü) oluşan ahşap katman kullanıldığı 1924 yılına dayanmaktadır. Uçak endüstrisinin hızlı gelişimiyle birlikte hafif, sert ve güçlü malzemelere olan talep, farklı katman malzemelerinin yaygınlaşmasına yol açmıştır. 1987'de GLARE (Glass – fibre Reinforced Aluminium, Cam Laminat Alüminyum Takviyeli Epoksi) olarak bilinen gelişmiş katmanlı malzeme Akzo Nobel tarafından patentlenmiştir (van Tooren, 2004). Bu sandviç malzeme, daha iyi dayanıma, daha düşük korozyona, daha düşük özgül ağırlığa ve daha iyi yangın direncine sahiptir.

Aynı dönemde, alüminyum esaslı ARALL (Aramide Reinforced ALuminum Laminate, Aramid Alüminyum Laminatlar) (Wu ve Wu, 1994) veya CARALL (CARbon Reinforced ALLuminum, Karbon Elyaf Takviyeli Alüminyum Laminatlar) gibi katmanlı saclar da geliştirilmiştir (Austin vd., 1999; Kawai ve Hachinohe, 2002).

Avrupa Birliğinin 2005 yılında başlatmış olduğu “Super Light Car” projesi ile otomobillerin ağırlıklarının azaltılması için çalışmalar hız kazanmıştır (Goede vd., 2009). Dört yıllık çalışmanın ardından 2009 yılında bu proje ile referans otomobillere (VW Golf V ve Audi TT) göre otomobil ağırlıklarının %35 dışmesi sağlanmıştır. Otomobil ağırlığındaki azalmanın güvenlik açısından bir zaaf doğurmadığı görülmüş ve bazı parçaların çarpışma testlerinde daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Projede genel olarak ağır olan elik yerine daha hafif olan magnezyum, alüminyum gibi metaller ve karbon fiber ağırlıklı kompozitler kullanılmıştır.

2009 yılında ThyssenKrupp firmasının başlatmış olduğu “InCar Plus” projesi ile otomobillerin ağırlıklarının %60 oranında dışrlmesi amaçlanmıştır (Heintzel, 2014). Bu proje kapsamında, otomobilin tüm bileşenlerinde ağırlığın azaltılması için farklı çözümler geliştirilmiştir. Özellikle araç gövdesinde 14 farklı parçada (kapı, amurluk, tavan vb.) kullanılmış oldukları alüminyum/polimer/alüminyum katmanlarından oluşan Litecor® katmanlı sacı ile geleneksel malzemelere göre sadece bu parçalar için %20 oranında ağırlık dışüş elde etmişlerdir.

3A Composites GmbH firması ise farklı alüminyum/polimer/alüminyum katmanlı sacları üreterek sektöre katkı sağlamıştır (Harhash, 2017). Firmanın üretmiş olduğu Alucobond®, taşımacılık sektöründe kullanılan gemilerin yapımında ve trenlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı firmanın Dibond isimli ürünü ise mimari yapılarda tercih edilmektedir. Firmanın en önemli ürünü ise yaklaşık 150°C sıcaklığa dayanabilen Hylite ürünüdür (şekil 1.1a). Bu rn VW Lupo’nun kaputunda (şekil 1.1b) ve Audi A2’nin derin çekme ile üretilen taban sacı olarak kullanılmıştır (Burchitz vd., 2005).



şekil 1.1. Çift katmanlı sacların uygulama örneklere (a) Hylite ile üretilmiş velomobile (b) VW Lupo kaputu (Burchitz vd., 2005).

Sonuç olarak, birçok bileşenin sac metallere plastik şekil verme yöntemleri (form baskı, derin çekme, bükme gibi) ile üretildiği otomotiv sektöründe, katmanlı saclara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Katmanlı sacların şekil alma kabiliyetleri ve şekil alma sürecindeki davranışları popüler bir araştırma konusudur. Özellikle otomotiv sektöründe hafif yapılara olan ihtiyacın artması ve katmanlı sacların bu hafifliği sağlaması, ancak şekil alma davranışları üzerine yeterli araştırma ve derin analizi olmaması bu tezin başlangıç noktası olmuştur.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu doktora tezi ile çelik ve alüminyum alaşımı sacların yapıştırılması ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların mekanik özellikleri, şekil alma kabiliyetleri ve derin çekme işlemindeki davranışlarının araştırılması amaçlanmıştır. Çift katmanlı sacların derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi nümerik analiz edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Böylece sacları sonlu elemanlar yöntemi ile modellemek için kullanılan farklı yöntemler karşılaştırılarak çift katmanlı saclardan derin çekme ile parça (kupa) üretilmesi halinde gerçeğe en yakın sonucu veren sonlu elemanlar modeli belirlenmiştir. Bu kapsamda çeşitli deneyler ve simülasyonlarda aşağıdaki uygulama adımları izlenmiştir:

- Derin çekmeye uygun düşük karbonlu çelik sac ile alüminyum magnezyum alaşımı olan ve korozyon direnci iyi olan bir sac malzeme seçilerek çift katmanlı sac malzeme üretilmiştir. Bu sayede çelik saca göre daha hafif ve korozyon direncine sahip bir katmanlı alüminyum sac olan iki katmanlı sac test edilmiştir.
- Çift katmanlı sacın ve onu oluşturan tek sacların mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiştir. Böylece oluşturulan çift katmanlı saclar mekanik dayanım açısından tek saclar ile karşılaştırılmıştır.
- Çift katmanlı sacın ve onu oluşturan tek saclara düzlem dışı gerdirmeye ve derin çekme testleri yapılmıştır. Bu sayede çift katmanlı sacların şekil alma kabiliyetleri ve derin çekilebilirlikleri belirlenerek tek saclarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.
- Çift katmanlı saclara V-bükme testi yapılarak tek ve çift katmanlı sacların geri esneme oranları belirlenmiştir.

- Çift katmanlı saclara ve tek saclar derin çekme işlemi öncesinde ve sonrasında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan sertlik ölçümleri ile sacların derin çekme işlemi sonrasında pekleşme derecelerinin hesaplanmıştır.
- Çift katmanlı saclar, sonlu elemanlar programı ile modellenerek simülasyonları yapılmıştır. Tasarlanan farklı modeller ile çift katmanlı sacların özelliklerini gerçeğe en yakın şekilde veren sonlu elemanlar modeli belirlenmiştir. Belirlenen model ile yapılan simülasyonlarda, katmanlı saclarda ara yüzey ve hasar oluşumunun ortaya konulması hedeflenmiştir.

1.2. Tez Kapsamı

Bu doktora tezi toplamda 10 ana bölümden oluşmaktadır.

1. Bölümde ilk kullanılan katmanlı saclardan başlayarak katmanlı sacların kullanımı hakkında bilgi verilmiştir. Otomotiv sektöründeki kullanımına dikkat çekilerek daha önceki örnekler sunulmuştur. Ayrıca alt başlıklar ile çalışmanın amaç ve hedefleri belirtilerek, tezin kapsamlı bir taslağı sunulmuştur.

2. Bölümde çift katmanlı saclar hakkında literatürde yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Önceki çalışmalar kendi aralarında sınıflandırılarak alt başlıklar halinde okuyucuya sunulmuştur. Ayrıca her alt başlık için özet bir tablo oluşturularak literatürün takibi kolaylaştırılmıştır.

3. Bölümde tezin araştırma konusu olan katmanlı saclar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Katmanlı sacların kompozit malzemeler sınıfındaki yeri belirtilmiş, genel özellikleri, üretim yöntemleri ve ticari olarak çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

4. Bölümde tezde kullanılan derin çekme yöntemi genel hatları ile açıklanmıştır. Yöntemin çeşitleri, yönteme etkiyen parametreler ve işlem sırasında karşılaşılan hatalar bu bölümde genel bilgi olarak sunulmuştur.

5. Bölümde çift katmanlı sacı oluşturmak için çalışmada kullanılan tek sacların genel özellikleri ve standartları hakkında bilgi verilmiştir. Sacların birleştirilmesinde kullanılan ara katman malzemesi hakkında bilgi de yine bu bölümde sunulmuştur.

6. Bölümde çalışmada kullanılan deneysel yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Öncelikle katmanlı sacların üretilmesinde ve yapışma dayanımının

belirlenmesinde izlenen yöntem ve standartlar sunulmuştur. Devamında ise katmanlı sacların mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan deneysel yöntem ve bunların standartları hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Sacların şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesinde kullanılan farklı yöntemlere ve bu çalışmada kullanılan yöntem bu bölümde yer verilmiştir.

7. Bölümde bir önceki bölümde anlatılan deneysel yöntemler uygulanarak elde edilmiş deney sonuçları paylaşılmıştır. Bu sonuçların geniş çaplı analizi ve tartışması yapılarak alt başlıklar halinde sunulmuştur.

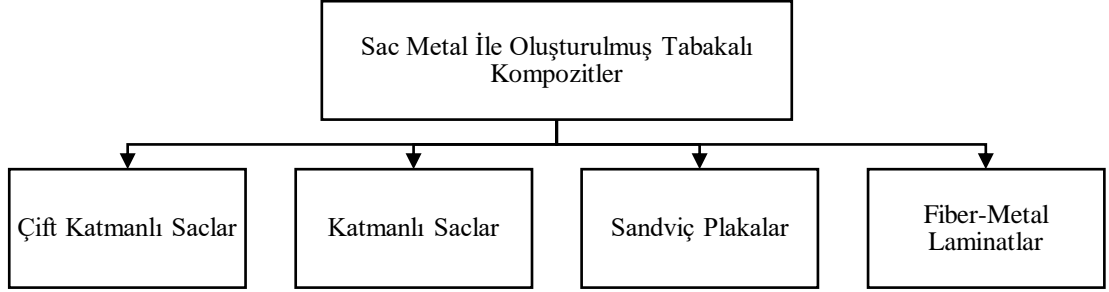
8. Bölümde çift katmanlı sacların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi yapılmıştır. Öncelikle çift katmanlı sacların yapışma durumunun modellenmesi için gerekli parametreler iteratif yöntemler ile bulunmuştur. Elde edilen bu parametreler farklı çift katmanlı sac modellerinde kullanılarak gerçeğe en yakın çift katmanlı sac modeli belirlenmiştir. Daha sonra çift katmanlı sacların derin çekme işlemi modellenerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve modellerin doğruluğu ispatlanmıştır. Ayrıca deneysel olarak belirlenmesi zor olan sac üzerindeki şekil değişimleri ve kulaklanma değerleri sonlu elemanlar yöntemiyle ortaya konmuştur.

9. Bölümde elde edilen deneysel bulgular ve sonlu elemanlar analizi sonuçları önceki çalışmaları da dikkate alarak tartışılmıştır.

10. Bölümde ise bu tezde yapılan deneysel ve numerik çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar paylaşılmış ve ileriki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Farklı veya aynı sac metallerin birleştirilmesi ile oluşturulan yapılar, tabakalı kompozitler sınıfına girmektedir. Sac metallere ile oluşturulan tabakalı kompozitler çift katmanlı saclar, katmanlı saclar, sandviç plakalar ve fiber metal laminatlar olmak üzere 4 ana gruba ayrılır (Şekil 2.1). Bu bölümde alt başlıklar halinde sac metallere ile üretilmiş kompozitler ile yapılmış önceki çalışmalara ait özetler verilmiştir.



Şekil 2.1. Sac metallere ile oluşturulmuş tabakalı kompozitlerin sınıflandırılması

2.1. Çift katmanlı (Bimetalik) Saclar Üzerinde Yapılmış Çalışmalar

Çift katmanlı saclar, iki farklı sac metalin bir yapıştırıcı veya yapıştırıcı olmadan birleştirildiği tabakalı sac metal yapılarıdır. Aynı anda iki farklı metal ile bu metallere farklı özellikleri aynı yapı üzerinde bulunabilir. Böylelikle hem daha hafif bir yapı elde edilirken hem de yüksek dayanım, korozyon direnci gibi özelliklerde sağlanmış olur. Çift katmanlı saclar, bu tür farklı özellikleri sebebiyle birçok çalışmaya konu olmuştur.

Mori ve Kurimoto (1996), paslanmaz çelik ve alüminyum çift katmanlı sacların şekillendirilmesini ve kırışmasını araştırmışlardır. Derin çekme işlemi sırasında yüksek mukavemetli bileşenin, çekme oranı ve kırışma davranışında daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Takuda vd (1996), düşük karbonlu çelik ile farklı alüminyum alaşımlarından ibaret (A1100-O, A20204-T4, A5052-O) çift katmanlı sacın derin çekme işlemini simüle etmişlerdir. Çatlak oluşumu ve şekillendirme sınırı, sünek kırılma kriteri kullanılarak başarıyla öngörülmüş ve deneysel gözlemler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, alüminyum sacların şekillendirilebilirliklerinin çelik saclar ile birleştirildiğinde arttırılabileceği gösterilmiştir.

Parsa vd (2001), alüminyum/paslanmaz çelik çift katmanlı sacların derin çekilmesi ile çekme oranı üzerine kalınlık oranının ve katman diziliminin etkisini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, alüminyumun çelik kalınlığına

oranının 1/3 olması durumunda maksimum çekme oranının elde edilebileceğini göstermiştir.

Chen vd (2006), Al/Cu çift katmanlı sacının silindirik derin çekme esnasındaki kulaklanma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmada alüminyum ve bakır sacları soğuk haddeleme ile yapıştırmışlardır. Daha sonra farklı sıcaklıklarda tavladıkları sacları derin çekme işlemine tabi tutarak kulaklanma düzeyini ve değişimini belirlemişlerdir. Sonuç olarak 300°C altındaki sıcaklıkta tavlanan çift katmanlı sacların 45° de kulaklanma oluşturduğu görülürken daha yüksek sıcaklıklarda yapılan tavlamalarda kulaklanmanın 0/90° olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Aghchai vd (2008), Al 1100-St 12 çift katmanlı sacların şekil alma kabiliyetini incelemiştir. İki katmanlı tabakalara M-K modeli uygulamış ve teorik olarak $\dot{\epsilon}$ SSD' yi elde etmişlerdir. Teorik sonuçları doğrulamak için testler yapmış ve iki katmanlı metalik sacların şekil alma kabiliyetinin, düşük şekillendirilebilirliği olan bileşenden daha iyi olduğuna karar vermişlerdir.

Fereshteh-Saniee vd (2008), çift katmanlı levhaların derin çekme prosesinde sürtünme koşulları ve tabaka temas koşullarının etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, hasar oluşabilecek bölgeyi öngörmek için gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda daha önce Siebel ve Beisswanger tarafından tek saclarda maksimum zımba kuvvetini hesaplamak için önerilen formülün çift katmanlı saclar içinde doğru sonuç verdiğini göstermişlerdir. Derin çekme esnasında çift katmanlı saclarda hasar oluşumu için en kritik bölgenin zımba kavisi çevresi olduğunu belirtmişlerdir.

Tseng vd (2009), titanyum alaşımı sacların şekillendirilebilirliğini arttırmak için, titanyum/alüminyum çift katmanlı sac kullanarak hidro-şekillendirme işlemi ile telefon bataryası kapağı imal etmişlerdir.

Tseng vd (2010), farklı kalınlık oranlarında haddeleyerek yapıştırma işlemi ile imal edilen alüminyum/bakır çift katmanlı sacların şekillendirilebilirliğini sonlu elemanlar (FE) simülasyonu ve deneysel olarak incelemiştir. Katmanlı saclarda haddeleme ile oluşan kalıcı gerilmeler nedeniyle, tek sacların şekillendirilebilirliğinin katmanlı saclardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Morovvati vd (2010), derin çekme işleminde çift katmanlı sacların (Alüminyum/paslanmaz çelik) kırışmasını analitik yöntemler, sayısal simülasyonlar ve deneyler ile incelemiştir. Çalışmalarında şekillendirme kuvveti ve kırışma üzerinde katmanların dizilim sırasının etkili olduğunu göstermişlerdir. Alüminyum tabakanın üst tabakaya yapıştığı durumda şekillendirme kuvveti, paslanmaz çelik tabakanın üst tabakaya yapıştırıldığı kuvvetten daha büyük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Morovvati vd (2011) yapışkanla hazırlanmış alüminyum/çelik çift katmanlı sacın derin çekilmesinde kırışıklığı önlemek için saca uygulanması gereken baskı plakası kuvvetini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda yüksek ve düşük mukavemete sahip saclardan oluşan katmanlı saclarda kırışıklığı önlemek için gerekli baskı plakası kuvvetinin her bir katman için gerekli olan baskı plakası kuvvetlerinin arasındaki bir değerde olduğunu göstermişlerdir.

Bagherzadeh vd (2012), hidro mekanik derin çekme işleminde çift katmanlı sacların gerilme durumunu analitik yöntemler ile tahmin etmeye çalışmışlardır. Şekillendirme kuvveti ve maksimum akışkan basıncını deneysel ve teorik olarak tahmin etmişlerdir. Maksimum kritik basınçta sürtünme etkisi, katman dizilimi ve katman kalınlık oranı değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, analitik modelin maksimum sıvı basıncını hesaplama yeteneğine sahip olduğunu ancak akışkan basıncı için güvenli çalışma bölgesinin yanı sıra katmanların şekillendirilebilirliğini, şekil değişim miktarını ve kalınlık dağılımını doğru bir şekilde tahmin edemediğini göstermiştir.

Aghchai vd (2013) malzemelerin mekanik özelliklerinin Al 3004/St 12 çift katmanlı sacın şekillendirilebilirliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Önerilen teorik model, katmanlı sacın şekillendirme limit eğrisinin tek malzemelerin şekillendirme limit eğrilerinin arasında olduğunu göstermiştir.

Maleki vd (2013), analitik, sayısal ve deneysel yaklaşımları kullanarak alüminyum/çelik çift katmanlı sacların haddeleme işleminde yapışma mukavemetini ve kalınlık azalmasını incelemiştir. Yapışma mukavemetinin ve kritik kalınlık azalmasının, katmanların akma dayanımından ve başlangıç kalınlığından önemli ölçüde etkilenebileceğini bildirmişlerdir.

Atrian & Fereshteh-Saniee (2013) tarafından yağlama, inceltme ve katmanların dizilim sırası da dahil olmak üzere, çift katmanlı sacların (Çelik/pirinç) derin çekme işleminde çeşitli parametrelerin etkileri sunulmuştur. Üst katmanda çelik bulunan

numunelerin, üst katmanda pirinç olana kıyasla deformasyon için daha yüksek şekillendirme kuvveti gerektiğini göstermişlerdir.

Bagherzadeh vd (2015), akışkan basıncı şekillendirme işlemlerinde temel işlem parametrelerini belirlemek amacıyla, alüminyum/çelik çift katmanlı sacların hidro mekanik derin çekme (HMDC) işlemini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda uygun sıvı basıncı ile HMDC işlemi, Al/Çe çift katmanlı sacların şekillendirilebilirliğini ve limit çekme oranı derin çekme işlemine göre arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, alüminyum/çelik yerleşimindeki akışkan basıncının işlem sınırları ve emniyetli çalışma bölgesi, çelik/alüminyum dizilimine kıyasla daha geniş olduğunu göstermişlerdir. Daha yüksek çekme oranları elde etmek için çelik/alüminyum dizilimi yerine alüminyum/çelik diziliminin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Afshin ve Kadkhodayan (2015), Al 1050/St 304 ve Al 5052/St 304 çift katmanlı sacların derin çekme işleminde sıcaklık, tane boyutu, baskı plakası kuvveti, katman dizilim sırası ve sürtünme gibi farklı etkenlerin etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda hasar oluşumunun zımba kavisi ile kupa duvarlarının olduğu bölgelerde oluştuğunu belirlemişlerdir. Ayrıca çelik katmanın üst tarafta bulunması durumunda zımba kuvvetinin alüminyum katmanın üst tarafta olduğu duruma göre daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Sac sıcaklığı arttıkça, katmanlı sacı şekillendirmek için gerekli şekillendirme kuvvetinin arttığını göstermişlerdir. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda baskı plakası kuvvetini arttırarak daha az kuvvet ile sıcak derin çekme işlemi yapılabildiğini belirtmişlerdir.

Marandi vd. (2016), patlamalı kaynak metodu ile birleştirilmiş Alüminyum/Bakır çift katmanlı sacların hidro şekillendirme işlemi esnasındaki davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca hidro şekillendirme işlemini nümerik olarak modellemişler ve analitik olarak çözmüşlerdir. Çalışma sonucunda her iki yüzeyinden de ayrı ayrı şekillendirilen sacların aynı deformasyon davranışını sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ancak çift katmanlı sacların tek saclara göre daha fazla uzama gösterdiğini belirlemişlerdir. Araştırmacılar uzama miktarındaki artışı çift katmanlı sac kalınlığının tek sacların kalınlığından daha fazla olmasına bağlamışlardır. Çalışmadan elde edilen bir başka sonuç ise çift katmanlı sacların her bir katmanında

oluşan şekil değiştirmenin aynı olmasına rağmen, gerilmenin akma dayanımı yüksek olan sacda yoğunlaşması olmuştur.

Chen vd. (2016), yatay ikiz haddeli döküm yöntemiyle paslanmaz çelik sac üzerine alüminyum yapıştırmışlardır. Oluşan çift katmanlı sacın farklı tavlama sıcaklıklarındaki mikro yapı görüntülerini incelemişler ve yapışma dayanımını T-soyulma testi ile belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda farklı sıcaklıklarda yapılan tavlama ile yapışma dayanımını %75 oranında arttırmışlardır. Ancak belirli sıcaklığın üzerinde yapılan tavlamalarda yapışma dayanımının ciddi oranda düştüğünü göstermişlerdir. Ayrıca üretilen çift katmanlı saclara yapılan soğuk haddeleme ile yapışma dayanımında %33'lük bir artış daha sağlamışlardır.

Jalil vd (2016), Al 1050/St 13 çift katmanlı sacların konik derin çekme işlemlerini analitik yöntemle incelemişlerdir. İşleme etki eden parametreleri belirleyerek hasarsız üretim için uygun basıncı belirlemişlerdir. Bulunan değerler, deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Kagzi vd. (2016), çift katmanlı sacların geri esneme durumlarını pekleşme ve kalınlıktaki değişimleri dikkate alarak analitik olarak modellemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda araştırmacılar düşük büküm açılarında geri esneme değerlerinin sabit kaldığını göstermişlerdir. Ayrıca yüksek mukavemetli çeliklerin sahip olduğu yüksek geri esneme değerlerinin, ince ve düşük mukavemetli bir sac ile çift katmanlı yapı oluşturularak azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Karajibani vd (2017), alüminyum-1100/bakır-C10100 çift katmanlı saclarının şekil alma kabiliyetlerini ABAQUS sonlu elemanlar programı ile belirlemişlerdir. Simülasyonda sacın şekil alma hızının arttığı bölgeleri bir alt kod oluşturarak belirlemişler ve bu noktadaki şekil alma değerlerini limit değer olarak belirlemişlerdir. Simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile uyumlu çıkmıştır.

Darabi vd (2017), alüminyum Al 3105/St 14 çift katmanlı saclarının malzeme özelliklerinin şekil alma kabiliyetine etkisini analitik ve deneysel yöntemler ile belirlemeye çalışmışlardır. Analitik model Hill ve Barlat-Lian akma kriterlerine göre Marciniak-Kuczynski (M-K) modeli esas alınarak geliştirilmiştir. Sonuç olarak katmanlı sacların katmanlarının pekleşme üsteli ve gerinim hızı hassasiyet faktörünün artması ile şekil alma kabiliyetinin de arttığını göstermişlerdir.

Sakhtemanian vd. (2017), patlamalı kaynak yöntemiyle birleştirilmiş düşük karbonlu çelik ve ticari olarak saf titanyum sacların artırımı şekillendirme özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada katman diziliminin çift katmanlı sacın şekillendirilmesine olan etkisini deneysel ve nümerik olarak belirlemişlerdir. Titanyum/çelik diziliminin çelik/titanyum dizilimine göre daha yüksek şekillendirme kuvvetine ihtiyaç duyduğunu göstermişlerdir. Nümerik çalışmaları ABAQUS sonlu elemanlar programında modellemişler ve deneysel çalışmalar ile elde edilen şekillendirme kuvvetleri arasında %15 fark bulmuşlardır.

Nejad vd. (2017), daha önce Atrian & Fereshteh-Saniee (2013) tarafından deneysel olarak gerçekleştirilmiş çalışmayı Abaqus sonlu elemanlar programı ile modellemişlerdir. Modellerin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu belirledikten sonra zımba kavisi, kalıp kavisi, çelik ve pirinç katmanların yüzeyler ile olan sürtünme katsayıları, baskı plakası kuvveti ve sac çapının zımba kuvveti ve kalınlık azalması üzerine etkilerini yüzey cevap metodu ile istatistiksel olarak incelemişlerdir. Bu metoda göre hazırladıkları 90 adet sac model sonuçlarını paylaşmışlardır. Çalışma sonucunda zımba kuvvetine en çok etki eden parametreler sırasıyla sac çapı, çelik katmanın sürtünme katsayısı, zımba kavisi ve baskı plakası kuvveti olduğunu belirlemişlerdir. Diğer taraftan kalınlık azalmasına en çok etki eden parametrelerin sırasıyla çelik katman ile kalıp arasındaki sürtünme katsayısı, pirinç katman ile zımba arasında sürtünme katsayısı ve sac çapı olduğunu belirlemişlerdir.

Uscinowicz R. (2019), Al/Cu çift katmanlı sacların elastoplastik özelliklerinin hadde yönüne göre değişimini incelemiştir. Çalışmada Al/Cu sacları soğuk haddeleme yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Farklı kalınlıklarda bakır sac kullanarak farklı kalınlıkta çift katmanlı sac elde edilmiştir. Çalışma sonucunda farklı oranlarda oluşturulmuş çift katmanlı sacların elastoplastik özellikleri hadde yönüne göre yüksek oranda değişiklik gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca karışım kanununun bu malzeme için elastik sabitleri hesaplarken doğru sonuç vermediğini göstermişlerdir.

Zahedi vd. (Zahedi vd., 2019), patlamalı kaynak ile birleştirilmiş Al/Cu çift katmanlı saclarının hasar ve boyun verme şekil değiştirmelerini iki farklı dizilimde araştırmışlardır. Oluşturdukları sacları çekme testi ve düzlem dışı gerdirme testi yapmışlardır. Çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemi ile destekleyerek sac üzerinde oluşacak olan hasarları doğru bir şekilde tahmin etmişlerdir. Çalışma sonucunda

plastik Şekil değiştirmenin dış katmanda biriktiğini, iç katmanda ise hidrostatik basınç olduğu ve bu durumun dış katmanda hasar oluşumuna sebep olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca alüminyum sacın dış katmanda olması durumunda sacdaki incelmenin erken baŐladıęını ve boyun vermenin daha düşük Şekil değiştirme miktarlarında gerçekteŐtięini belirtmişlerdir.

Mittler vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada bakır/kalay çift katmanlı sacların sürekli döküm yöntemiyle üretimini ve soğuk haddeleme ve giyotin ile kesme sonrası durumlarını incelemişlerdir. Döküm halindeki yapışma kalitesinin önemli oranda döküm hızına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Ancak soğuk haddeleme ve ortalama bir tavlama yapıldığında, yapışma kaliteleri arasında fark olmadığını göstermişlerdir. Ayrıca kesme sırasında saclar arasında ayrılma olmadığını ve kesme kuvvetinin işlem öncesi sacların dizilimine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuşlardır.

Tablo 2.1. Çift katmanlı saclar ile yapılmış önceki çalışmalar

Araştırmacılar	Yıl	Malzeme	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı	Deneysel yöntemler	FEM
Mori ve Kurimoto	1996	Çe/Al	Haddeleme	Belirtilmemiş	Derin çekme, Çekme testi, ŞSD	Yok
Takuda vd	1996	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	Derin çekme, Analitik yöntem	Var
Parsa vd	2001	Çe/Al	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Derin çekme	Var
Chen vd	2006	Al/Cu	Haddeleme	Belirtilmemiş	Derin çekme, Kulaklanma, XRD	Yok
Aghchai vd	2008	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	ŞSD, Analitik yöntem	Yok
Fereshteh-Saniee vd	2008	Çe/Pirinç	Yok	Belirtilmemiş	Derin çekme	Yok
Tseng vd	2009	Ti/Al	Haddeleme	Belirtilmemiş	HMDÇ	Var
Tseng vd	2010	Al/Cu	Haddeleme	Belirtilmemiş	Derin çekme ve ŞSD	Var
Morovvati vd	2010	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	Derin çekme, Analitik yöntem, Kırışma	Var
Morovvati vd	2011	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	Derin çekme, Kırışma	Var
Bagherzadeh vd	2012	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	HMDÇ, Analitik yöntem	Yok
Aghchai vd	2013	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	ŞSD, Analitik yöntem	Yok
Maleki vd	2013	Çe/Al	Haddeleme	Belirtilmemiş	Haddeleme, Analitik yöntem	Var
Atrian & Fereshteh-Saniee	2013	Çe/Pirinç	Yok	-	Derin çekme	Var
Bagherzadeh vd	2015	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	HMDÇ	Var
Afshin ve Kadkhodayan	2015	Çe/Al	Yapıştırma	Loctite 5368	Sıcak derin çekme, Tavlama	Yok
Marandi vd	2016	Al/Cu	Patlamalı kaynak	-	Şişirme testi, Analitik yöntem	Var
Chen vd	2016	Çe/Al	Döküm	-	Soyulma testi, SEM, EDS	Yok
Jalil vd	2016	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	HMDÇ, Analitik yöntem	Var
Kagzi vd.	2016	Çe/Al	Belirtilmemiş	-	Bükme, Geri yaylanma	Yok
Karajibani vd	2017	Al/Cu	Patlamalı kaynak	-	ŞSD	Var
Darabi vd	2017	Çe/Al	Yapıştırma	Poliüretan	ŞSD, Analitik yöntem	Yok
Sakhtemanian vd	2017	Ti/Çe	Patlamalı kaynak	-	Arttırımlı şekillendirme, SEM	Var
Nejad vd	2017	Çe/Pirinç	Yok	-	Yok	Var
Uscinowicz R.	2019	Al/Cu	Haddeleme	Belirtilmemiş	Çekme testi, SEM	Yok
Zahedi vd	2019	Al/Cu	Patlamalı kaynak	-	ŞSD, Çekme testi, SEM,	Var
Mittler vd	2019	Cu/Bronz	Döküm	-	Kesme, SEM	Yok

2.2. Katmanlı Saclar Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Katmanlı saclar çift katmanlı saclardan farklı olarak genellikle aynı tür malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu malzemeler aynı malzemenin farklı alaşımları olabileceği aynı alaşımlarda olabilmektedir. Ayrıca bu malzemelerde iki veya daha fazla katman bulunabilmektedir. Bu tür saclar ile yapılmış çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Takiguchi ve Yoshida (2003a), bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal levhaların plastik bükülmesi için yeni bir teknik önermişlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilen alüminyum tabakaların deformasyon özelliklerine şekillendirme hızının etkisi, V-bükme testleri yapılarak ve oda sıcaklığında çeşitli zımba hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Yazarlar, bükme işlemi için geliştirilen kodun deneysel çalışmalar ile tutarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır.

Takiguchi ve Yoshida (2003b), alüminyum katmanlı saclarında bükme işlemleri sırasında oluşan ayrılmaları incelemişlerdir. Çalışmada A5083P-O alüminyum saclarını sünek epoksi ile birleştirerek katmanlı sac oluşturmuşlardır. Yapışmanın kayma dayanımını kayma testleri ile belirlemişler ve ayrıca bükme işleminde oluşan hasarları incelemek için farklı hızlarda ve farklı kanal açıklıkları olan kalıplarda bükme testleri yapmışlardır. Yapılan çalışma ile bükme işlemi sonrasında yapışık sac yüzeyleri arasında büyük şekil değişimleri olduğunu göstermişlerdir. Ancak bu şekil değişimlerinin belirli bir sınırı aşmadıkları sürece yapışkanın dayanımının düşürmediğini ortaya koymuşlardır. Bu sebeple yapıştırıcı ile birleştirilmiş sacların pres ile şekillendirmeye uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Cheng vd (2004), polimer yapıştırıcı ile birleştirilmiş katmanlı çelik levhaların kırılma davranışını incelemiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarını Yoshida ve sıkıştırılmış şerit testi yoluyla deneysel verilerle doğrulamışlardır. Ayrıca dikdörtgen panel şekillendirme testleri gerçekleştirmişlerdir. Tek sacların ve katmanlı sacların kırılmaya karşı direncini karşılaştırmışlar ve flanş kırılmasını incelemişlerdir.

Manesh ve Taheri (2005), üç katmanlı şeritlerin soğuk haddelemesine ilişkin çalışma yapmıştır. Sandviç şerit haddeleme üzerine yaptıkları deneylerde sandviç şeritlerin katmanları olarak alüminyum, yumuşak çelik ve bakır kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Haddeleme sonucunda, kalınlık azalmasının her katmanda farklı

olduğunu belirtmişler ve bu durumun katmanların farklı akma gerilmelerine sahip olmalarına bağlamışlardır.

Lang vd (2005) ortada çok ince bir alüminyum katman ve bu katmanın her iki yanında iki çelik sacdan oluşan çok katmanlı metal levhaların hidro-şekillendirilmesi üzerine sayısal ve deneysel araştırmalar yapmıştır. İki dış katmanın, katman diziliminin ve anizotropik özelliklerin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Katmanlar arasındaki sürtünme katsayıları arttıkça, ince alüminyum ara katmanın şekillendirilebilirliğinin daha da geliştirilebileceği gösterilmiştir.

Sertkaya (2010), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında katmanlı AA1050 alüminyum sacların kare derin çekme performansını araştırmıştır. Çalışmada 0.3 ile 2 mm arasında değişen farklı kalınlıklardaki sacları herhangi bir yapıştırıcı kullanmadan üst üste dizerek kare derin çekme işlemine tabi tutmuştur. Çalışma sonucunda tek katmanlı saclarda derin çekme işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirirken çok katmanlı saclarda hasarsız ürün elde edememiştir. Katmanlı saclarda başarılı ürün elde edebilmek için taslak alanını azaltmışlardır.

Satheeshkumar ve Narayanan (2014), çelik iki katlı sacların şekillendirilebilirliği için yapışma özelliklerinin önemini araştırmışlardır. Deneysel çekme testlerine dayanarak, sertleştiricinin reçineye oranının artırılmasıyla şekillendirilebilirliğin arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, katmanlı sacların iki temel tabaka arasına belirtilen kalınlıkta bir yapışkan tabakanın uygulanması, herhangi bir yapışkan tabakası olmaksızın katmanlı bir sac veya tek bir saca göre daha iyi bir boyuna uzama gösterebileceğini belirtmişlerdir.

Li vd (2015), Al/Mg/Al katmanlı sacları haddeme yöntemiyle üretmişlerdir. Sıcaklık, hız, kalıp kavisi gibi parametreler değiştirilerek en yüksek limit çekme oranı elde edilmiştir. Ayrıca değişik koşullarda oluşan katmanlar arası içyapı incelenmiştir. 200°C şekillendirme sıcaklığı ve 50°C zımba sıcaklığında en yüksek limit çekme oranı (LÇO) elde edilmiştir.

Zhang vd (2016), elyaf takviyeli metal katmanlı saclar üretmek için kullanılan, boşluk üretici olarak adlandırılan, plakaların arasına yerleştirilen üçüncü levhanın kalınlığının derin çekme işlemine olan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ara malzemenin kalınlığının zımbaya göre en altta bulunan sacın incelmesini yüksek oranda etkilediği görülmüştür. Ara plakanın teması sonucu şekillendirilen parçanın

farklı bölgelerinde farklı sürtünmeler oluşmasının zımba kuvvetini arttırdığını ve farklı bölgelerde farklı sac kalınlıkları oluşturduğunu göstermişlerdir.

Kim vd (2017), orta katmanında çelik bulunan alt ve üst katmanı TWIP (twining-induced plasticity, ikizlenme ile plastikliğı arttırılmış) çelik sacından oluşan katmanlı sacların gerdirilebilirlik ve çekilebilirliğini araştırmışlardır. Saclara çekme testi ve Erichsen testi uygulanmıştır. Sonuç olarak limit kubbe yükseklikleri tek sacın limit kubbe yüksekliklerinden daha iyi çıkmıştır.

Rahmatabadi ve Hashemi (2017), yaptıkları çalışmada 1 mm kalınlığındaki Al1050 saclarını haddeleme yöntemi ile birbirine yapıştırmışlardır. İlk haddeleme sonunda oluşan sacları ikiye bölerek tekrar haddelemişler ve bu şekilde toplamda 7 paso haddeleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen sacların 1., 3., 5., ve 7. paso sonrasındaki çekme dayanımlarını, uzamalarını ve şekillendirme sınır eğrilerini karşılatırmışlardır. Haddeleme ile yapıştırma yönteminde ilk paso sonunda uzama ve şekillendirme sınır eğrilerinde ani bir düşüş oluşmakta, çekme dayanımında ise hızlı bir yükseliş olduğunun belirlemişlerdir. Bu durumu ilk paso sonucunda oluşan yüksek pekleşme ile ilişkilendirmişlerdir. Çalışma sonucunda şekillendirme sınır eğrilerinin ilk haddeleme sonucunda düştüğünü ancak haddeleme sayısı arttıkça yükseldiğini belirlemişlerdir.

Li vd. (2019), paslanmaz çelik ve düşük karbonlu çeliğı haddeleyerek katmanlı sac oluşturmuşlardır. Diğer çalışmalarda ince (1 – 2 mm) katmanlı saclar incelenirken bu çalışmada orta kalınlıkta (3 - 4 mm) katmanlı saclar incelenmiştir. Araştırmacılar, çalışmada orta kalınlıktaki katmanlı sacların şekillendirilebilirliklerini katman dizilimi, kalınlık oranı sürtünme katsayısı gibi parametreler açısından incelemişlerdir. Yapılan deneyleri sonlu elemanlar metodu ile destekleyerek katmanlı kalın sacların baskı plakası olmadan da şekillendirilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca mukavemeti yüksek sacın dış katmanda olması durumunda, zımba kuvvetinin arttığı gözlenmiştir.

Özdilli (2018), doktora çalışmasında polimer kaplı sac metallerin derin çekme davranışını incelemiştir. Çalışmada DC01 sacına Jotun Corro-Coat PE 7 polyester kaplaması yapmıştır. Yapmış olduğu deneylerde derin çekme oranı, baskı plakası kuvveti ve çekme hızı parametrelerini değiştirmiştir. Çalışma sonucunda polimer kaplı sacların kaplamasız saclara göre daha yüksek limit çekme oranına sahip olduğunu

belirlemiştir. Ayrıca polimer kaplamalı sac numunelere derin çekme işlemi esnasında uygulanan zımba kuvvetini kaplamasız saclara göre daha düşük bulmuştur.

Rahmatabadi vd. (2019), yapmış oldukları çalışmada Alüminyum/Bakır çok katmanlı saclarının elastik ve plastik özelliklerini incelemiştir. Alüminyum levhalar arasına yerleştirdikleri bakır levhaları haddeleme yöntemi ile sıkıştırarak yapıştırmışlardır. Yapıştırdıkları sandviç levhaları tekrar üst üste yığarak haddelemişler ve çok katmanlı sac elde etmişlerdir. Bu yöntemin avantajlı tarafı malzemeler arasında herhangi bir yapıştırıcı kullanmadan malzemelerin mikro yapısal düzeyde birbirleri ile yapışmasıdır. Haddeleme sayısı ve katman sayısı arttıkça bakır levhanın, üretilen sac içerisinde daha homojen dağıldığı görülmüştür. Yapılan çalışmada üretilen sacın elastisite modülü, çekme dayanımı, pekleşme üsteli gibi elastik ve plastik malzeme özellikleri belirlenmiştir. Üretilen saclar aynı zamanda metal matrisli kompozit olarak da sınıflandırılabilir olduğundan dolayı araştırmacılar elastisite modülü için kullanılan teorik modelleri bu sac üzerinde uygulamışlardır. Ancak bu teorik modellerin bu şekilde üretilmiş katmanlı yapılar için uygun olmadığını ortaya koymuşlardır.

Tablo 2.2. Katmanlı saclar ile yapılmış çalışmalar

Araştırmacı	Yıl	Malzeme	Birleştirmeye Yöntemi	Yapıştırıcı	DeneySEL yöntemler	FEM
Takiguchi ve Yoshida	2003	Al/Al	Yapıştırma	Akrilik Epoksi	3 nokta eğme, Kayma testi, V bükme, Analitik yöntem	Yok
Takiguchi ve Yoshida	2003	Al/Al	Yapıştırma	Akrilik Epoksi	V bending, Analitik yöntem	Yok
Cheng vd	2004	Çe/Çe	Yapıştırma	Polimer	Kırışma, Yoshida burkulma testi, Dörtgen parça şekillendirme	Yok
Burchitz vd	2005	Hylite	-	-	Literatür araştırması	-
Manesh ve taheri	2005	Al/Çe/Al Cu/Çe/Cu	Haddeleme	-	Haddeleme, Analitik yöntem	Yok
Lang vd	2005	Çe/Al/Çe	Yok	-	HMDÇ	Var
Ibarra-Castaneda	2011	GLARE	-	-	Darbe testleri, Katmanların ayrılması	-
Satheeshkumar ve Narayanan	2014	Çe/Çe	Yapıştırma	Farklı yapıştırıcılar (epoksi vb)	Çekme testi	Yok
Li vd	2015	Al/Mg/Al	Haddeleme	-	Derin çekme, SEM	Yok
Zhang vd	2016	Al/Al/Al	Yok	-	Derin çekme	Var
Kim vd	2017	Çe/Çe/Çe	Haddeleme	-	Derin çekme, Erichsen testi	Yok
Rahmatabadi ve Hashemi	2017	Al/Al	Haddeleme	Roll bonding	ŞSD, XRD, SEM	Yok
Kami vd	2017	Bondal	-	-	Çekme testi, Şişirme testi, Derin çekme, Soyulma testi, SEM	Yok
Groche vd	2018	Alucobond, Hylite	-	-	Kesme, SEM	Yok
Li vd	2018	Çe/Çe	Haddeleme	-	Şekillendirme, Çekme testi	Var

2.3. Sandviç Paneller Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Sandviç paneller aynı metalden iki levhanın arada polimer katman olacak şekilde yapıştırılması ile elde edilirler. Katmanlı saclardan farkları katmanları oluşturan sacların aynı olması ve ara katmanda yapıştırıcı haricinde bir polimer katman (çekirdek) bulunmasıdır. Yüksek eğilme dirençleri ve hafiflikleri sebebiyle özellikle otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yan duvar ve çatı kaplamalarında da kullanılan bu paneller derin çekme işlemine elverişli değildir. Çelik bir sac ile aynı eğilme direncine sahip alüminyum sandviç metal, çelikten %65 alüminyumdan ise %30 daha hafif olabilmektedir (Kim vd., 2009).

Sandviç panellerin endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanıldığı gibi otomotiv sektöründe sandviç paneller gelecek için iyi bir potansiyele sahiptir (Kim vd., 2003). Mohr ve Straza'nın (2005) bahsettiği gibi, ince sandviç panellerin gelişmesi mühendislik uygulamalarında kullanımının artması için oldukça önemlidir. Bu tür kompozit malzemelerin şekil alma kabiliyetinin otomotiv endüstrisi için düşük olması ve kaynak edilememesi otomotiv endüstrisindeki kullanımının yaygınlaşmasını önlemektedir. Ticari olarak HYLITE® ve BONDAL® üç katmanlı metal/polimer/metal sandviç panel örnekleridir. HYLITE®, Audi A2 ile otomotiv pazarına tanıtılan 0.2/0.8/0.2 mm kalınlıklara sahip bir alüminyum/polipropilen/alüminyum sandviç paneldir. BONDAL®, sönümleme uygulamaları için yaklaşık 50 µm polimer göbek kalınlığına sahip çelik/polipropilen/çelik sandviç paneldir. Burchitz vd (2005), HYLITE® ile tasarım ve malzeme konsepti üzerine çalışmışlardır.

Kim ve Thomson (1990) ticari bir ürün olan Acousteel® isimli metal-polimer lamineler arasındaki ayrılma durumunu 4 nokta eğme ve U-kanal çekme testleri ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, yüksek sıcaklıkta şekillendirme esnasında rijitliğin düştüğü, bununla birlikte şekillendirilen parçanın da esnekliğinin arttığı görülmüştür.

Kim vd. (2003), haddeleme ile yapıştırılmış Al/PP/Al (HYLITE®) malzemenin mekanik davranışını belirlemişler ve akış sınır eğrisi ile akma fonksiyonunu hesaplamışlardır. Çalışmalarında sandviç panelin yüksek şekil değiştirme oranı hassasiyetinin olumlu etkisinin, düşük pekleşme üstelinin olumsuz etkisi tarafından

nötrlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sandviç panellerin yüksek şekil alma kabiliyetinin temel nedeninin daha kalın olmalarından kaynaklandığını da ortaya koymuşlardır.

Weiss vd. (2007), alüminyum/polimer/alüminyum sandviç panellerde sıcaklığın şekillendirme davranışına olan etkisini belirlemişlerdir. 0.2 mm kalınlığındaki AA5182 alüminyum sacları, 0.8 mm kalınlığındaki termoplastik polipropilen ile birleştirmişlerdir. Üretilen katmanlı saclara çekme testini, 4 nokta eğme testini, derin çekme testini ve şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesi için küresel gerdirmeye testini farklı sıcaklıklarda uygulamışlardır. Çalışma sonucunda sıcaklığın çekirdek malzeme olan termoplastığın özelliklerini önemli derecede etkilediğini ancak bu durumun katmanlı sacın mekanik özelliklerine çok az etki ettiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca arttırılan sıcaklığın katmanlı sacın geri esnemesini azalttığı ancak derin çekme işlemlerinde kırılma eğilimini artmasına sebep olduğunu belirlemişlerdir.

Can (2008), yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında ticari olarak satılmakta olan ALUCOBOND® isimli 4 mm kalınlığındaki sandviç plakaların derin çekme performanslarını araştırmışlardır. Farklı çaplarda zımbalar kullanılarak silindirik derin çekme işlemi sonucunda hasar durumu ve numune kalınlıklarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sandviç plakaları maksimum 8 mm derinliğe çekebilmişlerdir. Çalışmada sandviç panellerin farklı malzemelerden meydana gelmesi ve bu malzemelerin de farklı mekanik özelliklere sahip olması sebebiyle şekillendirilebilirliğinin düşük olduğu belirtilmiştir.

Kim vd (2009), alüminyum/polimer/alüminyum sandviç plakaların şekillendirilebilirliklerini ve çökme dirençlerini belirlemişlerdir. AA5182 serisi alüminyum sacların arasında polipropilen levha koyarak haddeleme yöntemiyle birleştirmişlerdir. Üretilen sandviç plakaların şekillendirme sınır diyagramları belirlenmiş ve araç kaportası üretimi için uygun kalıp tasarımları yapılmıştır. Sandviç plaka ile hasarsız olarak üretilen araç kaportaları çökme direnci testine tabi tutulmuş ve çelik kaportalardan daha yüksek bir direnç göstermiştir.

Carradò vd (2011), yarı mamul sandviç levha üretimi için farklı işlemlerin, farklı metal katmanların (östenitik çelik, alüminyum alaşımı) ve kombinasyonlarının ve fiber takviyeli ve takviyesiz farklı polimer çekirdeklerinin, sandviç levhaların fiziksel özelliklerine ve şekil alma kabiliyetlerine olan etkilerini incelemişlerdir. Erichsen testleri sırasında tüm sıcak presli sandviç panellerde çekirdek-dış katman arayüzünde

ayrılmalar oluşmuştur. Şekillendirilebilirlik testleri ve çekme testleri esnasında, laboratuvarda haddeleyerek birleştirilmiş panellerde, endüstriyel olarak üretilen panellere kıyasla daha iyi değerler elde etmişlerdir.

Sokolova vd (2012), karmaşık parçaların ana üretim prosesi olan derin çekme için, çekirdek ve dış katman kalınlıklarının değişimi ve değişik yüklemelerde sandviç panellerin davranışlarını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda çekirdek kalınlığının artmasıyla metalin, polimerin içine daha kolay çekilebildiğini, böylece zımba kavislerinin olduğu bölgelerde yüksek gerilmeyi önlediğini göstermişlerdir. Aynı zamanda, çekirdeğin kalınlaştıkça, dış tabakanın çekme işlemine daha dirençli olduğu gözlenmiştir.

Liu ve Xue (2013), yaptıkları çalışmada AA5052/polietilen/AA5052 sandviç levhaların şekil alma kabiliyetlerini deneysel olarak incelemiştir. Farklı kalınlıklarda çekirdek malzemeye sahip üç çeşit AA5052/polietilen/AA5052 sandviç numuneyi sıcak presleme yapıştırma metodu ile hazırlamışlardır. Daha sonra bu sandviç levhaların mekanik özelliklerini araştırmak için tek eksenli çekme testleri gerçekleştirerek, polimer çekirdek kalınlığının sandviç levhanın limit kubbe yüksekliği üzerindeki etkilerini araştırmak için germe testleri yapmışlardır. Üç çeşit sandviç levha için şekillendirme sınır eğrileri elde edilmiştir. Deneysel sonuçları AA5052/polietilen/AA5052 sandviç tabakanın şekillendirme limitinin tek AA5052 tabakadan daha yüksek olduğunu ve polietilen çekirdeğin kalınlığının artırılmasıyla şekillendirme limitinin arttığını göstermişlerdir.

Kami vd (2017a), darbe emici BONDAL® sacının şekil alma kabiliyetlerini Nakazima testi ile belirlemişlerdir. Ayrıca sacın yapışma durumunu incelemek için ayırma testi yapmışlardır. Yapışma yüzeyleri arasındaki durumu incelemek için SEM’de görüntüleyerek incelemişlerdir. Testler sonucunda sandviç panel ile paneli oluşturan sacın mukavemetinin aynı olduğu görülmüştür. Sacın ara katmanındaki hasarın yüzeydeki hasardan sonra oluştuğunu belirtmişlerdir.

Groche vd. (2018), metal/polimer /metal sandviç panellerin kesme işlemlerinde gerekli olan kuvveti tahmin eden bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında piyasada ticari olarak bulunan ALUCOBOND® ve HYLITE FOAM® sandviç ürünlerini kullanmışlardır. Geliştirdikleri analitik model ile literatürde daha önce olan modellere göre maksimum kuvvet ve maksimum kuvvet mesafesini daha iyi tahmin etmişlerdir.

Liu ve Zhuang (2018), alüminyum/polimer/alüminyum sandviç sacların silindirik derin çekme davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada AA 5052 alüminyum alaşımı sac ve polietilen ara katman kullanmışlar ve plakaları sıcak presleme tekniği ile yapıştırmışlardır. Sandviç sacların limit çekme oranlarını simülasyonlar ile modellemişler ve deneysel olarak simülasyonları doğrulamışlardır. Ayrıca polimer katman kalınlığının LÇO'ya olan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sandviç sacların çekilebilirliklerinin yüzeydeki sacın çekilebilirliği ile birlikte arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca sandviç sacların LÇO'larının polimer katman dayanımının artmasıyla azaldığını göstermişlerdir.

Park vd. (2020), iki adet DP590 çelik sacı epoksi, polietilen ve bu ikisinin karışımından oluşan 3 farklı yapıştırıcı ile birleştirmişlerdir. Üretilen sandviç plakaların çekme testi ile mekanik özelliklerini, kayma ve soyulma testleri ile yapışma özelliklerini belirlemişlerdir. Ayrıca V bükme testi ile katmanlar arası ayrılma durumunu deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda katmanlar arası ayrılmanın kayma ve kıvrılma sonucun oluştuğunu belirlemişlerdir. Ayrılmanın bu iki durumdan baskın olan durum altında gerçekleşeceğini ortaya koymuşlardır.

Metal-polimer-metal sandviç plakalar eğer cıvata veya kaynak gibi yöntemlerle birleştirilecekse bu plakalara yapılan lokal takviyeler önem kazanmaktadır. Birbirleri ile cıvata yardımıyla birleştirilmiş takviyesiz sandviç panellerde, dinamik koşullarda cıvatalardaki ön gerilme kuvveti azalmaktadır. Diğer taraftan kaynaklı birleştirmelerde ise arada bulunan polimer katman buharlaşarak hem kaynağı zayıflatmakta hem de kaynak bölgesinde korozyona sebep olmaktadır (Sokolova vd., 2011). Takviyeli malzemelerde katı metal ya da metal ağ şeklinde olan takviye elemanı çekirdek içerisinde belirli bir yere yerleştirilerek yapının kolay kaynak edilmesini veya o bölgedeki dayanımı arttırarak ön gerilme kuvvetinin azalmasını engellemektedir. Bu durumda takviyeli ve takviyesiz sandviç panellerin şekil alma davranışlarında farklılıklar gözlenmektedir.

Sokolova vd (2011), sandviç panelleri yuvarlak katı metal ve metal ağ ile takviyelendirerek bu levhaların derin çekme ve gerdirme özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca Nakajima testi kullanılarak şekil alma kabiliyetleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda takviyeli panellerin daha yüksek şekil alma performansı sergilemesi için

zımba çapından daha buyk takviye kullanılması gerektiği görülmüştür. Eğer termal bir birleştirme yapılmayacaksa ağ yapısına sahip takviye elemanı kullanmanın daha faydalı olacağı ortaya çıkmıştır. Her iki durumda da kullanılan takviyenin, takviyesiz panellere göre dış katmandaki incelmeyi önlediği ve rijitliği arttırdığını göstermişlerdir.

Harhash vd (2014b), paslanmaz elik sandviç panel arasındaki polipropilen levha içerisine yerleştirilen paslanmaz elik takviyelerin akma özelliğine etkisini araştırmak için panelin flanş bölgesine takviye yerleştirmiş ve derin çekme ile şekillendirmiştir. Buna ek olarak, eklenen takviyenin bölgesel deformasyon üzerindeki etkisini, takviyenin etrafında ve farklı derin çekme adımlarında karakterize etmişlerdir. Flanş bölgesine konan takviye elemanı akış ve deformasyon davranışını etkilemiştir. Hasar oluşumu i katmanda gecikmiş, dış katmanda ise daha erken meydana gelmiştir.

Harhash vd (2017), daha önceki çalışmalarının devamı niteliğinde, paslanmaz elik sandviç panel arasındaki polipropilen levha içerisine yerleştirilen paslanmaz elik takviye boyutunun, geometrisinin, malzemesinin (rg ve katı takviye) ve konumunun (zımba kenarında ve flanşta) derin çekme ve gerdirme koşulları altında şekillendirme davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, eğer takviye flanş bölgesine yerleştirilirse hasar oluşumuna olan etkisi minimum olurken, sadece takviye çevresinde majör gerinim farklılıkları oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca takviye, zımba kavisinin altına gelecek şekilde yerleştirilirse parçanın daha erken hasara uğradığını göstermişlerdir. Takviye flanş bölgesine yerleştirildiğinde ise takviye boyutu ve geometrisi sadece yerel etkiler göstermiştir. Ayrıca takviye boyutunun artması ile şekillendirilebilirliğin düştüğü gözlenmiştir.

Tablo 2.3. Sandviç paneller ile yapılmış çalışmalar

Araştırmacı	Yıl	Malzeme	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı	Deneysel yöntemler	FEM
Kim ve Thomson	1990	Acousteel	-	-	4 nokta eğme, U-kanal bükme	Yok
Kim vd	2003	Al/PP/Al	Yapıştırma	EVA	ŞSD, Analitik yöntem	Yok
Weiss vd	2007	Al/PP/Al	-		Çekme testi, Kayma testi, ŞSD, 4 nokta eğme, Kanal bükme, Derin çekme	Yok
Kim vd	2009	Al/PP/Al	Haddeleme		Derin çekme, ŞSD, Batma testi	Var
Sokolova	2011	Çe/PP-PE/Çe	Yapıştırma	Epoksi	Derin çekme, ŞSD, 3 nokta eğme	Yok
Carrado vd	2011	Çe/PP-PE/Çe Al/PP-PE/Al	Haddeleme ve Sıcak Pres	Köratac ve Mowital	Derin çekme	Yok
Sokolova vd	2012	Çe/PP-PE/Çe	Yapıştırma	Köratac	Derin çekme	Yok
Liu ve Xue	2013	Al/PE/Al	Sıcak Pres	Polietilen	ŞSD, tensile test	Yok
Harhash	2014	Çe/PP-PE/Çe	Haddeleme	Epoksi	Derin çekme, ŞSD, Çekme testi	Yok
Harhash	2016	Çe/PP-PE/Çe	Haddeleme	Epoxy	Derin çekme	Yok
Park vd	2020	ÇE/PEE/Çe	Yapıştırma	Akrilik (ACRY), Polietilen (PE), Polietilen epoksi (PEE)	Çekme testi, V-bükme testi	Var

2.4. Elyaf-Metal Lamineler Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Elyaf-metal lamineler, elyaf takviyeli kompozit ile metal sacların yapıştırılması ile elde edilen metal-kompozit panellerin bir çeşididir. Bu hafif yapılar metallerin süneklik, şekil alma, darbe, yüzey kalitesi gibi üstün özelliklerini taşımakla birlikte, elyaf kompozitlerin yüksek mukavemet, yüksek rijitlik, iyi korozyon dayanımı ve yorulma dayanımı gibi özelliklerini ihtiva etmektedirler.

Mosse vd (2005) tarafından yapılan çalışmada, ön ısıtma sıcaklığının etkisi ve çekirdek malzeme özelliklerinin dikdörtgen kap şekillendirmeye olan etkisi incelenmiştir. Cam elyaf takviyeli polipropilen çekirdekli elyaf metal lamineler flanş bölgesinde kırışma gösterirken, sadece polipropilen takviyeli kompozitlerde ise kırışma olmaksızın alüminyum katmadan ayrılma gözlenmiştir.

Gresham vd (2006), elyaf metal laminelerin şekillendirme davranışını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında ön ısıtma sıcaklığı, baskı plakası kuvveti gibi işlem değişkenlerinin şekillendirilebilirliğe olan etkilerini incelemiştir.

Reyes ve Kang (2007), polipropilen esaslı termoplastik elyaf-metal laminelerin mekanik ve şekillendirilebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında bu yeni hafif malzemenin metal ve elyafların mükemmel mekanik özelliklerini belirlediler. Ayrıca bu malzemenin otomotiv ve havacılık sektörü için üretilerek kullanılabileceğini belirttiler.

Havacılık endüstrisinde (Airbus 380) alüminyum tabakalar ile cam elyaf takviyeli bir epoksi birleşimi olan GLARE veya ARALL, çok iyi bilinen ancak seri üretimi çok pahalı olan malzemelerdir. Ibarra-Castaneda vd (2011), GLARE'deki tabakalar arası ayrılmayı incelemiş ve cam elyafların sertleştikten sonra sınırlı deformasyon davranışına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Rajabi ve Kadkhodayan (2011), baskı plakası kuvvetinin, ön ısıtma sıcaklığının ve malzeme özelliklerinin elyaf-metal laminelerin kırışmasına olan etkisini incelemiştir. Çalıştıkları sıcaklık aralığında elyaf-metal laminelerin sıcaklıktan çok metalin özelliklerine karşı duyarlı olduklarını göstermişlerdir.

Davey vd (2013), CF (Karbon Fiber)/PEEK (Polietereterketon) levhalarının form baskı işlemini simüle etmek için bir FE modeli geliştirmiştir. Model, çeşitli baskı plakası kuvvetleri altında yapılan form baskı deneyleri ile doğrulanmış, gerilmenin

gelişimi ölçülmüş ve FE simülasyonlarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda farklı şekil değiştirme değerlerinde hasar oluşumu görülmüş ve hasar bölgeleri sonlu elemanlar yöntemi ile başarılı şekilde tahmin edilmiştir.

Rajabi vd (2015), iki farklı termoplastik metal kompozit plakanın derin çekme sürecini araştırmışlardır. Sıcaklık maksimum şekillendirme kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahipken, baskı plakası kuvveti ise katmanların kırışmasında etkili olduğunu göstermişlerdir.

Tablo 2.4. Elyaf metal lamineler ile yapılmış çalışmalar

Araştırmacı	Yıl	Malzeme	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı	DeneySEL yöntemler	FEM
Mosse vd	2005	FML	Sıcak pres	Polipropilen	U-kanal geri esneme	Yok
Gresham vd	2006	FML	Sıcak pres	Polipropilen	Küresel zımba ile gerdirmeye	Yok
Reyes ve Kang	2007	TFML	Sıcak pres	Polipropilen	Çekme testi, ŞSD	Yok
Rajabi ve Kadkhodayan	2011	FML	Sıcak pres	Polipropilen	Derin Çekme, Kırışıklık	Var
Davey vd	2013	CF/PEEK	Belirtilmemiş	-	Küresel zımba ile gerdirmeye	Var
Rajabi vd	2015	Al/GFRP veya Polipropilen/AL	Sıcak pres	Polipropilen	Küresel zımba ile gerdirmeye	Var

2.5. Literatür Hakkında Genel Değerlendirme

Sac metal ile oluşturulmuş tabakalı kompozitler hakkında önceki yıllarda yapılmış çalışmalar çift katmanlı saclar, katmanlı saclar, sandviç plakalar ve elyaf metal lamineler şeklinde 4 ana gruba ayrılarak özetlenmiştir. Bu kompozit grupları arasında en düşük şekillendirilebilirliğe sahip elyaf metal lamineler hakkında diğer gruplara göre daha az çalışma mevcuttur. Özellikle derin çekme ile şekillendirilebilirliği düşük olması sebebiyle otomotiv sektörü yerine havacılık alanında tercih edilmektedir.

Sandviç panellerde ise ara katmanda polimerik bir katman olması ve bu katmanın elektriği iletmemesi yapılan çalışmaların ana çıkış noktası olmuştur. Bu sebeple ara katmanda bir takviye elemanının kullanılması ve bu takviye elemanının derin çekme işleminin performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca ara katman kalınlığının derin çekme ve şekillendirilebilirliğinin araştırılması yapılan çalışmalarda ortak paydadır.

Katmanlı saclar önceki çalışmalarda genellikle üretim yöntemi olarak diğer katmanlı saclardan farklılaşmaktadır. Aynı sac metalden iki veya daha fazla katmanlı veya farklı sac metallerden oluşan katmanlı saclar genellikle haddeleme yöntemi ile birleştirilmiştir. Özellikle ilk birleştirme işleminden sonra elde edilen sacın tekrar üst üste yığılarak birkaç paso daha haddelenmesi ile çok katmanlı ve metalürjik olarak bağlı bir yapı oluşmaktadır. Yapılan çalışmalarda haddeleme sırasındaki paso sayısının derin çekme ve şekillendirme işlemlerine olan etkisi araştırılmıştır. Ayrıca katmanlar arası bağlantının metalürjik olması sebebiyle iç yapıdaki değişikliğin şekillendirme işlemine etkileri de araştırmacıların değindiği bir diğer konu olmuştur.

Çift katmanlı saclar literatürde diğer katmanlı saclara göre derin çekme ve şekillendirme alanında en çok çalışma bulunan konudur. Yapılan çalışmalarda çift katmanlı saclar farklı iki metalden oluşmakta ve yapıştırma, haddeleme, döküm ve patlamalı kaynak yöntemleri ile birleştirildiği görülmüştür. Yapıştırma işlemlerinde poliüretan bazlı yapıştırıcılar kullanılmıştır. Çift katmanlı sacların derin çekme işlemi sırasındaki kırışma davranışı üzerine daha çok araştırma olduğu görülmüştür. Derin çekme işlemi analitik olarak modellenmiş ve bu modeller deneyler ile doğrulanmıştır. Daha genel bir ifade ile derin çekme işlemi ve şekillendirilebilirliğin belirlendiği şekillendirme sınır diyagramları hem deneysel olarak elde edilmiş hem de analitik yöntemler ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca bazı çalışmalar sonlu elemanlar metodu ile desteklenmiştir.

Literatür özellikle çift katmanlı saclar açısından incelendiğinde tespit edilen eksiklikler şu şekildedir:

- Yapılan çalışmalarda oluşturulan çift katmanlı sacların yapışma dayanımlarının belirlendiği ve bu sacların diğer katmanlı saclar arasındaki yerini gösteren çalışma sayısı sınırlıdır.
- Oluşturulan çift katmanlı saclar için derin çekme işlemlerinde kullanılabilecek baskı plakası ve limit çekme oranının bir arada verildiği bir işlem penceresi oluşturulmamıştır.
- Birçok çalışmada katmanlar üzerindeki gerilme dağılımı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesine rağmen, bunu destekler nitelikteki deneysel tespitlerin olmadığı görülmüştür.

- Çalışmalarda sonlu elemanlar metodu ile yapılan modellerde genel olarak katmanlı saclar birçok farklı şekilde modellenmesine rağmen yapıştırma yöntemi ile üretilmiş çift katmanlı saclar için bir model önerilmemiştir.

Yukarıda yapılan tespitler neticesinde bu doktora tezinde literatürle uyumlu olarak Çe/Al çift katmanlı saclar poliüretan bazlı yapıştırıcı ile yapıştırılarak üretilmiştir. Tekil ve katmanlı sacların mekanik özellikleri belirlenmiş, derin çekme testleri yapılmış ve şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiştir. Literatürden farklı olarak çift katmanlı sacların soyulma ve bindirme bağlantısı testleri ile yapışma dayanımları belirlenmiş ve diğer katmanlı saclar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan derin çekme testleri neticesinde çift katmanlı saclar için işlem pencereleri oluşturulmuş ve Çe/Al ve Al/Çe dizilimlerinin derin çekme işlemine etkisi vurgulanmıştır. Derin çekme işlemi sonrasında malzeme üzerindeki pekleşme durumları yüzey sertlik ölçümü ile tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan sac metaller, yapıştırma yöntemi ve yapılan testler gibi çalışmayı oluşturan ana bileşenler Tablo 2.5’te verilmiştir.

Tablo 2.5. Çalışmada kullanılan malzeme ve yöntemler

Yapı	Çift Katmanlı
Sac	DC01/EN AW 5754 H111
Birleştirme yöntemi	Yapıştırma
Yapıştırıcı	Poliüretan (Polimex 3002)
Yapışma dayanımı	T-soyulma testi, Tek etkili bindirme testi
Mekanik özellikler	Tek eksenli çekme testi, sertlik ölçümü
Geri esneme oranı	V-bükme testi
Şekillendirilebilirlik	Derin çekme, düzlem dışı gerdirmeye testleri
Sonlu elemanlar metodu	Çift katmanlı sacın ve derin çekme işleminin modellenmesi

Tezin ikinci kısmında ise derin çekme işlemi sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Önceki çalışmalarda kullanılan sonlu elemanlar modellerinin katmanlı sacların üretim yöntemi ile uyumlu olarak modellendiği belirlenmiştir. Örnek olarak haddeleme ile metalürjik bağlı olarak elde edilen katmanlı saclar sonlu elemanlar metoduyla modellenirken yekpare bir sac olarak modellenmişlerdir. Ancak yapılan çalışmalarda yapıştırma ile oluşturulmuş çift katmanlı saclar için önerilmiş bir model bulunmamaktadır. Bu doktora çalışması ile literatürdeki model tiplerine ek olarak iki farklı model daha geliştirilmiştir. Bu modellerden deneysel sonuçlara en yakın sonucu veren model belirlenerek literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışma tezin özgün yanı olup bundan sonraki çalışmalarda sonlu elemanlar metodu ile yapılacak analizlerde doğrudan kullanılabilir.

Diğer taraftan katmanlı sacların şekillendirilmesi üzerine ülkemizde yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışmalar arasında ise farklı metallerin birleştirilmesi ile oluşturulmuş çift katmanlı saclar ile ilgili çalışmaya ulaşamamıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda sonlu elemanlar analizlerine yer verilmemiştir. Ülkemiz endüstrisine bakıldığında otomotiv sanayi önemli bir yer kaplamaktadır. Otomobillerdeki bir çok bileşen derin çekme, form verme, bükme gibi şekillendirme işlemleri ile elde edilmektedir. Son yıllarda enerji tasarrufunun ön plana çıkması ile çift katmanlı saclar gibi hafif yapılar ve bu yapıların şekillendirilebilirliği önem kazanmaktadır. Dolayısı ile katmanlı saclar ve bu sacların şekil alma kabiliyetleri üzerine yapılan çalışmaların artması ile ülkemizin bu alandaki bilgi düzeyine olumlu katkılar sağlayacaktır.

3. KATMANLI SACLAR

Otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisi gibi yerlerde farklı ve yeni işlevlere sahip malzemelere olan talep giderek artmaktadır. Metaller, seramikler veya polimerler gibi malzemeler tek başlarına bazı orijinal uygulamalar için istenilen tüm teknolojik ihtiyaçları karşılayamazlar. Bu sebeple üstün özelliklere sahip malzemeler elde etmek için tek malzemeler birleştirilerek yeni melez malzemeler oluşturma ihtiyacı doğmuştur. Literatürde farklı iki veya daha fazla malzemenin kimyasal etkileşime girmeden bir araya getirilerek oluşturduğu yeni malzemeye “kompozit” adı verilmektedir. Kompozit malzemeleri oluşturan malzemeler genellikle farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Bir araya getirilmeleri ile oluşan kompozit malzeme ise daha farklı özelliklere (hafiflik, yüksek dayanıklılık, elektrik iletkenliği vb.) sahip olur. İçerisinde çelik bulunan beton yapılar, çamur ve saman karışımından oluşan kerpiç evler yaygın olarak bilinen kompozit yapılarıdır. Bugün metal matrisli, polimer matrisli, partikül takviyeli, fiber takviyeli gibi birçok farklı çeşit kompozit bulunmaktadır.

Katmanlı saclar iki veya daha fazla malzemedan oluşması ve yeni malzemenin farklı özelliklere sahip olması sebebiyle bir kompozit malzeme olarak değerlendirilmektedir. İki veya daha fazla aynı veya farklı sac metalin ara katmanda bulunan bir yapıştırıcı veya farklı bir yöntemle birleştirilerek oluşturulmuş yeni malzemeye “katmanlı sac” adı verilmektedir. Bu malzemelerde katmanlar aynı metalden olduğunda ara katmanda bir yapıştırıcı veya polimerik bir malzeme bulunmaktadır. Katmanlar farklı metallerden olduğunda ise yapıştırıcı veya polimerik malzemenin yanında kaynak veya perçin gibi yöntemler kullanılarak katmanlı sac üretilmektedir. Diğer taraftan genellikle katmanların aynı olması ve katmanlar arasında polimerik bir çekirdek olması durumunda oluşan yeni malzemeye sandviç panel ismi verilirken, katmanların farklı malzemedan olması durumunda çift katmanlı (bimetalik) sac ismi verilmektedir.

3.1. Katmanlı Sacların Özellikleri

Katmanlı saclar hafiflik, ağırlığına oranla yüksek dayanım ve rijitlik, yüksek yük taşıma kapasitesi, yüksek yorulma dayanımı, geliştirilmiş termal ve akustik izolasyon ve titreşim sönümlenme gibi çeşitli özelliklere sahip olabilirler. Ancak katmanlı sacların bu üstün özelliklere sahip olabilmesi için birtakım zorlukların üstesinden gelinmelidir. Bunlar; metal-polimer arası yapışma, şekillendirilebilirlik, birleştirme problemleri

(kaynak, perçin vb.), talaşlı imalat ve geri dönüşüm gibi zorluklardır. Metal-polimer arası yapışma homojen ve düzgün olmazsa sacda ayrılmalar görülebilir. Ara katmanın düşük şekillendirilebilirliğe sahip olması veya gevrek olması durumunda ara katmanda kopmalar ve kırılmalar görülebilmektedir. Diğer taraftan katmanlı sacların kaynak edilebilirliği ayrı bir sorundur. Elektrik geçirgenliğinin ve termal geçirgenliğinin düşük olması ve yüksek sıcaklığın ara katmanı eritmesi gibi problemler dikkat çekmektedir.

Yapıştırma ile üretilen katmanlı saclar genel olarak üç önemli bileşenden oluşmaktadır (Harhash, 2017). Bunlar:

1. **Yüzey katmanı:** Bu katman yükü taşıyan ve şekillendirme enerjisinin büyük kısmını absorbe eden katmandır. Çelik, alüminyum, titanyum veya karbon fiber takviyeli polimerler yüzey katmanı olarak kullanılmaktadır. Bu katmanın genel özellikleri yüksek eğilme ve kayma dayanımı, yüksek mukavemet, yüksek korozyon dayanımı ve yüksek şekillendirilebilirliktir.
2. **Çekirdek katman:** Dış katmana göre daha kalın ve özellikle yüzey normalinde yeterli rijitliğe sahiptir. Bu katmanlar fiber takviyeli polimer, polimer, köpük, bal peteği, kauçuk veya viskoelastik reçinelerden olabilir. Bu katmanın hafif, yük altında stabil, rijit, işlem ve çalışma sıcaklıklarında termal olarak kararlı olması beklenir.
3. **Yapışma ara yüzeyi:** Çekirdek katman ile yüzey katmanı arasında kırışma ve katmanlar arası ayrılmayı önler. Silikon yapıştırıcılar, poliüretan katkılı reçineler, epoksiler yapışma ara yüzeyini oluşturabilir. Ayrıca yapışma ara yüzeyi ile çekirdek katman aynı malzemeden olabilir.

3.2. Katmanlı Sacların Üretim Yöntemleri

Katmanlı sacların üretimlerinde birçok farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları sadece birleştirme odaklıyken, diğerleri ise seri üretime uygun yöntemlerdir. Bu yöntemler kaynaklı birleştirmeler, şekil bağlı birleştirmeler ve yapıştırımlar olmak üzere genel olarak üç ana grupta toplanabilir.

3.2.1. Kaynaklı Birleştirme

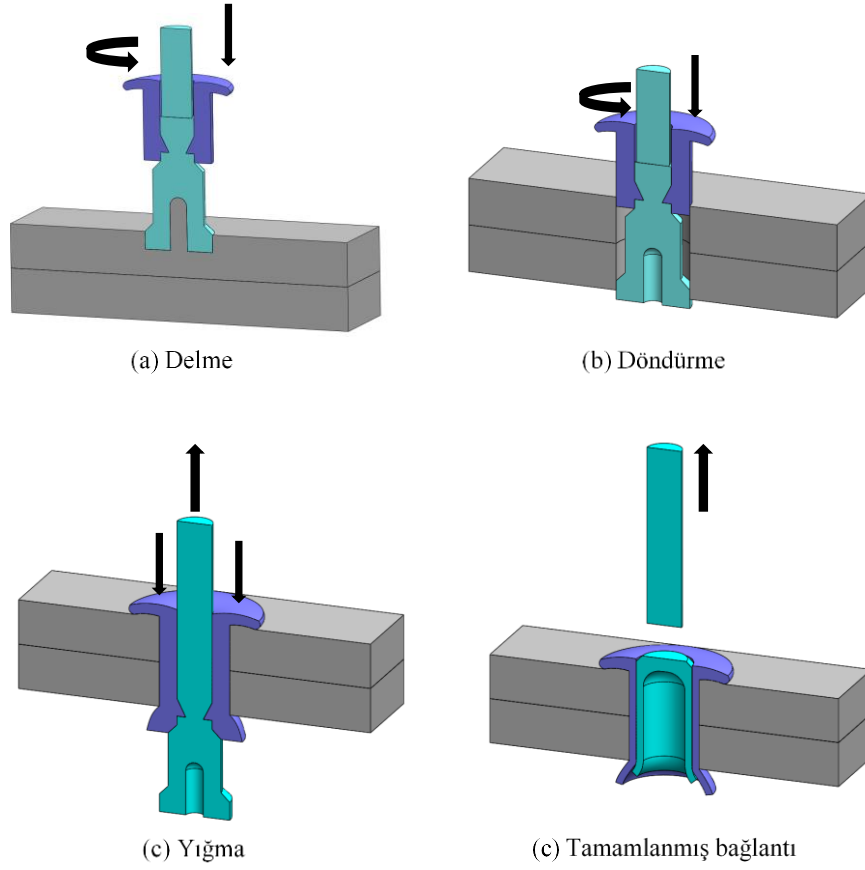
Punta kaynağı, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Katmanlı sacların birleştirilmesinde de bu yöntem kullanılmaktadır. Bu

yöntemde malzemenin lokalize ısınması malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu sebeple katmanlı sac üretiminde fazla tercih edilmeyen bir yöntemdir. Diğer taraftan punta kaynağı ile aynı mantığa sahip dikiş kaynağı da kullanılan bir diğer yöntemdir.

Lazer kaynağı geleneksel kaynak tekniklerine kıyasla bazı avantajlar sunar. Bunlar; bileşenlerin az miktarda bozulması, yüksek nüfuziyet derinliği, daha geniş kaynaklanabilir malzeme çeşidi ve farklı türdeki malzemeleri birleştirme yeteneği olarak özetlenebilir (Mackwood ve Crafer, 2005). Lazer kaynağı, iyi bir konumlandırma ve yüksek kaynak hızlarının gerekli olduğu uygulamalar için uygun bir işlemdir. Odak noktasındaki yüksek güç yoğunluğu nedeniyle, işlenecek malzeme erime noktasına ulaşana kadar ısınır ve kaynak yapılır (Tsoukantas ve Chryssolouris, 2008). İşlemin özel ve pahalı ekipmanlar gerektirmesi sebebiyle çok fazla tercih edilmemektedir.

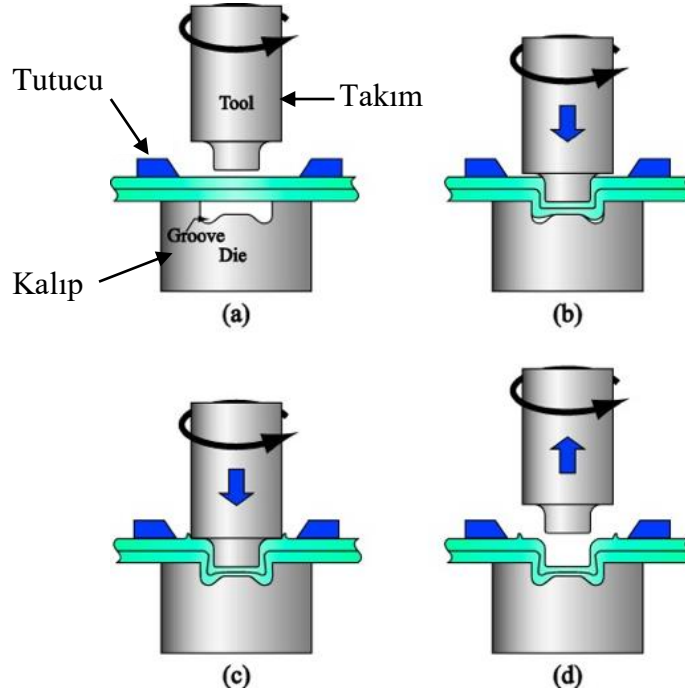
3.2.2. Şekil Bağlı Birleştirmeler

Perçinleme, iki ince sacı kalıcı olarak sabitlemek için kullanılan yöntemlerden biridir. Perçinleme teknolojisi, sacı kendi kendine delen perçinlerin tanıtılmasıyla geliştirilmiştir (Hill, 1994; Barnes ve Pashby, 2000). Kendiliğinden delen perçinleme, sac malzemelerin nokta birleştirmesi için yüksek hızlı bir mekanik sabitleme tekniğidir (Şekil 3.1). Otomotiv sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır. Perçinlemenin avantajı, termal hasara neden olmadan farklı malzemelerin birleştirilebilmesidir (Grote ve Antonsson, 2009). Yapıştırıcılar ile birlikte kendi kendine delen perçin teknolojisinin yüksek yorulma mukavemeti ve yüksek güvenilirlik derecesinde sızdırmaz birleşme yerleri sunabilmesi nedeniyle otomotiv montajında punta kaynağına uygun bir alternatif sunar (Mortimer, 2005).



Şekil 3.1. Kendiliğinden delerek perçinleme işlemi (Lathabai vd., 2011)

Bir diğer perçinleme yönteminde ise sac malzemeler delinmeden sadece bir zımba ile ezilerek birleşmesi sağlanmaktadır (Şekil 3.2). Bu yöntemde endüstride ezdirme yöntemi denilmektedir. Ezdirme ile birleştirme otomotiv endüstrisinde sac plaka elemanlarının montajında güçlü bir şekilde kullanılmaktadır (Varis, 2003). Bu yöntemde katmanlı saclar delinmeden yerel olarak damgalanarak ve malzeme yapısı üzerinde herhangi bir ısı etkisi oluşmadan üretilir. Hibrit sistemler için, birleştirilen bileşenlerden birine ek olarak bir yapıştırıcı uygulanır.



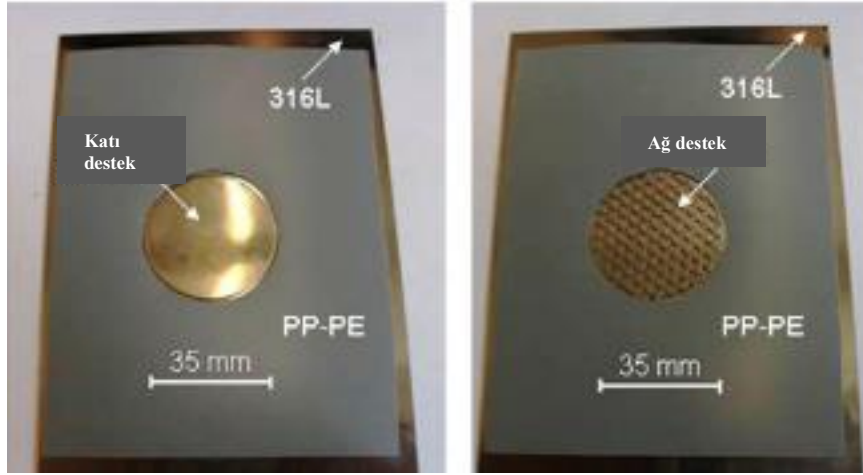
Şekil 3.2. Katmanlı sacların ezdirme yöntemi ile birleştirilmesi (Lin vd., 2018)

3.2.3. Yapıştırma

Yapıştırıcı ile katmanlı sacların üretilmesi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Katmanlı saclar özellikle kayma yönünde yüklemeye maruz kalıyorsa bu durumda sadece yapıştırıcı ile birleştirme yeterlidir. Yüksek kaliteli yapıştırıcılar, farklı sacların düşük maliyetle birleştirilmesini, bileşenlerin deformasyonunu önlerken gürültü ve titreşimlerin sönümlenmesini de sağlar. Aynı zamanda, yapıştırıcı kullanılması durumunda malzemede diğer birleştirme yöntemlerinde oluşan artık gerilmeler olmayacağından dolayı malzemelerin yorulma direnci artabilir (Barnes ve Pashby, 2000; Huck ve Bosshard, 2007). Diğer taraftan yüzeylerin durumu (yağ ve kirden arındırılması vb.), yapıştırıcının yüzeylere uygulanması ve işlem parametreleri (zaman, sıcaklık ve basınç gibi) yapıştırmanın kalitesine etki eder.

Haddeleyerek yapıştırma işlemi, tanımlanmış sıcaklık-basınç-zaman koşullarında metal-polimer-metal katmanlı sacların seri üretimi için kullanılan bir yöntemdir (Sokolova vd., 2011; Carradò vd., 2011; Palkowski ve Lange, 2007). Sandviç yapının en önemli problemi, bağlantı yerlerindeki elastik polimer çekirdeğin uzun süre veya dinamik yükleme koşullarında erken hasara uğramasıdır. Bu durumun üstesinden gelmek için katmanlı sacların arasına yerel destekler konulmaktadır (Bozhevolnaya ve Lyckegaard, 2005). Ara katmana konulan destekler, katmanlı sacların daha erken bozulmasına yol açabilecek karmaşık birleştirme yöntemlerinin

kullanımını azaltır. Bir başka deyişle katmanlar arası elektrik iletkenliği sağlanabileceğinden dolayı kaynaklı birleştirmeler yapılabilir. Ayrıca bu desteklerin özel ihtiyaçlara (örneğin yük) göre uyarlanması katmanlı saca ekstra özellikler kazandırabilir. Şekil 3.3'te yerel olarak destek elemanı yerleştirilmiş bir sandviç plaka örneği verilmiştir.



Şekil 3.3. Yerel olarak desteklenmiş sandviç plaka örneği (Sokolova vd., 2011)

Yapıştırma ile birleştirme yönteminin kaynak ve mekanik bağlantı yöntemlerine göre avantajları şu şekilde sıralanabilir (Habenicht, 2009; Amancio-Filho ve dos Santos, 2009):

- Artık gerilme oluşturmadan farklı malzemelerin birleştirilebilmesi
- Yorulma dayanımının artması
- İyi yüzey özellikleri ve sızdırmazlık
- Çok ince malzemelerinde birleştirilebilmesi
- En önemli özellik ise düşük sıcaklıklarda kürlenmesi sebebiyle polimerlerin yapısını bozmadan birleşebilmesi

Yapıştırma ile birleştirmenin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar (Harhash, 2017):

- Sınırlı demontaj durumu,
- Yüzeylerin iyi bir şekilde hazırlanması zorunluluğu,
- Kayma yüklerine dayanıklı olmasına karşın soyulmaya karşı düşük dirence sahip olması,
- İşlem anında katmanların ayrılması gibi öngörülemeyen hasar durumları

- Sıcaklık değişimine karşı hassas olmaları
- Üretim sonrasında kürlenme için beklenmesi
- Bazı yapıştırıcılarda zararlı kimyasallar kullanılmasıdır.

3.3. Ticari Olarak Katmanlı Saclar

Katmanlı saclar farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit yapılar olduğundan dolayı birleştirme ve şekillendirme gibi özellikleri ile tek malzemelerden farklıdırlar. Genellikle daha düşük mukavemetli ve hafif bir malzemenin ara katmanda ve daha yüksek mukavemetli malzemenin ise dış katmanda kullanılması ile katmanlı saclar oluşmaktadır. Hafif ara katmanlar polimer folyolardan, balsa ağacından, polimer köpüklerden, metalik, kâğıt veya polimer bal peteği yapılarından oluşabilir. Bu malzemeler karbon, cam, aramid fiber takviyeli polimerler ile alüminyum, titanyum ve çelik gibi dış katmanlar ile kullanılmışlardır. Katmanlı sacların oluşturduğu hafif yapılar başta otomotiv ve havacılık sektörü olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır.

Tablo 3.1’de ticari olarak satılan ve kullanılan katmanlı ürünler dış ve ara katmanları ile birlikte verilmiştir. Bu ürünlerden Hylite® arabalarda çatı, taban ve kaput malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu malzeme hafiflik ve yüksek sönümlenme özelliğine sahiptir. Hylite®’tan sonra çelik/polyamid/çelik ürünler de kullanılmaya başlanmıştır.

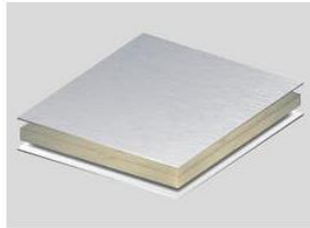
Tablo 3.1. Ticari katmanlı ürünler (Palkowski vd., 2013; Harhash, 2017)

Ticari isim	Dış Katman	Ara Katman	Referans
Alucobond®	Al	Polietilen	(Dulucleanu vd., y.y.; Can, 2008)
Alulight®	Al/PVC veya Mineral/PVC	Köpük Alüminyum	(Jackson vd., 2008)
ARALL®	Al	Aramid takviyeli polimer	(Johnson, 1986; Vogelesang, 1983; Johnson vd., 1998)
Bondal®	Çelik	Vizkoelastik yapıştırıcı	(A. ThyssenKrupp Stahl, 2012; Kami vd., 2017b)
CAPAAL®	Al	Karbon fiber takviyeli PA6	(Wielage vd., 2011)
CAPET®	Ti	Karbon fiber takviyeli PEEK	(Wielage vd., 2011)
Carall®	Al	Karbon epoksi	(Almeida vd., 2008)
Dibond®	Al	Polietilen	(GmbH, 2010)
FML	Metal	Fiber	(Abdullah vd., 2009)
GLARE®	Al	Cam elyaf takviyeli polimer	(Ibarra-Castaneda vd., 2011; van Tooren, 2004; Burchitz vd., 2005; Kawai ve Hachinohe, 2002; Vermeeren vd., 2003; Botelho vd., 2006; Schijve, 1993)
HTCL®	Ti	Karbon fiber takviyeli polimer	(Johnson vd., 1996)
Hybrix™	Al veya Çe	Mikro fiber takviyeli yapıştırıcı	(Jackson vd., 2008; Lamera, 2020; Marklund vd., 2013)
Hylite®	Al	Polipropilen	(Burchitz vd., 2005; Hufenbach vd., 2008)
Litecor®	Çe	PE-PA	(Wiesbaden, 2014; A. G. ThyssenKrupp Stahl, 2012)
Sollight®	Çe	Polipropilen	(Jackson vd., 2008)
Steelite®	Çe	Polipropilen	(Boesenkool vd., 1997; Gower vd., 2006)
TiGr®	β-Ti	Karbon polyamid (PMC)	(Burianek ve Spearing, 2001)
Usilight®	Çe	PP, PP/PE	(Dunand ve Gacel, 2006; Dunand ve Gauriat, 2004)
Meisitu©	Al-Çe	Patlamalı kaynak ve haddeleme	-
Meisitu©	Al-Cu	Patlamalı kaynak ve haddeleme	-
Meisitu©	Cu-Çe	Patlamalı kaynak ve haddeleme	-
Meisitu©	Ti-Al	Patlamalı kaynak ve haddeleme	-
Meisitu©	Ti-Çe	Patlamalı kaynak ve haddeleme	-

Bondal® (ThysennKrupp AG) katmanlı sacı, çelik dış kamandan ve yaklaşık 10 mikron kalınlığında polyolefin ara katmandan oluşan ticari bir üründür. Bu ürün yağ tankları, vites kutuları gibi ürünlerde dış kaplama olarak gürültü azaltma amaçlı kullanılmıştır.

Bazı saclarda tokluk ve mukavemeti arttırmak amacıyla düşük maliyetli ve kolay bulunabilen cam elyaf takviyeler kullanılmıştır. Ancak bu durumda saclar üretim sonrası soğuduktan sonra gevrekleşmeleri ve ara katmanda epoksi gibi termoset matrisler kullanılmaları nedeniyle şekillendirilememektedirler. Ayrıca tekrarlı yüklemelerde erken hasar ve katmanlar arası ayrılmalar görülebilmektedir. Fiber takviyeli ürünlere örnek olarak HTCL[®], ARALL[®], GLARE[®] ve Hybrix verilebilir. Araştırmacılar fiber takviyeli ürünlerin şekillendirilebilirliğini arttırmak için termoplastik matrisli (PP, PA ve PET) CAPAAL[®] ve CAPET[®] gibi ürünler geliştirilmiştir.

Diğer taraftan termoplastik ve metal ile oluşturulmuş katmanlı saclar şekillendirilebilirliği yüksek sacların oluşmasına imkân vermiştir. Bu tip saclar kendi içerisinde iki gruba ayrılabilir. İlk grupta Bondal[®] gibi ara katman kalınlığı 50 µm'den küçük olan katmanlı saclar genellikle gürültü sönümlemek için kullanılmaktadır. Diğer grupta ise ara katman kalınlıkları 0.3 ile 2 mm arasında değişen ve hafif olmaları sebebiyle tercih edilen Alucobond[®], Usiligth[®], Hylite[®], Steelite[®] ve Litecor[®] gibi ürünler yer almaktadır.



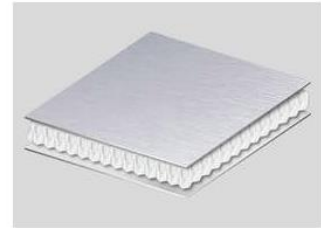
ALUCOBOND[®] PLUS

Ara katmanda geç alev alan malzeme bulunan alüminyum kompozit panel



ALUCOBOND[®] A2

Ara katmanda yanmaz mineral malzeme bulunan alüminyum kompozit panel



ALUCORE[®]

Aşırı hafif alüminyum bal peteği panel

Şekil 3.4. Alucobond[®] firmasının üretmiş olduğu farklı ürünler (GmbH, 2020)

Meisitu firması Al-Çe ve Al-Cu çift katmanlı saclarını patlamalı kaynak ve haddeleme ile üretmektedir. Al-Çe katmanlı sacını gemi yapım sektörüne özel olarak üretmektedirler. Gemi yapımı sürecinde geminin alt kısmı çelik, üst kısmı ise alüminyum yapıda üretilmekte ve bu iki farklı yapı perçin ile birleştirilmektedir. Firma üretmiş olduğu Al-Çe plakaları çelik alt gövde ile alüminyum üst gövde arasında geçiş malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sayede perçinleme işlemi ortadan kaldırılarak birleştirme işlemi kaynak ile yapılmaktadır. Al-Çe plaklara yapışma ara yüzünün

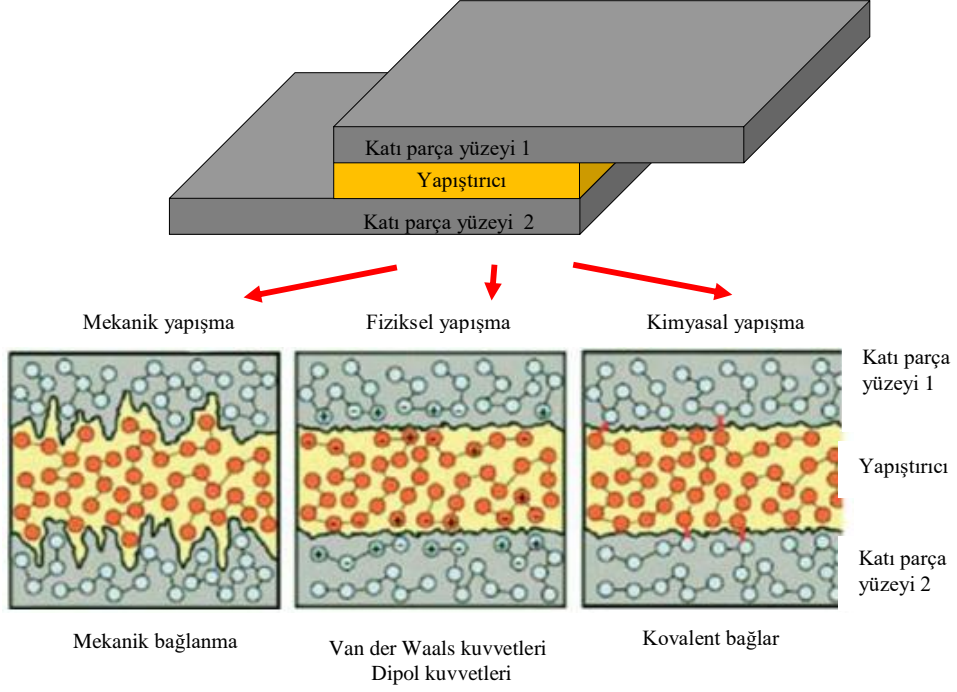
metalürjik olması sebebiyle saclar yüksek mukavemetli ve korozyona karşı dayanıklıdır. Firma farklı korozif ortamlara karşı farklı çift katmanlı saclar üretmektedir.

3.4. Metal-Polimer Adhezyonu

Yapışma, mekanik, fiziksel veya kimyasal bağlanma ile temas eden iki yüzey arasında oluşan bir ara yüz tabakasının fiziksel durumudur (Ruokolainen ve Sigler, 2008). Malzemelerin yapışma kabiliyeti ise, çeşitli materyallerin birbirleriyle etkileşime girebilmesi olarak tanımlanır.

Yüzeyler arası kendinden yapışma mümkün olmadığında katmanlar arasındaki bağlanmayı bağlayıcı madde veya yapıştırıcı sağlar. Yapıştırıcı genellikle kendiliğinden yapışan, sıcaklık veya bir aracı madde ile aktifleşen bir maddedir. Şekil 3.5, iki bileşen ve yapıştırıcıdan oluşan bir katmanlı sacın yapışmasını sağlayan farklı mekanizmaları göstermektedir. Metal/polimer/metal yapılarda yapışma aşağıdaki üç tipe ayrılır (Palkowski vd., 2013):

- Mekanik yapışma, ağırlıklı olarak yüzey pürüzlülüğü ve morfolojisine bağlıdır;
- Kimyasal yapışma, yapıştırıcı ile yapıştırılan katmanlar arasındaki kimyasal reaksiyonlara dayanır;
- Fiziksel yapışma, fiziksel süreçlere, yani bileşenlerin bağlanmasından kaynaklanan etkileşim kuvvetlerine (çekme ve itme kuvvetleri) dayanan fiziksel interpoler (artı-eksi kutupları arası bağlantı) bağlara bağlıdır.



Şekil 3.5. Farklı malzemelerin yapıştırıcı ile yapıştırılması (Palkowski vd., 2013)

Katmanlar arası yapışma, sacın işleme, şekillendirme ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Katmanların yapışma durumunu anlamak amacıyla farklı teoriler sunulmuştur. İki malzeme arasındaki mekanik yapışma (mikro-mekanik kilitleme) ve otomatik yapışma (hareketli makro moleküller arası difüzyon) basit mekanizmalara dayanırken, spesifik yapışma fiziksel-kimyasal ve termodinamik olaylara bağlıdır.

Polarizasyon teorisine göre fiziksel yapışma durumunda yapışma kuvvetlerinin, atomların veya moleküllerin dipol momentindeki artışla arttığı kabul edilir. Dipol momentleri aralarında bağ olan iki atomun birbirlerine olan uzaklıklarıyla, yüklerinin çarpımı şeklinde tanımlanır. Dolayısı ile yapışma kuvveti, atomların yükleri ve atomlar arası uzaklık ile doğru orantılıdır. Bu sebeple yapışma kuvvetinin artması için katmanlar farklı polar gruplar içermeli böylelikle farklı elektriksel kutuplar sağlanmalıdır. Bu tür polar fonksiyonel grupların bazı örnekleri, hidroksil, karbonil, karboksil, ester, amino grupları, epoksi, izosiyanat veya nitril gibi oksijen veya azot içeren grupları içerir (Palkowski vd., 2013).

Sadece yapıştırıcı ve katmanlar arasındaki fiziksel bağlara dayanan yapışma durumuna kıyasla, “kimyasal yapışma modeli” sadece moleküller arası kuvvetlerin değil kimyasal reaksiyonun da olabileceğini varsayar. Örneğin polimerler bu güçlü

kimyasal bağlardan kovalent bağları oluşturulabilir. Polimerik ve metalik yüzeylerin özelliklerini değiştirmek ve / veya iyileştirmek için bazı yüzey işlemleri uygulanabilir. Polimerik yüzeyin düşük yüzey enerjisi, korona ozon aktivasyonu veya atmosferik plazma yöntemleri gibi yüzey işlemleri kullanılarak yükseltilebilir (Liston vd., 1993; Carradò vd., 2011; Palkowski vd., 2013). Böylece metal-polimer ara yüzünün yapışması daha da kuvvetlendirilir.

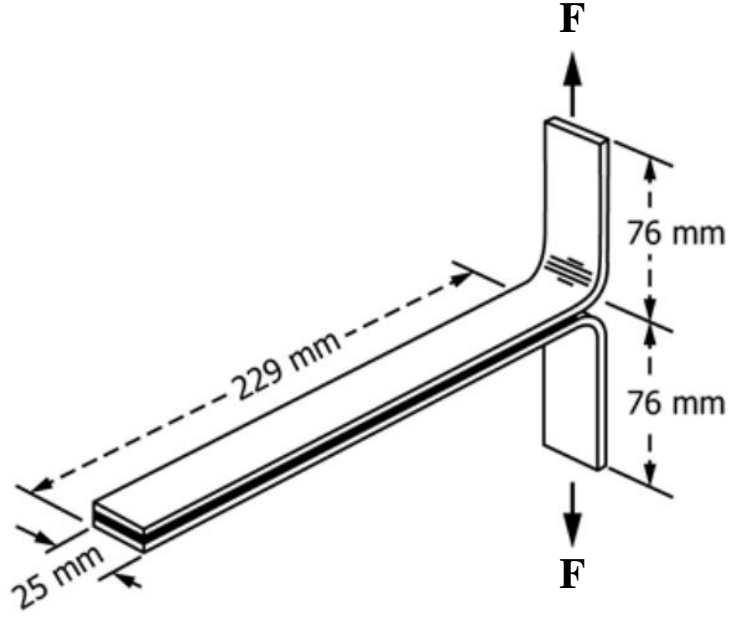
3.5. Katmanlı Sacın Yapışma Dayanımlarının Belirlenmesinde Kullanılan Testler

İki sacı birleştirerek katmanlı sac oluşturmak için çeşitli yöntemler (punta kaynağı, haddeleme vs.) mevcuttur. Çift katmanlı sac üretimi için kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri de yapıştırıcı ile yapıştırma yöntemidir. Bu yöntemde iki sac metal arasına uygun yapıştırıcı sürülerek saclar birleştirilir. Yapıştırıcı türüne bağlı olarak yapıştırıcının kurumması için belirli bir süre bekletilir ve yapıştırıcı üzerine bekleme süresi boyunca kuvvet uygulanır.

Farklı malzemeleri ortak bir yapıştırıcı film yapısında birleştirme kavramı, bu katmanların birbirine yapışacağı öngörüsüne dayanır. Yeterli yapışma olmadan, katmanlar birbirinden ayrılır ve gereken işlevi sağlamaz. Yapıştırıcı filmin çekme dayanımı, sertliği ve diğer fiziksel özelliklerinin iyi olması için iyi bir tabakalar arası yapışma gerekir. Tabakalar arası yapışmanın kalitesi T-soyulma ve tek bindirme bağlantısı testi ile ölçülebilir.

3.5.1. T-Soyulma Testi

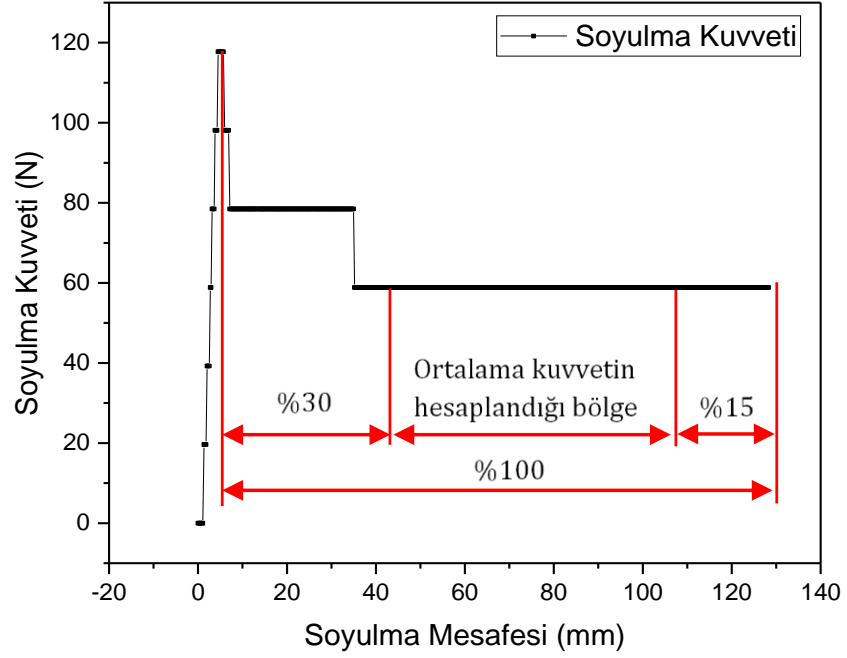
İki malzeme arasına uygulanan yapıştırıcının yapışma direncini ölçmede en çok kullanılan yöntemlerden biri T-soyulma testidir. Bu testin değişik açılarda ve değişik aparatlarda yapılan farklı türleri vardır. Ancak en çok kullanılanı ASTM D1876'da açıklanan "T-peel" (T-soyulma) testidir (ASTM D1876-08, 2015). Bu teste 305 mm uzunluğunda 25 mm genişliğindeki saclar 229 mm uzunluğunda birbirine yapıştırılır. Kalan 76 mm'lik kısım ise 90 derece bükülür. İki parçanın birleştirilmesi ile malzeme deneye ismini veren "T" şeklini alır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. T-soyulma test numunesi (ASTM D1876-08, 2015)

Hazırlanan numuneler çekme cihazının çenelerine tutturularak 254 mm/dk çekme hızı ile çekilir. Bu esnada uygulanan kuvvet ve gerçekleşen yer değiştirme miktarı cihazın yazılımı tarafından kayıt altına alınır. Test ayrılmanın başlamasından itibaren minimum 127 mm yer değiştirme değerine kadar devam eder. Test sonucunda kuvvet-soyulma mesafesinin grafiği elde edilir (Şekil 3.7). Grafikte soyulma yükü, çene hareketinin başlaması ile birlikte ani olarak yükselmekte sonrasında ise belirli bir değerde lineer olarak devam etmektedir. Grafikte elde edilen en yüksek kuvvet değeri, çatlak kuvveti (F_{maks}) olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik (3.1)'de verilen çatlak kuvvetinin numune genişliğine (b) oranı ise soyulma direnci (P_a) olarak adlandırılmaktadır (Nick vd., 2000). Testin devamında kuvvet belirli bir değere düşerek bölgesel yapışma durumuna ve cihazın hassasiyetine bağlı olarak ufak dalgalanmalar gösterebilmektedir. Bazı durumlarda farklı soyulma mesafelerinde başlangıçtaki yapışmadan daha kuvvetli yapışmalar olabilmektedir. Bu durumda ASTM D1876 standardında belirtildiği üzere test sırasında elde edilen en yüksek soyulma yükü, çatlak kuvveti olarak kabul edilmektedir (ASTM D1876-08, 2015).

$$P_a = \frac{F_{maks}}{b} \text{ (ASTM D1876-08, 2015)} \quad (3.1)$$

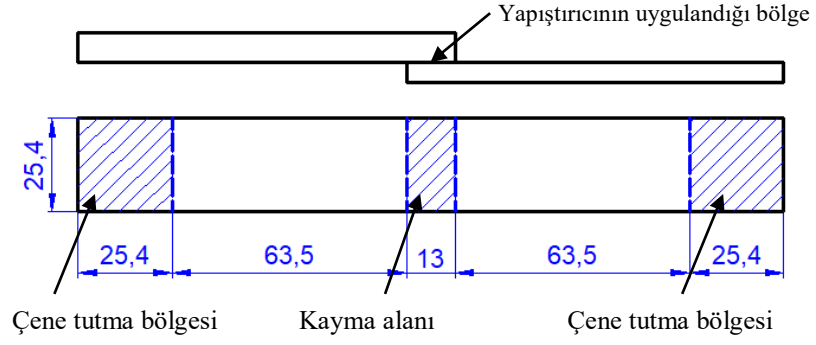


Şekil 3.7. T-soyulma testi sonucunda elde edilen örnek grafik

Eğrinin ilk pik noktasındaki soyulma mesafesi başlangıç olarak kabul edilerek soyulmanın tamamlandığı mesafe maksimum soyulma mesafesi olarak belirlenir. Burada, toplam soyulma mesafesinin %30 başlangıç ve %15 bitiş kısmından değerler atılır ve arada kalan %55’lik kısma ait kuvvetlerin ortalaması alınarak “Ortalama Soyulma Kuvveti” belirlenir.

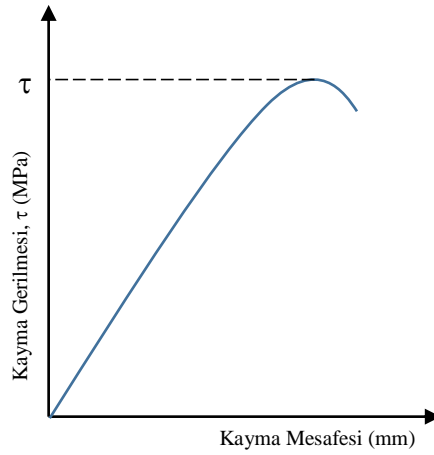
3.5.2. Tek Bindirme Bağlantısı Testi

Yapışmanın kayma doğrultusundaki dayanımını belirlemek için tek bindirme bağlantısı (single-lap-joint) veya tek etkili kayma (single-lap-shear) testi kullanılmaktadır. Yapıştırılmış metallerde kullanılan yapıştırıcıların kayma dayanımı ASTM D1002 standardı ile belirlenmektedir (ASTM D1002-10, 2005). Bu testte 102 mm uzunluğunda 25.4 mm genişliğinde iki sac metal yapıştırıcı ile uç kısımlarından 13 mm uzunluğunda yapıştırılır (Şekil 3.8). Yapıştırılan test numunesi, çekme cihazının çenelerine 25.4 mm’lik kısımlarından tutturulur. Numuneler 1.3 mm/dk’lık çekme hızı ile çekilir.



Şekil 3.8. Tek bindirme bağlantısı test numunesi

Test sonucunda elde edilen çekme kuvveti kayma alanına bölünerek kayma gerilmesi hesaplanır. Kayma gerilmesine karşılık kayma mesafesi grafik olarak verilir (Şekil 3.9). Bu grafikte görülen en yüksek gerilme değeri yapıştırıcının kayma dayanımı vermektedir.

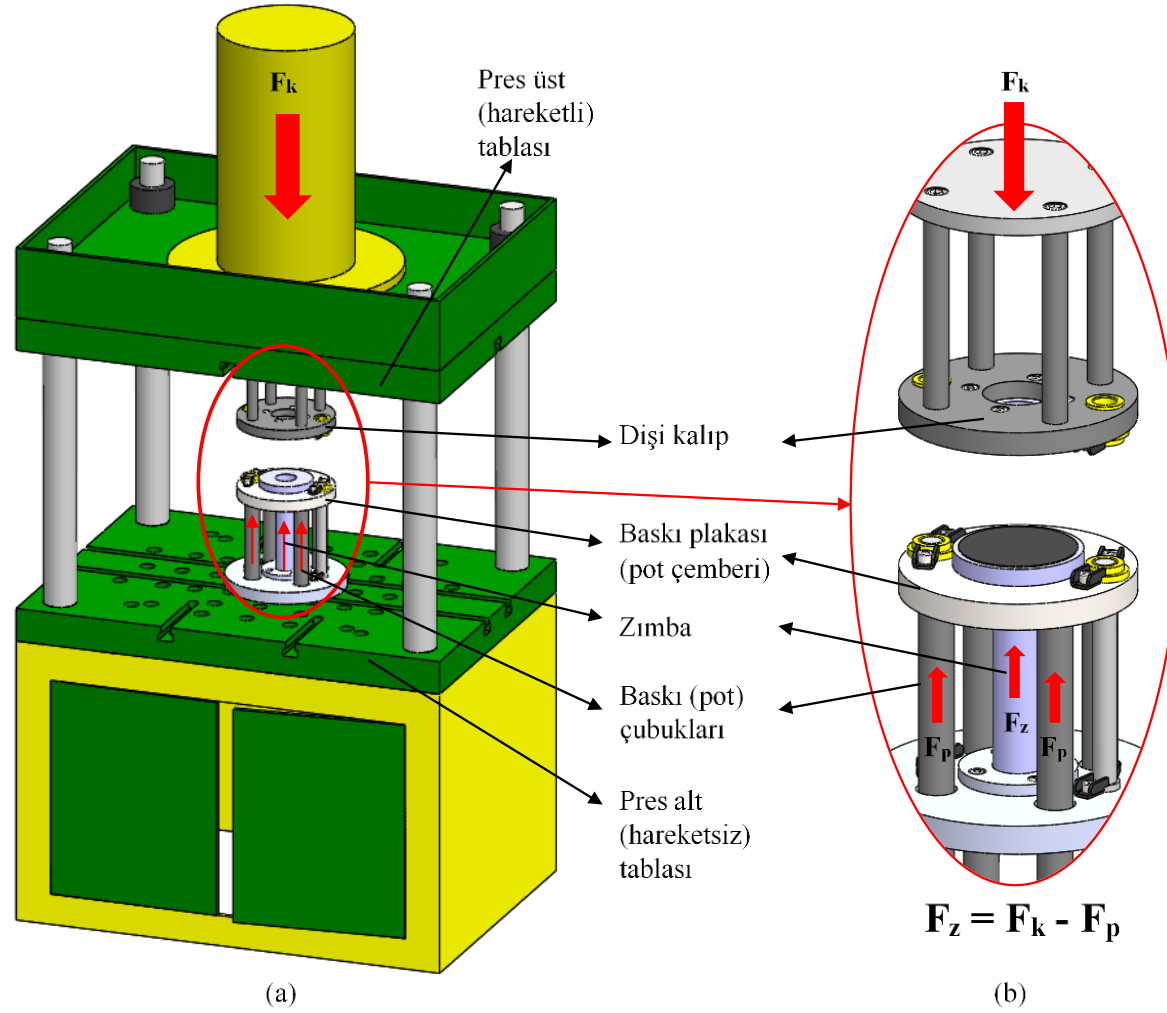


Şekil 3.9. Tek bindirme bağlantısı testinden elde edilen grafik

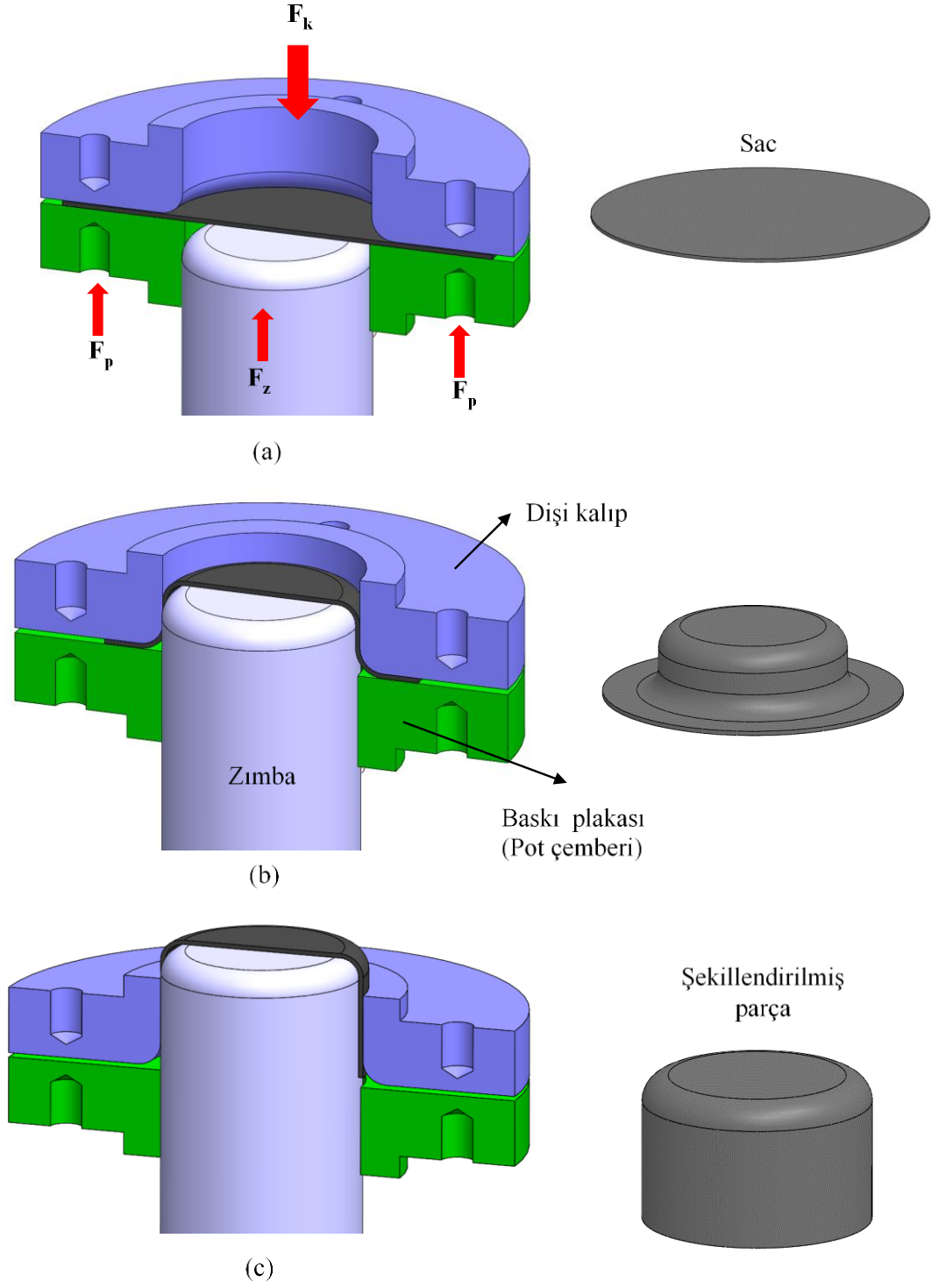
4. DERİN ÇEKME

Derin çekme, sac metalden kupa veya kutu benzeri yapıları elde etmek için kullanılan yaygın bir üretim yöntemidir. Yemek pişirmek için kullanılan tencere ve tavalar, medikal konteynırlar, lavabolar, otomobil panelleri ve gaz tankları derin çekme ile üretilen ürünlerden birkaçıdır. Endüstride bazen sıvama olarak adlandırılrsa da teknik olarak sıvama ve derin çekme işlemleri farklı işlemlerdir. Derin çekme işlemi, kalıp ile baskı plakası (pot çemberi) arasına sıkıştırılmış düz bir sac metalin zımba ile kalıp içerisine itilmesiyle üç boyutlu bir kaba veya bir kutuya dönüştürülmesi işlemidir. Derin çekilmiş bir parçanın şekli daire veya kare ile sınırlı değildir, daha karmaşık geometrileri de bu yöntemle üretmek mümkündür. Ancak, karmaşıklık arttıkça üretim zorlukları da artmaktadır.

Şekil 4.1a'da derin çekme kalıbı bağlanmış çift etkili bir hidrolik pres görülmektedir. Çift etkili preslerde derin çekme işlemi yukarı doğru yapılır. Bu sebeple Şekil 4.1b'de görüldüğü gibi derin çekme kalıbı ters olarak bağlanır. Basit bir derin çekme kalıbı temel olarak zımba, dişi kalıp ve baskı plakasından oluşmaktadır. Sacı şekil veren zımba kuvveti (F_z), üst tabla kuvvetinin (F_k) baskı kuvvetini yenmesi (F_p) ile oluşur. Baskı kuvveti Şekil 4.1'de görülen pot çubukları ile sağlanır. Şekil 4.2a'da görüldüğü gibi sac metal, dişi kalıp ile baskı plakası arasına sıkıştırılır. Pres üst tablasının (koç) aşağı inmesi ile dişi kalıp sacı zımbanın üzerine doğru iterek sacın kalıp boşluğunda şekillenmesini sağlar (Şekil 4.2b-c). Üretilen ürünün kalitesi veya işlemin başarısı kalıp ve zımba kavislerine, yağlama durumuna, yüzey pürüzlülüğüne, kalıp boşluğuna, baskı plakası kuvvetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



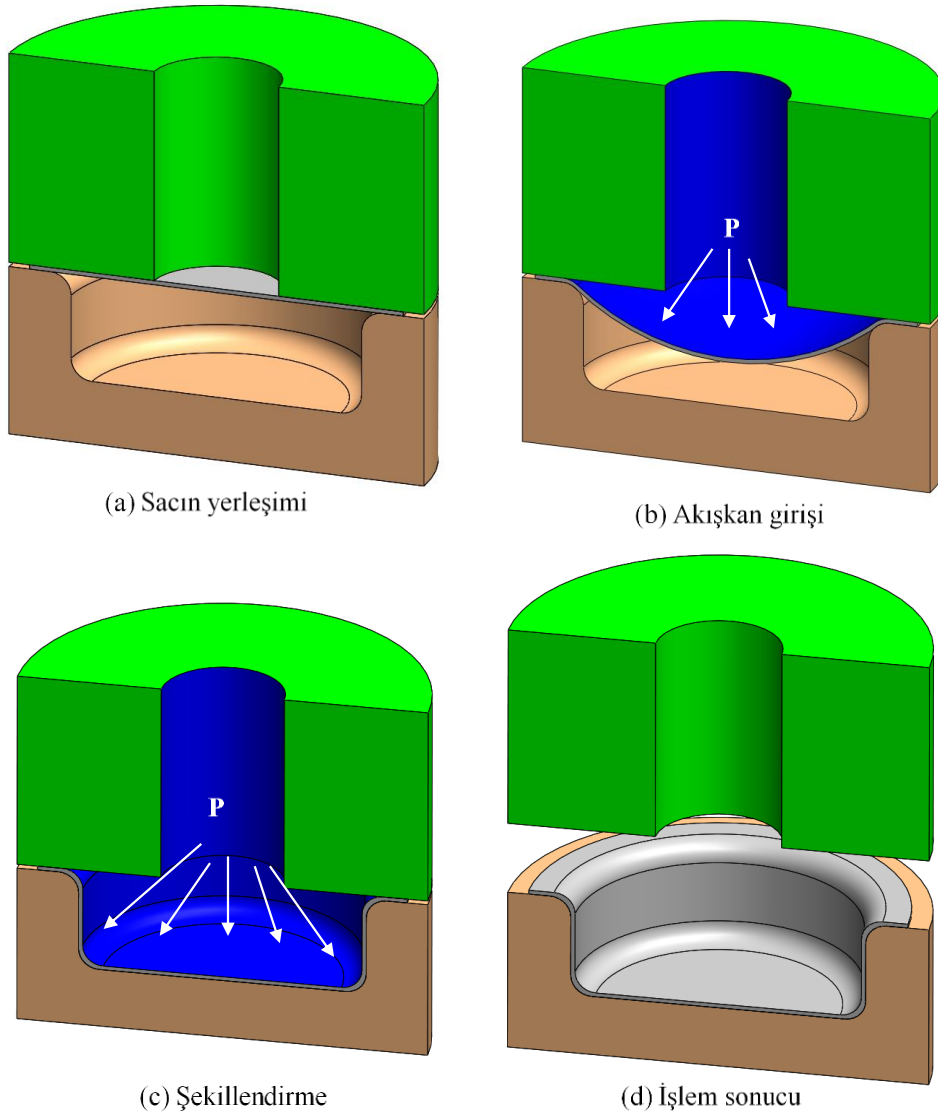
Şekil 4.1. Çift etkili hidrolik preste derin çekme işlemi (a) Çift etkili hidrolik pres (b) Derin çekme kalıbı



Şekil 4.2. Sac metalin derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi (a) Sacın sıkıştırılması (b) Kalıp içine hareketi (c) İşlem sonucunda üretilen kupa

4.1.2. Hidro Şekillendirme

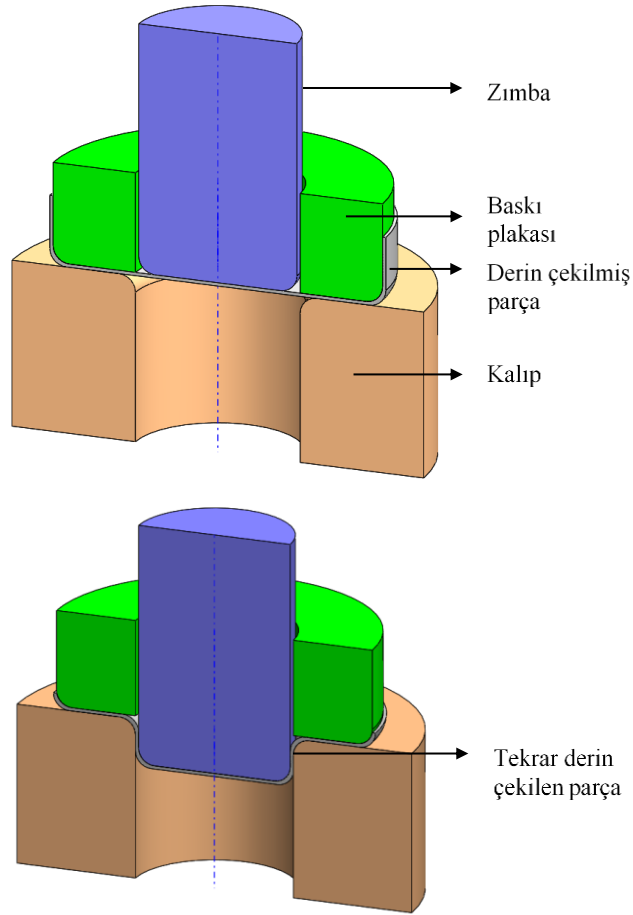
Hidro şekillendirme yönteminde klasik derin çekme işleminden farklı olarak zımba bulunmamaktadır. Bu işlemde zımbanın yerini akışkan almıştır (Şekil 4.4). Kalıplar arasına yerleştirilen sac yüksek basınçlı bir sıvı ile dışı kalıp boşluğuna çekilmektedir. Bu yöntemin avantajı zımba ile üretilmeyecek kadar karmaşık şekillerin üretilmesine olanak sağlamasıdır. Ayrıca sistemde zımba ile temas olmadığından sürtünme minimuma indirilmiş olur.



Şekil 4.4. Hidro şekillendirme işleminin şematik gösterimi (Anonim, 2009)

4.1.3. Kademeli Derin Çekme

Kademeli derin çekme işlemi tek aşamada ulaşılamayacak derinlikteki parçaların çekilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde istenilen derinliğe ulaşmak için sac metal iki veya daha fazla aşamada derin çekilir. Genellikle teleskopik bir zımba sistemi kullanılır (Şekil 4.5). Belirlenen kademe sayısına göre hesaplanan çekme oranlarına göre zımba tasarımları yapılır. Sac öncelikle en büyük çaplı zımba ile kalıp içerisine çekilir. Daha sonra bu zımba içerisinden çıkan ikinci bir zımba derin çekilmiş ürünü daha küçük çaplı bir kalıba çekerek nihai ürün elde edilir. Kademeler arasında genellikle normalizasyon tavı yapılarak malzemenin yumuşaması sağlanır.

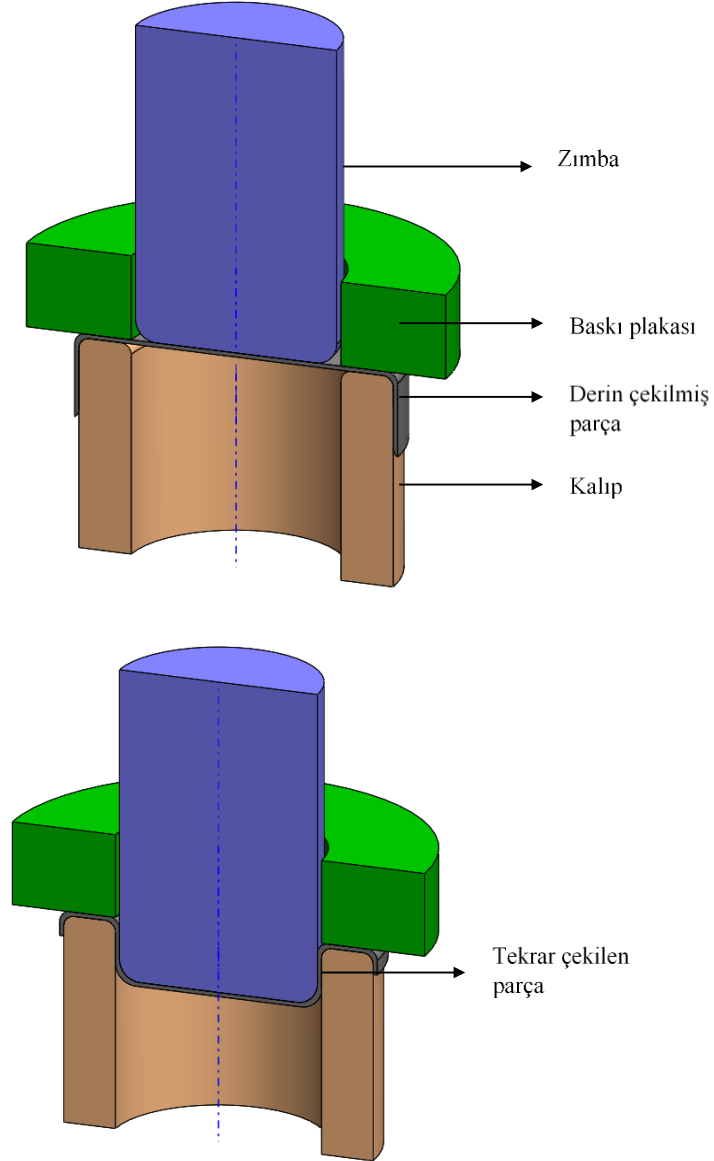


Şekil 4.5. Tekrar çekme yönteminin şematik gösterimi

4.1.4. Ters Çevirip Tekrar Çekme

Ters çevirip tekrar çekme işlemi tekrar çekme işlemi ile aynıdır. Ancak adından da anlaşılacağı üzere ilk kademede çekilen parça daha küçük çapa ters çevrilerek çekilir (Şekil 4.6). Bu şekilde malzemede ilk derin çekme işleminden kaynaklanan dislokasyon yığılmaları ters yönde harekete zorlanır. Yığılan dislokasyonların ters

yöndeki hareketi daha kolay olduğundan (Baushinger etkisi) malzeme daha küçük çaplara ve daha fazla derinliğe çekilebilmektedir. Bu yöntemde kademeler arası geçişlerde tavlamaya gerek duyulmaz. Ayrıca Baushinger etkisi sebebiyle tekrar çekme işlemine göre daha düşük zımba kuvveti ile işlem gerçekleştirilir (Bhaduri, 2018). Fakat tekrar çekme işlemine göre strok uzunluğu daha fazladır.



Şekil 4.6. Ters çevirip tekrar çekme yönteminin şematik gösterimi

4.2. Derin Çekmeyi Etkileyen Faktörler

Derin çekme işleminde ürünün başarılı bir şekilde elde edilmesi birçok parametreye bağlıdır. Limit çekme oranı, zımba ve kalıpların kavisleri, zımba ve kalıp arasındaki boşluklar, derin çekme hızı (zımba hızı), kalıp ile sac arası sürtünme-yağlama durumu, malzeme akışının kontrolü (baskı plakası kuvveti vb.), malzeme

özellikleri (sac kalınlığı, anizotropi) sacların derin çekilme performansını etkileyen başlıca faktörlerdir.

4.2.1. Zimba ve Kalıp Kavisleri

Zimba ve kalıp kavisleri derin çekme işleminin başarısını önemli ölçüde etkilemektedir. Küçük zimba kavisleri sacın zimba kavisinin olduğu bölgelerde aşırı incelenerek hasara uğramasına sebep olmaktadır. Zimba kavisleri arttıkça yan duvarlara düşen yük azalmakta ve sac kalınlığının daha homojen bir şekilde dağılmaktadır. Bu sayede sacın bölgesel olarak incelenmesi engellenerek daha derin parçaların çekilmesi sağlanabilmektedir.

Kalıp kavisinin artması ile sacın kalıp içerisine çekilmesi için gereken zimba kuvveti azalmaktadır. Kalıp kavisinin aşırı artması ise malzemede kırışıklığa sebep olmaktadır. Çünkü sac metal kalıp içerisine çekilirken kavis olan bölgeye geldiğinde kırışmayı önleyici baskı plakası, kavisin büyük olması sebebiyle sacı sıkıştırılmamaktadır. Bu durum flanş bölgesinde kırışmalara sebep olmaktadır.

4.2.2. Zimba ve Kalıp Arası Boşluk

Sac metal derin çekilirken ilk önce zimba kavisinin olduğu bölgede incilir. Bu incelme kupa duvarları boyunca azalarak devam eder. İşlem sonuna doğru ise sac kalınlığı giderek artar. Zimba ve kalıp arasında bırakılması gereken boşluk genellikle sac kalınlığının 1.07 - 1.15 katı olarak tavsiye edilir (Bhaduri, 2018). Aradaki boşluk bu değerlerin altında olduğunda sac metal kalıp ile zimba arasına sıkışarak yerel incelmelere ve yırtılmalara sebep olabilir. Ütülleme gibi özel durumlarda çekilen ürünün kalınlığını homojen dağıtmak amacıyla zimba ile kalıp arası daha düşük boşluklar kullanılabilir. Bu durumda zimba kuvveti de artış gösterecektir. Zimba ile kalıp arası boşluk arttığında ise bu sefer kupa duvarlarında kırışmalar meydana gelecektir.

4.2.3. Çekme Hızı

Metalik malzemelerde şekil değişimi esnasında dislokasyonlar yer değişimi için belirli bir süreye ihtiyaç duyarlar. Kısa zamanda yüksek oranda dislokasyonun büyük miktarda yer değiştirmesi mümkün olmayacağından dolayı dislokasyonlar kilitlenerek malzemenin erken hasara uğramasına sebep olurlar. Bu sebeple derin çekme işleminde özellikle şekil değiştirme hızından etkilenen malzemeler için derin çekme hızı yüksek

önem arz etmektedir. Şekil değiştirme hızı arttığıında malzemeyi derin çekme için gerekli olan zımba kuvveti ve malzemenin akma gerilmesi de artmaktadır. Bu sebeple malzemede yerel incelmeler ve yırtılmalar görülmektedir.

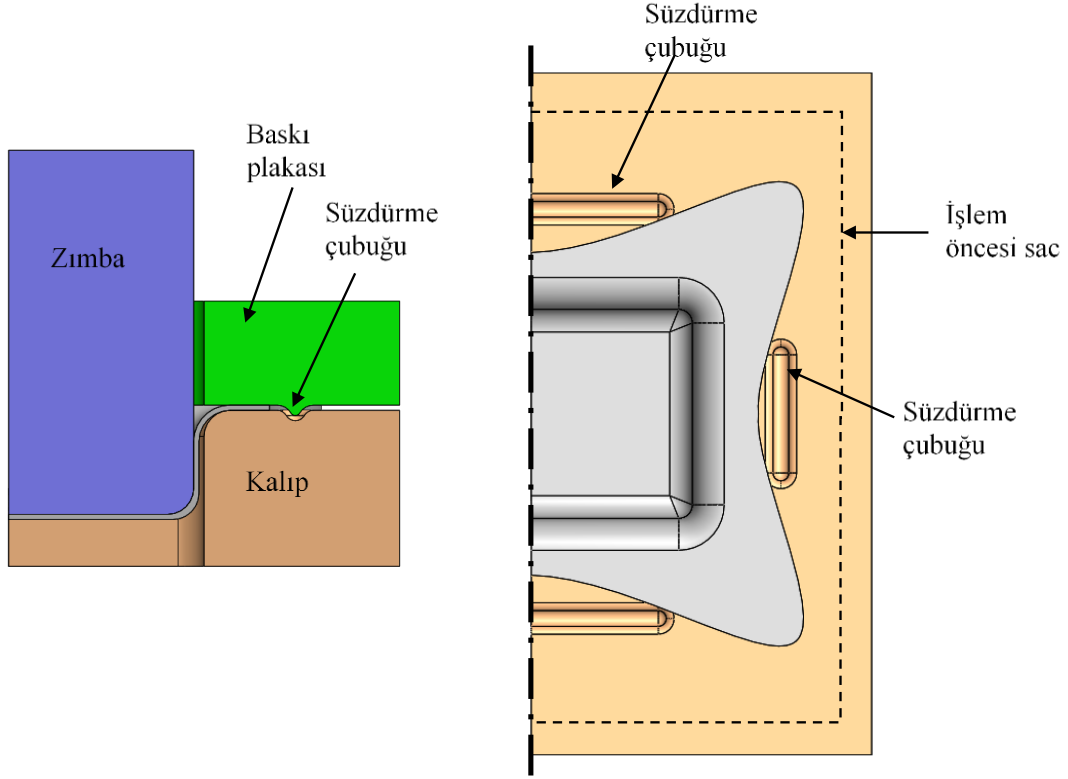
4.2.4. Arayüzeyde Sürtünme ve Yağlama Durumu

Zımba ve kalıp malzemesinin talaşlı imalat esnasında yüzeyinde oluşmuş pürüzler derin çekme işlemini etkilemektedir. Özellikle kalıp ile baskı plakası arasında kalan sac baskı plakası kuvvetinin de etkisiyle yüksek sürtünme kuvvetlerine maruz kalır. Bu durumda sacda erken yırtılmalar görülmektedir. Derin çekme esnasında yüksek sürtünme kuvvetleri ile oluşan hasarları önlemek için farklı yağlayıcılar kullanılmaktadır. Özellikle metal-metal temasını keserek yüzeyde bir film tabakasının oluşması ve derin çekme işlemi süresince bu tabakanın kaybolmaması önemlidir. Endüstride derin çekme için özel olarak üretilmiş birçok yağlayıcı bulunmasına rağmen en yaygın kullanılan yağlayıcı türü naylon poşettir. Naylon poşetin hem yüzeyler arası düşük bir sürtünmeye sebep olması hem de işlem boyunca yüzeyler arasında kalması derin çekme işleminin başarısını arttırmaktadır.

4.2.5. Sac Metalin Kalıp İçerisine Akışının Kontrolü

Derin çekme işleminde malzemenin kalıp içerisine akışını kontrol altında tutmak ürün kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Sac metalin kalıp içerisine akış hızı yüksek olduğunda flanş bölgesinde kırışıklıklar, akış hızı az olduğunda ise zımba kavisi etrafında yırtılmalar oluşmaktadır. Derin çekme işleminde malzemenin akış hızı baskı plakaları ve süzdürme çubukları ile kontrol edilir. Baskı plakası kuvvetinin doğru ayarlanması ile başarılı bir derin çekme işlemi yapmak mümkündür. Ancak baskı plakası kuvvetini hesaplamak için önerilen formüller uygulanacak kuvvet hakkında fikir vermesine rağmen başarılı bir derin çekme işlemi için yeterli olmamaktadır (Bhaduri, 2018). Baskı plakası kuvveti genellikle deneme yanılma ile çekilecek malzemeye göre belirlenmektedir. Ayrıca son zamanlarda yapılan çalışmalar işlem süresince sabit bir kuvvet yerine değişken bir kuvvet uygulamanın daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir (Gunnarsson ve Schedin, 2001; Manabe vd., 2002; Wang vd., 2010; Mostafapour vd., 2016). Diğer taraftan süzdürme çubukları araba kapıları gibi simetrik olmayan parçaların form baskılarında malzeme akışını kontrol etmek için kullanılmaktadır (Çiçek, 2005; Halkacı vd., 2014; Ke vd., 2018). Bu tür parçalarda malzemenin her bir noktasının kalıba aynı hızda akması istenmez.

Malzemenin akış hızının azaltılmak istendiği bölgelere süzdürme çubuğu (drawbead) denilen engeller konulmaktadır (Şekil 4.7). Baskı plakası kuvvetine ek olarak bu engeller üzerinden akmaya çalışan malzeme bu bölgede daha yavaş akacaktır. Hatta bazı uygulamalarda bu engeller malzeme akışını tamamen kesmektedir (lock bead).



Şekil 4.7. Süzdürme çubuklarının şematik gösterimi (a) derin çekme sırasında (b) derin çekme sonrasında ürün kenarlarının durumu

4.2.6. Metalik Malzeme Özellikleri

Sac metal kalınlığı derin çekme işlemini etkileyen malzeme özelliklerinden biridir. İnce saclarda baskı plakası altında oluşan kırışmayı önlemek için daha yüksek baskı plakası kuvveti gerekirken, sac kalınlığı arttıkça kırışmayı önlemek için gereken baskı plakası kuvveti de azalmaktadır. Sac metalin kırışması burkulma ile doğrudan ilişkilidir. Burkulmada kalınlık arttıkça sacı burkmak için gereken kuvvet de artmaktadır. Dolayısı ile kalın sacların burkulması daha zordur. Diğer taraftan sac kalınlığının artması ile sac metalin şekillendirilebilirliği de artmaktadır. Bu sayede karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi mümkün olabilmektedir.

Anizotropi durumu ise derin çekme işlemini etkileyen bir başka malzeme parametresidir. Haddeme yöntemi ile üretilmiş sac metallerde malzeme özellikleri

genellikle yöne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu duruma anizotropi denilmektedir. Anizotropi derin çekme işleminde üründe kulak oluşumuna sebep olmaktadır. Anizotropinin düşük olması durumunda nihai üründe oluşan kulakların yükseklikleri de düşük olmaktadır. Derin çekilmiş bir üründe kulak oluşumu üretici için ekstra maliyet demektir. Çünkü derin çekme sonrası bu kulakların kesilmesi için ek bir işlem daha yapılması gerekmektedir. Anizotropinin bir diğer dezavantajı ise radyal çekme gerilmeleri altında uzaması gereken sacın çevresel bası gerilmeleri ile kulak bölgelerinde kalınlığının artmasıdır (Bhaduri, 2018). Bu kalınlık artışı flanş bölgesinde baskı plakası ile sac arasında boşluklar yaratarak kırışmaların oluşmasına sebep olabilir.

4.3. Derin Çekme İşleminde Karşılaşılan Hatalar

Sac metallerin derin çekilmesinde malzeme, operatör ve kalıp kaynaklı farklı hatalar meydana gelmektedir. Yırtılma, kırışma, bölgesel incelme, kulaklanma, yüzeyde çizikler, yüzeyde portakal kabuğu görüntüsü gibi hatalar derin çekme işlemlerinde sıkça karşılaşılan hatalardır.

4.3.1. Yırtılmalar

Derin çekme işleminde en çok karşılaşılan hata türü yırtılmadır. Özellikle zımba kavisinin olduğu bölgelerde oluşmaktadır. Derin çekme esnasında artan çekme gerilmeleri malzemenin dayanacağı sınırları aşar ve zımba kavisinde incelen malzeme buradan yırtılarak hasara uğrar (Şekil 4.8). Bu hasar tipinde baskı plakası kuvveti azaltılarak sorun çözülebilir. Ancak baskı plakası kuvvetinin azaltılması ile flanş bölgesinde kırışmalar meydana gelebilir. Bir diğer çözüm ise zımba kavisinin artırılması ile bu bölgedeki gerilmeler düşürülerek yırtılma hasarının önüne geçilebilir. Yine zımba ile sac metal arası yağlayıcı azaltılarak sürtünme artırılır ve malzemenin zımba kavisine yapışarak bu bölgeden incelmesi engellenebilir.



Şekil 4.8. Derin çekme sonrası yırtılma hasarına uğramış sac parça

4.3.2. Kırışma

Derin çekme işlemlerinde çok karşılaşılan hatalardan biri de üründe oluşan kırışıklıklardır. İşlem esnasında baskı plakası kuvvetinin yetersiz olması sebebiyle flanş bölgesinde kırışmalar oluşmaktadır (Şekil 4.9). Sac metalin derin çekme esnasında flanş bölgesinde oluşan çevresel bası gerilmeleri sacın burkulmasına sebep olmaktadır. Bu burkulmalar sacın flanş bölgesinde dalgalı bir form oluşturmaktadır. Derin çekme işlemin devam etmesi sonucunda kırışmalar kupa duvarlarında da oluşacaktır. Kırışmayı önlemenin en kolay yolu baskı plakası kuvvetinin artırılmasıdır. Ancak baskı plakası kuvvetinin aşırı artması ile malzemede yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Kırışmayı önlemenin bir diğer yolu ise sac kalınlığının artırılmasıdır. Kalın sacların burkulması daha zor olacağından dolayı kırışma ihtimalide daha düşük olacaktır. Diğer taraftan derin çekilecek sac çapının zımba çapına göre büyük olması bir başka kırışma sebebi olmaktadır. Çap arttıkça burkulma için önemli bir parametre olan narinlik katsayısı artmaktadır. Bu durumda sacın burkulması için gereken kritik gerilme azalmakta ve sac burkularak kırışmalar oluşmaktadır. Daha anlaşılabilir olması açısından basit bir çubuğun burkulması için gereken kuvvet,

$$F_{br} = \frac{\pi^2 EA}{\left(\frac{L_k}{k}\right)^2} \quad (4.1)$$

şeklinde verilebilir. Burada

$$\lambda = \frac{L_k}{k} = L_k \sqrt{\frac{A}{I}} \quad (4.2)$$

narınlık katsayısı olarak tanımlanmakta ve mesnetleme durumuna göre L_k 'nin değerlerine bağlı olarak değişik değerler almaktadır. Her mesnetleme durumuna göre etkili veya serbest burkulma boyu L_k burkulma öncesi çubuk boyu L 'nin belirli bir oranı şeklinde değerlendirilebilmektedir (Koç, 2020). Buradan hareketle dairesel bir sacın çevre uzunluğunu çubuk boyu olarak varsaydığımızda, artan çap ile çubuk boyu artacak dolayısı ile narınlık katsayısı da artacaktır. Narınlık katsayısının artması ile sacın kırışması için gereken kuvvet azalacak ve sac daha kolay burkulacaktır.



Şekil 4.9. Flanş bölgesinde kırışıklık olan derin çekilmiş parça (Afshin ve Kadkhodayan, 2015)

4.3.3. Yerel İncelemeler

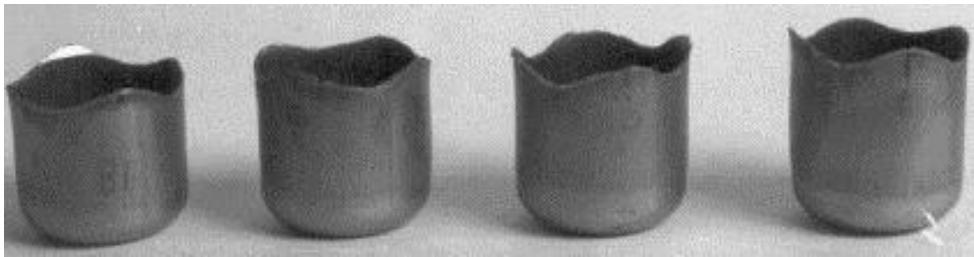
Derin çekilmiş üründe özellikle zımba kavisinin olduğu bölgelerde diğer bölgelere göre gözle görülebilir bir inceleme olmaktadır (Şekil 4.10). Bu durum yırtılma öncesi oluşan bir durumdur. Çekme oranı malzemeyi yırtacak kadar yüksek değil ancak yerel olarak incelmesine veya boyun vermesine yetecek kadar fazladır.



Şekil 4.10. Yerel incelme oluşmuş derin çekme ürünü (Bakhshi-Jooybari vd., 2012)

4.3.4. Kulaklanma

Sac metallerde yöne bağlı olarak özelliklerin değişmesi anizotropi olarak adlandırılır. Anizotropik sac metallere derin çekildiklerinde kupa kenarları dalgalı bir yapıya sahip olur (Şekil 4.11). Bu dalgalı yapıya kulaklanma denir. Kulak sayısı malzemeye göre değişkenlik göstermekle birlikte 4, 6 veya 8 tane olabilir. Haddelenmiş ürünlerin çoğunda anizotropi gözlenmektedir. Bu değer düşük karbonlu çelik gibi malzemelerde yüksek olabilirken, alüminyum gibi malzemelerde daha düşük olabilir. Anizotropik malzemelerde derin çekme işlemi sonrası oluşacak kulakların kesilmesi için derin çekilecek parçanın ölçülerinin kesme payları hesaplanarak belirlenmesi gerekir.



Şekil 4.11. Derin çekme işleminde kulak oluşumu (Kishor ve Ravi Kumar, 2002)

4.3.5. Yanlış Merkezleme

Derin çekme kalıplarında derin çekilecek sac metalin kalıp üzerine yanlış merkezlenmesi çeşitli hasarlara sebep olmaktadır. Yanlış merkezlenen sac üzerine baskı plakası kuvveti homojen şekilde dağılmaz. Sonuç olarak sacın bir kısmında malzeme akışı fazla iken diğer tarafında daha az olur (şekil 4.12). Bunun sonucunda da çekilen parça yırtılabilir veya kullanılamayacak derecede kulaklanır. Sacın merkezlenmesi dışında zımbanın kalıp boşluğu ile olan merkezlenmesi de oldukça önemlidir. Çünkü zımbanın kalıp merkezinden kaık olması durumunda zımba ile kalıp arası boşluk her yerde eşit olmayacağı için sac derin çekme esnasında sıkışarak yırtılabilir. Bu sorunu çözmek için genellikle merkezleme kolonları ile kalıplar kılavuzlanır. Böylelikle zımba her zaman kalıbın merkezinde olur.



şekil 4.12. Sacın kalıp üzerine yanlış merkezlenmesi sonucunda oluşan ürün

4.3.6. Portakal Kabuğu Görünümü

Bu hasar durumu derin çekilecek malzemenin tane yapısı ile ilgili bir durumdur. İri taneli mikro yapıya sahip malzemelerde derin çekme sonrası ürün yüzeyinde portakal kabuğuna benzer bir görünüm oluşur (şekil 4.13). Metal içindeki taneler birbirinden bağımsız olarak deforme olma eğilimindedir. İri taneli yapıda bu deformasyonlar gözle görülür hale geldiği için portakal kabuğuna benzer bir yüzey oluşur. İnce taneli metallerde ise tanelerin ufak olması sebebiyle bu durum gözle görülemez. Tane yapısı büyüdükçe akma gerilmesinin düşmesi sebebiyle iri taneli malzemeler derin çekme işlemine daha uygudur. Bu sebeple derin çekme işlemlerinde kullanılacak malzemelerin portakal kabuğu görünümü oluşurmıyacak kadar büyük taneli olması tercih edilir.



Şekil 4.13. Derin çekilmiş üründeki portakal kabuğu görüntüsü (Prasad vd., 2018)

4.4. Derin Çekme İşlemlerinde Kullanılan Pres Çeşitleri

Presler sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan makinelerdir. Sac metallere form vermek için hazırlanan kalıplar bu makinelerin üst ve alt tablalarına bağlanırlar. Genellikle alt tablası sabit olan preslerde üst tabla hareket ederek alt tabla üzerine bağlanmış kalıp üzerindeki sac metale şekil verir. Presler üst tablanın hareketini sağlayan sisteme göre isimlendirilmektedir. Üst tabla hareketi genellikle hidrolik veya mekanik yöntemler ile sağlanır. Ancak son zamanlarda mekanik preslerin özel bir çeşidi olan servo preslerde avantajlarından dolayı sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanılmaktadır.

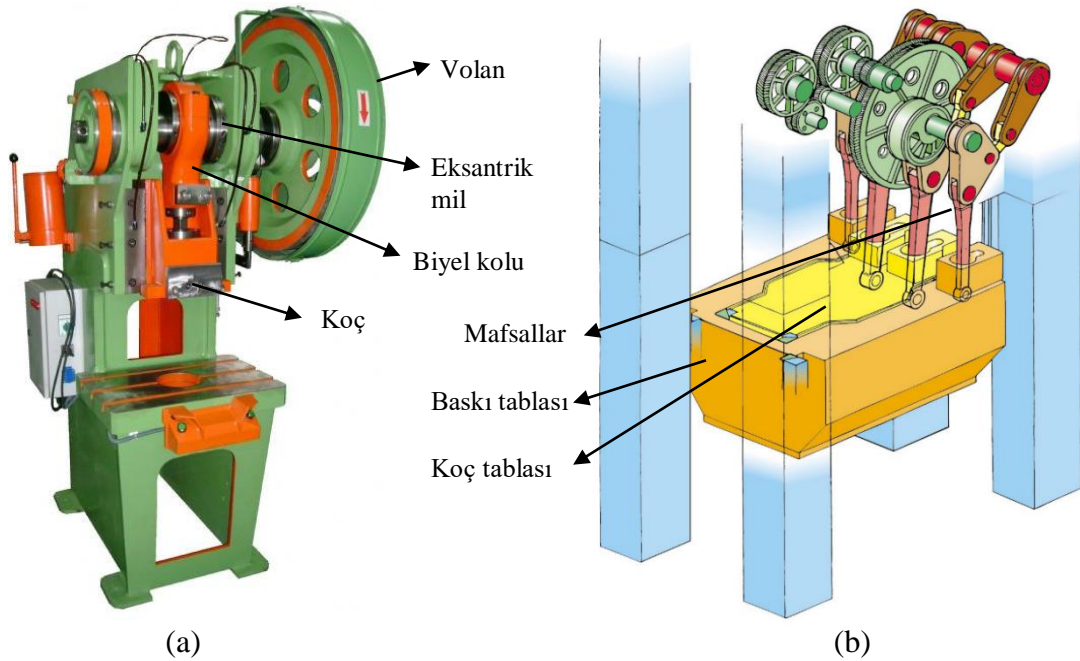
4.4.1. Mekanik Presler

Mekanik presler tahrik sistemine göre ikiye ayrılır. Bunlar elektrik motoru ile tahrik edilen mekanik presler ve servo motor ile kontrol edilen servo mekanik preslerdir.

Mekanik presler, motordaki dönme hareketini doğrusal harekete çevirerek kuvvet iletimini sağlayan makinelerdir. Bu preslerde elektrik motorundan alınan enerji bir volanda biriktirilerek işlem sırasında mekanizmaya aktarılır. Bu sayede yüksek kuvvetlerin iletilmesi mümkün olmaktadır. Hidrolik preslere göre daha hızlıdır. Ancak uygulanan kuvvet bir mekanizma ile iletildiğinden dolayı hız ve uygulanan kuvvet strok boyuna değişiklik gösterir. Örnek vermek gerekirse krank biyel mekanizmalarında üst ölü noktada kuvvet maksimum iken hız sıfırdır. Krank konumuna göre kuvvet ve hız değerleri sürekli değişmektedir. Mekanik preslerde kullanılan mekanizmaların hareket eğrisine göre kuvvet ve hız değişiklik göstermektedir.

Mekanik preslerin içerisinde en yaygın olarak kullanılanlar eksantrik presler ve mafsallı preslerdir. Eksantrik preslerde, koçun bağlandığı biyel kolu krank miline benzer eksantrik bir mil üzerine montaj edilmiştir (Şekil 4.14a). Eksantrik milin dönüşü ile beraber biyel kolunun bir ucu eksantrik milin ekseninde dönmektedir. Diğer ucu ise koçun aşağı ve yukarı hareketini sağlamaktadır. Eksantrik presler genellikle küçük ve seri üretim işlemlerde kullanılmaktadır. Hızlı ve diğer preslere göre daha küçük yük kapasitesine sahip olmaları sebebiyle tercih edilmektedirler.

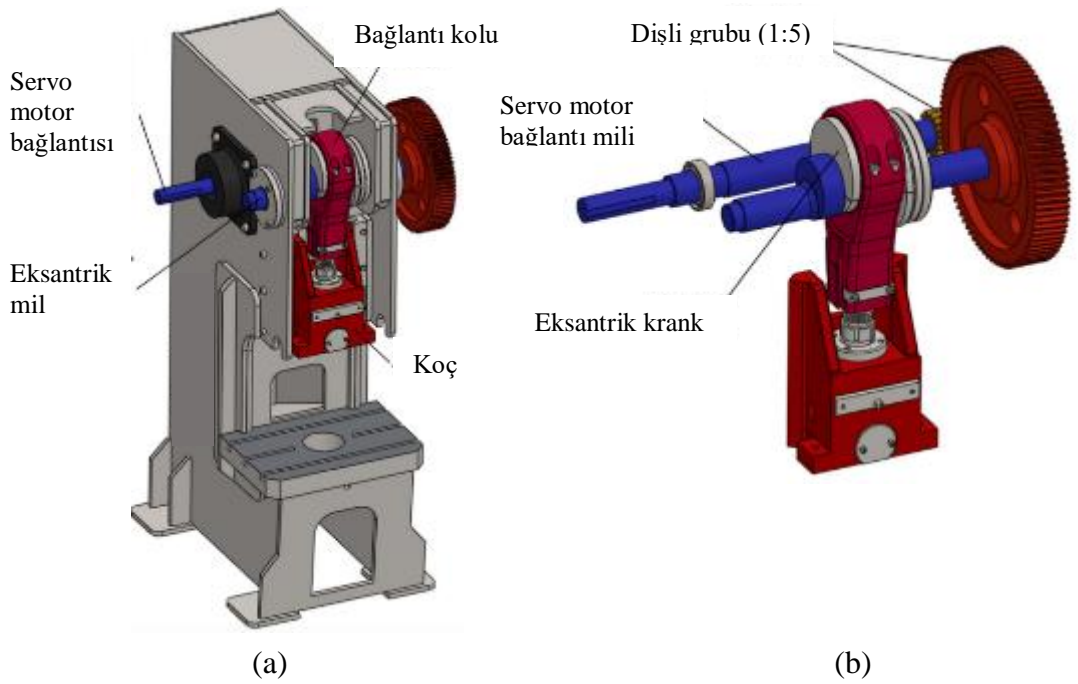
Şekil 4.14b’de ise mafsallı bir presin üst tabla montajı şematik olarak verilmiştir. Bu pres çift etkili bir prestir. İşlem sırasında öncelikle baskı tablası kalıp üzerine kapanarak baskı kuvvetini oluşturmakta ve hareketin devamında koç tablası şekillendirme işlemini yapmaktadır. Derin çekme işlemlerinde saca form verme işleminin yavaş gerçekleşmesi istenir. Mafsallı preslerde istenilen kuvvet hız profiline göre yapılan mekanizma tasarımları sayesinde koç kalıp üzerine hızlı bir şekilde kapanıp şekillendirme işlemini eksantrik preslere göre $\frac{1}{2}$ veya $\frac{1}{3}$ oranında daha yavaş gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 4.14. Mekanik presler (a) Eksantrik pres (b) Mafsallı presin şematik görünümü (Schuler GmbH, 1998; Haksan, 2016)

Servo mekanik presler, mekanik presler ile aynı çalışma mekanizmasına sahiptirler. Bu tip mekanik preslerden farkı ise sistemde volan olmayışı ve elektrik motoru yerine servo motor bulunmaktadır (Şekil 4.15). Servo motorlar standart

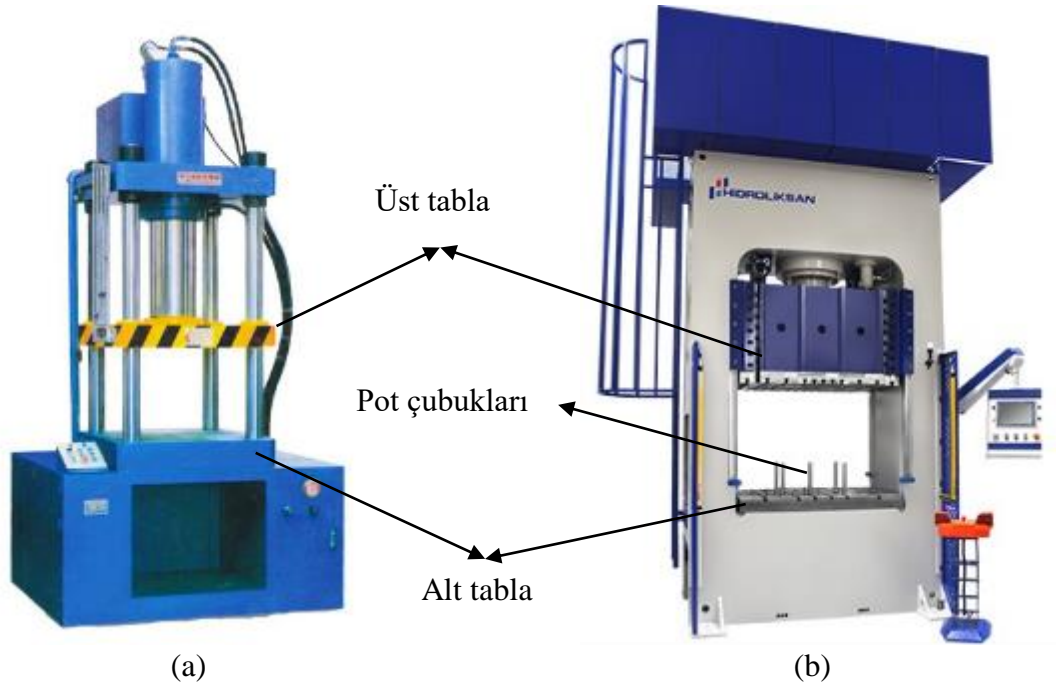
elektrik motorlarından farklı olarak motorun hızı ve konumunu sürekli takip ederek geri besleme yapabilen, böylede hassas hız ve konum ayarı yapabilen motorlardır. Sistemde servo motor kullanılması, servo mekanik preslerin diğer preslere göre daha fazla hareket esnekliğine sahip olmasını sağlamıştır. Mekanik preslerde hareket tek yönlüdür. Yani işlem başladığında presin üst tablası aşağı inerek işlemi tamamlar ve tekrar yukarı çıkar. Ancak servo mekanik preslerde işlemin herhangi bir anında üst tabla aşağı veya yukarı hareket edebilir. Benzer şekilde işlem sırasında farklı hızlarda çalışabilir. Hız artırılıp azaltılabilir veya istenilen hız grafiğine uygun olarak hareket edebilir. Örnek olarak derin çekme esnasında çok kısa aralıklar ile üst tablayı yukarı aşağı hareket ettirerek titreşimli bir derin çekme işlemi gerçekleştirebilir. Bu sayede daha derin parçalar elde etmek mümkündür. Diğer taraftan üst tablanın hareket hızı ve uygulayacağı kuvvet hassas olarak kontrol edilebildiğinden dolayı kesme operasyonlarında oluşan gürültü önemli ölçüde azaltılır. Ayrıca istenilen torku ve hızı anlık olarak karşılayabilmeleri sebebiyle sistemde volan gibi bir enerji depolayıcısına ihtiyaç olmamaktadır. Dolayısı ile mekanik preslerden farklı olarak servo mekanik preslerdeki servo motorlar sadece işlem anında çalışmaktadır. Bu sebeple servo mekanik presler, mekanik preslere göre harcadıkları enerji açısından daha tasarrufludurlar.



Şekil 4.15. C-tipi eksantrik presin modifiye edilerek servo mekanik prese dönüştürülmesi (Halicioğlu vd., 2016)

4.4.2. Hidrolik Presler

Hidrolik preslerde, tabla hareketi hidrolik yağın pompa vasıtasıyla basınçlandırılması ve hidrolik valfler vasıtasıyla silindirlere iletilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu tür presler uzun strok boylarında ve strok boyunca sabit bir hızda çalışabilir. Hidrolik presler mekanik preslere göre daha yavaş olmasına rağmen daha yüksek baskı kuvvetleri sağlayabilirler. Kuvvet iletim şekline göre tek, çift ve üç etkili presler olarak sınıflandırılabilir. Tek etkili preselerde hareketli bir üst tabla vardır ve kuvvet buradan iletilir (Şekil 4.16a). Bu tür preslerde genellikle fazla derin olmayan form verme işlemleri yapılmaktadır. Çift etkili preslerde üst tablaya ek olarak alt tablanın altında pot silindirleri mevcuttur (Şekil 4.16b). Bu silindirler derin çekme işleminden üst tablaya karşı direnç oluşturarak derin çekilecek sacı kalıp ile pot çemberi arasına sıkıştırırlar. Üç etkili preslerde ise çift etkili preslere ek olarak üst tablada fazladan bir silindir daha mevcuttur. Bu tür presler kademeli derin çekme operasyonlarında kullanılmaktadır. Üst tabla ilk derin çekme işlemini tamamladıktan sonra geriye gelmeden iç kısımdaki ikinci silindir harekete geçerek 2. kademe derin çekme işlemini gerçekleştirir.



Şekil 4.16. (a) Tek etkili hidrolik pres (b) Çift etkili hidrolik pres (Keliwei, 2019; Hidroliksan, 2019)

Derin çekme işlemlerinde genellikle çift etkili presler tercih edilmektedir. Bu tür preslerde pot silindirlerinin basıncı ayarlanarak derin çekilecek sacı kalıp ile pot

çemberi arasına sıkıştırarak kuvvet değiştirilebilmektedir. Bazı uygulamalarda sisteme oransal valf eklentisi yapılarak pot silindirindeki basıncın işlem esnasında anlık olarak değişmesi sağlanır. Bu sayede daha derin parçalar başarılı bir şekilde çekilebilmektedir.

4.5. Derin Çekme Hesaplamaları

Sac metal şekillendirme işlemlerinde, kalıp veya ürün tasarımcısı kullanacağı sac metalin şekillendirilebilirlik sınırlarına ihtiyaç duyar. Derin çekme ile üretilecek bir parça için kullanılacak maksimum sac çapı limit çekme oranı ile belirlenirken, sac metale verilecek olan form sırasında oluşacak hasarların önceden tahmini şekillendirme sınır diyagramları ile yapılmaktadır. Aşağıda limit çekme oranının teorik sınırları ve deneysel olarak belirlenmesi hakkında genel bilgiler verilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramlarının tarihçesi, etkileten faktörler ve diyagramların belirlenmesi alt başlıklar halinde verilmiştir.

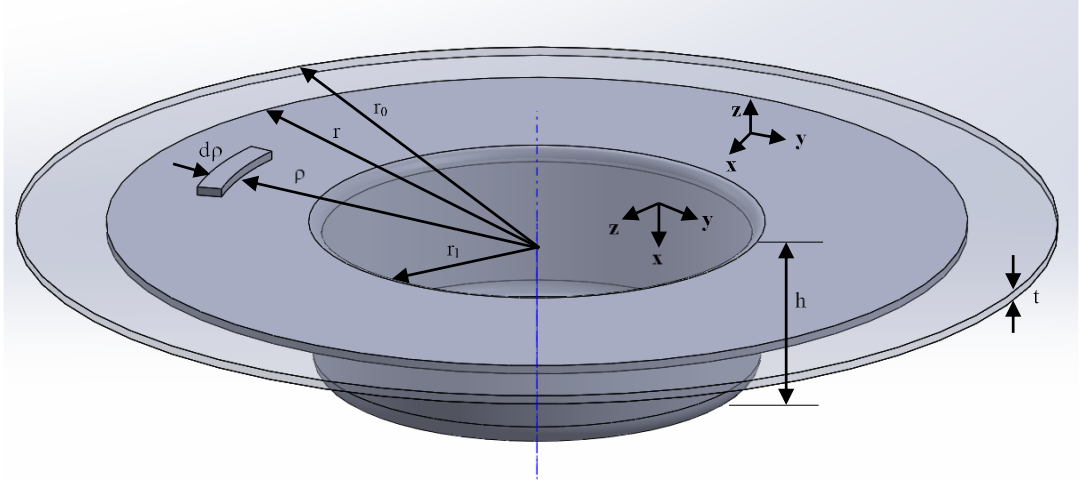
4.5.1. Limit Çekme Oranının Belirlenmesi

Derin çekme işlemlerinde “Limit Çekme Oranı (LÇO)” önemli bir parametredir. Bu parametre, hasarsız olarak derin çekilebilecek maksimum sac (pul) çapının zımba çapına oranı olarak bilinmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2007). LÇO (4.1)’da verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte D_0 ile sac çapı, D_z ile zımba çapı ifade edilmektedir.

$$LÇO = \frac{D_0}{D_z} \quad (4.1)$$

LÇO’nun alabileceği maksimum değer teorik olarak daha önce belirlenmiştir. Şekil 4.17’de verilen kısmen derin çekilmiş parça üzerindeki koordinat sistemi kullanılarak maksimum LÇO oranı hesaplanmıştır. Bu değer belirlenirken hesaplamaları basitleştirmek için bazı kabuller yapılmıştır (Hosford ve M., 2007):

- Harcanan enerjinin tamamı flanş bölgesindeki malzemeyi deforme etmek için kullanılır. Sürtünmeye karşı ve kalıp kavislerindeki bükme işlemlerinde yapılan iş ihmal edilmektedir.
- Malzemedeki pekleşme olmadığı kabul edilmektedir.
- Flanş bölgesinde, kupa duvarlarında ve kalıp tabanında kalınlığın sabit olduğu kabul edilmektedir ($\epsilon_z=0$).



Şekil 4.17. Kısmen derin çekilmiş bir parçanın şematik görünüşü (Hosford ve M., 2007)

Sac kalınlığının işlem boyunca sabit olduğu ($\varepsilon_z=0$) kabulü ile düz sacın yüzey alanı ile derin çekilmiş parçanın yüzey alanı eşitlik (4.2) birbirine eşit olmalıdır.

$$\pi \cdot \rho^2 + 2\pi \cdot r_1 \cdot h = \pi \cdot r_0^2 \quad (4.2)$$

Her iki tarafın diferansiyeli alındığında (4.3)'teki eşitlik elde edilmektedir.

$$2\pi \cdot \rho \cdot d\rho + 2\pi \cdot r_1 \cdot dh = 0 \rightarrow d\rho = -r_1 \frac{dh}{\rho} \quad (4.3)$$

Diğer taraftan Şekil 4.17'deki gibi bir birim eleman alındığında bu eleman üzerindeki çevresel şekil değişimi $d\varepsilon_y = d\rho / \rho$ olarak tanımlanabilir. Hacim sabitliği kuralı sebebiyle $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$ olmaktadır. Kalınlığın değişmediği kabulü ile $d\varepsilon_z = 0$ olacağından dolayı x yönündeki şekil değişimi eşitlik (4.4)'daki gibi bulunur. Bu ifadede dh terimi zımbanın birim hareketini ifade etmektedir.

$$d\varepsilon_x = -d\varepsilon_y = -\frac{d\rho}{\rho} = r_1 \frac{dh}{\rho^2} \quad (4.4)$$

Birim hacimde harcanan yapılan iş eşitlik (4.5)'de verildiği gibi gerilme ile birim şekil değişiminin çarpımına eşit olmaktadır. İfade tüm şekil değiştirme doğrultuları için genişletildiğinde eşitlik (4.6) elde edilmektedir. Denklem derin çekme işlemi için düzenlendiğinde $d\varepsilon_y$ yerine $-d\varepsilon_x$ yazılarak, birim hacimde yapılan iş eşitlik (4.7)'deki gibi olmaktadır.

$$\delta W = \frac{F \cdot dl}{V} = \frac{(\sigma \cdot A)dl}{Al} = \sigma \cdot d\varepsilon \quad (4.5)$$

$$\delta W = \sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \sigma_z d\varepsilon_z \quad (4.6)$$

$$\delta W = (\sigma_x - \sigma_y) d\varepsilon_x \quad (4.7)$$

ρ ile $\rho+d\rho$ çapları arasındaki çevresel eleman üzerinde yapılan iş miktarı, bu elemanın hacmi ($2\pi\rho d\rho$) ile birim hacimde yapılan iş miktarının çarpımına eşittir. Eşitlik (4.8) düzenlenerek tekrar yazıldığında çevresel birim eleman üzerinde yapılan iş miktarı eşitlik (4.9)'teki gibi olmaktadır.

$$dW = \delta W \cdot dV \quad (4.8)$$

$$dW = (2\pi t \rho d\rho)(\sigma_x - \sigma_y) d\varepsilon_x = (2\pi t \rho d\rho)(\sigma_x - \sigma_y) \left(r_1 \frac{dh}{\rho^2} \right) \quad (4.9)$$

Birim eleman üzerinde yapılan iş zımbanın ilerlemesine (dh) bölündüğünde derin çekme işlemi sırasında zımba tarafında uygulanması gereken kuvvet eşitlik (4.10)'teki gibi bulunmuş olur.

$$F = \frac{dW}{dh} = \int_{r_1}^r \frac{2\pi r_1 t (\sigma_x - \sigma_y) d\rho}{\rho} = 2\pi r_1 t (\sigma_x - \sigma_y) \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) \quad (4.10)$$

Kuvvet için bulunan genel ifadede r değeri sacın anlık yarıçapını göstermektedir. Derin çekme kuvvetinin işlemin başında maksimum değere ulaşacağı kabulü ile r yerine r_0 değeri yazılarak maksimum zımba kuvveti belirlenmiş olur. Bu aşamadan sonra doğal logaritma içerisindeki yarıçap (r) ifadeleri çap (d) ile değiştirilmiştir.

$$F_{maks} = 2\pi r_1 t (\sigma_x - \sigma_y) \ln(d_0/d_1) \quad (4.11)$$

Yukarıda belirlenen kuvvet değeri dikkate alınarak kupa duvarında oluşacak aksenal gerilme değeri eşitlik (4.12)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\sigma_x = \frac{F_{d(max)}}{2\pi r_1 t} = (\sigma_x - \sigma_y) \ln(d_0/d_1) \quad (4.12)$$

Yukarıdaki ifadede görülen σ_x ve σ_y değerleri flanş boyunca değişmesine rağmen $(\sigma_x - \sigma_y)$ ifadesinin değeri sabittir ve bu değer malzemede pekleşme olmadığı kabulü ile akma gerilmesine eşittir. Ayrıca kupa duvarlarında oluşacak olan maksimum gerilme de akma gerilmesi kadar olmaktadır. Dolayısı ile yukarıdaki gerilme ifadesi düzenlendiğinde eşitlik (4.13) elde edilir.

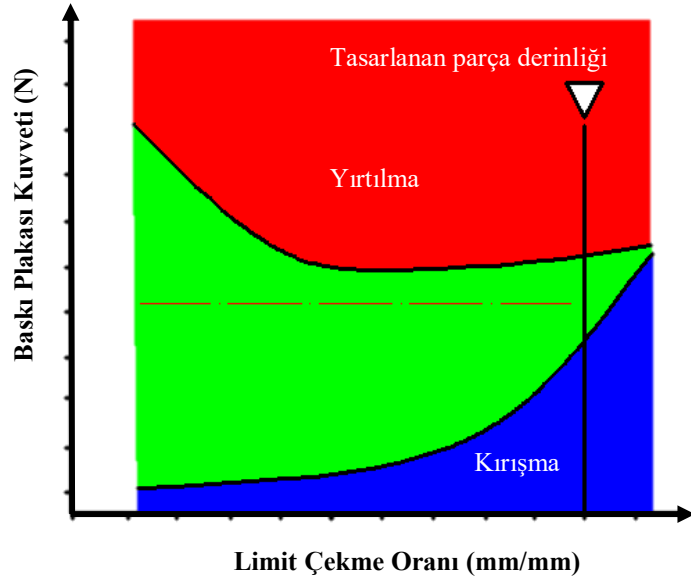
$$\sigma_f = \sigma_f \ln(d_0/d_1) \quad (4.13)$$

Eşitlik(4.13) sadeleştirildiğinde görüldüğü gibi limit çekme oranı maksimum doğal logaritma tabanı $e=2.718$ kadar olabilmektedir. Bu değer oldukça yüksek bir değerdir. Sürtünmeye karşı yapılan işi ve kalıp kavislerinde bükülmeye nede olan hisşi de hesaba katmak için derin çekme kuvveti basit olarak $1/\eta$ ile çarpılabilir. Burada η ile işlemin verimi ifade edilmektedir. Bu değer 1 olduğunda limit çekme oranı maksimum değeri olan 2.718'e ulaşmaktadır. Pratikte ise verimin 0.7 seviyelerinde kaldığı ve limit çekme oranının 2.01 mertebelerinde olduğu görülmüştür (Hosford ve M., 2007).

$$L\check{C}O = \frac{D_0}{D_z} = e^\eta \quad (4.14)$$

Kademeli çekme veya sıcak çekme yöntemleri ile daha yüksek limit çekme oranlarına ulaşmak mümkündür.

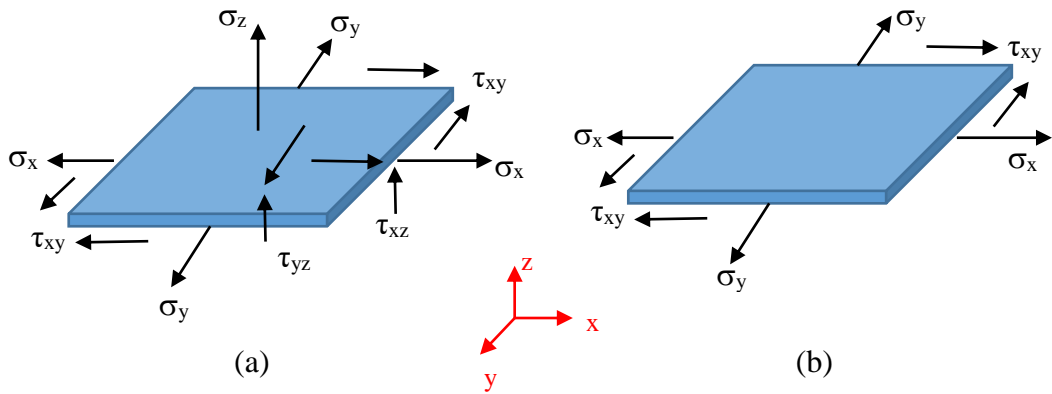
Derin çekme işlemlerinde hasar genellikle yüksek çekme gerilmesi altındaki kupa duvarında oluşan incelme sonucu gerçekleşmektedir. LÇO sac metale ait birçok mekanik özellikten etkilenmektedir. Bunun yanında yağlama durumu, kalıp kavisleri, yüzey pürüzlülüğü, baskı kuvveti gibi durumlarda LÇO'yu etkileyebilmektedir. LÇO belirlenirken farklı çaplarda kesilmiş sac numuneler bir kalıp ile farklı baskı plakası kuvvetleri altında derin çekilirler. Burada kırışma oluşan, yırtılan ve başarılı olarak çekilen numuneler bir diyagrama işaretlenir. Yırtılan ve kırışmanın olduğu numunelerin sınırladığı başarılı numunelerin bulunduğu bölge çalışma bölgesi olarak adlandırılır. Şekil 4.18'de çalışma bölgesini gösteren şematik bir grafik verilmiştir. Bu grafikten de görüleceği üzere baskı plakası kuvveti arttıkça parçada yırtılma, azaldıkça kırışma daha çok görülmektedir. Ayrıca düşük LÇO'lar için çalışma bölgesi genişlerken, yüksek LÇO'larda bu bölge giderek daralmaktadır.



Şekil 4.18. Şematik olarak LÇÖ ve baskı plakası kuvvetinin değişiminin gösteren çalışma bölgesi grafiği (Zhong-qin vd., 2007)

4.5.2. Şekillendirme Sınır Diyagramları

Gerçekte herhangi bir cisme etkiyen gerilmeler üç boyutlu (Şekil 4.19a) olmasına rağmen mühendislikte bazı kabuller yapılır. Eğer düzlemsel bir sac alınır ve bu sac yalnızca kendi düzlemi içinde kalacak şekilde yüklenirse ve aynı zamanda bu sacın kalınlığı diğer boyutları yanında çok küçükse bu sac üzerinde oluşan gerilme durumu düzlem gerilme (plain stress) olarak adlandırılır (Şekil 4.19b).



Şekil 4.19. Birim eleman üzerindeki gerilmeler (a) üç boyutlu gerilmeler (b) üç boyutlu birim eleman üzerinde düzlem gerilme hali

Şekil 4.20a'daki birim eleman statik dengededir. Bu elemanın θ açısı kadar döndürülmüş hali ise Şekil 4.20b'de verilmiştir. Bu durumda da statik dengeyi koruyacak şekilde gerilmeler σ_x' , σ_y' , $\tau_{x'y}'$ olarak kabul edelim. Hesaplamalarda bu

yeni gerilme bileşenlerinin σ_x , σ_y ve τ_{xy} cinsinden bilinmesi gerekmektedir. Statik denge şartından dolayı x ve y yönündeki kuvvetlerin toplamı sıfıra eşit olmalıdır. Buna göre,

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (4.15)$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (4.16)$$

$$\tau_{x'y'} = -(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (4.17)$$

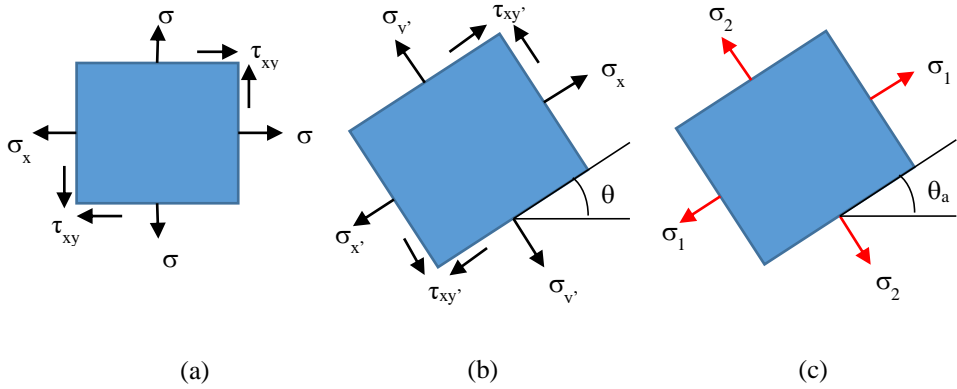
eşitlikleri elde edilir (Beer vd., 2014). Bu eşitlikler yarım açı formülleri ile düzenlendiğinde,

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (4.18)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (4.19)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (4.20)$$

eşitlikleri elde edilir (Beer vd., 2014). Bu yeni eşitlikler ile θ açısı kadar döndürülmüş birim eleman üzerindeki gerilmeler σ_x , σ_y ve τ_{xy} cinsinden hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.20. İki boyutlu birim eleman üzerinde (a) düzlem gerilme hali (b) θ kadar döndürüldüğünde oluşan gerilmeler (c) düzlem gerilme hali için asal gerilmeler (Beer vd., 2012)

Mühendislikte normal gerilme ve kayma gerilmesi bileşenlerinin oluşturduğu maksimum normal gerilme bileşenlerinin büyüklüğü ve bulunduğu düzlemlerin belirlenmesi yüksek önem arz etmektedir. Çünkü bu gerilme değerleri uç değerler

oldukları için yüklemeye maruz eleman içindeki en kritik kesit bu gerilmelerin bulunduğu kesit olup, hesaplamalarda dikkate alınmaktadır. Gerilmeler eşitlik (4.18), (4.19), (4.20) ile θ 'nın fonksiyonu olarak hesaplanabildiğine göre bu denklemlerin θ 'ya göre türevi alınır ve sıfıra eşitlenirse,

$$\frac{d\sigma_{x'}}{d\theta} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} 2\sin 2\theta + 2\tau_{xy} \cos 2\theta = 0 \quad (4.21)$$

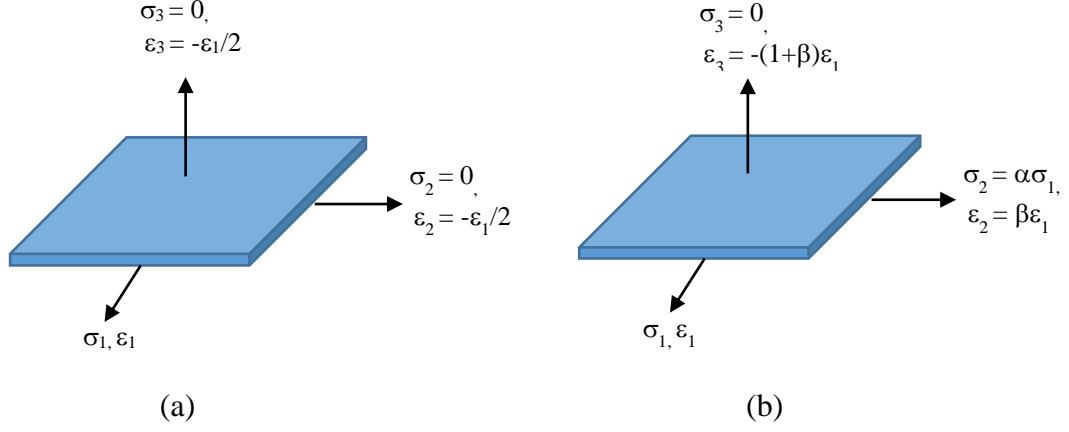
eşitliği elde edilir (Beer vd., 2014). Bu denklemin kökleri maksimum ve minimum gerilmenin oluştuğu θ açısını vermektedir. Burada, θ açısı özel bir değere sahip olduğu için θ yerine θ_a yazılırsa,

$$\tan 2\theta_a = \frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)} \quad (4.22)$$

bulunur (Beer vd., 2014). Buradan hesaplanacak olan θ_a değeri asal gerilme düzlemlerinin bulunduğu açıyı belirtmektedir. Yine trigonometrik dönüşümler kullanılarak $\tan 2\theta_a$ ifadesinden $\sin 2\theta_a$ ve $\cos 2\theta_a$ ifadeleri çekilir ve bunlar (4.15), (4.16), (4.17) eşitliklerinde yerine konulursa, asal gerilmeler;

$$\sigma_{max,min} = \sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.23)$$

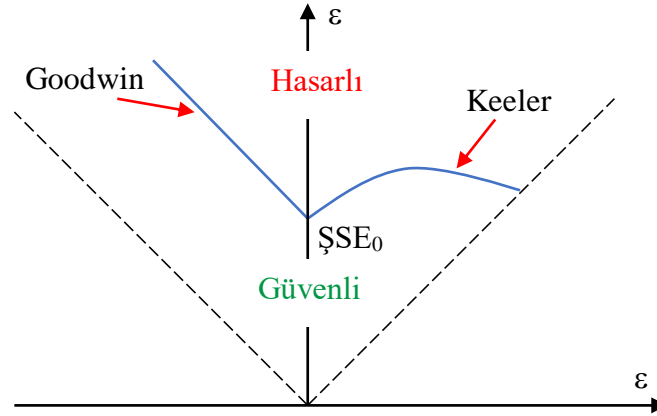
olarak bulunur (Beer vd., 2014). Diğer taraftan (4.22) eşitliği (4.17) eşitliğinde yerine yazılırsa $\tau_{x'y'}=0$ olarak bulunur. Bunun sonucunda asal gerilmelerin bulunduğu düzlemlerde kayma gerilmeleri sıfırdır. Bir başka ifadeyle asal gerilme durumu, kayma gerilmelerinin sıfır olduğu konumdur. Bu tip yükleme durumunda şekil değişimleri bu asal eksenler doğrultusunda maksimum olacaktır. Çünkü kayma gerilmeleri ve dolayısıyla kayma şekil değiştirmeleri yoktur. Şekil 4.21'te genellikle görülen deformasyon tipleri verilmiştir. Burada σ_2 'nin σ_1 'e oranı α , ε_2 'nin ε_1 'e oranı ise β olarak tanımlanmıştır. α ve β oranlarının şekillendirme işlemi boyunca sabit kaldığı kabul edilmektedir. Ayrıca ifade edilen gerilme ve şekil değiştirme değerleri asal gerilme ve asal şekil değiştirme değerleridir.



Şekil 4.21. Sac levhada deformasyon altında asal gerilme ve şekil değiştirmeler (a) çekme testi (b) sac şekillendirme işlemlerindeki düzlem gerilme durumu (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002)

Sabit bir α oranına göre sac metal üzerindeki gerilmelerin sürekli arttığını düşünelim. Bu durumda akma gerilmesini aşan malzeme plastik olarak şekil değiştirmeye başlayacaktır. Bu şekil değişimi 1 ve 2 yönlü eksenlerde yine sabit bir β oranına göre artış gösterecektir. Bu artış malzemenin dayanım sınırlarına kadar devam edecek ve malzeme bir maksimum ε_1 ve ε_2 değerinde yırtılarak hasara uğrayacaktır. Benzer şekilde β oranı değiştirilerek aynı işlem tekrar edildiğinde malzeme farklı bir maksimum ε_1 ve ε_2 değerinde yırtılarak hasara uğrayacaktır. Bu farklı β oranları için elde edilen ε_1 ve ε_2 asal şekil değişimleri malzemenin şekillendirme sınırı olarak bilinmektedir (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002).

Sac metallerin şekillendirilebilirliği, genelde boyun vermeden ya da kopmadan istenen şekilde deforme olabilmesi olarak tanımlanır (Öztürk ve Lee, 2005). Sac metaller, sonunda sünek kırılmaya yol açan yerel boyun vermenin başladığı sınırlı bir şekil değiştirme değerine kadar şekillendirilebilir. Bu sınırı ifade edebilmenin en bilinen yolu Şekillendirme Sınır Diyagramlarıdır (ŞSD). Bu kavram ilk olarak 1960'lı yıllarda Keeler (1961) ve Goodwin (1968) tarafından ortaya atılmıştır. Keeler bir zımba ile gerdirilmiş saclar üzerindeki plastik kararsızlıkları incelediği doktora tezinde numune üzerine markaladığı dairesel işaretleri deformasyon sonrasında ölçerek asal şekil değiştirmeleri belirlemiştir. Şekillendirme işlemi esnasında bu dairesel izler elips haline gelmektedir. Keeler, iki eksenli gerdirme ($\varepsilon_1 > 0$; $\varepsilon_2 > 0$) testlerinde hasara uğrayan parçaların üzerindeki elipslerden aldığı ölçümler ile büyük şekil değişimlerine karşılık küçük şekil değişimlerini bir grafiğe aktarmıştır (Keeler, 1961). Bu şekli ile ŞSD'nin sağ tarafı Keeler tarafından oluşturulmuştur (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Keeler ve Goodwin tarafından bulunan şekillendirme sınır diyagramı örneği (Chang, 2013)

Farklı sac malzemeler üzerinde tekrarlı deneyler ve endüstriyel sac parçalar için yapılan uygulama sonuçlarının uyumlu olması şekillendirme sınırlarının ŞSD ile başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Daha sonra, Chrysler firması mühendislerinden Gorton M. Goodwin (1968), Keeler'in bulmuş olduğu eğrinin yeterli olmadığını preshanede otomobil marşpiye (basamak) saclarına yapmış oldukları denemelerde görmüştür. Eğrinin sadece pozitif iki eksenli çekme (şişirme veya gerdirme) durumunu temsil etmesi sebebiyle derin çekme işlemi gibi bir eksenle pozitif diğer eksenle negatif şekil değişimlerinin olduğu şekillendirme işlemlerinde yetersiz olduğunu belirlemiştir. Eğrinin bu haliyle pratik olarak kullanılamayacağını ifade etmiştir. Bunun üzerine farklı genişlikteki şerit saclara çekme ve kupa testleri yaparak çekme/basma durumları için ŞSD'nin sol tarafını ($\varepsilon_1 > 0$; $\varepsilon_2 < 0$) oluşturmuştur (Şekil 4.22). Yapılan testlerde, bir asal eksen doğrultusunda basma oluşturulduğunda ona dik olan eksenlerde daha yüksek çekme şekil değişimlerine (haddeleme ve tel çekmedeki gibi) ulaşılabileceği görülmüştür.

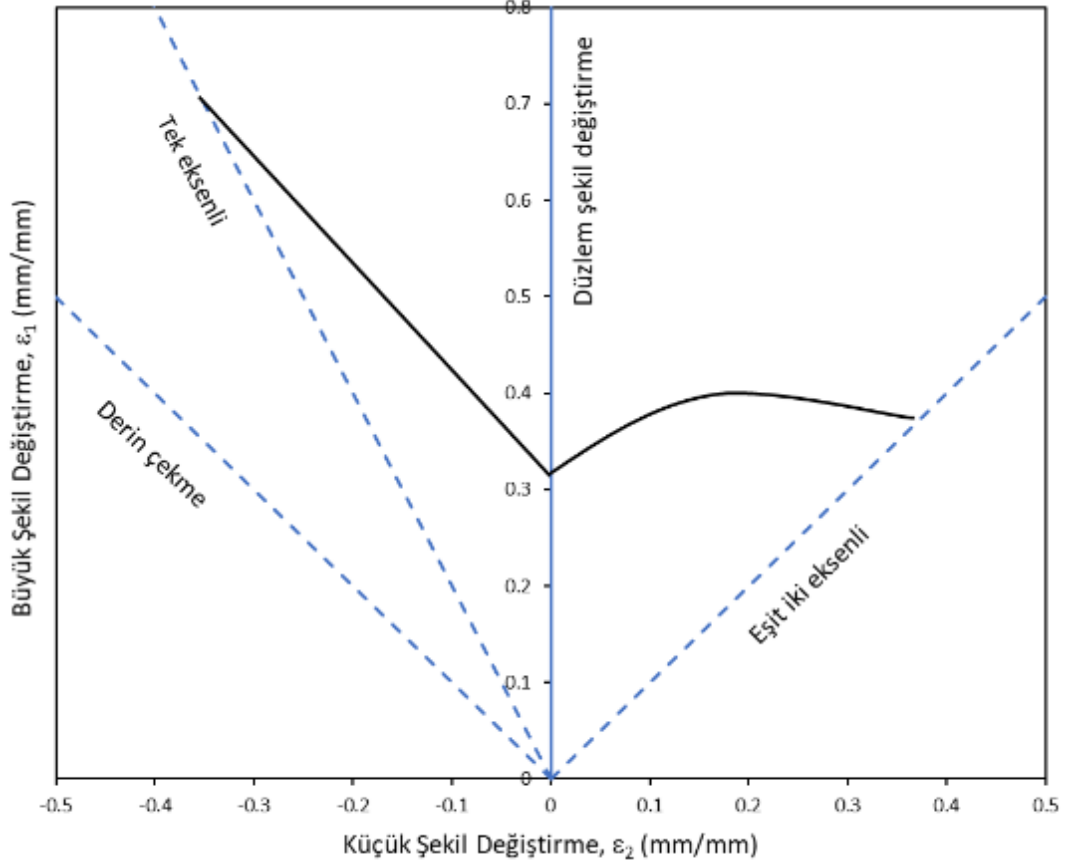
Keeler'in sağ tarafını ve Goodwin'in ise sol tarafını oluşturduğu bu diyagram "Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)" olarak adlandırılmaktadır. Şekillendirme limitlerinin bulunduğu noktaların birleştirilmesi ile oluşan eğriye ise "Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE)" denilmektedir (Banabic, 2010). Bu eğrinin yani ŞSE'nin en alt noktası olarak tanımlanan ve eğrinin sol ve sağ taraflarının birleştiği düzlem şekil değiştirme ($\varepsilon_1 > 0$; $\varepsilon_2 = 0$) üzerindeki nokta ŞSE₀ olarak tanımlanır. ŞSD, hasarlı (ŞSE'nin üstü) ve güvenli (ŞSE'nin altı) olmak üzere iki bölgeden oluşmaktadır. Şekillendirme işlemi sonrası parça üzerinde oluşan büyük ve küçük deformasyonlar ŞSE'nin altında kaldığı sürece parçada herhangi bir hasar oluşmayacaktır. Ancak

deformasyon miktarının artarak eğrinin üzerine çıkması durumunda parça üzerinde yırtılma veya aşırı incelme hasarları oluşacaktır. Bu sebeple endüstride sac ürünler, tasarım aşamasında sonlu elemanlar programları ile modellenerek bu programlarda malzeme üzerinde oluşacak deformasyonlar ŞSE'ler ile karşılaştırılmaktadır. Deformasyon miktarının yüksek olduğu kritik bölgelerde tasarımda veya sac malzemede değişikliğe gidilerek hasar oluşması önlenmektedir.

Şekillendirme kabiliyeti malzeme üzerindeki deformasyon durumu ile doğrudan bağlantılıdır. Malzemedeki deformasyon hali üç asal eksendeki şekil değiştirmelerin ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) birleşimi ile oluşmaktadır. Burada 1 ve 2, düzlem üzerindeki (sac yüzeyindeki) birbirine dik eksenleri belirtirken, 3 ise sacın kalınlık doğrultusundaki eksenini ifade etmektedir. Hacim sabitliği kuralı sebebiyle bu üç eksendeki şekil değişiminin toplamı sıfır olarak kabul edilmektedir. Malzemedeki deformasyon halinin belirlenmesi için iki eksendeki deformasyon değerinin bilinmesi yeterli olmakta ve genellikle düzlem üzerindeki 1 ve 2 yönündeki deformasyonlar kullanılmaktadır. ŞSE'ler, 1 ve 2 yönündeki asal şekil değiştirmeler dikkate alınarak oluşturulmaktadır. 1 ve 2 yönündeki deformasyonlar arasındaki oran aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_2 = \beta \cdot \varepsilon_1 \quad (4.24)$$

Burada β oranı deformasyon yolu (strain path) olarak bilinmektedir. Bu oran poisson oranı ile benzerlik göstermektedir. Poisson oranı tek eksenli gerilme halinde malzemenin eninde meydana gelen şekil değişiminin boyundaki şekil değişimine oranıdır. Bu değer elastik şekil değişimine uğrayan her malzeme için sabit kabul edilerek malzemenin karakteristik bir özelliğidir. Poisson oranı elastik şekil değişimi altında geçerli olurken plastik şekil değişimlerinde geçerli değildir. β oranı ise plastik şekil değişimi durumunda 1 ve 2 yönündeki şekil değişimlerinin birbirine göre durumlarını ifade etmektedir. β oranı malzeme üzerindeki deformasyon durumuna göre pozitif veya negatif olabilmektedir. Şekillendirme işlemlerinde ε_1 ve ε_2 deformasyonlarının gerçek değerlerinden çok bunlar arasındaki β oranı birçok özelliği etkilemektedir. ŞSE sadece deformasyon yolunun lineer olduğu durumlarda geçerlidir. Başka bir deyişle β oranı işlem boyunca sabit kalmalıdır. Şekil 4.23'te β oranının belirli değerleri için karşılaşılan deformasyon durumları mavi çizgiler ile verilmiştir.



Şekil 4.23. ŞSD üzerindeki özel deformasyon halleri (Paul vd., 2013)

Şekil 4.23'te mavi çizgiler ile verilen β oranının bazı değerleri aşağıda açıklanmıştır (Emmens, 2011).

- $\beta = 1$: Bu durumda $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, şekil değişimi düzlem üzerindeki tüm yönlerde eşittir. Bu deformasyon hali *eşit iki eksenli* olarak adlandırılır. Diğer taraftan $\beta > 0$ olan tüm durumlar *iki eksenli* olarak adlandırılmaktadır.
- $\beta = 0$: Bu durumda 2 yönünde herhangi bir deformasyon yoktur ve *düzlem şekil değiştirme* olarak adlandırılır.
- $\beta = -0.5$: Bu durum izotropik malzemeler için çekme testinde gerçekleşen *tek eksenli* çekme durumudur. Anizotropik malzemeler için çekme testinde bu değer $\beta = -\bar{R}/(1 + \bar{R})$ olmaktadır. Burada \bar{R} ortalama anizotropi katsayısıdır.
- $\beta = -1$: Bu durumda $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0$ ve hacim eşitliği sebebiyle $\varepsilon_3 = 0$ 'dır (kalınlık değişimi yok). Bu durum derin çekilen parçaların flanş bölgesinde görülür ve *derin çekme* olarak adlandırılır.

4.5.2.1. ŞSE'leri Etkileyen Faktörler

Sac metallerin şekillendirme esnasındaki davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için ŞSE'leri etkileyen faktörlerin bilinmesi oldukça önemlidir. Bu sayede şekillendirme esnasında karşılaşılan hataların sebepleri daha kolay anlaşılır. Bu hataların önüne geçmek için alınması gereken önlemler belirlenebilir.

ŞSE'leri etkileyen faktörler başlıca sac kalınlığı, markalama boyutları, deformasyon yolu, mekanik özellikler, test yöntemi, sıcaklık, şekil değiştirme hızı ve normal basınç olarak sınıflandırılabilir (Kleemola ve Kumpulainen, 1980; Banabic, 2010; Rees, 2001; Hosford ve M., 2007).

Sac kalınlığı

Başarılı bir şekillendirme işleminin gerçekleşmesi için kaliteli sac kullanımının yanı sıra sac kalınlığının artırılması sıklıkla başvurulmuş çözümlerdir. Sac kalınlığındaki artışın şekillendirilebilirliği olumlu etkilediğini gösteren çeşitli çalışmalar mevcuttur (Zadpoor vd., 2009; Dilmec vd., 2013). Özellikle şekillendirme işlemi esnasında etki eden gerilme iki doğrultuda çekme gerilmesi ise sac kalınlığı artırılması başarılı sonuçlar vermektedir. Sac kalınlığının ŞSE üzerine etkisi aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Banabic, 2010).

- ŞSE'de boyun verme sac kalınlığına bağlıdır.
- Sac kalınlığı arttıkça ŞSE yukarı doğru kayar. Ancak bu kritik bir sac kalınlığına kadar devam eder.
- Sac kalınlığının etkisi gerdirme gibi işlemlerde artarken, basma işlemlerinde kaybolur.

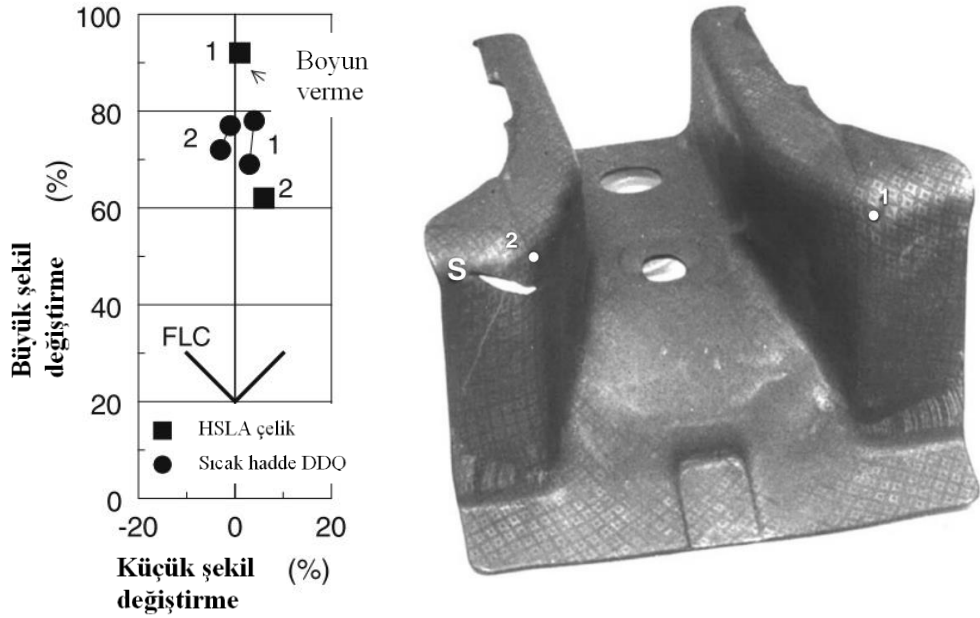
Markalama boyutları

Sac üzerine markalanan d çaplı bir daire üzerinden ölçülen şekil değiştirme değeri d mesafesi kadar bir alandaki ortalama şekil değişimidir. Dolayısı ile sac metali markalamada kullanılan dairenin d çapının küçük olması, ölçülen şekil değişiminin çözünürlüğünü artırır. Bir başka deyişle markalamada kullanılan daire çapı küçüldükçe ortalama bir şekil değişimi yerine o noktadaki gerçek şekil değişimi ölçülmüş olur. Bu sebeple markalama boyutları küçüldükçe ŞSE'nin doğruluğu artar. Markalama yöntemleri ile ilgili farklı çalışmalar mevcuttur. Keeler (1968) dairesel markalama yöntemi ve uygulama alanları hakkında bir çalışma yapmıştır. Öztürk ve

arkadaşları (2009) farklı markalama yöntemlerini karşılaştırarak bunların ölçüm metotlarını incelemiştir.

Deformasyon yolu

Sac üzerine markalanmış, hasara yakın bölgeden bir dairenin şekil değişimi deformasyon süresince ŞSD'ye anlık olarak aktarıldığında oluşan çizgiye deformasyon yolu denir. Bu deformasyon yolları her zaman ϵ_1 ve ϵ_2 eksenlerinin orijinininden başlar ve deformasyon sonuna kadar devam eder. Yapılan çalışmalarda farklı deformasyon işlemleri gerektiren sac metal şekillendirme işlemlerinde, işlemler arası geçişlerde deformasyon yolunun yön değiştirdiğini belirlenmiştir (Kikuma ve Nakazima, 1971; Graf ve Hosford, 1993; Kuroda ve Tvergaard, 2000). Deformasyon işlemleri arası geçişlerde deformasyon yolu yön değiştirerek sacın daha erken veya daha geç yırtılmasına sebep olur. Örneğin parça üzerinde yapılan ilk işlemdeki deformasyon $\epsilon_2 < 0$ (basma veya tek eksenli çekme) ve bunu takip eden işlem iki eksenli çekme ise ŞSE yukarı doğru kayar. Diğer taraftan eğer ilk işlem $\epsilon_2 > 0$ ve bunu takip eden işlem basma veya tek eksenli çekme ise bu durumda ŞSE aşağı doğru kaymaktadır. Örneğin Schlosser ve arkadaşları (2019) önce şişirme ardından tek eksenli çekme yaptıkları numunelerde ŞSE'nin çok daha üzerinde şekil değiştirme değerleri elde etmişlerdir. Şekil 4.24'da, 1984 model bir otomobil parçası ve bu parçada oluşan şekil değiştirmeler grafik üzerinde gösterilmiştir. Resmin yanındaki malzemenin şekil alma eğrisi düzlem şekil değiştirme için %20 değerlerinde iken parça üzerindeki 1 ve 2 numaralı bölgelerde şekil değişiminin %80 civarında olduğu görülmektedir. Bu gibi durumlar, yukarıda bahsedilen farklı deformasyon işlemleri ile yani doğrusal olmayan deformasyon yolları ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.24. Yüksek yerel şekil değiştirmelerin olduğu 1984 model bir otomobil parçası (Emmens, 2011)

Mekanik özellikler

Mekanik özellikleri birbirine yakın malzemelerin $\dot{\epsilon}$ SSD'leri birbirine benzer olmaktadır (Banabic, 2010). Deformasyon yolları sabit tutularak farklı mekanik özelliklerin etkisi incelenebilmektedir. Tek eksenli çekme testi ele alındığında artan anizotropi katsayısı (R) ile deformasyon yolunun eğimi sol tarafa doğru azalmaktadır (Woodthorpe ve Pearce, 1970; Marciniak vd., 1973).

Benzer şekilde pekleşme üsteli (n) arttığında malzemenin maksimum uzama değeri artmakta ve bununla birlikte $\dot{\epsilon}$ SSD₀ değeri yükselmektedir. Diğer taraftan $\dot{\epsilon}$ SSD için iki eksenli çekme bölgesinde n değeri arttıkça $\dot{\epsilon}$ SE'nin sağa doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum boyun vermenin gecikmesi sayesinde deformasyon yolunun daha uzun süre lineer kalması ile açıklanmaktadır. Sonuç olarak mekanik özellikleri birbirine yakın farklı malzemelerin $\dot{\epsilon}$ SSD'leri benzer kalarak anizotropi katsayısı (R) ve pekleşme üsteli (n) değerlerine göre farklı yönlere kayabilmektedir.

Test metodu

$\dot{\epsilon}$ SSD'leri belirlemek için Nakajima, Marciniak, Olsen gibi birçok deneysel yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerin her birinde farklı zımba ve kalıp geometrisi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda $\dot{\epsilon}$ SSD'nin belirlenmesi için kullanılan deneysel yöntemin sınır eğrisinin yerini etkilediği görülmüştür (Banabic, 2010). İçerisinde düz

zımbanın olduğu farklı eğrilik yarıçapına sahip zımbalar ile yapılan deneylerde eğrilik yarıçapı azaldıkça şekillendirilebilirliğin arttığı görülmüştür (Charpentier, 1975).

Sıcaklık

Sıcaklığın artması genelde malzemelerin şekillendirilebilirliğini arttırmaktadır (Naka vd., 2001; Li ve Ghosh, 2004; Abedrabbo vd., 2007). Ancak sıcaklığın farklı metalik alaşımların şekillendirilebilirliklerine olan etkileri farklıdır. Örneğin AA5754 alaşımının şekillendirilebilirliği küçük sıcaklık değişimleri ile artmakta iken aynı miktarda sıcaklık değişimi ile AA 6111-T4 alaşımının şekillendirilebilirliğinde çok az miktarda değişim olmaktadır (Banabic, 2010).

Şekil değiştirme hızı

Genel olarak şekil değiştirme hızının artması ŞSE'nin aşağı doğru kaymasına dolayısı ile şekillendirilebilirliğin azalmasına sebep olmaktadır (Jie vd., 2009; Zhang vd., 2009; Verleysen vd., 2011). Özellikle şekil değiştirme hızından etkilenen malzemelerde ŞSE'deki düşüş daha belirgindir.

Normal basıncın etkisi

Sac metallerin şekillendirilebilirliğine normal basıncın etkisi endüstride uzun süredir bilinmekte ve kullanılmaktadır. Hidro şekillendirme, arttırımlı şekillendirme gibi operasyonlarda sac önemli derecede normal basınca maruz kalmaktadır. Normal basıncın artması ile birlikte sacın şekillendirilebilirliği artmaktadır (Emmens, 2011). Bu artış genellikle sac üzerindeki mikro boşlukların akışkan tarafından uygulanan normal basıncın etkisiyle kapanması veya yeni bir boşluğun oluşumunun engellenmesi ile açıklanmaktadır (Banabic ve Soare, 2008; Assempour vd., 2009; Wu vd., 2009).

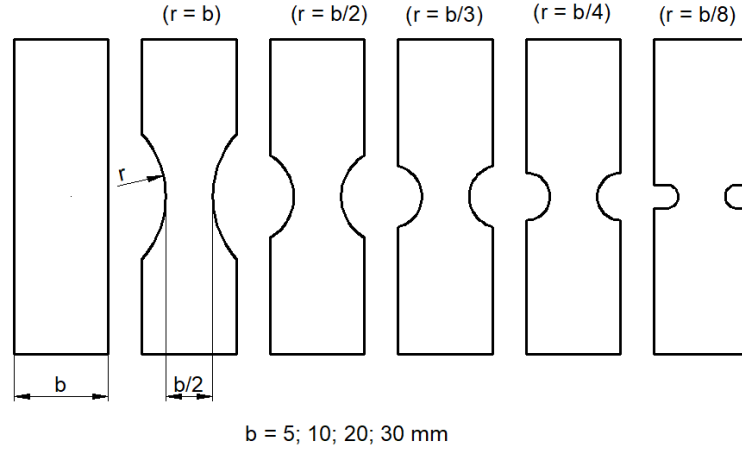
4.5.2.2. ŞSD'lerin Belirlenmesinde Kullanılan Farklı Yöntemler

Şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesinde kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Genel olarak yöntemlerin mantığı aynı olmasına rağmen uygulandığı kalıp ve numune ölçüleri farklı olmaktadır. Şekillendirme sınır diyagramları sacın farklı gerilme durumlarında göstermiş olduğu maksimum deformasyonun belirlenmesi ile oluşur. Bu sebeple şekillendirme sınır diyagramı oluşturulacak sacların farklı gerilme durumları altında hasar oluşuncaya kadar deforme edilmesi gerekmektedir. Bu gerilme durumları tek eksenli, düzlem şekil değiştirme ve eşit iki eksenli şekil değiştirme bölgelerini kapsayacak şekilde olmalıdır. Sac üzerindeki farklı gerilme durumları

genellikle sacın farklı geometrilerde kesilmesi ile oluşturulur. ŞSD'lerin belirlenmesinde kullanılan farklı deneysel yöntemler aşağıda verilmiştir.

Tek eksenli çekme testi

Bu test ile ŞSD'nin sadece sol tarafı ($\epsilon_2 < 0$) belirlenebilmektedir. Farklı deformasyon yolları oluşturmak için numuneler farklı genişliklerde ve şekillerde çentikli ve çentiksiz olarak kullanılmaktadır (Şekil 4.25).

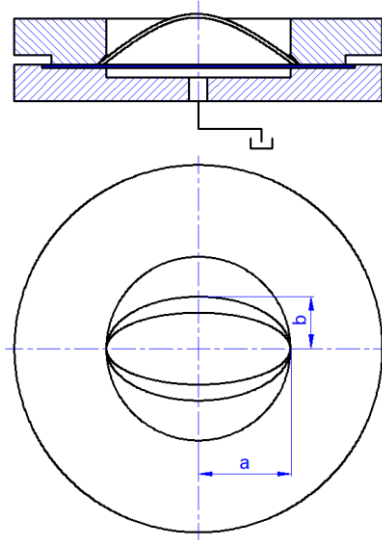


Şekil 4.25. Çentikli ve çentiksiz dikdörtgen numuneler (Banabic, 2010)

Bu test, numunelerin hazırlanmasının kolay olması ve tek eksenli çekme test cihazının kullanılması sebebiyle avantajlıdır. Ayrıca test sonrası numunelerin düz kalması ölçüm kolaylığı açısından avantaj yaratmaktadır.

Hidrolik kubbe testi

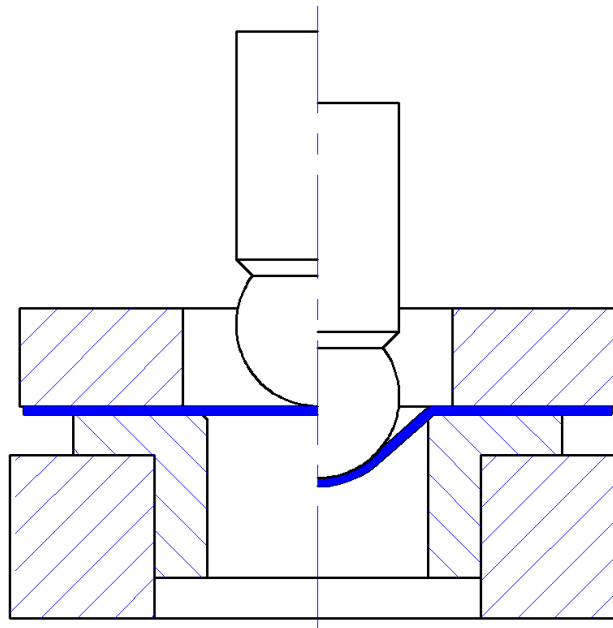
Bu test ilk olarak Olsen (1920) tarafından ortaya konmuştur. Farklı deformasyon yolları oluşturmak için farklı ölçülerdeki elips kalıplar kullanılmaktadır (Şekil 4.26). Elips geometrili kalıp ile baskı plakası arasına sıkıştırılan sac hidrolik yağ ile yırtılıncaya kadar deforme edilir. Bu testin avantajı işlemin yağ ile gerçekleşmesi sebebiyle sürtünme oluşmamasıdır. Dezavantajı ise sadece ŞSD'nin sağ tarafı ($\epsilon_2 > 0$) elde edilebilmesidir. Çünkü sac düzlem üzerindeki iki eksen doğrultusunda gerdirilmektedir.



Şekil 4.26. Hidrolik kubbe testi şematik görünüşü (Banabic, 2010)

Zımba ile gerdirme testi

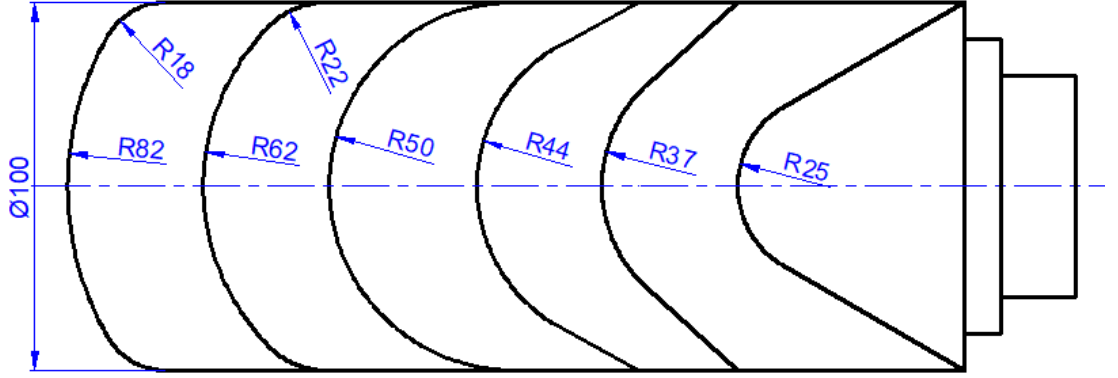
Bu test ilk olarak Keeler tarafından ortaya konmuştur. Bu teste kalıp ile baskı plakası arasında sıkıştırılan sac küresel eliptik bir zımba ile gerdirilmektedir (Şekil 4.27). Farklı deformasyon yolları oluşturmak için farklı genişliklerdeki saclar kullanılmaktadır. Ayrıca zımba kavislerini ve yağlayıcıyı değiştirerek farklı deformasyon yolları elde etmek mümkündür.



Şekil 4.27. Zımba ile gerdirme testi şematik gösterimi

Keeler testi

Bu teste farklı deformasyon yolları elde edebilmek amacıyla farklı çaplarda zımbalar kullanılmaktadır (Şekil 4.28). Bu test yüksek miktarda deneysel çalışma gerektirdiğinden tercih edilmemektedir. Ayrıca ŞSD'nin sadece sağ tarafının elde edilebilmesi ve şekillendirme sınırının yerinin ve şeklinin zımba kavisi ile değişmesi diğer dezavantajlarıdır.



Şekil 4.28. Keeler testinde kullanılan zımbalar ve ölçüleri (Banabic, 2010)

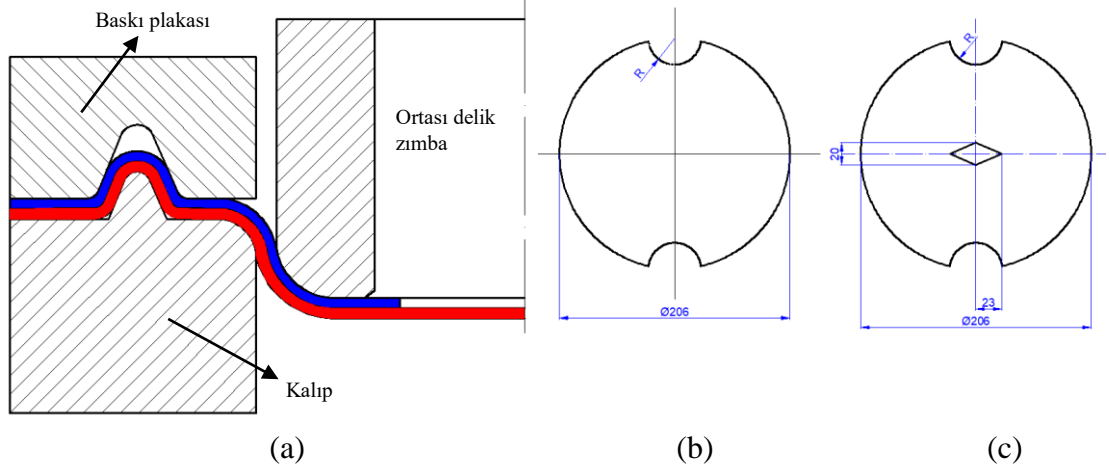
Hecker testi

Bu teste tek tip ve boyutta zımba ve numune kullanılmaktadır (Hecker, 1972, 1975). Farklı yağlayıcı kullanılarak farklı sürtünme durumları oluşturulmakta ve böylelikle farklı deformasyon yolları elde edilmektedir. Ancak bu testte de ŞSD'nin sadece sağ tarafı belirlenebilmektedir.

Marciniak testi

Düz dipli derin çekme işlemlerinde parça genellikle taban ile silindirik duvar arasındaki bağlantıdan yırtılmaktadır. Marciniak ve Kuczynski (1967), derin çekilen parçanın düzlemsel kısmında yırtılmayı gerçekleştirmek için, oyuk bir zımba ve zımba ile iş parçası arasına ortasında dairesel delik olan bir ara parça kullanmayı önermiştir (Şekil 4.29a). Şekilde mavi ile gösterilen ara parça sac, kırmızı ile gösterilen ise asıl test edilmek istenen sacdır. Bu testte farklı deformasyon yolları elde etmek için farklı kesitli zımbalar kullanılır (dairesele, eliptik, dikdörtgen). Deney sonucunda yırtılmanın sacın düz taban kısmında gerçekleşmesi ölçüm kolaylığı sağlar. Bu sayede eğri yüzeylerdeki oluşan ölçüm hataları ortadan kaldırılmış olur. Ancak bu testte de zımba ve kalıbın kompleks geometrisi ve ŞSD'nin sadece sağ tarafının elde edilebilmesi bir

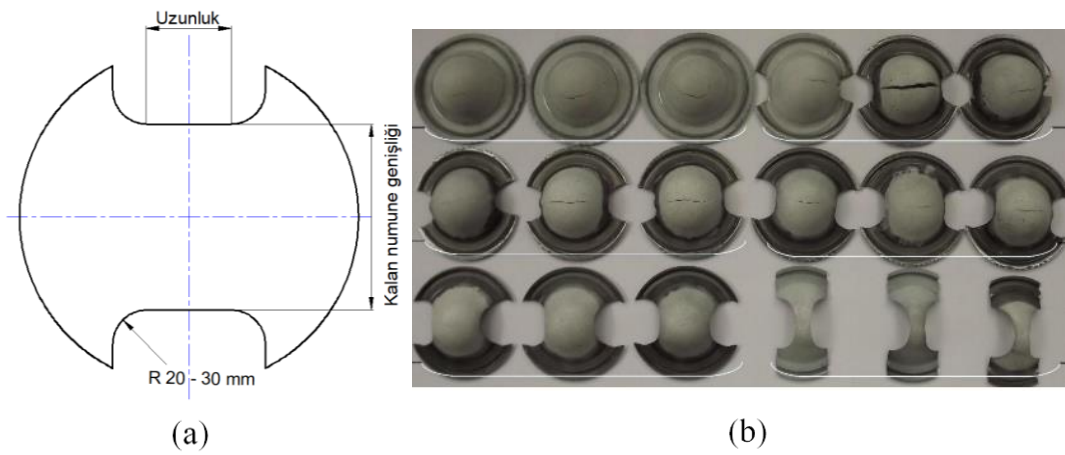
dezavantajdır. Bu dezavantaj numunelerin Şekil 4.29b ve c’de görüldüğü gibi modifiye edilmesi ile giderilmektedir. Böylelikle ŞSD’nin tamamı tek bir zımba ile elde edilebilmektedir.



Şekil 4.29. (a) Marciniak testinin şematik görünüşü (b) Test numunesi (c) Ara parça (Banabic, 2010)

Nakazima testi

Nakazima testinde farklı genişliklerdeki dikdörtgen çentiklere sahip numuneler yarı küresel bir zımba ve silindirik bir kalıp ile çekilmektedir (Şekil 4.30). Numune genişliklerini ve yağlayıcıları değiştirerek ŞSD’nin sağ ve sol kısımlarını elde etmek mümkündür. Bu test “Metallik malzemelerin şekillendirme sınır eğrilerinin belirlenmesi” şeklinde ISO 12004 standardında yer almaktadır. Önerilen numune uzunluğu ise zımba çapından %25 daha uzun olmalıdır. Zımba ve kalıp çapları sırasıyla 100 mm ve 105 mm olarak önerilmektedir.

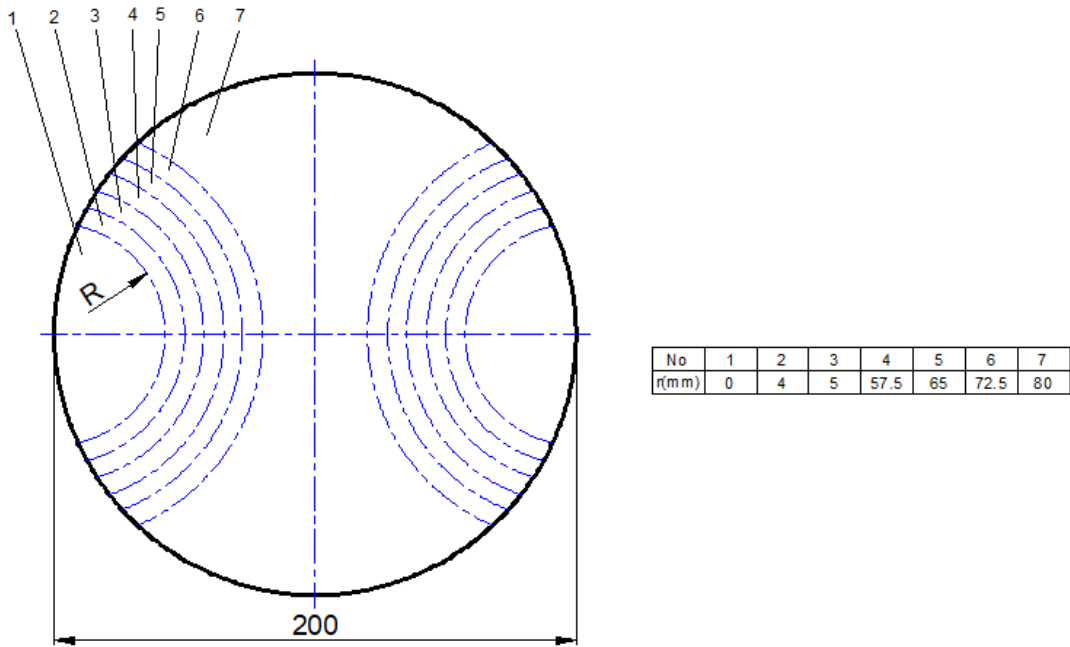


Şekil 4.30. (a) Nakazima testinde kullanılan numunenin şematik görüntüsü (Banabic, 2010) (b) Tamamlanmış ŞSD testine ait numuneler (Kami vd., 2017b)

Numunelerin ve kalıp parçalarının basit olması ve ŞSD'nin tamamının elde edilebilmesi bu testi avantajlı kılmaktadır. Dezavantajı ise kırışma oluşumu ve yüzey eğriliği sebebiyle oluşacak ölçüm hatalarıdır.

Hasek testi

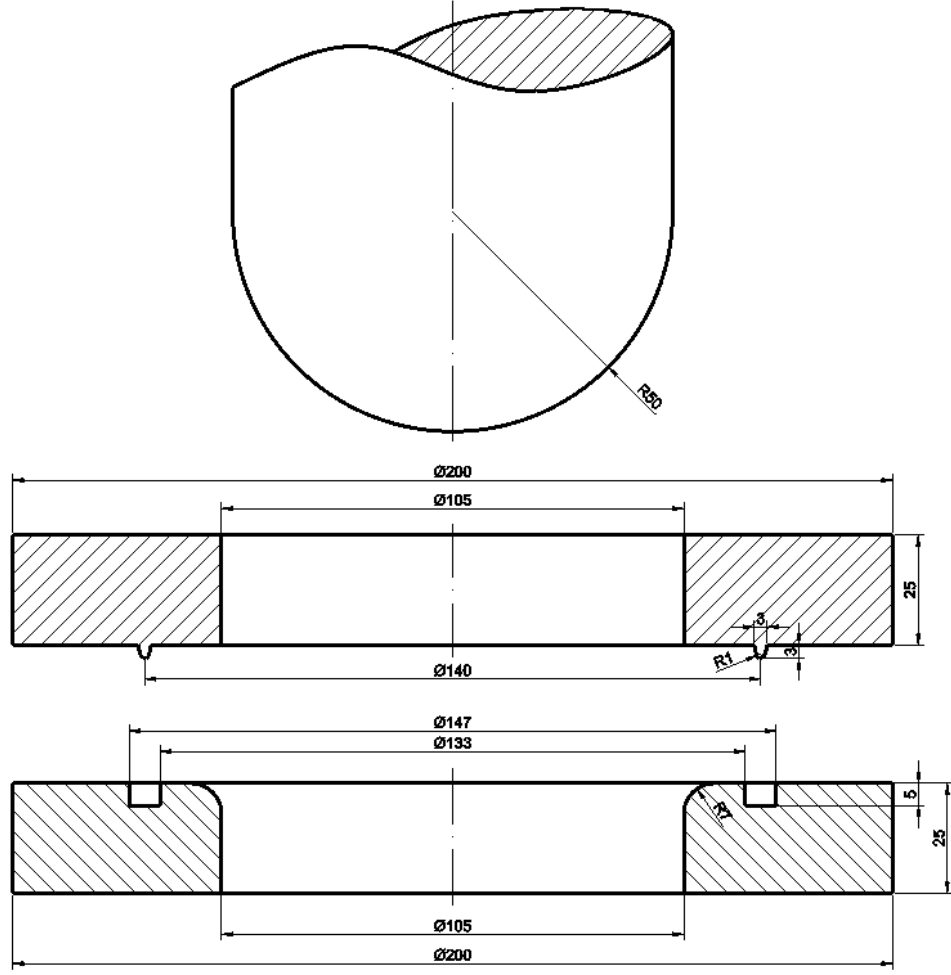
Hasek testinde, Nakazima testinde oluşması muhtemel kırışmaları önlemek amacıyla dairesel numunelerin üzerinde farklı çaplarda dairesel çentikler açılmaktadır. Şekil 4.31'te bu teste kullanılan numunelerin şematik görünüşü ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 4.31. Hasek testinde kullanılan numuneler ve ölçüleri (Hasek, 1978)

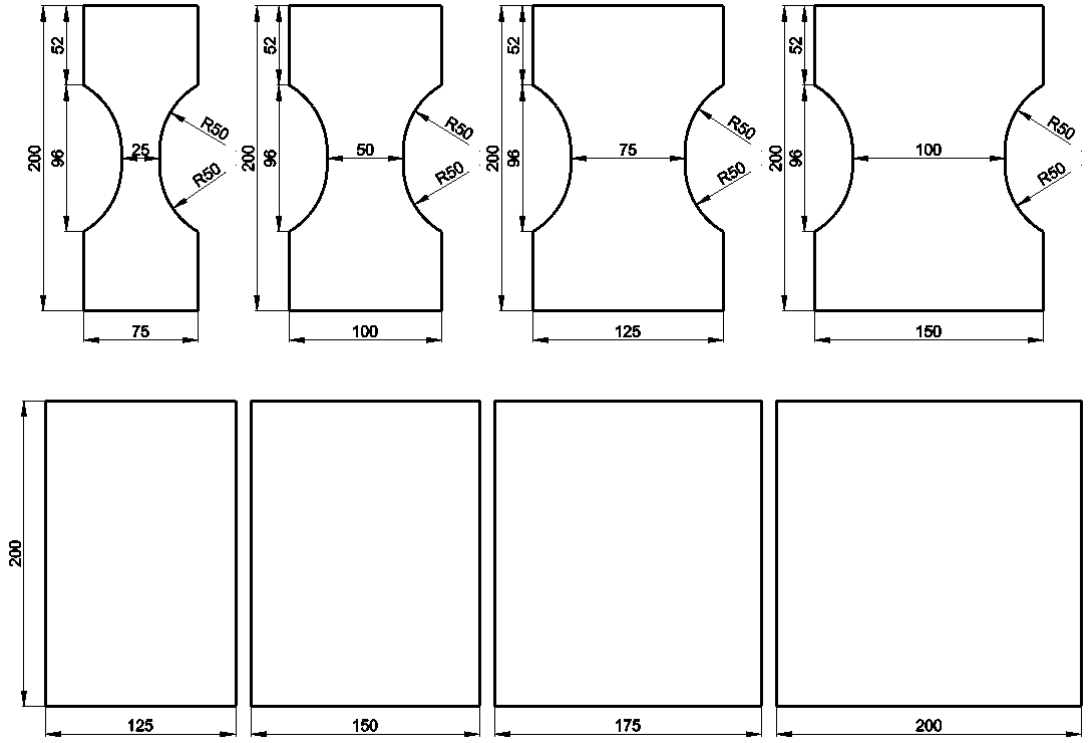
Düzlem dışı gerdirmeye testi (Out-of-plane test)

Bu testte Nakazima testi ile aynı kalıp ölçülerine sahip kalıplar kullanılmaktadır. Testin Nakazima testinden farkı kullanılan numunelerin geometrisinin ve ölçülerinin farklı olmasıdır. Kalıp ile baskı plakası arasına yerleştirilen numuneler yarı küresel zımba yardımı ile yırtılıncaya kadar deforme edilmektedir. Testte kullanılan kalıba ait detaylı teknik resim Şekil 4.32'te verilmiştir.



Şekil 4.32. Düzlem dışı gerdirme testinin kalıp ölçüleri (Yoshida vd., 1995; Raghavan, 1995)

Bu teste kullanılan numunelere ait teknik ölçüler Şekil 4.33'te verilmiştir. Numunelerin genişliği 25 mm'den 200'e kadar 25 mm'lik artışlar ile artmaktadır. Bu sayede tek eksenli gerilme halinden eşit iki eksenli gerilme haline kadar farklı deformasyon yolları elde edilerek ŞSD'nin tamamı tek bir kalıp ile belirlenebilmektedir.



Şekil 4.33. Düzlem dışı gerdirme testinde kullanılan numuneler ve ölçüleri (Öztürk ve Lee, 2005)

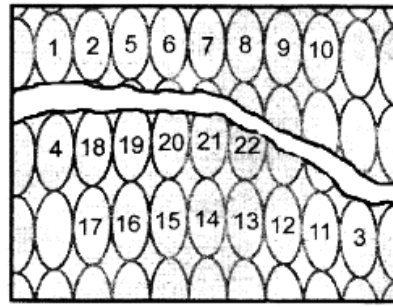
Yukarıda verilen, ŞSE'leri belirlemek için kullanılan yöntemlerden en çok kullanılanı düzlem dışı gerdirme testidir. Numune geometrisinin basit olması, tek bir kalıbın kullanılması ve ŞSE'nin her iki tarafının belirlenebilmesi sebebiyle bu tezde tek ve çift katmanlı sacların ŞSE'lerini belirlemek için düzlem dışı gerdirme testi kullanılmıştır.

4.5.2.3. Limit Şekil Değişikliklerinin Belirlenmesi

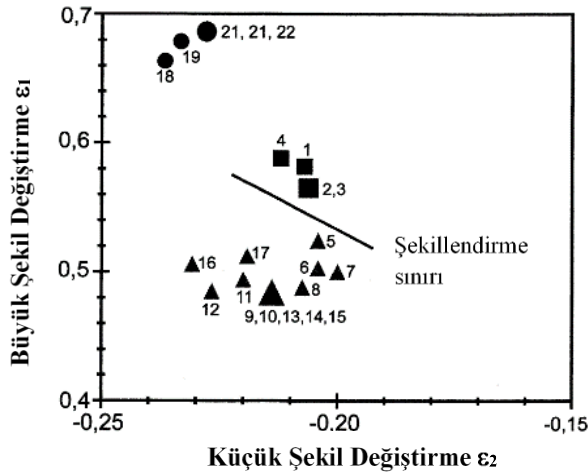
ŞSD'lerin belirlenebilmesi için deney sonrası numune üzerindeki limit şekil değişikliklerinin ölçülmesi gerekmektedir. Sac üzerindeki limit şekil değişikliklerinin ölçülmesinde farklı yöntemler olmasına rağmen en çok kullanılan yöntem kamera ile ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde deney öncesinde malzeme üzerine dağlama veya serigrafi yöntemi ile oluşturulan kare veya daire şeklindeki ağırlar deformasyon sonrası veya sırasında kamera yardımı ile ölçülür.

Şekil 4.34'da limit şekil değişikliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntem şematik olarak gösterilmiştir. Deformasyon sonrası sac üzerinde bulunan dairesel ağırlar eliptik geometriye dönüşmüştür. Bu elipslerin bazıları hasarın üzerinde bazıları ise hasar ile komşudur. Şekilde görülen 18'den 22'ye kadar olan elipsler tamamen hasara uğramıştır. 1'den 4'e kadar olan elipsler boyun vermiş bölgede veya hasardan

etkilenmiş bölgede bulunan elipslerdir. 5'ten 17'ye kadar olan elipsler ise tamamen güvenli bölgede bulunmaktadır. ŞSD oluşturulurken bu elipslerin büyük ve küçük eksenleri ölçülerek ilk baştaki dairenin çapına oranlanmakta böylelikle büyük ve küçük şekil değişimi belirlenmektedir. Bu şekil değişimleri yatay ekseni küçük, dikey ekseni ise büyük şekil değişimini gösterecek şekilde bir grafiğe aktarılmaktadır. Şekillendirme sınırı güvenli bölgedeki elipslerden alınan ölçümler ile boyun vermiş bölgeden alınan ölçümlerin arasından çizilmektedir. Farklı genişlikteki numunelerden aynı şekilde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen eğri şekillendirme sınır eğrisini vermektedir.



- Tip I ● Hasarlı (18...22)
 Tip II ■ Boyun vermiş veya Hasardan etkilenmiş (1...4)
 Tip III ▲ Güvenli (5...17)



Şekil 4.34. Limit şekil değiştirmelerin belirlenmesinde kullanılan yöntem (Banabic, 2010)

5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

Bu bölümde tez çalışması kapsamında çift katmanlı sacların üretiminde kullanılan saclar ve yapıştırıcı hakkında bilgiler alt başlıklar halinde verilmiştir.

5.1. Çalışmada Kullanılan Sac Metaller

Bu tez kapsamında şekil alma kabiliyeti yüksek ancak korozyon direnci düşük olan çelik sac, yapıştırma yöntemiyle şekillendirilebilirliği ve korozyon direnci iyi farklı bir sac metal ile birleştirilerek çift katmanlı sac oluşturulmuştur. Bu sebeple piyasada kolay temin edilebilen şekillendirilebilirliği yüksek, düşük karbonlu çelik bir sac seçilmiştir. Çift katmanlı sacın diğer katmanında ise şekil alma kabiliyeti kullanılan çelik saca yakın bir alüminyum sac seçilmiştir. Çalışmada kullanılan çelik ve alüminyum sacların özellikleri, kimyasal içerikleri ve standartları sunulmuştur.

5.1.1. Çelik Sac





Çift katmanlı sacın bir katmanında derin çekme işlemine uygun düşük karbonlu soğuk haddelenmiş çelik kullanılmıştır. Piyasada en çok kullanılan çelik sacların başında gelen DC01 (EN 10130 veya Erdemir 6112) kalite sac 1000x2000x0.5 mm³ boyutlarında temin edilmiştir. Buzdolabı ve çamaşır makinesi gibi ev eşyalarından, otomotiv sanayine, büro malzemeleri ve aydınlatma ekipmanlarından galvaniz kaplama ürünlerine kadar pek çok yerde kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan çelik ve alüminyum sacların kimyasal kompozisyonları Samsun Uluslararası Akredite Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarında (SAMLAB) Spectrolab marka M12 Hibrit model metal analiz cihazında belirlenmiştir. Kullanılan çelik saca ait kimyasal içerikler ve sac üreticisinin sunmuş olduğu standart değerler Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Çalışmada kullanılan çelik saca ait kimyasal içeriklerin ağırlıkça yüzdeleri ve standart değerleri

Element	DC01	DC01 (Standart)
%C	0.062	<0.12
%Si	0.017	-
%Mn	0.246	<0.6
%P	0.017	<0.045
%Cr	0.039	-
%Ni	0.052	-
%Al	0.041	-
%Cu	0.057	-
%Fe	99.46	Kalan

Çalışmada kullanılan derin çekmeye uygun sac fiziksel özelliklerin esas alındığı sisteme göre isimlendirilmiştir. Sanayide sıklıkla kullanılan bu sac tipi DC01 olarak adlandırılmıştır. Bu çelik sac az karbonlu, yumuşak ve soğuk şekillendirmeye uygun yassı çeliklerdendir. Bu çeliklere ait olan DC, DD ve DX harflerinden sonra, standartlarca belirlenmiş sadece sınıflandırma değeri olan sayılar ve ilave sembol harfleri gelir. Bu kısa gösterimlerde mukavemet değeri verilmemiştir. Kullanılan çelik sacın farklı standartlardaki gösterimleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kullanılan çelik saca ait farklı standart gösterimler. (2018a; SAE, 1993; Peckner ve Bernstein, 1977; Yüksel ve Meran, 2010; The Aluminum Association Inc., 2006)

Firma Standardı	ISO Adı 	EN 	AISI 	JIS 
Erdemir 6112	DC01	10130	ASTM A619 CR CQ	G3141 SPCEN

Çelik standartları, bileşen, makine ve konstrüksiyon üretiminde kullanılan farklı çelik ve demir alaşımlarının kimyasal, mekanik ve metalürjik özelliklerini sınıflandırmak, değerlendirmek ve belirlemek için kullanılan sistemlerdir. Bu standartlar, metalürji laboratuvarlarına, üreticilere ve son kullanıcılara çelik üretiminde, işlenmesinde ve uygulanmasında çelik hakkında bilgi vererek yardımcı olmaktadır (2018b).

Çelikler için dünya çapında kabul edilen ve kullanılan bir dizi sınıflandırma ve numaralandırma sistemi olmasına rağmen ortak bir çelik standardı veya sınıflandırma sistemi yoktur. Dünya genelinde kullanılan standartlar, Standart Kalkınma Örgütleri (Standards Development Organizations, SDO) tarafından ulusal veya uluslararası düzeyde veya belirli dikey endüstriler veya tedarikçiler tarafından geliştirilmiş ve standartlaştırılmıştır. Daha sık kullanılan çelik standart ve sınıflandırma sistemlerinin bazıları şunlardır (2018b):

- ABD’de ve yurt dışında geleneksel olarak kullanılan AISI (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü) çelik standartları: Bu standart artık muhafaza edilmemekte ve giderek artan şekilde SAE, ASTM ve diğer ABD standartları ile değiştirilmekte olmasına rağmen, hala yaygındır.
- Avrupa ülkelerinin metal ve çelik standartlarına uyumlu bir sistem olan EN (Euronorm): Tüm Avrupa ülkelerinde kabul edilen ve etkin bir şekilde kullanılmasına rağmen, Alman DIN, İngiliz BS, Fransız AFNOR

ve İtalyan UNI gibi “eski” ulusal sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır ve çoğu belgede sıklıkla bulunur.

- Asya ve Pasifik bölgelerinde yaygın olarak kullanılan JIS çelik standartları: JIS çelik standartları, Kore, Çin ve Tayvan standartları gibi diğer ulusal sistemler için de temel olarak kullanılmaktadır.
- Çin GB ve YB, Hint IS ve Brezilya NBR gibi yeni sanayileşmiş ülkelerin çelik standartları, bazen daha az gelişmiş ve detaylı olmasına rağmen, küresel kaynak kullanımı nedeniyle giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen standartlar dışında dikey endüstriyel çelik standartları otomotiv, havacılık ve daha fazlası için SAE; basınçlı kaplar ve diğer birçok uygulama için ASME; sarf malzemeleri ve ilgili malzemeler için AWS kullanılmaktadır. Gemi yapımına uygun çelikler için standartlar ise Amerikan ABS, British Lloyds, İtalyan RINA ve diğerleri tarafından karşılanmaktadır.

Burada açıklanan standartlara ek olarak, birçok çelik üreticisi ve tedarikçileri, çelikleri tanımlamak için kendi ticari isimlerini geliştirmişlerdir. Bu işaretlerden bazıları, yıllar sonra ve onlarca yıldan beri endüstriyel topluluk içinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve genellikle belirli bir tedarikçiye atıfta bulunmadan “ortak” isimler veya “ticaret” adları olarak adlandırılmaktadır (HARDOX, WELDOX vb.). Çoğu durumda, bu “ortak” isimler standartlaştırılmamıştır ve özellikler büyük ölçüde değişebilir.

Avrupa standartları ilgili alt grup tarafından hazırlanıp Avrupa Standartları Komitesi (Comite Europeen de Normaliation, CEN) genel kurulundan onaylanıp çıkarılan Avrupa Standardı (EN) üç farklı dilde (Almanca, İngilizce ve Fransızca) yayınlanır. Üye ülkelerin kendi dillerine çevirme ve kendi dillerindeki şeklini CEN’e onaylatma görevleri vardır. Ancak, kısa bir ulusal önsöz dışında standart metnine herhangi bir ilave veya değişiklik getirme hakkı yoktur. Ulusal standart ile Avrupa standardı arasındaki fark, sadece ulusal önsözü de içeren bir kapaktan ve standart numarasının önüne ilave edilen ulusal standart işaretinden (DIN, BS vb.) ibarettir. Örneğin Türkçe: Çelik Tiplerinin Tarifi ve Sınıflandırılması adını taşıyan EN 10020 Alman standardı olarak DIN EN 10020, Britanya standardı olarak BS EN 10020 haline gelir (Yüksel ve Meran, 2010). Avrupa standardı esas alınarak Türk standartlarına göre

Çeliklerin sınıflandırılmasını, adlandırılmasını ve kısa gsterişlerini düzenleyen standartlar şu şekildedir:

- TS EN 10 020 : elik Tiplerinin Tarifi ve Sınıflandırılması
- TS EN 10 027-1: ekliklerin Kısa Gösteriliş Sistemleri-elik Adları
- TS EN 10 027-2: Çeliklerin Kısa Gösteriliş Sistemleri –elik Numaraları
- TS EN 10 079 : elik Mamullerin Tanımları

Avrupa standartlarını kabul eden ülkelerin kullandığı çelikler için EN 10 027-1'e göre çeliklerin kısa gsterilişlerinde fiziksel ve kimyasal özelliklerin esas alındığı iki temel ilke takip edilir. Bunlar;

- Fiziksel zelliklerin Esas Alındığı Kısa Gsterilişler (Re, Rp0,2, Rm gibi mukavemet değerleri, HBW ve HR30Tm olarak sertlik değerleri veya elektromanyetik zellikler)
- Kimyasal Bileşimin Esas Alındığı Kısa Gsterilişler

5.1.2. Alüminyum Sac

Çift katmanlı sacın diğer katmanını oluşturan EN AW 5754 H111 alüminyum alaşımı sac 1000x2000x1 mm³ Seyko Alüminyum Paz. San. Ve Tic. Ltd. şti.'den temin edilmiştir. Bu sac saf alüminyuma göre daha sert bir yapıya sahiptir. Bu ürünün korozyon dayanımı yüksek, kaynak kabiliyeti iyi, özellikle endüstriyel atmosfere ve deniz suyuna karşı dayanımı yüksektir. Ayrıca yorulma dayanımı yüksek olup, soğuk şekillendirme ve kaplama için uygun bir malzemedir. Bu sebeple çift katmanlı sacın ikinci katmanı olarak EN AW 5754 H111 sacı seçilmiştir. Alüminyum saca ait kimyasal içerikler ve sac üreticisinin sunmuş olduğu standart değerler Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Çalışmada kullanılan alüminyum saca ait kimyasal içeriklerin ağırlıkça yüzdeleri ve standart değerleri

Element	EN AW 5754	EN AW 5754 (Standart)
%Mn	0.2	<0.5
%Si	0.33	<0.4
%Cr	0.05	<0.3
%Mg	2.7	2.6-3.6
%Cu	0.07	<0.1
%Ti	0.02	<0.15
%Zn	0.06	<0.02
%Fe	0.37	<0.4
%Ni	0.012	<0.15
%V	0.017	<0.15
%Al	96.17	Kalan

Alüminyum alaşımlarını tanımlamak ve bazı özelliklerini belirtmek için kullanılan birçok alüminyum standardı bulunmaktadır. Diğer metal ve alaşımlarında olduğu gibi alüminyum ve alaşımlarında da Avrupa EN (Euronorm), US SAE ve ASTM, Japon JIS, uluslararası ISO, Çin GB gibi birçok standart bulunmaktadır (2018c). Tablo 5.4'te çalışmada kullanılan alüminyum sacın farklı standartlardaki gösterimleri verilmiştir.

Tablo 5.4. Alüminyum sacın farklı standartlarda gösterimi

ISO Adı 	EN 	AA	DIN 
AlMg3	EN AW-5754 H111 (Al Mg3)	5754	AlMg3

Euronorm alüminyum standartlarında işlenmiş alüminyumlar dört rakam ile, döküm alüminyumlar 5 rakam ile gösterilir. Dört basamaklı numaralandırmalar ISO alüminyum standartları ve US numaralandırmaları ile birebir aynıdır. Bu durum, Amerikan Alüminyum Derneği (The Aluminum Association, AA) ile Alüminyum Uluslararası Numaralandırma Sistemi (International Designation System) arasında yapılan bir anlaşma ile belirlenmiştir. AA alüminyum için özel bir dernektir ve dünya genelinde alüminyum standartları için esas alınır. Örneğin, Euronorm alüminyum standartlarında belirtilen kimyasal bileşim sınırları, eşdeğer alaşımlar için Alüminyum Birliği ile kayıtlı olanlarla aynıdır.

Alüminyum Birliği standart olarak AA önekini, Avrupa alüminyum standartları ise EN AW önekini kullanılır (2018c). Avrupa sisteminde, “AB” öneki yeniden eritme için külçeleri ifade eder; “AC”, dökme bir ürünü; “AM”, bir döküm ana alaşımını;

“AW” şekillendirilebilir ürünü (EN AW 5754 gibi) ifade etmektedir. Ayrıca numaralandırma sonlarında "A" son eki (örn. EN AW-6005A), alaşımın ulusal varyasyonunu gösterir.

Alüminyum ve biçimlenebilen alüminyum alaşımlarının dört rakamlı malzeme numarası sistemi ve alüminyum alaşımlarının standart numarasının ardından ısıl işlem durumunu belirten kodlar “Ekler” bölümünde verilmiştir. Çalışmada kullanılan sacın ısıl işlem durumu H111 olarak seçilmiştir. Bu ifade malzemenin germe veya düzeltme gibi işlemler sırasında tavllanmış ve hafifçe soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış olduğunu göstermektedir.

5.2. Çift Katmanlı Sacların Üretiminde Kullanılan Yapıştırıcı

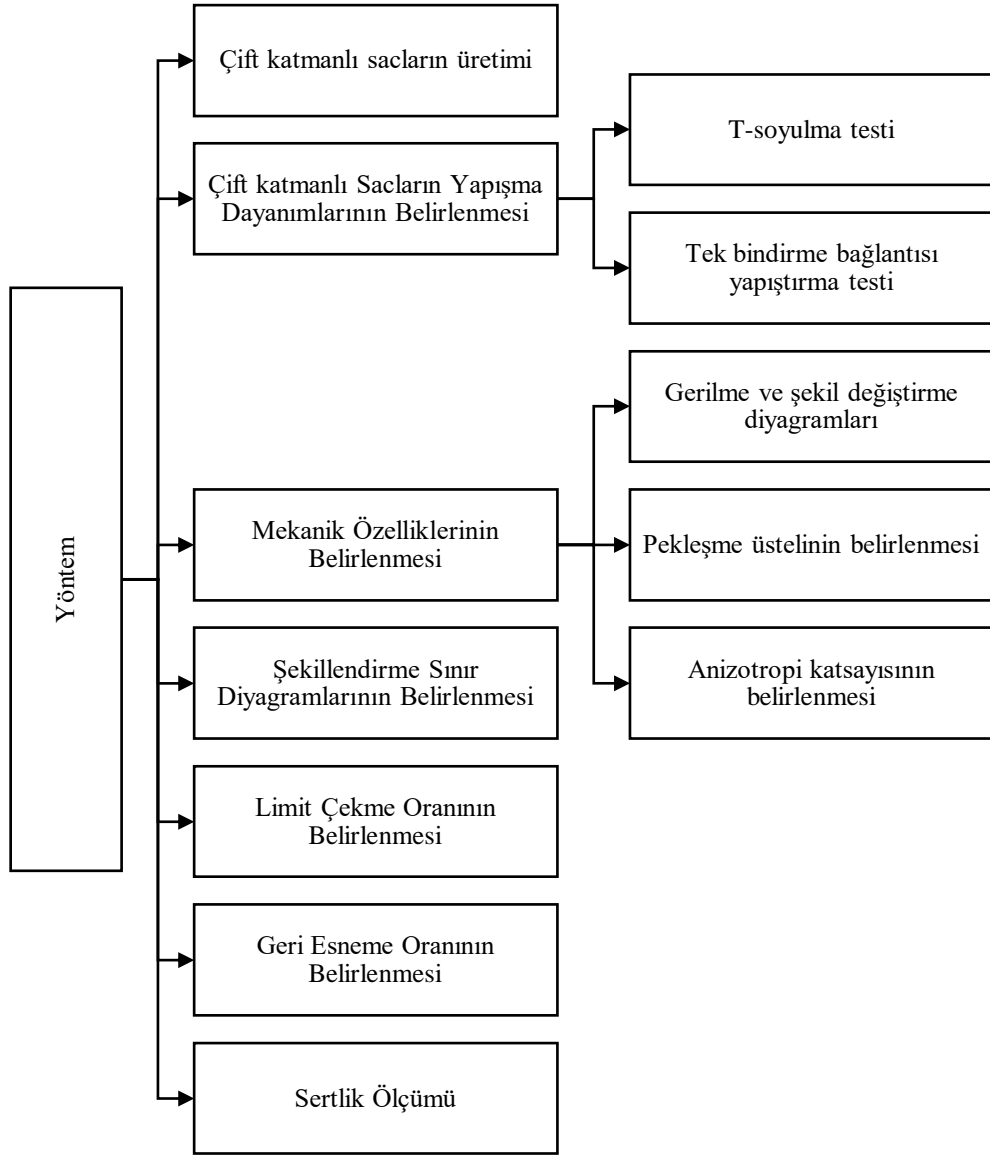
Bu çalışmada çelik ve alüminyum sac metallerin yapıştırılmasında poliüretan bazlı Polymex 3002 reçine kullanılmıştır. Bu reçineye ait firmanın sunmuş olduğu özellikler Tablo 5.5’te verilmiştir. Bu yapıştırıcı değişik koşullarda ve farklı sıcaklıklarda kullanılabilir. Elektrik direnci ve dielektrik katsayısı yüksektir. Aşınmaya ve asit ve benzeri korozif maddelere karşı dayanıklıdır. Düşük sıcaklıklarda önemli bir hacim değişikliği göstermeden sertleşmektedir. Katalizörler sayesinde kürlenme süresi kısaltılabilir. Bu yapıştırıcının seçilmesindeki başlıca sebep kürlenme süresinin ayarlanabilmesidir. Ayrıca katalizör sayesinde iki sac arasında hava ile temas olmasa dahi kuruyabilmektedir. Yapılan ön denemelerde silikon bazlı yapıştırıcılarda sacın arasında kalan yapıştırıcının hava ile teması olmamasından dolayı uzun bekleme sürelerine rağmen kürlenmediği görülmüştür. Diğer taraftan Polymex 3002 ile yapılan denemelerde sertleşme sonrası hava ile temas eden numunelerin gevrekleştiği görülürken sacın arasında kalan yapıştırıcının sünekliğini koruduğu tespit edilmiştir. Bu durum çift katmanlı saclar için önemli bir avantajdır.

Tablo 5.5. Polymex 3002 yapıştırıcının teknik özellikleri (Polymex, 2020)

Özellik	Değer
Yapıştırıcının yoğunluğu	1.43 g/cm ³
Sertleştiricinin yoğunluğu	1.22 g/cm ³
Sıcaklık dayanımı	-45 / +280 °C
Shore sertlik	90-95
Dielektrik katsayısı	3.5 F/m
Uygulama sıcaklığı	5-35 °C

6. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

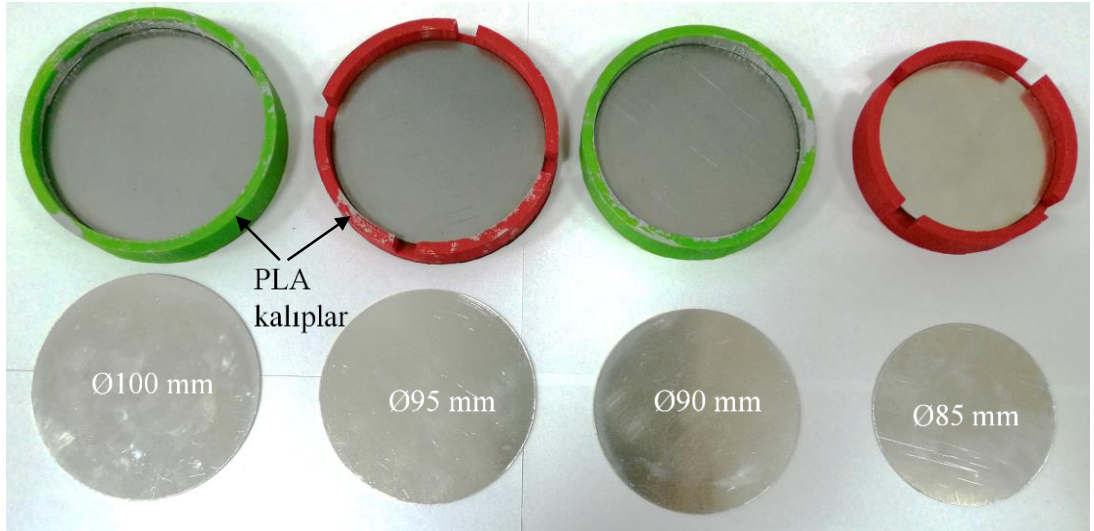
Bu bölümde çift katmanlı sacların üretimi, mekanik özellikleri, şekil alma kabiliyetleri, derin çekme performansları, geri esneme davranışları ve sertliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Kullanılan yöntemlerin genel özellikleri, standartları ve çalışmadaki uygulama biçimleri bu bölümde anlatılmıştır. Katmanlı sacların üretimi, yapışma özellikleri, mekanik özellikleri, şekil alma kabiliyetleri, limit çekme oranları, geri esneme davranışları ve sertliklerini belirlemede kullanılan yöntemler Şekil 6.1’de sistematik olarak sunulmuştur.



Şekil 6.1. Ana hatları ile çalışmada izlenen yol

6.1. Çift Katmanlı Sac Üretim Yöntemi

Bu tez kapsamında DC01 çelik sacı ile EN AW 5754 H111 alüminyum sacı ara katmanda Polymex 3002 poliüretan esaslı reçine kullanılarak yapıştırılmıştır. Deneylede kullanılacak saclar $\text{Ø}85$, $\text{Ø}90$, $\text{Ø}95$, $\text{Ø}100$ mm ölçülerinde kesilmiştir. Sac yüzeyleri kir ve pastan temizlenmesi için zımparalanmış ve alkol ile silinmiştir. Temizlenen sacların bir yüzeyine yapıştırıcı uygulanarak bu ölçü ve geometriye uygun 3B yazıcı ile PLA (poli laktik asit) malzemeden üretilmiş kalıplar (Şekil 6.2a) içerisinde kürlenmeye bırakılmıştır. Bu kalıplar ile sacların birbiri üzerinde kayması engellenmiş ve standart ürünlerin çıkması sağlanmıştır. Numunelerin kalıp üzerine yapışmasını engellemek amacıyla kalıp ile numune arasında yağlı poşet kullanılmıştır. Kalıp içerisine yerleştirilen sacların üzerine 15 N'luk ağırlık konularak yapıştırıcının katmanların temas yüzeyine yayılması sağlanmıştır (Şekil 6.2b). Hazırlanan çift katmanlı saclar yapıştırıcının kuruması için 24 saat bekletilmiştir.



(a)

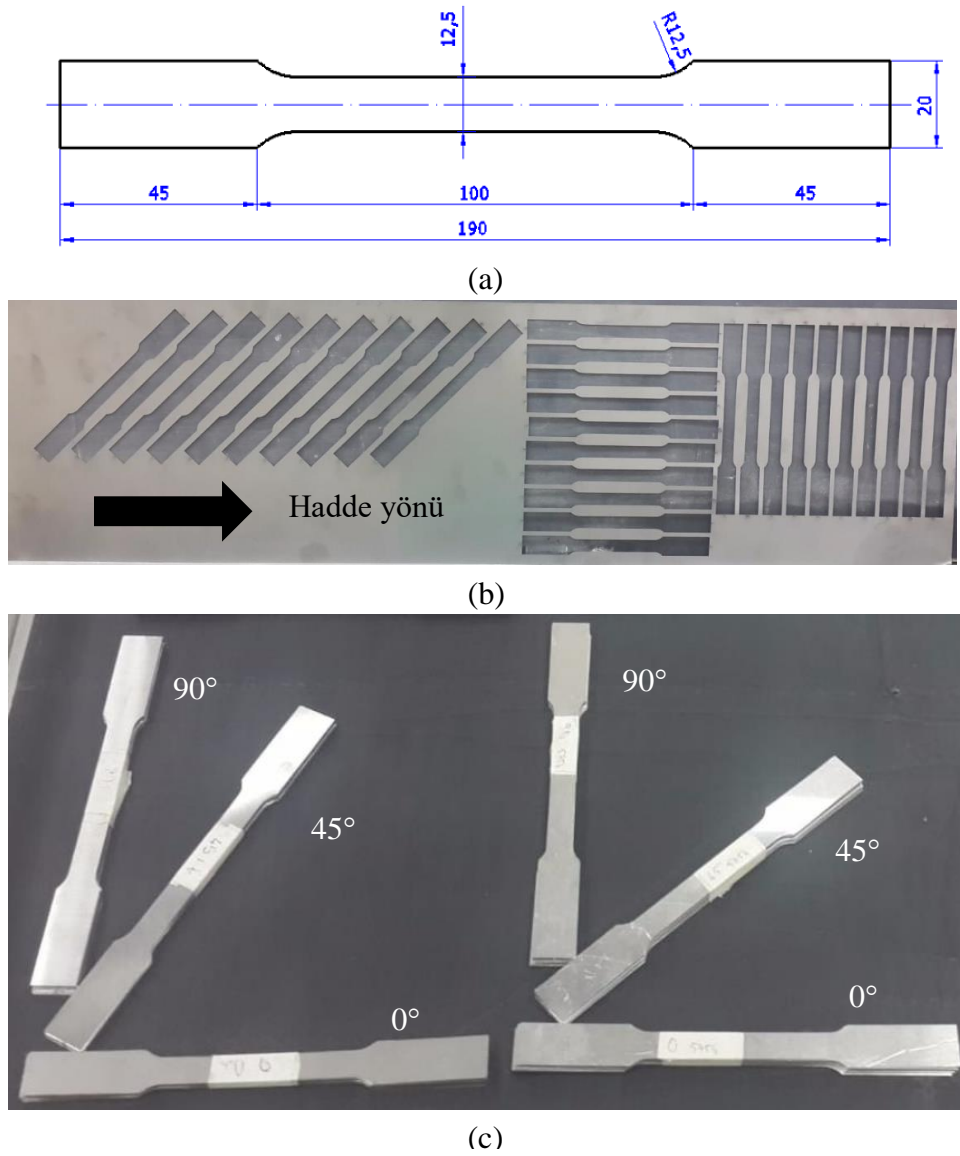


(b)

Şekil 6.2. Çift katmanlı sac üretimi (a) PLA kalıplar (b) Yapıştırılmış numunelerin kurutulması

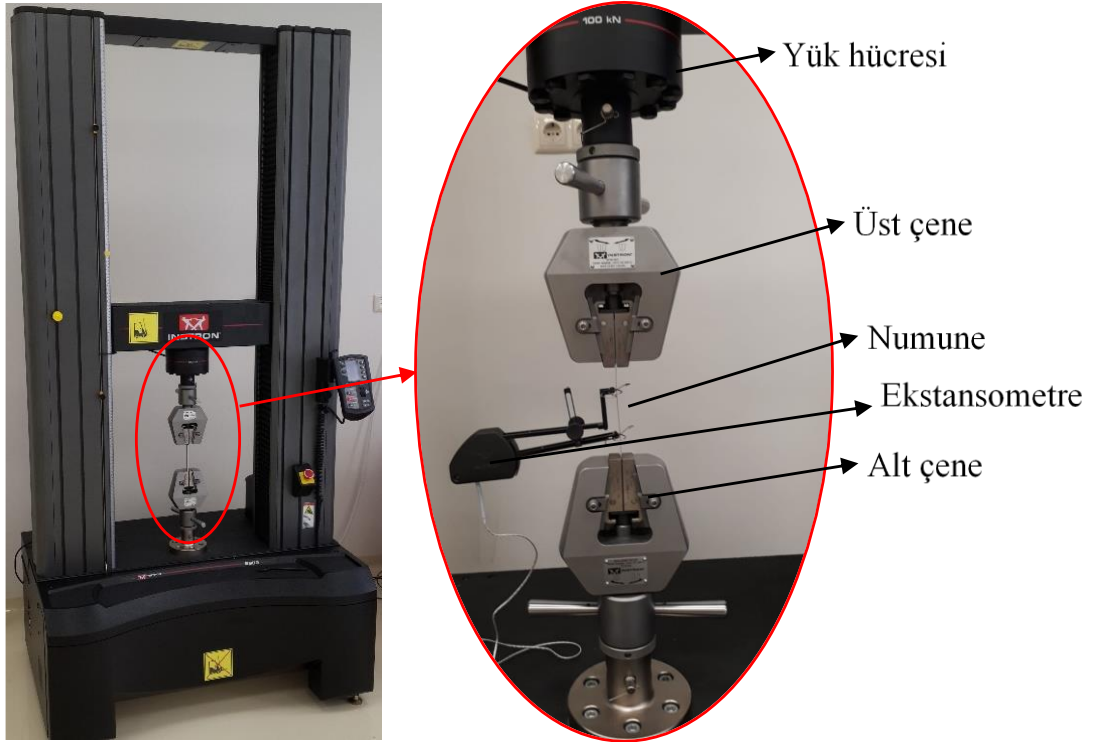
6.2. Sac Metallerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Sac metallerin uzama, akma dayanımı, kopma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi yapılmaktadır. Çalışmada kullanılacak olan DC01 (Erdemir 6112 veya düşük karbonlu çelik) ve EN AW 5754 H111 (Alüminyum-Magnezyum alaşımı) kalite saclardan ASTM E8 (Standard, 2013) standardına uygun numuneler hazırlanmıştır. Standart numune ölçüleri Şekil 6.3a'da verilmiştir. Numuneler hadde yönü ile paralel (0°), diagonal (45°) ve dik (90°) olacak şekilde kesilmiştir (Şekil 6.3b). Bu şekilde sacların anizotropik özellikleri belirlenmektedir. Kesilen numuneler Şekil 6.3c'de görülmektedir.



Şekil 6.3. Çekme testi numuneleri (a) ASTM E8 standart numune ölçüleri (b) Numunelerin çıkartıldığı sac (c) Lazer ışını ile kesilmiş çekme numuneleri

Tek eksenli çekme deneyleri, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezinde (KİTAM) bulunan Instron Marka 5982 Model 100 kN yüklemeye kapasiteli 0.01 N hassasiyetle çekme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4). Çekme hızı deney standardında (ASTM-E8/E8M-15a, 2015) belirtildiği üzere 10 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Deneyler esnasında şekil değiştirme miktarlarını ölçmek amacıyla numuneye ölçü boyu 50 mm olan ekstansometre bağlanarak gerilme ve şekil değiştirme (σ - ϵ) verileri alınmıştır.



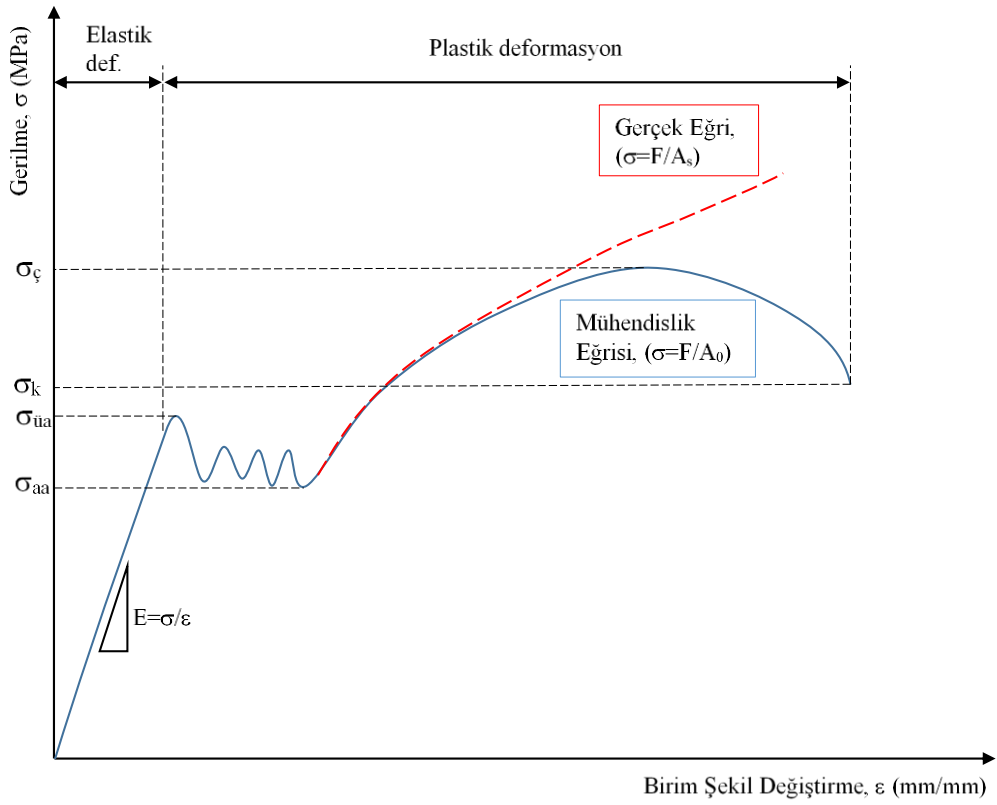
Şekil 6.4. 100 kN yüklemeye kapasiteli çekme/basma test cihazı (KİTAM)

6.2.1. Gerilme ve Şekil Değiştirme Diyagramları

Çekme testi, metalik malzemelerin akma dayanımını ($R_{p0,2}$), çekme dayanımını (R_m), maksimum uzaması ($\Delta l_{maks.}$), elastisite modülü (E), pekleşme üsteli (n), anizotropi katsayılarını (R_0 , R_{45} , R_{90}) belirlemeyi sağlamaktadır. Çekme testleri sonucunda kuvvet (F) – uzama (Δl) grafikleri elde edilir. Bu eğri tek başına kullanıldığında numune boyutlarının verilmesi gerekmektedir.

Şekil 6.5’de belirgin akma sınırı gösteren metalik malzeme için mühendislik gerilmesi – mühendislik şekil değiştirmesi diyagramı verilmiştir. Düşük karbonlu (ağırlıkça $C < \%0,1$) yumuşak çeliklerde belirgin akma sınırı görülmektedir (Özel ve

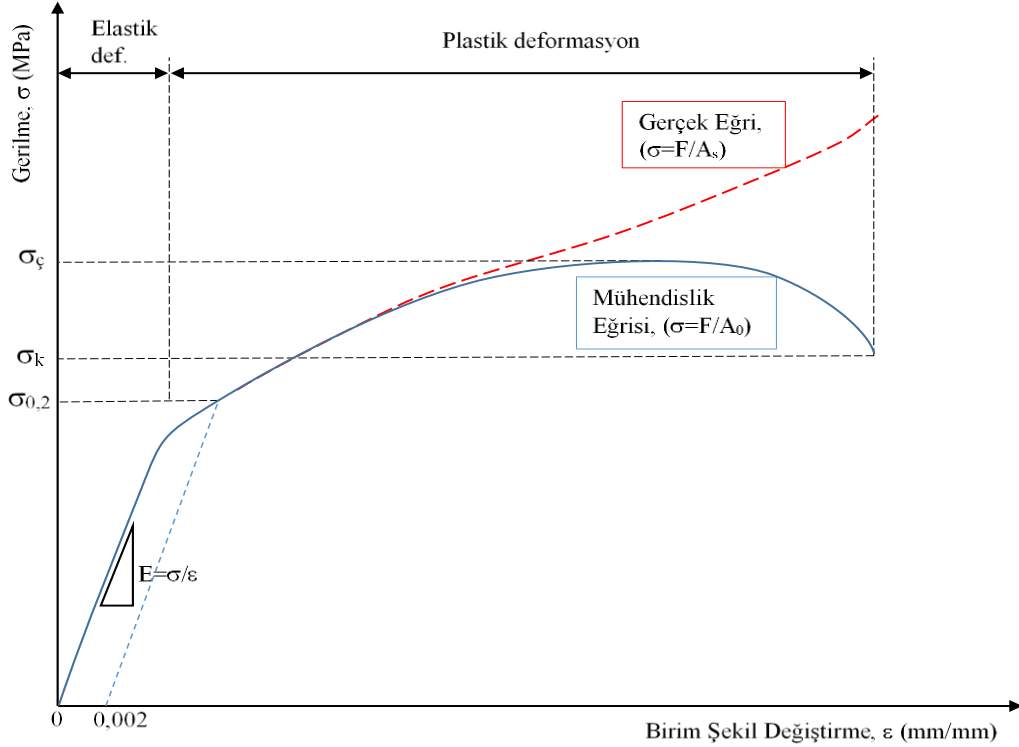
Aka, 1969). Akma sınırı tek eksenli çekme testi esnasında malzeme içerisindeki deformasyonun homojen olarak gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. Sac içyapısında, dislokasyonların bulunduğu bölgelerde yoğunlaşan karbon atomları (ara yer atomları) bu bölgelerdeki dislokasyonları kilitleyerek deformasyon için gerekli olan gerilmenin artmasına sebep olmaktadır (J. Rosler, H. Harders vd., 2007; Föll, y.y.). Numune üzerindeki gerilmenin üst akma sınırına ($\sigma_{\text{üa}}$) ulaşması ile birlikte malzemede ilk kalıcı deformasyon malzeme yüzeyinde 45° lik bir bant şeklinde oluşur. Lüders bantları olarak adlandırılan bu bantlar, malzeme bu homojen olmayan deformasyon bölgesinden çıkıncaya kadar oluşmaya devam eder.



Şekil 6.5. Belirgin akma sınırı gösteren bir metalik malzeme için çekme diyagramı

Şekil 6.6'da belirgin akma sınırı göstermeyen bir metalik malzemeye ait çekme diyagramı verilmiştir. Temperlenmiş (rekristalizasyon sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta tavlınmış) düşük karbonlu çelikler, yüksek alaşımlı çelikler ve alüminyum gibi birçok metalde belirgin akma sınırı gözlenmez. Bu tür metallerde içyapıdaki ara yer atomları (kafes yapısını oluşturan atomlardan daha küçük çaplı atomlar, örneğin çelik içerisindeki karbon atomları) içyapı içerisine daha homojen dağılmış ve dislokasyonları (atomsal boşluk dizilimi) kilitlememişlerdir. Tek eksenli çekme testi

esnasında malzemede elastikten plastik bölgeye geçişte herhangi bir belirti olmaz. Elastik deformasyon direncini aşan parça plastik şekil değiştirmeye başlar ve kopana kadar bu şekilde devam eder. Belirgin akmanın olmadığı bu tür metallerde akma sınırı, 0,002 (%0,2) birim uzama miktarından elastik doğruya paralel olarak çekilen ve eğriyi kesen nokta ($\sigma_{0,2}$) olarak kabul edilir.



Şekil 6.6. Belirgin akma sınırı göstermeyen malzeme için çekme diyagramı

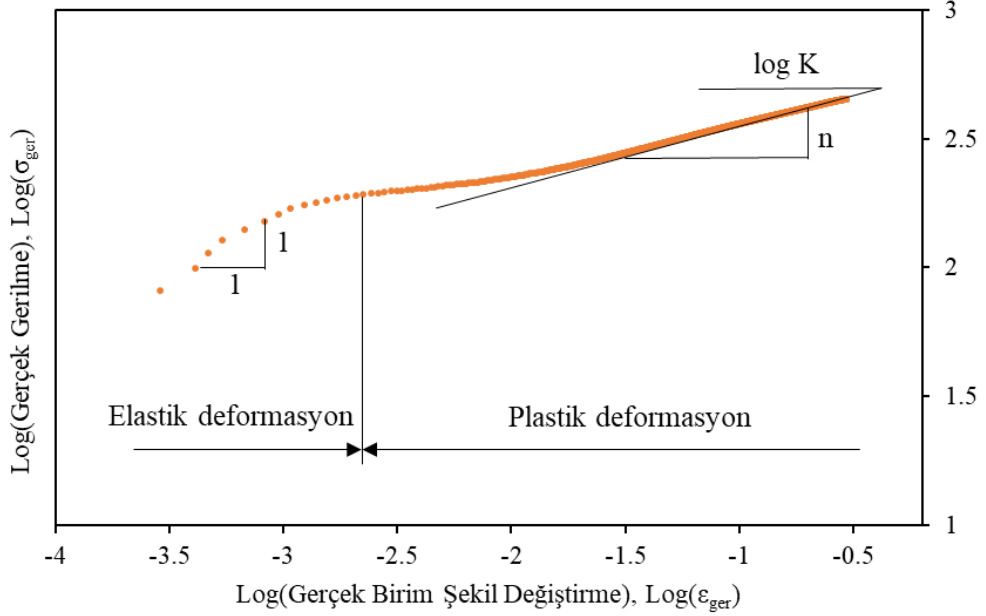
6.2.2. Pekleşme Üstelinin Belirlenmesi

Pekleşme üsteli, metalik malzemenin şekil alabilirliği hakkında kullanıcıya bilgi vermektedir. Pekleşme üsteli daha yüksek olan metaller daha fazla şekillendirilebilirken, düşük olan metaller daha az şekillendirilebilmektedir. Genellikle malzemelerin pekleşme üsteli Hollomon eşitliği (6.1) ile belirlenmektedir (Hollomon, 1945). Burada K mukavemet katsayısı, n ise pekleşme üstelini temsil etmektedir.

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (6.1)$$

Hollomon eşitliğindeki K ve n katsayıları hesaplanırken gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme değerlerinin logaritması alınarak Şekil 6.7'dakine benzer şekilde grafikleri çizdirilir. Plastik bölgeye $y=ax+b$ denkleminde uygun bir doğru

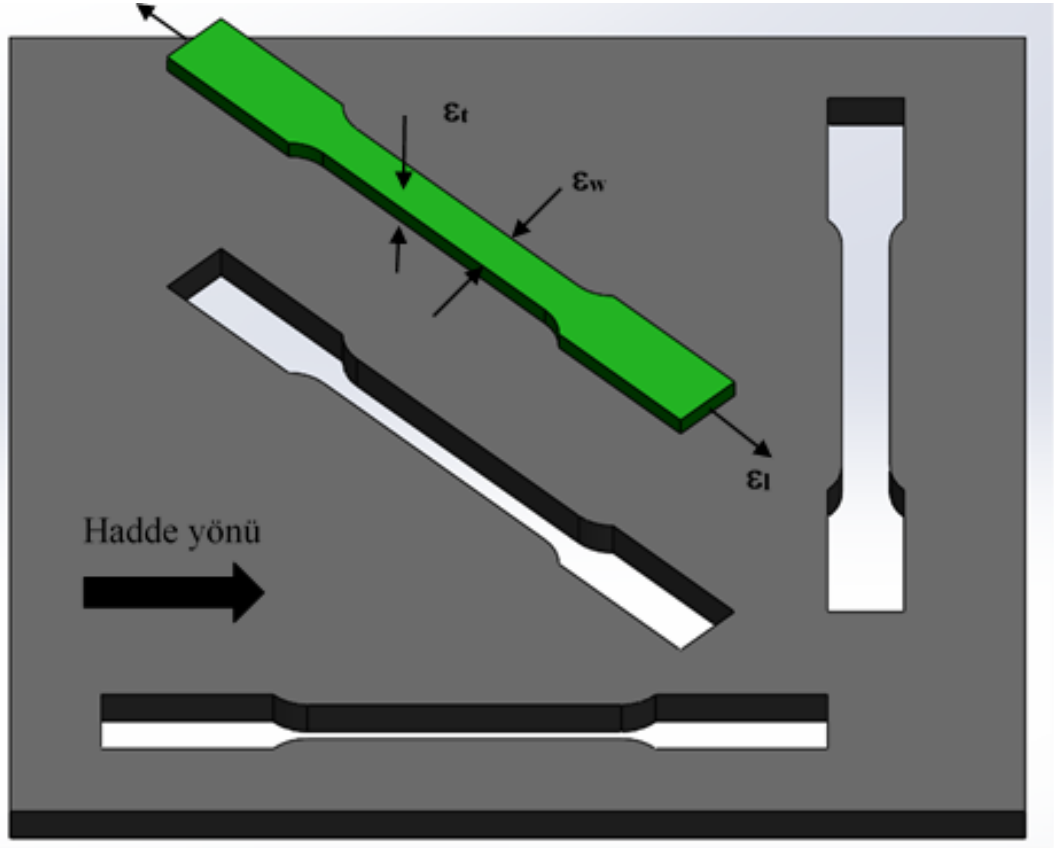
uydurulur. Buna göre (6.1) numaralı denklem, $\log(\sigma)=n \log(\epsilon) + \log(K)$ halini alır. Burada plastik bölgeye uydurulan doğrunun eğimi (a) pekleşme üstelini (n) vermektedir. $\epsilon=1$ veya $\log(\epsilon)=0$ olduğunda buna karşılık gelen gerçek gerilme değeri mukavemet katsayısı (K) olarak adlandırılır. Mukavemet katsayısı yüksek olan metallerin dayanımları daha yüksektir veya bir başka deyişle mukavemet katsayısı yüksek olan metale şekil verebilmek için uygulanması gereken kuvvet daha fazladır.



Şekil 6.7. Gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrisinin logaritmik olarak çizilmesi (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002)

6.2.3. Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi

Malzemelerin özellikleri (akma dayanımı, uzama, elastisite modülü vd.) yükleme yönüne bağlı olarak değişmeyen veya bir başka deyişle mekanik özellikleri her yönde aynı olan malzemelere izotropik malzemeler denir. Döküm yöntemi ile üretilmiş metaller ve camlar izotropik olarak kabul edilebilir. Sac şekillendirme işlemlerinde kullanılan metaller genellikle haddelenmiş sac metal malzemelerdir. Dolayısıyla malzeme içerisindeki kristaller hadde yönünde uzayarak yönlenmişlerdir. Bu tip metaller farklı yükleme yönlerinde farklı özellikler gösterirler ve anizotropik malzeme olarak adlandırılırlar. Anizotropi katsayılarını belirlemek için sac metalden hadde yönünde, hadde yönüne dik ve hadde yönü ile 45° açı yapan çekme numuneleri hazırlanarak çekme testine tabi tutulurlar (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Anizotropi katsayılarının belirlenmesi için hadde yönüne göre farklı açılardaki numuneler

Yükleme yönüne bağlı olarak değişiklik gösteren anizotropi durumu R değeri ile ifade edilmektedir. Bu değer genişlikteki (w) şekil değişiminin ($\epsilon_w = \ln(w/w_0)$), kalınlıktaki (t) şekil değişimine ($\epsilon_t = \ln(t/t_0)$) oranı olarak bilinmektedir. Kalınlık ölçümünün hassas olarak yapılamadığı durumlarda anizotropi katsayısı sabit hacim varsayımı ile uzunluk (l) ve genişlik (w) ölçümlerinden (6.2) denklemindeki gibi hesaplanabilmektedir (ASTM-E517-00, 2011). Burada 0 alt indisi ile ilgili geometrik boyutun ilk ölçüsü simgelenmektedir.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 t_0}{w l}\right)} \quad (6.2)$$

Anizotropi katsayısını belirlemek için yapılan uzunluk ve genişlik ölçümleri genellikle belirli bir şekil değiştirme değerinde yapılır. Çekme testi ile maksimum uzama değeri belirlenen parça, yeni bir çekme testi yapılarak maksimum kopma dayanımının olduğu şekil değiştirme değerinden daha düşük bir değere kadar çekilerek test sonlandırılır (ASTM-E517-00, 2011). Test sonucunda numunenin son boyu (l), kalınlığı (t) ve genişliği (w) ölçülerek anizotropi katsayıları (R) belirlenir (Şekil 6.8).

Anizotropi katsayısının fiziksel anlamı, $R > 1$ olduğu takdirde, sac metalin düzlemdeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu şeklindedir; $R < 1$ olduğunda ise sac düzlemindeki şekil değişimine daha dayanıklı olduğu anlamına gelmektedir. İzotrop bir malzemede ise $R = 1$ dir. Yani sac metal her yönde aynı özelliği göstermektedir.

Hesaplanan R değerleri, ölçümün yapıldığı yönü gösteren R_0 , R_{45} , R_{90} gibi alt indisler ile gösterilir. Burada R_0 hadde yönündeki, R_{45} diyagonal (sacın hadde yönüne 45° açıda) yöndeki, R_{90} ise hadde yönüne dik doğrultudaki anizotropi katsayısını temsil etmektedir. Eğer ölçüm yapılan bir sac metal için bu katsayılar birbirinden farklı değerlerde ise sac düzlemsel anizotropiye (ΔR) sahiptir. Bu değer pozitif veya negatif olabilmesine rağmen çeliklerde genellikle pozitiftir. Düzlemsel anizotropi (6.3) denklemi ile hesaplanabilmektedir (ASTM-E517-00, 2011).

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (6.3)$$

Düzlemsel anizotropi katsayısı ΔR , sacın haddeleme doğrultusuna göre, kulakların konumunun belirlenmesini sağlar. $|\Delta R|$ büyüdükçe kulak yüksekliği artar. $\Delta R = 0$ için kulak oluşumu görülmez. Ayrıca $\Delta R < 0$ olduğunda hadde yönü ile 0° ve 90° açı yapan doğrultularda kulak oluşacağı, $\Delta R > 0$ olduğunda ise kulakların sacın hadde yönü ile 45° açı yapan doğrultularında oluşacağı anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan düzlemsel özellikler ile kalınlık özellikleri arasında ilişki genellikle normal plastik anizotropi (\bar{R}) ile ifade edilmektedir. Burada “normal” terimi sac düzlemine dik doğrultudaki özellikler anlamında kullanılmaktadır. Normal anizotropi katsayısı ortalama anizotropi olarak da bilinmektedir. Bu ifade 45° doğrultusunun 2 ile çarpılmasının sebebi sac üzerinde aynı doğrultunun orjine göre simetriğinin 135° ’de olmasıdır. Normal plastik anizotropi denklemi (ASTM-E517-00, 2011),

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (6.4)$$

şeklinde verilir. Bu değer 0 ile $+\infty$ arasında değerler alabilmektedir. Bu denkleme göre

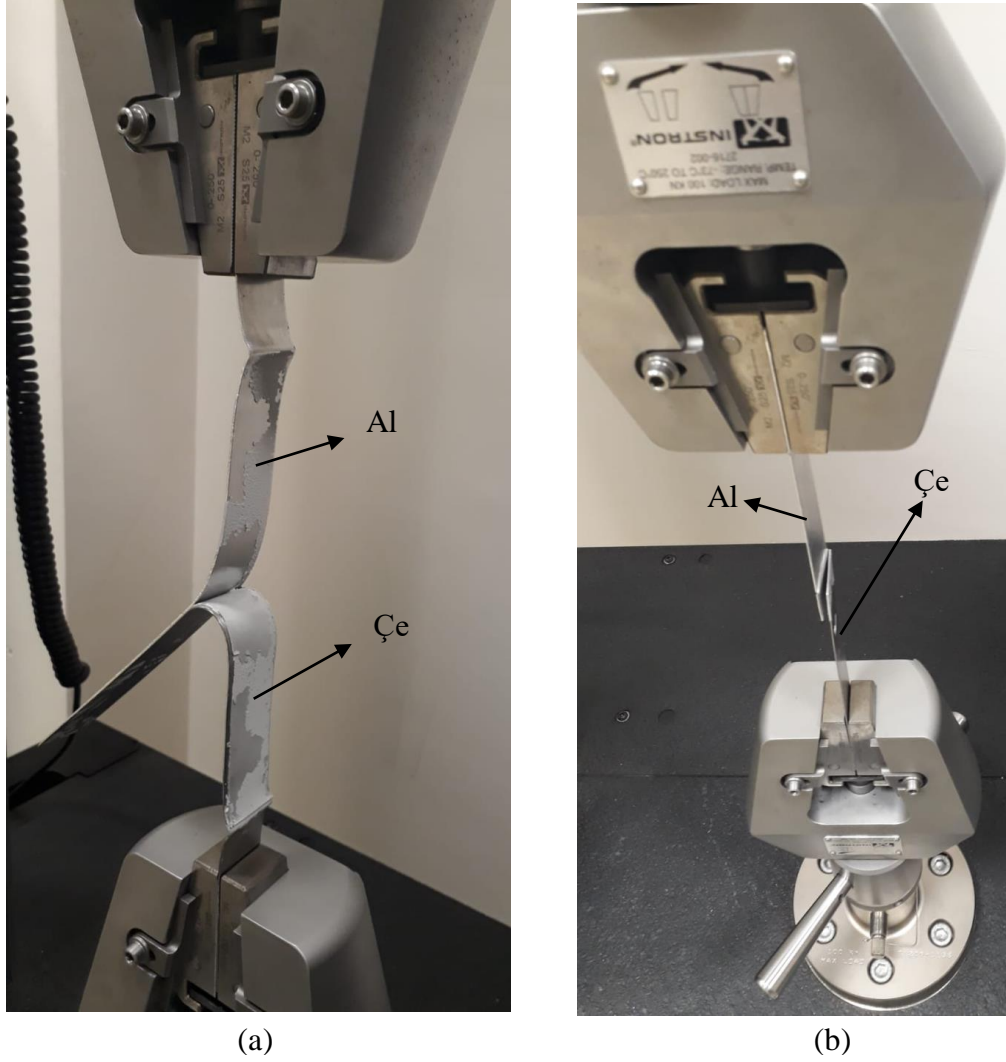
- $\bar{R} = 1$ ise malzeme izotrop kabul edilir.

- $\bar{R} \neq 1$ ise ve aynı zamanda bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan tek eksenli çekme deneyi numuneleri ile yapılan deneylerde R_0 , R_{45} , R_{90} değerleri farklılık göstermiyorsa sac metalde dikey anizotropi ve düzlemsel izotropi bulunduğu söylenir. Bir başka deyişle sac düzlemindeki şekil değişimlerinin aynı, kalınlık doğrultusundakinin ise bundan farklı olacağı anlamına gelmektedir. Bu durumda derin çekme işleminde kulaklanma olmayacaktır.
- $\bar{R} \neq 1$ ise ve aynı zamanda R_0 , R_{45} , R_{90} değişiyorsa sac metalde dikey ve düzlemsel anizotropi vardır. Bir başka deyişle sac metal her yönde farklı özellik gösterecek ve dolayısı ile derin çekme işleminde parçada kulaklanma görülecektir.

6.3. T-soyulma ve Bindirme bağlantısı testleri

Yapıştırma işleminde yapıştırıcının soyulma ve kayma yönündeki dayanımının belirlenmesi için çift katmanlı saclara T-soyulma ve bindirme bağlantısı testi yapılmıştır. Numuneler Bölüm 4.5'te verilen ölçülere uygun şekilde hazırlanmıştır. Deneylerin tamamı çekme testi için kullanılan Instron çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. T-soyulma testleri (Şekil 6.9a) 254 mm/dk hızla, bindirme bağlantısı testleri (Şekil 6.9b) ise 1.3 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir.

T-soyulma testi sırasında hasara uğrayan yapıştırıcı her iki yüzeyde parçalar halinde kalmıştır. Ancak bindirme bağlantısı testlerinde hasara uğrayan yapıştırıcı tek bir yüzey üzerinde kalmıştır. Diğer yüzeyde yapıştırıcı kalıntısı gözlenmemiştir.



Şekil 6.9. Yapıştırma bağlantısı için mukavemet testleri (a) T-soyulma testi (b) Bindirme bağlantısı testi

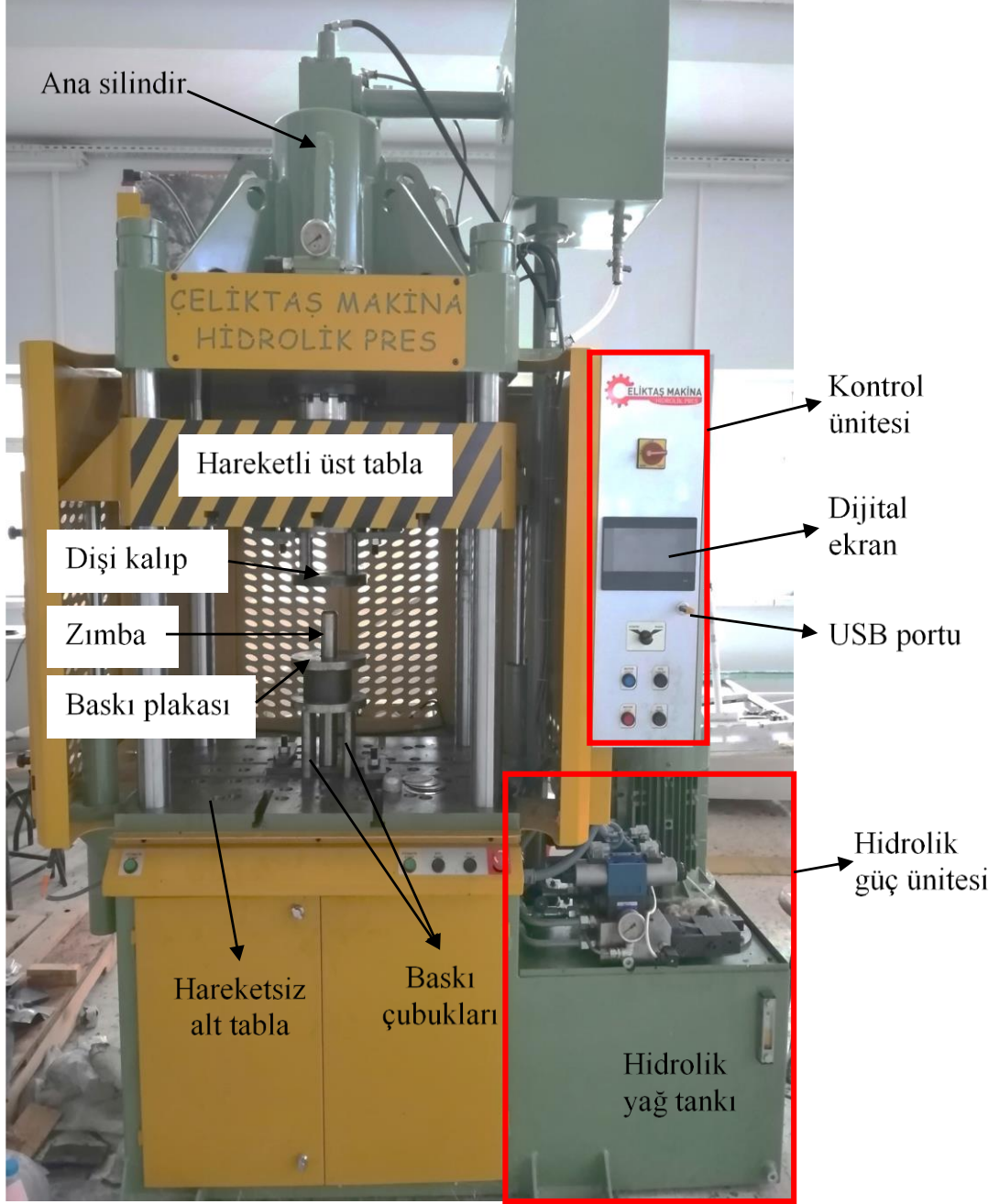
6.4. Şekillendirme İşlemlerinde Kullanılan Hidrolik Pres

Çalışmada düzlem dışı gerdirme testi ve derin çekme operasyonları 800 kN yük kapasiteli Çeliktaş marka çift etkili hidrolik preste gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.10). Pres maksimum çalışma basıncı 300 bar olup, ana silindir çapı 200 mm, baskı silindiri ise 150 mm çapa sahiptir. Ana silindirin strok mesafesi 400 mm, baskı silindirinin stroğu ise 200 mm'dir. Baskı silindirleri ile en çok 400 kN yük uygulanabilmektedir. Hidrolik presin tabla ölçüleri, 900x650 mm²'dir.

Çift etkili preslerde derin çekme işlemi yapılırken, dişi kalıp hareketli üst tablaya bağlanır. Baskı plakası zımba üzerine çıkarılarak sac metal yerleştirilir. Dişi kalıp, üst hareketli tablanın aşağı inmesiyle baskı plakası üzerine kapanır. Bu sayede sac metal baskı plakası ile dişi kalıp arasına sıkışır. Ana silindirde basıncın artması ile birlikte baskı silindirindeki basınç yenilir ve üst hareketli tabla aşağı doğru iner. Bu esnada

dişi kalıp sacı zımba üzerine bastırarak zımba etrafına sıvar. Presleme bittiğinde üst hareketli tabla yukarı kalkar. Baskı çubukları alt hareketsiz tabla üzerindeki deliklerden çıkarak işlem başındaki konumuna gelir.

Kullanılan hidrolik preste derin çekme işlemi dijital ekran üzerinden kontrol edilmektedir. Baskı silindiri hidrolik basıncı, ana silindir basıncı, piston sınır konumları ekran üzerinden kontrol edilmektedir. Ana silindirdeki ve baskı silindirindeki basınç piston hareketi ile ilişkili kayıt edilmekte ve grafik ekrandan izlenmektedir. Ayrıca hidrolik prese, imalat sonrasında eklenen servo motorlu oransal basınç kontrol valfi ile pot basıncı işlem sırasında otomatik olarak değiştirilebilmektedir. Bu sayede derin çekme işlemlerinde saca değişken baskı plakası kuvveti uygulanabilmektedir. Baskı plakası kuvveti kontrol paneli üzerinden mesafeye bağlı olarak girilmektedir. İşlem başladığında sistem otomatik olarak önceden girilmiş mesafe bilgisine karşılık gelen baskı plakası kuvvetini baskı silindirine iletmektedir. Derin çekme işlemi sisteme eklenen servo valf sayesinde değişken baskı plakası kuvveti altında gerçekleştirilebilmektedir.

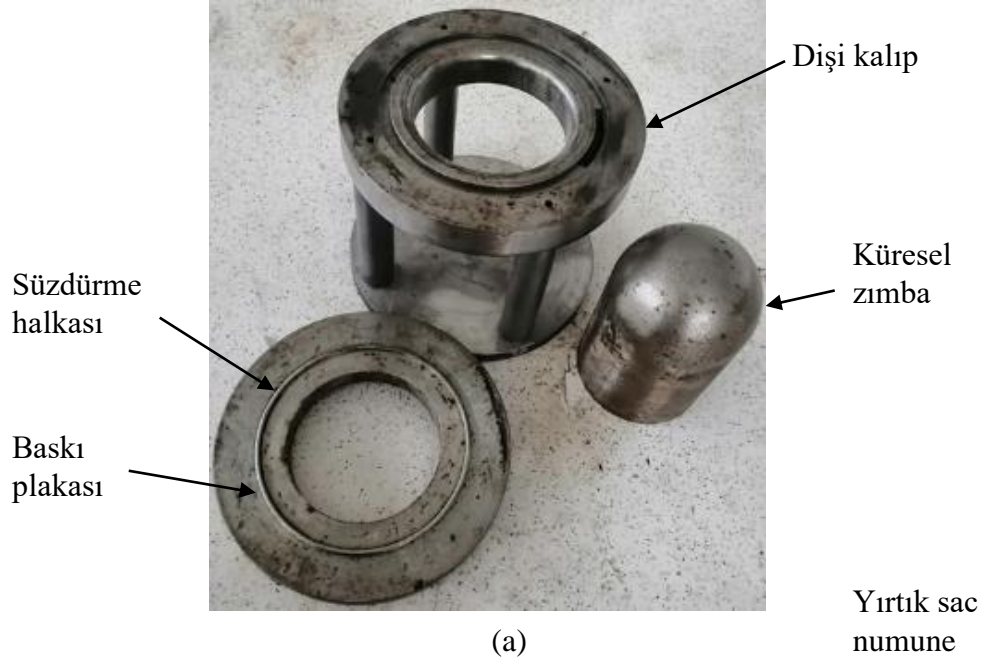


Şekil 6.10. Derin çekme ve düzlem dışı gerdirme testlerinde kullanılan 800 kN yüklem kapasiteli çift etkili hidrolik pres

6.5. Düzlem Dışı Gerdirme Testleri

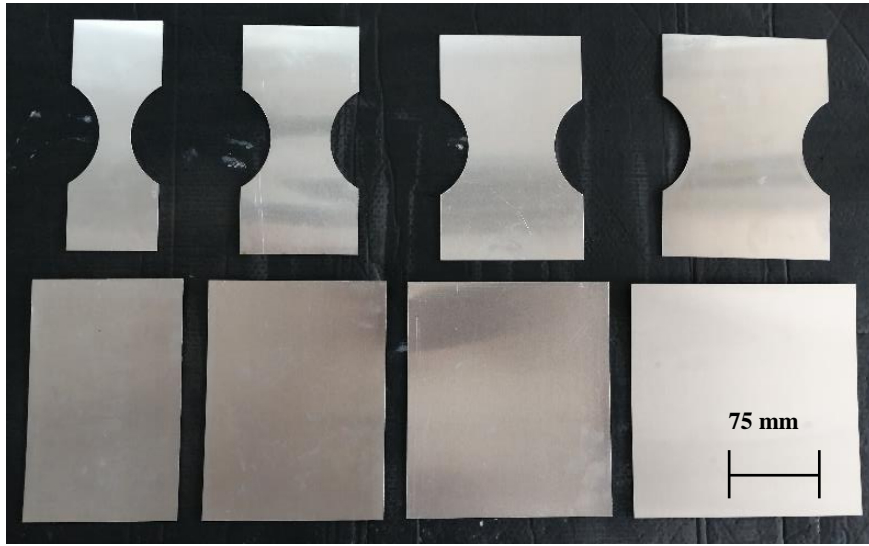
Bu çalışmada tek ve çift katmanlı sacların ŞSD'lerinin belirlenmesinde düzlem dışı gerdirme testi kullanılmıştır. Bu test, numune ölçülerinin büyük olması ve dolayısı ile deformasyon sonrası ölçüm alınmasının kolay olması sebebiyle seçilmiştir. Düzlem dışı gerdirme testi kalıpları Şekil 3.32'de verilen ölçülere göre imal edilmiştir. Üretilen düzlem dışı gerdirme testi kalıbı Şekil 6.11a'da görülmektedir. Baskı plakası üzerinde

bulunan süzdürme halkası, sacı kalıp ile baskı plakası arasına sıkıştırarak malzemenin kalıp içerisine akmasını önlemektedir. Kalıbın kolonlu yapılmasının sebebi işlem sırasında deformasyonun anlık olarak takip edilmesini sağlamaktır. Çift katmanlı sacların deformasyonu sırasında yırtılma başladığında, işlem durdurularak parçadaki yırtığın büyümesi önlenir (Şekil 6.11b-c). Aşırı deformasyon ölçüm hatalarına sebep olmaktadır.

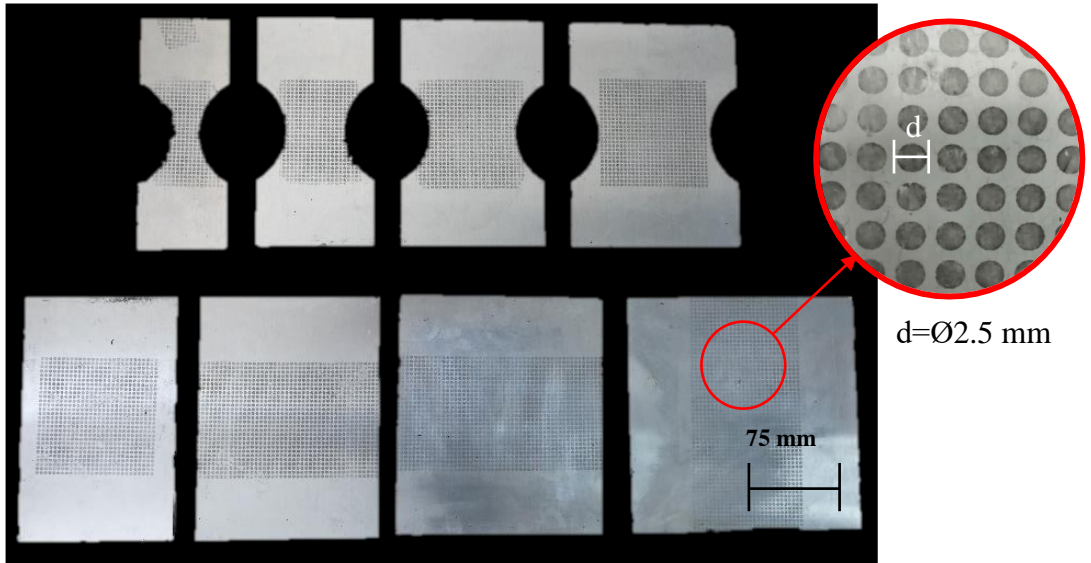


Şekil 6.11. Düzlem dışı gerdirme testi (a) Kalıp elemanları (b) Kalıp kapalı durum (c) Yırtılan numune

Düzlem dışı gerdirme testi numuneleri Şekil 3.33'te verilen ölçülere uygun olarak lazer ile kesilmiştir (Şekil 6.12a). Kesilen sac numunelerin yüzeylerine her biri 2.5 mm çapında ve aralarında 1'er mm boşluk bırakılarak daireler elektrokimyasal dağlama yöntemi ile markalanmıştır (Şekil 6.12b). Çift katmanlı saclarda ise kesilen numunelerin bir yüzeyleri yapıştırıcının bulaşmaması için naylon koruyucu film tabakası ile kaplanmıştır. Sacların diğer yüzeylerine yapıştırıcı uygulanarak kurumaya bırakılmıştır. Film tabakası soyularak yüzeylere daire baskılı tek ve çift katmanlı saclar elektrokimyasal yöntemle markalanmıştır.



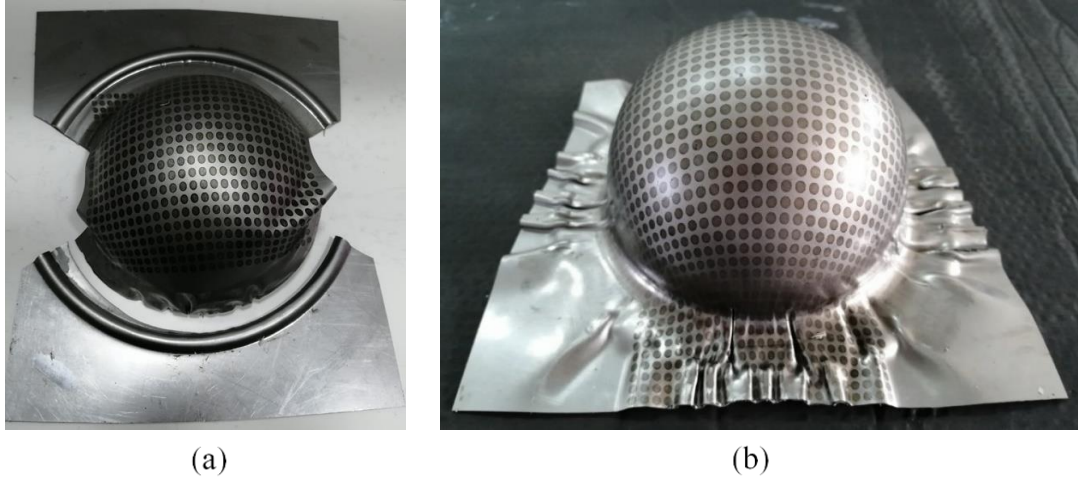
(a)



(b)

Şekil 6.12. ŞSD için hazırlanan numuneler (a) Lazer kesim sonrası (b) Daire ile markalanmış sac numune yüzeyleri

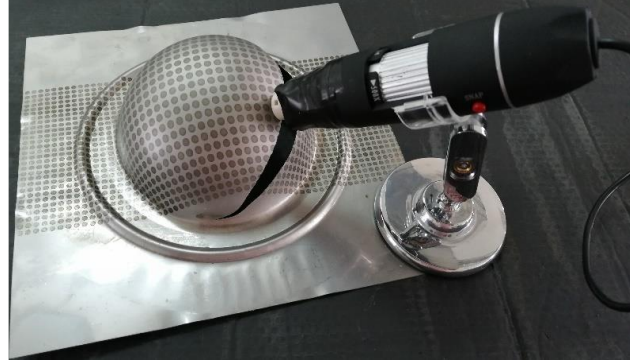
Hazırlanan tek ve çift katmanlı numuneler 80 ton kapasiteli çift etkili hidrolik preste yırtılana kadar deforme edilmiştir. Sacın kalıp ile baskı plakasından sıyrılmaması için baskı plakasına tek saclar için yaklaşık 90 kN, çift katmanlı saclara ise 180 kN kuvvet uygulanmıştır. Yapılan deneylerde tek Al ve Çe saclara daha fazla baskı plakası kuvveti uygulanması durumunda sacların kalıp üzerinde bulunan süzdürme halkası tarafından kesildiği görülmüştür (Şekil 6.13a). Çift katmanlı saclarda ise aynı baskı kuvveti uygulanması durumunda sacın kalıp ile baskı plakası arasından kaydığı gözlenmiştir. Şekil 6.13b’de yetersiz baskı plakası kuvveti sonucunda flanş bölgesinde kırışma olmuş bir sac numune görülmektedir. Hidrolik preste yetersiz baskı plakası kuvvetinde kare numunelerde bu şekilde kırışma olurken dikdörtgen numunelerde kalıbın içine akma (ilerleme) görülmektedir. Bu sebeple çift katmanlı saclara daha yüksek baskı kuvveti (180 kN) uygulanmıştır.



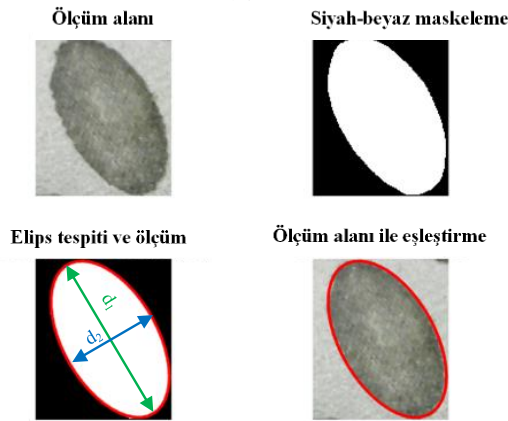
Şekil 6.13. Düzlem dışı gerdirme testinde hasara uğramış numuneler (a) Sacın kalıp tarafından kesilmesi (b) Yetersiz baskı plakası kuvveti sebebiyle flanş bölgesinde kırışma oluşmuş numune

Çalışmada tek katman DC01 ve EN AW 5754 H111 saclarının ve hazırlanan çift katmanlı (DC01-EN AW 5754) sacların ŞSD’leri çizilmiştir. Numuneler deformasyona uğradıktan sonra sac yüzeylerinde oluşan şekil değiştirmeler bir kamera entegreli bir görüntü işleme yazılımı ile ölçülmüştür (Şekil 6.14a). Kamerayla, sac yüzeyinde hasarın olduğu bölgedeki deforme olmuş her bir elips fotoğraflanmaktadır. Daha sonra bu fotoğraflar MATLAB® yazılımı ile hazırlanmış EK 4’te kodları verilmiş görüntü işleme programına aktarılarak elipslerin büyük ve küçük eksenlerinin ölçülmesi sağlanmıştır (Şekil 6.14b). Programda sac üzerine dağlanan daireler deformasyon öncesinde kamera ile görüntülenmektedir. Bu görüntüler üzerinden referans dairenin çapı ölçülerek program kalibre edilmektedir.

Deformasyon sonrasında eksen uzunlukları ölçülen elipsler referans daire ölçüsüne oranlanarak gerçek şekil değiştirme değerleri bulunmaktadır. Burada elipslerin görüntülenirken her defasında aynı mesafeden ölçülmesi ölçümlerin tutarlılığı açısından önem kazanmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 6.14. Büyük ve küçük şekil değiştirmelerin belirlenmesi (a) Kamera ile fotoğraflama (b) Fotoğraflardan ölçüm alınması

Plastik deformasyon sonrası sac numuneler Şekil 6.15’de gösterilmiştir. Deforme edilen her bir numunenin hasar bölgesi incelenerek ölçüm yapılacak noktalar belirlenmiştir. Belirlenen noktalar tek tek fotoğraflanarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda büyük (ϵ_1) ve küçük (ϵ_2) gerçek şekil değiştirmeler (6.5) ve (6.6) eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Sac numune deformasyona uğradıktan sonra üzerindeki dairesel markalamalar elips şeklini almaktadır. Bu elipslerin uzun eksenleri ölçülerek büyük gerçek şekil değiştirme, kısa eksenleri ölçülerek küçük gerçek şekil değiştirme miktarları hesaplanmıştır. Plastik şekillendirme işlemlerinde gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirmeler kullanılmaktadır. Mühendislik gerilme ve mühendislik şekil değiştirmeleri kesit değişimini dikkate almadan sabit bir kesit üzerinden hesaplanırken, gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirmede anlık kesit değişimi

dikkate alınır. Bu sebeple gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirmeler daha doğru sonuç vermektedir. (6.5) ve (6.6) eşitliklerinde deformasyon öncesi dairenin çapı d_0 , deformasyon sonrası oluşan elipsin büyük eksenini d_1 , küçük eksenini ise d_2 ile ifade edilmiştir. Buna göre asal şekil değiştirmeler aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanmaktadır (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002).

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (6.6)$$



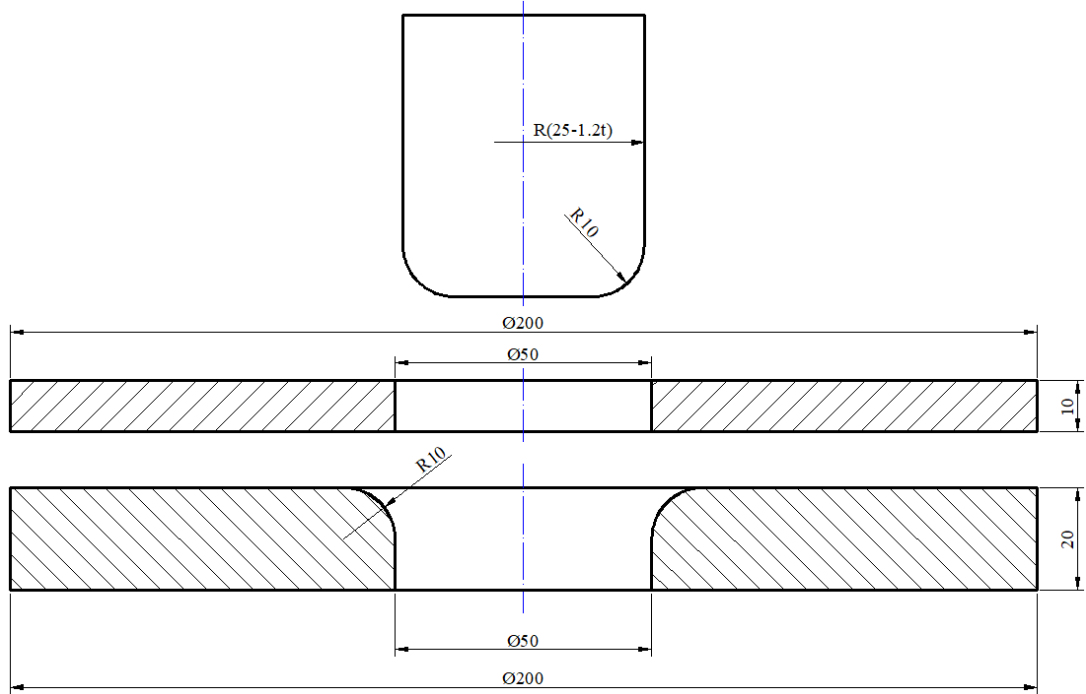
şekil 6.15. Deformasyon sonrası alüminyum sac numuneler

6.6. Derin Çekme İşlemi

Sac metalleri derin çekme işleminde çekilebilecekleri maksimum bir numune çapı (Limit çekme oranı, LÇO) ve optimum baskı plakası kuvveti vardır. Maksimum numune çapının çekildiği baskı plakası kuvvetinin üstündeki değerlerde ürün yırtılırken, bu kuvvetin altındaki değerlerde üründe kırışmalar meydana gelmektedir. Bu sınırlar içerisinde kalan bölge sac metaller için işlem penceresi (process window) olarak adlandırılmaktadır.

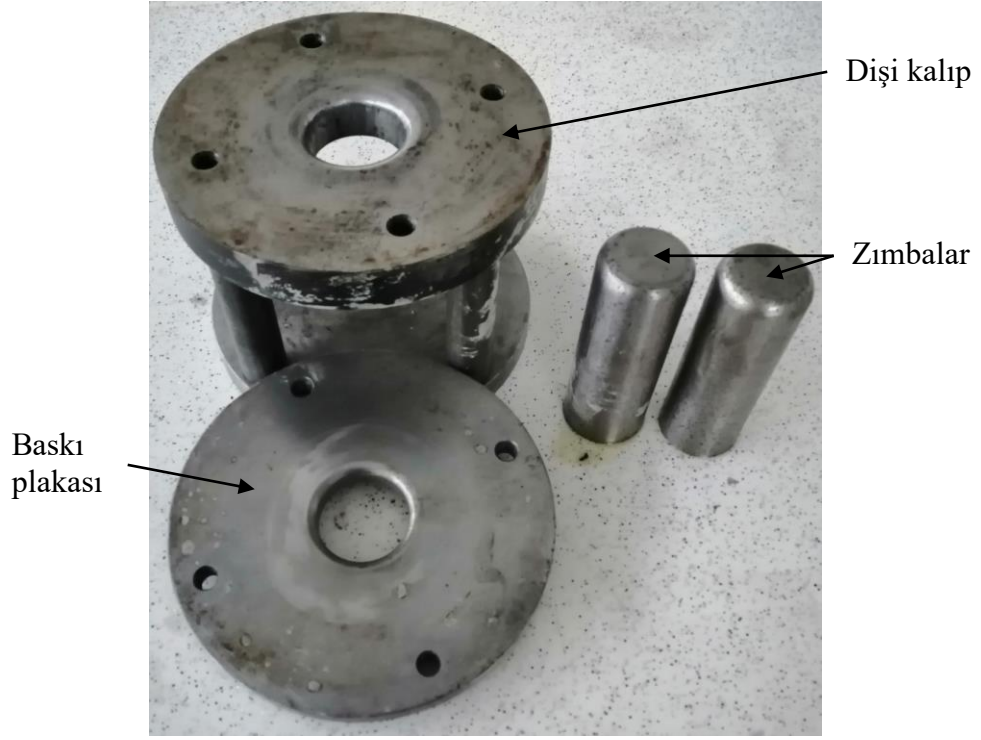
Çalışmada işlem penceresini belirlemek için kullanılan derin çekme kalıbı elemanlarının ölçüleri şekil 6.16'da verilmiştir. Dişi kalıpta parçanın derin çekileceği

çap 50 mm olarak belirlenmiştir. Zımba çapı ise kalıp boşluğu sac kalınlığının (t) 1.2 katı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sebeple tek saclarda ve çift katmanlı saclarda farklı zımba ölçüleri kullanılmıştır. Çelik sac ($t=0.5$ mm) için 48.8 mm, alüminyum sac ($t=1$ mm) için 47.6 mm, çift katmanlı saclar ($t=1.7$ mm) için 45.9 mm çapındaki zımbalar kullanılmıştır.



Şekil 6.16. Derin çekme işleminde kullanılan kalıp elemanlarının ölçüleri

Tek ve çift katmanlı sacların işlem penceresini oluşturmak için farklı çaplardaki ($\text{Ø}80$, $\text{Ø}85$, $\text{Ø}90$, $\text{Ø}95$, $\text{Ø}100$) numunelere farklı baskı plakası kuvvetleri (10.6-88.3 kN) altında derin çekme işlemi yapılmıştır. Derin çekme işlemi öncelikle küçük çaplı numunelere düşük baskı plakası kuvveti uygulayarak tekrarlı olarak yapılmıştır. Çekme işlemi sırasında sıkışma, yanlış merkezleme gibi durumlar sebebiyle oluşan hasarlı numuneler dikkate alınmamıştır. Derin çekme işleminin gerçekleştirildiği kalıp elemanları Şekil 6.17a'da verilmiştir. Dişi kalıp presin üst hareketli tablasına bağlanmış, zımba ise alt hareketsiz tablaya bağlanmıştır. Pot çubukları üzerindeki baskı plakasına yerleştirilmiş sac numune Şekil 6.17b'de görülmektedir. Derin çekme işlemi sonrasında sac numune Şekil 6.17c'de görüldüğü gibi zımba üzerinde kupa şeklini almaktadır.



(a)



(b)

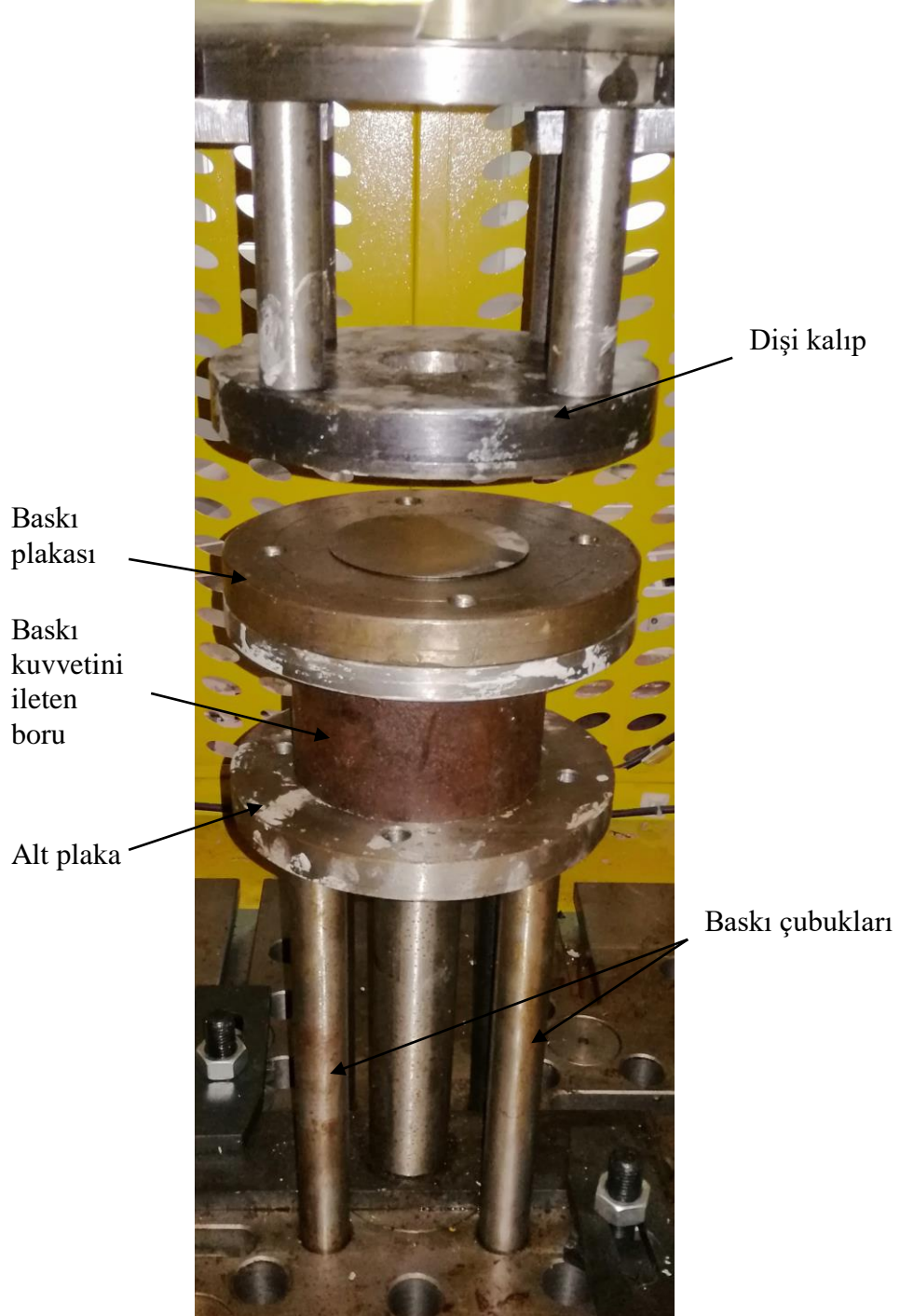


(c)

Şekil 6.17. Derin çekme işlemi (a) Kalıp elemanları (b) İşlem öncesi (c) İşlem sonrası

Baskı çubuklarının baskı plakasına temasının dengesiz olması işlem sırasında karşılaşılan en büyük problemlerden biridir. Baskı çubuklarının boylarındaki küçük farklar baskı kuvvetinin dengesiz olarak dağılmasına sebep olmaktadır. Özellikle baskı plakası kalınlığının az olduğu durumlarda bu durum parçada yırtılma hasarı oluşturmaktadır. Bu sebeple baskı çubuklarının üstüne bir plaka ve bu plaka ile baskı

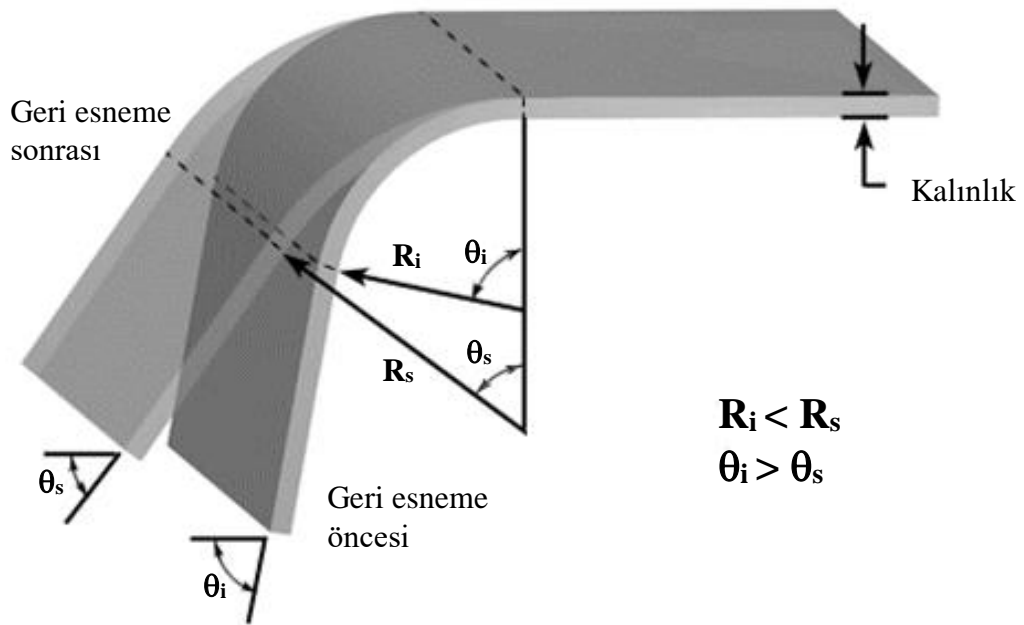
plakası arasına, baskı çubuklarının dizildiği dairesel eksenden daha küçük çaplı bir boru konulmuştur (Şekil 6.18). Bu sayede baskı kuvvetinin akış yönü değiştirilmiştir. Bu sayede baskı çubuklarının baskı plakasına temas ederek kuvvetin temas bölgelerinde yoğunlaşmasının önüne geçilmiştir. İki plaka arasına konulan boru ile kuvvetin baskı plakasına dairesel bir temas alanı ile iletilmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.18. Baskı plakası kuvvetinin baskı çubuklarından baskı plakasına iletimi

6.7. V-Bükme İşlemi

Tüm malzemeler bir elastisite modülüne sahip olduğundan dolayı, plastik deformasyondan sonra yükün kaldırılması durumunda malzemedeki elastik şekil değiştirme kaybolur. Bükme işlemlerinde şekil değişiminin elastik kısmının geri dönerek kaybolması geri esneme olarak adlandırılır. Şekil 6.19’da görüldüğü üzere bükme açısı (θ) geri esnemenin azalırken, bükme yarıçapı (R) artmaktadır. Geri esneme sadece sac metallerin bükülmesinde değil aynı zamanda çubuklar, profillerin ve tellerin bükülmesinde de kesit geometrisine bağlı olmaksızın gerçekleşmektedir.



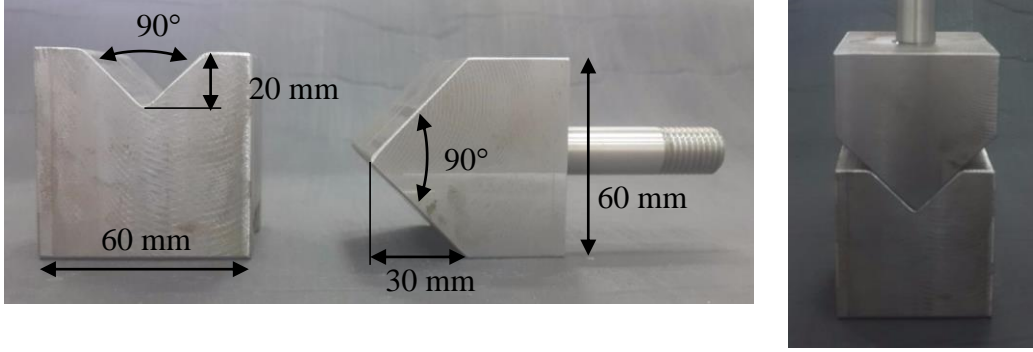
Şekil 6.19. Bükme işleminde geri esneme durumu (CustomPartNet, 2009)

V-Bükme testleri sonucunda geri esneme oranı yüklü durumdaki bükme açısı (θ_i) ile yük kaldırıldıktan sonraki bükme açısının (θ_s) farkı dikkate alınarak (6.7) eşitliğindeki gibi hesaplanabilir.

$$\% \text{ Geri Esneme Oranı} = \frac{(\theta_s - \theta_i)}{\theta_i} \cdot 100 \quad (6.7)$$

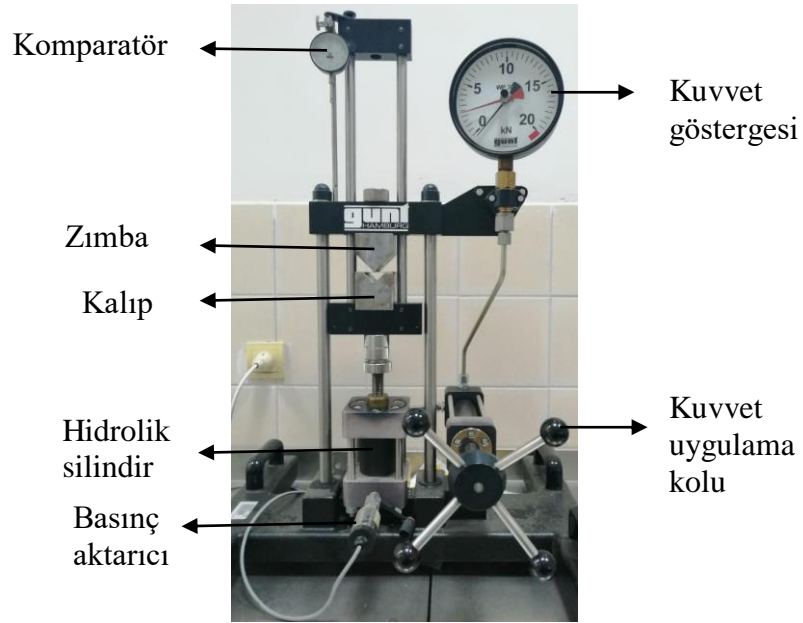
Çalışmada kullanılan tekil ve çift katmanlı sacların geri esneme durumları V-bükme testi ile belirlenmiştir. V-bükme testi için Şekil 6.20’deki bükme kalıbı tasarlanmıştır. Kalıp ile maksimum 60x60 mm² boyutlarındaki sac metallere 90°

bükülebilmektedir. Bükme testine tabi tutulan numune boyutları $60 \times 25 \text{ mm}^2$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.20. İmal edilen V-bükme kalıbı

Hazırlanan kalıp 20 kN yükleme kapasiteli GUNT deney düzeneğine bağlanarak bükme işlemleri yapılmıştır (Şekil 6.21). Bu deney düzeneğine bağlanan farklı modüller ile eğilme, çekme, basma, Erichsen testleri gibi farklı testler yapılabilmektedir. Deney düzeneğinde zımbanın ilerleme miktarı komparatör ile 0.01 mm hassasiyetle kontrol edilmiştir. Kuvvet kolunun döndürülmesi ile hidrolik silindir yukarı doğru hareket ederek kalıbı zımbaya bastırmaktadır. İşlem süresince oluşan kuvvet kuvvet göstergesi üzerinden takip edilirken aynı zamanda basınç aktarıcı ile bilgisayara aktarılmaktadır.



Şekil 6.21. Bükme işleminin yapıldığı üniversal test düzeneği

V-bükme deneylerinde tek ve çift katmanlı sacların bükme açılarına bağlı olarak geri esneme durumları incelenmiştir. Bu kapsamda 3 farklı büküm açısı belirlenerek tekrarlı deneyler yapılmıştır. Büküm açısı deney esnasında hassas olarak kontrol edilemediğinden bunun yerine zımbanın ilerlemesi esas alınmış ve bu ilerlemeye denk gelen bükme açıları belirlenmiştir. Zımbanın 6.5, 13 ve 19.5 mm ilerlemesi durumunda sac metalleri sırasıyla 37.6°, 67.3° ve 90°'lik büküm açısına ulaşmaktadırlar. Sac metal büküldükten sonra yük kaldırılmadan ve yük kaldırıldıktan sonra fotoğraflanmaktadır. Fotoğraflar bir CAD programına aktarılarak yüklü halde ve yük kaldırıldıktan sonraki büküm açıları belirlenmektedir.

6.8. Sertlik Ölçümü

Malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmede en sık kullanılan test sertlik testidir. Sertlik genellikle yüzeyin batmaya karşı direnci olarak tanımlansa da; çizilmeye veya aşınmaya karşı direnç olarak da tanımlanabilir (Kalpakjian ve Schmid, 2007). Sertlik, batıcı ucun geometrisine ve uygulanan yüke bağlı olarak değişebileceğinden dolayı temel bir özellik değildir. Malzemelerin sertliklerini ölçmek amacıyla farklı geometrilere ve farklı malzemeler kullanılarak çeşitli sertlik ölçme teknikleri geliştirilmiştir. Brinell, Vickers, Rockwell ve Knoop sertlik ölçüm yöntemleri en yaygın standart sertlik ölçüm metotlarıdır. Ek3'te bu sertlik ölçüm yöntemlerinin özellikleri bir tablo halinde verilmiştir. Sertlik testleri genellikle laboratuvardaki özel deney cihazları ile gerçekleştirilmekle birlikte, taşınabilir sertlik ölçüm cihazları da mevcuttur. Taşınabilir sertlik ölçüm cihazları genellikle tüm sertlik ölçüm yöntemlerini uygulayabilmekle birlikte; delik içi, dişli çark dişi gibi özel geometrilere ölçüm alabilecek şekilde olabilir.

Ölçüm yönteminden bağımsız olarak daha geniş ve derin bir iz daha doğru bir sertlik sonucu vermektedir. Bununla birlikte, iz çok derinse veya parça çok ince ise sertlik ölçüm izi parçanın diğer tarafına geçerek hatalı ölçümlere sebep olacaktır. Bu sebeple sertliği ölçülecek numunenin kalınlığı değerlendirilerek uygun sertlik ölçüm yönteminin seçilmesi gerekmektedir. Buradan hareketle bu çalışmada sac metallerin sertliğini belirlemek için mikro Vickers testi kullanılmıştır.

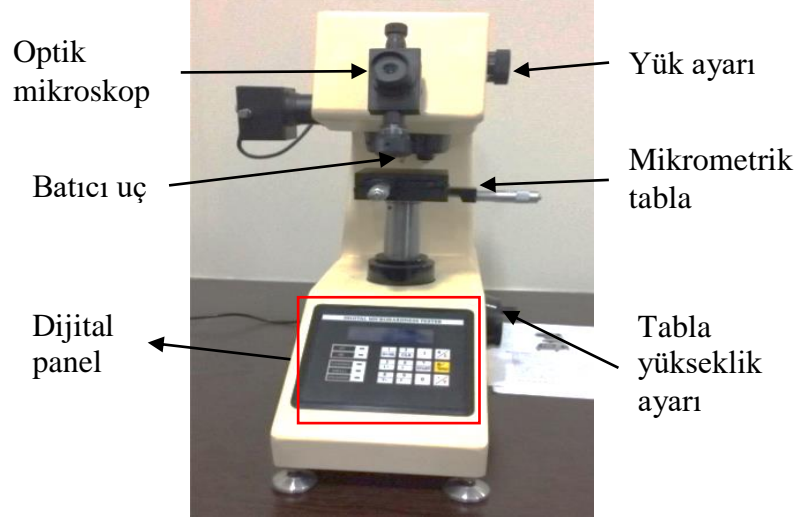
Vickers testinde piramit şekilli elmas bir batıcı uç 1 ile 120 kg arasında yükler uygulanarak kullanılır. Bu sertlik ölçüm yönteminin daha düşük yükler ile yapılan türü ise mikro Vickers testi olarak adlandırılır. Kullanılan batıcı uç ve sertlik hesaplama

yöntemi aynı olmakla birlikte tek fark uygulanan yüklerdir. Micro Vickers sertlik ölçümünde 1 ile 1000 g arası yükler uygulanmaktadır. Bu sertlik ölçüm yöntemi ile ince sac metaller ve ufak parçaların sertliği ölçülebilmektedir. Micro Vickers sertlik değeri (6.8) eşitliğindeki formül ile hesaplanmaktadır (ASTM E384-05a, 2005).

$$HV = \frac{1.854P}{L^2} \quad (6.8)$$

Burada P uygulanan yük, L ise izin köşegen uzunluğudur. Batıcı ucun yüzeyde bıraktığı iz genellikle 0.5 mm'den küçük bir paralel kenardır. Vickers testi uygulanan yükten bağımsız olarak aynı sertlik değerini verir. Dolayısı ile çok düşük ve yüksek sertlikteki malzemelerin sertliğini ölçmede uygundur. Vickers sertlik ölçüm yönteminin daha düşük yükler ile yapılan türü ise mikro Vickers testi olarak adlandırılır. Kullanılan batıcı uç ve sertlik hesaplama yöntemi aynı olmakla birlikte tek fark uygulanan yüklerdir. Micro Vickers sertlik ölçümünde 100 g ile 1 kg arası yükler uygulanmaktadır. Bu sertlik ölçüm yöntemi ile ince sac metaller ve ufak parçaların sertliği ölçülebilmektedir.

Bu tez kapsamında derin çekilmiş ürünlerin sertlik ölçümleri OMÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki HV1000B Mikro Vickers sertlik ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.22). Cihaz ile numune üzerine 0.098, 0.245, 0.49, 0.9807, 1.961, 2.942, 4.903 ve 9.807 N'luk yükler uygulanarak sertlik ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Cihaz üzerinde ayarlanan yük numune yüzeyine 15 s boyunca uygulanmaktadır. Oluşan iz yine cihaz üzerinde bulunan bir mikroskop ile ölçülerek cihazın dijital ekranına giriş yapılmakta ve sertlik değeri cihaz tarafından hesaplanmaktadır.



Şekil 6.22. Mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı

7. DENEYSEL BULGULAR

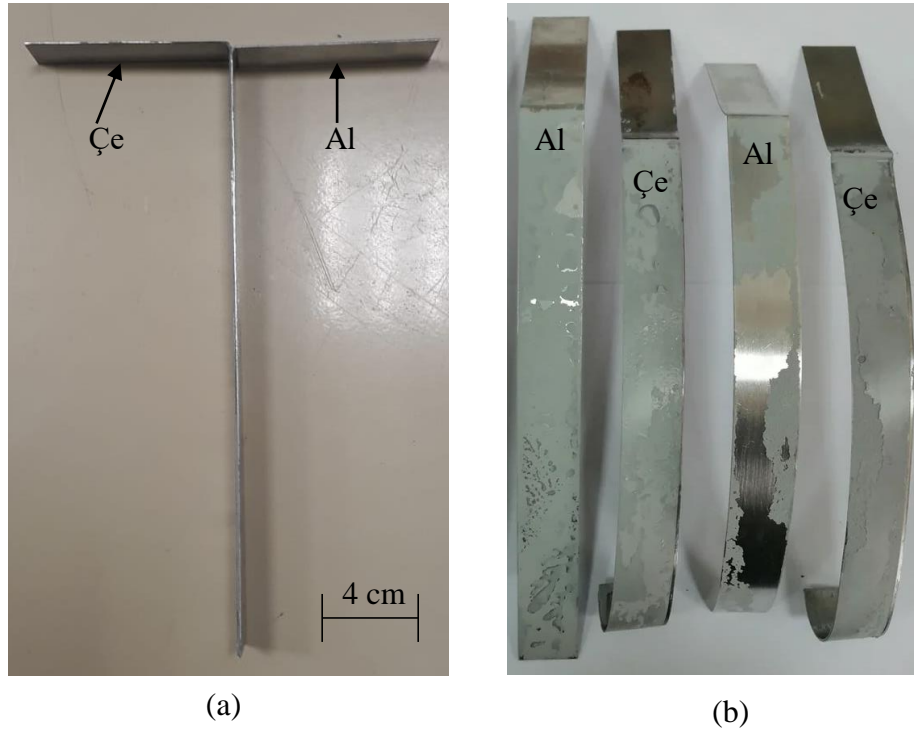
Bu bölümde, bir önceki bölümde açıklanan yöntemler kullanılarak yapılan deneysel bulgular ve sonuçlar verilmiştir.

7.1. Çift Katmanlı Sacın Yapışma Özelliklerinin Belirlenmesi

Çift katmanlı sacın üretim sonrası yapışma mekanizmasını belirlemeye çalışılmıştır. Yapıştırıcının yapışmaya dik eksendeki dayanımı T-soyulma testi, yapışma yüzeyi boyunca dayanımı ise tek bindirme bağlantısı testi ile belirlenmiştir.

7.1.1. T-Soyulma Testi

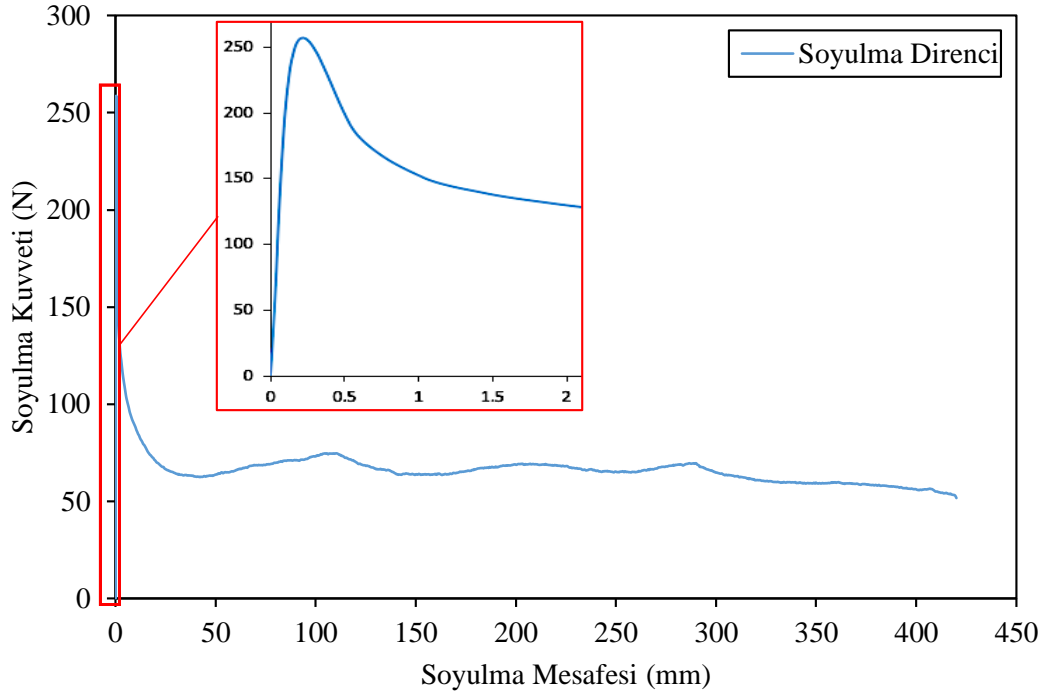
T-soyulma testi için numunelerin hazırlanması ve testin yapılışı Bölüm 4.5.1’de detaylı olarak anlatılmıştır. Buna göre hazırlanan T-soyulma testi numunesi Şekil 7.1a’de görülmektedir. Test sonrasında numunelerin her iki yüzeyinde yapıştırıcı kaldığı görülmektedir (Şekil 7.1b). Yapışkanın homojen olarak yüzeyden ayrılmaması ve her iki yüzeyde de yapıştırıcı olması yapışmanın başarılı olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle yapıştırıcı yüzeylere iyi tutunduğu için hasar katılmış yapıştırıcı üzerinde gerçekleşmiş ve hasara uğrayan yapıştırıcı her iki yüzeyde kalmıştır.



Şekil 7.1. T-soyulma testi (a) öncesi ve (b) sonrası çift katmanlı numune durumları

T-soyulma testi sonucunda çift katmanlı Çe/Al sacı soyulma kuvveti – soyulma mesafesi grafiği Şekil 7.2’de verilmiştir. Grafikte soyulmanın yaklaşık 450 mm

boyunca devam ettiği görülmektedir. Çe/Al çift katmanlı sac soyulma testi için çatlak kuvveti yaklaşık 250 N, çatlak mesafesi ise 0.168 mm olarak ölçülmüştür. Eşitlik (4.1)'e göre soyulma direnci 10 N/mm olarak hesaplanmıştır. Soyulma mesafesinin ilk %30'luk kısmı ve son %15'lik kısmı çıkarıldıktan sonra hesaplanan ortalama soyulma kuvveti 64.92 N olarak hesaplanmıştır.



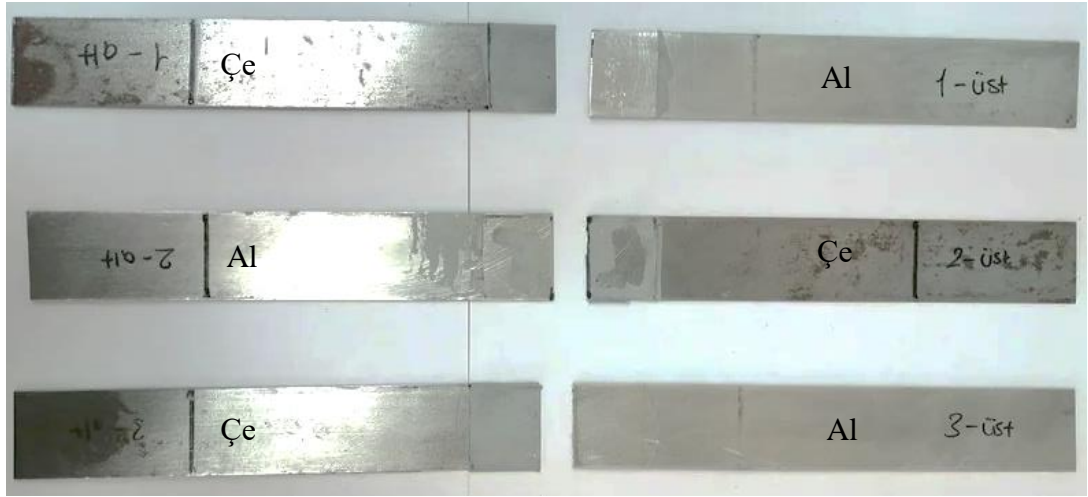
Şekil 7.2. Çe/Al çift katmanlı sacların soyulma kuvveti-soyulma mesafesi grafiği

7.1.2. Tek Bindirme Bağlantısı Testi

Tek bindirme bağlantısı testi numuneleri Bölüm 4.5.2'de belirtildiği gibi hazırlanmış (Şekil 7.3a) ve 100 kN yük kapasiteli Instron çekme-basma cihazı ile test edilmiştir. Test sonrası numunelerin görüntüsü Şekil 7.3b'de verilmiştir. Test sonucunda hasar uğrayan numunelerde yapıştırıcı Al yüzeyinden tamamen sökülmiş ve Çe sac üzerinde kalmıştır. Bu durum yapıştırıcının kayma yönünde düşük dayanıma sahip olduğunu ve çelik sac yüzeyine daha iyi tutunduğunu göstermektedir.



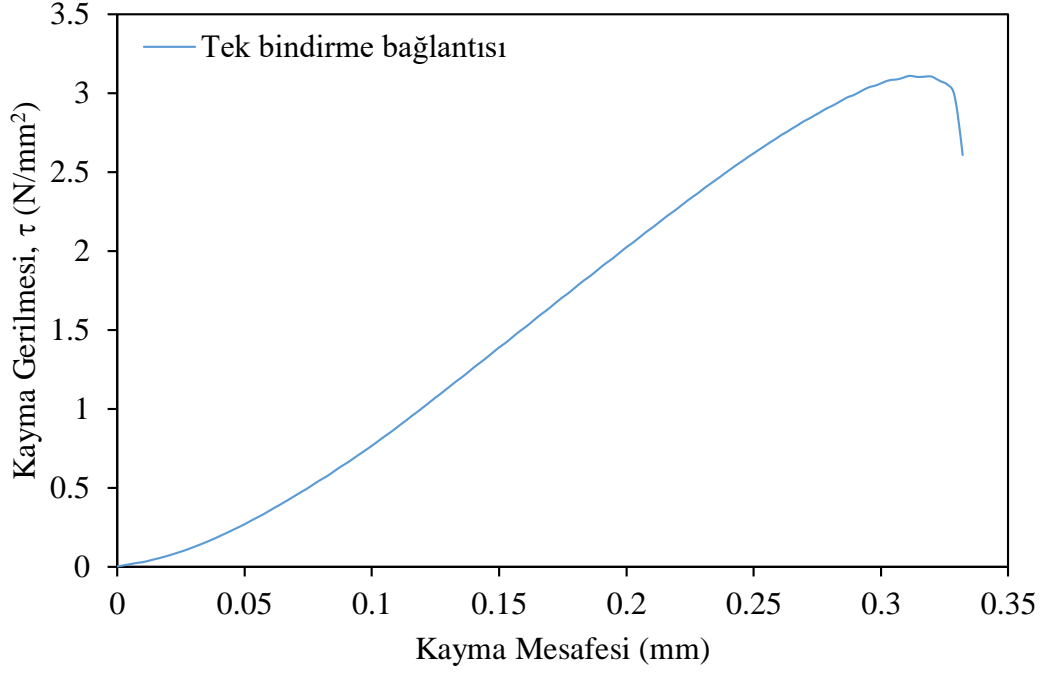
(a)



(b)

Şekil 7.3. Bindirme bağlantısı test numuneleri (a) Test öncesi (b) Test sonrası

Test sonucunda kayma gerilmesi–kayma mesafesi grafiği Şekil 7.4’te verilmiştir. Kayma gerilmesi, ölçülen kuvvet katmanlar arası yapışma alanına bölünerek elde edilmektedir. Buna göre test sonucunda maksimum kayma gerilmesi (τ_{max}) 3.1 MPa olarak hesaplanmıştır. Maksimum kayma gerilmesi bu değere 0.32 mm kayma mesafesinde ulaşmıştır. Devamında ise kayma gerilmesi hızla düşerek yapışma yüzeyi tamamen ayrılmıştır.



Şekil 7.4. Tek bindirme bağlantısı testinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma mesafesi grafiği

Yapıştırıcının kayma doğrultusundaki dayanımı (kayma gerilmesi) tek bindirme bağlantısı testi, düzleme dik doğrultudaki dayanımı ise T-soyulma testi ile deneysel olarak belirlenmiştir. Deneyleerde bulunan Bölüm 8’de yapıştırıcının sonlu elemanlar ile modellenenilmesi için kullanılacaktır.

7.2. Tek Sacların Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramları

Çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri sonucunda kopan numuneler Şekil 7.5’te verilmiştir. Numunelerin tümü boyun vererek sünek kırılma göstermiş ve yükleme yönü ile 45° açı yapacak şekilde kopmuşlardır.



(a)

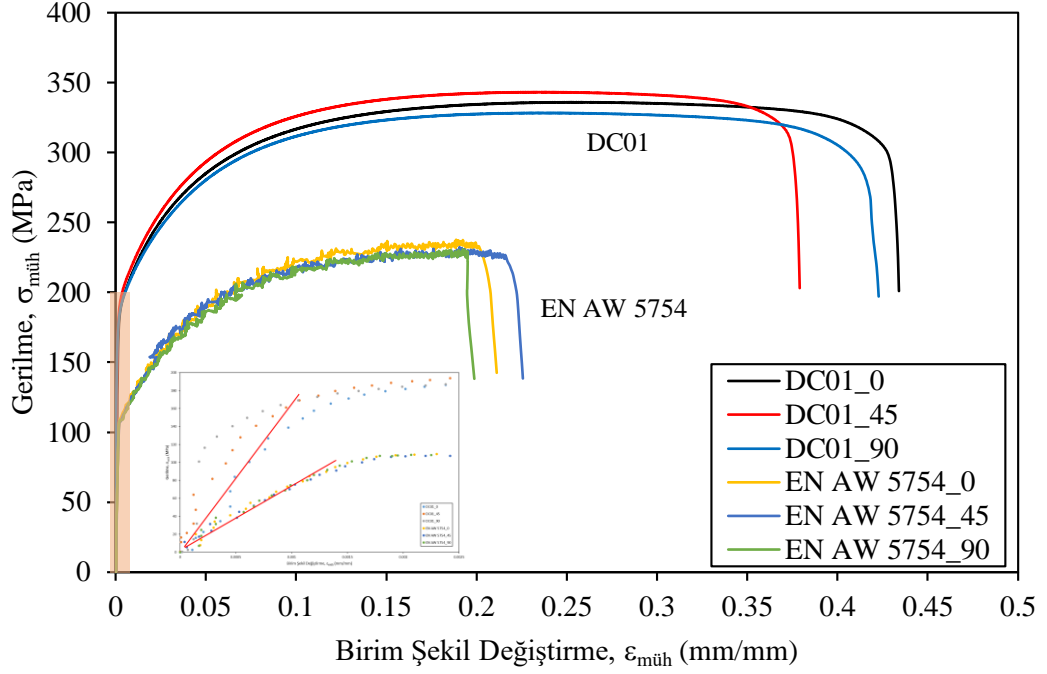


(b)

Şekil 7.5. Çekme testinde kopan numuneler (a) Düşük karbonlu çelik sac (DC01) (b) Al-Mg alaşımı sac (EN AW 5754)

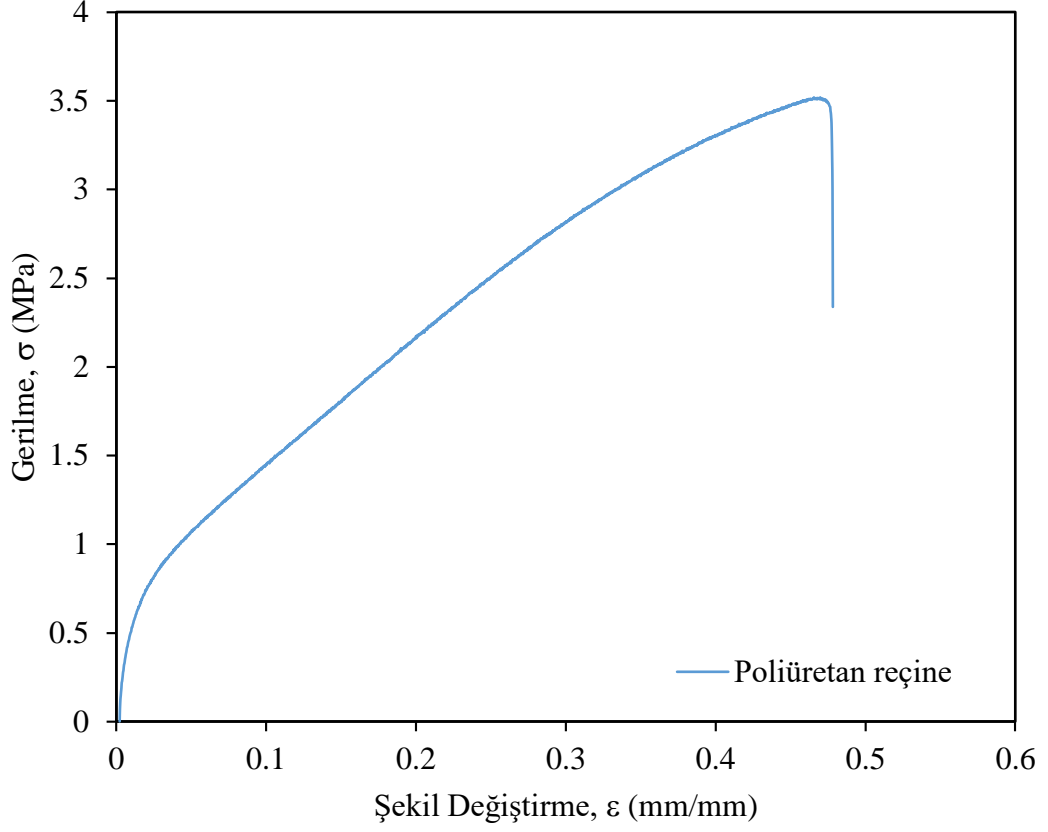
Tek saclara yapılan çekme testleri sonucu gerilme – şekil değiştirme eğrileri Şekil 7.6a’da verilmiştir. Çekme testi yapılan malzemelerin tümünde belirgin bir akma sınırı gözlenmemiştir. Çekme eğrilerinin elastik bölgeleri yakınlştırıldığında lineer bölge açıkça görülmektedir. Malzemelerin belirgin akma göstermemesi durumunda, genelde %0.2'lik uzamaya ($\epsilon = 0.002$) karşılık gelen çekme gerilmesi değeri akma sınırı veya akma dayanımı olarak alınır (Off-set kuralı). Diğer taraftan derin çekmeye uygun olan bu tür çeliklerin belirgin akma sınırı göstermesi özellikle istenmez. Çünkü derin çekme işlemi sonrasında malzeme üzerinde portakal kabuğu (orange peel) görünümünde izler oluşmaktadır (J. Rosler, H. Harders vd., 2007).

Çekme testleri sonucunda DC01 çelik sacın ortalama %40.6 uzama gösterdiği görülürken EN AW 6764 alüminyum sacın ortalama %20.4 uzadığı görülmektedir. Çelik sacın ortalama akma dayanımı 204 MPa değerlerinde iken alüminyum sacın akma dayanımı 120 MPa değerlerindedir. Çekme dayanımları karşılaştırıldığında ise çelik sacın ortalama 335.9 MPa’ya çıktığı görülürken, alüminyum alaşımı sacın 237.5 MPa’ya dayandığı görülmektedir.



Şekil 7.6. Çalışmada kullanılan sac metallere ait mühendislik (deneysel) çekme eğrileri

Çalışmada sacları yapıştırma için kullanılan poliüretan yapıştırıcının mekanik özellikleri belirlemek amacıyla çekme testi yapılmıştır. Daha önceden çekme testi standardına göre hazırlanmış kalıplara dökülen sıvı poliüretan yapıştırıcı 2 gün boyunca katılaşımaya bırakılmıştır. Daha sonra kalıplardan sökülen numunelerin çapakları temizlenerek çekme testine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda gerilme-şekil değişimi grafiği Şekil 7.7’de verilmiştir. Katılaştıran yapıştırıcının yaklaşık %50 uzama miktarına ulaştığı görülmüştür. Bu %50’lik uzama miktarı yapıştırılacak olan sac malzemelerin uzama miktarından daha fazladır. Dolayısı ile şekillendirme işlemlerinde yapıştırıcı sac metaller ile birlikte şekil alacağı ve sac metalden önce hasara uğramadığı görülmüştür.



Şekil 7.7. Sacları yapıştırmada kullanılan poliüretan yapıştırıcının gerilme – şekil değiştirme grafiği

Mühendislik gerilmesi (7.1) eşitliğinde görüldüğü üzere çekme kuvvetinin (F) başlangıç kesitine (A_0) bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Mühendislik şekil değiştirmesi ise (7.2) eşitliğinde görüldüğü üzere uzama miktarının (Δl) ilk boy (l_0) bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (7.1)$$

$$\epsilon_{müh} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_s}{l_0} - 1 \quad (7.2)$$

Gerçek gerilme hesaplanırken malzeme hacminin sabit kaldığı kabul edilir. Bu şekilde gerçek kesit alanı (A_s), ilk kesit alanı (A_0), ilk boy (l_0) ve son boy (l_s) cinsinden ifade edilebilir. Eşitlik düzenlendiğinde gerçek gerilme mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekil değiştirmesi cinsinden yazılarak (7.3) eşitliğindeki gibi hesaplanabilir. Diğer taraftan gerçek şekil değiştirme uzama hıza bağlı olarak anlık değişmektedir. Dolayısı ile her bir birim uzama miktarında ilk boy başlangıç

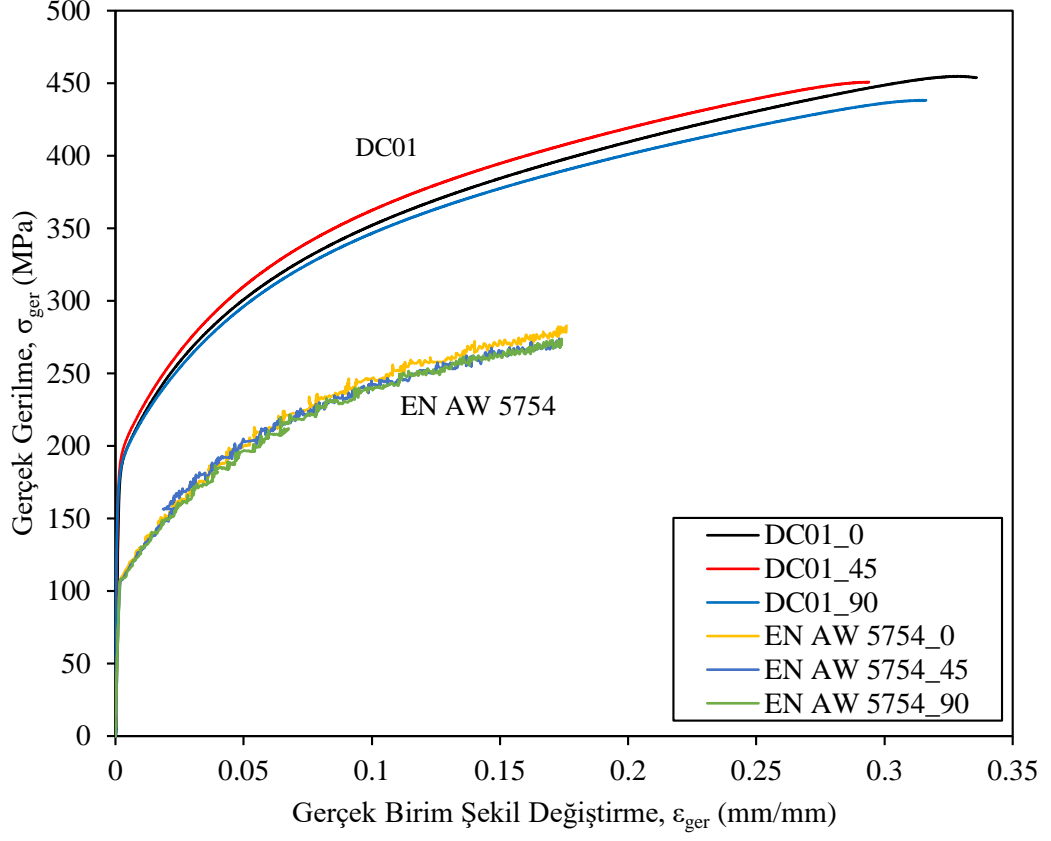
değerinden farklı olmaktadır. Anlık olarak hesaplanan bu şekil değiştirmeler toplanarak gerçek şekil değiştirme (7.4) eşitliği gibi elde edilmektedir. Bu şekilde sonlu sayıda toplam integral ile kolaylıkla ifade edilebilmektedir. Bu durumda gerçek şekil değiştirme (7.5) eşitliğinde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{ger} = \frac{F}{A_s} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l_s}{l_0} = \sigma_{müh} \cdot (1 + \varepsilon_{müh}) \quad (7.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} + \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2} \dots + \frac{\Delta l}{l_n} = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta l}{l_n} \quad (7.4)$$

$$\varepsilon_{ger} = \int_{l_0}^{l_s} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_s}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (7.5)$$

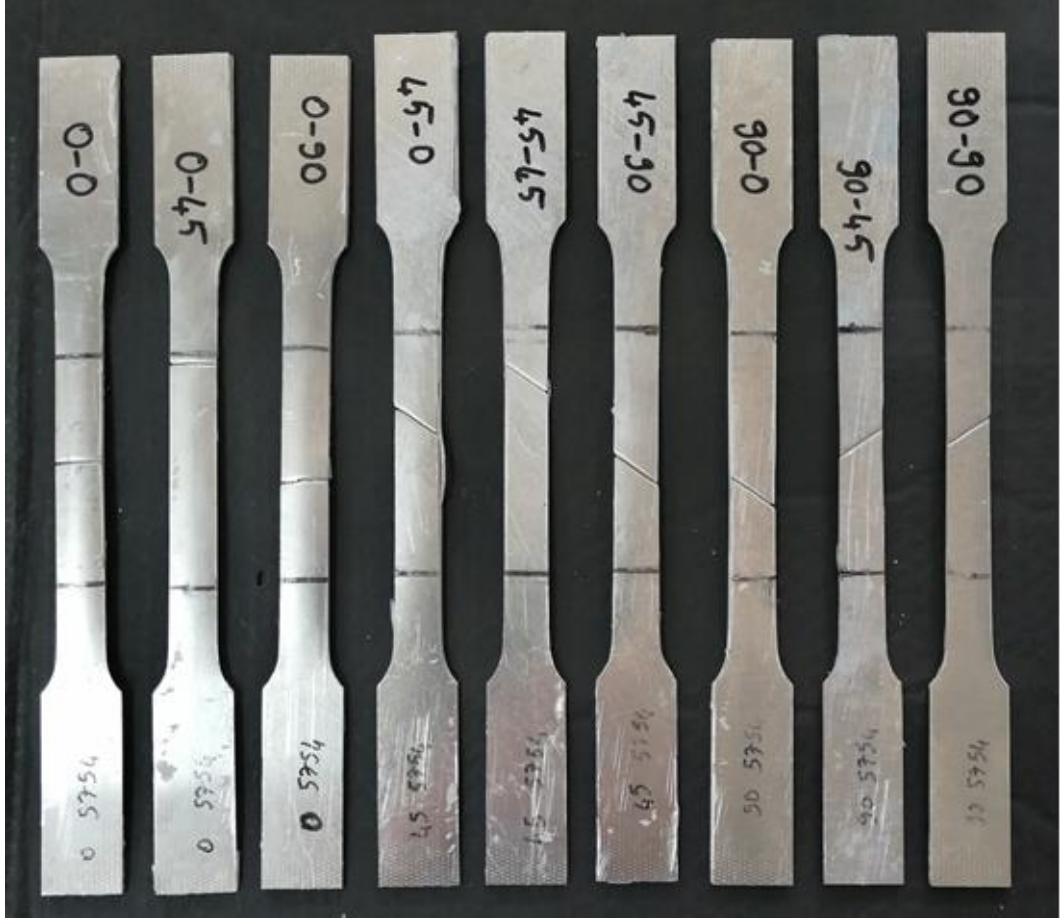
Gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrileri hesaplanırken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta bu eğrilerin maksimum mühendislik gerilmesine karşılık gelen şekil değiştirme değerine kadar hesaplanır. Malzemeye maksimum kuvvetin uygulandığı bu gerilme değerinden (σ_c) sonra malzeme boyun vermekte ve (7.5) eşitliği artık geçerliğini yitirmektedir. Çünkü bu noktadan sonra deformasyon boyun veren bölgede daha hızlı gerçekleşmektedir. Yukarıda gösterilen hesaplamalar doğrultusunda çekme testi yapılan malzemelerin gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme eğrileri hesaplanarak Şekil 7.8’de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde malzemelerin gerçek dayanımlarının daha yüksek değerlerde olduğu ancak şekil değiştirme miktarlarının azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.8. Çalışmada kullanılan sac metallere ait gerçek gerilme – gerçek şekil değişirme eğrileri

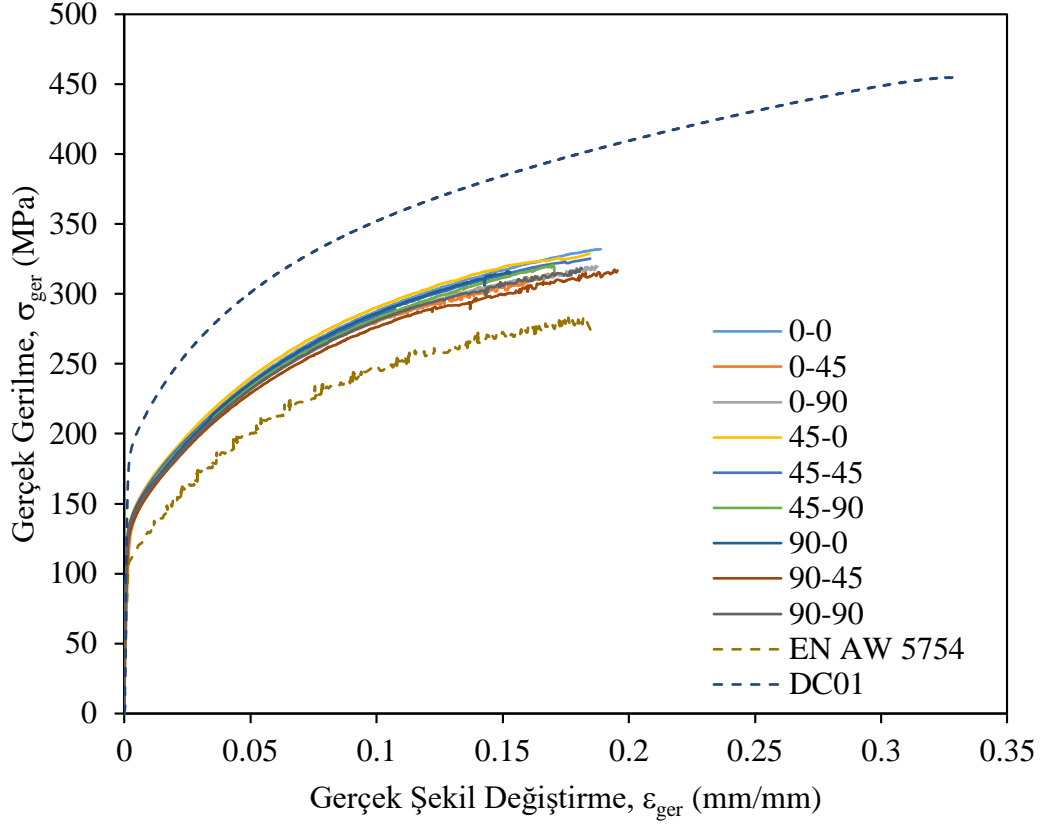
7.3. Çift Katmanlı Sacların Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramları

Çalışma kapsamında yapılan çekme deneyleri sonucunda kopan çift katmanlı numuneler Şekil 7.9’de verilmiştir. Çekme testleri çift katmanlı saclardan herhangi biri hasara uğrayana kadar devam etmiştir. Numunelerin tümünde sadece alüminyum sacın koptuğu gözlenmiştir. Deney numunelerinde hadde yönünde kesilmiş alüminyum numunelerin yükleme yönüne dik olarak koptuğu gözlenirken, diğer numunelerin yükleme yönüne göre 45° açıda koptukları gözlenmiştir.



Şekil 7.9. Çekme testinde kopan EN AW 5754 – DC01 çift katmanlı sac numuneler

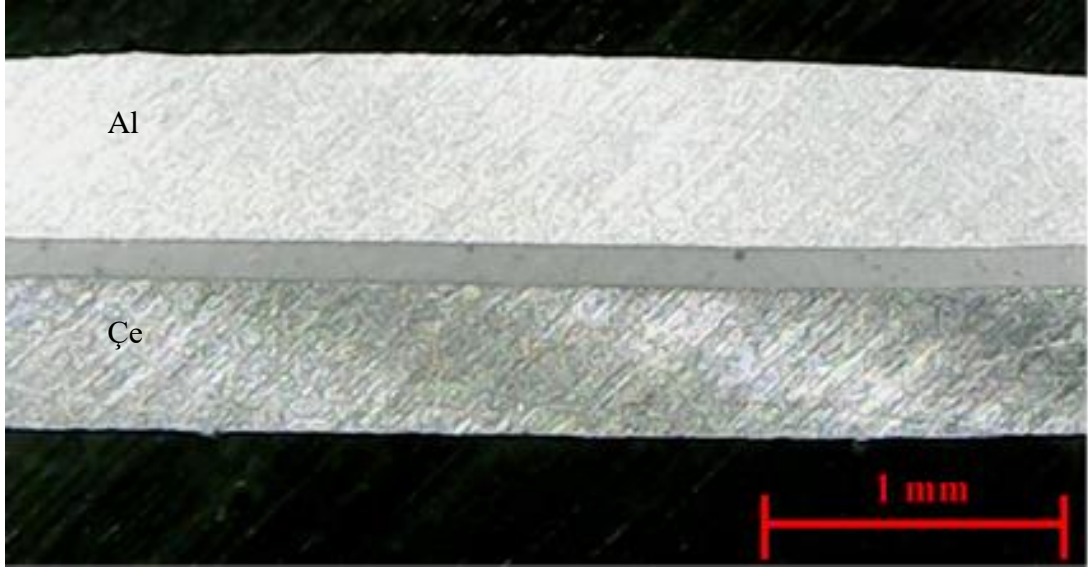
Yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafikleri Şekil 7.10’da verilmiştir. Çekme testi yapılan çift katmanlı sacların tümünde tek sacların çekme testlerindeki gibi belirgin bir akma sınırı gözlenmemiştir. Çift katmanlı sacların dayanımları beklenildiği üzere katmanlı yapıyı oluşturan sacların dayanımları arasında çıkmıştır. Çift katmanlı sacın şekil değiştirme miktarı ise alüminyum sacdan yaklaşık %20 daha fazladır. Şekil değiştirme miktarının artması saclar arası yapışmanın iyi olduğunun bir göstergesidir. Saclar arasındaki yapıştırıcı yüzeylerdeki pürüzlülükleri kapatarak çatlak oluşumunu bir miktar geciktirmektedir. Bu sayede çift katmanlı malzeme alüminyum sacdan daha fazla sünek davranır.



Şekil 7.10. EN AW 5754-DC01 saclarının çekme testlerinden elde edilen gerçek gerilme – gerçek şekil değişirme grafikleri

Şekil 7.11’de çift katmanlı çekme numunelerinden test sonrası optik mikroskop ile alınmış görüntüler verilmiştir. Alüminyum ve çelik sac katmanları arasında katılaşmış yapıştırıcı katmanın bozulmadan kaldığı görülmektedir. Kesit boyunca yapılan incelemede ara katmanda gaz boşluğu ya da yapıştırıcıda herhangi bir fiziksel kusur gözlenmemiştir. Yapıştırıcı katman kalınlığının kesit boyunca sabit olduğu görülmüştür. Ayrıca sac yüzeyleri üzerindeki pürüzlülüklerin yapıştırıcı ile doldurulması sayesinde katmanlar arasında daha önce Bölüm 4.4’te anlatılan mekanik veya şekil bağlantısı oluşur. Tek sacda malzeme çekme yükü altında belirli bir noktaya kadar homojen olarak uzamaktadır. Sac metal üzerindeki pürüz çukurları mikro çatlaklar olarak kabul edilirse, bu homojen uzama esnasında bu çatlakların giderek büyüdüğü düşünülebilir. Çekme testi esnasında yükün artması ile bir noktada kuvvet maksimum değere ulaşmakta ve malzeme boyun vermektedir. Malzemenin boyun verdiği bölgede artık uzama daha hızlı gerçekleşmektedir. Çift katmanlı sacda yapıştırma ile oluşturulan mekanik bağlantı sayesinde alüminyum katmandaki

homojen uzamanın bir süre daha devam ettiği anlaşılmaktadır. Böylelikle alüminyum katmanın erken boyun vermesi engellendiği için tek halden daha fazla uzamaktadır.



Şekil 7.11. Çekme numunesinin optik mikroskop ile alınmış kesit görüntüsü

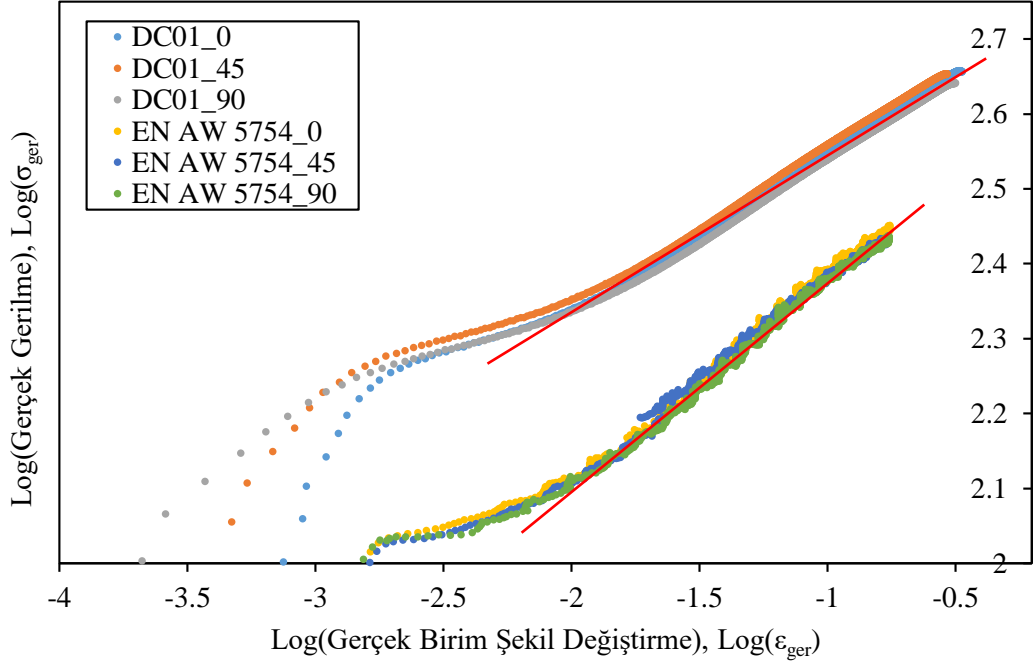
Diğer taraftan yapıştırma ile oluşturulmuş çift katmanlı sacın çelik katmandan daha az uzama miktarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum şöyle açıklanabilir; alüminyum katman çift katmanlı sacdaki zayıf katmandır. Dolayısıyla her zaman hasar alüminyum katmandan başlayacaktır. Yani çekme testi sırasında ilk olarak alüminyum katman kopacaktır. Alüminyum katmanın kopması ile birlikte anlık olarak numune üzerindeki tüm yük çelik katman üzerine etki edecektir. Çelik katman, üzerine gelen ani yüklemeyi taşımayacağından dolayı alüminyumun hemen ardından kopmaktadır.

7.4. Tek Sacların Pekleşme Üstelinin Belirlenmesi

Şekil 7.12’de çalışmada kullanılan malzemelerin gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme değerlerinin logaritması alınarak grafikleri çizdirilmiştir. Eğrilerin plastik bölgede kalan kısımlarına lineer regresyon yapılarak doğru uydurulmuş ve Tablo 7.1’deki değerler elde edilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde en yüksek pekleşme üstelinin alüminyum (EN AW 5754 H111) sacda, en düşük pekleşme üstelinin ise çelik (DC01) sacda olduğu görülmektedir. Hesaplanan mukavemet katsayıları (K) incelendiğinde en yüksek dayanıma çelik, en düşüğüne ise alüminyum sacın olduğu görülür.

Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan sac metallerin pekleşme üsteli (n) ve mukavemet katsayıları (K)

	DC01			EN AW 5754		
	0	45	90	0	45	90
K	580.4	586.6	561.9	449.9	425.1	435.7
n	0.216	0.210	0.210	0.267	0.252	0.265
R²	0.997	0.996	0.996	0.991	0.993	0.991



Şekil 7.12. Çelik ve alüminyum sacların logaritmik gerçek gerilme ve şekil değişirme eğrileri

Hollomon eşitliği genellikle tavllanmış düşük karbonlu çelikler için yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002). Gerçek gerilme–gerçek şekil değişirme eğrilerini ifade eden birçok farklı pekleşme denklemi (Swift, Ludwig, Voce vd.) mevcuttur.

Bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan simülasyonlarda malzemenin gerçek gerilme – gerçek şekil değişirme eğrisini daha doğru ifade edebilmek için Swift pekleşme denklemi kullanılmıştır. Bu çalışmada Swift pekleşme denklemi (7.6) gerçek eğrilere eğri uydurma yöntemi ile belirlenmiştir.

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (7.6)$$

Çalışmada kullanılan sac metallere ait Swift pekleşme denklemindeki katsayılar Tablo 7.2’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde alüminyum sac malzemenin pekleşme üstelinin (n), çelik sacın ise mukavemet katsayısının (K) daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca R² değerleri Hollomon eşitliğindeki değerlerin üzerindedir.

Metalik malzemelerin plastik davranışının Swift pekleşme denklemi ile daha iyi ifade edildiği görülmüştür.

Tablo 7.2. Çalışmada kullanılan sac metallerin Swift pekleşme denklemi katsayıları

	DC01			EN AW 5754		
	0	45	90	0	45	90
K	589.6	596.8	572.3	459.4	426.4	446.2
n	0.228	0.222	0.223	0.278	0.253	0.278
ϵ_0	0.0032	0.0028	0.0033	0.0017	0.0002	0.0019
R²	0.999	0.998	0.999	0.992	0.993	0.992

Yapılan çekme testleri sonucunda sac metallere ait mekanik özellikler Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3. Çekme testi sonucuna göre tek sacların ortalama mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	DC01	EN AW 5754
Elastisite modülü, E (GPa)	194.7	77.03
Akma dayanımı, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	204.3	120.2
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	335.9	237.5
Uniform uzama, ϵ (mm/mm)	0.241	0.188
Kopma uzaması, ϵ_k (mm/mm)	0.406	0.204
Pekleşme üsteli, n	0.212	0.261
Mukavemet katsayısı, K (MPa)	576.3	436.9
Kalınlık, t (mm)	0.5	1

7.5. Çift katmanlı Sacların Pekleşme Üstelinin Belirlenmesi

Pekleşme üsteli, malzemenin şekil alabilirliği hakkında kullanıcıya bilgi vermektedir. Pekleşme üsteli daha yüksek olan malzemeler daha fazla şekillendirilebilirken, düşük olan malzemeler daha az şekillendirilebilmektedir. Genellikle malzemelerin pekleşme üsteli Hollomon (1945) eşitliği (7.7) ile belirlenmektedir. Burada K mukavemet katsayısı, n ise pekleşme üstelini temsil etmektedir.

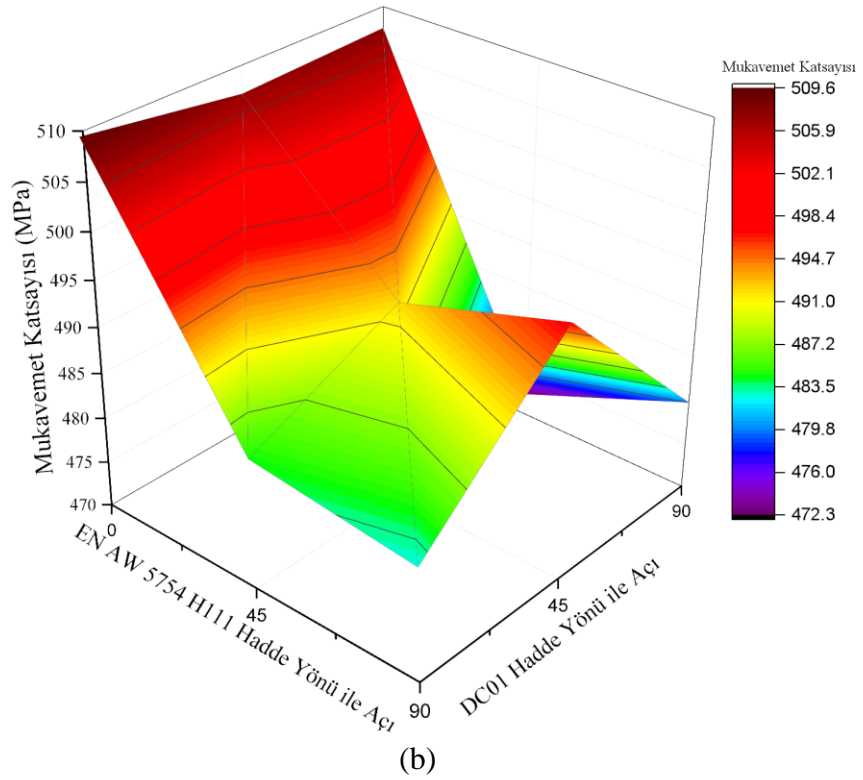
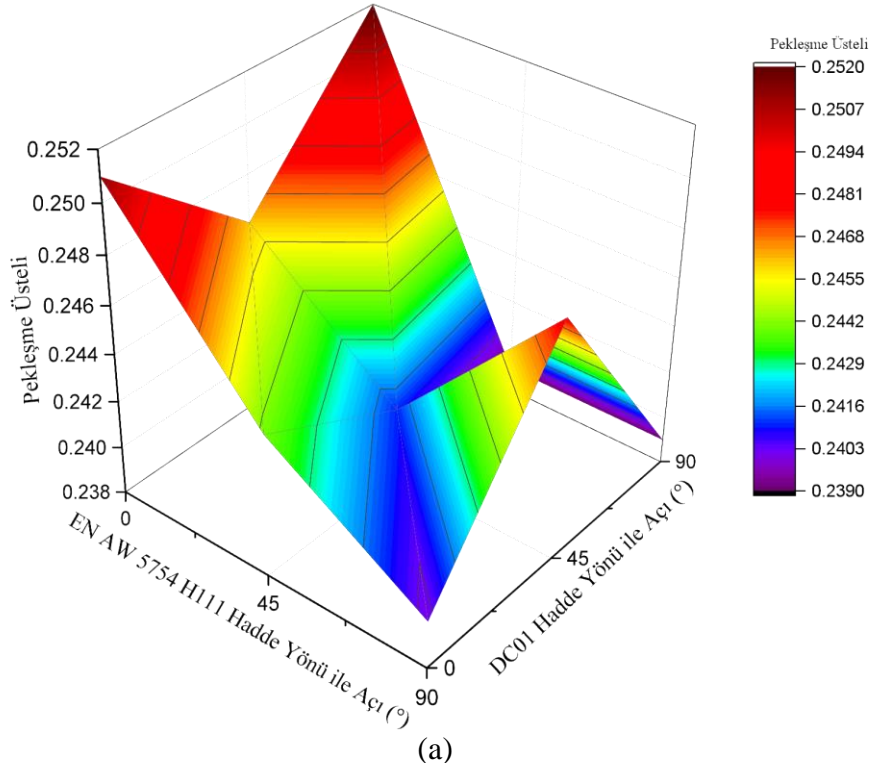
$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (7.7)$$

Bu eşitlikteki K ve n değerleri gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme eğrilerine bu denklemin uydurulması ile bulunabilir. Hollomon eşitliği akma gerilmesinden maksimum çekme dayanımına kadar olan kısımda geçerlidir. Çift katmanlı sacların çekme testleri sonuçlarından elde edilen gerçek gerilme - gerçek şekil değiştirme eğrilerinden her bir numunenin K ve n değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 7.4'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 7.13a'da n değerinin çift katmanlı sacların hadde yönüne göre değişimi verilmiştir. Şekil 7.13b'de ise K değerinin çift katmanlı sacların hadde yönüne göre değişimi verilmiştir. Grafiklerde K

ve n değerlerinin alüminyum sacın hadde yönüne göre daha fazla değiştiği görülmektedir. En yüksek değerleri alüminyum sacın hadde yönünün 0° olduğu durumda elde edilmiştir. Diğer taraftan alüminyum sac sabit tutulup çelik sac farklı yönlerde birleştirildiği zaman K ve n değerlerinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Alüminyum sacın çift katmanlı sacın mekanik özellikleri üzerinde etkili olmasının sebebi sac kalınlığının çelik sacdan daha fazla olmasıdır.

Tablo 7.4. EN AW 5754–DC01 çift katmanlı sacının hadde yönüne farklı dizimlerdeki K ve n değerleri

	0 - 0	0 - 45	0 - 90	45 - 0	45 - 45	45 - 90	90 - 0	90 - 45	90 - 90
K	509.6	507.1	507.7	484.5	491.9	472.4	482.6	497.5	479.8
n	0.251	0.246	0.252	0.244	0.241	0.239	0.240	0.248	0.239
R²	0.994	0.992	0.991	0.993	0.993	0.994	0.992	0.994	0.992



Şekil 7.13. EN AW 5754 – DC01 çift katmanlı sacların K ve n değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan çekme testleri sonucunda çift katmanlı sac ile onu oluşturan sacların mekanik özellikleri Tablo 7.5’te verilmiştir. Verilen mekanik özellikler hadde yönüne göre farklı açılarda kesilmiş numunelerin çekme testi sonuçlarından elde edilen

değerlerin ortalaması olarak bulunmuştur. Çift katmanlı sacların mekanik özelliklerinin, tek sacların mekanik özelliklerinin arasında olduğu görülmektedir.

Tablo 7.5. Çekme testi sonucunda EN AW 5754/DC01 sacı için belirlenen mekanik özellikler

Mekanik Özellikler	DC01	EN AW 5754	EN AW 5754 / DC01
Elastisite modülü, E (GPa)	194.7	77.03	99.8
Akma dayanımı, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	204.3	120.2	147.88
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	335.9	237.5	269.5
Maks. uzama, ϵ (mm/mm)	0.406	0.204	0.218
Pekleşme üsteli, n	0.212	0.261	0.244
Mukavemet katsayısı, K (MPa)	576.3	436.9	493
Kalınlık, t (mm)	0.5	1	1.6 – 1.9

Diğer taraftan çift katmanlı sac kompozit bir malzeme olarak da düşünülebilir. Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılan üç farklı model ve bu modellere göre EN AW 5754/DC01 çift katmanlı sacı için hesaplanmış elastisite modülleri Tablo 7.6’da verilmiştir. Bu modellerde $V_{Al+Çe}$, V_{Al} , $V_{Çe}$ sırasıyla çift katmanlı sacın, alüminyum sacın ve çelik sacın hacimlerini, $E_{Al+Çe}$, E_{Al} , $E_{Çe}$ ise sırasıyla çift katmanlı sacın, alüminyum sacın ve çelik sacın elastisite modüllerini göstermektedir. Önerilen modellerden 1 ve 3 numaralı model deney sonuçlarına uzak değerler verirken, 2 numaralı model %-3.3’lük bir hata oranı ile deneysel sonuçlara oldukça yakın değer vermiştir.

Tablo 7.6. Kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin tahmini için önerilmiş modeller

No	Model	Elastisite modülü (GPa)	Hata oranı
1	$E_{Al+Çe} = \frac{V_{Al}E_{Al}+V_{Çe}E_{Çe}}{V_{Al+Çe}}$ (Voigt, 1889)	116.25	% 16.4
2	$\frac{V_{Al+Çe}}{E_{Al+Çe}} = \frac{V_{Al}}{E_{Al}} + \frac{V_{Çe}}{E_{Çe}}$ (Reuß, 1929)	96.46	% - 3.3
3	$\log E_{Al+Çe} = \frac{V_{Al} \cdot \log E_{Al} + V_{Çe} \cdot \log E_{Çe}}{V_{Al+Çe}}$ (Lichtenecker, 1926)	104.92	% 5.1

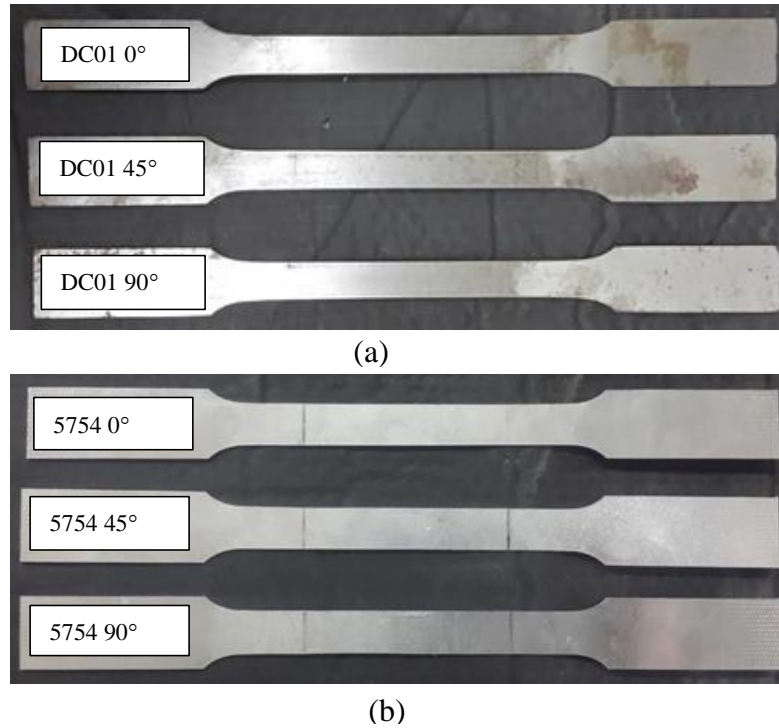
Tablo 7.7’de 2 numaralı model ile hesaplanan mekanik özellikler deneysel olarak elde edilen veriler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Teorik model, özellikleri genel olarak deneysel değerlerin daha altında hesaplamıştır. Hata oranı düşük olmasına karşın sadece maksimum uzama miktarında teorik model deneysel değerden %12 daha yüksek bir değer vermiştir.

Tablo 7.7. Çift katmanlı sacın mekanik özelliklerinin teorik değerler ile karşılaştırılması

Mekanik Özellikler	EN AW 5754 / DC01	Teorik	Hata Oranı
Elastisite modülü, E (GPa)	99.8 ± 6.5	96.5	% - 3.36
Akma dayanımı, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	147.88 ± 2.74	139.32	% - 5.79
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	269.5 ± 4.4	263.2	% - 2.35
Maks. uzama, ϵ (mm/mm)	0.218 ± 0.03	0.245	% + 12.18
Pekleşme üsteli, n	0.244 ± 0.01	0.242	% - 0.87
Mukavemet katsayısı, K (MPa)	493 ± 13.6	475.2	% - 3.52

7.6. Tek Sacların Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi

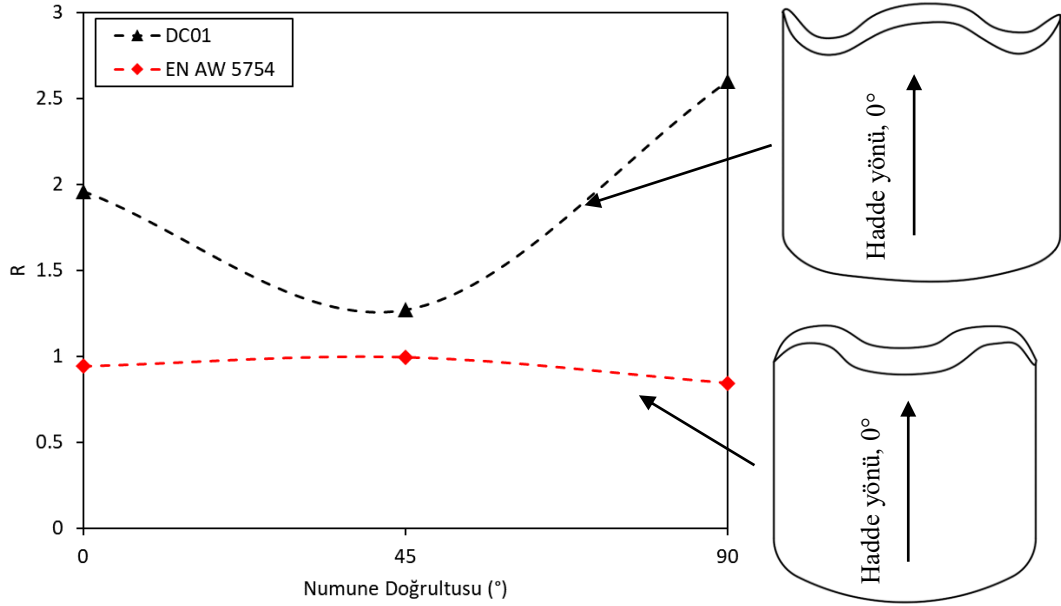
Bu çalışmada kullanılacak olan sac metallerin anizotropi katsayıları çekme testi ile tamamen koparılmadan belirlenmiştir (ASTM-E517-00, 2011). Daha önce Tablo 7.3'te verilen maksimum uzama değerlerinin %15'ine kadar çekilen numunelerin çekme testi boyun vermeden önce sonlandırılmıştır (Şekil 7.14). Test edilen numunelerin daralma, uzama ve incelme durumları 0.01 mm hassasiyetli mikrometre ile belirlenmiştir.



Şekil 7.14. Anizotropi katsayılarının belirlenmesi için boyun vermeden önce sonlandırılmış çekme testi numuneleri (a) DC01 (b) EN AW 5754

Hadde yönüne göre 0, 45 ve 90°'de belirlenen anizotropi katsayıları Şekil 7.15'te verilmiştir. Yöne bağlı anizotropi katsayıları ve grafiğin şekli derin çekme sonrasında sac metalde oluşacak olan kulaklanma hakkında bilgi vermektedir. Buna göre DC01 sacında 0 ile 90° açılarında kulaklanma görülmesi beklenmektedir (Şekil 7.15). Diğer

tarafından EN AW 5754 alüminyum alaşımı sacda anizotropi katsayılarının 3 farklı açı değeri için birbirine yakın olması bu sacda kulaklanmanın çok az miktarda olacağını göstermektedir.



Şekil 7.15. Sac metallerin hadde yönüne göre anizotropi katsayıları ve kulaklanma yönleri

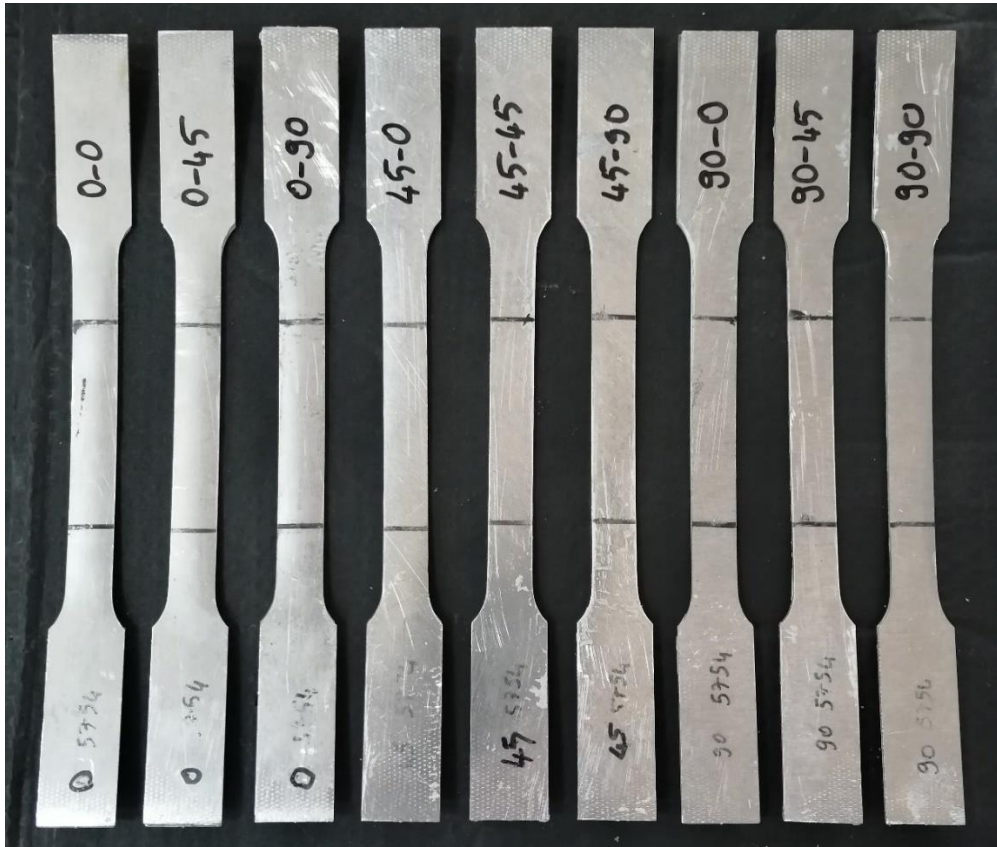
Tablo 7.8’de yöne bağlı anizotropi katsayılarına ek olarak normal ve düzlemsel anizotropi katsayıları verilmiştir. Burada $|\Delta R|$ değeri daha büyük olan sac metalde daha yüksek kulak uzunluğu görülecektir. Sayısal değerler incelendiğinde en yüksek kulak uzunluğunun düşük karbonlu çelikte (DC01) olacağı görülmektedir. Kulaklanma sac şekillendirmede istenmeyen bir durumdur. Çünkü sac şekillendirme sonrası bu kulakların kesilmesi gerekir ve bu durum ek bir maliyet ve israf getirmektedir. Bu sebeple sac metallerde düşük $|\Delta R|$ değeri tercih sebebidir. Alüminyum magnezyum alaşımı sacda bu değer in sıfıra yakın olduğu dolayısıyla kulak oluşumunun minimum olacağı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan \bar{R} değerinin yüksek olması, daha derin parçalar çekilmesini mümkün kılar. Ayrıca otomobil dış panelleri gibi daha sığ ve düzgün hatlı parçalarda yüksek \bar{R} değeri parçadaki kırışıklık olasılığını azaltır (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002). Tablo 7.8’deki sac metaller incelendiğinde en yüksek \bar{R} değerine düşük karbonlu çeliğin sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda sacın şekillendirilmesi esnasında, düzlem içerisindeki şekil değişiminin incelmedeki şekil değişiminden daha fazla olacağı ve daha geç yırtılacağı anlamına gelir. Bir başka deyişle, çelik sac alüminyum saca göre incelmeye karşı daha dayanıklıdır.

Tablo 7.8. Sac metallerin anizotropi katsayıları

	DC01	EN AW 5754
R_0	1.962	0.942
R_{45}	1.271	0.995
R_{90}	2.600	0.846
ΔR	1.010	-0.101
\bar{R}	1.776	0.945

7.7. Çift katmanlı Sacların Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi

Şekil 7.16'te görülen numuneler anizotropi katsayısının belirlenmesi için % 15 uzama miktarına kadar tek eksenli çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonucu sac numuneler eğri bir şekil almıştır. Bu eğriliğin sebebi elastisite modülü düşük olan alüminyum sacın daha fazla esneyerek kısalmaya çalışması, elastisite modülü daha yüksek olan çeliğin aynı oranda kısalmasıdır. Aynı durum çekme testinde koparılan numunelerde görülmemektedir. Çünkü kopan çekme numuneleri üzerinde herhangi bir elastik gerilme kalmamaktadır.



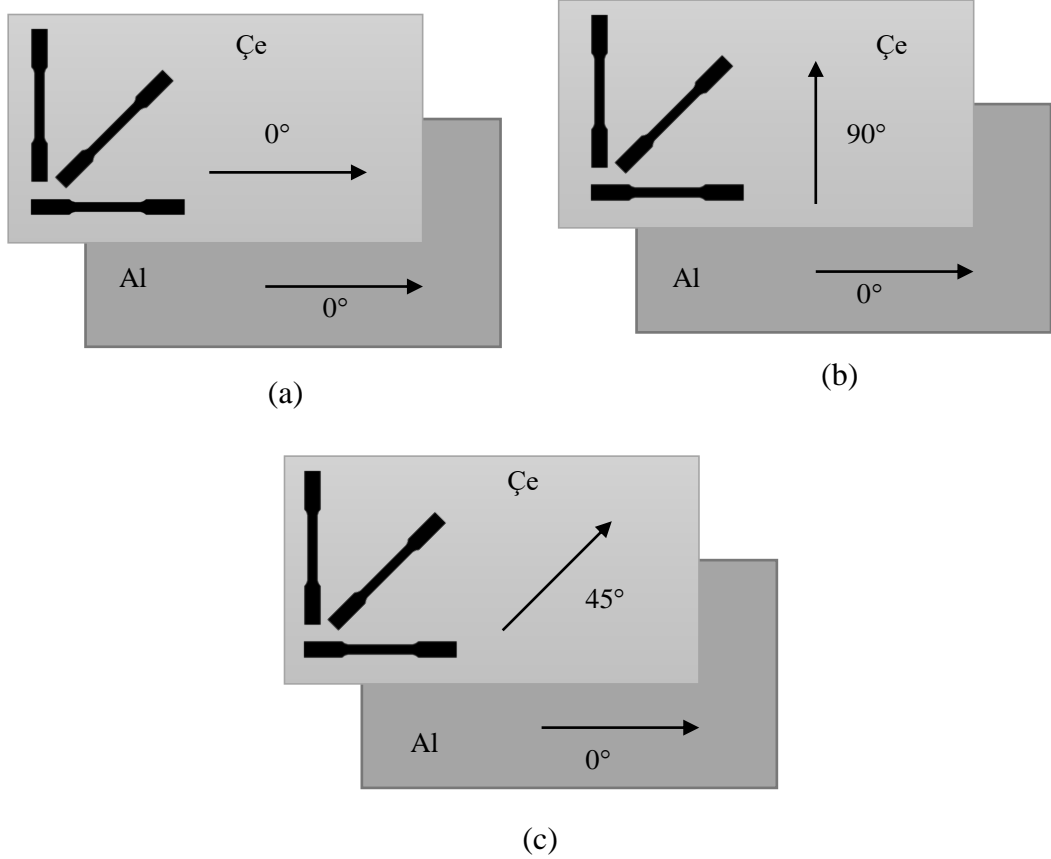
Şekil 7.16. Çekme cihazında % 15 uzama miktarına kadar çekilmiş çift katmanlı numuneler

Çekme cihazında çekilen numunelerin son kalınlık (t), son genişlik (w) ve son uzama (l) değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler (7.8) denkleminde yerine konarak

anizotropi katsayıları hesaplanmıştır (Kalpakjian ve Schmid, 2007). Bu denklemde w_0 , t_0 ve l_0 sırasıyla ilk kalınlık, ilk genişlik ve ilk boy değerlerini simgelemektedir.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 l_0}{w l}\right)} \quad (7.8)$$

Hesaplanan anizotropi katsayılarını mevcut haliyle değerlendirmek zor olmaktadır. Anizotropi katsayılarını daha iyi ifade edebilmek için Şekil 7.17'deki sac dizilimleri verilmiştir. Sacın üzerinde hadde yönleri oklar ile gösterilmiştir. Bu dizilimlere bakıldığında yapıştırma işlemi ile 3 farklı sac elde edilmiş gibi düşünülebilir. Şekil 7.17a'da iki sac hadde yönleri paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 7.17b'de birbirine dik olacak şekilde, Şekil 7.17c'de ise bir sac diğerine göre 45° döndürülerek yapıştırılmıştır. Katmanlı sacların yeni ve farklı birer sac olduğu düşünülerek bu 3 sacdan 0° , 45° ve 90° 'lik doğrultularda üçer adet numune çıkarılmıştır. Çıkarılan numunelerin tek sacların dizilimleri Tablo 7.9'da verilmiştir.

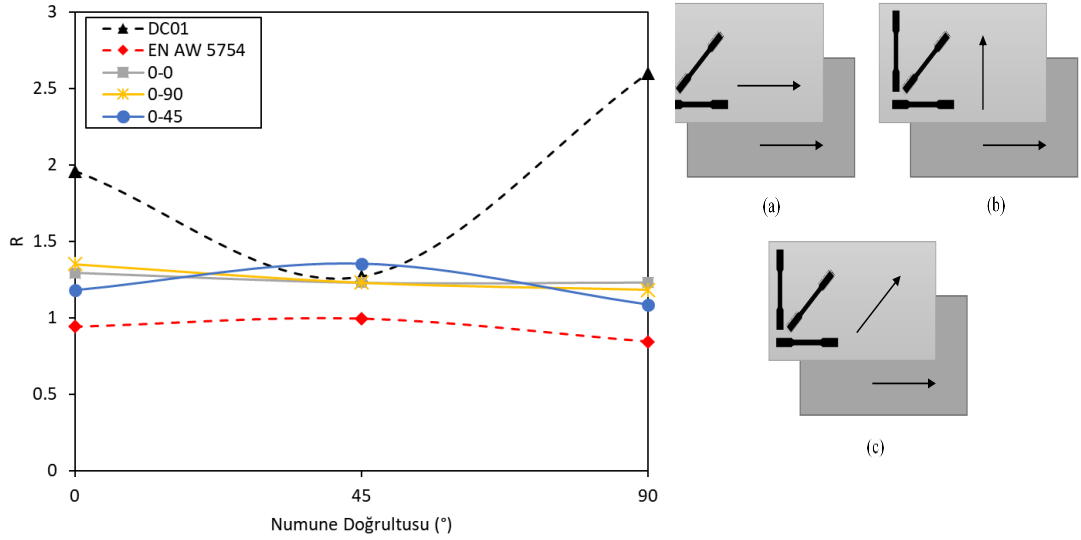


Şekil 7.17. Hadde yönüne göre farklı şekillerde dizilmiş saclar (a) 0° - 0° (b) 0° - 90° (c) 0° - 45°

Tablo 7.9. Çift katmanlı saclardan kesilen çekme numunelerinin sac dizilimleri

	(a)	(b)	(c)
0°	0°-0°	0°-90°	0°-45°
45°	45°-45°	45°-45°	45°-0°
90°	90°-90°	90°-0°	90°-45°

Çift katmanlı saclarda, saclar eğer birbirine paralel yerleştirilmemiş ise hadde yönü olgusu anlamsızlaşmaktadır. Bu durumda sadece yeni oluşan sac üzerinden farklı yönlerde numune keserek bu numunelerin anizotropisine bakmak uygundur. Hadde yönüne göre 0, 45 ve 90°'de belirlenen anizotropi katsayıları Şekil 7.15'te verilmiştir. Yöne bağlı anizotropi katsayıları ve grafiğin şekli derin çekme sonrasında sac metalde oluşacak olan kulaklanma hakkında bilgi vermektedir. Tek saclarda, DC01 çelik sacının kulaklanma eğiliminin fazla olduğu Şekil 7.15'ten anlaşılmaktadır. Tek çelik sacda 45°'de anizotropi katsayısı en düşük çıkmakta 0 ve 90° yönlerinde ise yüksek çıkmaktadır. Bu durum derin çekme işlemi sonrasında oluşan kulakların hadde yönü ve ona dik doğrultuda oluşacağını göstermektedir (Şekil 7.15a). Diğer taraftan tek alüminyum sacda ise kulaklanma oluşumu oldukça az görülmektedir. Çünkü grafikte 0, 45 ve 90° doğrultuları için anizotropi katsayısında belirgin değişim olmamaktadır. Bu iki sacın birleştirilmesi ile oluşturulan çift katmanlı sacda ise tek sacların dizilimlerine göre 3 farklı durum oluşmuştur. Buna göre iki metal sac Şekil 7.17a ve Şekil 7.17b'de olduğu gibi birleştirildiğinde kulaklanmanın azaldığı görülmektedir. Çift katmanlı saclar birleştirerek çekme testine tabi tutulduğunda, çift katman içerisindeki çelik sac, serbest haldeki gibi uzayamamaktadır. Çünkü alüminyum sac, çelik sacın uzamasını kısıtlamaktadır. Dolayısı ile anizotropi katsayısı için çekme testine tabi tutulan çift katmanlı sac ancak alüminyum sacın izin verdiği ölçüde uzar. Bu sebeple tek çelik sac 0 ve 90° doğrultularında göstermiş olduğu anizotropi çift katmanlı sacda azalmaktadır. Sacların (c) dizilimindeki gibi birleştirilmesi durumunda kulak oluşumunun daha fazla olacağı görülmektedir.



Şekil 7.18. Çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları

Tablo 7.10’da yöne bağlı anizotropi katsayılarına ek olarak normal ve düzlemsel anizotropi katsayıları verilmiştir. Değerler incelendiğinde çift katmanlı saclarda en fazla kulak oluşumunun (c) tipi sacda yani 0-45 diziliminde olacağı görülmektedir. Sac metallerde düşük $|\Delta R|$ değeri tercih sebebidir. Tablo 7.10’da en düşük $|\Delta R|$ değerinin (a) ve (b) tipi sacda olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablo 7.10’daki çift katmanlı saclarda (a) ve (c) tipi sacların yüksek \bar{R} değerine sahip olduğu görülmektedir. Tek saclara göre çift katmanlı saclarda elde edilen $|\Delta R|$ ve \bar{R} değerleri birbirine yakındır. Dolayısıyla genel bir değerlendirme yapıldığında çift katmanlı sacların üst üste hangi yönde dizildiğine (istiflendiğine) bakılmaksızın derin çekmede çelik saca göre daha az kulaklanma görüleceği belirlenmiştir.

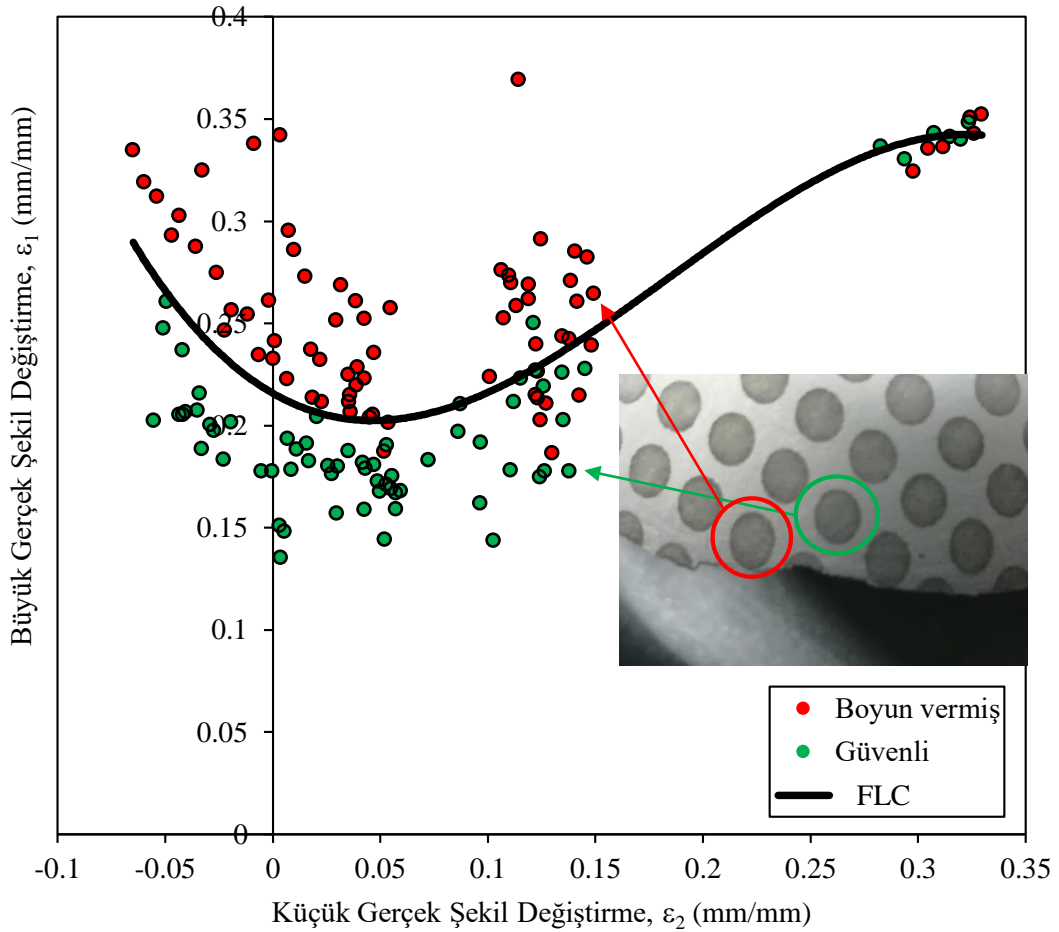
Tablo 7.10. EN AW 5754 H111/DC01 çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları

	DC01	EN AW 5754	(a)	(b)	(c)
R_0	1.962	0.942	1.294	1.352	1.181
R_{45}	1.271	0.995	1.230	1.230	1.353
R_{90}	2.600	0.846	1.232	1.183	1.088
ΔR	1.010	-0.101	0.033	0.037	-0.219
\bar{R}	1.776	0.945	0.939	0.941	0.906

7.8. Tek ve Çift katmanlı Sacların ŞSD’lerinin Belirlenmesi

Şekil 7.19’de 1 mm kalınlığa sahip EN AW 5754 H111 sacının deneyler sonucunda belirlenmiş ŞSD’si verilmiştir. Kırmızı renk ile gösterilen noktalar sacın hasarlı bölgesinin kenarından alınmış ölçümlerdir. Yeşil renk ile gösterilenler ise hasarlı bölgenin bir sıra arkasından alınan ölçümlerdir. Şekillendirme sınır eğrisi kırmızı ve yeşil noktaların arasında geçecek şekilde eğri uydurma yöntemi ile

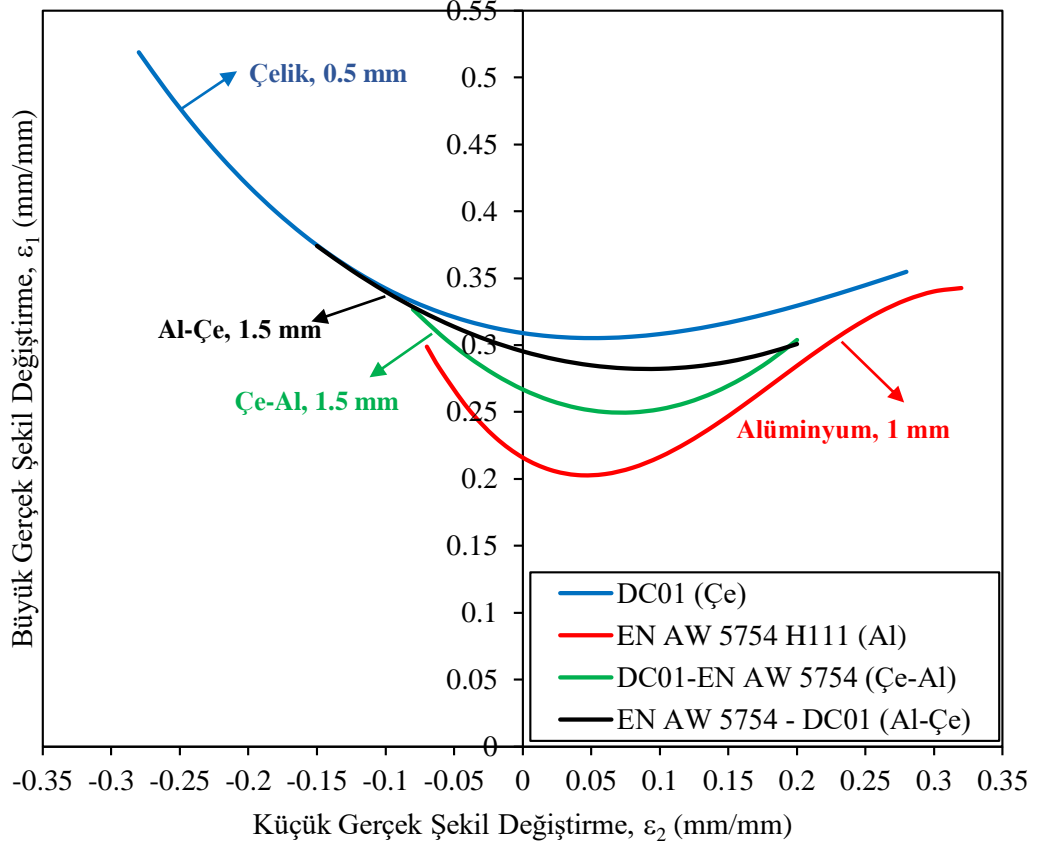
oluşturulmuştur. Elde edilen ŞSD'nin alt tarafındaki bölge güvenli bölge, üst tarafı ise hasarlı bölge olarak adlandırılmaktadır. Şekillendirme işlemlerinde doğrusal bir deformasyon yolu izlendiğinde şekil değiştirme miktarının eğrinin üstüne çıkması durumunda parçada hasar oluşacaktır. Tüm düzlem dışı gerdirme testlerinde sıvı yağlayıcı kullanılmıştır. Ancak diyagramın en sağ tarafını yani eşit iki eksenli gerilme durumunu elde edebilmek amacıyla zımba ile sac metal arasına kauçuk tabaka konarak ve sıvı yağlayıcı ile yağlanarak çekilmiştir. Bu şekilde eşit iki eksenli gerilme için gerekli deformasyon yolu elde edilebilmiştir. Zımba ile sac metal arasındaki sürtünme durumunun değişmesi ŞSD üzerinde belirgin bir fark yaratarak ŞSD'nin sağ tarafının net bir biçimde ortaya konmasını sağlamıştır. Yapılan bu işlemlerin tamamı tüm tek ve çift katmanlı saclar için tekrarlanarak ŞSD'ler elde edilmiştir.



Şekil 7.19. 1 mm kalınlığa sahip EN AW 5754 H111 sacının şekillendirme sınır diyagramı

Şekil 7.20'te tek DC01 ve EN AW 5754 H111 saclarının ŞSE'leri ve bunlardan oluşan çift katmanlı sacların ŞSE'leri birlikte verilmiştir. Şekillendirme sınırı en

yüksek ($\text{\$SE}_0 = 0.31$) olan sac DC01 çelik sac iken, en düşük ($\text{\$SE}_0 = 0.21$) sac EN AW 5754 H111 alüminyum sacıdır. Çelik sac, diyagramın sol ve sağ tarafında daha geniş bir bölgeye yayılırken alüminyum sacda bu durum sadece sağ kısım için geçerlidir. Bu saclardan oluşan çift katmanlı sacların $\text{\$SE}$ 'leri kendini oluşturan sacların $\text{\$SE}$ 'lerin arasında kalmaktadır. Ayrıca katmanlı sacların $\text{\$SE}$ 'leri dış katmanda bulunan sacın $\text{\$SE}$ 'sine yakın çıkmaktadır. Şekilde zımba ile temas eden sacın ismi önce yazılmıştır. Buna göre çelik katman zımba ile temas ettiği durumda $\text{\$SE}_0 = 0.267$ iken, alüminyum katman zımba ile temas ettiği durumda bu değer 0.295'e kadar çıkmaktadır. Çift katmanlı sacların $\text{\$SE}$ 'leri belirlenirken test esnasında iç katman, üzerindeki yapıştırıcı ve diğer sac sebebiyle normal kuvvet etkisi altındadır. Ancak dış katmana herhangi bir normal kuvvet etki etmemektedir. Bu sebeple iç katmandaki sacda normal kuvvetin etkisiyle çatlak başlangıcı ertelenmekte ve bu sayede tek halinden daha yüksek şekillendirme kabiliyeti elde edilebilmektedir. Ayrıca sac kalınlığının artması sebebiyle alüminyum kesite gelen gerilme değeri düşmüştür. Bu sebeple malzeme kopma dayanımına ulaşmadan bir miktar daha şekil değiştirebilmektedir. Kalınlığı artan sacların $\text{\$SE}$ 'lerinin yukarı doğru kayması bu durumu doğrulamaktadır. Kalınlık artışı ile malzemede yük taşıyan kesitin alanı artmaktadır. Bu alan artışı gerilmenin düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 7.20. Çelik ve alüminyum sacların tek ve çift katmanlı ŞSE'leri

Yapılan düzlem dışı gerdirmeye testleri sonucunda elde edilen ŞSD'ler yukarıda verilmiştir. Farklı sacların birleştirilmesi ile oluşturulan çift katmanlı saclarda şekillendirme sınırının kendini oluşturan sacların ŞSE'lerinin arasında çıktığı görülmüştür. Ancak bu ŞSE'lerin sacın test esnasında yerleştirme pozisyonuna göre değiştiği görülmüştür. Şöyle ki, çift katmanlı sacın ŞSE'si deney esnasında dış katmanda bulunan sacın (zımba ile temas etmeyen sac) ŞSE'sine yakın çıkmaktadır. Alüminyum ve çelik sacların birleştirilmesi ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların şekillendirilebilirliği alüminyuma göre %27.6 ile %40.4 oranında artmıştır. Aynı durum çelik sac baz alınarak incelendiğinde çift katmanlı sacın şekillendirilebilirliği çelik sacından yaklaşık %13.8 ile %4.8 daha düşük çıkmıştır. Farklı saclardan oluşturulmuş çift katmanlı sacların zımba ile temas yüzeyi değiştirilerek iki ŞSE arasında istenilen şekillendirilebilirliğe ulaşabileceği görülmüştür.

7.9. Tek ve Çift katmanlı Sacların Derin Çekilmesi

Derin çekme işlemlerinde hasarsız parça üretebilmek için çalışma bölgelerinin bilinmesi gereklidir. Çalışma bölgesi genel olarak parçanın çekileceği pul (derin

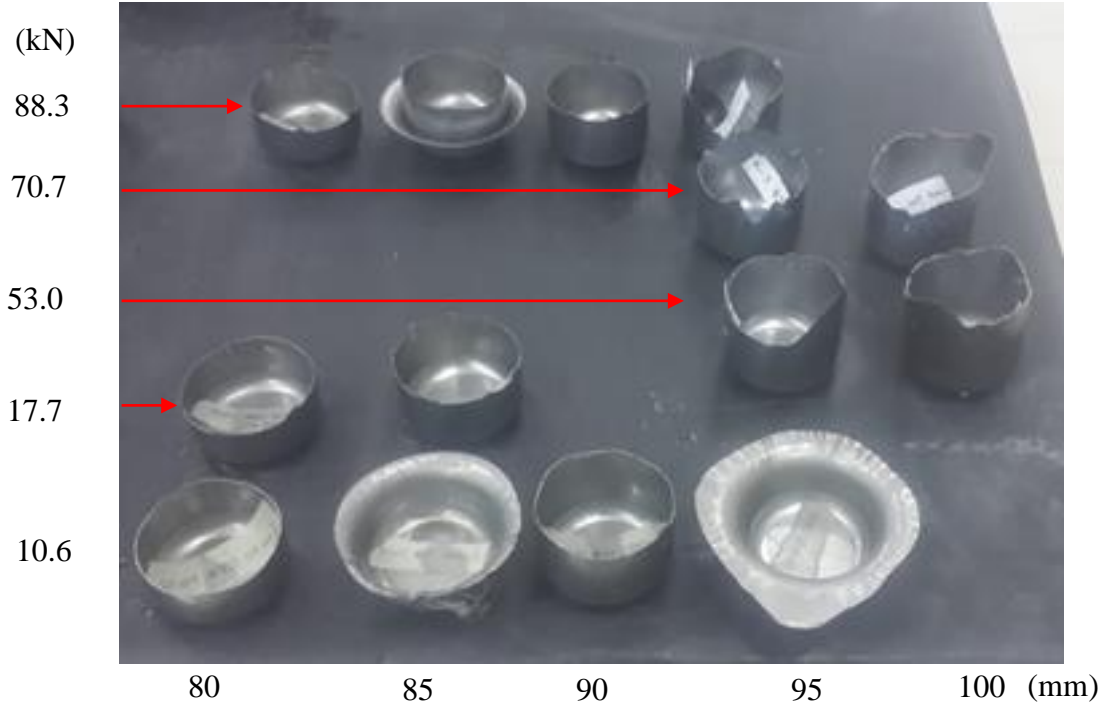
çekme öncesi taslak sac geometrisi) çapına göre gerekli olan baskı plakası kuvvetinin belirlendiği grafiksel alandır. Farklı pul çaplarının farklı baskı plakası kuvveti gerektirmesinden dolayı bu durumu grafik üzerinde bölgesel olarak tanımlamak daha uygun olmaktadır. Bu bölge tanımlanırken dikey eksen baskı plakası kuvvetini yatay eksen ise limit çekme oranını göstermektedir. Limit çekme oranı (LÇO) çekilebilecek maksimum pul çapının (D_p) zımba çapına (D_z) oranı olarak verilmektedir. Grafikte pul çapı yerine LÇO'nun verilmesi ile farklı zımba çaplarına uygulanabilen boyutsuz bir ifade elde edilmektedir. Bu ifade,

$$LÇO = \frac{D_p}{D_z} \quad (7.9)$$

şeklinde verilir (Z. Marciniak, J.L. Duncan, 2002).

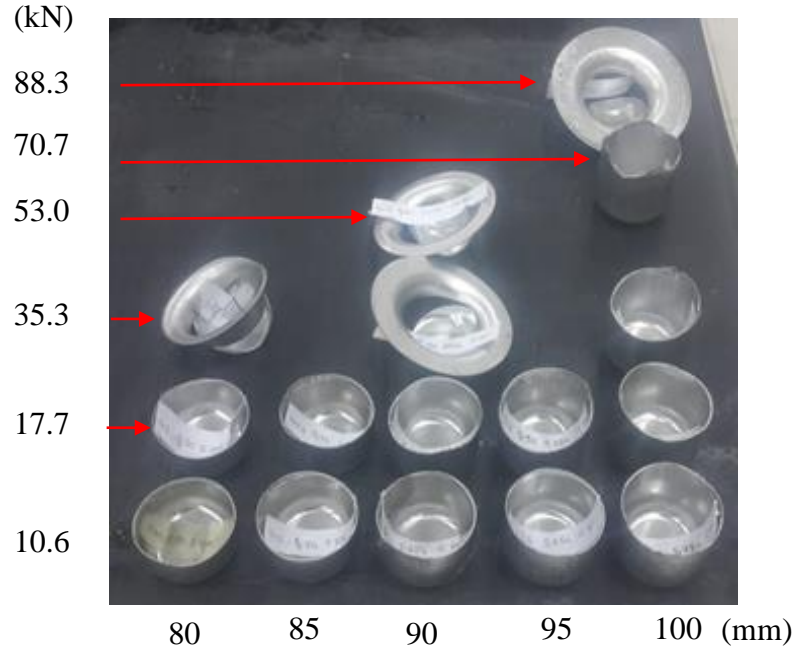
7.9.1. Tek Sacların Derin Çekilerek Limit Çekme Oranlarının Belirlenmesi

Katmanlı sacların LÇO'larını kıyaslayabilmek için tek sacların LÇO değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple tek saclar derin çekilmiştir. Derin çekme deneyleri için belirlenen çaplar referans alınarak plaka halindeki sac metaller lazer ışını tezgahında kesilmiştir. Kesilen saclar hidrolik preste silindirik derin çekme işlemine tabi tutulmuştur. DC01 sacından çekilen numuneler Şekil 7.21'te verilmiştir. Çapı 80 mm olan numuneler 10.6 kN ve 88.3 kN pot çemberine (baskı plakası) kuvvet uygulanarak çekilmiş ve herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir. Çap 85 mm ve 90 mm olan numuneler yine aynı baskı kuvvetleri altında çekilmiş ve herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Çap 95 mm olan numunelerde 10.6 kN uygulandığında numunelerin flanş bölgesinde kırışmalar meydana geldiği görülmüştür. Aynı çapta baskı plakası kuvvetinin arttırılması ile kırışma giderilmiştir. Ancak 35 kN üzerindeki baskı kuvvetlerinde numunelerde yırtılmalar oluşmuştur. Çap 100 mm olduğunda ise ideal baskı plakası kuvveti aralığının 35-50 kN olduğu görülmüştür. Bu aralığın altındaki değerlerde numunelerde kırışmalar meydana gelmekte, üstündeki değerlerde ise parçada yırtılmalar oluşmaktadır.



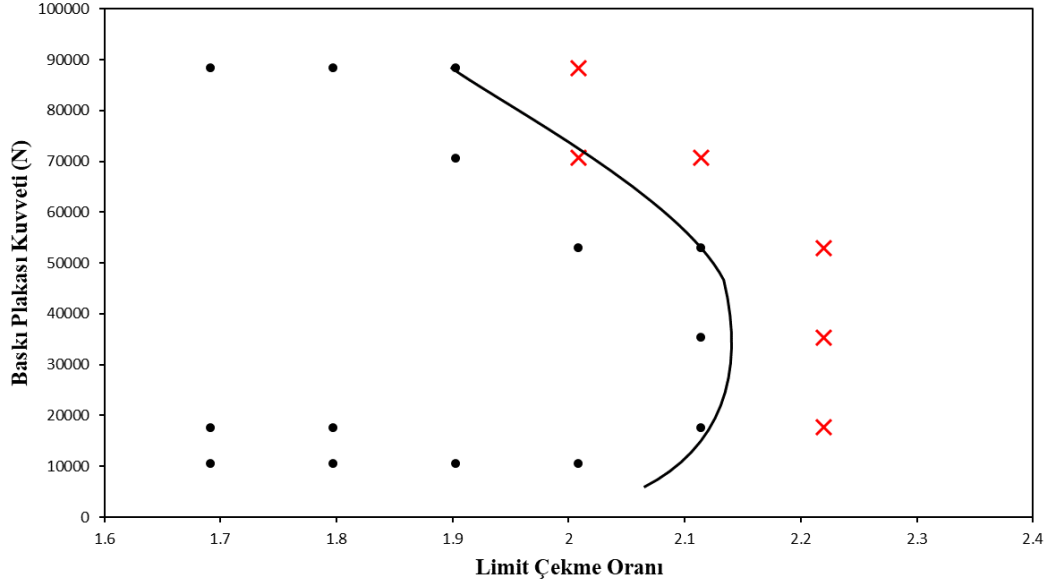
Şekil 7.21. DC01 çelik sacdan derin çekilen numuneler

EN AW 5754 H111 saclarından derin çekilen numuneler Şekil 7.22’te verilmiştir. Bu sacların derin çekme işleminin tamamında sıvı yağlayıcıya ek olarak naylon poşet kullanılmıştır. Naylon poşet kullanılmayan derin çekmelerde başarılı numune üretilenmemiştir. Çapı 80 ile 100 mm arasında değişen tüm numunelerde 10.6-17.7 kN baskı plakası kuvveti aralığında başarılı derin çekme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çapı 100 mm olan saclarda ise 35 kN üzeri baskı plakası kuvvetinde parçada yırtılmalar ve kopmalar oluşmuştur.

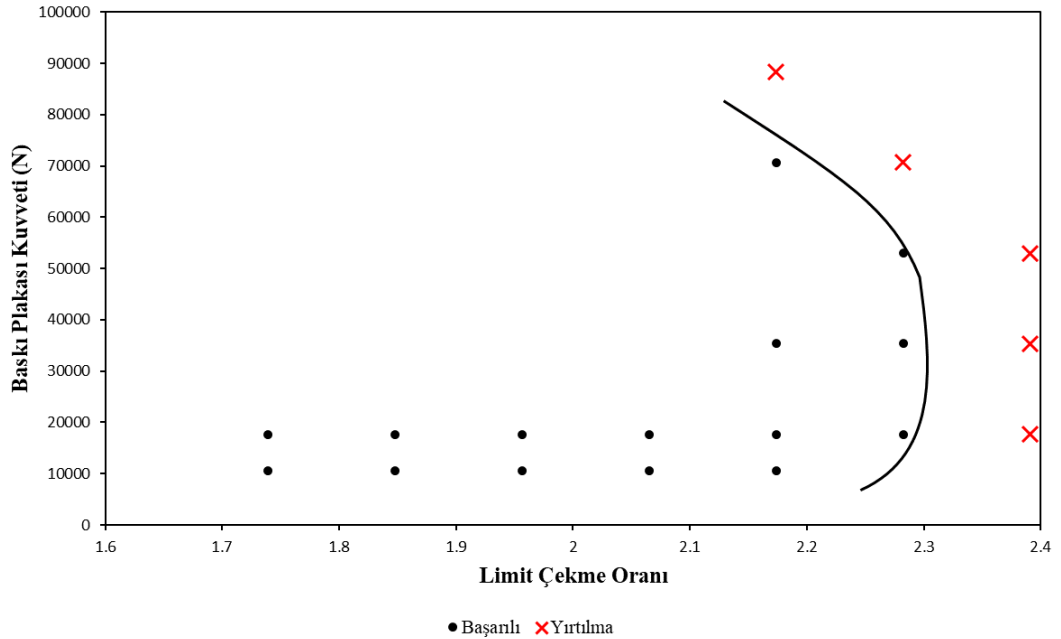


Şekil 7.22. EN AW 5754 alüminyum alaşımı sacdan derin çekilen numuneler

Şekil 7.23'da DC01 ve EN AW 5754 sacları tek olarak derin çekildiğinde elde edilmiş güvenli çalışma bölgeleri verilmiştir. Bu bölge belirlenirken derin çekme deneyleri yırtılma görülen çapa ve baskı plakası kuvvetine kadar devam etmiştir. Şekil 7.23a'da DC01 çelik saca ait çalışma bölgesi verilmiştir. Buna göre limit çekme oranı (LÇO) yaklaşık 2.1 iken maksimum 60 kN'luk baskı plakası kuvveti altında başarılı şekilde derin çekme işlemi gerçekleştirilebilmiştir. Baskı plakası kuvveti daha fazla arttırıldığında ise sacda yırtılmalar oluşmakta ve çalışma bölgesi daralmaktadır (Şekil 7.23a). Şekil 7.23b'de ise alüminyum saca ait güvenli çalışma bölgesi verilmiştir. Grafik incelendiğinde alüminyum için LÇO'nun yaklaşık 2.3 değerine kadar yükseldiği görülmüştür. Baskı plakası kuvveti, çelik sacda olduğu gibi 60 kN civarlarında en yüksek değerine ulaşmıştır. Şekil 7.23'deki iki grafik birlikte incelendiğinde alüminyum sacın güvenli çalışma bölgesinin çelik saca göre 50 kN baskı plakası kuvveti altında %9 daha fazla olduğu görülmektedir.



(a)



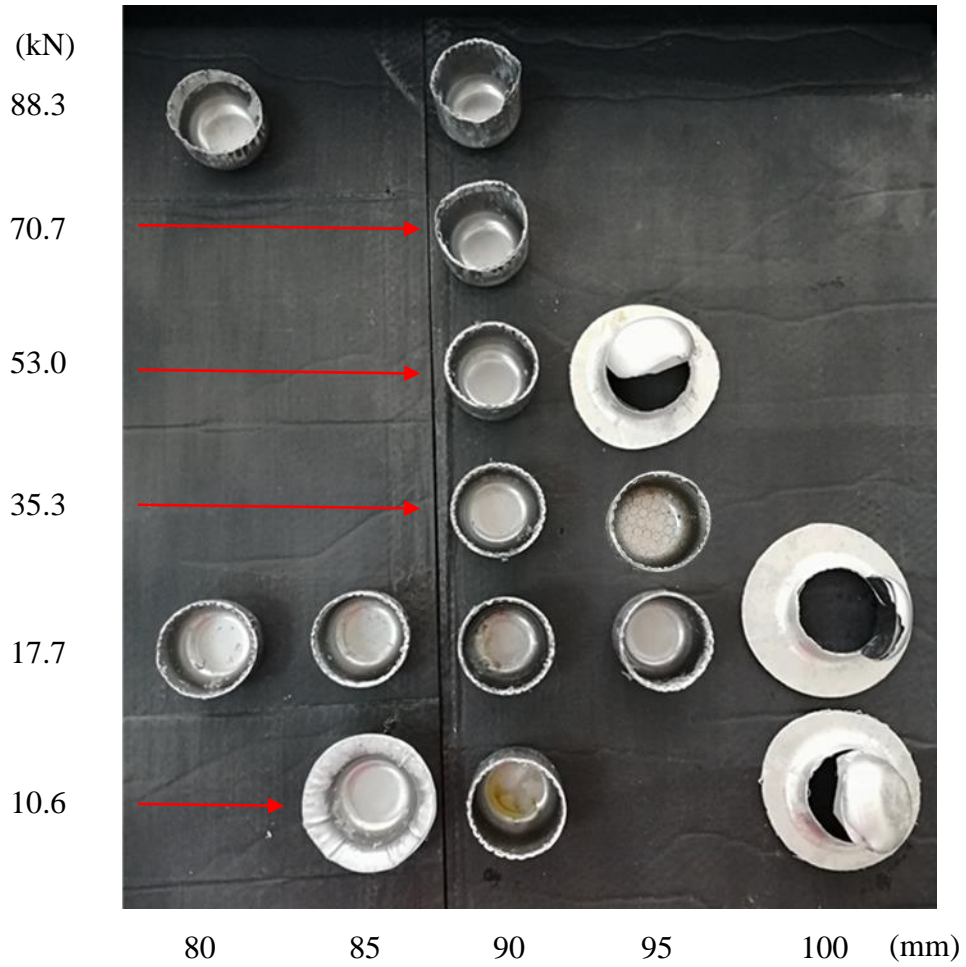
(b)

Şekil 7.23. Tek sacların güvenli çalışma bölgeleri (a) DC01 çelik sacı (b) EN AW 5754 alüminyum sacı

7.9.2. Çe/Al Çift katmanlı Sacının Derin Çekilerek Limit Çekme Oranının Belirlenmesi

Şekil 7.24’de DC01/EN AW 5754 çift katmanlı sacından derin çekilmiş numuneler bulunmaktadır. Bu numunelerde sacın çelik yüzü zımba ile temas etmektedir. Derin çekme işlemi esnasında kalıplar ve sacın her iki yüzü madeni yağ

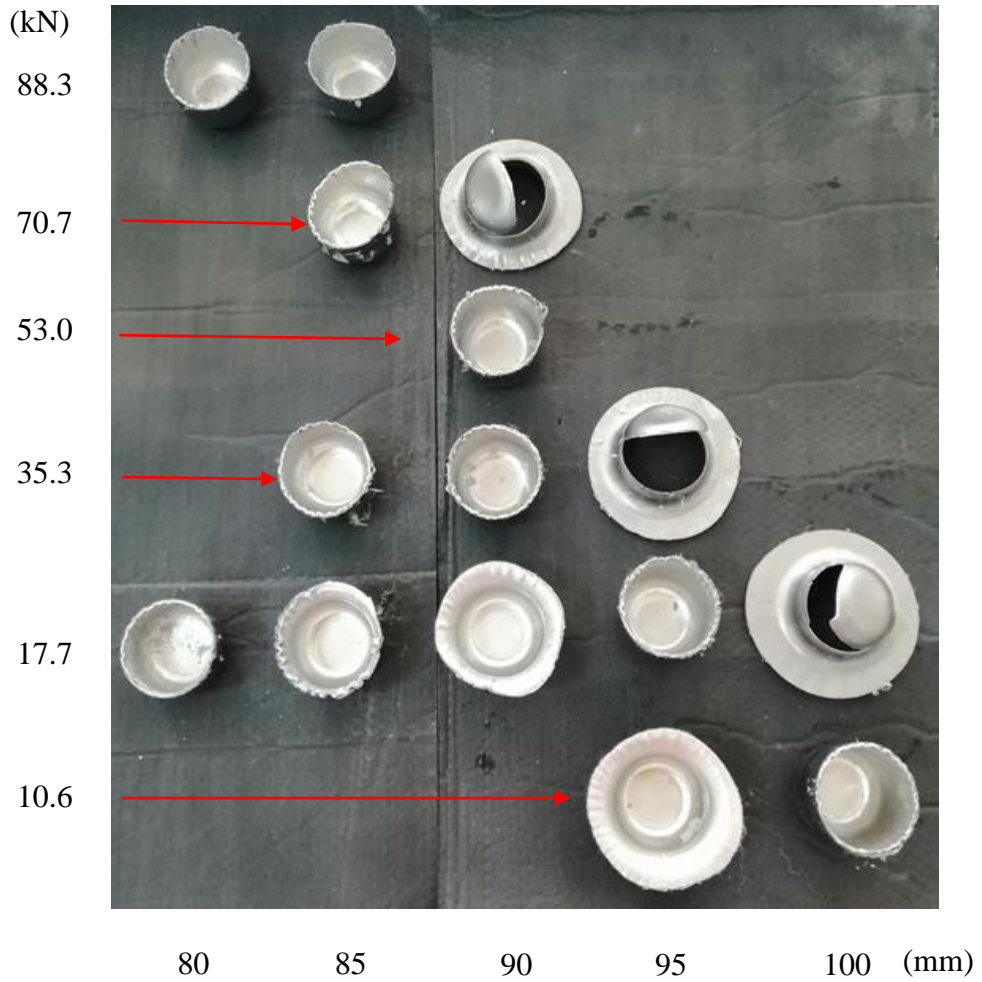
ile yağlanmıştır. Ayrıca dişi kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla sacın yüzeyine naylon poşet serilmiştir. Deneyler sonucunda çapı 100 mm olan numunelerin tamamında yırtılma gözlenmiştir. 10.6 ve 17.7 kN'luk baskı plakası kuvveti uygulanan numunelerde yırtılma olması daha yüksek baskı kuvvetlerinde numunenin daha erken yırtılacağını göstermiştir. Bu sebeple 100 mm'lik numuneler ile yapılan deneyler sonlandırılmıştır. Benzer şekilde diğer çaptaki numunelerin pot basınçları yırtılma gerçekleşinceye kadar arttırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zımbanın çelik sac ile temas etmesi durumunda maksimum 95 mm çapında numune çekilebildiği saptanmıştır. Baskı plakası kuvvetinin 10.6 kN olması durumunda derin çekilen sacların flanş bölgelerinde kırışmalar meydana gelmiştir. Baskı plakası kuvveti arttırıldığında ise bu kırışmalar azalmış ancak tamamen yok olmamıştır.



Şekil 7.24. DC01/EN AW 5754 çift katmanlı sac ile çekilmiş numuneler

Şekil 7.25'de EN AW 5754/DC01 çift katmanlı sacları ile yapılmış derin çekme deneylerine ait numuneler görülmektedir. Bu numunelerde zımba EN AW 5754 sacı

ile temas edecek şekilde veya başka bir deyişle alüminyum sac kupanın iç kısmında kalacak şekilde derin çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çe/Al diziliminde maksimum 95 mm çapında numune derin çekilebiliyorken, Al/Çe diziliminde 100 mm çapındaki numune derin çekilebilmiştir. Ancak bu işlem baskı plakası kuvvetinin 17.7 kN'nun altındaki işlemler için geçerli olabilmiştir. 95 mm çapındaki numunelerde 35.3 kN, 90 mm çapındaki numunelerde ise 53.0 kN'a kadar herhangi bir yırtılma gözlenmemiştir. Yapılan deneylerinde derin çekilen sacların hiçbirinde ayrılma gözlenmemiştir. Derin çekme esnasında numune üzerinde bulunan yapıştırıcı kalıntıları numune yüzeyinden koparak dökülmüştür.

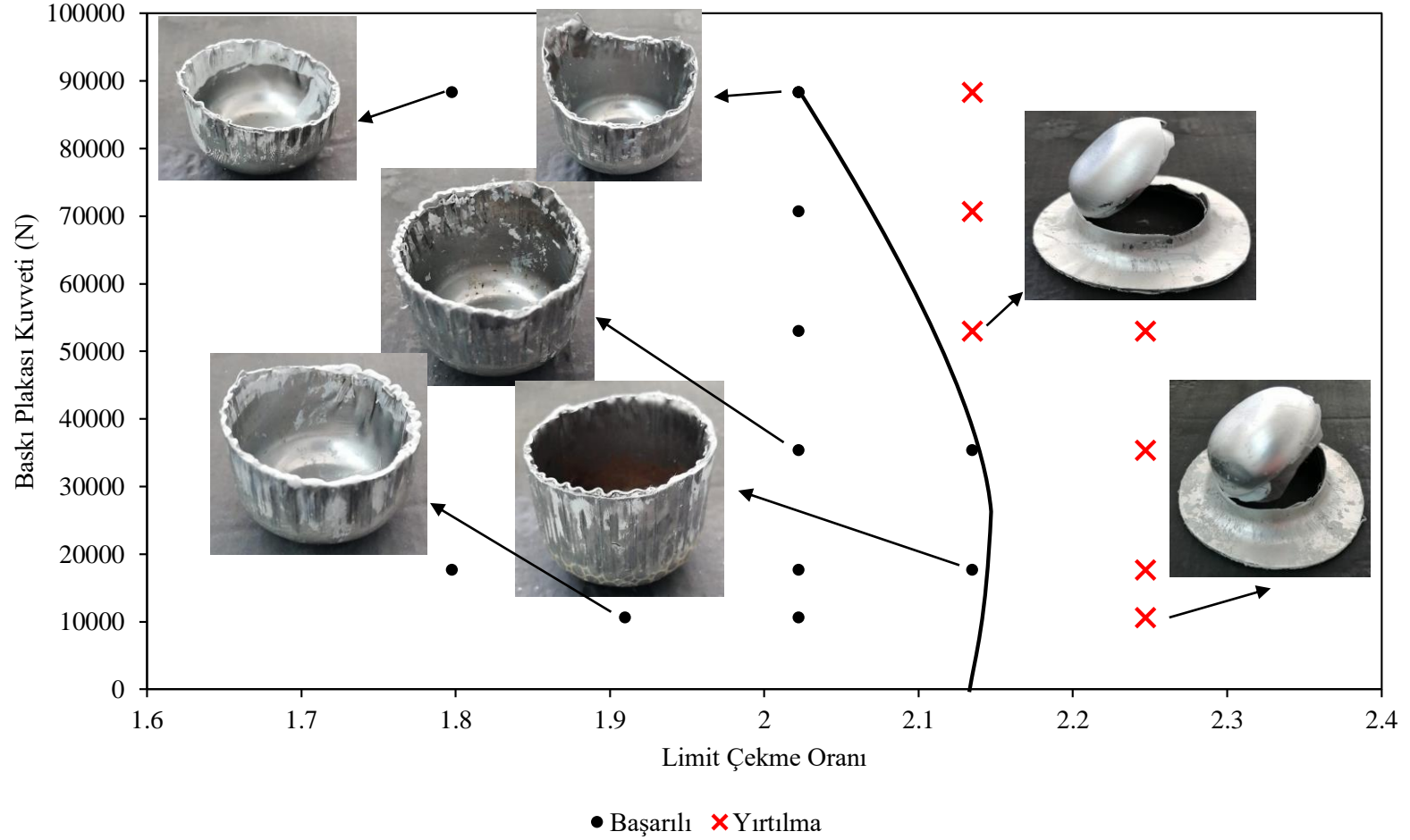


Şekil 7.25. EN AW 5754/DC01 çift katmanlı sac ile çekilmiş numuneler

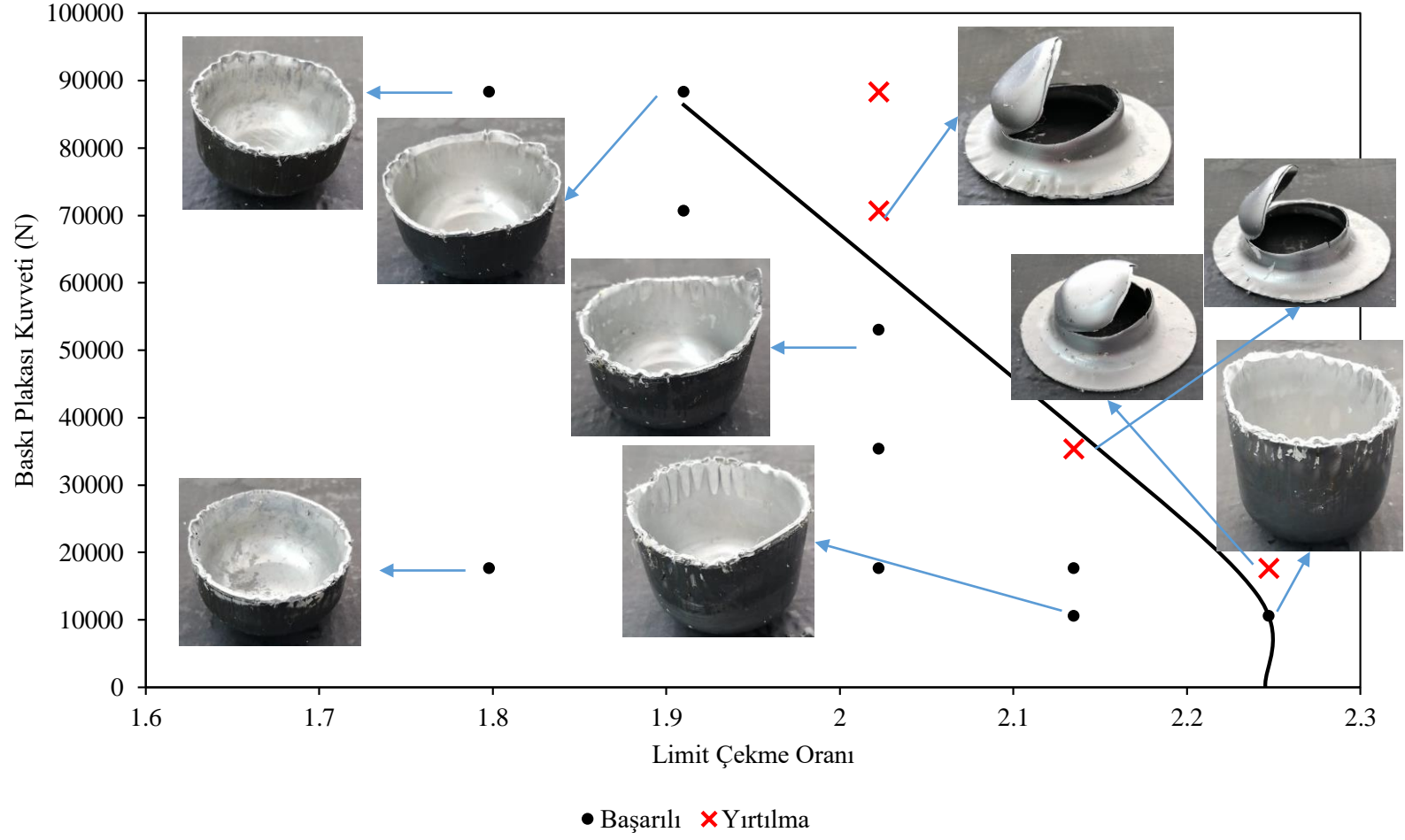
Çelik ve alüminyum sac malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulmuş çift katmanlı saclarda derin çekildikten sonra herhangi bir ayrılma gözlenmemiştir. Bu durumun sebebi yapıştırıcı etkisinden daha çok derin çekme işlemi sonrasında

malzeme üzerinde kalan gerilmelerin malzemenin hareketini kilitlemesidir. Özellikle alüminyum sacların iç kısımda yer aldığı durumda geri esneme etkisi bu kilitlenmeye sebep olmaktadır. Alüminyum sacın elastisite modülünün (~70 GPa) çelik saca göre (~200 GPa) daha küçük olması alüminyum sacın geri esneme miktarının çelikten daha fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durumda çift katmanlı sac derin çekildiğinde iç kısımda kalan alüminyum sac geri esnemekte, ancak dış katmanda bulunan çelik sac bu durumu sınırlandırmaktadır. Dolayısı ile sacların hareket yönünden birbirini kilitlediği bir durum ortaya çıkmaktadır.

Aşağıdaki grafiklerde çift katmanlı sacların dizilimlerine göre elde edilen güvenli çalışma bölgeleri verilmiştir. Çift katmanlı sacların dizilimi Çe/Al şeklinde olduğunda (Çelik sac katmanı zımba ile temasta) elde edilen çalışma bölgesi Şekil 7.26'da, Al/Çe dizilimi şeklinde olduğu durum ise Şekil 7.27'da verilmiştir. Çe/Al dizilimi daha yüksek baskı plakası kuvveti altında çalışmaya olanak tanırken, Al/Çe dizilimi ise daha büyük çaplı parçalar çekilmesine imkân vermektedir. Ancak Al/Çe diziliminde baskı plakası kuvveti Çe/Al dizilimine göre 4 kat azalmakta, bu durum üretilen ürünlerde kırılma riskini arttırmaktadır.

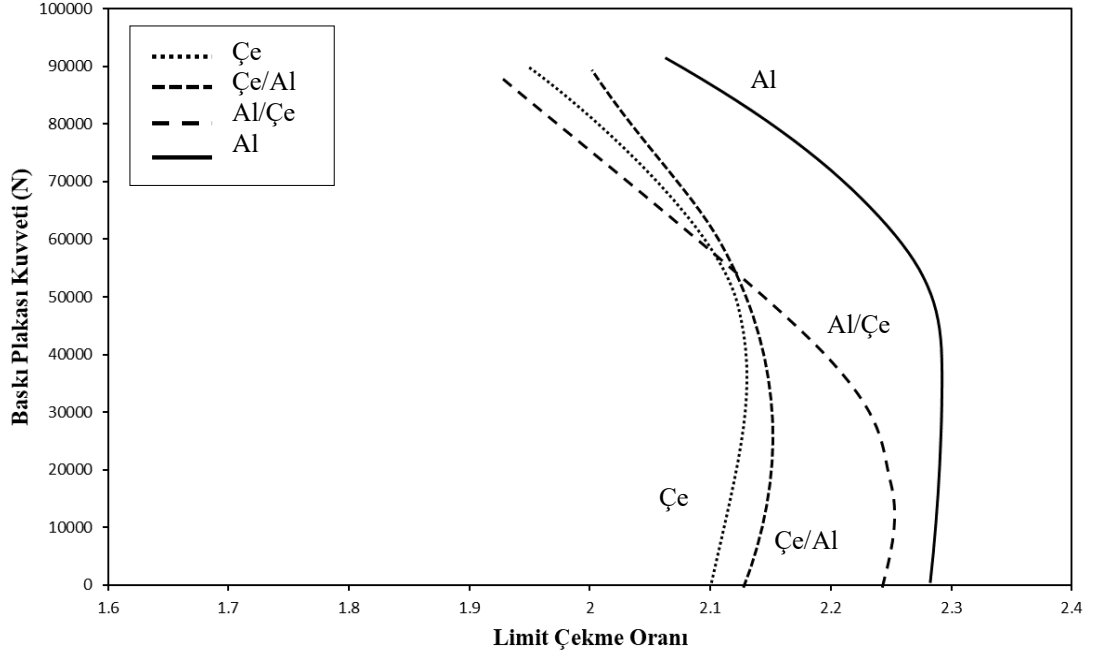


Şekil 7.26. Çe/Al sacınm güvenli çalışma bölgesi



Şekil 7.27. Al/Ce sacının güvenli çalışma bölgesi

Şekil 7.28’de tek ve çift katmanlı sacların güvenli çalışma bölgeleri birlikte verilerek karşılaştırılmıştır. Grafiğe göre en dar çalışma bölgesi çelik sacda iken en geniş çalışma bölgesi alüminyum sacda oluşmuştur. Çift katmanlı saclar ise bu iki bölgenin arasında kalarak beklenen davranışı sergilemiştir. Burada dikkat çeken husus çift katmanlı sacların Çe/Al diziliminin çelik saca, Al/Çe diziliminin ise alüminyum saca yakın olmasıdır. Dış katmandaki sacın mukavemetinin yüksek olması çift katmanlı sacın LÇO’sunun artmasına sebep olmuştur. Ayrıca burada LÇO’nun artmasındaki asıl sebep çelik ve alüminyum malzemenin anizotropi katsayıları ile açıklanabilir. Alüminyum malzemenin anizotropi katsayıları incelendiğinde üç farklı katsayının da (R_0, R_{45}, R_{90}) $R < 1$ şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durum EN AW 5754 sacının düzlem içindeki şekil değişimine dayanıklı olduğunu, ancak incelmeye karşı daha az dayanıklı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan DC01 sacının anizotropi katsayılarını incelendiğinde üç farklı katsayının da $R > 1$ değerini sağladığı gözükmektedir. Bu durumda sac tüm yönlerde anizotropi gösterecek ve ayrıca incelmeye karşı daha dayanıklı olacaktır. Dış katmandaki sacın daha fazla incelmeye maruz kalacağı açıktır. Çift katmanlı saclar için bu iki durum değerlendirildiğinde, dış katmandaki sacın incelmeye karşı daha dayanıklı olmasının LÇO’nun yükselmesine sebep olduğu anlaşılmaktadır. Nitekim ortalama anizotropi katsayıları dikkate alındığında $\overline{R_{Çe}} > \overline{R_{Al}}$ olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle, çelik sac alüminyum saca göre incelmeye karşı daha dayanıklıdır. Bu noktada sac kalınlıklarının da önemli olduğunu söylemekte fayda vardır. Çünkü Al/Çe diziliminde alüminyum katmanının sac kalınlığı arttırıldığı takdirde taşıyacağı gerilme de artacak ve çalışma bölgesi genişleyecektir.

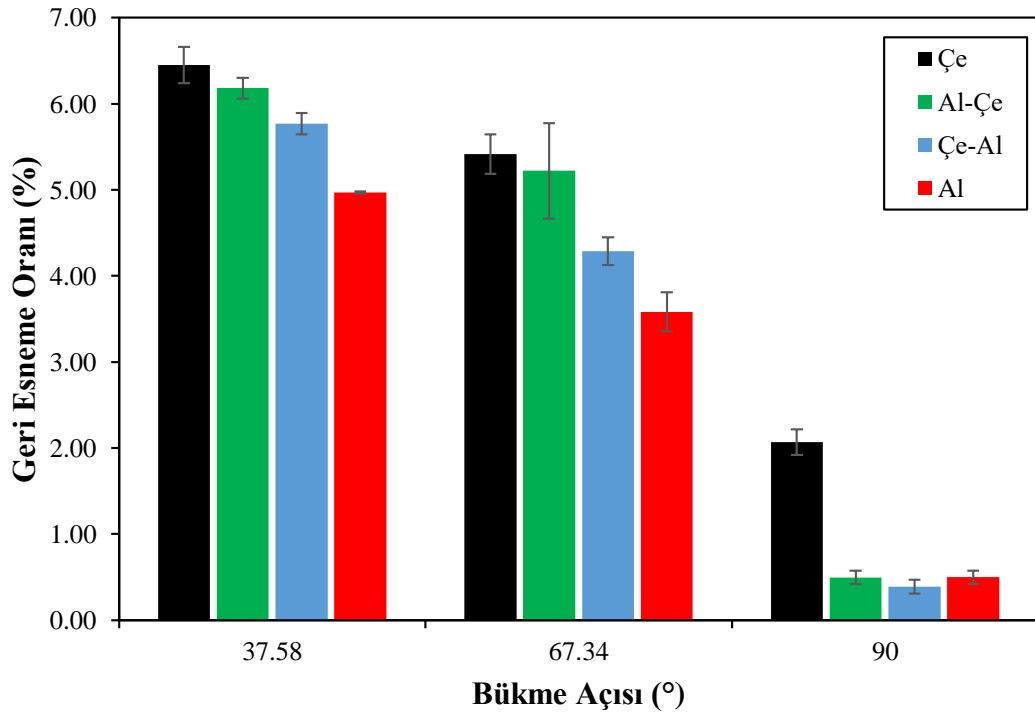


Şekil 7.28. Çift katmanlı sacların güvenli çalışma bölgelerinin tek saclar ile karşılaştırılması

7.10. Tek ve Çift Katmanlı Sacların Geri Esneme Durumları

Şekil 7.29'de tekil ve çift katmanlı sacların büküm açısına bağlı olarak geri esneme oranları yüzdesel olarak verilmiştir. Grafikte dikey eksen yüzde geri esneme miktarını, yatay eksen ise sac metalin büküm açısını (θ) göstermektedir. Çift katmanlı sacların isimlendirilmesinde zımba ile temas eden sacın ismi önce verilmiştir. Tekil alüminyum sacda en az geri esneme görülürken, tekil çelik sacda ise en fazla geri esneme değerleri görülmektedir. Elastisite modülü daha küçük olan Al sacın (~ 70 GPa) çelik sacdan (~ 200 GPa) daha fazla geri esnemesi beklenebilir. Ancak alüminyum sac kalınlığının 1 mm olması sebebiyle geri esneme değeri çelik sacdan (0.5 mm) daha az olmaktadır. Çift katmanlı saclarda ise geri esneme durumu dış katmandaki saca bağlı olarak değişmektedir. Buna göre zımba ile alüminyum temas ederken, dış katmanda çelik olduğu durumda geri esneme değerleri tekil çelik sacın geri esneme değerlerine daha yakın çıkmaktadır. Tersisi durumda ise geri esneme değerleri alüminyum saca daha yakın çıkmaktadır. Bir başka deyişle çift katmanlı saclarda dış katmanda olan sac geri esneme derecesini belirlemektedir. Çift katmanlı saclarda bükülme işlemi esnasında tarafsız eksen yüksek mukavemetli olan saca yakın olur (Yilamu vd., 2010). İç katmanda düşük mukavemetli ve daha kalın olan alüminyum sacın olması durumunda bu sac bası gerilmelerine maruz kalacaktır. Bası gerilmeleri sacın kalınlığının bir

miktar artmasına dolayısı ile daha büyük bükme yarıçapına sebep olacaktır. Bükme yarıçapının artması geri esnemenin de artmasına sebep olmaktadır.

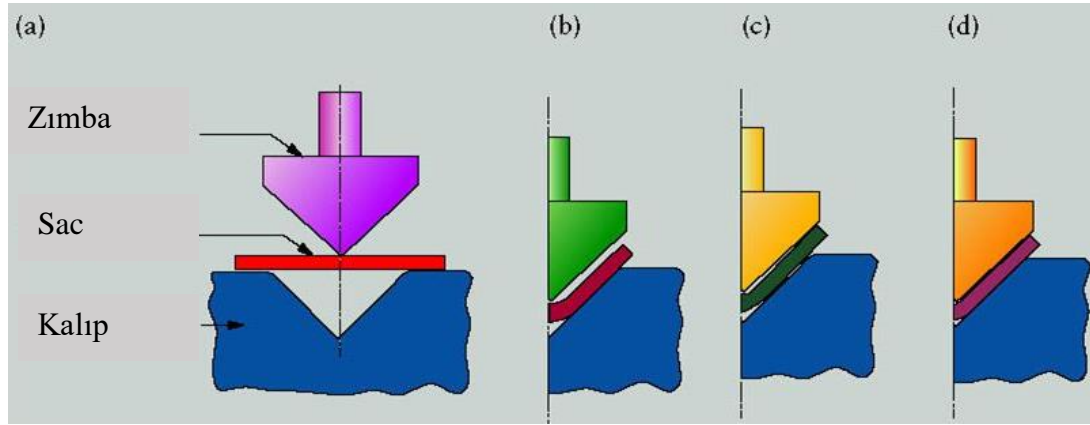


Şekil 7.29. Bükme açısına bağlı olarak tekil ve çift katmanlı sacların geri esneme oranları

Grafikte bükme açısının 90° olduğu durumda geri esneme oranı minimum düzeye inmektedir. Bu durum esasen işlemin yapılış biçiminden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada yapılan tüm bükme işlemleri kalıp 90° olan kalıpta yapılmıştır. Dolayısı ile 90°'den düşük büküm açıları elde etmek için zımba ilerlemesinden faydalanılmış bir başka deyişle havada bükme işlemi yapılmıştır. Havada bükme işlemlerinde bükülen sac metalin alt tarafı kalıba temas etmediğinden dolayı geri esneme miktarları daha fazla olmaktadır. 90°'lik bükme işleminde ise zımba strok sonuna gelerek kalıp sac metalin kalıp ile teması sağlanmaktadır. Bu sebeple geri esneme değeri oldukça düşmektedir.

Genellikle geri esneme işleminde bükme işleminde yük kaldırıldıktan sonra oluşan büküm açısı, yük kaldırılmadan önceki büküm açısından büyüktür ve bu geri esneme tipi pozitif geri esnemedir. Ancak V kalıpta bükme işlemi tamamlandıktan ve yük kaldırıldıktan sonra bükme açısı artar. Şekil 7.30'da (b) aşamasında bükülmüş parçayı çıkarırsak, pozitif geri yaylanacaktır. Bu durum çalışmada yapılan deneylerde 37.6° büküm açısında gerçekleşen durumdur. Şekil 7.30c'de parçanın uçları erkek

zımbaya temas eder. Şekil 7.30c ve Şekil 7.30d aşamalarında, parçanın uç kısımlarının aslında (b) aşamasındakinin tersi yönde büküldüğüne dikkat edilmelidir. Şekil 7.30'da (c) durumu yapılan deneylerde 67.3° 'lik büküm açısı ile benzerlik göstermektedir. Parçanın uç kısımları bir miktar ters yönde bükülmektedir. Parçanın büküm noktasında oluşan pozitif geri esneme, uç kısımlarda ters yönde oluşan geri esneme ile birleşerek net geri esnemeyi ilk duruma göre bir miktar azaltmaktadır.

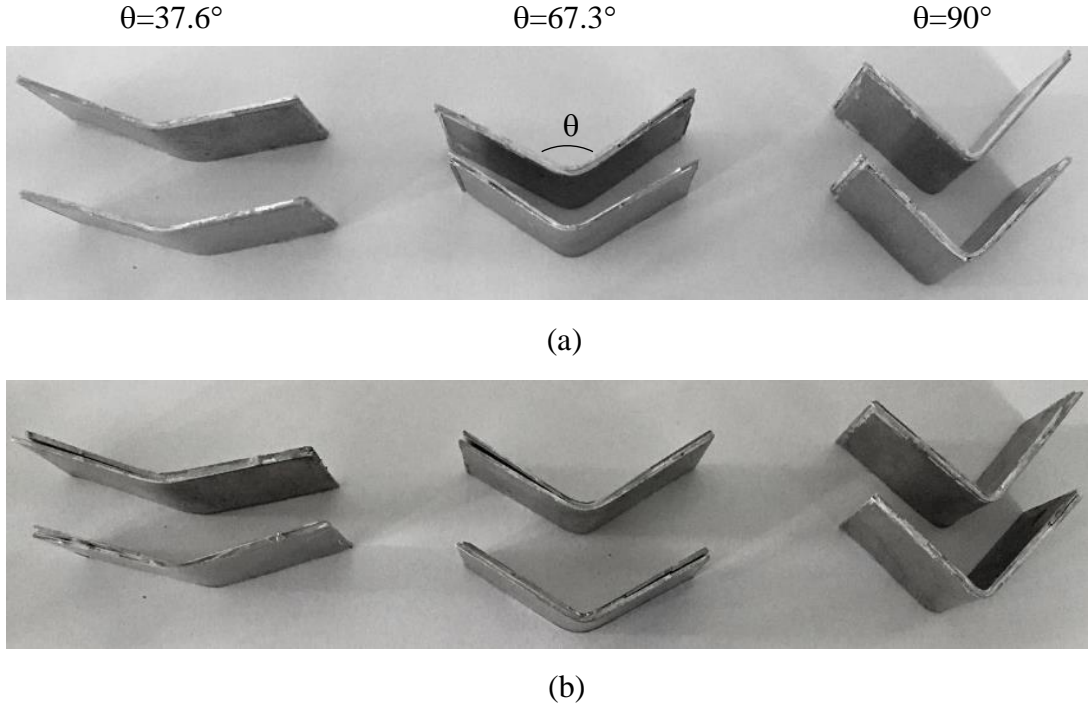


Şekil 7.30. V kalıpta bükme işleminin şematik gösterimi (Kalpakjian ve Schmid, 2007)

Şekil 7.30d'de kalıbın tam kapanmış hali verilmiştir. Bu aşamada, parça ile kalıp yarıçapı aynıdır. Deneylerde 90° 'lik bükme işlemi bu durum ile aynıdır. Yük boşaltıldığında, Şekil 7.30d'deki parçanın kol kısımlarındaki bükülme Şekil 7.30c'den daha fazladır. Ayrıca parçanın büküm kısmı kalıbın tam kapanması ile birlikte bir miktar ezilmektedir. Büküm noktasında oluşan bu ezilmeler geri esnemeyi azaltmaktadır. Zaten bu durum pratikte geri esnemeyi telafi etme yöntemi olarak da kullanılmaktadır. Sonuç olarak bu iki durum dikkate alındığında net geri esneme 37.6° ve 67.3° 'lik büküm açılarına göre oldukça az olacaktır.

Şekil 7.31a'da Al-Çe diziliminde ve Şekil 7.31b'de ise Çe/Al dizilimindeki bazı çift katmanlı sacların bükme işlemi sonrası durumları verilmiştir. Bükme işlemi genel olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çe/Al dizilimindeki numunelerde bükme işlemi sonrası katmanlar arasında ayrılmalar gözlenmiştir. Katmanlar arası ayrılmanın o bölgedeki geri esnmeden oluşan tepki kuvvetinin yapışma kuvvetini yenmesi sebebiyle gerçekleşmiştir. Yapıştırıcının bu bölgeye homojen dağılması ve düzgün bir yapışma gerçekleşmemesi sebebiyle bazı numunelerde katmanlar arası bütünlüğü sağlayan yapıştırma kuvveti düşük kalmıştır. Alüminyum sacın yüksek geri esneme oranına sahip olması sebebiyle Çe/Al diziliminde Al katman Çe katmandan

daha fazla geri esnemeye çalışmaktadır. Bu geri esnemenin yapıştırma kuvvetini yenmesi sebebiyle Çe/Al dizilimine sahip saclarda katmanlar arası ayrılmalar görülmüştür. Ayrılmaların özellikle düşük büküm açılarında gerçekleşmesi bu durumun geri esneme ile bağlantılı olduğunu göstermektedir. 90° büküm açısına sahip numunelerde katmanlar arası ayrılma görülmezken minimum geri esneme bu saclarda gerçekleşmiştir.



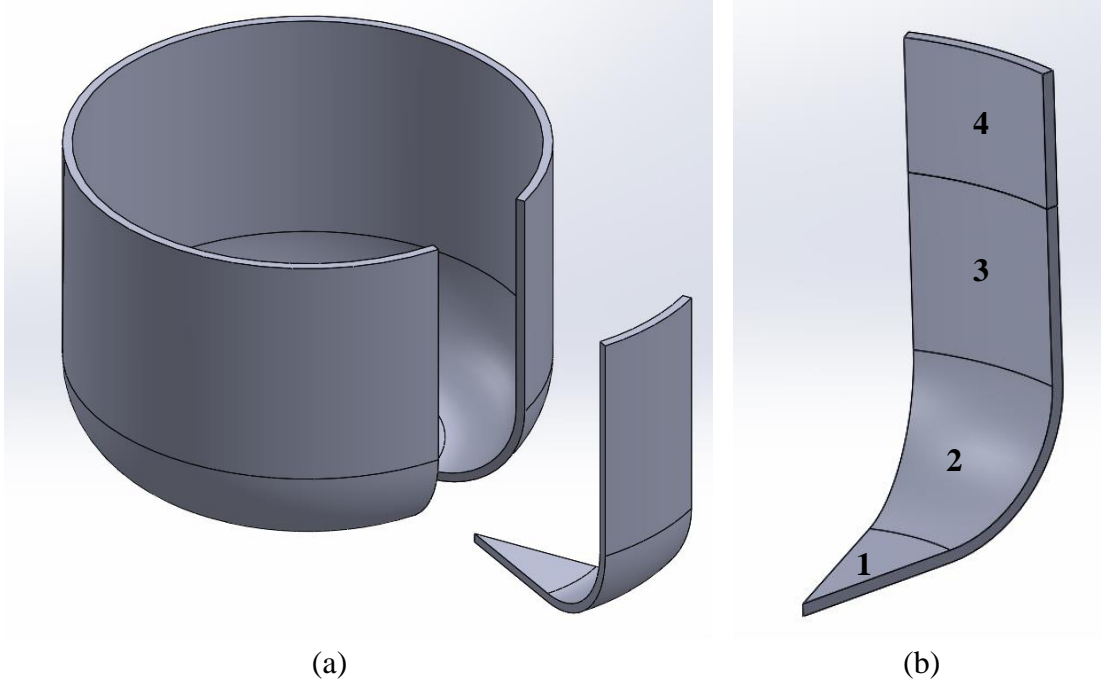
Şekil 7.31. Bükme işlemi sonrası bazı numuneler (a) Al/Çe dizilimi (b) Çe/Al dizilimi

7.11. Derin Çekme Yöntemiyle Üretilmiş Ürünlerin Yüzey Sertlik Değerleri

Derin çekme esnasında oluşan pekleşme durumunu tek ve çift katmanlı saclarda incelemek amacıyla derin çekilmiş numunelere sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçüm yöntemi olarak Bölüm 6.8'de açıklanan mikro Vickers testi kullanılmıştır. Numuneler ince sac olduğundan dolayı diğer yöntemlerde uygulanan yük, batıcı uç izinin sacın diğer tarafına geçmesine sebep olmaktadır. Bu durumda sağlıklı bir sertlik ölçümü yapılmamaktadır. Mikro sertlik ölçüm yöntemleri ile numuneye küçük yükler uygulanarak sac gibi ince numunelerin sertliklerinin ölçülmesi mümkün olmaktadır.

Sertlik ölçümü öncelikle derin çekme işlemi için kullanılan deforme edilmemiş sac numunelere uygulanmıştır. Böylelikle sacların derin çekme işlemi öncesi sertlikleri belirlenmiştir. Derin çekilmiş numunelerden bir dilim kesilmiş (Şekil

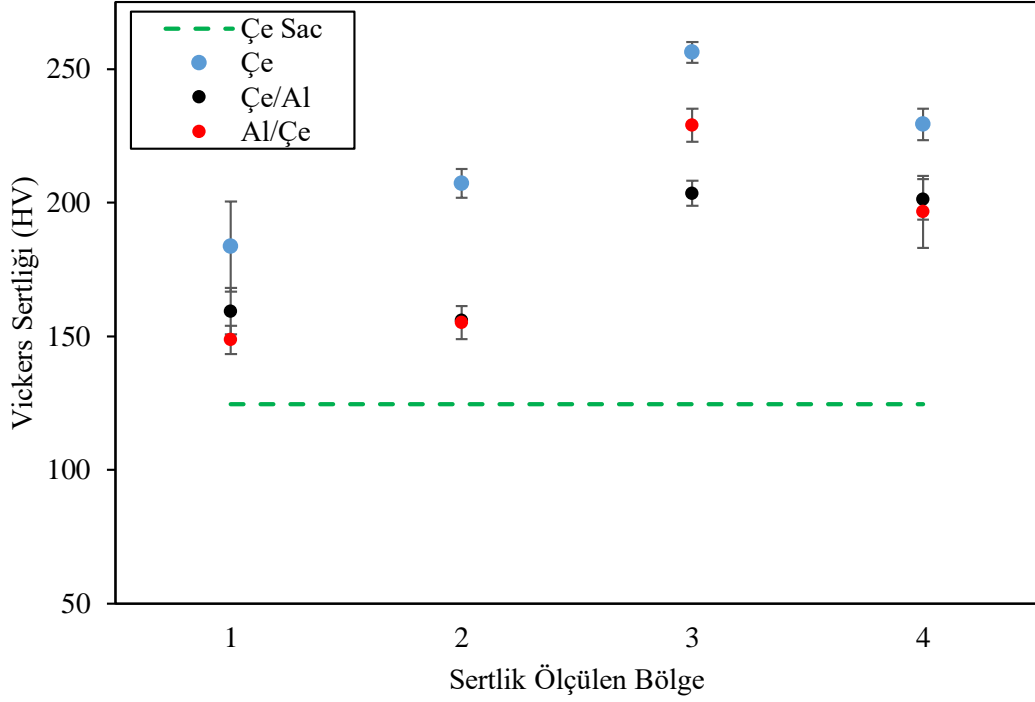
7.32a), bu dilim 4 farklı bölgeye ayrılmıştır (Şekil 7.32b). Daha sonra tek saclardan derin çekilmiş numunelerin ve çift katmanlı saclardan çekilmiş numunelerin her bir katmanından belirlenen bölgelerden sertlik ölçümleri tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelere mikro Vickers sertlik ölçümleri 2.94 N'luk yük altında yapılmıştır.



Şekil 7.32. (a) Derin çekilmiş numunenin şematik gösterimi (b) Sertlik ölçümü alınan bölgeler

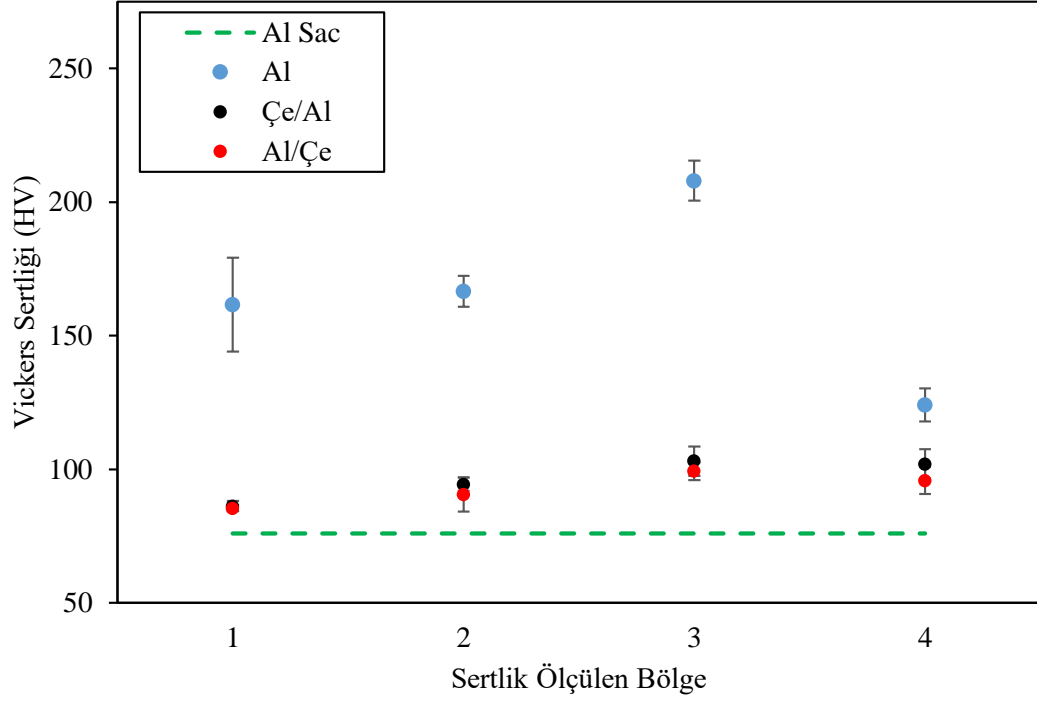
Şekil 7.33'te çelik sac numunelere ait sertlik değerleri verilmiştir. Grafikte yatay eksen sertlik ölçümünün alındığı bölgeyi, dikey eksen ise sertlik değerini vermektedir. Yeşil kesikli çizgi ile gösterilen değer çelik sacın derin çekme işleminden önce düz sac halindeki sertlik değeridir. Bu değer çelik sac için yaklaşık 125 HV olarak belirlenmiştir. Tek çelik sacdan derin çekilmiş numuneye ait sertlik değerleri mavi çizgi ile gösterilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere en yüksek sertlik değerleri tek sac ile derin çekilmiş numunelerden elde edilmiştir. 1. bölgede 184 HV sertlik ölçülürken 2. bölgede bu değer bir miktar artarak 207 HV olarak ölçülmüştür. 3. bölgede sertlik değeri maksimuma ulaşarak 256 HV olarak belirlenmiştir. 4. bölgede ise tekrar azalarak 229 HV'ye gerilemiştir. Çift katmanlı saclarda ise sertlik değerleri tek sac ile aynı trendi izlemesine rağmen daha düşük seviyede kalmıştır. 1. ve 2. bölgede yaklaşık 155 HV sertlik değeri ölçülürken 3. bölgeye gelindiğinde zımbanın çelik sac ile temas ettiği durumda 203 HV, çelik sacın dış katmanda kaldığı durumda

ise 229 HV sertlik değeri ölçülmüştür. 4. bölgede ise sertlik değeri yine azalarak yaklaşık 200 HV değerine ulaşmıştır. Ayrıca basım yönünün etkisi 3. Bölge dışında diğer bölgelerde görülmemiştir.



Şekil 7.33. Tek ve çift katmanlı çelik sacların derin çekme işlemi sonrası sertlik değerleri

Şekil 7.34'te alüminyum sac numunelere ait sertlik değerleri verilmiştir. Grafikte alüminyum sacın derin çekilmeden önce düz haldeki sertlik değeri yeşil kesikli çizgi ile yaklaşık 76 HV olarak verilmiştir. Tek alüminyum sacın derin çekme sonrası sertliğinin oldukça arttığı görülmüştür. 1. bölgedeki sertlik değeri 161 HV, 2. Bölgede 167 HV olarak ölçülmüştür. Yine 3. bölgede artarak 208 HV değerine kadar çıkmıştır. 4. bölgede ise ani bir düşüş ile 124 HV değerine ulaşmıştır. Diğer taraftan çift katmanlı saclarda alüminyum katmanının sertlik değeri tek saca göre oldukça düşük kalmıştır. 1. bölgede basım yönü fark etmeksizin 85 HV olan sertlik değeri lineer bir artış ile 3. bölgede yaklaşık 100 HV değerine ulaşmıştır. Sertlik 4. bölgede ise az miktarda düşerek yaklaşık 96 HV değerinde kalmıştır.

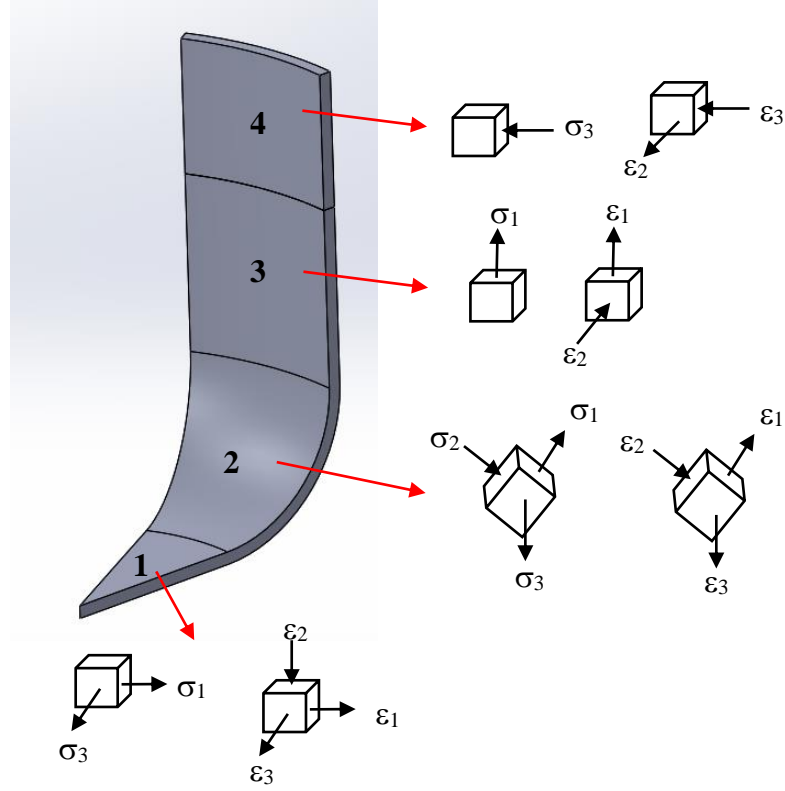


Şekil 7.34. Tek ve çift katmanlı alüminyum sacların derin çekme işlemi sonrası sertlik değerleri

Malzeme içerisindeki dislokasyonların varlığı şekil değiştirme (kayma) için gerekli kayma gerilmesini düşürmesine rağmen, dislokasyonlar malzeme içinde karışık ve iç içe geçmiş olabilir. Ayrıca malzeme içindeki tane sınırları, safsızlıklar ve katışkılar gibi engeller tarafından dislokasyonların hareketi engellenir veya geciktirilir. Bu gibi durumlar malzemenin şekil değiştirmesi için gerekli kayma gerilmesini artırır. Kayma gerilmesindeki bu artış aynı zamanda malzemenin genel dayanımını da artırır. Bu durum *pekleşme* olarak adlandırılır (Kalpakjian ve Schmid, 2007). Dolayısı ile malzemenin daha çok deforme edilmesi, daha fazla dislokasyonun karışarak ve birbirini engelleyerek malzemenin dayanımının artmasına sebep olur.

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda özellikle tek sacların yüksek oranda pekleşerek ilk duruma göre 1.5 ile 2 kat oranında sertliklerinin arttığı görülmüştür. Derin çekme işleminde malzeme büyük oranda şekil değiştirdiğinden dolayı pekleşmektedir. Ayrıca derin çekme işlemi sırasında sac malzemenin farklı bölgelerinde farklı deformasyon durumları olduğu (Şekil 7.35) için pekleşme derecesi deformasyon bölgelerine göre değişmektedir. Şekil 7.35'te görülen derin çekme işleminde taban kısmında (1) sac, düzlem üzerindeki iki doğrultuda uzamakta, kalınlık doğrultusunda ise incelmektedir. (2) ile gösterilen zımba kavisinin olduğu kısımda yine taban kısmında görülen deformasyonlar oluşmaktadır. Kupa duvarlarının

olduğu (3) ile gösterilen bölümde ise malzeme tek eksenli çekmeye maruz kalmaktadır. Bir başka deyişle malzeme işlem doğrultusunda uzarken, kalınlığı azalmaktadır. Diğer eksende ise herhangi bir şekil değişimi oluşmamaktadır. Bu durumda malzeme düzlem şekil değişiminin etkisi altıdadır. Diğer taraftan (4) ile gösterilen blgedede malzeme baskı plakasından ve kalıp kavisinden kurtulmuştur. Sadece kalıp şeklini almaya zorlayan çevresel bası gerilmesi malzemeye etki etmektedir. Bu gerilmenin etkisi ile malzeme bu blgedede kalınlaşmaktadır. şekil 7.35'te görülen numune derin çekme işleminin en son aşamasını temsil etmektedir. Numune bu hale gelmeden önceki aşamada, (4) ile gösterilen bölge baskı plakası ile kalıp arasında σ_2 yönünde bası gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu aşamada ezilen yüzey, baskı plakası kuvvetinden kurtulduktan sonra ϵ_3 şekil değişirmesi ile kalıp şeklini almaya zorlanmakta ve bu esnada ezilen yüzey ϵ_2 şekil değişirmesi ile tam tersi yönde bir deformasyona uğramaktadır. Bu ters yöndeki deformasyon bir başka deyişle malzemenin kalınlaşması, içyapı içerisindeki dislokasyon yığılmalarını bir miktar azaltarak malzemenin (3) numaralı bölgeden daha yumuşak olmasını sağlamaktadır. Ancak daha önceki aşamalarda flanş bölgesinde maruz kaldığı deformasyonlar ile düz saca göre daha sert olmaktadır.



Şekil 7.35. Derin çekme işleminde oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler

Yukarıda anlatıldığı üzere derin çekme işleminden sonra yapılan sertlik ölçümleri malzemede gerçekleşen plastik şekil değişimleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda bu durumu doğrular niteliktedir. Birçok araştırmacı sertlik ile şekil değişimi arasında bir bağlantı kurmaya çalışmış ve yapmış oldukları deneyler ile sertlik-şekil değişimi bağlantısını doğrulamışlardır (Milman vd., 1993; Kim vd., 1996; Tekkaya, 2001; Cotterell vd., 2002; Mkaddem vd., 2006; Sonmez ve Demir, 2007; Wang ve Chan, 2011; Zottis vd., 2018). Bu doğrultuda yapılan sertlik ölçümleri sonucunda tek sacların oldukça yüksek bir plastik şekil değişimine maruz kaldığı görülürken çift katmanlı yapı ile bu şekil değişimlerinin azaldığı görülmüştür. Derin çekme işlemi açısından bakıldığında ise en fazla şekil değişiminin sertliğin en fazla artış gösterdiği 3. bölgede meydana geldiği belirlenmiştir.

8. ÇİFT KATMANLI SACLARIN SONLU ELEMANLAR METODUYLA MODELLENMESİ

Tez çalışmasında yapılan derin çekme deneyleri, numerik olarak tahmin edilebilmesi için sonlu elemanlar programı ile sac modeller tasarlanmış ve derin çekme deformasyonu simüle edilmiştir.

Bu bölüm;

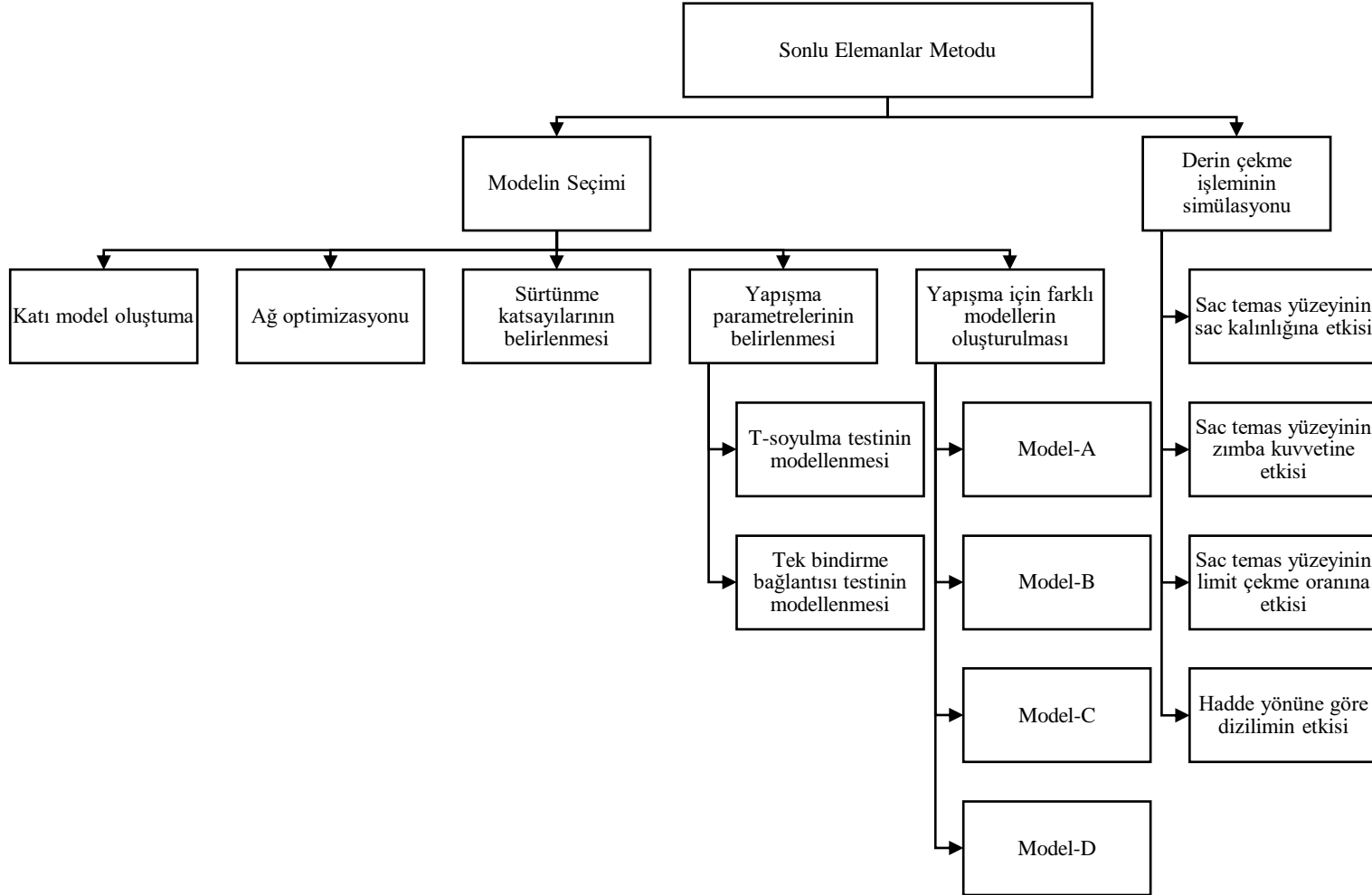
- Çift katmanlı sac model tasarımı ve sacları en iyi simüle eden modelin belirlenmesi
- Çift katmanlı saclara yapılan derin çekme işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilmesi

şeklinde iki kısımdan oluşmaktadır.

İlk kısımda çift katmanlı sacların sonlu elemanlar modeli için farklı varsayımlar yapılmıştır. Katmanlar arasındaki yapışmanın özelliklerini belirleyen ve daha önce deneysel olarak gerçekleştirilen T-soyulma ve tek bindirme bağlantısı testleri modellenmiştir. Yapışmanın modellenmesi için gerekli olan parametreler girilmiştir. Daha sonra çift katmanlı sacları simüle etmek için kullanılabilen 4 farklı sonlu elemanlar modeli (Model-A,B,C ve D) oluşturulmuştur. Modeller birbirleri ile kıyaslanarak deneysel sonuçları en yakın tahmin eden model seçilmiştir. Sonuçta deneysel çalışmaları gerçeğe yakın simüle edebilen, deney yapmadan veya daha az deney yaparak gerçeğe yakın sonuçlar alabilecek bir sonlu elemanlar modeli önerilmiştir.

İkinci kısımda ise ilk kısımda oluşturulan model ile deneysel yapılmış derin çekme testleri simüle edilmiştir. Simülasyonlar ile deney esnasında incelenmesi mümkün olmayan şekillendirme durumları incelenerek tartışılarak yorumlar yapılmıştır.

Bu bölümde yapılan işlemlerin ilişki şeması Şekil 8.1’de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. Çift katmanlı sacların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi

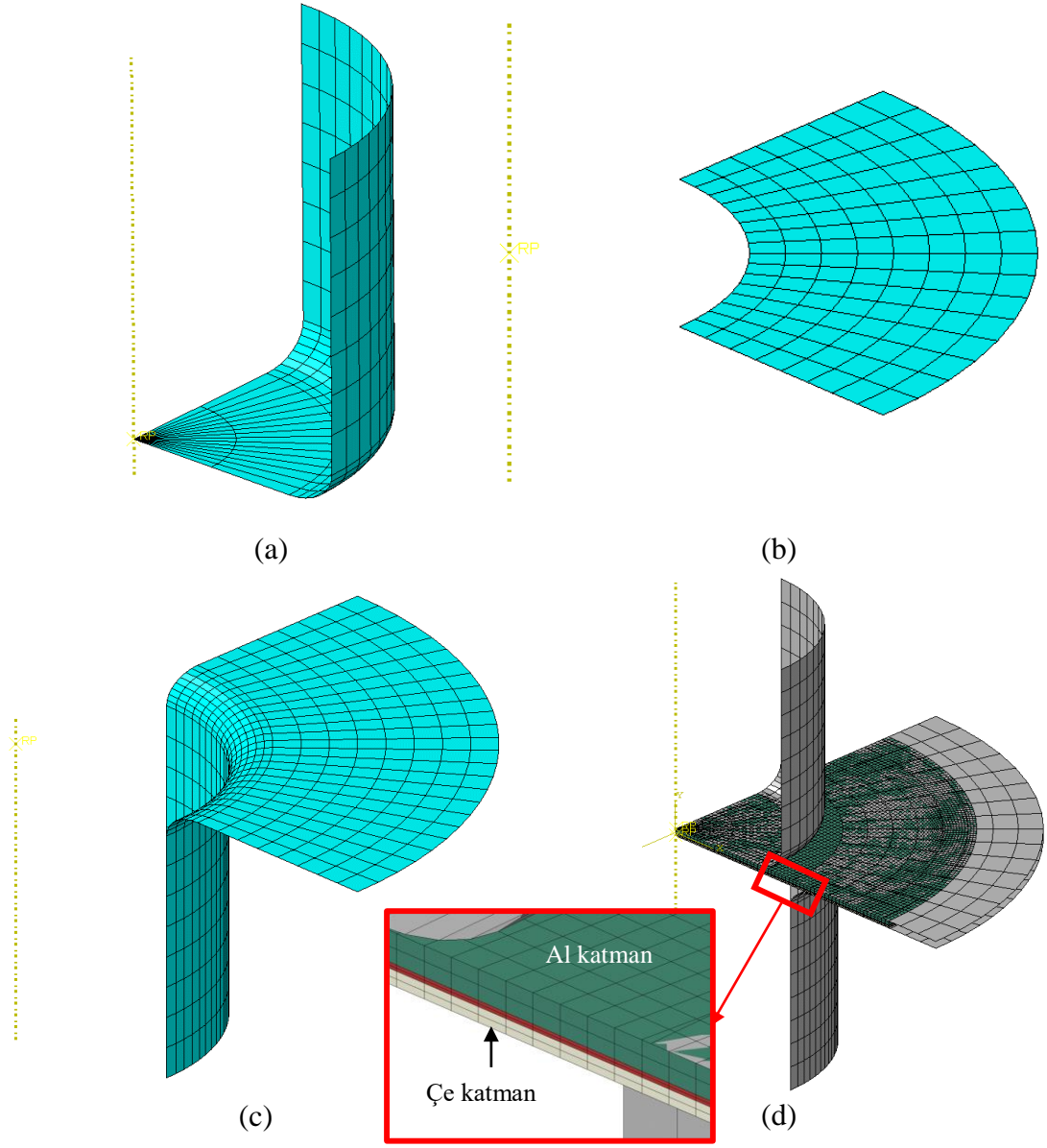
8.1. Sonlu Elemanlar Metodu ile Modelleme

Çift katmanlı sacları gerçeğe en yakın şekilde simüle edebilen sonlu elemanlar modeli bu bölümde belirlenmiştir. Çift katmanlı sac modeli belirlenirken yapılan tüm işlemler ilgili başlıklar altında ifade edilmiştir.

8.1.1. Sacların Katı Modellenmesi

Deneysel yapılan derin çekme işleminin simüle edilebilmesi için deneylerde kullanılan dişi kalıp, baskı plakası (pot çemberi), zımba ve sac ayrı ayrı modellenmiştir. Katı modeller, ABAQUS/CAE® programında tasarlanmıştır. Tüm simülasyonlarda aynı kalıp modelleri kullanılmıştır. Kalıbın simetrik yapısı sebebiyle modelin $\frac{1}{4}$ 'ü oluşturulmuştur. Kalan kısmı simetrik sınır koşullarından faydalanılarak simüle edilmiştir. Bu tür bir eksen etrafında simetrik olan modellerde iki boyutlu modeller de kullanılabilir. Ancak çalışmada kullanılan sacların anizotropik özellikte olması ve bu durumun simülasyon sonuçlarını etkilemesi nedeni ile üç boyutlu model tercih edilmiştir.

Derin çekme işleminde sadece sac metalin şekil değiştirdiği, kalıp elemanlarının ise şekil değiştirmedikleri kabul edilmiştir. Çünkü derin çekme işleminde sac metal yüksek oranda plastik şekil değişimine maruz kalırken, kalıp elemanları üzerinde sadece az miktarda elastik şekil değişimi olmaktadır. Bu elastik şekil değişimi simülasyon sonuçlarına etki etmemektedir. Dolayısıyla ile tasarlanan modelde sadece sac metal şekil değiştirebilir eleman olarak modellenmiştir. Kalıp ve kalıp elemanları ise "Rijit" olarak kabul edilmiştir. Rijit olarak modellenen kalıp elemanları herhangi bir şekil değişimi ve gerilmeye maruz kalmaz. Bu sebeple, modellenen kalıp ve elemanların kalınlığının bir önemi olmamakla birlikte, sadece sac metal ile temas eden yüzeylerinin oluşturulması yeterlidir. Yapılan kabuller doğrultusunda oluşturulan kalıp elemanları Şekil 8.2a, b ve c'de verilmiştir. Rijit kalıp elemanları, üç boyutlu dört düğüm noktalı rijit dörtkenar (R3D4) eleman tipi kullanılarak ağ yapısı (mesh) oluşturulmuştur. Sac metal modelinde ise deforme edilebilir üç boyutlu sekiz düğüm noktalı (C3D8R) eleman tipi kullanılmıştır. Bütün modellerin montajlanmış halleri Şekil 8.2d'de verilmiştir.



Şekil 8.2. Kalıp elemanlarının ¼ modelleri (a) Zimba (b) Baskı plakası (c) Dişi kalıp (d) Montaj görünüşü

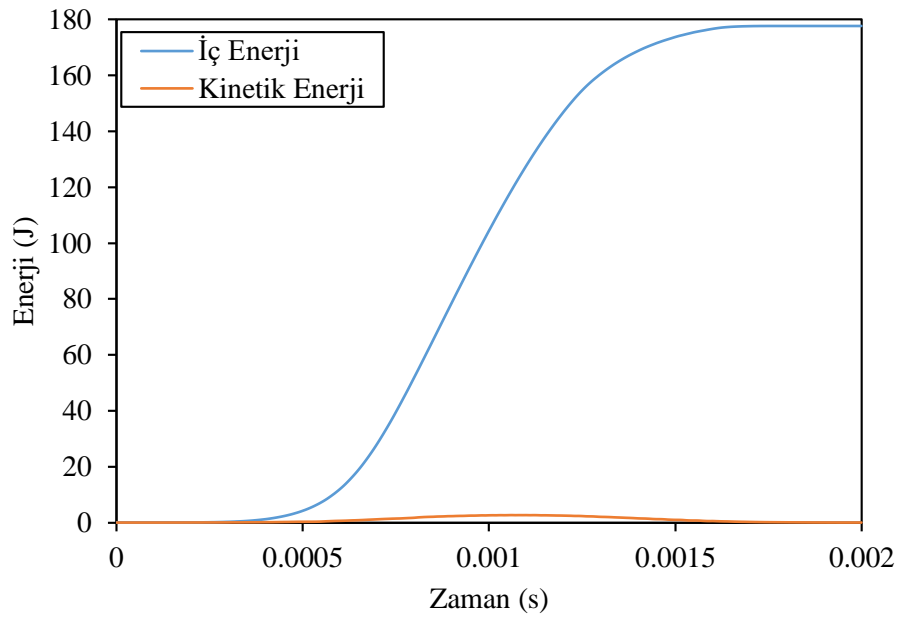
8.1.2. Adım Süresinin Belirlenmesi

Derin çekme işleminde işlem süresi malzemede dinamik etki oluşturmayacak kadar uzun bir süredir. Dinamik etki, malzemenin çok kısa sürede yüksek deformasyona maruz kalması durumudur. Bu gibi durumlarda malzemeye etki eden atalet kuvvetlerinin ($Kuvvet = Kütle \times İvme$) dikkate alınması gereklidir. Şekillendirme işlemlerinde ise malzeme şekil değişimi dinamik duruma göre daha yavaş gerçekleşir. Bu sebeple şekillendirme işlemleri sanki statik (quasi static) olarak kabul edilir. Çalışmada oluşturulan modeller için adım süresi (step time) belirlenmelidir. Adım süresi arttığında hesaplama süresi artmakta, azaldığında ise

işlem çok kısa sürede gerçekleştiği için dinamik etkiler oluşmakta ve çözüm gerçek sonuçlardan uzaklaşmaktadır.

Tasarlanan sac modellerde dinamik etki oluşmaması için adım süresi malzemenin 1. doğal frekansından fazla olmamalıdır (Abaqus Manual, 2007). Yapılan frekans simülasyonu ile malzemenin 1. doğal frekansının alüminyum için yaklaşık 1124.8 s^{-1} , çelik için 548.52 s^{-1} olarak belirlenmiştir. Adım süresi bu frekans değerlerinin tersi alınarak belirlenmektedir. Buna göre alüminyum için minimum adım süresi $0.00089 \text{ (1/1124.8) s}$, çelik için $0.0018 \text{ (1/548.52) s}$ olarak belirlenebilir. Bu değerler malzemenin dinamik etkiye maruz kalmaması için işlemin gerçekleşebileceği en kısa zaman aralığı değerleridir. Buna göre tüm modelleri kapsayacak şekilde uygun adım süresi 0.002 s olarak belirlenmiştir.

Yapılan simülasyonlarda dinamik etki olup olmadığı iç enerji ile kinetik enerji karşılaştırılarak belirlenmiştir. Şekil 8.3’de belirlenen adım süresinde yapılan simülasyonun işlem süresince iç enerji ile kinetik enerji değişimi verilmiştir. Dinamik etkinin olmadığı kabulü yapılabilmesi için maksimum kinetik enerji değerinin maksimum iç enerji değerine oranı %5’i geçmemelidir. Şekil 8.3’te maksimum kinetik enerji (2.6 J) değeri maksimum iç enerji değerine (177.6 J) oranlandığında %1.47 bulunmuştur. Dolayısı ile 0.002 s olarak seçilen adım süresi sanki statik (quasi static) analiz için yeterli bir süre olarak kabul edilmiştir.

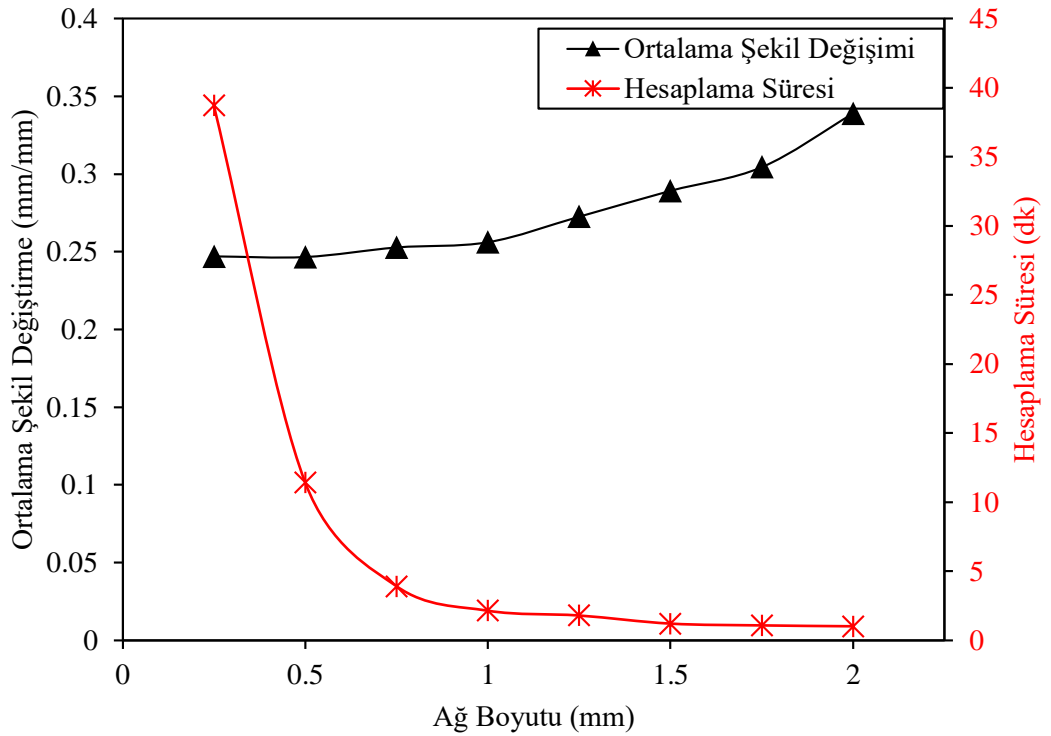


Şekil 8.3. Belirlenen adım süresine (0.002 s) göre iç enerji ve kinetik enerjinin değişimi

8.1.3. Ağ Boyutunun Optimizasyonu

Yapılan ön denemelerde rijit elemanların ağ boyutunun simülasyon sonuçlarını değiştirmedeği görülmüştür. Ancak şekil değiştirebilir eleman tipinin boyutları simülasyon sonuçlarını ve hesaplama süresini değiştirmektedir. Bu sebeple farklı boyutlardaki ağ yapıları ile hesaplama yaptırılarak optimum ağ boyutu, hesaplama süresi ve simülasyon sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir.

Adım süresinin belirlenmesinin ardından bu adım süresinde uygun olan ağ boyutunun belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmada 0.25 mm ile 2 mm arası ağ boyutları 0.25 mm arttırılarak 8 farklı model oluşturulmuştur. Simülasyonların sonuçları, malzemenin radyal doğrultudaki kalınlık değişimlerinin ortalaması alınarak birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 8.4'te ağ boyutuna bağlı olarak ortalama şekil değişimi ve hesaplama süresini gösteren grafik verilmiştir. Grafiğin sol taraftaki dikey eksen ortalama şekil değişimini göstermekte, sağ taraftaki dikey eksen ise programın modeli tamamen hesaplaması için gereken süreyi göstermektedir. Aynı şekilde siyah eğri ile şekil değişimi, kırmızı eğri ile hesaplama süresi gösterilmiştir.



Şekil 8.4. Ağ (mesh) boyutuna göre şekil değişimi ve hesaplama süresinin değişimi

Sonlu elemanlar metodunda ağ (mesh) boyutu küçüldükçe çözümün doğruluğu artmaktadır. Diğer taraftan ağ boyutu küçüldükçe sonlu elemanlar programının (ABAQUS®) modeli hesaplama süresi artmaktadır. Şekil 8.4'teki grafiğe göre ağ boyutu küçüldükçe, şekil değişiminde bir miktar azalma meydana gelmektedir. Ancak ağ boyutu 0.75 mm ve altına düştükçe ortalama şekil değişimi benzer sonuçlar vermektedir. Programın modeli çözmek için ihtiyaç duyduğu süre ise (hesaplama süresi) ise 2 mm ağ boyutu için yaklaşık 1 dk sürerken ağ boyutu küçüldükçe hesaplama için gereken zaman giderek artmaktadır. Özellikle 0.75 mm'den küçük ağ boyutlarında hesaplama süresi eğrisinin eğimi dikleşmektedir. Yapılan simülasyonlar neticesinde en uygun ağ boyutunun 0.75 mm olduğuna karar verilmiştir. Çünkü, bu değerden daha küçük ağ boyutlarında, sonuçlarda anlamlı bir değişiklik olmazken hesaplama süresi önemli ölçüde artmaktadır. Tüm simülasyonlarda bu ağ boyutu kullanılmıştır.

8.1.4. Yüzeyler Arası Sürtünme Katsayılarının Belirlenmesi

Sürtünme, temas yüzeyi çiftine göre değişen izafi bir kavramdır. Derin çekme esnasında yüzeylerin yüksek basınçlara maruz kalması sebebiyle sürtünme durumu farklılık gösterir. Bu sebeple, derin çekme işlemlerini etkileyen parametrelerden birisi olan sürtünme katsayısını (μ) belirlemek zordur. Yapılan simülasyonlarda, yüzeyler arası sürtünme katsayısı deneme-yanılma yöntemi ile tespit edilmiştir.

DeneySEL olarak farklı baskı kuvvetleri altında birçok deney yapılmıştır. Bu deneylerde malzemeler belirli bir baskı kuvvetine kadar başarılı bir şekilde çekilirken, bu değer üstündeki baskı kuvvetinde hasara uğramaktadır. Simülasyonlarda öncelikle tüm yüzeyler arası sürtünmesiz olarak bir model oluşturulmuştur. Bu model ile maksimum baskı plakası kuvveti altında çekilebilecek maksimum sac çapları belirlenmiştir. Daha sonra bu modele sürtünme katsayısı eklenmiş ve deneySEL sonuçlar ile aynı değerler elde edilene kadar sürtünme katsayıları değiştirilmiştir. Simülasyonlarda sürtünme katsayıları değiştirilerek yapılan farklı denemeler sonucunda Tablo 8.1'de verilen sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Bundan sonraki yapılan simülasyonlarda, tablodaki sürtünme katsayıları kullanılmıştır. Özellikle alüminyum katmanda sürtünme katsayılarının düşük olduğu görülmektedir. Deneyler esnasında alüminyum katman yağsız veya yağlı derin çekildiğinde sacların yırtıldığı görülmüştür. Bu durumda kalıp yüzeyleri ve sacın yağlanmasına ek olarak işlem

sırasında sac ile kalıp yüzeyleri arasına ince naylon poşet koyularak sürtünme asgari seviyeye indirilmiş ve başarılı derin çekme ürünleri elde edilmiştir. Simülasyonlarda alüminyum katman ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısının düşük çıkması deneysel sonuçlar ile örtüşmektedir.

Tablo 8.1. Yüzeyler arası sürtünme katsayıları (μ)

Malzeme	Kalıp (Çelik)	Zımba (Çelik)	Baskı Plakası (Çelik)
Alüminyum Sac	0.0007	0.008	0.005
Çelik Sac	0.09	0.1	0.1

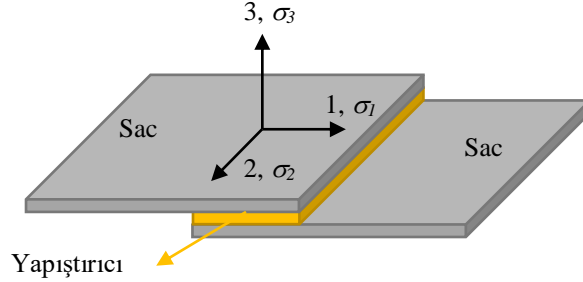
8.1.5. Sac Yüzeyler Arası Yapışma Modeli

Sac metallerin yapıştırılması ile oluşturulan çift katmanlı saclarda iki sacın birbirine tutunmasını sağlayan yapışma durumunun sonlu elemanlar programında modellenmesi gerekmektedir. Deneysel derin çekmede saclar arasına sürülen yapıştırıcı sac yüzeyi ile bir bağ kurarak yüzeye tutunmaktadır. Simülasyonda sac yüzeyine tutunmayı sağlayan kuvvetlerin bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Klasik Columb sürtünme durumu bu durumu ifade etmede yetersiz kalmaktadır. Çünkü çift katmanlı saclar arasında sürtünme durumundan farklı olarak yüzeylerin birbiri ile yapışması söz konusudur. Bu yapışma soyulma ve kayma durumlarına göre farklı dayanıma sahip olup, bu dayanım aşıldığında yüzeyler tamamen birbirinden ayrılmayıp kademeli olarak bir hasar oluşmakta ve devam etmektedir.

Çalışmada kullanılan çift katmanlı yapıyı simüle edebilmek için yüzeyler arasında “Yapışkan Bölge Modeli, YBM” (Cohesive Zone Modelling, CZM) kullanılmıştır (Abaqus Manual, 2007). YBM, ara yüzeylerdeki ayrılmayı modellemek için çekme yüküne karşı meydana gelen ayrılmayı kullanır. Bir başka deyişle yapışmış yüzeyleri sökmek için uygulanan kuvvete karşılık yüzeylerin birbirinden ayrılma mesafesini dikkate alır. Yapışkan, bir miktar elastik uzamaya izin verdiği için YBM hasardan önce yüzeyler arasında bir elastik çekme-ayrılma durumu olduğunu kabul eder. Bu elastik sınırın aşılması durumunda YBM yapışkan bağındaki hasarın, yapışkan rijitliğinin aşamalı olarak bozulması ile oluştuğunu varsayar.

Yapışkan bölge modelinde hasar, yapışma gerilmelerini içeren ikinci dereceden bir denklemin “1” değerine ulaşması ile başlar (Liu vd., 2013). (8.1) denkleminde σ_1 , σ_2 , σ_3 sırasıyla birinci, ikinci ve yüzey normal kayma yönlerindeki gerilmeyi

göstermektedir (Şekil 8.5). σ_1^0 , σ_2^0 , σ_3^0 ise sırasıyla ayrılmanın sadece birinci kayma doğrultusunda, sadece ikinci kayma doğrultusunda ve sadece temas yüzeyinin normalinde olduğu durumlardaki kritik gerilmeleri ifade etmektedir.



Şekil 8.5. Yapışkan yüzey modelinde normal, birinci ve ikinci kayma doğrultuları

$$\left\{ \frac{\langle \sigma_1 \rangle}{\sigma_1^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle \sigma_2 \rangle}{\sigma_2^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle \sigma_3 \rangle}{\sigma_3^0} \right\}^2 = 1 \quad (\text{Liu vd., 2013}) \quad (8.1)$$

Denklem (8.1) sadece hasar başlangıcını temsil etmektedir. Ancak hasar başladıktan sonra ilerleyerek gelişmektedir. YBM’de hasarın ilerlemesini ifade etmek için bir enerji ifadesi kullanılmaktadır. Yapışmış yüzeylere hem normal hem de kayma yönlerinde (karışık mod) çekme olması durumunda oluşacak olan hasarın enerjisi bir güç kanunu ile tanımlanabilir. Bu güç kanunu karışık mod altında oluşan hasarın, tek modların (normal veya kayma modu) oluşturacağı hasar için gereken enerjilerin toplamı ile ifade edilmesidir. Bu güç kanunu (8.2) denklemi ile ifade edilmiştir. Bu denklemde G_1 , G_2 , ve G_3 sırasıyla birinci, ikinci kayma doğrultuları ve yüzeyin normali doğrultusundaki ayrılma için gerekli olan Griffith hasar enerjisini ifade etmektedir. G_1^C , G_2^C , ve G_3^C ise sırasıyla birinci ve ikinci kayma doğrultuları ile yüzeyin normali doğrultusunda hasar oluşması için gereken kritik hasar enerjilerini ifade etmektedir.

$$\left\{ \frac{G_1}{G_1^C} \right\} + \left\{ \frac{G_2}{G_2^C} \right\} + \left\{ \frac{G_3}{G_3^C} \right\} = 1 \quad (\text{Liu vd., 2013}) \quad (8.2)$$

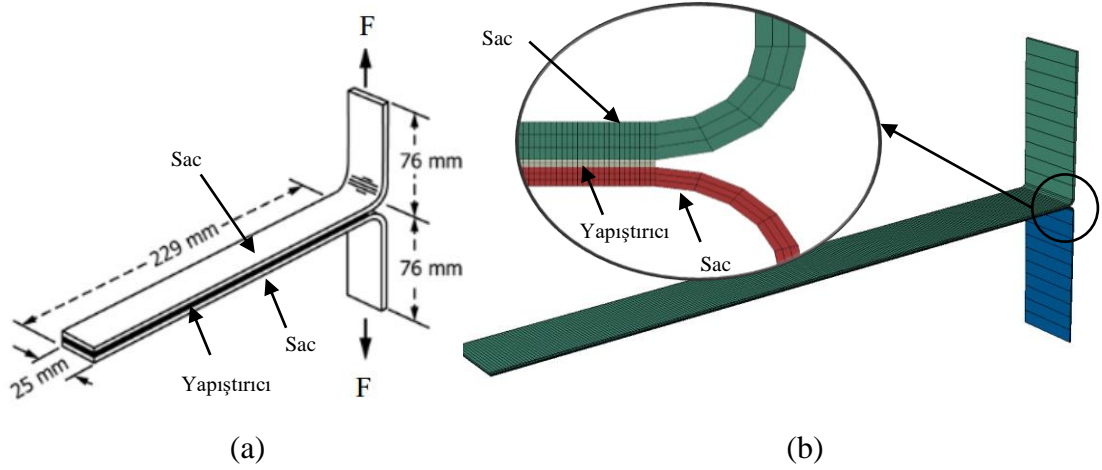
ABAQUS® sonlu elemanlar programında YBM’yi modellemek için σ_1^0 , σ_2^0 , σ_3^0 , G_1^C , G_2^C , ve G_3^C değerlerinin girdi olarak verilmesi gerekmektedir. Bu değerlerden normal doğrultuda olan σ_3^0 ve G_3^C değerleri T-soyulma (T-peel) testi ile σ_1^0 , σ_2^0 , G_1^C , ve G_2^C değerleri ise tek bindirme bağlantısı testi ile belirlenmektedir. Deneysel olarak gerçekleştirilen bu testler sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş

ve bir algoritma ile iterasyon yapılarak YBM için gerekli olan girdiler belirlenmiştir. Bu girdilerin elde edilmesinde izlenen yöntem aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

8.1.5.1. T-Soyulma (T-Peel) Testinin Modellenmesi

T-soyulma testi yapıştırıcının yüzey normali doğrultusundaki dayanımını belirlemek için yapılan bir testtir (ASTM D1876-08, 2015). Bu testte L şeklinde bükülmüş iki sac metal bir yapıştırıcı ile birbirine T şekli oluşturacak biçimde yapıştırılır. Daha sonra çekme testi yapılarak yapıştırıcının soyulmaya karşı direnci belirlenir. Daha önce Bölüm 7.1.1’de çalışmada kullanılan yapıştırıcının soyulma direnci bu test ile deneysel olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada deneysel gerçekleştirilen T-soyulma testi ABAQUS® sonlu elemanlar programı ile modellenerek yapışmanın girdi parametreleri (sınır şartları) belirlenmiştir. ABAQUS® sonlu elemanlar programı ile iki yüzey arasındaki yapışma davranışı yapışkan bölge modeli (cohesive zone model, CZM) ile simüle edilebilmektedir. Programdaki bu modeli kullanabilmek için yapıştırıcı malzemenin yöne bağlı mekanik özelliklerinin (σ_3^0 ve G_3^C) belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada yapıştırıcının normal doğrultudaki (kalınlık boyunca) mekanik özelliklerini belirlemek için T-soyulma testi kullanılmıştır. T-soyulma testi yapışkan bağlayıcıların soyulma direncinin belirlenmesinde kullanılan standart bir test metodudur (ASTM D1876-08, 2015). Bu metoda göre T şeklinde yapıştırılan numuneler kulak kısımlarından çekilerek ayrılmaya zorlanmaktadır (Şekil 8.6a). Çekme esnasında yapıştırıcının ayrılmaya karşı göstermiş olduğu direnç kuvveti çekme mesafesine bağlı olarak kayıt edilmiştir. T-soyulma numunesi gerçektekine uygun ABAQUS/Standart sonlu elemanlar programında katı modellenmiştir (Şekil 8.6b).



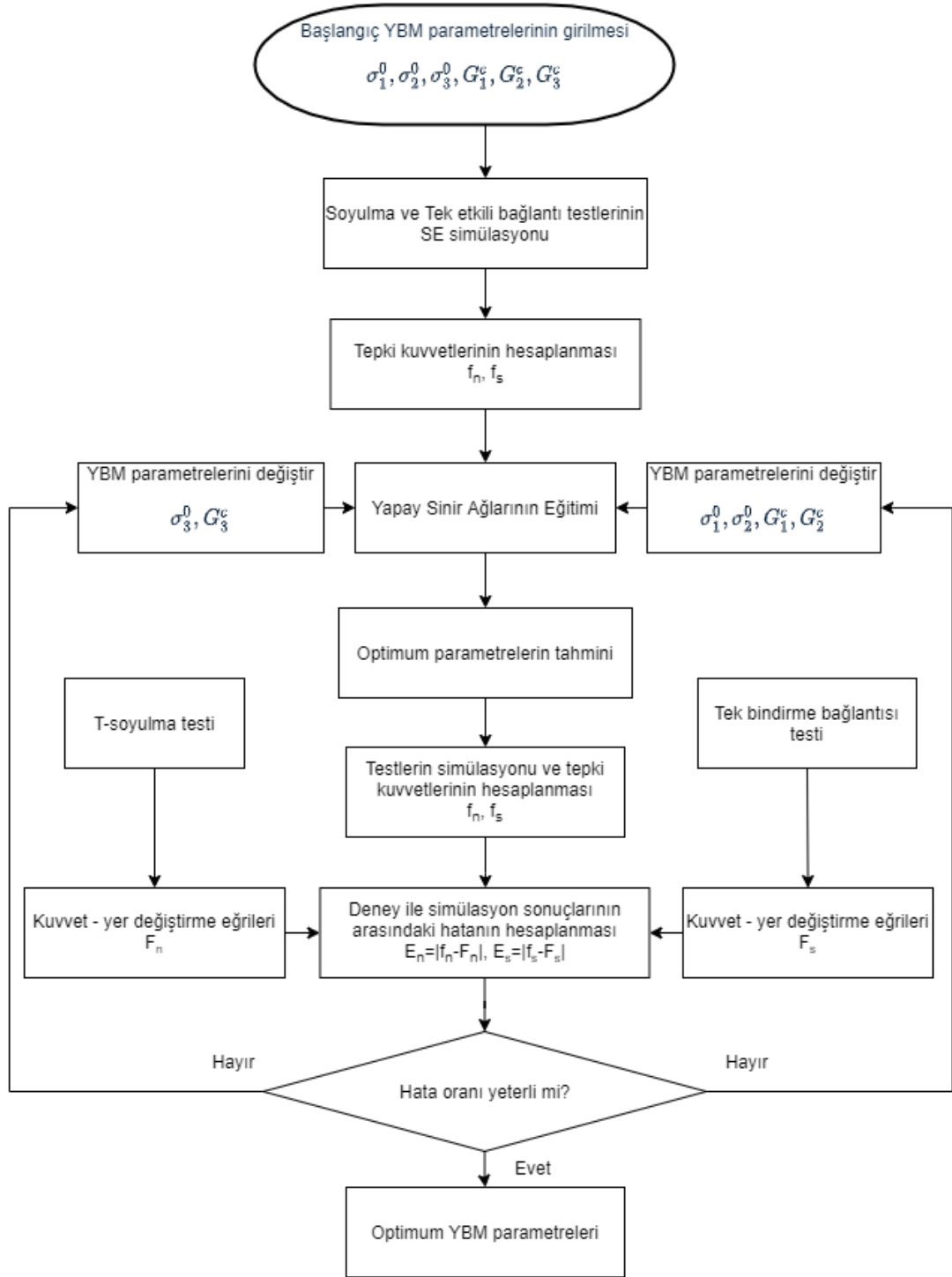
Şekil 8.6. T-soyulma testi (a) Şematik görünüşü (b) Sonlu elemanlar modeli

Katı model, hesaplama zamanından tasarruf etmek amacıyla iki boyutlu olarak oluşturulmuştur. Şekil 8.6b’de görüldüğü üzere daha kalın (1 mm) olan üst katmanda alüminyum, alt katmanda ise çelik sac (0.5 mm) bulunmaktadır. Ara katmanda ise 0.2 mm kalınlığında yapıştırıcı malzeme modellenmiştir. Tüm bu katmanlar elasto-plastik malzeme özellikleri ile modellenmiştir. Ayrıca yapıştırıcı malzeme ile alüminyum ve çelik yüzeyler arası *yapışkan bölge* tanımlaması yapılmıştır. Simülasyonun amacı bu yapışkan bölgeyi tanımlayan parametreleri bulmaktır. Modeldeki tüm elemanlar 4 düğüm noktasına sahip CPE4R eleman tipi ile modellenmiştir. Yapışkan bölgenin program tarafından çözülmesi mesh boyutuna oldukça bağlıdır. Bu sebeple ağ boyutu çok küçük (~ 0.1 mm) tutularak çözüm sağlanmıştır. Her katmanda kalınlık boyunca 3 katman mesh bulunmaktadır. Modelde bulunan toplam mesh eleman sayısı 5667 adettir.

Katı sac model ile parametrelerinin belirlenebilmesi için farklı parametreler ile denemeler yapılmış, deneysel sonuca en yakın yapışkan model parametresi belirlenmiştir. Bu süreci kısaltmak ve parametrelerin hassas şekilde belirlenmesini sağlamak için bir döngü kurulmuştur (Papazafeiropoulos vd., 2017). Döngüye ait akış şeması Şekil 8.7’de verilmiştir. Bu döngü Matlab® programı ile yazılmış kodlardan oluşmaktadır. Genel olarak döngü şu şekilde ilerlemektedir;

- Oluşturulan sonlu elemanlar model dosyası Matlab® tarafından okunur.
- Başlangıç parametreleri kullanıcı tarafından programa verilir.
- Program bu parametreleri kullanarak ilk çözümleri yapar ve kuvvet – ayrılma mesafesini çıktı olarak verir.

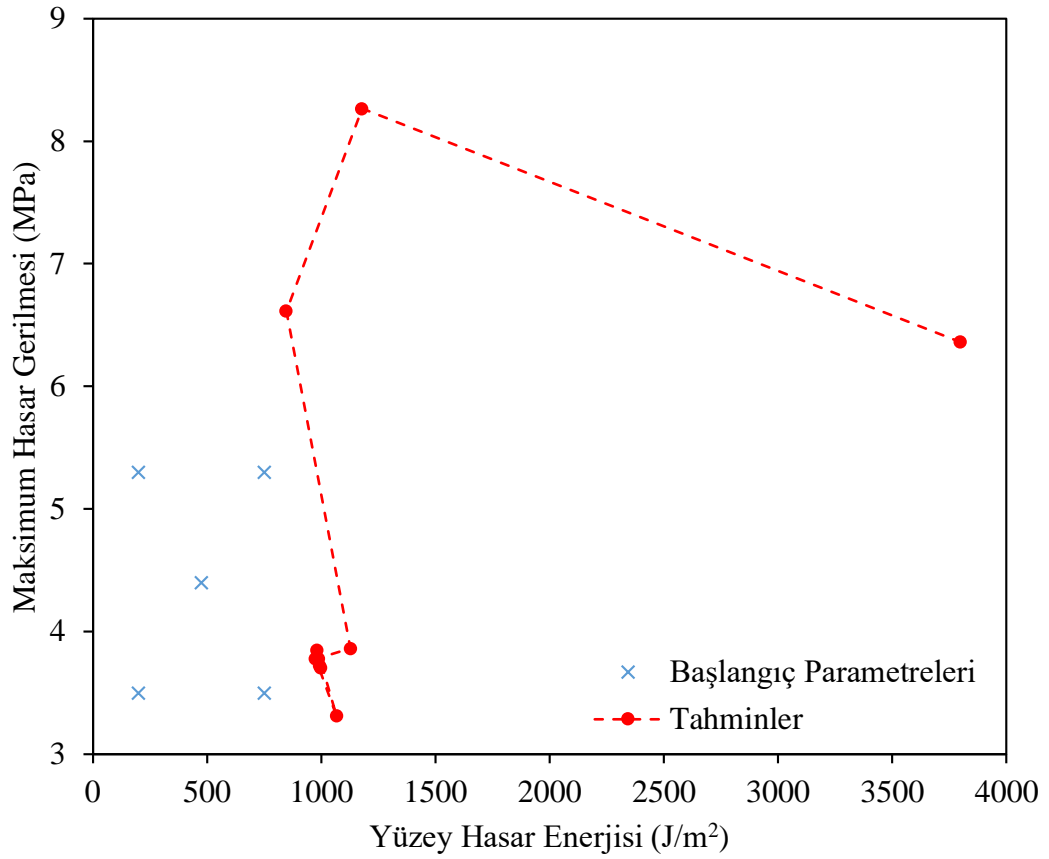
- Matlab® bu çıktıları alarak başlangıç parametreleri girdi, kuvvet değerleri çıktı olacak şekilde bir yapay sinir ağı modeli oluşturur ve eğitir.
- Yapay sinir ağlarından alınan veriler deneysel veriler ile karşılaştırılır.
- Bir önceki adımdaki girdiler optimize edilerek yeni parametre tahmini yapılır.
- Bu yeni parametreler ile model tekrar ABAQUS® sonlu elemanlar programına çözdürülür.
- Programda elde edilen çıktılar ile deneysel çıktılar arası hata hesaplanarak uygun olup olmadığına bakılır. Eğer hata yüksekse istenilen seviyeye düşene kadar döngü tekrar edilir.



Şekil 8.7. YBM parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan algoritmanın akış şeması

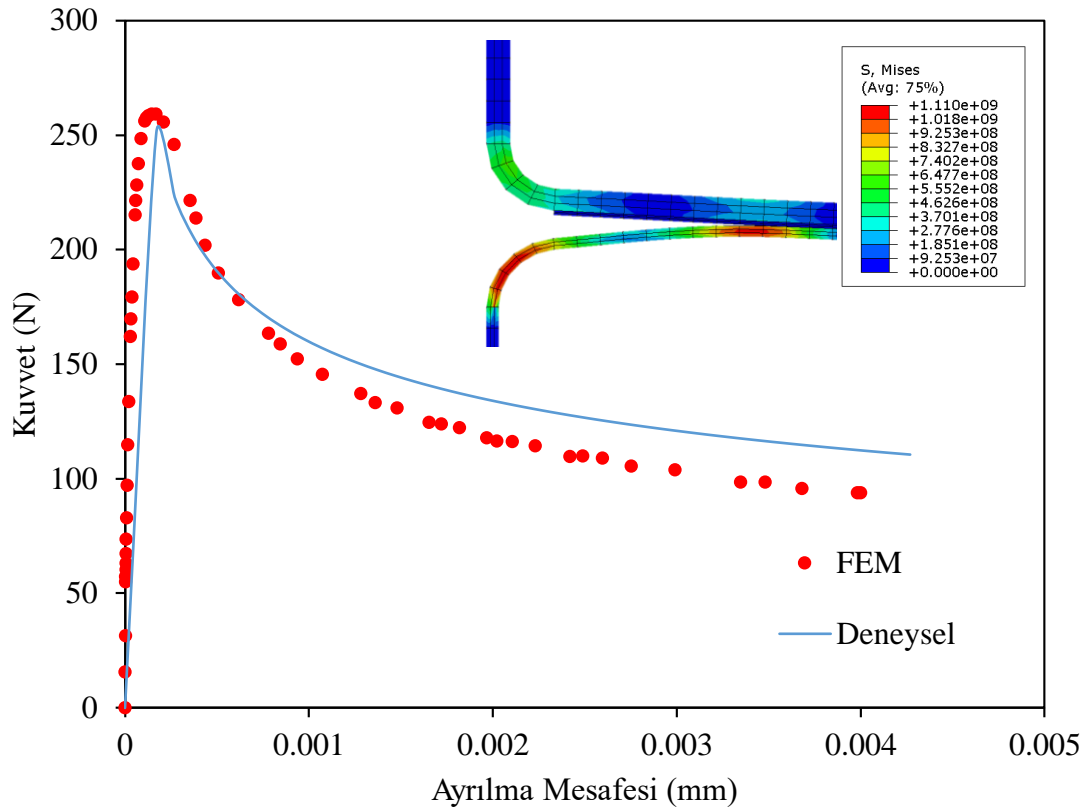
Yukarıda anlatılan döngünün yapmış olduğu tahminler Şekil 8.8’da verilmiştir. Programa ilk olarak 5 farklı çift başlangıç parametresi verilmiştir. Bu parametreler yapışkan bölgeyi tanımlayan maksimum hasar gerilmesi ve hasar enerjisi değerleridir. Bu değerlerin değişmesi sonucu elde edilen kuvvet – ayrılma mesafesi eğrileri

değişmektedir. Yazılan Matlab® programı, verilen 5 farklı giriş parametresinden sonra 9 adet daha tahmin yaparak sonuca ulaşmıştır.



Şekil 8.8. T-soyulma testi için yapılan tahminlerin değişimi

Şekil 8.9’da sonlu elemanların iterasyon sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Programın yapmış olduğu en son tahmine göre elde edilen eğri deneysel eğriye oldukça yakın çıkmıştır. Buna göre yapışkanda normal doğrultuda hasarın başlaması için gerekli olan maksimum gerilme 3.8 MPa’dır. Bu hasarın devamı için gerekli olan enerji ise 1000 J/m²’ye karşılık gelmektedir.

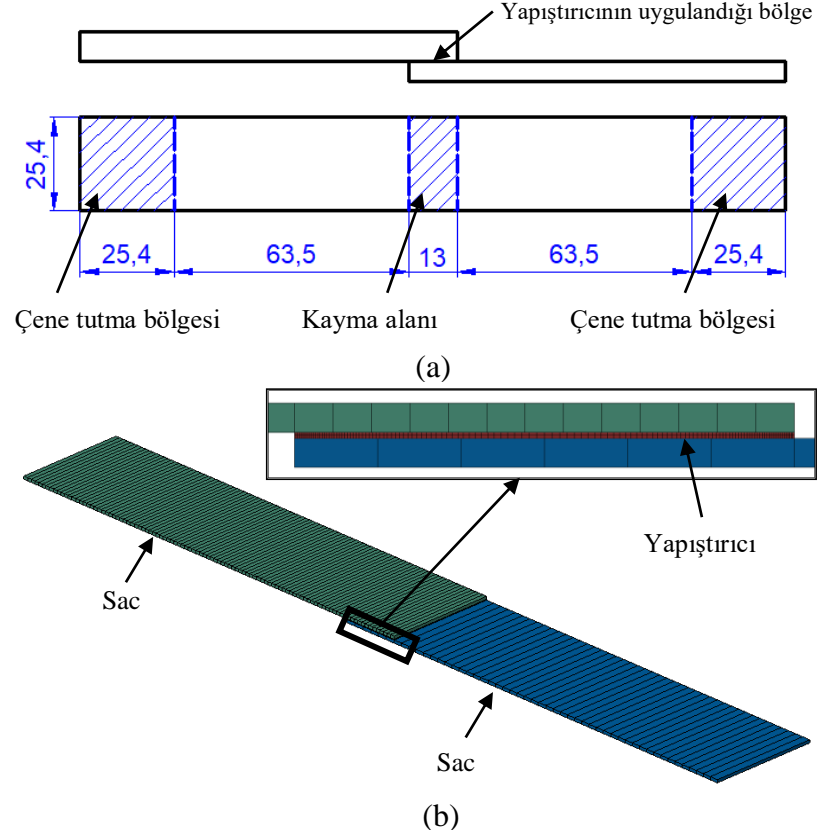


Şekil 8.9. Çift katmanlı sacın T-soyulma testi için deneysel ve numerik kuvvet–ayrılma mesafesi eğrileri

8.1.5.2. Tek Bindirme Bağlantısı (Single Lap Joint) Testinin Modellenmesi

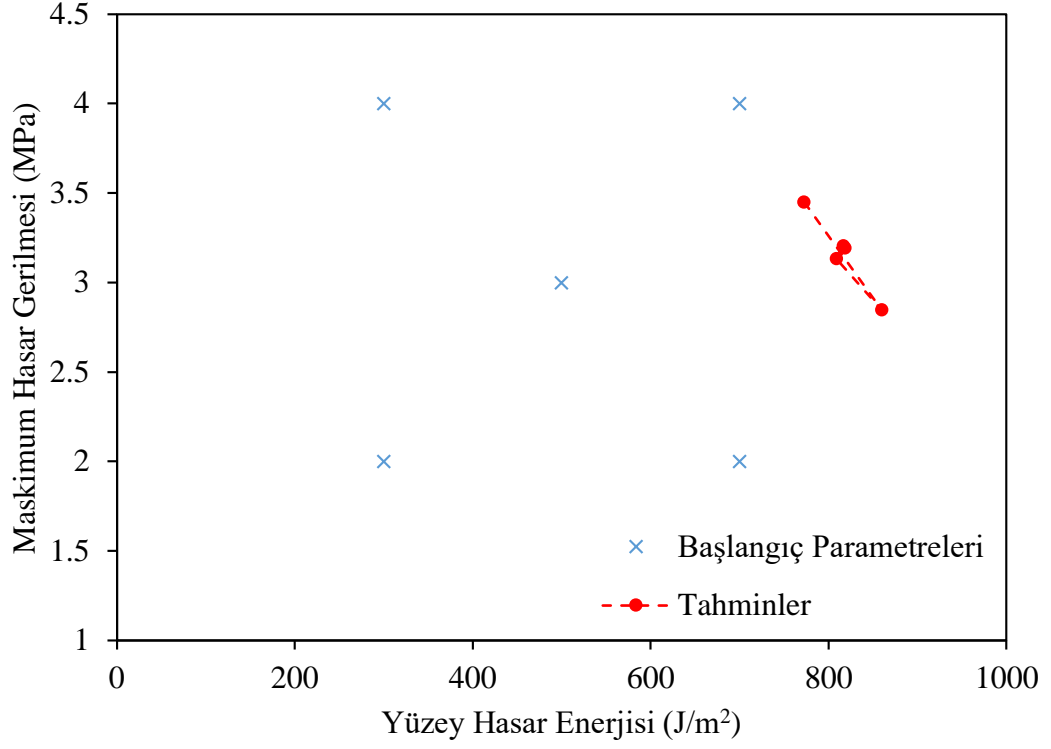
Tek bindirme bağlantısı testi yapışmanın kayma dayanımını belirlemek için kullanılan standart bir test metodudur (ASTM D1002-10, 2005). Bu teste uç kısımlarından üst üste bindirilerek yapıştırılan numuneler kuruduktan sonra çekme testine tabi tutulmaktadır (Şekil 8.10a). Çekme testi esnasında kuvvet – uzama değerleri kaydedilerek maksimum dayanım bulunmaktadır. Daha önceki çalışma sürecinde yapıştırıcının kayma dayanımı bu test ile deneysel olarak belirlenmiştir.

Bu bölümde tek bindirme bağlantısı testi sonlu elemanlar yöntemi ile bir önceki teste benzer olarak iki boyutlu modellenmiştir (Şekil 8.10b). Modelde 4 düğüm noktalı CPE4R eleman tipi kullanılmıştır. Yaklaşık eleman boyu 0.05 mm olup toplamda 673 adet mesh elemanı vardır. Bir önceki bölümde anlatılan işlem döngüsü bu simülasyonda da kullanılmıştır.



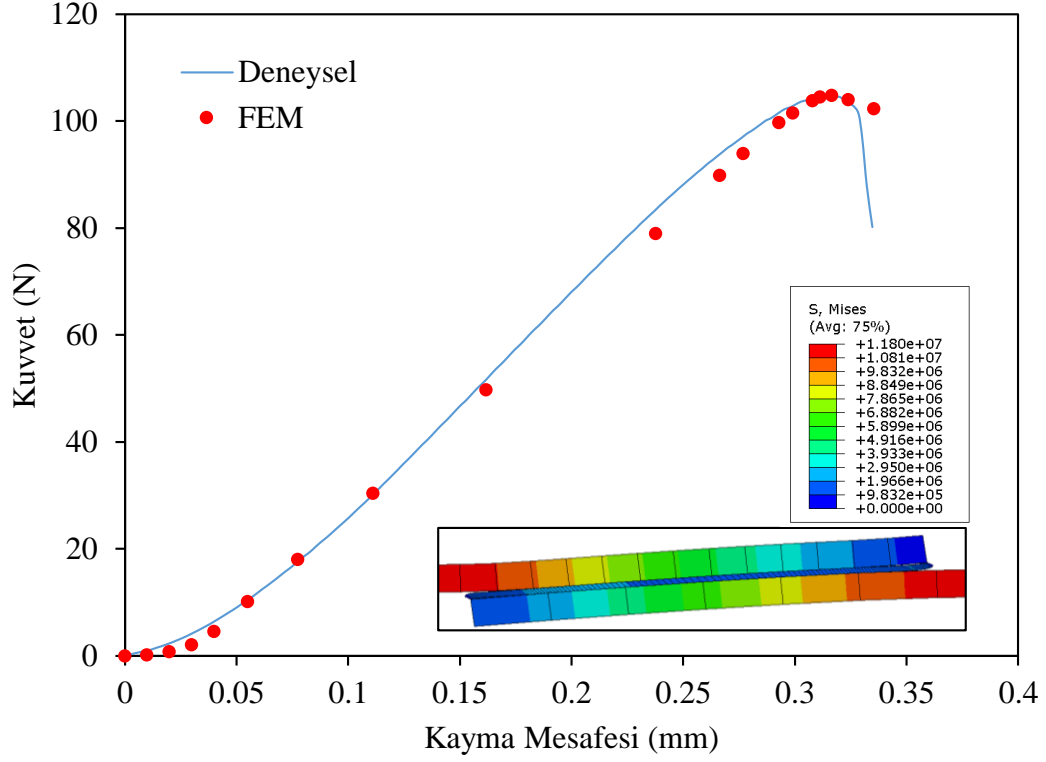
Şekil 8.10. Tek bindirme bağlantısı testi (a) Şematik görünüşü (b) Sonlu elemanlar modeli

T-soyulma testine benzer şekilde tek bindirme bağlantısı testinde yapışkan yüzey parametreleri kayma doğrultusunda belirlenmiştir. Oluşturulan döngüye aktarılan model çalıştırarak deneysel sonuçlara en yakın çıktıyı veren parametreler belirlenmiştir. Buna göre döngü 5 adet başlangıç değerinden sonra 5 farklı iterasyon daha yaparak nihai sonuca ulaşmıştır (Şekil 8.11).



Şekil 8.11. Tek bindirme bağlantısı için yapılan tahminlerin değişimi

Şekil 8.12’de kuvvet-kayma mesafesine ait deneysel ve sonlu elemanlar programından elde edilen eğriler verilmiştir. Yapılan tahminler neticesinde deneysel eğriye çok yakın bir eğri elde edilmiştir. Hasar sonrası kuvvetin azaldığı kısımda eğrinin rejimi bir miktar değişim göstermiştir. Sonuçta deneysel verilere en yakın çıktığı veren maksimum hasar gerilmesi değeri 3.2 MPa ve hasar enerjisi değeri ise 820 J/m² olarak bulunmuştur.



Şekil 8.12. Deneysel ve sonlu elemanlar programından elde edilen kuvvet – kayma mesafesi eğrileri

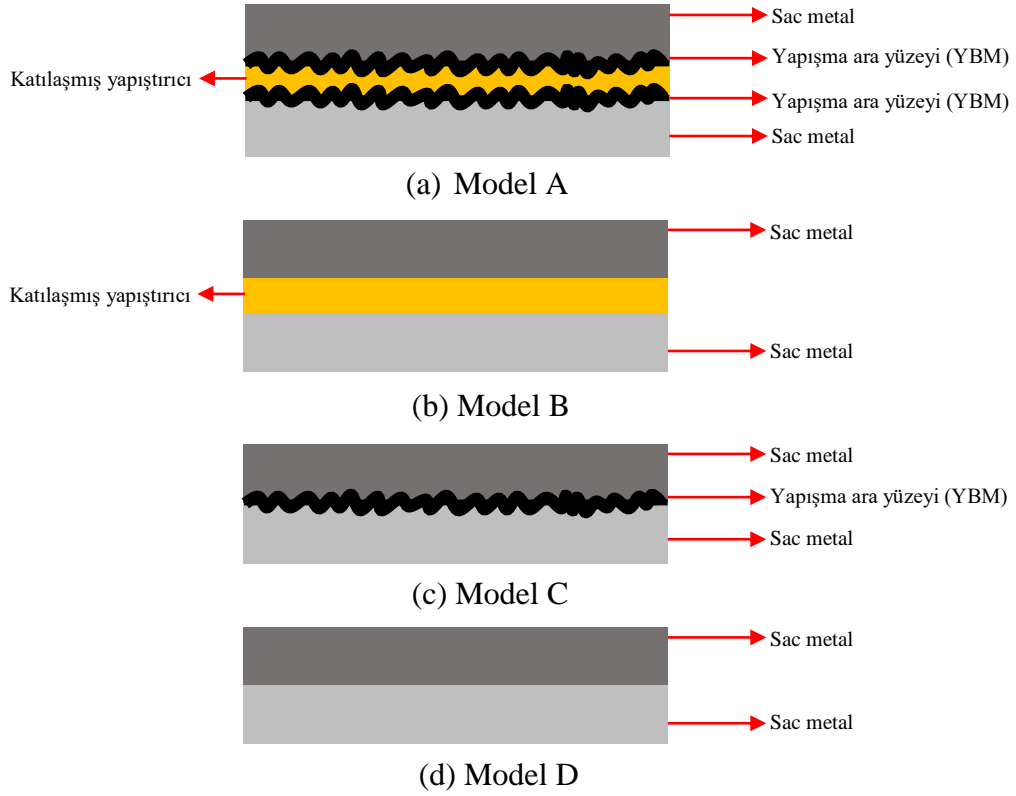
Yapılan sonlu elemanlar metodu ile modellemeler sonucunda, YBM'ye ait parametreler Tablo 8.2'de verilmiştir. Belirlenen parametreler ile iki kayma düzlemi ve bunlara dik doğrultudaki yapışkan davranışı gerçeği yakınsamıştır.

Tablo 8.2. Yapışkan yüzey modeli (YBM) parametreleri

σ_1^0	σ_2^0	σ_3^0	G_1^C	G_2^C	G_3^C
3.2 MPa	3.2 MPa	3.8 MPa	820 J/m ²	820 J/m ²	1000 J/m ²

8.1.6. Sonlu Elemanlar Metodu Modellerinin Doğrulanması

Çift katmanlı saclarda metal yüzeyine uygulanan yapıştırıcı işlem sonrası katlaşmakta ve yapıştırıcı ara yüzeyleri ile sac metaller yapışmaktadır. Şekil 8.13'te yapıştırma ile oluşturulmuş katmanlı sacların sonlu elemanlar metodu ile modellenmesinde kullanılan 4 farklı model verilmiştir.



Şekil 8.13. Çift katmanlı saclar için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin şematik görünüşü (a) Model-A (b) Model-B (c) Model-C (d) Model-D

Model-A: Bu model çift katmanlı sac kesitine görsel olarak en benzeyen modeldir. Sac metal arasında katılaştıran yapıştırıcı oluşturulmuş ve bu katılaşmış yüzey ile sac metal yüzeyi arasında yapışkan bölge modeli (YBM) tanımlanmıştır (Şekil 8.13a). Şekillenme esnasında yapışma kuvvetinin aşılması durumunda yüzeyler arasında ayrılma oluşabilir. Ara katmanında polimer bulunan ve sıcak presleme yöntemi ile birleştirilmiş katmanlı saclar bu şekilde modellenmişlerdir (Liu ve Zhuang, 2018; Liu vd., 2013).

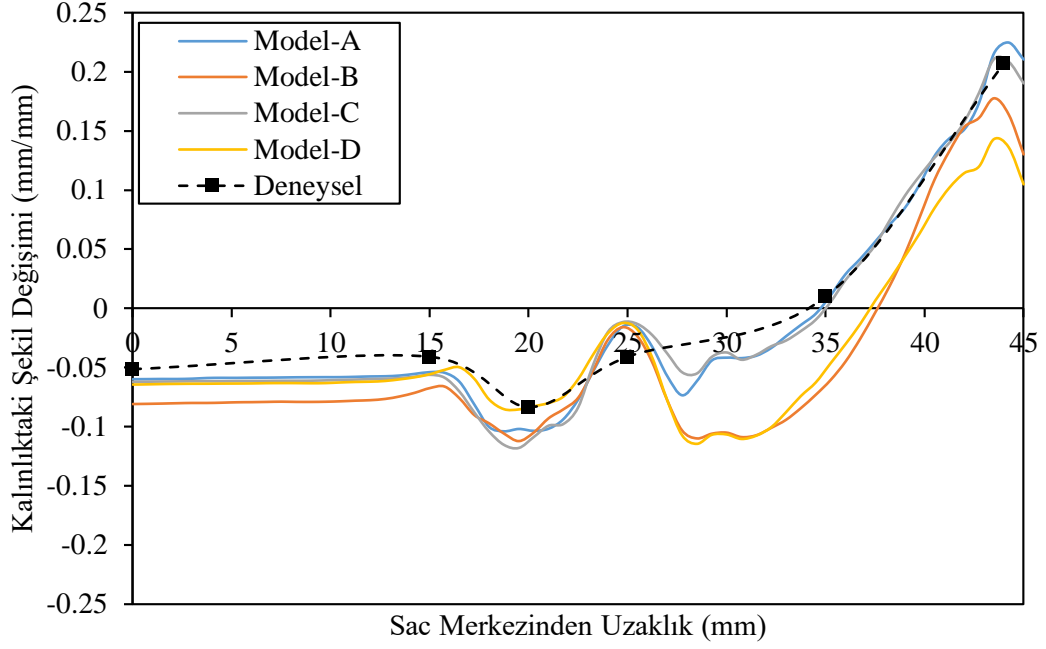
Model-B: Bu modelde sac metal ile katılaştıran yapıştırıcı arasında mükemmel bir yapışma kabulü yapılmıştır (Şekil 8.13b). Bu sebeple sac metal ile katılaşmış yapıştırıcı yüzeyi birleşik ve ayrılmaz olarak modellenmiştir. Ara yüzeyde herhangi bir temas durumu tanımlanmamıştır. Derin çekmede, katmanlar arasında herhangi bir ayrılma gözlenmez.

Model-C: Bu modelde sadece sac metaller arasında yapışma teması (YBM) tanımlanmıştır (Şekil 8.13c). Katılaştıran yapıştırıcı modellenmemiştir. Şekillenme esnasında yapışma kuvvetinin aşılması durumunda yüzeyler arasında ayrılma oluşabilir.

Model-D: Bu modelde yapışmanın mükemmel olarak gerçekleştiği ve aradaki yapıştırıcının ihmal edildiği varsayılmıştır (Şekil 8.13d). Saclar birbirleri ile birleşik ve ayrılamaz olarak modellenmiştir. Ara yüzeyde herhangi bir temas durumu tanımlanmamıştır. Şekillenme esnasında herhangi bir ayrılma gözlenmez. Bagherzadeh vd. (2015) ile Atrian ve Fereshteh-Saniee (2013) katmanlı saclar ile yaptıkları çalışmalarda sacları bu şekilde modellemişlerdir.

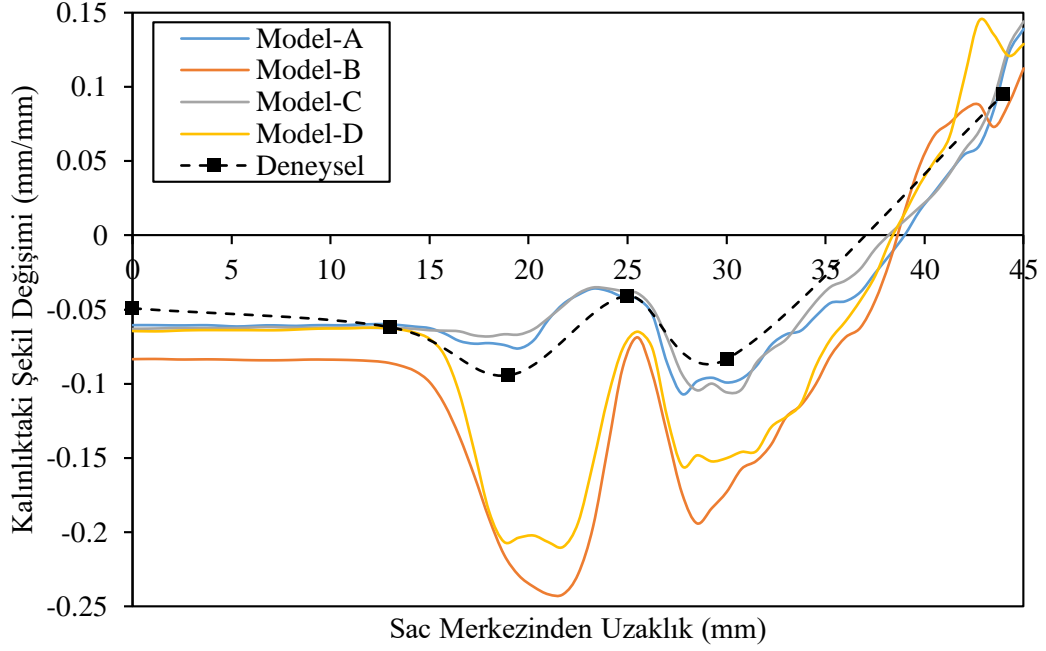
Yukarıda tanımlanan modeller ile derin çekme simülasyonları ayrı ayrı çalıştırılarak çözdürülmüştür. Bu modellerden simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak gerçeğe en yakın sonucu verebilen, deney yapılmadan sadece simülasyon ile gerçeğe yakın sonuçlar verecek bir sac model belirlenmiştir.

Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile yapılan simülasyonlardan elde edilen kalınlık değişimleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonrası çift katmanlı sacın alüminyum tarafında oluşan kalınlık değişimleri ile deney numunesi üzerinden alınan kalınlık ölçümleri, ölçümün alındığı noktanın dairesel sacın merkezine olan uzaklığına bağlı olarak Şekil 8.14'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde Model-A ile Model-C'nin benzer değişimlere sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan Model-B ile Model-D arasında kalınlık değişimlerinde benzerlik görülmüştür. Modellerin bu şekilde iki gruba ayrılması ara yüzeydeki yapışma temasının tanımlanmasından kaynaklanmaktadır. Yapışma temasının tanımlanmadığı Model-B ile Model-D benzer özellik gösterirken, yapışma temasının tanımlandığı Model-A ile Model-C benzer kalınlık değişimleri sergilemiştir. Simülasyondan elde edilen eğriler ile deneysel eğri karşılaştırıldığında Model-A, B, C ve D için korelasyon katsayıları sırasıyla 0.982, 0.961, 0.978 ve 0.963 olarak çıkmaktadır. Katsayılar arasında çok büyük fark olmamasına rağmen, deneysel sonuca en yakın modelin Model-A olduğu görülmektedir.



Şekil 8.14. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların alüminyum tarafında simülasyonlarda meydana gelen kalınlık değişimlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

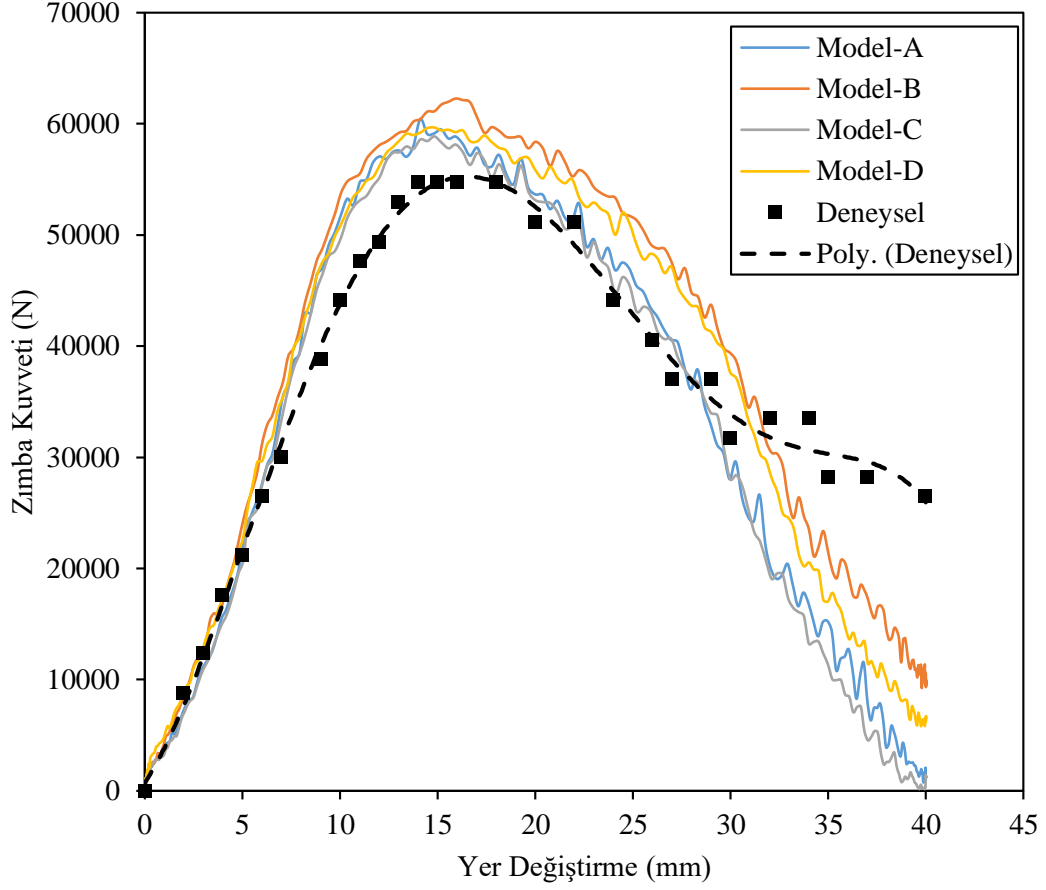
Şekil 8.15’de çift katmanlı sacın çelik tarafındaki kalınlık değişimleri deney numunesinin kalınlık değişimleri ile karşılaştırılmıştır. Çelik tarafındaki ölçümlerde modeller arasındaki farklılıklar daha belirgin olmuştur. Model-A ile Model-C benzer eğrilere sahipken Model-B ile Model-D benzer eğrilere sahiptir. Ancak bu iki grup arasındaki fark alüminyum tarafa göre daha büyüktür. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile korelasyonu incelendiğinde korelasyon katsayıları Model-A, B, C ve D için sırasıyla 0.959, 0.901, 0.960 ve 0.897 olduğu görülmüştür. Alüminyum sac katmanında olduğu gibi çelik sac katmanında deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olan model Model-A’dır.



Şekil 8.15. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların çelik tarafında simülasyonlarda ve deneylerde meydana gelen kalınlık değişimlerinin karşılaştırılması

Sac merkezinden yaklaşık 20 mm ve 30 mm uzaklıktaki kalınlık değişimlerinin her iki katmanda da Model-B ve Model-D’de daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi bu modellerde katmanlar arası yapışmanın mükemmel olması sebebiyle herhangi bir ayrılma olmamasıdır. Yüzeyler arasında ayrılma olmadığı için derin çekme işlemi boyunca her iki katman birlikte hareket ederek eşit miktarda uzamaya çalışmaktadır. Düzlem üzerinde gerçekleşen bu uzamalar hacim sabitliğine göre kalınlık ekseninde daha fazla şekil değişimine sebep olmaktadır.

Şekil 8.16’de zımbanın yer değiştirmesine bağlı olarak oluşan zımba kuvvetleri verilmiştir. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile yapılan simülasyonlardan elde edilen eğriler birbirine çok yakın çıkmıştır. Ayrıca bu sonuçlar deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu ve kabul edilebilir seviyededir. Deneysel sonuçlara en yakın eğriler Model-A ve Model-C’den elde edilmiştir. Yer değiştirme, 30 mm’den fazla olduğu durumda deneysel zımba kuvveti simülasyona göre daha yavaş azalmaktadır. Bunun sebebi sacın kalıp içerisine çekildikten sonra pres koçu pot millerine basmaya devam etmekte dolayısı ile pres koçuna karşı bir direnç oluşturmaktadır.



Şekil 8.16. Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile yapılan derin çekme simülasyonlarından elde edilen zımba kuvvetleri ile deneysel zımba kuvvetinin karşılaştırılması

Sonuçta Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile yapılan simülasyonlarda genel itibariyle benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Eğrilerin artış ve azalış eğilimleri deneysel sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Çift katmanlı sacların her iki tarafında kalınlık değişimi için elde edilen korelasyon katsayılarının ortalamaları alındığında Model-A, B, C ve D için sırasıyla 0.970, 0.931, 0.969 ve 0.930 olduğu görülmüştür. Diğer taraftan zımba kuvvetlerinde tüm modeller deneysel sonuçlara benzerdir. Kalınlık değişimleri ve zımba kuvveti grafikleri birlikte incelendiğinde, deneysel derin çekme sonuçlarına en yakın benzeşim Model-A sonucu olarak belirlenmiştir. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olması sebebiyle saclardaki gerilmeler, çift katmanlı sac kalınlık değişimleri, zımba kuvvetleri gibi değerler simülasyon sonuçlarından belirlenebilir. Ayrıca diğer modeller ile yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçların benzer olması farklı modellerin kullanılabilceğini göstermiştir. Model-A gerçeğe en yakın model olmasına rağmen çözüm süresi diğer modellere göre daha uzundur. Diğer taraftan daha basit olan

Model-C daha kısa çözüm süresine sahipken, sonuçlar da Model-A'ya yakın çıkmaktadır.

Model-A, Model-B, Model-C ve Model-D ile yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması neticesinde gerçeğe en yakın sonuç veren modelin Model-A olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, çalışmadaki tüm sonlu elemanlar analizlerinde Model-A kullanılacaktır.

8.2. Derin Çekme İşleminin Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi

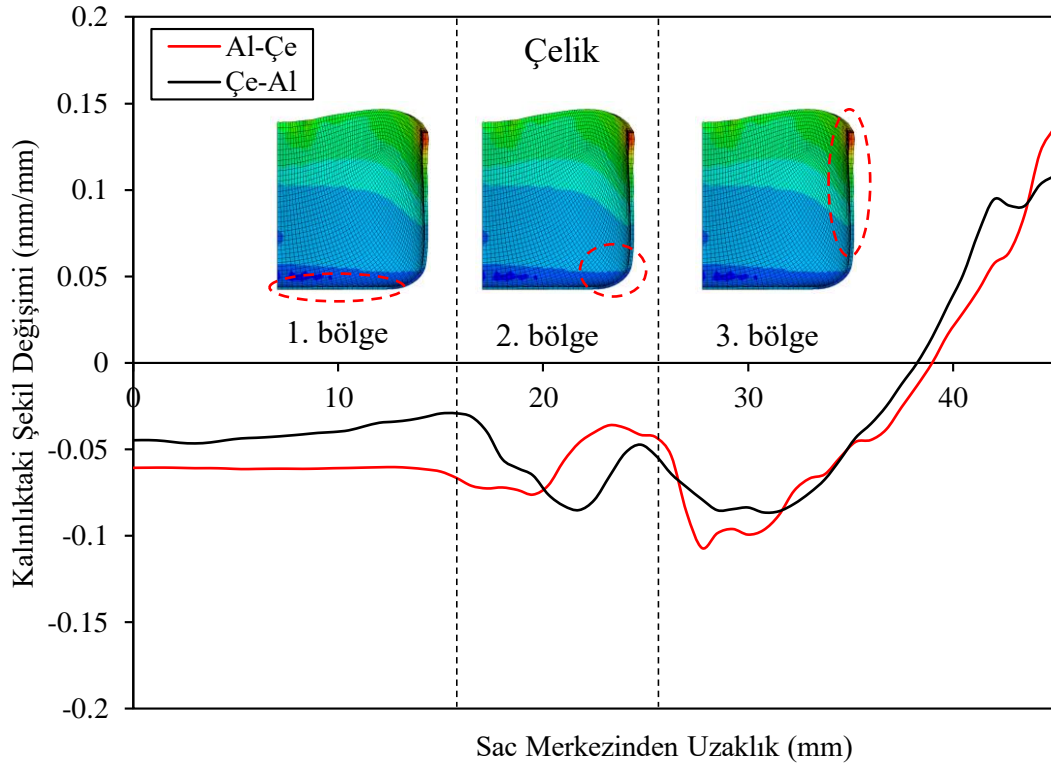
Bölüm 8.1'de çift katmanlı sacların özelliklerini gerçeğe en yakın simüle edebilen sonlu elemanlar modeli belirlenmiştir. Bu model ile derin çekme işlemi deneysel olarak yapılmadan oluşacak hasarlar (yırtılmalar, kırışmalar vb.) sadece simülasyon ile gerçeğe yakın şekilde belirlenebilir. Çalışmanın bu bölümünde derin çekme işlemi simüle edilerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

8.2.1. Çift katmanlı Saclarda Zimba ile Temas Eden Yüzeyin Sac Kalınlığına Etkisi

Yapılan ön denemeler ile çift katmanlı sacların davranışını gerçeğe en yakın simüle eden modelin Model-A olduğu belirlenmiştir. Tüm değerlendirmelerde Model-A ile yapılmış simülasyon sonuçları kullanılmıştır. Bu bölümde, alüminyum ile çelik sacdan oluşturulmuş çift katmanlı sacların derin çekme işlemi esnasında zimba ile temas eden yüzeylerinin sac kalınlığına olan etkisi incelenmiştir. 90 mm çapındaki saclardan 53 kN baskı plakası kuvveti altında çekilen numuneler incelenmiştir. Şekil değişimi eğrileri, daha kolay anlaşılabilmesi amacıyla 3 farklı bölge ayrılmıştır. Zimbanın düz yüzeyi altında kalan bölge 1. bölge, zimba kavisinin olduğu kısımda kalan bölge 2. Bölge ve zimba yüksekliği boyunca olan bölge ise 3. Bölge olarak adlandırılmıştır.

Şekil 8.17'de Al/Çe ve Çe/Al katmanlı sac dizilimlerinde çelik sacın kalınlığında meydana gelen şekil değişimleri verilmiştir. Al/Çe diziliminde dış katmanda kalan çelik sacın 1. Bölgede daha fazla incelme olduğu görülmektedir. 2. Bölgeye geçildiğinde ise Çe/Al diziliminde iç katmanda bulunan çelik sacın kalınlığının düştüğü görülmektedir. Çelik sacın zimbaya temas etmesi ve dolayısı ile sürtünme kuvvetinin Al/Çe dizilimine göre daha fazla olması bu bölgede daha fazla incelmeye sebep olmaktadır. En fazla incelme, 3. Bölgenin başlangıcında ve dış katmanda çelik sacın bulunduğu Al/Çe

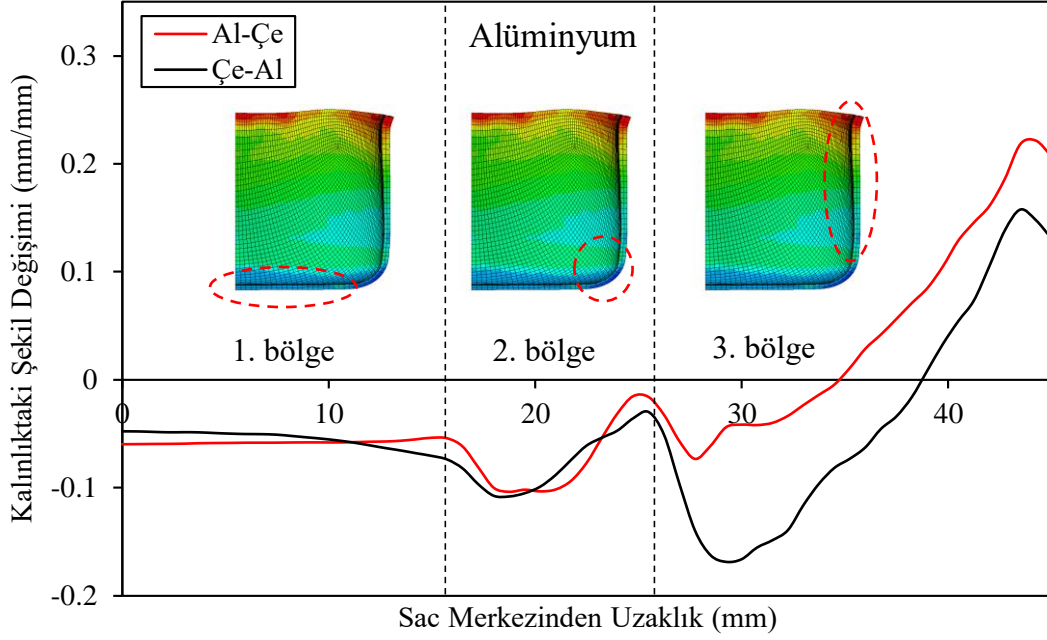
diziliminde gerçekleşmektedir. Derin çekme işlemlerinde yırtılma genelde 3. Bölgenin başlangıcında veya 2. Bölgenin sonunda görülmektedir.



Şekil 8.17. Çift katmanlı saclarda zimbaya temas eden yüzeye göre çelik sacın kalınlığındaki şekil değişimi

Şekil 8.18’de Al/Çe ve Çe/Al katmanlı sac dizilimlerinde, alüminyum sacın kalınlığında meydana gelen değişimler verilmiştir. Kalınlık değişimi 1. Bölgede her iki dizilim için oldukça benzer olduğu görülmektedir. 1. Bölgenin sonunda alüminyum sacın dış katmanda olduğu Çe/Al diziliminde kalınlıkta hafif bir azalma görülmektedir. 2. Bölgede yine her iki dizilim içinde kalınlık değişimi benzer olurken, 3. Bölgede kalınlık değişiminde büyük farklar görülmektedir.

Dış katmanda alüminyumun olduğu Çe/Al diziliminde 3. Bölgede kalınlığın Al/Çe dizilimine göre düştüğü belirlenmiştir. Bu sebeple çift katmanlı saclarda dayanımı daha düşük olan sac katmanının yırtılmanın oluşmaması için içeride kalması daha avantajlı olacaktır. Mekanik dayanımı düşük olan sacın dış katmanda olduğu ve özellikle diğer saca göre ince olduğu durumlarda bu katmanda yırtılma kaçınılmaz olacaktır.

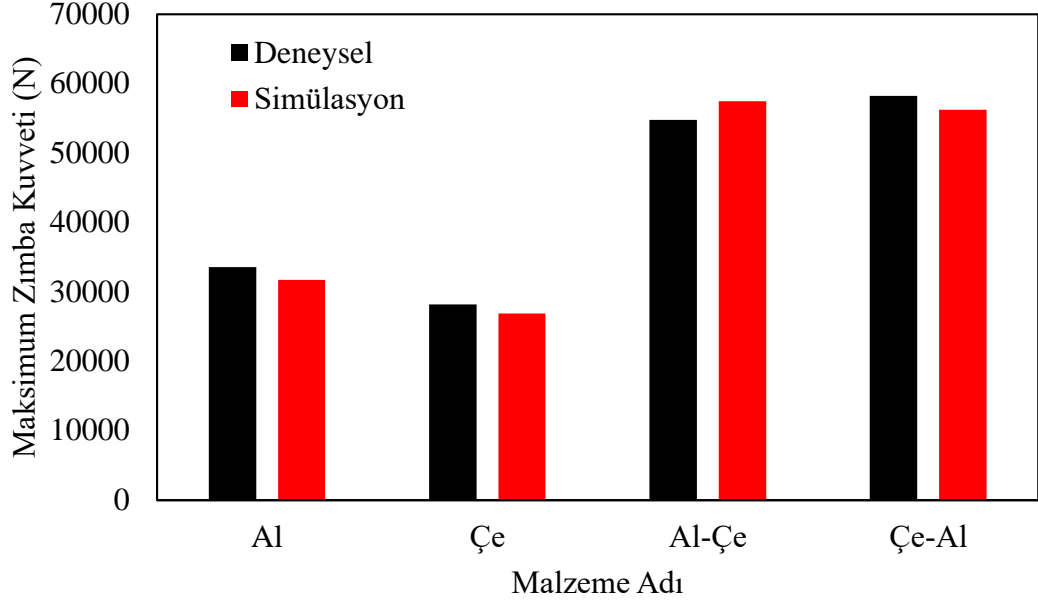


Şekil 8.18. Çift katmanlı saclarda zımbaya temas eden yüzeye göre alüminyum sacın kalınlığındaki şekil değişimi

Yukarıda verilen iki grafik dikkate alındığında dizilimden bağımsız olarak dış katmandaki sacın her zaman minimum kalınlığa sahip olduğu görülmektedir. Yerel olarak bazı bölgelerde bu durum değişiklik gösterse de sacın genelinde alüminyum veya çelik sacın dış katmanda yer aldığı durumda daha fazla incelendiği görülmüştür.

8.2.2. Çift Katmanlı Saclarda Zımba ile Temas Eden Yüzeyin Zımba Kuvvetine Etkisi

Derin çekme işlemi sonrasında tek ve çift katmanlı sacların maksimum zımba kuvvetleri Şekil 8.19’de verilmiştir. Tek saclar incelendiğinde daha kalın olan alüminyum sacın (1 mm) simülasyonlarda 31.7 kN, çelik sacın ise (0.5 mm) 26.8 kN’luk maksimum zımba kuvvetine ulaştığı görülmüştür. Saclar Çe/Al şeklinde diziliğinde maksimum zımba kuvveti 56.2 kN olurken, Al/Çe diziliminde 57.5 kN’a yükseldiği görülmüştür. Dizilimin değişmesi ile zımba kuvvetinde gerçekleşen artış zımba ile temas eden yüzeyin, dolayısıyla sürtünme katsayısının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Buna göre, çift katmanlı sacların derin çekilmesinde gerekli olan maksimum zımba kuvveti, tek sacların çekilmesi için gerekli olan maksimum zımba kuvvetlerinin toplamı kadar olmaktadır.



Şekil 8.19. Maksimum zımba kuvvetlerinin zımbaya temas eden yüzeye ve tek saclara göre değişimi

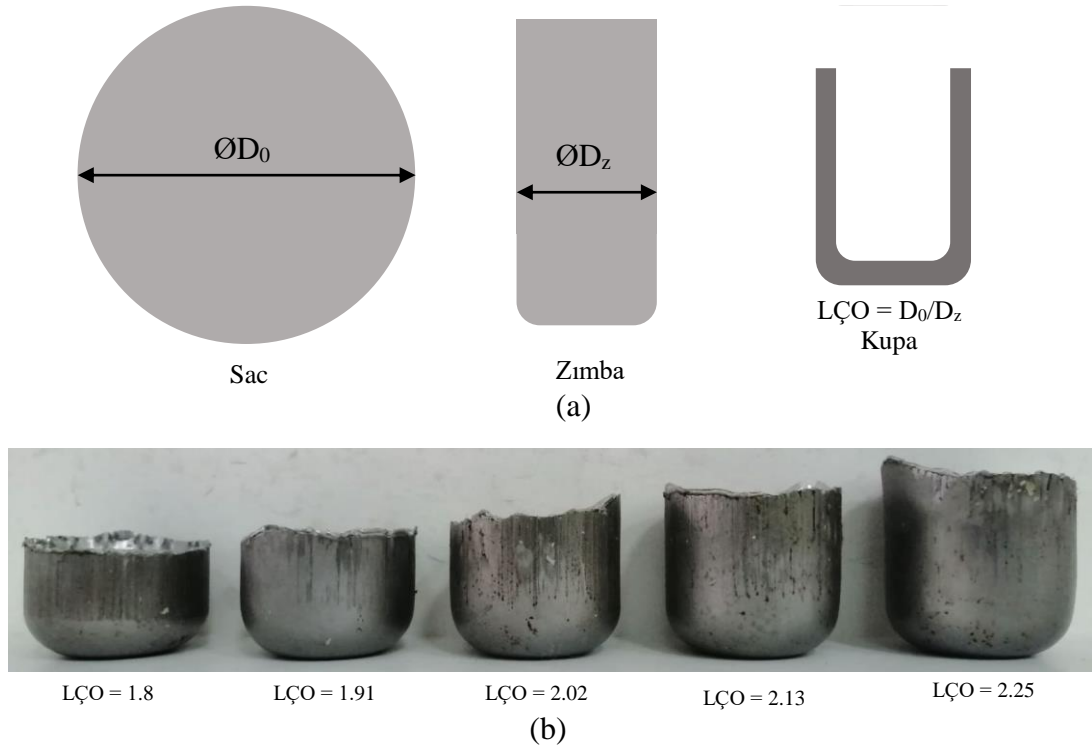
Tablo 8.3'te deneysel olarak ve simülasyonlardan elde edilen maksimum zımba kuvvetleri verilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen maksimum zımba kuvvetlerinin deneysel sonuçlara göre hata oranları hesaplanmıştır. En düşük hata oranı % -3.5 ile Çe/Al diziliminde hesaplanırken, en yüksek hata oranı % -5.5 ile Al sacın maksimum zımba kuvvetinde hesaplanmıştır. Pres üzerindeki hidrolik hatta bağlı basınç algılayıcının hassasiyeti bu hata oranlarını etkilemektedir.

Tablo 8.3. Deney ve simülasyonlarda maksimum zımba kuvvetleri ve hata oranları

Malzeme	Maks. Zımba Kuvveti (N)		Hata Oranı
	DeneySEL	Simülasyon	
Al	33519	31674	% -5.5
Çe	28209	26853	% -4.8
Al/Çe	54745	57451	% 4.9
Çe/Al	58245	56219	% -3.5

8.2.3. Çift katmanlı Saclarda Zımba ile Temas Eden Yüzeyin LÇO'ya Etkisi

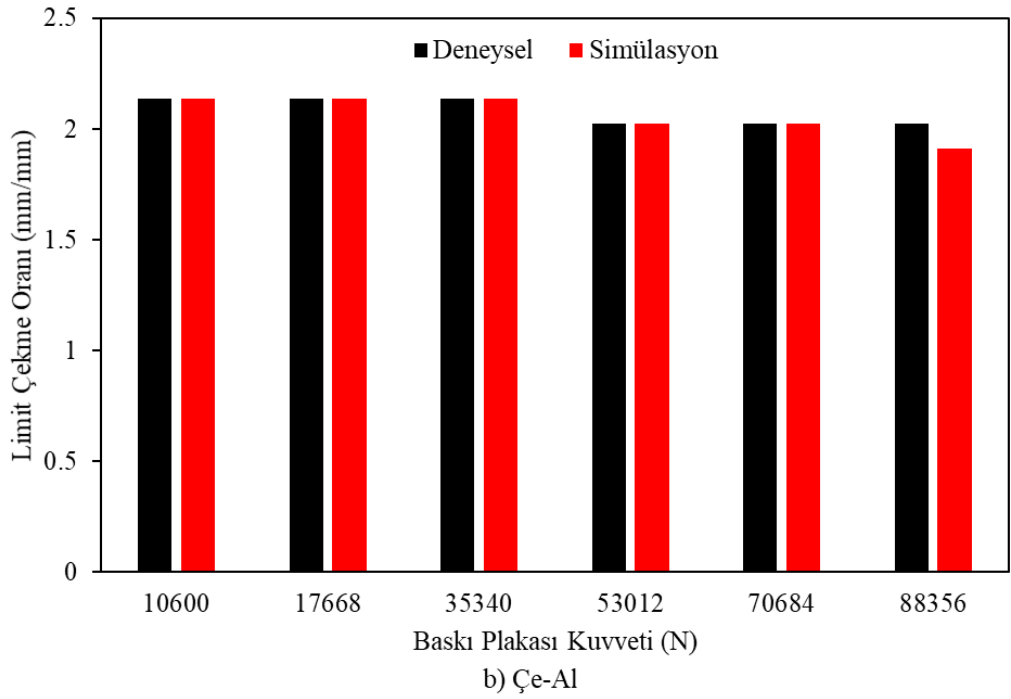
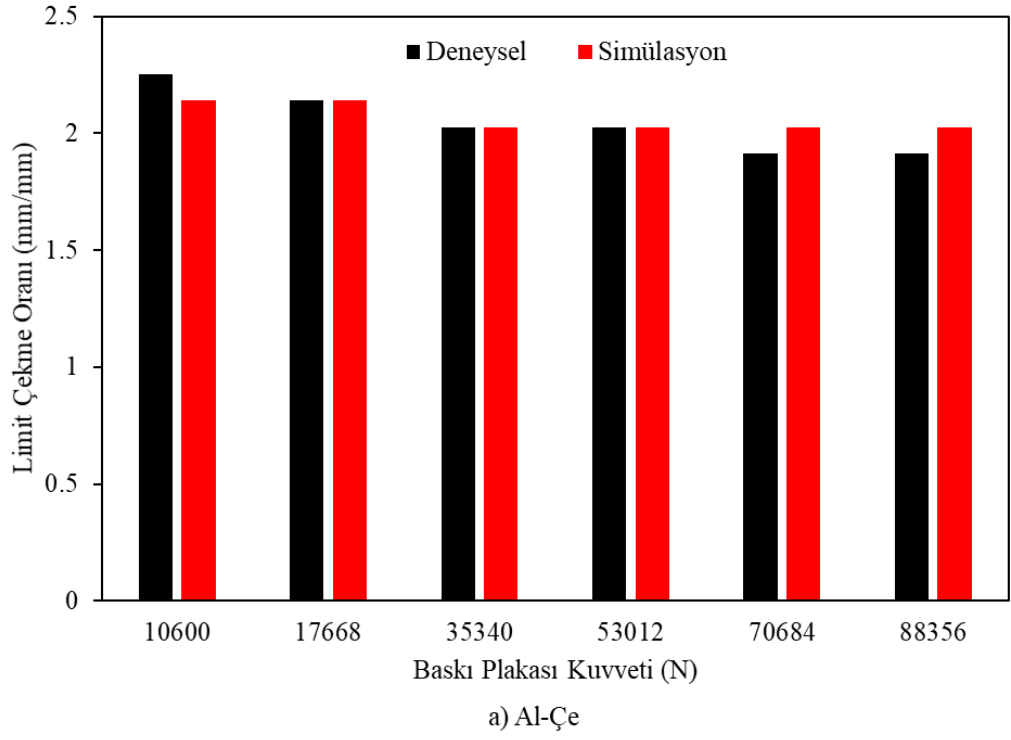
Derin çekme işleminde limit çekme oranı (LÇO) derin çekilebilirliği gösteren önemli bir parametredir. Bu parametre belirli çapta bir zımba (D_z) ile hasar oluşmadan çekilebilecek maksimum sac çapını (D_0) tanımlamaktadır. Maksimum sac çapının zımba çapına oranı (D_0 / D_z) limit çekme oranı (LÇO) olarak adlandırılır (Şekil 8.20a). Bu oran arttıkça zımba çapına göre çekilebilecek sac çapı da artmaktadır. Bu durumda daha büyük LÇO'ya sahip bir sac ile daha yüksek kupalar elde edilecektir (Şekil 8.20b).



Şekil 8.20. Limit çekme oranı (a) Şematik olarak (b) Çift katmanlı sacların derin çekilmesi ile elde edilmiş farklı LÇO'lar

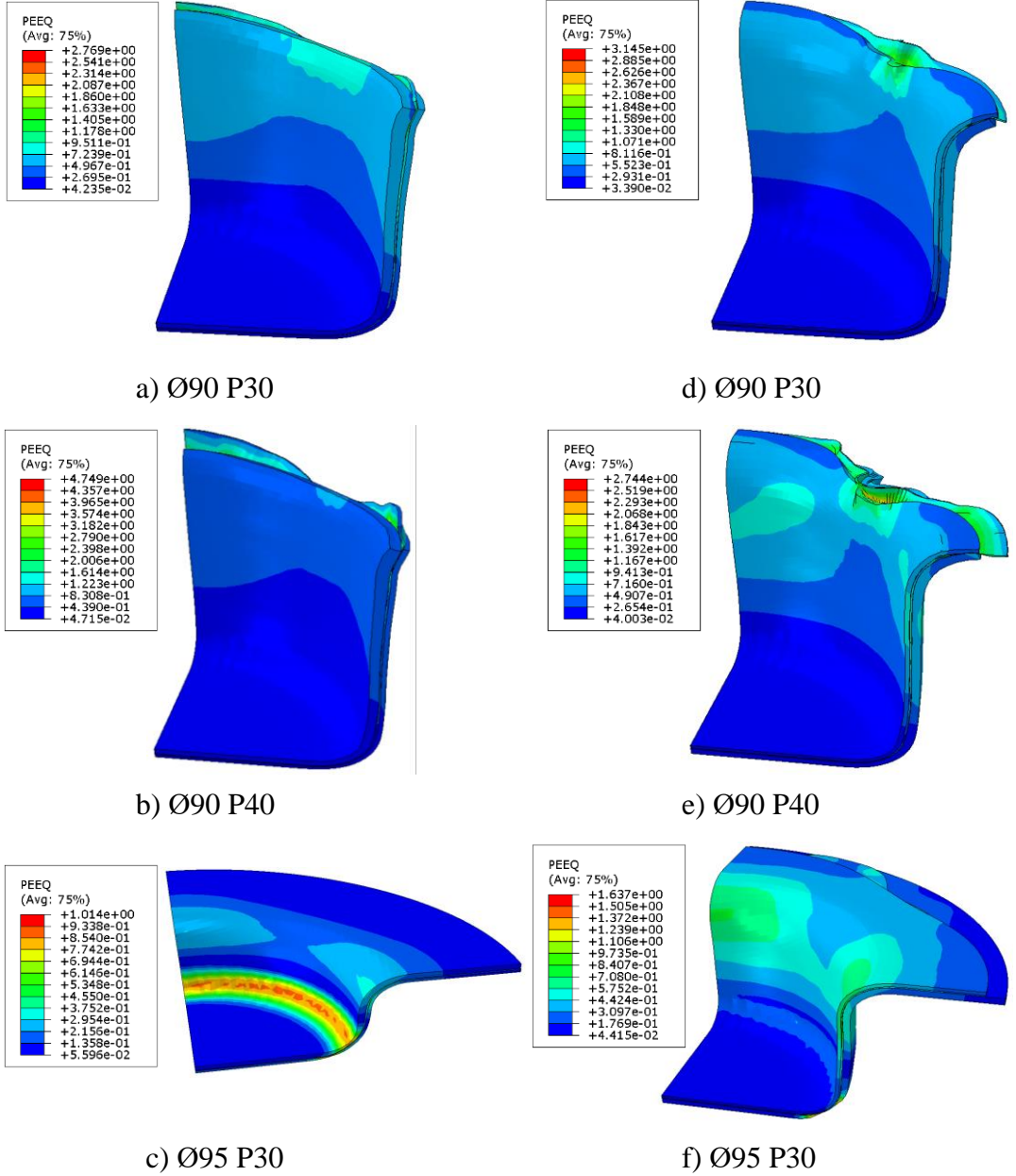
Yapılan simülasyonlarda maksimum LÇO'lar Bölüm 7.9.2'de verilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8.21). Simülasyonlarda Al/Çe diziliminde ulaşılan maksimum LÇO deneysel 2.25 olarak belirlenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar modelleri ile aynı baskı plakası kuvveti (yaklaşık 10.6 kN) için LÇO 2.14 olarak tespit edilmiştir. Baskı kuvvetinin artması ile LÇO'nun düştüğü ve 88.4 kN'luk baskı kuvveti altında LÇO'nun 1.91 olduğu görülmüştür (Şekil 8.21a). Çe/Al diziliminde maksimum LÇO 10.6 kN'luk baskı plakası kuvveti altında deneysel ve simülasyonda 2.14 olarak tespit edilmiştir (Şekil 8.21b). Bu oran yaklaşık 53 kN'luk baskı kuvvetinde sabit kalırken bu değerden sonra LÇO düşer. Yapılan deneylerde, 88.4 kN'luk baskı kuvveti altında elde edilen LÇO deneysel olarak 2.02, simülasyonda ise 1.91'dir. Al/Çe dizilimi için %2.8, Çe/Al dizilimi içinse %0.9'luk ortalama hata oranı ile deneysel sonuçlara çok yakındır. Derin çekme işleminin sonlu elemanlar simülasyonlarında sürtünme katsayısı genellikle sabit bir Coulomb sürtünmesi olarak ifade edilir. Ancak gerçekte, temas noktalarındaki sürtünme katsayısı, değişen operasyonel, deformasyon ve temas koşullarına göre değişir (Karupannasamy vd., 2012). Derin çekme işlemi esnasında meydana gelen bu farklı sürtünme durumları ve

sürtünme katsayısının işlemin farklı aşamalarında değişmesi sebebiyle simülasyon ile deneysel sonuçlar arasında bu tür farklılıklar oluşabilmektedir.



Şekil 8.21. Simülasyonlardaki maksimum LÇO'ların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması

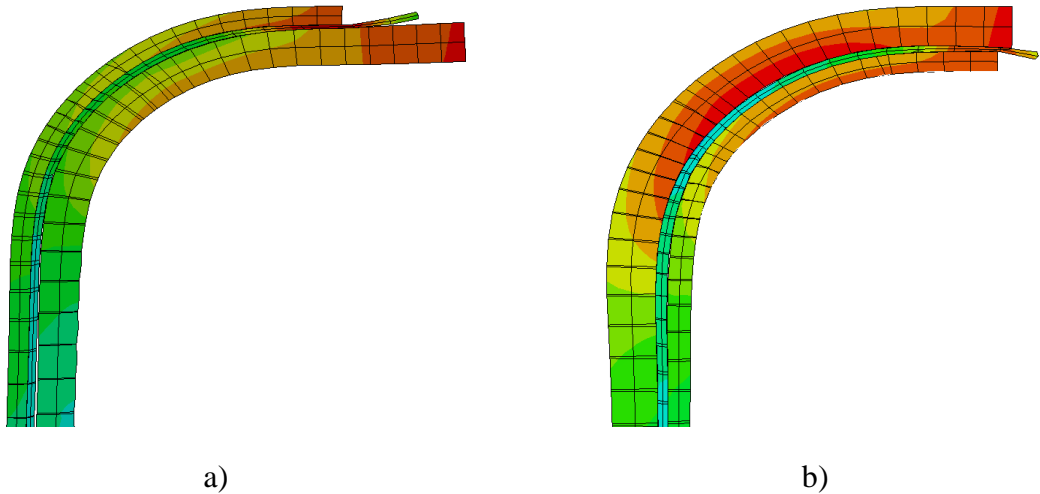
Şekil 8.22’de 90 ve 95 mm çapında sacların eşdeğer plastik şekil değişimleri (PEEQ) ile verilmiştir. Şekil 8.22a’da Al/Çe diziliminde 90 mm çapında (LÇO=2.022) ve 53 kN baskı plakası kuvveti altında başarılı şekilde derin çekilmiş kupa görülmektedir. Derin çekilmiş parçada (kupa) herhangi bir yırtılma görülmezken, kupa uçlarında saclar arasından yapıştırıcı malzemenin bir miktar dışarı çıktığı görülmektedir. Şekil 8.22b’de Al/Çe diziliminde 90 mm çapında (LÇO=2.134) ve 70.7 kN baskı plakası kuvveti altında derin çekilen kupa görülmektedir. Kupada herhangi bir yırtılma gözlenmezken saclar arasından dışarı taşan yapıştırıcı malzeme miktarı artmıştır. Metalik saclara göre oldukça elastik davranan katılmış yapıştırıcının baskı plakası kuvvetine bağlı olarak dışarı taşıdığı gözlenmiştir. Baskı kuvveti arttıkça ara katmanın dışarı çıkma miktarı da artmaktadır.



Şekil 8.22. Farklı limit çekme oranlarında simüle edilmiş kupa örnekleri (a) Al/Çe, LÇO=2.022 (b) Al/Çe, LÇO=2.134 (c) Çe/Al, LDR=2.134 (d) Çe/Al, LÇO=2.247

Şekil 8.22d’de Çe/Al diziliminde 90 mm çapında (LÇO=2.022) ve 53 kN baskı plakası kuvveti altında derin çekilmiş kupa görülmektedir. Al/Çe diziliminden farklı olarak bu dizilimde kupanın uç kısımlarında kırışmalar da meydana gelmiştir. Aynı çap için baskı plakası kuvveti artırılarak 70.7 kN’a çıkarılmış ancak kırışma durumunda bir değişiklik gözlenmemiştir. Sacların anizotropik özelliklere sahip olması ve çelik sacın alüminyum sacdan daha yüksek anizotropi katsayılarına sahip olması sebebiyle sacın farklı yönlerinde farklı uzamalar meydana gelmektedir. Çift katmanlı saclarda, kırışmaların olduğu bölgede (hadde yönüne göre 45°) çelik sac daha

az uzamaktadır (Şekil 8.23a). Çe/Al diziliminde üst tarafta kalan çelik sac 45° doğrultusunda kısmen daha az uzadığından kalıp içerisine daha hızlı çekilmektedir. Şekil 8.22e’de şeklin alındığı anda sacın 0 ve 90° doğrultusunda kalan kısımları hala baskı plakasının altında kalırken 45° doğrultusunda kalan bölgesi baskı plakasından kurtulmuştur. Baskı plakası kuvvetinden kurtulan sac, flanş bölgesinde sac düzlemi üzerindeki basma gerilmelerinin etkisi ile kırışmaktadır. Kupa ucunda kırışmaya sebep olan burkulma gerilmeleri aynı zamanda sacları bir arada tutan gerilmeyi aşarak sacların flanş bölgelerinde ayrılmasına sebep olmaktadır. Sac dizilimi Al/Çe olarak değiştirildiğinde çeliğe göre daha izotropik olan alüminyum sac üst katmanda kalmaktadır (Şekil 8.23b). Derin çekme işlemi boyunca alüminyum sacın tamamı baskı plakası altında kalmaktadır. Alt katmandaki çelik sac, 45° doğrultusunda daha hızlı aktığında alüminyum sac bir kılıf görevi görerek çelik sacın üzerine kalıp kavisi boyunca baskı uygulamaktadır. Simülasyonda, Al/Çe diziliminde kupa duvarlarında kırışma görülmemektedir.



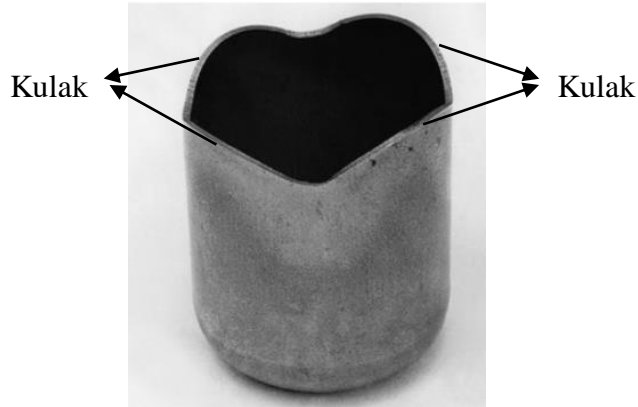
Şekil 8.23. Aynı zımba mesafesi için sacların dışı kalıp kavisi çevresindeki durumları a) Çe/Al b) Al/Çe (Deformasyon resimleri sacın hadde yönü ile 45° açı yaptığı pozisyonda alınmıştır.)

Şekil 8.22c Al/Çe dizilimi ve Şekil 8.22d’de Çe/Al dizilimi için 95 mm çapında ve 53 kN baskı plakası kuvveti altında hasara uğramış çift katmanlı saclar görülmektedir. Dış katmanda çelik sac olduğu durumda çift katmanlı sac zımba kavisinin olduğu bölümden incelerek hasara uğramaktadır (Şekil 8.22c). İşlem ortasında sacın zımba kavisi ile temas eden bölgesinde aşırı incelme görülmüştür. İlk

sac çapının artması ile daha fazla sürtünme kuvvetine maruz kalan flanş bölgesi kalıp içerisine plastik akamamıştır. Bu durum, sacın geri kalanında incelmeye sebep olmuş ve zımba kavisinin bulunduğu bölgede yerel incelme artarak yırtılma hasarına sebep olmuştur. Yırtılma hasarı, mukavemeti daha düşük olan ve zımba ile temas halinde olan alüminyum sacda başlamış ve iterasyon devamında elik sac katmanda incelme gözlenmiştir. Dış katmanda alüminyum sacın kullanılması durumunda derin çekme esnasında bu katmanın aşırı incelmesine rağmen elik katmanın sac kalınlığında daha az incelme gözlenmiştir (şekil 8.22f). elik sac katman, alüminyum katman ile olan yapışma kuvvetini yenerek kalıp içerisine doğru çekilmiştir.

8.2.4. Çift katmanlı Saclarda Zımba ile Temas Eden Yüzeyin ve Sacların Hadde Yönünün Birbirine Göre Açısal Pozisyonunun Kulaklanmaya Etkisi

Sac metallerin hadde yönüne göre farklı uzama miktarına sahip olması (düzlemsel anizotropi) derin çekilen kapların kenarlarında dalgalı bir yapı (kulaklanma) oluşturur (şekil 8.24). Alüminyum alaşımı içecek kutularının üretim sonrası kutu uzunluğunun yaklaşık %1 veya %2'si kadar kulak oluşmaktadır (Kalpakjian ve Schmid, 2007). Bu kulaklar üretim sonrası kesilmekte, dolayısı ile zaman ve malzeme kaybına sebep olmaktadır.

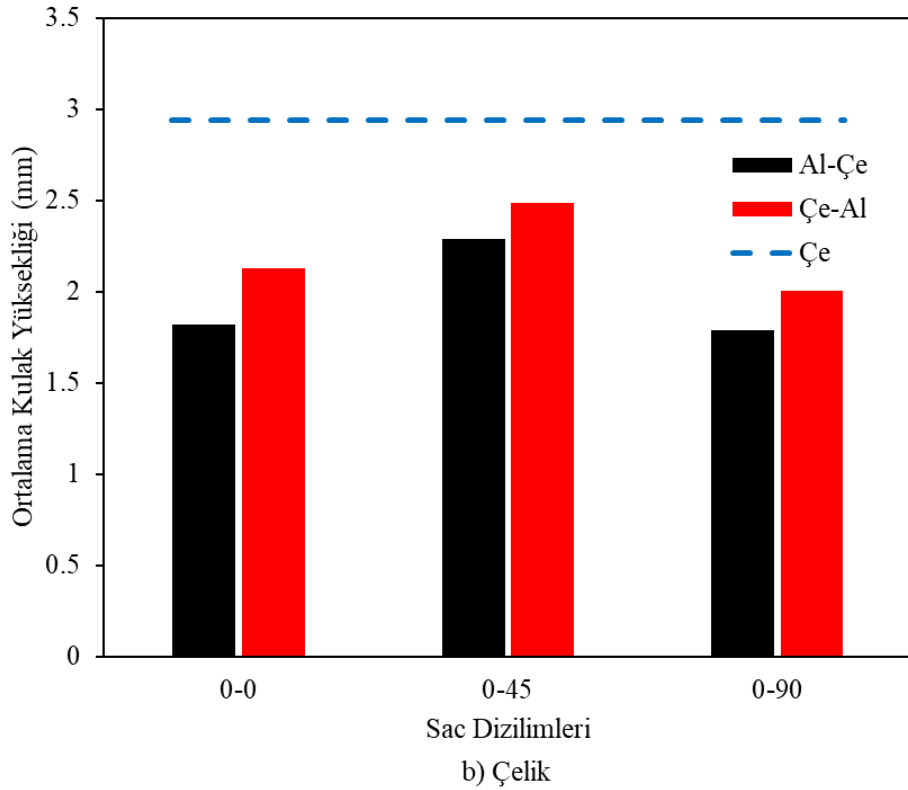
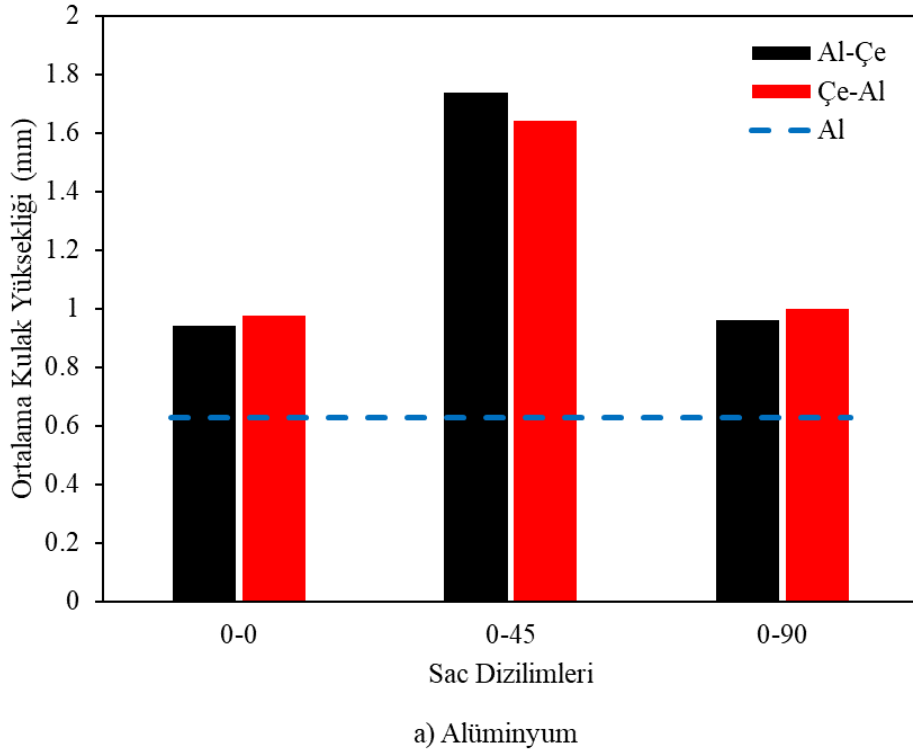


şekil 8.24. Derin çekilmiş elik bir kupada sacın düzlemsel anizotropisi sebebiyle oluşmuş kulaklanma durumu (Kalpakjian ve Schmid, 2007)

Bölüm 7.2'de hadde yönüne göre farklı yönlerde dizilmiş çift katmanlı saclara çekme testleri yapılmıştı. Bu testler sonucunda elde edilen anizotropi katsayıları yorumlandığında saclarda derin çekme sonrası oluşan kulaklanmanın çift katmanlı saclarda hadde yönüne göre farklı dizilimler ile azaltılabileceği grlmştir (şekil

7.18). Bu bölümde çekme testlerinden elde edilen anizotropi katsayıları ile varılan sayısal sonuç, farklı dizilimlerdeki saclara sonlu elemanlar programı ile derin çekme işlemi uygulanarak doğrulanmaya çalışılmıştır.

Bu bölümde çift katmanlı sacların hadde yönüne göre dizilimlerinin kulaklanmaya olan etkisi incelenmiştir. Şekil 8.25'da birbirine göre farklı hadde yönlerinde dizilerek oluşturulmuş katmanlı sacların derin çekme sonrası oluşan ortalama kulak yükseklikleri verilmiştir. Çift katmanlı saclarda, derin çekme esnasında katmanlar arası kaymalar meydana geldiği için üretilen üründe her katman farklı kulak yüksekliğine sahip olmaktadır. Bu sebeple her katmanın kulak yükseklikleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Şekil 8.25a'da çift katmanlı sacın alüminyum katmanında, Şekil 8.25b'de ise çelik katmanında meydana gelen kulaklanmaların ortalama yüksekliği verilmiştir. Şekillerde, siyah sütunlar ile çift katmanlı sacın alüminyum tarafının zımba ile temas ettiği durum, kırmızı sütunlar ise çift katmanlı sacın çelik tarafının zımba ile temas ettiği durum verilmiştir. Ayrıca Şekil 8.25'deki grafiklerde mavi kesik çizgi ile tek sacın derin çekildiğinde oluşan ortalama kulak yüksekliği gösterilmiştir. Grafiklerde dikey eksen ortalama kulak yüksekliğini verirken, yatay eksen sacın hadde yönüne göre dizilimini ifade eder. Hadde yönüne göre dizilimlerde ilk değer her zaman alüminyum sacı ifade etmektedir. Örneğin 0-45 dizilimi alüminyum katman hadde yönünde (0°) iken çelik katmanın 45° döndürüldüğünü ifade etmektedir.



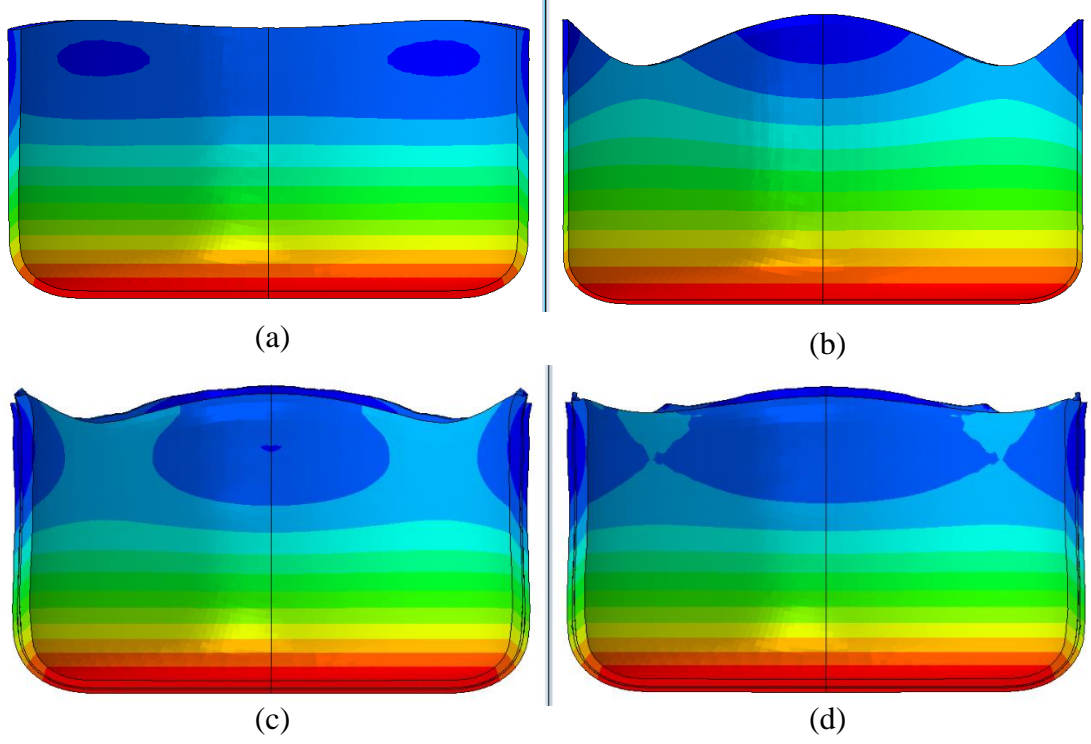
Şekil 8.25. Zimba ile temas eden yüzeylerinin ve sacların hadde yönünün birbirine göre açılma konumunun kulaklanmaya etkisi a) Alüminyum sac katman b) Çelik sac katman

Şekil 8.25a'da tek alüminyum sac derin çekildiğinde ortalama 0.63 mm kulak yüksekliği oluşur. Çelik sac ile birleştirilerek üretilen çift katmanlı saclarda, sacın

basım yönü fark etmeksizin alüminyum katmanda kulak yüksekliği artar. En uzun kulak, ortalama 1.74 mm ile alüminyum sacın zımba ile temas ettiği 0-45 açısal dizilimindedir. En kısa kulak ise 0.94 mm ile alüminyum sacın zımba ile temas ettiği 0-0 açısal dizilimindedir. Buna göre tek alüminyum saca göre çift katmanlı sacın alüminyum katmanında kulak uzunluğu minimum %49 oranında artmıştır.

Şekil 8.25b'de tek çelik sacın derin çekildiğinde ortalama 2.94 mm kulak uzunluğu oluşumu görülmektedir. Çift katmanlı saclarda çelik katman için ortalama kulak yüksekliği azalır. En uzun kulak, ortalama 2.48 mm ile çelik sacın zımba ile temas ettiği durumda 0-45 açısal dizilimde elde edilmiştir. En kısa kulak ise 1.79 mm ile alüminyum sacın zımba ile temas ettiği ve 0-90 açısal dizilimindedir. Tek çelik saca göre çift katmanlı saclarda çelik katmanda kulak uzunluğu maksimum %39 oranında azalma göstermiştir. Kulak yüksekliğindeki bu azalma çelik sacın alüminyum sac ile birlikte hareket etmeye zorlanmasından kaynaklanmaktadır. Çelik sac hadde yönünde ve bu yöne dik doğrultuda diagonal (45°) doğrultuya göre daha fazla uzamaktadır. Bu durum çelik sacda kulak oluşumunu ortaya çıkarır. Alüminyum sacda ise tüm doğrultulardaki uzama miktarları arasındaki fark daha azdır. Bu sebeple alüminyum sacda daha az kulak oluşumu görülür. Alüminyum sac ile yapıştirılan çelik sac diagonal doğrultuda daha fazla uzamaya zorlanır. Bir başka deyişle çelik sac tek haldeki gibi kalıp içerisine serbestçe akamaz. Dolayısıyla kulak oluşumu tek sacdan daha az olur.

Şekil 8.26'de derin çekme işlemi sonrası tek ve çift katmanlı saclarda kulak oluşumları görülmektedir. Tek alüminyum sacda kulaklanma çok az olurken (Şekil 8.26a), çelik sacda daha belirgin kulak oluşumu görülmektedir (Şekil 8.26b). Bu iki sacın birleştirilmesi ile çelik sacdaki kulaklanma düşürülmektedir. Şekil 8.26c'de alüminyum sacın hadde yönüne göre 0°, çelik sacın ise hadde yönüne göre 45° diziliminde bir araya getirilmiş çift katmanlı sacdan çekilmiş numune görülmektedir. Burada tek çelik saca göre kulaklanmada azalma olduğu görülmektedir. Sacların dizilimlerinin hadde yönüne göre değiştirilmesi ile kulaklanma azaltılabilir. Şekil 8.26d'de alüminyum sacın ve çelik sacın hadde yönüne göre 0°-0° ve 0°-90° dizilimlerinde bir araya getirilmiş çift katmanlı sacdan çekilmiş numunede kulak oluşumunun 0°-45° dizilimine göre daha azdır. Bu durum Bölüm 7.7'de yapılan çekme testlerinde elde edilen anizotropi katsayıları ile örtüşmektedir.



Şekil 8.26. Derin çekme sonrası kulak oluşumları (a) Tek alüminyum (b) Tek çelik (c) Al/Çe çift katmanlı 0-45 dizilimi (d) Al/Çe 0-0 dizilimi

Derin çekilen çift katmanlı saclarda tek saclara göre kulak oluşumunda farklılıklar gözlenmiştir. Çift katmanlı saclarda kulak uzunluğuna etki eden en önemli faktörün sac katmanlarının birine göre açılmal dizilimidir. Alüminyum sac ile çelik sac hadde yönleri birbirine dik olarak (0° - 90°) birleştirildiğinde, tek çelik saca göre çift katmanlı sacda %39 oranında kulak yüksekliğinin azaldığı görülmüştür. Bu durumda tek çelik sac ile alüminyum sac birleştirilerek çift katmanlı hale getirildiğinde, derin çekme işlemi ile üretilen kupanın (parçanın) kullanılabilir yüksekliği artmıştır.

9. TARTIŞMA

9.1. Çift Katmanlı Sac Üretimi

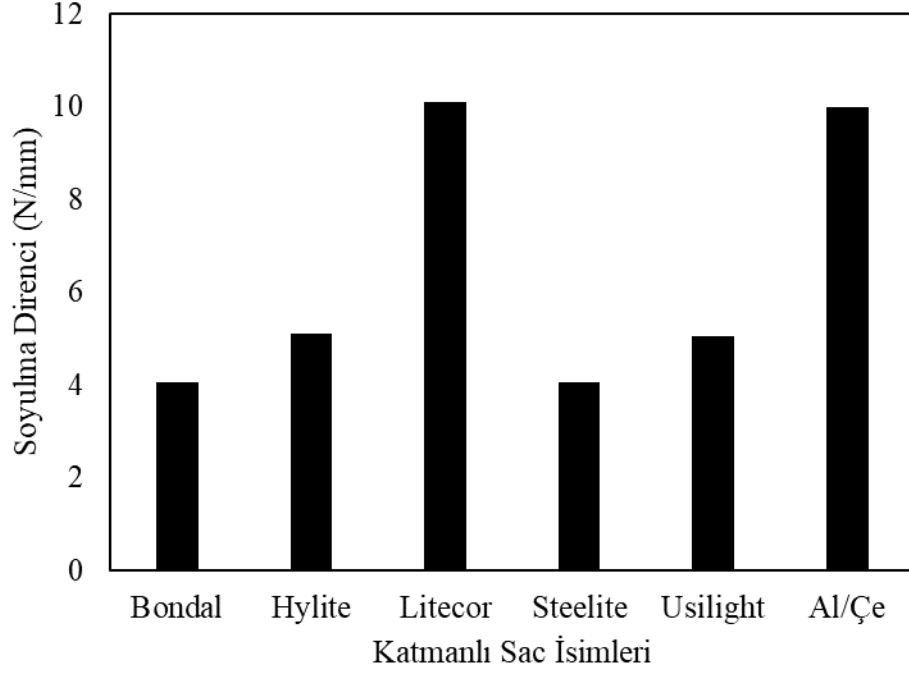
Bu çalışmada 0.5 mm kalınlığındaki çelik sac ile 1 mm kalınlığındaki alüminyum sac yapıştırma yöntem ile birleştirilmiştir. Çift katmanlı saclar haddeleme, patlamalı kaynak, punta kaynağı gibi farklı yöntemler ile birleştirilebilir. Bu yöntemlerde katmanlı saclar metalürjik olarak birbirine bağlanmaktadır. Örneğin patlamalı kaynak metodunda ara katmanda oluşan yüksek ısı sebebiyle eğiyen sac metal yüzeyleri birbirine karışarak bir bağlantı oluşturmaktadır. Ancak bu yöntemlerin dezavantajı laboratuvar ortamında uygulanmasının zor ve maliyetli olmasıdır. Benzer şekilde haddeleme yönteminde sacların yapışması için kullanılan merdane sistemi ve yüksek kuvvet gereksinimi yine bu yöntemin laboratuvar şartlarında uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Yapıştırma yöntemi ise laboratuvar şartlarında kolay ve pratik olarak uygulanabilir bir yöntemdir. Bu yöntemde sac metal üzerine uygulanan yapıştırıcı belirlenen sürelerde kurumaya bırakılarak katmanlı sac üretilir. Burada katmanlı sac üretiminde kullanılan yapıştırıcının seçilmesi önem arz etmektedir. Epoksi bazlı yapıştırıcılar yüksek yapışma dayanımı sağlarken yüksek sertlikleri sebebiyle şekillendirme işlemlerinde tercih edilmemektedir. Silikon bazlı yapıştırıcılar ise nem ile kurduğundan dolayı katmanlar arasında kalan yapıştırıcı uzun süre kurumamakta ve yapışma işlevini yerine getirmemektedir. Çalışmada kullanılan poliüretan yapıştırıcı iki bileşenli (yapıştırıcı-sertleştirici) olması sebebiyle uygulandıktan sonra kolayca kurumakta ve katılaştıktan sonra elastikiyeti korumaktadır. Bu sebeple çalışmada poliüretan bazlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda Loctite 2368, Köratac, farklı epoksi reçineler çift katmanlı sacların üretimi için tercih edilmiştir (Harhash vd., 2014a; Afshin ve Kadkhodayan, 2015). Yapıştırma esnasında katmanların sıvı yapıştırıcının viskoz etkisiyle birbiri üzerinden kayması karşılaşılan sorunlardan biridir. Bu durum yapıştırılacak olan sac geometrisine uygun kalıp yapılarak aşılmaya çalışılmıştır.

Yapışmanın soyulma yönünde ve kayma yönündeki dayanımı incelendiğinde ticari katmanlı sac üretiminde kullanılan diğer yapıştırıcılar ile benzer dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Şekil 9.1a'da üretilen çift katmanlı sacın ve diğer ticari ürünlerin soyulma direnci verilmiştir. Ticari ürünlerde soyulma direnci Litecor® sacı hariç ortalama 5 N/mm olarak görülmektedir. Bu çalışmada üretilen Al/Çe çift katmanlı

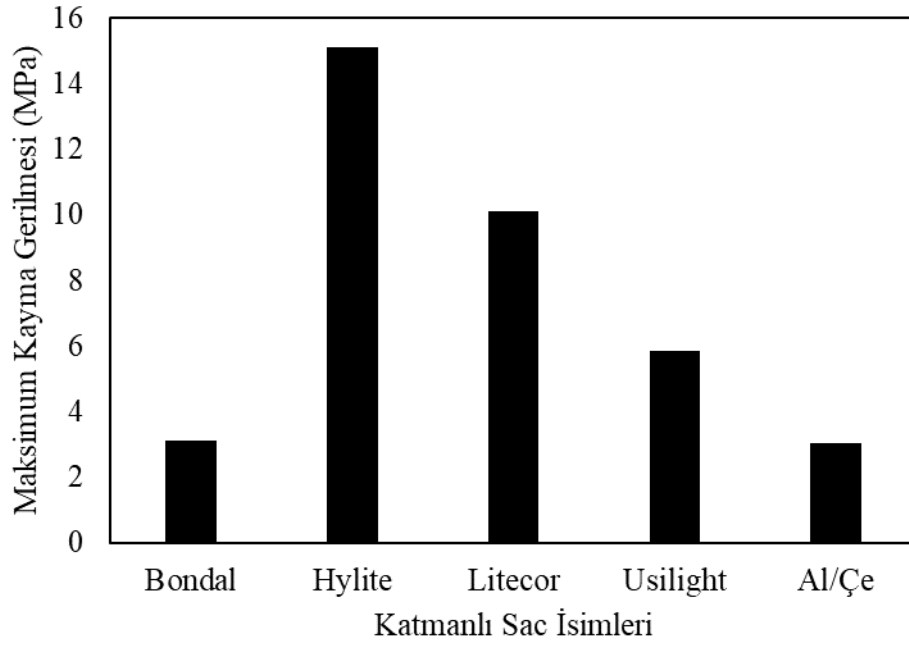
sacın ise soyulma direncinin diğler ürünlerin yaklaşık 2 katı (10 N/mm) olduğu ve Litecor® sacı ile benzer soyulma direncine sahip olduğu görölmektedir.

Şekil 9.1b'de üretilen çift katmanlı sacın ve diğler ticari ürünlerin maksimum kayma gerilmesi değerleri verilmiştir. Çalışmada üretilen Al/Çe çift katmanlı sacın maksimum kayma gerilmesi 3.1 MPa olduğu görölmektedir. Ticari olarak Bondal® sacının bu değere yakın bir kayma dayanımı olduğu görölmektedir. Diğler ürünlerin kayma gerilmesi değerleri ise daha yüksektir.

Otomotiv endüstrisinde parçanın kullanım yerine göre 1 ile 5 N/mm soyulma direncine sahip olan katmanlı saclar yeterli olmaktadır. Bu çalışmada üretilen katmanlı sacın otomotiv sektörü için istenen değerlerden daha yüksek soyulma direncine (10 N/mm) sahip olması bu sacın tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 9.1. Çalışmada üretilen çift katmanlı sacların ticari ürünler ile karşılaştırması (a) Soyulma direnci (b) Maksimum kayma gerilmesi (Harhash, 2017)

Yapıştırıcının, derin çekme işlemindeki performansı incelendiğinde katmanlar arası yapışmanın işlem süresince bütünlüğünü koruduğu görülmüştür. Çe-Al ve Al-Çe diziliminde gerçekleştirilen derin çekme operasyonlarında herhangi bir ayrılma görülmemiştir. Çift katmanlı sacın şekillendirme sonrası da katmanlar ayrılmamıştır.

belirlenebilmelidir. Ancak, Lesuer vd. (1996) tarafından çelik/pirinç katmanlı sacların kopma uzamaları karışım kuralı ile doğru tahmin edilememiştir. Bunun sebebi olarak hasar oluşumunun katmanlar arası ayrılma, katman kalınlığı, çatlak yeri gibi birçok farklı parametreye bağlı olmasını işaret etmişlerdir. Başka bir çalışmada, Mg/Al/Paslanmaz çelik (AZ31/Al3004/AISI 430) üç katmanlı sacının hasara uğradığı şekil değiştirme miktarının karışım kuralına uymadığını belirtilmiştir (Kim ve Hong, 2013). Yapılan bazı çalışmalarda katmanlı sacların akma gerilmesi, kopma gerilmesi, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri karışım kuralı ile belirlenmiştir (Choi vd., 1997; Oya vd., 2010; Uscinowicz, 2013). Bu tez çalışmasında literatürde kompozitler için önerilen 3 farklı karışım kuralı kullanılarak üretilen çift katmanlı sacın elastisite modülü tahmin edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda deneysel değerlere en yakın sonuç Reuss (1929) modeli ile elde edilmiştir. Üretilen çift katmanlı sacın akma dayanımı, kopma dayanımı, maksimum uzama miktarları gibi mekanik özellikleri Reuss modeli ile hesaplanmıştır. Literatüre benzer şekilde maksimum uzama miktarı dışındaki tüm özellikler deneysel sonuçlara yakın olarak tahmin edilmiştir.

Çift katmanlı sacların anizotropi katsayıları çalışma kapsamında belirlenmiştir. Sonuçların derin çekme verileri ve önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Çift katmanlı sacların hadde yönlerine göre farklı açılarda dizilmesi ile farklı mekanik özellikler elde edilebileceği belirlenmiştir. Sacların farklı dizilmesi ile elde edilen mekanik özellikler arasında değişim az olmasına rağmen derin çekme işlemine etkisi büyük olmaktadır. Derin çekme işleminde karşılaşılan sorunlardan biri operasyon sonrası parçada oluşan kulaklardır. Çift katmanlı sacların hadde yönüne göre farklı açılarda dizilmesi ile daha düşük kulak yüksekliğine sahip parça üretmek mümkün olmaktadır. Bu sayede derin çekilen parçaların kullanılabilir yükseklikleri artmakta ve ıskarta azalmaktadır.

9.3. Çift Katmanlı Sacların Şekillendirme Sınır Diyagramları

Çift katmanlı sacların ŞSD'leri düzlem dışı gerdirme testi ile belirlenmiştir. Test sırasında karşılaşılan en önemli sorun eşit iki eksenli gerilme durumunun elde edilmesi olmuştur. Kare geometriye sahip sac numuneler standart yağlayıcı ve naylon ile çekildiğinde büyük şekil değiştirmenin küçük şekil değiştirmeye oranı 0.5'tir. Bu değeri arttırmak için Öztürk ve Lee'nin (2005) önerdiği gibi çift katmanlı sac ile zımba

arasına kauçuk lastik parçası konulmuştur. Yapılan bu değişiklik ile eşit iki eksenli gerilme durumu elde edilebilmiştir.

Deneysel sonuçlarda çift katmanlı sacların ŞSE'leri katmanları oluşturan sacların ŞSE'lerin arasındaki değerlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca çift katmanlı sacın zımba temas yüzeyinin ŞSE'yi etkilediği belirlenmiştir. Darabi vd. (2017) yapmış oldukları numerik çalışmalarda Çe/Al sacların ŞSE'lerinin katmanların arasında olduğunu belirlemiş ve deneysel olarak doğrulamışlardır. Zahedi vd. (Zahedi vd., 2019) ise çift katmanlı sacın zımba temas yüzeyinin ŞSE'yi etkilediğini göstermişlerdir. Bu çalışmada yapılan düzlem dışı gerdirme deney sonuçlarının, önceki çalışmalar ile örtüştüğü görülmüştür. Çift katmanlı sacın Al tarafı zımba ile temas ettiğinde, yani dış katmanda çelik sac olduğunda (Al/Çe dizilimi) Çe/Al dizilimine göre daha yüksek şekillendirilebilirliğe sahip olduğu görülmüştür. Bunun başlıca sebebi daha önce Banabic ve Soare'nin (2008) belirttiği normal kuvvetin pozitif etkisidir. Düşük şekil alma kabiliyetine sahip Al sac, zımba ile çelik katman arasında kaldığında her iki yüzeyine normal kuvvet etki etmektedir. Bu normal kuvvet etkisinde sac üzerinde hasar başlangıç süreci gecikmektedir. Al katmanının dış tarafta olduğu durumda ise normal kuvvet sacın sadece bir yüzeyinden etki etmekte ve dolayısı ile hasar başlangıcı Al katmanının iç tarafta olduğu duruma göre daha erken olmaktadır.

9.4. Çift Katmanlı Sacların Derin Çekilmesi

9.4.1. Limit Çekme Oranları

Üretilen çift katmanlı saclar farklı baskı plakası kuvvetleri altında derin çekilerek çift katmanlı saclar için bir işlem penceresi oluşturulmuştur. İşlem penceresinde sacda kırılma ve yırtılma olmadan derin çekilebileceği maksimum çap ve baskı plakası kuvveti belirlenebilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda Al/Çe dizilimine sahip sacların Çe/Al dizilimine sahip saclardan daha geniş bir işlem penceresine sahip olduğu görülmüştür. Bir başka deyişle daha büyük çaptaki sacların Al/Çe diziliminde derin çekilmesi mümkündür. Bu durum Al katmanının iç kısımda kalması sebebiyle çelik tarafından korunarak zımba kavisi gibi muhtemel hasar bölgelerinde daha az incelmesidir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler bu durumu doğrulamaktadır. Bagherzadeh vd. (2015) yapıştırma ile oluşturdukları çift katmanlı Çe/Al saclarda benzer sonuçları elde etmişlerdir. Ancak yapılan çalışmada işlem penceresinin sadece bir kısmı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. İşlem

penceresinin diğer kısımları yapılan deneyler ile doğrulanan sonlu elemanlar modeli ile belirlenmiştir. Bunun sonucunda araştırmacılar limit çekme oranının düşmesi ve baskı plakası kuvvetinin artması ile birlikte Çe/Al ve Al/Çe dizilimlerinin güvenli çalışma bölgeleri arasındaki farkın arttığını belirtmişlerdir. Ancak bu doktora çalışmasında yapılan deneyler limit çekme oranının düşmesi ve baskı plakasının artması ile güvenli çalışma bölgeleri arasındaki farkın azaldığını hatta bir noktada kesiştiğini göstermiştir. İki çalışma arasındaki bu uyumsuzluk Bagherzadeh vd.'nin (2015) işlem penceresini sonlu elemanlar simülasyonu ile oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü araştırmacılar oluşturdukları sonlu elemanlar modelinde yüzeyler arası sabit bir sürtünme katsayısı tanımlamışlardır. Derin çekme yönteminde, işlem sırasında parça yüksek basınçlara maruz kaldığından dolayı farklı sürtünme durumları ortaya çıkmaktadır (Karupannasamy vd., 2012). Özellikle baskı plakası kuvvetinin artırılması ile birlikte yüzeyler arası oluşan sürtünme durumu sacın daha erken hasara uğramasına sebep olmaktadır.

9.4.2. Çift Katmanlı Sacların Zimba Temas Yüzeyinin Sac Kalınlığına Etkisi

Model-A ile yapılan analizler deneysel sonuçlar ile doğrulanarak modelin tutarlı olduğu Bölüm 8.1'de belirlenmişti. Bu model ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre zimba temas yüzeyinin sac kalınlıklarına etkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, çelik katman kalınlığındaki değişimin sac diziliminden daha az etkilendiği görülmüştür. Alüminyum katmanın ise sac dizilimine göre farklı kalınlık değişimlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle sac diziliminin Çe/Al olması durumunda alüminyum katmanın zimba kavisi ile kupa duvarının birleştiği noktada aşırı incelendiği belirlenmiştir. Bu bölge aynı zamanda muhtemel hasar bölgesidir (Atrian ve Fereshteh-Saniee, 2013; Afshin ve Kadkhodayan, 2015). Katmanlarda yırtılmaları önlemek amacıyla çift katmanlı sacları Al/Çe diziliminde kullanılması daha uygundur. Bagherzadeh vd. (2015) çift katmanlı sacların hidromekanik derin çekme işlemindeki davranışını inceledikleri çalışmada, zimba temas yüzeyinin sac kalınlığına etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada çift katmanlı saclardaki kalınlık değişimi bu tez çalışmasındaki sonuçlar ile örtüşmektedir.

9.4.3. Çift Katmanlı Saclarda Kulak Yükseklikleri

Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde derin çekme işlemi sonrası çift katmanlı saclardaki kulak oluşumları incelenmiştir. Simülasyonlar sonucunda çift katmanlı sacların hadde yönüne göre farklı yönlerde dizilmesiyle farklı kulak yükseklikleri elde edileceği görülmüştür. Sacların birbirine paralel (0° - 0°) veya dik (0° - 90°) olarak dizilmesi durumunda kulak yüksekliğinin minimum seviyede olduğu belirlenmiştir. Çelik sac, alüminyum sac ile birleştirilerek kulak uzunluğu azaltılmıştır. Burada katmanlar arası yapıştırmanın kalitesi, kulak yüksekliğini belirleyen önemli bir faktördür. Yapışmanın iyi olması bir sacın yöne bağlı olarak uzamasının diğer sac ile kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır.

Tez çalışmasında katmanların yapıştırıcı ile birleştirilmesi katmanlar arası kaymaya imkan vermiştir. Saclar, yapıştırıcının kayma yönündeki direncini yendiğinde, birbirinden hareket etmektedir. Bu durum çift katmanlı sacların yapıştırma ile birleştirilmesinin dezavantajıdır. Bu doğrultuda haddeleyerek yapıştırma veya patlamalı kaynak yöntemi ile üretilmiş çift katmanlı saclarda kulaklanma daha iyi kontrol edilebilir. Chen vd. (2006) haddeleme yöntemi ile yapıştırdıkları bakır (Cu) ve alüminyum (Al) sacların plastik anizotropilerindeki uyumsuzluğun bimetallik sacların özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Ürettikleri çift katmanlı saclarda bu tez çalışmasındaki sonuçlara benzer olarak Al'den daha düşük Cu'dan daha yüksek kulak yükseklik ölçülmüştür.

9.5. Çift Katmanlı Sacların Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi

Literatürde katmanlı saclar farklı yöntemler ile modellenmiştir. Bu doktora çalışmasında literatürde kullanılan 2 farklı model ve bu çalışmada oluşturulan 2 model karşılaştırılarak toplam 4 farklı model arasından yapıştırma ile oluşturulmuş çift katmanlı saclar için en doğru sonucu veren model belirlenmiştir. Parsa vd.(2010), Liu vd. (2012, 2013; 2018) sandviç paneller ile yapmış oldukları çalışmalarda Model-A, Bagherzadeh vd. (2015), Modanloo vd. (2016), Zahedi vd.'nin (Zahedi vd., 2019) çift katmanlı saclar ile yaptıkları çalışmalarda Model-D'yi kullandığı görülmüştür. Çalışmalarda kullanılan sandviç paneller sıcak presleme tekniği ile, çift katmanlı saclar ise yapıştırma, haddeleme ve patlamalı kaynak yöntemi ile üretilmişlerdir. Çift katmanlı saclarda farklı üretim tekniklerine rağmen aynı modelin kullanılması çalışma sonuçlarına etki etmektedir. Özellikle haddeleme ve patlamalı kaynak metodu ile

birleştirilen sacların ayrılmaya karşı dirençleri daha yüksek olmaktadır. Sac katmanlar arası kayma yok denecek kadar azdır. Ancak yapıştırma ile oluşturulan saclarda ise katmanlar arası kaymalar olmaktadır. Özellikle çift katmanlı saclardaki kulak oluşumu incelemekse katmanlar arası kayma, kulak oluşumunu ciddi derecede etkilemektedir.

Bu çalışmada, araştırılan sonlu elemanlar modellerinden Model-A ve Model-C sac kalınlığında oluşan değişimleri deneysel sonuçlar ile uyumlu olarak tahmin etmişlerdir. Deneysel sonuçlara en yakın Şekil alma davranışı Model-A ile elde edilmiştir. Ancak oluşturulan modellerin çözümleri dikkate alındığında optimum modelin Model-C olduğu belirlenmiştir. Bu modelin avantajı katmanlar arası yapışmanın modellenmesi sebebiyle katmanlar arasındaki kayma dikkate alınarak daha kısa sürede çözüme ulaşmasıdır. Farklı çalışmalarda kullanılan Model-D'nin çözümleri kısa olmasına rağmen deneysel sonuçlarla uyumsuz olduğu görölmüştür.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında alüminyum ve çelik sacdan yapıştırma yoluyla üretilmiş çift katmanlı sacların şekil alma kabiliyetleri ve derin çekilebilirlikleri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Yapıştırma yöntemi ile üretilmiş çift katmanlı sacların yapışma dayanımları ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Düzlem dışı gerdirme testi ile şekillendirme sınır diyagramları belirlenerek çift katmanlı sacı oluşturan tek saclar ile karşılaştırılmıştır. Tek ve çift katmanlı saclara kupa testi yapılarak limit çekme oranları belirlenmiştir. Ayrıca derin çekilen sacların sertlikleri ölçülerek pekleşme durumları ortaya konulmuştur. Diğer taraftan deneysel olarak gerçekleştirilen derin çekme işlemi sonlu elemanlar programı ile modellenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar şu şekildedir:

- Farklı yapıştırıcılar ile yapılan ön denemelerde epoksi bazlı yapıştırıcıların gevrek olduğu ve şekillenme esnasında kırıldıkları görülmüştür. Silikon bazlı yapıştırıcıların ise istenilen esnekliği sağladığı ancak katmanların arasında kalan yapıştırıcının kurumadığı görülmüştür. Poliüretan bazlı yapıştırıcılarda ise istenilen kuruma ve süneklik sağlanmıştır. Dolayısı ile çift katmanlı sacların yapıştırma ile oluşturulması durumunda poliüretan bazlı reçineler ile daha iyi sonuçlar elde edileceği görülmüştür.
- Soyulma testleri sonucunda yapışmanın soyulma direncinin 10 N/mm, ortalama soyulma kuvvetinin ise yaklaşık 65 N olduğu belirlenmiştir. Yapıştırmanın dayanabileceği maksimum kayma gerilmesi de yaklaşık 3.1 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler otomotiv sanayiinde kullanılan parçalar için istenilen değerlerin üstünde olması nedeniyle tez kapsamında üretilen katmanlı sac bu sektörde kullanılabilir.
- Çekme testleri ile çelik sacın akma ve çekme dayanımları sırasıyla 204.3 MPa ve 335.9 MPa, alüminyum sacın ise 120.2 MPa ve 237.5 MPa olarak belirlenmiştir. Uzama miktarları ise çelik için %24.1, alüminyum için %18.8 olduğu görülmüştür.
- Çift katmanlı sacın akma dayanımı 147.88 MPa, çekme dayanımı ise 269.5 MPa olarak belirlenmiştir. Maksimum uzama değerinin ise %21.8 olduğu görülmüştür.

- Çift katmanlı saclara yapılan çekme testleri sonucunda sacların dayanım ve uzama miktarları kendilerini oluşturan sacların değerlerinin arasında çıkmıştır.
- Çalışma sonucunda çift katmanlı sacların kompozit malzemeler için geçerli olan karşım kuralına uyduğu görülmüştür. Tek malzemelerin mekanik özellikleri ve karşım kuralı formülleri kullanılarak çift katmanlı sacın mekanik özellikleri ortalama %4.6'lık bir hata oranı ile belirlenebilmiştir. Dolayısı ile katmanlı sacların mekanik özellikleri karşım kuralı ile hesaplanabilir.
- Şekillendirme sınırı en yüksek ($\$SE_0 = 0.31$) olan sac DC01 çelik sac iken, en düşük ($\$SE_0 = 0.21$) sac EN AW 5754 H111 alüminyum sacıdır. çift katmanlı sacların $\$SE$ 'leri kendini oluşturan sacların $\$SE$ 'lerin arasında kalmaktadır. Buna göre çift katmanlı sacın çelik katmanı zımba ile temas ettiği durumda $\$SE_0 = 0.267$ iken, alüminyum katman zımba ile temas ettiği durumda bu değer 0.295'e kadar çıkmaktadır.
- Çift katmanlı sacların şekillendirme sınırının kendini oluşturan sacların $\$SE$ 'lerinin arasında çıktığı belirlenmiştir. Çift katmanlı sacın $\$SE$ 'si dış katmanda bulunan sacın (zımba ile temas etmeyen sac) $\$SE$ 'sine yakın çıkmaktadır.
- Alüminyum ve çelik sacların birleştirilmesi ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların şekillendirilebilirliği alüminyuma göre %27.6 (Çe/Al) ile %40.4 (Al/Çe) oranında artmıştır. Aynı durum çelik ölçüt alınarak incelendiğinde çift katmanlı sacın şekillendirilebilirliği çelik sacdan yaklaşık %13.8 (Çe/Al) ile %4.8 (Al/Çe) daha düşük çıkmıştır. Bu durumda çift katmanlı sacların şekillendirilebilirliği, kendisini oluşturan saclardan şekillendirilebilirliği düşük olan sacın üstünde olmaktadır. Daha yüksek şekillendirilebilirliğe sahip saclar otomotiv sektöründe tercih edilir.
- Çift katmanlı sacların derin çekilmesinde elastik modülü düşük olan sacın iç kısımda olması durumunda yapıştırma kuvvetine ek olarak geri esneme kuvveti ile saclar kilitlenmektedir. Böylelikle çift katmanlı saclarda katmanlar arası ayrılma zorlaşmaktadır.

- Çe/Al dizilimi daha yüksek baskı plakası kuvveti altında çalışmaya olanak tanırken, Al/Çe dizilimi ise daha büyük çaplı parçalar çekilmesine imkân vermektedir. Ancak Al/Çe diziliminde baskı plakası kuvveti Çe/Al dizilimine göre 4 kat azalmakta bu durum üretilen ürünlerde kırılma riskini arttırmaktadır.
- Çift katmanlı sacların LÇO'larının zımba ile temas eden saca göre değiştiği görülmüştür. LÇO'nun her zaman iç katmanda bulunan saca daha yakın olduğu görülmüştür.
- Derin çekme işleminde incelmanın dış katmanda daha fazla olması sebebiyle, mukavemet olarak zayıf olan malzemenin iç katmanda olması daha avantajlı olmaktadır
- Anizotropi katsayısı, farklı saclardan oluşan çift katmanlı sacların derin çekilmesini önemli ölçüde etkilemektedir. Katmanlı sacı oluşturacak tek sacların anizotropi özelliklerinin benzer olması işlemin başarısını arttıracaktır.
- Derin çekme işleminde alüminyum saclar yağlama durumundan yüksek oranda etkilenirken çelik saclarda aynı etki gözlenmemiştir. Dolayısıyla alüminyum saclar ile çalışılırken kullanılacak olan yağlayıcı derin çekme performansını önemli ölçüde etkileyecektir.
- Derin çekme sonrası çift katmanlı saclarda herhangi bir ayrılma görülmemiştir. Bu durum yapışmanın derin çekme işlemi boyunca sürekliliğini koruduğunu göstermiştir.
- Al/Çe çift katmanlı sacların geri esneme oranlarının tek sacların geri esneme oranlarının arasında olduğu belirlenmiştir. Geri esneme oranının her zaman dış katmandaki sacın geri esneme oranına yakın çıktığı görülmüştür.
- Tek çelik sacın alüminyum ile birleştirilerek çift katmanlı yapılması durumunda geri esneme oranının 37.58° bükme açısı için yaklaşık %10 oranında azaltılabileceği görülmüştür.
- Derin çekilen numunelere yapılan sertlik ölçümleri sonucunda özellikle tek sacların yüksek oranda pekleşerek ilk duruma göre 1.5 ile 2 kat oranında sertliklerinin arttığı görülmüştür. Çift katmanlı saclarda ise katmanların sertlikleri ilk duruma göre yaklaşık 1.3 kat arttığı

görülmüştür. Buna göre çift katmanlı sacların katmanlarının tek saclara göre daha az pekleştiği belirlenmiştir.

Yukarıdaki sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde tez kapsamında üretilen çift katmanlı sacların, yapışma dayanımları açısından piyasadaki saclar ile benzer özelliklerde olması ve şekil alma kabiliyetlerinin kendisini oluşturan tekil sacların arasında olması sebebiyle otomotiv sektöründe kullanılabilir.

Derin çekme simülasyon sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Sonlu elemanlar programı ile farklı modeller oluşturularak yapılan simülasyonlar yapışmanın modellenme durumunun sonuçları etkilediğini göstermiştir. Gerçeğe en yakın sonucun çift katmanlı sacın sac metal/yapışma ara yüzeyi/katılan yapıştırıcı/yapışma ara yüzeyi/sac metal şeklinde modellenmesi durumunda elde edildiği görülmüştür.
- Yapılan farklı simülasyon modellerinde katılan yapıştırıcı ara katmanın modellenmediği durumlarda da gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür. Böylelikle daha kısa sürede çözüm elde edilebilmektedir.
- Sonlu elemanlar modelinde yapışmanın modellenmesi için normal yöndeki kritik gerilme 3.8 MPa, kayma yönündeki kritik gerilme ise 3.2 MPa olarak belirlenmiştir. Yapışmada hasar oluşumunun devamı için gereken kritik hasar enerjisi normal yönde 1000 J/m², kayma yönünde ise 820 J/m² olarak belirlenmiştir.
- Çift katmanlı saclarda dizilimden bağımsız olarak her zaman en dış katmandaki sac kalınlığı daha fazla değişmektedir. Bu sebeple dış katmanda yüksek mukavemetli sacın bulunması hasar oluşumunu geciktirecektir.
- Çift katmanlı sacların derin çekilmesinde gerekli olan maksimum zımba kuvveti, tek sacların çekilmesi için gerekli olan maksimum zımba kuvvetlerinin toplamı kadar olmaktadır. Genel olarak %4.85'lik bir mutlak hata oranı ile maksimum zımba kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir.

- Yapılan simülasyonlar ile LÇO'lar ortalama %1.85 hata oranı ile deneysel sonuçlara yakın olarak belirlenmiştir. Kalıp elemanları ile sac yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısının LÇO'yu yüksek oranda etkilediği görülmüştür.
- Baskı plakası kuvvetini artması ile birlikte katmanlar arasında bulunan katılmış yapıştırıcının dışarı taşıdığı görülmüştür. Taşma miktarı baskı plakası kuvvetinin artması ile birlikte artmıştır.
- Çe/Al dizilimde Al/Çe dizilime göre daha fazla kırışıklık olduğu belirlenmiştir. Çelik sacın yüksek düzlemsel anizotropiye ($|\Delta R|=1.010$) sahip olması sebebiyle hadde yönü ile 45° 'lik açıda kalıp içerisine diğer yönlerden daha önce çekilmesi kırışmanın başlıca nedenidir. Sac dizilimi Al/Çe olarak değiştiğinde ise daha izotrop ($|\Delta R|=0.101$) olan alüminyum sacın çelik sacı baskılayarak kırışmayı engellediği belirlenmiştir.
- Yapılan simülasyonlar ile hasar oluşumunun her zaman mukavemeti zayıf olan sacdan başladığı belirlenmiştir.
- Çift katmanlı saclarda kulak uzunluğuna etki eden en önemli faktörün hadde yönüne göre açısız dizilim olduğu görülmüştür. Alüminyum sac ile çelik sac hadde yönleri birbirine dik olarak (0-90) birleştirildiğinde kulak yüksekliğinin tek çelik saca göre çift katmanlı sacda %39 oranında azaldığı görülmüştür.
- Derin çekme sonucunda oluşan kulakların sacın zımba ile temas eden yüzeyinden etkilenmediği görülmüştür. Ancak tek sacların çift katmanlı sac üretimi esnasındaki hadde yönüne göre durumlarının kulak uzunluğunu etkilediği görülmüştür. Hadde yönüne göre 0-0 ve 0-90 dizilimlerine sahip saclarda minimum kulak yüksekliği görülürken 0-45 dizilimli saclarda ise maksimum olduğu görülmüştür.

Çift katmanlı saclar için yapılan simülasyonlar neticesinde bu çalışmada tasarlanan Model-C ile gerçeğe en yakın sonuçların optimum sürede alınabileceği görülmüştür. Dolayısı ile bundan sonraki yapılacak çalışmalarda veya tasarımlarda çift katmanlı sacların davranışları Model-C kullanılarak doğru bir şekilde belirlenebilir. Tasarımcı Model-C ile yaptığı simülasyonlarda sac metalin şekillendirilmesi esnasında oluşacak hasar durumlarını belirleyebilir. Kalıp boyutlarını bu modeli

kullanarak rahatlıkla belirleyebilir. Sonuç olarak bu tez kapsamında tasarlanan sonlu elemanlar metodu modellerinde Model-C yapıştırma ile oluşturulmuş çift katmanlı sacların simülasyonlarında kullanılması tavsiye edilir.

Öneriler aşağıda maddeler haline sunulmuştur:

- Derin çekme esnasında çift katmanlı sacların yan duvarlarında ayrılma oluşabilmektedir. Bu gibi durumların önlenmesi için kalıp boşluğundan basınçlı hidrolik (hidro mekanik derin çekme) ile karşı baskı oluşturulabilir.
- Yapıştırıcı kalınlığının kontrol edilebildiği bir sistem ile farklı yapıştırıcı kalınlıkları ile üretilmiş çift katmanlı sacların davranışları ileriki çalışmalara konu olabilir.
- Homojen kalınlığa sahip çift katmanlı saclar ile kalıp boşluğunun çift katmanlı saclarda oluşan kırışmaya etkisi incelenebilir.
- Bu çalışmada sabit baskı plakası kuvveti altında derin çekme işlemleri yapılmıştır. Değişken baskı plakası kuvveti altında çift katmanlı sacların derin çekme davranışları incelenerek literatüre katkı sağlanabilir.
- Sandviç panellerde olduğu gibi çift katmanlı saclarda da ara katmanda takviye elemanı kullanılabilir. Takviye elemanının çift katmanlı sacların davranışına olan etkisi incelenebilir.
- Çalışmada yüzeylerin farklı olması sebebiyle derin çekme işleminin ara yüzey yağlama durumundan yüksek oranda etkilendiği görülmüştür. İleriki çalışmalarda yağlama durumunun çift katmanlı sacların derin çekilmesine olan etkisi incelenebilir.
- Farklı sac birleştirme türlerinin (yapıştırma, haddeleme, kaynak gibi) çift katmanlı sacların kulaklanma durumuna etkisi incelenebilir.
- Oluşturulan çift katmanlı saca çökme direnci belirlenebilir. Ayrıca titreşim analizi yapılarak dinamik etkiler altındaki davranışları incelenebilir.
- Tekil sacların anizotropik özelliklerinin çift katmanlı saca olan etkileri XRD, SEM gibi yöntemler kullanılarak belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Abaqus Manual. (2007). *Abaqus/explicit: user's examples and theory manuals*. Dassault systemes.
- Abdullah, S., Fahrudin, A., Syarif, J., Omar, M.Z., ve Zulkifli, R. (2009). Fatigue crack growth modelling of fibre metal laminate (FML) composite. *European Journal of Scientific Research*. 35 (1). 43–53.
- Abedrabbo, N., Pourboghra, F., ve Carsley, J. (2007). Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models. *International Journal of Plasticity*. 23 (5). 841–875.
- Afshin, E. ve Kadkhodayan, M. (2015). An experimental investigation into the warm deep-drawing process on laminated sheets under various grain sizes. *Materials & Design*. 87 . 25–35.
- Aghchai, A.J., Shakeri, M., ve Dariani, B.M. (2013). Influences of material properties of components on formability of two-layer metallic sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 66 (5–8). 809–823.
- Aghchai, A.J., Shakeri, M., ve Mollaei-Dariani, B. (2008). Theoretical and experimental formability study of two-layer metallic sheet (Al1100/St12). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 222 (9). 1131–1138.
- Alizad-Kamran, M., Hoseinpour Gollo, M., Hashemi, A., ve Seyedkashi, S.M.H. (2018). Determination of critical pressure in analyzing of rupture instability for hydromechanical deep drawing using advanced yield criterion. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 18 (1). 103–113.
- Almeida, R.S., Damato, C.A., Botelho, E.C., Pardini, L.C., ve Rezende, M.C. (2008). Effect of surface treatment on fatigue behavior of metal/carbon fiber laminates. *Journal of materials science*. 43 (9). 3173–3179.
- Amancio-Filho, S.T. ve dos Santos, J.F. (2009). Joining of polymers and polymer–metal hybrid structures: Recent developments and trends. *Polymer Engineering & Science*. 49 (8). 1461–1476.
- Anonim. (2009). Sheet metal hydroforming. <http://www.inoxveneta.it/en/sheet-metal-hydroforming/>, erişim 19 Nisan 2020.
- Assempour, A., Hashemi, R., Abrinia, K., Ganjiani, M., ve Masoumi, E. (2009). A methodology for prediction of forming limit stress diagrams considering the strain path effect. *Computational Materials Science*. 45 (2). 195–204.
- ASTM-E517-00. (2011). Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. *ASTM Standard*.
- ASTM-E8/E8M-15a. (2015). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *ASTM Standard*.
- ASTM D1002-10. (2005). Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). *Standards*. 1–5.
- ASTM D1876-08. (2015). Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-peel Test). *ASTM International*.
- ASTM E384-05a. (2005). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. *ASTM International*. 14 . 1–24.

- Atrian, A. ve Fereshteh-Saniee, F. (2013). Deep drawing process of steel/brass laminated sheets. *Composites Part B: Engineering*. 47 . 75–81.
- Austin, T.S.P., Gregson, P.J., Dakin, J.P., Powell, P.M., ve Singh, M.M. (1999). “Fatigue damage in carbon fiber reinforced aluminum alloy laminates”. *Proc of 5th Int Conf on Deformation and Fracture of Composites*. ss. 191–200.
- Bagherzadeh, S., Mirnia, M.J., ve Mollaei Dariani, B. (2015). Numerical and experimental investigations of hydro-mechanical deep drawing process of laminated aluminum/steel sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 18 . 131–140.
- Bagherzadeh, S., Mollaei-Dariani, B., ve Malekzadeh, K. (2012). Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations. *Journal of Materials Processing Technology*. 212 (9). 1840–1849.
- Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, H., ve Elyasi, M. (2012). “Developments in Sheet Hydroforming for Complex Industrial Parts”. *Metal Forming – Process, Tools, Design*. InTech.
- Banabic, D. (2010). *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Springer Berlin Heidelberg.
- Banabic, D. ve Soare, S. (2008). On the effect of the normal pressure upon the forming limit strains. *Numisheet 2008*. (October). 199–204.
- Barnes, T.A. ve Pashby, I.R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part II—adhesive bonding and mechanical fasteners. *Journal of materials processing technology*. 99 (1–3). 72–79.
- Beer, F., DeWolf, J., Johnston Jr, E.R., ve Mazurek, D. (2014). *Mechanics of materials*. McGraw-Hill Education.
- Beer, P.F., Johnston Jr, E.R., DeWolf, J., Mazurek, D., Beer, F., DeWolf, J., Johnston Jr, E.R., ve Mazurek, D. (2012). *Mechanics of materials*. McGraw-Hill.
- Bhaduri, A. (2018). *Mechanical properties of metals and alloys*. Springer Nature Singapore.
- Boesenkool, R., Hurkmans, A., Jansen, R.J., ve Roukema, M. (1997). The development of steelite: the lightweight deep-drawable steel-plastic sandwich for automotive applications. *Materials for Lean Weight Vehicles*. 61–66.
- Botelho, E.C., Silva, R.A., Pardini, L.C., ve Rezende, M.C. (2006). A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Materials Research*. 9 (3). 247–256.
- Bozhevolnaya, E. ve Lyckegaard, A. (2005). Structurally graded core inserts in sandwich panels. *Composite Structures*. 68 (1). 23–29.
- Burchitz, I., Boesenkool, R., van der Zwaag, S., ve Tassoul, M. (2005). Highlights of designing with Hylite—a new material concept. *Materials & Design*. 26 (4). 271–279.
- Burianek, D.A. ve Spearing, S.M. (2001). Delamination growth from face sheet seams in cross-ply titanium/graphite hybrid laminates. *Composites science and technology*. 61 (2). 261–269.
- Can, V. (2008). *Kompozit Sandviç Panellerin Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, (178738).
- Carradò, A., Faerber, J., Niemeyer, S., Ziegmann, G., ve Palkowski, H. (2011). Metal/polymer/metal hybrid systems: Towards potential formability applications. *Composite Structures*. 93 (2). 715–721.
- Chang, K.-H. (2013). *Sheet Metal Product Manufacturing and Cost Estimating Using Cad/Cae Simulation*. Elsevier Inc.

- Charpentier, P.L. (1975). Influence of punch curvature on the stretching limits of sheet steel. *Metallurgical transactions A*. 6 (8). 1665.
- Chen, C.-Y., Kuo, J.-C., Chen, H.-L., ve Hwang, W.-S. (2006). Experimental Investigation on Earing Behavior of Aluminum/Copper Bimetal Sheet. *Materials Transactions*. 47 (9). 2434–2443.
- Chen, G., Li, J.T., Yu, H.L., Su, L.H., Xu, G.M., Pan, J.S., You, T., Zhang, G., Sun, K.M., ve He, L.Z. (2016). Investigation on bonding strength of steel/aluminum clad sheet processed by horizontal twin-roll casting, annealing and cold rolling. *Materials and Design*. 112 . 263–274.
- Cheng, H.S., Cao, J., Yao, H., Liu, S.D., ve Kinsey, B. (2004). Wrinkling behavior of laminated steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 151 (1–3). 133–140.
- Choi, S.H., Kim, K.H., Oh, K.H., ve Lee, D.N. (1997). Tensile deformation behavior of stainless steel clad aluminum bilayer sheet. *Materials Science and Engineering A*. 222 (2). 158–165.
- Çiçek, O. (2005). *Effects of Drawbeads in Sheet Metal Forming*. Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (166522).
- Cotterell, M., Schambergerova, J., Ziegelheim, J., ve Janovec, J. (2002). Dependence of micro-hardness on deformation of deep-drawing steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 124 (3). 293–296.
- CustomPartNet. (2009). Springback. <https://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming#bending>, erişim 05 Mart 2020.
- Darabi, R., Azodi, H.D., ve Bagherzadeh, S. (2017). Investigation into the effect of material properties and arrangement of each layer on the formability of bimetallic sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 29 . 133–148.
- Davey, S., Das, R., Cantwell, W.J., ve Kalyanasundaram, S. (2013). Forming studies of carbon fibre composite sheets in dome forming processes. *Composite Structures*. 97 . 310–316.
- DiCello, J.A. (1980). Steel-Polypropylene-Steel Laminate—A New Weight Reduction Material. *SAE Transactions*. 89 . 491–505.
- Dilmec, M., Halkaci, H.S., Ozturk, F., Livatyali, H., ve Yigit, O. (2013). Effects of sheet thickness and anisotropy on forming limit curves of AA2024-T4. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 67 (9–12). 2689–2700.
- Dulucheanu, C., Severin, T.L., ve Bancescu, N. (y.y.). The influence of environment temperature variation on the strength characteristics of composite materials type “alucobond. *New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*.
- Dunand, M. ve Gacel, J.-N. (2006). Usilight: A Cost-Effective Solution to Lighten Cars. *SAE Technical Papers*. 12.
- Dunand, M. ve Gauriat, A. (2004). Usilight, an answer to the light-weighting requirements to the automotive industry. *Revue de Metallurgie*. (10). 773.
- Emmens, W.C. (2011). *Formability; A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal*. Springer Berlin Heidelberg.
- Fereshteh-Saniee, F., Alavi-Nia, A., ve Atrian-Afyani, A. (2008, Eylül). “An experimental investigation on the deep drawing process of steel–brass bimetal sheets”. *Proceedings of metal forming*. Krakow, Poland.
- Föll, H. (y.y.). Inhomogeneous Deformation. https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_9/advanced/a9_2_2.html, erişim 29 Aralık 2018.

- GmbH, 3A Composites. (2020). Alucobond. <https://alucobond.com/products>, erişim 10 Eylül 2020.
- GmbH, A.C. (2010). *Dibond Broschüre*.
- Goede, M., Stehlin, M., Rafflenbeul, L., Kopp, G., ve Beeh, E. (2009). Super Light Car-lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration. *European Transport Research Review*. 1 (1). 5–10.
- Goodwin, G.M. (1968). Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *SAE Transactions*. 380–387.
- Gower, H.L., Richardson, I.M., ve Pieters, R. (2006). Pulsed laser welding of Steelite, a steel polypropylene laminate. *Science and Technology of Welding and Joining*. 11 (5). 593–599.
- Graf, A. ve Hosford, W. (1993). Effect of Changing Strain Paths on Forming Limit Diagrams of Al 2008-T4. *Metallurgical Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*. 24 (11). 2503–2512.
- Gresham, J., Cantwell, W., Cardew-Hall, M.J., Compston, P., ve Kalyanasundaram, S. (2006). Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures. *Composite Structures*. 75 (1–4). 305–312.
- Groche, P., Übelacker, D., Stein, P., Steinbach, F., ve Erman Tekkaya, A. (2018). Experimental and analytical investigation of the force requirements in shear cutting of metal-polymer-metal composites. *International Journal of Material Forming*. 11 (2). 213–224.
- Grote, K.-H. ve Antonsson, E.K. (2009). *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. Würzburg Springer.
- Gunnarsson, L. ve Schedin, E. (2001). Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force. *Journal of Materials Processing Technology*. 114 (2). 168–173.
- Habenicht, G. (2009). *Applied adhesive bonding: A Practice Guide for Flawless Results*. Mörlanbach Wiley-VCH.
- Haksan. (2016). Eksanrik pres. <http://www.haksanmakina.com.tr/?d530/genc-35-ton-mekanik-kavramali-pnomatik-sistemli-c-tipi-eksantrik-pres-tezgahi.html>, erişim 25 Kasım 2020.
- Halicioglu, R., Dulger, L.C., ve Bozdana, A.T. (2016). Structural design and analysis of a servo crank press. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 19 (4). 2060–2072.
- Halkaci, H.S., Turkoz, M., ve Dilmec, M. (2014). Enhancing formability in hydromechanical deep drawing process adding a shallow drawbead to the blank holder. *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (8). 1638–1646.
- Harhash, M. (2017). Forming Behaviour of Multilayer Metal/Polimer/Metal Systems. PhD Thesis, Technische Universität Clausthal.
- Harhash, M., Carrado, A., ve Palkowski, H. (2014a). *Forming Limit Diagram of Steel/Polymer/Steel Sandwich Systems for the Automotive Industry*. Springer.
- Harhash, M., Carradó, A., ve Palkowski, H. (2017). Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel/polymer sandwich systems with local inlays – Part 2: Stretching and deep drawing. *Composite Structures*. 160 . 1084–1094.
- Harhash, M., Sokolova, O., Carradó, A., ve Palkowski, H. (2014b). Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel/polymer sandwich systems with local inlays – Part

1. *Composite Structures*. 118 . 112–120.

- Hasan Nejad, S.J., Hasanzadeh, R., Doniavi, A., ve Modanloo, V. (2017). Finite element simulation analysis of laminated sheets in deep drawing process using response surface method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 93 (9–12). 3245–3259.
- Hasek, V. (1978). Research and theoretical description concerning the influences on the FLDs. *Blech Rohre Profile*. 25 . 213–220.
- Hecker, S.S. (1972, Ekim). “A simple forming-limit curve technique and results on aluminum alloys”. *Int. Deep Drawing Res. Group, 7 th Biennial Congress*. Amsterdam.
- Hecker, S.S. (1975). Formability of Aluminum Alloy Sheets. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 97 (1). 66–73.
- Heintzel, A. (2014). The Project ThyssenKrupp InCar plus. *ATZ extra*. (October).
- Hidroliksan. (2019). Hidrolik Pres. http://www.hidroliksan.com/tr/urunler-55/uretim_presleri-212/hdd-214.html, erişim 25 Kasım 2020.
- Hill, H. (1994). Introduction to the self-pierce riveting process and equipment. *IBEC'94-Body Assembly & Manufacturing*. 1–9.
- Hollomon, J.H. (1945). Tensile deformation. *Aime Trans*. 12 (4). 1–22.
- Hosford, W.F. ve M., C.R. (2007). *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press.
- Huck, W.R. ve Bosshard, B. (2007, Ekim). “Adhesive Bonding Concepts for Add-on Module in Assembly Lines”. *Proceedings of the Car Body Hang-ons-8th European Automotive Meeting*. Bad Nauheim, Germany.
- Hufenbach, W., Jaschinski, J., Weber, T., ve Weck, D. (2008). Numerical and experimental investigations on HYLITE sandwich sheets as an alternative sheet metal. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 8 (2). 67–80.
- Ibarra-Castanedo, C., Avdelidis, N.P., Grinzato, E.G., Bison, P.G., Marinetti, S., Plescanu, C.C., Bendada, A., ve Maldague, X.P. (2011). Delamination detection and impact damage assessment of GLARE by active thermography. *International Journal of Materials and Product Technology*. 41 (1–4). 5–16.
- J. Rosler, H. Harders, M.B., Harders, H., ve Baker, M. (2007). *Mechanical behaviour of engineering materials*. Springer Berlin Heidelberg.
- Jackson, K.P., Allwood, J.M., ve Landert, M. (2008). Incremental forming of sandwich panels. *Journal of Materials Processing Technology*. 204 (1–3). 290–303.
- Jalil, A., Hoseinpour Gollo, M., Sheikhi, M.M., ve Seyedkashi, S.M.H. (2016). Hydrodynamic deep drawing of double layered conical cups. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 26 (1). 237–247.
- Jie, M., Cheng, C.H., Chan, L.C., ve Chow, C.L. (2009). Forming limit diagrams of strain-rate-dependent sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. 51 (4). 269–275.
- Johnson, W.S. (1986). *Impact and residual fatigue behavior of ARALL and AS6/5245 composite materials*. Virginia NASA.
- Johnson, W.S., Cobb, T.Q., Lowther, S., ve St Clair, T.L. (1998). *Hybrid titanium composite laminates: a new aerospace material*. Hampton NASA-Langley Research Center.
- Johnson, W.S., Li, E., ve Miller, J.L. (1996). High temperature hybrid titanium composite laminates: an early analytical assessment. *Applied Composite Materials*. 3 (6). 379–390.

- Kagzi, S.A., Gandhi, A.H., Dave, H.K., ve Raval, H.K. (2016). An analytical model for bending and springback of bimetallic sheets. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 23 (1). 80–88.
- Kalpakjian, S. ve Schmid, S.R. (2007). *Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5/E*. Illinois Prentice Hall.
- Kami, A., Chung, K., ve Banabic, D. (2017a). Analytical and numerical studies of formability of metal/polymer/metal sandwich sheets. *Romanian Journal Of Technical Sciences - Applied Mechanics*. 62 (1).
- Kami, A., Mollaie Dariani, B., Comsa, D.S., Banabic, D., Sadough Vanini, A., ve Liewald, M. (2017b). An Experimental Study on the Formability of a Vibration Damping Sandwich Sheet (Bondal). *Proceedings of the Romanian Academy, Series A*.
- Karajibani, E., Hashemi, R., ve Sedighi, M. (2017). Forming limit diagram of aluminum-copper two-layer sheets: numerical simulations and experimental verifications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 90 (9). 2713–2722.
- Karupannasamy, D.K., Hol, J., de Rooij, M.B., Meinders, T., ve Schipper, D.J. (2012). Modelling mixed lubrication for deep drawing processes. *Wear*. 294–295 . 296–304.
- Kawai, M. ve Hachinohe, A. (2002). Two-stress level fatigue of unidirectional fiber–metal hybrid composite: GLARE 2. *International Journal of Fatigue*. 24 (5). 567–580.
- Ke, J., Liu, Y., Zhu, H., ve Zhang, Z. (2018). Formability of sheet metal flowing through drawbead—an experimental investigation. *Journal of Materials Processing Technology*. 254 . 283–293.
- Keeler, S.P. (1961). *Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches*. Massachusetts Institute of Technology.
- Keeler, S.P. (1968). Circular grid system—a valuable aid for evaluating sheet metal formability. *SAE Transactions*. 371–379.
- Keliwei. (2019). No Title. <http://www.sinkmachine.com/hydraulic-press-machine/single-action-hydraulic-press/four-column-single-acting-hydraulic-press.html>, erişim 25 Kasım 2020.
- Kikuma, T. ve Nakazima, K. (1971, Haziran). “Effects of deforming conditions and mechanical properties on the stretch-forming limits of steel sheets”. *Proc Internat Conf Sci Technol Iron Steel*. Tokyo.
- Kim, H., Lee, S.-M., ve Altan, T. (1996). Prediction of hardness distribution in cold backward extruded cups. *Journal of Materials Processing Technology*. 59 (1–2). 113–121.
- Kim, I.K. ve Hong, S.I.G. (2013). Roll-bonded tri-layered Mg/Al/stainless steel clad composites and their deformation and fracture behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 44 (8). 3890–3900.
- Kim, J.G., Baek, S.M., Yoon, J.I., Seo, M.H., Cho, W.T., Chin, K.G., Lee, S., ve Kim, H.S. (2017). Stretchability and drawability of twinning-Induced plasticity steel-Cored layer steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 250 . 357–362.
- Kim, J.K. ve Thomson, P.F. (1990). Separation behaviour of sheet steel laminate during forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 22 (2). 147–161.
- Kim, K.J., Kim, D., Choi, S.H., Chung, K., Shin, K.S., Barlat, F., Oh, K.H., ve Youn, J.R. (2003). Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 139 (1–3). 1–7.
- Kim, K.J., Rhee, M.H., Choi, B.I., Kim, C.W., Sung, C.W., Han, C.P., Kang, K.W., ve Won, S.T. (2009). Development of application technique of aluminum sandwich sheets for

- automotive hood. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 10 (4). 71–75.
- Kishor, N. ve Ravi Kumar, D. (2002). Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method. *Journal of Materials Processing Technology*. 130–131 . 20–30.
- Kleemola, H.J. ve Kumpulainen, J.O. (1980). Factors influencing the forming limit diagram: Part II — Influence of sheet thickness. *Journal of Mechanical Working Technology*. 3 (3). 303–311.
- Koç, E. (2020). *Makina Elemanları, cilt 1*. Nobel Kitabevi.
- Kuroda, M. ve Tvergaard, V. (2000). Effect of strain path change on limits to ductility of anisotropic metal sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. 42 (5). 867–887.
- Lamera. (2020). Hybrix. <https://www.lamera.se/Transportation>, erişim 21 Nisan 2020.
- Lang, L., Danckert, J., ve Nielsen, K.B. (2005). Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle. *Journal of Materials Processing Technology*. 170 (3). 524–535.
- Lathabai, S., Tyagi, V., Ritchie, D., Kearney, T., Finnin, B., Christian, S., Sansome, A., ve White, G. (2011). Friction Stir Blind Riveting: A Novel Joining Process for Automotive Light Alloys. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*. 4 (1). 589–601.
- Lesuer, D.R., Syn, C.K., Sherby, O.D., Wadsworth, J., Lewandowski, J.J., ve Hunt, W.H. (1996). Mechanical behaviour of laminated metal composites. *International Materials Reviews*. 41 (5). 169–197.
- Li, C., Chi, C., Lin, P., Zhang, H., ve Liang, W. (2015). Deformation behavior and interface microstructure evolution of Al/Mg/Al multilayer composite sheets during deep drawing. *Materials & Design*. 77 . 15–24.
- Li, D. ve Ghosh, A.K. (2004). Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 145 (3). 281–293.
- Li, Z., Zhao, J., Zhang, Q., Jiao, S., ve Jiang, Z. (2019). Numerical investigation on the forming behaviour of stainless / carbon steel bimetal composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 101 . 1075–1083.
- Lichtenecker, K. (1926). Dielectric constant of natural and synthetic mixtures. *Phys. Z.* 27 . 115.
- Lin, P.-C., Lo, S.-M., ve Wu, S.-P. (2018). Fatigue life estimations of alclad AA2024-T3 friction stir clinch joints. *International Journal of Fatigue*. 107 . 13–26.
- Liston, E.M., Martinu, L., ve Wertheimer, M.R. (1993). Plasma surface modification of polymers for improved adhesion: a critical review. *Journal of adhesion science and technology*. 7 (10). 1091–1127.
- Liu, J., Liu, W., ve Wang, J. (2012). Influence of interfacial adhesion strength on formability of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 22 . s395–s401.
- Liu, J., Liu, W., ve Xue, W. (2013). Forming limit diagram prediction of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheets. *Materials & Design*. 46 . 112–120.
- Liu, J. ve Xue, W. (2013). Formability of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheets. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 23 (4). 964–969.
- Liu, J. ve Zhuang, L. (2018). Cylindrical cup-drawing characteristics of aluminum-polymer

sandwich sheet. 1885–1896.

- Mackwood, A.P. ve Crafer, R.C. (2005). Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review. *Optics & Laser Technology*. 37 (2). 99–115.
- Maleki, H., Bagherzadeh, S., Mollaei-Dariani, B., ve Abrinia, K. (2013). Analysis of bonding behavior and critical reduction of two-layer strips in clad cold rolling process. *Journal of materials engineering and performance*. 22 (4). 917–925.
- Manabe, K., Koyama, H., Yoshihara, S., ve Yagami, T. (2002). Development of a combination punch speed and blank-holder fuzzy control system for the deep-drawing process. *Journal of Materials Processing Technology*. 125 . 440–445.
- Manesh, H.D. ve Taheri, A.K. (2005). Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 166 (2). 163–172.
- Marandi, F.A., Jabbari, A.H., Sedighi, M., ve Hashemi, R. (2016). An Experimental, Analytical, and Numerical Investigation of Hydraulic Bulge Test in Two-Layer Al–Cu Sheets. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 139 (3). 031005.
- Marciniak, Z. ve Kuczyński, K. (1967). Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences*. 9 (9). 609IN1613-612IN2620.
- Marciniak, Z., Kuczyński, K., ve Pokora, T. (1973). Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension. *International Journal of Mechanical Sciences*. 15 (10). 789–800.
- Marklund, E., Hellström, P., ve Wingborg, J. (2013). *Evaluation of CFRP-Hybric integrated joints*. Swerea SICOMP.
- Miller, W.K. (1980). *Metal-plastic laminates for vehicle weight reduction*. SAE Technical Paper.
- Milman, Y. V., Galanov, B.A., ve Chugunova, S.I. (1993). Plasticity characteristic obtained through hardness measurement. *Acta Metallurgica Et Materialia*. 41 (9). 2523–2532.
- Mittler, T., Greß, T., Feistle, M., Krinninger, M., Hofmann, U., Riedle, J., Golle, R., ve Volk, W. (2019). Fabrication and processing of metallurgically bonded copper bimetal sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 263 (July 2018). 33–41.
- Mkaddem, A., Bahloul, R., Dal Santo, P., ve Potiron, A. (2006). Experimental characterisation in sheet forming processes by using Vickers micro-hardness technique. *Journal of Materials Processing Technology*. 180 (1–3). 1–8.
- Modanloo, V., Hasanzadeh, R., ve Esmaili, P. (2016). The study of deep drawing of brass-steel laminated sheet composite using Taguchi method. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 29 (1). 103–108.
- Mohr, D. ve Straza, G. (2005). Development of Formable All-Metal Sandwich Sheets for Automotive Applications. *Advanced engineering materials*. 7 (4). 243–246.
- Mori, T. ve Kurimoto, S. (1996). Press-formability of stainless steel and aluminum clad sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 56 (1–4). 242–253.
- Morovvati, M.R., Fatemi, A., ve Sadighi, M. (2011). Experimental and finite element investigation on wrinkling of circular single layer and two-layer sheet metals in deep drawing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 54 (1–4). 113–121.
- Morovvati, M.R., Mollaei-Dariani, B., ve Asadian-Ardakani, M.H. (2010). A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 210 (13). 1738–1747.

- Mortimer, J. (2005). Jaguar “Roadmap” rethinks self-piercing technology. *Industrial Robot*. 32 (3). 209–213.
- Mosse, L., Compston, P., Cantwell, W.J., Cardew-Hall, M., ve Kalyanasundaram, S. (2005). The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre–metal laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 36 (8). 1158–1166.
- Mostafapour, A., Akbari, A., ve Nakhaei, M.R. (2016). Application of response surface methodology for optimization of pulsating blank holder parameters in deep drawing process of Al 1050 rectangular parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 91 (1–4). 731–737.
- Naka, T., Torikai, G., Hino, R., ve Yoshida, F. (2001). The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 113 (1–3). 648–653.
- Nick, A., Nick, B., ve Wortmann, F.-J. (2000). Peel testing of adhesively bonded joints of carbon fibre reinforced epoxy resin. *European Structural Integrity Society*. 27 . 261–271.
- Olsen, T.Y. (1920). Machines for ductility testing. *Proc. Am. Soc. Mater.* 20 (1920). 398–403.
- Oya, T., Tiesler, N., Kawanishi, S., Yanagimoto, J., ve Koseki, T. (2010). Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending. *Journal of Materials Processing Technology*. 210 (14). 1926–1933.
- Özdilli, Ö. (2018). *Polimer kaplı metal sacların derin çekme davranışının incelenmesi*. Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, (542132).
- Özel, M. ve Aka, E.Z. (1969). Çeliklerde akma sınırı ve akma sınırı uzaması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*. 8 (4). 233–238.
- Ozturk, F., Dilmec, M., Turkoz, M., Ece, R.E., ve Halkaci, H.S. (2009, Haziran). “Grid marking and measurement methods for sheet metal formability”. *5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*. ss. 18–21.
- Öztürk, F. ve Lee, D. (2005). Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test. *Journal of Materials Processing Technology*. 170 (1–2). 247–253.
- Palkowski, H. ve Lange, G. (2007). Creation of tailored high-strength, hybrid sandwich structures. *Advanced Materials Research*. 22 . 27–36.
- Palkowski, H., Sokolova, O.A., ve Carradò, A. (2013). Sandwich Materials. *Encyclopedia of Automotive Engineering*. 1–17.
- Papazafeiropoulos, G., Muñiz-Calvente, M., ve Martínez-Pañeda, E. (2017). Abaqus2Matlab: A suitable tool for finite element post-processing. *Advances in Engineering Software*. 105 . 9–16.
- Park, H., Kim, S.-J., Lee, J., Kim, J.H., ve Kim, D. (2020). Delamination behavior analysis of steel/polymer/steel high-strength laminated sheets in a V-die bending test. *International Journal of Mechanical Sciences*. 173 . 105430.
- Parsa, M.H., Ettehad, M., Matin, P.H., ve Al Ahkami, S.N. (2010). Experimental and Numerical Determination of Limiting Drawing Ratio of Al3105-Polypropylene-Al3105 Sandwich Sheets. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 132 (3). 031004.
- Parsa, M.H., Yamaguchi, K., ve Takakura, N. (2001). Redrawing analysis of aluminum–stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments. *International Journal of Mechanical Sciences*. 43 (10). 2331–2347.
- Paul, S.K., Manikandan, G., ve Verma, R.K. (2013). Prediction of entire forming limit diagram from simple tensile material properties. *The Journal of Strain Analysis for Engineering*

Design. 48 (6). 386–394.

- Peckner, D. ve Bernstein, I.M. (1977). Handbook of stainless steels. *McGraw-Hill Book Co., New York*. 1977, (Chapters paged separately).
- Polymex. (2020). P-3002 Poliüretan Protolin Döküm Reçinesi. <https://www.polymex.com.tr/urunler/p-3002-poliuretan-protolin-dokum-recinesi/>, erişim 10 Şubat 2017.
- Prasad, K.S., Panda, S.K., Kar, S.K., Murty, S.V.S.N., ve Sharma, S.C. (2018). Effect of solution treatment on deep drawability of IN718 sheets: Experimental analysis and metallurgical characterization. *Materials Science and Engineering: A*. 727 . 97–112.
- Raghavan, K.S. (1995). A simple technique to generate in-plane forming limit curves and selected applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 26 (8). 2075–2084.
- Rahmatabadi, D. ve Hashemi, R. (2017). Experimental evaluation of forming limit diagram and mechanical properties of nano/ultra-fine grained aluminum strips fabricated by accumulative roll bonding. *International Journal of Materials Research*. 108 (12). 1036–1044.
- Rahmatabadi, D., Shahmirzaloo, A., Farahani, M., Tayyebi, M., ve Hashemi, R. (2019). Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC. *Materials Science and Engineering: A*. 753 . 70–78.
- Rajabi, A. ve Kadkhodayan, M. (2011, Eylül). “An Experimental and Numerical Investigation of Wrinkling in Deep Drawing of Fiber-Metal Laminates”. *10th International Conference Technology on Plasticity*. Aachen.
- Rajabi, A., Kadkhodayan, M., Manoochehri, M., ve Farjadfar, R. (2015). Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental investigations, statistical analyses and finite element modeling. *Journal of Materials Processing Technology*. 215 . 159–170.
- Rees, D.W.A. (2001). Factors influencing the FLD of automotive sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 118 (1). 1–8.
- Reuß, A. (1929). Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 9 (1). 49–58.
- Reyes, G. ve Kang, H. (2007). Mechanical behavior of lightweight thermoplastic fiber–metal laminates. *Journal of Materials Processing Technology*. 186 (1). 284–290.
- Ruokolainen, R.B. ve Sigler, D.R. (2008). The effect of adhesion and tensile properties on the formability of laminated steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 17 (3). 330–339.
- SAE, A. (1993). Metals and alloys in the unified numbering system. *SAE HS-1086 FEB93 and ASTM DS-56 E. 6th ed. Warrendale, PA: A joint publication of the Society of Automotive Engineers (SAE), Inc. and the American Society for Testing and Materials*.
- Sakhtemanian, M.R., Honarpisheh, M., ve Amini, S. (2017). Numerical and experimental study on the layer arrangement in the incremental forming process of explosive-welded low-carbon steel/CP-titanium bimetal sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 95 (9–12). 3781–3796.
- Satheeshkumar, V. ve Narayanan, R.G. (2014). Investigation on the influence of adhesive properties on the formability of adhesive-bonded steel sheets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 228 (3). 405–425.

- Schijve, J. (1993). Development of fibre-metal laminates, ARALL and GLARE, new fatigue resistant materials. *Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-715*.
- Schlosser, F., Signorelli, J., Leonard, M., Roatta, A., Milesi, M., ve Bozzolo, N. (2019). Influence of the strain path changes on the formability of a zinc sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 271 . 101–110.
- Schuler GmbH. (1998). *Metal Forming Handbook*. Springer Berlin Heidelberg.
- Sertkaya, E. (2010). *Aynı Kalınlıktaki Tek ve Çok Katmanlı Sacların Derin Çekme Özelliklerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, (292499).
- Sokolova, O.A., Carradò, A., ve Palkowski, H. (2011). Metal–polymer–metal sandwiches with local metal reinforcements: A study on formability by deep drawing and bending. *Composite Structures*. 94 (1). 1–7.
- Sokolova, O.A., Kühn, M., ve Palkowski, H. (2012). Deep drawing properties of lightweight steel/polymer/steel sandwich composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 12 (2). 105–112.
- Sonmez, F.O. ve Demir, A. (2007). Analytical relations between hardness and strain for cold formed parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 186 (1–3). 163–173.
- Standard, A. (2013). ASTM E8/E8M-13a. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*.
- Takiguchi, M. ve Yoshida, F. (2003a). Analysis of plastic bending of adhesive-bonded sheet metals taking account of viscoplasticity of adhesive. *Journal of Materials Processing Technology*. 140 (1). 441–446.
- Takiguchi, M. ve Yoshida, F. (2003b). Deformation characteristics and delamination strength of adhesively bonded aluminium alloy sheet under plastic bending. *International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*. 46 (1). 68–75.
- Takuda, H., Mori, K., Fujimoto, H., ve Hatta, N. (1996). Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheets using ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*. 60 (1–4). 291–296.
- Tekkaya, A.E. (2001). Improved relationship between Vickers hardness and yield stress for cold formed materials. *Steel Research*. 72 (8). 304–310.
- The Aluminum Association Inc. (2006). International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys. *The Aluminum Association, Arlington, Virginia*. (April 2006). 28.
- ThyssenKrupp Stahl, A. (2012). *Data sheet Bondal®: Composite material with structure and airborne sound damping properties*. Bochum.
- ThyssenKrupp Stahl, A.G. (2012). Litecor: the intelligent solution for cost-effective lightweight design. *Order*. (2187).
- Tseng, H.-C., Hung, C., ve Huang, C.-C. (2010). An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 49 (9–12). 1029–1036.
- Tseng, H.-C., Wu, Z.-C., Hung, C., Lee, M.-H., ve Huang, C.-C. (2009, Eylül). “Investigation of optimum process parameters on the sheet hydroforming of titanium/aluminum clad metal for battery housing”. *4th International Conference on Tube Hydroforming*. Kaohsiung, Taiwan Citeseer.

- Tsoukantas, G. ve Chryssolouris, G. (2008). Theoretical and experimental analysis of the remote welding process on thin, lap-joined AISI 304 sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 35 (9–10). 880–894.
- Uscinowicz, R. (2013). Experimental identification of yield surface of Al-Cu bimetallic sheet. *Composites Part B: Engineering*. 55 . 96–108.
- Uscinowicz, R. (2019). Characterization of Directional Elastoplastic Properties of Al/Cu Bimetallic Sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 28 (3). 1350–1359.
- van Tooren, M.J.L. (2004). *Around Glare*. Dordrecht Springer.
- Varis, J.P. (2003). The suitability of clinching as a joining method for high-strength structural steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 132 (1–3). 242–249.
- Verleysen, P., Peirs, J., Van Slycken, J., Faes, K., ve Duchene, L. (2011). Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (8). 1457–1464.
- Vermeeren, C., Beumler, T., De Kanter, J., Van Der Jagt, O.C., ve Out, B.C.L. (2003). Glare design aspects and philosophies. *Applied Composite Materials*. 10 (4–5). 257–276.
- Vogelesang, L.B. (1983). Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*. 22 (3). 492–496.
- Voigt, W. (1889). Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. *Annalen der physik*. 274 (12). 573–587.
- Wang, G.D. ve Chan, L.C. (2011). Hydroformability of bulge forming light-weight tubes via micro-hardness dependence. *Key Engineering Materials*. 465 . 149–152.
- Wang, W., Chen, G., ve Lin, Z. (2010). Application of new VBHF optimization strategy to improve formability of automobile panels with aluminum alloy sheet. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 20 (3). 471–477.
- Weiss, M., Dingle, M.E., Rolfe, B.F., ve Hodgson, P.D. (2007). The Influence of Temperature on the Forming Behavior of Metal/Polymer Laminates in Sheet Metal Forming. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 129 (4). 530.
- Wielage, B., Nestler, D., Steger, H., Kroll, L., Tröltzsch, J., ve Nendel, S. (2011). “CAPAAL and CAPET–new materials of high-strength, high-stiff hybrid laminates”. *Integrated Systems, Design and Technology 2010*. Springer.
- Wiesbaden, S.F. (2014). Application Potential of Litecor in the Body. *ATZextra worldwide*. 19 (10). 108–111.
- Woodthorpe, J. ve Pearce, R. (1970). “The effect of the r and n upon the FLD of sheet steel”. *Proceedings of the ICSTIS Conference*. Tokyo.
- Wu, H.F. ve Wu, L.L. (1994). MIL-HDBK-5 design allowables for fibre/metal laminates: ARALL 2 and ARALL 3. *Journal of materials science letters*. 13 (8). 582–585.
- Wu, P.D., Embury, J.D., Lloyd, D.J., Huang, Y., ve Neale, K.W. (2009). Effects of superimposed hydrostatic pressure on sheet metal formability. *International Journal of Plasticity*. 25 (9). 1711–1725.
- Yao, H., Chen, C.-C., Liu, S.-D., Li, K.P., Du, C., ve Zhang, L. (2003). *Laminated steel forming modeling techniques and experimental verifications*. SAE Technical Paper.
- Yilamu, K., Hino, R., Hamasaki, H., ve Yoshida, F. (2010). Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 210

(2). 272–278.

Yoshida, T., Katayama, T., ve Usuda, M. (1995). Forming-limit analysis of hemispherical-punch stretching using the three-dimensional finite-element method. *Journal of Materials Processing Technology*. 50 (1). 226–237.

Yüksel, M. ve Meran, C. (2010). *Malzeme bilgisine giriş*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası.

Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J.H. (2002). *Mechanics of Sheet*. Butterworth Heinemann.

Zadpoor, A.A., Sinke, J., ve Benedictus, R. (2009). The effects of thickness on the formability of 2000 and 7000 series high strength aluminum alloys. *Key Engineering Materials*. 410 . 459–466.

Zahedi, A., Mollaei Dariani, B., Mirnia, M.J., Dariani, B.M., ve Mirnia, M.J. (2019). Experimental determination and numerical prediction of necking and fracture forming limit curves of laminated Al/Cu sheets using a damage plasticity model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 153–154 . 341–358.

Zhang, C., Leotoing, L., Guines, D., ve Ragneau, E. (2009). Theoretical and numerical study of strain rate influence on AA5083 formability. *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (8). 3849–3858.

Zhang, R., Lang, L., Zafar, R., Li, K., ve Wu, L. (2016). Effect of gap generator blank thickness on formability in multilayer stamp forming process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 26 (9). 2442–2448.

Zhong-qin, L., Wu-rong, W., ve Guan-long, C. (2007). A new strategy to optimize variable blank holder force towards improving the forming limits of aluminum sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 183 (2–3). 339–346.

Zottis, J., Soares Diehl, C.A.T., ve Rocha, A. da S. (2018). Evaluation of experimentally observed asymmetric distributions of hardness, strain and residual stress in cold drawn bars by FEM-simulation. *Journal of Materials Research and Technology*. 7 (4). 469–478.

(2018a). MatWeb. <http://www.matweb.com/index.aspx>, erişim 27 Haziran 2018.

(2018b). Total Materia - Steel Standards. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=SteelStandards&LN=EN>, erişim 26 Haziran 2018.

(2018c). Total Materia - Aluminum Standards. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=AluminumStandards&LN=EN>, erişim 26 Haziran 2018.

EKLER

**EK1 ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ DÖRT RAKAMLI MALZEME
NUMARALANDIRMA SİSTEMİ**

EK2 ALÜMİNYUM SACLARIN TAVLAMA DURUMLARI

EK3 SERTLİK ÖLÇÜM METOTLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

**EK4 SAC METAL ÜZERİNDEKİ DEFORMASYONLARIN ÖLÇÜMÜ İÇİN
YAZILAN GÖRÜNTÜ İŞLEME KODU**

**EK5 SOYULMA VE KAYMA YÖNÜNDEKİ YAPIŞMA
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN
ALGORİTMA**

**EK1 ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ DÖRT RAKAMLI MALZEME
NUMARASI SİSTEMİ**

1XXX: Alaşımsız Al ($Al \geq 99,00\%$)

2XXX: Alüminyum - Bakır

3XXX: Alüminyum – Mangan

4XXX: Alüminyum – Silisyum

5XXX: Alüminyum – Magnezyum

6XXX: Alüminyum – Mg + Si

7XXX: Alüminyum – Çinko

8XXX: Alüminyum – Diğerleri

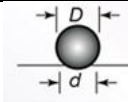



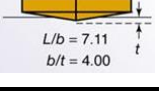

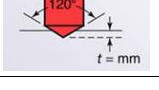

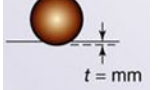

9XXX: Yedek grup

EK2 ALÜMİNYUM SACLARIN TAV DURUMLARI

F	İmal edildiği gibi(Mekanik özellik limitleri belirtilmemiştir.)
O	Sıcak şekillendirme işlemlerinden sonra gerekli tavlama özelliklerini kazanan tavllanmış mamüller 0 temperi ile gösterilebilirler.
T1	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş ve tabii olarak yaşlanmış
T2	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş soğuk işlenmiş ve tabii olarak yaşlanmış
T3	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, soğuk işlenmiş ve tabii olarak yaşlanmış
T4	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış ve tabii olarak yaşlanmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş ve sonra suni olarak yaşlanmış
T6	Çözelti ısıtma işlemi görmüş ve suni olarak yaşlanmış
T7	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış ve sonra suni olarak aşırı yaşlanmış
T8	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, soğuk işlenmiş ve suni olarak yaşlanmış
T9	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, suni olarak yaşlanmış ve sonra soğuk işlenmiş
T42	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış ve tabii olarak yaşlanmış. Tavllanmış veya F temperden ısıtma işlemi yapılmış deney malzemesine veya kullanıcı tarafından herhangi bir temperden ısıtma işlemi yapılmış mamüllere uygulanır.
T62	Çözelti ısıtma işlemi görmüş ve suni olarak yaşlanmış, tavllanmış veya F temperden ısıtma işlemi yapılmış deney malzemesine veya kullanıcı tarafından herhangi bir temperden ısıtma işlemi yapılmış mamüllere uygulanır.
T31	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, yaklaşık %1 oranında soğuk işlenmiş ve tabii olarak yaşlanmış
T351	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, kontrollü bir miktarı germe ile gerilim gidermeye tabi tutulmuş (sürekli set levhalar için %0,5-3 pleytler için %1,5-3, haddelenmiş veya soğuk işlenmiş çabuk için, %1-3, elde veya halka dövme ve haddelenmiş halka için %1-5) ve tabii olarak yaşlanmış mamüllere germe sonrası daha fazla düzeltme yapılmaz.
T651	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, kontrollü bir miktarı germe ile gerilim gidermeye tabi tutulmuş (sürekli set levhalar için %0,5-3 pleytler için %1,5-3, haddelenmiş veya soğuk işlenmiş çabuk için, %1-3, elde veya halka dövme ve haddelenmiş halka için %1-5) ve suni olarak yaşlanmış.Mamüllere germe sonrası daha fazla düzeltme yapılmaz.
T851	Çözelti ısıtma işlemi yapılmış, kontrollü bir miktarı germe ile gerilim gidermeye tabi tutulmuş (sürekli set levhalar için %0,5-3 pleytler için %1,5-3, haddelenmiş veya soğuk işlenmiş çabuk için, %1-3, elde veya halka dövme ve haddelenmiş halka için %1-5) ve sonra suni olarak yaşlanmış.Mamüllere germe sonrası daha fazla düzeltme yapılmaz.
H111	Germe veya düzeltme gibi işlemler sırasında tavllanmış ve hafifçe soğuk biçimlendirme

	sertleşmesi yapılmış (H11'den az)
H112	Sınırlı bir soğuk işlemden (mekanik özellik limitleri belirlenmiş) veya yüksek bir sıcaklıktaki işlemden hafifçe soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış
H12	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış $^{-1/4}$ sert
H14	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış $^{-1/2}$ sert
H16	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış $^{-3/4}$ sert
H18	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış $^{-4/4}$ sert tam sertleştirilmiş
H19	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ekstra sert
H22	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve kısmen tavlanmış $^{-1/4}$ sert
H24	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve kısmen tavlanmış $^{-1/2}$ sert
H26	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve kısmen tavlanmış $^{-3/4}$ sert
H28	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve kısmen tavlanmış $^{-4/4}$ sert(tam sertleştirilmiş)
H32	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve dengelenmiş $^{-1/4}$ sert
H34	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve dengelenmiş $^{-1/4}$ sert
H36	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve dengelenmiş $^{-3/4}$ sert
H38	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve dengelenmiş $^{-4/4}$ sert(tam sertleştirilmiş)
H42	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış, boyanmış ve laklanmış $^{-1/4}$ sert
H44	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış ve laklanmış $^{-1/2}$ sert
H46	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış, boyanmış ve laklanmış $^{-3/4}$ sert
H48	Soğuk biçimlendirme sertleşmesi yapılmış, boyanmış ve laklanmış $^{-4/4}$ sert(tam sertleştirilmiş)

EK3 SERTLİK ÖLÇÜM METOTLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Test	Batıcı uç	Geometri	İz	Yük, P	Sertlik değeri	
Brinell	10 mm çelik veya tungsten karbür bilye			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Elmas piramit			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$	
Knoop	Elmas piramit			25 g – 5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$	
Rockwell A C D	Elmas Koni			60 kg 150 kg 100 kg	HRA HRC HRD	= 100-500t
B F G	1/16 inç çapında çelik bilye			100 kg 60 kg 150 kg	HRB HRF HRG	= 130 – 500t
E	1/8 inç çapında çelik bilye			100 kg	HRE	

EK4 SAC METAL ÜZERİNDEKİ DEFORMASYONLARIN ÖLÇÜMÜ İÇİN YAZILAN GÖRÜNTÜ İŞLEME KODU

```
function varargout = Strain_Calculator(varargin)
% STRAIN_CALCULATOR MATLAB code for Strain_Calculator.fig
%   STRAIN_CALCULATOR, by itself, creates a new STRAIN_CALCULATOR
%   or raises the existing
%   singleton*.
%   H = STRAIN_CALCULATOR returns the handle to a new
%   STRAIN_CALCULATOR or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   STRAIN_CALCULATOR('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls
%   the local
%   function named CALLBACK in STRAIN_CALCULATOR.M with the given
%   input arguments.
%   STRAIN_CALCULATOR('Property','Value',...) creates a new
%   STRAIN_CALCULATOR or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Strain_Calculator_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Strain_Calculator_OpeningFcn via varargin.
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help Strain_Calculator
% Last Modified by GUIDE v2.5 09-Jul-2019 08:52:06
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Strain_Calculator_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Strain_Calculator_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [] , ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before Strain_Calculator is made visible.
function Strain_Calculator_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles  structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin  command line arguments to Strain_Calculator (see VARARGIN)
clc;
% Choose default command line output for Strain_Calculator
handles.output = hObject;
global image C ref_l ref_w
ref_l=0;
ref_w=0;
image=0;
C=0;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes Strain_Calculator wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Strain_Calculator_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject   handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{ 1 } = handles.output;
% --- Executes on button press in exit.
function exit_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to exit (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
delete(handles.figure1);
clear
function major_axis_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to major_axis (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of major_axis as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of major_axis as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function major_axis_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to major_axis (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function minor_axis_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to minor_axis (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of minor_axis as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of minor_axis as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function minor_axis_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to minor_axis (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in load.
function load_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to load (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global image filename
[filename,pathname]=uigetfile();
if filename==0
    msgbox(sprintf('Please, select an image!','ERROR','Error'));
else
    axes(handles.axes1)
    image=imread(filename);
    imshow(image);
end
% --- Executes on button press in calculate.
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to calculate (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global image D C ref_l ref_w l w ref
if image==0
    msgbox(sprintf('Please, select an image!','ERROR','Error'));
elseif D==0
    msgbox(sprintf('Please, crop the image!','ERROR','Error'));
else
    [l,w]=strain_detect(D,C);
    ref=get(handles.ref_circle,'Value');
    def=get(handles.def_circle,'Value');
    if ref==1
        ref_l=l;
        ref_w=w;
        set(handles.major_axis,'String',l);
        set(handles.minor_axis,'String',w);
    elseif def==1
        if ref_l==0

```

```

        msgbox(sprintf('Please, select the reference circle first!', 'ERROR', 'Error'));
    else
        major_strain=log(l/ref_l);
        minor_strain=log(w/ref_w);
        set(handles.major_axis,'String',l);
        set(handles.minor_axis,'String',w);
        set(handles.major_strain,'String',major_strain);
        set(handles.minor_strain,'String',minor_strain);
    end
end
end
function major_strain_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to major_strain (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of major_strain as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of major_strain as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function major_strain_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to major_strain (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function minor_strain_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to minor_strain (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of minor_strain as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of minor_strain as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function minor_strain_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to minor_strain (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in Crop.
function Crop_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Crop (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global image C
if image==0
    msgbox(sprintf('Please, select an image!', 'ERROR', 'Error'));
else
    axes(handles.axes1)
    [C,rect]=imcrop(image);%resmi kirp
    imshow(C);
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function figure1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to figure1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
movegui('center');
% --- Executes on button press in ref_circle.
function ref_circle_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ref_circle (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of ref_circle
% --- Executes on button press in radiobutton3.
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to radiobutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton3
% --- Executes on selection change in listbox1.
function listbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns listbox1 contents as cell
array
% contents{ get(hObject,'Value')} returns selected item from listbox1
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listbox controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on selection change in listbox2.
function listbox2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to listBox2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns listBox2 contents as cell
array
% contents{ get(hObject,'Value')} returns selected item from listBox2
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listBox2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to listBox2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: listBox controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in add.
function add_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to add (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global l w ref_l ref_w ref filename
if ref==1
    data=get(handles.uitable1,'data');
    rn=length(data)-5%number of rows
    data(rn+1,1)={ filename };
    data(rn+1,2)={ 1 };
    data(rn+1,3)={ w };
    data(end+1,:)={" };
    set(handles.uitable1,'data',data);
else
    data=get(handles.uitable1,'data');
    rn=length(data)-5%number of rows
    data(rn+1,1)={ filename };
    data(rn+1,2)={ 1 };
    data(rn+1,3)={ w };
    data(rn+1,4)={ log(1/ref_l) };
    data(rn+1,5)={ log(w/ref_w) };
    data(end+1,:)={" };
    set(handles.uitable1,'data',data);
end
% --- Executes on button press in export.
function export_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to export (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Data=get(handles.uitable1,'data');
ColumnName=get(handles.uitable1,'ColumnName');

```

```

CombData=[ColumnName';Data];
FileName='Strain_table';
xlswrite(FileName,CombData);
% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global D
D=roipoly;
imshow(D);
% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global image D C ref_l ref_w l w ref
if image==0
    msgbox(sprintf('Please, select an image!', 'ERROR', 'Error'));
elseif D==0
    msgbox(sprintf('Please, crop the image!', 'ERROR', 'Error'));
else
    [l,w]=FindCircle(D,C);
    ref=get(handles.ref_circle, 'Value');
    def=get(handles.def_circle, 'Value');
    if ref==1
        ref_l=l;
        ref_w=w;
        set(handles.major_axis, 'String', l);
        set(handles.minor_axis, 'String', w);
    elseif def==1
        if ref_l==0
            msgbox(sprintf('Please, select the reference circle first!', 'ERROR', 'Error'));
        else
            major_strain=log(l/ref_l);
            minor_strain=log(w/ref_w);
            set(handles.major_axis, 'String', l);
            set(handles.minor_axis, 'String', w);
            set(handles.major_strain, 'String', major_strain);
            set(handles.minor_strain, 'String', minor_strain);
        end
    end
end
end
end

```

EK5 SOYULMA VE KAYMA YÖNÜNDEKİ YAPIŞMA PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİNDE KULLANILAN ALGORİTMA

Aşağıda verilen kodlar Papazafeiropoulos vd. (2017) çalışmalarında kullanmış oldukları kodun bu çalışmaya uyarlanmış halidir.

```
%% T-Peel test
clear
clc
close all
S = mfilename('fullpath');
f = filesep;
ind=strfind(S,f);
S1=S(1:ind(end)-1);
cd(S1)
%% STEP 1: read experimental CMOD and LOAD from excel file
% [CMOD_exp,F_exp] = import_exp_data('Exp_data.xlsx','Data',4);
exp=xlsread('Exp_data.xlsx');
[~,d,c]=unique(exp,'rows','first');
[~,d]=unique(exp,'rows','first');
[~,idx]=unique(exp(:,1));
out=exp(idx,:);
CMOD_exp=out(:,1);
F_exp=out(:,2);
figure(1)
hold on
plot(CMOD_exp,F_exp)
xlabel 'Uzama [mm]'
ylabel 'Kuvvet[N]'
grid on
savefig('Experimental_values.fig')
% b=[CMOD_exp,F_exp]; % bu kodlar deneysel data içindeki tekrar eden
% değerleri silmek için
% [~,d,c]=unique(b,'rows','first');
% [~,d]=unique(b,'rows','first');
% [~,idx]=unique(b(:,1));
% out=b(idx,:);
% plot(CMOD_exp,F_exp)
% hold on
% plot(out(:,1),out(:,2))
%% STEP 2: define initial points to train the neural net
K_points=[10e6,50e6,50e6,10e6,30e6];
n_points=[0.8,0.8,0.5,0.5,0.65]';
INPUT_VALUES=[K_points,n_points];
%%
figure(2)
hold on
```

```

plot(INPUT_VALUES(:,1),INPUT_VALUES(:,2),'kx')
xlabel 'Mukavemet Katsayısı (MPa)'
ylabel 'Pekleşme Üsteli'
grid on
savefig('Initial_values.fig')
%% STEP 3: Simulate the LOAD-CMOD for each initial point
Inp_file='Input_file.inp';
for sim=1:length(n_points) % Repeat this bucle for each initial point of MAXS and
ENERGY
    % Create a .inp file with the cohesive parameters defined by MAXS_points
    % and ENERGY_points variables
    Exit_file_name=Create_new_input(Inp_file,n_points(sim),K_points(sim));
    % Run the input file with Abaqus
    system(['abaqus job=' Exit_file_name ' cpus=10']);
    disp(['FEM simulation: ' Exit_file_name ' RUNNING']);
    % Pause Matlab execution to give Abaqus enough time to create the lck file
    pause(10)
    % If the lck file exists then halt Matlab execution
    while exist([Exit_file_name '.lck'],'file')==2
        pause(0.1)
    end
    disp(['FEM simulation: ' Exit_file_name ' FINISHED']);
    % Postprocess Abaqus results file with Abaqus2Matlab functions
    % Obtain the desired output data
    clear out
    out = readFil([Exit_file_name '.fil'],[101,104]);
    % CMOD
    CMOD_simulated{sim}=(out{1,1}(1:end,3))*1000;
    % Reaction force
    F_simulated{sim}=out{1,2}(1:end,3);
end
%% STEP 4: Obtain the key points of the LOAD-CMOD curves to be fitted by the
neural network
num_points=12;
L=cellfun(@numel,CMOD_simulated);
Lmax=max(L);
CMOD_simulated_mat=nan(Lmax,numel(L));
for i=1:numel(L)
    CMOD_simulated_mat(1:L(i),i)=CMOD_simulated{1,i};
end
CMOD_points=linspace(max(min(CMOD_simulated_mat)),min(max((CMOD_exp)
)),num_points);
% CMOD_points=[6.25e-06 0.00017 0.0007 0.0010 0.0014 0.0018 0.0021 0.0025
0.0028 0.0032 0.0036 0.00397];
F_exp_points=interp1(CMOD_exp,F_exp,CMOD_points);
% plot the experimental points to be fitted
figure(1)
hold on
plot(CMOD_points,F_exp_points,'ob')

```

```

savefig('Experimental_values_Discretized.fig')

% Obtain the key points of the simulated LOAD-CMOD curves to be fitted by the
neural network
for sim=1:length(n_points)
    F_simulated_key_points(sim,:)=
interp1(CMOD_simulated{sim},F_simulated{sim},CMOD_points);
end
% plot the simulated points to be used by the Neural Net
for sim=1:length(n_points)
    plot(CMOD_simulated{sim},F_simulated{sim})
    plot(CMOD_points,F_simulated_key_points(sim,:),'ro')
end
savefig('Initial_LOAD_CMOD_Curves.fig')
save('DATA_INITIAL.mat') %Optional save data before to start the iterativ proces
%% STEP 5: Iterative Process to obtain the optimal cohesive values
% define initial point to search for a minimum error
x0_(sim,:)=[30e6,0.65]; % start point for the minimization process (central point)
error(sim)=1;
while error(sim)>1e-5
    %% STEP 5.1: Obtain the neuronal net
    % Choose a Training Function
    trainFcn = 'trainbr'; % Bayesian Regularization
    % Create a Fitting Network
    hiddenLayerSize = 20;
    net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);
    % Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
    net.divideParam.trainRatio = 80/100;
    net.divideParam.valRatio = 15/100;
    net.divideParam.testRatio = 5/100;
    % Train the Network
    [net,tr] = train(net,INPUT_VALUES',F_simulated_key_points');
    % Test the Network
    y = net(INPUT_VALUES');
    e = gsubtract(F_simulated_key_points',y);
    performance = perform(net,F_simulated_key_points',y);
    %% STEP 5.2: Obtain the optimal values of MAXS and ENERGY to fit the
experimental curve.
    funt=@(GT) sum((net([GT(1);GT(2)])-F_exp_points').^2)/sum(F_exp_points.^2);
    %function to be optimized
    [Optimal_values,~]=fminsearch(funt,x0_(sim,:)); %optimization process
    sim=sim+1;
    K_optimal(sim)=abs(Optimal_values(1));
    n_Optimal(sim)=abs(Optimal_values(2));
    x0_(sim,:)=[K_optimal(sim),n_Optimal(sim)];%actualized the starting point of
fminsearch function
    %% STEP 5.3: Used the optimal values of MAXS and ENERGY to obtain a new Load-
CMOD curve by Abaqus.
    % Create a .inp file with the cohesive parameters defined by MAXS_points

```

```

% and ENERGY_points variables
[ Exit_file_name ] = Create_new_input( Inp_file,n_Optimal(sim),K_optimal(sim)
);
disp(['FEM simulation: ' Exit_file_name ' RUNNING']);
% Run the input file with Abaqus (eliminate the .inp(extension))
system(['abaqus job=' Exit_file_name ' cpus=10']);
% Pause Matlab execution to give Abaqus enough time to create the lck file
pause(10)
%%
% If the lck file exists then halt Matlab execution
while exist([Exit_file_name '.lck'],'file')==2
    pause(10)
end
disp(['FEM simulation: ' Exit_file_name ' FINISHED']);
%% Postprocess Abaqus results file with Matlab
% Obtain the desired output data
clear out
out = readFil([Exit_file_name '.fil'],[101,104]);
% CMOD
CMOD_simulated{sim}=(out{1,1}{:,:3})*1000;
% Reaction force
F_simulated{sim}=out{1,2}{:,:3};
% Obtain the key points of the simulated LOAD-CMOD curves to be fitted by the
neural network
F_simulated_key_points(sim,:)=interp1(CMOD_simulated{sim}(1:end),F_simulated
{sim}(1:end),CMOD_points);
% Obtain the error between the experimental and FEM curves
error(sim)=sum((F_simulated_key_points(sim,:)-
F_exp_points).^2)/sum(F_exp_points.^2);
%% actualized the input values of the neural network by adding the last optimal
points obtained
INPUT_VALUES(sim,:)= [K_optimal(sim),n_Optimal(sim)];
%% Check the variation in the MAXS and ENERGY values obtained from one
iteration to another.
var1(sim)=abs(INPUT_VALUES(sim,1)-INPUT_VALUES(sim-
1,1))/((INPUT_VALUES(sim,1)+INPUT_VALUES(sim-1,1))/2);
var2(sim)=abs(INPUT_VALUES(sim,2)-INPUT_VALUES(sim-
1,2))/((INPUT_VALUES(sim,2)+INPUT_VALUES(sim-1,2))/2);
%% If there is not significant variation, the process is stoped.
if var1(sim)<0.01 && var2(sim)<0.01
    break
end
end
end
%% STEP 6: Plot final results
% Plot comparison between CMOD-loads curves
figure(4)
hold on
plot(CMOD_exp,F_exp)
plot(CMOD_simulated{sim},F_simulated{sim})

```

```
xlabel 'Uzama [mm]'
ylabel 'Kuvvet[N]'
legend ('Deneysel','FEM','Location','southeast')
grid on
savefig('CMOD_LOAD_Final_solution.fig')
% Plot optimal MAXs and ENERGY obtained points at each iteration
figure(5)
hold on
plot(INPUT_VALUES(1:5,1),INPUT_VALUES(1:5,2),'kx')
plot(INPUT_VALUES(6:end,1),INPUT_VALUES(6:end,2),'r*--')
grid on
xlabel 'Mukavemet Katsayısı (MPa)'
ylabel 'Pekleşme Üsteli'
savefig('Optimal_points_obtained_for_each_iteration.fig')
```

ÖZ GEÇMİŞ



Cengiz Görkem DENGİZ, 02.11.1989 tarihinde İzmir’de doğdu. Menemen Anadolu Lisesi’ni bitirdikten sonra Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında bölüm birincisi ve fakülte üçüncüsü olarak mezun oldu. 2014 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Yüksek Lisans programını bitirdi. Mezuniyetinden bu yana araştırma görevlisi olarak görev yapan Cengiz Görkem DENGİZ, iyi derece İngilizce bilmektedir. Temel ilgi alanları, sac metal şekillendirme yöntemleri, makine elemanları, sonlu elemanlar metodu, bilgisayar destekli tasarım ve üretim, hidrolik-pnömatik sistemlerdir (01/02/2021) .

İletişim Bilgileri

E mail: gorkem.dengiz@omu.edu.tr

Telefon: 0 554 336 51 11

ORCID ID: 0000-0003-1308-3223

Yayınlanmış Çalışmalar:

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2020). Effect of phase shape and size on the FEM analysis of indentation test of duplex stainless steel microstructures. *SN Applied Sciences*. 2(4).
2. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2019). Çift katmanlı saclarda presleme kuvveti ve sac malzemesinin soyulma direnci ve ortalama soyulma kuvvetine etkisi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 8. 1054-1063.
3. Şahin, F., Dengiz, C. G., Yıldızlı, K., Namlı, L. (2019). The effect of nanoparticle-added solid lubricant on the formability of sheet metal. *SN Applied Sciences*. 1(5). 384.
4. Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Yıldızlı, K., Koç, E. (2018). Design and analysis of lifting system by using finite elements method. *Universal Journal of Materials Science*. 6(2). 58-63.

5. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2017). Experimental and numerical study of process limits for deep drawing of dome-structured sheet metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. (92). 4457-4472.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. Sağlam, S., Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2019, Haziran). “Çift katmanlı saclarda geri esnemenin araştırılması”. *The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia/Turkey*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir.
2. Karaca, C., Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2019, Haziran). “EN AW-1070 H22 alüminyum sacın şekil alma kabiliyetinin araştırılması”. *The Internatinonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in Cappadocia/TURKEY*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir.
3. Temiz, H., Yazıcı, M. E., Şahin, F., Dengiz, C. G., Yıldızlı K., Namlı, L. (2019, Mayıs). “Üç boyutlu yazıcılar için filament ekstruder üretimi”. *Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Kongresi*, Samsun.
4. Ertan, M., Şahin, F., Dengiz, C. G., Yıldızlı, K., Namlı, L. (2019, Mayıs). “Nanopartikül katkılandırılmış madeni yağların derin çekme işlemindeki performansının incelenmesi”. *Uluslararası 19 Mayıs Multidisipliner Çalışmalar Kongresi*, Samsun
5. Şahin, F., Dengiz, C. G., Kakırdaklıoğlu, A., Namlı, L., Yıldızlı, K. (2018, Nisan). “The effect of nano-lubricants on deep drawing”. *International Congress on Engineering and Life Science*. Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.
6. Dengiz, C. G., Özdemir, N., Çeven, M., Yıldızlı, K. (2018, Nisan). “Artificial mouth model design for volatile aroma compounds extraction from food compositions”. *International Congress on Engineering and Life Science*. Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.
7. Dengiz, C. G., Şahin, F., Bayorul, C., Yıldızlı, K. (2018, Nisan). “Improvement of formability of epoxy polymer matrix used in bonding processes”. *International Congress on Engineering and Life Science*, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.
8. Dengiz, C. G., Kılıç, E. A., Yıldızlı, K. (2018, Nisan). “Investigation of the effect of force and material on the adhesion of double layer sheets”. *International Congress on Engineering and Life Science*. Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.
9. Şahin, F., Dengiz, C. G., Timur, M. F., Yıldızlı, K. (2018, Nisan). “Improving the formability of Al reinforced epoxy polymer matrix based composites”. *International Congress on Engineering and Life Science*. Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu.
10. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2017, Kasım). “Modeling of duplex stainless steel microstructures with image processing”. *International Conference on Computational and Statistical Methods in Applied Sciences*, Samsun.
11. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2017, Kasım). “Determination of strain by image processing technique in sheet metal forming”. *International Conference on Computational and Statistical Methods in Applied Sciences*. Samsun.
12. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2016, Ekim). “Erichsen deney düzeneği simülasyon modellerinin karşılaştırılması”. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, Çukurova Üniversitesi, Adana.

13. Yıldızlı, K., Kayalarlı, T., Dengiz, C. G., Çep, H. (2016, Ekim). “Laser surface hardening of the carbon enriched duplex stainless”. *Proceeding of Symposium on Automated Systems and Technologies*. Hannover
14. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2016, Nisan). “Dubleks paslanmaz çelik sacların şekillendirme sınır diyagramlarının deneysel ve teorik olarak belirlenmesi”. *International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir.
15. Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Yıldızlı, K., Koç, E. (2016). “Makaslı kaldırma sistemi tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi”. *International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir.
16. Yıldızlı, K., Dengiz, C. G. (2014, Ekim). “Ostenitik ve dubleks paslanmaz çelik sacların şekil alma kabiliyetlerinin karşılaştırılması”. *15th International Materials Symposium*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Koç, E. (2016). Endüstriyel beton pompası hidrolik devre tasarımı, kurulumu ve simülasyonu. *İş Makinaları Mühendisleri Birliği Dergisi*. (53), 20-30.
2. Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Koç, E. (2016). Endüstriyel mil göbek montaj tertibatı geliştirilmesi elektro pnömatik devre tasarımı ve simülasyonu. *Hidrolik&Pnömatik Akışkan Gücü ve Kontrol Sistemleri Dergisi*. (83), 86-93.
3. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K., Altınordu, B. (2014). Desenli çelik sacların şekil alma kabiliyetlerinin araştırılması. *Mühendis ve Makina*, 55(650), 47-55.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. Karaca, C., Dengiz, C. G., Yıldızlı, K. (2017, Kasım). “Boru bükme ve delme tezgâhı hidrolik devre tasarımı ve simülasyonu”. *VIII. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi*, İzmir.
2. Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Yıldızlı, K., Koç, E. (2017, Kasım). “Eksantrik preslerde mekanik kumandanın pnömatik sistem ile revizyonu”. *VIII. Ulusal Hidrolik Ve Pnömatik Kongresi*, İzmir.
3. Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Koç, E. (2014, Ekim). “Endüstriyel beton pompası hidrolik devre tasarımı ve simülasyonu”. *VII. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi Ve Sergisi*, İstanbul.
4. Şenel, M. C., Dengiz, C. G., Koç E. (2014, Ekim). “Mil göbek montaj tertibatı pnömatik devre tasarımı ve simülasyonu”. *VII. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi Ve Sergisi*, İstanbul.
5. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K., Altınordu, B. (2013, Aralık). “Desenli çelik sacların şekil alma kabiliyetlerinin araştırılması”. *Makina İmalat Teknolojileri Kongresi*, Bursa.

Projelerde Yaptığı Görevler:

1. Alüminyum Lityum Alaşımı Sacların Viskoz Akışkan Basıncı ile Derin Çekilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı: Dengiz Cengiz Görkem, Yürütücü: Yıldızlı Kemal, 16/05/2016 - 16/11/2018 (ULUSAL)
2. Kalıp Tasarımı Eğitim Merkezi (KATEM), Avrupa Birliği, Proje Koordinatörü: Özkoç Osman, Proje Koordinatör Yrd.: Dengiz Cengiz Görkem Eğitimci: Salepci Ayhan, Eğitimci: Öztürk Erkan, Eğitimci: Çolak Harun, Eğitimci: Koçoğlu Suat,

Eğitmen: Bögrek Ahmet, Eğitmen: İpek Osman, 01/03/2016 - 14/11/2017
(ULUSLARARASI)

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. TÜBİTAK 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Bursu, 2014-2018