

**SIVI BASINCIYLA SAC METAL ŞEKİLLENDİRME
(HYDROFORMING) İŞLEM PARAMETRELERİNİN
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

İbrahim KARAAĞAÇ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2011
ANKARA**

İbrahim KARAAĞAÇ tarafından hazırlanan SIVI BASINCIYLA SAC METAL ŞEKİLLENDİRME (HYDROFORMING) İŞLEM PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

.....

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Zafer TEKİNER

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Ferhat GÜL

.....

Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

.....

Makine Eğitimi, Karabük Üniversitesi

Tarih: 07/01/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

İbrahim KARAAĞAÇ

**SIVI BASINCIYLA SAC METAL ŞEKİLENDİRME
(HYDROFORMING) İŞLEM PARAMETRELERİNİN DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)**

İbrahim KARAAĞAÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2011**

ÖZET

Bu tez çalışmasında, sıvı basıncı ile sac metal şekillendirme yöntemlerinden hidromekanik derin çekme işleminde etkili olan parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Erdemir 6112, AISI 304 paslanmaz ve bakır sac malzemeler deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar; kare ve silindirik çekme olmak üzere iki farklı geometride ve değişik şekillendirme parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, tasarımı ve imalatı yapılan hidromekanik şekillendirme deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme esnasında oluşan kuvvetler yük hücreleri, kalıp içi basıncı da basınç transdüseri kullanılarak hassas olarak ölçülmüştür. Deney düzeneği, elektronik kontrol ve veri okuma kartı yardımıyla bilgisayar kumandalı olarak kontrol edilmiştir. Çekme hızı, kalıp kavis, kalıp içi basıncı, sac malzeme türü ve kalınlığı gibi parametrelerinin hidromekanik şekillendirme işlemine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Hidromekanik şekillendirme işlemlerinde etkili olan basıncın, sac malzemenin çekme oranını klasik çekme yöntemine göre arttırdığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, sac kalınlığındaki incelenin ürün üzerinde klasik çekme işlemine göre daha homojen dağılım gösterdiği, kırışıklık oluşumu gibi şekillendirme hatalarının azaldığı ve şekillendirilebilirliğin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Klasik çekme

işlemlerinde çok sayıda operasyon ile şekillendirilebilen parçaların hidromekanik derin çekme yöntemi ile tek seferde şekillendirilebildiği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Sıvı basıncı ile şekillendirme, derin çekme, hidromekanik derin çekme
Sayfa Adedi : 172
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

**THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHEET METAL
HYDROFORMING PROCESS PARAMETERS**

(Ph.D. Thesis)

İbrahim KARAAĞAÇ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2011

ABSTRACT

In the study, the effects of the processing parameters on the hydromechanical deep drawing which is one of the hydroforming processes have been investigated experimentally. Erdemir 6112, AISI 304 stainless steel and copper sheet materials were used as experimental material. The experimental studies were carried out the different forming parameters and different drawing geometries such as square and cylindric. Experimental studies were realized using the hydromechanical forming device which had been designed and manufactured. The forming forces were measured using loadcells and the chamber pressure was measured accurately by the pressure transducer. The device for experiments was controlled using electronic control and data acquisition board computer control. The effect of the parameters such as drawing speed, die radius, chamber pressure and sheet material type and thickness on hydromechanical forming were experimentally investigated. It was observed that the pressure was increased drawing ratio of sheet metal when the hydromechanical deep drawing compared to the conventional drawing methods. In experimental studies, it was seen that the thickness of the product are more homogeneous compared with the conventional deep drawing and forming failure such as wrinkling decreased and the formability was affected positively.

The samples which require multiple operations in the classical deep drawing processes were formed at once in hydromechanical deep drawing method.

Science Code : 708.3.028

Key Words : Hydroforming, deep drawing, hydromechanical deep drawing

Page Number : 172

Adviser : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e teşekkür ederim. Tez süresince yapılan tez izleme komisyonu toplantılarında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Doç. Dr. Zafer TEKİNER ve Sayın Doç. Dr. Ferhat GÜL'e teşekkür ederim. Tez çalışmalarım sırasında maddi ve manevi katkılarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir GÜLLÜ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Deney cihazının yapımında çeşitli vesileler ile yardımlarını esirgemeyen; Sn. Levent KARAGÜLLE (Karagülle Kalıp Teknolojileri), Sn. Necati ŞİMŞEK ve Sn. Ahmet ORAZALİ (Yeni İz Makina), Sn. Serdar GÜNDEM (Enkosis Otomasyon), Sn. İsmail CEYLAN (Mersan Metal ve Lazer), Sn. Hayati CAN ve Sn. Adem ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sırasında, sabırla bana yardımcı olup sıkıntıları aşmamda her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Şule KARAAĞAÇ'a şükranlarımı sunarım.

Yetişmemde sonsuz emeği geçen sevgili anne ve babama şükranlarımı sunarım.

Doktora çalışmasını 07/2007-40 ve 07/2009-12 kodlu projeleri ile destekleyerek verdiği maddi katkıdan dolayı, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Sıvı Basıncı İle Şekillendirme Yöntemleri İle İlgili Çalışmalar ve DeneySEL Yaklaşımlar	4
2.2. Analitik ve Matematiksel Modelleme Çalışmaları	22
2.3. Sayısal Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları	27
2.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	35
3. KAVRAMSAL BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER	37
3.1. Klasik Kalıplama Yöntemi İle Çekme İşlemleri	37
3.1.1. Baskı plakalı çekme işlemi	38
3.1.2. Baskı plakasız çekme işlemi	39
3.1.3. Çevirme çekme işlemi	40
3.2. Sıvı Basıncı ile Şekillendirme İşlemleri	40
3.2.1. Sac malzemelerin sıvı basıncıyla şekillendirilmesi	41

Sayfa

3.2.2. Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi	48
3.2.3. Sıvı basıncı ile muhtelif şekillendirme yöntemleri.....	50
3.3. Çekme Oranı ve İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi	52
3.3.1. Çekme oranı	52
3.3.2. İlkel parça boyutlarının belirlenmesi.....	54
3.4. Çekme İşlemine Etki Eden Parametreler	56
3.4.1. Çekme hızı	56
3.4.2. Kalıp kavisi	58
3.4.3. Çekme boşluğu	60
3.4.4. Çekme kuvveti	61
3.4.5. Baskı yastığı basıncı ve kuvveti	62
3.5. Plastik Deformasyon ve Temel İlkeleri	63
4. MATERYAL VE METOT	69
4.1. Deney Düzeneginin Mekanik Tasarımı ve Üretimi	69
4.1.1. Bilgisayar destekli tasarım (CAD)	69
4.1.2. Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) ile tasarım doğrulama	72
4.1.3. İmalat ve montaj	73
4.2. Deney Düzeneginin Teknik Özellikleri	76
4.3. Elektronik Kontrol ve Veri Okuma Sistemi	79
4.4. Kuvvet Ölçümleri-Yük Hücreleri	81
4.5. Deney Düzeneginin Kalibrasyonu	83
4.5.1. Baskı yastığı grubu kalibrasyon işlemi	83

	Sayfa
4.5.2. Şekillendirme zımbası grubu kalibrasyon işlemi	86
4.5.3. Kalıp içi basıncı kalibrasyon işlemi	88
4.6. Deney Malzemeleri Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	91
4.7. Deney Kalıpları – Zımbaları ve Teknik Özellikleri	94
4.8. Deneysel Çalışma Parametreleri	97
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	100
5.1. Erdemir 6112 Sac Malzemenin Silindirik Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları	100
5.2. Erdemir 6112 Sac Malzemenin Kare Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları	115
5.3. Bakır Sac Malzemenin Silindirik Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları	126
5.4. Bakır Sac Malzemenin Kare Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları	135
5.5. AISI 304 Paslanmaz Sac Malzemenin Silindirik Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları	143
5.6. AISI 304 Paslanmaz Sac Malzemenin Kare Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları	145
5.7. Sac Malzemelerdeki Et Kalınlığı Değişiminin Değerlendirilmesi	145
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149
KAYNAKLAR	154
EKLER	165
ÖZGEÇMİŞ	170

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Sıvı ile şekillendirme ve klasik kalıplama yöntemleri için çekme oranı limitleri karşılaştırması	53
Çizelge 3.2. Klasik kalıplama işlemi için önerilen ortalama çekme hızları-1	57
Çizelge 3.3. Klasik kalıplama işlemi için önerilen ortalama çekme hızları-2	57
Çizelge 3.4. Sac kalınlığı ve zımba çapı yüzde oranına göre önerilen kalıp kavisi yarıçap değerleri	59
Çizelge 3.5. Sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavisi yarıçapı için önerilen değerler.....	59
Çizelge 3.6. Hidromekanik derin çekme işlemleri için uygulanan basınçlar.....	61
Çizelge 3.7. Çekilen malzeme için ideal baskı yastığı basınç değerleri	63
Çizelge 4.1. Deney düzeneği teknik özellikleri	77
Çizelge 4.2. Deney düzeneği hidrolik şema elemanları detayı	79
Çizelge 4.3. Deney düzeneğinden elde edilen grafikler.....	80
Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan yük hücresi teknik özellikleri	83
Çizelge 4.5. Kalibrasyon işleminde kullanılan yayların teknik özellikleri	84
Çizelge 4.6. Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar	92
Çizelge 4.7. Erdemir 6112 deney malzemesi kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	93
Çizelge 4.8. AISI 304 paslanmaz sac deney malzemesi kimyasal ve fiziksel özellikleri	93
Çizelge 4.9. Bakır sac deney malzemesi kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	93
Çizelge 4.10. Deneysel çalışma parametreleri	97
Çizelge 4.11. Erdemir 6112 sac ve silindirik geometri için baskı yastığı kuvveti.....	98

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.12. Erdemir 6112 sac ve kare geometri için baskı yastığı kuvveti	98
Çizelge 4.13. AISI 304 sac ve silindirik geometri için baskı yastığı kuvveti	98
Çizelge 4.14. AISI 304 sac ve kare geometri için baskı yastığı kuvveti.....	98
Çizelge 4.15. Bakır sac ve silindirik geometri için baskı yastığı kuvveti	98
Çizelge 4.17. Bakır sac ve kare geometri için baskı yastığı kuvveti.....	99
Çizelge 5.1. Erdemir 6112 sac malzeme silindirik geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları	115
Çizelge 5.2. Erdemir 6112 sac malzeme kare geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları	126
Çizelge 5.3. Bakır sac malzeme silindirik geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları	134
Çizelge 5.4. Bakır sac malzeme kare geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları	142

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemi	2
Şekil 2.1. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemiyle derin çekme işlemi	5
Şekil 2.2. Çoklu diyafram metodunun olumlu yönleri	6
Şekil 2.3. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin şekillendirilmesi için genelleştirilmiş ideal akışkan basıncı – zımba yolu ilişkisi	7
Şekil 2.4. Hidromekanik derin çekme işlemi ve içbükey özellikli parçalar	9
Şekil 2.5. Sıvı basıncı ile entegre şekillendirme işlemleri	10
Şekil 2.6. Kaynaklı sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi ve adımları	10
Şekil 2.7. İç ve karşı basınçlı sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi	11
Şekil 2.8. Ön şişirmeli sıvı ile şekillendirme deney düzeneği	12
Şekil 2.9. Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde kalıp içi basınç - baskı yastığı kuvveti ilişkisi	13
Şekil 2.10. Yarı rijit ve aktif-elastik baskı yastıklarının kalınlık dağılımı açısından deneysel incelenmesi	14
Şekil 2.11. Karşı basınç ile sıvı ile şekillendirme yöntemi	15
Şekil 2.12. Viskozitesi yüksek akışkan basınçlı derin çekme işlemi	16
Şekil 2.13. Eksenel basınç destekli hidrodinamik derin çekme işlemi	18
Şekil 2.14. Hidrolik basınçla iyileştirilmiş derin çekme yöntemi	19
Şekil 2.15. Çekme oranı 3,5 ve üzeri olan çekilmiş parça görüntüleri	19
Şekil 2.16. Ters sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri	20
Şekil 2.17. Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde kalıp içi basınçlandırma yöntemleri	21
Şekil 2.18. Hareketli dişi kalıp ile sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemi	22

Şekil	Sayfa
Şekil 2.19. Kulak bölgesindeki element üzerinde oluşan gerilim	24
Şekil 2.20. Kalıp kavisinde oluşan deformasyon	24
Şekil 2.21. Sıvı basıncıyla şekillendirilen parçalar için karakteristik ürün geliştirme çevrimi	28
Şekil 2.22. Sonlu elemanlarla analiz için model tanımlanması ve deneysel çalışma sonucu elde edilen ürün	29
Şekil 2.23. Farklı geometriler için simülasyon görüntüleri	30
Şekil 2.24. Çok adımlı sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi ve her bir adımda üretilmiş parça görüntüsü	32
Şekil 2.25. Sayısal simülasyon analizi için model oluşumu görüntüsü	33
Şekil 2.26. Sıvı basıncı ile ezerek şekillendirme yöntemi	34
Şekil 2.27. Sıvı basıncı ve diyafram ile esnek şekillendirme yöntemi	35
Şekil 3.1. Çekme işleminin oluşumunun şematik ve perspektif görüntüsü	37
Şekil 3.2. Klasik kalıplama ile çekme işlemlerinin sınıflandırılması	38
Şekil 3.3. Baskı plakalı çekme işleminin oluşumu	39
Şekil 3.4. Baskı plakasız çekme işlemi	39
Şekil 3.5. Çevirme çekme işleminin oluşumu.....	40
Şekil 3.6. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri.....	41
Şekil 3.7. Hidromekanik derin çekme işlemi	42
Şekil 3.8. Hidrolik gerdirme çekme işlemleri	44
Şekil 3.9. Diyafram ile hidrolik şekillendirme yöntemi.....	45
Şekil 3.10. Hidromekanik derin çekme ve hidrolik gerdirme çekme bileşimi	46
Şekil 3.11. Çift sacların sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinin otomotiv endüstrisindeki potansiyel uygulamaları	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.12. Sac metal çiftlerinin sac sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinin sınıflandırılması	47
Şekil 3.13. Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemi.....	48
Şekil 3.14. X Eklem şeklinin deneysel ve analiz sonuçlarla karşılaştırılması	49
Şekil 3.15. Sıvı basıncı ile birleştirme uygulaması	51
Şekil 3.16. Hidrolik Şişirme (Kabuk yapıların sıvı basıncıyla şekillendirme) yöntemi ve yöntem kullanılarak üretilmiş kap.....	51
Şekil 3.17. Sıvı basıncıyla çeşitli şekillendirme yöntemleri	52
Şekil 3.18. Alan metodu ile ilkel çapın bulunması	54
Şekil 3.19. Uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile ilkel çapın bulunması	56
Şekil 3.20. Çekme kalıbı kesit görüntüsü	58
Şekil 3.21. Bir cisme etki eden kuvvetler ve oluşan gerilmeler.....	64
Şekil 3.22. Pekleşme üssü “n” değerinin hesaplanması.....	67
Şekil 3.23. Gerilim-uzama grafiğinde n üssünün değerlendirilmesi.....	68
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin CAD ortamında üç boyutlu tasarım görüntüleri.....	70
Şekil 4.2. Deney düzeneği kesit görüntüsü	71
Şekil 4.3. Hidromekanik şekillendirme deney düzeneği detay kesit görüntüsü	71
Şekil 4.4. Deney düzeneği mukavemet hesaplamaları, kuvvet tanımlama ve ağ örgü oluşturma aşamaları.....	72
Şekil 4.5. Taşıyıcı kolonlar için kuvvet uygulanması işlemi ve elde edilen analiz sonucu.....	73
Şekil 4.6. Deney düzeneğinin hidrolik şeması	78
Şekil 4.7. Sıvı basıncıyla şekillendirme yazılımı arayüz ekranı görüntüsü	80
Şekil 4.8. Yük hücrelerinin deney düzeneğinde bağlantı konumları	81

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Yük hücresi kalibrasyon grafiği	82
Şekil 4.10. Deneylerde kullanılan Filintec marka yük hücresi	82
Şekil 4.11. Baskı yastığı kuvveti-zaman kalibrasyon grafiği	84
Şekil 4.12. Kalibrasyon yayının sıkıştırılması ile elde edilen tepki kuvvetleri grafiği	85
Şekil 4.13. Şekillendirme zımbasına ait yük hücresinin kalibrasyon grafiği	87
Şekil 4.14. Şekillendirme zımbası yol-zaman grafiği	88
Şekil 4.15. Kalıp içi basıncın sabit tutulma aralığı	90
Şekil 4.16. Çekme deney numunesi detayı ve sac malzeme üzerinde yerleşim konumu	91
Şekil 4.17. İmalatı yapılan kare geometrili kalıp teknik resmi	94
Şekil 4.18. İmalatı yapılan silindirik geometrili kalıp teknik resmi	95
Şekil 4.19. Silindirik geometrili kalıp zımbası teknik resmi	96
Şekil 4.20. Kare geometrili kalıp zımbası teknik resmi	96
Şekil 5.1. Erdemir 6112 silindirik geometri için ilkel pul çapı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa	101
Şekil 5.2. Erdemir 6112 silindirik geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10$ MPa	102
Şekil 5.3. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zımba hızı ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm	103
Şekil 5.4. Erdemir 6112 silindirik geometri için güç tüketimi – zımba hızı ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm	104
Şekil 5.5. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti ve zaman ilişkisi, $t = 0, 5$ mm	106
Şekil 5.6. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti ve zaman ilişkisi, $t = 0, 8$ mm	106

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti ve zaman ilişkisi, $t = 1$ mm	107
Şekil 5.8. Erdemir 6112 silindirik geometri için güç tüketimi – kalıp kavisi ilişkisi, $t = 0,8$ mm, $D = 140$ mm	108
Şekil 5.9. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 4$ mm.....	109
Şekil 5.10. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 6$ mm.....	110
Şekil 5.11. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 8$ mm	110
Şekil 5.12. Erdemir 6112 silindirik geometri şekillendirme kuvveti – sac kalınlığı ilişkisi, $D = 140$ mm	112
Şekil 5.13. Erdemir 6112 silindirik geometri güç tüketimi – sac kalınlığı ilişkisi, $D = 140$ mm	113
Şekil 5.14. Erdemir 6112 kare geometri için ilkel pul çapı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa	116
Şekil 5.15. Erdemir 6112 kare geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10$ MPa	116
Şekil 5.16. Erdemir 6112 kare geometri zımba hızı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm	118
Şekil 5.17. Erdemir 6112 kare geometri zımba hızı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm	118
Şekil 5.18. Erdemir 6112 kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,5$ mm	120
Şekil 5.19. Erdemir 6112 kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,8$ mm	120
Şekil 5.20. Erdemir 6112 kare geometri şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 1$ mm	121

Şekil	Sayfa
Şekil 5.21. Erdemir 6112 kare geometri şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 4$ mm	122
Şekil 5.22. Erdemir 6112 kare geometri şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 6$ mm	122
Şekil 5.23. Erdemir 6112 kare geometri için sac kalınlığı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $D = 130$ mm	123
Şekil 5.24. Erdemir 6112 kare geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi, $D = 130$ mm.....	124
Şekil 5.25. Bakır sac silindirik geometri için ilkel pul çapı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa	127
Şekil 5.26. Bakır sac silindirik geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10$ MPa	127
Şekil 5.27. Erdemir 6112 sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm.....	128
Şekil 5.28. Erdemir 6112 sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm.....	129
Şekil 5.29. Bakır sac silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,5$ mm	130
Şekil 5.30. Bakır sac silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,8$ mm.....	130
Şekil 5.31. Bakır sac silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 1$ mm	131
Şekil 5.32. Bakır sac silindirik geometri için sac kalınlığı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $D = 130$ mm.....	132
Şekil 5.33. Bakır sac silindirik geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi, $D = 130$ mm.....	133
Şekil 5.34. Bakır sac kare geometri için ilkel pul çapı şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa	135
Şekil 5.35. Bakır sac kare geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi.....	136

Şekil	Sayfa
Şekil 5.36. Bakır sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm	137
Şekil 5.37. Bakır sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm.....	137
Şekil 5.38. Erdemir 6112 kare geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi, $D = 130$ mm.....	138
Şekil 5.39. Bakır sac kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 6$ mm	139
Şekil 5.40. Bakır sac kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 8$ mm	139
Şekil 5.41. Bakır sac kare geometri için sac kalınlığı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $D = 130$ mm, $v = 6$ mm/s	140
Şekil 5.42. Bakır sac kare geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi, $D = 130$ mm, $v = 6$ mm/s.....	141
Şekil 5.43. AISI 304 paslanmaz sac malzeme için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi.....	144
Şekil 5.44. Et kalınlığı değişimi ölçüm noktaları.....	146
Şekil 5.45. Erdemir 6612 sac malzeme için şekillendirilen ürün üzerindeki kalınlık değişimleri	147
Şekil 5.46. Bakır sac malzeme için şekillendirilen ürün üzerindeki kalınlık değişimleri.....	148

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. TEF 07/2003-20 kod numaralı G.Ü. BAP Projesi kapsamında temin edilen hidrolik güç ünitesi	74
Resim 4.2. Deney düzeneği montajı çalışma ortamı görüntüsü	74
Resim 4.3. Deney düzeneği ve deneysel çalışma ortamı-1	75
Resim 4.4. Deney düzeneği ve deneysel çalışma ortamı-2	75
Resim 4.5. Hidromekanik derin çekme deney düzeneği	76
Resim 4.6. Baskı yastığı kalibrasyon işlemi	85
Resim 4.7. Şekillendirme zımbası grubu yük hücresi kalibrasyon çalışması	86
Resim 4.8. Manometrelerin deney düzeneğindeki bağlantı görüntüsü	89
Resim 4.9. Basınç transdüseri deney düzeneği bağlantısı	90
Resim 4.10. Çekilmiş deney numuneleri görüntüsü	92
Resim 4.11. İmalatı yapılmış silindirik ve kare geometrili kalıplar	95
Resim 4.12. İmalatı yapılan kalıp zımbaları ve deneysel çalışma ortamı görüntüleri	96
Resim 5.1. Erdemir 6112 sac malzemeden silindirik şekillendirilmiş parçalar	114
Resim 5.2. 140 mm ilkel pul çapında şekillendirilebilirlik denemeleri	117
Resim 5.3. Farklı zımba hızlarında şekillendirme çalışmaları $t = 0,5 \text{ mm}$, $p=10\text{MPa}$	119
Resim 5.4. Erdemir 6112 sac malzemeden kare şekillendirilmiş parçalar	125
Resim 5.5. Farklı çekme oranlarında şekillendirilmiş parçalar	134
Resim 5.6. Farklı çekme oranlarında kare şekillendirilmiş bakır sac parçalar	142

Resim	Sayfa
Resim 5.7. AISI 304 sac malzemeden şekillendirilmiş parçalar, çekme oranı: 2,0	143
Resim 5.8. Farklı kalıp içi basınçlarında şekillendirilmiş AISI 304 sac malzemeler	145
Resim 5.9. Et kalınlığı ölçümü için kesilmiş deney numuneleri.....	146

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
σ	Gerilme, N/mm ²
η	Akışkan viskozitesi, PaS
σ_u	Kopma gerilmesi, N/mm ²
σ_{ak}	Akma gerilmesi, N/mm ²
c	Sabit sayı, 2-3 arası
$\bar{\sigma}$	Denge plastik gerilmesi, N/mm ²
K	Uzama sertleşme katsayısı
n	Uzama sertleşme üsteli
$\dot{\epsilon}_r$	Eksenel yönde plastik uzama, mm
$\dot{\epsilon}_\theta$	Çevresel yönde plastik uzama, mm
$\dot{\epsilon}_z$	Kalınlık yönünde plastik uzama, mm
σ_r	Eksenel gerilme, N/mm ²
σ_z	Kalınlık gerilmesi, N/mm ²
$\bar{\sigma}_e$	Bükme işlemi başlangıcındaki gerilim dengesi
C_b	Doğrusal çalışma sertleşmesi katsayısı
$\bar{\epsilon}_e$	Bükme başlangıcındaki eşdeğer uzama
σ_b	Bükme işlemi sonrası çekme gerilmesi, N/mm ²
$\bar{\epsilon}_b$	Büküm esnasındaki uzama, mm
$\bar{\sigma}_b$	Büküm esnasındaki denge gerilmesi, N/mm ²
σ_y	Tüp malzemenin akma dayanımı, N/mm ²
β	Çekme oranı
t	Sac Kalınlığı, mm
t_1	Zaman, s

Simgeler	Açıklama
D	İlkel sac çapı, mm
d	Bitmiş ürün çapı, mm
h	Çekme yüksekliği, mm
r	Kalıp kavisi yarıçapı, mm
z	Çekme boşluğu, mm
F_{dr}	Çekme kuvveti, N
A_p	Zımba kesit alanı, cm^2
p	Kalıp içi basıncı, kg/cm^2
σ_{UTS}	Maksimum çekme gerilmesi, N/mm^2
p_{BH}	Baskı yastığı basıncı, N/mm^2
F_{BH}	Baskı yastığı kuvveti, N
A_{BH}	Baskı yastığı etkili alanı, mm^2
σ_1	En büyük gerilme, N/mm^2
σ_3	En küçük gerilme, N/mm^2
S	Mühendislik gerilmesi, N/mm^2
P	Herhangi bir anda verilen kuvvet, N
E	Elastikiyet Modülü, N/m^2
e	Mühendislik uzaması, mm
ε	Gerçek uzama, mm
ε_0	Çevresel plastik uzama, mm
e_2	Kopma anındaki yüzde uzama
ΔL	Toplam uzama değişimi, mm
L_0	Sac numunenin ilk uzunluğu, mm
L	Toplam uzama, mm
A_0	Çekme işleminden önceki kesit alanı, mm^2
A_2	Çekme işlemi sonrası kesit alanı, mm^2
G	Güç tüketimi, Watt

Simgeler

v	Zimba hızı
V	Gerilim, Volt
X	Zımbanın Aldığı Yol, mm

Kısaltmalar**Açıklama**

SBŞ	Sıvı Basıncı İle Şekillendirme
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
FRT	Dokuma Kumaş Takviyeli Termoplastik

1. GİRİŞ

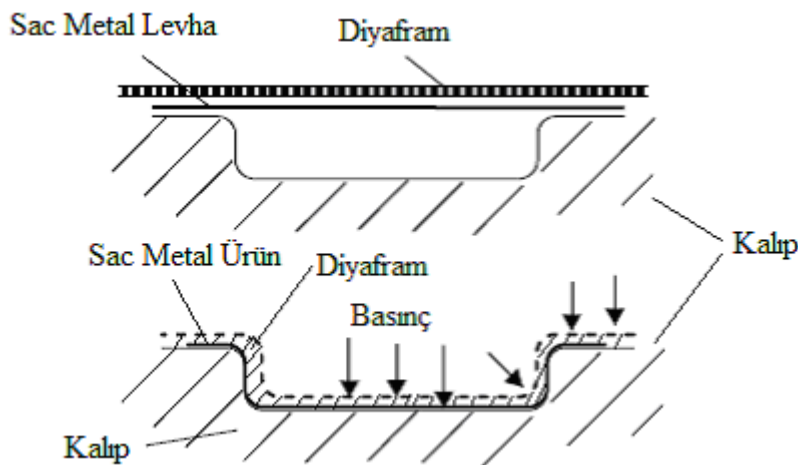
Sac metal kalıpcılığı, otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayi başta olmak üzere birçok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Günlük hayatta kullanılan sac metal parçalarının çok büyük bir çoğunluğu sac metal kalıplama ile üretilmektedir. Her bir ürün için kalıp tasarımı ve üretimi, zorluk derecesine göre uzun bir süreç alabilmektedir. Sac metal şekillendirmede en önemli maliyet arttırıcı unsur, şekillendirmede belirlenen adım sayısı ve buna bağlı olarak kalıp tasarım ve imalat maliyeti olduğu bilinmektedir. Sac metal kalıpcılığında, istenilen ürünleri elde etmek için kesme, delme, bükme ve çekme işlemleri ile şekil verilmektedir. Ancak şişirme gibi bazı farklı sac metal şekil verme uygulamaları için klasik kalıplama yöntemleri ile şekil vermek mümkün olmamaktadır. Bunun yanı sıra, araç kaportaları ve/veya büyük gövdeli parçalar için de kalıp yapılarak şekil verilmesi çok büyük altyapı ve yatırım maliyeti gerektirmektedir. Hidromekanik derin çekme yöntemleri ile çok sayıda operasyon gerektiren karmaşık şekilli parçalar tek operasyon ile şekillendirilebilmekte ve sıvı basıncının etkisi ile klasik kalıplama ile şekillendirme yöntemlerine göre daha yüksek çekme oranında şekillendirme yapılabilmektedir. Sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinin kullanılmasıyla, çok sayıda kalıplama takımları kullanılmadan ve sac metal parça üzerinde dayanım açısından problem oluşturan kalınlık azalmaları önlenabilmektedir. Diğer taraftan, sıvı basıncı ile şekil verme yöntemlerinde etkili olan işlem parametrelerinin etki düzeyinin belirlenmesi, kalıp tasarımı ve imalatı açısından verimli olarak kullanılabilmesi ve bilimsel olarak anlaşılabilmesi önem taşımaktadır.

Sıvı basıncı ile şekillendirme (SBŞ) işlemi, geleneksel kalıplama yöntemlerine nazaran alternatif etkili bir şekillendirme yöntemi olarak tercih edilmektedir. Sıvı basıncı ile derin çekme yöntemi, sıvı basıncı ile şekillendirme teknolojisi bünyesinde alt grup olarak yer alan bir şekillendirme yöntemidir. Hidromekanik şekillendirme yöntemi, geleneksel derin çekme teknolojisi ve sıvı basıncı ile şekillendirme teknolojisinin her ikisinin de özelliklerini içermektedir. Sıvı basıncı ile şekillendirme işleminde kauçuk zar ve bir zımba takımı, parçalara şekil vermek için kullanılmaktadır. İşlem esnasında; kalıp zımbası, akışkanın şekil verdiği dişi kalıp

içine girmektedir ve bu esnada sac malzemeye giren takım zımba etrafına sarılmakta ve şekillendirilmek istenen parça oluşturulmaktadır [1].

Bir diğer ifadeye göre sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi, rijit takımlarla yapılan geleneksel derin çekmede oluşan bazı doğal problemleri aşmak amacıyla geliştirilen özel derin çekme işlemlerinden birisi olarak tanımlanmıştır. Sıvı basıncı ile şekillendirme ile derin çekme işlemlerinde rijit kalıbın yerini alması için elastik bir diyafram kullanılmaktadır. Dolayısıyla, sürtünme kuvvetleri büyük oranda azaltılabilmiş ve simetrik olmayan geometrilere sahip kalıpların sadece bir yarısının üretilmesiyle, karmaşık şekilli sac metal parçaları derin çekme ile şekillendirmek mümkün olmuştur [1].

Birçok uygulamada, esnek bir diyafram üzerine sac yerleştirilmekte ve daha sonra Şekil 1.1’de gösterilen bir dişi kalıp boşluğu içinde şekil verilmektedir. Yöntemin olumlu yönü, kalıp tasarımının daha basit ve işlemin daha küçük sayıdaki parçaların üretimi için ekonomik olmasıdır. En önemli olumsuzluğu ise oldukça yüksek basınçların gerekmesi ve işlem zamanının mekanik preslerdeki presleme zamanından daha fazla olmasıdır [2].



Şekil 1.1. Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemi [2].

Bu çalışmada, deneysel işlem parametreleri, başlıca girdi parametreleri ve çıktı parametreleri olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmıştır. Girdi parametreleri olarak kalıp içi sıvı basıncı, zımba hızı (şekillendirme hızı), sac malzeme cinsi, sac malzeme kalınlığı ve iş parçası geometrisi olarak tespit edilmiştir. Çıktı parametreleri olarak ise; parça üzerindeki kalınlık değişimi, derin çekilebilirlik (çekme oranı), şekillendirme hataları (katlanma, yırtılma, aşırı kesit incilmesi) dikkate alınmıştır.

Yüksek çekme kuvveti ve yüksek baskı plakası kullanmayı gerektirmesine rağmen, yüksek sıvı basıncı ile sac metal şekillendirme teknolojisi, geleneksel çekme teknolojisine nazaran ciddi bir alternatif olmaya devam etmektedir. Bu çalışmanın temel amaçları;

- Bir sıvı ile şekillendirme yöntemi olan hidromekanik derin çekme işlemlerinde etkili olan parametrelerin deneysel olarak incelemek,
- Farklı geometri ve farklı malzeme türleri için ideal hidromekanik derin çekme parametrelerini belirlemek,
- Klasik bir kalıplama ile çekme yöntemine göre avantaj ve dezavantajları yönünden detaylı bir şekilde incelemek,

olarak özetlenebilir.

Tez çalışması kapsamında, Erdemir 6112 sac, AISI 304 paslanmaz çelik sac ve bakır sac malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda 0,5 mm, 0,8 mm ve 1 mm malzeme kalınlıkları kullanılmıştır. Çalışmada, hidromekanik derin çekme yöntemi kullanılmış, literatürde az araştırmaya konu edilen kare geometrili kapların çekme deneyleri de yapılmıştır. Kalıp içerisindeki akışkan sıvının basıncının etkisini gözlemlemek için 10, 20 ve 30 MPa (N/mm^2) basınç değerleri uygulanmıştır. Şekillendirme esnasında, silindirik ve kare şekilli olmak üzere iki temel geometri ve her bir geometri için de 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalıp kavisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, şekillendirme hızının etkisini belirlemek için de 6 mm/s, 12 mm/s ve 18 mm/s çekme hızı değerlerinde deneyler yapılmıştır. Belirlenen bu parametre değerlerine bağlı olarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sıvı basıncı ile şekillendirme konusunda; sonlu elemanlarla analiz, analitik ve matematiksel modelleme ve çok sayıda araştırma ile deneysel çalışma yapılmıştır. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemlerinin çok çeşitli olması; çekme, şişirme ve birleştirme gibi farklı şekil verme işlemleri için de yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Sıvı basıncı ile derin çekme teknolojisi ilk kez 1890 yılında geliştirilmiştir. Devam eden geliştirme ve yenilikler sayesinde, özel üretim ekipman ve cihazlar geliştirilmiş, üretilmiş ve ticari olarak ve kullanıma sunulmuştur. Sıvı basıncı ile derin çekme işlemleri, verimlilik kaybı haricinde ürünün kalitesini de geliştirmesi dolayısıyla bazı diğer metal şekil verme işlemlerinin yerini almaktadır [1, 3]. Bu teknolojinin yaygınlaşmasında önemli bir gelişme İkinci Dünya Savaşından sonra başlamıştır ve ilk araştırmalar; Almanya ve Japonya’da yapılmıştır [1, 3-5].

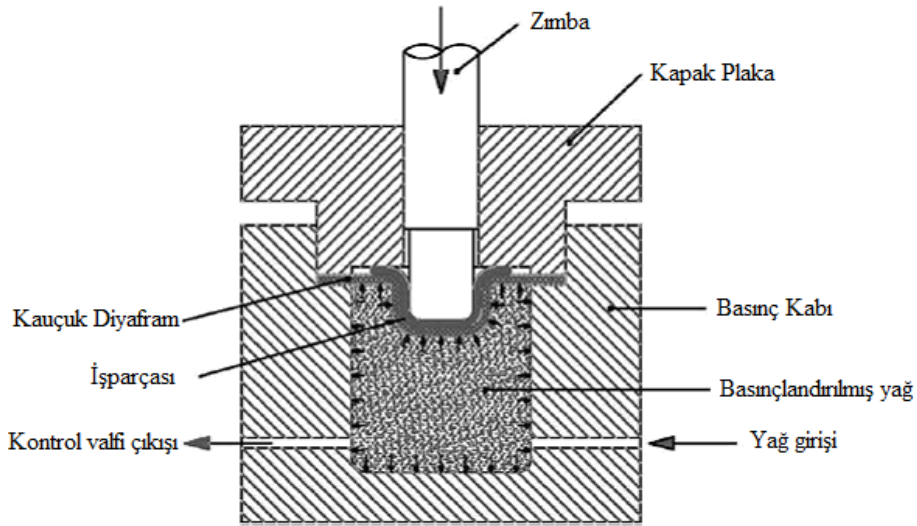
Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi, ilk olarak II. Dünya savaşından önce yumuşak bir zımba olarak akışkanın kullanımı ile sac malzemeye şekil vermek üzere geliştirilen ve uzun zamandır iyi bilinen bir işlemdir. Literatürden, işlemin kontrolünün iyileştirilmesi ve çevrim zamanının azaltılması esaslı sıvı basıncı ile şekillendirmenin uygulama alanlarının genişlediği görülmektedir [6-12]. Yüksek sıvı basıncı ile şekillendirme (Hydroforming) teknolojisi çok yönlü olumlulukları nedeniyle araştırmacılarca artan bir ilgi kazanmaya maruz kalmıştır.

2.1. Sıvı Basıncı İle Şekillendirme Yöntemleri İle İlgili Çalışmalar ve Deneysel Yaklaşımlar

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde etkili olan, kalıp içi basıncı, zımba geometrisi ve kavisi, kalıp kavisi, şekillendirme kuvveti, sac malzeme kalınlığı ve türü gibi işlem parametrelerini belirlemek için çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları bu kısımda özet olarak verilmiştir.

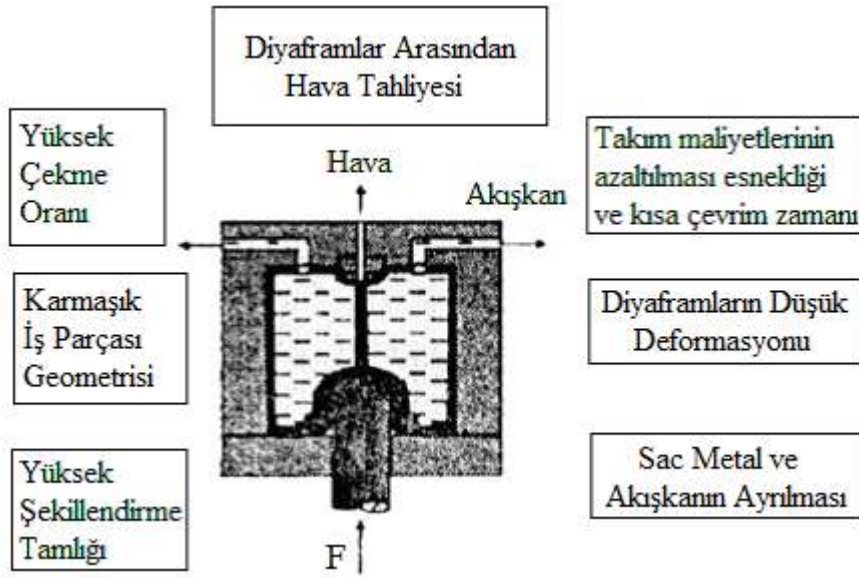
Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde, sac malzemenin doğrudan sıvı ile temas ettiği uygulamalarda meydana gelen sızıntıları engellemek işlem ve kurulum maliyetini arttırmaktadır. Çünkü bu durum ek güvenlik maliyetleri ve sızdırmazlık elemanları gerektirmekte veya sızıntı nedeniyle oluşan kayıplar nedeniyle işlem maliyetleri artmaktadır. Bu nedenle sac malzeme ile sıvı arasında diyafram kullanımı ile ilgili çalışmaların yapıldığı görülmüştür.

Kandil, sıvı basıncı ile derin çekme işleminde sabit bir dişi kalıp yerine sıvı üzerine elastik kauçuk bir diyafram kullanmıştır. İşlem esnasında, yağlayıcı kullanımıyla sürtünme kuvvetlerinin azaltılması nedeniyle kompleks şekilli ve simetrik olmayan geometrili parçaların şekillendirilmesini sağlamıştır [13].



Şekil 2.1. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemiyle derin çekme işlemi [13].

Vollertsen, v.d.; çoklu elastomer diyaframları dikkate alarak sürtünme nedeniyle meydana gelen deformasyonu belirlemek için sonlu elemanlarla analiz yöntemlerini kullanarak ABAQUS adlı programda işlemin simülasyonunu yapmışlardır. Klasik bir çekme işlemi ile tekli ve çoklu diyafram kullanımını karşılaştırmışlardır. Çoklu diyafram kullanımı ile çok sayıda olumlu yönlerin elde edildiği çalışmada ortaya konmuştur (Şekil 2.2) [14].



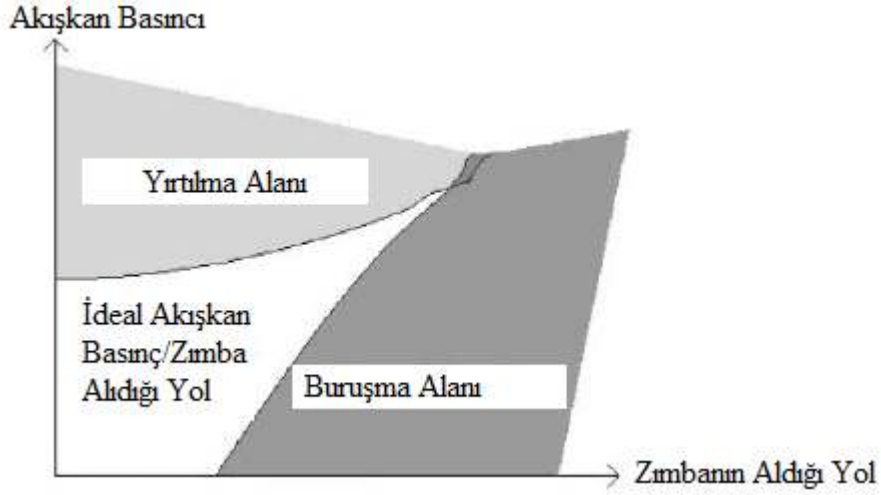
Şekil 2.2. Çoklu diyafram metodunun olumlu yönleri [14].

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde malzeme en önemli faktörlerden birisi olduğundan malzemeye dayalı şekillendirilebilirliği belirlemek için çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır [15-20].

Dachang, v.d.; uzay ve havacılıkta geniş bir uygulama alanı olan süper alaşım malzemelerin hidromekanik yöntemle derin çekilmesi sonucu yırtılma ve kalınlık değişimini incelemiştir. İşlem esnasında 100 MPa kalıp içi basıncına ve 2,45 çekme oranına ulaşılmıştır. Malzemelerin yüksek gerilimli olmasından dolayı şekillendirme işlemi için bu kadar büyük iç basınçlara çıkılmıştır [15].

Yu ve arkadaşları; dokuma kumaş takviyeli termo-plastik (FRT) kompozitlerin sıvı ile şekillendirilmesi işlemini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. İşlem esnasında dokunan takviye örgüsünün şekillendirme davranışını analiz etmek için, açık kodlu dinamik model sonlu elemanlar kodları uygulanmıştır. Çalışmada; buruşma davranışının, akışkan basıncı ve başlangıçtaki şekillendirmede oluşan değişimlerin karşılık etkisinin uygulamalı olarak incelendiği görülmüştür [16].

Zampaloni v.d.; elyaf takviyeli termoplastik kompozit sacların şekillendirilmesi için termo-sıvı ile şekillendirme isimli yeni bir yöntem geliştirmişler ve sıvı ile şekillendirme işlemi esnasında ısıtılmış sıvı kullanmışlardır. Klasik kalıplama işlemlerinde, termoplastik kompozit malzemelerin şekillendirilmesi için öncelikle ısıtılması gerekmekte ve bu işlem maliyetini arttırmaktadır. Çalışmalarında, cam elyaf takviyeli termoplastik malzemelerin şekillendirilmesi için yırtılma ve kırışıklık oluşumundan kaçınmak için zımbanın aldığı yol ile akışkan basıncı (Şekil 2.3) ilişkisini ideal olarak genelleştirmişlerdir [17].



Şekil 2.3. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin şekillendirilmesi için genelleştirilmiş ideal akışkan basıncı – zımba yolu ilişkisi [17].

Bruni ve arkadaşları; yüksek gerilimli çeliklerin sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde kalıcı gerilme ve geri esnemenin belirlenmesine yönelik çalışmada, sac malzeme olarak, TRIP 800 kalite çelik kullanılmışlardır. Sıvı ile şekillendirme işlemlerinde etkili olan; kalıp içi basınç, kalıp geometrisi ve baskı yastığının, geri esneme ve kalıcı gerilmeye olan etkilerini deneysel ve sayısal prosedürlerle detaylı olarak incelemişlerdir. Yüksek gerilimli çelikleri şekillendirmek için 135 MPa gibi çok yüksek basınçlara çıkmışlardır [18].

Kleiner ve arkadaşları; sac metallerin sıvı ile şekillendirilmesi için ultra yüksek performanslı beton kalıbı geliştirmişlerdir. Geliştirilen kalıp, 80 MPa – 96 MPa

basınç aralığına kadar dayanabilmiştir. Kalıp, büyük boyutlu parçaların şekillendirilmesi için kolaylık sağlarken küçük kavisli parçaların şekillendirilmesinde; küçük kavisler ve yüksek sertlikteki malzemeler için daha yüksek dayanımlı kalıplara ihtiyaç duyulması sebebiyle uygun olmamaktadır [19].

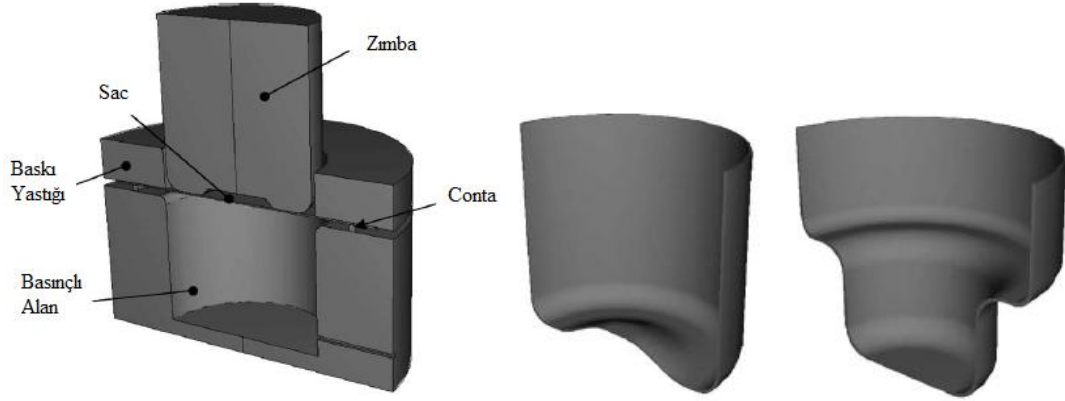
Karkoub, sıvı ile şekillendirme işleminin karakteristiklerini tahmin etmek için yapay sinir ağları kullanmıştır. İşlem esnasında yapay sinir ağlarının kullanılmasıyla oluşan deformasyonun miktarını tahmin etmek için bir model geliştirmiş ve ağları genelleştirilmiş algoritmalar ve deneysel veriler kullanarak eğitmiştir. Tasarlanan ağlar ile başarılı bir şekilde, deformasyonun şekli, kalınlık değişimi ve merkezdeki sapma değerlerini tahmin edilebilmiştir [20].

Karmaşık geometrili parçalarda ve çok aşamalı şekillendirme gerektiren hallerde sıvı basıncıyla şekillendirmenin son derece ekonomik olduğu ve yüksek sıvı basıncının yırtılmanın ve et kalınlığında dayanım azaltıcı bir incelmeyi olmasında son derece önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Yırtılmanın ve problemlerle incelmelerin bulunmadığı şekillendirme işlemlerinde kalıp içi basıncı kritik bir parametre olmaktadır. Diğer taraftan, aşırı yüksek basınç; sac malzemelerde yırtılmalara, düşük basınç ise kırışmalara neden olabilmektedir [21-24]. Birden fazla kademeli ve/veya karmaşık geometrilerin, şekillendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Khandeparkar ve Liewald, karmaşık geometrili ve kademeli metal parçaların hidromekanik derin çekilebilirliğini araştırmışlardır. Düşük karbonlu çelik (DC04) için 3,0 ve paslanmaz çelik (DIN 1.4301) için 2,875 çekme oranını elde etmişlerdir. Kalıp içi basınç kontrolü için, mikron düzeyinde ölçme duyarlılığına sahip basınç kontrol valfi kullanılmıştır [21].

Qin ve Balendra; çalışmalarında içbükey geometrili sac parçaların hidromekanik olarak derin çekilebilirliğini incelemişlerdir. Karmaşık geometrili parçaların şekillendirilmesinde, şekillendirme zımbasının teması ile oluşan karşı basıncın çok önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Karşı basıncın, şekillendirme zımbasının hızı,

baskı yastığı kuvveti ve zımba başının şeklinden etkilendiği deneysel olarak belirlenmiştir. Karmaşık geometrili parçaların şekillendirilmesinde karşı basıncın çok hassas bir şekilde kontrolünün gerekli olduğu ortaya konmuştur [22].

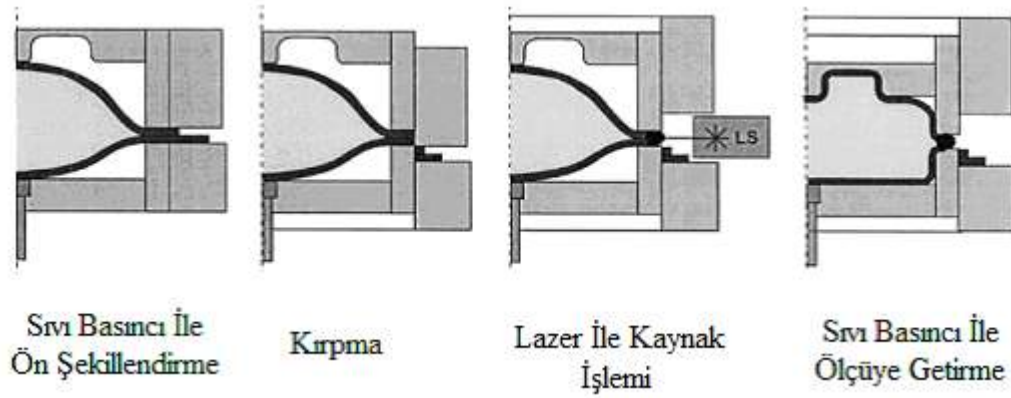


Şekil 2.4. Hidromekanik derin çekme işlemi ve içbükey özellikli parçalar [22].

Günümüzde; otomotiv endüstrisinde çeşitli yöntemlerle (kesme, bükme, kaynak vb. yöntemlerle) şekil verilerek oluşturulmuş karmaşık geometrilere sahip parçalar sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri kullanılarak tek operasyonda üretilmektedir. Sac metal çiftlerinin şekillendirilmesi, bu tür yöntem uygulamalarının en iyi örneklerini oluşturmaktadır. Sac metal çiftlerinin şekillendirilmesi ile ilgili olarak çok sayıda çalışma yapılmıştır [25-28]. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

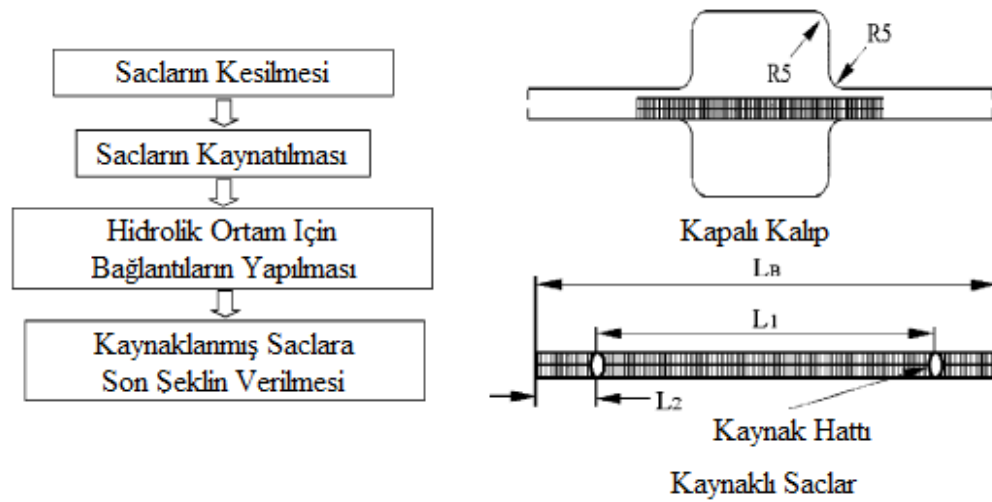
Hein ve Vollertsen; kaynak ile birleştirilmemiş sac metal çiftlerinin sıvı basıncı ile şekillendirilmesinde etkili olan parametreleri deneysel olarak incelemişlerdir. Baskı yastığının kapanma kuvvetinin sac malzemedeki sürtünmeye olan etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. İşlem esnasında, sac malzeme çifti sıvı basıncının etkisi ile şişirilirken baskı yastığı kuvveti akmaya izin verecek şekilde olması ve en son şekle getirme işleminde ise 125 MPa gibi çok yüksek basınçlara çıkıldığından dolayı çok yüksek kapanma kuvvetlerine ulaşılması gerektiği tespit edilmiştir [25].

Sıvı ile şekillendirme işlemleri; kesme, bükme ve birleştirme gibi şekillendirme işlemleri ile bütünleşik işlem zinciri halinde gerçekleştirilebilmektedir [25, 29].



Şekil 2.5. Sıvı basıncı ile entegre şekillendirme işlemleri [25].

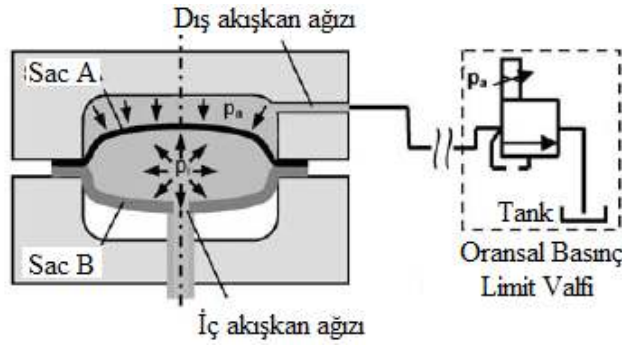
Shin ve arkadaşları; otomotiv endüstrisinde kullanılan bazı parçaların üretimi için sıvı ile şekillendirme yöntemini esas alan yeni bir işlem geliştirilmiştir. İşlemin diğer uygulamalardan farkı, kullanılan sacların kaynakla önceden birleştirilmiş olması ve daha sonra sıvı basıncı ile şekillendirme işleminin uygulanması olarak görülmüştür. Geliştirilen yeni yöntemle motor montaj destek parçasının üretimi yapılmıştır [26]. Yeni yöntemin işlem adımları ve yöntem Şekil 2.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kaynaklı sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi ve adımları [26].

Geiger, v.d.; farklı kalınlık veya malzemeye sahip homojen olmayan karmaşık şekilli sac metal çiftlerinin şekillendirilmesinde, sıvı basıncı ile şekillendirme yönteminde

karşı basınç kullanılarak yapılan yeni bir yöntem denemişlerdir. Farklı olan iki sacın, farklı davranışlarını sönümlemek için iki sacdan birisinin dışına karşı bir basınç uygulanmasıyla şekillendirilebilirlik potansiyelinin başarılı bir şekilde kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir [27].



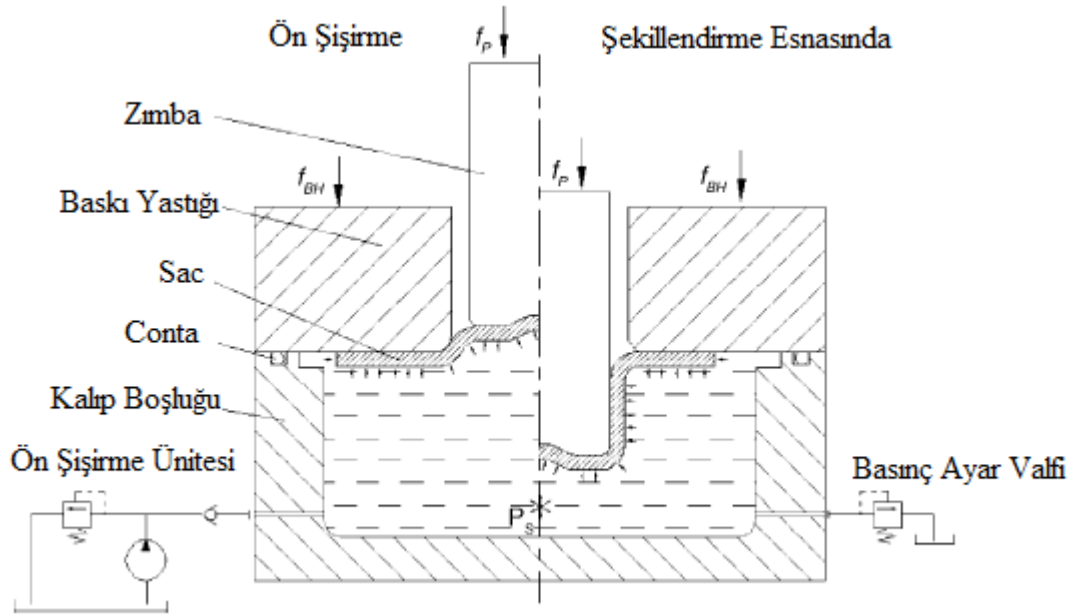
Şekil 2.7. İç ve karşı basınçlı sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi [27].

Assempour ve Emami; üst sınır analizleri metodunu kullanarak sac metal çiftlerinin sıvı ile şekillendirme işlemlerinde basınç tahmini yapmışlardır. Basınç tahmini için, ilk olarak kinematik hız alanlarının ilişkisi çıkartılmış daha sonra da üst sınır metodu ve enerjinin optimizasyonu ile şekillendirme için ihtiyaç duyulan basınç miktarı tespit edilmiştir [28].

Otomotiv endüstrisinde, alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi hafif malzemeler ağırlık azaltmak için çok yüksek bir potansiyele sahiptir. Ancak, oda sıcaklıklarında alüminyumun yüksek alaşım yüzdesi ve magnezyumun hegzagonal yapısı nedeniyle bu tür malzemelerin şekillendirilebilirliği düşük olmaktadır. Bu nedenle, bu malzemelerin şekillendirilmesi için sıcak dövme, ekstrüzyon, döküm gibi geleneksel şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Geleneksel şekillendirme yöntemlerinin yerine, sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinin getirmiş olduğu şekillendirme kolaylıkları nedeniyle, arttırılmış sıcaklıklarda sıcak sıvı basıncı ile şekillendirme işlemleri denenerek kolaylıkla bu tür malzemelerin şekillendirilebildiği görülmüştür [30-31].

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde, ön şişirme basıncı (kalıp içi başlangıç basıncı) güçlü bir etkiye sahiptir ve sac malzemenin şekillendirilebilirlik oranını doğrudan etkileyen bir parametredir. Ön şişirme işleminde, ön şişirme basıncı ve ön şişirme yüksekliği olmak üzere iki büyüklük dikkate alınmıştır [32-34].

Lang, v.d.; alüminyum sac malzeme üzerine eşit basınç uygulayarak yaptıkları hidromekanik derin çekme işlemi esnasında ön şişirmenin etkisini incelemişlerdir. Ön şişirme, sacın zımba ucunu önceden kaplamasına yardımcı olmakta böylece, sac ve zımba arasındaki temas nedeniyle zımba ucunda yırtılmanın oluşumunu engellemektedir. Diğer taraftan aşırı ön şişirmenin, çok şiddetli bükme ve geri bükme etkisi nedeniyle yırtılmaya neden olduğu tespit edilmiştir [32].



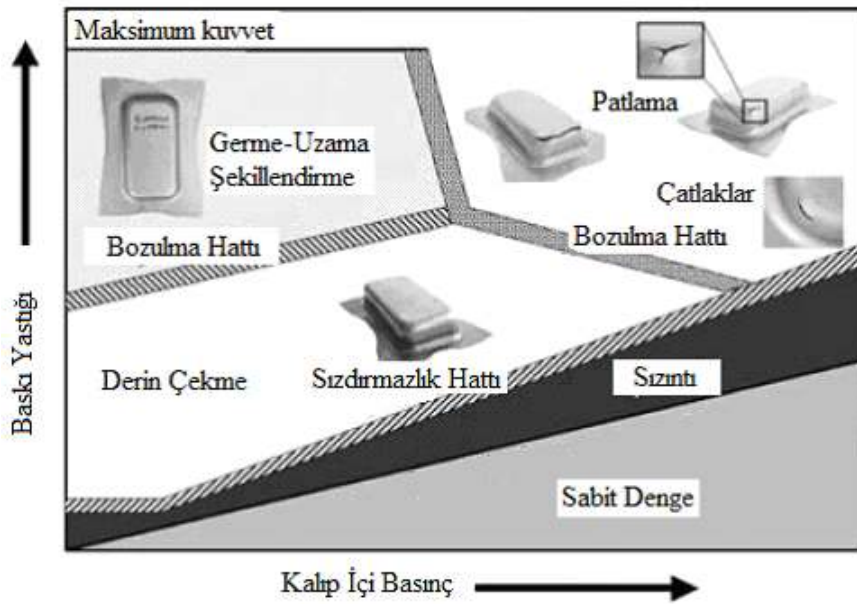
Şekil 2.8. Ön şişirmeli sıvı ile şekillendirme deney düzeneği [32].

Zhang ve arkadaşları, düşük karbonlu çelik parçaların sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işleminde ön şişirme basıncının ve malzeme anizotropisinin ürün üzerindeki et kalınlığı değişimine olan etkilerini incelemişlerdir. Ön şişirme basıncının ideal seçilmesi durumunda ürün üzerinde daha eşit kalınlık dağılımının

elde edildiği, çatlama ve bölgesel incelmenin önlenemediği deneysel olarak ispat edilmiştir [33].

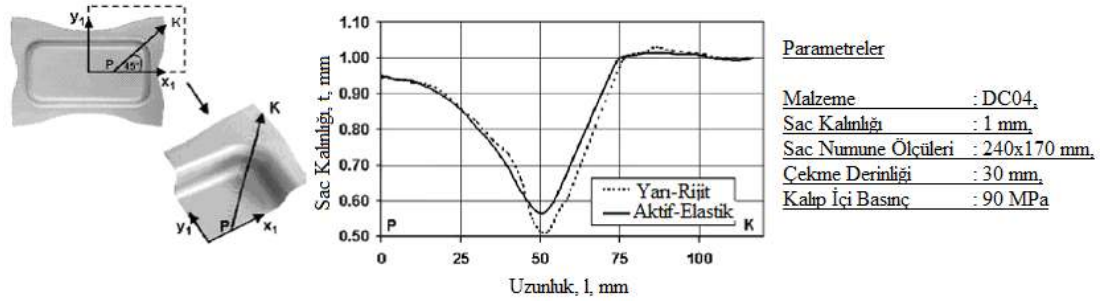
Singh ve Kumar, ön şişirme basıncının ve kalıp içi en büyük basıncının şekillendirilmiş ürün yüzey kalitesine ve kalınlık dağılımına olan etkilerini incelemişlerdir. Ön şişirme basıncının kontrolünün, parçanın yüzey kalitesi ve eşit kalınlık dağılımı açısından faydalı bir şekilde etkilediğini deneysel olarak kanıtlamışlardır. Sıvı ile şekillendirme işlemi esnasında düşük karbonlu çelik malzemede aşırı basınç nedeniyle oluşan yırtılma ve kırışıklık oluşumunu engellemek için ideal ön şişirme ve kalıp içi basınç değerlerini belirlemişlerdir [34].

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde, baskı yastığının kontrolü çok önemli bir parametredir. Bu nedenle, ideal baskı yastığı parametresini elde etmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. İşlem esnasında, baskı yastığı kuvvetinin ideal değerden az olması kırışıklık oluşumu ve sızıntılara, fazla olması ise yırtılmalara neden olmaktadır [35-37]. Basınç ve kapanma kuvveti arasındaki ilişki Şekil 2.9 'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde kalıp içi basınç- baskı yastığı kuvveti ilişkisi [35].

Groche ve Metz, sac metal malzemelerin yüksek basınçlı şekillendirme işlemleri için aktif-elastik bir baskı yastığı geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu baskı yastığı sisteminin, yarı-rijit baskı yastıklarının tersine, sac malzemenin kulak bölgesinde akmasına ve şekillendirilen parçalar için kritik bölge olan köşelerde daha az kalınlık incelmeye imkân tanıdığı görülmüştür. Geliştirilen sistemle yarı rijit takımların kullanımına göre, daha yüksek çekme oranı yakalamış ve en aza indirilmiş plastik uzamalar ve kulak bölgesinde daha çok malzeme akışına imkân tanınmıştır. [38]. Şekil 2.10 'da geliştirilen yöntem ile yapılan deneysel çalışma sonucu kalınlık dağılımının karşılaştırması verilmiştir.



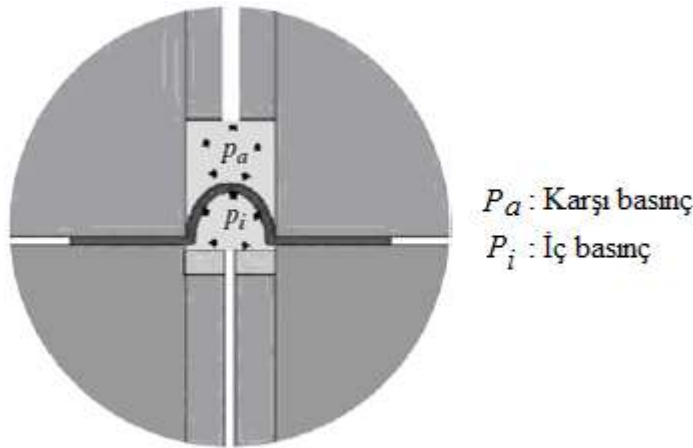
Şekil 2.10. Yarı rijit ve aktif-elastik baskı yastıklarının kalınlık değişimi açısından deneysel incelenmesi [38].

Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri günümüz endüstrisinde uygulama alanları ve kalıplama konusunda getirdiği yenilikler nedeniyle büyük ilgi toplamıştır. İşlem esnasında sıvının kullanılması, yöntemi geleneksel kalıplama yöntemlerinden ayıran en büyük parametredir. Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde, sıvı basıncı uygulama yöntemleri de çok sayıda araştırmaya konu olmuştur.

Lang, v.d.; Al 6016-T4 ve Al 1050-H0 malzemelerinin üzerine eşit basınç uygulayarak hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirmeyi denemişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu yöntem ile sac malzeme üzerindeki basınç kalıp içerisindeki basınca eşit olmaktadır ve kalıp içerisindeki basınç tam olarak kontrol edilebilmektedir. Eksenel basıncın, sıvı ile şekillendirme işlemlerinde çekme oranını arttırdığı ve sac kenarlarındaki eksenel basınca eşit olduğu görülmüştür. Önerilen yöntemlerin, şekillendirilen ürünlerde daha düzgün yüzeylerin elde edilmesine ve

3,11 gibi daha yüksek çekme oranlarına erişilmesine imkan tanıdığı görülmüştür. Araştırmacılar, bir başka çalışmada, kare şekilli bir parçayı yuvarlak zımba üzerine işlemiş sac malzemeyi üzerine eşit basınçlı sıvı uygulayarak şekillendirmişlerdir. Hidromekanik derin çekme işlemlerinde geleneksel tasarımda kullanılan kare kalıp yerine yuvarlak kalıp kullanımının yapılabilir olduğu görülmüştür. Kare şekilli bir parça için düşük akma dayanımlı çelik kullanımında 3,53 ve düşük akma dayanımlı alüminyum kullanımında 3,44 çekme oranı elde etmişlerdir [39, 40].

Guk, v.d., karşı akışkan basıncı ile eksenel simetrik hidrolik şekillendirmede çelik sacların şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmalarında, otomobil üst kaportalarının yapımında kullanılması için gelecek vadeden DP600, TRIP700 ve DC06 saclarının sıvı ile şekillendirilme yönteminin kullanılmasıyla elde edilen sonuçları sunmuşlardır. Karşı basınç kullanımının ürün kalitesini arttırdığı ve ürünün her tarafında eşit kalınlık dağılımını sağladığı görülmüştür [41].

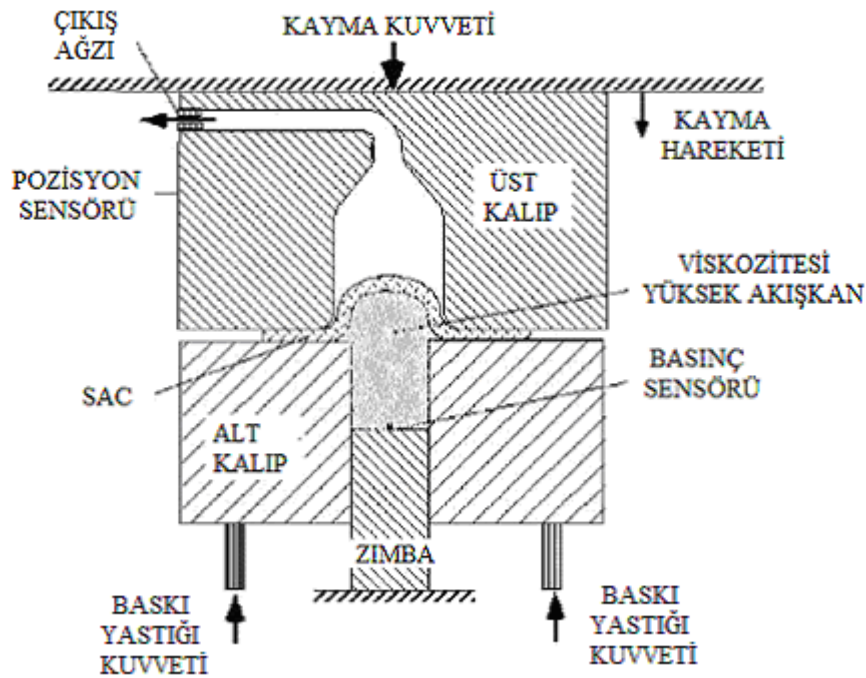


Şekil 2.11. Karşı basınçlı sıvı ile şekillendirme yöntemi [41].

Thiruvardhelvan ve Lewis, sabit akışkan basıncı kullanarak bakır sac malzemelerin şekillendirilmesi işlemini gerçekleştirmişlerdir. Sac malzeme ile sıvı doğrudan temas ettirilmeyerek, kauçuk diyafram ile ayrılmıştır. Pratikte sıvı ile şekillendirme işlemlerinde kalıp içerisindeki sıvı basıncı, zımbanın aldığı yola bağlı olarak artmaktadır. Basınç başlangıçta pompa ile sağlanmakta, daha sonrasında

şekillendirme zımbasının yol alması ile basınç artışı olmakta ancak basınç ayar valfi ile sabit değerde tutulabilmektedir. Bu yöntem ile çekme oranının sınırlı kaldığı tespit edilmiştir [42].

Ahmetoğlu ve arkadaşları, viskoz basınçlı akışkan kullanarak sac metallerin sıvı ile şekillendirilebilirliklerini çalışmışlardır. İşlem esnasında viskoz akışkanın kullanılmasıyla, contalama problemleri daha da iyileştirilerek sızıntılar azaltılmıştır. Yöntemin kullanılmasıyla, simetrik olmayan malzemelerin şekillendirilmesi sağlanmıştır. Şekillendirme hızı, kilitleme kuvveti ve viskoz akışkan basıncının bitmiş parça geometrisine olan etkileri incelenmiştir. Akışkan basıncı gerilimini, kırışıklığı engellemek için başlangıç baskı yastığı kuvvetini ve akışkan basıncı nedeniyle alt kalıpta oluşan karşı basıncını tahmin eden eşitlikler elde etkileri görülmüştür [43].



Şekil 2.12. Viskozitesi yüksek akışkan basınçlı derin çekme işlemi [43].

Çalışmada başlangıç adımı, Newtonik akışkanın akış gerilmesi Eş. 2.1 eşitliği ile verilmiştir [43]. ;

$$\sigma = k.\dot{\epsilon} \quad (2.1)$$

Kırışıklığı engellemek için başlangıç baskı yastığı kuvveti Eş. 2.2 ile önerilmiştir [43].

$$P_{bh} = 10^{-3} . c \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0,005.d}{t} \right] \sigma_u \quad (2.2)$$

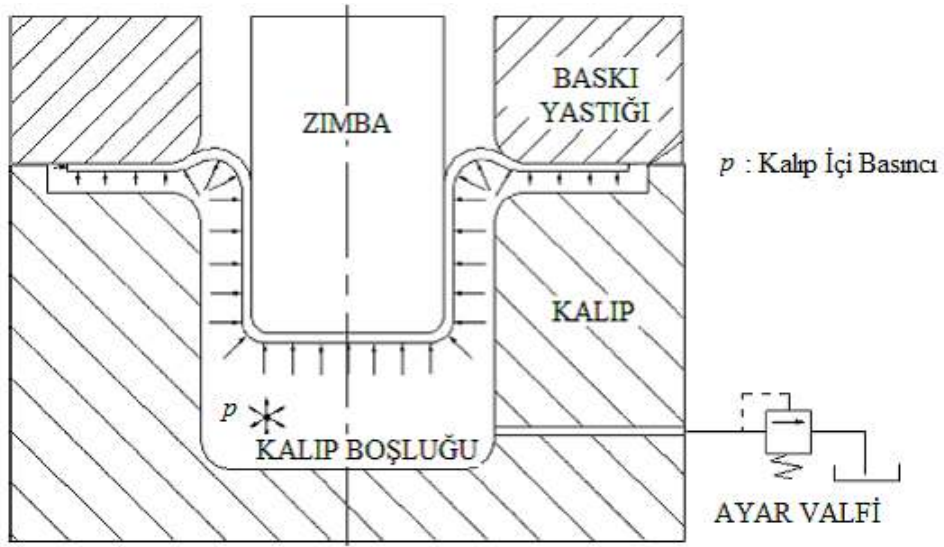
Başlangıçta kulak bölgesinde gerekli baskı yastığı kuvveti Eş. 2.3 ile önerilmiştir [43].

$$BHF = (P_{bh}).(A_f) \quad (2.3)$$

Thiruvarduchelvan ve Tan, akışkan basıncını, çekme işlemi esnasında sac malzeme kenarlarına uygulayarak çekme gerilmesini azaltmayı denemişlerdir. Geliştirmiş oldukları yöntemde; kalıp içerisine basıncın uygulanmasıyla, parça duvarlarında sürtünme desteği sağlanmakta ve kalıp kavisinde mükemmel bir yağlama oluşmakta bu durumun, çekme işlemi esnasında çekme gerilmesinin azaltılması sonucu çekme oranını arttırdığı gözlemlenmiştir [44].

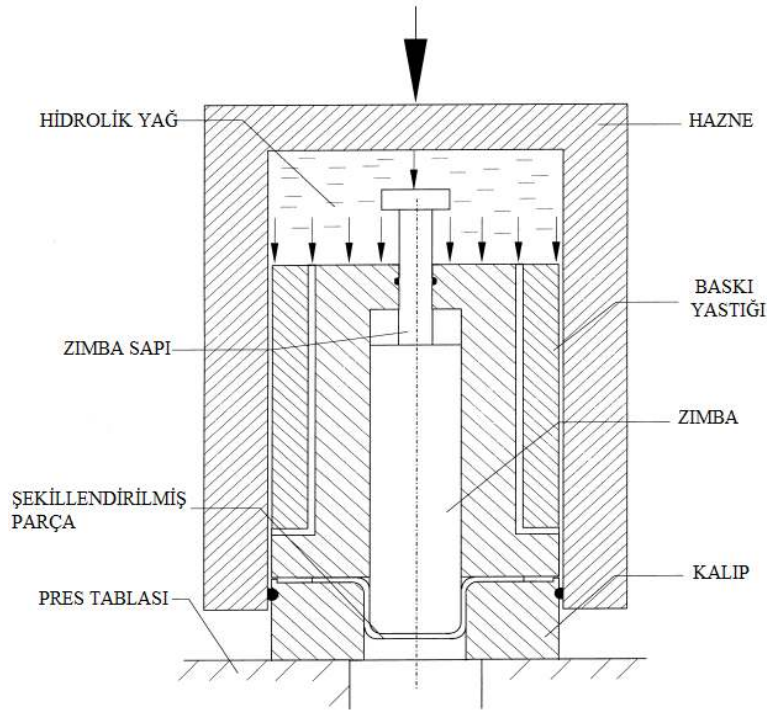
Lang, v.d.; sac malzeme üzerine eksenel basınç uygulayarak hidrodinamik derin çekme yöntemini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemin diğer geleneksel yöntemlerden farkı, çekme kuvvetini azaltmak amacıyla sac malzemenin kenarları boyunca eksenel bir basınç uygulamalarıdır. Eksenel basıncın, sac malzeme ve baskı yastığı arasındaki yağlama ortamı dolayısıyla çekme kuvvetini azalttığı ve çekme oranını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca geliştirilen bu yöntemin diğer yöntemlerden avantajı, çok iyi ürün yüzey kalitesi elde edilebilmesi, yüksek ölçü tamlığı ve karmaşık şekilli parçaların üretilmesi olarak tespit edilmiştir.

Şekillendirme işlemlerinde haddeleme yönü ve malzeme anizotropisinin de çok etkili olduğu vurgulanmıştır. Şekil 2.13’de çalışmada esas alınan yönteme ait şekil verilmiştir [45].

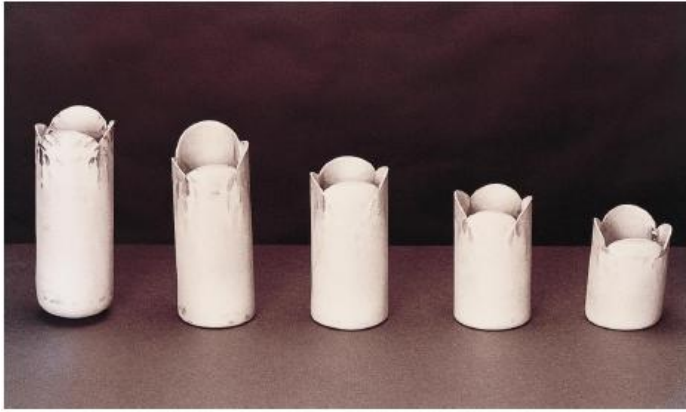


Şekil 2.13. Eksenel basınç destekli hidrodinamik derin çekme işlemi [45].

Thiruvardhulan ve arkadaşları, sac metallerin çok derin şekillendirilerek üretilmesi için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu yöntemde, sac malzeme çevresine eksenel itme için hidrolik basınç kullanmışlardır. İşlem esnasında sac malzeme şekillenirken, zımba etrafında çekme gerilmesi ve sac malzeme etrafında eksenel itme gerilmesi olduğu gözlemlenmiştir. Basınçlı akışkan, sac malzemenin alt ve üst yüzeyini ve kalıp kavisini yağlamakta ve bu durum çekme işlemini oldukça kolaylaştırmaktadır. Hidrolik akışkanın, zımbaya ve ilkel sac numunenin kalınlığı oluşturan çevresel yüzeyine uygulanması nedeniyle baskı yastığı tarafından uygulanması gereken kuvvetin donanımın fiziki yapısından dolayı kendiliğinden oluşmakta olduğu tespit edilmiştir. Yöntemin kullanılmasıyla, 1 mm kalınlıkta Al 1100-H14 kalite sac malzeme için 36 mm çapında ve 3,5 üzerinde çekme oranına ulaşılabilmektedir. Şekil 2.14’de hidrolik basınçla iyileştirilmiş derin çekme yönteminin şeması, Şekil 2.15’de de çekilmiş parça görüntüleri verilmiştir [46-47].



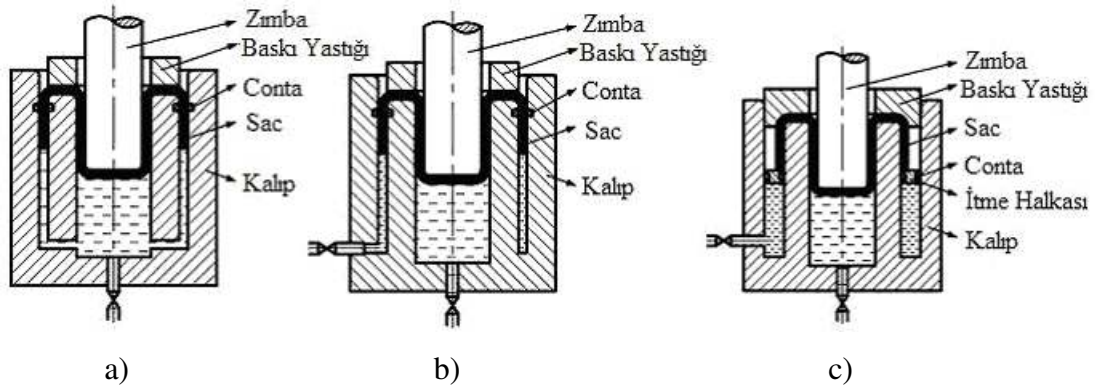
Şekil 2.14. Hidrolik basınçla iyileştirilmiş derin çekme yöntemi [46-47].



Şekil 2.15. Çekme oranı 3,5 ve üzeri olan çekilmiş parça görüntüleri [46].

Zhao ve arkadaşları; hidro-mekanik yönteminde, sac malzemeyi aksenal olarak iterek ters derin çekme işlemini geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu yöntemde, sac malzemenin aksenal olarak kulaklarından itilmesinin deformasyonu kolaylaştırdığını kanıtlamışlardır. Ters derin çekme işlemi, çekilecek malzemenin öncelikli olarak çekme yönünde kulaklarının deformasyonu ve sonrasında kulak bölgelerinde aksenal

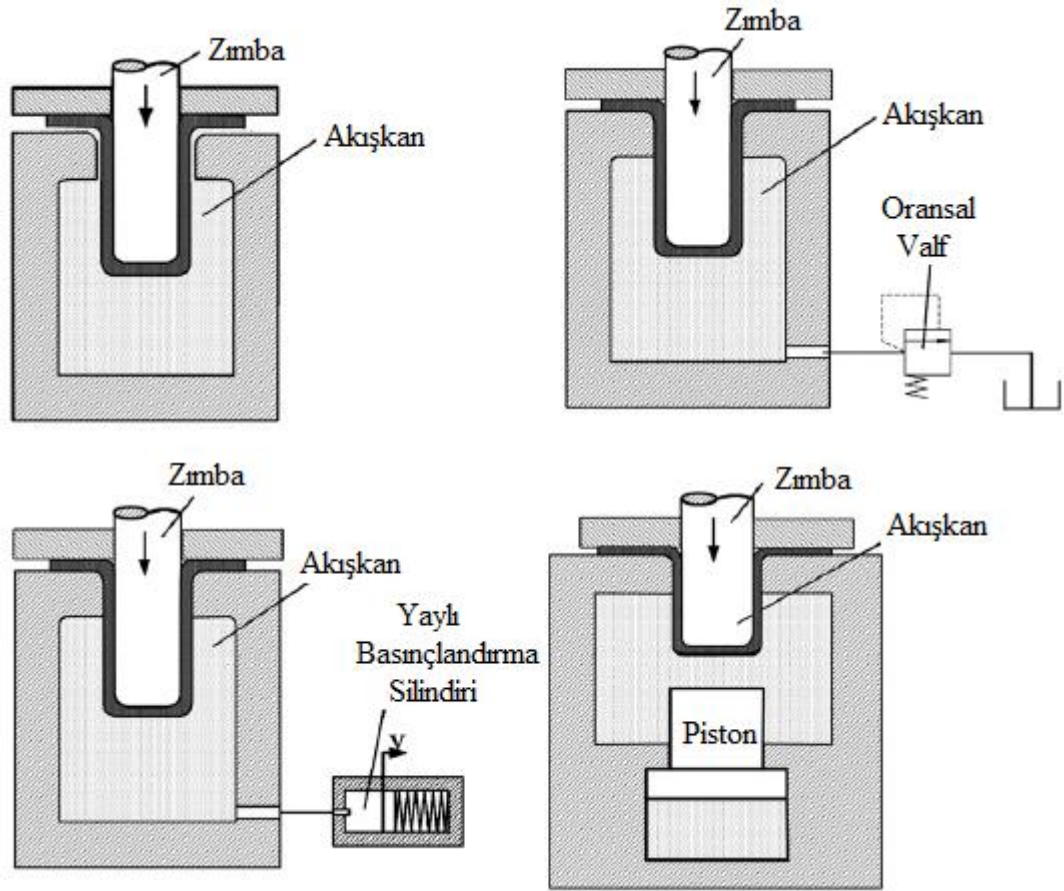
itme ile şekillendirme zımbasının deformasyonundan oluşmaktadır. Geliştirilen yöntem de, başlangıçta akışkan basıncı, kalıp boşluğu basıncı ile aynı değerdayken sonrasında kalıp boşluğundan bağımsız olarak uygulanmıştır. Deneysel çalışmada, 1 mm kalınlıkta 08Al kalite çelik malzeme kullanılmış ve 2,95 çekme oranı elde edilmiştir [48].



Şekil 2.16. Ters sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri [48].

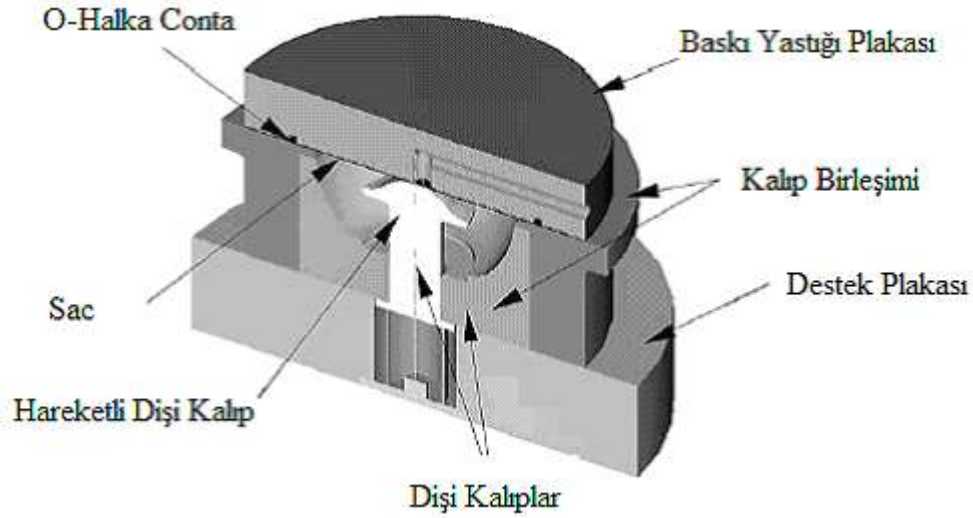
a) Aynı kalıp boşluğunda eksenel itme, b) Kalıp boşluğundan bağımsız eksenel itme, c) Kalıp boşluğundan bağımsız itme bileziği ile eksenel itme

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde, kalıp içerisindeki sıvıya istenilen değerde basınç yükleme ve bu basıncı kararlı tutmak önemli bir adımdır. Basınçlandırma işlemi için çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Lin ve arkadaşları, kalıp içerisindeki sıvıyı basınçlandırmak için yeni bir yöntem geliştirmiş ve kalıp içerisine yeni bir silindir yerleştirmişlerdir. Diğer silindir ile de baskı yastığı ve zimba için eksenel itme kuvvetini sağlamışlardır. Geliştirilen yöntemin avantajı, basınçlandırma işlemi için ek bir dış kaynağa ihtiyaç duyulmaması olarak açıklanmıştır. Şekil 2.17’de geliştirilen yöntem ve diğer kalıp içi basınçlandırma yöntemleri verilmiştir. Deneysel çalışmada 1 mm kalınlıkta 08 Al çelik sac malzeme kullanılmış ve 2,63 çekme oranı elde edilmiştir [49].



Şekil 2.17. Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde kalıp içi basınçlandırma yöntemleri [49].

Sac metal parçaların sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemlerinde genellikle zimba hareketli olup, basınç uygulanan yüzey sabit kalmaktadır. Zhang ve arkadaşları, az sayıda ve karmaşık şekilli parçaların sıvı basıncı ile şekillendirilmesi için dişi kalıp hareketli olacak şekilde yeni bir yöntem geliştirmiş ve başarılı bir şekilde uygulamışlardır. İşlem esnasında, akışkan sıvı sac malzemeyi şekillendirirken hareketli olan dişi kalıp sac malzemenin deforme olmuş alanı ile temas halinde tutulmuş ve bunun sonucu olarak, deformasyon bölgesinde ilave oluşabilecek deformasyonlar sınırlandırılmıştır. Geliştirilen yöntemin diğer bir özelliği de dişi kalıp malzemesi olarak sert ağaç türü çok ucuz malzemelerin kullanılabilmesine imkan tanımasıdır. Bu yöntemin kullanımı ile sac malzemelerin çekme limitinin arttırıldığı, malzeme üzerinde eşit deformasyonun oluştuğu, deneyler ve sayısal analiz çalışmalarıyla kanıtlanmıştır [50].



Şekil 2.18. Hareketli dişi kalıp ile sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemi [50].

2.2. Analitik ve Matematiksel Modelleme Çalışmaları

Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri için analitik modelleme ve sayısal simülasyon çalışmalarının 2000’li yılların başından itibaren giderek yer aldığı gözlemlenmiştir. Şekillendirme sürecinin analitik ve matematiksel olarak modellenmesiyle, deneme yanılma yoluyla elde edilebilecek sonuçların veya işlem esnasında oluşabilecek davranışların önceden tahmin edilebilmesi sağlanmıştır. Bu konuda yapılan çalışmaların bilgisayar donanımındaki gelişmelere paralel olarak artış gösterdiği, analitik ve matematiksel modelleme çalışmalarında yazılımlarda bulunan iyileştirmelerin hesaplamaların hızına ve doğruluğuna önemli katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Sac malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemlerinde diyaframlar birçok kolaylıklar sunmaktadır. Diyaframların kullanıldığı sıvı ile şekillendirme işlemlerinde şekillendirmenin tamlığına; diyafram içerisindeki basınç, diyafram malzemesi ve kalınlığı gibi parametreler etki etmektedir. Beckmann ve Vollertsen basınçlandırılmış diyaframların kullanıldığı derin çekme ve gerdirmeye çekme sonrası şekil kavisi için analitik modeller önermişlerdir. Şekillendirme işlemi esnasında etkili olan parametrelerde dahil olmak üzere diyafram içerisindeki gerekli basıncın

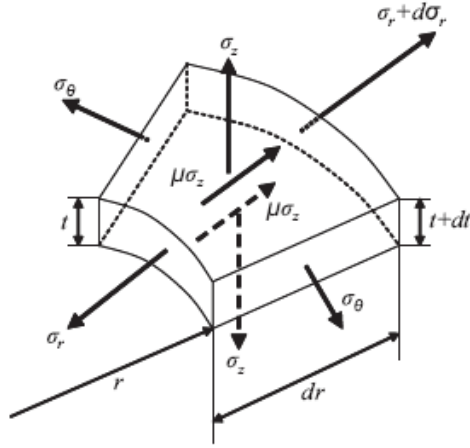
hesaplanmasında da analitik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşımlar ile diyafram ile şekillendirme için gerekli basınç %10 aralıkla hesaplanabilmiştir [51]. Vollertsen'in diğer bir çalışmasında da düşük karbonlu sac metal malzemenin sıvı ile şekillendirilmesi işlemi esnasında oluşan ters kırışıklıkları önlemek için analitik modeller türetilmiştir. Ters kırışıklıklar, kalıp boşluğu içerisine sac malzemenin ön uzamasının sonucu olarak baskı yastığı ve zımba tarafından işlemin başında oluşmaktadır. Analitik modellerin hesaba katılmasıyla karmaşık şekilli parçaların diyafram kullanarak istenilen şekilde şekillenebildiği görülmüştür [52].

Peled, v.d.; derin çekme işleminde Cosserat yayılmış diyafram teorisini kullanarak sac incelmesini analiz etmişlerdir. Cosserat teorisi, şekillendirme işlemi esnasında sac malzemenin akışı için değişen ve doğrusal olmayan analitik çözümü elde etmek için kullanılmıştır. Analitik sonuçların kılavuzluğunda geliştirilen sistem ile tek adımda 3,16 çekme oranını yakalamışlardır [53].

Choi, v.d.; otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan alüminyum ve magnezyum gibi ağırlıkça hafif malzemelerin sıcak hidromekanik derin çekilme işlemlerinde; sıcaklık, hidrolik basınç, baskı yastığı kuvveti ve şekillendirme hızı gibi işlem şartlarının etkilerini incelemek için analitik modeller hazırlamışlardır. Analitik modeller ile sıcak hidromekanik yöntemiyle şekillendirme ünitesinin tasarımı için hızlı ve doğru sonuçlar sağlamışlardır. Çalışmalarında, şekillendirme esnasında meydana gelen deformasyon adımlarını üç parçaya bölerek detaylı incelemişlerdir. İlk adım olarak sac malzemenin kulak bölgesinde meydana gelen eksenel çekme, ikinci adım olarak kalıp içerisinde hidrolik basıncın uygulanmasıyla meydana gelen kalıp kavisi bölgesindeki plastik bükülme ve uzama, üçüncü adım olarak da karşı hidrolik basınç nedeniyle şekillendirme zımbası ve profillerinin sac malzemeyle teması olarak gruplandırılmıştır [54].

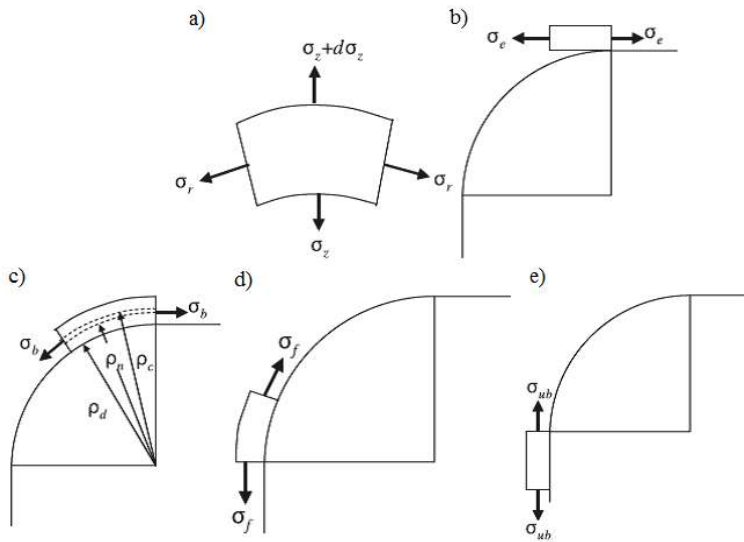
Sac malzemenin deformasyonunun Swift 'in deformasyon sertleşmesi kanununa uyduğu kabul edilmiştir. Swift'in deformasyon-sertleşme kanunu Eş. 2.4'te tanımlanmıştır [54].

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (2.4)$$



Şekil 2.19. Kulak bölgesindeki element üzerinde oluşan gerilim [54].

Kalıp kavis bölgesine ulaşan element, kalıp kavisindeki eğri çizgi boyunca bükülmeye başlamakta, doğal eksen kavis merkez eksenin kavisinden küçük olmaktadır. Sac malzeme kalınlığı kalıp profil kavisindeki orjinal kalınlığın oranına bağlı olarak azalmaktadır. Kalıp kavis bölgesinde meydana gelen deformasyon adımları Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20. Kalıp kavisinde oluşan deformasyon [54].

- a) Bükmedeki elemente gelen gerilmeler, b) Başlangıç durumu,
c) Bükme, d) Sürtünme durumu, e) Geri bükülme durumu

Deneysel çalışmalarla ve optimize edilmiş parametrelerle yapılan sıvı basıncı ile şekillendirme çalışmalarından elde edilen sonuçların çok iyi uyum gösterdikleri konu ile ilgili literatürün incelenmesinden tespit edilmiştir. Farklı optimizasyon tekniklerinin çalışmalarda yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Bilgisayar destekli tasarım, imalat ve mühendislik tekniklerinin, sıvı basıncı ile üretilcek sac metal ürünler için işlemin optimizasyonun da ne derece etkin ve maliyet azaltıcı bir rol uyguladığı günümüzde de kabul görmüş bir sonuçtur.

Ravisekar, sac malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirme işlemleri için pahalı bilgisayar analiz ve simülasyon kodlarının optimizasyonu yerine metamodel tabanlı optimizasyon tekniklerinin de kullanılarak ideal işlem parametrelerinin tahmini çalışmalarını yapmıştır. Araştırmada, sac metal malzemelerin sıvı ile şekillendirilmesi işlemlerinde, ideal zımba yolu ve basınç değerlerini elde ederek kırışıklık hatalarını azaltmak ve yırtılma öncesi daha derin çekmeyi sağlamak amaçlanmıştır. Uygulamada otomotiv parçaları kullanılmış ve optimizasyonda Bayesian tekniğine dayalı olarak serbest eğilim algoritmalarından yararlanılmıştır [55].

Alamo ve arkadaşları, sıvı basıncıyla kalıplama işleminde etkili olan çevresel faktörlerin optimizasyonu ile bu faktörlerin işleme olan etkilerini incelemişlerdir. Çevresel faktörler, kullanılan yağın tipi ve miktarı, kurutma sıcaklığı ve kurutma zamanı, parça kalınlığı ve malzeme tipi olarak belirlenmiştir. Sıvı basıncı ile kalıplama işleminde kullanılan toplam yağ miktarının % 50 oranında azaltılabileceği deneylerle kanıtlanmıştır [56].

Yoon ve arkadaşları; ideal şekillendirme tasarımı teorisine bağlı olarak sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde elde edilen çekme işlemi ve ön şekillendirmenin tasarım optimizasyonunu yapmışlardır. İdeal şekillendirme teorisi esaslı yapılan doğrudan tasarım metodunun, düz sacların çekme işlemleri için başarılı bir şekilde uygulandığı görülmüştür. Optimizasyon olmaksızın, kalıp ve ön şekillendirme işlemi için yapılan tasarımların çok sayıda deneme gerektirdiği

ispatlanmıştır. Bu nedenle, kısa bir zaman aralığında hatasız olarak son ürünü üretmek için en uygun tasarımın yapılmasının önerildiği görülmüştür [57].

Lang ve arkadaşları, uçak üretiminde kullanılan komplike alüminyum alaşımı parçalarının hidromekanik derin çekme yöntemiyle üretilmesinde etkili olan anahtar parametreleri optimize etmişlerdir. Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde parça gövdesinde oluşan kırışıklıkları önlemek için kalıp içerisindeki basınç değişimlerini ve açınım sac şeklini optimize ederek, uygun sonuçların elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır [58].

Gather ve arkadaşları, sac metal malzemelerin sıvı basıncıyla şekillendirme işlemleri için parametre tasarımı yapmışlardır. Seçilen parametreler, çeşitli istatistiki yöntemlere göre optimize edilerek tahmini matematiksel modeller oluşturulmuş ve geliştirilen bu modellere göre ideal veriler için değerlendirmeler yapılarak parametrelerin etki değerleri belirlenmeye çalışılmıştır [59].

Kim ve arkadaşları sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde; çalışma sertleşmesi, anizotropi, akma gerilmesi gibi malzeme parametrelerindeki değişkenlerin hesaba katılmasıyla şekillendirme limitini değerlendirmek için istatistiksel bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışmada güvenilirlik, ilk sıra güvenilirlik metoduna dayalı olarak analitik olarak hesaplanmış ve daha sonra Monte-Carlo simülasyon metodu (MCS) ile doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşım ile sıvı ile şekillendirme işlemlerinde şekillendirme limitlerinin tam olarak değerlendirilebildiği tespit edilmiştir [60].

Hojjati, v.d. sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde, 5083 alaşımlı alüminyumun süper plastik şekillendirilmesinin optimizasyonunu yapmışlardır. İşlem esnasında uygulanan basınçların; kalınlık dağılımı, son şişme yüksekliği, eşit uzama ve gerilim dağılımı gibi önemli parametrelere etkilerini değerlendirmişlerdir. Analitik modellerle uygulanan basınçların karşılaştırılmasıyla sıvıyla şekillendirme işlemi için basınç profili tahminini yapmışlardır [61].

Azodi ve arkadaşları, silindirik geometrili parçaların hidromekanik derin çekme işleminde oluşan yırtılma kararsızlığını analiz etmişlerdir. Barlat-Lian ve Hill 'in ikinci dereceden olmayan akma kriteri ve en büyük izin verilen akışkan basıncına bağlı olarak analitik modeller geliştirmişlerdir. İşlemin etkileri ve malzeme parametrelerinin en büyük uygulanabilen akışkan basıncına olan etkileri incelenmiş ve en büyük izin verilen akışkan basıncı doğru tahmin edilebilmiştir. Yırtılma olmadan daha yüksek oranda çekme oranları elde etmek için düşük akışkan basınçlarının kullanılması gerektiği kanıtlanmıştır. Zimba profil kavisinin arttırılmasının yırtılmadan önceki kritik akışkan basıncını azalttığı deneysel ve analitik olarak ortaya konmuştur [62].

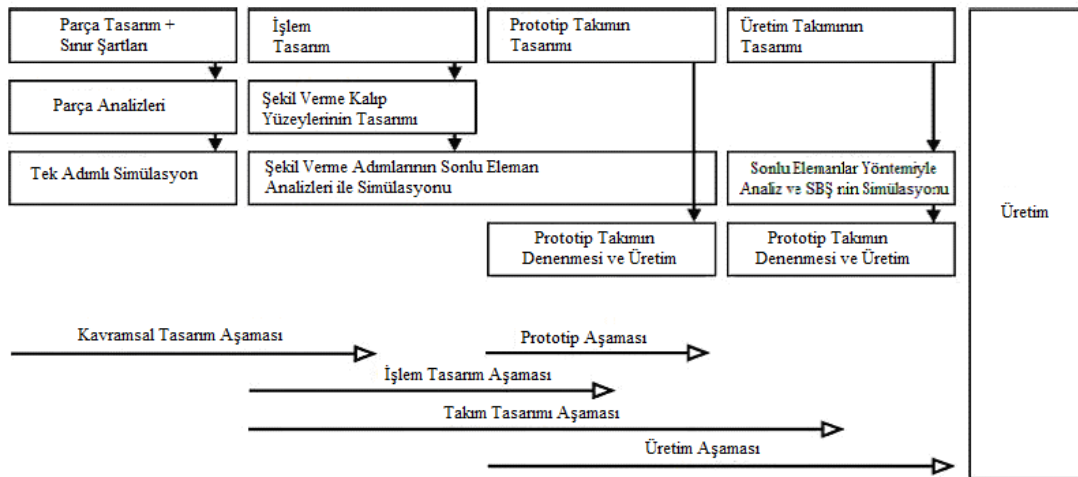
2.3. Sayısal Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları

Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerini dikkate alan ve bilgisayar ortamında yapılan sonlu elemanlar yöntemleriyle analiz ve simülasyon ile sayısal modelleme çalışmalarının 1990'lı yılların ortalarında başladığı görülmektedir.

Sonlu elemanlarla analiz yöntemleri, tasarımcıya bitmiş bir sac metal ürün için işlem parametrelerinin etkilerinin gözlemlenmesinde çok fazla yardımcı olmaktadır. SBŞ işlemlerinde, malzeme ve kontrol parametreleri, baskı yastığı kuvveti vb. etkilerinin analizlerle gerçeğe yakın olarak simüle edilebildiği gözlemlenmiştir [63]. Bu durum, gerçek üretim aşamasında deneme yanılma yoluyla yapılan ayar sürelerinin kısalmasına neden olmakta ve maliyetin düşmesini sağlamaktadır. Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinin sonlu elemanlarla analiz yöntemleri kullanılarak simülasyonunun yapıldığı çok sayıda çalışmaya literatürde rastlanmıştır [6, 64-71].

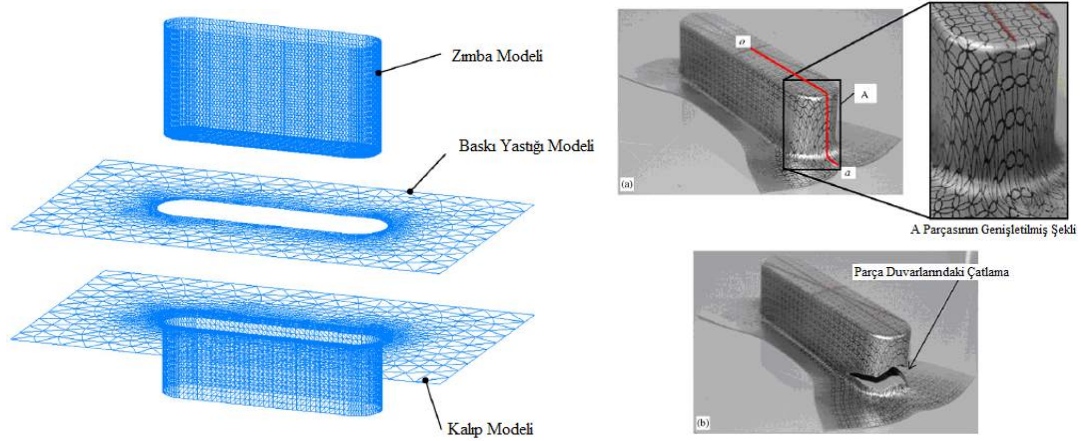
Bilgisayar destekli tasarım, imalat ve mühendislik (CAD/CAM/CAE) tekniklerinin sıvı basıncıyla şekillendirme uygulamalarında sonlu elemanlar simülasyonlarıyla bütünleşmesinin sac metal ürünlerin ve işlemlerin gelişimine olan katkıları 2000'li yıllardan itibaren bilgisayar donanım teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte artan oranda görülmeye başlamıştır. Dohmann ve Hartl; SBŞ uygulamalarında ürün ve işlemlerini geliştirmek için sonlu elemanlarla simülasyon yöntemlerini, güncel

örneklerle bilgisayar destekli tasarım, imalat ve mühendislik uygulamalarıyla bütünleşik olarak kullanmışlardır. Bu tekniklerin kullanımıyla işlem zinciri ve parça kalitesinin optimizasyonu ve iyileştirilmesiyle, işlem geliştirme için harcanan çaba ve maliyet azaltılmıştır [6]. Geliştirilen ürün geliştirme çevrimi Şekil 2.21 'de verilmiştir.



Şekil 2.21. Sıvı basıncıyla şekillendirilen parçalar için karakteristik ürün geliştirme çevrimi [6].

Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sac metallerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemleri için elasto-plastik sonlu eleman yöntemi programının geliştirildiği, bu simülasyon programının STAMP3D adıyla ticari olarak yaygınlaşmış paket program içerisinde uygulandığı çalışmaların literatürde yer aldığı görülmektedir. Hama ve arkadaşları, geliştirmiş oldukları elastoplastik sonlu elemanlar yöntemi ile eliptik parçaların sıvı basıncı ile şekillendirilmesini simüle etmişlerdir. Simülasyon programından elde edilen sonuçlarla deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları kıyaslayarak sıvı basıncıyla şekillendirmenin geleneksel şekillendirmeye nazaran özellikle eliptik şekilli parçalarda daha iyi sonuçlar verdiğini kanıtlamıştır [64]. Şekil 2.22'de analiz için model tanımlanması ve deneysel çalışma sonucu çıkan ürünlere ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 2.22. Sonlu elemanlarla analiz için model tanımlanması ve deneysel çalışma sonucu elde edilen ürün [64].

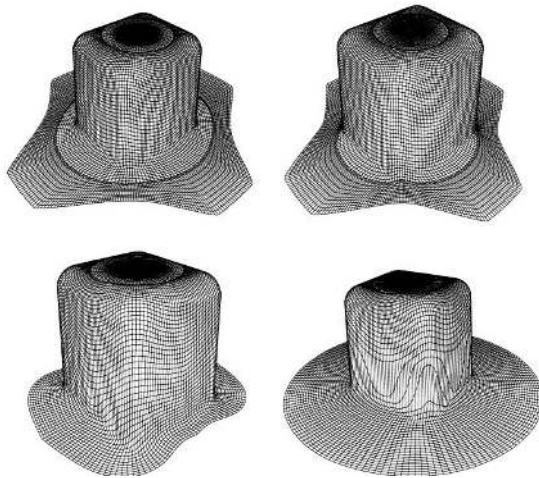
Sonlu elemanlarla analiz yöntemleri sıvı basıncı ile şekillendirme işlemleri için çoğunlukla yol gösterici olmuştur. SBŞ işlemlerinde etkili olan parametreler çok farklı olmaktadır ve bu parametrelere zimba ve kalıp profili, kalıp içi basıncı, malzeme özellikleri örnekler olarak verilebilir. Ancak, analizler için seçilen parametre değerlerinin uygun değerler olması işlem süresi açısından önemlidir. Bir parametre için seçilen değer aralığı ne kadar geniş olursa olsun, belirli bir değerden sonra elde edilen sonuçların anlamlı bir fark oluşturmadığı yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur [24]. Anlamsız parametre değerleriyle çalışma, analiz için işlem zamanını uzatmakta ve zaman kaybına yol açmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde, yakıt tankı gibi büyük parçaların şekillendirilmesi çekme ve kaynakla birleştirme gibi geleneksel yöntemlerle yapılmaktadır. Ancak, son zamanlarda bu tür parçaların sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemi kullanılarak tek seferde üretilmesi mümkün olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanılmasıyla, yakıt tankı gibi büyük hacimli parçaların üretimi için geleneksel ve SBŞ ile üretilme durumları karşılaştırılabilmektedir. Kang, v.d.; otomotiv yakıt tankı parçası için sonlu elemanlar analizlerini kullanarak, SBŞ ve geleneksel yöntemlere göre şekillendirilebilirlik analizlerini yapmıştır. Sıvı ile şekillendirme işlemleri sonucunda geleneksel şekillendirme yöntemlerine göre daha düzgün kalınlık ve gerilim dağılımının elde edildiği tespit edilmiştir [66].

Pandya, sonlu elemanlarla analiz yöntemini kullanarak sıvı basıncıyla Alüminyum 2024 sac metal malzemenin şekillendirilmesi ile ortaya çıkan ürünlerdeki ölçü toleranslarında oluşan değişimi tahmin etmiştir. Çalışmasında ayrıca, otomotiv sektöründe birbiri üzerinde, montaj edilerek araç gövdesinin elde edildiği şekillendirilmiş sac metal parçaların üzerlerinde bulunan delik, pot, kenarlama, şişirme vb. unsurların sınırlı boyutsal tolerans değişiminin öneminden hareketle, yapay sinir ağlarına dayalı tahmin metodunu önermiştir [67].

Palaniswamy, DP600, AKDQ, BH210 ve A5182-O türü sac metal malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirme işlemleri için ideal işlem parametrelerinin belirlenmesinde sayısal optimizasyon tekniklerinden de faydalanarak sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. İdeal sac şeklini ve baskı yastığı kuvvetinin belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemi dikkate alınmış, dolayısıyla hatasız ürün sürecinde deneme yanılma için harcanan zaman, üretim maliyetleri ve fire oranı azaltılmıştır [68].

Zhang ve arkadaşları, altıgen ve dairesel şekilli olmak üzere değişik ölçüde sacların hidromekanik derin çekme yöntemini kullanarak açılı dikdörtgen kutuların şekillendirilebilirliğinin simülasyonunu çalışmışlardır. Simülasyonlar sayesinde, kırışıklık oluşumu, incelme gibi hata tiplerini tahmin etmişlerdir. Simülasyonlardan elde edilen şekillendirilmiş örnek profiller Şekil 2.23’de verilmiştir [69].



Şekil 2.23. Farklı geometriler için simülasyon görüntüleri [69].

Farklı akışkan basıncı ve çekme kuvveti değerlerinin sac malzemedeki uzama ve gerilme dağılımına etkileri, ürün üzerindeki et kalınlığının değişimi ve çekilen sac metalin boyutsal değişimi gibi işlem parametrelerinin ve etkilerinin incelendiği çalışmalarda optimum tasarım kriterlerini elde etmek için Taguchi yönteminin etkin olarak kullanıldığı görülmektedir [72-73].

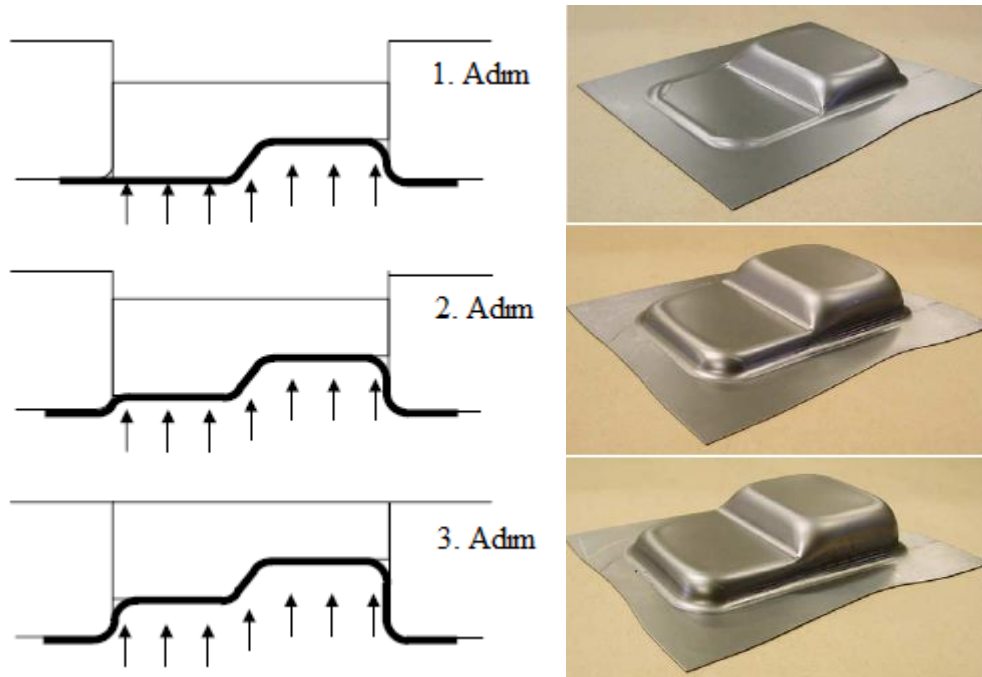
Uygun olmayan malzeme parametrelerinin sonlu elemanlarla analiz yöntemlerinde girdi olarak verilmesi nedeniyle ideal şekillendirme parametrelerinin belirlenmesi zor ve zaman alıcı olmaktadır. Lang ve arkadaşları, SBŞ için simülasyon ortamında ters modelleme kullanarak doğru malzeme özelliklerini ve bazı önemli işlem parametrelerini (takım boyutları ve ön şişirme durumu) optimize etmişlerdir. Optimize edilen bu parametre değerlerine bağlı olarak, sacların sıvıyla şekillendirme işlemlerinin daha yüksek tamlıkla analiz edilebildiği görülmüştür [74-75].

Sayısal modelleme yöntemleri kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarının sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde ne derece etkili bir şekilde başarılı olduğu birçok deneysel doğrulama çalışmalarıyla da kanıtlanmıştır [76-87]. Gerçek uygulamalarda bu tür çalışmalar yeni ürünlerin üretiminde kullanılan mühendislik adımlarını kısaltması nedeniyle, zaman konusunda kullanıcılara ciddi anlamda tasarruflar sağlamaktadır [88].

Kompleks şekilli parçaların yüksek yapısal dayanımı nedeniyle; sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde, SBŞ yöntemi tercih edilir olmuştur. Sıvı basıncıyla şekillendirme yönteminin ana avantajı, malzeme üzerinde tüm bölge üzerinde eşit deformasyonun oluşmasıdır. Karmaşık şekilli geometriye sahip ürünler ve parabolik parçaların sıvı basıncıyla şekillendirilmesi işlemleri için çok sayıda deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, kırışıklık ve yırtılma kusurlarının oluşumu önceden tahmin edilerek şekillendirilebilirlik arttırılmıştır [83, 85].

Kompleks şekilli parçaların sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde farklı bir yöntem olarak, tek seferde şekillendirme yerine birkaç adımda şekillendirme

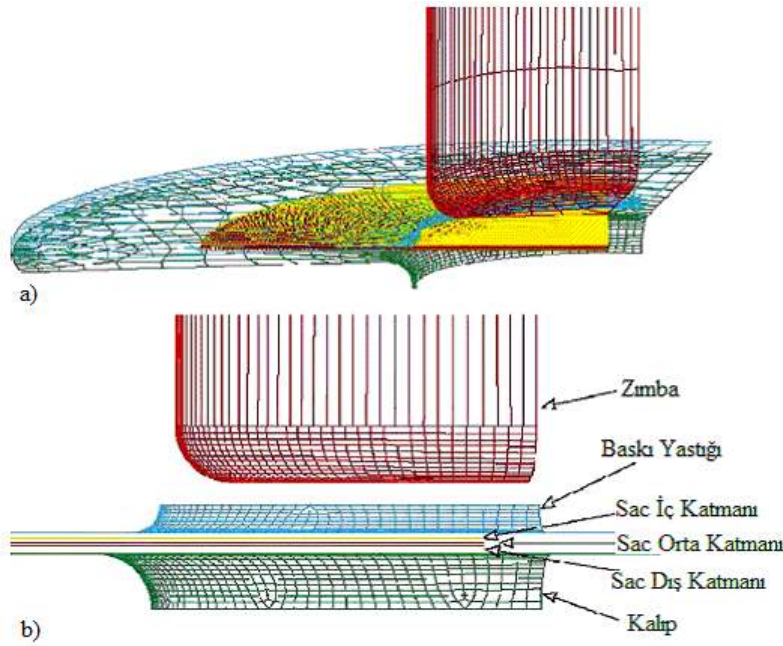
yapılarak, şekillendirilebilirlik oranının arttırılabildiği deneysel çalışmalar ve sayısal simülasyonlar kullanılarak kanıtlanmıştır. Kim, v.d., karmaşık şekilli geometrileri sıvı basıncıyla çok adımlı bir şekilde şekillendirmeyi başarmışlardır. Her bir adımda ideal şekillendirmeyi sağlamak için şekillendirme boyuna göre farklı basınç uygulamışlardır. Geliştirilen yöntemin uygulanmasıyla kare şekilli geometri ve tava parçaları daha eşit bir kalınlık dağılımı elde edilerek çekilebilmiştir Şekil 2.24’de çok adımlı sıvı ile şekillendirme işlemi şematik görüntüsü ve her bir adımda üretilmiş parça görüntüsü verilmiştir [76].



Şekil 2.24. Çok adımlı sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi ve her bir adımda üretilmiş parça görüntüsü [76].

Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde etkili olan parametreleri dikkate alarak ideal şekillendirme şartlarını tespit etmek için yeni analiz teknikleri geliştirilmiştir. Lang v.d., sıvı basıncıyla şekillendirme işleminde kullanılan sac malzemeyi; dış, orta ve iç katman olarak üç bölgeye ayrılmış ve her katmandaki şekillendirme işlemleri deneysel ve sayısal modelleme yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, sac malzemedeki meydana gelen incelmelerin en çok orta katmanda olduğu gözlemlenmiş olup, dış ve iç katmanlar ile orta katmanın şekillendirilebilirliği

kontrol edilebilmiştir. Orta katmanın şekillendirilebilirliğinin geliştirilmesiyle sac malzemede meydana gelen buruşma ve yırtılma engellenebilmiştir. Şekil 2.25’de sayısal simülasyon için oluşturulan model görüntüsü verilmiştir [79].



Şekil 2.25. Sayısal simülasyon analizi için model oluşumu görüntüsü [79].

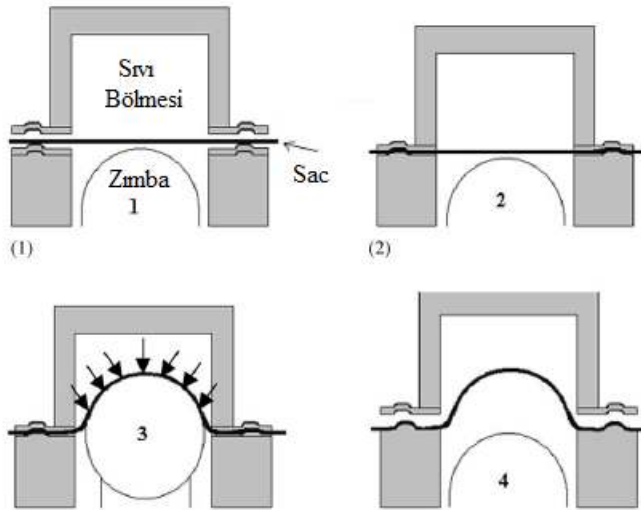
a) Örgü yapı, b) Kesit görüntüsü.

Sac metallerin sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde şekillendirilebilirliklerini daha da arttırmak için sayısal modelleme ve deneysel araştırma çalışmaları yapılmıştır. Palumbo ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada, özellikle büyük çaptaki parçaların çekilebilmesi için deformasyon dayanımını azaltmak için plastik film kullanılmıştır. Bu durumun çekilebilirlik üzerinde önemli katkıda bulunduğu, deneysel çalışmalar ve ABAQUS programının kullanımı ile yapılan sayısal analizlerle doğrulanmıştır [78].

Diğer sayısal simülasyon çalışmalarından farklı olarak, Önder ve Tekkaya, ideal derin çekme işlemini belirlemek için farklı kesitli iş parçaları kullanılarak geleneksel, yüksek basınçlı ve hidromekanik derin çekme yöntemlerini sayısal simülasyon yöntemlerini kullanarak karşılaştırılmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda,

hidromekanik derin çekme yönteminin karmaşık şekilli parçaların üretimini kolaylaştırdığı ve 2,25'in üzerindeki çekme oranına sahip ürünler için kullanılabileceği belirlenmiştir. Sac malzemelerde en az incelmenin diğer işlemlere göre hidromekanik derin çekme işlemlerde elde edildiği tespit edilmiştir [77].

Sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerindeki şekil verme konusundaki yeni fikirleri araştırmak için sayısal modellemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirlik limitlerini arttırmak için basınçlandırılmış akışkanın ezerek şekillendirme işlemlerinde de kullanılmaya başlandığı tespit edilmiştir [80, 82]. Yöntem, şekil verme esnasında sac malzemenin dış tarafından basınçlı akışkanın bir yastık gibi desteklenerek kullanılmasından oluşmaktadır. Sac malzemenin iç tarafından kalıp ile dış tarafından da akışkan desteği ile sıkıştırma gerilimine tabi tutulmasıyla yırtılma ve buruşmanın gecikmesine neden olmakta ve bu nedenle daha iyi şekil almasını sağlamaktadır. Sayısal modelleme yöntemlerinden faydalanılarak işlemin çok başarılı bir şekilde simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.26'da yöntemin aşamaları verilmiştir.

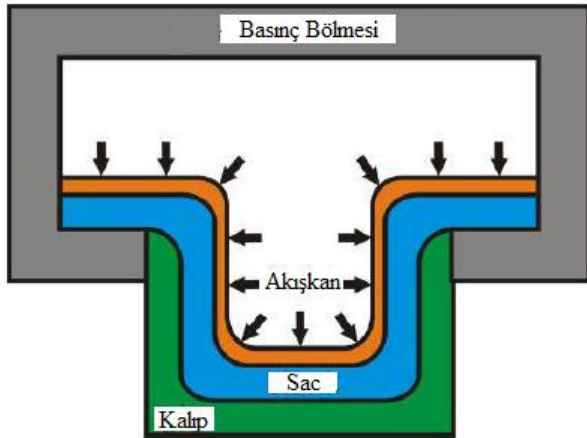


Şekil 2.26. Sıvı basıncı ile ezerek şekillendirme yöntemi [80].

1. Aşama: Sistemin hazırlanması,
2. Aşama: Haznenin sıvı ile doldurulması.
3. Aşama: Zimbanın hareketi ve sıvı basıncının kontrolü,
4. Aşama: İşlemin tamamlanması

Birçok sayısal model, sonlu elemanlarla analiz yöntemi ile çözüm yapan programlarda kullanılabilir. Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinden birisi olan sıvı basıncı ile şişirme yöntemi de günümüzde otomotiv ve imalat endüstrisinde çok geniş uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Gerek otomotiv gövde parçalarının, gerekse alüminyum alaşımları ve ince sacların sıvı ile şişirerek şekillendirme işlemlerinde etkili olan ideal şekillendirme parametrelerinin belirlenmesi çok sayıda araştırmaya konu olmuştur [10, 81, 86, 89].

Diyafram ve sıvı basıncının kombinasyonu olarak yapılan bu tür şekillendirme işlemleri, esnek şekillendirme (flexform) olarak adlandırılmıştır. Hatipoğlu, sac metal malzemelerin flexform işlemini deneysel ve sayısal olarak incelemiş ve bükme işleminin simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Sayısal yöntem sonucu ile simülasyonun sonuçlarını karşılaştırarak şekillendirme parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. İncelenen yöntemin Şekil 2.27’de görüntüsü verilmiştir [41].



Şekil 2.27. Sıvı basıncı ve diyafram ile esnek şekillendirme yöntemi [41].

2.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Literatürde yapılan araştırmalar, akademik düzeyde sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinin birçok ülkede çok sayıda araştırmacı tarafından başarılı bir şekilde araştırılmakta olduğunu göstermiştir. Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemleri, özellikle otomotiv endüstrisi başta olmak üzere uzay ve havacılık, beyaz eşya,

savunma sanayi, sac metal kalıpcılığı gibi farklı sektörlerde ve bazı özel parçaların da üretiminde başarılı bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Araştırmalarda teorik yaklaşımların yanında, çalışmaya has ve yaygın kullanılan sıvı basıncıyla şekillendirme deney donanımlarının geliştirilmesine paralel olarak konu ile ilgili yapılan bilimsel araştırmalar ve deneysel çalışmaların arttığı tespit edilmiştir.

SBŞ yönteminin uygulanmasında, sürtünme, açınım sacın çapı, kalınlığı ve malzemesi, baskı plakası kuvveti, çalışılan akışkanın basıncı, iş parçası geometrisi, kalıp içerisindeki başlangıç şişirme basıncı, kalıp içindeki en yüksek basınç ve zımba-kalıp arası yağ boşluğu güçlü bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kullanılıyor ise diyafram malzemesi, diyafram et kalınlığı, diyafram içindeki basınç gibi işlem parametrelerinin de işlemden güçlü bir etkiye sahip olduğu literatürden belirlenmiştir.

Sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemini analiz etmek için çok sayıda sayısal çözümleme programlarının başarılı bir şekilde kullanıldığı görülmüştür. Bu programlar başlıca, Ansys LS-Dyna, MSC Marc Mentat, Pam-Stamp, Abaqus, Indeed, AutoForm ve Dyna Form yazılımları olarak tespit edilmiştir. Ayrıca matematiksel modellemeleri de simülasyon programları içerisinde tanımlayarak işlemi analiz etmek için kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, işlem esnasında oluşan gerilmeler, çekme parametrelerinin etkileri ve et kalınlığındaki değişimler araştırılmıştır.

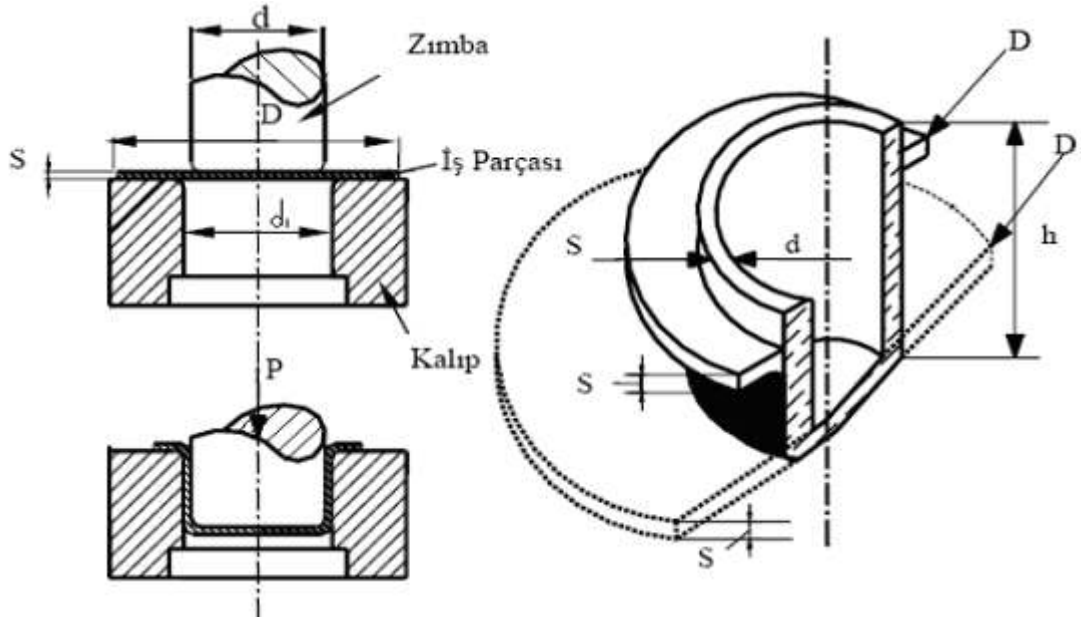
Literatür araştırmalarında; sıvı basıncı ile şekil verme işleminde yapılan çalışmaların, parametrelerinin sınırlı olduğu ve işlemi genel olarak iyileştirmeye yönelik kapsamı dar tutulan çalışmaların yapıldığı veya çoğunlukla endüstriyel bir problemi çözümlemeye yönelik olarak uygulamalarla desteklendiği tespit edilmiştir.

Literatürde yapılmış olan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, sıvı basıncıyla şekillendirme işleminde etkili olan parametrelerin, tasarımı ve imalatı bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen elektro-hidromekanik derin çekme deney donanımı, kalıpları aracılığıyla farklı geometri ve malzeme türleri için bir bütün olarak incelenmesi yapılmıştır.

3. KAVRAMSAL BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER

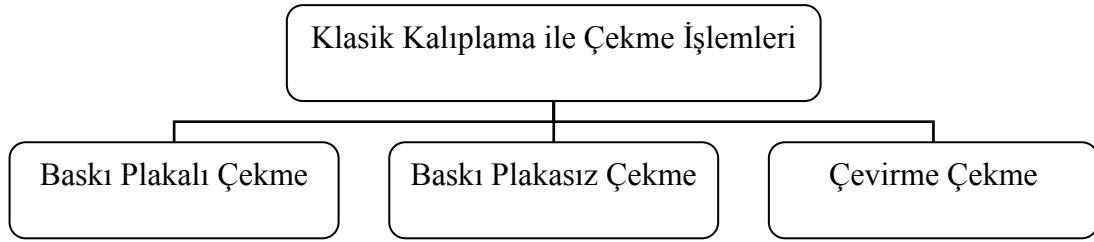
3.1. Klasik Kalıplama Yöntemi İle Çekme İşlemleri

Düz plakaların kalıplar aracılığıyla ve pres altında çökertilerek belirli derinlik ve profillerde kap şekline sokulması işlemine “çekme” ismi verilmektedir. Derinliği fazla olan kaplar birkaç çekme işlemi ile elde edilir. Birkaç işlemle yapılan çekme “derin çekme” olarak isimlendirilmektedir [90-93]. Şekil 3.1’de çekme işleminin oluşumunun şematik ve perspektif görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1. Çekme işleminin oluşumunun şematik ve perspektif görüntüsü [90, 91].

Klasik kalıplama yöntemiyle çekme işlemleri, çekilecek parçanın şekline, ölçülerine ve malzeme türüne bağlı olarak çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Klasik kalıplama ile çekme işlemleri; baskı plakalı çekme, baskı plakasız çekme ve çevirme çekme olmak üzere temelde üç ana gruba ayrılmıştır. Şekil 3.2’de klasik kalıplama ile çekme işlemlerinin sınıflandırılmış görüntüsü verilmiştir.

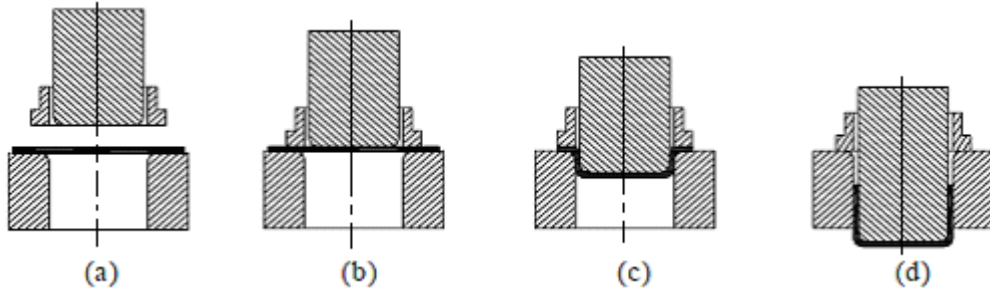


Şekil 3.2. Klasik kalıplama ile çekme işlemlerinin sınıflandırılması [90, 91].

Klasik kalıplama yöntemiyle çekme işlemi konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, çekme işleminin deneysel ve teorik olarak incelendiği çok sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Temel olarak, daha iyi çekme oranı elde etmek ve farklı geometrilerin çekme ile şekillendirilebilirliğini sağlamak amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için, baskı yastığı plakası kuvveti ve şekli, zımba profili, kalıp boşluğu, çekme kuvveti, zımba kavis ve malzemenin etkisi gibi değişkenlerin, çekme yüksekliği, kırışıklık oluşumu ve et kalınlığı değişimine etkileri incelenmiştir [94-102].

3.1.1. Baskı plakalı çekme işlemi

Sac malzeme kalınlığının az olduğu veya çekme yüksekliğinin büyük olduğu durumlarda kırışıklıkları önlemek amacıyla baskı plakasının kullanıldığı çekme işlemidir. Baskı plakası çekme işlemi esnasında sac malzemenin akmasını sınırlamakta ve kontrol etmektedir. Bunun sonucu olarak da kırışıklık oluşumu engellenmektedir. Bu tür çekme kalıbı; baskı plakası, çekme halkası ve çekme zımbasından oluşmaktadır. Şekil 3.3'te baskı plakalı çekme işleminin oluşum aşamaları verilmiştir [90, 91, 93].

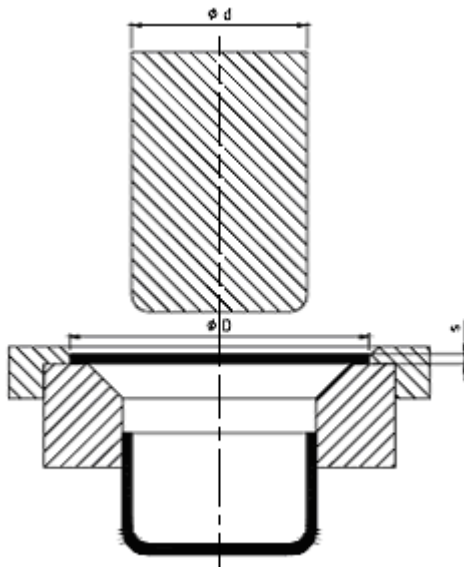


Şekil 3.3. Baskı plakalı çekme işleminin oluşumu [90, 91].

- a) Sac malzemenin yerleştirilmesi, b) Baskı kuvvetinin uygulanması,
c) Çekme işleminin başlangıcı, d) Çekme işlemi sonu,

3.1.2. Baskı plakasız çekme işlemi

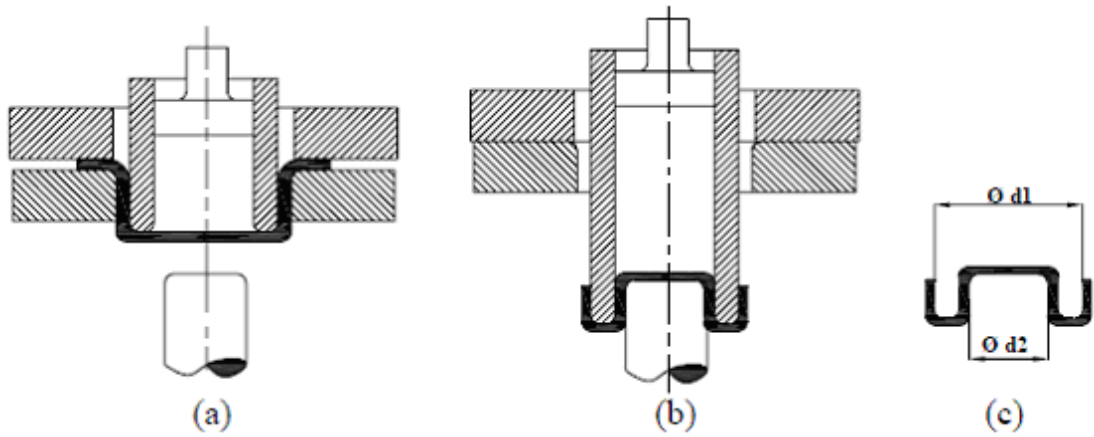
Kalınlığı fazla olan sacların ($t > 4\text{mm}$) derin olmayan çekme işlemleri için kullanılan bir çekme yöntemidir. Çekme işlemi esnasında derinlik az olduğu için sac malzemede kırışma oluşmamaktadır. Çekme kalıbı, bir çekme zımbası ve kalıptan oluşmaktadır. Çekme işlemi, pres koçuna bağlı zımbanın sac malzemeye baskı uygulayarak kalıp içerisine itmesinden oluşmaktadır [90, 91, 93]. Şekil 3.4’de baskı plakasız çekme işlemi görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.4. Baskı plakasız çekme işlemi [90, 91, 93].

3.1.3. Çevirme çekme işlemi

Çevirme çekme yöntemiyle çekme işleminde, bir pres kursu ile iki çekme operasyonu birlikte yapılabilir. Çevirme çekme yönteminde iki adet çekme zımbası bulunmaktadır. Parça çapını veren zımba kalıbın alt tarafında ve sabit konumdadır. İlk çekme çapını verecek olan zımba ise pres başlığına (koçuna) bağlanmıştır. Üst konumdaki zımba, ilk çekme işlemini yaptıktan sonra ilk zımbanın aşağıya inmesiyle alt zımba devreye girerek parçayı ikinci kez çeker. Çevirme çekme yöntemi özellikle küresel, konik ve parabolik parçaların imalatı için uygundur [90, 91]. Çevirme çekme işleminin oluşumu Şekil 3.5'te verilmiştir.



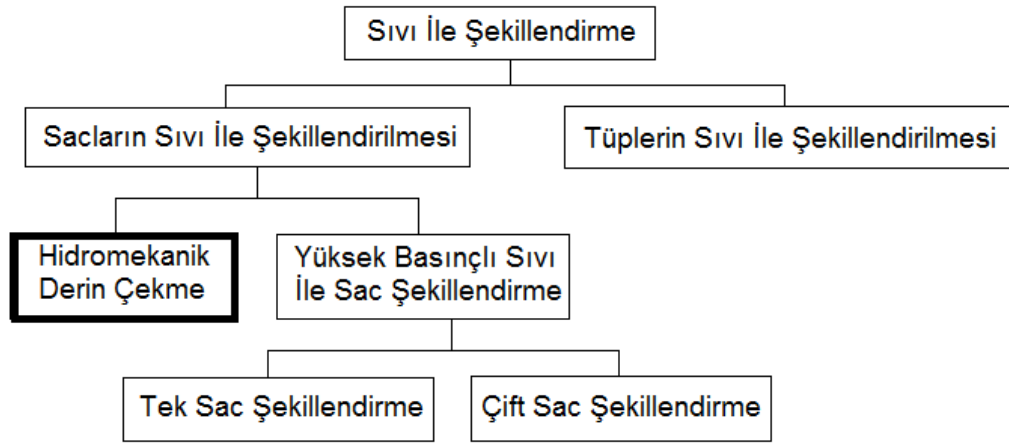
Şekil 3.5. Çevirme çekme işleminin oluşumu [90, 91].

a) Çekme, b) Çevirme çekme, c) Ürünün elde edilmesi

3.2. Sıvı Basıncı ile Şekillendirme İşlemleri

Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemi, istenilen bir şeklin içerisine konulan bir malzemenin (sac veya boru) deformasyonuna yardımcı olmak için ve/veya plastik deformasyon için katı takım (zımba, kalıp, maça vb.) yerine basınçlandırılmış sıvının kullanıldığı bir malzeme şekillendirme işlemidir [103].

Sıvı ile şekillendirme yöntemi, genel olarak sacların sıvı ile şekillendirilmesi ve boruların sıvı ile şekillendirilmesi olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılmıştır [4, 103-106]. Bu sınıflandırma şeması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri [103].

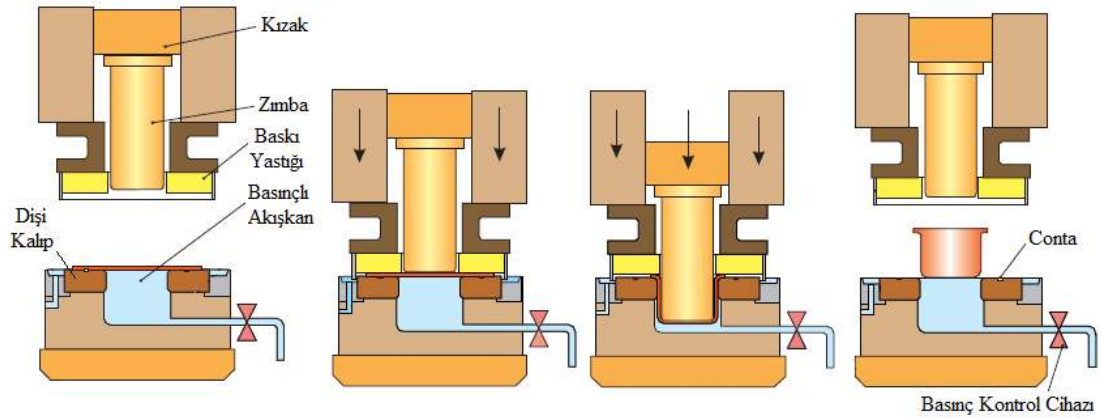
3.2.1. Sac malzemelerin sıvı basıncıyla şekillendirilmesi

Sıvı basıncı ile sac malzemelerin şekillendirmesi işlemlerinde, çok farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler başlıca, hidromekanik derin çekme, hidrodinamik derin çekme, viskoz basıncılı sac şekillendirme, çift sacların şekillendirilmesi, sıvı yardımıyla sac tutuculu derin çekme, hidrolik şekillendirme ve klasik kalıplama ile şekillendirme kombinasyonu, diyaframlı hidrolik şekillendirme, hidrolik gerdirmе çekme vb. olarak ifade edilmektedir [103, 105, 107].

Hidromekanik derin çekme yöntemi

Sıvı basıncıyla şekillendirme teknolojisinin bir alt işlemi olan hidromekanik derin çekme işlemi, sıvı basıncıyla şekillendirme ve konvansiyonel derin çekme yöntemlerinin özelliklerinin karışımı olan bir kalıplama yöntemidir.

Bu yöntemde, saca şekli vermek için, şekillendirme zımbası kontrollü olarak yüksek basınçlı sıvı bir akışkan kütleye doğru hareket eder. Çekme zımbasının sıvı dolu hazneye girmeye başlamasıyla akışkanın basıncı artmaya başlar. Deformasyon esnasında sac malzeme çekme zımbasına doğru preslenmektedir. Çekme zımbasının basınçlı akışkan içerisine girerek aktifleştirdiği basıncın çok yönlü etkisi vardır. Basıncın etkisiyle sac malzeme zımbayı çepeçevre sarmaya zorlanmaktadır. Zorlanmadan dolayı zimba ile sac arasındaki sürtünme giderek artmaktadır. Bu nedenle kalıp içerisinde oluşan basıncın etkisiyle çekme kuvvetleri klasik derin çekme işleminde oluşan kuvvet den daha yüksek bir seviyeye çıkartabilmektedir [108, 109]. Şekil 3.7’de hidromekanik derin çekme işleminin safhaları verilmiştir.



Şekil 3.7. Hidromekanik derin çekme işlemi [109].

Hidromekanik derin çekme işleminin avantajları [5, 108].

- Mümkün olan çekme oranı konvansiyonel çekme yöntemlerinden daha iyidir. Örneğin çekme oranı $\beta = 2,4$ 'e kadar mümkün olmaktadır (Malzeme: ST 13). Bu oran, klasik çekme işlemlerinde maksimum 2.2'dir.
- Klasik çekme yöntemleri ile 4-5 çekme operasyonu ile elde edilen ürünlerden olan konik ve parabolik çekilmiş parçalar tek çekmede üretilebilmektedir.
- Sac kalınlığında azalma dip kavislerinde çok düşüktür, bu durumdan dolayı çok küçük dip kavisleri bile etkili olarak çekilebilmektedir.

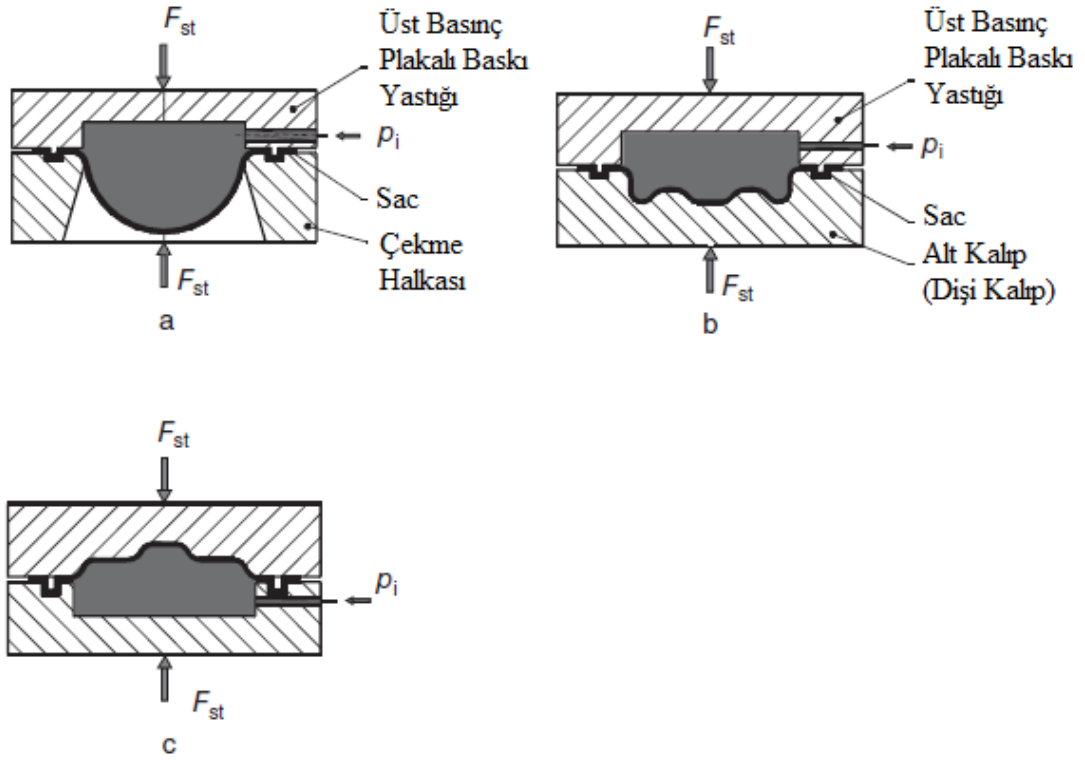
- Aynı takımlar ile farklı malzeme türleri ve sacın değişken kalınlıkları işleme tabi tutulabilmektedir.
- Takım kurulum ve değiştirme işlemlerinin çabuk ve kolay olmasından dolayı işlem basitleştirilmekte ve düşük takım maliyetleri ve daha az çekme adımları nedeni ile üretim maliyetleri geleneksel derin çekme işlemlerinden daha düşük olmaktadır.
- Karmaşık geometrili parçalar şekillendirilebilmekte, sıkı toleranslar korunabilmekte ve muhafaza edilebilmektedir.
- Yalnızca sabit bir takım veya kalıp kullanıldığından dolayı; parça, takım ve işçilik maliyetleri azaltılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında, sıvı basıncıyla şekillendirme yöntemlerinden hidromekanik derin çekme yöntemi seçilmiş ve çalışılmalar bu yöneme göre yapılmıştır.

Hidrolik gerdirmeye çekme yöntemi

Hidrolik gerdirmeye çekme yönteminde, sac malzeme bir kalıpta sıkıca kilitlenmekte ve alt kalıp veya üst kalıbın kalıp boşluğu dışında veya çekme halkası girişi boyunca sızdırmazlık sağlanarak hidrolik basınç yardımıyla şekillendirme sağlanmaktadır [103]. Şekil 3.8’de hidrolik gerdirmeye ile çekme işleminin görüntüsü verilmiştir.

Hidrolik gerdirmeye ile çekme işleminde, baskı yastığının basıncı çok yüksek olduğundan dolayı sac kulaklarının kalıp içerisine akmasına izin verilmemektedir [104]. İşlemden elde edilen çekme derinliği, kullanılan malzemenin şekillendirilebilirlik özelliklerine bağlıdır [107]. Bu yöntemde, malzemenin en büyük uzama miktarı kadar şekillendirme yapılabilmektedir.

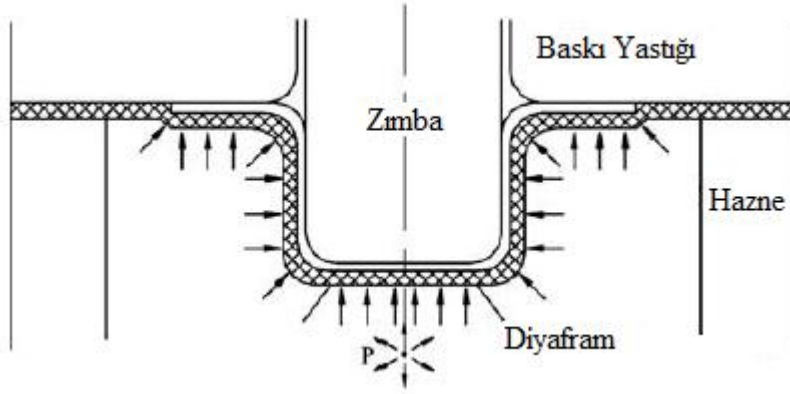


Şekil 3.8. Hidrolik gerdirme çekme işlemleri [103].

- a) Şişirme testi, b) Sabit alt kalıp ile şekillendirme,
c) Sabit üst kalıp ile şekillendirme

Diyafram ile hidrolik şekillendirme yöntemi

Diyafram ile hidrolik şekillendirme işlemlerinde, sıvı dolu hazne elastik diyafram ile kapatılmıştır. Diyafram yüzeyi, baskı yastığı olarak davranmaktadır. Şekillendirme zımbasının basınçlı alana girmesiyle şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Yöntemin avantajları, az sayıda parçaların düşük maliyetli üretimi için uygun olması, daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesi ve daha karmaşık şekilli parçaların üretimi için ideal bir şekillendirme yöntemi olmasıdır [107, 110]. Şekil 3.9'da yöntemin görüntüsü verilmiştir.



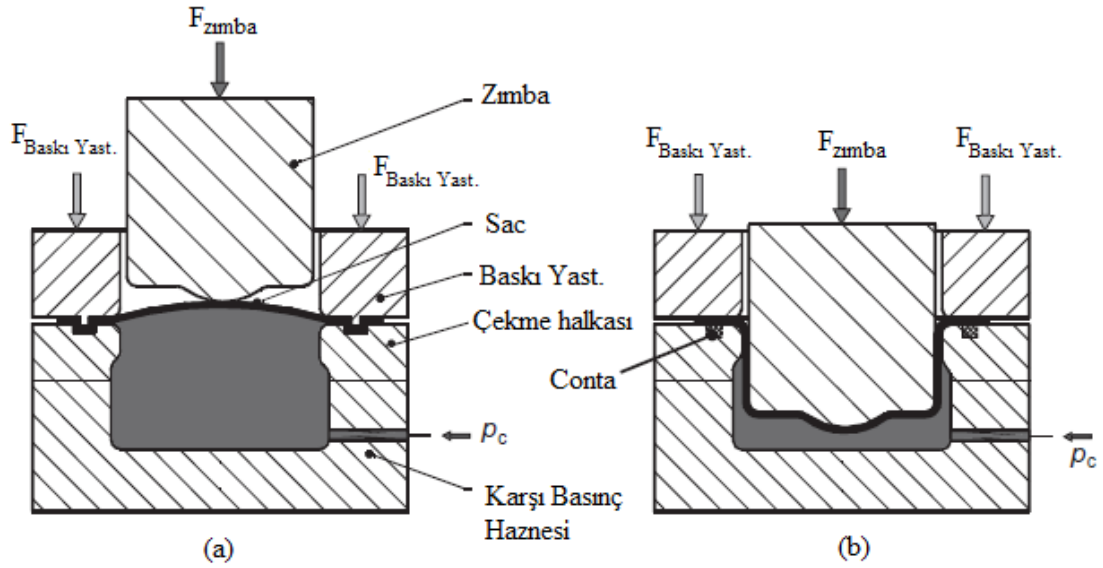
Şekil 3.9. Diyafram ile hidrolik şekillendirme yöntemi [110].

Hidromekanik derin çekme ve hidrolik gerdirme çekme bileşimi

Hidromekanik derin çekme ve hidrolik gerdirme çekme işlemlerinin her ikisinin de birlikte kullanıldığı bir şekillendirme işlemidir. Bu yöntemlerin birleşimi ile elde edilen şekillendirme işlemi, ön şişirmeli hidromekanik derin çekme ve aktif hidromekanik olarak ta isimlendirilmektedir [103].

Sac malzeme gerdirme işleminde, parça yüzey alanında eşit dağılımlı uzamalar meydana gelmektedir, bu durum çalışma sertleşmesini arttırmakta ve çekme dayanımını iyileştirmektedir. Çekme işleminde karmaşık şekilli parçaların şekillendirilmesi işlemi yapılmaktadır [107].

Bu yöntem çoğunlukla; daha rijit ve şiddetli darbe dayanımı gerektiren kaporta parçaları ve çatılar gibi düz otomotiv gövde parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 3.10 'da yöntemin uygulanma görüntüsü verilmiştir.



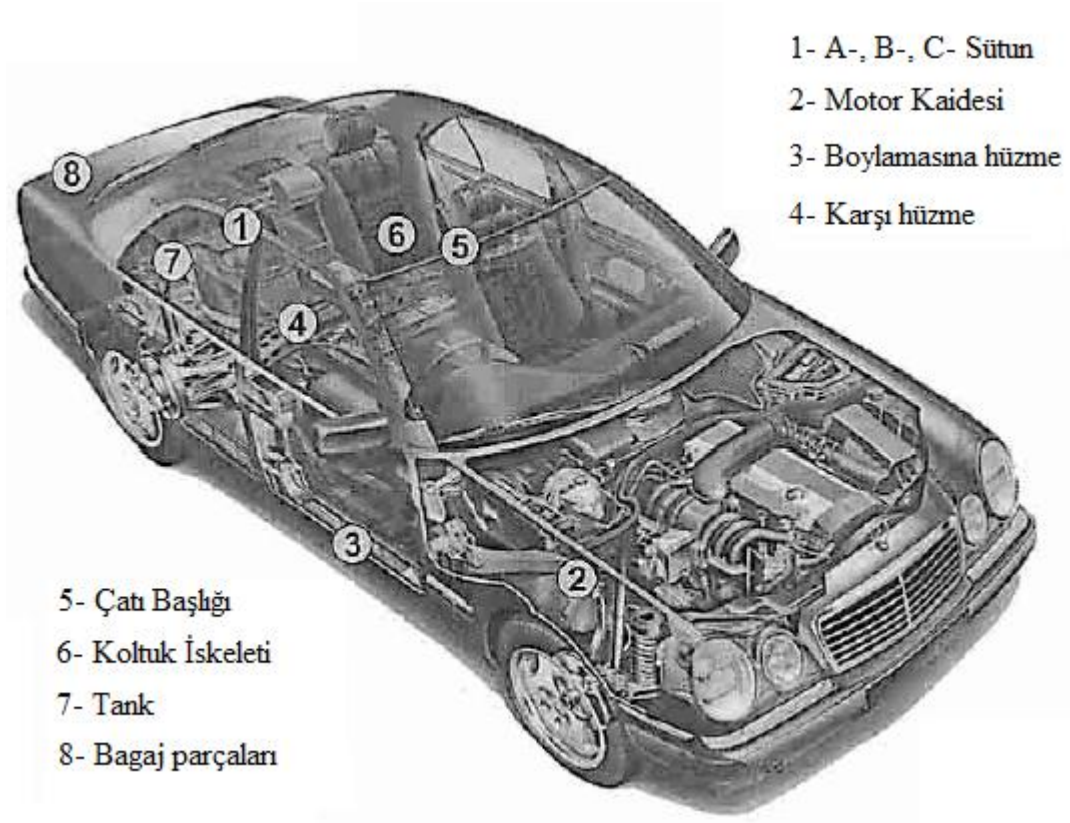
Şekil 3.10. Hidromekanik derin çekme ve hidrolik gerdirmeye çekme bileşimi [103].
a) Hidrolik gerdirmeye çekme işlemi, b) Hidromekanik derin çekme işlemi

Sac metal çiftlerinin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi

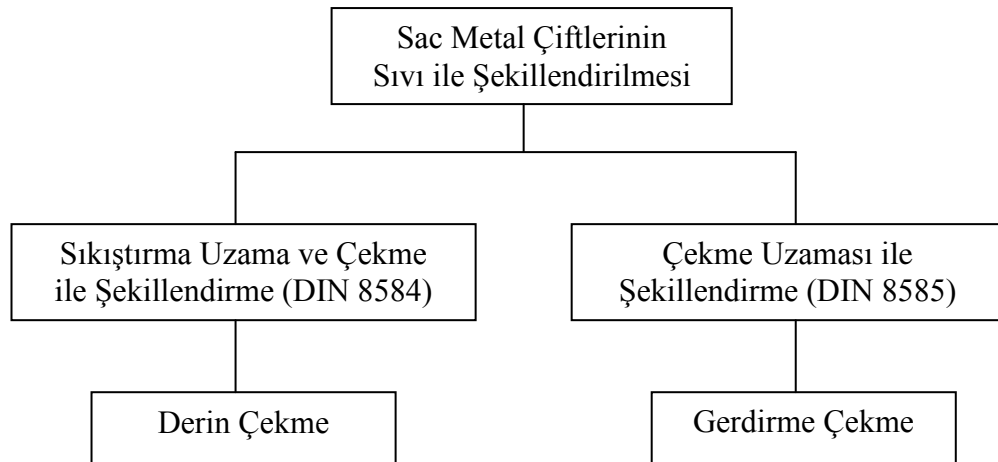
Sac metal çiftlerinin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemi, kabuk gövdeli parçaların üretimi için kullanılan bir yöntemdir [111]. Bu yöntem, yastık şekillendirme veya paralel plakalı sıvı ile şekillendirme olarak da isimlendirilmektedir. Çevresel olarak kaynaklı iki adet sac alt ve üst kalıp arasında konumlandırılarak, sıvı ile şekil verme işlemi yapılmaktadır [107].

Hidrolik sistem ile sıvı akışkanın, sac çiftinin arasına dolması ve basınçlandırılması ile plastik deformasyon başlamakta, daha sonra sırasıyla kalıp ile sac malzemelerin temas noktasında ilave deformasyonlar oluşmaktadır. Diğer klasik derin çekme işlemleri ile karşılaştırıldığında şekillendirme zımbasının olmaması ve takım maliyetinin azalması dolayısıyla üretim maliyeti de azaltılmaktadır [110].

Sac metal çiftlerinin sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinin otomotiv endüstrisindeki potansiyel uygulamaları Şekil 3.11’de, yöntemin sınıflandırılması ise Şekil 3.12’de verilmiştir.



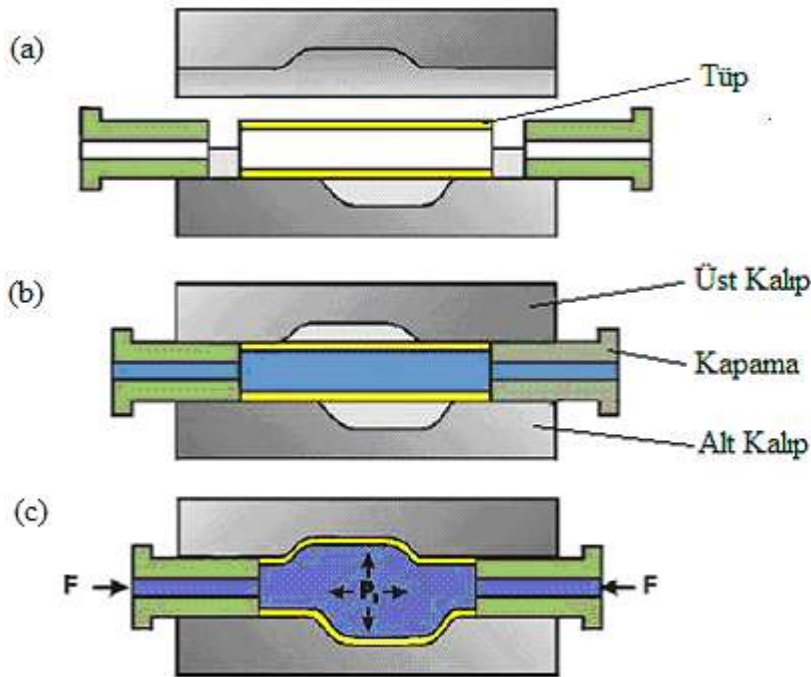
Şekil 3.11. Çift sacların sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinin otomotiv endüstrisindeki potansiyel uygulamaları [111].



Şekil 3.12. Sac metal çiftlerinin sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinin sınıflandırılması [111].

3.2.2. Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi

Tüplerin sıvı basıncıyla şekillendirme işlemi, tüp biçiminde bir parçanın iki kalıp arasına yerleştirilmesi ve sızdırmazlığın sağlanmasından sonra 1200 MPa üzerinde basınçlandırılmış akışkanın enjekte edilerek doldurulması işlemidir. İşlemde öncelikli olarak basıncın etkisiyle boru duvarları kalıp şeklinde deforme edilmekte, daha sonra tam şekli alması için basınç altında bekletilerek (ütüleme) parça nihai ölçüye getirilmektedir [112]. Tüp malzemelerin sıvı ile şekillendirilmesi teknolojisi 1990'ların başında popüler olmuştur [106]. Şekil 3.13'te tüp malzemenin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemi verilmiştir [113].



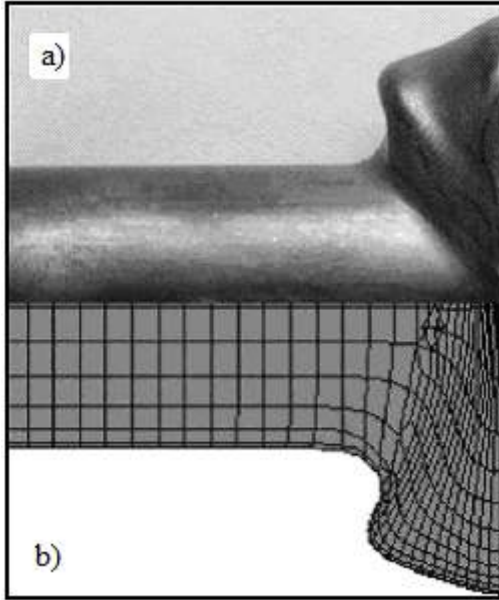
Şekil 3.13. Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemi [113].

- a) Kalıbın kapanması, b) Tüpün sızdırmazlığının sağlanması,
c) Tüpün sıvı basıncı ile şekillendirilmesi işlemi

Tüp malzemelerin sıvı basıncı ile şekillendirilmesi için gerekli olan basınç Eş. 3.1'de verilmiştir [112].

$$p_o = \frac{\sigma_y \cdot t}{r} \quad (3.1)$$

Tüplerin sıvı basıncıyla şekillendirilmesi işlemlerinde; şekillendirilebilirlik parametreleri, işlem limitlerinin belirlenmesi ve yöntemin simülasyonu ile ilgili çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış, analitik modeller geliştirilmiştir [112, 114-116] Şekil 3.14’de X eklem şekli için deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz çalışmasının karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 3.14. X Eklem şeklinin deneysel ve analiz sonuçlarla karşılaştırılması [114].

a) Deneysel, b) Sonlu elemanlarla analiz

Alüminyum gibi ağırlıkça hafif malzemelerin veya yüksek dayanımlı ve alaşımlı çelik sac malzemelerin şekillendirilmesi işlemlerinde klasik metal şekillendirme teknolojileri çoğunlukla sınırlı kalmaktadır. Bu tür malzemelerin aynı teknolojiyle ve aynı donanım ile deformasyonu için geniş güç aralığı gerekmektedir. Bu tür problemler, kontrollü olarak sıcaklığın artırıldığı yöntemler kullanılarak aşılabilmektedir. Tüp malzemelerin şekillendirilmesi işlemlerinde de sıcaklığın kontrollü olarak artırıldığı sıvı ile şekillendirme yöntemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [113, 117].

Yakıt fiyatlarının artması ile birlikte yakıt tüketiminin ve sera gazı salımı oranının azaltılması ihtiyacı araçlarda ağırlık azaltılmasını gerektirmiştir. Geleneksel şekillendirme yöntemleriyle üretilen karmaşık parçaların yerine, sıvı basıncı kullanarak şekillendirme yoluyla üretilen parçalarda bu ihtiyaç karşılanabilmektedir. Tüp malzemelerin sıvı ile şekillendirilmesi işlemi; karmaşık yapıları parçaların üretiminde, bükme, birleştirme teknolojileri ile birlikte bütünleşik olarak başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [106, 118]. Bu teknolojiler otomotiv endüstrisinde; krank mili şekilli boru parça, motor kızıağı, alt iskelet, yakıt tankı ve egzoz sistemleri gibi parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [11, 119, 120].

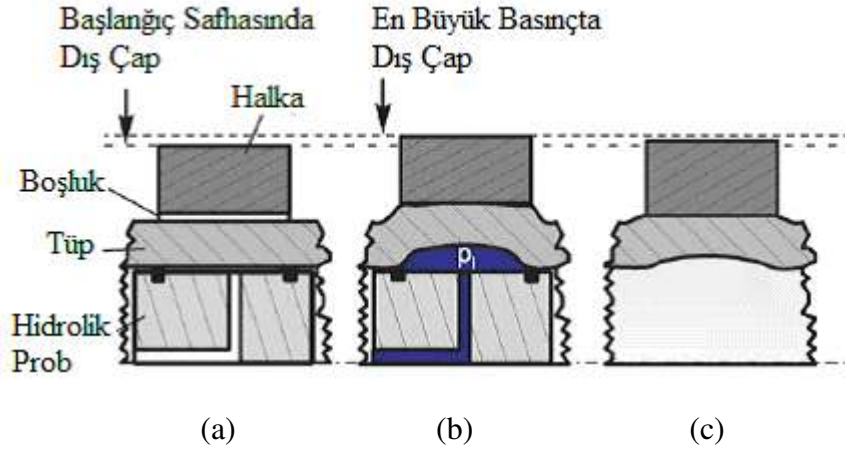
Otomotiv endüstrisinde kullanılan şase gibi çok karmaşık şekilli parçalar, çok aşamalı işlemler ile üretilmektedir. Bu tür üretim yöntemlerinde ilk aşama, tüp parçanın ön bükülmesi diğer aşama ise sıvı ile şekil verilmesi aşamasından oluşmaktadır. Önceden form verilmiş parçaların kullanılmasıyla daha sonraki aşamalarda işlem kolaylaşmaktadır [24, 118]. Tüplerin şekillendirilebilirliğini, yapılan bir ön şekillendirmenin önemli ölçüde azalttığı deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmalarıyla görülmüştür [118].

3.2.3. Sıvı basıncı ile muhtelif şekillendirme yöntemleri

Sıvı basıncı kullanılarak, gerek sac gerekse de diğer malzemelerin şekillendirilmesi için çok sayıda farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri olarak adlandırılmış ve farklı sektörlerdeki ürünler üzerinde başarılı bir şekilde uygulanmışlardır.

Sıvı ile şekillendirme işlemlerinin diğer farklı uygulamaları; su basıncı ile çekme şekillendirme, karşı basınç ile hidrolik derin çekme, hidrodinamik derin çekme, sıcak akışkanlı sıvı ile şekillendirme, membran ile esnek şekillendirme, yüksek iç basınçlı şekillendirme, akışkan destekli baskı yastığı ile sac şekillendirme, akışkan takım kullanarak şekillendirme, hidrolik şişirme (kabukların sıvıyla şekillendirilmesi) ve sıvı ile birleştirme olarak tespit edilmiştir [4, 5, 8, 87, 121, 122].

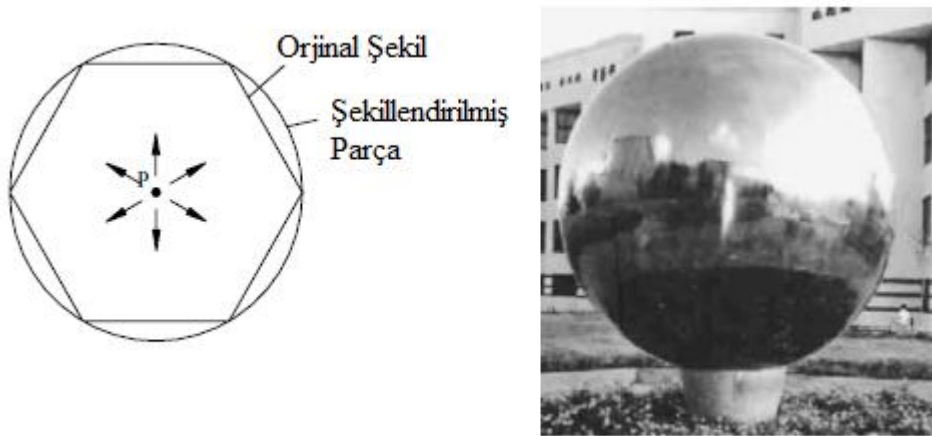
Şekil 3.15'te sıvı basıncıyla çeşitli şekillendirme uygulamalarından olan sıvı ile birleştirme uygulaması verilmiştir.



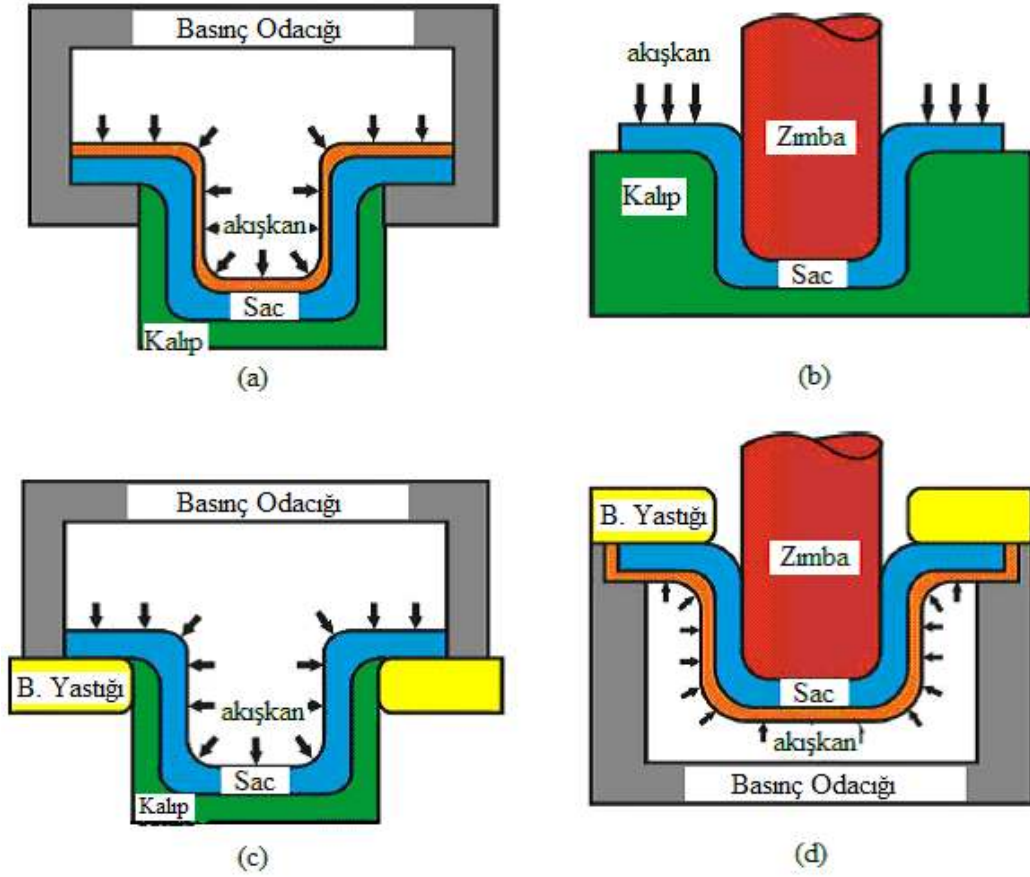
Şekil 3.15. Sıvı basıncı ile birleştirme uygulaması [8].

a) Konumlama, b) basınç ile maksimum genişleme, c) elastik şekil

Şekil 3.16'da hidrolik şişirme yöntemi ve bu yöntemin uygulanması ile elde edilmiş uygulama, Şekil 3.17 'de de değişik sıvı ile şekillendirme yöntemleri bütün olarak verilmiştir.



Şekil 3.16. Hidrolik şişirme (Kabuk yapıların sıvı basıncıyla şekillendirme) yöntemi ve yöntem kullanılarak üretilmiş kap [4]



Şekil 3.17. Sıvı basıncıyla çeşitli şekillendirme yöntemleri [87].

- a) Membran ile esnek şekillendirme, b) Akışkan destekli sac tutuculu derin çekme, c) Yüksek iç basınçlı şekillendirme, d) Membran ile hidromekanik derin çekme

3.3. Çekme Oranı ve İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi

3.3.1. Çekme oranı

Derin çekme işlemlerinde, çekme işlemi için izin verilen deformasyon, çekme oranı ile belirlenmektedir. Çekme oranı,

- Çekilmiş bir parçanın üretilmesi için kaç tane çekme operasyonun gerektiğinin belirlenmesinde,
- Derin çekme çeliklerinin çekilebilirliğinin değerlendirilmesinde,

- Çekme kuvvetini hesaplamak için gerekli olan düzeltme faktörünün (n) belirlenmesinde kullanılmaktadır [108].

Genel olarak çekme oranı, yırtılma ve kırılma olmadan başarılı bir şekilde çekilen en büyük açınım sac çapının (D), zımba çapına (d) oranı olarak tanımlanmıştır. Derin çekme işleminde amaç, mümkün olduğu kadar derin çekilmiş ürün elde etme olarak görülmüştür [92, 109, 123, 124].

Çekme oranı en düşük çekme oranı ve en yüksek çekme oranı olmak üzere iki grupta sınıflandırılmıştır [108]. En düşük çekme oranı (m) Eş. 3.2’de verilmiştir.

$$m = \frac{d}{D} \quad (3.2)$$

En yüksek çekme oranı veya gerçek çekme oranı (β) Eş. 3.3’te verilmiştir [6].

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (3.3)$$

Sıvı basıncıyla şekillendirme işlemlerinde klasik yöntemlere nazaran daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabilir. Çekme oranı, klasik kalıplama ile çekme işlemleri için en büyük 2,2 oranı civarında elde edilebilmektedir [72, 77]. Çizelge 3.1’de klasik kalıplama ve sıvı ile şekillendirme işlemlerinde elde edilebilen çekme oranı limitleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sıvı ile şekillendirme ve klasik kalıplama yöntemleri için çekme oranı limitleri karşılaştırması [72].

Malzeme	Çekme oranı limiti	
	Sıvı ile şekillendirme	Klasik kalıplama
Soğuk haddelenmiş	2,9	2,2
Paslanmaz çelik	3,4	2,3
Alüminyum	2,5	1,8

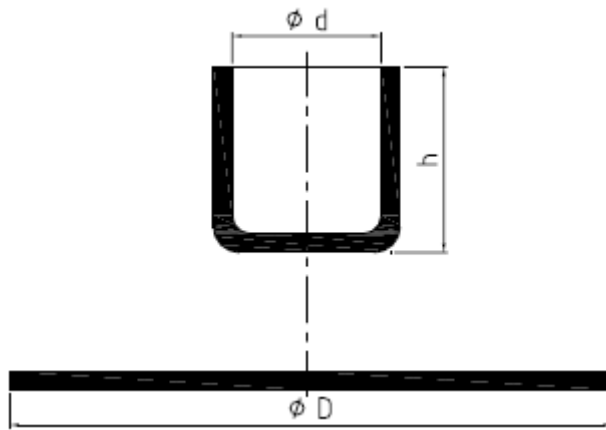
3.3.2. İlkel parça boyutlarının belirlenmesi

Çekme işleminin tasarımına, çekme öncesi parça boyutlarının ve şeklinin belirlenmesiyle başlanmaktadır [90, 91]. Çekme işlemi süresince, sac malzeme eğilme, basılma ve çekilme gerilmelerine uğramaktadır [90, 125]. Her plastik şekil verme işleminde olduğu gibi çekme işleminde de, çekme öncesi parça hacmiyle çekme sonrası parça hacmi eşittir [90, 91, 125].

Silindirik, prizmatik ve karmaşık şekilli parçaların açınım şekillerinin belirlenmesinde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler; alan yöntemi, uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi, çizim (geometrik) veya grafik yöntemi olarak sınıflandırılmıştır [91, 126]. Alan yöntemi, uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır.

Alan yöntemi

Alan yöntemi ile ilkel çapın (açınım çapının) bulunması, açınım çapı ve çekilmiş parça alanlarının eşit olması ilkesine göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.18. Alan metodu ile ilkel çapın bulunması [90, 125].

Şekil 3.18’de verilen parça için çekilecek parça alanı ve çekilen parça alanına ait hesaplama yöntemi Eş. 3.4 ve Eş. 3.5’de verilmiştir.

$$\text{Çekilecek parça alanı} = \frac{\pi.D^2}{4} \quad (3.4)$$

$$\text{Çekilen parça alanı} = \frac{\pi.d^2}{4} + \pi.d.h \quad (3.5)$$

Alanlar eşit olarak kabul edildiğinden dolayı, eşitlik aşağıdaki gibi sadeleştirilerek Eş. 3.6 elde edilmiştir.

$$D = \sqrt{d^2 + 4.d.h} \quad (3.6)$$

Uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi

Uzunluk ve ağırlık merkezi ile çevre bulma yönteminde, çekilen parçanın simetrik kesiti alınmakta ve çekme işlemi yapılan kenarların uzunlukları ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu uzunluklar ve ağırlık merkezlerinin parça eksenine olan uzaklıkları çarpımının toplamı, çekilecek olan parça alanına eşitlenmektedir [90, 125, 126]. Uzunluk ve ağırlık merkezi metodu ile ilkel çapın bulunmasında, Şekil 3.19’da verilen geometri esas alınır, Eş. 3.7, Eş. 3.8, Eş. 3.9 ve Eş. 3.10 aracılığıyla Eş. 3.11’de verildiği gibi ilkel çap elde edilmektedir.

Şekil 3.19’de verilen geometride, $R_1 = R_2$ alınır,

$$l_2 \text{ ve } l_4 \text{ için çevre hesabı} = \frac{\alpha}{360} \cdot 2\pi \cdot R_1 \text{ mm}, \quad (3.7)$$

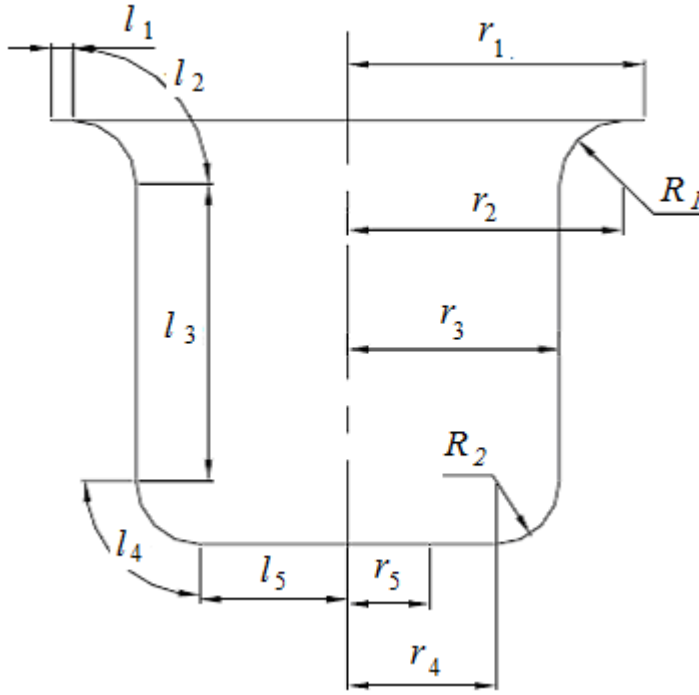
$$\alpha = 90 \text{ derece olduğundan dolayı çevre; } l_2 = \frac{\pi \cdot R_1}{2} \text{ mm}, \quad (3.7)$$

$$\text{İlkel parça alanı} = \frac{\pi.D^2}{4} \text{ mm}^2 \quad (3.9)$$

$$\text{Kap alanı} = 2\pi(r_1.l_1 + r_2.l_2 + r_3.l_3 + r_4.l_4 + r_5.l_5) \text{ mm}^2 \quad (3.10)$$

Bu iki alan birbirine eşitlenirse,

$$\text{İlkel \u00e7ap} = \sqrt{8(r_1 l_1 + r_2 l_2 + r_3 l_3 + r_4 l_4 + r_5 l_5)} \text{ mm} \quad (3.11)$$



Şekil 3.19. Uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi ile ilkel \u00e7apın bulunması [90, 125].

3.4. \u00c7ekme İşlemine Etki Eden Parametreler

Hidromekanik derin \u00e7ekme işlemlerinde \u00e7ekme işlemine etki eden parametreler; \u00e7ekme hızı, kalıp kavis, \u00e7ekme boşluğu, \u00e7ekme kuvveti, bası yastığı kuvveti, kalıp içi basınç, sac malzeme ve kalınlığı olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen bu parametreler detaylı olarak açıklanmıştır.

3.4.1. \u00c7ekme hızı

\u00c7ekme hızı, \u00e7ekilen sac malzemenin fiziksel özelliklerini ve şekil değıştirmesini önemli ölçüde etkilemektedir [90]. Sac malzemeye akması için yeterli zaman verilmelidir aksi takdirde elde edilen ürünler üzerinde \u00e7atlaklar oluşmaktadır [126].

Kranklı preslerde koça bağlı olarak şekillendirme hızı değişkenken, hidrolik preslerde şekillendirme hızı ve kuvveti hidrolik donanımların kontrolü ile sabit bir değerde tutulabilmektedir.

Klasik kalıplama işleminde çekme hızları için kesin kurallar konmamıştır [93, 126]. Ancak ortalama çekme hızlarına yönelik farklı kaynaklardan çeşitli değerler önerilmiştir. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te önerilen ortalama çekme hızları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Klasik kalıplama işlemi için önerilen ortalama çekme hızları-1 [126].

Malzeme	Çekme hızları, mm/s	
	Tek etkili presler	Çift etkili presler
Alüminyum	900	500
Al. Alaşımları	-	150-200
Pirinç	1000	500
Bakır	750	430
Çelik	300	180-250
Paslanmaz çelik	-	100-150

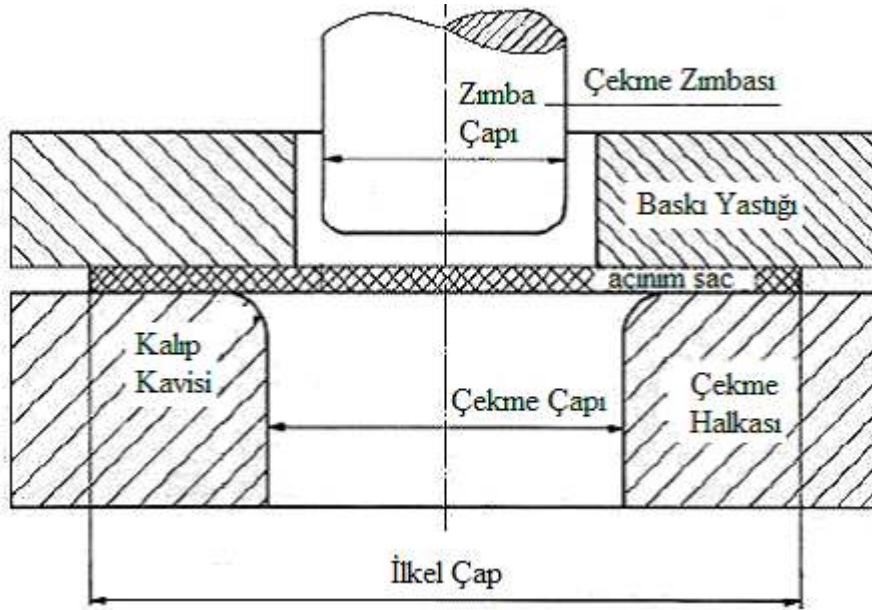
Çizelge 3.3. Klasik kalıplama işlemi için önerilen ortalama çekme hızları-2 [93].

Malzeme	Çekme hızları, mm/s	
	Tek etkili presler	Çift etkili presler
Alüminyum	800-900	500
Sert alüminyum	-	150-200
Pirinç	1000	500
Bakır	600-700	430
Çelik	280-300	180-250
Paslanmaz çelik	-	100-150

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemleri için, çekme hızının düşük olması nedeniyle işlem süresinin uzun olması bir dezavantaj olmaktadır. Çok düşük çekme hızlarında şekillendirme yapılmaktadır [5, 78, 80, 87]. Yapılan incelemelerde sıvı ile şekillendirme işlemleri için çekme hızı değerinin 5-10 mm/s arasında değişim gösterdiği tespit edilmiştir [15, 33, 39, 54, 69, 83].

3.4.2. Kalıp kavis

Çekme işleminin kolay olması ve malzemenin zorlanarak deforme olmasını önlemek için çekme halkasının ağız kısmına kavis yapılmaktadır.



Şekil 3.20. Çekme kalıbı kesit görüntüsü [108, 127].

Çekilen sacın ilk çekmede bir kere bükülüp doğrulduğu, müteakip çekmelerde ise iki kere bükülüp doğrulduğu dikkate alındığında, çekme işleminde sac malzemenin kalıp içerisinde akışını kolaylaştırmak için zımba ve dişi kalıp kavislerinin mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, gereğinden büyük tutulmuş zımba ve dişi kalıp kavislerinde, baskı plakası etki yüzeyi küçüleceğinden, sac malzemenin takım ile temas etmeyen yüzeyi büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır. Çekme kavislerinin çok düşük tutulması durumunda ise, sac malzemenin kalıp içerisinde akışı için gerekli olan temas alanı küçüleceğinden dolayı, takım kesme kalıbı gibi çalışmakta ve malzemenin yırtılması kolaylaşmaktadır [90, 91, 93, 125, 126].

Kalıp kavisinin belirlenmesi için çeşitli eşitlikler geliştirilmiştir. Bu eşitlikler, Eş. 3.12 [90] ve Eş. 3.13’de [127] verilmiştir.

$$r = 0,035.[50 + (D - d)]\sqrt{t}, \quad (3.12)$$

$$r = \sqrt{0.8(D - d)t}, \quad (3.13)$$

Kalıp kavislerinin belirlenmesi için farklı yöntemlerde literatürde yer almaktadır. Çizelge 3.4 ’de sac kalınlığı ile zımba çapı arasındaki yüzde oran (t/d) değerine göre önerilen değerler verilmiştir. Çizelge 3.5 ’de ise sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavis için önerilen değerler verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sac kalınlığı ve zımba çapı yüzde oranına göre önerilen kalıp kavis yarıçap değerleri [90, 91].

Çekme işleminin tipi	t/d (%)		
	2,0-1,0	1,0-0,3	0,3-0,1
Silindirik çekme	(5-8).t	(8-10).t	(10-15).t
Flanşlı çekme	(10-15).t	(15-20).t	(20-30).t
Eşikli çekme	(4-6).t	(6-8).t	(8-10).t

Çizelge 3.5. Sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavis yarıçapı için önerilen değerler [91, 93].

Sac malzeme kalınlığı, mm	Kalıp kavis, mm
0,4	1,6
0,8	3,2
1,2	4,8
1,5	6
1,6	6,4
2	9,5
2,4	11
2,6	11,6
3,2	14
5	20

3.4.3. Çekme boşluğu

Çekme kalıbı ve çekme zımbası arasındaki mesafeye “çekme boşluğu” ismi verilmektedir [93]. Diğer bir tanıma göre çekme boşluğu, çekme zımbası ve çekme halkası çapı arasındaki farkın yarısı olarak ifade edilmiştir [108].

Çekme boşluğunun gereğinden küçük olması durumunda, sac ile kalıp arasında aşırı sürtünme meydana gelmektedir. Bu durum, malzeme kalınlığında incelmelere ve taban yırtılması olarak adlandırılan olumsuzluklara yol açmaktadır. Çekme boşluğunun gereğinden büyük olması durumunda ise istenilen parça ölçülerini gerçekleştirmek zor olmakta ve parçada kırışıklıklar oluşmaktadır [93].

Çekme boşluğunun hesaplanması için farklı matematiksel eşitlikler literatürden belirlenmiştir. Eş. 3.14 [108] ve Eş. 3.15’de [91, 93, 108, 127] bu eşitlikler verilmiştir.

$$z = t \sqrt{\frac{D}{d}} , \quad (3.14)$$

$$\text{Çelik saclar için çekme boşluğu;} \quad z = t + 0,07\sqrt{10t} , \text{ mm} \quad (3.15 \text{ a})$$

$$\text{Alüminyum saclar için çekme boşluğu;} \quad z = t + 0,02\sqrt{10t} , \text{ mm} \quad (3.15 \text{ b})$$

$$\text{Demir olmayan metaller için çekme boşluğu;} \quad z = t + 0,04\sqrt{10t} , \text{ mm} \quad (3.15 \text{ c})$$

Hidromekanik derin çekme işlemleri hem mekanik hem de hidrolik şekillendirmenin özelliklerini kapsadığından dolayı, çekme boşluğu değerleri de Eş. 3.14 ve Eş. 3.15’de verilen klasik kalıplama yönteminde olduğu hesaplanmaktadır. Tez çalışması kapsamında da, klasik yöntem ile çekme işlemi için elde edilen çekme boşluğu değerleri kullanılmıştır.

3.4.4. Çekme kuvveti

Çekme kuvveti, istenilen parçayı meydana getirmek için malzeme üzerine uygulanması gereken kuvvet veya çekme işlemi esnasında parçanın gösterdiği direnç olarak tanımlanmıştır [93].

Klasik kalıplama yöntemi ile yapılan işlemlerde çekme kuvvetine; ilkel sac ve çekilen parça çapları, sac malzeme kalınlığı ve cinsi, baskı plakasının uyguladığı basınç, çekme hızı, kalıp ve zımba kavisleri, çekme boşluğu ve yağlama etki etmektedir [91].

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, çekme kuvvetine, sac malzeme kalınlığı ve çekme dayanımı, çekme zımbası çapı ve kalıp içerisinde oluşan basınç doğrudan etki etmektedir.

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde çekme kuvvetinin bulunması Eş. 3.16'da verilmiştir [108].

$$F_{dr} = (1,5) \cdot \sigma_{UTS} \cdot d \cdot \pi \cdot t + \frac{A_p \cdot P}{10} \quad (3.16)$$

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, farklı malzeme türlerine göre uygulanması gereken kalıp içi basınç değerleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Hidromekanik derin çekme işlemleri için uygulanan basınçlar [108,109].

Malzeme	Al ve Al alaşımları	Derin çekme çelikleri, St13, St14	Yüksek-alaşımli çelikler, paslanmaz çelik
Uygulanan basınç, MPa	6-30	20-70	30-100

3.4.5. Baskı yastığı basıncı ve kuvveti

Sac malzemelerin çekme ile şekillendirilmesi işlemlerinde, işlem esnasında kırışıklık oluşumunu engellemek için baskı yapan düzenek baskı yastığı olarak tanımlanmaktadır. Sacı tutma kuvveti, parçanın kırışiksız çıkmasını sağlayacak seviyede olmalıdır. Sacı tutma kuvvetinin büyük olması durumunda şekillendirilen parçanın dip kavislerinden veya flanş kısmından yırtılma olmaktadır. Küçük olması durumunda ise, şekillendirilen parçada kırışıklık oluşumu gözlenmektedir [91, 93].

Diğer bir tanıma göre baskı yastığı basıncı; çekme halkası ile sac arasındaki ve baskı yastığı ile sac arasındaki yüzeylere gelen basınç olarak tanımlanmıştır ve kırışıklıklardan kaçınmak için sac malzemenin kolayca kaymasını engelleyecek kadar yüksek, sac malzemenin kaymasını kilitlemeyecek kadar düşük değerde olmalıdır. Klasik ve hidromekanik derin çekme işlemleri arasındaki farklılıklar baskı yastığı açısından değerlendirildiğinde; hidromekanik işlemlerde sac malzemenin farklı gerilim ve uzamaya maruz kalması ile işlem esnasında oluşan kalıp içi basıncına göre sızdırmazlığı sağlayacak kuvvette olması olarak belirlenmiştir [103].

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde, baskı yastığı basıncı ve kuvvetini hesaplamak için değişik eşitlikler önerilmiştir. Bu eşitliler, Eş. 3.17 ve Eş. 3.18’de açıklanmıştır. Her iki eşitlik ile yapılan hesaplamalar neticesinde birbirine çok yakın değerlerin elde edildiği tespit edilmiştir.

[103] nolu kaynağa göre baskı yastığı basıncı,

$$p_{BH} = 0,002...0,0025[(\beta - 1)^3 + 0,5 \frac{d}{100.t}] \sigma_{UTS} \quad (3.17)$$

eşitliğinden bulunmaktadır. [112] nolu kaynakta ise baskı yastığı basıncının,

$$p_{BH} = 2.10^{-3}[(\beta - 1)^2 + \frac{D}{200.t}] \sigma_{UTS} \quad (3.18)$$

eşitliği ile hesaplandığı görülmektedir.

Baskı yastığı kuvveti, baskı yastığının uyguladığı basıncın etkili olduğu birim alan ile çarpılmasından elde edilen kuvvet olarak ifade edilmiştir [43, 103, 108].

$$F_{BH} = A_{BH} \cdot P_{BH} \quad (3.19)$$

Baskı yastığı basıncının pratik olarak hesaplanması için ideal şekillendirme basınçları da önerilmiştir. Çekilen parça için flanş bölgesindeki baskı yastığı basıncının, çekilen malzemenin çekme ve akma gerilmesi toplamının 0,005 ve 0,067 arasında uygulanmaktadır [127]. Kırıksıklık oluşumunu engellemek için farklı malzemelere yönelik ihtiyaç duyulan basınç değerleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Çekilen malzeme için ideal baskı yastığı basınç değerleri [127].

Malzeme	Basınç, MPa
Derin çekme çeliği	2,0-3,0
Düşük karbonlu çelik	3,5
Alüminyum ve Alüminyum alaşımları	0,85-1,40
Özel Alüminyum alaşımları	3,5
Paslanmaz çelik, genel	2,0-5,0
Paslanmaz çelik, östenitik	7,0
Bakır	1,25-1,75
Pirinç	1,40-2,0

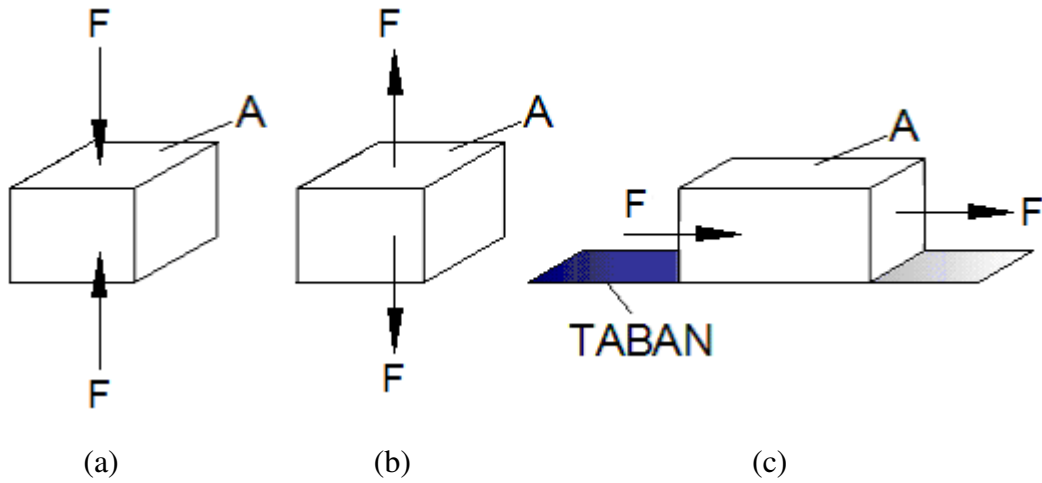
3.5. Plastik Deformasyon ve Temel İlkeleri

Şekillendirme, kopma ya da aşırı incelmeden önce bir metal malzemenin dayanabildiği deformasyon miktarının ölçüsüdür. Sac şekillendirme yöntemleri, basit bir bükme işleminden çekmeye, karmaşık şekilli parçaların derin çekilmesine kadar değişik alt işlemleri içerebilmektedir [128].

Şekillendirme ve ürün kalitesine doğrudan ya da dolaylı olarak etki eden malzeme özellikleri; en büyük çekme gerilmesi, akma dayanımı, elastikiyet modülü, süneklik,

sertlik, pekleşme katsayısı ve plastik gerilme oranıdır [128, 129]. Bütün bu parametreler sac levhadan malzemeden bir numune deneye tabi tutularak belirlenebilir.

Bir cisme, aritmetik toplamı sıfır olacak şekilde kuvvetler uygulandığında cisimde gerilme hali oluşmaktadır. Böyle bir durumda, birim alana etki eden kuvvet gerilme olarak tanımlanmaktadır. Gerilme normal gerilme ve kayma gerilmesi olarak iki tipte dikkate alınmaktadır. Normal gerilme, cisme uygulanan kuvvetin yönüne göre, çekme veya basma gerilmesi olarak isimlendirilmektedir. Bir cisme gelen gerilmeler Eş. 3.20’de verilmiştir [130].



Şekil 3.21. Bir cisme etki eden kuvvetler ve oluşan gerilmeler [130].

a) Basma gerilmesi, b) Çekme gerilmesi, c) Kayma gerilmesi

$$\text{Basma gerilmesi; } \sigma = -F/A, (F \perp A) \quad (3.20-a)$$

$$\text{Çekme gerilmesi; } \sigma = F/A, (F \perp A) \quad (3.20-b)$$

$$\text{Kayma gerilmesi; } \tau = F/A, F//A \quad (3.20-c)$$

Akma dayanımına kadar olan gerilme değerlerinde, metallerin “gerilme-birim şekil değiştirme” eğrisi doğrusal olup, yük kaldırıldığında malzemenin orijinal boyutlarına geri dönmesi sonucu oluşan şekil değişimi elastik deformasyon olarak tanımlanmaktadır [130].

Malzeme üzerine uygulanan gerilme arttırıldığında, gerilme kaldırıldıktan sonra malzemenin orijinal şekline dönemeyeceği elastik sınır olarak isimlendirilen bir noktaya geçilmektedir. Metallerin akma mukavemeti düzeyinde olan elastik sınırdan daha yüksek gerilme değerlerinde “gerilme-birim şekil değiştirme” doğrusallık bozulmakta ve malzemelerde plastik deformasyon olarak isimlendirilen kalıcı şekil değişimi oluşmaktadır [130].

Plastik şekil verme işlemlerinde, akmanın ne zaman başlayacağı önemli olmaktadır. Bir cisme uygulanan gerilme, akma mukavemetini aştığında plastik deformasyon başlamaktadır. Tek eksenli gerilme için çekme deneyi ideal bir uygulamadır ancak üç eksenli gerilme halinde akma koşulunu belirlemek için Von Misses ve Tresca kriterlerinden faydalanılmaktadır.

Von Misses kriterine göre, cisme uygulanan gerilmelerle şekil değiştirme enerjisi kritik bir değere ulaştığında akma olayı başlamaktadır [130]. Von Misses kriteri Eş. 3.21’de verilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (3.21)$$

Tresca kriterine göre akma olayı, uygulanan gerilmeler altında cisimde oluşan en büyük kayma gerilmesinin tek eksenli çekme deneyindeki kayma gerilmesi değerine ulaştığı anda başlamaktadır. Bu kriter en büyük kayma gerilmesi olarak ta tanımlanmaktadır [130]. Tresca kriteri Eş. 3.22’de verilmiştir.

$$\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_3, \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (3.22)$$

Bir malzemenin yük altındaki davranışının belirlenmesi, gerilme-uzama eğrisi ile ortaya konulmaktadır. Gerilme-uzama eğrisi grafiği, bir metal numunenin tek eksenli gerilim içinde bozulana kadar çekilmesiyle oluşturulmaktadır. Ek-1’de tipik bir mühendislik gerilim-uzama eğrisi verilmiştir.

Mühendislik gerilimi ve uzamasının bulunması Eş. 3.23 ve Eş. 3.24’de verilmiştir.

$$S = P / A_0 \quad (3.23)$$

$$e = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0 \quad (3.24)$$

Elastik bölgedeki eğrinin eğimi, Elastikiyet modülü E olarak belirlenmiştir ve Eş. 3.25 ile ifade edilmiştir.

$$E = \Delta S / \Delta e = (S_2 - S_1) / (e_2 - e_1) \quad (3.25)$$

Toplam Uzama, kopma anındaki tek eksenli uzamanın miktarıdır. Toplam uzama, elastik ve plastik deformasyonu kapsamakta ve genellikle kopma anındaki yüzde uzama olarak kabul edilmektedir. Kopma anındaki uzama Eş. 3.26 ile verilmiştir.

$$e_2 = 100.(L - L_0) / L_0 \quad (3.26)$$

Alan (Kesit) Daralması, kopma anındaki uzama gibi sünekliğin bir başka ölçüsü olarak kabul edilmekte ve yüzde ile ifade edilmektedir. Alan daralması, kopma noktasındaki kesit alanının ölçülmesiyle hesaplanmaktadır. Eş. 3.27’de kesit daralması tanımlanmıştır.

$$\text{Kesit alan daralması (\%)} = (A_0 - A_2) / A_0 \quad (3.27)$$

Uzama sertleşme katsayısı, bir malzemenin hangi hızla daha güçlü ve sert hale geleceğinin bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Uzama sertleşme eğrisinin bulunması Eş. 3.28’de verilmiştir [128, 129].

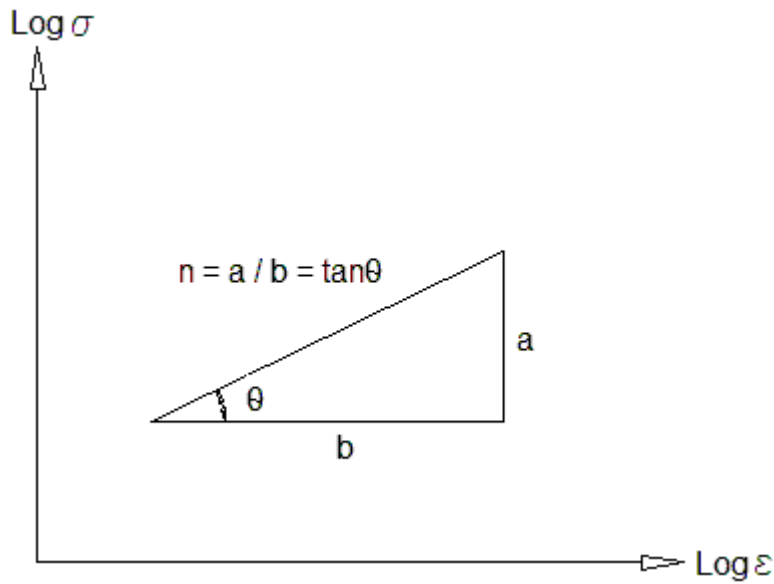
$$\sigma = K.\varepsilon^n \text{ (Holloman Eşitliği)} \quad (3.28)$$

$\varepsilon=0$ alınırsa, $\sigma =0$ olmaktadır. Bu nedenle eşitliğe, akma gerilmesi eklenerek ifade genişletilmiştir (Eş. 3.29).

$$\sigma = \sigma_{ak} + K.\varepsilon^n \quad (\text{Ludwing Eşitliği}) \quad (3.29)$$

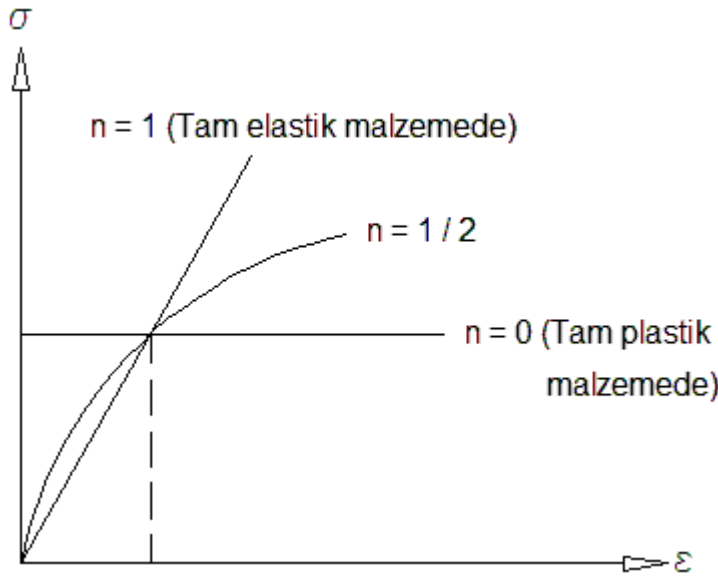
Pekleşme, plastik deformasyondan dolayı mukavemetteki artıştır. Metalik malzemeler yük altında gerilmeye maruz kaldıklarında, kalıcı şekil değişiklikleri oluşmaktadır. Dislokasyonlar, malzemede var olan atomsal hatalar ve malzemede sünekliği bozan yapısal değişikliklerdir. Düşük sıcaklıklardaki soğuk şekil verme işlemlerinde dislokasyonlar malzeme dışına atılamayarak içeride birikmekte, bunu sonucu olarak yığılarak birbiri ile kesişmektedir. Bu hareketler sonucunda malzemede mukavemet artmakta, süneklik azalmaktadır [128, 129].

Pekleşme katsayısı “n” plastik deformasyonun başladığı akma gerilmesi ile boyun vermenin başladığı nokta arasında bulunan eşit deformasyon bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerlerine göre çizilen ($\text{Log } \sigma - \text{Log } \varepsilon$) grafiğinin eğimine eşittir. Bu durum Şekil 3.22 ile gösterilmiştir [129].



Şekil 3.22. Pekleşme üssü “n” değerinin hesaplanması [129].

Deformasyonun başlangıcında; gerçek uzama, uzama sertleşme katsayısına eşittir. Bundan dolayı, n değeri ne kadar yüksek olursa malzeme deformasyondan önceki bölgeye o kadar fazla deforme edilebilir. Başka bir deyişle, akma dayanımı ve maksimum dayanım arasındaki farkın daha büyük olmasına ve malzemenin kopma olmaksızın en yüksek gerilmeye maruz neden olmaktadır. Bu durum Şekil 3.23 ile de açıklanmıştır [128, 129].



Şekil 3.23. Gerilim-Uzama grafiğinde n üssünün değerlendirilmesi [128].

Düz bir levhadan, kap biçimli üç boyutlu bir parçanın derin çekme yöntemiyle elde edilmesinde yukarıda ifade edilen deformasyon parametrelerinin literatürde önerilen aralıklarda kalmasına dikkat edilmiştir. Tez kapsamında çalışılan sac malzemelerin dayanım ve deformasyon özellikleri ve buna bağlı olarak imal edilen kalıp elemanlarının ölçüleri detaylı olarak materyal ve metot bölümünde aktarılmıştır.

4. MATERYAL VE METOT

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemleri; özellikle otomotiv sektörü başta olmak üzere, beyaz eşya, uzay ve havacılık, savunma sanayi ve kalıpcılık sektörlerinde kullanılan parçaların şekillendirilmesinde yaygınlaşmaktadır. Endüstride farklı sektörlerde sıklıkla kullanılmakta olan malzemeler için sıvı ile ideal şekillendirme parametrelerinin belirlenmesi, uygulamalarda deneme yanılma ile ayar sürelerinin kısaltmasını sağlayacaktır. Yöntemin kullanımında etkili olan parametrelerin bir bütün olarak hesaba katılması; sürecin bütünüyle değerlendirilmesine imkan veren her bir malzeme türü için gerçek şekillendirme sınırlarının belirlenmesini sağlayacaktır.

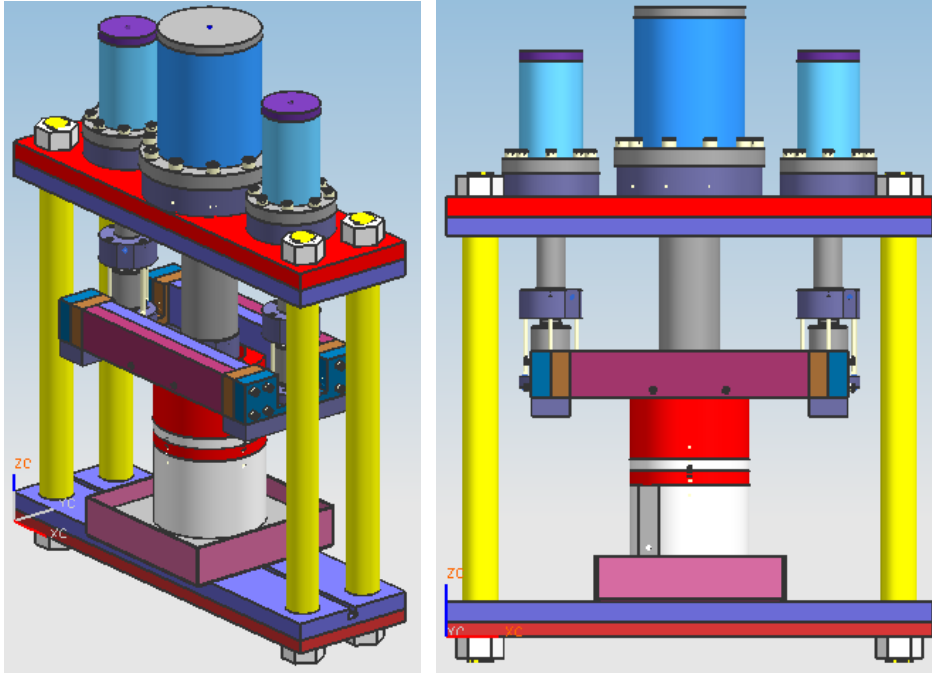
Sıvı ile şekillendirme yönteminin çevrim zamanının uzun olması ve yüksek basınç gerektirmesi, yüksek basınç için de özel hidrolik ekipmanların kullanımı sistemin dezavantajını oluşturmaktadır. Bu nedenle; tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, yüksek basınçlı ekipman kullanmak mümkün olmadığından, hem sıvı ile şekillendirme hem de klasik şekillendirme işleminin özelliklerini içeren hidromekanik derin çekme yöntemi tercih edilmiştir.

4.1. Deney Düzeneğinin Mekanik Tasarımı ve Üretimi

Sıvı basıncı ile şekillendirme deney düzeneğinin mekanik tasarımı ve üretimi; bilgisayar destekli tasarım (CAD), bilgisayar destekli dayanım analizi (CAE) ile tasarımın doğrulanması, imalat ve montaj aşamaları olmak üzere gruplandırılmıştır.

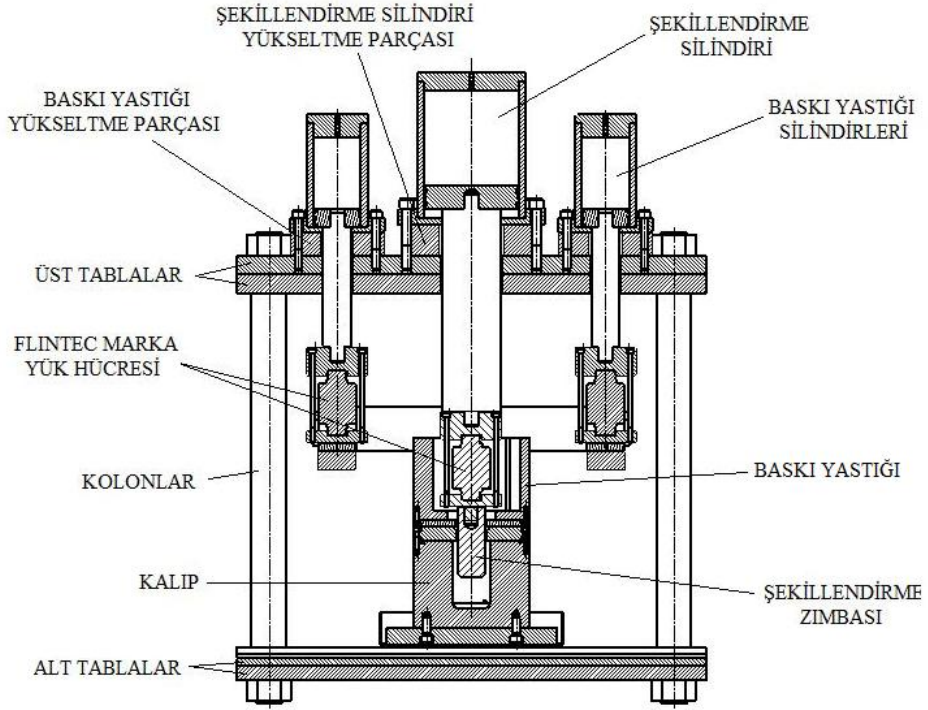
4.1.1. Bilgisayar destekli tasarım (CAD)

Deney düzeneğinin bilgisayar ortamında 3 boyutlu tasarımı işlemleri UG-NX 6.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de deney düzeneğinin CAD ortamında 3 boyutlu model görüntüleri verilmiştir.



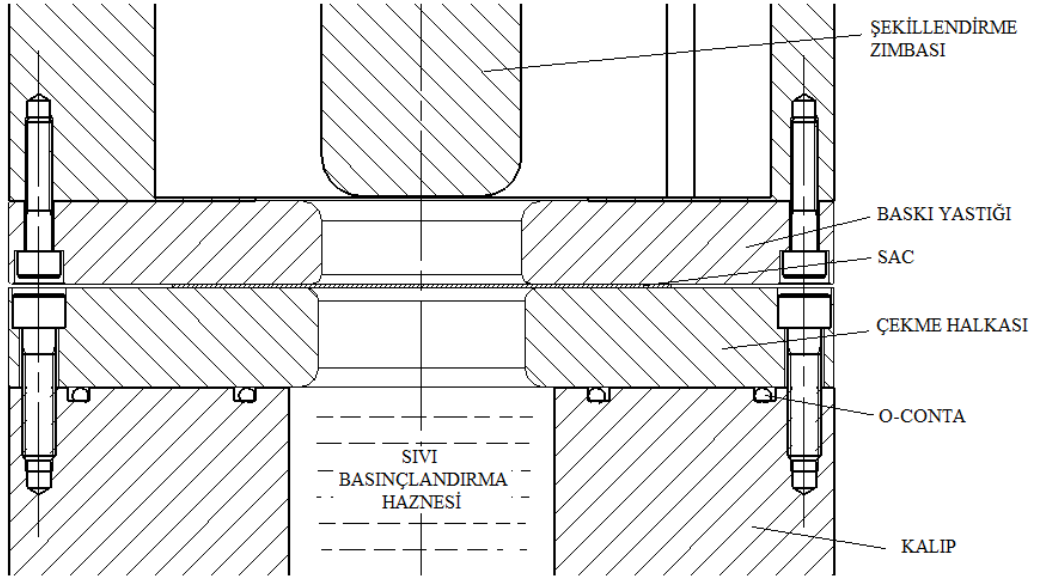
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin CAD ortamında üç boyutlu tasarım görüntüleri.

Deney düzeneği, hidromekanik şekillendirme yöntemi esas alınarak tasarlanmış ve esas itibariyle baskı yastığı, şekillendirme zımbası ve basınçlı kalıp bölümünden oluşmaktadır. Baskı yastığının basıncı ve hızı, şekillendirme zımbasının hızı ve kalıp içi basınç bilgisayar kumandalı olarak ayarlanabilmektedir. Baskı yastığı iki adet silindir ile şekillendirme zımbası da bir adet silindir ile hareket ettirilecek şekilde tasarlanmıştır. Baskı yastığı silindirleri ile baskı yastığı arasında ve şekillendirme zımbası ile de silindiri arasında yük hücreleri bulunmaktadır. Kalıp içi basıncı da kalıba giden hat üzerindeki basınç transdüseri ile okunmaktadır. Gerek yük hücreleri, gerekse de basınç transdüserinden alınan veriler veri okuma ve kontrol kartı ile alınmakta, tez çalışması kapsamında hizmet alımı yoluyla tasarlattırılan yazılım ile değerlendirilip sistem kontrol edilmektedir. Şekil 4.2’de deney düzeneğinin mekanik tasarımının genel hatları ile kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.2. Deney düzeneği kesit görüntüsü.

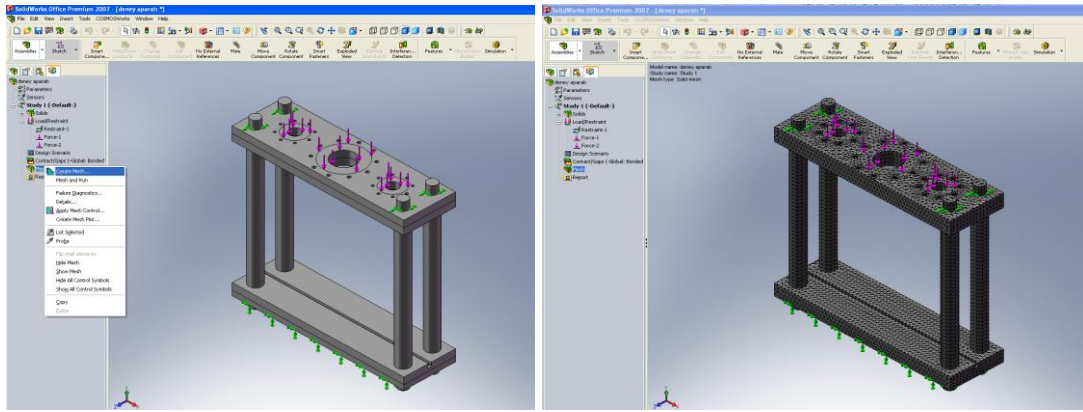
Hidromekanik şekillendirme deney düzeneğine ait detay kesit görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Hidromekanik şekillendirme deney düzeneği detay kesit görünüşü

4.1.2. Bilgisayar destekli mühendislik (CAE) ile tasarım doğrulama

Deney düzeneğinin bilgisayar ortamında yapılan üç boyutlu tasarımı, Solidworks yazılımının bir alt modülü olan Cosmosworks kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılan analiz çalışmasında üç boyutlu tasarım; deney düzeneği tablaları, kolon milleri ve sabitleme somunları olmak üzere bölümlere ayrılmış ve ayrı ayrı dayanım analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4’de deney düzeneği tablaları için uygulanan kuvvetler ve ağ örgü (mesh) oluşturulması işlemlerine ait görüntüler verilmiştir.



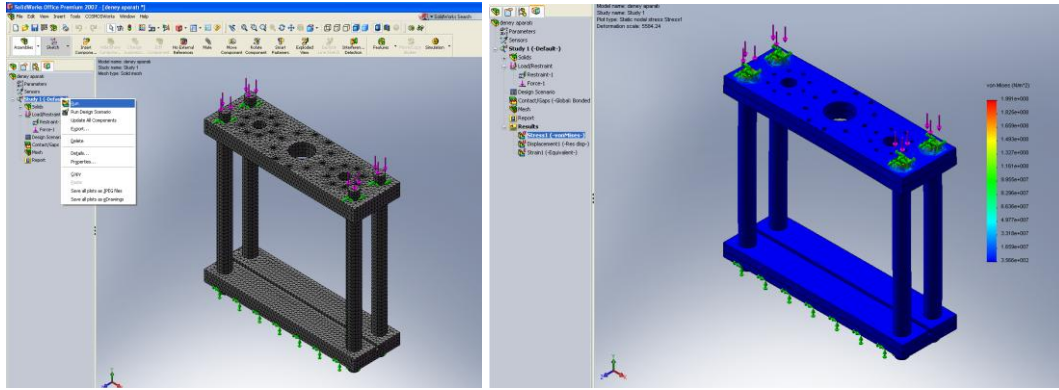
Şekil 4.4. Deney düzeneği mukavemet hesaplamaları kuvvet tanımlama ve ağ örgü oluşturma aşamaları.

Analiz çalışmalarında; şekillendirme silindiri için 300 kN, iki adet baskı yastığı silindirleri için ayrı ayrı 200 kN yük uygulanmıştır. Tasarımın seçilen AISI 1040 çelik malzemeler için 2,1 emniyet katsayısıyla dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Taşıyıcı kolon ve tablaların birleştirildiği somunlar için yapılan analizlerde 250 kN kuvvet için 1,6 emniyet katsayısı ile dayanım gösterdiği tespit edilmiştir (Emniyet katsayısı = $\sigma_{ak} / \sigma_{Von Mises}$).

Üç boyutlu tasarımın taşıyıcı kolonları için yapılan analizinde, her bir kolon için 300 kN kuvvet uygulanmıştır. Analiz sonucunda taşıyıcı kolonların 3,5 emniyet katsayısıyla dayanım gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.5’de deney düzeneği

tasarımı için uygulanan kuvvetlerin tanımlanması ve analiz sonucu elde edilen görüntü verilmiştir.



Şekil 4.5. Taşıyıcı kolonlar için kuvvet uygulanması işlemi ve elde edilen analiz sonucu.

4.1.3. İmalat ve montaj

Üç boyutlu tasarım ve mühendislik analizleri ile tasarımın doğrulanması aşamalarından sonra deney düzeneğinin üretimi ve montajı aşamasına geçilmiştir.

Elektrik ve elektronik kontrol panosunun üretimi için hizmet alımı yapılmıştır. Deney düzeneğinde etkili olan; kalıp içi basınç, baskı yastığı kuvveti, şekillendirme hızı parametreleri bilgisayar ve elektronik kontrollü olarak kumanda edilebilmektedir.

İmalat safhasında, öncelikli olarak daha önceki BAP projeleri kapsamında temin edilen hidrolik ünite tez çalışması kapsamında kullanılmak üzere alınmış olup, hidromekanik şekillendirme yöntemine göre revize edilmiştir. Resim 4.1’de hidrolik güç ünitesinin çalışma öncesi ilk alındığı zamana ait görüntüsü verilmiştir.

Tasarıma ait parçaların imalat teknik resimleri oluşturulmuş ve bu parçaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Mekanik parçaların üretiminin tamamlanması ile deney

düzeneğinin montajı aşamasına geçilmiştir. Resim 4.2’de deney düzeneği montajı çalışma ortamı görüntüsü verilmiştir.



Resim 4.1. TEF 07/2003-20 kod numaralı G.Ü. BAP Projesi¹ kapsamında temin edilen hidrolik güç ünitesi



Resim 4.2. Deney düzeneği montajı çalışma ortamı görüntüsü

¹ TEF 07/2003-20: CNC kontrollü sistemlerde hidrolik tahrikli dairesel interpolasyon hareket limitlerinin belirlenmesi; Güllü, A., Pınar, A.

Deney düzeneğinin mekanik konstrüksiyon montajının tamamlanması ile hidrolik donanımlar ile bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Elektronik kontrol ve veri okuma sisteminin de eklenmesi ile deney düzeneğinin üretim safhaları tamamlanmıştır. Resim 4.3 ve Resim 4.4’de deney düzeneğinin üretimi tamamlanmış görüntüleri ve deneysel çalışma ortamı resimleri verilmiştir.



Resim 4.3. Deney düzeneği ve deneysel çalışma ortamı-1



Resim 4.4. Deney düzeneği ve deneysel çalışma ortamı -2

4.2. Deney Düzenekinin Teknik Özellikleri

Deney düzeneği genel olarak; mekanik konstrüksiyon, hidrolik güç ünitesi ve elektronik kontrol olmak üzere üç bölümde değerlendirilmiştir. Resim 4.5’de deney düzeneğinin resmi verilmiş ve genel olarak bileşenler tanıtılmıştır.



Resim 4.5. Hidromekanik derin çekme deney düzeneği.

- 1- Kontrol yazılımı, 2- Elektronik kontrol ve veri okuma panosu,
- 3- Elektrik panosu, 4- Hidrolik motor ve pompa grubu, 5- Hidrolik tank,
- 6- Hidrolik valf grubu, 7- Geri dönüş filtreleme grubu,
- 8- Baskı yastığı silindirleri, 9- Şekillendirme silindiri,
- 10- Koordinat okuyucu cetvel, 11- Mekanik konstrüksiyon,
- 12- Baskı yastığı grubu, 13- Kalıp grubu ve sıvı haznesi,
- 14- Şekillendirme zımbası.

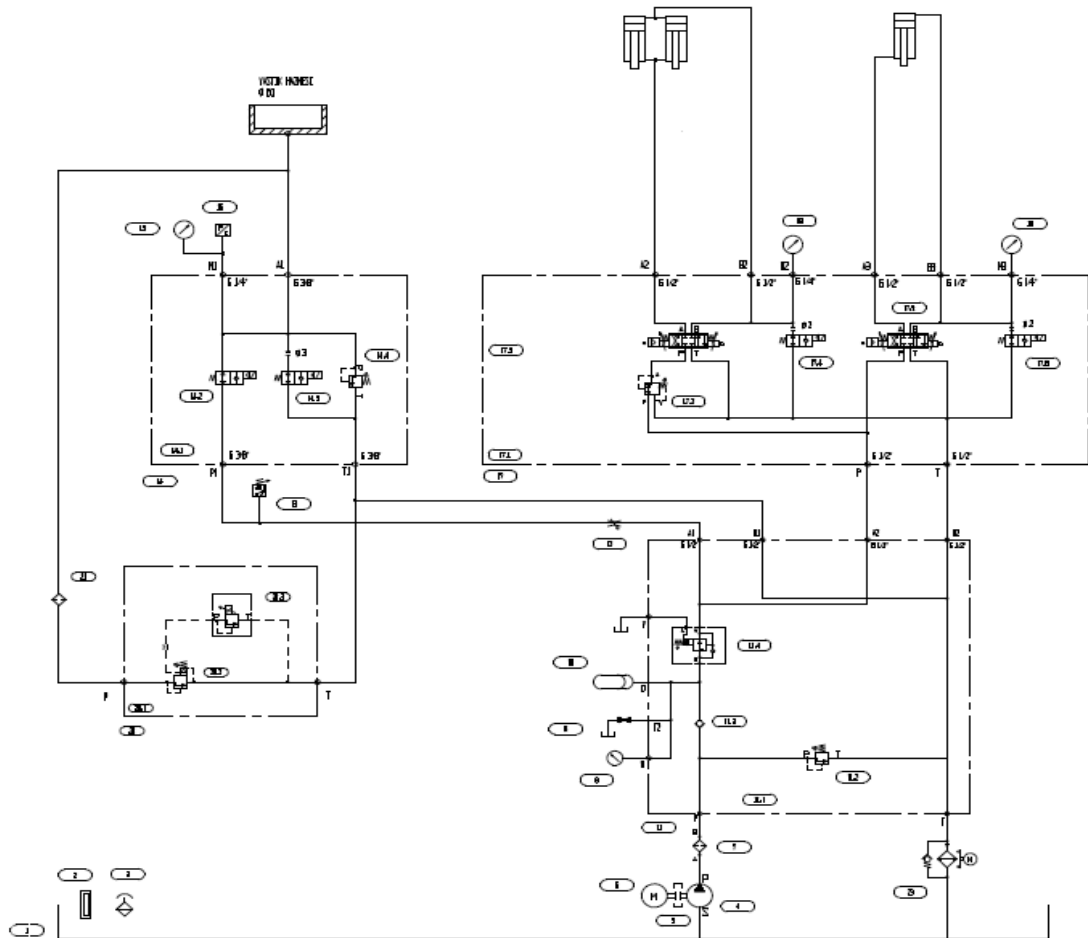
Çizelge 4.1’de deney düzeneğinin detaylı teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney düzeneği teknik özellikleri

Hidrolik Sistem	En büyük sistem basıncı	25 MPa
	En küçük sistem basıncı	1 MPa
	Motor gücü	15 Kw
	Pompa debisi	32 lt/min
	Şekillendirme hızı aralığı	0-18 mm/s
Baskı yastığı grubu	Silindir çapı	100 mm $\approx$ 7854 mm ²
	Uygulayabileceği en büyük kuvvet (25 MPa için)	196 350 N
	Etkili baskı alanı	28 588 mm ²
	Kurs boyu	100 mm
	Silindir adedi	2
Şekillendirme grubu	Silindir çapı	200 mm $\approx$ 31416 mm ²
	Uygulayabileceği en büyük kuvvet (25 MPa için)	785 400 N
	Kurs boyu	200 mm
	Silindir adedi	1
	Koordinat okuyucu cetvel kurs boyu	300 mm
Kalıp grubu	Ayarlanabilen basınç aralığı	0-30 MPa
	Kalıp ağız çapı	60 mm $\approx$ 2827 mm ²
	Uygulayabileceği en büyük karşı kuvvet (30 MPa için)	84 823 N
	Kalıp içi en büyük basıncı	30 MPa

Hidromekanik derin çekme yöntemi, hem sıvı ile şekillendirme hem de klasik kalıplama ile şekillendirme yöntemlerinin özelliklerini içermektedir. Bu yöntemde,

hidrolik akışkan vasıtasıyla sac malzeme ile kalıp arasında film tabakası oluşturularak şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Deney düzeneğinde de, şekillendirme işlemi için hidrolik ekipmanlar yardımıyla akışkan gücü oluşturulmakta ve kontrol edilmektedir. Hidrolik ekipmanlardan, yön kontrol valfleri, baskı silindirleri ve şekillendirme silindirlerinin hareketini sağlamaktadır. Hız oransal valfleri ile de, baskı yastığı ve şekillendirme silindirlerinin hız kontrolü yapılmaktadır. Basınç oransal valfleri, kalıp içi basıncın istenilen değerde tutulmasını sağlamaktadır. Deney düzeneğinde üç adet de basınç emniyet valfi bulunmaktadır. Basınç emniyet valfleri, sistemin genel basıncının ayarlanmasında, kalıp içi basıncının ayarlanmasında ve baskı yastığı silindirleri basıncının ayarlanmasında kullanılmaktadır. Sistemin hidrolik şeması Şekil 4.6’da, hidrolik devre elemanlarının detayı ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Deney düzeneğinin hidrolik şeması

Çizelge 4.2. Deney düzeneği hidrolik şema elemanları detayı

TEK. POZ. NO	MALZEMENİN ADI	MALZEME KODU	ADET
1	DEPO	120 LT.	1
2	SICAKLIK SEVİYE GÖSTERGESİ	FSA 120	1
3	KAPAK	-	1
4	İÇTEN POMPA	PG3-3X/032RE07VE4	1
5	AKUPLAJ	-	1
6	ELEKTRİK MOTORU	15 Kw, 950 d/d	1
7	BASINÇ HATTI FİLTRESİ	DF BN/HC 110 G 10 A 1.1	1
8	KÜRESEL VANA	KHB-G1/4-1212-03X	1
9	HİDROLİK AKÜ	SB330-4A1/112U-330A	1
10	GLİSERİNLİ MANOMETRE	63x160 (PANO TİP)	1
11	KONTROL BLOĞU	-	1
11.1.	BLOK GÖVDESİ	-	1
11.2	BASINÇ EMNİYET VALFİ	DBDH 10 KX/315	1
11.3	ÇEK VALF	CP100-1-B-0-005	1
11.4	BASINÇ DÜŞÜRME VALFİ	DR 10 K4-3X/350YM	1
12	KISMA VALFİ	DV-10-01.1/0	1
13	BASINÇ ŞALTERİ	HED 80A-2X/100K14KW	1
14	KONTROL BLOĞU	-	1
14.1	BLOK GÖVDESİ	-	1
14.2	POPET VALF	KSDEU1PBHNDV	1
14.3	POPET VALF	KSDEU1PBHNDV	1
14.4	BASINÇ EMNİYET VALFİ	DB4E01X-630V	1
15	GLİSERİNLİ MANOMETRE	100x400 (PANO TİPİ)	1
16	BASINÇ TRANSDÜSERİ	HM17-1X/400-CV00	1
17	KONTROL BLOĞU	-	1
17.1	BLOK GÖVDESİ	-	1
17.2	BASINÇ DÜŞÜRME VALFİ	DR 10 K4-3X/315YM	1
17.3	ORANSAL YÖN VALFİ	4WREE GE16-2X/G24K31/A1V-655	1
17.4	POPET VALF	WEI-BA-2A-DG-NA-S-NSS	1
17.5	ORANSAL YÖN VALFİ	4WREE GE16-2X/G24K31/A1V-655	1
17.6	POPET VALF	WEI-BA-2A-DG-NA-S-NSS	1
18	GLİSERİNLİ MANOMETRE	100x400 (PANO TİPİ)	1
19	GLİSERİNLİ MANOMETRE	100x400 (PANO TİPİ)	1
20	KONTROL BLOĞU	ORANSAL BASINÇ BLOĞU	1
20.1	BLOK GÖVDESİ	-	1
20.2	PİL UYARILI BASINÇ EMNİYET VALFİ	DB20K1-1X/350XY	1
20.3	ORANSAL BASINÇ EMNİYET VALFİ	KBPSABAA/SCG24K4V	1
20.3.1	ELEKTRONİK KART	VT-SSPA 1-5-1X/V00-024	1
23	HAVALI SOĞUTUCU	2020 K 24 V	1

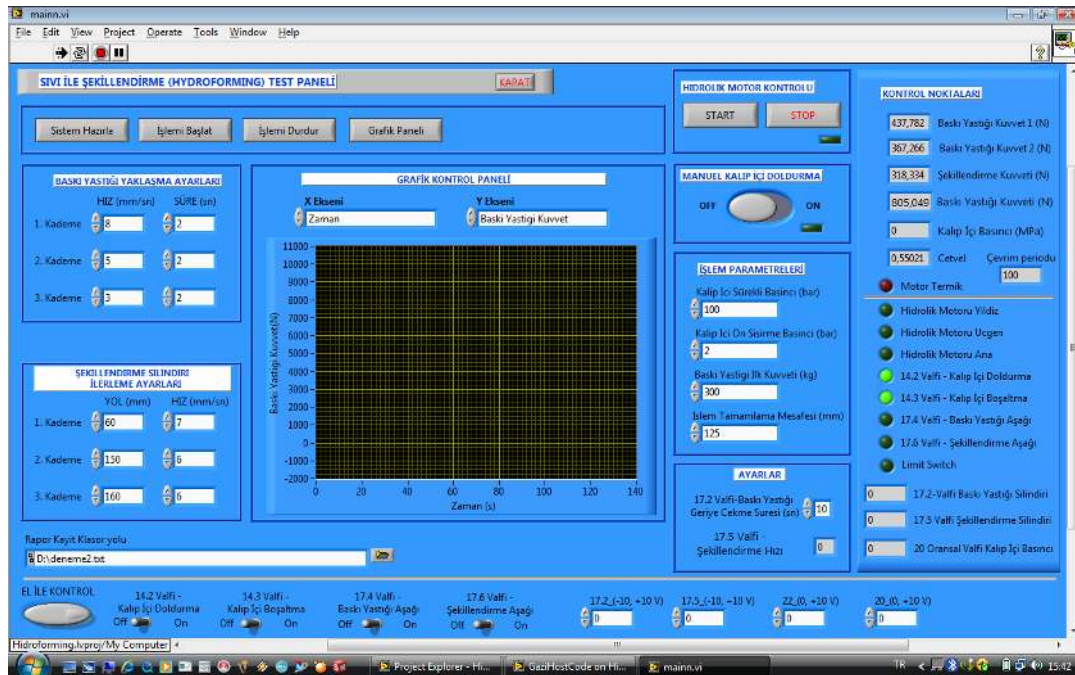
4.3. Elektronik Kontrol ve Veri Okuma Sistemi

Deney düzeneğinde elektronik kontrol ve veri okuma işlemi, National Instrument veri toplama ve değerlendirme kartı ile ve LabWiew editöründe tasarlanan yazılımla yapılmaktadır. Yazılım ile deney düzeneği bilgisayardan hizmet alımı ile hazırlanan arayüz yardımıyla kontrol edilebilmekte veya isteğe bağlı olarak elle de kumanda edilebilmektedir. Deneyisel çalışma, eş zamanlı olarak elde edilen verilere göre grafiksel olarak da izlenebilmektedir. Deney sonrası elde edilen grafikler “bmp” uzantılı resim dosyası halinde doğrudan kaydedilmektedir. Tasarımı yapılan sıvı

basıncıyla şekillendirme yazılımı ekran görüntüleri de Şekil 4.7’de verilmiştir. Deneysel çalışma esnasında, 3 adet yük hücresinden ve bir adet de basınç transdüserinden 250 adet/s veri okunabilmektedir. Okunan veriler “txt” veya “xls” uzantılı dosya olarak da yazdırılabilmektedir. Deney sonrası elde edilen grafikler Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deney düzeneğinden elde edilen grafikler.

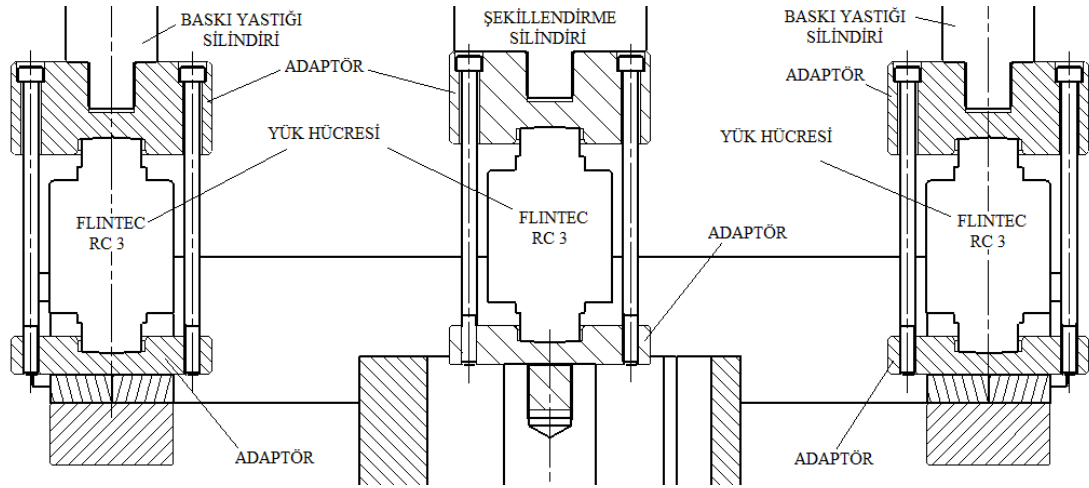
Baskı Yastığı	Şekillendirme Zımbası	Kalıp İçi Basıncı
Okunan Veri Adedi: 250 adet/s	Okunan Veri Adedi: 250 adet/s	Okunan Veri Adedi: 250 adet/s
<u>Grafik 1:</u> Baskı Yastığı Kuvveti – Zaman	<u>Grafik 1:</u> Şekillendirme Zımbası Kuvveti – Zaman	<u>Grafik 1:</u> Kalıp İçi Basıncı – Zaman
<u>Grafik 2:</u> Baskı Yastığı Kuvveti – Şekillendirme Zımbasının Aldığı Yol	<u>Grafik 2:</u> Şekillendirme Zımbası Kuvvet – Hız	<u>Grafik 2:</u> Kalıp İçi Basıncı – Şekillendirme Zımbası Aldığı Yol
	<u>Grafik 3:</u> Şekillendirme Zımbası Kuvvet – Yol	<u>Grafik 3:</u> Kalıp İçi Basıncı – Şekillendirme Zımbası Hızı
	<u>Grafik 4:</u> Şekillendirme Zımbasının Aldığı Yol - Hız	



Şekil 4.7. Sıvı basıncıyla şekillendirme yazılımı arayüz ekranı görüntüsü.

4.4. Kuvvet Ölçümleri - Yük Hücreleri

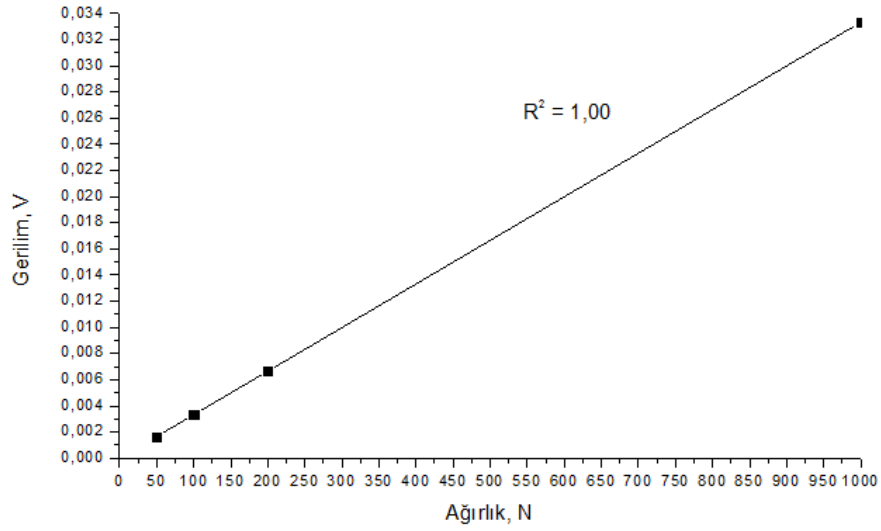
Deney düzeneğinde; iki adet baskı yastığı silindirleri altında, bir adet de şekillendirme silindiri ile zımba arasında olmak üzere toplamda üç adet baskı tip yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücrelerinden alınan veriler kullanılarak, baskı yastığı ve şekillendirme kuvvetleri belirlenmekte ve sistem kumanda edilmektedir. Yük hücrelerinden sağlıklı veriler elde etmek için, küresel adaptör bağlantıları tasarlanarak üretimi yapılmış ve deney düzeneğine dahil edilmiştir. Yük hücrelerinin bağlantısı Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Yük hücrelerinin deney düzeneğinde bağlantı konumları.

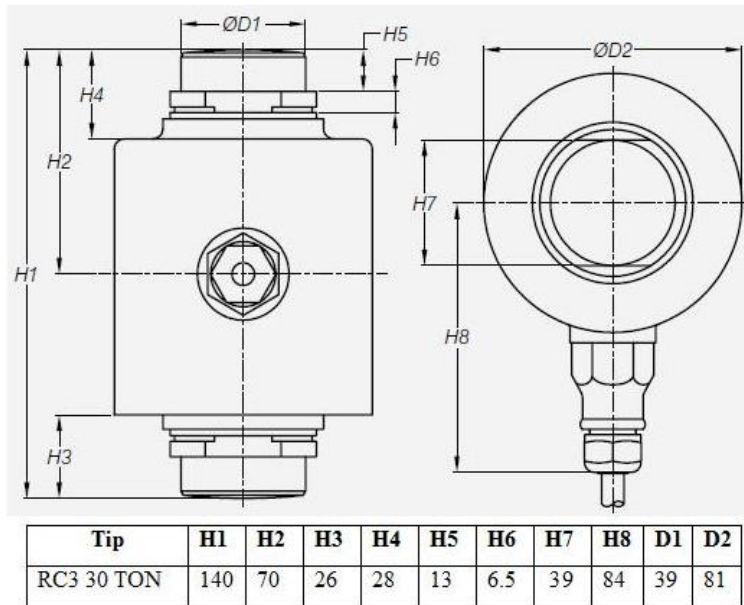
Şekillendirme işlemi esnasında, yüksek kuvvet ihtiyaçları olduğundan dolayı 0-300 000 N kapasiteli yük hücresinin kullanımına karar verilmiş ve Flintec RC3 marka baskı tip yük hücresi seçilmiştir. Seçilen yük hücresi, uygulanan kuvvetle orantılı olarak 2 mV/V gerilim üretmektedir. Hiç bir yük uygulanmaması durumunda 0 mV, 300 000 N yük uygulandığında da 20 mV gerilim üretmektedir. Üretilen bu gerilim, transmitterler ile 0-10 V arası gerilim değerine dönüştürülmektedir. Yük hücrelerinin kalibrasyonunu yapmak amacıyla, 50, 100, 200 ve 1 000 N değerinde hassas yükler hazırlanmış ve üzerlerine ayrı ayrı uygulanmıştır. Kuvvet uygulanmadan yapılan ölçüm değerine göre alınan gerilim değeri 0 Volt olmuştur. Buna karşın, 50 N yük uygulandığında 0,00166 Volt, 100 N yük uygulandığında

0,0033 Volt, 200 N yük uygulandığında 0,00666 Volt, 1 000 N yük uygulandığında ise 0,0333 Volt gerilim değeri elde edilmiştir. Hassas ağırlıkların uygulanması ile elde edilen yük-gerilim kalibrasyon değerleri grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Yük hücresi kalibrasyon grafiği.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere seçimi yapılan yük hücresinin genel ölçüleri Şekil 4.10’da, teknik özellikleri ise Çizelge 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.10. Deneylerde kullanılan Filintec marka yük hücresi [136].

Çizelge 4.4. Deneylerde kullanılan yük hücresi teknik özellikleri.

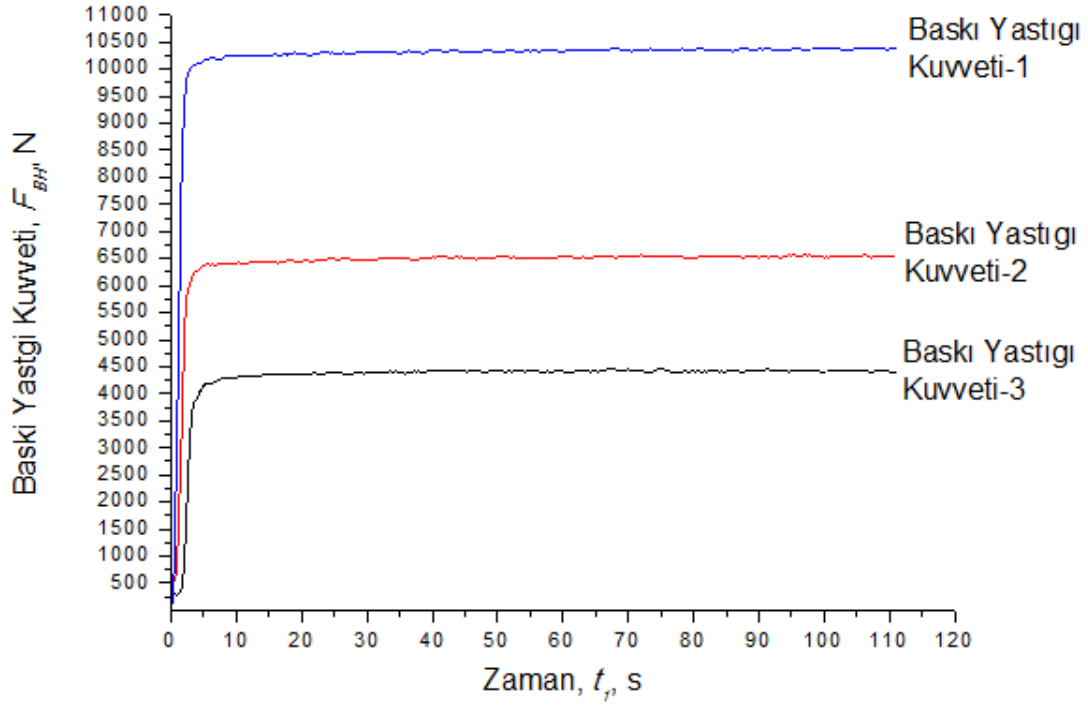
En büyük kapasite ($=E_{\max}$)	t	30
Çıktı oranı (RO)	mV/V	2
OIML R60 a göre hassasiyet sınıfı	-	C3
En büyük doğrulama aralığı	n	3000
En küçük yük hücresi doğrulama aralığı	$V_{\min}$	$E_{\max}/13000$
Çıkış voltajı	V	5-15
Çalışma sıcaklık aralığı	°C	-40..+80
Giriş direnci	Ω	1150
Çıkış direnci	Ω	1000
Yük hücresi malzemesi	-	1.4548 paslanmaz

4.5. Deney Düzenekinin Kalibrasyonu

Deney düzeneğinin; tasarım, üretim ve montaj aşamalarının tamamlanması ile birlikte kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada; düzenekte kullanılan yük hücreleri, basınç transdüseri, hidrolik basınç ve hız kontrol valfleri gibi ekipmanların istenilen şekilde çalışıp çalışmadıkları ve düzeneden doğru veri aktarımının yapıp yapılmadığı kontrol edilmiştir. Kalibrasyonu işlemi; baskı yastığı grubu, şekillendirme zımbası grubu ve kalıp içi basıncı olmak üzere üç ana bölümde incelenmiştir.

4.5.1. Baskı yastığı grubu kalibrasyon işlemi

Deneyisel çalışmalarda baskı yastığı kuvveti sabit değerde tutulmaktadır. Deney düzeneğinde bu durum, baskı yastığı basıncının teorik hesaplamalar ile elde edilen ideal sabit değere ayarlanması ile sağlanmaktadır. Deneyisel çalışma süresince, baskı yastığının sabit kuvvet uygulayıp uygulamadığının tespiti için üç adet deneme yapılmıştır. Bu denemeler için; baskı yastığı kuvveti el ile 4 250 N, 6 250 N ve 10 250 N sabit kuvvet değerlerine ayarlanmış ve deney düzeneğinin de baskı yastığını bu sabit kuvvet değerlerinde ± 50 N hassasiyetle tutabildiği görülmüştür. Zamana bağlı olarak elde edilen baskı yastığı kuvvetinin grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir.



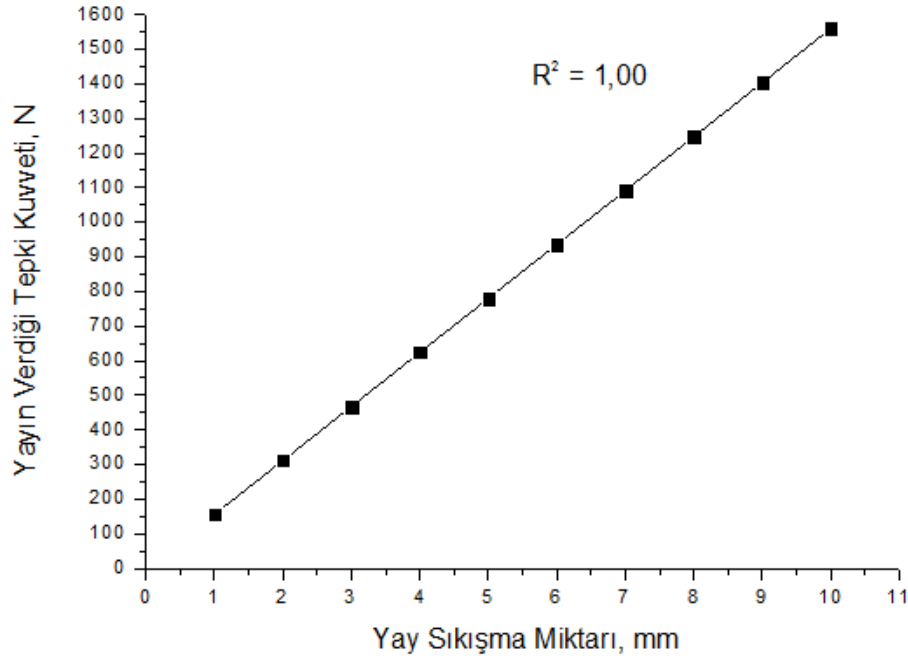
Şekil 4.11. Baskı yastığı kuvveti-zaman kalibrasyon grafiği

Deney düzeneği üzerinde bulunan baskı yastığına ait yük hücrelerinin, okudukları kuvvetlerin doğruluğu da diğer bir çalışma ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, yay sabiti bilinen kırmızı renkli ağır yük kalıp yayları alınarak sıkıştırılmış ve sıkıştırma oranlarına göre elde edilen yükler ile yük hücrelerinin okuduğu yükler karşılaştırılmıştır. Seçilen kalıp yayına ait teknik özellikler Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Kalibrasyon işleminde kullanılan yayların teknik özellikleri.

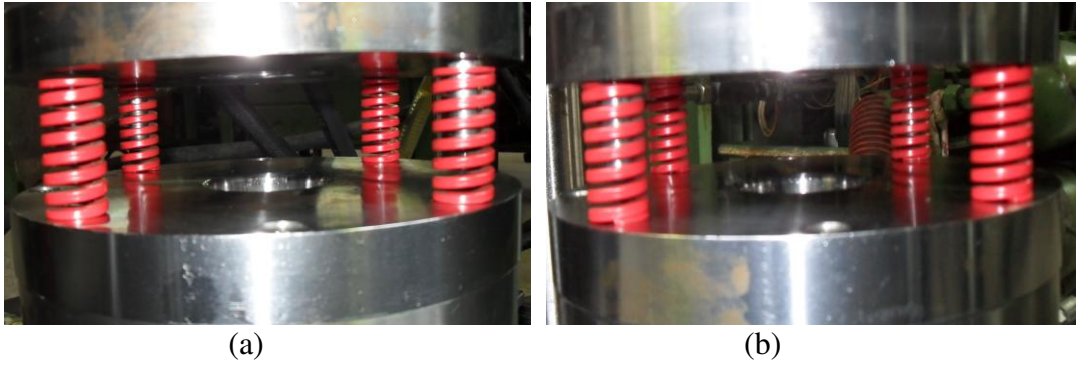
Dış Çap (mm)	İç Çap (mm)	Boy (mm)	Tel Kesiti (mm)	Yay Sabiti (N/mm)	Renk	Sınıf	Marka
25	12,5	51	5,5x4,2	156	Kırmızı	Ağır Yük	Enemak

Kalibrasyon işleminde kullanılan yayların sıkıştırılması ile oluşan kuvvetler hesaplanarak Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Kalibrasyon yayının sıkıştırılması ile elde edilen tepki kuvvetleri grafiği

Baskı yastığına bağlı yük hücrelerinin okuduğu kuvvetlerin doğruluğunun tespiti için, baskı yastığı ve kalıp arasına bir düzlem oluşturacak şekilde dört adet sert kalıp yayı yerleştirilmiştir. Başlangıçta açık konumda olan yaylar, dijital cetvel yardımıyla adım adım hassas olarak sıkıştırılmış ve bu esnada okunan kuvvetler tespit edilmiştir. Yayın sıkışma miktarına göre verdiği tepki kuvvetleri ile yük hücrelerinin okuduğu kuvvetler karşılaştırılmıştır. Elde edilen ve okunan kuvvetlerin birbiri ile aynı olduğu gözlemlenmiştir. Kalibrasyon işlemine ait görüntüler Resim 4.6 'da verilmiştir.

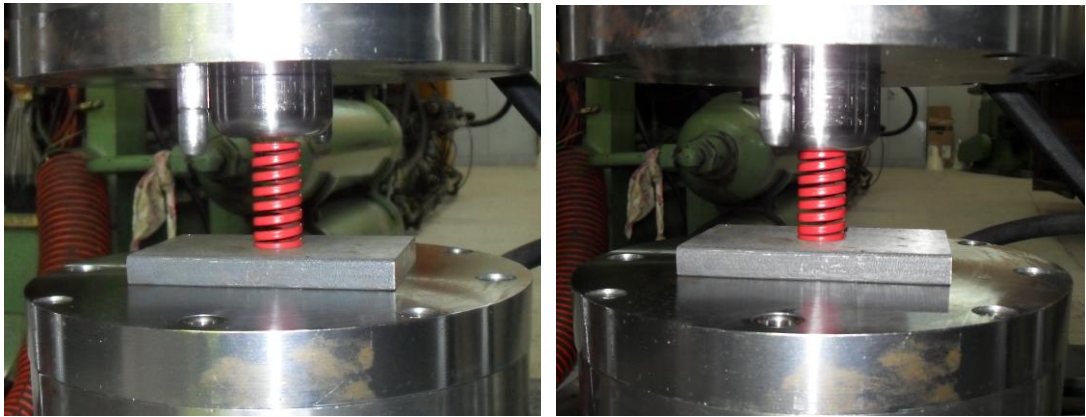


Resim 4.6. Baskı yastığı kalibrasyon işlemi

- a) Kalibrasyon işlemi başlangıcı sıkıştırılmamış yaylar.
- b) Kalibrasyon işlemi bitişi sıkıştırılmış yaylar.

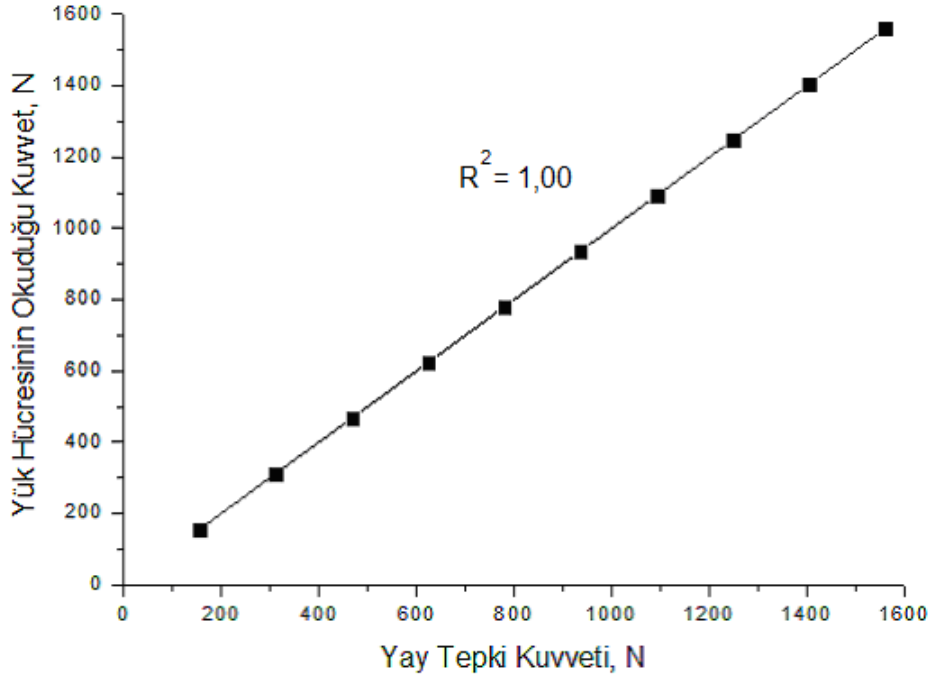
4.5.2. Şekillendirme zımbası grubu kalibrasyon işlemi

Şekillendirme zımbasının kalibrasyonu işlemi, kuvvet ve hız kalibrasyonu olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. İlk olarak, şekillendirme zımbası ile zımbaya hareket veren silindir arasına yerleştirilen yük hücresinin okuduğu verilerin doğruluğu test edilmiştir. Bu işlem için, şekillendirme zımbası ile kalıp üzerine yerleştirilen taşlanmış bir parça arasına yay sabiti bilinen bir adet sert kalıp yayı yerleştirilmiştir. Şekillendirme silindiri ile kalıp yayı kontrollü olarak sıkıştırılmıştır. Kalıp yayının verdiği tepki kuvveti ile şekillendirme zımbasına bağlı yük hücresinin okuduğu kuvvet karşılaştırılmış ve birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kalibrasyon işlemini gösteren örnek görüntüler Resim 4.7’de verilmiştir.



Resim 4.7. Şekillendirme zımbası grubu yük hücresi kalibrasyon çalışması.

Şekillendirme zımbasına bağlı yük hücresinin okuduğu kuvvet ile hesaplanan kalıp yay tepki kuvveti arasındaki ilişki Şekil 4.13’de verilmiştir.

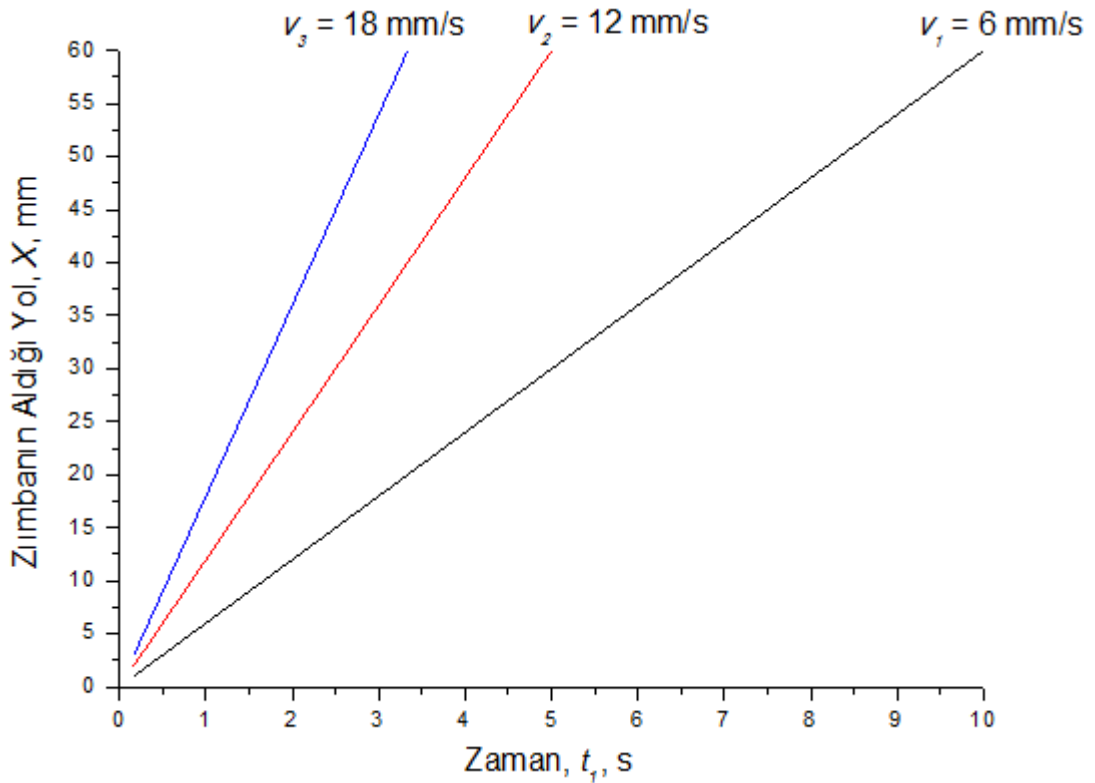


Şekil 4.13. Şekillendirme zımbasına ait yük hücresinin kalibrasyon grafiği.

Deneysel çalışmalarda; şekillendirme zımbasının hızı, çekme işlemi hızını tayin etmektedir. Şekillendirme zımbasına bağlı olan yük hücresinin, deney düzeneği üzerindeki kalibrasyon işleminin tamamlanması ile birlikte şekillendirme hızının kalibrasyonu aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada ilk olarak, şekillendirme zımbasının en büyük hızı belirlenmiştir. Bu işlem, zımbanın hızını kontrol eden hız oransal valfi kullanılarak yapılmıştır. Hız oransal valfi, -10 V ~ 0 V ve 0 V ~ 10 V arasındaki gerilim değerleri ile kontrol edilmektedir. Sistemin en büyük hızını tayin etmek için, hız oransal valfine -10 V değeri verilerek, zımbanın boşta hareket mesafesi olan 60 mm mesafeyi ne kadar sürede aldığı tespit edilmiş ve bu işlem üç defa tekrar edilmiştir. Bu işlem sonucunda, 60 mm lik boşta çalışma mesafesini, şekillendirme zımbasının yaklaşık 3,33 s. sürede aldığı görülmüş ve sistemin en büyük hızı 18 mm/s olarak tespit edilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışma ile de, tasarımı yapılan programa girilen hız parametresinin deney düzeneğinde doğru bir şekilde yerine getirip getirmediği tespit edilmiştir. Bu işlem için; şekillendirme zımbasının hızı, tasarlanan programda 6 mm/s olarak girilmiş ve zımbanın dijital cetvel ile okunan 60 mm mesafeyi ne kadar zamanda

alındığı kronometre ile ölçülmüştür. Aynı işlem, diğer deney parametresi olan 12 mm/s için de denenmiştir. 6 mm/s şekillendirme hızı için; zımbanın 60 mm lik mesafeyi yaklaşık 10 s sürede, 12 mm/s hızı da yaklaşık 5 mm/s sürede aldıkları tespit edilmiştir. Bu çalışma ile deney düzeneğinde, sistemde girilen hız parametre değerinin sistem tarafından doğru bir şekilde yerine getirildiğini göstermiştir. Zaman – alınan yol mesafesi değişim grafiği Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14. Şekillendirme zımbası yol-zaman grafiği

4.5.3. Kalıp içi basıncı kalibrasyon işlemi

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, kalıp içi basıncının ayarlanması önemli bir parametredir. Deneysel çalışma esnasında, şekillendirme zımbasının kalıp içerisine batması ile birlikte, basınç sıfırdan itibaren istenilen basınç değerine ulaşmaya kadar artmaktadır. Artan kalıp içi basıncı, oransal basınç valfleri vasıtasıyla istenilen sabit bir değerde hassas olarak tutulmaktadır.

Kalıp içi basıncını okumak ve kontrol etmek için, kalıp içi basınç hattına basınç transdüseri eklenmiştir. Eklenen basınç transdüseri, 0-40 MPa aralığında veri alabilmekte ve 0-10 V arasındaki gerilim ile veri okuma işlemi yapabilmektedir. Transdüsera giden gerilim 10 V olduğunda, okunan basınç değeri 40 MPa olmaktadır. Sistem 0,00061 MPa hassasiyetle basınç değerini okuyabilmektedir.

Kalıp içi basıncının kalibrasyon işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, transdüserin okuduğu değerin doğru olup olmadığı test edilmiştir. İkinci aşamada ise, kalıp içi basıncının istenilen sabit bir değerde tutulup tutulamadığı test edilmiştir.

İlk aşama olan kalıp içi basınç değerinin doğruluğunun tespiti için, kalıp içi basınç hattına mekanik basınç göstergesi olan manometre dahil edilmiştir. Devamında sistemde kalıp içi basıncı, 1 MPa, 10 MPa, 20 MPa ve 30 MPa değerlerine ayarlanmıştır. Her bir basınç değerinde, manometreden gösterilen değer ile basınç transdüserinin okuduğu basınç değeri karşılaştırılmış ve sistemin hatasız olarak veri okuduğu gözlemlenmiştir. Resim 4.8’de manometrelerin deney düzeneği üzerindeki görüntüsü, Resim 4.9’da ise basınç transdüserinin bağlantı görüntüsü verilmiştir.



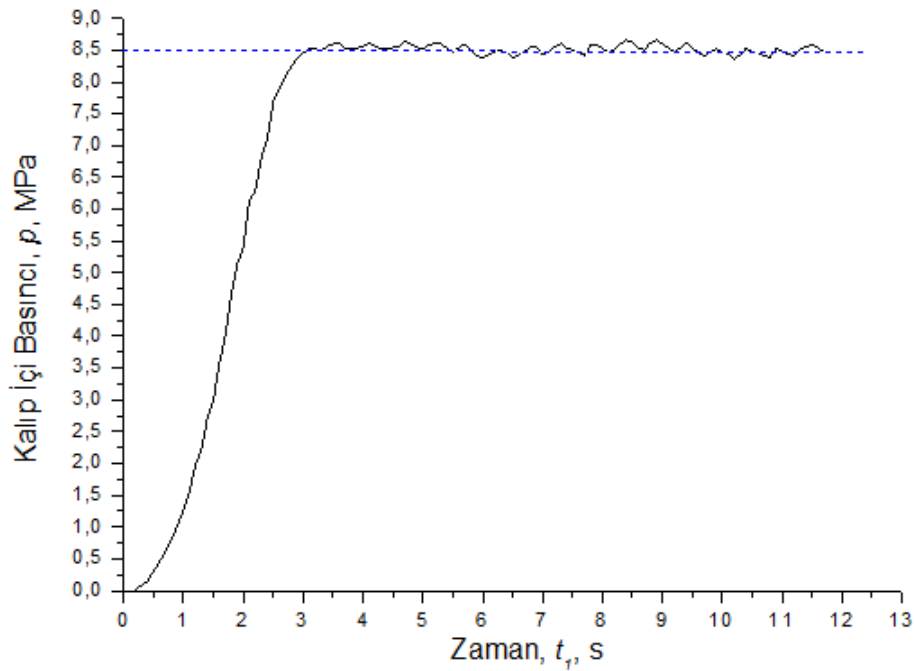
Resim 4.8. Manometrelerin deney düzeneğindeki bağlantı görüntüsü.

1- Kalıp içi basıncı manometresi, 2- Şekillendirme zımbası basıncı manometresi, 3- Baskı yastığı basıncı manometresi



Resim 4.9. Basınç transdüseri deney düzeneği bağlantısı.

Deney düzeneğinde; okunan kalıp içi basınç değerinin doğruluğunun tespiti ile birlikte, ikinci aşama olan basınç değerinin istenilen değerde tutulup tutulamadığı test edilmiştir. Bu işlem için, kalıp içi basınç değeri 8,5 MPa değerlerine ayarlanmıştır. Kalıp içi basıncının deney bitimine kadar, ortalama 8,5 MPa basınç değerinde tutulduğu görülmüştür. Basınç oransal valfinin $\pm 0,2$ MPa hassasiyetle işlemi gerçekleştirdiği görülmüştür. Gerçekleştirilen işlem sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.15’de verilmiştir.



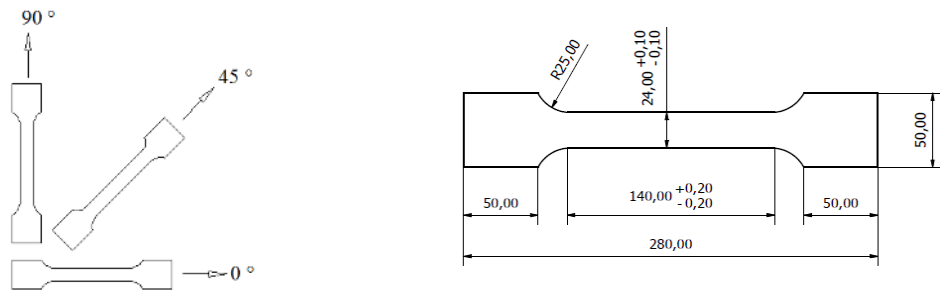
Şekil 4.15. Kalıp içi basıncın sabit tutulma aralığı

4.6. Deney Malzemeleri Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanmak için; Erdemir 6112, AISI 304 paslanmaz ve bakır sac olmak üzere üç farklı türde malzeme seçilmiştir. Malzeme seçimi aşamasında, endüstride üretimde sıklıkla kullanılıyor olmaları göz önünde bulundurulmuştur. Erdemir 6112 sac malzeme, beyaz eşya endüstrisinde ve çekme kalıpcılığında kullanılmaktadır. AISI 304 paslanmaz sac malzeme ise özellikle gıda sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Bakır sac malzeme ise savunma sanayindeki uygulamalarda kullanılmaktadır.

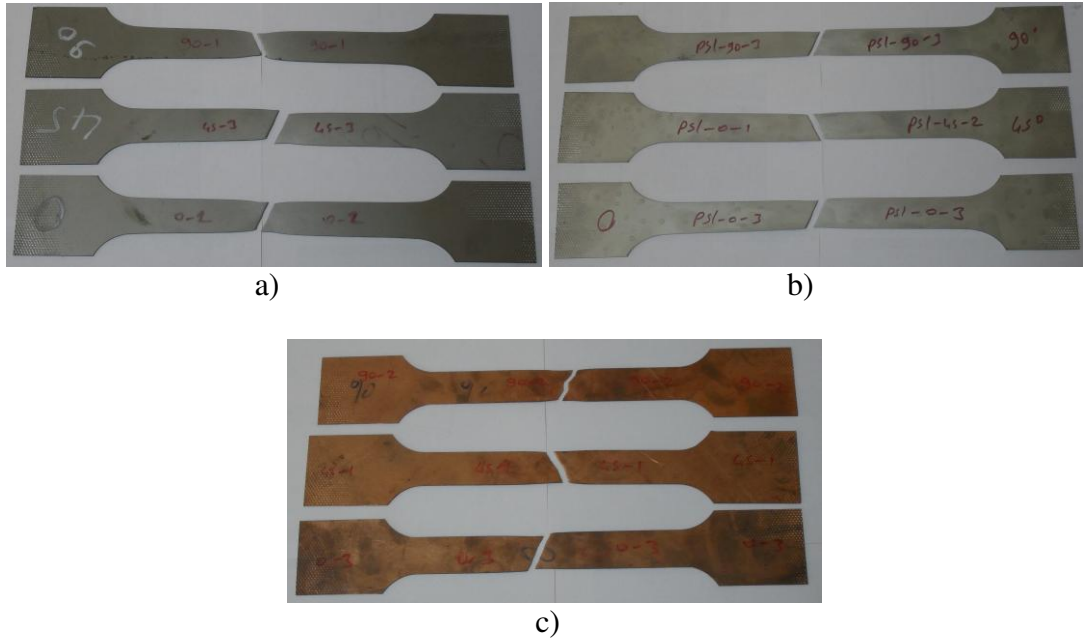
Erdemir 6112 ve AISI 304 paslanmaz sac malzemeler lazer ile kesilerek 120 mm, 130 mm ve 140 mm çaplarında deney numunesi olarak hazırlanmıştır. Bakır sac malzeme deney numuneleri ise Router tezgahında kesilerek hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere; sac malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için, 1 mm kalınlıkta her bir sac malzeme türünden hadde yönüne göre 0°, 45° ve 90°, 3'er adet deney numunesi kesilerek hazırlanmış ve çekme deneyi yapılmıştır. Şekil 4.16'da deney numunesi teknik resmi ve bu numunelerin kesim için sac malzeme üzerinde yerleşim resimleri verilmiştir.



Şekil 4.16. Çekme deney numunesi detayı ve sac malzeme üzerinde yerleşim konumu (ASTM E8-M)

Her bir malzeme türü için hazırlanan çekme numunelerinin kesim işleminin tamamlanması ile numuneler çekme cihazında çekilerek mekanik özellikler elde edilmiştir. Resim 4.10'da çekilen deney numunelerine ait görüntüler verilmiştir.



Resim 4.10. Çekilmiş deney numuneleri görüntüsü

a- Erdemir 6112 sac, b- AISI 304 Paslanmaz sac, c- Bakır sac

Çekme testi sonucunda, her bir malzeme türü için farklı hadde yönlerinde elde edilen en büyük çekme gerilmeleri ile literatür de verilen çekme gerilmeleri karşılaştırılmış ve Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar

Erdemir 6112	Hadde Yönü			Deneysel Elde Edilen Çekme Gerilmesi, MPa	Literatürdeki En Büyük Çekme Gerilmesi, MPa
	0°	45°	90°		
	En Büyük Çekme Gerilmesi, MPa				
1. Test	360,6	342,3	344,1	350	270 - 410
2. Test	356,5	344,8	339,6		
3. Test	356,9	345,9	340,6		
AISI 304	Hadde Yönü			Deneysel Elde Edilen Çekme Gerilmesi, MPa	Literatürdeki En Büyük Çekme Gerilmesi, MPa
	0°	45°	90°		
	En Büyük Çekme Gerilmesi, MPa				
1. Test	677,9	630,9	615,6	647	505
2. Test	675,4	635,1	622,1		
3. Test	674,7	633,3	616,2		
Bakır	Hadde Yönü			Deneysel Elde Edilen Çekme Gerilmesi, MPa	Literatürdeki En Büyük Çekme Gerilmesi, MPa
	0°	45°	90°		
	En Büyük Çekme Gerilmesi, MPa				
1. Test	316,8	315,1	305,9	310	210
2. Test	323,0	316,1	298,6		
3. Test	317,2	311,3	301,0		

Deney numunelerinin çekme testi sonucu elde edilen mekanik özellikleri, literatürden elde edilen kimyasal ve fiziksel özellikleri olmak üzere; Çizelge 4.7’de Erdemir 6112 sac malzeme için, Çizelge 4.8’da AISI 304 kalite sac malzeme için ve Çizelge 4.9’da da Bakır sac malzeme için ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 4.7. Erdemir 6112 deney malzemesi kimyasal ve fiziksel özellikleri

Malzeme	Element (%)	Mekanik Özellikler
Erdemir 6112 Sac	Karbon (C) 0,02740	Çekme Dayanımı, MPa 350
	Krom (Cr) 0,05140	Akma Dayanımı, MPa 252,9
	Fosfor (P) 0,00723	Uzama, % 18,81
	Kükürt (S) 0,01230	Elastikiyet Modülü, GPa 141,7
	Molibden (Mo) 0,00942	Poission Oranı 0,28
	Nikel (Ni) 0,03630	Özgül Ağırlığı, g/cm ³ 7,83
	Kobalt (Co) 0,01850	
	Bakır (Cu) 0,02350	
	Mangan (Mn) 0,25800	
	Kalay (Sn) 0,00467	
	Alüminyum (Al) 0,03030	
	Demir (Fe) Kalan	

Çizelge 4.8. AISI 304 paslanmaz sac deney malzemesi kimyasal ve fiziksel özellikleri

Malzeme	Element (%)	Mekanik Özellikler
AISI 304 Sac	Karbon, (C) ≤ 0.080	Çekme Dayanımı, MPa 647
	Krom, (Cr) 18.0 - 20.0	Akma Dayanımı, MPa 215
	Demir, (Fe) 66.345 - 74.0	Uzama, % 52,3
	Mangan, (Mn) ≤ 2.0	Elastiklik Modülü, GPa 144,7
	Nikel, (Ni) 8.0 - 10.	Poison Oranı 0.290
	Fosfor, (P) ≤ 0.045	
	Silisyum, (Si) ≤ 1.0	
	Kükürt, (S) ≤ 0.030	

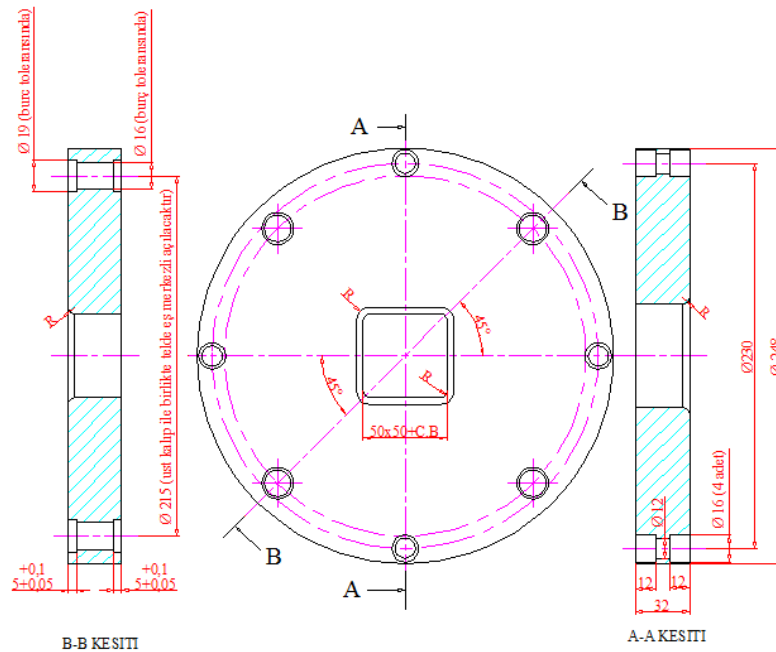
Çizelge 4.9. Bakır sac deney malzemesi kimyasal ve fiziksel özellikleri

Malzeme	Element (%)	Mekanik Özellikler
Bakır Sac	Bakır, Cu 100 %	Çekme Dayanımı, MPa 310
		Akma Dayanımı, MPa 33.3
		Uzama, % 16
		Elastiklik Modülü, GPa 104,8
		Poison Oranı 0.343

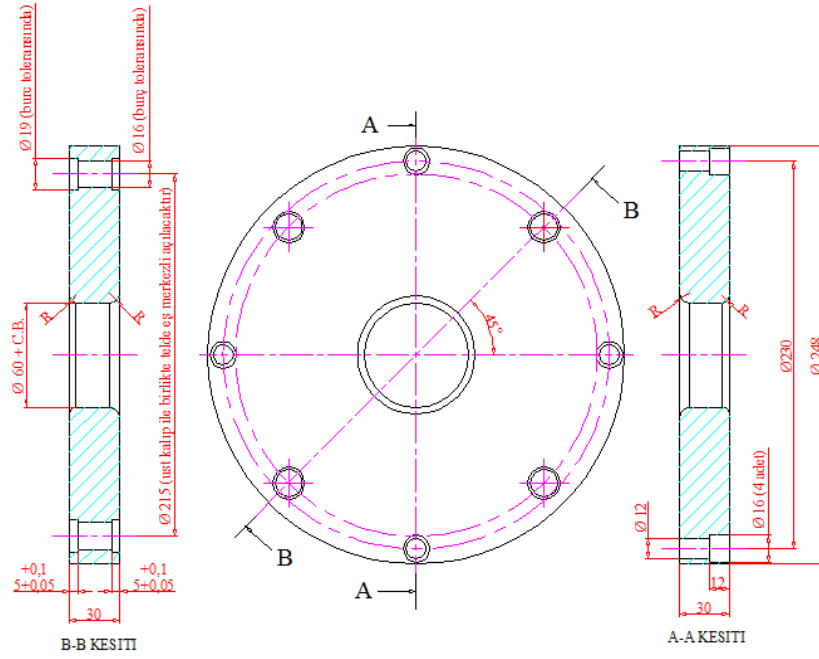
4.7. Deney Kalıpları – Zımbaları ve Teknik Özellikleri

Deneysel çalışma parametrelerinden kalıp kavisi ve ürün geometrisi için kalıplar ve zımbalar üretilmiştir. Ürün geometrisi için silindirik ve kare şekilli kalıplar ve zımbalar imal edilmiştir. Her iki kalıp geometrisi için de; 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalıp kavisi açılmıştır. Zımbalar için uç kavis değeri 12 mm sabit alınmıştır. Her bir zımba ve kalıp için 0,5 mm, 0,8 mm ve 1 mm olmak üzere üç farklı sac kalınlığında çekme boşluğu hesaplanmış ve bu durum kalıplara yansıtılmıştır.

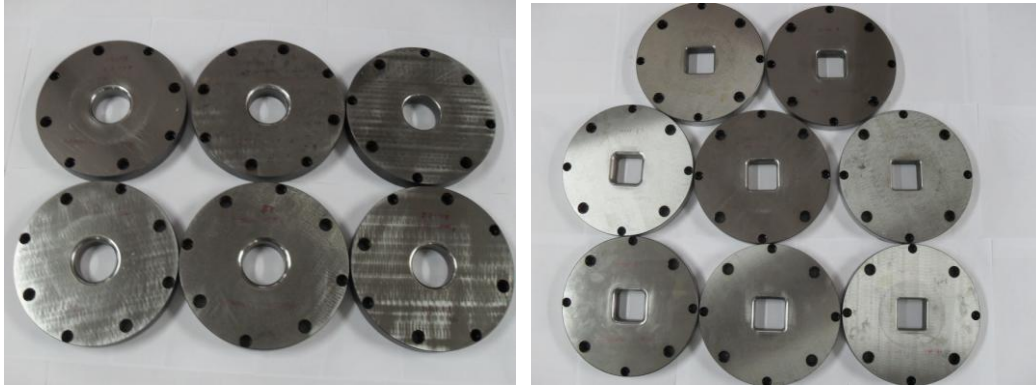
Kalıp malzemeleri olarak, AISI 4140 çelik malzeme kullanılmış ve 42-44 HRC sertlik alacak şekilde ısıtılma tabi tutulmuştur. Bir sonraki adımda malzemeler geometriye ve çekme boşluğuna göre tel erezyon tezgahında kesilerek hazırlanmıştır. Son aşamada da, kesilen malzemelere kalıp kavisleri açılmıştır. Deney parametrelerine göre 9 adet 60 mm çapında silindirik geometride, 9 adet de 50x50 mm kare geometrisinde olmak üzere 18 adet kalıp imal edilmiştir. Şekil 4.17’de imalatı yapılan kare kalıp, Şekil 4.18’de silindirik kalıp teknik resim görüntüsü ve Resim 4.11’de ise imal edilmiş kalıpların çeşitli görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.17. İmalatı yapılan kare geometrili kalıp teknik resmi

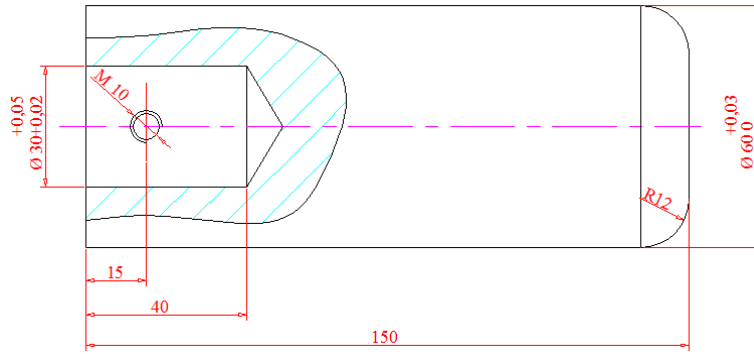


Şekil 4.18. İmalatı yapılan silindirik geometrili kalıp teknik resmi

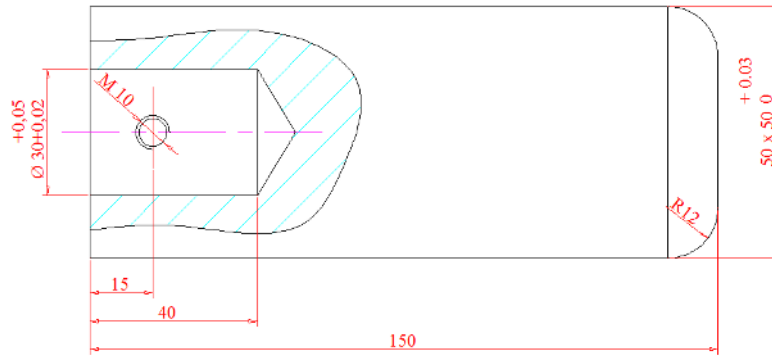


Resim 4.11. İmalatı yapılmış silindirik ve kare geometrili kalıplar

Kalıpların üretimi ile eş zamanlı olarak kare ve silindirik kalıp zımbalarının da imalatı tamamlanmıştır. Zımbaların da çalışma esnasında deforme olmasını engellemek için AISI 4140 çelik malzemeden üretilerek ısıtılma tabi tutulmuştur. Silindirik geometrili kalıplar için bir adet, kare geometrili kalıplar için ise 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalıp kavislerinde 3 adet zımba imal edilmiştir. Şekil 4.19'da silindirik geometrili kalıp zımbasının, Şekil 4.20'de ise kare geometrili kalıp zımbasının teknik resmi verilmiştir.



Şekil 4.19. Silindirik geometrili kalıp zımbası teknik resmi



Şekil 4.20. Kare geometrili kalıp zımbası teknik resmi

İmalatı yapılan kalıp zımbalarına ait görüntüler Resim 4.12’de verilmiştir.



Resim 4.12. İmalatı yapılan kalıp zımbaları ve deneysel çalışma ortamı görüntüleri

4.8. Deneysel Çalışma Parametreleri

Deney cihazının tasarım ve üretim aşamalarının tamamlanması ile birlikte Çizelge 4.10'da verilen parametrelere göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda; 729 adet silindirik geometrili, 729 adet de kare geometrili zımba ile toplamda 1458 deney yapılmıştır. Her bir deney en az 3 defa tekrar edilmiştir.

Çizelge 4.10. Deneysel çalışma parametreleri

Sac Malzeme Türü	1- Erdemir 6112 2- AISI 304 3- Bakır
Sac Kalınlığı, mm	0,5 0,8 1
Kalıp Kavisi, mm	$r_1=4$ $r_2=6$ $r_3=8$
Kalıp İçi Sıvı Basıncı, MPa	$P_1= 10$ $P_2= 20$ $P_3= 30$
Zımba Hızı, mm/s	$v_1=6$ $v_2=12$ $v_3=18$
İlkel Çap, mm	$D_1= 120$ $D_2= 130$ $D_3= 140$
Zımba Şekli	Silindirik (Çap 60 mm) Kare(50x50 mm)
Baskı Yastığı Kuvveti, kN	Çizelge 5.2 - Çizelge 5.7 'de verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda; sac malzemeye uygulanan baskı yastığı kuvveti, sabit kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Baskı yastığı kuvveti; her bir malzeme türü ve geometri için, Eş. 3.17 ve Eş. 3.18'e göre ayrı ayrı hesaplanarak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Eşitliklere göre hesaplanan ve uygulanan baskı yastığı kuvvetleri; Çizelge 4.11 - Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Erdemir 6112 sac ve silindirik geometri için baskı yastığı kuvveti

Açınım sac çapı, mm	Sac Kalınlıkları, mm					
	0,5		0,8		1	
	Baskı Yastığı Kuvveti, kN					
	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan
120	13,06	13,10	10,38	10,40	9,49	9,50
130	19,45	19,50	15,88	15,90	14,70	14,70
140	27,94	28,00	23,32	23,35	21,78	21,80

Çizelge 4.12. Erdemir 6112 sac ve kare geometri için baskı yastığı kuvveti

Açınım sac çapı, mm	Sac Kalınlıkları, mm					
	0,5		0,8		1	
	Baskı Yastığı Kuvveti, kN					
	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan
120	19,47	19,50	16,70	16,70	15,78	15,80
130	29,09	29,10	25,42	25,45	24,19	24,20
140	41,85	41,90	37,12	37,15	35,54	35,60

Çizelge 4.13. AISI 304 sac ve silindirik geometri için baskı yastığı kuvveti

Açınım sac çapı, mm	Sac Kalınlıkları, mm					
	0,5		0,8		1	
	Baskı Yastığı Kuvveti, kN					
	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan
120	24,13	24,15	19,20	19,20	17,55	17,60
130	35,95	36,00	29,36	29,40	27,17	27,20
140	51,65	51,70	43,11	43,15	40,27	40,30

Çizelge 4.14. AISI 304 sac ve kare geometri için baskı yastığı kuvveti

Açınım sac çapı, mm	Sac Kalınlıkları, mm					
	0,5		0,8		1	
	Baskı Yastığı Kuvveti, kN					
	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan
120	36,00	36,00	30,87	30,90	29,16	29,20
130	53,78	53,80	46,98	47,00	44,72	44,75
140	77,37	77,40	68,62	68,65	65,70	65,70

Çizelge 4.15. Bakır sac ve silindirik geometri için baskı yastığı kuvveti

Açınım sac çapı, mm	Sac Kalınlıkları, mm					
	0,5		0,8		1	
	Baskı Yastığı Kuvveti, kN					
	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan
120	11,56	11,60	9,20	9,20	8,41	8,45
130	17,23	17,25	14,07	14,10	13,02	13,05
140	24,75	24,80	20,66	20,70	19,29	19,30

Çizelge 4.16. Bakır sac ve kare geometri için baskı yastığı kuvveti

Açınım sac çapı, mm	Sac Kalınlıkları, mm					
	0,5		0,8		1	
	Baskı Yastığı Kuvveti, kN					
	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan	Hesaplanan	Uygulanan
120	17,25	17,25	14,79	14,80	13,97	14,00
130	25,77	25,80	22,51	22,55	21,43	21,45
140	37,07	37,10	32,88	32,90	31,48	31,50

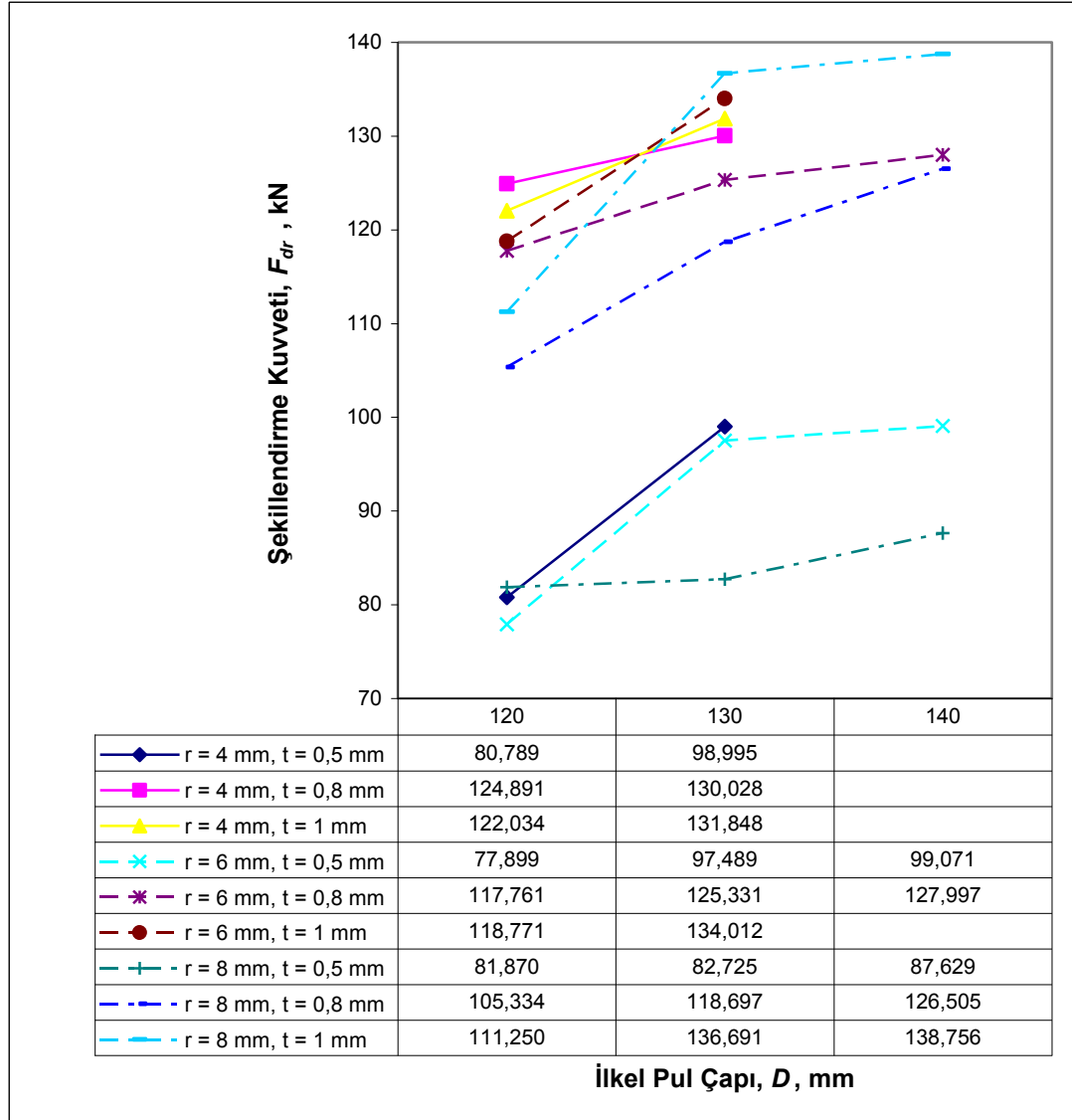
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar Çizelge 4.11’de verilen parametrelere göre gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları; her bir malzeme türü ve şekillendirme zımbası geometrisine göre gruplandırılarak ayrı ayrı yorumlanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları; işlem parametrelerinin, şekillendirme kuvveti, çekme oranı ve kalınlık değişimine etkileri açısından değerlendirilmiştir.

5.1. Erdemir 6112 Sac Malzemenin Silindirik Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları

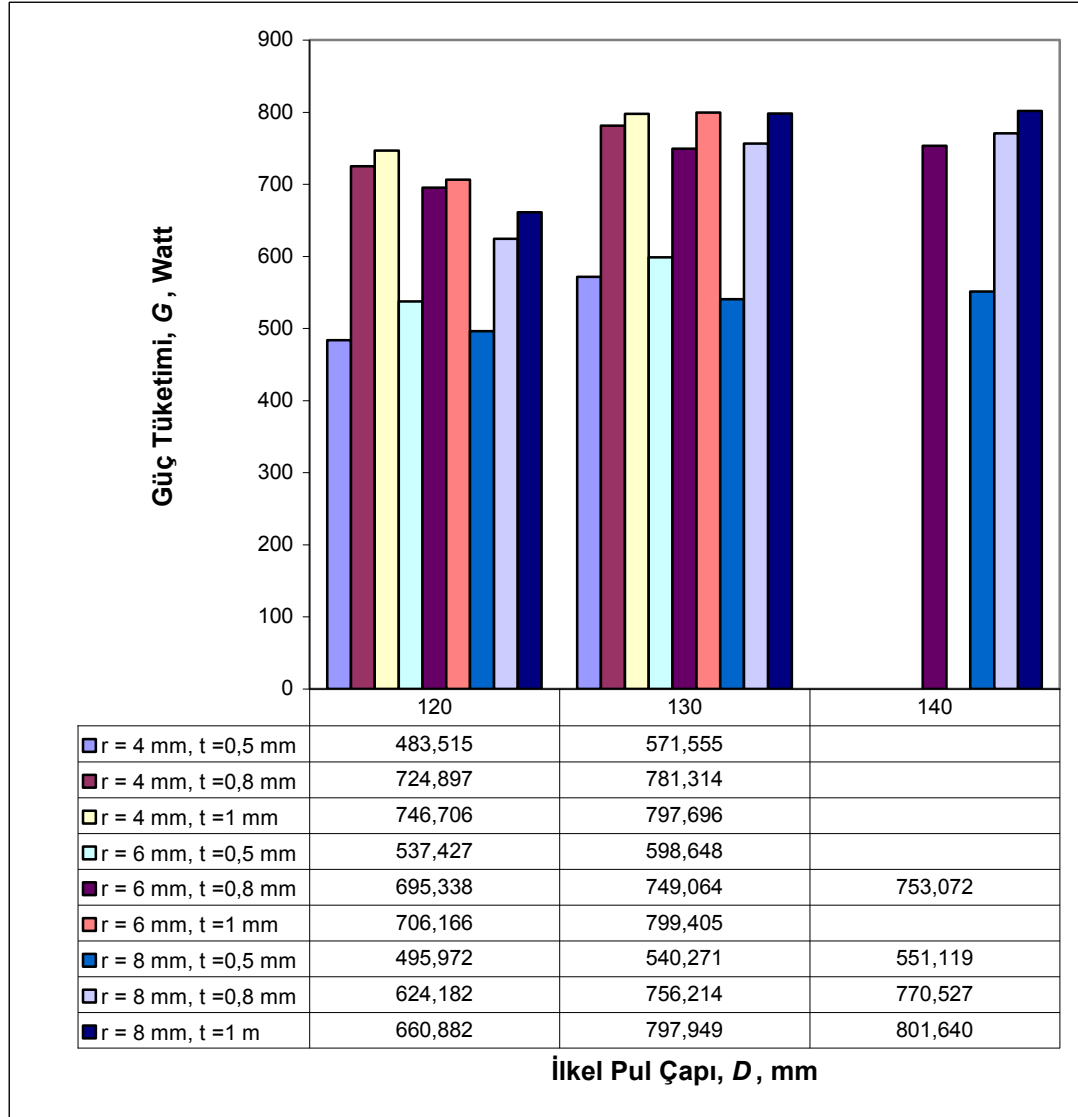
Erdemir 6112 sac metal malzemenin silindirik geometrilili zımba ile şekillendirilmesi deneylerinde, ilkel pul çapı, çekme hızı, kalıp içi basıncı, kalıp kavisi ve sac kalınlığının deney sonuçlarına etkileri değerlendirilmiştir.

Başarılı ve başarısız sonuçların gösterildiği 0,5 mm, 0,8 mm ve 1,0 mm sac kalınlıkları ve farklı kalıp kavisi için sonuçlar; ilkel pul çapına göre şekillendirme kuvveti ile güç tüketimi ilişkileri açısından Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir.



* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.1. Erdemir 6112 silindirik geometri için ilkel pul çapı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$



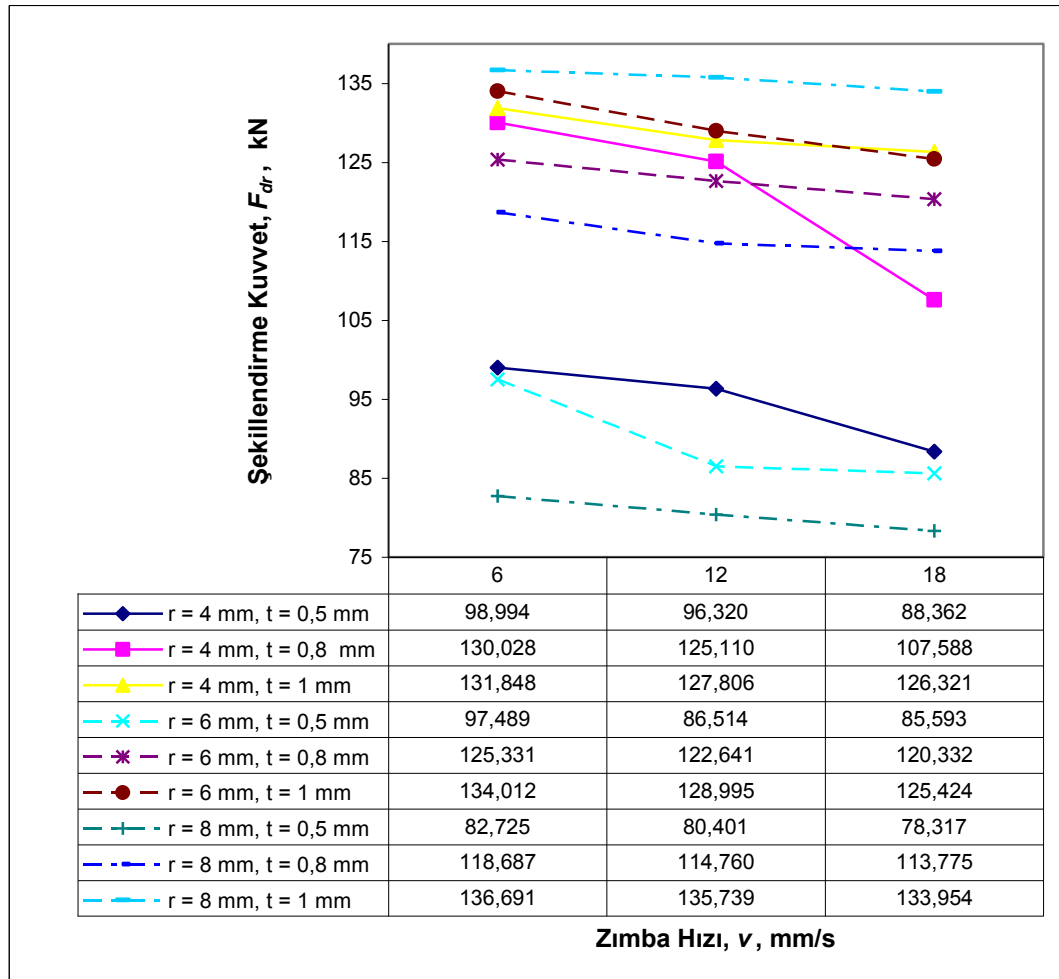
* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.2. Erdemir 6112 silindirik geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10$ MPa

İkel pul çapları; 120 mm, 130 mm ve 140 mm olmak üzere üç farklı çapta alınmıştır. İkel pul çapının artırılmasının; şekillendirme kuvvetini ve güç tüketimini arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Bu durum, şekillendirilecek alanın büyümesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, ilkel pul çapının 140 mm'ye artırılması durumunda 4 mm kalıp kavisinde ve 10 MPa ve bir deney hariç 20 MPa kalıp içi basınç değerinde yapılan şekillendirme işlemlerinde başarısızlık elde edilmiştir.

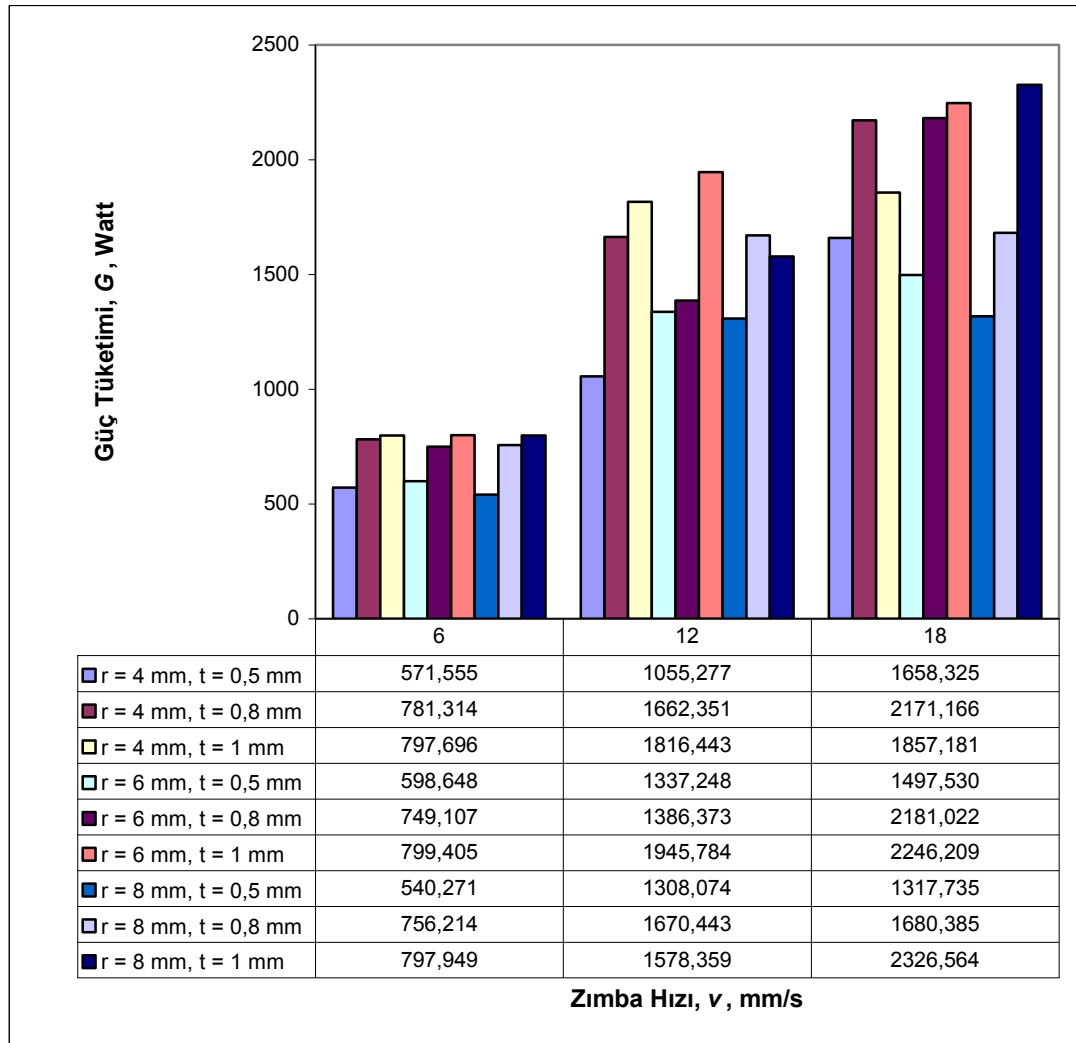
Literatürde yapılan çalışmalarda da dişi kalıp kavisinin küçülmesi ve ilkel pul çapının büyük olması [13, 47, 49] halinde şekillendirme işleminde başarısızlık olduğu bildirilmiştir. Diğer taraftan şekillendirmenin mekaniği ve geçmiş çalışmaların sonuçları açısından ilkel pul çapı artışının şekillendirme kuvvetini ve güç tüketimini artırmış olduğu bu çalışmada da ortaya konmuştur.

Deneyler, 6 mm/s, 12 mm/s ve 18 mm/s zımba hızlarında gerçekleştirilmiştir. Zımba hızı arttırıldığında, çekme kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.3). Bu durumun literatür araştırmaları ile de uyduğu ve yapılan diğer çalışmalarda da zımba hızının arttırılmasıyla şekillendirme kuvvetinin düştüğü gözlemlenmiştir [54, 90].



Şekil 5.3. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zımba hızı ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$

Şekil 5.3’de yer alan grafiklerde iki grup deneyin sonuçlarının, diğer sonuçlardan farklı eğimde grafik çizdiği görülmektedir. Bunlardan kalıp kavisi $r = 4$ mm ve sac kalınlığı $t = 0,8$ mm olan deney grubunda, üç kez tekrarlanarak elde edilen sonuçların Erdemir 6112 sac malzemede çekme hızının artışının oldukça etkili görülmüştür. Erdemir 6112 sac malzemenin daha detaylı çalışılabileceği izlenimi elde edilmiştir.



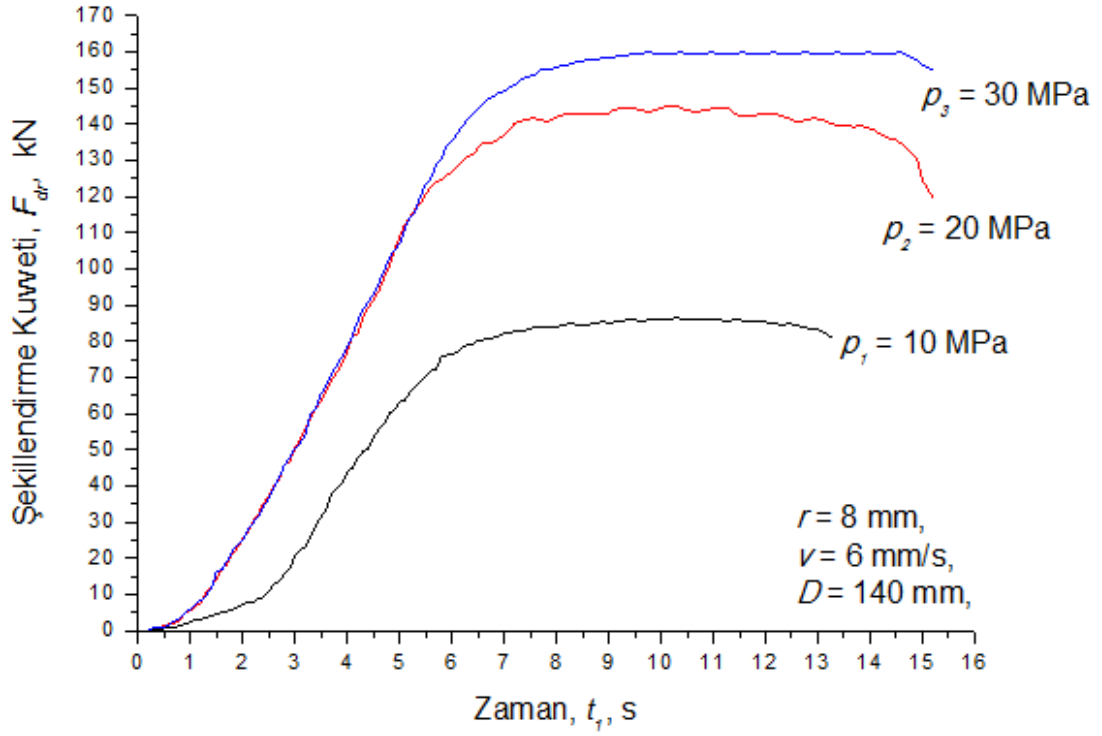
Şekil 5.4. Erdemir 6112 silindirik geometri için güç tüketimi – zımba hızı ilişkisi,
 $p = 10$ MPa, $D = 130$ mm

Zimba hızının arttırılmasının elde edilen güç tüketimi değerlerinde artışa yol açtığı görülmüştür (Şekil 5.4). Bu sonucun, şekillendirme işlem zamanının kısa olmasından kaynaklandığı bilinmektedir.

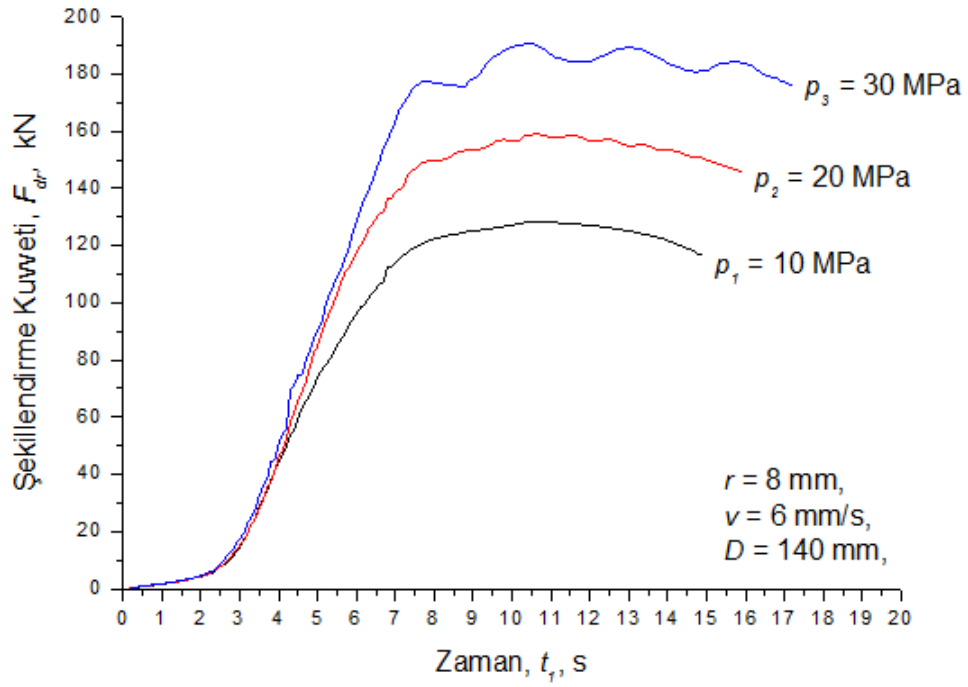
Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, kalıp içi basıncının en önemli parametrelerden birisi olduğu deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir [15, 23, 46, 54]. Zımbanın sac malzemeye temas etmesi ve kalıp içerisine girmesiyle, kalıp içerisinde oluşan hidrostatik basınç etkisinden dolayı sac malzeme daha yüksek oranda deforme edilebilmektedir.

Erdemir 6112 sac malzemenin silindirik şekillendirilmesi deneylerinde; kalıp içi basıncın artmasının etkisi, 0,5 mm sac kalınlığı ve 4 mm kalıp kavisi ile 1 mm sac kalınlığı ve 6 mm kalıp kavisi deneylerinde belirgin olarak görülmüştür. Her iki çalışmada da 10 MPa kalıp içi basınç değerinde ilkel sac numunede yırtılma olurken, 20 ve 30 MPa kalıp içi basınç değerlerinde başarılı şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Kalıp içerisindeki basınç artışına karşın, şekillendirme kuvvetinin de arttığı gözlemlenmiştir.

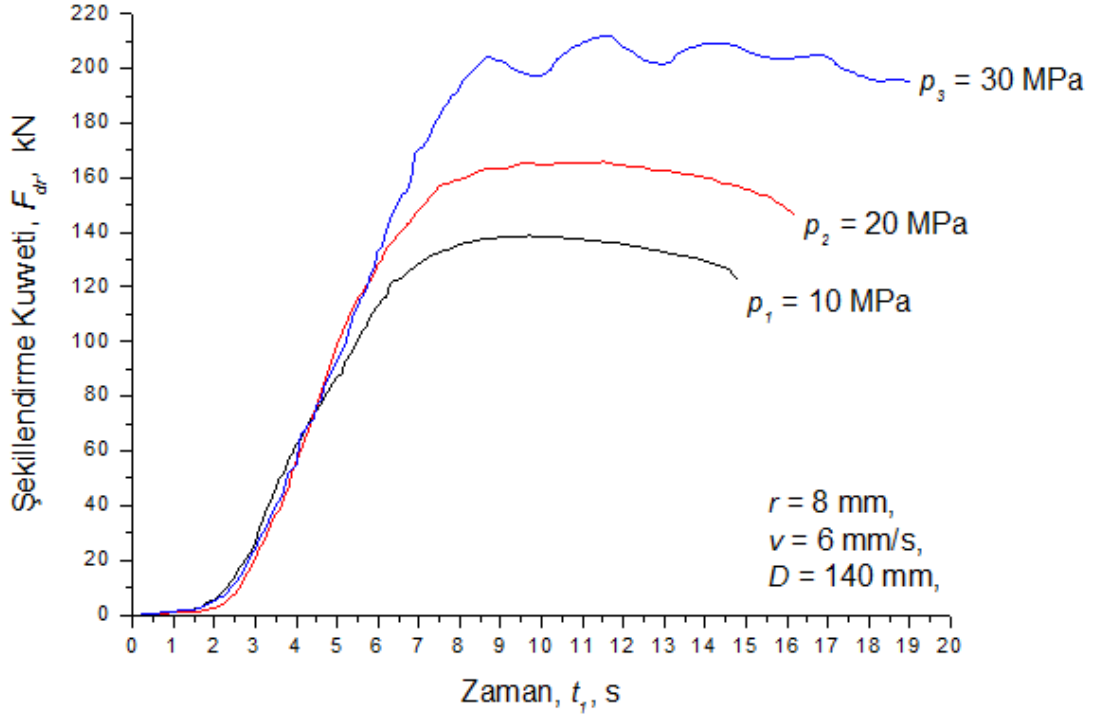
140 mm ilkel pul çapı, 8 mm kalıp kavisi ve her sac malzeme kalınlığı için, şekillendirme kuvveti – zaman ilişkileri Şekil 5.5 - Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti ve zaman ilişkisi, $t = 0, 5$ mm



Şekil 5.6. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti ve zaman ... ilişkisi, $t = 0, 8$ mm



Şekil 5.7. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti ve zaman ... ilişkisi, $t = 1$ mm

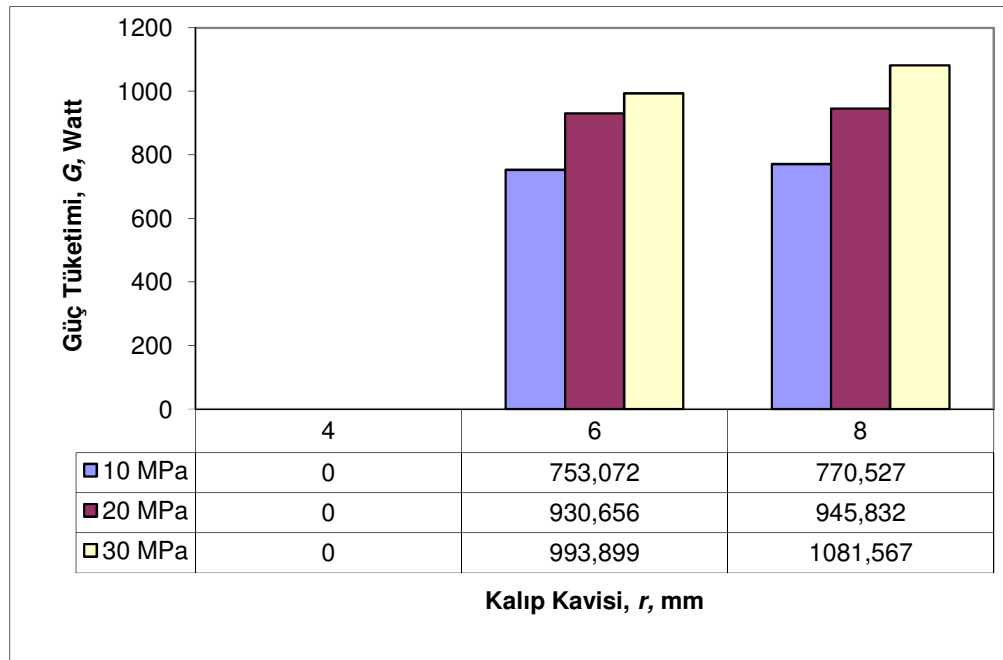
Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de görüldüğü gibi, sac kalınlığının arttığı numunelerin şekillendirilmesinde, kalıp içi basınç değerini sınırlayan valf kumandasının ve basınç transdüserinin kontrol sistemi esnasında cevap zamanından kaynaklanan dalgalanmaya yol açtığı görülmektedir. Mevcut sistemde cevap alma süresinin, daha düşük değerlere, donanımlarla birlikte çekilmesiyle bu dalgalanmanın azalacağı ortadadır. Yüksek basınçlarda ortaya çıkan bu durumum yüksek sıvı basıncı (100 MPa ve üzeri) ile şekillendirmenin yapılacağı gelecekteki çalışmalara önemli bir ışık tutacağı düşünülmektedir.

Kalıp kavisinin $r = 4$ mm ve $r = 6$ mm olduğu deneylerden elde edilen başarılı ve başarısız şekillendirme işlemlerinin grafiklerine örnekler Ek 2’de verilmiştir.

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, kalıp kavisinin şekillendirme kuvveti ve çekme oranına etkileri ayrıca değerlendirilmiştir. Kalıp kavisinin artması ile birlikte şekillendirme kuvvetinin ve güç tüketiminin de arttığı görülmüştür. 4 mm kalıp

kavisi ve 10 MPa kalıp içi basınç değerlerinde 0,5 mm, 0,8 mm ve 1 mm sac kalınlıkları için, 140 mm ilkel sac numunelerin şekillendirilmesi işlemlerinde başarısız olunmuştur. Ancak, kalıp kavisi değerinin 6 mm ve 8 mm değerlerine çıkartılması durumunda 140 mm ilkel pul çapında başarılı şekillendirme işlemi yapılabilmektedir. Bu durum, kalıp kavisinin artırılması ile birlikte sacın şekillendirilebilirliğinin arttığını ortaya koymuştur.

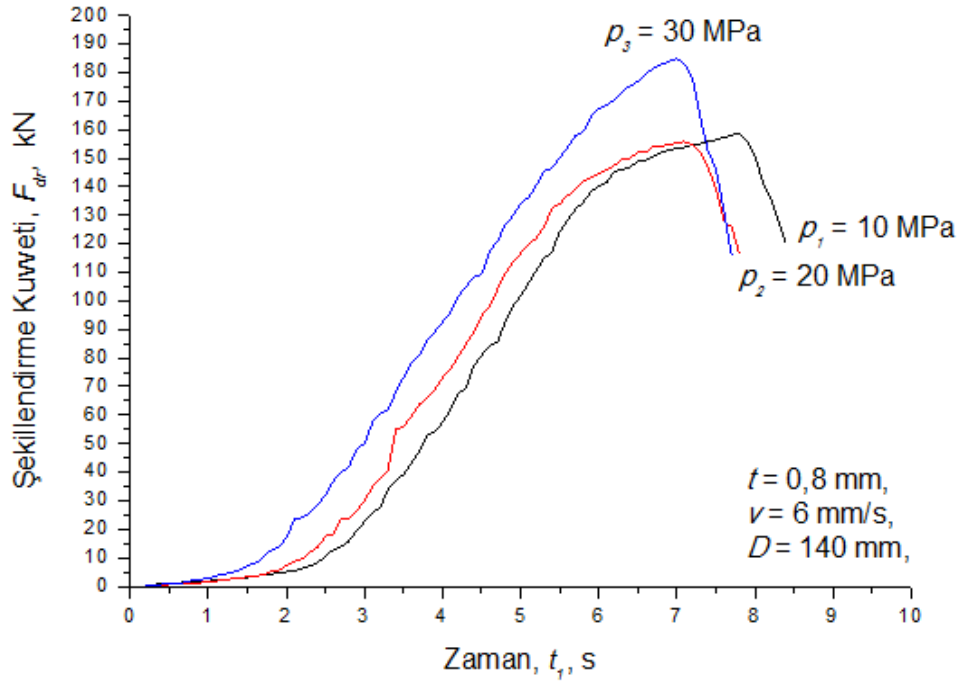
140 mm ilkel pul çapı ve 0,8 mm sac kalınlığı için, kalıp kavisi ve kalıp içi basıncı değerlerine göre güç tüketimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Başarısız olan şekillendirme işlemleri için güç tüketimi değerleri hesaplamaaya dahil edilmemiştir.



* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

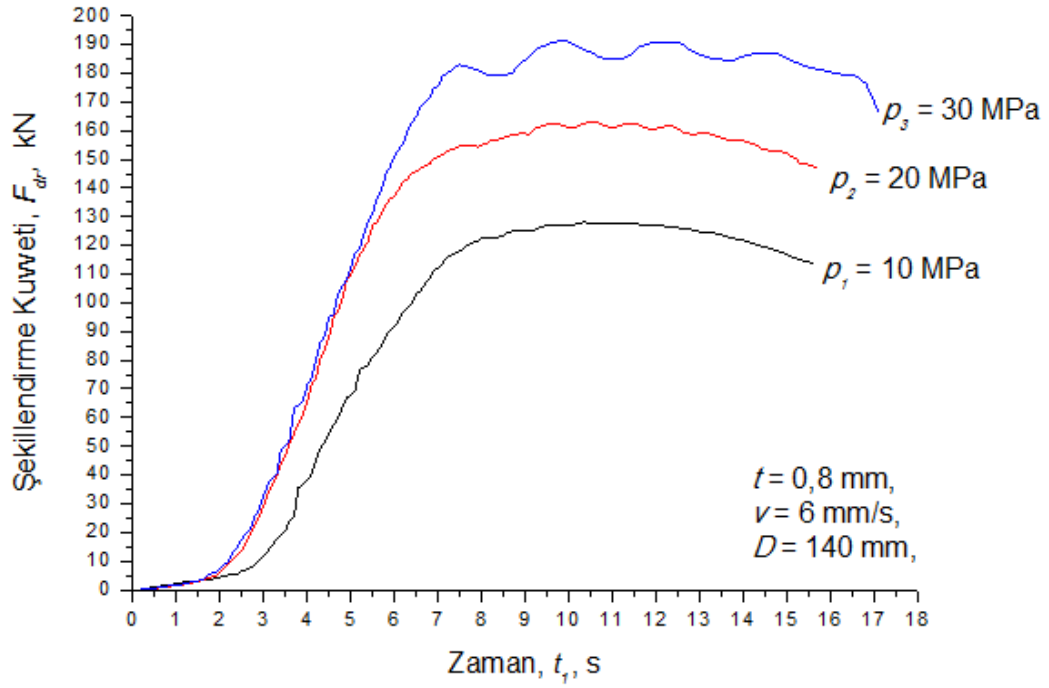
Şekil 5.8. Erdemir 6112 silindirik geometri için güç tüketimi – kalıp kavisi ilişkisi, $t = 0,8$ mm, $D = 140$ mm.

140 mm ilkel pul çapı ve 0,8 mm sac kalınlığında, farklı kalıp kavisi değerleri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkileri Şekil 5.9 – Şekil 5.11’de verilmiştir.

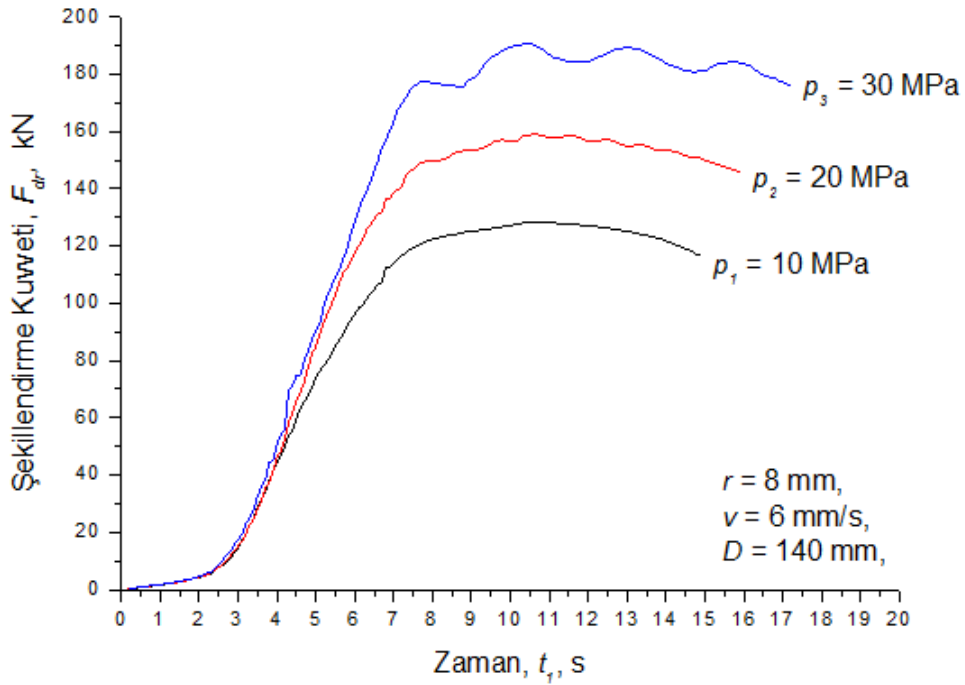


Şekil 5.9. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 4 \text{ mm}$

Şekil 5.9 incelendiğinde, sac numunenin yaklaşık 7 s sonrasında yırtılma yoluyla deforme olduğu, grafik üzerinde ani şekillendirme kuvveti düşüşü olarak görülmektedir.

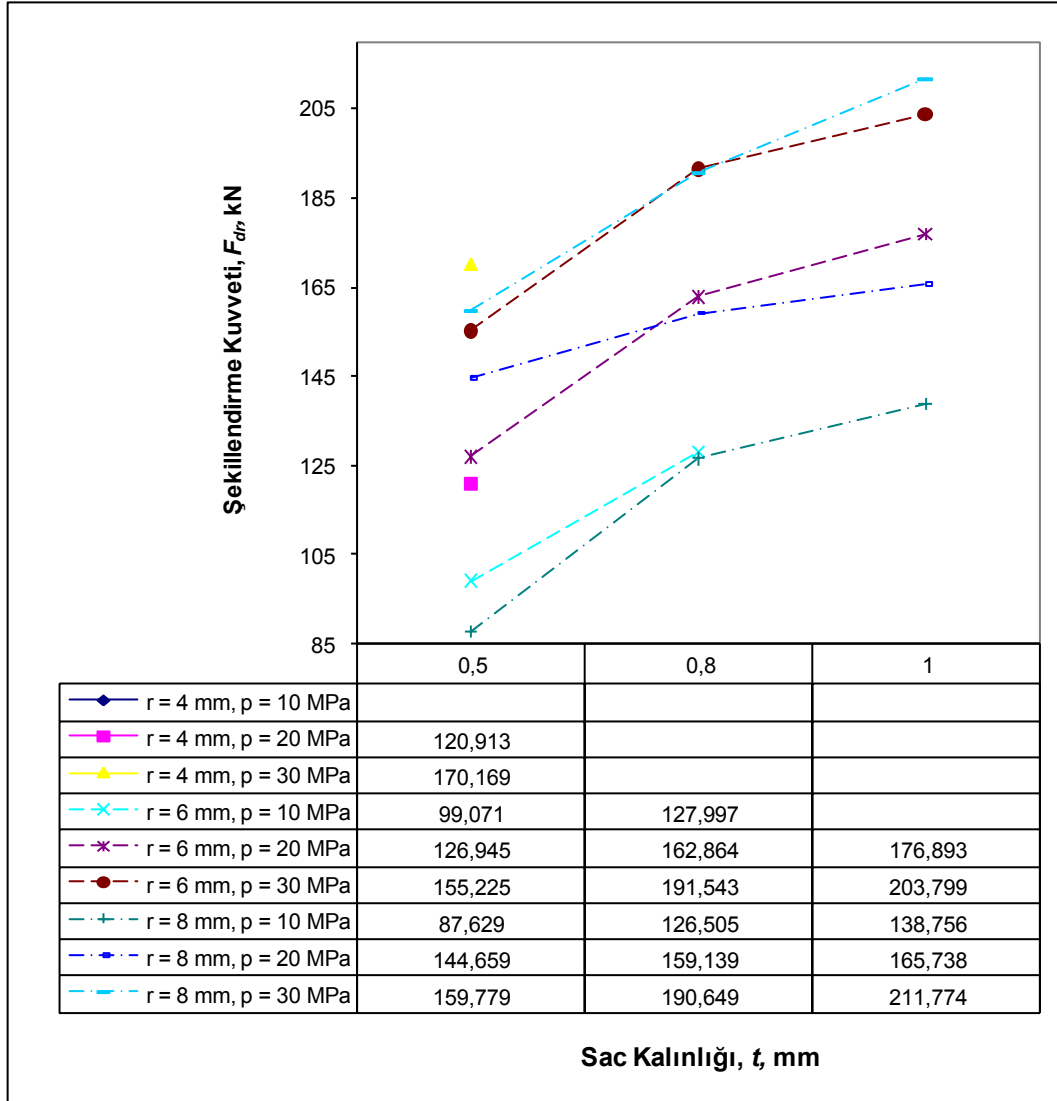


Şekil 5.10. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 6$ mm



Şekil 5.11. Erdemir 6112 silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 8$ mm

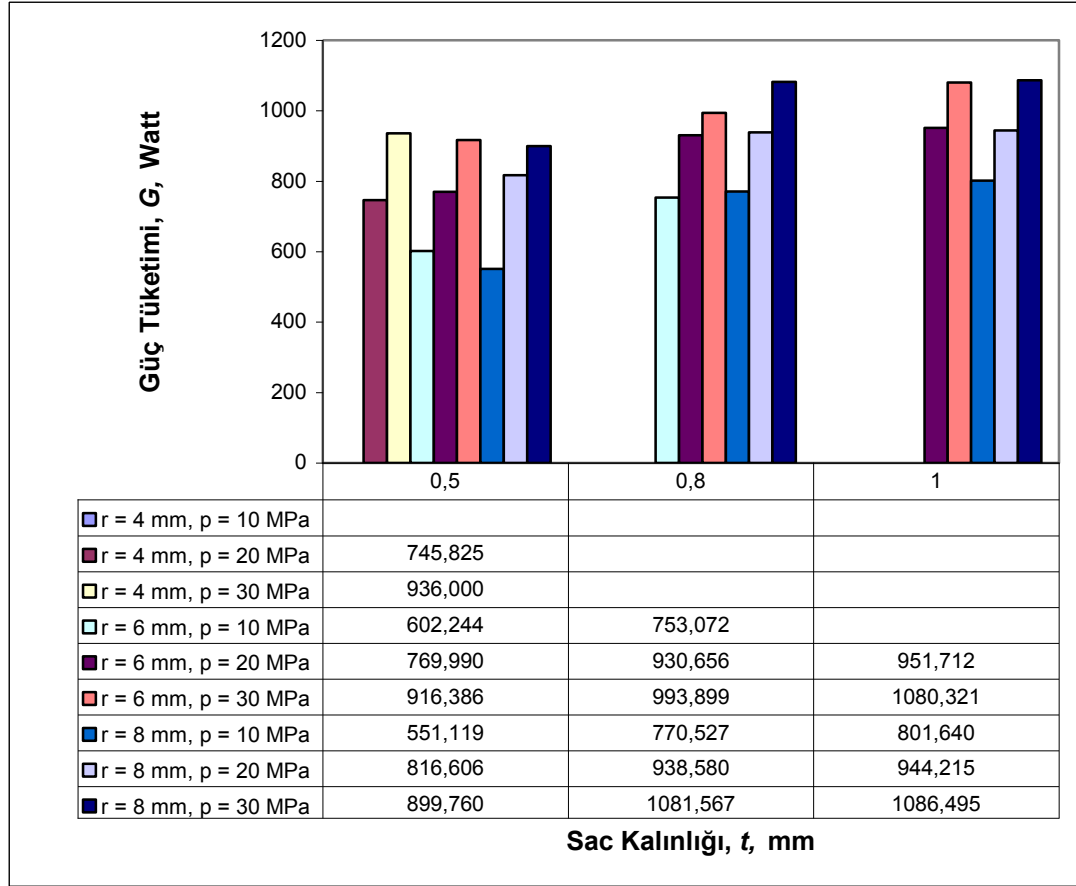
Çalışma kapsamında incelenen bir diğer parametre sac kalınlığı olmuştur. Sac kalınlığındaki artışın, şekillendirme kuvvetini ve güç tüketimini arttırdığı tespit edilmiştir. Sac kalınlığındaki artışın 4 mm kalıp kavisi değerinde şekillendirilebilirliği başarısız kıldığı görülmüştür. Bu durum; hidromekanik derin çekme işlemlerinde etkili olan kalıp içi basıncının, sac kalınlığı arttıkça hidrostatik basıncın şekillendirmeye yaptığı olumu etkisinin azalmasından kaynaklandığı bilinmektedir [13, 49]. Sac kalınlığının ince olduğu uygulamalarda, kalıp içi basıncın sac malzemenin zımba etrafında kolay şekil almaya katkı sağladığı ancak, sac kalınlığının bu katkıyı azalttığı görülmektedir. İlkel pul çapı 140 mm, 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalıp kavisi değerleri için, şekillendirme kuvveti ve sac kalınlığı ilişkisi Şekil 5.12’de, güç tüketimi ve sac kalınlığı ilişkisi de Şekil 5.13’de verilmiştir.



* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.12. Erdemir 6112 silindirik geometri şekillendirme kuvveti – sac kalınlığı ilişkisi, $D = 140$ mm

Literatürde yer alan çalışmalarda [13, 49] da olduğu gibi sac malzemenin kalınlığının artışının hem şekillendirme kuvvetini, hem de güç tüketimini arttırdığı tespit edilmiştir.



* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.13. Erdemir 6112 silindirik geometri güç tüketimi – sac kalınlığı ilişkisi,
 $D = 140$ mm

Silindirik numuneler için; çekme oranı limitleri de elde edilmiştir. Her bir sac kalınlığı için, en büyük 2,33 çekme oranına ulaşılabilmiştir. Şekillendirilen numunelere ait örnek Resim 5.1 'de verilmiştir.



a)

b)

c)

Resim 5.1. Erdemir 6112 sac malzemedan silindirik şekillendirilmiş parçalar,

a) Çekme Oranı = 2,0 ($D=120$ mm, $t = 1$ mm, $p = 10$ MPa),

b) Çekme Oranı = 2,16 ($D=130$ mm, $t = 1$ mm, $p = 10$ MPa),

c) Çekme Oranı = 2,33 ($D=140$ mm, $t = 1$ mm, $p = 10$ MPa),

Resim 5.1. incelendiğinde, çekme oranının arttıkça hadde yönünden dolayı oluşan kulaklaşmanın da arttığı gözlemlenmiştir.

Kalıp kavis ve kalıp içi basıncı artışının çekme oranını arttırdığı görülmüştür. Sac kalınlığı artışının kalıp kavis değerin küçük olduğu 4 mm değerinde çekme oranına olumsuz etki ettiği gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen çekme oranları, Çizelge 5.1’de verilmiştir.

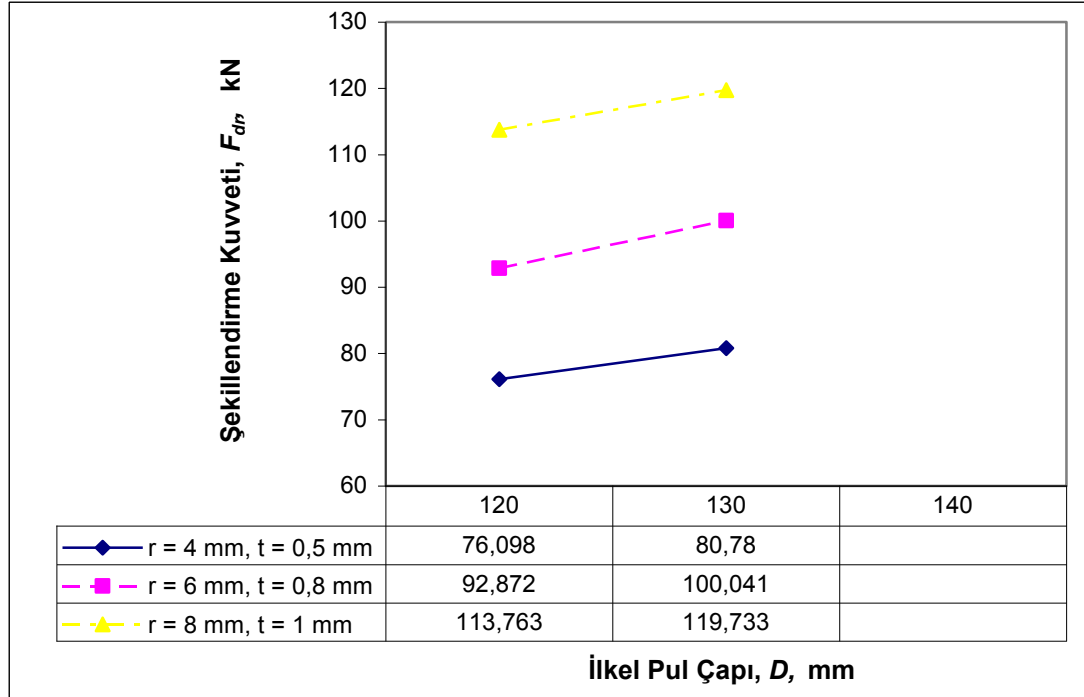
Çizelge 5.1. Erdemir 6112 sac malzeme silindirik geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları

Sac Kalınlığı, mm	Kalıp Kavisi, mm	Kalıp İçi Basıncı, MPa	Elde Edilebilen Çekme Oranları
0,5	4	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	6	10	2,33
		20	2,33
		30	2,33
	8	10	2,33
		20	2,33
		30	2,33
0,8	4	10	2,16
		20	2,16
		30	2,16
	6	10	2,33
		20	2,33
		30	2,33
	8	10	2,33
		20	2,33
		30	2,33
1,0	4	10	2,16
		20	2,16
		30	2,16
	6	10	2,33
		20	2,33
		30	2,33
	8	10	2,33
		20	2,33
		30	2,33

5.2. Erdemir 6112 Sac Malzemenin Kare Geometrilik Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları

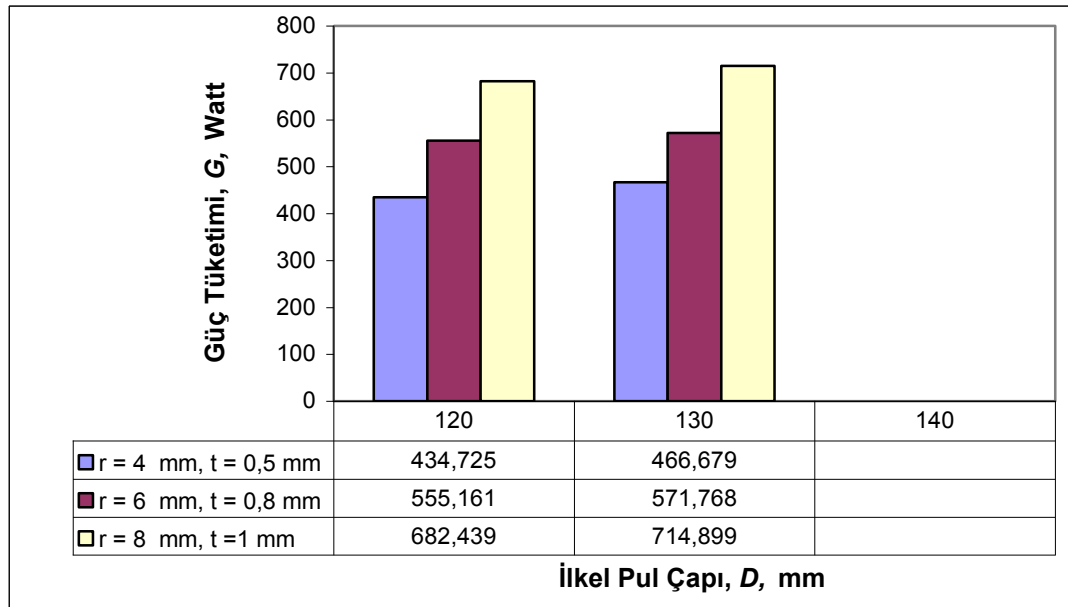
Literatürde hidromekanik derin çekme çalışmalarında kare biçimli zımbaların ve numunelerin çalışıldığı görülmüştür. Bu çalışma kapsamında, farklılık olması bakımından kare profilli çekme de çalışılmıştır.

İlkel pul çapları olarak, 120 mm, 130 mm ve 140 mm ölçüleri dikkate alınarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı malzeme kalınlıkları ve kalıp kavisi için elde edilen, ilkel pul çapı ve şekillendirme kuvveti ile güç tüketimi ilişkileri Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de verilmiştir.



* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.14. Erdemir 6112 kare geometri için ilkel pul çapı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$

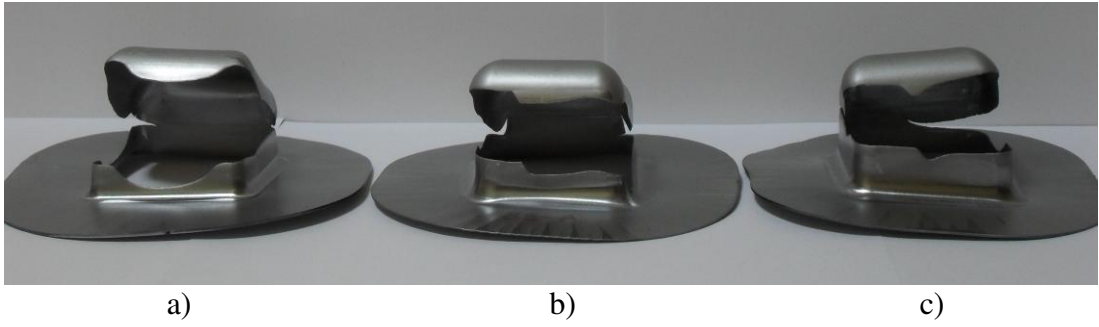


* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.15. Erdemir 6112 kare geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$

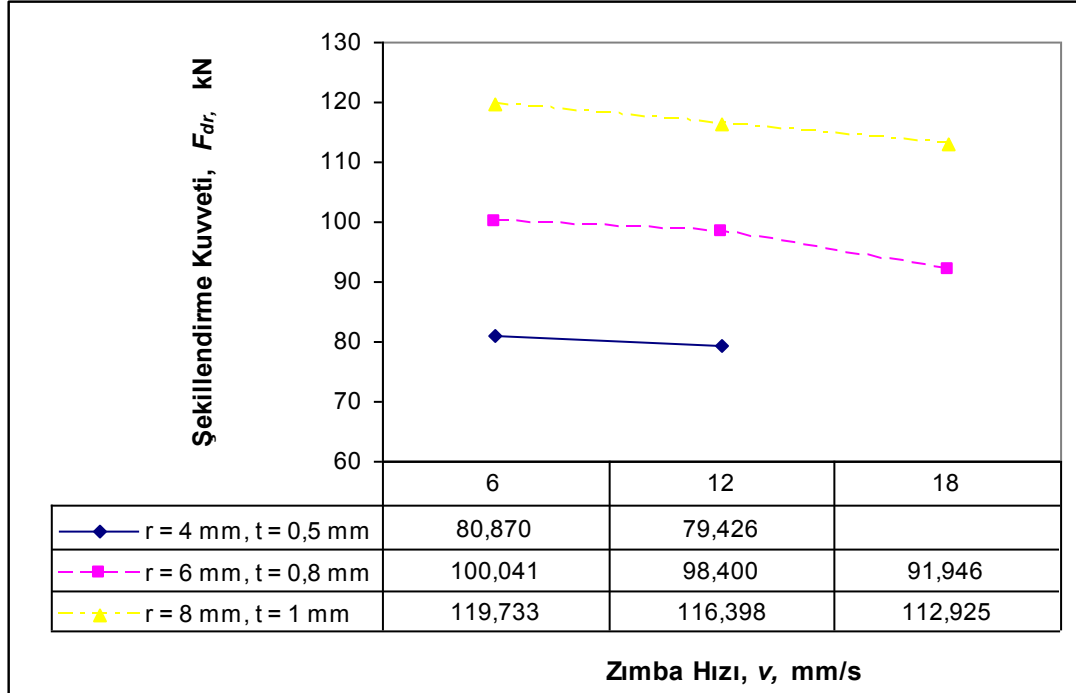
Kare geometrilerin hidromekanik derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesi işlemlerinde de, ilkel pul çaplarının arttırılmasının şekillendirme kuvveti ve güç tüketimini de arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15).

İlkel pul çapının 140 mm'ye arttırılması durumunda, bütün deney parametrelerinde şekillendirme işlemlerinde başarısızlık elde edilmiştir. Başarısız şekillendirmeye ait örnek numuneler Resim 5.2'de verilmiştir.



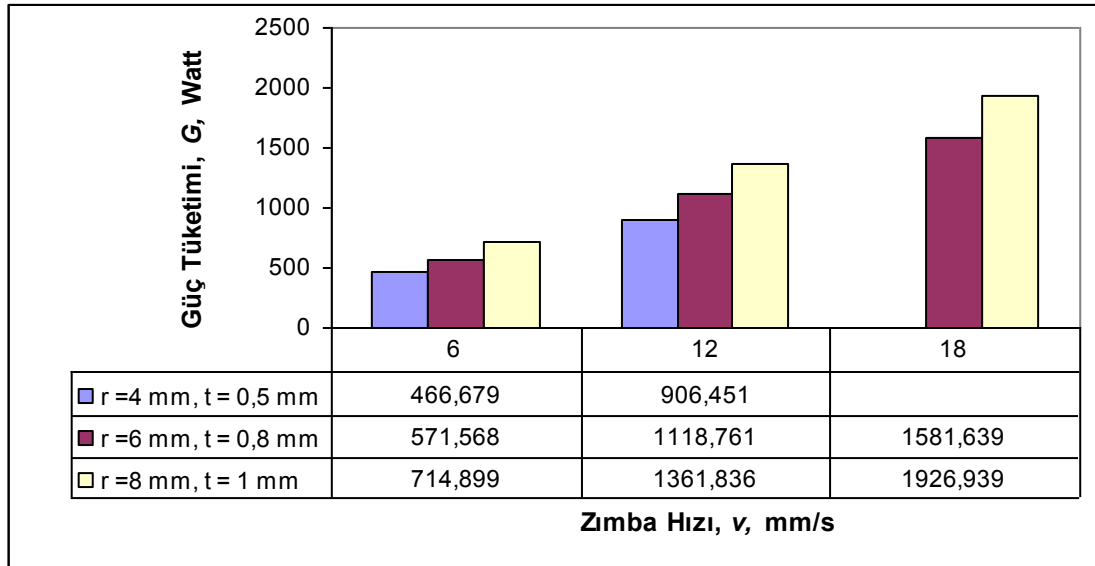
Resim 5.2. 140 mm ilkel pul çapında şekillendirilebilirlik denemeleri
a) $t = 0,5$ mm, b) $t = 0,8$ mm, c) $t = 1$ mm,

Zımba hızının arttırılması durumunda şekillendirilme kuvvetinin azaldığı ancak güç tüketiminin de arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5.16-Şekil 5.17).



* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.16. Erdemir 6112 kare geometri zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi,
 $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$.

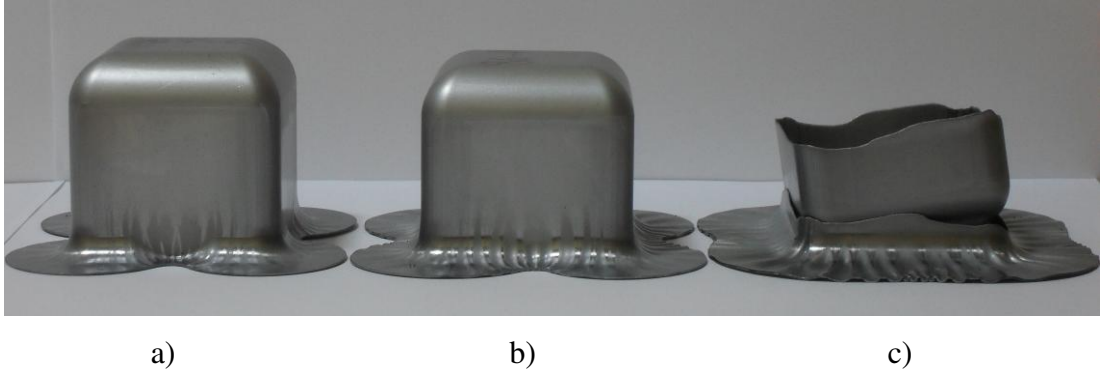


* : Boş olan hücreler başarısız şekillendirme işlemini ifade etmektedir.

Şekil 5.17. Erdemir 6112 kare geometri zımba hızı – güç tüketimi ilişkisi,
 $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$.

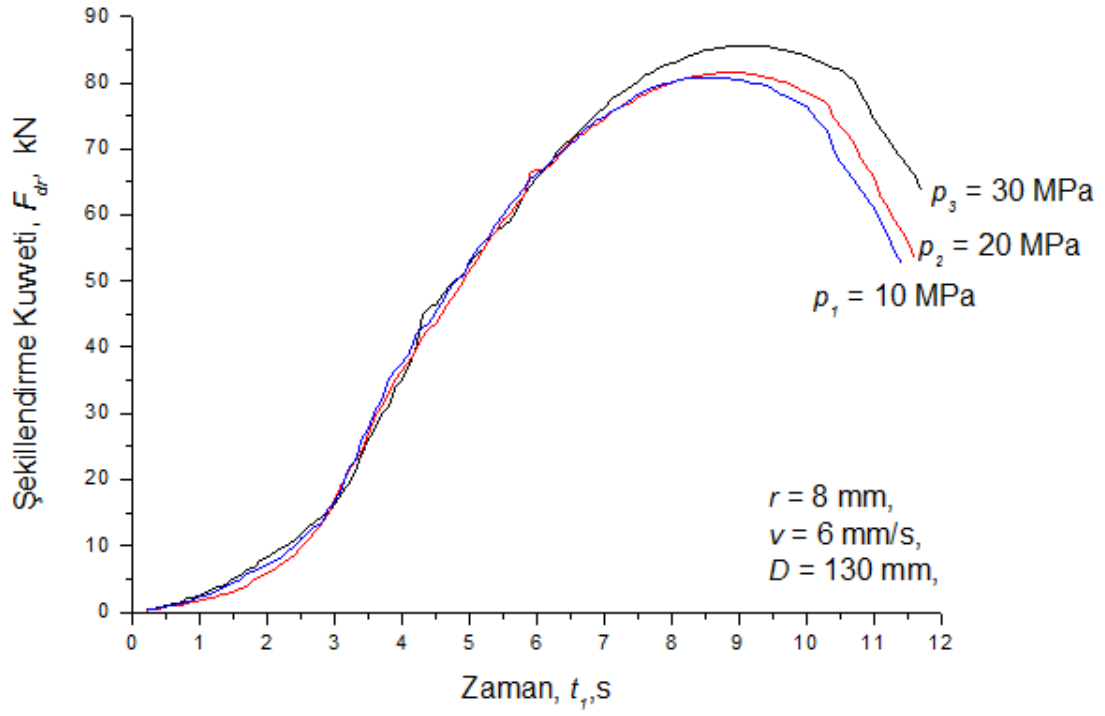
Zımba hızının etkisi, deneysel çalışmalarda belirgin bir şekilde gözlemlenebilmiştir. Zımba hızının artırılması durumunda küçük kalıp kavisi değerlerinde

şekillendirilebilirliğin azaldığı ve sac malzemenin yırtıldığı görülmüştür (Şekil 5.16). 4 mm kalıp kavisi değerinde; 6 mm/s ve 12 mm/s şekillendirme hızlarında en büyük 2.6 çekme oranı yakalanmış, 18 mm/s hızında başarısız sonuç elde edilmiştir. Şekillendirme görüntüleri Resim 5.3’de verilmiştir.

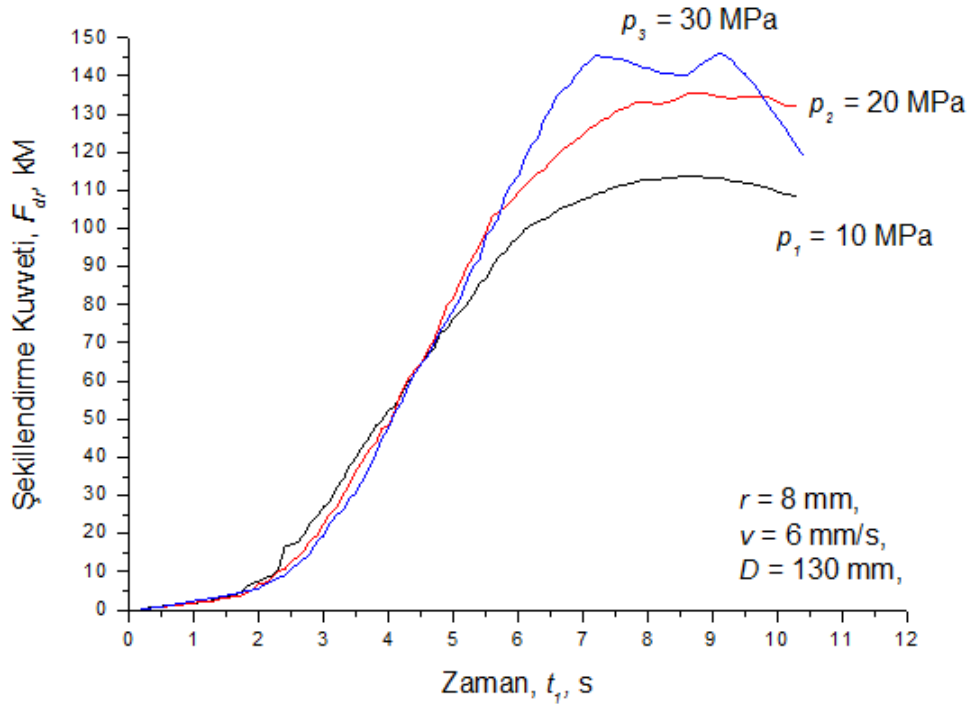


Resim 5.3. Farklı zımba hızlarında şekillendirme çalışmaları ($t = 0,5$ mm, $p=10$ MPa)
a) 6 mm/s, b) 12 mm/s, c) 18 mm/s deformasyon hızları

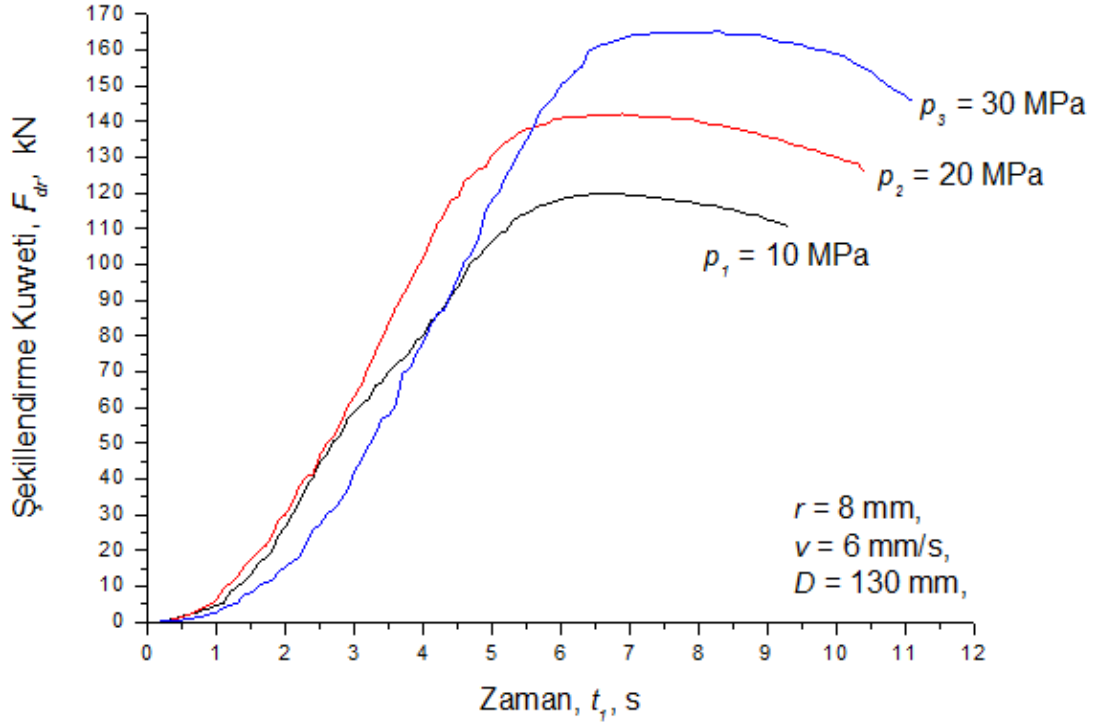
Kalıp içi basınç artışının kare profilli çekmelerde şekillendirilebilirliğe etkilerine bakıldığında, kalıp içerisindeki basınç artışının şekillendirme kuvvetinin de arttığı gözlemlenmiştir. 130 mm ilkel pul çapı, 8 mm kalıp kavisi ve her bir sac malzeme kalınlığı için, şekillendirme kuvveti-zaman ilişkileri Şekil 5.18 – Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.18. Erdemir 6112 kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,5$ mm



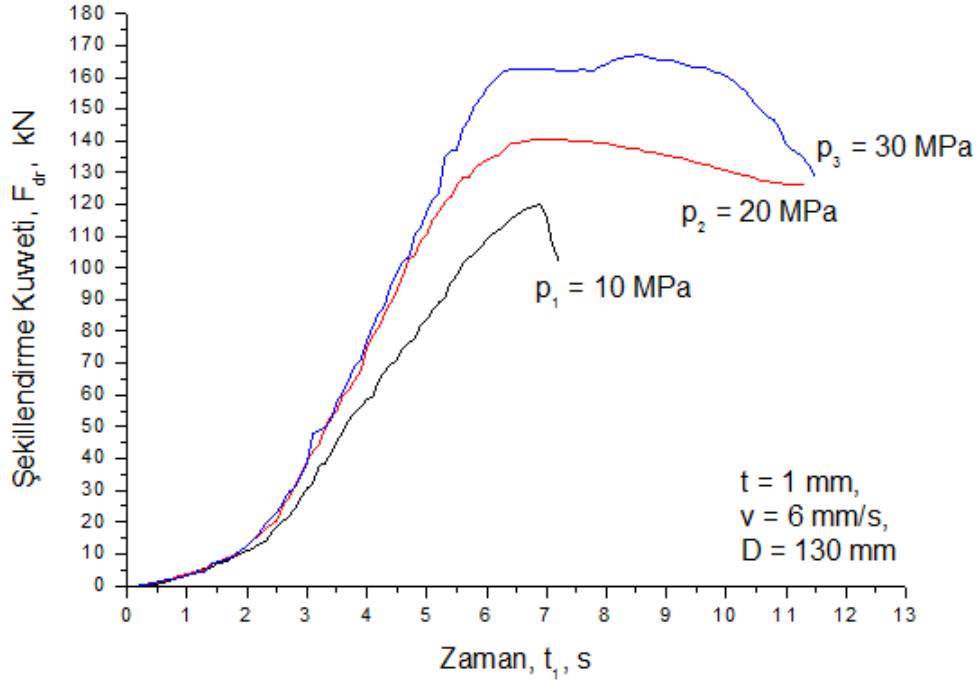
Şekil 5.19. Erdemir 6112 kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,8$ mm



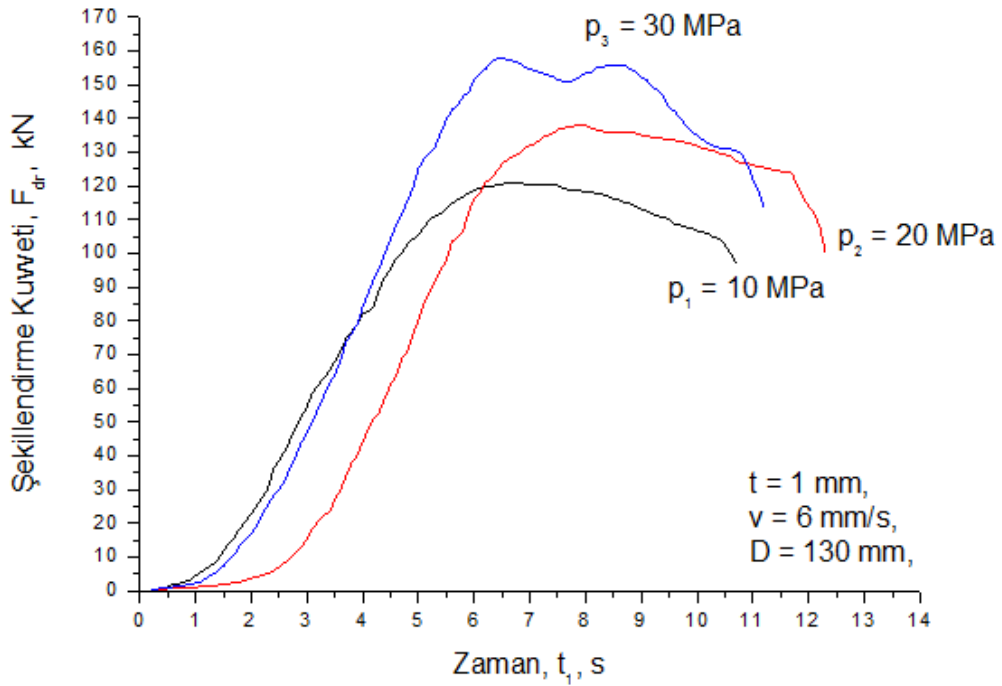
Şekil 5.20. Erdemir 6112 kare geometri şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi,
 $t = 1$ mm

Deneysel çalışmalarda, kalıp içi basıncındaki artışın şekillendirilebilirliği arttırdığı tespit edilmiştir. 130 mm ilkel pul çapı ve 4 mm kalıp kavisi değerlerinde, 0,8 mm ile 1 mm sac kalınlıklarında 10 MPa kalıp içi basıncında sac malzeme şekillendirilemeden yırtılırken, 20 MPa ve 30 MPa kalıp içi basınç değerlerinde şekillendirme işlemi yapılabilmektedir.

Kalıp kavisindeki artışın şekillendirilebilirliği arttırdığı gözlemlenmiştir. 130 mm ilkel pul çapının, 10 MPa kalıp içi basıncı ve 4 mm kalıp kavisinde şekillendirilmesi işlemlerinde 0,8 mm ve 1 mm sac malzeme kalınlıkları için başarısız olunurken, 6 mm ve 8 mm kalıp kavislerinde başarılı olunmuştur. Bu durum, kalıp kavisindeki artışın şekillendirilebilirliği artırdığını göstermiştir. 130 mm ilkel pul çapı ve 1 mm sac kalınlığında, farklı kalıp kavisleri için şekillendirme kuvveti-zaman ilişkileri Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmiştir.

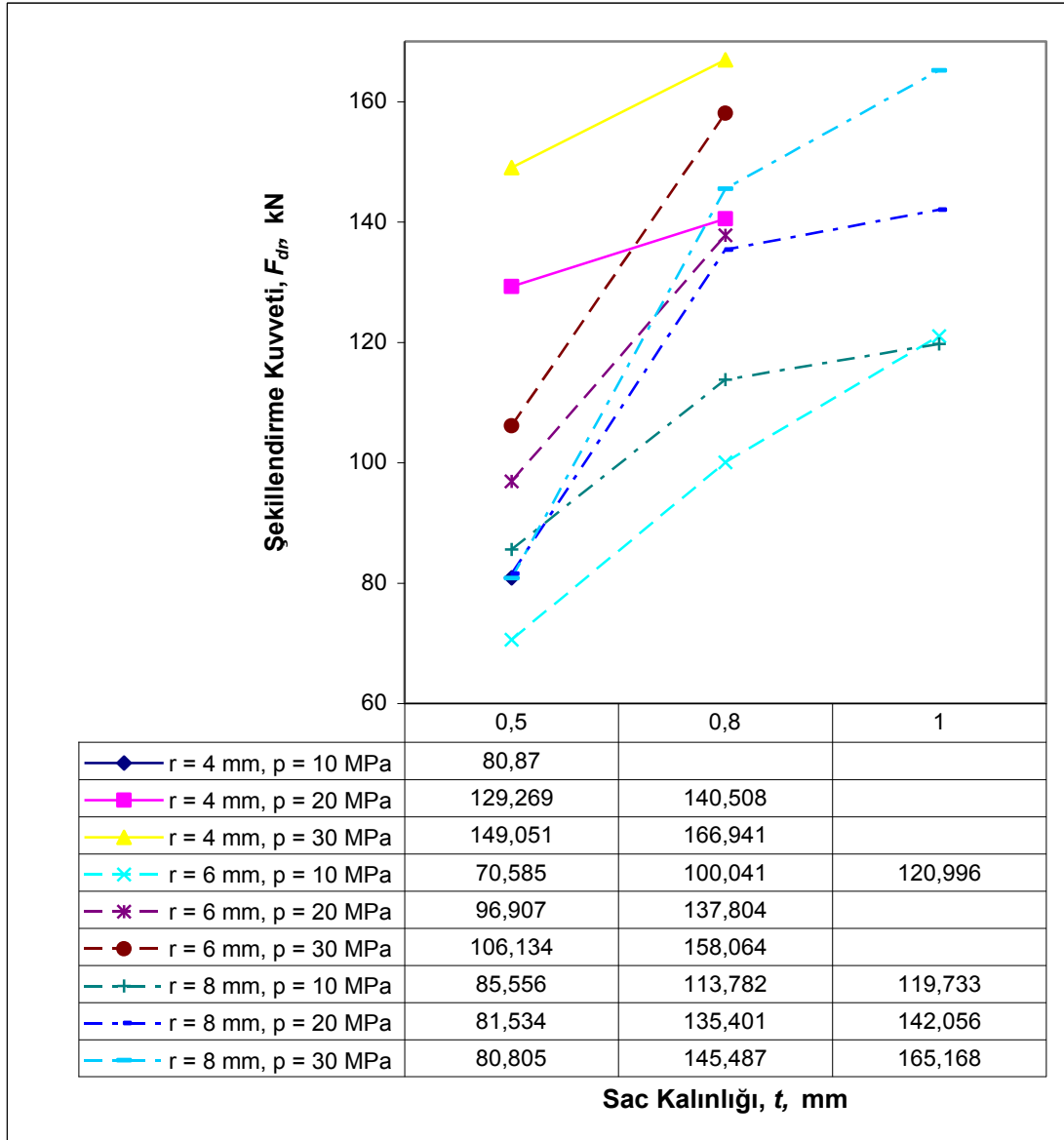


Şekil 5.21. Erdemir 6112 kare geometri şekillendirme kuvveti –zaman ilişkisi, $r = 4$ mm

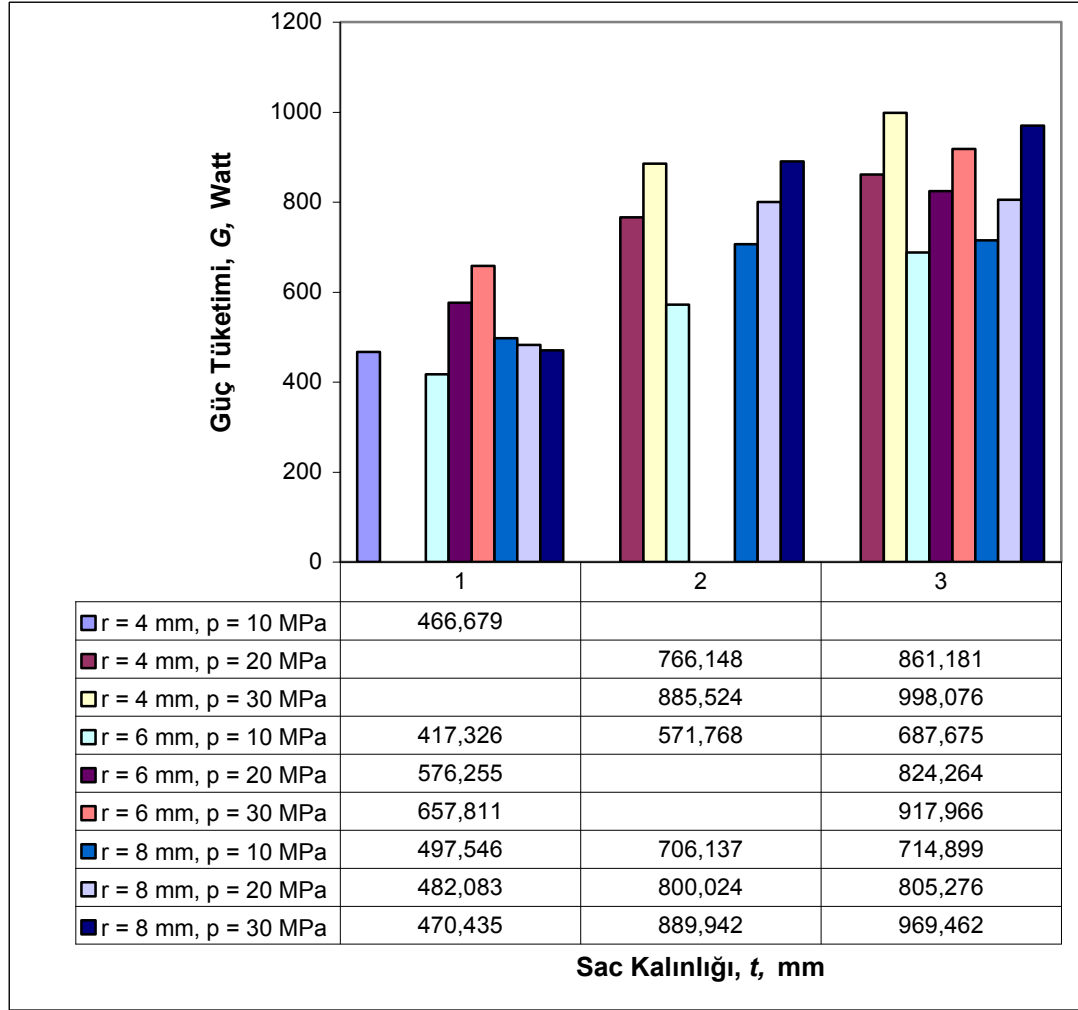


Şekil 5.22. Erdemir 6112 kare geometri şekillendirme kuvveti –zaman ilişkisi, $r = 6$ mm

130 mm ilkel pul çapı ve her kalıp kavis, sac kalınlığı, kalıp içi basınç değerleri için şekillendirme kuvveti ve sac kalınlığı ilişkisi Şekil 5.23’de, güç tüketimi ve sac kalınlığı ilişkisi de Şekil 5.24’de verilmiştir.



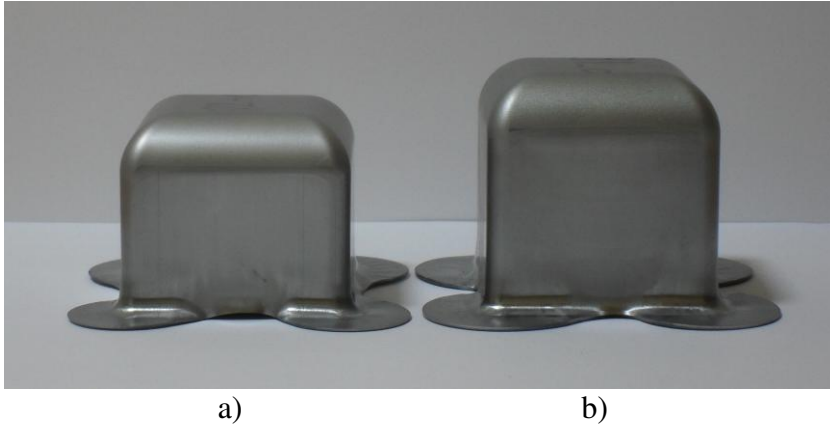
Şekil 5.23. Erdemir 6112 kare geometri için sac kalınlığı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $D = 130$ mm



Şekil 5.24. Erdemir 6112 kare geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi,
 $D = 130$ mm

Sac kalınlığındaki artışın, şekillendirme kuvvetini ve güç tüketimini arttırdığı görülmüştür (Şekil 5.23 – Şekil 5.24). Sac malzeme kalınlığındaki artışın, silindirik şekillendirme işleminde olduğu gibi kare şekillendirme işleminde de şekillendirilebilirliği azalttığı tespit edilmiştir. 4 mm kalıp kavisi, 130 mm ilkel pul çapı, 10 MPa kalıp içi basınç değerlerinde, 0,5 mm sac kalınlığında başarılı şekillendirme olmuş, 0,8 mm ve 1 mm kalınlıklarda başarılı bir şekillendirme işlemi yapılamamıştır. Bu durum, kalıp içerisindeki basıncın sac malzemenin zımba etrafında kolay şekil almaya katkı sağladığı ancak, sac kalınlığının bu katkıyı azaltmasından kaynaklanmakta olduğu görülmüştür.

Erdemir 6112 sac malzemenin kare geometrili zımba ile hidromekanik şekillendirme çalışmalarında tek seferde 0,5 mm, 0,8 mm ve 1 mm olmak üzere her bir sac malzeme kalınlığı için en büyük 2,6 çekme oranına ulaşılabilmiştir. Şekillendirilen numunelere ait örnek Resim 5.4’de, işlem parametrelerine göre elde edilebilen çekme oranı sınırları ise Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Resim 5.4. Erdemir 6112 sac malzemedan kare şekillendirilmiş parçalar
a) 2,4 çekme oranı, b) 2,6 çekme oranı, ($t = 0,8$ mm, $p = 10$ MPa)

Erdemir 6112 sac malzemelerin silindirik şekillendirme işlemlerinde olduğu gibi kare geometrili şekillendirme işlemlerinde de kalıp içi basıncının ve kalıp kavisinin şekillendirilebilirliği arttırdığı tespit edilmiştir. Kalıp kavisinin 4 mm olduğu şekillendirme çalışmalarında ise sac kalınlığının artışının şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Hidromekanik derin çekme işlemlerinde, birden fazla operasyon ile şekillendirilen kare geometrili parçaların tek seferde şekillendirilebildiği görülmüştür.

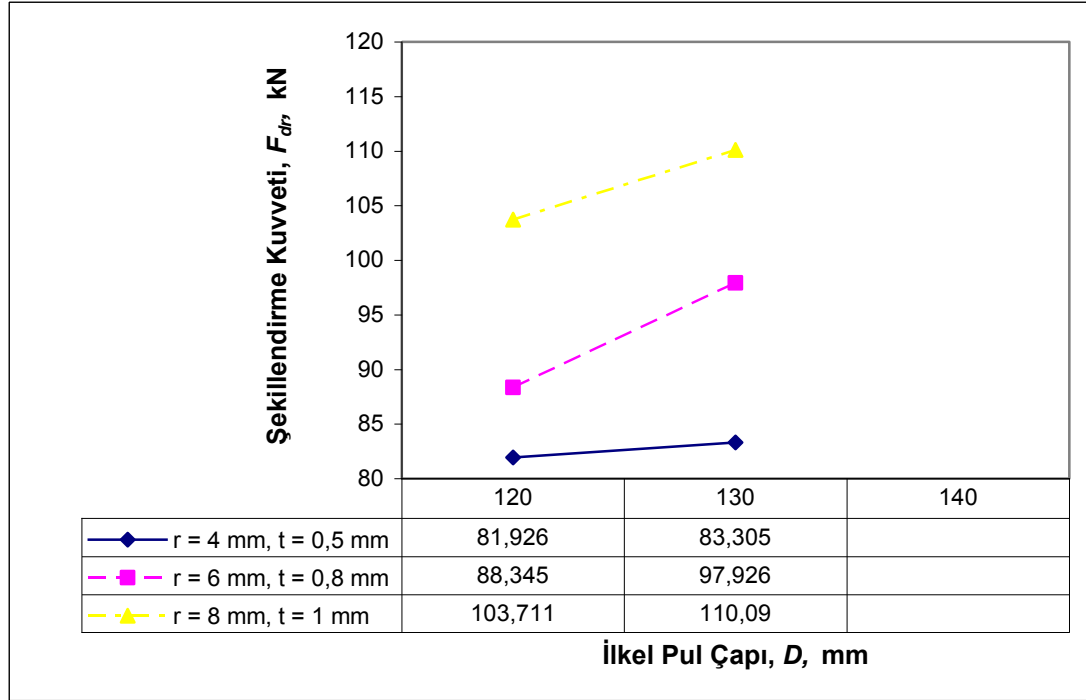
Çizelge 5.2. Erdemir 6112 sac malzeme kare geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları

Sac Kalınlığı, mm	Kalıp Kavisi, mm	Kalıp İçi Basıncı, MPa	Elde Edilebilen Çekme Oranları
0,5	4	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	6	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	8	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
0,8	4	10	2,4
		20	2,6
		30	2,6
	6	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	8	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
1,0	4	10	2,4
		20	2,6
		30	2,6
	6	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	8	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6

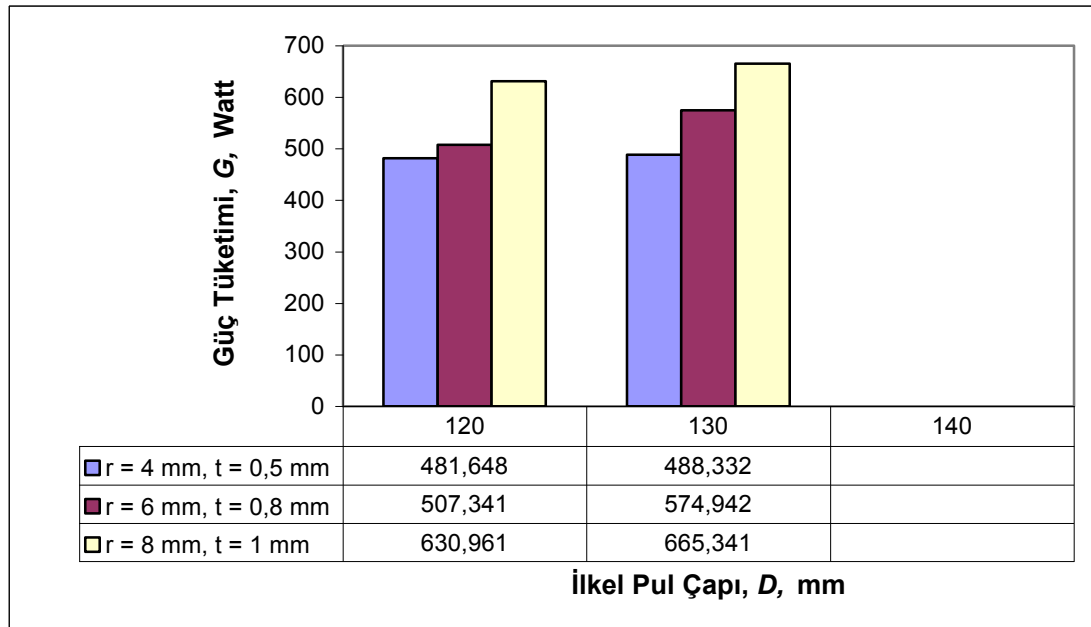
5.3. Bakır Sac Malzemenin Silindirik Geometrilik Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları

Bakır sac malzemenin çelik sac malzemeye nazaran haddeleme yön ve doğrultusunda fazla etkilenmeyen ve izotropik bir malzeme olması dolayısıyla çalışma kapsamında dahil edilmiştir. Çalışma kapsamında, bakır sac malzemenin silindirik geometrilik zımba ile hidromekanik derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesinde etkili olan işlem parametrelerinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

İlkel pul çapının artışının, şekillendirme kuvveti ve güç tüketimi üzerine etkileri Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da verilmiştir.



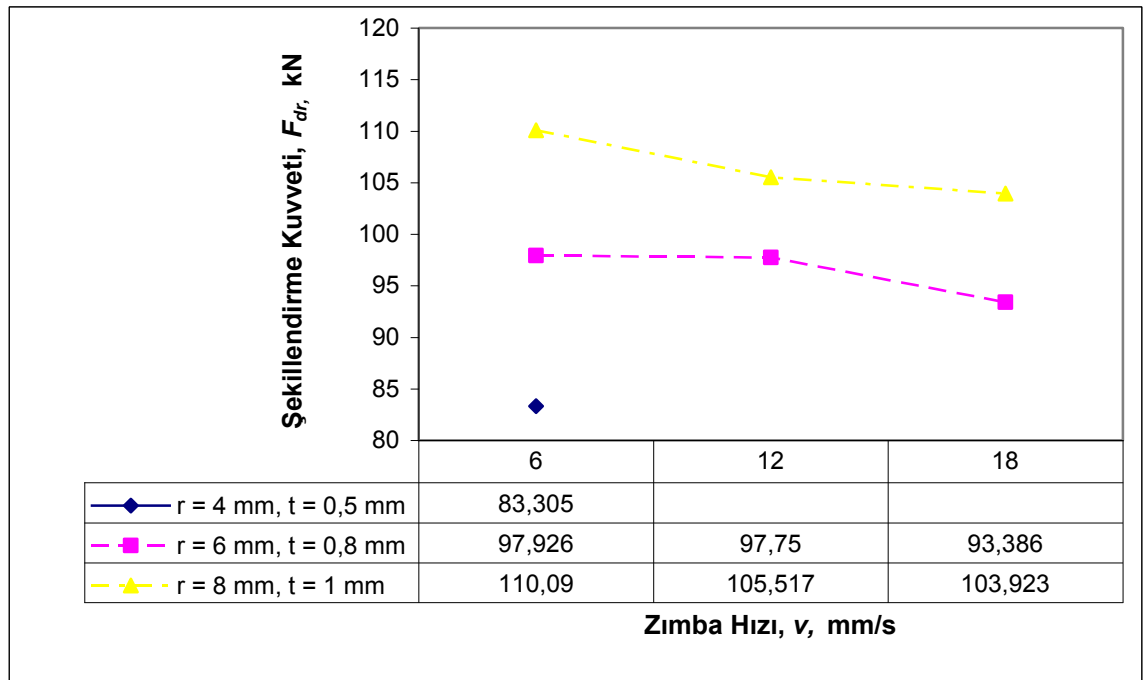
Şekil 5.25. Bakır sac silindirik geometri için ilkel pul çapı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$



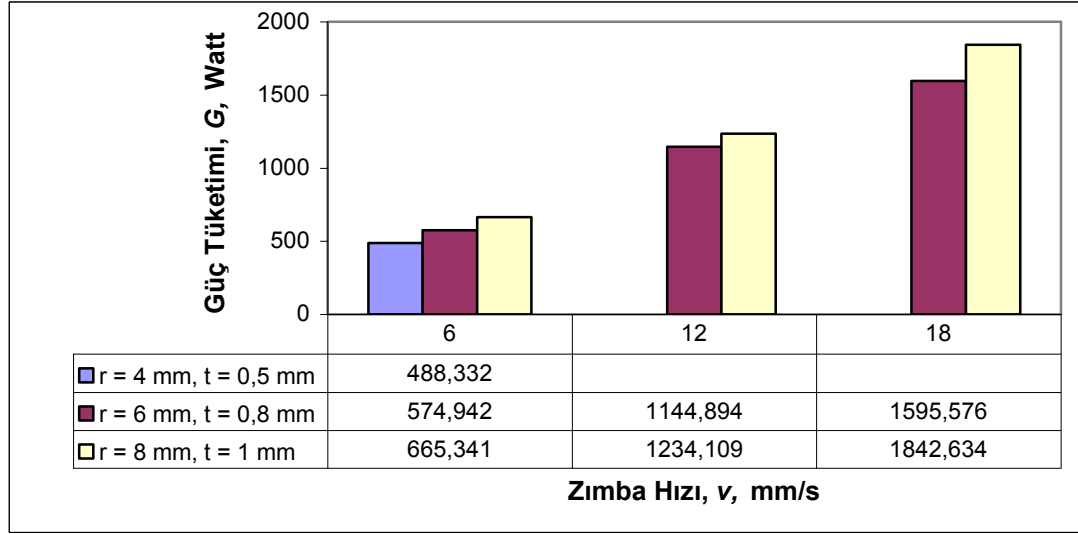
Şekil 5.26. Bakır sac silindirik geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$

İlkel pul çapı; 120 mm, 130 mm ve 140 mm olmak üzere üç farklı çapta alınmıştır. İlkel pul çapının arttırılması durumunda şekillendirme kuvvetinin ve güç tüketiminin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.25 ve Şekil 5.26). Buna karşın ilkel pul çapının 140 mm'ye arttırılması durumunda 10 MPa basınç değerinde şekillendirme işlemlerinde başarılı olunamamıştır. İlkel pul çapının artması ile şekillendirme kuvveti ve güç tüketiminin arttırılması şekillendirilen malzeme miktarının artmasından kaynaklanmaktadır.

Bakır sac malzemenin, silindirik geometrili zımba ile şekillendirilmesi işlemlerinde zımba hızının da etkisi incelenmiştir. Zımba hızının etkisi, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de verilmiştir.



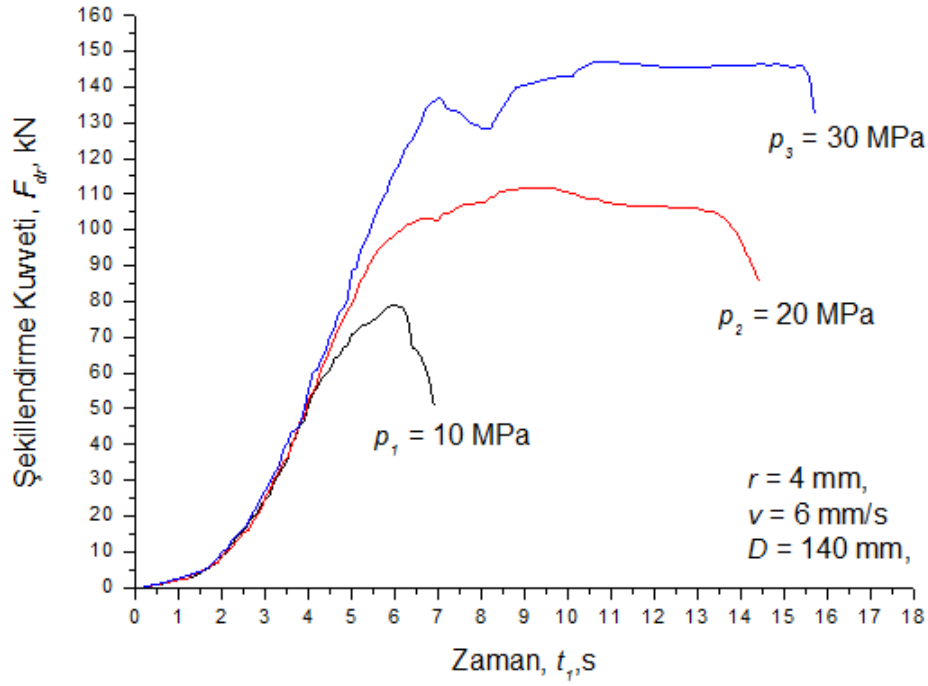
Şekil 5.27. Erdemir 6112 sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$.



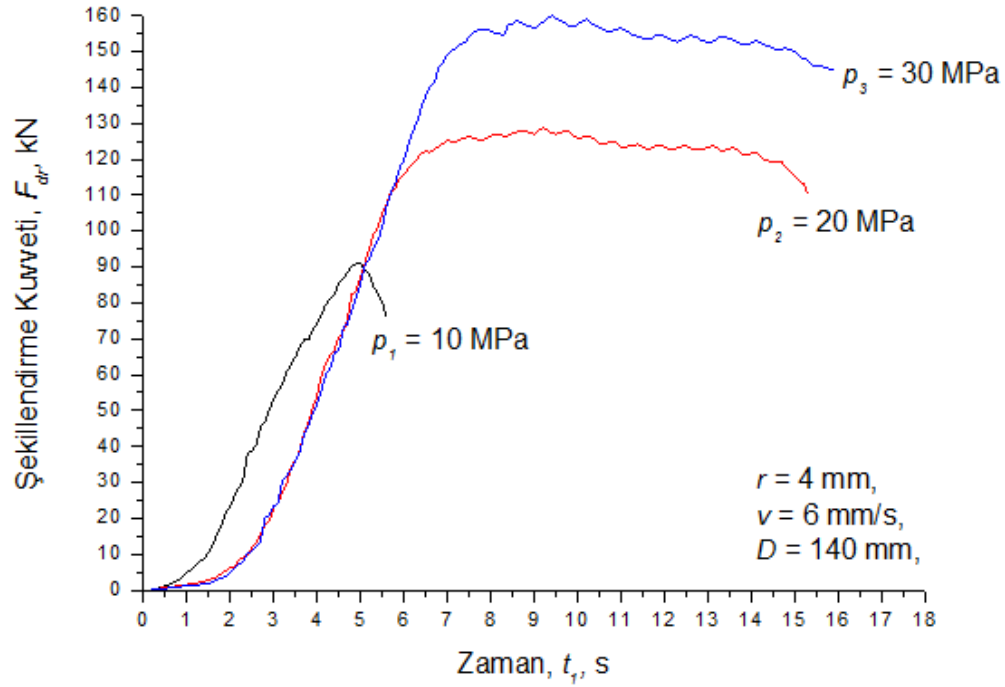
Şekil 5.28. Erdemir 6112 sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$.

Zımba hızının artırılması ile şekillendirme kuvvetinin azaldığı, güç tüketiminin ise arttığı gözlemlenmiştir. Küçük kalıp kavislerinde zımba hızı artışının şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği görülmüştür. $r = 4 \text{ mm}$ kalıp kavislerinde 12 mm/s ve 18 mm/s çekme hızlarında bakır sac malzemenin yırtıldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.27 ve Şekil 5.28).

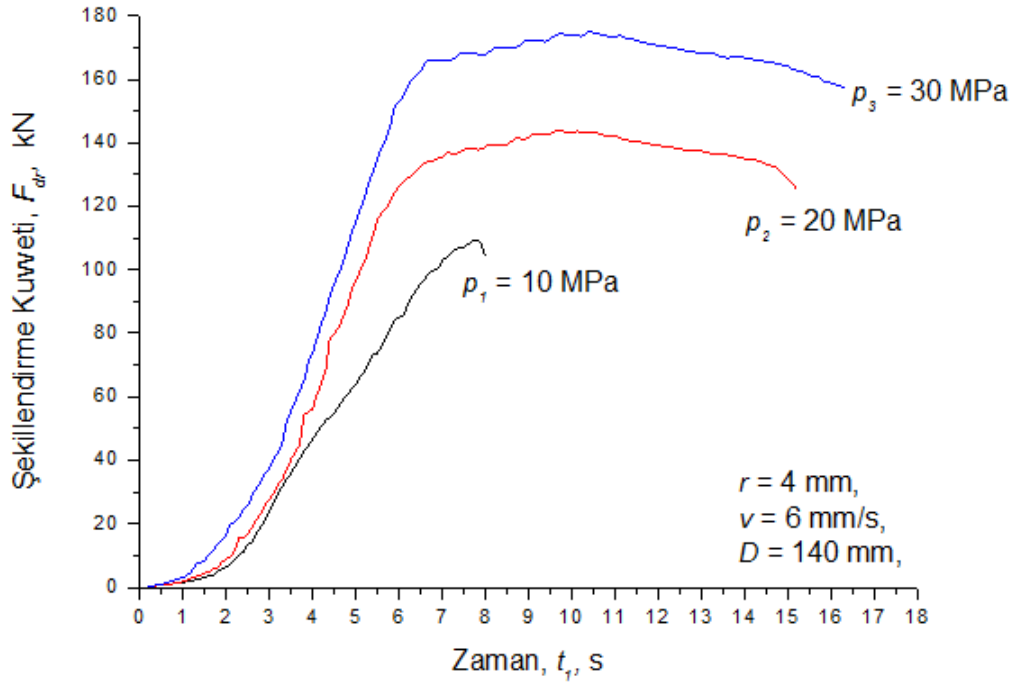
Bakır sac malzemelerin şekillendirilmesinde kalıp içi basıncın etkisi de incelenmiştir. Kalıp içi basıncının şekillendirilebilirliği arttıran en önemli parametrelerden birisi olduğu bu çalışma ile de kanıtlanmıştır. 4 mm kalıp kavis ve her bir sac malzeme kalınlığı için farklı basınç değerlerinde elde edilen zaman şekillendirme kuvveti ilişkileri Şekil 5.29 – Şekil 5.31’de verilmiştir. Diğer kalıp kavis değerlerindeki zaman şekillendirme kuvveti ilişkilerinin gösterildiği şekiller Ek-3’de verilmiştir.



Şekil 5.29. Bakır sac silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,5$ mm



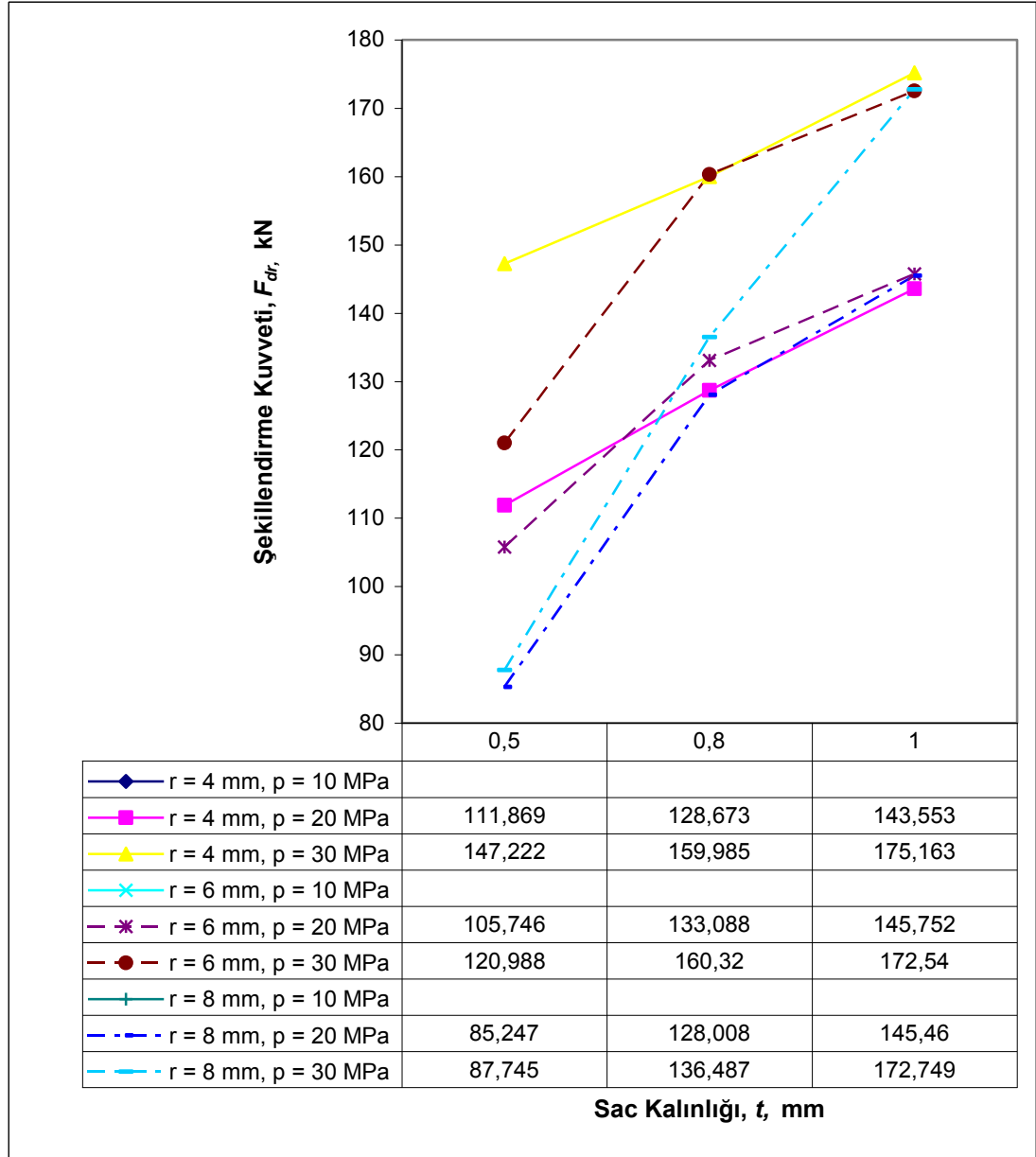
Şekil 5.30. Bakır sac silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $t = 0,8$ mm



Şekil 5.31. Bakır sac silindirik geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi,
 $t = 1$ mm

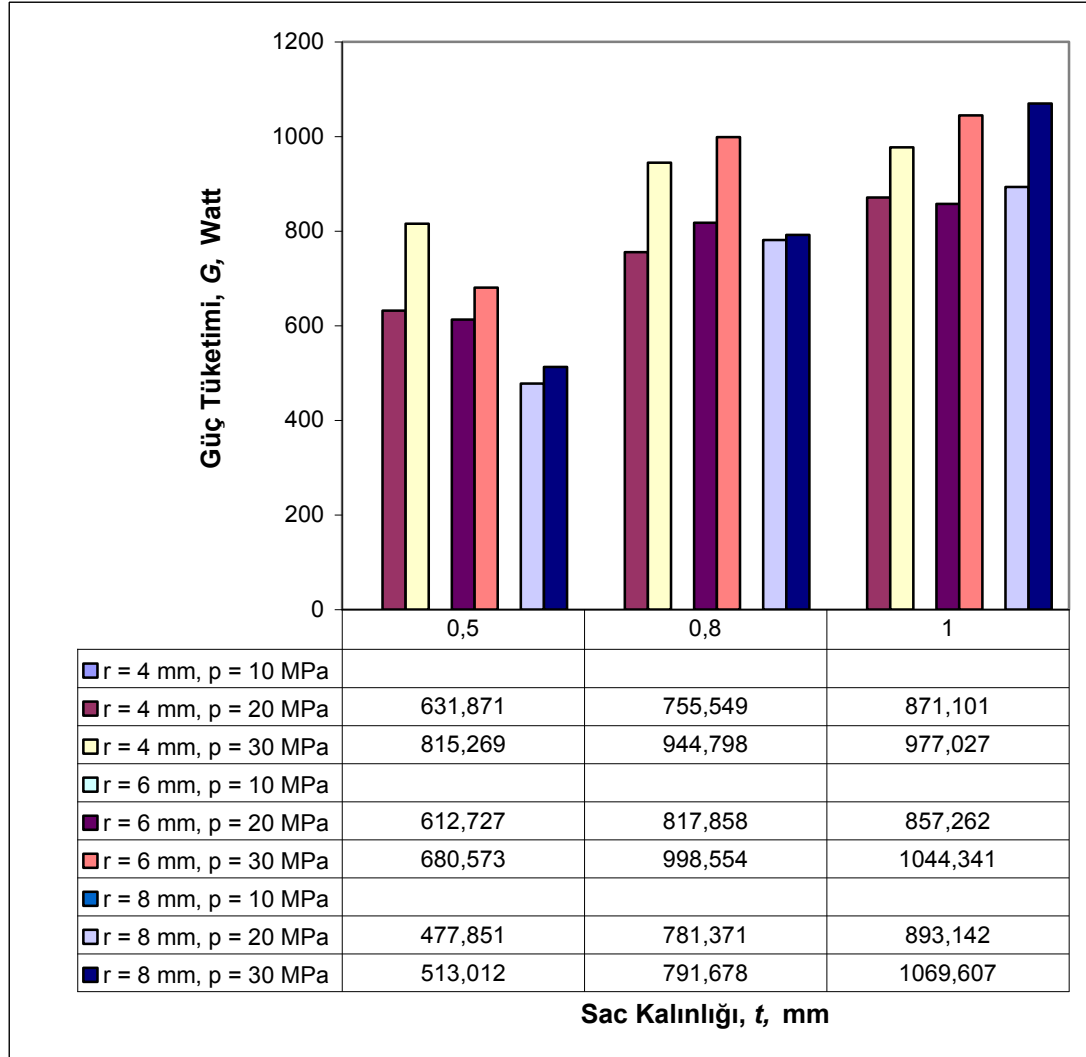
Şekil 5.29 – Şekil 5.31 incelendiğinde, 10 MPa kalıp içi basıncının yetersiz gelmesi nedeniyle sac malzemenin yırtıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, ani kuvvet düşmesinden anlaşılmaktadır. Ancak, kalıp içi basınç değerinin 20 MPa ve 30 MPa değerlerine çıkartılmasıyla şekillendirme işleminin yapılabildiği gözlemlenmiştir.

Tüm deney grupları için silindirik geometrili bakır sac malzemenin sac malzeme kalınlığına, kalıp kavisine ve kalıp içi basınç artışına göre şekillendirilebilirlik profilleri Şekil 5.32’de güç tüketimi değerleri Şekil 5.33’de verilmiştir.



Şekil 5.32. Bakır sac silindirik geometri için sac kalınlığı –şekillendirme kuvveti ilişkisi, $D = 130$ mm

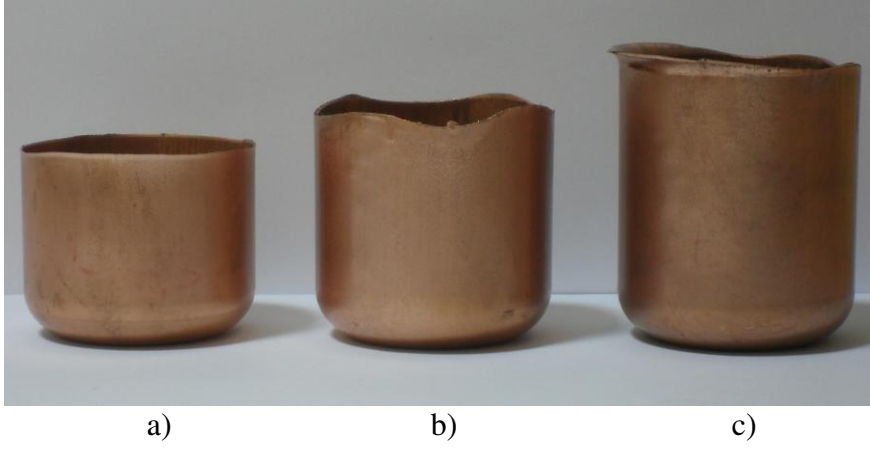
Şekil 5.32 incelendiğinde, tüm kalıp kavisi ve sac kalınlıklarında kalıp içi basıncının etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir. 10 MPa kalıp içi basınç değerinde şekillendirme işleminin başarısız olunmuş, 20 MPa ve 30 MPa kalıp içi basınç değerlerinde ise başarılı şekillendirme işleminde başarılı olunmuştur.



Şekil 5.33. Bakır sac silindirik geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi,
 $D = 130 \text{ mm}$

Sac kalınlığındaki artışın da, şekillendirme kuvveti ve güç tüketimi arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 5.32 – Şekil 5.33).

Bakır sac malzemenin silindirik geometride şekillendirilmesinde; 2, 2,16 ve en büyük 2,33 çekme oranına göre şekillendirme işlemi yapılabilmektedir. 2,33 çekme oranı için, tüm kalıp kavisi ve sac kalınlığı değerlerinde, 10 MPa değerinde başarılı olunamazken, 20 MPa ve 30 MPa kalıp içi basınç değerinde başarılı olunmuştur. Farklı çekme oranlarına şekillendirilmiş parçalara ait görüntü Resim 5.5’de verilmiştir.



Resim 5.5. Farklı çekme oranlarında şekillendirilmiş parçalar.

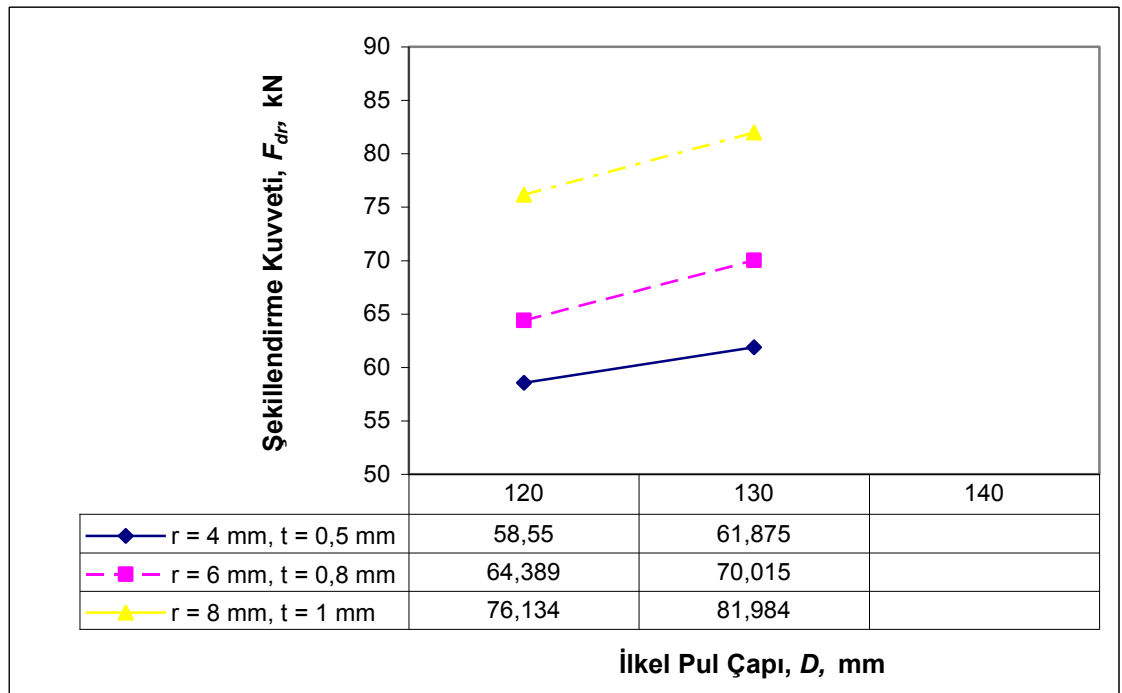
- a) 2,0 çekme oranı, ($D = 120$ mm, $t = 1$ mm, $p = 30$ MPa, $v = 6$ mm/s),
 b) 2,16 çekme oranı, ($D = 130$ mm, $t = 1$ mm, $p = 30$ MPa, $v = 6$ mm/s),
 c) 2,33 çekme oranı, ($D = 140$ mm, $t = 1$ mm, $p = 30$ MPa, $v = 6$ mm/s),

Çizelge 5.3. Bakır sac malzeme silindirik geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları

Sac Kalınlığı, mm	Kalıp Kavisi, mm	Kalıp İçi Basıncı, MPa	Elde Edilebilen Çekme Oranları
0,5	4	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	6	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	8	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
0,8	4	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	6	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	8	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
1,0	4	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	6	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33
	8	10	2,16
		20	2,33
		30	2,33

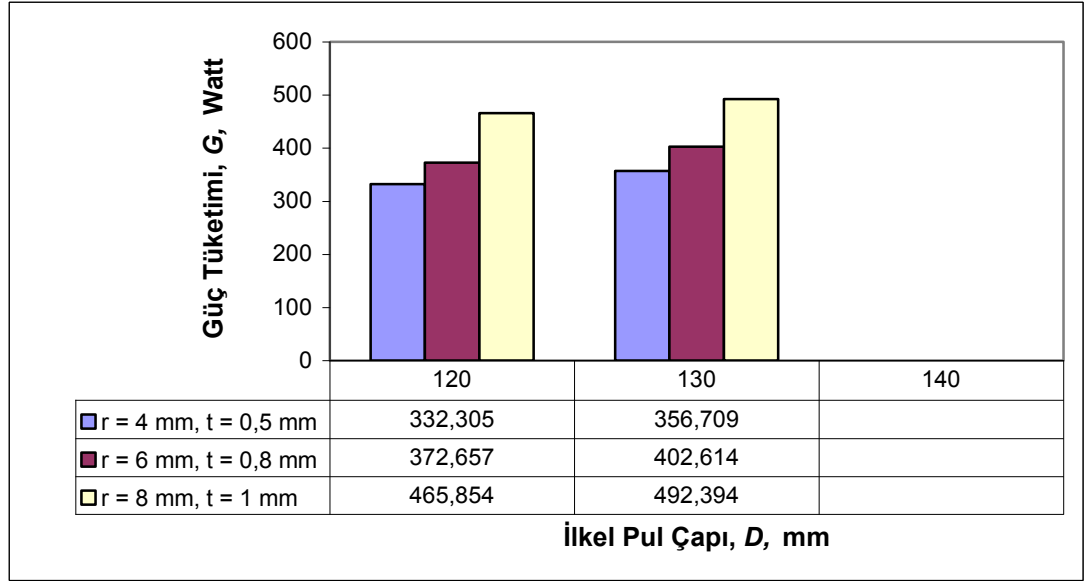
5.4. Bakır Sac Malzemenin Kare Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları

Bakır sac malzeme, kare geometrilili zımba ile hidromekanik şekillendirme işlemi yapılmıştır. Deney parametrelerinin şekillendirilebilirliğe etkileri incelenmiştir. İlkel pul çapının şekillendirme kuvvetine ve güç tüketimine etkileri Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de verilmiştir.



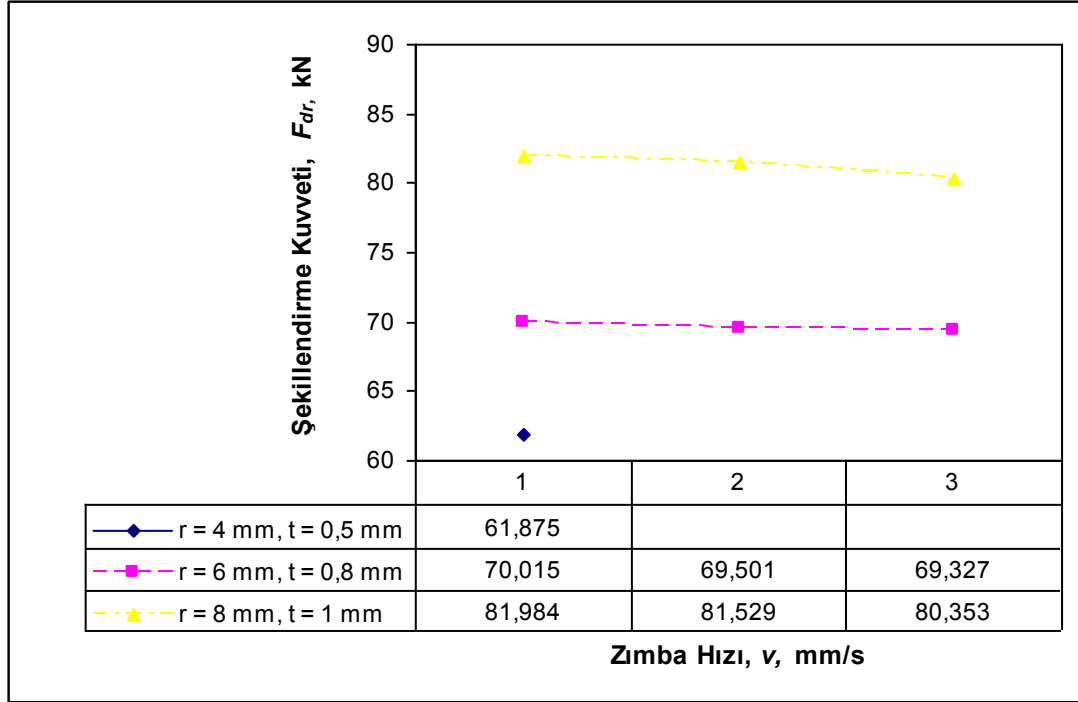
Şekil 5.34. Bakır sac kare geometri için ilkel pul çapı şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$

Şekil 5.34’de farklı kalıp kavisi ve sac kalınlıklarında yapılan denemelerde, ilkel pul çapının artmasının şekillendirme kuvvetini arttırdığı görülmektedir. Ancak, ilkel pul çapının 140 mm ye çıkartılması durumunda başarısız şekillendirme işleminin olduğu görülmektedir.

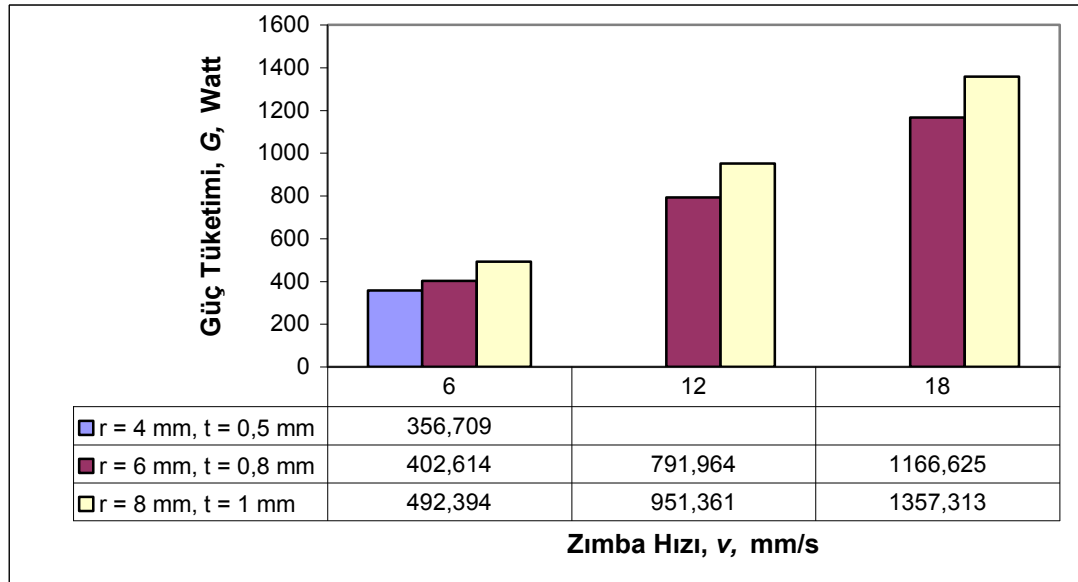


Şekil 5.35. Bakır sac kare geometri için ilkel pul çapı – güç tüketimi ilişkisi

İlkel pul çapının artması ile birlikte şekillendirme kuvvetinin ve güç tüketiminin de arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5.34 – Şekil 5.35). Zımba hızının artması durumunda ise şekillendirme kuvvetinin düştüğü, ancak güç tüketiminin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5.36 – Şekil 5.37). Gerek silindirik geometri, gerekse de kare geometride, ilkel pul çapı ve zımba hızının artması sonucu elde edilen kuvvet ve güç tüketimi sonuçlarının artış veya azalma açısından aynı olduğu tespit edilmiştir.



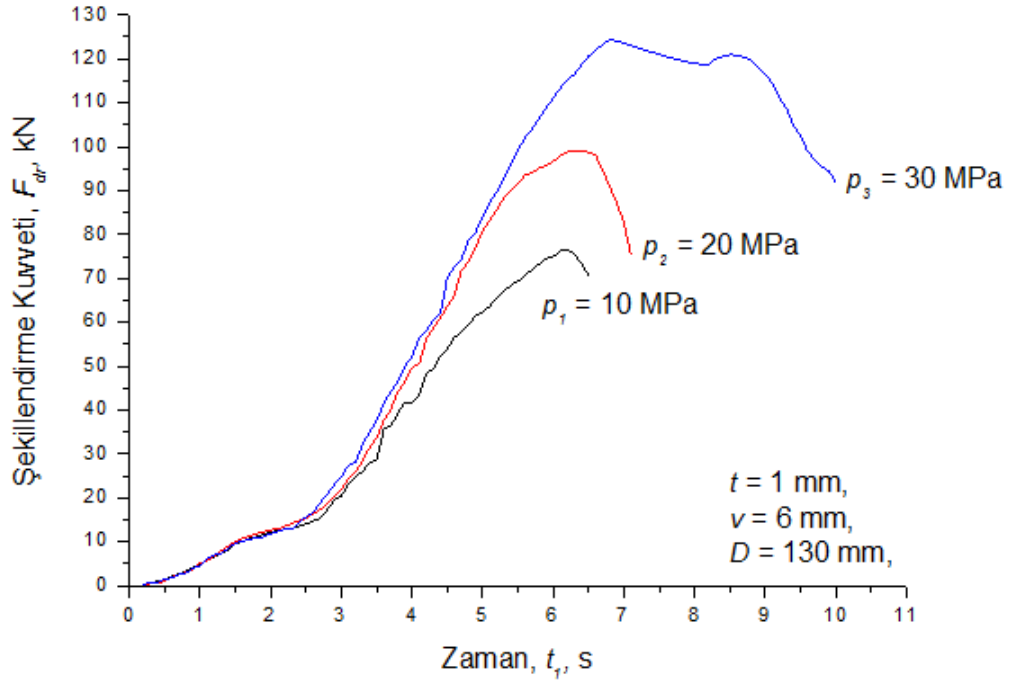
Şekil 5.36. Bakır sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$.



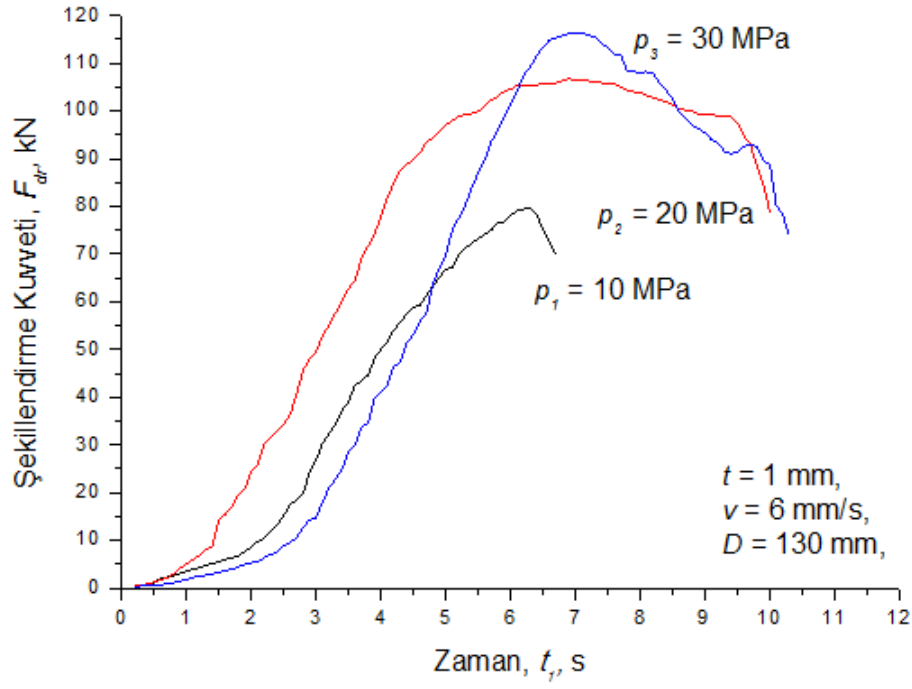
Şekil 5.37. Bakır sac kare geometri için zımba hız – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $p = 10 \text{ MPa}$, $D = 130 \text{ mm}$

Hidromekanik derin çekme işlemlerinde şekillendirme işlemlerinde etkili olan, kalıp kavisi ve kalıp içi basıncının etkisi kare geometriler için de ayrıca değerlendirilmiştir.

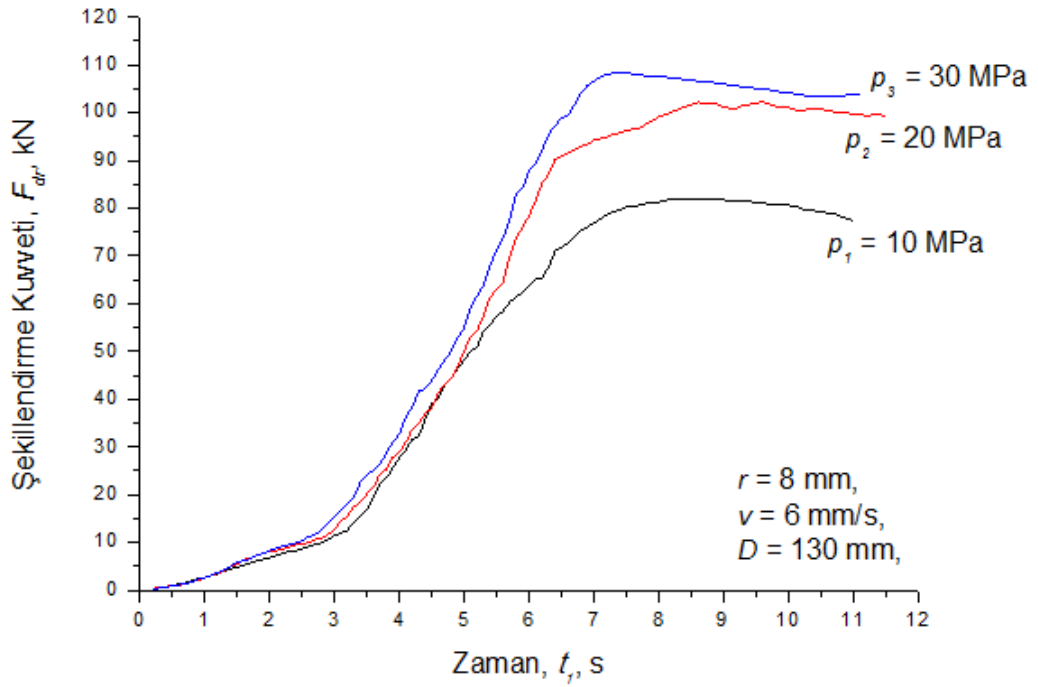
Kalıp kavisi değerindeki artışın, şekillendirebilirliği arttırdığı gözlemlenmiştir. 130 mm ilkel pul çapı, 4 mm kalıp kavisi ve 10 MPa kalıp içi basınç değerinde 1 mm kalınlığında sac malzeme şekillendirilemeden yırtılırken, aynı şartlarda 6 mm ve 8 mm kalıp kavislerinde sac malzeme yırtılmadan şekillendirilmiştir. Bu durum, Şekil 5.38 – Şekil 5.40’da verilmiştir.



Şekil 5.38. Bakır sac kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi,
 $r = 4$ mm

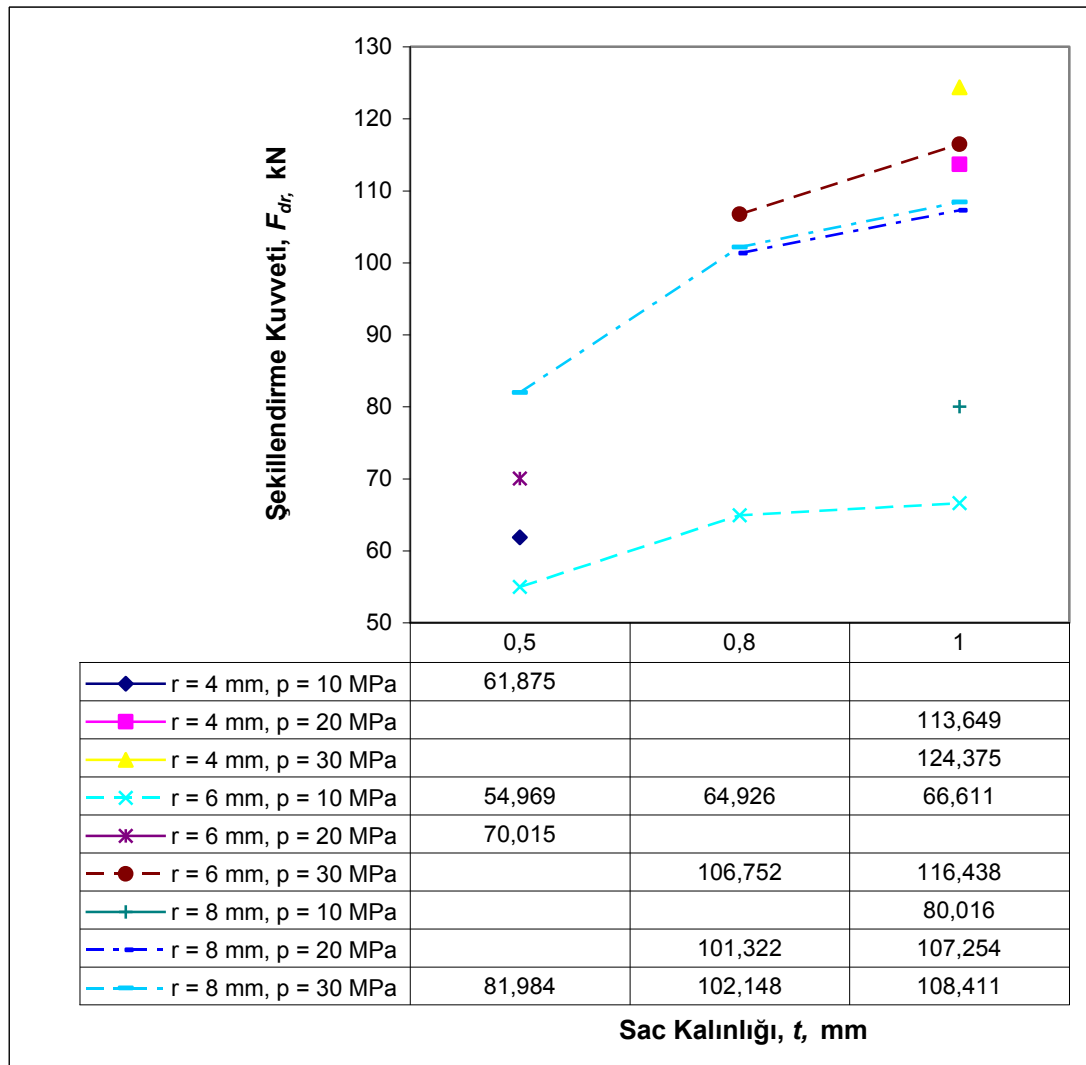


Şekil 5.39. Bakır sac kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 6$ mm

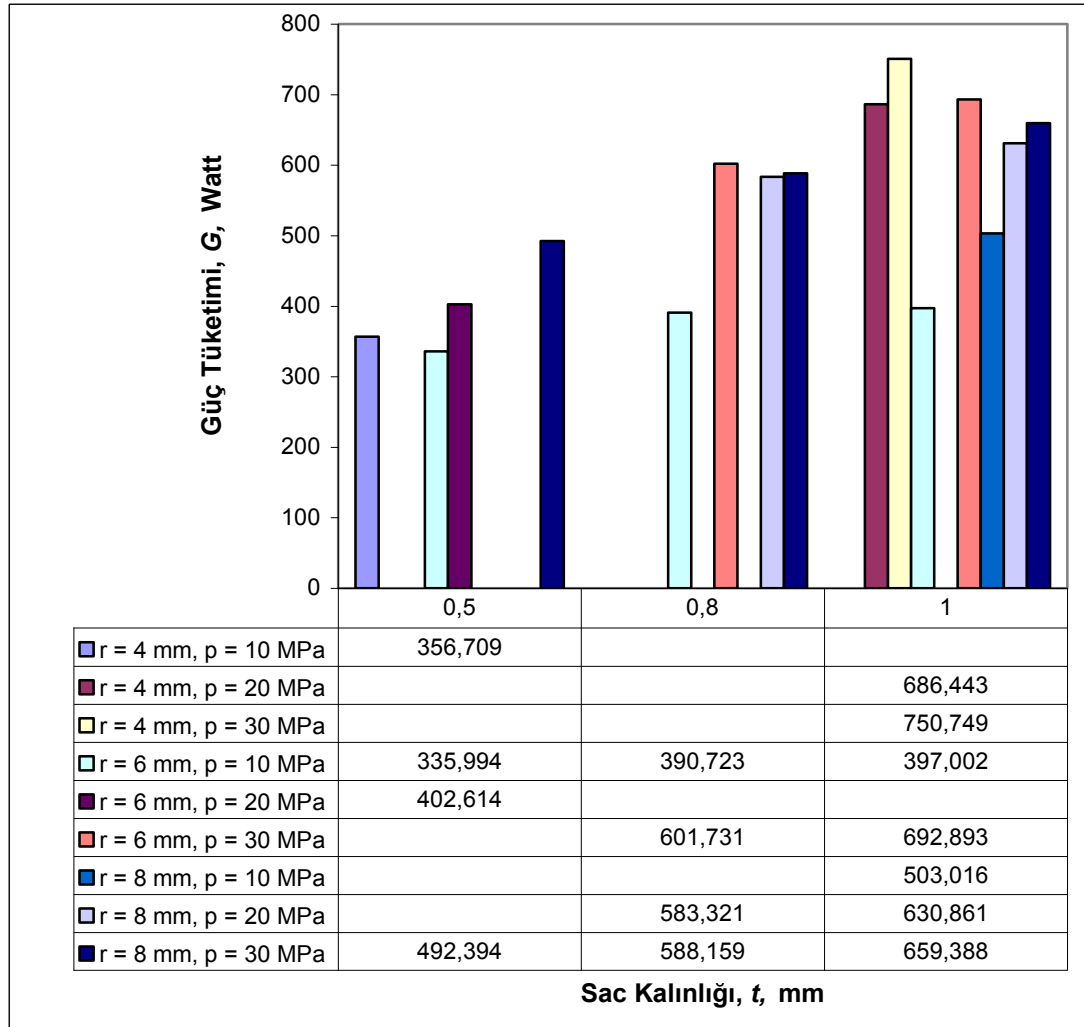


Şekil 5.40. Bakır sac kare geometri için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi, $r = 8$ mm

Kalıp içi basıncın artması ile birlikte şekillendirilebilirliğin arttığı gözlemlenmiştir. 4 mm kalıp kavisinde, 0,8 mm ve 1 mm sac kalınlığı için 10 ve 20 MPa kalıp içi basınç değerlerinde şekillendirme işlemi başarısız olurken, 30 MPa basınç değerinde başarılı olunmuştur. 6 mm kalıp kavisinde ise, 1 mm sac kalınlığında, 10 MPa kalıp içi basınç değerinde başarısız olunurken, 20 ve 30 MPa basınç değerlerinde başarılı olunmuştur. 8 mm kalıp kavisinde, 0,5 mm ve 0,8 mm sac kalınlıklarında 10 MPa basınç değerinde şekillendireme işlemi başarısız olunurken 30 MPa basınç değerinde başarılı olunmuştur.



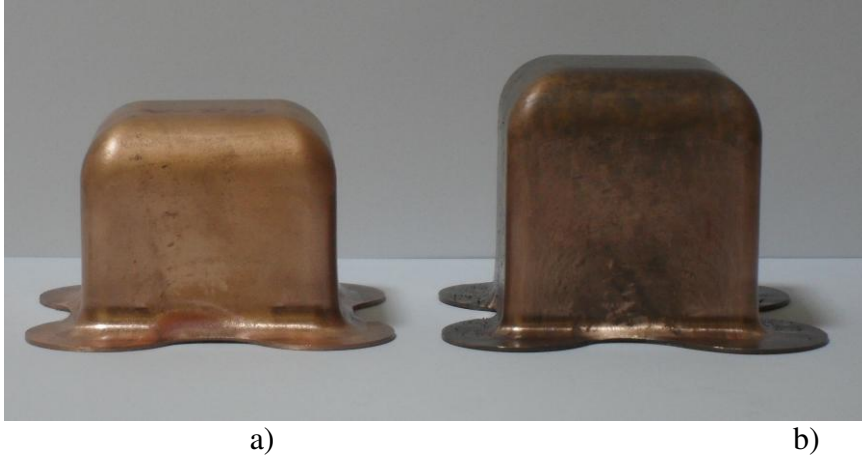
Şekil 5.41. Bakır sac kare geometri için sac kalınlığı – şekillendirme kuvveti ilişkisi, $D = 130$ mm, $v = 6$ mm/s



Şekil 5.42. Bakır sac kare geometri için sac kalınlığı – güç tüketimi ilişkisi,
 $D = 130$ mm, $v = 6$ mm/s

Sac kalınlığının şekillendirme kuvveti ve güç tüketimine olan etkileri Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de verilmiştir. Sac kalınlığının artmasına bağlı olarak şekillendirme kuvvetinin ve güç tüketiminin arttığı tespit edilmiştir.

Bakır sac malzeme, deney planına göre hidromekanik derin çekme yöntemi ile kare zımba ile şekillendirilmiştir. Şekillendirme işlemi sonucunda 2,4 ve 2,6 çekme oranlarında şekillendirme işlemi yapılabilmektedir. Şekillendirilen parçalara ait görüntüler Resim 5.6’da verilmiştir. Ancak 2,8 çekme oranı için yapılan deneylerde başarılı olunamamıştır. İlk pul çapı 140 mm olan sac malzemenin çekilebilmesi için, deneysel çalışma parametrelerinin değiştirilmesi etkili olamamıştır.



Resim 5.6. Farklı çekme oranlarında kare şekillendirilmiş bakır sac parçalar

a) 2,4 çekme oranı, ($D = 120$ mm, $t = 0,5$ mm, $p = 30$ MPa)

b) 2,6 çekme oranı, ($D = 130$ mm, $t = 0,5$ mm, $p = 30$ MPa)

Çizelge 5.4. Bakır sac malzeme kare geometri için elde edilebilen en büyük çekme oranları

Sac Kalınlığı, mm	Kalıp Kavisi, mm	Kalıp İçi Basıncı, MPa	Elde Edilebilen Çekme Oranları
0,5	4	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	6	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	8	10	2,4
		20	2,4
		30	2,6
0,8	4	10	2,4
		20	2,4
		30	2,6
	6	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6
	8	10	2,4
		20	2,6
		30	2,6
1,0	4	10	2,4
		20	2,4
		30	2,6
	6	10	2,4
		20	2,6
		30	2,6
	8	10	2,6
		20	2,6
		30	2,6

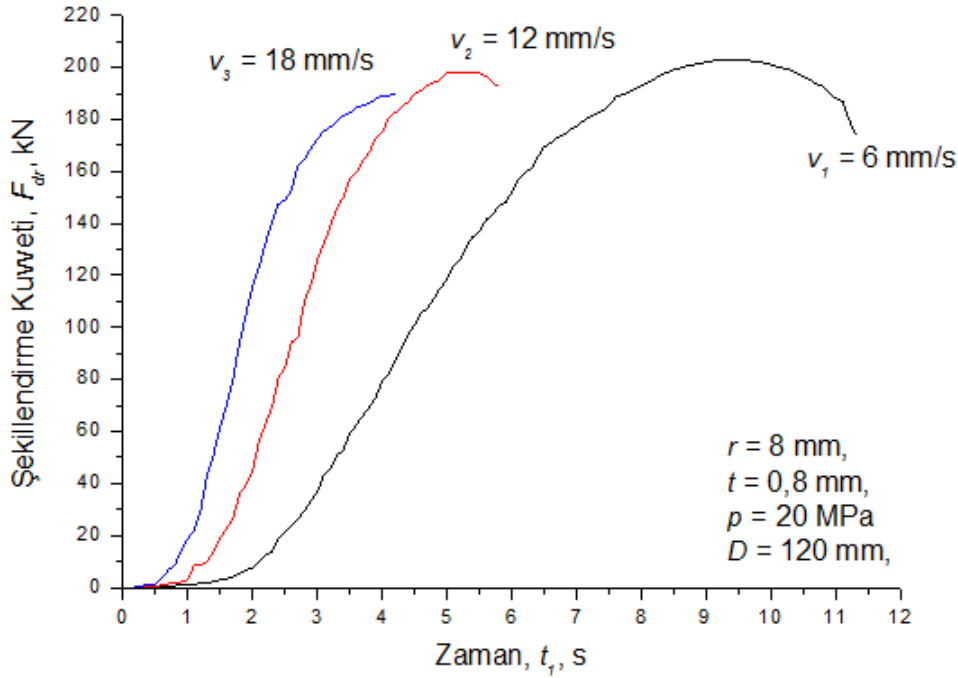
5.5. AISI 304 Paslanmaz Sac Malzemenin Silindirik Geometrilili Zımba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları

AISI 304 paslanmaz sac malzemenin deneysel çalışmalarda çok zor şekillendirilebildiği görülmüştür. Çekme dayanımının, Erdemir 6112 ve bakır sac malzemelere göre daha yüksek olması ve hidromekanik şekillendirme için önerilen kalıp içi basınç değerinin 30 – 100 MPa arasında olması nedeni ile en fazla 2,0 çekme oranı elde edilebilmiştir. Elde edilen çekme oranı değeri, kalıp kavisi değerinin en büyük olduğu 8 mm’de ve 120 mm ilkel numune çapında gerçekleştirilmiştir. Diğer deney şartlarında kalıp içi basıncının şekillendirilebilirliği arttırdığı ancak belirli bir süreden sonra yırtıldığı görülmüştür. Başarılı şekillendirilen parçalar ait görüntü Resim 5.7’de verilmiştir.



Resim 5.7. AISI 304 sac malzemedan şekillendirilmiş parçalar, çekme oranı: 2,0
 $D = 120 \text{ mm}$, $t = 0,8 \text{ mm}$, $p = 200 \text{ MPa}$

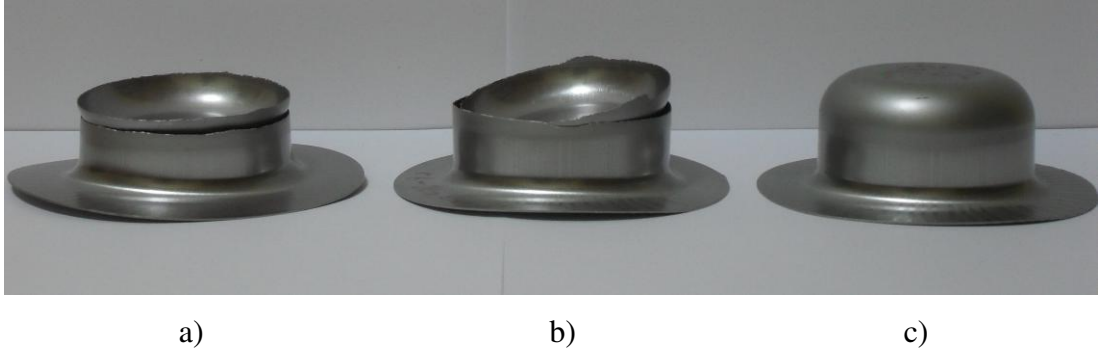
Başarılı şekillendirilen parçalara ait farklı çekme hızlarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kuvvet-zaman ilişkileri Şekil 5.43’de verilmiştir.



Şekil 5.43. AISI 304 paslanmaz sac malzeme için şekillendirme kuvveti – zaman ilişkisi

Şekil 5.43 incelendiğinde, zımba hızının artması ile birlikte şekillendirme kuvvetinin diğer sac malzemelerde olduğu gibi paslanmaz sac malzemede de düştüğü görülmüştür. Ancak şekillendirme için elde edilen en büyük kuvvetin diğer sac malzemelerden de çok yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu durum sac malzemenin akma dayanımının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Kalıp içi basıncının artışının AISI 304 paslanmaz sac malzemeler için de, şekillendirme işleminde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kalıp içi basınç değeri, 10 MPa değerinden 20 MPa değerine çıktığında şekillendirme oranı artmıştır. 20 MPa değerinden 30 MPa değerine arttırıldığında ise yırtılmadan şekillendirme işlemi yapılabilmiştir. Resim 5.8’de farklı kalıp içi basınçlarında şekillendirilmiş parçaların görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.8. Farklı kalıp içi basınçlarında şekillendirilmiş AISI 304 sac malzemeler
a) 10 MPa, b) 20 MPa, c) 30 MPa ($D = 130$ mm, $t = 0,8$ mm)

5.6. AISI 304 Paslanmaz Sac Malzemenin Kare Geometrilili Zimba İle Şekillendirilmesi Deneylerinin Sonuçları

AISI 304 sac malzemenin kare geometrilili olarak şekillendirilmesi çalışmalarında, silindirik şekillendirme işlemlerinde olduğu gibi malzeme özellikleri dolayısıyla sınırlamalarla karşılaşmıştır. Deney cihazının maksimum kalıp içi basınç değerinin 30 MPa olması, AISI 304 paslanmaz sac malzemelerin hidromekanik şekillendirilebilirliği için yeterli gelmemiştir.

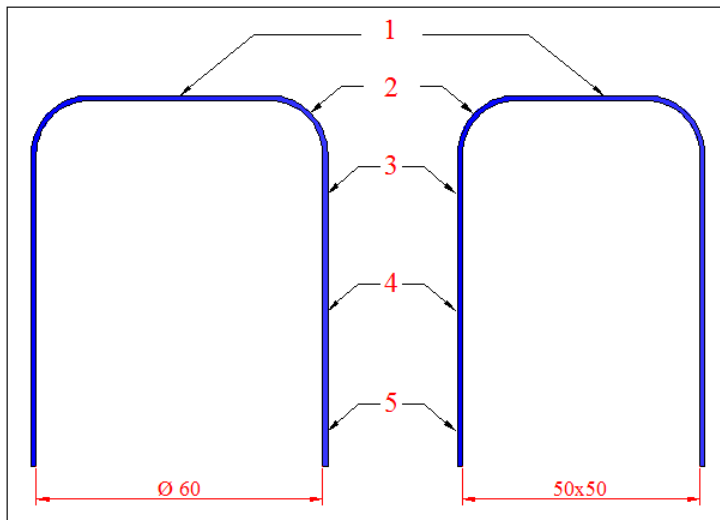
Deney cihazının kontrol edebildiği en büyük kalıp içi basıncı değerinin 30 MPa olmasına rağmen, kalıp içi basıncının etkisi bu çalışmada belirgin bir şekilde görülmüştür. 8 mm kalıp kavisli değerlerinde, 10 MPa kalıp içi basıncında şekillendirme işlemi yapılamazken, basınç değerinin 20 MPa ve 30 MPa değerine çıkartılmasıyla ancak 120 mm ilkel pul çapı için şekillendirme işlemi yapılabilmektedir. Diğer deney şartları için başarılı bir şekillendirme işlemi yapılamamıştır.

5.7. Sac Malzemelerdeki Et Kalınlığı Değişiminin Değerlendirilmesi

Sac metal malzemelerin şekillendirilmesinde, et kalınlığı değişiminin kontrolü önemli bir konu olmaktadır. Şekillendirilmiş parçadaki et kalınlığı değişimi, ürün kalitesini etkileyen bir durumdur. Et kalınlığı değişiminin en az olması, çıkan ürünün daha başarılı şekillendirilebildiğini göstermektedir. Klasik bir kalıplama ile yapılan çekme işlemlerinde elde edilen ürünlerde, zimba kavisinin geldiği yer ve yan

duvarlarda incelme meydana gelmektedir. Ancak; hidrolik şekillendirme işlemlerinde, akışkan sıvı şekillendirilen parçaya her taraftan eşit temas ettiği için et kalınlığı değişimi klasik kalıpla şekillendirme işlemlerine göre daha homojen olmaktadır.

Hidromekanik derin çekme yöntemi kullanılarak yapılan şekillendirme işlemlerinde elde edilen deneysel numuneler tel erozyon tezgahında kesilerek, et kalınlığı değişimleri Şekil 5.44’de gösterilen noktalardan ölçülmüştür. Ölçüm noktası olarak; parça tabanından bir nokta, parça kavisinin olduğu yerden bir nokta ve yan duvarlardan üç nokta alınmıştır.



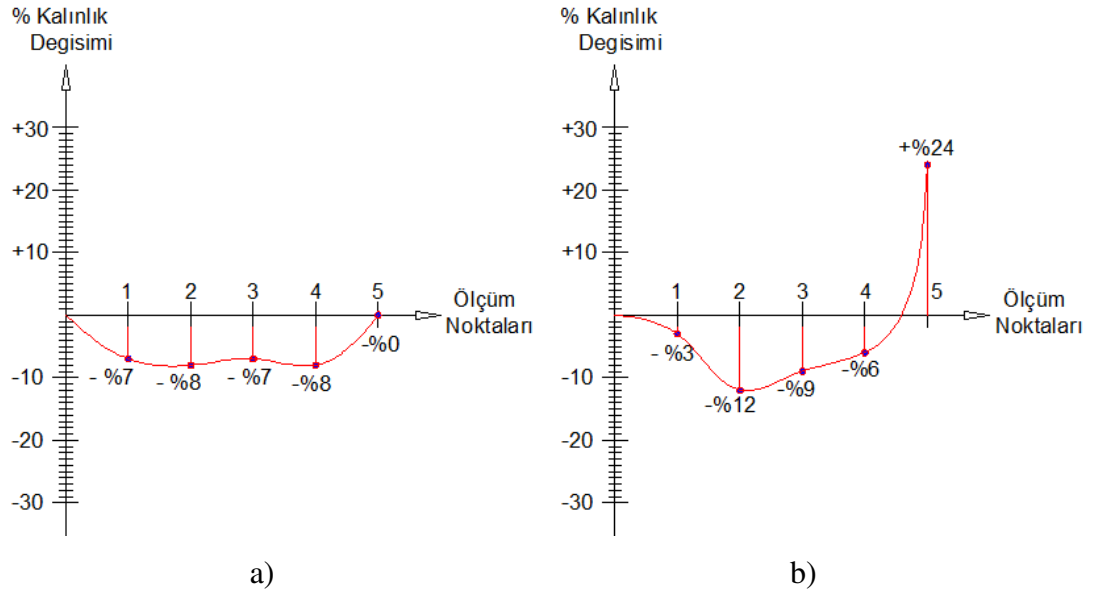
Şekil 5.44. Et kalınlığı değişimi ölçüm noktaları

Ölçüm için kesilen numunelerin görüntüsü Resim 5.9 ’da verilmiştir.



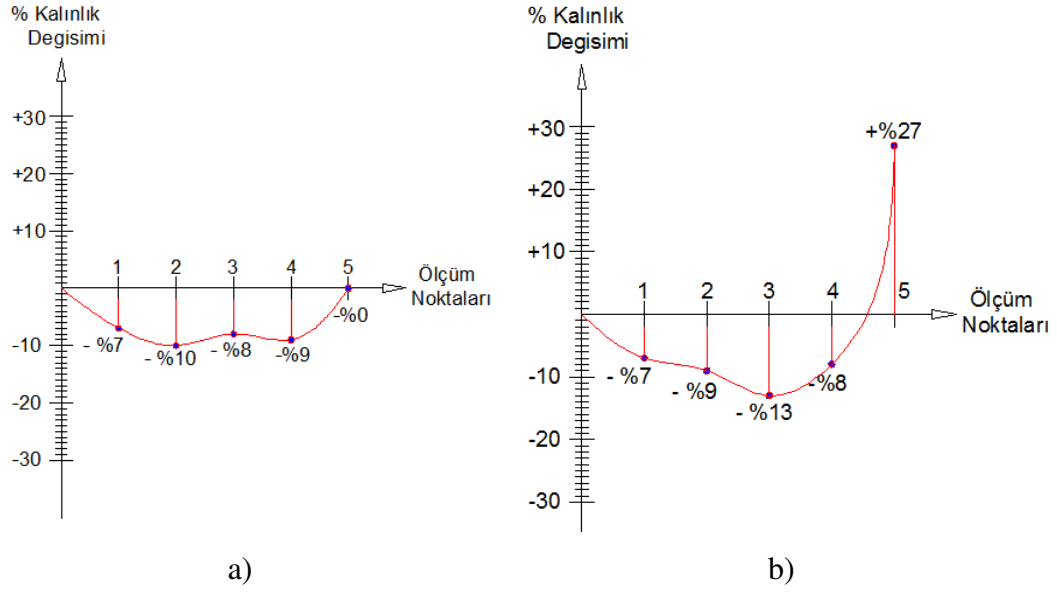
Resim 5.9. Et kalınlığı ölçümü için kesilmiş deney numuneleri

Erdemir 6112 ve bakır sac malzemeler için ve silindirik ve kare geometriler için Şekil 5.44’de verilen noktalardan elde edilen kalınlık değişimleri Şekil 5.45 ve Şekil 5.46’da verilmiştir.



Şekil 5.45. Erdemir 6612 sac malzeme için şekillendirilen ürün üzerindeki kalınlık değişimleri a) Kare geometri, b) Silindirik geometri

Erdemir 6612 sac malzeme için kalınlık değişimlerinin incelenmesinde, kare geometride ölçüm yapılan noktalarda kalınlık değişimindeki incelmenin % 8’i geçmediği görülmüştür. Bu durum, ürün üzerindeki kalınlık değişiminin klasik kalıplama yöntemine göre oldukça homojen bir yapıda olduğunu göstermektedir. Literatür araştırmasından, hidromekanik şekillendirme işlemlerinde ürün üzerindeki kalınlık değişiminin en fazla % 20’yi geçmediği tespit edilmiştir [15, 34, 74]. Silindirik geometrideki kalınlık değişiminin incelenmesinde, sac malzemedeki incelmenin kare geometriye nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum, silindirik geometrinin kare geometriye göre daha yüksek uzunlukta çekilerek deforme edilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.46. Bakır sac malzeme için şekillendirilen ürün üzerindeki kalınlık değişimleri a) Kare geometri, b) Silindirik geometri

Bakır sac malzemeler için kalınlık değişiminin incelenmesinde, Erdemir 6112 sac malzemeye göre her iki geometride de en büyük incelmenin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum bakır sac malzemenin akma dayanımının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bakır sac malzemenin kare geometrisinde de toplam incelmenin en çok % 10 'u aşmadığı görülmüştür. Bakır sac malzeme için de, kalınlık dağılımının homojen bir yapıda olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemlerinden birisi olan hidromekanik derin çekme işlemine etki eden parametreler deneysel olarak araştırılmıştır. Deney parametrelerinin, günümüzde yaygın olarak farklı sektörlerde kullanılan Erdemir 6112, AISI 304 ve bakır sac malzeme türlerinin şekillendirilebilirliğine etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlemlerinde; kalıp içi basıncı en önemli parametrelerden birisidir. Deneysel çalışmalarda da; kullanılan tüm malzeme türleri, kalınlıkları ve zımba geometrileri için de şekillendirilebilirliği arttıran önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Zımbanın; sac malzemeye teması ile kalıp içerisinde oluşmaya başlayan basınç, sac malzemenin kalıp kavisi ile teması arasında film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltmakta ve sac malzemenin yırtılmadan daha yüksek çekme oranlarında şekillenmesine imkan tanımaktadır. Klasik kalıplama ile çekme işlemlerinde en büyük 2,2 çekme oranına ulaşılabilirken [1, 47, 49, 72, 77], hidromekanik derin çekme yöntemi ile silindirik geometride en büyük 2,33, kare geometride ise en büyük 2,6 çekme oranına tek işlemde ulaşılabilmiştir. Kalıp içi basıncının artışının, her üç malzeme türü için de şekillendirebilirliği arttırarak çekme oranının yükselmesini sağladığı deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Basıncın etkisi Erdemir 6112 ve bakır sac malzeme türü için daha belirgin görülürken, AISI 304 paslanmaz sac için daha az görülmüştür. Bu durum, paslanmaz sac malzemenin mekanik özelliklerinin diğer sac malzemelere göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde, AISI 304 kalite sac malzemede, hidromekanik derin çekme işleminin etkisinin tam olarak görülebilmesi için 30-100 MPa arası basınç uygulanması önerilmektedir [109].

Kalıp içinde oluşan sıvı basıncının bir diğer olumlu yönü; sıvının sac malzemeye her noktadan eşit temas etmesini sağlayarak kare ve konik gibi parçaların zımba ile temas alanını arttırmaktadır. Birden fazla operasyon ile elde edilmesi gereken kare ve konik parçaların tek seferde şekillendirilebilmesine imkan tanımakta ve deneysel çalışmada, kare geometrili parçaların şekillendirilmesinde açıkça görülmüştür.

Şekillendirme ortamının basınçlandırılmış yağ ile desteklenmiş olmasının, sac malzemenin daha kolay kayarak deforme olmasını sağladığı tespit edilmiştir. Klasik bir kalıplama işleminde, zımba veya kalıp veya sac malzeme üzerindeki çizikler veya sac malzeme üzerindeki çapaklar çentik etkisi oluşturduğundan dolayı sac malzemenin şekillenmeden yırtılmasına neden olmaktadır. Hidromekanik yöntemde, yağ basıncı ile film tabakasının oluşturulması ve ortamın yağlı olması nedeniyle, bu tür olumsuzlukların engellendiği ve sac metal ürün üzerinde çentik, zayıflama vb. olumsuzlukların giderilebildiği tespit edilmiştir.

Sac malzemenin ilkel pul çapının artması, daha çok malzemenin şekillendirilmesi nedeniyle çekme kuvveti, güç tüketimini ve çekme oranının artmasını sağlamıştır. Ancak çok fazla arttırılmasının, daha geniş kontrol edilmesi gereken baskı yastığı alanı oluşturduğu için şekillendirilebilirliği azalttığı görülmüştür. Bu durum, sabit baskı yastığı kuvveti uygulanan işlemlerde bir olumsuzluk oluşturmaktadır. Baskı yastığı kuvvetinin büyük olması, sac malzemenin erken yırtılmasına, küçük olması da çabuk kırışmasına ve kopmasına neden olmaktadır.

Sac malzemedeki kalınlık artışı, hidromekanik derin çekme yönteminde çekme kuvvetini ve güç tüketimini arttırmaktadır. Kalınlık artışı ile birlikte, hidromekanik derin çekme yöntemlerinde etkili olan kalıp içi basıncının sac malzemenin deformasyonuna olumlu etkisinin azaldığı tespit edilmiştir. 0,5 mm sac kalınlıklarında hidromekanik derin çekme işleminin özellikleri daha iyi görülebilirken, kalınlık artışı ile birlikte şekillendirilebilirliğin azaldığı görülmüştür.

Kalıp kavisinin artışının, sac malzemenin kalıp içerisine daha kolay akmasına izin verdiği için şekillendirilebilirliği ve çekme oranını arttırdığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, kalıp kavis 4 mm'den 6 mm'ye arttırıldığında şekillendirme kuvveti ve güç tüketiminin de arttığı ancak, 6 mm'den 8 mm'ye arttırıldığında ise şekillendirme kuvvetinin ve güç tüketimini azaldığı tespit edilmiştir.

Çekme hızının klasik kalıplama yöntemine göre düşük değerde olması, hidromekanik sistemin en önemli dezavantajlarından birisi olup, deneysel çalışmalarda işlem

zamanının uzun olması ile görülmüştür. Deformasyon hızındaki artışın, hidromekanik derin çekme işlemleri için de şekillendirilebilirliğe olumsuz bir etki yaptığı tespit edilmiştir. Deformasyon hızının artması ile birlikte şekillendirme kuvvetinin de düştüğü ve güç tüketiminin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, deformasyon hızındaki artışın kırışıklık oluşumuna geçişi arttırdığı ve ürün kalitesini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Hidromekanik derin çekme yöntemi ile üretilen ürünlerde, et kalınlığı değişiminin homojen bir yapıda olması ürün kalitesi açısından önemli bir olumluluk olarak görülmektedir. Erdemir 6112 ve bakır sac malzeme için elde edilen en büyük çekme oranlarında kalınlık incelmesinin en fazla silindirik numunelerde olduğu görülmüştür. Ancak incelme miktarının her iki malzeme türü için de %13'ü aşmadığı tespit edilmiştir.

Sıvı basıncıyla hidromekanik derin çekme yöntemi, çekme oranı açısından klasik kalıplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında, önemli bir avantaja sahiptir. Klasik kalıplama yöntemleriyle, St13 çelik sac malzeme için en fazla 2,2 çekme oranına ulaşılabilirken, hidromekanik derin çekme yöntemiyle silindirik çekme işlemlerinde Erdemir 6112 ve bakır sac malzeme için en büyük 2,33 çekme oranına, kare çekme işlemlerinde ise en büyük 2,6 çekme oranına ulaşılmıştır. Hem silindirik hem de kare şekillendirme işlemi için birden fazla operasyon gerektiren işlemlerin tek seferde yapılabilirdiği tespit edilmiştir.

Çekme ile şekillendirme işlemi için; deneme yanılma yoluyla ideal şekillendirme parametrelerinin bulunması, zaman, işçilik ve malzeme maliyetini arttırmaktadır. Her bir malzeme türü için ideal şekillendirme parametrelerinin belirlenmesi maliyetlerin azaltılmasına imkan tanıyacak ve ekonomiye katkısı olacaktır. Ayrıca, klasik kalıplama yöntemiyle birkaç operasyon ile veya birkaç kalıp ile ürünün elde edilmesi de işletme maliyetini arttıran bir unsurdur. Klasik kalıplama ile birden çok kalıpla veya operasyonla elde edilen bir işlemin, hidromekanik yöntem ile tek seferde yapılabilmesi de maliyet unsuru açısından ekonomiye katkısı olacaktır.

Tasarımı ve imalatı tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen elektronik kontrollü hidromekanik deney düzeneğinin üretim, montaj ve alt sistemlerin sıralı çalışması aşamalarında çok yönlü problemlerle karşılaşmıştır. Bu problemlerin en önemlisi, çalışmanın başında belirlenen yüksek basınç (100 MPa ve üzeri) değerlerine ulaşamaması olmuştur. Yüksek basınç değerlerinde kullanılması gereken hidrolik pompa, valf grubu, basınç yükseltici ve hidrolik bağlantı elemanlarının niteliğinin ve dolayısıyla maliyetinin artması, bu çalışmada 30 MPa etkin basınç değerinin sınırlayıcısı olmuştur. Diğer taraftan, baskı yastığı basıncını kontrol eden elektro manyetik valfin son derece duyarlı olması gerekmektedir. Bu duyarlılık sayesinde, derin çekme işlemlerinde kalıp içerisine doğru zımba etkisiyle akan sacın, baskıya maruz kalan yüzey alanının küçülmesi oranında baskı plakası basıncının da düşürülmesiyle mümkün olacaktır. Donanımların teminindeki mali sınırlamalar dolayısıyla elde edilebilen elektro manyetik valfin istenilen duyarlılıkla çalışmaması nedeniyle başlangıçta planlanan çekme işlemi süresince baskı yastığı basıncı değiştirilememiş ve deneylerde sabit alınmak zorunda kalmıştır. İlkel pul yüzey alanına ve kalıp içi basınç artışına bağlı olarak, baskı yastığı kuvvetinin son derece duyarlı elektro manyetik valf ile ayarlanması halinde, çalışma kapsamında elde edilen çekme oranlarının üzerine çıkılması beklenmektedir.

Maliyet unsuru olarak hidrolik şekillendirme yöntemleri değerlendirildiğinde, gerek hidromekanik derin çekme yöntemi gerekse de diğer hidrolik şekillendirme işlemleri için gerekli alt yapının hidrolik ekipmanlar açısından ülkemizde sınırlı olduğu görülmüştür. Sistemin kontrolünü sağlayan hassas hidrolik ekipmanlar ve sızdırmazlık elemanlarının ülkemiz sanayisinde üretilmiyor olması yüksek sıvı basıncıyla sac metal ürünlerin şekillendirilmesi işlemi için önemli bir olumsuzluk olarak yorumlanmıştır.

Sıvı basıncı ile şekillendirme işlem parametrelerinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışma konusu ile ilgili olarak daha sonra yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

1. Kalıp içi basıncı değerinin 100 MPa ve üzerinde kontrol edilebilmesi, paslanmaz ve yüksek mukavvemetli çeliklerin hidromekanik yöntemine göre şekillendirilebilirliklerinin deneysel araştırılmasına imkan sağlayacaktır.
2. Baskı yastığı değerinin, kalıp içi basıncı değerine göre veya zımba hızı veya zamana bağlı olarak hassas kontrolü ile daha yüksek çekme oranlarında şekillendirme parametreleri deneysel olarak araştırılabilir.
3. Hidrolik şekillendirme yöntemlerinde akışkan sıvının sıcaklık kontrolü ile sıcaklığın şekillendirmeye olan etkileri araştırılabilir.
4. Sac malzemelerin hadde yönlerinin hidromekanik şekillendirme işlemlerinde etkisi deneysel olarak araştırılabilir.
5. Akışkan olarak, yağ türünün veya numarasının değişimi veya yağ yerine su kullanımı ile şekillendirme parametrelerinin etkisi araştırılabilir.
6. Kalıp veya zımba yüzey pürüzlülüğü değerinin şekillendirmeye olan etkileri deneysel olarak araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Zhang, S.H., Danckert, J., “Development of hydro-mechanical deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 83: 14–25 (1998).
2. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J., “Mechanics of Sheet Metal Forming”, *Butterworth - Heinemann Publications*, London, 152-153 (2002).
3. Şahin, S., “Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması”, *Mühendis ve Makine*, 45 (533): 35-39.
4. Lang L.H., Wang Z.R., Kang D.C., Yuan S.J., Zhang S.H., Danckert J., Nielsen K.B.; “Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 151: 165–177 (2004).
5. Zhang, S.H., “Developments in hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 91: 236–244 (1999).
6. Hartl Ch., “Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 383–392 (2005).
7. Çelikayar, G.; “Yüksek basınç altında metallerin şekillendirilmesi (hidroforming)”, *III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 29-38 (2003).
8. Kleiner M., Chatti S., Klaus A.; “Metal forming techniques for lightweight construction”, *Journal of Materials Processing Technology*, 177: 2–7 (2006).
9. Siegert K., HaËussermann M., LoËsch B., Rieger R., “Recent developments in hydroforming technology”, *Journal of Materials Processing Technology*, 98: 251-258 (2000).
10. Lücke, H.-U., Hartl, C., “Hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 115: 87-91 (2001).
11. Oh, S., Jeon, B-H., Kim, H.Y., Yang, J.B., “Applications of hydroforming processes to automobile parts”, *Journal of Materials Processing Technology*, 174: 42-55 (2006).
12. Banabic, D.; “Advanced methods in material forming”, *Springer*, Verlag Berlin Heidelberg, 167-188 (2007).
13. Kandil A., “An experimental study of hydroforming deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 134: 70-80 (2003).

14. Vollertsen, F., Breedel, R., Lange, X.; "A method for deep drawing with multiple elastomer membranes", *Annals of the CIRP*, 48 (1): 221-226 (1999).
15. Yongchao, X., Yu, C., Dachang, K.; "Hydromechanical deep drawing of superalloy cups", *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 243-246 (2005).
16. Yu, W.R., Zampaloni, M., Pourboghra, F., Chung, K., Kang, T.J.; "Sheet hydroforming of woven frt composites: non-orthogonal constitutive equation considering shear stiffness and undulation of woven structure", *Composite Structures*, 61: 353-362 (2003).
17. Zampaloni, M.A., Pourboghra, F., Yu, W.R.; "Stamp thermo-hydroforming: a new method for processing fiber-reinforced thermoplastic composite sheets", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17: 31-50 (2004).
18. Bruni, C., Celeghini, M., Geiger, M., Gabrielli, F.; "A study of techniques in the evaluation of springback and residual stress in hydroforming", *Int. Journal of Adv. Manuf. Technol.*, 33: 929-939 (2007).
19. Kleiner, M., Curbach, M., Tekkaya, A.E., Ritter, R., Speck, K., Trompeter, M.; "Development of ultra high performance concrete dies for sheet metal hydroforming", *German Academic Society for Production Engineering (WGP) Prod. Eng. Res. Devel.*, 2: 201-208 (2008).
20. Karkoub, M.A.; "Prediction of hydroforming characteristics using random neural networks", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17: 321-330 (2006).
21. Liewald, M., Khandeparkar, T.; "Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries", *Journal of Materials Processing Technology*, 202: 246-254 (2008).
22. Qin, Y., Balendra, R.; "Design considerations for hydromechanical deep drawing of sheet components with concave features", *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 163-170 (2004).
23. Wu, J., Balendra, R., Qin, Y.; "A study on the forming limits of the hydromechanical deep drawing of components with stepped geometries", *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 242-246 (2004).
24. Valetta, D.A.; "In-plane plane strain testinh of sheet materials for multi stage processes", M.Sc. Thesis, *Queen's University, Department of Mechanical and Materials Engineering*, Kingston Ontario, 1-14 (2005).
25. Hein, P., Vollertsen, F.; "Hydroforming of sheet metal pairs", *Journal of Materials Processing Technology*, 87: 154-164 (1999).

26. Shin Y.S., Kim, H.Y, Jeon, B.H., Oh, S.I.; "Prototype tryout and die design for automotive parts using welded blank hydroforming", *Journal of metarials processing techonology*, 130 (131): 121-127 (2002).
27. Merklein, M., Geiger, M., Cojutti, M.; "Hydroforming of inhomogeneous sheet pairs with counterpressure", *German Academic Society for Production Engineering Prod. Eng. Res. Devel.* (WGP), 1-6 (2008).
28. Assempour, A., Emami, M.R.; "Pressure estimation in the hydroforming process of sheet metal pairs with the method of upper bound analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (5): 2270-2276 (2008).
29. Vollertsen, F.; "Accuracy in process chains using hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, 103: 424-433 (2000).
30. Novotny, S., Geiger, M.; "Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures", *Journal of Materials Processing Technology*, 138: 594-599 (2003).
31. Choi, H.; "A study on warm hydroforming of lightweight sheet materials:process optimazition", Ph. D. Thesis, *Unversity of Michingan Department of Mechanical Engineering*, Michingan, 1-24 (2006).
32. Nielsen, K.B., Lang, L.H., Danckert, J.; "Investigation into the effect of pre-bulging during hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44: 649-657 (2004).
33. Zhang, S.H., Jensen, M.R., Nielsen, K.B., Danckert, J., Lang, L.H.; Kang, D.C., "Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups", *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 544-550 (2003).
34. Singh S. K., Kumar D.R.; "Effect of process parameters on product surface finish and thickness variation in hydro-mechanical deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 169-178 (2008).
35. Ertuğrul, M., Groche, P.; "Process control at the sealing line during sheet metal hydroforming", *Prod. Eng. Res. Devel.* 2: 3-8 (2008).
36. Abedrabbo, N., Pourboghrat, F., Zampaloni, M.A.; "Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming", *International Journal of Mechanical Sciences*, 47: 333-358 (2005).
37. Shang, H.M., Qin, S., Tay, C.J.; "Hydroforming sheet metal with intermittent changes in the draw-in condition of the flange", *Journal of Materials Proccessing Technology*, 63: 72-76 (1997).

38. Groche, P., Metz, C.; "Investigation of active-elastic blank holder systems for high-pressure forming of metal sheets", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 1271-1275 (2006).
39. Lang, L.; Danckert, J., Nielsen, K.B.; "Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44: 495–502 (2004).
40. Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B., Zhou, X.; "Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method", *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 191-200 (2005).
41. Guk, S.V., Smirnov, O.M., Kavalla, R.; "Stampability of steel sheet and strip in axisymmetric hydraulic forming with fluid counterpressure", *Metallurgist*, 50: 111-116 (2006).
42. Thiruvarudchelvan, S., Lewis, W.; "A note on hydroforming with constant fluid pressure", *Journal of Materials Processing Technology*, 88: 51–56 (1999).
43. Ahmetoglu, M., Hua, J., Kulukuru, S., Altan, T.; "Hydroforming of Sheet Metal Using a Viscous Pressure Medium", *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 97-107 (2004).
44. Thiruvarudchelvan, S., Tan, M.J.; "Fluid-pressure-assisted deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, 192 (193): 8-12 (2007).
45. Lang L., Danckert J., Nielsen K. B.; "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure. Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 150–161 (2005).
46. Thiruvarudchelvan, S., Wang, H.; "Investigations into the hydraulic-pressure augmented deep drawing process", *Journal of Materials Processing Technology*, 105: 161-175 (2000).
47. Thiruvarudchelvan, S., Wang, H.B., Seet, G.; "Hydraulic pressure enhancement of the deep-drawing process to yield deeper cups", *Journal of Materials Processing Technology*, 82: 156–164 (1998).
48. Zhao, S.D., Zhang, Z.Y., Zhang, Y., Yuan J.H.; "The study on forming principle in the process of hydro-mechanical reverse deep drawing with axial pushing force for cylindrical cups", *Journal of Materials Processing Technology*, 187(188): 300-303 (2007).

49. Lin, J., Zhao, S.D., Zhang, Z.Y., Wang, Z.W.; “Deep drawing using a novel hydromechanical tooling”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49: 73-80 (2009).
50. Zhang, S.H., Zhou, L.X., Wang, H.Z., Xu, Y.; “Technology of sheet hydroforming with a movable female die”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 781–785 (2003).
51. Beckmann M., Vollertsen F.; “Analytical model for free form radii after deep and stretch drawing using pressured membranes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 174: 363–370 (2006).
52. Vollertsen F.; “Process Layout Avoiding Reverse Drawing Wrinkles in Hydroforming of Sheet Metal”, *Journal of Engineering Manufacture*, 215: 977 – 990 (2001).
53. Peled, A., Rubin, M.B., Tirosh, J.; “Analysis of blank thickening in deep drawing processes using the theory of a cosserat generalized membrane”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52: 317-340 (2004).
54. Choi, H., Ni, J., Koç, M.; “A study on the analytical modeling for warm hydro-mechanical deep drawing of lightweight materials”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47: 1752-1766 (2007).
55. Ravisekar, A.; “Metalmodel-based optimization applied to crashworthiness and sheet metal hydroforming”, M.Sc. Thesis, *Michigan State University, Department of Mechanical Engineering*, Michingan, 1-2 (2003).
56. Alamo, J.D., Fernandez, J.C., Hernandez, M., Nunez, Y., Irusta, R., Valle, J.L.D.; “Environmental optimisation of a hydro-moulding process”, *Journal of Cleaner Production*, 12: 153-157 (2004).
57. Yoon, J.W., Chung, K., Pourboghrat, F., Barlat, F.; “Design optimization of extruded preform for hydroforming processes based on ideal forming design theory”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48: 1416–1428 (2006).
58. Lang, L., Li, T., An, D., Chi, C., Nielsen, K.B., Danckert, J.; “Investigation into hydromechanical deep drawing of aluminum alloy-complicated components in aircraft manufacturing”, *Materials Science and Engineering*, A 499: 320–324 (2009).
59. Gather U., Homberg W., Kleiner M., Klimmek C., Kuhnt S.; “Parameter Design For Sheet Metal Hydroforming Processes”, *Central Public Funding Organisationfor Academic Research in Germany (DFG)*, 1-6 (2002).

60. Kim, J., Kang, B.S., Lee, K.J.; "Statistical evaluation of forming limit in hydroforming process using plastic instability combined with form", *International Journal of Advanced Manufacturing of Technology*, 42: 53-59 (2009).
61. Hojjati, M.H., Zoorabadi, M., Hosseini-pour, S.J.; "Optimization of superplastic hydroforming process of aluminium alloy 5083", *Journal of Materials Processing Technology*, 205: 482-488 (2008).
62. Azodi, H.D., Naeini H.M., Parsa M. H., Liaghat, G. H.; "Analysis of rupture instability in the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups", *Int. Journal of Adv. Manuf. Technology*, 1-10 (2007).
63. Gelin J.C., Ghouati O., Paquier P.; "modelling and control of hydroforming processes for flanges forming", *Annals of the CIRP*, 47 (1): 213-216 (1998).
64. Hama, T., Hatakeyama, T., Asakawa, M., Fujimoto, H., Makinouchi, A., Amino, H., Takuda, H.; "Finite-element simulation of the elliptical cup deep drawing process by sheet hydroforming", *Finite Elements in Analysis and Design*, 43: 234-246 (2007).
65. Zhao, S., Zhang, Y., Zhang, Z.; "A novel response variable for finite element simulation of hydro-mechanical deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, 208: 85-89 (2008).
66. Kang, B.S., Son, B.M., Kim, J.; "A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using fem", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44: 87-94 (2004).
67. Pandya, R.S.; "Prediction of variation in dimensional tolerance due to sheet metal hydroforming using finite element analysis", M.Sc. Thesis, *Wichita State University, College of Engineering and the Faculty of Graduate School*, Wichita-Kansas, 1-16 (2006).
68. Palaniswamy, H.; "Determination of process parameters for stamping and sheet hydroforming of sheet metal parts using finite element method", Ph.D. Thesis, *Graduate School of The Ohio State University*, Ohio, 1-7 (2007).
69. Zhang, S.H., Nielsen, K.B., Lang, L.H., Kang, D.C., Danckert, J.; "Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes", *Journal of Materials Processing Technology*, 102: 1-8 (2000).
70. Sharma A. K., Rout D.K.; "Finite element analysis of sheet Hydromechanical forming of circular cup", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1445-1453 (2009).

71. Prete, A.D., Anglani, A., Primo, T., Spagnolo, A.; "Computer aided simulation as valid tool for sheet hydroforming process development", *Int. Journal of Mater. Form Suppl.*, 1: 317–322 (2008).
72. An, J.; "Computer-aided analysis and design of a sheet metal hydroforming process", Ph. D. Thesis, *University of Cincinnati Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering*, Cincinnati, 11-14 (1996).
73. Gather U., Kuhnt S.; "Generalized Linear Models for Simulated Hydroforming Processes"; *Kolloquium - Forschergruppe FreiFormFlächen*, Germany, 1-8 (2002).
74. Li-hui, L., Tao, L., Xian-bin, X., Kristensen, B.E., Danckert, J., Nielsen, K.B.; "Optimized constitutive equation of material property based on inverse modeling for aluminum alloy hydro forming simulation", *Trans. Nonferrous Met. SOC.* 16: 1379-1385 (2006).
75. Lang, L., Li, T., Zhou, X., Kristensen, B.E., Nielsen, K.B., Danckert, J.; "Optimized decision of the exact material modes in the simulation for the innovative sheet hydroforming method", *Journal of Materials Processing Technology*, 177: 692-696 (2006).
76. Kim T.J., Yang D.Y., Han S.S.; "Numerical modelling of the multi-stage sheet pair hydroforming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 151: 48–53 (2004).
77. E. Önder, A. E. Tekkaya; "Numerical Simulation of Various Cross Sectional Workpieces Using Conventional Deep Drawing and Hydroforming Technologies", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48 (5): 532-542 (2007).
78. Zhou, G., Xu, C., Tricarico, L., Zhang, S.H., Palumbo, G.; "Numerical/Experimental investigations for enhancing the sheet hydroforming process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 1212-1221 (2006).
79. Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B.; "Multi-Layer sheet hydroforming: experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle", *Journal of Materials Processing Technology*, 170: 524-535 (2005).
80. Zampaloni, M., Abedrabbo, N., Pourboghrat, F.; "Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals", *International Journal of Mechanical Sciences*, 45: 1815-1848 (2003).
81. Nagaraj, S.C.; "Experimental and numerical investigations of the sheet hydraulic bulge test for aluminum alloys", M.Sc. Thesis, *Michigan State University, Department of Mechanical Engineering*, Michigan, 1-7 (2005).

82. Abedrabbo, N.E.; “Experimental and numerical investigations of stamp hydroforming and ironing of wrinkling in sheet metal forming”, M.Sc. Thesis, *Michigan State University, Department of Mechanical Engineering*, Michigan, 1-50 (2002).
83. Zhang, S.H., Nielsen, K.B., Lang, L.H., Kang, D.C., Danckert, J.; “Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40: 1479–1492 (2000).
84. Lemiale, V., Chambert, J., Picart, P.; “Description of numerical techniques with the aim of predicting the sheet metal blanking process by fem simulation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 2723-2734 (2009).
85. Palumbo, G., Pinto, S., Tricarico, L.; “Numerical experimental analysis of the sheet hydroforming process using cylindrical, square and compound shaped cavities”, *Journal of Materials Processing Technology*, 155 (156): 1435-1442 (2004).
86. Parsa, P., Darbandi, M.H.; “Experimental and numerical analyses of sheet hydroforming process for production of an automobile body part”, *Journal of Materials Processing Technology*, 198: 381–390 (2008).
87. Hatipoğlu, H. A.; “Experimental and numerical investigation of sheet metal hydroforming (flexforming) processes, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-17 (2007).
88. Alberti, L., Fratini, N.; “Innovative sheet metal forming processes: numerical simulations and experimental tests”, *Journal of Materials Processing Technology*, 150: 2-9 (2004).
89. Cherouat, A., Ayadi, M., Mezghani, N., Sliman, F.; “Experimental and Finite Element Modelling of Thin Sheet Hydroforming Processes”, *Int. Journal of Mater. Form*, 1: 313–316 (2008).
90. Gürün, H.; “Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini”, Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 20-45 (2008).
91. Güneş, A.T., “Pres İşleri Tekniği Cilt 2”, *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, 1-159 (2002).
92. Alparslan Y.E.; “Merkezi delikli taslak malzemelerin derin çekme özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 9-31 (2008).
93. Ataşımşek, S.; “Sac Kalıpları”, 401- 570 (1971).

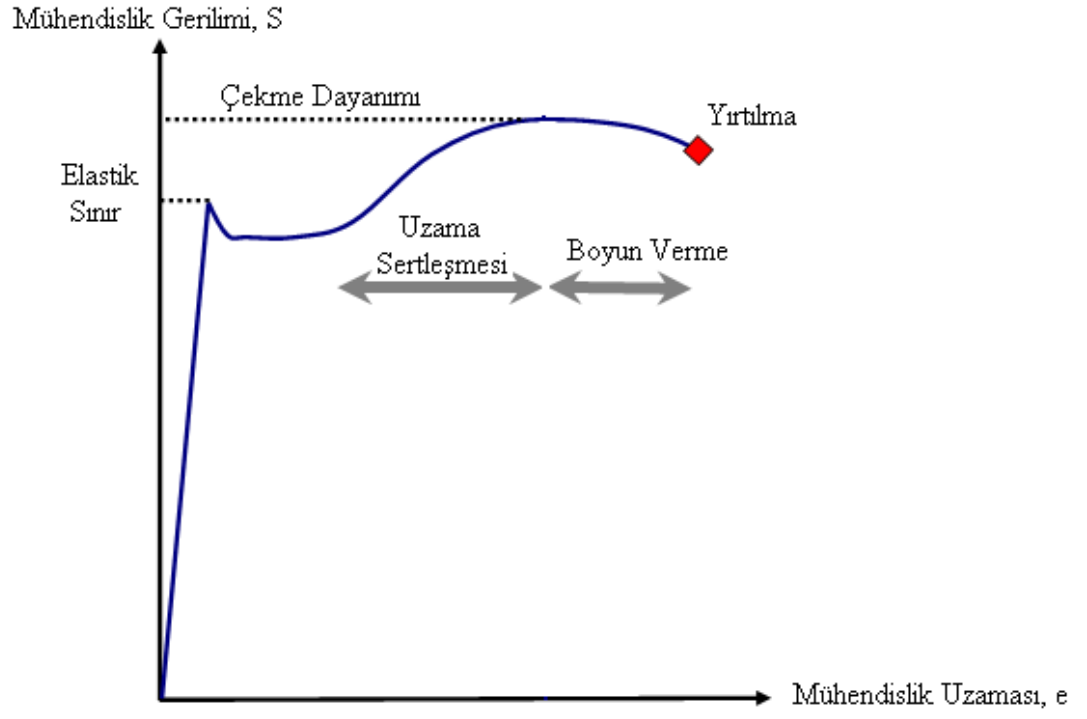
94. Karalı, M.; “Derin sac çekme işleminde kap verimini düşürmeyecek minimum pot baskı miktarının ve değişim eğrisinin FEM yoluyla araştırılması”, *Proceedings of 11th International Materials Symposium*, April 19-21, Denizli, Türkiye, 991-995 (2006).
95. Demirci, H.İ., Yaşar, M., Demiray, K., Karalı, M.; “Derin çekme işlemlerinde baskı plakasının cidar kalınlığı üzerindeki etkisinin ansys-Ls-Dyna ile incelenmesi”, *4th International Advanced Technologies Symposium*, September 28-30, Konya- Türkiye (2005).
96. Karalı M., “Silindirik derin çekme işleminde zımba uç formunun cidar kalınlık dağılımına etkisinin sey yöntemiyle incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 53-57 (2006).
97. Gavas, M., Yasar, M.; “Al-1050 alaşımlı alüminyum sacın kare derin çekilmesi ve teorik modelinin oluşturulması”, *Teknoloji*, 9 (2): 119-126 (2006).
98. Karalı, M.; “Derin sac çekme işleminde kalıp boşluğunun cidar kalınlık değişimine etkilerinin sonlu elemanlar analizi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1: 55-60 (2007).
99. Savas, V., Secgin, O.; “A new type of deep drawing die design and experimental results”, *Materials and Design*, 28: 1330-1333 (2007).
100. Özek. C., Bal, M.; “Derin çekme kalıplarında matris-zımba radyüsü ve çekme oranının et kalınlığı üzerindeki etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 24 (1): 33-41 (2009).
101. Karalı, M.; “Silindirik kapların derin çekilmesinde farklı baskı plakası kuvvetlerinin ve uygulama yöntemlerinin kulaklaşmaya olan etkilerinin incelenmesi”, *Trakya Univ. J. Sci.*, 9 (1) : 41-46 (2008).
102. Kesici, T.; “%70 Cu - %30 Zn pirinç alaşımlarında tav parametrelerinin derin çekilebilirliğe etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, 1-26 (2006).
103. Koç, M.; “Hydroforming for advanced manufacturing”, *Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC*, Cambridge, 1-28, 216-237 (2008).
104. Verlinden, B., Driver, J., Samajdar, I., Doherty, R.D.; “Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials”, *Pergamon Materials Series*, 11: 233-332 (2007).
105. Özer, M.; “Hidrolik akışkan basıncıyla (hydroforming) tesisat bağlantı elemanlarının şekillendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-28 (2007).

106. Gelin, J.C.; “Advances and progresses in sheet and tube hydroforming processes”, *Advances in Material Forming*, 13: 193-205 (2007).
107. Singh, H.; “Fundamentals of hydroforming”, *Society of Manufacturing Engineers*, 29-35 (2003).
108. Tschaetsch H.; “Metal Forming Practise”, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 172-184 (2006).
109. Altan, T.; “Metal Forming Handbook/Schuler”, *Springer*, Verlag Berlin Heidelberg, 185-193 (1998).
110. Zhou, L.X., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T., Zhang, S.H.; “Recent developments in sheet hydroforming technology”, *Journal of Materials Processing Technology*, 151: 237–241 (2004).
111. Vahl, M., Hein, P., Bobbert, S.; “Hydroforming of sheet metal pairs for the production of hollow bodies”, *Subject of a presentation at the 1999 ATS International Steelmaking Conference*, Paris, 1255-1263 (1999).
112. Abrantes, J.P., Ponce-Szabo, A., Batalha, G.F.; “Experimental and numerical simulation of tube hydroforming (thf)”, *Journal of Materials Processing Technology*, 164 (165) : 1140–1147 (2005).
113. Keigler, M., Silva, A.K.M., Bauer, H., Harrison, D.; “Enhancing the formability of aluminium components via temperature controlled hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 363-370 (2005).
114. Kocanda A., Sadlowska H.; “An approach to process limitations in hydroforming of x-joints as based on formability evaluation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 177: 663–667 (2006).
115. Koçar, O.; “Alüminyum 1050 tüplerin şekillendirilmesinin teoriksel ve deneysel olarak incelenmesi”, Bilim uzmanlığı tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-43 (2006).
116. Hwang Y.M., Wang C.W.; “Flow stress evaluation of zinc copper and carbon steel tubes by hydraulic bulge tests considering their anisotropy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 4423–4428 (2009).
117. Elsenheimer, D., Groche, P.; “Determination of Material Properties for Hot Hydroforming”, *Production Engineering*, 0944 (6524): 165-174 (2009).
118. Bardelcik, A.; “Effect of pre-bending and hydroforming parameters on the formability of advanced high strength steel tube”, M.Sc. Thesis, *University of Waterloo Department of Mechanical Engineering*, Waterloo, 1-5 (2006).

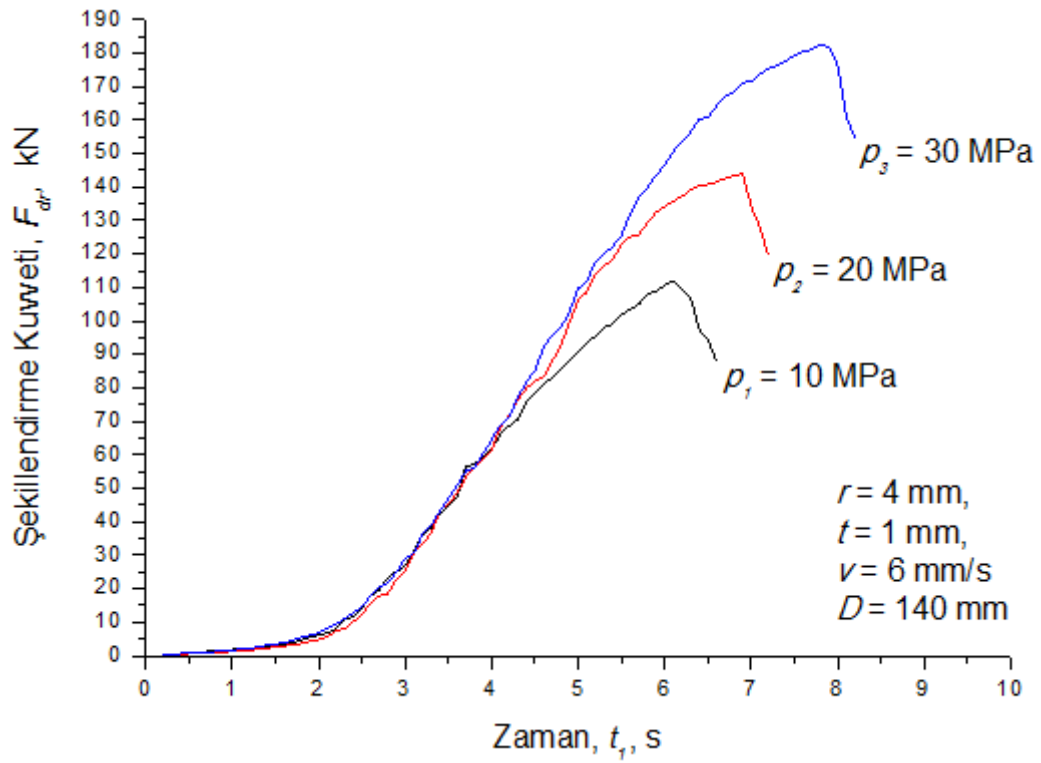
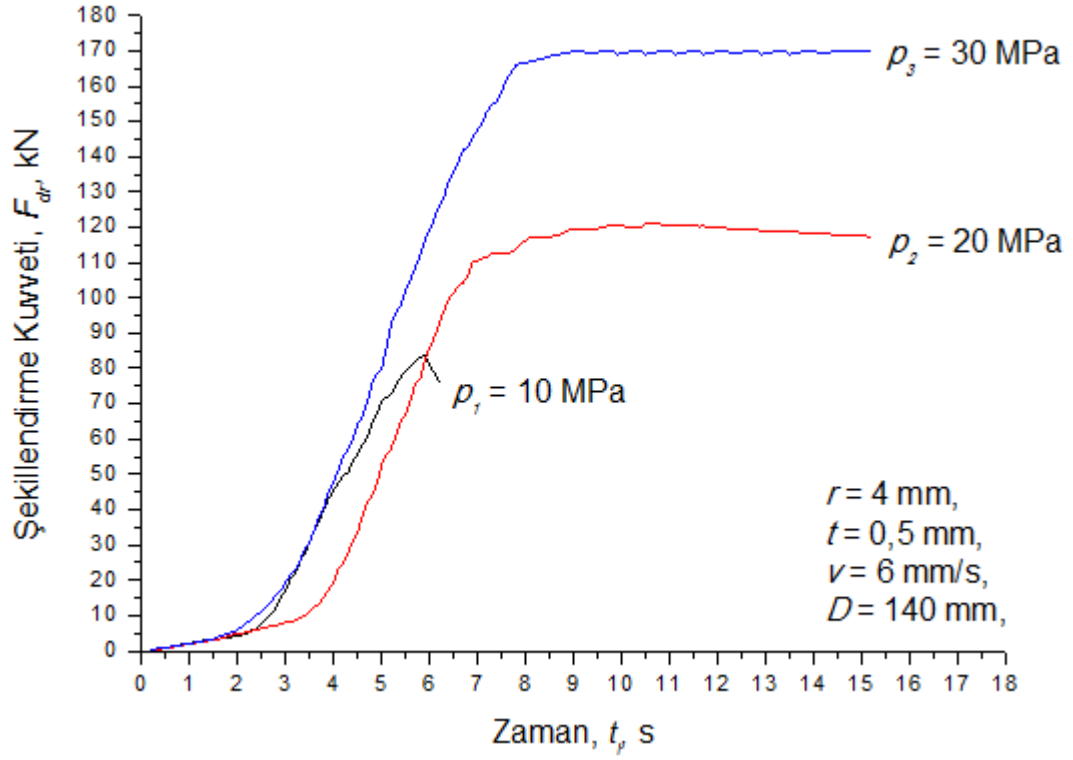
119. Yuan, S.J., Han, C., Wang, X.S.; “Hydroforming of automotive structural components with rectangular-sections”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 1201–1206 (2006).
120. Lin J.F., Yuan S.J.; “Influence of internal pressure on hydroforming of double handles crankshaft”, *Materials Science and Engineering*, A 499: 208–211 (2009).
121. Wang, Z.R., Teng, B.G., Yuan, S.J., Lang, L.H., Wang, Z.J.; “Simulation of some cases of hydroforming and viscous pressure forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 150: 25–29 (2004).
122. Neugebauer, R., Mauermann, R., Grützner, R.; “Hydrojoining”, *Int. Journal of Mater. Form. Suppl.*, 1: 1303 –1306 (2008).
123. Ali H.A.; “Ticari sacların ve erdemir derin çekme saclarının derin çekilebilme özelliklerinin belirlenerek benzer ithal saclar ile karşılaştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 5, 36-50, Ankara (2001).
124. Demiray, K.; “Al 1050 malzemesinin derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi”, Bilim uzmanlığı tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 1-30 (2006).
125. Erişkin, Y., “Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları*, Ankara, 127-159 (1986).
126. Simith, A.D., “Die Design Handbook”, *Society of Manufacturing Engineers*, Michigan, 10.1-10.30, 11.1-11.35, 12.1-12.44 (1990).
127. Suchy, I.; “Handbook of Die Design”, *McGraw-Hill*, New York, 367-461 (2006).
128. Gedney, R.; “Sheet metal formability”, *Advanced Materials & Processes*, Norwood, 33-36 (2002).
129. Özçelik, G.; “Derin çekme işleminin simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 13-35 (2008).
130. Kayalı, E.S., Çimenoglu, H., “Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 4-37 (1995).

EKLER

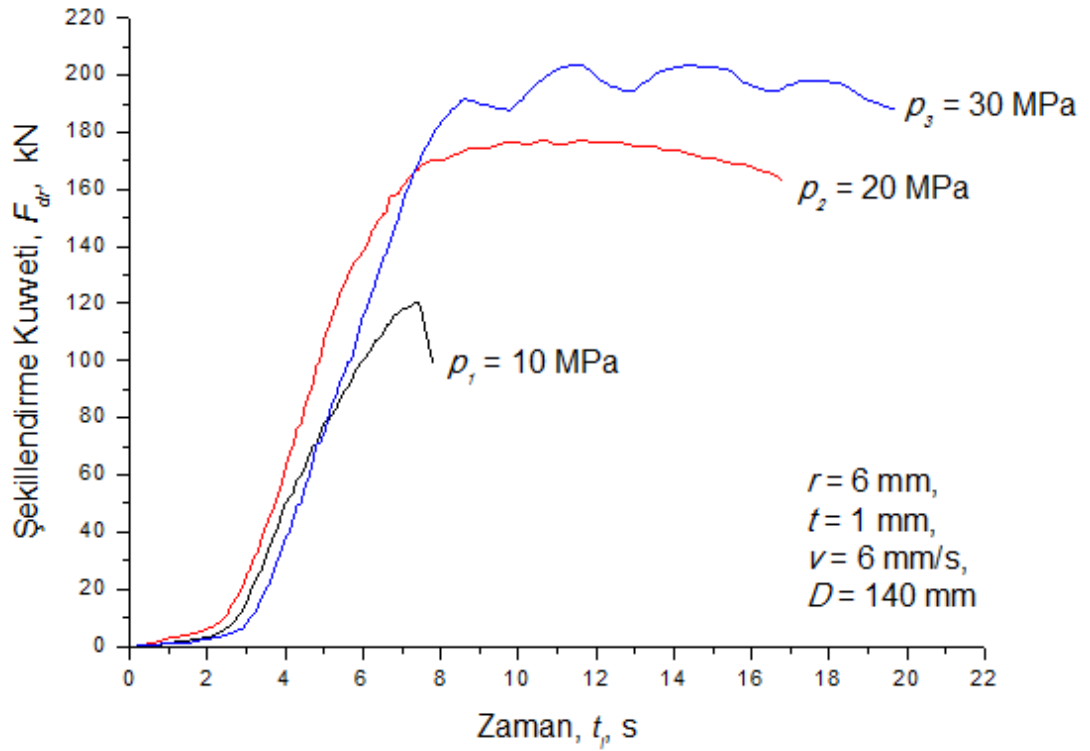
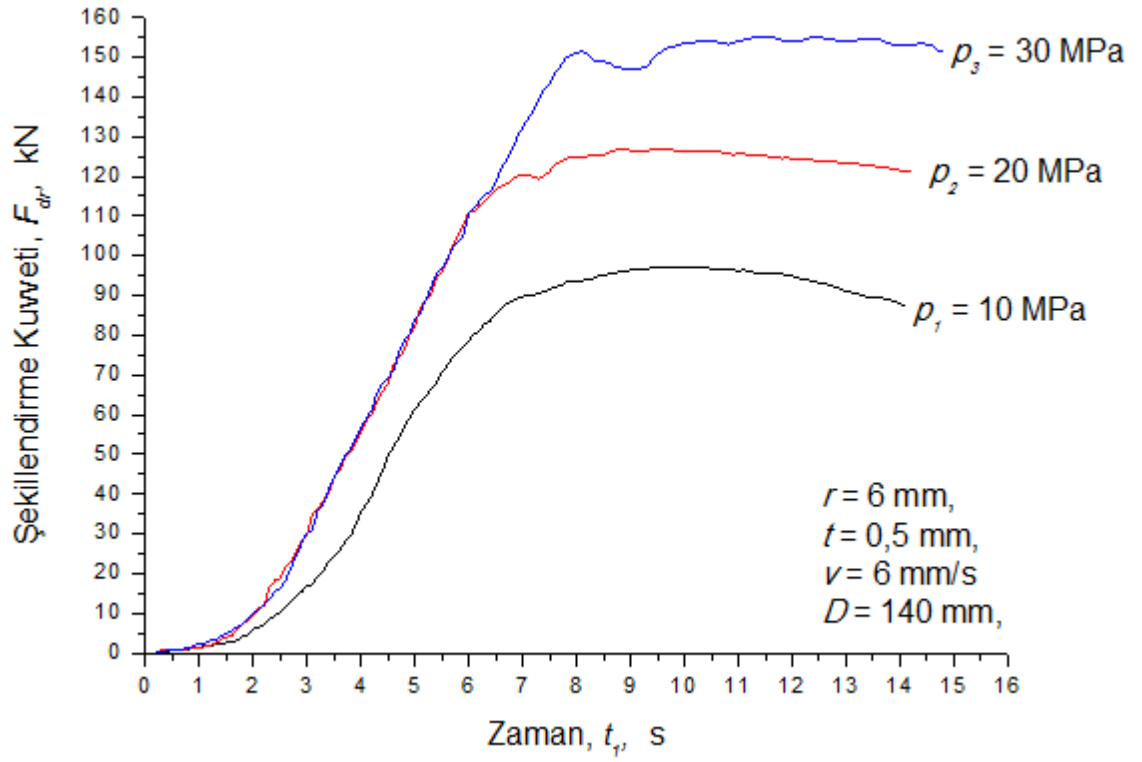
Ek-1. Gerilim-uzama grafiği



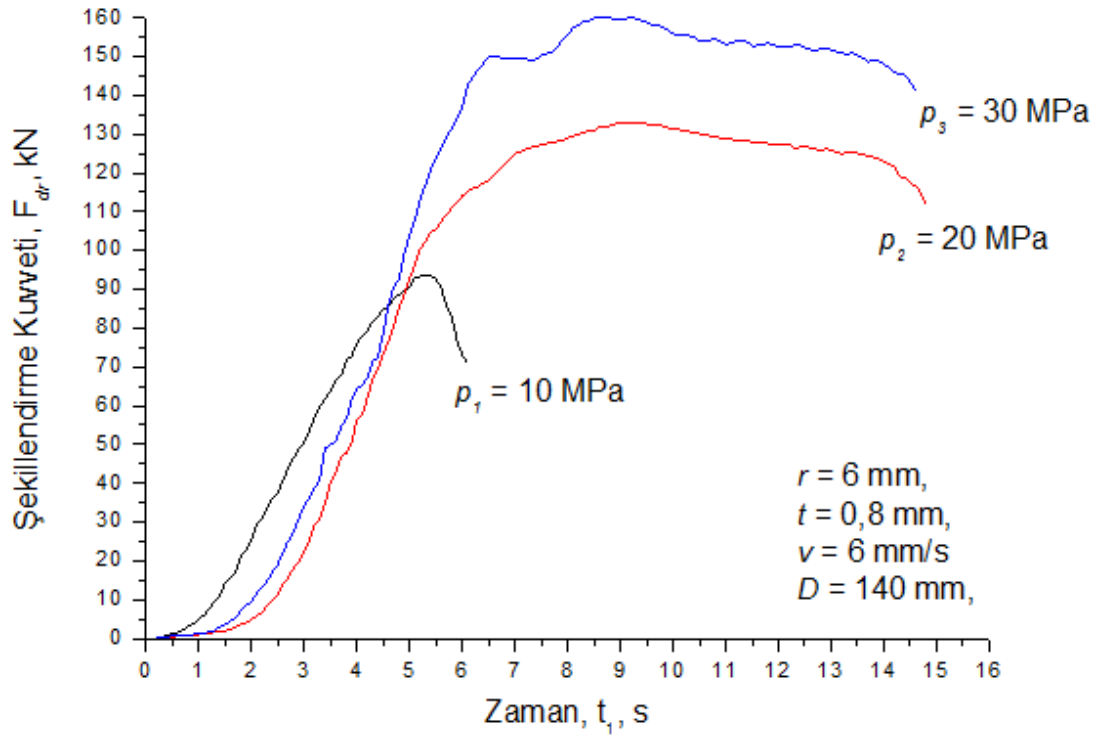
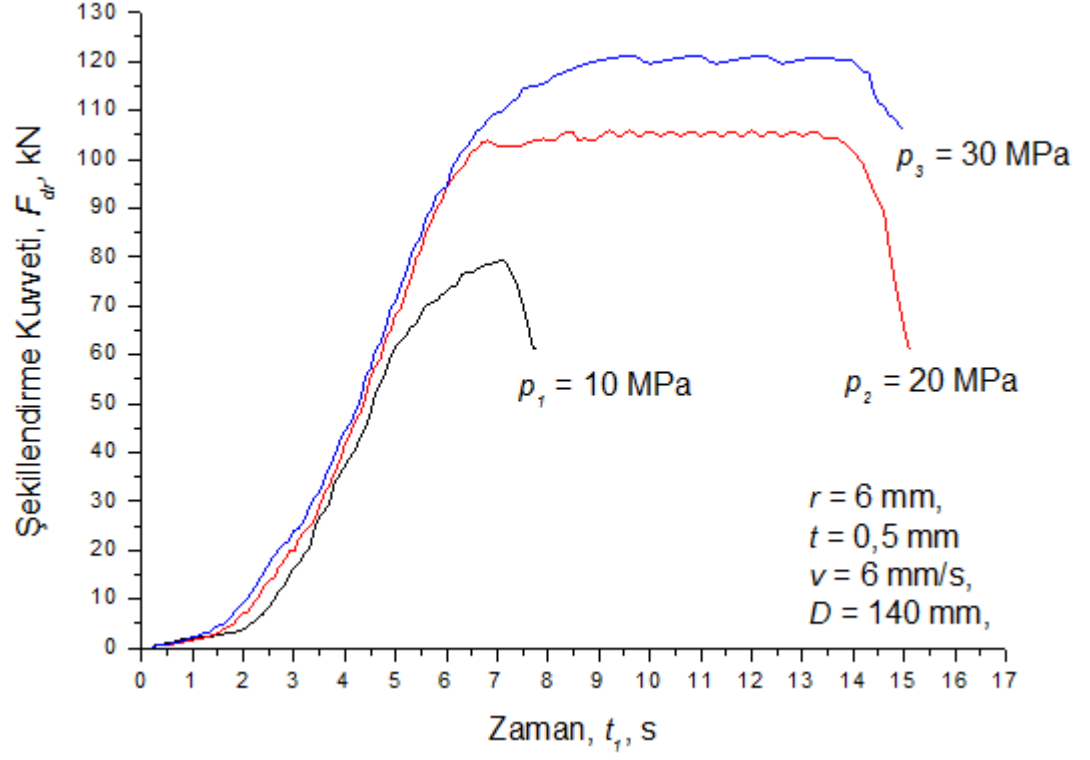
Ek-2. Erdemir 6112 sac malzeme $r = 4$ mm ve $r = 6$ mm kalıp kavisi örnek grafikleri



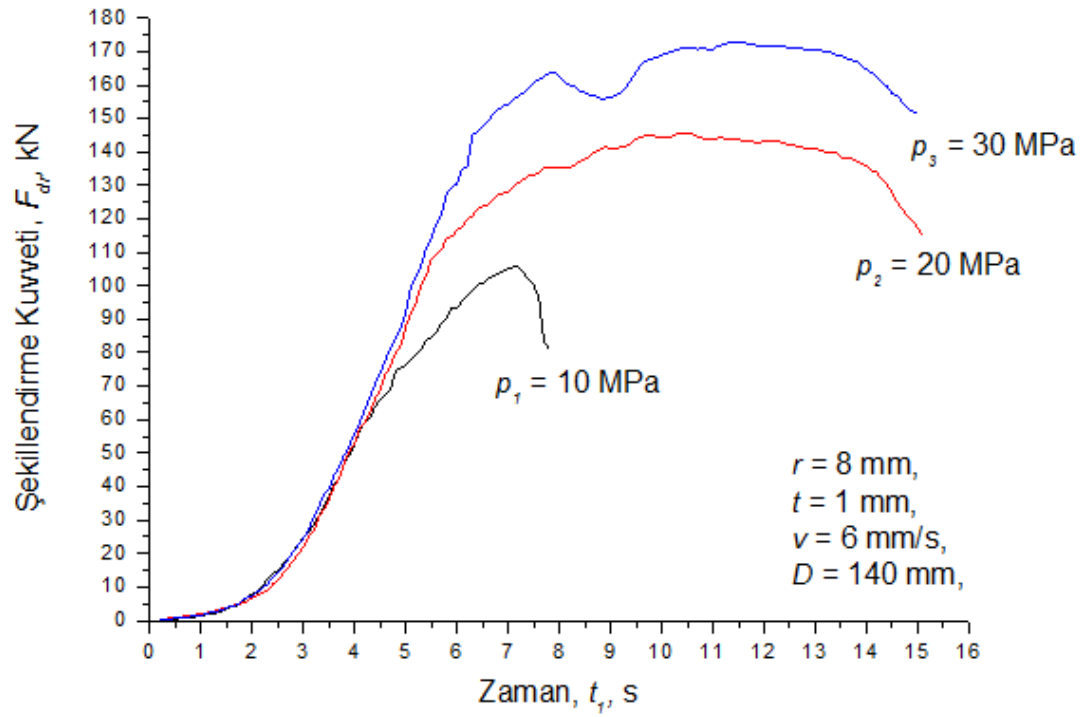
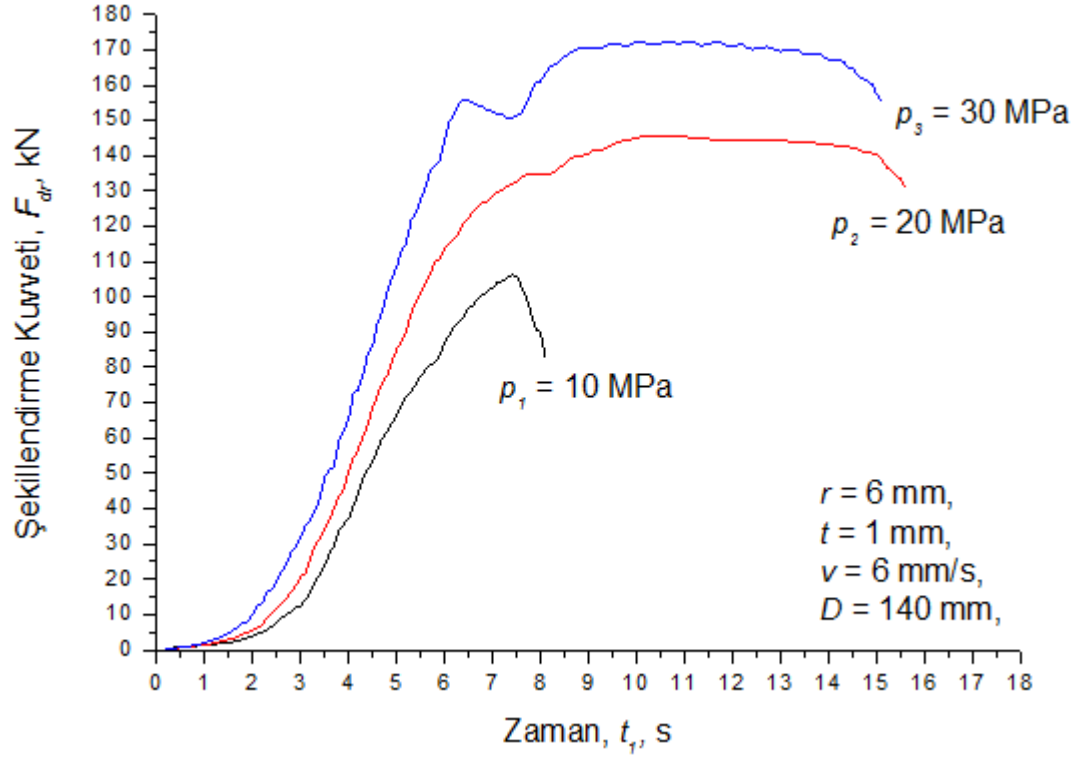
Ek-2. (Devamı) Erdemir 6112 sac malzeme $r = 4$ mm ve $r = 6$ mm kalıp kavisi örnek grafikleri



Ek-3. Bakır sac malzeme silindirik şekillendirme örnek grafikleri



Ek-3. (Devamı) Bakır sac malzeme silindirik şekillendirme örnek grafikleri



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARAAĞAÇ, İbrahim
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1979 - Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 202 89 07
 Faks : 0 (312) 282 73 16
 e-mail : ibrahimkaraagac@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniv. / Makine Eğitimi Böl.	2004
Lisans	Gazi Üniv. / Makine Eğitimi Böl.	2001
Lise	Ankara Gazi Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008- ---	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007-2008	TÜBİTAK-SAGE	Uzman
2006-2007	İstanbul Emniyet Müdürlüğü	Polis Memuru
2001-2006	Makim Makine İmalat San.Tic.Ltd.	Mekanik Tasarımcı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Karaağaç İ., Özdemir A., “Plastik enjeksiyon kalıplarının klasik maliyet hesabına algoritmik bir yaklaşım” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18 (4): 657-669 (2005), Ankara.

2. Karaağaç İ., Özdemir A., “Plastik enjeksiyon kalıplarının GKV yöntemi ile bilgisayar destekli maliyet hesabı” *Kalıp Dünyası Dergisi*, 46(8): 197-199 (2007).
3. Karaağaç İ., Gürün H., Özdemir A., “AISI 304 paslanmaz çelik sac malzemenin klasik ve sıvı basıncı yöntemleriyle derin çekilebilirliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmalı analizi” *5 th International Advanced Technologies Symposium IATS 09*, 112, Karabük, (2009).
4. Karaağaç İ., Özdemir A., “Sıvı basıncı ile sac şekillendirme yönteminin derin çekilebilirlik üzerine etkilerinin incelenmesi” *5 th International Advanced Technologies Symposium IATS 09*, 112, Karabük, (2009).
5. Karaağaç İ., Özdemir A. , “Sıvı basıncı ile şekillendirme deney düzeneğinin tasarımı” *11. Otomotiv Sempozyumu Kalıpcılık ve Tasarım*, Bursa, 331-338, (2009).

Tezler

Karaağaç İ.; “Plastik Enjeksiyon Kalıplarının Bilgisayar Destekli Maliyet Tahmini”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, (2004), Ankara