

**HİDROSTATİK BASINÇLA  
AI 5754 VE AI 1050 SAÇLARININ  
KÜÇÜK ÇAPTA ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

**2010  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ**

**Elmas AŞKAR**

**HİDROSTATİK BASINÇLA AI 5754 VE AI 1050 SAÇLARININ  
KÜÇÜK ÇAPTA ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

**Elmas AŞKAR**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2010**

Elmas AŞKAR tarafından hazırlanan “HİDROSTATİK BASINÇLA A1 5754 VE A1 1050 SAÇLARININ KÜÇÜK ÇAPTA ŞEKİLLENDİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim KADI

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 22 / 01 / 2010

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan: Prof. Dr. İbrahim KADI (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Cevdet GÖLOĞLU (KBÜ)

İmzası

... / ... / 2010

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Elmas AŞKAR

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **HİDROSTATİK BASINÇLA Al 5754 ve Al 1050 SAÇLARININ KÜÇÜK ÇAPTA ŞEKİLLENDİRİLMESİ**

**Elmas AŞKAR**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İbrahim KADI**

**Ocak 2010, 78 sayfa**

Hidro şekillendirme metal sac malzemenin akışkan bir ortam (su, viskoz polimerik malzeme vs) vasıtasıyla kapalı bir kapta yapılan soğuk şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem çok karmaşık parçaların şekillendirilebilmesi, üretim periyodunun kısa olmasından dolayı cazip hale gelmiştir. Bununla beraber uygulama alanlarının nispeten sınırlı olmasına rağmen, şekillendirme işleminin daha iyi sonuçlar vermesi, şekillendirme sırasında kırışıklıkların az olması ve şekillendirme işleminin de daha kolay yapılabilmesinden dolayı tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, kalıp içerisinde elde edilen hidrostatik basınçla alüminyum sacların küçük çapta şekillendirilmesi amaçlanmıştır. Malzemenin şekillenmesi için gerekli basınca dayanıklı ve basınçlı akışkanın sızmasını önleyecek bir şekillendirme kalıbı tasarlanarak deney düzeneği kurulmuştur. Çalışmada 38 mm çapında dişi kalıp kullanılmıştır. Deney numuneleri olarak 0,5 mm kalınlığında Al 5754 ve 0,6 mm kalınlığında Al 1050 sac malzemesi seçilmiştir.

Hidro şekillendirme deneyinde 104 mm çapında Al 5754 ve Al 1050 taslak sac malzemesi kullanıldığında, taslak malzemenin şeklinden ve büyüklüğünden dolayı yeterli çekme derinlikleri elde edilememiştir. Bundan dolayı çalışmada 68 mm çapında taslak levha kullanılmıştır. 68 mm çapında Al 5754 kullanıldığında sıvı basıncı 7,5 MPa, pot baskı kuvveti 8 MPa için 16 mm çekme derinliği elde edilmiştir. 68 mm çapında AL1050 malzemesinde sıvı basıncı 4 MPa, pot baskı kuvveti 4 MPa için 19 mm çekme derinliği elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın teorik modelinden elde edilen çekme derinlikleri ise 68 mm Al 5754 sac malzemesinde 20,98 mm, 68 mm Al 1050 sac malzemesinde 23,45 mm olarak bulunmuştur.

Şekillendirmenin teorik modeli eksplisit dinamik analiz kodu kullanan ANSYS/Ls-Dyna yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve model çözümlenmiştir. Deneysel ve teorik sonuçların kalınlık değişimleri ve şekillendirme miktarlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Geliştirilen teorik modellerde, basıncın ve baskı plakası kuvvetinin şekillendirmeye etkisi incelenmiştir. Kalınlık dağılımlarına göre teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış, kalınlık değişim grafikleri ve teorik olarak şekillendirme sınır diyagramları oluşturulmuştur.

**Anahtar Sözcükler** : Akışkanla şekillendirme, Sonlu elemanlar metodu, Al 5754,  
Al 1050

**Bilim Kodu** : 626.08.01

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **SMALL DIAMETER HYDROSTATIC FORMING OF Al 5754 and Al 1050 SHEETS**

**Elmas AŞKAR**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Education**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İbrahim KADI**

**January 2010, 78 pages**

Hydro forming is a cold forming method in which metal sheet material is formed in a closed pot by means of fluid medium (water, viscous polymeric material). This method becomes attractive since the manufacture period is short in order to form very complex parts. Although, application areas are very limited, this forming method is preferred because there are less wrinkles during forming and forming process can be done easily.

In this study, it was aimed to form aluminum sheets on a small diameter by hydrostatic pressure acquired within a mold .The experiment setup was organized by designing a formation mold that is resistant to pressure needed for forming of material and prevents leaking of compressed fluid . Mold 38 mm in diameter was used in this study. 0.5 mm thick Al 5754 and 0.6 mm thick Al 1050 sheet materials were chosen as experiment samples.

When Al 5754 and Al 1050 that were 104 mm in diameter draft sheet materials were used, enough pulling depth couldn't achieved because of shape and bigness of draft material in the hydro forming experiment. Because of this reason, draft plate that is 68 mm in diameter was used in this study. When Al 5754 that is 68 mm in diameter, liquid pressure was 7.5 MPa, 16mmmm pulling dept was achieved for pot press force 8 MPa. Liquid pressure was 4 MPa, 19 mm pulling dept was achieved for pot press force 4 MPa in Al 1050 material that was 68 mm. Pulling depths acquired from theoretical models of the study were 20.98 mm in 68 mm Al 5754 sheet material and 23.45 mm in 68 mm Al 1050 sheet material.

Theoretical model of the forming was generated by using ANSYS/Ls-Dyna software using explicit dynamic analyze code and the model was solved. Comparison of depth exchange of experimental and theoretical results and forming quantities were carried out. Effect of pressure and pres plate to forming within developed theoretical models was searched. Theoretical and experimental results were compared according to thickness distribution, thickness change graphics and theoretical forming border diagrams were generated.

**Keywords** : Forming by liquid, finite element method, Al 5754, Al 1050

**Science Code** : 626.08.01



## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımnda bana destek veren danıőmanım Sayın Prof. Dr. İbrahim KADI'ya, çeşitli vesilelerle katkıda bulunan Doç. Dr. Mustafa YAŞAR'a, Yrd. Doç. Dr. Cevdet GÖLOĞLU'na, Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARALI'ya, Arő. Gör. Hatice EVLEN'e, yardımlarından dolayı Satiye Sevim İSAOĞLU'na saygı ve teőekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakóltesi Arő. Gör. Mustafa AYYILDIZ'a teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	İİ
ÖZET .....	İV
ABSTRACT .....	VI
TEŞEKKÜR.....	VIII
İÇİNDEKİLER.....	İX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XV
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
BÖLÜM 2 .....	14
HİDRO ŞEKİLLENDİRME .....	14
2.1. GİRİŞ .....	14
2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ .....	16
2.2.1. Hidro Sac Şekillendirme.....	17
2.2.2. Tüp Hidro Şekillendirme .....	18
2.2.3. Hidromekanik Derin Çekme .....	19
2.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	21
2.3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi .....	21
2.3.1.1. Akma Mukavemeti.....	21
2.3.1.2. Elastisite (Young) Modülü .....	22
2.3.1.3. Pekleşme Üsteli “n” .....	23

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.3.1.4. Deformasyon Hız Duyarlılığı Üssü (m).....	24
2.3.1.5. Plastik Anizotropi “r”.....	25
2.3.1.6. Taslak Malzeme Şeklinin ve Büyüklüğünün Şekillendirme İşlemi Üzerindeki Etkileri.....	26
2.3.2. İşlem Koşulları.....	27
2.3.2.1. Kalıp Geometrisi.....	27
2.3.2.2. Baskı Plakası Kuvveti.....	27
2.3.2.3. Sac Kalınlığı ve Tane Boyutu.....	28
2.3.2.3. Çekme Hızı.....	28
2.3.2.4. Yağlama.....	28
2.3.2.5. Metalik Sacların Şekillendirme İşlemi Esnasında Görülen Hatalar ..	29
2.4. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI.....	32
2.5. METAL SACLARIN ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA BENZETİMİ.....	35
2.5.1. İmplicit Yöntem.....	36
2.5.2. Eksplicit yöntem.....	36
2.5.3. İmplicit ve Eksplicit Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	37
2.6. ANSYS/LS-DYNA PROGRAMI.....	38
2.6.1. Eksplicit Dinamik Analiz Programında Kullanılan Elementler.....	39
 BÖLÜM 3.....	 40
MATERYAL VE METOD.....	40
3.1. SİSTEMİN TANITILMASI.....	40
3.2. KALIBIN TANITILMASI.....	41
3.3. MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	43
3.4. TEORİK MODELİN OLUŞTURULMASI.....	45
3.4.1. Modelin Tasarlanması.....	45
3.4.2. Eleman Tipinin Tanımlanması.....	45
3.4.3. Malzeme Modelinin Tanımlanması.....	45
3.4.4. Modele Ağ Örne.....	46
3.4.5. Kontak (Sürtünme) Modelinin Tanımlanması.....	47

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 4 .....	49
DENEYSEL VE TEORİK BULGULAR .....	49
4.1. ÇAP 104 MM HİDRO ŞEKİLLENDİRME.....	50
4.1.1. Al 5754 .....	51
4.1.2. Al 1050 .....	54
4.2. ÇAP 68 MM HİDRO ŞEKİLLENDİRME .....	58
4.2.1. Al 5754 .....	58
4.2.2. Al 1050 .....	60
4.3. ÇAP 104 MM VE ÇAP 68 MM ŞEKİLLENDİRME KARŞILAŞTIRILMASI..	62
BÖLÜM 5 .....	66
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	66
5.1. SONUÇLAR .....	66
5.2. ÖNERİLER .....	68
KAYNAKLAR.....	69
EK A .....	75
HİDRO ŞEKİLLENDİRME SİSTEMİNİN AYRINTILI ÖLÇÜLERİ .....	75
ÖZGEÇMİŞ .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1.	Bükme işleminde, zımba kursu optimum sıvı basıncı ilişkisi .	4
Şekil 1.2.	Hidromekanik derin çekme sisteminin sistematik tanıtımı ve parabolik parçanın görünümü .	5
Şekil 1.3.	Farklı basınç değerlerinde tüpün aldığı şekiller .	6
Şekil 1.4.	Taylan vd. yaptıkları çalışma sırasında kullandıkları kalıp .	7
Şekil 1.5.	Teknik tüp .	7
Şekil 1.6.	Bir teknik tüpün et kalınlığı dağılımı .	8
Şekil 1.7.	İki şekillendirme işlemi arasındaki kalınlık incelmelerini .	11
Şekil 1.8.	Ters SBS Prosesleri .	13
Şekil 2.1.	Hidro şekillendirme kalıbı .	15
Şekil 2.2.	Yağ ve Suyun Sıkışma Grafiği .	16
Şekil 2.3.	Hidro Sac Şekillendirme .	17
Şekil 2.4.	Tüp hidro şekillendirme .	19
Şekil 2.5.	Hidrostatik ve hidrodinamik hidromekanik derin çekme .	20
Şekil 2.6.	Hidromekanik derin çekme .	20
Şekil 2.7.	Orta karbonlu çeliklerin gerilme gerinim eğrisi .	22
Şekil 2.8.	Düzgün akma gösteren bir malzemenin çekme diyagramında akma gerilmesinin bulunması .	22
Şekil 2.9.	$n$ değerinin kritik deformasyon miktarına etkisi .	24
Şekil 2.10.	Çeşitli malzemeler için derin çekme oranı sınırının ortalama dikey anizotropi “ $r$ ” katsayısına bağlı değişimi .	25
Şekil 2.11.	Şekillendirmede görülen hatalar .	29
Şekil 2.12.	Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı örneği .	33
Şekil 2.13.	Hidrolik şekillendirme kullanılan ızgara (grid) tekniği .	34
Şekil 2.14.	Farklı gerilim oranlarına benzer farklı deformasyon biçimlerini gösteren gerinim diyagramı .	35
Şekil 2.15.	İmplicit ve eksplisit metotların karşılaştırılması .	39
Şekil 2.16.	SHELL 163 element tipi .	39
Şekil 3.1.	Kurulan hidro şekillendirme sistemi kesit görünüşü .	40
Şekil 3.2.	Kurulan hidro şekillendirme kalıbı .	41

## Sayfa

Şekil 3.3. Kalıbın de-montaj resmi.....	42
Şekil 3.4. Kalıp elemanları için mesh model.....	46
Şekil 4.1. Al 5754 sacın 7,5 MPa akışkan basınç altındaki kalınlık değişim grafiği.....	52
Şekil 4.2. Al 5754 sacın 7,5 MPa akışkan basınçlı şekillenme sınırları değişimi. ..	53
Şekil 4.3. Al 5754 serisi 0,5 mm kalınlığındaki sac malzemesi için Ş.S.D.....	53
Şekil 4.4. Değişik basınçlarda yapılmış Al 5754 sac deneysel sonuçları.....	54
Şekil 4.5. Al 1050 sacın 4 MPa akışkan basınç altındaki kalınlık değişim grafiği. .	56
Şekil 4.6. Al 1050 sacın 4 MPa akışkan basınçlı şekillenme sınır değişimi. ....	56
Şekil 4.7. 0,6 mm'lik Al 1050 sac malzemesi için Ş.S.D.....	57
Şekil 4.8. Değişik basınçlarda yapılmış Al 1050 sac deneysel sonuçlar.....	57
Şekil 4.9. Küçük çapta şekillendirilmiş Al 5754 şekillenme sınırları değişimi. ....	59
Şekil 4.10. Küçük çaplı Al 5754 sacının Ş.S.D. ....	59
Şekil 4.11. Küçük çaplı Al 5754 sacının deneysel sonucu.....	60
Şekil 4.12. Küçük çap şekillendirilmiş Al 1050 çekme derinliği değişimi. ....	60
Şekil 4.13. Küçük çaplı Al 1050 sacının Ş.S.D. ....	61
Şekil 4.14. Küçük çaplı Al 1050 sacının deneysel sonucu. ....	61
Şekil 4.15. Al 5754 çekme derinliği. ....	62
Şekil 4.16. Al 1050 çekme derinliği. ....	63
Şekil 4.17. Al 5754 teorik kalınlık değişimi. ....	63
Şekil 4.18. Al 1050 teorik kalınlık değişimi. ....	64
Şekil 4.19. Al 5754 sac malzemesinin 104 mm ve 68 mm kalınlık değişim grafiği. .	64
Şekil 4.20. Al 1050 sac malzemesinin 104 mm ve 68 mm kalınlık değişim grafiği. .	65

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Al 5754 alaşımının kimyasal özelliği.....	43
Çizelge 3.2. Al 5754 alaşımının mekanik özelliği.....	44
Çizelge 3.3. Al 1050 alaşımının kimyasal özelliği.....	44
Çizelge 3.4. Al 1050 alaşımının mekanik özelliği.....	44
Çizelge 3.5. Kalıp elemanlarının sonlu element sayısı.....	47
Çizelge 4.1. Al 5754 hidrolik şekillendirmede kullanılan parametreler.....	51
Çizelge 4.2. Al 1050 hidrolik şekillendirmede kullanılan parametreler.....	55

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- Rk : kalıp radüsü  
r : plastik anizotropi  
t : sac kalınlığı  
n : pekleşme üssü  
m : deformasyon hızı duyarlılığı üssü

### KISALTMALAR

- SEM : sonlu elemanlar metodu  
FEM : finite element method  
EY : eksplisit yöntem  
IY : implisit yöntem  
ŞSD : şekillendirme sınır diyagramı  
HDÇ : hidromekanik derin çekme



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Sac şekillendirme teknolojileri son on yıl içinde özellikle otomotiv endüstrisinin gelişmesi ile çokça talep edilir hale gelmiştir. Müşteri isteklerini, güvenlik gereksinimlerini ve pazar rekabetini karşılamak amacıyla yeni üretim teknolojileri hayata geçirilmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde kullanılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisi de hidro şekillendirme yöntemidir.

Şekillendirme işleminin başlangıcında, şekillenecek sac metal kalıbın içine yerleştirilerek kalıp kapatılır. Kalıbın iç kısmında şekillendirmeyi gerçekleştirecek olan basınçlı yağ sac metale uygulanır. Sıkışan yağ sac metale uygulanarak kalıp iç profilini şeklini alarak şekillenir. Geleneksel yöntemlerde, tek kademedeki malzemede deforme olmaksızın istenilen bükümü elde etmek mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte sacların elastik/plastik davranışları, sac ve takım arasında oluşan sürtünme ve aşınma, şekillenme sırasında oluşan ısı, ısının yayılımı ve presin mekanik olarak kontrol ve dizaynı gibi şekillendirme işlemlerinin tasarımında birçok parametreyi göz önünde bulundurmak gerekir. Geleneksel yöntemlerle kalıp ve zımba yaparak üretim daha zor, zaman alıcı ve pahalıdır.

Hidro şekillendirme, günümüzde alüminyumun otomotiv ve uçak sanayisi başta olmak üzere sanayide yer tutması, fakat malzeme özellikleri itibarıyla mekanik yöntemlerle yapılan şekillendirmedeki kısıtlamalar, problemlerin oluşumunu azaltan ve daha iyi sonuçlar veren yöntemlerden birisidir. Bu yöntem çok büyük parçaların şekillendirilebilmesi için gerekli olan pres kuvvetlerinin, geleneksel yöntemlerle sağlanmasının çok zor hatta imkansız olması, çok karmaşık parçaların şekillendirilebilmesi, üretim periyodunun kısa olmasından dolayı cazip hale gelmiştir. Yöntemin uygulama alanlarının sınırlı olmasına rağmen, şekillendirme işleminin daha iyi sonuçlar vermesi, şekillendirme sırasında kırışıklıkların az olması

ve şekillendirme işleminin de daha kolay yapılabilmesinden dolayı tercih edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, hidro şekillendirme yöntemlerinden zımbasız hidromekanik yöntemini kullanarak, küçük çapta Al ve alaşımlarının şekillendirme özelliklerini teorik ve deneysel olarak incelemektir. Literatür çalışmalarına bakıldığında genellikle hidro şekillendirmelerde 100 mm ve yukarısı dişi kalıplar veya erkek zımbalar kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada daha küçük çaplarda da hidro şekillendirmenin kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Geçmiş çalışmalara bakıldığında büyük çap metalik sacların şekillendirilmesinde istenilen çekme derinliklerine ulaşılmış ve herhangi bir problemlerle karşılaşılmasıdır. Bu sebepten dolayı küçük çapta alüminyum şekillendirilmesinde uygun sıvı basıncı ve pot baskı kuvveti bulunması ile çekme derinliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Alüminyumun şekillendirilmesinde önemli problemler vardır. Bu problemler; Alüminyumun şekillenme kabiliyeti çelikten oldukça düşüktür ve şişme noktalarında yırtılmaya eğilimlidir. Alüminyumun elastik modülü çelikten daha düşüktür ve geri esnemesi çelikten daha az olduğundan dolayı alüminyumun belirli toleranslarda tutulması zordur.

Bu çalışmada hidrosatik basınçla küçük çapta Al 5754 ve Al 1050 saclarının kullanımı, hafifliği, geri dönüşebilir olması, hammaddesinin bol olması vb. nedenlerden dolayı Al malzemesinde meydana gelen şekillendirme özelliklerinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde hidro şekillendirme, hidro şekillendirme türleri ve şekillendirme sınır diyagramı hakkında bilgiler verilmiştir. Nümerik simülasyonlar için ANSYS/Ls-Dyna programı anlatılmıştır. Üçüncü bölümünde, kurulan hidro şekillendirme sistemi, sistemde kullanılan kalıp elemanları, sistemin çalışması, kullanılan malzeme özellikleri, teorik analiz modellerinin tanımlanması yapılmıştır. Dördüncü bölümünde, teorik ve deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırması yapılmıştır. Deneysel olarak alüminyum malzemeler şekillendirilmiş, bilgisayar ortamında teorik analizleri yapılmıştır. Beşinci

bölümünde, deneysel ve teorik olarak şekillendirilmiş malzemelerin sonuçları yazılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

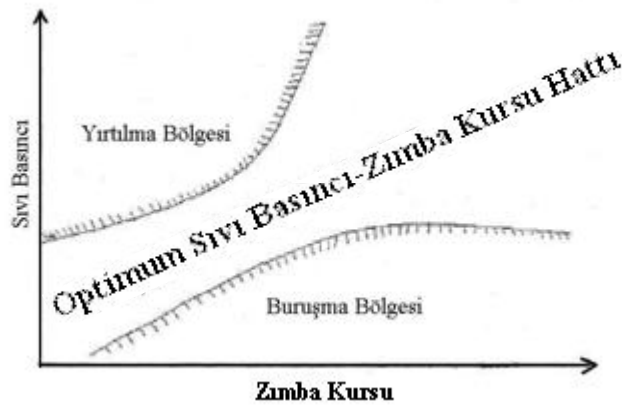
### 1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Hidro şekillendirme ile ilgili geniş araştırmalar yapılmıştır. Bunlardan bazıları; McClintock [1], Rice ve Tracey [2] hidrostatik basınç altında, malzemeye uygulanan kuvvetin arttığı halde, sac metal levhalarda meydana gelen sünek yırtılmaların çok ani olarak azaldığını çalışmalarında gösterdiler. Clift ve arkadaşları [3], Hartley ve arkadaşları [4], sac metallerin derin çekme çalışmalarında kullandıkları hidrostatik basınç sayesinde mikro çatlakların başlangıcını geciktirdikleri ve mikro çatlakların oluşması durumunda bile yayılmalarını önlediklerini gösterdiler. Bu çalışmalardaki başarının temelinde hidrostatik basıncı kullanarak levhalarda meydana gelen yırtılmaların başlangıcını geciktirmeleri vardır.

Youssef ve Denault çalışmalarında hidro şekillendirme ile bükme işleminin avantajlarının bir kısmını ortaya koymuşlardır [5]. Özellikle otomotiv ve uzay endüstrisinde dikkate değer oranda işlemlerde kullanılabileceğine dikkat çekmişler. Bu avantajlara, akışkan tarafından uygulanan basınçtan dolayı derin çekilebilme özelliğinin çok önemli ölçüde artması, zımba ve kalıp arasındaki sürtünmeden doğan aşınmaların minimize edilmesi, geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında ürünün son halinde bazı bölgelerinde meydana gelen aşırı incelmelerin ve buna bağlı olarak oluşan yırtılmaların azalması, takım kullanılmasının azalmasından dolayı dikkate değer oranda ekonomikliği ve işi bitirmek için gerekli işlem basamaklarının azalması dahildir.

Yossifon ve Tirosh tarafından da gösterildiği gibi, sıvı basıncı, üst sıvı odasında çok yüksek olursa, malzemenin sünekliğinin izin vermesinden daha hızlı olarak kalıbın şeklini almaya zorlanacaktır [6]. Bu da şekillenecek levhada beklenenden daha evvel yırtılmalara yol açar. Diğer taraftan, eğer sıvı basıncı çok düşük olursa, işlem esnasında yeterince uzama meydana gelmemesinden dolayı, malzeme buruşmaya daha meyilli olacaktır. Bundan dolayı, üst ve alt limitler arasında sıvı basıncını ayarlamak gerekir. Zımba kursu ile ilişkili olduğu gibi, optimum sıvı

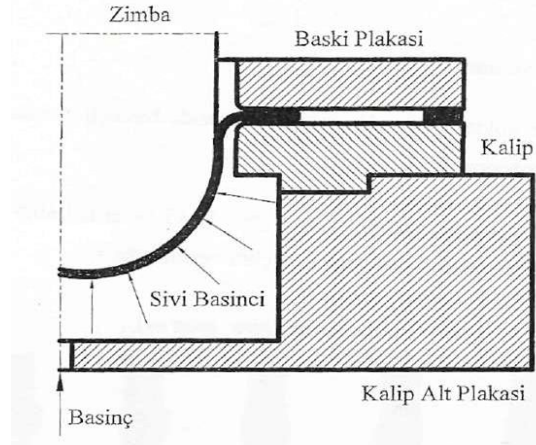
basıncının kontrolü de bitmiş üründe yırtılmaların ve buruşmaların en az seviyeye çekilmesini sağlayan bir etkidir. Bu fikre yardımcı olması açısından Şekil 1.1’de bir genelleştirilmiş şema görülmektedir. Sac metallerin hidrolik şekillendirme bükme işleminde yırtılma ve buruşma oluşumundan kaçarken, uygun basınç-zımba kursu oranını yakalamak zordur. Lo vd. [7], Hsu vd. [8], metalik yarım küre hidro şekillendirme bükme işlemi için sıvı basıncı-zımba kursu konusu ile ilgili bir seri deneysel ve teorik çalışma yapmışlardır. Metaller ve termoplastiklerle ilgili olarak halen bu değerlendirmeler devam etmektedir.



Şekil 1.1. Bükme işleminde, zımba kursu optimum sıvı basıncı ilişkisi [6].

Genellikle karmaşık sac malzemelerin şekillendirilmesinde hidromekanik derin çekme (HDD) teknolojisi kullanılır. Zhang vd. [9-10] hidromekanik derin çekme teknolojisiyle parabolik alüminyum sac malzemenin şekillendirilmesinde çeşitli yöntem parametreleriyle explicit sonlu elemanlar yöntemini kullanarak derin çekme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bazı şekillendirme şartları için yırtılma ve buruşma kusurlarının önceden tespit edilerek ve kalınlık dağılım sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Zımba hareketinin başlangıcındaki üçte birlik kısmı sırasınca başlıca zayıf noktalar tespit (zımba sac malzemeyi çekmeye başladığı anda malzemedeki zayıf noktaların tespiti) edilmiş, zımba hareketinin sonunda malzemedeki gerçekleşen buruşukluklar gözlenmiştir. Baskı plakasının ve sıyırıcı plaka kuvvetinin deformasyonda etkilerinin tartışılarak nümerik sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırmıştır. Parametre olarak kalıp ve sıyırıcı plaka arasındaki boşluk, basınç odasındaki basınç miktarı ve ara eleman yüksekliği kullanılmıştır (Şekil 1.2). Sonuç olarak farklı

şekillendirme şartları altında malzemenin bölgesel zayıflıkları ve buruşmalar tahmin edilmiş ve deformasyonda baskı plakasının etkisi analiz edilmiştir. Şekillendirmede başarı elde etmek için oda basıncı, baskı plakası kuvveti, ara eleman yüksekliğinin önemli olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemin başlıca avantajı geleneksel derin çekme teknolojisiyle altı adımda gerçekleştirilmek zorunda olunan parabolik şekillendirme, bir adımda gerçekleştirilebilmektedir. İlave olarak, Hidromekanik Derin Çekme (HDÇ) teknolojisi kullanıldığında üretim ölçülerinde dikkate değer bir tamlık elde edildiğini ve yüzey kalitesi iyileştiği, şekillendirme sisteminin basitleşeceği ve kullanılan takım sayısının azalacağı vurgulanmıştır.



Şekil 1.2. Hidromekanik derin çekme sisteminin sistematik tanıtımı ve parabolik parçanın görünümü [9-10].

Brunet vd. yaptığı çalışmalarda dahili basınç ve aksel kuvvet birleşimi altında hydroforming şekillendirilen boru için yırtılmanın gelişimini deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir [11]. Şekil verme işleminde iki farklı yırtılma şekli meydana geldiğini tespit etmişler. Bunlar boyun verme, çatlama, buruşma ve eğilmedir. Bu çalışmanın özgünlüğü ise dıştaki kuvvetler ve içtekilerin oranı temel alınarak birleştirilmiş yaklaşımın hesaba katılmasıdır.

Altan ve Jiatharanat yaptığı çalışmada basınçlı akışkanla şekillendirme için kullanılan bir sistemde hesaba katılması gereken ve tüpün şekillendirme sonundaki kalitesini belirleyen malzeme özellikleri ve şekillendirme başlamadan önceki tüpün geometrisi (kalınlık dağılımı ve tüpün boyutları) gibi faktörler düzenlenmiştir [12].

Bu faktörlerin her biri başarılı bir şekillendirmede önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Bundan dolayı basınçlı akışkanla şekillendirme teknolojisi uygulanırken dikkate alınması gerekenler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

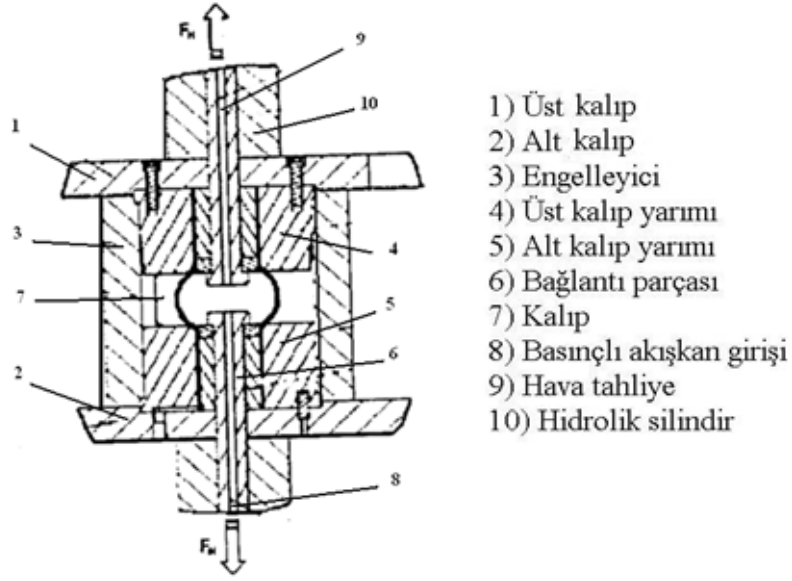
- Tüp malzemesi ve şekillendirilebilirliği
- Sürtünme ve yağlama
- Ekipman
- Çevrim süresi ve imalat oranı [12].

Yapılan çalışmada bu noktalar tartışılmış, bunun yanında basınçlı akışkanla şekillendirmede bilgisayar destekli benzeşimine yer verilmiştir. Şekil 1.3'de farklı basınç değerleri altında iç çapı 57,15 mm ve et kalınlığı 0,6 mm olan tüpün şekillendirme sonucu elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir [12].



Şekil 1.3. Farklı basınç değerlerinde tüpün aldığı şekiller [12].

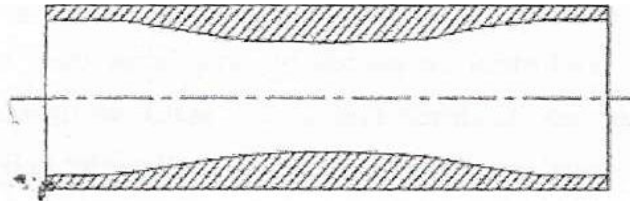
Şekil.1.4.'de yapılan çalışma sırasında kullandıkları kalıbın kesit görünüşü verilmiştir. Kalıbı oluşturan parçalar sırasıyla üst plaka, alt plaka, engelleyici, üst kalıp yarımı, alt kalıp yarımı, bağlantı parçası, kalıp, basınçlı akışkan girişi, hava tahliye ve hidrolik silindir [12].



Şekil 1.4. Taylan vd. yaptıkları çalışmada kullandıkları kalıp [12].

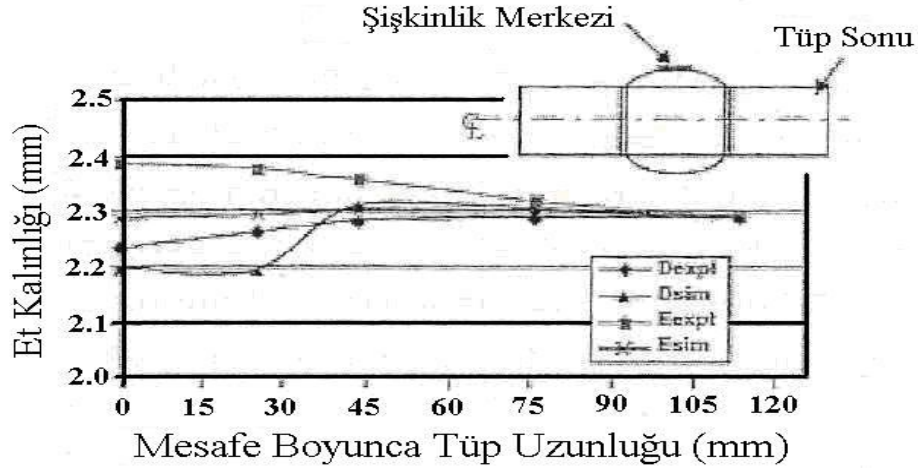
Neugebauer vd. yaptıkları çalışmada metal şekillendirme işlemlerinde benzeşim yardımıyla, örneğin bazı özel kesitli malzemelerin şekillendirilmesi ve basınçlı akışkanla şekillendirmede benzeşiminin kaçınılmazlığı tartışılmıştır [13]. Bunun sonucunda benzeşimle, metal şekillendirme işlemlerini kontrol ve en iyilenimi ve imalatta pahalı takımlar kullanılmadan uygulanabilirliği göstermişlerdir.

Aueulan vd. yaptıkları çalışmada düzgün duvar kalınlığı dağılımına sahip tüp ve şekil sınır diyagramına göre duvar kalınlığı gittikçe incelen tüpün karşılaştırılıp değerlendirilmesi yapılmıştır [14]. Bu değerlendirmede hem teknik tüp tasarımlarının değerlendirilmesi için yöntem biliminin tanımlanması, hem de deneysel sonuçlarla teorik sonuçların karşılaştırılmasını içeriyor. FEA ile beş teknik tüp tasarımı (Şekil 1.5) analiz edilmiştir. Bunlardan ikisinde şekillendirme sonucunda sabit duvar kalınlığı elde edilmiştir.



Şekil 1.5. Teknik tüp [14].

Şekil 1.6’da bir teknik tüpün şekillendirmeye başlamadan önceki malzeme boyunca et kalınlığı görülmektedir. Bu et kalınlığı 2,2–2,4 mm arasındadır. Şekillendirmeden sonra et kalınlık dağılımı istenilen değere yani 2,3 mm'ye ulaşmıştır [14].



Şekil 1.6. Bir teknik tüpün et kalınlığı dağılımı [14].

Brunet vd. 1998 yılında sac metal şekillendirme işleminde boyun vermenin deneysel ve teorik olarak yaptıkları çalışmada, şekillendirme sınır diyagramı kontrolü için iki farklı yaklaşımı detaylı olarak açıklamıştır [15]. İlk önce deneysel çalışma anlatılmıştır. Çalışmada, sacdaki yer değişim alanlarını ölçmek için bir korelasyon tekniği geliştirilmiştir. İkinci yaklaşım ise teoriktir. Burada boyun verme kriteri, yükün uygulanış şekline ve düzlemsel uzamanın meydana geldiği yerin belirlenmesi amaçlanmıştır Hill'in veya Barlat-Lian'ın anisotropisini izah etmek amacıyla Gurson-Tvergaard'in hasar modeli düzenlenerek ihtimaller verilmiştir. Özellikle non-lineer uzama yolu için ve lineer uzama hattı için kriterlerin yazıldığı formlar hazırlanmıştır. Sonuç olarak, üç farklı alüminyum sacın ve orta sertlikte bir çelik sacın şekillendirme sınır diyagramları deneysel ve teorik yollarla hesaplanarak elde edilmiştir.

Mattiasson'da 2000 yılında endüstride sac metal şekillendirme işlemlerinin sonlu elemanlarla simülasyonu konusundaki yaptığı çalışmayla; son yıllarda sacların şekillendirilmesi işleminin simülasyonu için nümerik işlemlerinin kullanımında büyük gelişmeler olduğundan bahisle, özellikle otomotiv endüstrisinde gerçek bir



uygulama alanı bulduğundan bahsetmiştir [16]. Bu makalede sac metal şekillendirme konusunda, pratik ve uygulanabilir konular sunulmuş ve bazı şekillendirme hatalarının meydana gelebileceği yerler belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada, yerinde şekillendirme yöntemi gözden geçirilmiş, pratik kullanımı konusunda sac şekillendirme simülasyonu yapılmıştır. Bu konuda özellikle değişik sonlu element formülasyonları, konunun tarihi gelişiminin gözden geçirilmesiyle uygulanmıştır. Sonuçta ise günümüz benzetim teknolojisi kısa olarak tanıtılmıştır, özellikle de otomotiv endüstrisindeki sac metallerin şekillendirme simülasyonları konusundaki uygulamalar geniş olarak anlatılmıştır.

Imaninejad vd. tüp hidro şekillendirme imalatında en uygun yük yolu adlı çalışmalarında boru şekillendirme çalışmaları sırasında meydana gelen yırtılmaları önlemek için aksel ve radyal kuvvetleri birleştirmişlerdir [17]. Bu çalışmadaki amaç gerilmeleri en düşük seviyeye çekmek ve istenen toleranslar arasında kalınlık değişimini elde edebilmektir. Geliştirilen T bağlantısına rağmen kalıp şekli için borunun ayarlanması, T göbek yükseldiği araştırılmıştır. Sonlu elemanlar simülasyonu ile en iyi yük yolunu, başlıca aksel besleme gereksinimlerini, iç basınç altında borunun hazırlanmasına yardımcı olmuştur. Yapılan deneyler de tek adımda, çift adımda, dört adımda yüksek ve düşük basınç altındaki kalınlık değişimleri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları karşılaştırılmış ve uygunluk gözlenmiştir.

Gantar vd. nümerik simülasyon kullanılarak sac metal şekillendirme işleminde en iyilenim adlı çalışmalarında parçada herhangi bir kusur meydana gelmeden işlemi tamamlayabilmek için sonlu elemanlar metodu temel alınarak nümerik simülasyon kullanılmıştır [18]. Araştırmalar endüstriyel örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekillenecek parçanın ilk şeklinin belirlenmesi, yırtılmaların, parçanın son kalınlığı ve kırışıklık tahmini yapılmıştır. Nümerik simülasyon sonuçları yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. İstenmeyen yırtılmalar ve kalınlık dağılımlarından kaçınabilmek için tedbirler alınmıştır.

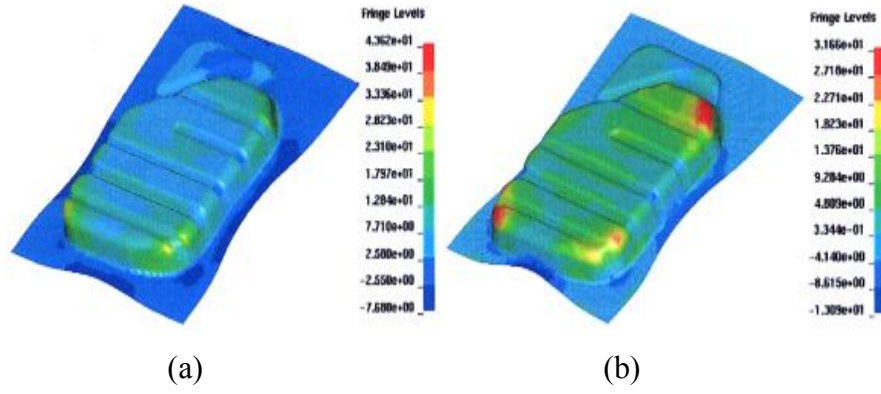
Kleiner vd. sac metal parçaların hidro şekillendirme işlemleri için ultra yüksek performanslı beton kalıpları geliştirilmiş ve yöntem uygulamalarında başarılı bir

şekilde uygulanmıştır [19]. Bu tür kalıpların, endüstriyel uygulamalarda, gerilim ve dayanım açısından çok büyük basınçlar için çok büyük avantajlar sağladığı görülmüştür.

Hartl hidro şekillendirmenin endüstriyel uygulamaları ve önemli avantajları adlı çalışmasında hidro şekillendirmenin durumuna genel bir bakış ve işlem basamaklarının tasarımıyla ilgili hidro şekillendirmenin önemli avantajları, yan mamul üretimi, presler ve kullanılan takımlar ve kısaca bugünkü hafif malzemelerin şekillendirilmesinde yararlanılan ısı enerjisi kullanımına benzer yeni hidro şekillendirme teknolojisi anlatılmıştır [20].

Lei vd. paslanmaz çelik sac metal şekillendirmesinde tasarım ve sonlu elamanlar analiziyle deneysel yöntemin karşılaştırılması adlı çalışmalarında: bükme ve çekme işlemlerinde sonlu gerilme formülüyle katı elementler kullanılarak paslanmaz çelik sac metal şekillendirme analizleri yapılmıştır [21]. Bükme deformasyonunda zımba ve iş parçası temas yüzeyi arasındaki boşluğun arttırılması sırasında geri esneme açısını artmıştır. Kontak tanımlamaları basitleştirildiği için teorik ve deneysel sonuçlar arasında farklar meydana gelmiştir.

Kim vd. yaptıkları çalışmada, hidromekanik sac şekillendirme ve geleneksel çekme işlemini karşılaştırmışlardır [22]. Bu karşılaştırmada eksplisit sonlu eleman kodu kullanmışlardır. Çalışmada özellikle hidro mekanik şekillendirme işlemi vasıtasıyla otomobil yakıt tankının üretimi için en iyi yükleme yolunun başarılmasına özel bir ilgi göstermişlerdir. Hidromekanik şekillendirme için geleneksel çekme yönteminden iki kat daha fazla zamana gerek duyduğunu, bununda ön şekillendirme ve kalibrasyon zamanlarından kaynaklandığını, buna rağmen parçayı geleneksel yöntemden çok daha düzgün ve kusursuz bir kalınlık dağılımı ile üretebileceğini saptamışlardır. Hidrolik şekillendirmede kalıp ve sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısının, sıvının etkisinden dolayı geleneksel yöntemden çok daha az olduğunu göstermişlerdir. Şekil 1.7’de elde edilen iki şekillendirme işlemi arasındaki kalınlık inceliği gösterilmiştir.



Şekil 1.7. İki şekillendirme işlemi arasındaki kalınlık incelmelerini, a) geleneksel şekillendirme, b) hidrolik şekillendirme [22].

Merklein vd. yaptığı çalışmada tüp ve çift sac arasındaki bağlantıyla ilgili araştırma yaparak, sonlu elemanlar analizi ve laboratuvar analizi kalıp boşluğunun şeklinin tasarımı, şekillenme işlemindeki tüp kesitindeki malzeme yırtılması, daralması ve kırışıklardan kaçınmak için yapmışlardır [23]. Bu çalışma bir kare kabın birkaç teknik çözümü ile beraber kısıtlamalarında kenar şeklinin tahmini için bir analitik model anlatılmıştır. Sonunda, hidrolik şişme işleminin analitik model tabanlı hidrolik şekillendirme malzeme faktörü tanımı doğru sac seçiminin farklı malzeme kuvveti ve birleştirilmiş malzemelerinin hidrolik şekillendirme için kalınlığın seçilmesine imkan vermektedir. Tek bir işlem ile çift sac hidrolik şekillendirme ve tüp hidrolik şekillendirme birleştirilerek karmaşık parçaların imalatının yapılabilmesine bu çalışma imkan vermektedir.

Khandeparkar ve Liewald yaptığı çalışmada kompleks adımlı geometrilerin hidrolik şekillendirme yöntemleri ile derin çekilebilirlikleri deneysel ve analiz çalışmalarıyla çalışılarak kanıtlanmıştır [24]. Yöntemin kullanılmasıyla çekme adımlarını azaltıldığı, daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiği ve daha yüksek çekme oranlarına ulaşıldığı görülmüştür.

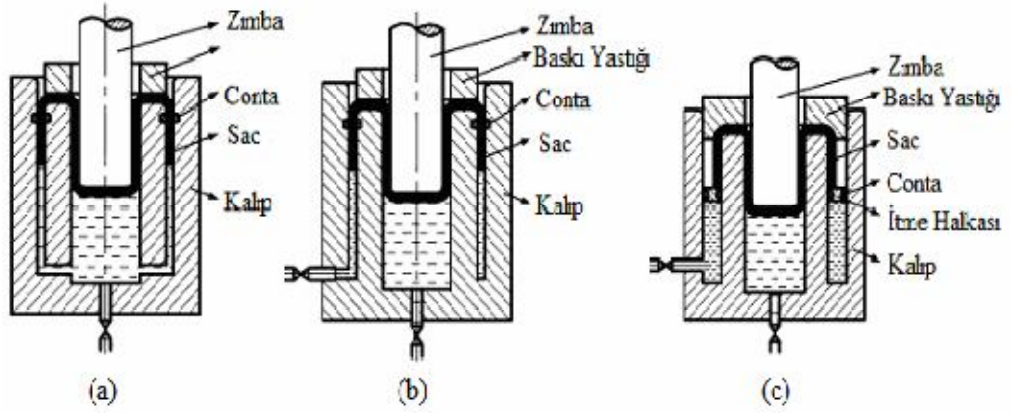
Dachang vd. yaptığı çalışmalarda, havacılık ve uzay sektöründe çok geniş bir kullanım alanı olan süper alaşımlı malzemelerin şekillendirilmesinde hidrolik şekillendirme proseslerinin kullanımı ile ilgili çalışmalar yaptıkları tespit edilmiştir [25]. Çalışmalarında, bu tür yüksek gerilime sahip parçaların hidrolik şekillendirme prosesinin kullanımı ile şekillendirilmesi için çok yüksek kalıp içi basıncının gerekli

olduğu ve işlem için kritik bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu tür malzemeler ile yapılan çalışmalarda prosesin kullanımı ile 2.45 çekme oranına ulaşılabildiği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Karkoub, hidro şekillendirme işlemlerinde meydana gelen deformasyon miktarını tahmin etmek için yapay sinir ağlarının kullanılarak modeller geliştirildiği tespit edilmiştir [26]. Çalışmada, deneysel verilerin ve genelleştirilmiş algoritmaların kullanılmasıyla ağlar eğitilmiş ve test edilmiştir. Bu modeller ile deformasyon şekli ve malzemedeki kalınlık değişiminin doğru olarak tahmin edildiği görülmüştür.

Thiruvardhelvan vd. alışmasında hidro şekillendirme proseslerinde akışkan-basınç destekli yeni bir şekillendirme yöntemi geliştirilmiştir [27]. Geliştirilen bu yöntemde, parçanın kenarları üzerine ikincil bir hidrolik basınç uygulanmakta böylece kalıp içerisindeki parça duvarlarında sürtünme desteği sağlanmaktadır. Bu yöntem ile parçanın ekilebilirliğinin arttırıldığı ve kulaklar dahil parçanın tümünün çekilmesine imkan tanıldığı görülmüştür.

Zhao vd. alışmalarında hidro şekillendirme işlemlerinde farklı bir yöntem olarak kullanılan ters çekme işleminin, silindirik parçalar için aksenal basınç itmesi ile geliştirildiği gözlemlenmiştir [28]. Bu yöntem ile sacların deformasyonla uzamasının geliştirildiği deneysel ve analiz çalışmaları ile kanıtlanmıştır. Geliştirilen yöntem ile parçanın yüzey kalitesi geleneksel ters çekme işlemlerine göre daha iyileştirilebilmiştir. şekil 1.8'de kullanılan ters Sıvı Basınçlı şekillendirme (SBS) kalıpları gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Ters SBŞ Prosesleri (a) Aynı Kalıp Boşluğunda Eksenel İtme, (b) Kalıp Boşluğundan Bağımsız Eksenel İtme, (c) Kalıp Boşluğundan Bağımsız İtme Halkası ile Eksenel İtme [28].

Karaağaç ve Özdemir yaptıkları çalışmada sıvı basıncıyla şekillendirme özellikle üretimi zor ve zaman alıcı, karmaşık ve dar toleranslı parçaların üretiminde tercih edilmektedir [29]. Bu çalışmada, uluslararası imalat sektöründe sac metal şekillendirme konusunda sıklıkla kullanılmakta olan sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemleri, genel bir bakış ile derlenmiş ve literatürde konu ile ilgili yapılmakta olan çalışmalar belirtilmiştir. Sıvı basıncı kullanarak derin çekme ile şekillendirme üzerine teorik, deneysel ve bilgisayar destekli analiz ve simülasyon esaslı araştırmaların özeti verilmiştir. Ayrıca, sıvı basıncı ile şekillendirme yöntemi, olumlu ve olumsuz yönleriyle incelenmiş ve geleneksel derin çekme yöntemleriyle karşılaştırmalı bir değerlendirilme yapmışlardır.

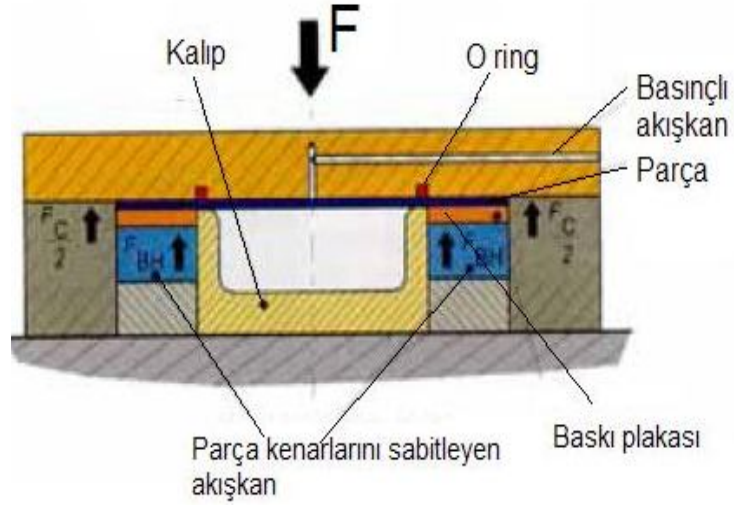
## BÖLÜM 2

### HİDRO ŞEKİLLENDİRME

#### 2.1. GİRİŞ

Hidro şekillendirme metal sac veya tüp malzemenin akışkan bir ortam (su, viskoz vs) vasıtasıyla kapalı bir kaptaki şekillendirilmesidir. Bu kadar geniş bir tanımla olmasından dolayı, hidrolik şekillendirme daha çok benzer işlemler için kullanılan genel bir ad olarak düşünülebilir [30]. Hidro şekillendirme ilk olarak 1890'larda ortaya çıkmış ancak asıl gelişimini II. dünya savaşı sonrasında gerçekleştirmiş bir imalat yöntemidir. İlk araştırmalar Almanya ve Japonya da gerçekleştirilmesine rağmen günümüzde Amerika, Rusya, Fransa, İsrail, Kore gibi değişik ülkelerde gerek üniversite gerekse özel araştırma birimlerinde yoğun bir şekilde konu üzerinde çalışılmaktadır. Yeterli bilgi birikimine ulaşamamış olmasından ve bazı teknik zorluklardan ötürü 1990'lara kadar gereken ilgiyi görmemiştir [31].

Hidro şekillendirme teknolojisi düşük adetli üretimlerde, prototip imalatında, alüminyum alaşımları ve yüksek dayanımlı çelikler gibi şekillendirilebilirliği göreceli olarak düşük malzemelerin kullanıldığı durumlarda yaygın kullanım alanı bulunmaktadır. Sac malzemelerin hidro şekillendirmesi, temelde çalışma prensibi ile çekme kalıplarıyla aynıdır. Fakat hidro şekillendirme işleminde kalıp yerine, tasarlanan bir kalıp boşluğu içerisinde akışkan sıvı konularak şekillendirme işlemi yapılmaktadır [32]. Şekil 2.1'de hidro şekillendirme kalıbı gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Hidro şekillendirme kalıbı [32].

Hidro şekillendirme işleminde bir kalıp tarafından sıkıştırılmış içi boş yapıya sahip bir borunun içine veya bir sac üzerine yüksek basınçlı akışkan gönderilerek borunun/sacın cidarlarının kalıbın geometrisine göre genişlemesi ve istenen şekle gelmesi işlemidir. Hidro şekillendirme bir tür esnek şekillendirme teknolojisidir.

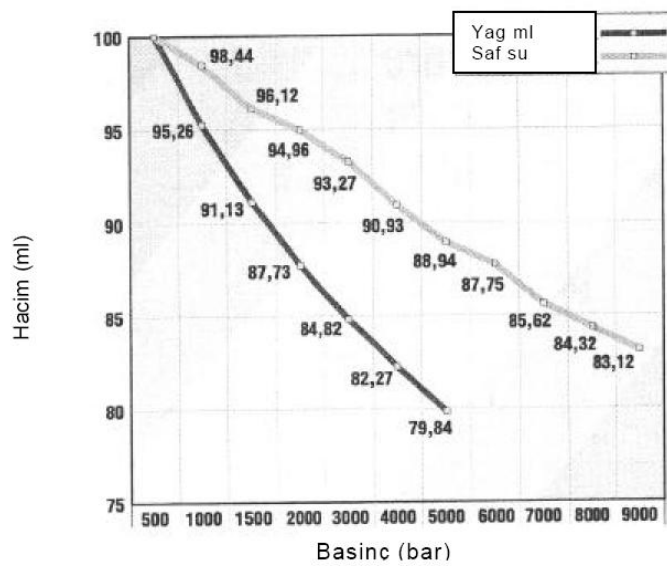
Bu şekillendirme işleminin avantajları [33]:

- Yüksek mukavemetli malzemeler rahatlıkla şekillendirilebilmektedir.
- Çevreyle uyumlu metal parçalar kullanılabilir.
- Diğer yöntemlere nazaran malzemenin yapısal sertliğini artırır.
- İşlem tek taraflı rijit kalıpla işleme, parça ve işçilik masrafları düşüktür.
- Parça adedi azaltılabilmektedir.
- Hidro şekillendirme ile üretilen parçalar daha sıkı bir tolerans aralığına, daha iyi bir yüzey görünümüne, daha düşük geri yaylanma miktarına ve önemli ölçüde daha düşük artık gerilmelere sahiptir.

Hidro şekillendirme işleminin dezavantajları; yavaş ürün çevrim süreci, pahalı donanım, kalıp ve sistem tasarımı için geniş kapsamlı bilgi gereksinimidir.

Metalik saclarının kullanıldığı bütün endüstri dallarında hidro şekillendirme yöntemi uygulanabilir. Bu endüstri dalları; uzay, havacılık sanayi, otomotiv, tarım

araçları, üretim ve imalat sanayi, enerji, ofis ve dış mekan mobilya sanayi, aydınlatma, metal şekillendirme, plastik enjeksiyon kalıp elemanlarıdır [34]. Hidro şekillendirme yönteminin uygulama alanlarına göre de kullanılan malzemelerde çok çeşitlidir. Bunların başında; alüminyum ve alaşımları, pirinç, bakır, paslanmaz çelik, soğuk-sıcak haddelenmiş çelik gelmektedir [33]. Şekillendirme esnasında kullanılan akışkan olarak, mineral yağın yanma özelliğinden dolayı yüksek basınç altında sıkıştırma işleminde su esaslı akışkanların kullanılması daha uygun olmaktadır. Sıkıştırılabilirlik özelliği açısından mineral yağ ile su esaslı akışkanları mukayese edecek olursak Şekil 2.2’de görüldüğü gibi belirli bir basınç altında mineral yağlar daha fazla sıkıştırılmakta dolayısı ile su esaslı akışkanlar daha az sıkıştırılabildiğinden dolayı bu işlem için daha uygun olmaktadır [36].



Şekil 2.2. Yağ ve Suyun Sıkışma Grafiği [36].

## 2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ

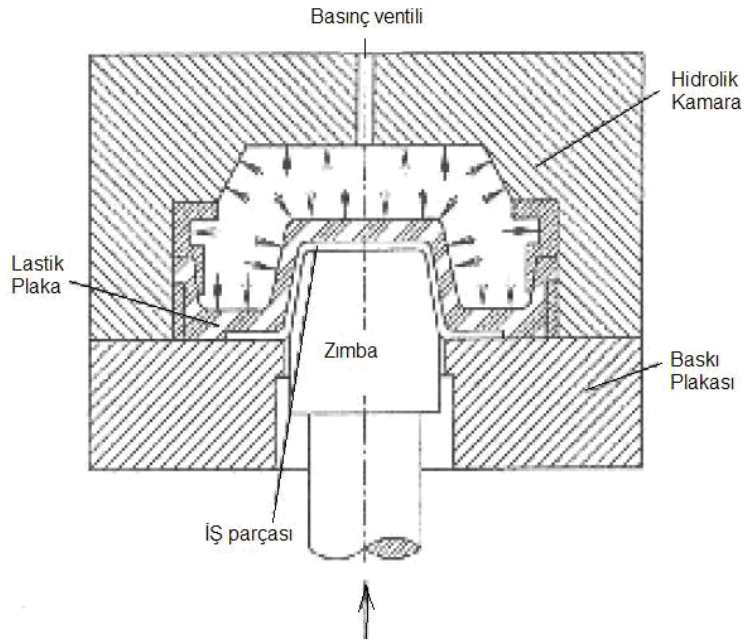
Değişken biçimli takımla şekillendirme teknolojileri basit ekipmanlar gerektirmeleri, mevcut donanıma uyum sağlayabilmeleri, düşük enerji tüketimleri, yüksek ürün kaliteleri ve fayda/maliyet oranlarının yüksek olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar [35]. Hidro şekillendirme 3 gruba ayrılır.



- Hidrolik sac şekillendirme.
- Tüp hidrolik şekillendirme.
- Hidromekanik derin çekme.

### 2.2.1. Hidro Sac Şekillendirme

Hidro sac şekillendirme işleminde şekillendirilecek sac baskı tablası üzerine konulmakta ve zimba, sacı lastik plakaya doğru itmektedir. Sacın hidrolik kamara üzerine itelenmesi hidrolik basıncın artmasına sebep olmaktadır. Kamaradaki artan basınç, sacın zimba üzerine sıvanmasını sağlar. Zımbanın kalıp içinde ilerlemesi ile orantılı olarak artan hidrolik basınç, basınç ventili vasıtası ile istenilen seviyede tutulur. Sac istenilen şekli aldıktan sonra basınç boşaltılır ve parça çıkarılır. Bu teknoloji özellikle havacılık sanayinde büyük boyutlu parçalarının imalatında, az adetli üretimlerde ve de prototip hazırlamada kullanılmaktadır [37]. Şekil 2.3’de hidro sac şekillendirme gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Hidro Sac Şekillendirme [37].

Hidro sac şekillendirme, geleneksel çekme yöntemlerine kıyasla daha büyük çekme derinliklerine olanak tanımaktadır. Bu işlemin diğer avantajları, düzgün bir yüzey elde edilmesi, düşük geri yaylanmaların olması, zamandan tasarruf edilmesi ve daha

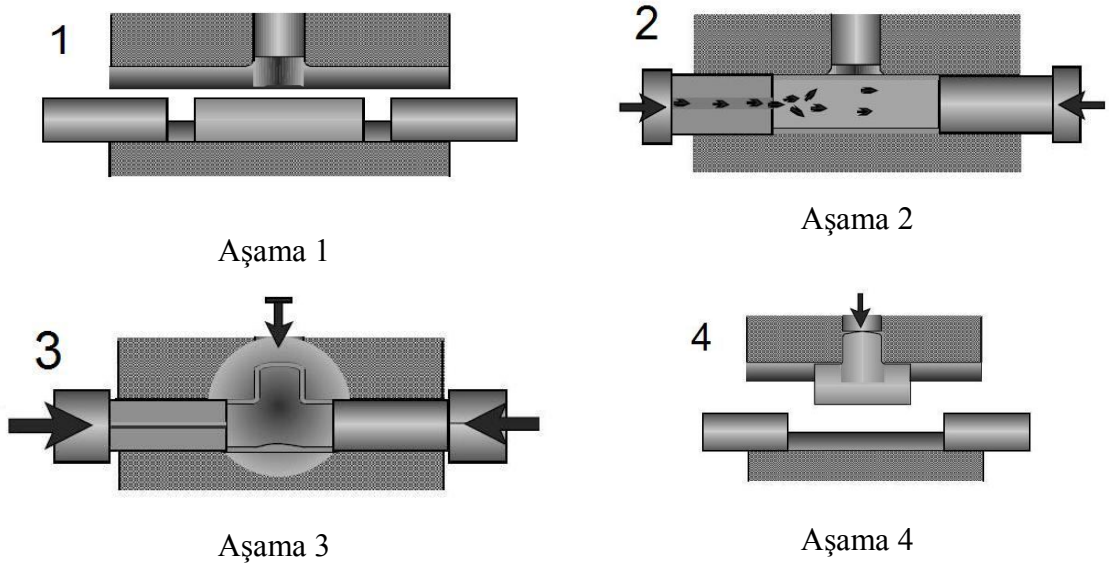
düşük imalat maliyetlerinin olmasıdır. Ancak geri dönüşlerin yüksek olmasından dolayı hidro sac şekillendirme düşük adetli üretimler için daha uygundur [38].

### 2.2.2. Tüp Hidro Şekillendirme

Bu teknolojiye zımbanın yerini tamamen sıvı bir ortam almaktadır. İşlem, düz ya da önceden belirli bir geometride bükülmüş boru parçanın uygulanan eksensel kuvvet ve iç basınç veya sadece iç basınç tarafından kalıp boşluğunun şeklini almaya zorlanması olarak özetlenebilir. Diğer hidro şekillendirme uygulamalarına göre göreceli olarak daha yüksek basınçlarla şekillendirme gerçekleştirilir. Uygulanan basıncın büyüklüğüne göre a) alçak basınçlı şekillendirme b) yüksek basınçlı şekillendirme olarak ikiye ayrılır. Alçak basınçlı şekillendirmede uygulanan iç basınç genel olarak 80–100 MPa civarında ve cidar inceliği çoğunlukla %5'den daha azdır. Yüksek basınçla şekillendirmede ise iç basınç 690 MPa gibi yüksek değerlere çıkabilmekte ve buna bağlı olarak da boru malzeme daha karmaşık kalıp boşluklarını doldurabilmektedir. Endüstride her iki yöntem birlikte uygulanmaktadır. Öncelikle kalıp kapanırken düşük basınçla şekillendirme başlamakta, kalıp tam kapandıktan sonra yüksek basınçlı şekillendirmeye geçilmektedir. Böylece sürtünme kuvvetleri azalmakta, uygulanması gereken en yüksek basınç miktarı düşmektedir [35].

Tüp hidro şekillendirme işlemi 4 aşamada açıklanmaktadır [30];

İlk adımda düz veya ön şekillendirilmiş boru, üretilecek ürünün profiline sahip kalıp içine yerleştirilir (Şekil 2.4. Aşama 1). Kalıp hidrolik pres yardımıyla kapatılır ve basınç uygulanır. Sızdırmazlığı ve aynı zamanda aksenal stroku sağlayacak olan pistonlar harekete geçer, borunun iki tarafını kapatır ve ortam şekillendirmeyi sağlayacak akışkanla doldurulur. Bu akışkan uygulamanın türüne göre değişik özelliklerde olabilir. Genel olarak yağ veya su kullanılmakla beraber, daha iyi sızdırmazlık özelliklerine sahip olmasından dolayı polimerik viskoz akışkanlarda kullanılmaktadır (Şekil 2.4. Aşama 2).

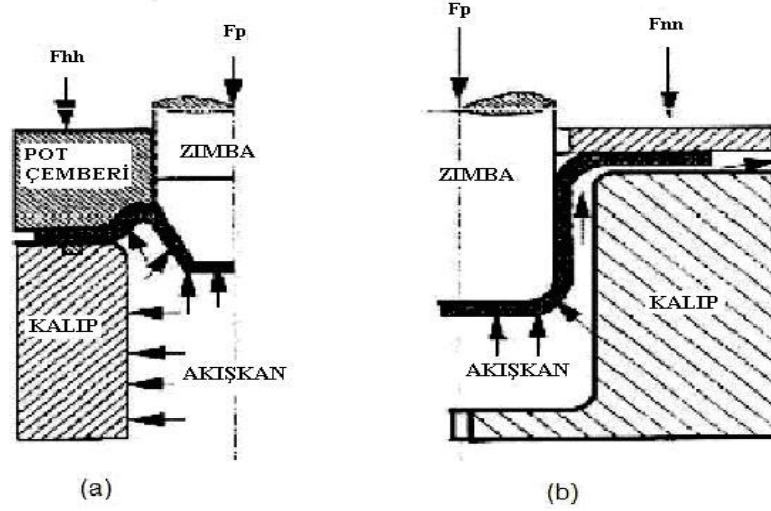


Şekil 2.4. Tüp hidro şekillendirme [30].

Uygulanan iç basınçtan ve eğer varsa aksel sıkıştırımdan dolayı malzeme kalıbın içinde akmaya başlar, şişer ve kalıbın şeklini alır (Şekil 2.4. Aşama 3). İşlem sonunda kalıp içerisindeki sıvı boşaltılır kalıp açılır ve parça dışarıya alınır (Şekil 2.4. Aşama 4).

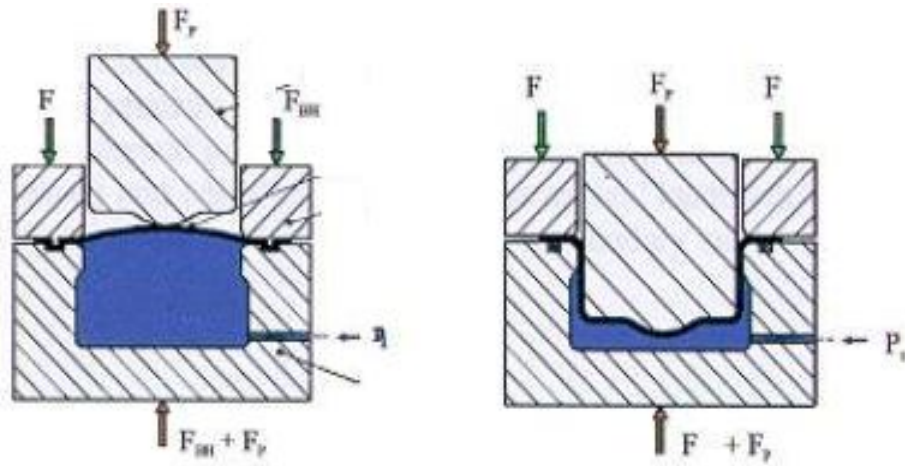
### 2.2.3. Hidromekanik Derin Çekme

Klasik hidro şekillendirme işlemi esnasında kullanılan lastik plaka bu işlem esnasında ortadan kalkar. Malzeme direk olarak akışkan ortamı ile temas halindedir (Şekil 2.5). Birçok farklı türe ayrılabilmesine rağmen temel olarak 2 ana sınıfta düşünebilir: Hidrostatik hidromekanik derin çekme, hidrodinamik hidromekanik derin çekmedir [37].



Şekil 2.5. Hidrostatik ve hidrodinamik hidromekanik derin çekme [37].

Hidromekanik çekme yönteminde klasik çekmeye oranla daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabilir. Pratik uygulamalar hidromekanik çekmede şekil 2.6.'daki gibi yüksek derin çekme oranlarına rahatlıkla ulaşabilmektedir. Bu durum bize klasik çekmede birden çok çekme kademesi gerektirecek profillere tek adımda ulaşma imkânı verir [39].



Şekil 2.6. Hidromekanik derin çekme [39].

Ayrıca bu işlem esnasında, malzemenin çekme zımbasına akışkan basıncı yardımıyla sıvanması sayesinde taban kavisi bölgesinde malzeme incelmesi çok az olmaktadır. Bu büyük üstünlük, çok ince malzemelerin bile hidromekanik yöntem kullanılarak çekilmesine olanak sağlar. Küçük taban kavisleri kullanılabilir. Bu özellik, basınçlı

kap imalatı gibi alanlarda, oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Klasik derin çekmede et kalınlığındaki yerel incelmelerden kaçınmak için, nominal kalınlıktan daha kalın levhalar kullanılırken; hidromekanik derin çekme yöntemiyle üretilen parçalarda, nominal kalınlığa çok daha yakın malzemeler kullanılabilir. Yöntem otomobil parçalarının üretiminde (far kovanları, çamurluklar), uçak sanayinde ve mutfak ekipmanları üretiminde kullanılmaktadır [39].

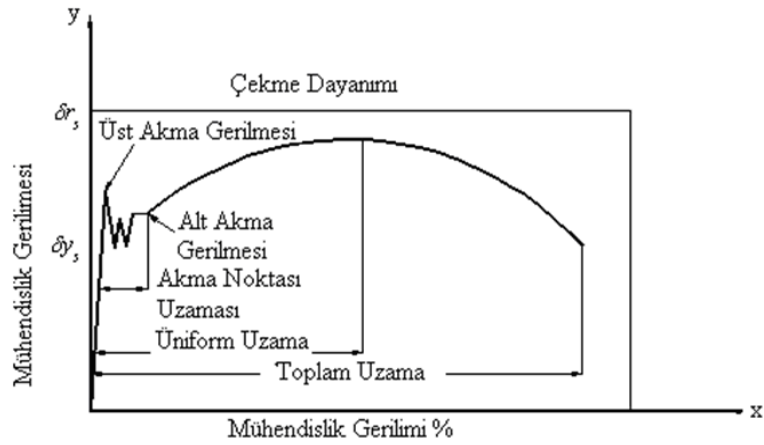
### **2.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Bu faktörler iki grupta toplanabilir. Malzeme özelliklerinin etkisi ve işlem koşullarıdır.

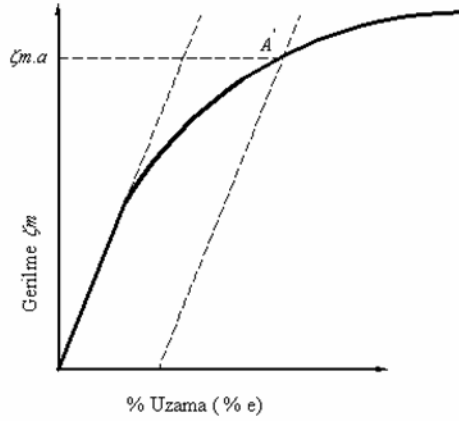
#### **2.3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi**

##### **2.3.1.1. Akma Mukavemeti**

Akma sınırı çekme testinde elastik deformasyonun durduğu ve plastik deformasyonun başladığı noktadır. Belirli bir üst akma noktası büyük miktarda serbest hareketli dislokasyonlara sahip olmayan dinlendirilmiş çelik gibi malzemelerde görülür (Şekil 2.7). Plastik deformasyonun gerçekleşmesi için sac parçanın bütün bölgelerinde bu noktanın aşılması gerekir. Tavlanmış alüminyumda akma düzgün olarak meydana gelir ve % 0,1 veya % 0,2'lik bir gerilim noktasında eğriye çizilen paralelin eğriyi kestiği noktayı akma dayanımı (Akma gerilmesi) olarak alınır (Şekil 2.8). Bununla birlikte düzgün bir akma davranışı sac metalin biçimlendirilmesinde arzu edilen bir malzeme özelliğidir. Küçük miktarda ara ergiyik atomları içeren malzemeler % 4 ila % 5 plastik deformasyonun olduğu kararsız gerilme gerinim davranışı göstermektedir. Akma sınırı uzaması olarak bilinen bu davranış, dislokasyonların, eriyik atomları ve bunu takip eden bozulmalar ile sürekli tutulması ve birikmesi ile neden olur. Bu durum sac yüzeylerin bozulmasına hatta çatlamalara yol açabilmektedir [40].



Şekil 2.7. Orta karbonlu çeliklerin gerilme gerinim eğrisi [40].



Şekil 2.8. Düzgün akma gösteren bir malzemenin çekme diyagramında akma gerilmesinin bulunması [40].

### 2.3.1.2. Elastisite (Young) Modülü

Gerilme gerinim eğrisinin 0 olduğu nokta konumu ile üst akma noktası arasında malzemenin elastik bölgesi adı verilir. Bu bölgede Hook Kanunu geçerli olup bu doğrunun eğimi malzemenin Young modülünü verecektir [40]. Metallere şekil verme sırasında görülen elastik geri yaylanmayı belirlemede akma mukavemeti elastisite modülü önemlidir. Bu olay daha yüksek akma mukavemeti ve düşük elastisite modülüne sahip malzemelerde görünür [41]. Metallere şekil verme sırasında görülen elastik geri yaylanmayı belirlemede akma mukavemeti elastisite modülü önemlidir. Bu olay daha yüksek akma mukavemeti ve düşük elastisite modülüne sahip malzemelerde görünür [40].

### 2.3.1.3. Pekleşme Üsteli “n”

Saca uygulanan gerilmedeki artış ile plastik şekil değişimi sertleşme yeteneği, soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliğidir. Bölgesel olarak plastik değişimine uğrayan bir bölgede, burada oluşacak pekleşmeden dolayı dayanım artacağından, bu bölgedeki şekil değişimi durur ve parçanın diğer komşu bölgelerdeki plastik şekil değişimi başlar [42].

Malzeme deforme oldukça deformasyon sertleşmesi nedeniyle şekil alma kabiliyeti giderek azalır. Gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme eğrisi logaritmik olarak çizilmesiyle elde edilen eğrinin eğiminden hesaplanır. Veriler aşağıdaki denklem ile uyum gösterir [41].

$$\sigma = K\varepsilon^n \text{ (N/ mm}^2\text{)} \quad (2.1)$$

$$\sigma = \text{Gerilme (N/ mm}^2\text{)}$$

K= Sabit

$\varepsilon$ = Gerçek birim şekil değiştirme (mm)

n= Pekleşme Üsteli

Karmaşık şekil verilmiş bir bölgenin şekillendirme arasında kritik bir bölgede, deformasyon dağılımına farklı n etkisi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. n değeri düşük olan bölgelerde levhada aşırı incelme ve kırılmalar ile sonuçlanabilir. Aynı parçanın n değeri yüksek olan kısımlarında aynı kritik bölgeler daha dirençli olacak ve deformasyonu komşu bölgelere transfer ederek hasara uğramadan şekillendirilebilecektir [41].



Şekil 2.9. n değerinin kritik deformasyon miktarına etkisi [43].

#### 2.3.1.4. Deformasyon Hız Duyarlılığı Üssü (m)

Malzeme deforme edilirken oluşan sertleşme daha fazla gerilme gerektirdiğinden şekil değiştirme üniform olarak dağılır. Boyun vermeden sonraki deformasyon miktarı m (Deformasyon Hız Duyarlılığı Üssü) ile yakından ilişkilidir [41].

Gerilim hızı duyarlılığı üsteli “m” pozitif ve yüksek olan malzemelerde boyun verme olayından sonraki şekil değiştirme miktarı artar. Bu tür malzemelerde boyun verme bölgesinde plastik gerilme artar ve boyun verme olayının etrafa yayılmasını sağlar. Böylece kalınlık incilmesi sadece bir bölgede yoğunlaşmayıp tüm malzemede üniform olarak gelişmesini sağlar. Yüksek sıcaklıklarda ( $T > 5.0 T_m$ ) gerinim hızının malzemenin mukavemetine etkisi çok olup, sabit sıcaklıkta ve birim değiştirme miktarı için aşağıdaki bağıntı geçerlidir [40].

$$\sigma = c\varepsilon^m \text{ (N/ mm}^2\text{)} \quad (2.2)$$

$\sigma$  = Gerilme (N/ mm<sup>2</sup>)

c = Malzeme Sabiti

$\varepsilon$  = Gerçek birim şekil değiştirme (mm)

m = Gerinim Hızı Duyarlılığı Üssü



### 2.3.1.5. Plastik Anizotropi “r”

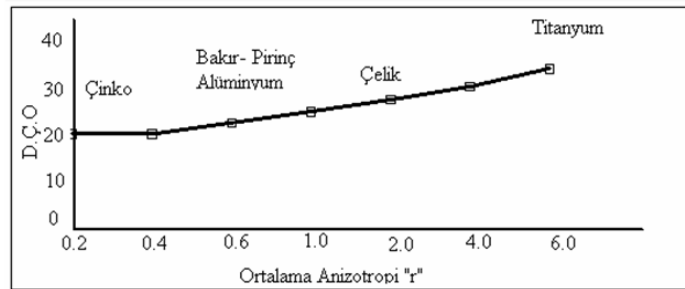
Sac malzemeden hazırlanan bir deney parçasına çekme deneyi uygulandığında plastik şekil değişimi çekme eksenini boyunca, buna dik olarak uzanan kalınlık ve genişlik doğrultusunda ise kısalma şeklinde meydana gelir. Hacim sabitliği uzama şekil birim toplamının kısalma şekil değişimlerinin toplamına eşit olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak bu kalınlık ve genişlik yönlerindeki birim şekil değişimlerinin birbirlerine eşit olmasını gerektirmemektedir. Genişlik yönündeki birim şekil değişimi [42];

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.3)$$

$\varepsilon_w$  = Genişlikteki gerinim

$\varepsilon_t$  = Kalınlıktaki gerinim

Ortalama dikey anizotropi katsayısı “r” sac malzemelerde derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür. Bunun 1 ve 1’den büyük olması istenir. Metalik saclara ait derin çekme oranı sınırının ortalama dikey anizotropi “r” katsayısına göre değişimi Şekil 2.10’da gösterilmiştir [40].



Şekil 2.10. Çeşitli malzemeler için derin çekme oranı sınırının ortalama dikey anizotropi “r” katsayısına bağlı değişimi [40].

Sac metal şekillendirilmesinde anizotropi normal ve düzlemsel olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Normal anizotropi, sacın maksimum çekilebilme değerini belirlerken

düzlemsel anizotropiye sahip parçalar hadde yönünde, haddeye dik yönde veya bu iki yön arasındaki herhangi bir açıya sahip yönde (örneğin 45° açılı yönde) farklı plastik şekil değiştirme özelliği gösterirler. [44]. Anizotropi katsayısı [45] anizotropinin ölçüsüdür. Sac metalin başarıyla preslenmesi için normal anizotropinin olabildiğince büyük, düzlemsel anizotropi ( $\Delta r$ ) değerininse olabildiğince küçük olması istenir.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.4)$$

$r_0$  = deformasyon yönündeki anizotropi katsayısı

$r_{45}$  = deformasyon yönü ile 45°'lik açı yapan anizotropi katsayısı

$r_{90}$  = deformasyona dik yönde açı yapan anizotropi katsayısı

Malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olan  $r$  değeri, çekme deneyi sırasında çekme numunesinde belirli bir uzamada genişlik boyunca olan şekil değişikliğinin, kalınlık boyunca olan şekil değişimine oranıdır. Metalin  $r$  değeri arttıkça, iyi bir şekil verilebilirlik için incelme miktarı azalmalıdır. Bu nedenle şekillendirme işlemi için uygun malzemenin  $r$  değeri birden büyük olmalıdır [46]. Ancak büyük  $r$  değeri, her metal şekillendirme işlemi için uygun değildir. Bu da her şekillendirme işlemi için farklı değerlerde malzeme anizotropisi istendiğini gösterir. Ayrıca şekillendirmede görülen hatalar, her işlemde farklı deformasyon miktarlarında oluşur [47]. Parçaların daha derin şekillendirilmesinde yüksek  $r$  değeri gerekir. Otomobil panelleri gibi yumuşak hatlı ve sık parçalarda, yüksek  $r$  değeri buruşma ve dalgalanma olasılığını azaltabilir [48]. Şekillendirme işlemlerinde düzlemsel anizotropinin küçük olması istenir.

### **2.3.1.6. Taslak Malzeme Şeklinin ve Büyüklüğünün Şekillendirme İşlemi Üzerindeki Etkileri**

Taslak malzeme şeklinin ve büyüklüğünün derin çekme işlemi üzerinde büyük bir etkisi vardır. Taslak malzeme büyüklüğünün, kritik çapı/büyüklüğü aşması halinde, malzemede oluşan buruşma ve gerilme (stretching) nedeniyle zımbanın altında tam bir akma meydana gelmez. Kalıp boğazında aşırı bir incelme (boyun verme)

meydana gelir ve malzeme genelde kare kaplarda değişik şekillerde kopması sonucu, çekme işlemi başarısızlıkla sonuçlanır. Diğer taraftan; eğer taslak malzeme çok küçük olursa buruşma oluşabilir. Pratik uygulamalarda sac metaldeki kalınlık değişimi sac metalin şekillendirilebilirliğinin bir göstergesidir. Kalınlık miktarındaki artış buruşmaya, azalma ise boyun vermeye yol açabilir. Pratikte, kalınlık artışı ve azalması sac kalınlığının + %15'i ile - %25'i arasında sınırlanır [62].

### **2.3.2. İşlem Koşulları**

#### **2.3.2.1. Kalıp Geometrisi**

Bir sacın biçimlendirilmesinde kalıp ve zımba kavis en önemli faktördür. Zımba üzerindeki küçük bir kavis, sac parça üzerindeki keskin hatların iyi bir şekilde elde edilmesi için arzu edilen bir özelliktir. Fakat böyle keskin hatlar gerinim artışı bir yerde toplayacağı için imalatta zorluklar ortaya çıkartır. Kavis üzerindeki gerinim yoğunluğu sac levhada buraya bitişik düz bölgelerde deformasyonun yayılmasına engel olur ve hata olasılığını azaltır. Böyle alanlarda sac malzeme çatlayacak veya yırtılacaktır. Çok büyük kavis ise zımba profili üzerinde kırışıklığa neden olacaktır [40]. Sac malzemenin kalıba girişteki kalıp kavisinde önemi oldukça büyüktür. Eğer kalıp giriş kavis küçük ise metal akamayacak, sonuçta gerilmeler ve büyük ihtimalle levha yırtılır. Kalıp kavis büyük ise, özellikle derin çekme ince parçalarda, malzeme, baskı plakası ve matris yüzeyi arasındaki sıkıştırma noktasını terk ettikten sonra buruşmaya başlar. Buruşma sert ise, malzeme kalıp giriş kavis arasında çekildiğinde akışı sınırlayabilir [49]. Uygun kalıp kavis:

$$R_k = (8 \sim 10) \cdot t \quad (2.5)$$

t = Sac kalınlığı (mm) formülü ile hesaplanır.

#### **2.3.2.2. Baskı Plakası Kuvveti**

Baskı plakası kuvvetinin kırışıklık ve yırtılma oluşumuna etkisi büyüktür. Baskı plakası kuvveti düşük tutulursa sac parçada kırışıklıklar oluşur. Bu kırışıklıklar uygun

kalıp aralığı kullanıldığı takdirde sadece flanşta; aksi halde kap duvarlarında da meydana gelir [40]. Baskı plakası kuvvetinin gerekenden fazla olması ise çekme sacının radyal doğrultuda hareketine engel olarak yüzeyin artmasına yol açar. Bu durum sadece sacın uzamasından ibarettir ve malzeme mukavemetinin aşılması halinde yırtılma meydana gelir [50].

### **2.3.2.3. Sac Kalınlığı ve Tane Boyutu**

Sac kalınlığındaki artış biçimlendirilebilirliğe olumlu yönde etki eder. Yapılan biçimlendirme işleminde kalın sacda ince saca göre daha büyük sınır gerinimleri elde edilir. Levha kalınlığının kopmadaki etkisini görmek amacıyla 0,5 ve 2 mm kalınlıktaki alüminyum numuneler çekme deneyine tabi tutulmuş, deney sonuçlarına bakıldığında çekme mukavemeti ve deformasyon sertleşme üssü (n) değerinin değişmediği, ancak % kopma uzama değerinin 0,5 mm'lik sac için daha fazla olduğu gözlenmiştir. Levha kalınlığının artmasıyla levha kusurlarının etkisinin azalması nedeniyle biçimlendirme limiti artmaktadır [41].

Tane büyüklükleri göz önüne alındığında küçük taneli sacların dayanımı yüksek fakat biçimlendirilebilirlik özelliği düşüktür. Kaba taneli sacların biçimlendirilebilirlik özelliği yüksek buna karşın yüzey düzgünlüğü “portakal kabuğu” diye anılan pürüzlülüğü görünümüne bürünebilir [51].

### **2.3.2.3. Çekme Hızı**

Çekme hızı, çekilen parçanın ve düzgünlüğüne ve fiziksel özelliklerine etki eder. Genelde çekme hızı çekilecek kap malzemenin cinsine, kalınlığına, kalıbın yağlanmasına ve benzer özelliklere bağlı olarak seçilir [52].

### **2.3.2.4. Yağlama**

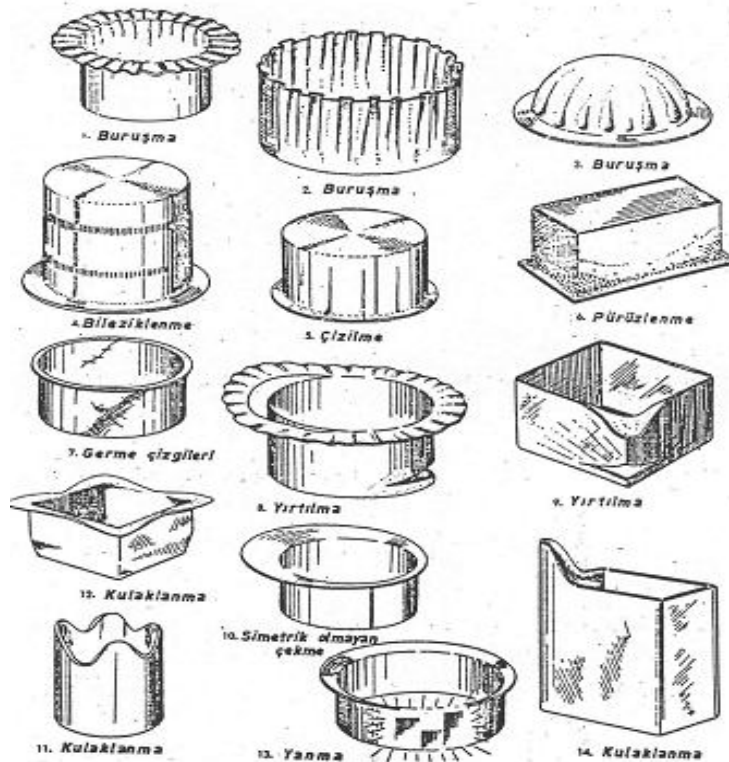
Yağlama, kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltarak malzemenin şekillenmeye karşı olan direncini azaltmış olur. İyi bir yağlama takım ve iş parçası yüzeylerinin zamansız bozulmalarını önlediği gibi kalıp ömrünün artmasına da sebep olur [42].

Bıçimlendirme işleminde bir yağlayıcının kullanılması üniform gerinim dağılımı sağlar. Bir yağın seçiminde göz önünde tutulması gereken noktalar [40];

- Film oluşturu özelliği ve yağlama kolaylığı.
- Kolay temizlenmesi.
- Korozyona karşı koruma.
- Gerinim oranlarına göre yağlama.

### 2.3.2.5. Metalik Sacların Şekillendirme İşlemi Esnasında Görülen Hatalar

Üretim sahası oldukça geniş olan hidrolik şekillendirme işleminde; çalışma parametreleri, levha özellikleri, kalıp ve zımba konstrüksiyonu tezgâh özelliklerine bağlı olan birçok problemle karşılaşmaktadır. Şekil 2.11’de şekillendirme işleminde görülen hatalar gösterilmiştir. Buna bağlı olarak kulaklanma, yüzey pürüzlülüğü (portakallanma), lüder çizgileri, looper çizgileri, buruşma, çatlamalar derin çekme işleminde karşımıza çıkan hatalardır. Bunlar;



Şekil 2.11. Şekillendirmede görülen hatalar.

## **Kulaklanma**

Şekillendirme ile çekilen kabın ağız kısmında girinti ve çıkıntılardan oluşan bir yapı göstermektedir. Bu girinti ve çıkıntıların her biri kulak olarak isimlendirilmektedir. Düzlemsel anizotropi kulak oluşumuna yol açar. Kulak oluşumuna yol açan düzlemsel anizotropi ( $\Delta r$ ) ampirik bir parametre ile ifade edilir ve

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.6)$$

$r_0$  = deformasyon yönündeki anizotropi katsayısı

$r_{45}$  = deformasyon yönü ile  $45^\circ$  lik açı yapan anizotropi katsayısı

$r_{90}$  = deformasyona dik yönde açı yapan anizotropi katsayısı

formülü ile hesaplanır.

Düzlemsel anizotropi parametresi  $\Delta r$ , sacın haddelenme doğrultusuna göre, kulakların konumunun belirlenmesini sağlar.  $\Delta r$  büyüdükçe kulak yüksekliği de artar.  $\Delta r = 0$  için kulak oluşumu görülmez [53].

## **Yüzey Pürüzlülüğü**

Şekillendirme işleminden sonra özellikle fazla deformasyona uğrayan bölgelerde görülen yüzey pürüzlülüğü portakallanma olarak adlandırılır. Gözle görünebilir derecede yüzey pürüzlülüğüne yol açan tane boyutu; deformasyon miktarı, alaşımın yapısı ve ürün cinsine göre değişmektedir. Bir genelleme yapmak gerekirse, yüzey kalitesi açısından çok hassas parçaların üretilmesinde tane boyutunun en fazla 0,04 mm olması tavsiye edilmektedir. Yüzey kalitesinin fazla kritik olmadığı durumlarda ise, 0,06–0,07 mm civarında tutulması sünekliği yükseltmektedir [54].

## **Lüder Çizgileri**

Genel olarak Al-Mg alaşımlı sacların derin çekilmesinde karşılaşılan lüder çizgileri, tavlanmış saclardaki akma uzaması ile oluşan bir tür yüzey pürüzlenmesi şeklindedir.

Çekme esnasında bazı bölgelerde çok az deformasyon meydana gelirken, takip edilen yükü 45° açı yapan ve kesme gerilmesinin maksimum değere ulaştığı doğrultularda bölgesel akma meydana gelerek yüzeyde çukurlaşmalar meydana gelmektedir. Deformasyonun devam etmesiyle büyüyerek yaygınlaşan çukurlaşmalar, derin çekilen kabın yüzeyinde iskelete benzer dağılım gösteren pürüzlü bölgelerin oluşmasına yol açmaktadır. Uygulanan gerilmenin basma gerilmesi olması halinde, pürüzlü alanlar çıkıntılar şeklinde ortaya çıkmaktadır. Çeşitli tipleri olan lüder çizgilerinin genel özelliği, istenilmeyen kaba ve pürüzlü bir yüzey oluşmasıdır [54].

### **Looper Çizgileri**

Derin çekmede karşılaşılan yüzey hatalarından birisi olan looper çizgileri, derin çekilen kabın yüzeyinde oluşan halka (loop) biçimli izler olarak tanımlanır. Metal yapısındaki düzensizliğin yol açtığı üniform olmayan deformasyon, bu tür bir yüzey hatasına yol açmaktadır [54].

### **Buruşma**

Buruşma zımba ile kalıp arasındaki mesafenin büyük olması, sıkıştırma kuvvetinin yeterli olmaması, kalıp ve zımba eğrilik yarıçapının büyük olması, taslak çapının gereğinden büyük olması veya malzemenin çok ince olduğu durumlarda görülür. Uygun kalıp geometrisinin ve uygun sıkıştırma basıncının yakalanması ile buruşma engellenebilir [55].

### **Çatlama**

Çatlama genellikle zımba eğrilik yarıçapının hemen üstündeki bölgede oluşur. Zımba veya kalıp eğrilik yarıçapının az olması, malzeme özelliklerinin yetersiz olması, derin çekme oranının büyük seçilmesi, sıkıştırma basıncının yüksek olması, zımba ile kalıp arasındaki mesafenin küçük olması, yağlamanın yetersiz veya uygun yağ çeşidinin kullanılmaması bu hataya sebep olur. Bu faktörlerin yetersizliği sonucunda zımba kuvveti artar ve malzemenin kritik bölgede incelerek kopması meydana gelir. Daha kaliteli malzeme kullanımı ve zımba kuvvetini azaltıcı tedbirlerin alınması ile bu hata önlenir. Bazı durumlarda çatlama işlemi parçanın üst kısımlarında veya

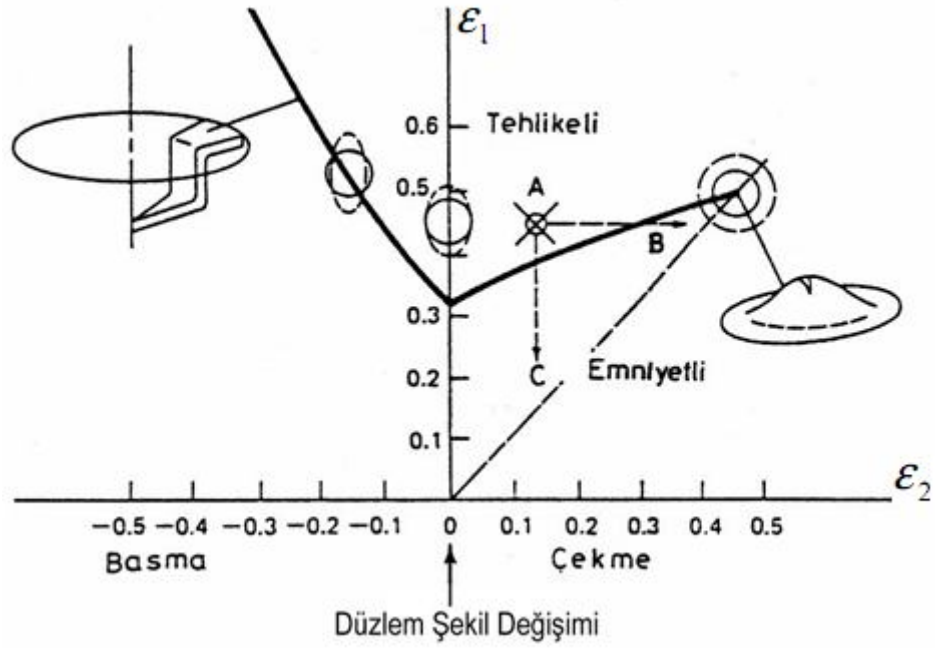
taslağın dış kısımlarında görülür. Bunun sebebi ise malzemenin çevresel dış basınca karşı koyamayacak zayıflıkta özelliklere sahip olmasıdır. Malzeme üzerinde çentik gibi izlerin olması da çatlama yol açabilir [56].

#### **2.4. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI**

Sac ve levha şeklindeki metal malzemelerin çok eksenli zorlanmalar altında şekillendirilebilme sınırlarının belirlenmesinde “Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD)” olarak tanımlanan malzeme verilerinden yararlanılmaktadır. Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için, plastik şekil değiştirme analizlerine ihtiyaç vardır. Bu amaçla, metalik sac yüzeyine, elektrokimyasal yolla, dairelerden oluşan bir ağ çizilir [57].

Deney numunesinin boyutlarını, yağlama yöntemini ve yağlayıcı türünü değiştirerek, çekme deneyiyle, plastik şekil değiştirme işlemi için farklı gerilme durumları oluşturulur. Bu gerilme koşulları altında malzemede boyun verme veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme işlemi sürdürülür. Deney sonrası değerlendirme için boyun verme bölgesindeki, çatlak bölgesindeki veya çatlağın bitişiğindeki 1.ci ve 2.ci komşu daire seçilir. Şekillendirme işlemi sonunda başlangıç daire çapında ya büyüme olur (dengeli iki eksenli çekme gerilmesi durumunda) veya daire elipse dönüşür (Şekil 2.12). Şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksenini ile en küçük eksenini ölçülerek, en büyük ( $\epsilon_1$ ) ve en küçük ( $\epsilon_2$ ) birim şekil değiştirme miktarları bulunur [57].

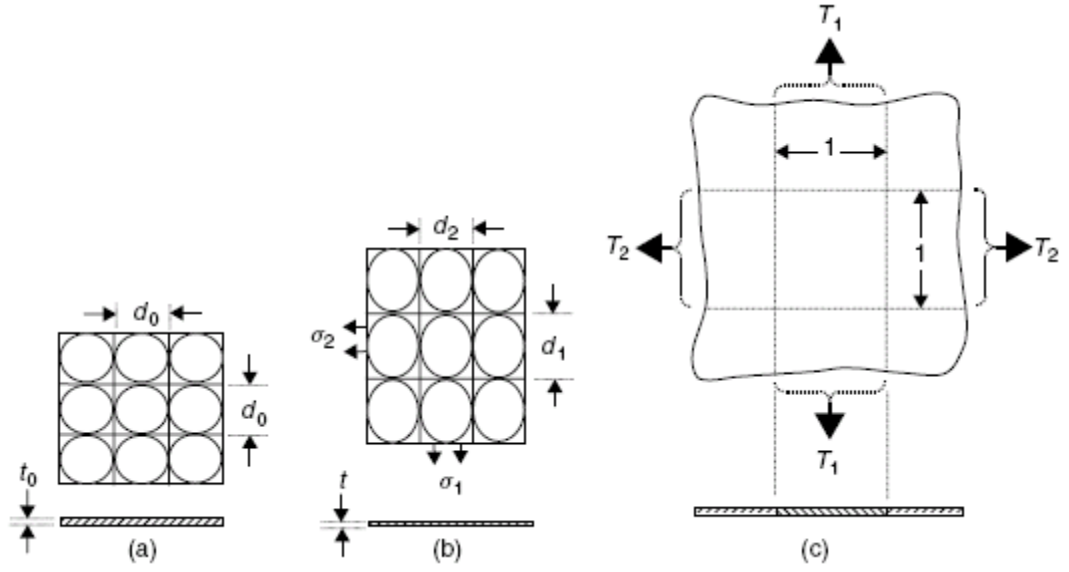




Şekil 2.12. Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı örneği [57].

Her olay için önce bir şekil değiştirme analizi yapılır, daha sonra çözüm yoluna gidilir. Genelde zımba veya erkek kalıp kuvvetini azaltacak önlemler, şekillendirme işleminin emniyetli bölgede kalmasına katkıda bulunacaktır [57].

Hidrolik şekillendirme sonucu saclarda plastik şekil değişiminin ölçülmesinde “ızgara (grid)” tekniğinden (Şekil 2.13) yararlanılmaktadır. Bu yöntemde başlangıçta levha üzerine (2–5 mm gibi) belirli çapta çok sayıda çember foto-kimyasal veya elektro-kimyasal bir yöntemle işlenmektedir (a). Şekillendirme işlemi sonrasında bu çemberler çeşitli boyut ve oranda elipslere veya daha büyük çaplı dairelere dönüşmektedir (b). Bu elipslerden boyun verme hasarının üstüne veya hemen yanına denk gelenlerin büyük ve küçük eksen boyları ölçülerek kaydedilir. Büyük ( $\epsilon_1$ ) ve küçük ( $\epsilon_2$ ) gerçek birim şekil değişimi değerleri aşağıdaki hesaplanmaktadır [57] :



Şekil 2.13. Hidrolik şekillendirme kullanılan ızgara (grid) tekniği a) Şekillendirme işlemine başlamadan önce sac levhanın üzerine eşit aralıkta ve büyüklükte çizilen çemberler. b) Şekillendirme işlemi sonucunda deformasyona uğramış olan levhadaki çemberlerin son hali c) levha üzerine çizilen çemberlerin bir tanesine etki eden çekme kuvvetleri [57].

Başlıca gerilimler:

Şekillendirme işlemi sonundaki başlıca gerinim;

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}; \varepsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}; \varepsilon_3 = \ln \frac{t}{t_0} \quad (2.7)$$

Gerinim Oranı:

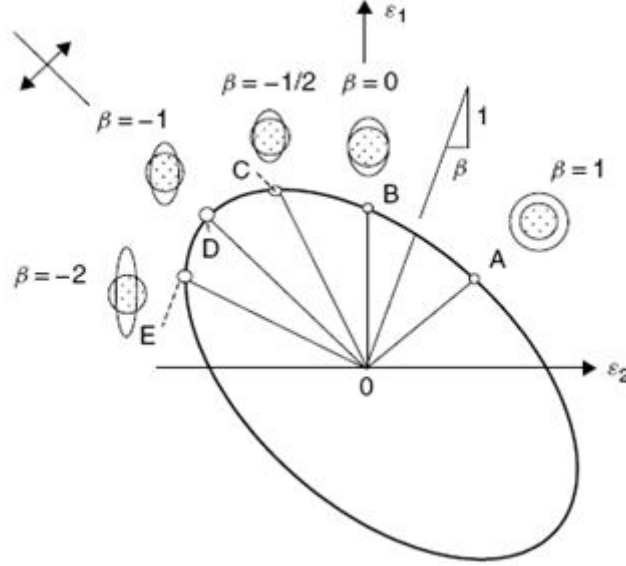
$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\ln(d_2/d_0)}{\ln(d_1/d_0)} \quad (2.8)$$

Bir Noktadaki Deformasyon:

$$\varepsilon_1 = \ln \left( \frac{d_1}{d_0} \right); \varepsilon_2 = \ln \left( \frac{d_2}{d_0} \right) = \beta \varepsilon_1 \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \left( \frac{t}{t_0} \right) = -(1 + \beta) \varepsilon_1 \quad (2.10)$$

Yukarıdaki hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler neticesinde şekil 2.14'deki örnek gösterimi verilmiş olan gerinim diyagramı elde edilir.



Şekil 2.14. Farklı gerilim oranlarına benzer farklı deformasyon biçimlerini gösteren gerinim diyagramı [57].

Değişik deneylerde, değişik koşullar için bulunan değerler bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 2.4.3.'de görülen "Şekillendirme Sınır Diyagramı" (ŞSD) elde edilir. Şekillendirme sınır diyagramının üst bölgesi tehlikeli bölge, alt bölgesi emniyetli bölgedir. Diyagram ayrıca, çekme-çekme veya çekme-basma tipi şekil değiştirme türlerinin bulunduğu iki bölgeye ayrılır. Çekme-çekme bölgesinde  $\varepsilon_2$  pozitif işaretlidir. Çekme-basma bölgesinde  $\varepsilon_2$  negatif işaretlidir. Şekillendirme sınır diyagramında  $\varepsilon_2$ 'nin sıfır olduğu nokta, düzlemsel şekil değiştirmeyi belirleyen noktadır. Farklı malzemelerin birbiriyle karşılaştırılmasında bu noktaya ait değerler kullanılır [57].

## 2.5. METAL SACLARIN ŞEKİLENDİRME İŞLEMİNİN BİLGİSAYAR ORTAMINDA BENZETİMİ

Günümüzde metalleri biçimlendirme konusunda dünya çapında 60'a yakın benzetim (simülasyon) yazılımı mevcuttur. Bunların %90 kadarı üniversite ve araştırma kuruluşlarında gerçekleştirilmiş olup yalnızca % 10 kadarı ticari amaçlı olup kullanıma açıktır [58].

### 2.5.1. İmplicit Yöntem

Bu yöntemde denge denklemleri  $t+\Delta t$  anında çözülür. Saç şekillendirmedeki birçok nonlineer davranış nedeni ile denge konumu iterativ olarak elde edilir. Genelde, denklem 3.3 de verilen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülür.

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (2.11)$$

Burada,  $K_t$  bilinen tegetsel direngenlik matrisi,  $F$  dış kuvvetlerin vektörü,  $I$  ise iç kuvvetlerin vektörü olup,  $\Delta u$  bir zaman adımındaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımında tegetsel direngenlik matrisinin yeniden oluşturulması ve ayrıştırılması gerekir yöntem teoride iki artış arasındaki adım aralığı istenen büyüklükte seçilebilmesine karşın pratikte nonlineer temas şartları nedeni ile sınırlıdır. Çözümde bir yakınsama kriterine ulaşıldığında hesaplama durur [58].

### 2.5.2. Eksplisit yöntem

Bu yöntemde denge denklemi  $t$  anında çözülür ve iterasyona gerek yoktur. Biçimlendirme işlemi statik değil dinamik bir işlem olarak algılanır ve hareket denkleminin entegrasyonu için merkezi farklara dayalı bir çözüm adımı kullanılır:

$$\begin{aligned} u^{(i+1)} &= u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \Delta \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} \\ u^{(i+\frac{1}{2})} &= \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^i}{2} \ddot{u}^{(i)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Buradaki merkezi farklar operatörü bir önceki artışlardan bilinen hız ve ivme değerlerini kullandığından yöntem eksplisit olarak adlandırılır. İvme için;

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1} (F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (2.13)$$

formülü kullanılır ki burada  $M^{-1}$  kütle matrisinin tersi olup “lumped mass” yöntemi kullanıldığı takdirde ters alma işlemi diyagonal bir matrisin tersini alma işlemi şeklinde kolaylaşır. Kararlılık açısından kullanılabilir zaman ise adımı genişliği sınırlıdır.  $I$ : karakteristik sonlu elaman büyüklüğü,  $c$ : malzemedeki ses hızı olmak

üzere, kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak  $\Delta t = l / c$  eşitliği ile bulunur. Yani bir zaman adımı içinde bir dalga en fazla bir sonraki sonlu elemana ulaşabilir. Ağ yoğunluğunda mm seviyesinde eleman büyüklükleri kullanıldığında  $\mu s$  mertebesinde zaman adımları elde edilir. Bu demektir ki bir derin çekme işleminin simülasyonu  $10^5 - 10^6$  kadar zaman adımına gerek duyulabilir. Bu da doğrudan hesaplama zamanına yansır. Bu problemi gidermek için şekillendirme işlemleri gerçekte olduğundan daha hızlı şekilde oluyormuş gibi benzeştirilir. Benzeşim sırasında ortaya çıkaabilecek atalet etkilerini gidermek için (örneğin sönüm elemanları kullanmak gibi) önlemler alınmalıdır. Yapılan araştırmalar, işlem hızının sonuçları etkilemeden on kata kadar çıkarılabileceğini göstermiştir. Malzeme özelliklerinin ve katsayıların şekil değiştirme hızına bağlı olduğu malzeme modelleri için ise hızın değiştirilmesi söz konusu olamaz. Alternatif bir yöntem de işlem hızı sabit tutularak malzemenin yoğunluğunun artırılması ve buna bağlı olarak malzeme içindeki ses hızı küçültülmesidir. Yoğunluğun 100 kat artırılması ses hızını 10 kat düşürür ve problem 10 kat hızlı çözülür [59].

### 2.5.3. İmplicit ve Eksplisit Yöntemlerin Karşılaştırılması

Eksplisit Yöntem (EY) mevcut durumda daha az hesap zamanına ve hafızaya gerek duymaktadır. Yalnız bu tip programların (Kisisel Bilgisayar-Personel Computer) PC bilgisayar teknolojisindeki gelişmeye paralel geliştirildiği unutulmamalıdır. İmplicit Yöntem (IY) ise mevcut yazılımların geliştirilmesi ile oluşturulmuştur.

EY'ler çarpma gibi kısa süreli dinamik problemlerin çözümü için çok elverişlidir. Ancak çok sayıda zaman adımına gerek duyarlar. İY'lerde adım aralığı teorik olarak sınırsızdır. Hesap zamanını kısaltmak için EY'lerde yapay olarak bir ivmelendirmeye veya yoğunluğu arttırmaya gidilir. Bunun sonucu ortaya çıkacak kütle etkileri ancak yazılım çok iyi tanıyan kullanıcılar tarafından alınacak önlemlerle giderilebilir. İY'lerde fiziksel sistemi değiştirmek gerekmez, çünkü çözüm zaten iteratif olarak yapılmaktadır.

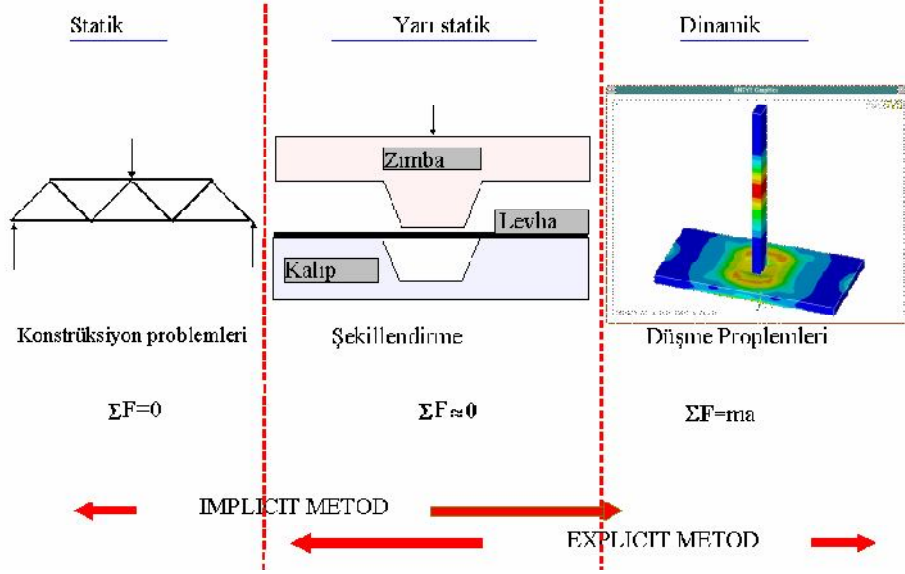
EY'ler nümerik açıdan oldukça kararlıdır. Temas şartları küçük zaman adımları sayesinde tam anlamı ile tarif edilebilir. Pot oluşması gibi karasızlık olguları kolayca

belirlenir ve yakınsama problemleri ile karşılaşmaz. İY'ler ise bu durumda işlemeyebilir veya burkulma sonrası gibi ek hesaplara gereksinim duyulabilir.

Geriye yaylanma ve iç gerilmeler konusunda İY'ler daha üstündür. Bu tip hesaplamalarda takım parçalarının birbirlerinden uzaklaştırılmasının simülasyonu çok önemlidir. Bu yükleme boşaltması EY'lerde ancak is parçası hareketini tamamlamışsa, yani dinamik etkiler sönümlenmişse uygulanabilir. Hesap zamanını azaltma kaygısı, elemanlarda kullanılan düşük dereceli integreasyon gerilmelerinin hassas hatta doğru hesaplanmasını engeller. Ancak, geriye yaylanmanın temel şartı ise gerilmelerin doğru hesaplanmasıdır. Dolayısıyla EY'lerle elde edilen geriye yaylanmalar ancak tendense olarak doğru sonuç verir. Eleman integrasyon derecesi yükseltilecek buna karşı gelinebilir, ancak hesap zamanı oldukça artar ve İY'lere karşı olan avantaj kaybedilir [59].

## **2.6. ANSYS/LS-DYNA PROGRAMI**

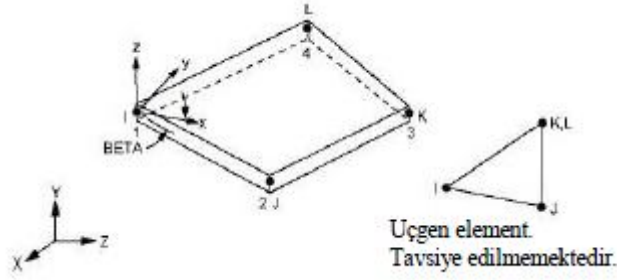
Bu çalışmada çözümler için kullanılan yazılım otomotiv endüstrisi için 1986'dan beri John Hallquist tarafından ticari olarak geliştirilmekte olan Livermore Software Technology Corp. (LSTC) firmasının LS-DYNA programı, genel amaçlı yüksek dereceden nonlineer zamana bağımlı dinamik problemlerin hesaplanmasında kullanılan eksplisit dinamik sonlu elemanlar yazılımıdır. Çok geniş kontak tipleri kullanılarak ileri düzeyde malzeme modelleme kapasitesi ile çok ayrıntılı deformasyon analizleri yapılabilmektedir. ANSYS ve LS-DYNA yazılımları birbiriyle entegre olarak çalışmaktadır. Eksplisit ve İmplicit çözüm teknikleri mükemmel bir şekilde ANSYS'de bir araya gelmiştir [59]. Şekil 2.15'te eksplisit ve implicit metotların karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 2.15. İmplicit ve eksplisit metotların karşılaştırılması [59].

### 2.6.1. Eksplisit Dinamik Analiz Programında Kullanılan Elementler

Eksplisit dinamik elementlerin tamamı üç boyutludur. Yapılan araştırmada SHELL 163 eksplisit element tipi kullanılmıştır. Şekil 2.16'da Shell 163 elementin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.16. SHELL 163 element tipi [59].

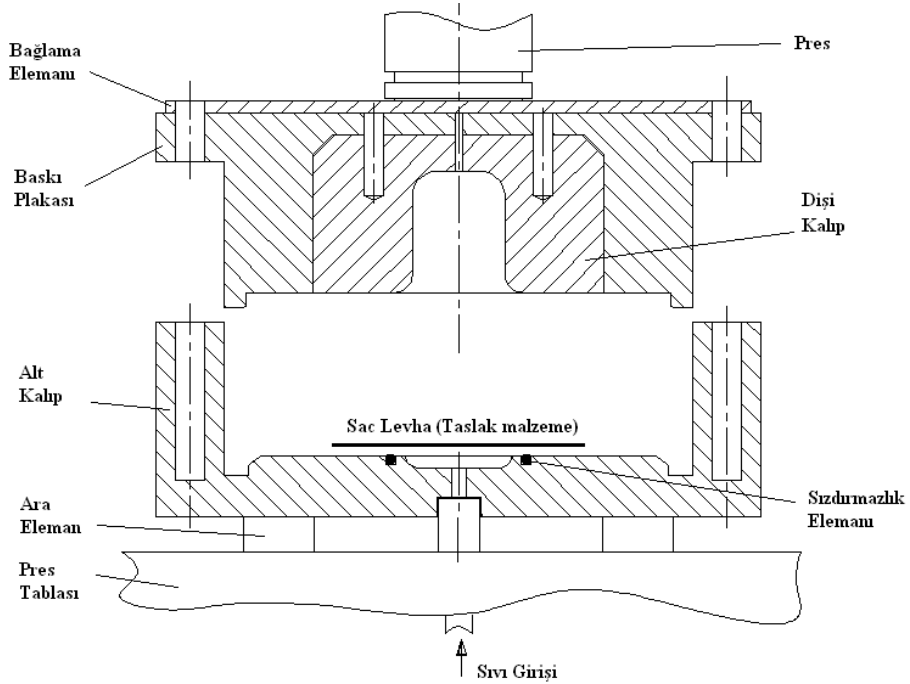
## BÖLÜM 3

### MATERYAL ve METOD

Kurulacak sistemin modellenmesi SolidWorks™ programı kullanılarak yapılmıştır. Bilgisayar ortamındaki modellemeden ihtiyaç duyulacak parçalar ve şekillendirmeyi sağlayacak elemanlar ölçüleri ile birlikte ayrıntılı bir şekilde belirlenmiştir. Bilgisayar ortamında, sistemde kullanılacak kalıp tasarımı da yapılmıştır. Kullanılacak kalıp ve şekillendirme deneylerinin benzetimi için ANSYS/Ls-Dyna sonlu elemanlar analizi programından yararlanılmıştır. Böylece teorik olarak şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. SİSTEMİN TANITILMASI

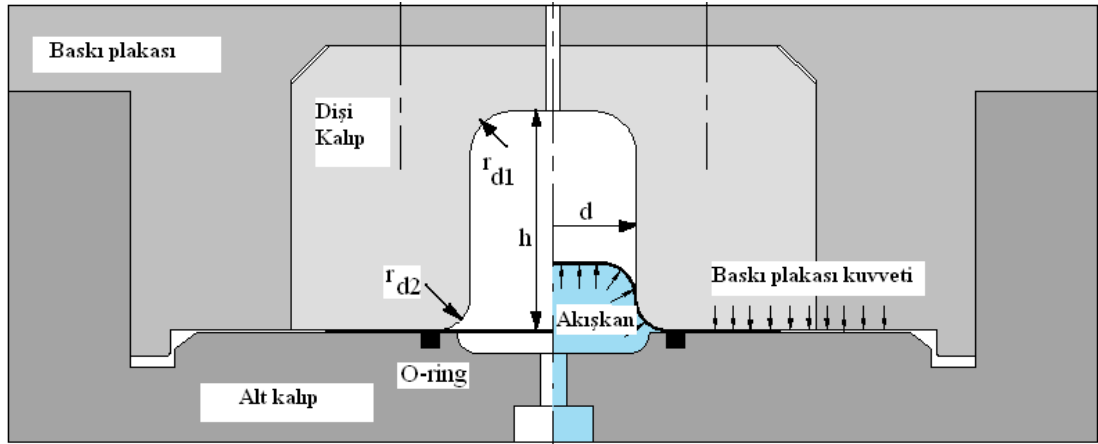
Hidro şekillendirme için kurulan sistem Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kurulan hidro şekillendirme sistemi kesit görünüşü.



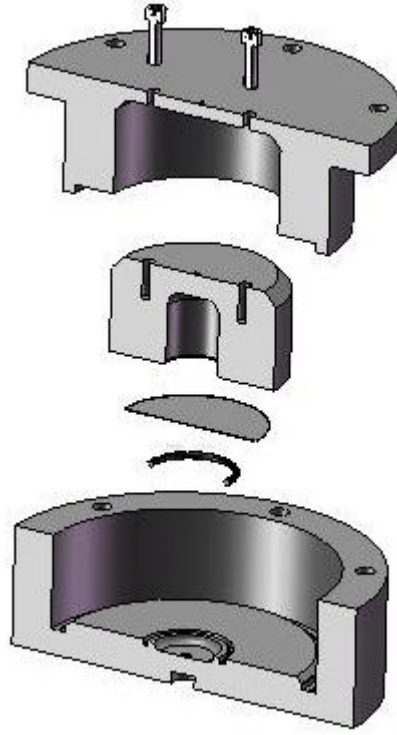
Sistemde 30 tonluk Hidroliksan marka pres kullanılarak baskı plakası kuvveti presin aşağı-yukarı hareketi ile sağlanarak şekillendirme sağlanmıştır. Sistemde alt kalıp, baskı plakası, şekillenmenin olacağı dişi kalıp, sızdırmazlık elemanları, standart parçalar ve şekillendirmeyi sağlayacak sıvı olarak hidrolik yağ kullanılmıştır. Bu tür şekillendirme de dişi kalıp kullanılmadığından onun yerine hidrolik akışkan kullanılmaktadır. Kapalı sisteme manuel pompa ile basılan hidrolik akışkan, baskı plakasına karşı göstermiş olduğu basınçla sıkışarak şekillendirmeyi gerçekleştirmektedir. Hidrolik akışkanın sisteme ne kadar miktarda basıldığını görmek ve ayarlamak için pompada bulunan gliserinli manometreden yararlanılmıştır. Aynı şekilde presin bünyesinde bulunan basınç göstergesi sayesinde uygulanan baskı plakası kuvveti de takip edilmiştir. Akışkanın sisteme dolması ile kalıpta oluşan havanın tahliyesi için kalıbın üstüne hava tahliye delikleri açılmıştır. Şekillendirmenin sonucunda sistemdeki yağın geri dönüşünü pompanın üzerinde bulunan ayarlı kol ile yaparak sistemden çıkışı sağlanmıştır. Şekil 3.2’de kurulan hidro şekillendirme kalıp düzeneğinin resmi verilmiştir.



Şekil 3.2. Kurulan hidro şekillendirme kalıbı.

### 3.2. KALIBIN TANITILMASI

Hidro şekillendirme sisteminde şekillendirmenin olabilmesi için öncelikle kalıp tasarlanmış ve ona uygun kalıp elemanları ile geliştirilerek imal edilmiştir. Sistem hidrolik akışkanla şekillendirme olduğu için kapalı sistem olarak tasarımı yapılmıştır. Şekillendirmeni gerçekleştirileceği kalıbın de-montaj resmi Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Kalıbın de-montaj resmi.

Sızdırmazlık, basınçlı akışkanla şekillendirmede önemli sorunlardan biri olduğundan dolayı sistem, birbirine içine geçen alt ve üst kalıp olarak iki kalıptan meydana gelmektedir. Üst kalıp içerisine yerleştirilen dişi kalıp, alüminyum malzemeyi hidrolik akışkanın basıncı ile sıkıştırarak kalıbın şeklini alması amaçlı modüler olarak tasarlanmıştır. Sistemde baskı plakasının aşağı yukarı hareketini ve alüminyum saca basmasını kolaylaştırmak için üst kalıba açılan M12 cıvata sayesinde üst kalıba bağlantısı yapılarak presin kafasına monte edilmiştir. Belirtildiği gibi basınçlı akışkanla şekillendirmede en büyük sorun sızdırmazlığın sağlanabilmesidir. Bunu engellemek için hidro şekillendirme kalıbını kapalı sistem olarak tasarlanmanın yanı sıra şekillendirme süresince içerdeki basınca karşın hidrolik yağın dışarı kaçmasını önlemek için sistemde 3,5 mm kesit çaplı O-ring kullanılmıştır. Hidrolik yağ, sisteme 700 bar basınca sahip manuel pompa ile verilmiştir. Kalıp elemanlarının tasarımında kalıp dış çapı 249 mm, et kalınlığı 25 mm, kullanılan dişi kalıp çapı 120 mm, dişi kalıp kenar kavis çapı 7,5 mm ve maksimum çekme derinliği de 50 mm olarak tasarlanmıştır. Bununla ilgili açıklama Ek A'da verilmiştir.

Hidro şekillendirme sisteminde belirlenmiş olan ölçülerde ürün üretmek yerine modüler olarak tasarlanan dişi kalıp sayesinde değişik geometrilere sahip, farklı türde malzeme kullanarak üretim yapma imkanı sağlanmıştır.

### 3.3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Petrol türevi yakıtların her geçen gün azalıyor olması ve araçların sebep olduğu CO2 emisyonunun yeryüzünün global ısınması ile ilintilendirilerek en aza indirilmesi konusunda hükümetlerin ve dünya çapındaki bazı organizasyonların getirdiği ulusal ve uluslar arası düzenlemeler otomotiv sektöründe ilk ve en başlıca önlem olarak araçların ağırlıklarının hafifletilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Alüminyum ve alaşımları bu amaca hizmet edecek en uygun malzemedir. 5XXX serisi Al-Mg alaşımları sahip oldukları yüksek mukavemet, uzama, şekil verilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüksek korozyon dayancı özellikleriyle farklı alanlarda yaygın kullanım bulurlar. Bu alaşımların yüksek şekillendirilebilirlik yetenekleri sahip oldukları Mg içeriğinden kaynaklanmaktadır. Mg atomlarının katı çözeltide Al atomları ile yer değiştirmesi ile mekanik deformasyon esnasındaki dislokasyon hareketi engellenerek yüksek uzama değerlerine kadar çalışma sertleşmesi geciktirilir, deformasyon yaygın boyun verme mekanizması şeklinde gelişir ve erken yırtılmalar engellenir [60]. Çalışmada, şekillendirilecek malzeme olarak Al 5XXX serisinden 0,5 mm kalınlığında Al 5754 sac malzeme kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de alüminyum malzemenin kimyasal özelliği, Çizelge 3.2’te ise mekanik özelliği verilmiştir.

Çizelge 3.1. Al 5754 alaşımının kimyasal özelliği.

%									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Her Biri	Toplam
0,40	0,40	0,10	0,50	2,6-3,6	0,30	0,20	0,15	0,05	0,15

Çizelge 3.2. Al 5754 alaşımının mekanik özelliği.

Mekanik özellikleri	AL 5754
Yoğunluk, kg/mm <sup>3</sup>	2,643x10 <sup>-3</sup>
Çekme Dayanımı, MPa	220
Akma Dayanımı, MPa	100
50 mm'deki Uzama, %	26
Elastikiyet Modülü, GPa	71
Poisson Oranı	0,33
Tangent Modülü, MPa	416
Barlat Exponent	8
r <sub>0</sub>	0,705
r <sub>45</sub>	0,765
r <sub>90</sub>	0,906

Çalışmada Al 5754'ün yanı sıra 0,6 mm kalınlığındaki Al 1050 malzemesinin de şekillendirilmesi incelenmiştir. Bu malzemeye ait kimyasal özellikler Çizelge 3.3'de, mekanik özellikleri de Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Al 1050 alaşımının kimyasal özelliği.

%								
Al	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Mn	Her Biri	Toplam
99,5	0,40	0,25	0,05	0,05	0,04	-	0,03	0,10

Çizelge 3.4. Al 1050 alaşımının mekanik özelliği.

Mekanik özellikleri	AL1050
Yoğunluk, kg/mm <sup>3</sup>	2,705x10 <sup>-3</sup>
Çekme Dayanımı, MPa	76
Akma Dayanımı, MPa	28
50 mm'deki Uzama, %	39
Elastikiyet Modülü, GPa	69
Poisson Oranı	0,33
Tangent Modülü, MPa	84
Barlat Exponent	8
r <sub>0</sub>	0,67
r <sub>45</sub>	0,45
r <sub>90</sub>	0,73

### **3.4. TEORİK MODELİN OLUŞTURULMASI**

Yapılan çalışmada, dinamik eksplisit ANSYS/LS-Dyna modülü kullanılmıştır. ANSYS programı altında çalışan 5 ana modül vardır. Bunlardan biride LS-DYNA modülüdür. LS-DYNA modülü DYNA3D programının ANSYS altında çalışan modülüdür.

#### **3.4.1. Modelin Tasarlanması**

Kalıp elemanları yüzey (surface) olarak modellenmiştir. Modellenen parçalar sisteme yerleştirilirken kalıp elemanlarının konumuna ve et kalınlıklarına dikkat edilmiştir. Üretilecek parça simetrik olduğu için kalıp elemanlarının ¼'ü modellenmiştir. Modellenen kalıp elemanlarının ağ örülmüş resmi Şekil 3.4'de verilmiştir.

#### **3.4.2. Eleman Tipinin Tanımlanması**

IGES formatında, ANSYS/LS-Dyna programına aktarılan yüzey modelinin element tipi belirlenmiştir. Element tipi olarak THIN SHELL 163 tanımlanmış olup kendi içindeki eleman formülü olarak da Belytschko-Wong formülasyonu seçilmiştir [61].

#### **3.4.3. Malzeme Modelinin Tanımlanması**

ANSYS/LS-Dyna programında oluşturulan modelin çözümlenmesinde en önemli unsur geometrilere uygun malzeme özelliklerinin tanımlanması ve girilmesi. ANSYS/LS-Dyna programında her türlü malzeme modeline uygun malzeme özellikleri bulunmakta ve bünyesinde olmayan malzeme özellikleri de dışarıdan elle girilerek yapılarak çözümlenmektedir.

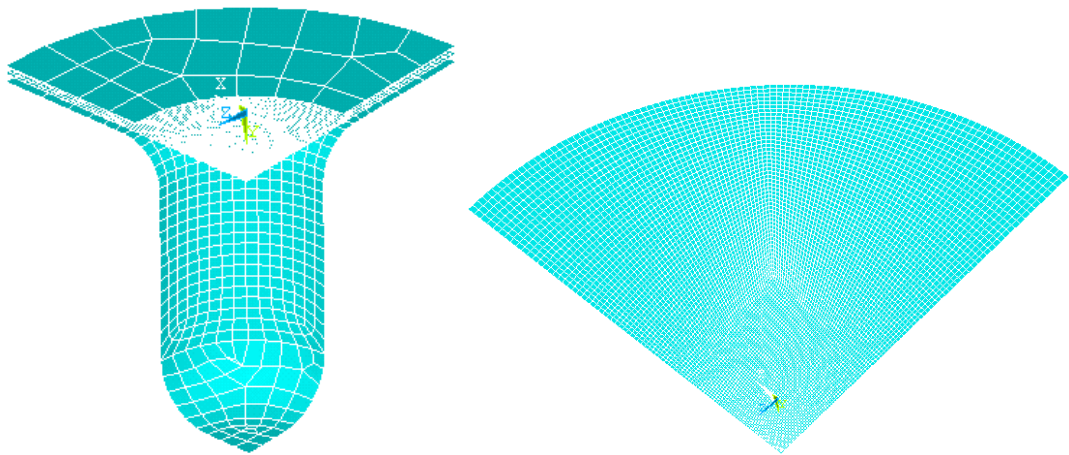
Deneysel çalışmalarda iki farklı alüminyum serisine ait malzeme kullanılmıştır. Teorik analizlerde de bu iki farklı malzeme modeline ait özellikler tanımlanarak aralarındaki farklılıklar kıyaslanmış ve elde edilen sonuçların deneysel çalışmalara uygunluğu araştırılmıştır.

Teorik analizlerde Al 1050 ve Al 5754 sac malzemelerine “Bilinear Kinematic” ve “3 Parameter Barlat Anisotropic” malzeme model tanımlamaları yapılmıştır [61].

Al 1050 ve Al 5754 sac malzemelerindeki deformasyonların incelenmesi için malzeme modeli tanımlaması yapılmıştır. Diğer kalıp elemanları baskı plakası ve kalıp için “Rijid” olarak malzeme tanımı yapılmıştır. Baskı plakasının “Z ve X” yönündeki yer değiştirilmesi sınırlandırılmış olup presin düşey hareketinden dolayı sadece “Y” yönündeki yer değiştirilmesine izin verilirken, tüm yöndeki dönmesi “All rotations” olarak sınırlandırılmıştır. Bu parametreler SolidWorks programında modellenen geometrinin orjin noktasına göre değişim göstermektedir. Kalıp modelde ise yer değiştirmesi “Rijid”, tüm yöndeki dönmeleri de “All rotations” olarak sınırlandırılmıştır. Bu sıralamadan da anlaşılacağı gibi malzeme tanımlaması sac malzeme, baskı plakası ve kalıp olarak sıralanmıştır.

#### 3.4.4. Modelle Ağ Örme

Kalıp elemanları kullanılan element tipi ve malzeme özelliklerine göre sonlu sayıda bölüntülere bölmek ve daha iyi sonuçlar elde etmek için modellere mesh(ağ) örülmüştür. Şekil 3.4’de kalıp elemanlarının ağ örülmüş resimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kalıp elemanları için mesh model.

Analizlerde sac malzemeye ait mesh modelinde sonlu element sayısı diğer kalıp elemanlarına göre daha yüksek belirlenmiştir. Sac malzemede oluşacak olan deformasyonlardan daha iyi sonuç almak adına böyle bir yol izlenmiştir. Programda sac malzeme için bölüntüler 100 mm, bölüntü oranını ise 0.2'ye göre, baskı plakası ve kalıp için mesh model örme ise serbest olarak yapılmıştır. Çizelge 3.5'de kalıp elemanlarına ait iki farklı malzeme için düğüm nokta sayıları verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kalıp elemanlarının sonlu element sayısı.

	Sonlu element sayısı	
	Al 5754	Al 1050
<b>Sac</b>	7500	7500
<b>Kalıp</b>	445	492
<b>Baskı plakası</b>	26	30

#### 3.4.5. Kontak (Sürtünme) Modelinin Tanımlanması

ANSYS/Ls-Dyna'da analizlerde modeller arası kontak tanımlamasının yapılması çok önemlidir. Parçalar arası zamana bağlı analizlerde parçaların birbirleriyle olan temaslarındaki sonuçları gözlemlemek kontak modelleme ile sağlanır. Çalışmada parçalar arası kontak tanımlanırken SURFACE TO SURFACE kontak modeli seçilirken, kontak grubu da FORMING (FSTS) seçilmiştir. Kontakları sağlama almak adına analizin tamamına SINGLE SURFACE ve kontak grubunu da AUTOMATIC (ASSC) genel olarak seçilmiştir [61]. Parçalar arası kontak sayesinde meydana gelebilecek olan deformasyonlar ve davranışlar otomatik olarak hesap edilecektir.

Kontak tanımlamasında kontak ve hedef olmak üzere seçimler model üzerinde yapılmıştır. Çalışmamızda;

- Sac- Kalıp
- Sac- Baskı plakası olarak kontaklar tanımlanmıştır.

Sistemde sac ve baskı plakası presin ařađı yukarı hareketinden dolayı dűşey merkezli olarak hareketli sečilmiřlerdir. Kalıp ise herhangi bir deformasyonla karřılařmayacađı için sabit tutulmuřtur.

Sistem sıvı basınçla şekillendirme olduğu için sac malzemenin yüzeyi element olarak sečilmiř ve akışkanın basıncı sac malzemeye atanmıştır. Bu sayede sisteme verilecek olan akışkanın basıncıyla birlikte meydana gelecek olan ve buna karşılık baskı plakasına da verilecek olan kuvvetin etkisiyle sac malzemedede şekillendirilme gerçekeşecektir.



## BÖLÜM 4

### DENEYSEL VE TEORİK BULGULAR

Bu bölümde, farklı çaplarda Al 5754 ve Al 1050 sac malzemeleri için şekillendirme deneylerinin sonuçları verilmiştir. Bilgisayar ortamındaki simülasyon sonuçlarında meydana gelen deformasyonlar ve şekil değişimleri incelenmiştir. Deneysel ve teorik olarak et kalınlıkları karşılaştırılmış ve şekillendirme sınır diyagramları çıkarılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp elemanları C1040 malzemesinden olup, Karabük ÖZGÜR MAKİNA firmasının bünyesinde bulunan CNC tezgahında işlenmiştir. Karabük Üniversitesi/ Talaşlı İmalat atölyesinde bulunan 30 tonluk HİDROLİKSAN marka prese bağlanarak şekillendirme ünitesi kurulmuştur. Deneysel çalışmalara 104 mm çapında Al 5754 ve Al 1050 sac malzemelerinin hidro şekillendirme yöntemi ile şekillenebilirliği incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla da deneysel çalışmalara başlanmıştır. Her iki malzeme için pot baskısı kuvveti ve sıvı basıncının şekillendirme üzerindeki etkisi, şekillendirme derinliğine ve sacdaki kalınlık değişimine bağlı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalara pot baskı kuvvetini 1'er MPa arttırarak devam edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların neticesinde 104 mm çapındaki Al 5754 ve Al 1050 sac malzemelerinin yetersiz şekillendiği, taslak malzemenin büyüklüğü nedeniyle çekme derinliklerinin yeterli olmadığı kanısına varılmıştır. Çünkü taslak malzeme şeklinin ve büyüklüğünün şekillendirme işlemi üzerinde büyük bir etkisi vardır. Taslak malzeme büyüklüğünün aşılması halinde, malzemedeki oluşan buruşma ve gerilme nedeniyle akışkanın altında tam bir akma meydana gelmemektedir [62]. Bu sorunu gidermek veya daha aza indirebilmek amacıyla taslak malzeme çapının 104 mm'den 68 mm'ye düşürülmüştür. Teorik ve deneysel çalışmalarda bulunan pot baskısı kuvveti ve sıvı basınçlarıyla 68 mm çapa ait Al 5754 ve Al 1050 saclarının küçük çapta şekillendirilmesi yoluna gidilmiştir.

Sacın ilk çapı ile dişi kalıp çapı arasındaki oran büyüdükçe sacı plastik deformasyona uğratabilecek kuvvet büyümektedir. Kuvvetin artması derin çekme esnasında oluşan gerilmelerin büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle derin çekme esnasında oluşan bu büyük gerilmelere mukavemet gösteremeyen iş parçasında yırtılmalar meydana gelmekte ve derin çekme işlemi başarısızlıkla sonuçlanmaktadır.

Derin çekme işlemlerinde optimum taslak malzeme kullanılması sadece malzeme tasarrufuna ve maliyetlerin düşürülmesine sebep olmaz, aynı zamanda biçim hatası buruşma, yırtılma gibi kusurların oluşumlarını da azaltır. Ancak; malzeme deformasyon davranışlarının karmaşıklığı nedeniyle optimum taslak malzeme şekli belirleyip tıraşlama (düzeltme) işlemi gerektirmeyen parça üretmek kolay değildir. Optimum taslak malzeme şekli belirlense bile, kesim ve yerleştirme hataları söz konusu kabın üretimini zorlaştırır. Özellikle az sayıdaki üretim periyodu dikkate alındığında, daha kısa zamanda ve daha kolay hazırlanabilen diğer taslak malzeme biçimleri de kullanılmaktadır [62].

Bu bölümde öncelikle 104 mm ve 68 mm çapa ait Al 5754 ve Al 1050 sac malzemelerinin hidro şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesi anlatılmıştır. Deneysel ve teorik çalışmaların sonucunda oluşan çekme derinlikleri, kalınlık değişimleri ve ŞSD oluşturulmuş ve incelenmiştir. Son olarak 104 mm ve 68 mm çaplara ait sac malzemelerinin çekme derinlikleri, kalınlık değişimleri karşılaştırılması yapılmıştır.

#### **4.1. ÇAP 104 mm HİDRO ŞEKİLLENDİRME**

Kurulan hidro şekillendirme sisteminde 0,5 mm kalınlığındaki Al 5754 ve 0,6 mm kalınlığındaki Al 1050 sac malzemesinin hidro şekillendirme yöntemiyle şekillendirilme deneyleri yapılmıştır. Şekillendirme işleminde 1 MPA artışlarla en uygun pot baskısı kuvveti ve çekme derinliği parametreleri baz alınmıştır.

#### 4.1.1. Al 5754

Teorik modelin çözümlenmesinden elde edilen pot baskı kuvveti ve sıvı basıncı kuvvetinin değerleri deneysel çalışmaların yapılmasında temel alınmıştır. Farklı basınçlar altında deneysel çalışmalar yapılarak sac malzemenin dişi kalıbın şekli almaya zorlanmıştır. Deneysel çalışmalarda pot baskısı değişken tutulmuş olup 1 MPa artışlarla deneylere devam edilmiştir.

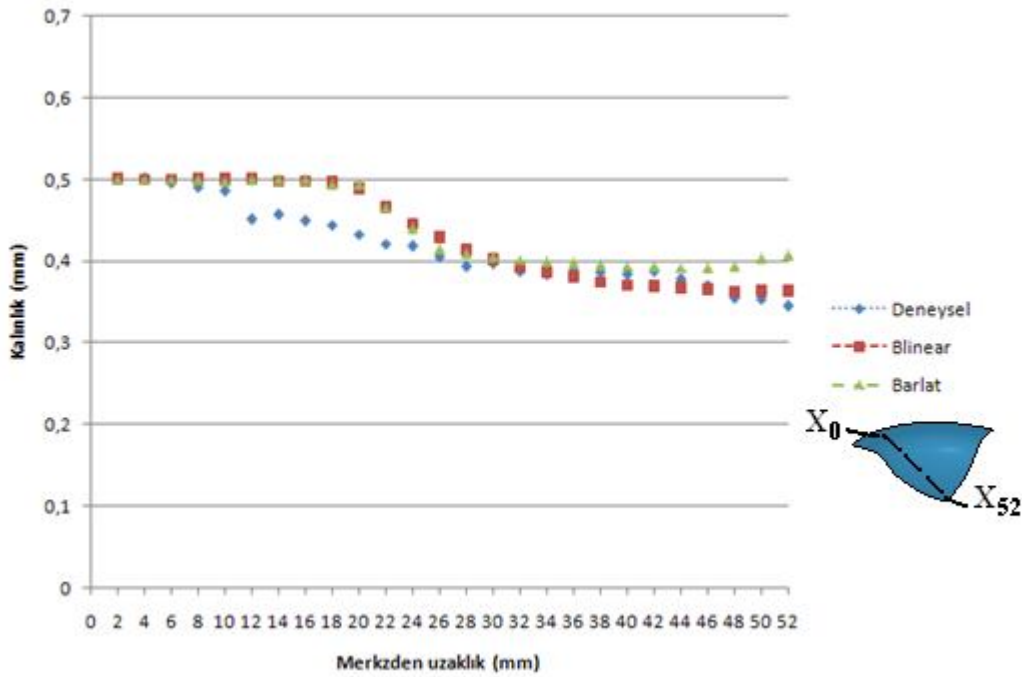
Yapılan deneylerde 0,5 mm kalınlığında Al 5754 sac malzemesi için pot baskı kuvveti 8 MPa, sıvı basıncı 7,5 MPa olarak bulunmuştur. Şekillendirme sonrasında elde edilen pot baskısı, çekme derinlikleri, uygulanan pompa sıvı basıncı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Al 5754 hidrolik şekillendirmede kullanılan parametreler.

Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
1	0	10	6
2	1	10	6
3	1	13	7,5
4	2	13	7,5
5	3	11	6
6	4	10	6
7	5	10	6
8	6	10,5	6
9	7	11	6
10	8	10	7
11	8	13,5	7,5
12	10	11	6
13	13	12,5	6

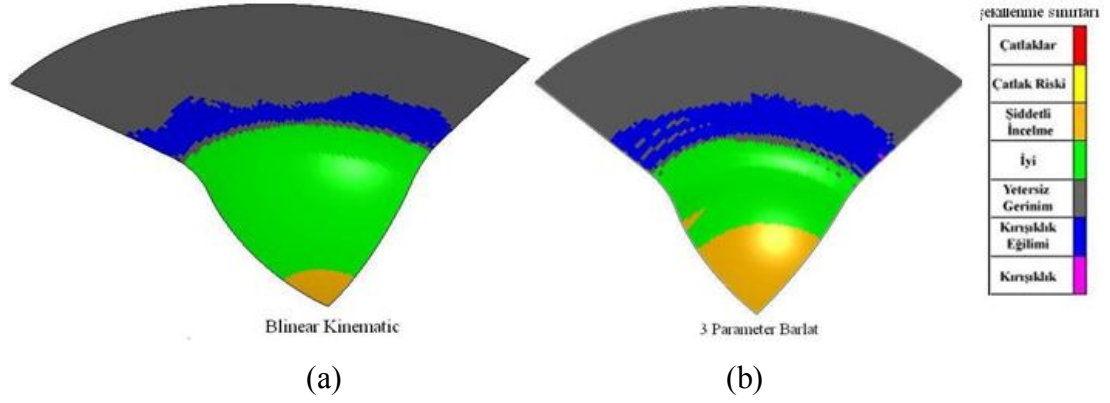
0,5 mm kalınlığındaki Al 5754 sac malzemesinin kalınlık değişimi grafiği incelendiğinde Bilinear ve Barlat malzeme modellerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Barlat ve Bilinear malzeme modelinde  $X_0$ - $X_{20}$  noktaları arasında kalınlıkta değişimin olmadığı görülmektedir. Deneysel malzemenin et kalınlığı değişimi incelendiğinde  $X_{10}$ - $X_{28}$  noktaları arasında kalınlıkta iniş çıkışlar görülmüştür. Merkeze doğru kalınlık Bilinear malzeme modeli ile uyum içerisinde değiştiği görülmektedir. Kalınlık değişimleri dikkate alınarak teorik ve deneysel

sonuçlar karşılaştırıldığında ise %85 lere varan bir uyum gözüktüğü, oluşturulan teorik modelin başka çalışmalara referans olacağı anlaşılmaktadır. Teorik sonuçlarla, deneysel sonuçlar arasında meydana gelen farklılığın daha çok ölüm hatalarından ve tanımlanan malzeme modelindeki anizotropi katsayısının literatürden alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.1’de deneysel ve teorik olarak kalınlık değişim grafiği verilmiştir.



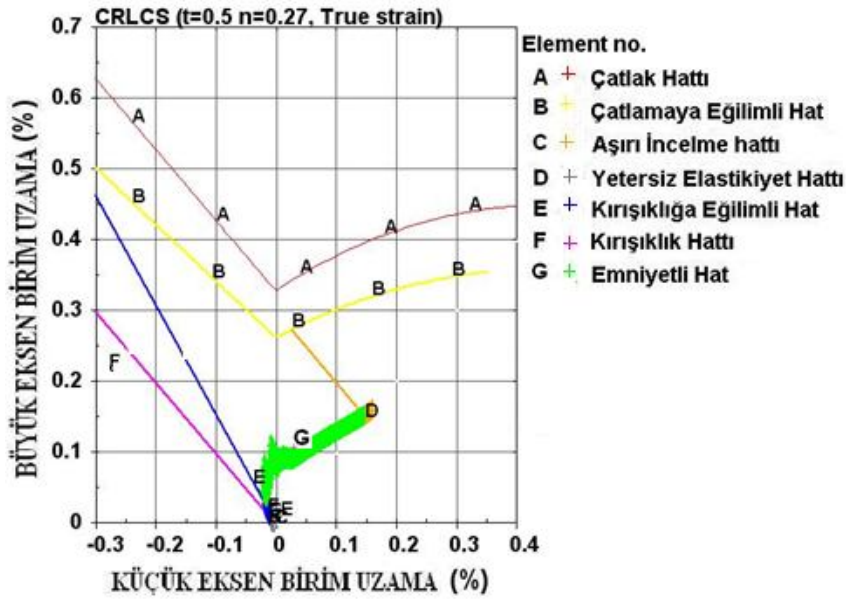
Şekil 4.1. Al 5754 sacın 7,5 MPa akışkan basınc altındaki kalınlık değişim grafiği.

Şekillendirilmiş 104 mm çapındaki Al 5754 sac malzemesinin Lsprepost programındaki simülasyonlar sonucu Şekillenme sınırları incelendiğinde Bilinear, Barlat malzeme modeline göre daha iyi sonuç verdiği ve Şekillenme bölgesinde incelmenin daha az olduğu grlmştir. Şekil 4.2’de Şekillenme sınır değişimi verilmiştir.



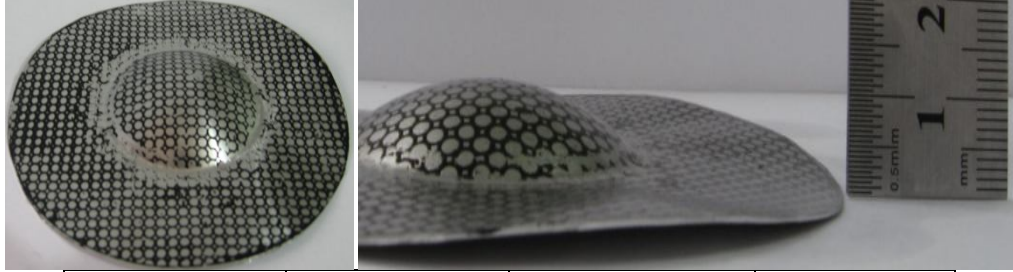
Şekil 4.2. Al 5754 sacın 7,5 MPa akışkan basınçlı şekillenme sınırları değişimi.  
a) Bilinear Kinematic, b) 3 Parameter Barlat.

0,5 mm kalınlığındaki Al 5754 sacın şekillendiğini araştırmak amacıyla teorik modelden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak Şekil 4.3’de Şekillendirme Sınır diyagramı (ŞSD) oluşturulmuştur. ŞSD’nin geneline bakıldığında meydana gelen birim uzamalar emniyetli bölgede oluşmuştur. ŞSD dikkatle incelendiğinde kırışmanın olmadığı ve malzemenin şekillenmesi sonucu incelmenin başladığı görülmektedir. Sacın genelindeki şekillenmede malzemenin çok dengeli olarak uzadığı ve dolayısıyla da yırtılmaların aynı oranda geciktirildiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.3’deki sonuçlardan da anlaşılacağı gibi sacların herhangi bir bölgesinde kalınlıkta aşırı bir incelme olmadığı anlaşılmaktadır.

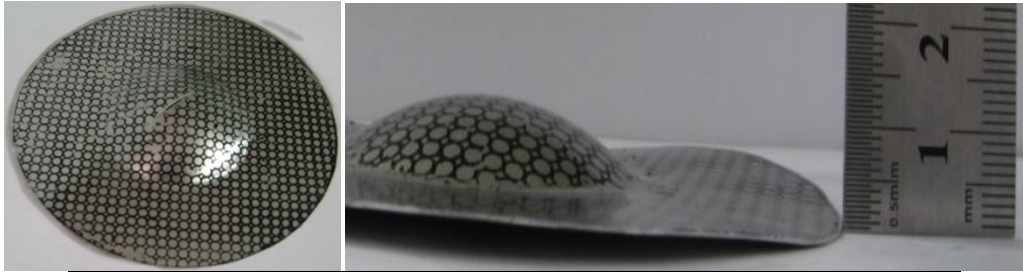


Şekil 4.3. Al 5754 serisi 0,5 mm kalınlığındaki sac malzemesi için Ş.S.D.

Değişik basınçlarda yapılmış deneyler neticesinde elde edilen Al 5754 sacın deneysel sonuçlarından şekillenmiş numunelerin resmi Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
11	8	13,5	7,5



Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
13	13	12,5	6

Şekil 4.4. Değişik basınçlarda yapılmış Al 5754 sac deneysel sonuçları.

#### 4.1.2. Al 1050

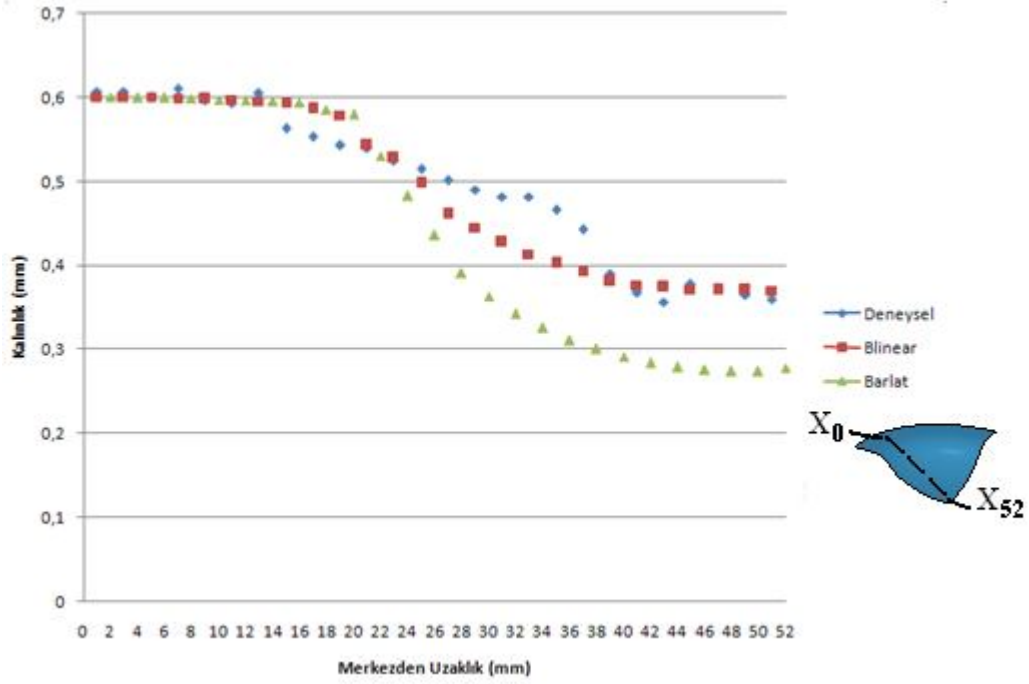
Teorik modelin çözümlenmesinden elde edilen pot baskı kuvveti ve sıvı basıncı kuvvetinin değerleri deneysel çalışmaların yapılmasında temel alınmıştır. Farklı basınçlar altında deneysel çalışmalar yapılarak sac malzemenin dişi kalıbın şekli almaya zorlanmıştır. Deneysel çalışmalarda pot baskısı değişken tutulmuş olup 1 MPa artışlarla deneylere devam edilmiştir.

Yapılan deneylerde 0,6 mm kalınlığında Al 1050 sac malzemesi için pot baskı kuvveti sabit 4 MPa, sıvı basıncı 4 MPa olarak bulunmuştur. Şekillendirme sonrasında elde edilen pot baskısı, çekme derinlikleri, uygulanan pompa sıvı basıncı Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Al 1050 hidrolik şekillendirmede kullanılan parametreler.

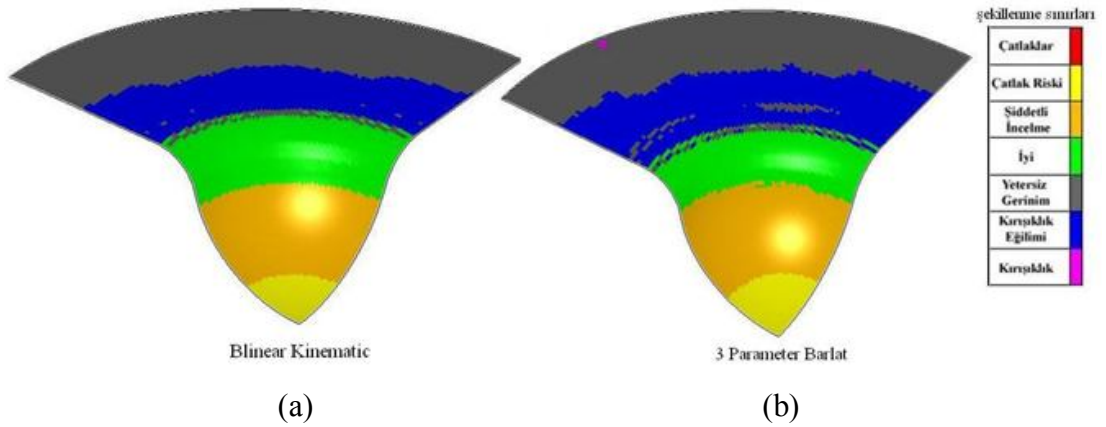
Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
1	0	8	4
2	1	16,5	5
3	1	13,5	4
4	2	14,5	4
5	3	15	4
6	4	15,5	5
7	4	16	4
8	5	14	4
9	6	13	4
10	7	13,3	4
11	8	14,3	4
12	9	15,2	5
13	6,5	14,5	5

0,6 mm kalınlığındaki Al 1050 sac malzemesinin kalınlık değişimi grafiği incelendiğinde Blinear ve Barlat malzeme modellerinin  $X_0$ - $X_{18}$  noktaları arasında kalınlıkta değişimin olmadığı görülmektedir. Deneysel malzemenin et kalınlık değişimi incelendiğinde  $X_{12}$ - $X_{46}$  noktaları arasında kalınlıkta iniş çıkışlar görülmüştür. Merkeze doğru kalınlık  $X_{40}$ - $X_{52}$  arasında Blinear malzeme modeli ile uyum içinde değiştiği görülmektedir. Kalınlık değişimleri dikkate alınarak teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ise %65 lere varan bir uyum gözüküğü, oluşturulan teorik modelin başka çalışmalara referans olacağı anlaşılmaktadır. Teorik sonuçlarla, deneysel sonuçlar arasında meydana gelen farklılığın daha çok ölçüm hatalarından ve tanımlanan malzeme modelindeki anizotropi katsayısının literatürden alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.5’de deneysel ve teorik olarak kalınlık değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 4.5. Al 1050 sacın 4 MPa akışkan basınç altındaki kalınlık değişim grafiği.

Şekillendirilmiş 104 mm çapındaki Al 1050 sac malzemesinin Lsprepost programında simülasyonlar sonucu şekillenme sınırları incelendiğinde Bilinear ve Barlat malzeme modelinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Şekil 4.6'da şekillenme sınır değişimi verilmiştir.

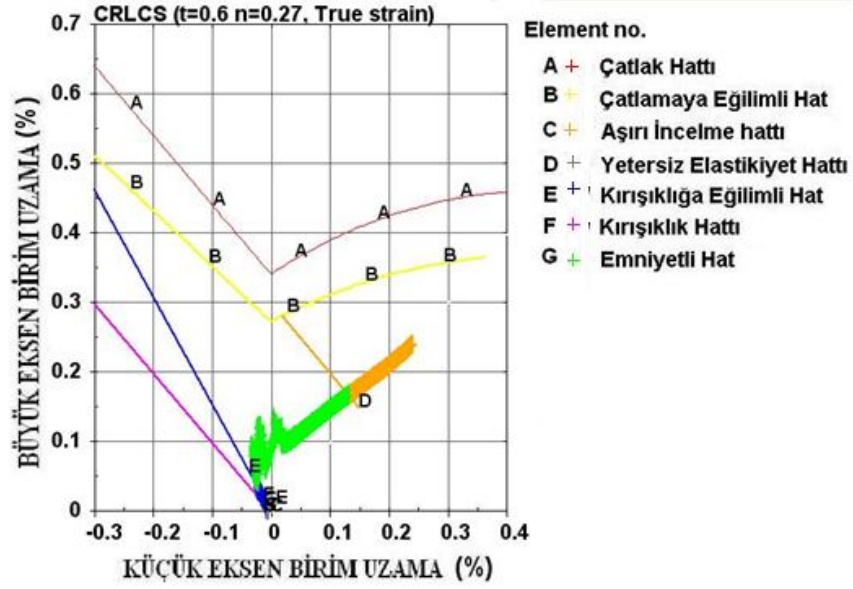


Şekil 4.6. Al 1050 sacın 4 MPa akışkan basınçlı şekillenme sınır değişimi.  
a) Bilinear Kinematic, b) 3 Parameter Barlat.

Al 1050 sacın şekillendiğini araştırmak amacıyla teorik modelden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak Şekil 4.7'de Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)

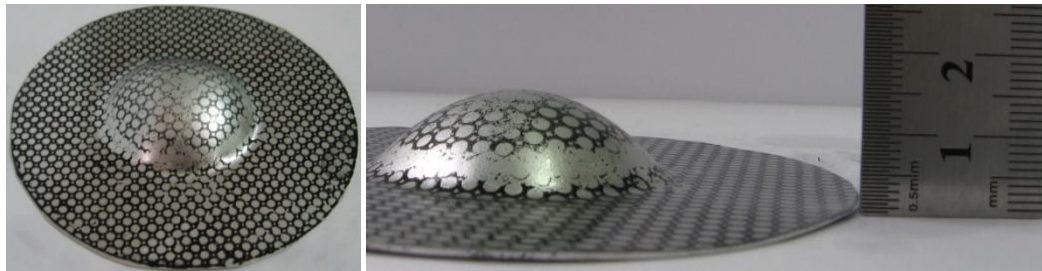


oluşturulmuştur. Şekillendirme sınır diyagramında Al 1050 sacın 4 MPa akışkan basıncında maksimum çekme derinliğine ulaştığı, şekillenme sonunda aşırı incelmelerin görüldüğü tespit edilmiştir.



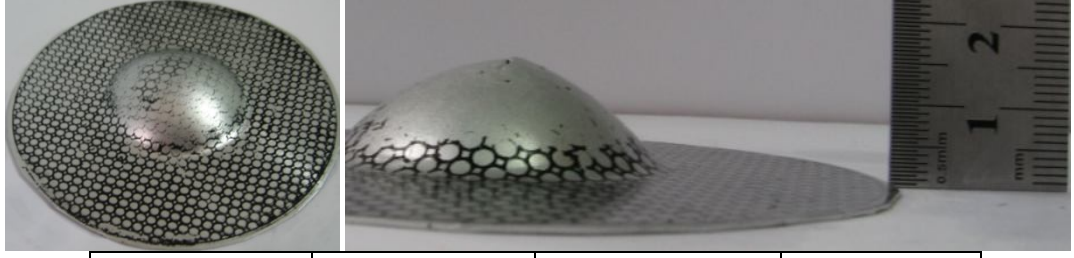
Şekil 4.7. 0,6 mm'lik Al 1050 sac malzemesi için Ş.S.D.

Değişik basınçlarda yapılmış deneyler neticesinde elde edilen Al 1050 sacın deneysel sonuçlarından şekillenmiş numunelerin resmi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
7	4	16	4

Şekil 4.8. Değişik basınçlarda yapılmış Al 1050 sac deneysel sonuçlar.



Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
9	6	13	4

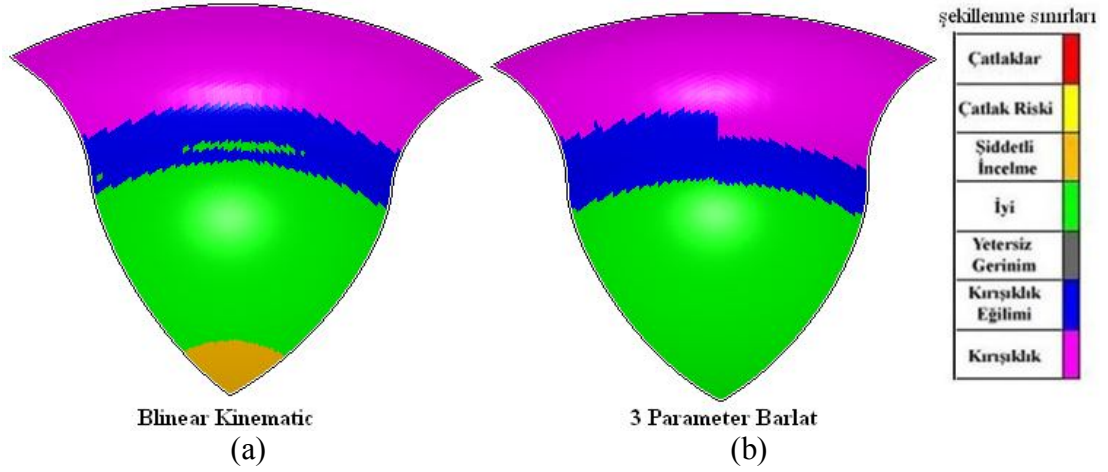
Şekil 4.8. (devam ediyor).

## 4.2. ÇAP 68 mm HİDRO ŞEKİLLENDİRME

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu çap 104 mm'lik alüminyum sacların şekillendirilmesinde taslak malzemenin çapı ile dişi kalıp arasındaki oranın büyük olması ve kalıpta meydana gelen sürtünme, malzemenin kalıp içerisinde akmasını engelleyen bir sebeptir. Bu sebeplerden dolayı taslak malzeme çapı 68 mm'ye düşürülerek hidrostatik basınçla küçük çapta şekillendirilmesine ait deneysel çalışmalar yapılmıştır. Optimum sıvı basıncı ve pot baskı kuvvetleri bulunan alüminyum sacların teorik analizleri iki malzeme modeli için yapılmış olup Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD) çıkarılmıştır. 0,5 mm Al 5754 ve 0,6 mm Al 1050 saclarının küçük çaptaki şekillendirilme sonrası kalınlık karşılaştırılması yapılmıştır.

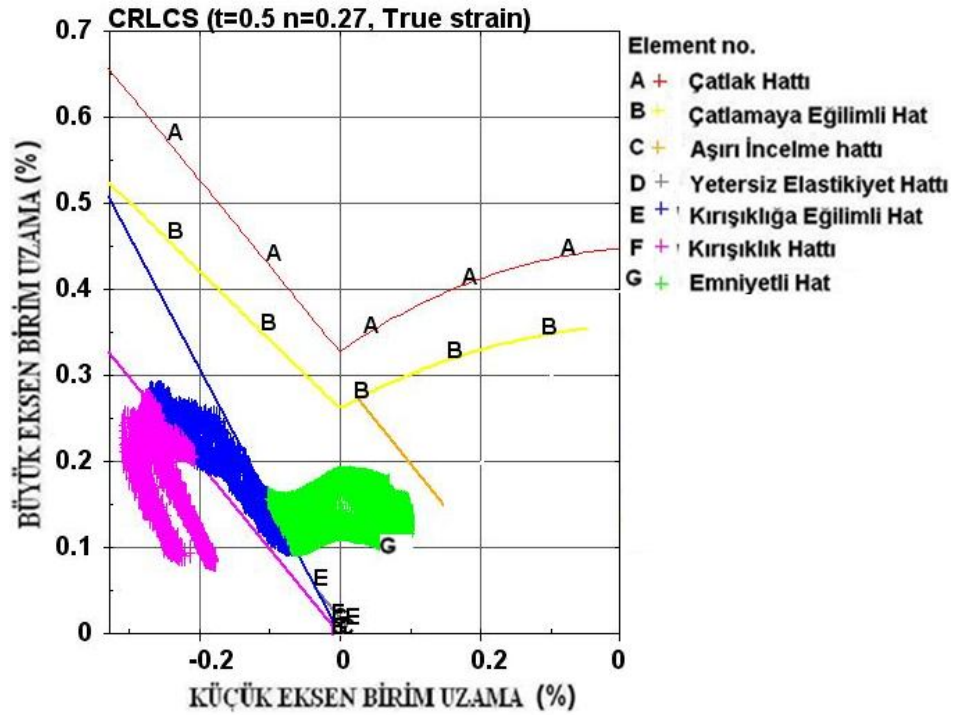
### 4.2.1. Al 5754

68 mm çapındaki Al 5754 sacının küçük çapta şekillendirilmesinin teorik olarak iki malzeme modeline ait şekillenme sınırları değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Lsprepost programındaki simülasyonlar sonucu 3 Parametre Barlat'ın Bilinear Kinematic'e göre şekillenme sınırı incelendiğinde malzeme tepe noktasında incelmeye görülmediği için daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Çekme derinliği 20,98 mm olarak elde edilmiştir.



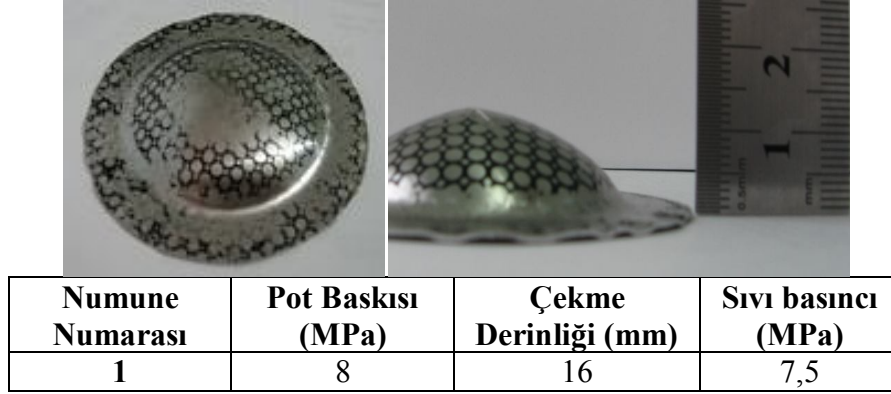
Şekil 4.9. Küçük çapta şekillendirilmiş Al 5754 şekillenme sınırları değişimi.  
a) Bilinear Kinematic, b) 3 Paramter Barlat.

Teorik modelden Al 5754 sacın şekillendiğini incelemek amacıyla teorik modelden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak için Şekil 4.10'da Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) oluşturulmuştur. Şekillendirme sınır diyagramı incelendiğinde flanşlarda ve yan duvarlarda kırışıklık ve kırışıklığa eğimli bölge oluştuğu, şekillenmenin emniyetli bölgede gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.10. Küçük çaplı Al 5754 sacının Ş.S.D.

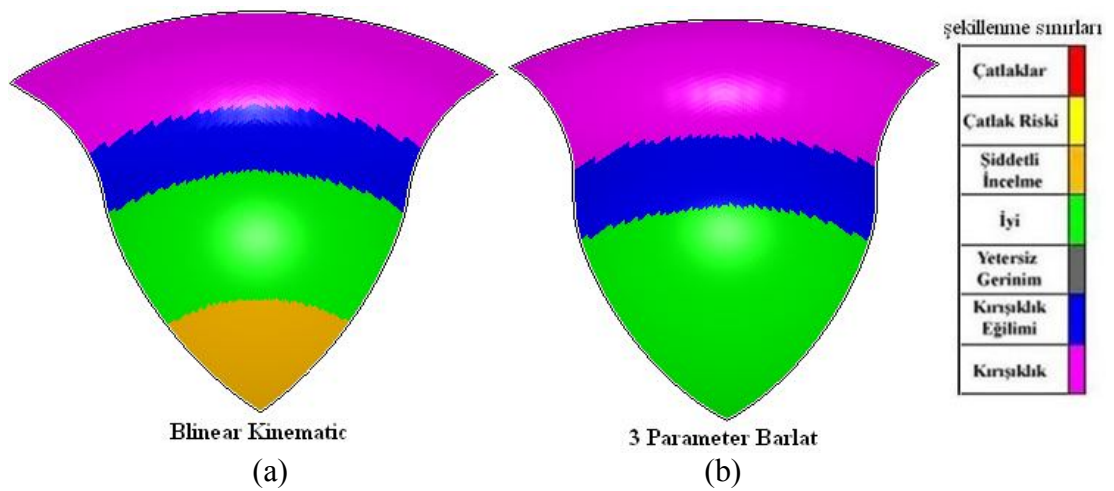
Küçük çapta şekillendirilmiş Al 5754 sacının deneysel şekillendirme sonucu Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Küçük çaplı Al 5754 sacının deneysel sonucu.

#### 4.2.2. Al 1050

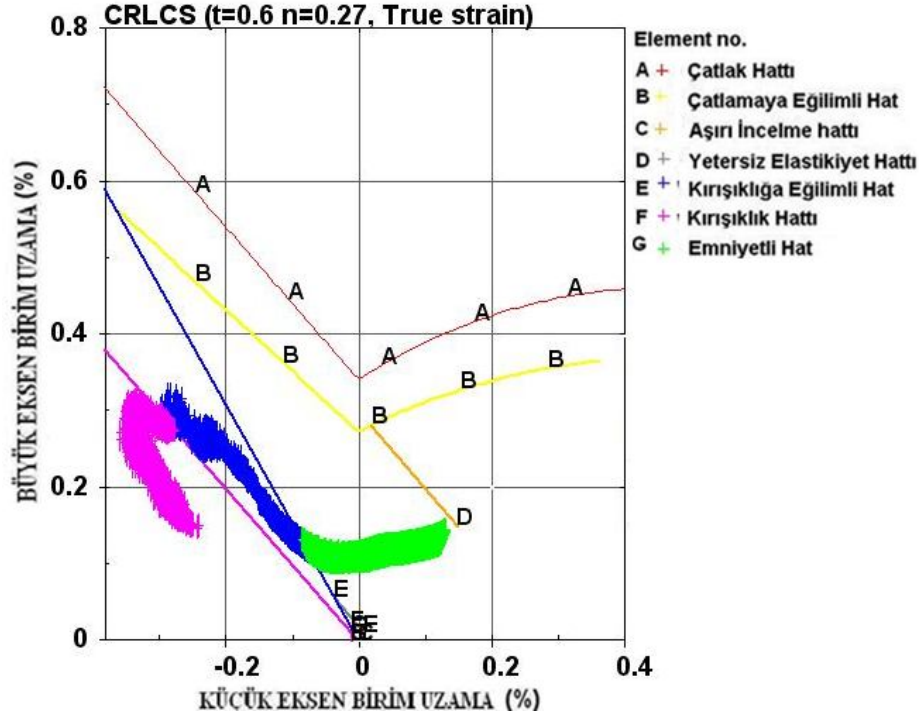
Al 1050 sacının küçük çap şekillendirilmesi teorik olarak iki malzeme modeline ait şekillenme sınırları Şekil 4.12’de verilmiştir. Lsprepost programındaki nümerik simülasyonlar sonucu malzeme modelleri incelendiğinde 3 Parametre Barlat’ın Bilinear Kinematic’e göre şekillenme sınırı daha iyi sonuç vermiştir. Çekme derinliği 23,45 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Küçük çap şekillendirilmiş Al 1050 çekme derinliği değişimi.

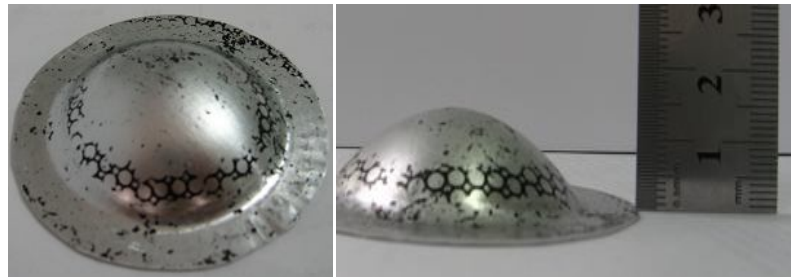
a) Bilinear Kinematic, b) 3 Parametre Barlat.

Teorik modelden Al 1050 sacın şekillendiğini incelemek için Şekil 4.13'de Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) oluşturulmuştur. Şekillendirme sınır diyagramı incelendiğinde flanş ve yan duvarlarda kırışıklık ve kırışıklığa eğimli bölge oluşmuş olup emniyetli bölgede şekillenme gerçekleşmiştir.



Şekil 4.13. Küçük çaplı Al 1050 sacının Ş.S.D.

Küçük çapta şekillendirilmiş Al 1050 sacının deneysel şekillendirme sonucu Şekil 4.14'de verilmiştir.

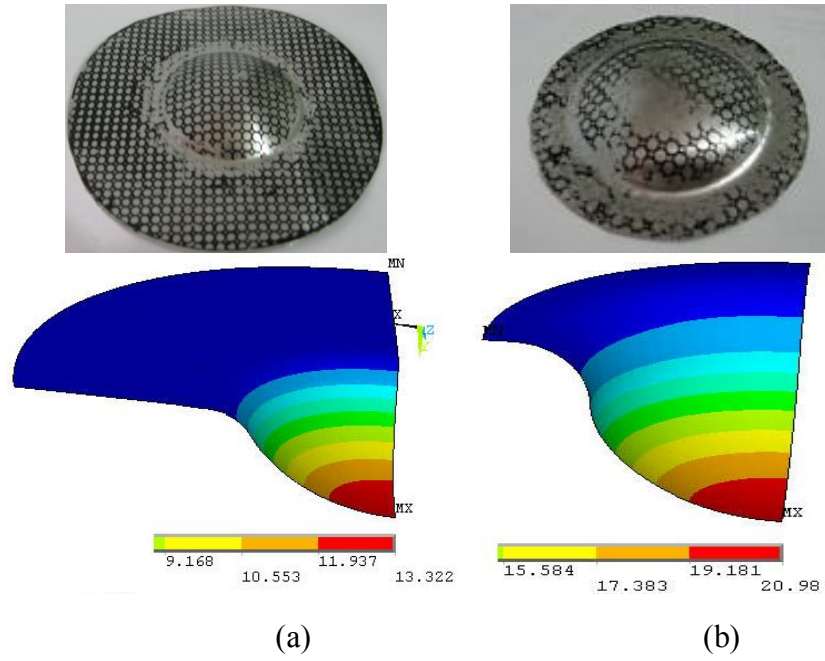


Numune Numarası	Pot Baskısı (MPa)	Çekme Derinliği (mm)	Sıvı basıncı (MPa)
1	4	19	4

Şekil 4.14. Küçük çaplı Al 1050 sacının deneysel sonucu.

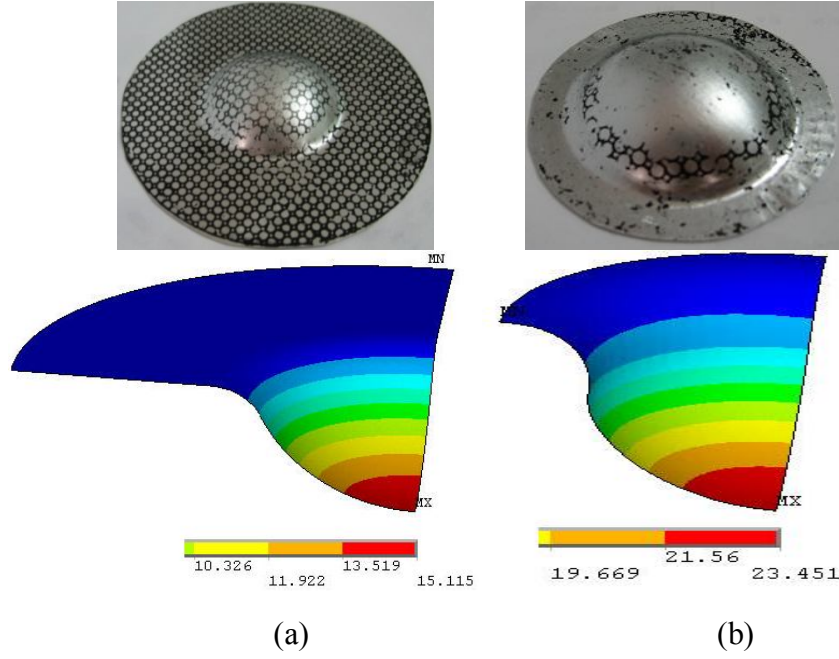
### 4.3. ÇAP 104 mm ve ÇAP 68 mm ŞEKİLLENDİRME KARŞILAŞTIRILMASI

Deneysel çalışmalar sonucu 104 mm çapında Al 5754 ve Al 1050 sac malzemesi ile 68 mm çapında Al 5754 ve Al 1050 sac malzemesi şekillenebilirlik açısından kıyaslanmıştır. 68 mm çapındaki sac malzemelerin taslak malzeme büyüklüğü nedeni ile şekillendirilmeye olumlu yönde etki ettiği gözlenmiştir. Bu hem deneysel çalışmalardaki çekme derinliğinden hem de teorik modelin nümerik simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir (Şekil 4.15 - Şekil 4.16).



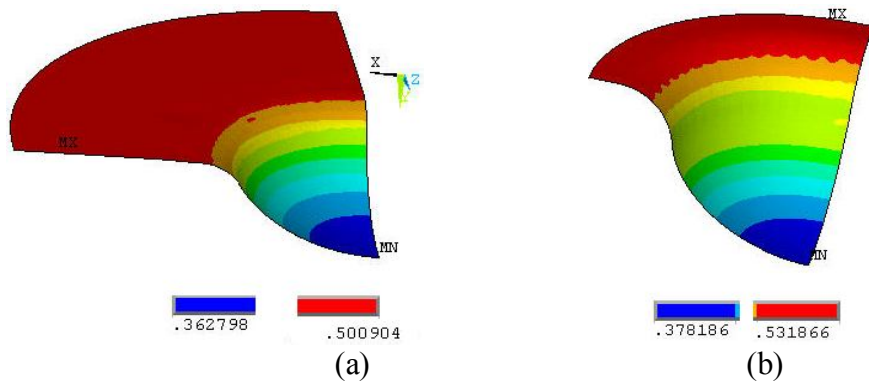
Şekil 4.15. Al 5754 çekme derinliği. a) 104 mm çap, b) 68 mm çap.



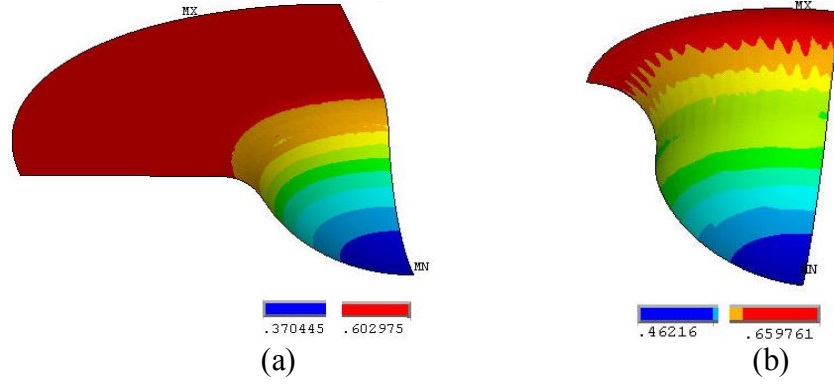


Şekil 4.16. Al 1050 çekme derinliği. a) 104 mm çap, b) 68 mm çap.

Teorik analiz sonuçlarından alüminyum malzemeye ait kalınlık değişimleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir. Kalınlık değişimi incelendiğinde 104 mm çapındaki Al 5754 sac malzemesinde deneysel ve teorik sonuçlarında düzenli bir değişim görülmüştür. Al 1050 sac malzemesinde ise kalınlıkta deneysel olarak iniş çıkışlar gözlemlenirken teorik sonuçlarda düzenli olarak değişimler olmuştur. 104 mm çapında Al 5754 ve Al 1050 sac malzemesinde Bilinear Kinematic malzeme modelinin şekillendirilmesi olumlu sonuçlar vermiştir. Taslak malzemesinin şekli ve büyüklüğünün şekillendirilmeye olan etkisi ile 68 mm çapındaki Al 5754 ve Al 1050 sac malzemesinin kalınlık değişiminde düzenli olarak sac kalınlığı değişmiştir.

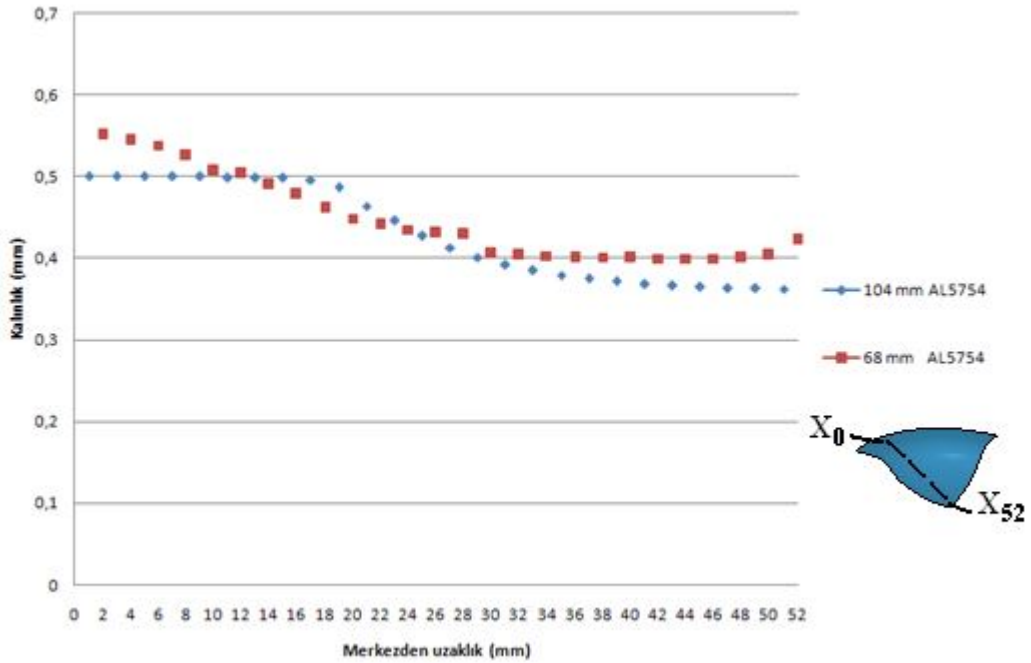


Şekil 4.17. Al 5754 teorik kalınlık değişimi. a) 104 mm çap, b) 68 mm çap.



Şekil 4.18. Al 1050 teorik kalınlık değişimi. a) 104 mm çap, b) 68 mm ap.

Şekillendirme sonu 104 mm ve 68 mm çapındaki Al 5754 ve Al 1050 sac malzemelerinin kalınlık değişim grafikleri çıkarılmış ve incelenmiştir (Şekil 4.19). Grafiklerden de anlaşıldığı gibi 68 mm çapındaki Al 5754 sac malzemesinin flanş bölgesinde  $X_0$ - $X_{10}$  arasında yığılmalardan dolayı kalınlıkta artış oluşmuştur. 104 mm sac malzemesinde  $X_0$ - $X_{14}$  arasında kalınlıkta değişim olmamış merkeze yaklaşıkça kalınlık değişimi düzenli bir Şekilde azalma göstermiştir.

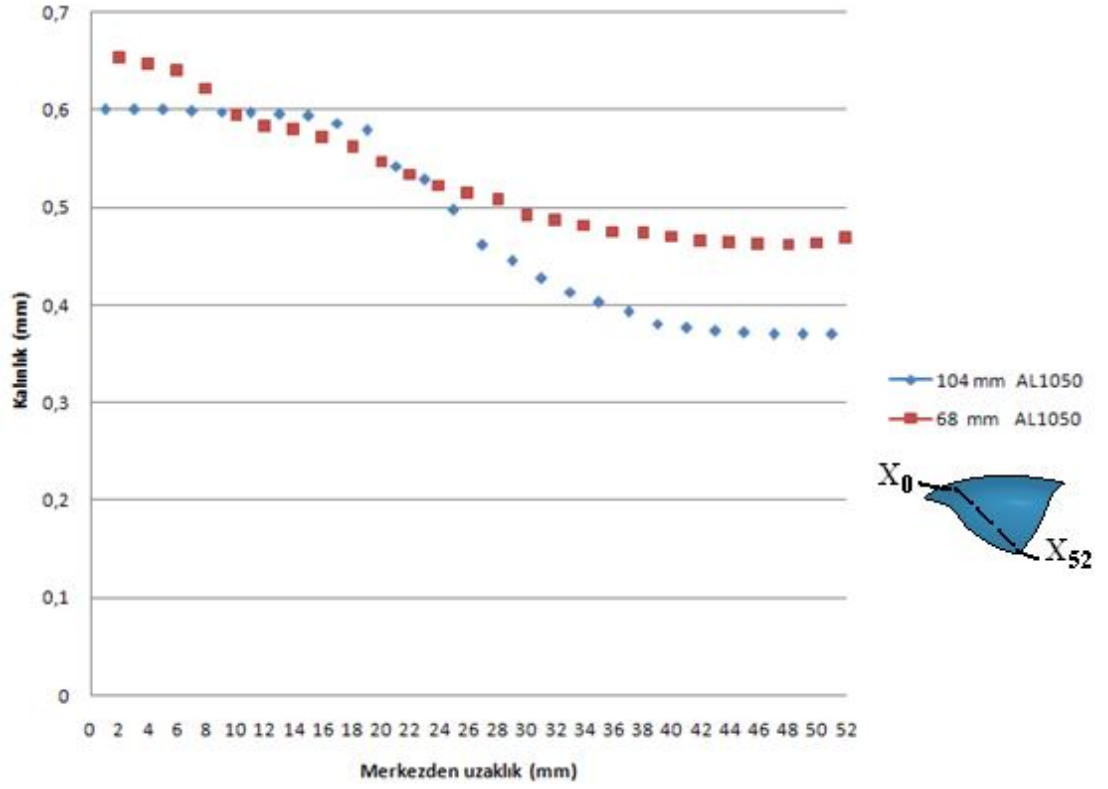


Şekil 4.19. Al 5754 sac malzemesinin 104 mm ve 68 mm kalınlık değişim grafiği.

68 mm çapındaki Al 1050 sac malzemesinin  $X_0$ - $X_{10}$  arasında yığılmalar sonucu kalınlık artışı flanş bölgesinde grlmştir. 104 mm çapındaki Al 1050 sacının  $X_0$ -



X<sub>16</sub> arasında kalınlıkta değişim görölmezken merkeze yaklaştıkça malzemeler arasında farklar oluşmaktadır. (Şekil 4.20). 68 mm çapındaki Al 5754 ve Al 1050 saclarının kalınlık değişimi oranı 104 mm çapa göre daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 4.20. Al 1050 sac malzemesinin 104 mm ve 68 mm kalınlık değişim grafiği.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada geleneksel derin çekme yöntemindeki zımbanın yerini basınçlı akışkan aldırılarak şekillendirme sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar, kapalı sistemde yapılmıştır. Sistemde, şekillendirmenin gerçekleştiği dişi kalıp modüler olarak tasarlanmıştır. Deneysel çalışmalarda 104 mm'den 68 mm'ye düşürülen 0,5 mm'lik Al 5754 ve 0,6 mm'lik Al 1050 saclarının şekillenebilirliği incelenmiştir. Maksimum çekme derinliği, pot baskısı kuvveti, sıvı akışkanın basıncı, şekillenme sonrası malzemedeki kalınlık değişim parametreleri incelenmiş ve şekillenmeye olan etkileri araştırılmıştır.

ANSYS/Ls-Dyna yazılımı kullanarak uygun parametreler bulunmaya çalışılmıştır. Böylece deneysel çalışmaların yapılabilirliği kolaylaştırılmıştır. Teorik modelden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumluluğu karşılaştırılmıştır.

Elde edilen değerlerden ve karşılaştırılmalarından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yapılan sistemde, şekillendirmenin gerçekleştiği dişi kalıp modüler olarak tasarlanmıştır. Bu sayede dişi kalıbın şekli değiştirilerek tek bir kalıp sisteminde farklı geometrilerde şekillendirme gerçekleştirilebilecektir.
- Hidro şekillendirme yöntemi ile çekme deneylerinde 104 mm çapındaki 0,5 mm'lik Al 5754 sacının 1MPa pot baskısı artışında malzemedeki meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir. Deneylerde kullanılan pot baskısı kuvvetlerinden ötürü bazı sac malzemelerde çatlaklar ve kırışmalar meydana gelmiştir ve yağ ile şekillendirilme gerçekleştiği için sızdırmazlığın

sağlanamaması nedeniyle şekillendirmeler sonlandırılmıştır. Uygun sıvı basıncı altında sac malzemenin ince olmasından dolayı deforme etmeden pot baskı kuvveti 8 MPa, sıvı basıncı 7,5 Mpa ve çekme derinliği 13,5 mm olarak şekillendirilebilirliği sağlanmıştır. Yapılan deneyler arasında kulaklanma ve kırılma görülmemiştir.

- Hidro şekillendirme yöntemiyle şekillendirilen 104 mm çapındaki 0,6 mm'lik Al 1050 sacında da uygun sıvı basıncı teorik modele yapılan analizler ve araştırmalar sonucu 4 MPa olarak bulunmuştur. Al 5754 deki gibi farklı pot baskısı kuvvetleri altında deneyler yapılmıştır. Al 5754 e göre 0,1 mm'lik kalınlık farkından dolayı şekillendirilme yükseklikleri daha iyi sonuçlar vermiştir. Uygun sıvı basıncı ile yapılan deneylerde pot baskısından dolayı sac malzemede çatlaklar oluşmuştur. Sızdırmazlık yüzünden, sistemden yağın tahliye olmasından dolayı şekillendirme sonlandırılmıştır. Kulaklanmanın görülmediği ve deformasyonun olmadığı deney numunesi olarak pot baskı kuvveti 4 MPa, sıvı basıncı 4 MPa ve çekme derinliği 16 mm olarak şekillendirebilirliği sağlanmıştır.
- Küçük çap hidro şekillendirme yöntemiyle Al 5754 ve Al 1050 saclarında çapta değişiklik yapılarak şekillendirilebilirliği incelenmiştir. Deneysel ve teorik simülasyonlar sonucu Al 5754 sacının çekme derinliği ve  $\dot{\epsilon}$  de olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar deneyde 16 mm iken teorik simülasyonda 20,98 mm olarak bulunmuştur. Al 1050 küçük çap şekillendirilmesinde çekme derinliği deneyde 19 mm, teorik simülasyonda ise 23,45 mm olarak bulunmuştur.  $\dot{\epsilon}$  de kırışıklık ve kırışıklığa eğimli bölgelerin yanı sıra emniyetli bölgede şekillendirilmeler gerçekleştirilmiştir.
- Teorik analizlerde Bilinear Kinematic ve 3 Parameter Barlat Anisotropic malzeme modelleri kullanılarak yapılan karşılaştırmalarda birbirlerine yakın kalınlık değişimi ve çekme derinlikleri sonuçları verdiği gözlemlenmiştir. Küçük çap şekillendirmede iki malzeme modeli için en iyi sonucu 3 Parameter Barlat vermiştir.

## 5.2. ÖNERİLER

Teorik ve deneysel olarak karşılaştırılması yapılan iki farklı alüminyum malzemenin şekillendirilebilirliğinin araştırılması üzerine olan bu çalışmada kurulan sistemin şekillendirilebilme engeli olmadığı görülmüştür. İleriye dönük yapılacak olan bu şekillendirme yönteminde önceki kurulan sistemlerden yola çıkılarak en önemli sorunun şekillendirme esnasında sızdırmalığın sağlanamamasıydı. Bunu engellemek için kapalı sistemin kurulması yoluna gidilmiş ve başarı sağlanmıştır.

Kurulacak olan sistemlerde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da şekillendirilecek geometrinin geniş bir alana sahip olmasıdır. Yapılan çalışmada 38 mm'lik çap geometrisine sahip olan çekirdeği şekillendirilmesi amaç edinilmiş olup daha iyi sonuçlar elde etmek adına bu parametrenin artırılması ve dikkat edilmesi önerilebilir. Yapılan deneysel çalışmalarda küçük çap şekillendirilmesi ile çekme derinliğinde iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sistemde sıvı basıncı manuel olarak kalıba iletiildiğinden ve baskı plakası kuvvetinin sıvı basıncına karşılık verdiği bu şekillendirilme ünitesi, bilgisayar kontrollü yapılarak sıvı basıncını ve değişken pot baskısı kuvvetinin kontrolü sağlanabilir.

Elde edilmesi istenen maksimum çekme derinliğine erişmek için geniş alanın yanı sıra şekillenecek malzemenin dışarıda ısıtılması veya sistem içerisinde kalıp dahil parçanın ısıtılması yoluna gidilerek çekile birlilik kolaylaştırılabilir.

Kullanılan alüminyum sacın kalınlığı değiştirilerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir ve farklı malzemelerin şekillendirilmesi yoluna gidilebilir.

## KAYNAKLAR

1. McClintock, F.A., "A criterion for ductile fracture by the growth of holes", *Journal of Applied Mechanics*, 35: 363-371 (1968).
2. Rice, J.R. and Tracey, D.M. "On the ductile enlargement of voids on triaxial stress fields", *Journal of Mechanical Physics and Solids*, 17: 201-217 (1969).
3. Clift, S.E., Hartley, P., Sturgess C.E.N., and Rowe, G.W., "Fracture prediction in plastic deformation process", *International Journal of Mechanical Science*, 32 (1): 1-17 (1990).
4. Hartley, P., Pillinger, I. and Sturgess, C., "Numerical modeling of material deformation processes research development and applications", *Springer-Verlag*, (1992).
5. Youssef, Y. and Denault, J., "Thermoformed glass fiber reinforced polypropylene: micro structure, mechanical properties and residual stresses", *Polymer Composites*, 19 (3): 301-309 (1998).
6. Yossifon, S. and Tirosh, J., "On the permissible fluid-pressure path in hydroforming deep drawing processes - analysis of failures and experiments", *Journal of Engineering for Industry*, 110: 146-152 (1988).
7. Lo, S.W., Hsu, T.C. and Wilson, W.R.D., "An analysis of the hemispherical-punch hydroforming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 23: 225-239 (1993).
8. Hsu, T.C. and Hsieh, S.J., "Theoretical and experimental analysis of failure for the hemisphere punch hydroforming processes", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 118: 434-438 (1996).
9. Zhang, S.H., Lang, L.H., Kang, D.C., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40: 1479-1492 (2004).
10. Zhang, S.H. and Danckert, J., "Development of hydromechanical deep drawing", *Journal of Materials Processing Tecnogy*, 83: 873-882 (2004).

11. Brunet, M., Boumaiza, S. and Nefussi, G., "Unified failure analysis for tubular hydroforming", *Journal of Processing Technology*, 149: 217-225 (2002).
12. Altan, T. and Jiathearanat, S., "Successful tube hydroforming: Watching parameters, accurately simulating the process yield good results", *The Tube & Pipe Journal*, June 15 (2001).
13. Neugebauer, R., Putz, M., Leihkau, J., B. Schulze, "Effective simulation of hydroforming: Current capabilities and requirements for the future", *The Tube & Pipe Journal*, (2001).
14. Aueulan, Y., Soman, P., Kaya, S., Smith, C. and Atlan, T., "Hydroforming tapered engineered tubes", *The Tube & Pipe Journal*, June 8 (2004).
15. Brunet, M., Mguil, S., Morestin, F., "Analytical and experimental studies of necking in sheet metal forming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 80: 40-46 (2000).
16. Mattiasson, K., "On finite element simulation of sheet metal forming process in industry", *European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMDS 2000)*, Barcelona, 11-14 (2000).
17. Imaninejad, M., Subhash, G., Loukus, A., "Loading path optimization of tube hydroforming process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1504-1514 (1997).
18. Gantar, G., Pepelnjak, T., Kuzman, T., "Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations", *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131: 54-59 (2002).
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)*, 2(2): 201-208 (2008).
20. Hartl. Ch., "Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 383-392 (1979).
21. Lei, L., Hwang, S., Kang, S., "Finite element analysis and design in stainless steel sheet forming and its experimental comparison", *Journal of Materials Processing Technology*, 110: 70-77 (2000).

22. Kim, J., Son, B. M., Kang, B. S., Hwang, S. M., Park, H. J., “Comparison stamping and hydro-mechanical forming process for an automobile fuel tank using finite element method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 550-557 (2004).
23. Merklein, M., Geiger, M., Celeghini, M., “Combined tube and double sheet hydroforming for the manufacturing of complex parts”, *Chair of Manufacturing Technology, Institute of Mechanical Engineering University of Erlangen-Nuremberg*, Germany, (2009).
24. Khandeparkar, T., Liewald, M., “Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries”, *Journal of Materials Processing Technology*, 202: 246–254 (2008).
25. Dachang, K., Yu, C., Yongchao, X., “Hydromechanical deep drawing of superalloy cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 243–246 (2005).
26. Karkoub, M.A., “Prediction of hydroforming characteristics using random neural networks”, *J. Intel. Manuf.*, 17: 321–330 (2006).
27. Thiruvarudchelvan, S., Tan, M.J., “Fluid-pressure-assisted deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192: 8–12 (2007).
28. 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: 300–303 (2007).
29. Karaağaç, İ., Özdemir, A., “Sıvı Basıncı İle Sac Şekillendirme (Sbş) Yönteminin Derin Çekilebilirlik Üzerine Etkilerinin İncelenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, 1-11 (2009).
30. Şahin, S., “Hidrolik Şekillendirme Yönteminin Esasları ve Sınıflandırılması”, *Mühendis ve Makine*, 45 (533): 35-39 (2004).
31. Wang Q., “Hydromechanical deep drawing”, *New Technol. New Process*, 5: 23-24 (1994).
32. M. Zampaloni, N. Abedrabbo, F. Pourboghraat “Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 45: 1815–1848 (2003).

33. Aydın, M., “Metalik sacların hidrolik şekillendirme ile şekillenebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 33-34 (2009).
34. Koçar, O., “Alüminyum 1050 tüplerin şekillendirilmesinin teoriksel ve deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 19-20 (2006).
35. Ağyel, T., “Metalik sacların hidrolik şekillendirme ile şekillenebilirliğinin teorik ve deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-6 (2009).
36. Çelikayar, G., “Yüksek basınç altında metallerin şekillendirilmesi (hidroforming)”, *III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, 4-7 Aralık İzmir, 29-38 (2003).
37. Zhang, S.H., “Developments in hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 91: 236-244 (1999).
38. Singh, H., “Fundamentals of hydroforming, 1st ed.”, *Society of Manufacturing Engineering*, ABD, 1-35 (2008).
39. İnternet: Schuler Hydroforming, [http://www.schulergroup.com/en/30products/60\\_hydroforming/10\\_with\\_pressure\\_from-within/index.php](http://www.schulergroup.com/en/30products/60_hydroforming/10_with_pressure_from-within/index.php) (2008).
40. Erdir, S., “Profilli derin çekmede hata analizi ve alınabilecek önlemler”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 77 (1995).
41. Gündü, T., “Derin çekme saclarında derin çekilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 126 (2000).
42. Alıcı, İ., “Derin çekme saclarının deformasyon davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 125 (2001).
43. Anon, “How to draw round cups deeper, by the ohio state university erc for net shape manufacturing”, [http://www2.thefabricator.com/Articles/stamping\\_Articles/.cfm?ID=542](http://www2.thefabricator.com/Articles/stamping_Articles/.cfm?ID=542) January 15 (2001).

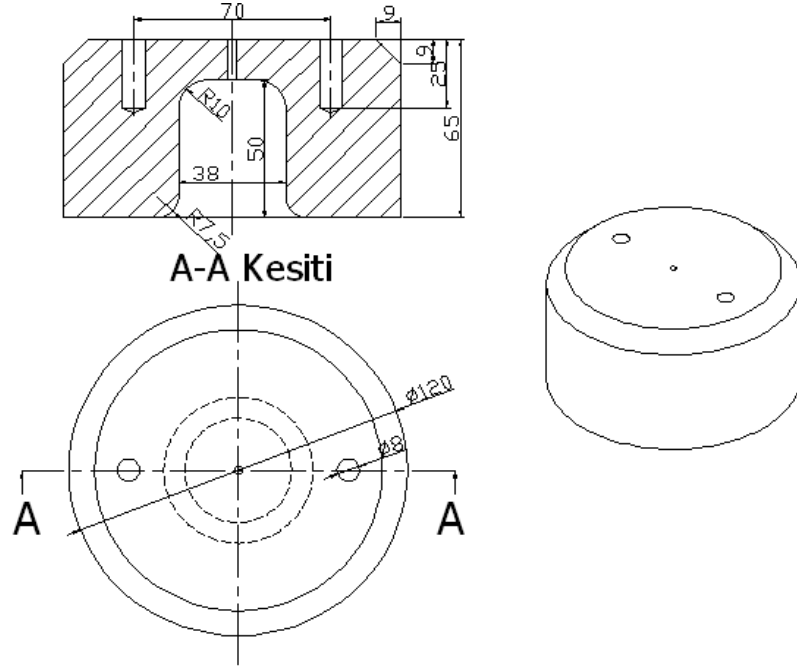


44. Banabic, D., Bunge, H.-J, Pöhlandt, K., Tekkaya, A. E., “Formability of metallic materials”, *Springer-Verlag*: Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, (2000)
45. Lankford, W. I., Snyder, S. C., Bauscher, J. A., “New criteria for predicting the press performance of deep-drawing sheets”, *Trans. ASM.*, 42: 1196-1232 (1950).
46. Weilong, H., Wang, Z.R., “Anisotropic characteristics of material and basic selecting rules with different sheet metal forming processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 127: 374-381 (2002).
47. Hosford, W. F., Caddell, R. M., “Metal forming: mechanics and metallurgy”, *2nd Ed, PTR Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, New Jersey, (1993).
48. Marciniak, Z., Duncan, J.L., Hu, S. J., “Mechanics of sheet metal forming”, *2nd Edition, Butterworth-Heinemann*, Oxford, (2002).
49. Karalı, M., “Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının kontrolünün cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 118 (2005).
50. Etkin, B., “Derin çekme kalıplarının bilgisayar tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 80 (1996).
51. Enser. C., “AA 5754 malzemesinde derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 20-21 (2006).
52. Demiray K., “AL1050 malzemesinin derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 66 (2006).
53. Çapan, L., “Metallere plastik şekil verme”, *Çağlayan Basımevi, IV. Baskı*, İstanbul, 440 (2003).
54. Delikanlı, K., “Soğuk haddelenmiş teknik alüminyum derin çekmesinde tavlama süresi ve sıcaklığın şekillendirilme kabiliyetine etkileri”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya 100 (1992).

55. Alpers, B., Bergmann, D., Galanulis, K. and Winter, D., “Advanced deformation measurement in sheet metal forming”, *GOM, Gesselschaft für Optisch Meßtechnik*, Germany, (2000).
56. Uzun, İ. ve Erişkin, Y., “Sac metal kalıpcılığı”, *Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları*, Ankara. 1-360 (2002).
57. Ensari, C. ve Kayalı, E., S., “Metalik sacları şekillendirme yöntemleri”, *Metallere Plastik Şekil Verme İlke Ve Uygulamaları, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 3: 384-385 (2000).
58. Karalı, M., “Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının kontrolünün cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 118 (2005).
59. Yasar, M., “Yüksek hızda şekillendirilen alüminyum alaşımlarında oluşan deformasyonun incelenmesi”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 164 (2003).
60. Johson, C. and Lloyd, D.J., *Materials Science Forum*, pp. 715-726, (2000).
61. Release 12.0 Documentation for ANSYS .
62. Gavas, M., Küçükderenci, İ., “Alüminyum kare kabın derin çekilmesinde taslak malzeme şekillerinin değerlendirilmesi”, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (2004).

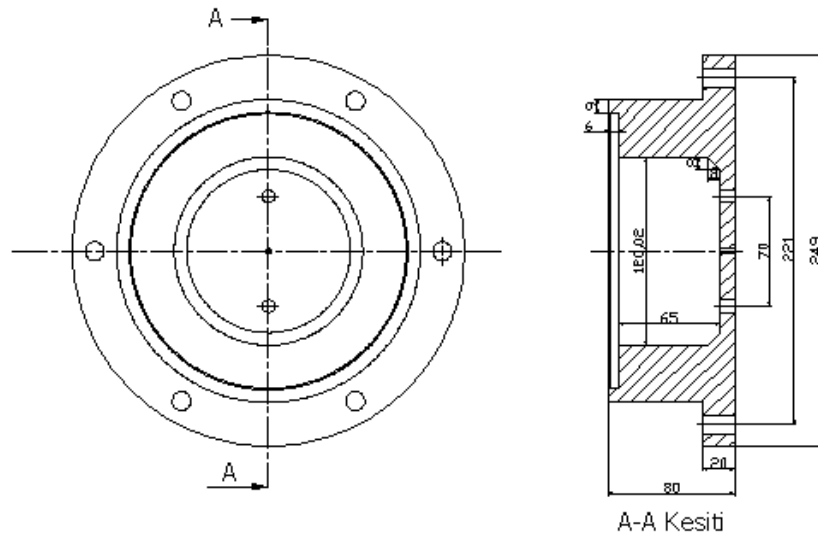
**EK A**

**HİDRO ŞEKİLLENDİRME SİSTEMİNİN AYRINTILI ÖLÇÜLERİ**



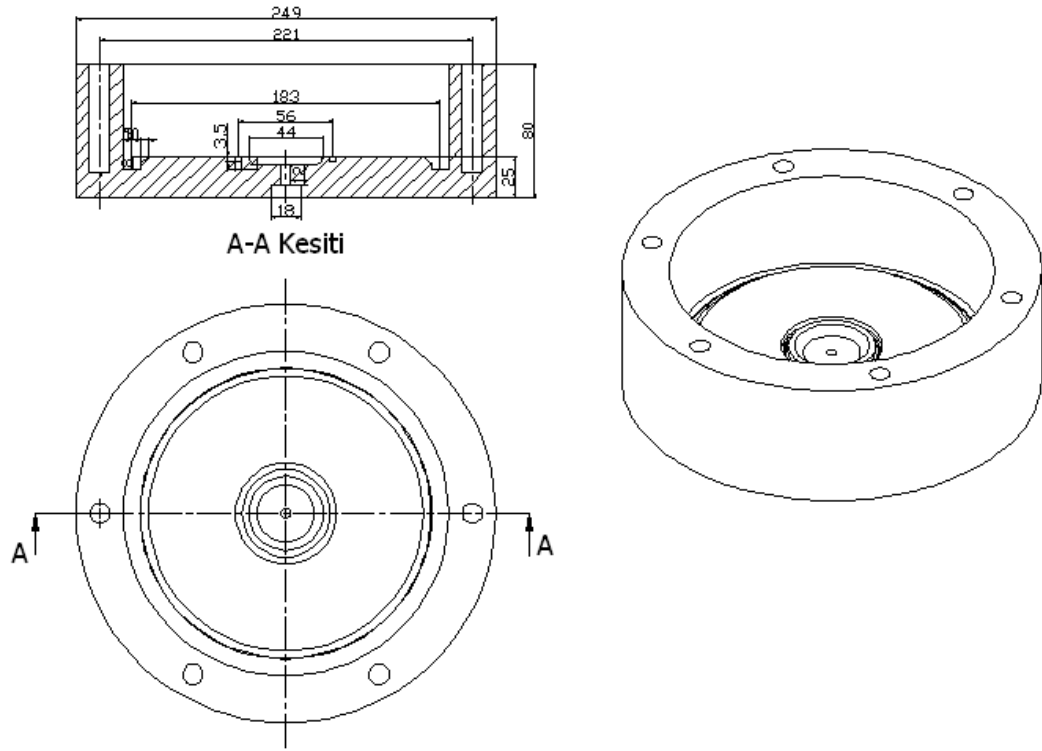
A-A Kesiti

Dişi kalıbın ayrıntılı ölçüleri.



A-A Kesiti

Baskı plakası parçasının ayrıntılı ölçüleri.



Alt kalıp parçasının ayrıntılı ölçüleri.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Elmas AŞKAR 24.10.1985'te Zonguldak ilinde doğdu; İlköğretimini Hisarönü İlköğretim Okulu'nda, Ortaöğrenimini Zonguldak Gazi Mustafa Kemal İlköğretim Okulunda ve Liseyi Zonguldak Atatürk Lisesinde tamamladı. 2002 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği bölümünü kazandı. 2006 yılında mezun oldu. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Eğitim Anabilim Dalında yüksek lisans programına başlamış ve halen eğitimini sürdürmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : ZONGULDAK

Tel :

E-posta : elmas.askar@gmail.com