

**METALİK SAÇLARIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME  
YÖNTEMİYLE ŞEKİLLENEBİLİRLİĞİNİN  
İNCELENMESİ**

**2009  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ**

**Murat AYDIN**

**METALİK SACLARIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE  
ŞEKİLLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Murat AYDIN**

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

**KARABÜK**

**Haziran 2009**

Murat AYDIN tarafından hazırlanan “METALİK SAÇLARIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE ŞEKİLLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” 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/ 06/ 2009

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. İbrahim KADI (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

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

İmzası



10/07/2009

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.”*

Murat AYDIN

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **METALİK SACLARIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİYLE ŞEKİLLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Murat AYDIN**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İbrahim KADI**

**Haziran 2009, 99 sayfa**

Teknolojinin gelişmesiyle, hafif malzemelerden karmaşık şekilli, dayanıklı parçaların üretim ihtiyacı doğmuştur. Bu ihtiyaca karşılık bulunan yöntemlerden biri hidro şekillendirmedir.

Bu çalışmada, hidro şekillendirme ile metalik sacların şekillenebilirliğine çalışılmıştır. Şekillendirme deneyleri için hidro şekillendirme sistemi ve kalıbı tasarlanarak, üretimi gerçekleştirilmiştir. Sistemde, Rubia 20W50 akışkan ortam ve zımba kullanılmıştır. Malzemelerde, farklı basınç ve çekme yüksekliklerindeki deformasyonlar gözlemlenmiştir. Deneylerde, 0,8 mm kalınlığında AL 5754 serisi alüminyum sac malzeme, 0,35 mm ve 0,6 mm kalınlığındaki C 1006 serisi çelik sac malzeme kullanılmıştır. Şekillendirmelerde 3 adet zımba kullanılarak, karmaşık geometrili parçalar üretilmiştir. Nümerik simülasyonlar için ANSYS LS DYNA yazılımı kullanılmış ve teorik analizlerde her parça için 2 farklı malzeme

modeli kullanılarak, deneysel sonuca en yakın sonuç veren malzeme modeli incelenmiştir.

Silindirik şekillendirmede en iyi sonuç, AL 5754 malzemeyle, 35 mm çekme yüksekliği ve 8 MPa akışkan basıncıyla elde edilmiştir. Parçanın taban, yan duvar ve kenar kıvrımlarında kırışıklık görülmemiş, malzeme kalınlığı maksimum 0,05 mm incelmıştır. Silindirik şekillendirmede kullanılan ön basıncın şekillendirmeye olumlu etkisi olduğu saptanmıştır. Kestamit zımba ucuyla en iyi sonuç, AL 5754 malzemeyle, 15 mm çekme yüksekliği, 7 MPa ve 15 MPa akışkan basınçlarıyla elde edilmiştir. Zımba ucundaki havuz, köşe ve kenar kıvrımları, kırışıklık oluşmadan başarılı bir şekilde şekillendirilmiştir. Desenli zımba ucuyla en iyi sonuç, 0,6 mm kalınlıktaki C 1006 sac malzemeyle, 8 MPa ve 14 MPa akışkan basınçlarında elde edilmiştir. Malzemeye desen şekli verilmiş, kırışıklıklar meydana gelmemiştir. Alüminyum malzeme için 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelinin en iyi sonucu verdiği, çelik malzemeler için Bilinear Isotropic ve Bilinear Kinematic malzeme modellerinin doğru sonuç verdiği saptanmıştır.

**Anahtar Sözcükler** : Sac metal şekillendirme, hidro şekillendirme, hidro statik basınç, alüminyum alaşım.

**Bilim Kodu** : 626.08.01

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATING FORMABILITY OF SHEET METAL MATERIALS USING HYDROFORMING METHOD**

**Murat AYDIN**

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

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. İbrahim KADI**

**June 2009, 99 pages**

Parallel to development of technology, requirement production of more strength parts with complex shapes using light materials was occurred. Hydro-forming was a method which was developed for this requirement.

In this paper, it was investigated formability of sheet metal materials using hydro-forming method. For deformation experiments, hydro forming system and die set were designed and were produced. In the system, deformation was achieved using pressurized Rubia 20W50 fluid media and punch. Deformations of materials using different fluid pressure and punch movement were observed. In drawing experiments, AL 5754 aluminium sheet material which thickness was 0,8 mm and, C 1006 steel sheet materials which thicknesses were 0,35 mm and 0,6 mm were used. In the die set, three different punch profiles were used, thus parts with complex geometrical shapes could be produced. ANSYS LS DYNA software was used for

numerical simulations. In numerical simulations, there were used 2 different theoretical materials models for each material. It was tried to determine which theoretical material models could gave the best results accurately compared with experimental results.

In cylindrical cup drawing, the best result was obtained using 35 mm drawing height and 8 MPa fluid pressure with AL 5754 sheet material. After the deformation, there weren't any wrinkles at floor, side walls and edge radius of part. The thickness of material was become thin about 0,05 mm. The pre-forming pressure was tried in cylindrical cup drawing and it was determined that effect of pre-forming pressure is positive over the deformation. After the cylindrical cup drawings, it was performed drawing experiments with polyamide punch. With polyamide punch, the best results were obtained using 15 mm drawing height and 7 MPa and 15 MPa fluid pressures with AL 5754 sheet materials. Pool chamber and all radiuses on the punch were formed successfully on the materials without cracks and wrinkles. The last drawings experiments were performed using steel punch with complex shape. In these experiments, the best results were obtained using 8 MPa and 14 MPa fluid pressure with C 1006 steel sheet materials which thickness is 0,6 mm. The complex shape on the punch was formed successfully on the materials without cracks and wrinkles. For aluminium material, 3 Parameters Barlat Anisotropic theoretical material model was gave results accurately compared with experiments. For steel material, Bilinear Isotropic and Bilinear Kinematic theoretical material models were gave results close to experiments and each others. Bilinear Isotropic and Bilinear Kinematic theoretical material models, both of them can be used for steel material.

**Key Words :** Sheet metal forming, hydro forming, hydro static pressure, aluminum alloy.

**Science Code :** 626.08.01



## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yardımlarını, tüm desteğini ve yol gösterici fikirlerini esirgemedен beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. İbrahim KADI'ya; beni kendi tez öğrencilerinden ayırmayıp, her konuda yardımcı olan ve bu çalışmanın hazırlanmasına büyük emeği geçen değerli hocalarım Doç. Dr. Mustafa YAŞAR'a ve Yrd. Doç. Dr. Cevdet GÖLOğLU'na, tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Yakup KAYA'ya, hep yanımda olarak maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme, tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma sonsuz saygı ve teőekkürü borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI.....	3
1.2. LİTERATÜRDE BULUNAN BENZER ÇALIŞMALAR .....	4
BÖLÜM 2 .....	18
GENEL BİLGİLER .....	18
2.1. HİDRO ŞEKİLLENDİRME .....	19
2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRMENİN KULLANILDIĞI ALANLAR .....	19
2.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ .....	20
2.3.1. Tüp Hidro Şekillendirme .....	20
2.3.1.1. Düşük Basıncılı Hidro Şekillendirme .....	23
2.3.1.2. Yüksek Basıncılı Hidro Şekillendirme .....	24
2.3.1.3. Çoklu Basıncılı Hidro Şekillendirme.....	24
2.3.1.4. Hidro Şişirmeyle Şekillendirme .....	25
2.3.1.5. Körüklü Hidro Şekillendirme .....	26
2.3.2. Sac Hidro Şekillendirme.....	27
2.3.2.1. Diyafram Destekli Hidro Şekillendirme.....	28
2.3.2.2. Hidro Mekanik Derin Çekme .....	29
2.3.2.3. Hidrolik Esneterek Şekillendirme.....	29

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.3.2.4. Birleştirilmiş Esnetme ve Derin Çekme .....	30
2.3.2.5. Çift Kalıplı Hidro Şekillendirme .....	31
2.4. HİDRO ŞEKİLLENDİRMEDE KULLANILAN MALZEMELER.....	32
2.5. HİDRO ŞEKİLLENDİRME SİSTEMİNİN AVANTAJLARI.....	33
2.6. HİDRO ŞEKİLLENDİRMENİN SINIRLILIKLARI.....	34
BÖLÜM 3 .....	36
SONLU ELEMANLAR METODU.....	36
3.1. SONLU ELEMANLAR METODU .....	37
3.2. SONLU ELEMANLAR METODUNUN TARİHSEL GELİŞİMİ .....	39
3.3. METALİK SAÇLARIN DEFORMASYONUNUN BİLGİSAYAR ORTAMINDA SİMULASYONU .....	40
3.3.1. İmplicit Yöntem .....	40
3.3.2. Eksplicit Yöntem .....	40
3.3.3. İmplicit ve Eksplicit Yöntemlerin Karşılaştırılması .....	41
3.4. ANSYS LS-DYNA .....	43
3.4.1. LS-DYNA'nın Kullanıldığı Alanlar .....	43
3.4.2. LS-DYNA'da Kullanılan Element Modelleri.....	44
3.4.3. LS-DYNA'da Kullanılan Malzeme Modelleri.....	46
3.4.4. Kontak Yüzeyler.....	47
BÖLÜM 4 .....	52
MATERYAL VE METOT .....	52
4.1. SİSTEMİN TANITILMASI.....	53
4.2. KALIBIN TANITILMASI.....	54
4.3. MALZEME ÖZELLİKLERİ .....	59
4.4. TEORİK MODELİN OLUŞTURULMASI.....	61
4.4.1. Modelin Tasarımı.....	61
4.4.2. Eleman Tipinin Tanımlanması .....	62
4.4.3. Malzeme Modelinin Tanımlanması.....	62
4.4.4. Modele Ağ Örne .....	65
4.4.5. Kontak Modelinin Tanımlanması.....	66

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 5 .....	69
TEORİK VE DENEYSEL BULGULAR .....	69
5.1. GİRİŞ.....	70
5.2. SİLİNDİRİK DÜZ ÇEKME .....	70
5.2.1. Al 5754 .....	70
5.3. KESTAMİT ZIMBA UÇLU ŞEKİLLENDİRME.....	74
5.3.1. Al 5754 .....	74
5.3.2. C 1006 Çelik Sac Malzeme .....	79
5.4. DESENLİ ZIMBA UÇLU ŞEKİLLENDİRME.....	81
5.4.1. Al 5754 .....	81
5.4.2. C 1006 Çelik Sac Malzeme .....	85
BÖLÜM 6 .....	91
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	91
6.1. SONUÇLAR .....	91
6.2. ÖNERİLER .....	93
KAYNAKLAR .....	94

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1.	Çekme işlemi basamakları .....	2
Şekil 1.2.	Bükme işleminde zımba stroğu-optimum sıvı basıncı ilişkisi .....	5
Şekil 1.3.	Teorik kare çekme ve sekizgen sac malzeme.....	7
Şekil 1.4.	Haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda şekil değişimi.....	9
Şekil 1.5.	Karşı basınçla üretilen tüpteki kalınlık değişimi.....	11
Şekil 1.6.	Şekillendirme yöntemleri arasındaki kalınlık değişimi farkı .....	12
Şekil 1.7.	Simetri eksen ve diyagonal hat boyunca teorik ve deneysel kalınlık.....	16
Şekil 1.8.	Hidro mekanik ve konvansiyonel derin çekmedeki kalınlık incelmeleri	17
Şekil 2.1.	Tüp hidro şekillendirme işlem basamakları .....	21
Şekil 2.2.	Hidro şekillendirme için tüp malzemeler .....	21
Şekil 2.3.	Tüp hidro şekillendirme ile üretilmiş ürünler .....	22
Şekil 2.4.	Düşük, yüksek, çoklu basınçlı hidro şekillendirme işleminde kalıbın kapanması sırasında kesit şekillenmesi.....	23
Şekil 2.5.	Hidro şişirme işlemi boyunca basınç sıralaması .....	25
Şekil 2.6.	Hidro şekillendirilmiş Y birleştirmeli egzoz.....	26
Şekil 2.7.	Hidro şekillendirilmiş otomotiv egzoz konisi .....	26
Şekil 2.8.	Hidro şekillendirilmiş körüklü parça .....	27
Şekil 2.9.	Körüklü şekillendirme işlem sırası.....	27
Şekil 2.10.	Diyafram destekli hidro şekillendirme .....	29
Şekil 2.11.	Hidro mekanik derin çekme .....	30
Şekil 2.12.	Hidrolik esneterek şekillendirme .....	30
Şekil 2.13.	Birleştirilmiş esnetme ve derin çekme .....	31
Şekil 2.14.	Çift kalıplı hidro şekillendirme .....	32
Şekil 2.15.	Çift kalıplı hidro şekillendirme ile üretilen ürün.....	32
Şekil 2.16.	Akışkan basıncı-zımba stroğu arasındaki ilişki.....	35
Şekil 3.1.	Dairenin sonlu sayıda elemana bölünmesi .....	38
Şekil 3.2.	İmplicit ve Eksplisit yöntemlerin karşılaştırılması.....	42

## **Sayfa**

Şekil 3.3. SHELL 163 (Kabuk) eleman tipi .....	44
Şekil 4.1. Kurulan hidro şekillendirme sisteminin şematik resmi.....	53
Şekil 4.2. Kurulan hidro şekillendirme sistemi .....	54
Şekil 4.3. Kalıp elemanlarının demonte hali .....	55
Şekil 4.4. Geleneksel çekme kalıplarındaki tek taraflı çekme boşluğu.....	57
Şekil 4.5. Kurulan sistemdeki tek taraflı ölçü farkı.....	57
Şekil 4.6. Kullanılan zımba uçları .....	59
Şekil 4.7. Yüzey modellenen kalıp elemanları .....	61
Şekil 4.8. Yüzey modellenen zımba uçları .....	62
Şekil 4.9. Eleman tipinin belirlenmesi .....	62
Şekil 4.10. Alüminyum için malzeme modelleri.....	63
Şekil 4.11. Çelik malzeme için malzeme modelleri .....	64
Şekil 4.12. Rigid malzeme ve sınırlılık tanımlanması.....	64
Şekil 4.13. Oluşturulan kalıba ait teorik model.....	65
Şekil 4.14. Sac malzemeye ait teorik model.....	65
Şekil 4.15. Zımba uçlarının teorik modelleri.....	66
Şekil 4.16. Kullanılan kontak modeli .....	67
Şekil 4.17. Birbirleri arasında kontak bulunan parçalar .....	68
Şekil 5.1. Silindirik şekillendirilmiş alüminyum malzemeler .....	71
Şekil 5.2. Silindirik şekillendirilmiş alüminyum saclara ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları .....	72
Şekil 5.3. Silindirik şekillendirilmiş malzemeye ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri.....	73
Şekil 5.4. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum malzemeler .....	75
Şekil 5.5. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum saclara ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları.....	76
Şekil 5.6. Kestamit zımba uçlu şekillendirmeye ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri.....	78
Şekil 5.7. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlıktaki çelik sac malzeme .....	79
Şekil 5.8. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzemeye ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonucu .....	80

Şekil 5.9. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlıktaki çelik sac malzemenin teorik ve deneysel kalınlık değişimi .....	81
Şekil 5.10. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum malzemeler .....	82
Şekil 5.11. Desenli zımba ucuyla alüminyum malzemelerin şekillendirilmesinin simülasyon sonucu.....	83
Şekil 5.12. Desenli çelik zımba ucuyla şekillendirmeye ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri.....	84
Şekil 5.13. Desenli zımba ucuyla 4 MPa akışkan basıncında şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlıktaki çelik sac malzeme .....	85
Şekil 5.14. Desenli zımba ucuyla 7 MPa akışkan basıncında şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlıktaki çelik sac malzeme .....	85
Şekil 5.15. Desenli zımba ucuyla 7 MPa akışkan basıncıyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki sac malzemeye ait farklı malzeme modeli simülasyon sonucu .....	86
Şekil 5.16. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki saca ait teorik ve deneysel kalınlık değişimi .....	87
Şekil 5.17. Desenli zımbayla 0,35 mm kalınlıktaki çelik saca ait kalınlık değişimi .....	87
Şekil 5.18. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,6 mm kalınlıktaki çelik sac malzemeler .....	88
Şekil 5.19. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,6 mm kalınlıktaki çelik saclara ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları .....	89
Şekil 5.20. Desenli zımbayla şekillendirilmiş 0,6 mm kalınlığındaki saca ait teorik ve deneysel kalınlık değişimi.....	90

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Kontak çeşitleri ve alt kontak seçenekleri .....	51
Çizelge 4.1. Kalıp elemanları ile ilgili önemli ölçüler .....	56
Çizelge 4.2. Örnek tek taraflı çekme boşlukları.....	57
Çizelge 4.3. Çelik zımba ucuna ait ölçüler .....	58
Çizelge 4.4. Kestamit zımba ucuna ait ölçüler.....	58
Çizelge 4.5. AL 5754 serisi alüminyum sacın kimyasal özelliği.....	59
Çizelge 4.6. AL 5754 serisi alüminyum sacın mekanik özelliği .....	60
Çizelge 4.7. C 1006 serisi çelik saca ait kimyasal özellikler .....	60
Çizelge 4.8. C 1006 serisi çelik saca ait mekanik özellikler.....	61
Çizelge 4.9. Kalıp elemanlarının sonlu eleman sayısı .....	66
Çizelge 5.1. Alüminyum malzemelerin silindirik şekillendirilme parametreleri.....	71
Çizelge 5.2. Kestamit zımba ucuyla alüminyum sacların şekillendirme parametreleri .....	74
Çizelge 5.3. Desenli zımba ucuyla alüminyum şekillendirme parametreleri .....	82
Çizelge 5.4. Desenli zımba ucuyla 0,6 mm kalınlıktaki sac malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan parametreler.....	88



## BÖLÜM 1

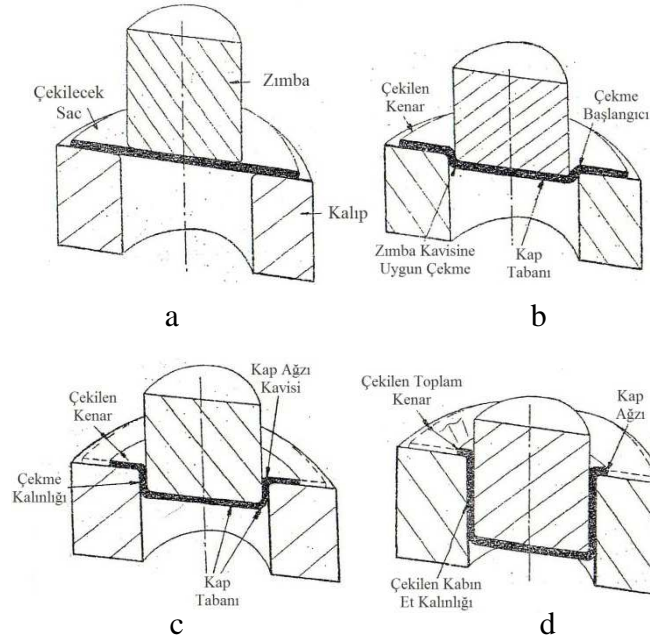
### GİRİŞ

Sac metal şekillendirme, günümüzde en çok kullanılan şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Sac metal şekillendirme yöntemiyle üretilmiş ürünler, günlük hayatımızın her noktasında kullanılmaktadır. Metalik sacların şekillendirilmesinde pres, zımba, matris (dişi kalıp) ve baskı plakası gibi ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu şekilde sac malzeme plastik olarak deforme edilmekte ve istenilen şekli alması sağlanmaktadır. Bu teknik geniş bir şekilde binlerce sac malzemelerin şekillendirildiği otomotiv, havacılık, mobilya, gıda sanayi gibi birçok endüstri dalında kullanılmaktadır.

Sac metal şekillendirme yada sac metal kalıpcılığı, sacların üretim şekillerine göre kendi içerisinde kesme, bükme, çekme yada ardışık gibi sınıflara ayrılmaktadır. Bu yöntemler arasında en zor ve en çok kullanılan çekme yöntemidir. Çekme yöntemiyle sac malzemeler içi boş, ince cidarlı bir şekilde üretilmektedir. Pres hareketiyle ilerleyen zımba, sac malzemeyi kalıp içerisine doldurarak, kalıbın şeklini almasını sağlamaktadır. Şekil 1.1’de şematik olarak çekme işleminin basamakları gösterilmiştir. Düz bir sac malzemedan kapalı bir şekilde üretim yapmak gerçekten zor ve zahmetli bir iştir.

Geometri, hacim, malzeme tipi gibi birçok etkene bağlı olarak sac malzemelerin derin çekilmesi, esnetilmesi gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır [1]. Farklı yöntemlerin kullanılmasına rağmen, sac şekillendirme işlemlerinde, kopma, yırtılma, boyun verme, kırışıklık, geri yaylanma gibi istenmeyen birçok hatalar meydana gelmektedir [2]. Ayrıca işlemin başarısı ve kalıp ekipmanlarının sağlanması için büyük miktarda maliyet söz konusudur. Yöntem içinde ekonomik olarak tasarrufun sağlanması için, usta ve yetenekli operatörlerin kullanılması gerekmektedir.

Çeşitli endüstri dallarında kullanılan malzemelerin hem hafif hem de dayanıklı olması istenmektedir. Geleneksel çekme yöntemleri ile bu ihtiyaca yönelik ürünlerin üretilmesinde birçok problemler yaşanmaktadır. Malzeme özellikleri itibarıyla, mekanik yöntemlerle yapılan şekillendirmelerde yaşanan kısıtlamalar ve meydana gelen problemler, daha iyi sonuçlar veren metotların araştırılmasına sebep olmuştur. Bu araştırmalardan doğan ve geleneksel çekme yöntemlerine alternatif olarak kullanılan teknolojilerden biriside hidro şekillendirme yöntemidir.



Şekil 1.1. Çekme işlemi basamakları. a. Sac levha yerleşimi, b. Çekme başlangıcı, c. Çekmeye devam, d. Çekme sonu [3].

Sonlu elemanlar yöntemi ve analizi mühendislik dallarının hemen hepsinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarlanan veya üretilecek olan ürünlerin ihtiyaca uygunluğu ve çeşitli çalışma şartlarına uyum sağlamasının önceden tahmin edilmesi, maliyet ve zamandan önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır. Bu yüzden sac metal şekillendirme işlemlerinin bilgisayar ortamında ki simülasyonu büyük bir önem kazanmaktadır. Son yıllarda şekillendirme işlemleri, sonlu elemanlar yöntemi ve analizi kullanılarak bilgisayar ortamında, çeşitli program ve yazılımlarla simüle edilmektedir. Simülasyonlar deneysel yöntemlerle elde edilemeyecek verilerin ölçülebilmesine ve yeni şekillendirme teknolojilerinin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır.

Klasik metotlarla alüminyum malzemelerin şekillendirilmesinde, çelik malzemelerin şekillendirilmesine göre çok daha fazla problemler yaşanmaktadır. Bunarı sıralarsak;

- Alüminyum malzemenin şekillenme kabiliyetinin çelikten daha düşük olması ve şişirme noktalarında yırtılmaya eğimli olması,
- Alüminyum malzemenin elastikiyet modülünün çelikten daha düşük olması ve geri esnemesi daha az olduğundan belirli toleranslarda tutulmasının zor olması [4].

Çalışmanın ikinci bölümünde, hidro şekillendirme sistemi, hidro şekillendirme sisteminin çeşitleri, hidro şekillendirme sistemi ile kullanılan malzemeler, hidro şekillendirme sisteminin avantajlarının neler olduğu tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, sonlu elemanlar metodu, sonlu elemanlar metodunun tarihsel gelişimi, sac malzemelerin simülasyonu, simülasyonların yapılmasına yardımcı olan ANSYS/LS-DYNA programı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, kurulan hidro şekillendirme sistemi, sistemde kullanılan kalıp, kalıp elemanları, sistemin çalışması, teorik modellerin oluşturulması, teorik analizlerde kullanılan malzeme modelleri, kontak modelleri, ağ örme işlemleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Beşinci bölümde, teorik ve deneysel çalışmaların sonucu elde edilen veriler incelenmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel olarak alüminyum ve çelik malzemeler şekillendirilmiş, şekillendirilen malzemelerin bilgisayar ortamında teorik analizleri yapılmıştır. Şekillendirilen malzemelerin et kalınlık ölçümleri yapılmış ve teorik olarak elde edilen et kalınlıkları ile kıyaslanmıştır. Altıncı bölümde, teorik ve deneysel olarak şekillendirilmiş malzemeler ile ilgili sonuçlar yazılmış, çalışmanın genel sonucu ve ileriki aşamalarda yapılabilecekler önerilmiştir.

## **1.1. ÇALIŞMANIN AMACI**

Bu çalışmanın amacı, hidro şekillendirme türlerinden biri olan sac hidro şekillendirme yönteminin kullanımı ile metalik sacların şekillendirme kabiliyetlerinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi, ayrıca hidro şekillendirme yönteminin klasik çekme yöntemlerinden çok daha avantajlı ve uygun bir yöntem olduğunun deneysel ve nümerik olarak doğrulanmasıdır. Deneylerde alüminyum ve çelik malzemelerin

şekillendirilmesine çalışılmıştır. Klasik şekillendirme geometrilerinden farklı olarak sacların desenli geometriyle şekillendirilmesi de çalışma kapsamında incelenmiştir. Deneyleerde farklı zımba geometrileri kullanılmak suretiyle tek bir kalıp içerisinde, değişik ürünlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Zımbaların hızlı bir şekilde değiştirilmesi ile sistemin modüler hale getirilmesi amaçlanmıştır.

## **1.2. LİTERATÜRDE BULUNAN BENZER ÇALIŞMALAR**

McClintock [5] 1968 yılında, Rice ve Tracey [6] 1969 yılında, hidrostatik basınç altındaki malzemeye uygulanan kuvvet arttığı halde, sac metal levhalarda meydana gelen sünek yırtılmaların çok ani olarak azaldığını çalışmalarında göstermişlerdir.

Yossifon ve Tirosh'un 1977 ve 1988 yılında yaptıkları çalışmalarında gösterdiği gibi, sıvı basıncı, üst sıvı odasında çok yüksek olursa, malzemenin sünekliliğinin izin vermesinden daha hızlı olarak kalıbın şeklini almaya zorlanacaktır. Böylece şekillenecek levhada beklenenden daha evvel yırtılmalara yol açacaktır. 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 gerekmektedir. 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 1.2'de genelleştirilmiş bir şema gösterilmiştir. Sac metallerin hidro şekillendirme bükme işleminde yırtılma ve buruşma oluşumundan kaçarken, uygun basınç-zımba stroğu oranını yakalamak oldukça zordur [7,8].

Clift, Hartley, Sturgess ve Rowe [9] 1990 yılında, Hartley, Pillinger ve Strugess [10] 1992 yılında, sac metallerin derin çekme çalışmalarında kullandıkları hidro statik basınç sayesinde mikro çatlakların başlangıcını geciktirdikleri ve mikro çatlakların oluşması durumunda bile yayılmalarını önlediklerini göstermişlerdir.

Hsu ve Hsieh [11] 1996 yılında, Lo, Hsu, ve Wilson [12] 1993 yılında, metalik yarım küre hidro şekillendirme bükme işlemi için sıvı basıncı-zımba stroğu konusu

ile ilgili bir seri deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır. Metaller ve termoplastiklerle ilgili olarak halen bu değerlendirmeler devam etmektedir.



Şekil 1.2. Bükme işleminde zımba stroğu-optimum sıvı basıncı ilişkisi.

Mamalis ve arkadaşlarının, 1997 yılında yaptıkları çalışmalarda, eksplisit sonlu elemanlar tekniğini kullanarak, silindirik kapların derin çekilmesini, malzemenin şekillendirme karakteristiğine etkisi simülasyonu ile araştırmışlardır. alışmalarında sac metallerin şekillendirme analizlerinde eksplisit FE DYNA3D kodunu kullanmışlardır. Silindirik kabın derin çekilmesi için 3D FE model kurulmuş ve farklı simülasyon parametreleri kullanılarak simülasyon sonuçlarını elde etmişlerdir. Kullandıkları parametreler: zımba hızı, metalin yoğunluğu, takım-levha arasındaki Coulumb sürtünme katsayısı ve tipi, FE ağ örme elementinin büyüklüğü olmuştur. Zımba kuvveti ve zımba hareket mesafesini değiştirerek 5 değişik galvanizli sac ve alüminyum sac için uzama dağılımına bağlı olan (radyal, çevresel ve kalınlık boyunca) teorik sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve iyi bir uyum gözlemlemişlerdir [13-14].

Youssef ve Denault 1998 yılındaki çalışmalarında hidro şekillendirme bükme işleminin avantajlarının bir kısmını ortaya koymuşlardır. Özellikle otomotiv ve uzay endüstrisinde dikkate değer oranda işlemlerde kullanılabileceğine dikkat çekmişlerdir. 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

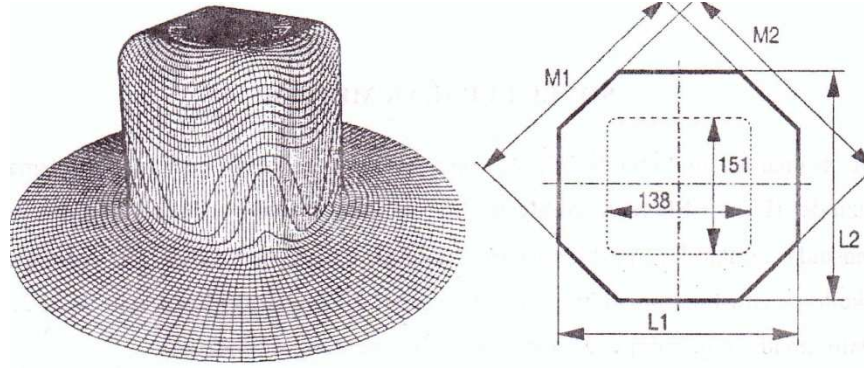
halinin bazı bölgelerinde meydana gelen aşırı incelemelerin ve buna bağlı olarak oluşan yırtılmaların azalması, takım kullanılmasının azalmasından dolayı dikkate değer oranda ekonomikliği ve işi bitirmek için gerekli işlem basamaklarını azalması, ortaya koydukları avantajlardır [15].

Brunet ve arkadaşları 1998 yılında sac metal şekillendirme işleminde boyun verme üzerine deneysel ve teorik olarak yaptıkları çalışmada, şekillendirme sınır diyagramı kontrolü için iki farklı yaklaşımı detaylı olarak açıklamışlardır. İlk önce deneysel çalışmayı anlatmışlardır. Çalışmalarında, sacdaki yer değişim alanlarını ölçmek için bir kolerasyon tekniği geliştirmişlerdir. İkinci yaklaşımı teorik olarak gerçekleştirmişlerdir. Burada boyun verme ölçütü, yükün uygulanış şekline göre belirlemişlerdir. Düzlemsel uzamanın meydana geldiği yerin belirlenmesinde Hill'in veya Barlat-Lian'ın anizotropisini izah etmek amacıyla Gurson-Tvergaard'ın hasar modelini düzenleyerek ihtimaller vermişlerdir [16].

Genellikle kompleks sac malzemelerin şekillendirilmesinde hidro-mekanik derin çekme teknolojisi kullanılmaktadır [17]. Zhang ve arkadaşlarının 1998 ve 2000 yıllarında yaptıkları çalışmalarında, hidro mekanik derin çekme teknolojisiyle parabolik alüminyum sac malzemenin şekillendirilmesinde çeşitli yöntem parametrelerinin eksplisit sonlu eleman yöntemini kullanarak derin çekme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bazı şekillendirme şartları için yırtılma ve buruşma kusurlarının önceden tespit edilmesini ve kalınlık dağılım sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasını yapmışlardır. Zimba hareketinin başlangıcındaki üçte birlik kısmı sırasınca, başlıca zayıf noktalarını tespit (zimba sac malzemeyi çekmeye başladığı anda malzemedeki zayıf noktaların tespiti) etmişler, zimba hareketinin sonunda malzemedeki gerçekleşen buruşuklukları gözlemlemişlerdir. Baskı plakasının ve sıyrıcı plaka kuvvetinin deformasyondaki etkilerini tartışarak, nümerik sonuçlarla deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır [18-19].

Mattiasson'da 2000 yılında, endüstride sac metal şekillendirme işlemlerinin sonlu elemanlarla simülasyonu için nümerik işlemlerinin kullanımında büyük gelişmeler olduğundan bahsetmiş, özellikle otomotiv endüstrisinde gerçek bir uygulama alanı bulduğuna değinmiştir [20].

Zang, Lang ve arkadaşları 2000 yılında, yumuşak çelik ve alüminyum konik dikdörtgen kutuların, hidro mekanik derin çekme işlemi kullanılarak şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Yapılan deneyler tanıtılmış ve tartışılmıştır. Nümerik analizleri eksplisit sonlu elemanlar metodu kullanarak yapmışlar, nümerik sonuçlarla, deneysel sonuçları karşılaştırıp, elde edilen verileri tartışmışlardır. Ölçüleri farklı sekiz kenarlı ve dairesel sac malzemelerin benzeşimini yaparak karşılaştırmışlar ve şekillendirme sırasında en elverişli olanı belirlemişlerdir. Deneylerde meydana gelen kırışıklıklar ve bölgesel incelmeleri tahmin etmişlerdir. Şekil 1.3’de kullandıkları kare çekme ve sekizgen sac malzeme gösterilmiştir [21].



Şekil 1.3. Teorik kare çekme ve sekizgen sac malzeme.

Vollertsen’in 2001 yılında yaptığı, tüp ve sac malzemelerin hidro şekillendirme işleminin gelişmesi adlı çalışmasında, hidro şekillendirme işleminin günümüze kadar gelen değişimini incelemiştir. Çalışmasında içi boş parçaların üretim metotlarına değinmiştir. Yüksek dayanımlı ve ölçü tamlığıyla parçaların üretilebilmesi için sıvı ortamının kullanım gerekliliğini ortaya koymuştur. Hidro şekillendirme işleminin çeşitlerini ve sınıflarını açıklamıştır. Tüp hidro şekillendirme işleminin küçük hacimli ürünler için yüksek standartlara ulaştığını göstermiştir. Tek bir sac malzemenin, iş parçası ve sıvıyı ayıran bir diyafram kullanılarak şekillendirilmesinin mümkün olduğunu ve bu sayede tek adımda parçaların şekillendirilebileceğini açıklamıştır [22].

Lei ve arkadaşları 2001 yılında, paslanmaz çelik sac metal şekillendirilmesinde, tasarım ve sonlu elemanlar analiziyle deneysel yöntemin karşılaştırılması adlı çalışmalarında, bükme ve çekme işlemlerinde Code Marc Finite-Element sonlu

gerilme formülüyle, katı elementler kullanılarak paslanmaz çelik sac metal şekillendirme analizleri yapmışlardır. Bükme deformasyonunda zımba ve iş parçası temas yüzeyi arasındaki boşluğun arttırılması sırasında geri esneme açısını arttırmışlardır. Kontak tanımlamalarını birleştirdikleri için teorik ve deneysel sonuçlar arasında farkların meydana geldiğini göstermişlerdir [23].

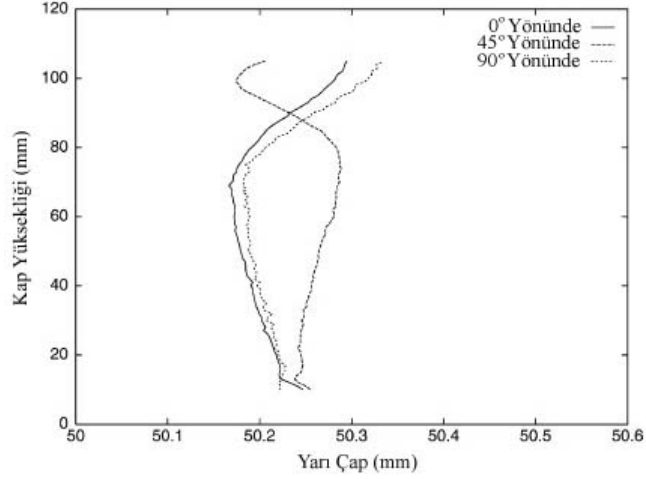
Gaspar Gantar ve arkadaşlarının 2002 yılında yaptıkları, nümerik simülasyon kullanılarak sac metal şekillendirme işleminde eniyilenim adlı çalışmalarında, parçada herhangi bir kusur meydana gelmeden işlemi tamamlayabilmek için sonlu elemanlar metodu temel alınarak nümerik simülasyon kullanmışlardır. Araştırmalarını endüstriyel örnekler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Şekillenecek parçanın ilk şeklinin belirlenmesi, yırtılmaların, parçanın son kalınlığı, kırışık tahmini yapmışlardır [24].

Güner Çelikayar'ın 2003 yılında, yüksek basınç altında metallerin şekillendirilmesi adlı çalışmasında, hidro şekillendirme işleminin önemini açıklamış ve tüp hidro şekillendirme yöntemi üzerine çalışmıştır. Tüp hidro şekillendirmenin avantajlarını ve uygulama alanlarını incelemiştir. Çalışmada tüp hidro şekillendirme işlemi için gerekli olan kalıp elemanları, kullanılacak akışkan, kullanılan pres sistemi ve otomasyon sistemlerini detaylı bir biçimde anlatmıştır [25].

Zhang, Jensen ve arkadaşlarının 2003 yılında yaptıkları çalışmada, yumuşak çelik kapların hidro mekanik derin çekme işlemlerini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Deneyleri, farklı ön şişirme basınçları altında, sabit fark metodu (boşluklu) ve konvansiyonel metodu (boşluksuz) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. İş parçasının şekil değişimleri ve kalınlık dağılımı üzerine tartışmışlardır. Son ürün kalitesi üzerinde, ön şişirme basıncının ve anizotropinin etkisini araştırmışlardır. Şekillendirme işlemlerini, eksplisit sonlu eleman kodu DYNA3D'de, Barlat Lian malzeme modelini kullanarak analiz etmişlerdir. Nümerik sonuçları, deneylerden elde edilen sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Çalışmada, şekillendirilen kabın radyal yöndeki şekil değişimini, hadde yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda incelemişlerdir. 0° ve 90° derecelerdeki şekil değişiminin birbirine çok yakın



olduğunu ama 45° şekil değişimin çok farklı olduğunu göstermişlerdir. Şekil 1.4.'de 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda şekil değişimi grafiği gösterilmiştir [26].



Şekil 1.4. Haddelenme yönüne 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda şekil değişimi.

Zampaloni, Abedrabbo ve Pourboghra, 2003 yılında alüminyum alaşımlı saclara şekil vermek için, deneysel ve nümerik olarak sac hidro şekillendirme işlemi üzerine çalışmışlardır. Basınçlı akışkan kullanımıyla, sac malzemenin işlemin başlangıcından sonuna kadar desteklendiğini ve böylece şekillenen parçanın daha iyi aktığını, malzeme hatalarının geciktiğini, kırışıklıkların azaldığını ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında, 3003-H14 alüminyum alaşımlı sac malzeme kullanmışlar ve deneysel çalışmalarla çekme derinliğinin %31 oranına kadar arttırıldığını göstermişlerdir. Teorik analizlerde LS-DYNA sonlu eleman analiz kodunu kullanmışlardır. Barlat Anizotropik akma fonksiyonu kullanılan nümerik simülasyonlarla doğru bir şekilde alüminyum malzemenin kırışıklık karakteristiğinin ve bölgesel malzeme hatalarının tespitini gerçekleştirmişlerdir [27].

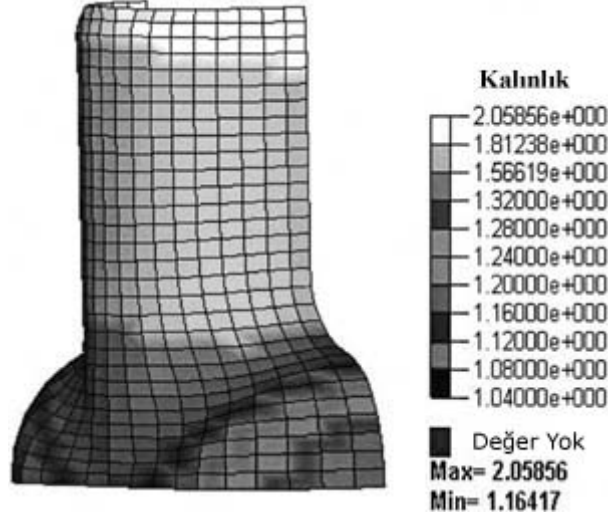
Serdar Şahin'in 2004 yılında yaptığı çalışmasında hidro şekillendirme yönteminin genel bir gözden geçirilmesini yapmıştır. Klasik şekillendirme yöntemleri ile karşılaştırmış, hidro şekillendirme çeşitleri ve uygulama alanlarını açıklamış, işlem basamakları tasarımını incelemiştir. İşlem sırasında meydana gelen hatalar, kırışıklıklar ve bölgesel incelmeleri araştırmıştır [28].

Zhang, Wang ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptıkları, sac hidro şekillendirme teknolojisinde son gelişmeler adlı çalışmalarında, günümüzde ve son yıllarda hidro

şekillendirme alanında meydana gelen gelişmeleri göstermişlerdir. Hidro şekillendirme yöntemi ile sac malzemelerin şekillenme limitinin önemli ölçüde arttırıldığını ve geometrileri daha karışık olan parçaların şekillendirilebildiğini ortaya koymuşlardır. Bu sayede yüksek verim ve düşük maliyetin elde edildiğini göstermişlerdir. Hidro şekillendirme işlemine, bir hareketli kalıbın adapte edilmesiyle, deformasyonunun daha iyi olacağını, bu sayede duvar kalınlıklarının kontrol edileceğini, incelmelerin azaltılacağını ve sac malzemenin şekillendirme limitinin arttırılacağını açıklamışlardır [29].

L.H. Lang, Z.R. Wang ve arkadaşlarının 2004 yılında, sac hidro şekillendirme ve tüp hidro şekillendirme adlı çalışmalarında, hidro şekillendirme işleminin önemli noktalarını vurgulamışlardır. Çalışmada hidro şekillendirme işlemi sınıflarına ayırarak, önemli noktalarını ve karakteristiklerini açıklamışlardır. Birçok yıldır üzerine çalışılan bir yöntem olmasına rağmen, şekillendiren ortam olarak sıvının kullanıldığı sac ve tüp hidro şekillendirme oldukça yeni ve sadece bir kısmı keşfedilmiş bir teknoloji olduğunu vurgulamışlardır. Hidro şişirme, tüp hidro şekillendirme ve sac hidro şekillendirme üzerine açıklamalara yer vermişlerdir. Tüp hidro şekillendirilen parçaların şekillendirme sonrasında, ölçüm cihazlarını ve ölçüm yöntemlerini ayrıntılı bir şekilde açıklamışlardır. Hidro şekillendirme işlemi için gerekli olan takımları, pres sistemlerini değinmişlerdir. Nümerik simülasyonların şekillendirme işlemindeki yerini ve önemini vurgulamışlardır [30].

Jain, Wang ve Alexander'ın 2004 yılında yaptıkları çalışmalarında, hidro şekillendirme yönteminin parça sayısının azalması, parça dayanıklılığı ve sertliğini arttırması, ağırlığın azaltılması gibi avantajlarının imalatçılar için büyük maliyet tasarruflarını gerçekleştirdiğini açıklamışlardır. 3 eksenel gerilme durumunun gerçekleştirilebilmesi için karşı basınç adı verilen bir yöntem geliştirmişlerdir. Tüp hidro şekillendirmede uygulanan harici karşı basıncın esaslarını tespit etmişler ve karşı basıncın tüp malzemeye geri destek sağladığını gözlemlemişlerdir. Bu sayede aşırı incelmeleri ve erken kırışıklıkları önlemişlerdir. Geniş tüp genişlemesini başarmışlar ve işlemi çift hidro şekillendirme olarak adlandırmışlardır. Şekil 1.5'de karşı basınç ile üretilen tüp malzemenin kalınlık değişimi gösterilmiştir [31].

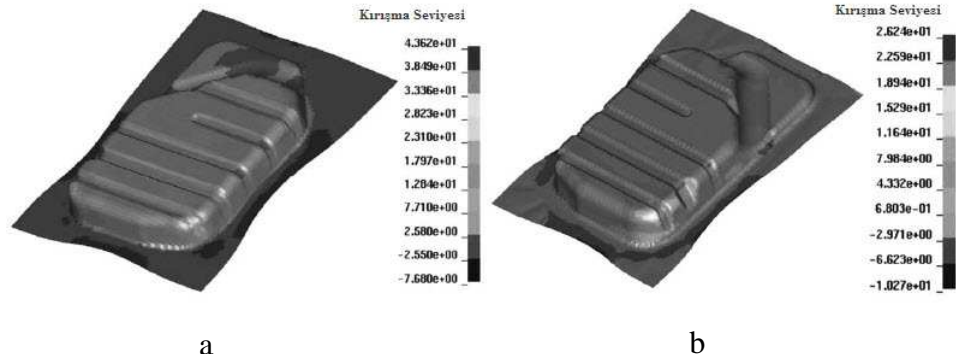


Şekil 1.5. Karşı basınçla üretilen tüpteki kalınlık değişimi.

Kim, Son ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptıkları çalışmada, hidro mekanik sac şekillendirme ve geleneksel çekme işlemini karşılaştırmışlardır. 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. Hidro mekanik şekillendirme için geleneksel çekme yönteminden iki kat daha fazla zamana gerek duyduğunu, bunda ön şekillendirme ve kalibrasyon zamanlarından kaynaklandığını, buna rağmen parçayı, geleneksel yöntemden çok daha düzgün ve kusursuz bir kalınlık dağılımı ile üretebileceğini saptamışlardır. Hidro şekillendirmede kalıp ve sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısının, sıvının etkisinden dolayı geleneksel yöntemden çok daha az olduğunu göstermişlerdir. Şekil 1.6'da elde edilen iki şekillendirme işlemi arasındaki kalınlık incelmesini gösterilmiştir [32].

Palumbo, Pinto ve Tricarico'nun 2004 yılında yaptıkları, silindirik, kare ve birleşik şekilli kalıp boşluğu kullanarak sac hidro şekillendirme işleminin teorik ve deneysel analizi adlı çalışmalarında, teorik-deneysel yaklaşımlı sac hidro şekillendirme işleminin kullanılmasıyla, karmaşık geometrilerin üretilmesiyle alakalı problemler üzerine odaklanmışlardır. Çalışmada 3 farklı kalıp kullanmışlardır. Bu kalıplarla üretim yapılarak teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneysel verileri, sonlu eleman modelini tanımlarken ve doğrularken kullanmışlardır. Sac hidro şekillendirme işleminin simülasyonunu silindirik, kare ve birleşik geometri

parçaların üretimine uygulamışlardır. Bu tip geometrilerin yapılabilirliğini, eş değer plastik gerilme dağılımının analizinden ve birçok kritik alanın gerilme yönlerinden araştırılmasıyla incelemiştir. Kare kalıpla üretimde, olası patlama alanının, katlama-açılma etkisi yüzünden ve malzemenin sarılması esnasında yüksek sıkışma hareketinden dolayı aşırı gerilme sonuçlarının olduğu kare köşe çevresi olduğunu saptamışlardır. Bileşik kalıpla üretimde ise, silindirik parçanın uygun etkisinden dolayı, bütün yönlerde düzgün bir çekmenin meydana geldiğini ve çapraz yönde sınırlama etkisinin olmadığını ortaya koymuşlardır [33].



Şekil 1.6. Şekillendirme yöntemleri arasındaki kalınlık değişimi farkı. a. Geleneksel şekillendirme, b. Hidro şekillendirme.

Xu, Kang ve arkadaşlarının 2004 yılında yaptıkları çalışmada, SUS304 paslanmaz çeliğin sıcak mekanik özelliklerine ve hidro mekanik derin çekme işlemine dayanarak, sıcak hidro mekanik derin çekme işlemini sunmuşlardır. Elde ettikleri deney sonuçlarını tartışmışlardır. Deneyleri 4 farklı sıcaklıkta gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık altındaki paslanmaz çeliğin şekillendirilmesinin geliştirildiğini göstermişlerdir. Sıcak hidro mekanik derin çekme, etkili bir şekilde SUS304 paslanmaz çeliğin sınır çekme oranını arttırdığını, konvansiyonel derin çekme ile 2.0 olan bu oranın bu yöntemle 3.3 e kadar arttırıldığını göstermişlerdir. 90 derece sıcaklığın, SUS304 çelik malzemenin şekillendirilmesine olumlu yönde katkı yaptığını, kalınlık dağılımının daha düzgün olduğunu ve martenzit yapının etkili bir şekilde kontrol edildiğini göstermişlerdir [34].

Ch. Hartl 2005 yılında, hidro şekillendirmenin endüstriyel uygulamaları ve önemli avantajları adlı çalışmasında, hidro şekillendirmenin durumuna genel bir bakış ve işlem basamaklarının tasarımıyla ilgili hidro şekillendirmenin önemli avantajlarını,

yarı mamul üretimini, presleri ve kullanılan takımları, kısaca bugünkü hafif malzemelerin şekillendirilmesinde yararlanılan ısı enerjisi kullanımına benzer yeni hidro şekillendirme teknolojisini anlatmıştır [35].

Shim ve Yang'ın 2005 yılında çeşitli zımba formları ile deneysel şekillendirmeler gerçekleştirmişlerdir. Sac hidro şekillendirmede, en iyi basınç eğrisinin tespiti için bir metot önermişlerdir. Basınç eğrisinin tespitinde eğri parametresi olarak başlangıç basıncını, son basıncı ve basınç yolunu kullanmışlardır. Basınç yolunun, zımba stroğundan ziyade, zımba tarafından akışkan içine itilen hacimle orantılı olduğunu saptamışlardır. Hidro şekillendirme deneyleri boyunca, erken şekillendirme basamağındaki hataların, ana etkeninin zımbanın kalıp içine girmesiyle, kalıp yüzeyinden sac malzemenin kalkmasına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Başlangıç basıncından, basınç yolunun varsayımından ve bazı seçilen son basınç değerlerinden, basınç eğrilerini doğru şekilde değerlendirmişlerdir. Hataların olup olmayacağını ön görülmesi için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişler ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarından, denenen son basınç eğrileri arasındaki en iyi son basınç eğrisi tespit etmişlerdir. Farklı zımba şekilleri için basınç-zımba stroğu arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu ilişkinin kalınlık dağılımına olan etkisini incelemişlerdir [36].

Abedrabbo, Zampaloni ve Pourboghrat'ın 2005 yılında yaptıkları, alüminyum sac hidro şekillendirmede kırışıklık kontrolü adlı çalışmasında, teorik ve deneysel olarak 6111-T4 alüminyum alaşımının, sac hidro şekillendirme boyunca kırışıklık davranışını incelemişlerdir. Şekillendirme deneylerinde yarım küresel kesitli zımba kullanmışlardır. Teorik analizlerde, en iyi akışkan basıncını başlangıçta tahmin etmek için Lo ve diğerlerinin çalışmalarını referans almışlardır. Teorik analizlerde Tresca malzeme modelini kullanmışlardır. Bu malzeme modelinin kullanımı ile erken kopmaları saptamışlardır. En iyi akışkan basınç profilini Barlat anizotropik akma fonksiyonunu kullanarak, sonlu eleman metodu ile oluşturmuşlardır. Yaptıkları deneylerde flanş bölgesinde kırışıklık ve kulaklanmalar olmadan üretim gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları sonlu elemanlar modeliyle, sacın kırışıklık karakteristiklerini doğru bir şekilde tahmin edebilmişler ve kopmaların yerini belirleyebilmişlerdir [37].

Li, Yan, Peng ve Wu'nun 2006 yılında, silindirik kapların şekillendirilmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında farklı çalışma koşulları altında denenen silindirik kaplarla alakalı önceki deneylere dayalı olarak, sistematik bir şekilde bu işlemin nasıl yapıldığını, metal malzemelerin sınır çekme oranlarının neden farklı olduğunu, iş parçası kalitesine etki eden çalışma koşullarının hangileri olduğunu ve deformasyonların hangi ölçütlerde meydana geldiğini araştırmışlardır. Çalışmalarında 0,95 mm kalınlığındaki 304 paslanmaz çelik malzeme kullanmışlar ve DYNAFORM yazılımıyla gerçekleştirdikleri simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir oranda deneysel sonuçlarla uyum sağladığını saptamışlardır. Şekillendirmede ağırlıklı olarak kap derinliğinin kap duvar incelme oranına etki ettiğini göstermişler, tasarladıkları hareketli kayıcı tarafından dışı kalıp ve sac arasındaki kontağın iyi bir şekilde kontrolü sağlandığında tatmin edici karmaşık parçaları başarabilmişlerdir [38].

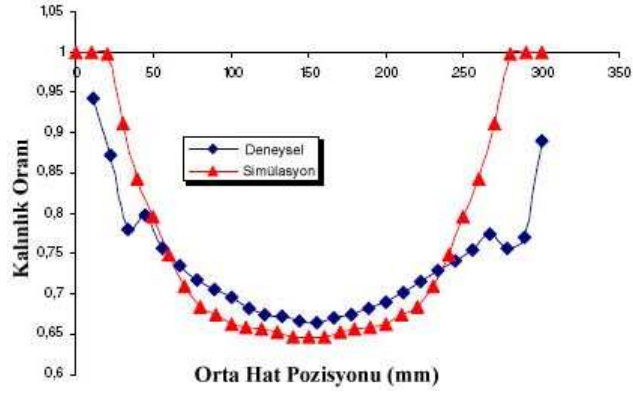
Hama, Hatakeyama ve arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları, sac hidro şekillendirme işlemi ile eliptik kapların derin çekilmesinin sonlu elemanlar analizi adlı çalışmalarında, eliptik kapların nümerik simülasyonları üzerine çalışmışlardır. Çalışmada teorik modeller için STAMP3D adı verilen bir sonlu elemanlar kodu geliştirmişlerdir. Elde edilen simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Bölgesel incelemelerin zımba ve duvar bölgesinde olduğunu, simülasyonlardan elde edilen kalınlık dağılımı sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyum gösterdiğini saptamışlardır. Geleneksel şekillendirmeye elde edilen kalınlık dağılımı ile hidro şekillendirmeye elde edilen kalınlık dağılımı arasındaki farkın sürtünmenin etkisinden kaynaklandığını vurgulamışlardır. Sürtünme artış etkisinin geliştirdikleri programın geçerliliğini onaylayarak, simülasyonla iyi bir şekilde ön görüldüğünü açıklamışlardır [39].

Chen ve arkadaşları 2007 yılında tüp hidro şekillendirme üzerine yaptıkları çalışmada, hidrolik basınç, deforme olmuş tüp dış köşe kıvrımı, tüp kalınlığı ve malzemenin akma gerilmesi arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çalışmalarında sonlu eleman analizlerine de yer vermişlerdir. Sonlu eleman analizini uygun gördükleri teorik model üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Sonlu eleman analizinin uygunluğunu kanıtlamak için iki farklı sonlu eleman kodunu kullanıp, simülasyon sonuçlarıyla

karşılaştırmışlardır. Akışkan basıncı sırasında köşe kavislerinde meydana gelen deformasyonu incelemişlerdir [40].

Zhao, Zhang ve arkadaşlarının 2007 yılında yaptıkları çalışmada, iki taraflı hidro mekanik derin çekme şekillendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında silindirik kapların, aksenal itme kuvvetli hidro mekanik derin çekme işlemi için yeni bir aygıt önermişlerdir. Bu aygıt ile aksenal itme kuvveti özel bir parça ile sac malzemenin kenarı üzerine uygulanmıştır. Akışkan basıncından bağımsız olarak aksenal itme kuvvetini kontrol etmişlerdir. Teorik analizlerde DYNAFORM-PC kodunu kullanmışlardır. Deneysel çalışmada 1 mm kalınlığında 08Al malzeme kullanmışlardır. Aksenal itme kuvvetinin, malzemenin deformasyon sınırlarını önemli ölçüde arttırdığını ve tersine çekme işlemi için anahtar faktör olduğunu kanıtlamışlardır. Deneysel sonuçlarının nümerik simülasyonlar ile uyum sağladığını göstermişlerdir [41].

Cherouat, Ayadi, Mezghani ve Slimani 2008 yılında, 3 boyutlu ince sac malzemelerin hidro şekillendirilmesinin geliştirilmesine yardımcı olmak amacıyla, nümerik bir yöntem sunmuşlardır. Yöntemi, doğrusal olmayan anizotropik sertleştirmeyi açıklayan elastoplastik kurucu eşitliklere dayandırmışlardır. Deneysel çalışmada, 0,4mm kalınlığında dikdörtgen şekilli paslanmaz çelik malzeme kullanmışlardır. Deneysel, kalıp şeklinin etkisi, anizotropik akma ve sertleştirme kuralları üzerine gerçekleştirmişlerdir. Deforme ettikleri sacın incelmeye gelişimini, Tahribatsız Teknik adı verilen bir yöntemle incelemişlerdir. Bu teknikte, tüm kalınlık değişimi ölçümünde ultrasonik bir kaynak kullanmışlardır. Bu tekniğin, pizoelektrik dönüştürücüden gönderilen dalga mekaniğinin, malzemedeki iletimi üzerine dayalı olduğunu belirtmişlerdir. Dönüştürücüyü, sac üzerindeki her bir noktaya yerleştirilmişler ve buradaki noktalardan 0,001 mm hassasiyetle ölçüm yapmışlardır. Simetri ekseni ve diyagonal hat boyunca elde ettikleri ölçümler ve teorik sonuçlar Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Deneysel ve ön görülen sonuçlar arasında uyum olduğunu gözlemlemişlerdir [42].



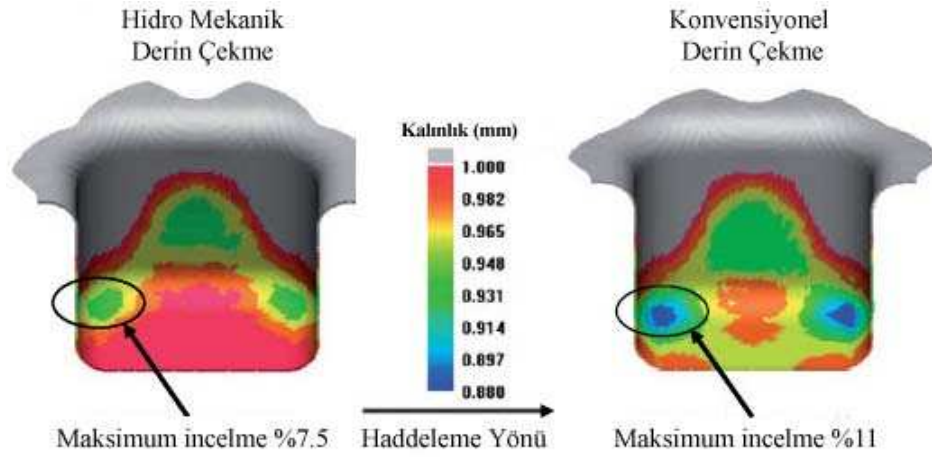
Şekil 1.7. Simetri eksenini ve diyagonal hat boyunca teorik ve deneysel kalınlık.

Del Prete, Anglani, Primo ve Spagnolo'nun 2008 yılında yaptıkları çalışmada, sac hidro şekillendirmenin karmaşık parçaların şekillendirilmesinde kullanıldığını, buna karşın kontrolü oldukça zor olan bir teknoloji olduğunu belirtmişlerdir. Uygun pres ekipmanları ve bu ekipmanları sağlayanların az sayıda olması hidro şekillendirme teknolojisinin dezavantajlarından biri olduğunu açıklamışlardır. Çalışmada 4 farklı geometrik şekil incelemişler, fakat deneysel çalışmayı sadece kare şekillendirme için yapmışlardır. Parça üzerinde etkili plastik gerilmelerin nerede olduğunu, deneysel çalışmada kullanılan uyarıcının yükleme yolu ve kalıp içindeki basıncı incelemişlerdir. Elde ettikleri teorik ve deneysel sonuçların uyumluluğunu araştırmışlardır. Şekillendirme sonrası düzenli kalınlık dağılımının elde edildiğini ve gerilmelerin düzgün bir şekilde dağıldığını göstermişlerdir. Özellikle gerilme yığılmalarının kare parça olmasından dolayı kenar birleşimleri ve köşelerde meydana geldiğini göstermişlerdir [43].

Erkan Önder, A. Erman Tekkaya'nın 2008 yılında yaptıkları çalışmada, klasik derin çekmeyi ve hidro şekillendirme teknolojisini teorik olarak karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, yüksek basınçlı sac metal şekillendirme, hidro mekanik derin çekme ve konvansiyonel derin çekmenin nümerik sonuçlarının kıyaslanması ile en iyi sac metal şekillendirme işleminin ve çeşitli kesitlerdeki parçalar için işlem parametrelerinin belirlenmesi üzerine incelemeler yapmışlardır. Çalışmada, 6 farklı kesit şeklinin derin çekilmesini analiz etmişler ve her kesit için derinliği, karakteristik ölçü oranını ve köşe kavislerini sistematik olarak değiştirmişlerdir. Nümerik analizlerde St14 ve Dc04 çelik tiplerini, eksplisit ortak sonlu eleman kodunda elastoplastik malzeme modelini kullanmışlardır. Silindirik kesitli parçalarda



konvansiyonel çekme işleminde, parçanın alt köşelerinde % 5-10 arasında baskın incelemenin görüldüğünü, ancak hidro şekillendirme ile bu incelmenin çok daha azaltıldığını ortaya koymuşlardır. Kare şekillendirme, konvansiyonel çekme ile kalınlık incelmesinin %15.8 olduğunu, hidro şekillendirme ile bu oranın %10.72'ye indirildiğini göstermişlerdir. Şekil 1.8'de hidro şekillendirme ve konvansiyonel şekillendirmeye üretilmiş parçadaki kalınlık dağılımı gösterilmiştir [44].



Şekil 1.8. Hidro mekanik ve konvansiyonel derin çekmedeki kalınlık incelmeleri.

Panda ve Kumar 2008 yılında, dikiş kaynaklı sac malzemelerin hidro şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Dikiş kaynaklı sacların kullanımının çeşitli avantajları olmasına rağmen şekillendirme işlemlerinde zorlukların meydana geldiğini vurgulamışlardır. Çalışmada düşük karbonlu dikiş kaynaklı çelik malzemeleri şekillendirmişlerdir. Zımba ile sac malzeme arasındaki sürtünme ve karşı basıncın, zımba formuyla olan ilişkisinin, kalınlık dağılımına olan etkisini araştırmışlardır. İşlemi ayrıca, sonlu eleman metodu kullanarak bilgisayar ortamında analiz etmişler ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Sac malzemede karşı basıncın eş zamanlı uygulanmasının ve yağlamanın yüksek gerilebilirliğe ve düzenli kalınlık dağılımına sebep olduğunu ortaya koymuşlardır [45].

## BÖLÜM 2

### GENEL BİLGİLER

Metalik sacların şekillendirilmesi birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Sac malzemelerin şekillendirilmesinin kullanım alanı fazla olması nedeniyle ihtiyaçlar için bulunan çözümlerde farklılık göstermektedir. Metalik sacların şekillendirilmesi sırasında farklı malzeme tiplerinin kullanılmasından dolayı birçok problemler yaşanmaktadır. Karşılaşılan sorunların malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerine dayanmasıyla beraber, bazı problemler işlem yöntem ve prensiplerinin değiştirilmesi ile aşılabilmektedir. Geleneksel yöntemlerde karşılaşılan sorunların çözümleri için alternatif yöntemler arayışına girilmiş ve bu arayış içerisinde bulunan çözümlerden biride hidro şekillendirme teknolojisidir.

Hidro şekillendirme, ilk olarak 1890'lerde 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. Yöntem, yeterli bilgi birikimine ulaşamamış olmasından ve bazı teknik zorluklardan ötürü 1990'lara kadar gereken ilgiyi görememiştir [28].

Bu bölümde hidro şekillendirme işleminin tanımı ve işlem basamakları, hidro şekillendirmenin kullanıldığı alanlar, hidro şekillendirme teknolojisinin çeşitleri ve kendi arasında sınıflandırılması, bu teknolojiyle kullanılan malzemeler, hidro şekillendirmenin avantajları gibi, hidro şekillendirme teknolojisiyle alakalı bilgiler verilmiştir.

## 2.1. HİDRO ŞEKİLLENDİRME

Hidro şekillendirme, metalik malzemelerin istenilen şekilde elde edilmesinde akışkan basıncının kullanıldığı bir imalat yöntemidir. Daha geniş bir tanım yapılırsa; hidrolik şekillendirme, temel olarak metal sac veya tüp malzemenin akışkan bir ortam vasıtasıyla (su, viskoz, polimerik malzeme vs.) kapalı bir kaptaki şekillendirilmesidir. Bu kadar geniş bir tanıma olmasından dolayı, hidrolik şekillendirme daha çok benzer işlemler için kullanılan genel bir ad olarak düşünülebilir [28].

Hidro şekillendirme sisteminde, sac malzemenin bir yada her iki tarafı şekillendirilen parçaya destek olan, basınçlı viskoz kullanılmaktadır. Böylece dışı kalıba ihtiyaç duyulmadan şekillendirme gerçekleştirilmektedir. Basınçlı akışkanın görevi;

- Şekillendirme işleminin başlangıcından bitimine kadar sac malzemeyi desteklemek ve böylece şekillendirmenin daha verimli olmasını sağlamak,
- Malzeme hatalarının başlangıcını ertelemek,
- Sac malzemenin bir yada iki tarafına birden uygulandığında kırışıklıkların oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktır.

## 2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRMENİN KULLANILDIĞI ALANLAR

Hidro şekillendirme, uygulama alanı fazla olan üretim yöntemlerinden birisidir. Metalik sacların kullanıldığı bütün endüstri dallarında hidro şekillendirme yöntemi uygulanmaktadır. Bu endüstri dallarını sıralarsak;

- Uzay ve havacılık sanayi.
- Otomotiv sanayi.
- Tarım araçları.
- Enerji.
- Üretim ve imalat sanayi.
- Yemek sanayi.
- Aydınlatma.
- Sağlık.

- Eğlence.
- Ofis ve dış mekan mobilya sanayi.
- Metal şekillendirme.
- Plastik enjeksiyon kalıp ekipmanları.

### **2.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ**

Hidrolik şekillendirme bir tür değişken biçimli takım (soft tool) veya diğer bir deyişle esnek şekillendirme teknolojisidir. Değişken biçimli takım ile 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 [28].

Genel olarak hidro şekillendirme 2 gruba ayrılmaktadır;

- Tüp hidro şekillendirme.
- Sac hidro şekillendirme.

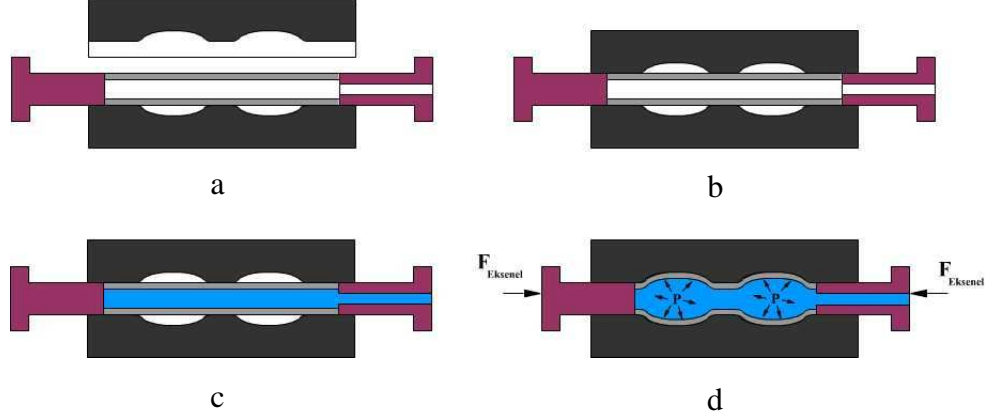
#### **2.3.1. Tüp Hidro Şekillendirme**

Tüp hidro şekillendirme, iki ucu açık boru malzemenin iç yüzeyine uygulanan akışkan basıncıyla malzemenin şeklinin değiştirilmesidir. Şişirme ile şekillendirmeye benzerlik göstermektedir. Tüp hidro şekillendirmede zımba yerine akışkan sıvı kullanılmaktadır.

Malzemeye uygulanan iç basınç ile tüpün yüzeysel genişmesi sağlanmaktadır. Bu genişleme aksel yönde sıfırdır. Başlangıçta tüp daireselliğini korumakla beraber çapında büyüme meydana gelmektedir [4]. Tüp malzeme iki kalıp yarımı arasına yerleştirilir. Malzemedeki genişleme bu kalıp yarımına doğru gerçekleşmektedir. Şekil 2.1’de tüp hidro şekillendirme için işlem basamakları gösterilmiştir.

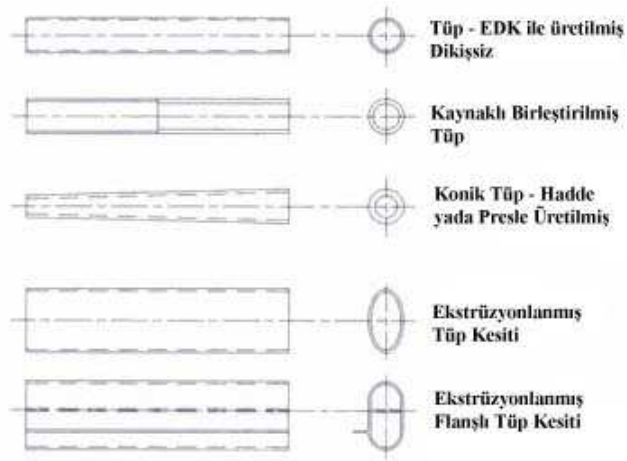
Tüp hidro şekillendirmede değişik seviyeli akışkan basıncı kullanılmaktadır. Akışkan basıncı kalıbın kapanması aşaması boyunca kullanılır. Bu basınca *Kalıp Kapanma*

*Basıncı* denir. Tüp malzeme kalıp kapandıktan sonra iki uçtan uygulanan kuvvetle kalıp içine itilir. Böylece *Eksenel Besleme* etkisi oluşturulmaktadır. Eksenel beslemeden sonra tüp içerisindeki basınç şekillendirme için gerekli olan maksimum seviyeye arttırılır. Bu basınç genellikle *Kalibrasyon Basıncı* olarak adlandırılır [46].



Şekil 2.1. Tüp hidro şekillendirme işlem basamakları. a. Kalıp açık, b. Kalıp kapalı, c. Sıvı gönderimi, d. Basınç arttırımı.

Sac metal hidro şekillendirmeden daha fazla bilinen tüp hidro şekillendirme otomotiv ve diğer endüstrilerde, yüksek hacimli üretimler için uygulanmaktadır. Şekil 2.2’de pek çok uygulama için elektrik direnç kaynağı (EDK) yada lazer kaynağı ile üretilmiş tüp malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Hidro şekillendirme için tüp malzemeler.

Üretilecek ürüne bağlı olarak tüp malzemeler alüminyum ekstrüzyondan, bakır borulardan, tek tek paralel veya konik kesitli sac malzemelerden üretilebilmektedir. Şekil 2.3’de tüp hidro şekillendirme yöntemi ile üretilmiş ürünler gösterilmiştir.



a



b

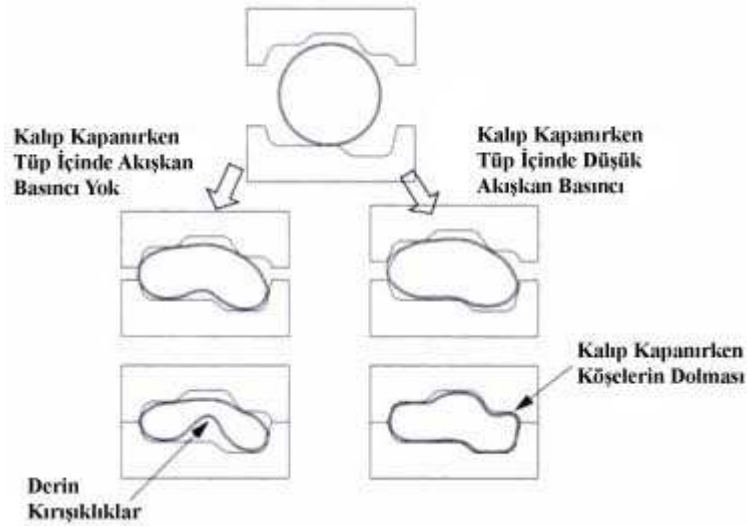
Şekil 2.3. Tüp hidro şekillendirme ile üretilmiş ürünler. a. Farklı kesitli, b. Farklı tip.

Tüp hidro şekillendirme birbirleriyle ilişkili 5 işlem sınıfına ayrılmaktadır;

- Düşük basınçlı hidro şekillendirme.
- Yüksek basınçlı hidro şekillendirme.
- Çoklu basınçlı hidro şekillendirme.
- Hidro şişirmeyle şekillendirme.
- Körüklü hidro şekillendirme.

### 2.3.1.1. Düşük Basıncılı Hidro Şekillendirme

Düşük basınçlı hidro şekillendirmede, şekillendirilen kesitin çevre uzunluğu başlangıçtaki tüp malzeme ile neredeyse aynıdır. Bazı kalıplarda, tüp malzemenin özellikleri ve kalınlığına bağlı olarak çevre uzunluğu yaklaşık olarak %3 oranında artabilmektedir. Hidro şekillendirme işlemi boyunca kalıp ilk kapatıldığında tüpün içinde akışkan basıncı bulunmamaktadır. Bu yüzden Şekil 2.4'te gösterildiği gibi tüp malzemenin yüzeyi deforme olup, kırışıklıklar meydana gelmektedir. Bu kırışıklıklar daha sonra akışkan basıncı ile giderilebilmektedir. Ama derin kırışıklıklar düşük akışkan basıncı ile giderilemeyebilir. Malzeme, üst yüzeydeki köşe kıvrımlarını tamamen dolduramayabilir. Düşük basınçlı hidro şekillendirmede parça kesitleri, kalıbın kapanması yüzünden meydana gelen başlangıç kırışıklıklarını en aza indirmek için dikkatlice tasarlanmalıdır [46].



Şekil 2.4. Düşük, yüksek, çoklu basınçlı hidro şekillendirme işleminde kalıbın kapanması sırasında kesit şekillenmesi. Sıvı basıncılı (sağ) ve sıvı basıncısız (sol) durum.

Bu olumsuzlukları gidermek için düşük basınçlı şekillendirme kullanılmaktadır. Bu işlemde tüp malzeme kalıp yarımları arasına yerleştirilir. Kalıp kapanmadan tüp malzeme içerisine düşük miktarda akışkan basıncı verilmektedir. Bu sayede derin kırışıklıklar önlenmekte ve düşük akışkan basıncı sayesinde kalıp içerisindeki kıvrımlar daha rahat bir şekilde dolmaktadır. Bu işlemde tüp malzeme de yok

denecek kadar az bir genleşme meydana gelmekte ve malzeme kesitinde çok az kalınlık değişimi gözlenmektedir.

### **2.3.1.2. Yüksek Basıncılı Hidro Şekillendirme**

Yüksek basınç hidro şekillendirilen kesitin çevre uzunluğu malzemenin plastik uzama yüzdesinin izin verdiği limite kadar uzamasına olanak tanımaktadır. Kalıbın kapanması esnasında oluşabilecek herhangi bir yüzey deformasyonu ve kırışıklık, yüksek basınç kullanımı ile giderilmektedir. Yüksek genişlemeden dolayı, hidro şekillendirilen kesit genellikle düşük geri yaylanma ve ölçü tamlığına sebep olan yüksek plastik gerilmelere maruz kalmaktadır. Kesit çevresindeki kalınlık değişimi genelde yüksektir. İncelmeler malzemenin köşelerinde meydana gelmektedir. Yüksek basınç, ayrıca düşük basınç işlemi ile mümkün olmayan karmaşık kesitlerin oluşturulmasına imkan sağlamaktadır [46].

Yüksek basınçlı şekillendirme işleminde, yüksek basıncı üretmek ve bu basıncı kullanmak için sağlam ekipmanlar ve büyük presler gerekmektedir. Başlangıç maliyeti fazla olmasına rağmen üretim döngüsü düşük basınçlı hidro şekillendirmeye oranla daha yüksektir.

### **2.3.1.3. Çoklu Basıncılı Hidro Şekillendirme**

Düşük basınçlı hidro şekillendirmenin bir çeşidi de *çoklu basınçlı hidro şekillendirme* yada *sıralı basınçlı hidro şekillendirme* olarak da adlandırılır. Çoklu basınç işlemi için, akışkan sıvı, kalıp açık pozisyondayken tüp içerisine gönderilir. Akışkan basıncı kalıp kapanma basıncına kadar arttırılır ve kalıp kapandığı zaman tüp içerisindeki basınç kalibrasyon basıncına kadar yükseltilir.

Kalıp kapanma aşaması süresince akışkan sıvı bir çeşit mil görevi görmektedir. Böylece düşük basınçlı hidro şekillendirmenin sebep olduğu aşırı kırışıklık ve yüzey deformasyonuna engel olunmuş olur. Şekil 2.4'te kalıp kapanırken parça içinde sıvı basıncı ve sıvı basıncının olmadığı kesit şekilleri kıyaslanmaktadır. Malzemenin

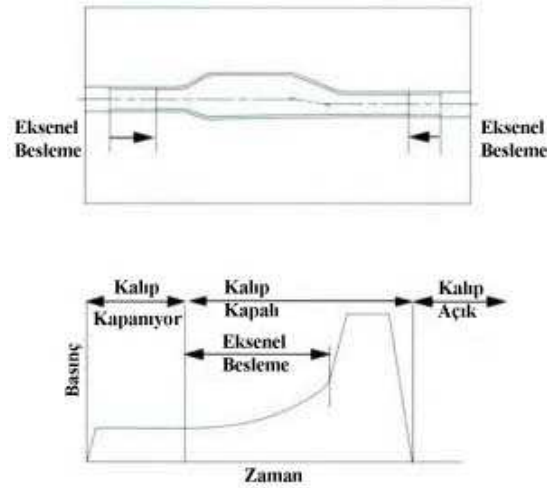


kalıp ayırma çizgisi boyunca sıkışmaya eğilimi önemli ölçüde azaltılmakta ve malzeme kalıbın kapanmasıyla akışkan tarafından köşelere doğru itilmektedir [46].

Malzemenin kesit çevresinin genişlemesi % 1-3 oranında tutulduğunda çoklu basınçlı hidro şekillendirme, karmaşık kesitleri şekillendirebilen, düşük basınçlı hidro şekillendirmenin tüm avantajlarına sahiptir. Bu metodun kullanımı ile, yağlama için gereksinim önemli ölçüde azaltılabilir yada giderilebilmektedir. Düşük basınçlarda bile çok daha iyi yüzey formları elde edilebilir.

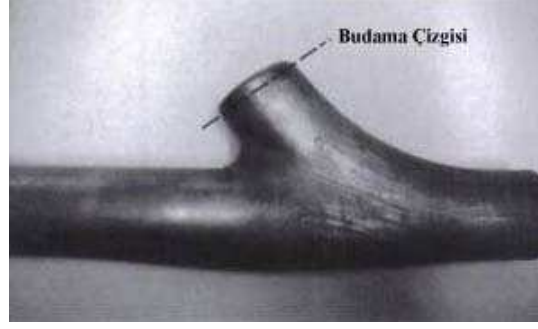
#### 2.3.1.4. Hidro Şişirmeyle Şekillendirme

Hidro şişirmede, düşük ve yüksek basınçlı şekillendirmelerden farklı olarak, tüpün yüzeysel genişmesi tamamen kalıp kapalı iken gerçekleşmektedir. Akışkan içerisindeki basınç sıralı bir şekilde artmaktadır. Bu yöntemle T ve Y birleştirmeli tüp malzemelerin üretilmesi mümkündür. Şekil 2.5'te hidro şişirme boyunca basınç sıralaması gösterilmiştir.

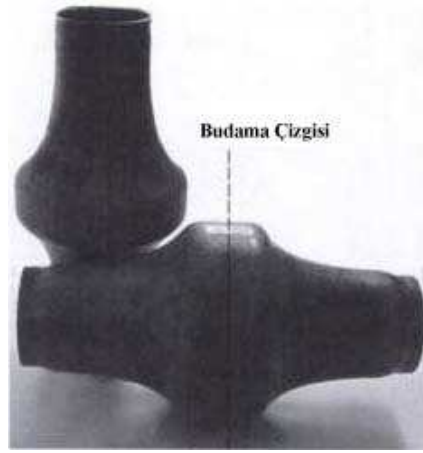


Şekil 2.5. Hidro şişirme işlemi boyunca basınç sıralaması [46].

Şişirme işlemi boyunca tüpün önemli bir uzunluğu kalıp boşluğuna itilir. Genellikle bu işlem; uzun parçalarda yüksek genişleme oranlarının elde edilmesinde, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi Y birleştirme ve T kesit kollarının çıkarılmasında, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi egzoz parçaları ve şaftların en az kalınlık incilmesi ile üretiminde kullanılır [46].



Şekil 2.6. Hidro şekillendirilmiş Y birleştirmeli egzoz.



Şekil 2.7. Hidro şekillendirilmiş otomotiv egzoz konisi.

Son besleme işlemi parçanın şekillenebilirliğini oldukça arttırmaktadır. Büyük gerilmeler iç basınç tarafından, kesit çevresinde meydana gelirken, en düşük gerilme, aksenal kuvvet tarafından tüp malzemenin uzunluğu boyunca uygulanır. Son besleme ve iç basınç, şekillenme limit diyagramında kalınlık değişiminin sabit bir çizgi şeklinde kalması için kontrol edilir. Sabit kalınlık çizgisi ne kadar uzunluktaysa kesit şekline ve genişleme miktarına bağlı olarak işlem ilerletilebilir. Uzunluk boyunca sıkıştırıcı kuvvetlere karşı çıkan kısmi dayanımın oluşması ve kesit genişlemesinden dolayı geometride değişiklikler meydana gelebilir [46].

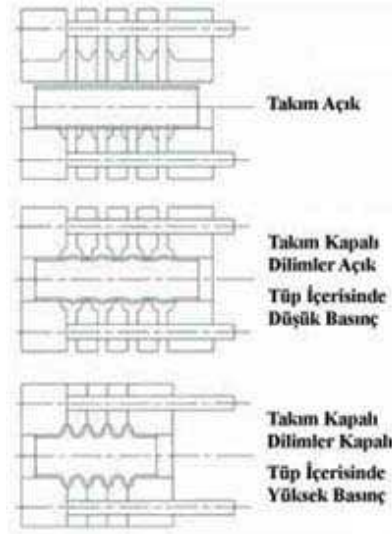
### 2.3.1.5. Körüklü Hidro Şekillendirme

Körüklü parçaların, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, hidro şekillendirme yöntemi ile üretilmesi mümkündür. Körüklü şekillendirme için, Şekil 2.9’da gösterilen dilimlere ayrılmış takım kullanılır. Malzeme kalıp alt yarımı üzerine yerleştirildikten sonra

kalıp üst yarımı aksel yönde, hala açık olan takım dilimleriyle birlikte aşağı indirilir. Sonra düşük basınçlı akışkan, tüp malzeme içine gönderilir ve açık dilimli takım hafifçe malzeme yüzeyini deforme etmesi için malzemeye baskı uygulanır. Daha sonra dilimler, her körük içine malzemenin dolması için aksel yönde baskı uygular ve dilimlerin kapanması ile malzeme içindeki akışkan basıncı, kalıp boşluğunun şeklini alarak körüklerin oluşması için tamamen arttırılır.



Şekil 2.8. Hidro şekillendirilmiş körüklü parça.



Şekil 2.9. Körüklü şekillendirme işlem sırası.

### 2.3.2. Sac Hidro Şekillendirme

Sac metal hidro şekillendirme, tamamıyla geleneksel çekme yöntemi ile karşılaştırılabilmektedir. Geleneksel çekme yönteminde olduğu gibi kalıp, zımba ve baskı plakası kullanılmaktadır. Sac metal hidro şekillendirme de kalıp yada zımba yerine akışkan basıncı yer almaktadır. Şekillenme boyunca sac malzemenin sadece

bir tarafı akışkan sıvıya, kauçuk zara yada diyaframa maruz kalmaktadır. Genellikle bu işlemle, sac malzemenin tüm yüzeyinde daha büyük ve düzgün bir uzamanın gerçekleşmesine olanak sağlanır.

Sac hidro şekillendirme, geleneksel çekme yöntemlerine kıyasla 1,5 kez 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 maliyetleridir. Ancak geri dönüşlerin yüksek olmasından dolayı sac hidro şekillendirme düşük adetli üretimler için daha uygundur [46].

Sac hidro şekillendirme 5 sınıfa ayrılmaktadır;

- Diyafram destekli hidro şekillendirme.
- Hidro mekanik derin çekme.
- Hidrolik esneterek şekillendirme.
- Birleştirilmiş esnetme ve derin çekme.
- Çift kalıplı hidro şekillendirme.

### **2.3.2.1. Diyafram Destekli Hidro Şekillendirme**

Bu metot, 1940'ların sonlarında ve 1950'lerin başlarında, küçük miktardaki derin çekilecek parçaların üretiminde, düşük maliyetli bir metoda ihtiyaç olduğu için geliştirilmiştir. Ağırlıklı olarak hava araçlarının parçalarının şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknikte sıvı ile çevrelenmiş bir oda, elastik bir diyaframla (kauçuk vs.) kapatılmıştır. Diyaframın yüzeyi, baskı plakası ve aynı zamanda her şekle uyabilen kapsamlı bir kalıp görevi görmektedir. Diğer kalıp elemanları Şekil 2.10'da görülen zımba ve baskı plakasıdır. Zımbanın üst tarafı baskı plakasıyla aynı hizaya konumlanır. Sac malzeme uygun bir yağlama ile kaplanır ve baskı plakası halkasının altına yerleştirilir. Bazen esnek giydirmeye elemanı sac malzemenin üzerine, kauçuk diyaframı korumak için yerleştirilir. Şekillenme odası aşağıya indirilir ve oda içindeki basınç parça için önceden ayarlanmış seviyeye kadar artırılır. Zımba önceden belirlenen hızda şekillenme odasına doğru ilerletilir. Zımbanın ilerlemesi boyunca, esnek diyafram, akışkan basıncı altındaki durumda sac malzemeyi

zımbanın şekline alacak şekilde sarar. Daha sonra basınç azaltılır, şekillenme odası kaldırılır ve zımba şekillendirilmiş parçadan ayrılır [46]. Esnek diyafram kullanımında, malzeme üzerindeki basıncın kontrol edilmesiyle şok çizgilerinde büyük miktarda azalma ve bunların giderilmesi mümkündür. Malzemedeki inceltme minimum seviyededir.



Şekil 2.10. Diyafram destekli hidro şekillendirme.

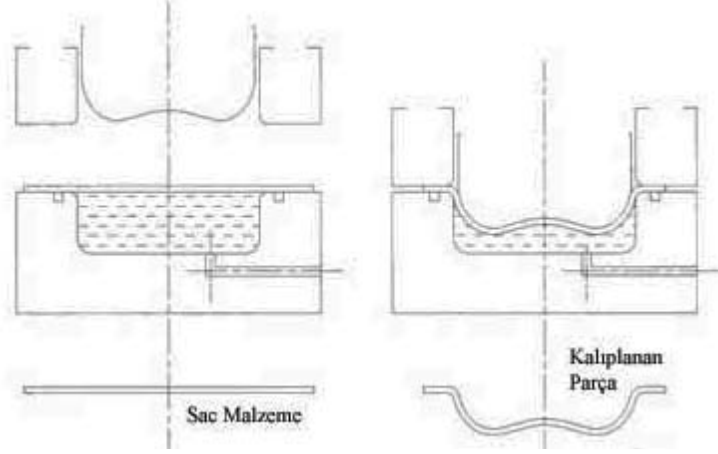
### 2.3.2.2. Hidro Mekanik Derin Çekme

Bu işlemde temel ekipmanlar olarak, Şekil 2.11’de gösterilen zımba, baskı plakası ve sıvı odası kullanılmaktadır. Zımba genellikle yukarı pozisyonda olup, baskı plakası içine yerleştirilmiştir. Sac malzeme alt taraftaki kalıba yerleştirildiğinde, sızdırmazlık elemanını sıkıştırmak için baskı plakası aşağı indirilmektedir. Daha sonra, sıvı odası basınçlı akışkan ile doldurulur ve zımba sac malzemeyi sıkıştırarak, şekillendirme gerçekleştirilmektedir. Sıvı odasındaki akışkan basıncının etkili bir şekilde kontrolü, malzemenin düzgün bir şekilde uzamasını ve zımbanın profilini almasını sağlamaktadır [46].

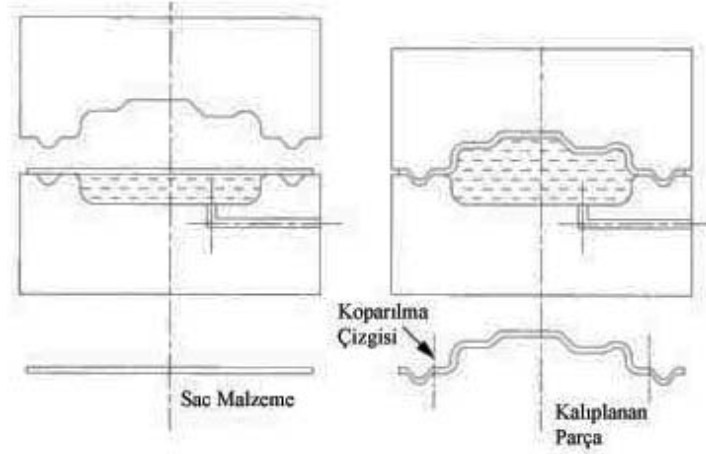
### 2.3.2.3. Hidrolik Esneterek Şekillendirme

Bu işlem için hidrolik basınç odasının ve kalıbın yerleşimi Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Kalıp preste aşağı yada yukarı pozisyonda olabilmektedir. Sac malzeme, kalıp yarımının üzerine konulduktan sonra baskı plakası ile sıkıştırmakta ve kanallardan kilitlenmektedir. Sıvı odasındaki basınç etkili bir şekilde artarak

malzemeyi esnetmekte ve kalıbın şeklini almasını sağlamaktadır. Bu yöntemde gerçekleştirilen çekme yüksekliği malzemenin şekillenme özelliğine bağlıdır [46].



Şekil 2.11. Hidro mekanik derin çekme.

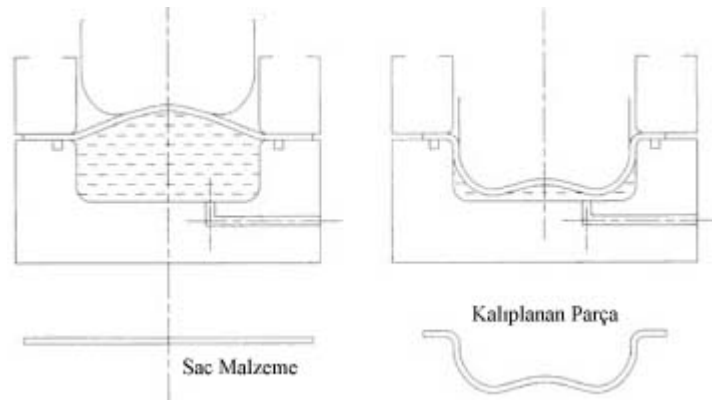


Şekil 2.12. Hidrolik esneterek şekillendirme.

#### 2.3.2.4. Birleştirilmiş Esnetme ve Derin Çekme

Bu yöntemde sac malzemeye, zımba hareketinden önce, bir ön akışkan basıncı verilerek, bir miktar şişirilmektedir. Şişirilen malzeme, zımbanın aşağı doğru hareketi ile şekillenmektedir. Belli bir basınç altındaki akışkan, zımbanın hareketi ile daha da sıkışmaktadır. Bu şekilde malzemenin zımbanın şeklini daha iyi alması sağlanmaktadır.

Şekil 2.13’de görüldüğü gibi, uygun kalıp tasarımı, malzemenin akış kontrolünün iyi hesaplanmasıyla derin çekme ve esnetme operasyonları birleştirilebilmektedir. Bu birleştirilmiş metot, araç gövde parçalarının üretimine daha uygundur. Sac malzemenin esnetilmesiyle, malzemenin sertleşmesi ve parçanın yüzey alanının genelinde düzgün bir gerilme dağılımı oluşmaktadır. İyi kaliteli yüzeyler sac hidro şekillendirmenin bu yöntemi ile üretilebilmektedir. Bu metotla, yüksek çekme derinlikleri gerçekleştirilebilmekte ve karmaşık geometrili parçalar üretilmektedir [46].



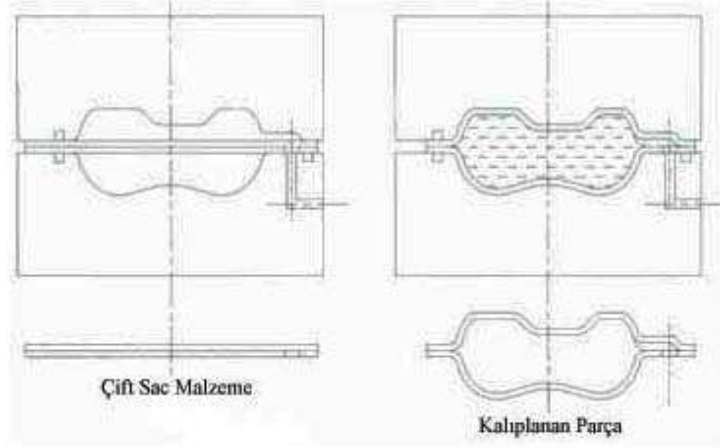
Şekil 2.13. Birleştirilmiş esnetme ve derin çekme.

### 2.3.2.5. Çift Kalıplı Hidro Şekillendirme

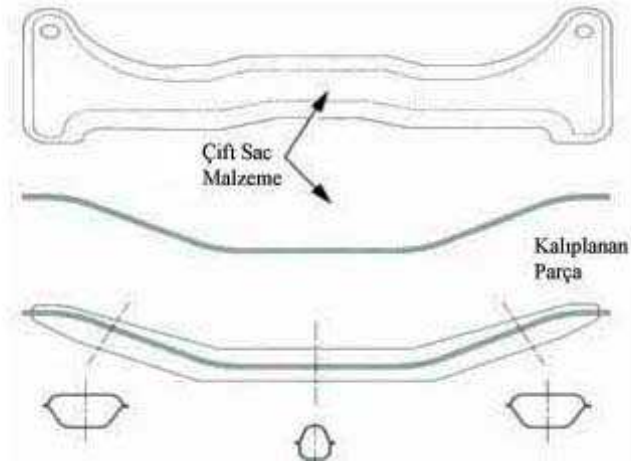
Şekil 2.14’de gösterilmiş, sac hidro şekillendirmenin bu yöntemi, *Yastık Şekillendirme* (Pillow Forming) yada *Paralel Düzlemli Şekillendirme* (Parallel-Plate Hydroforming) olarak da adlandırılır. Bu yöntemde, çevrelerinden kaynak edilmiş iki tane sac metal malzeme üst ve alt kalıp yarımları arasına yerleştirilmektedir. Akışkan basıncı iki sac malzemenin arasına gönderilerek, malzemeleri sündürme ve çekme yöntemi ile kalıbın şeklini alması sağlanmaktadır [46].

Bu yöntem, Şekil 2.15’de gösterildiği gibi, montaj halinde yada tamamen kapalı parçaların şekillendirilmesinde kullanılabilir. Malzemeler ihtiyaca göre farklı kalınlık ve özelliklerde olabilmektedirler. Saclar, yapıştırıcı ile birleştirilebilir yada flanşlar ile sıkılmaktadır. Sac plakalar kenarlarından kaynak edilerek flanşlar kullanılmayabilir. Bu yöntem için muhtemel uygulamalar tüp malzemelerden

üretilemeyen yakıt tankı gibi tamamen kapalı yada değişik kesitli elemanlar ve parçalardır.



Şekil 2.14. Çift kalıplı hidro şekillendirme.



Şekil 2.15. Çift kalıplı hidro şekillendirme ile üretilen ürün.

#### 2.4. HİDRO ŞEKİLENDİRMEDE KULLANILAN MALZEMELER

Hidro şekillendirme yönteminin uygulama alanı çok fazla olduğu gibi, bu yöntemde kullanılan malzemelerde çok çeşitlidir. Kullanılan başlıca malzemeler:

- Alüminyum ve alüminyum alaşımlar,
- Pirinç,



- Soğuk haddelenmiş çelik,
- Sıcak haddelenmiş çelik,
- Paslanmaz çelik,
- Bakır.

## 2.5. HİDRO ŞEKİLLENDİRME SİSTEMİNİN AVANTAJLARI

Günümüzde geleneksel şekillendirme yöntemlerine alternatif olarak metalik sacların hidrolik şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmesi geçerli bir uygulamadır. Şekillendirilmesi zor olan parçaların üretilmesinde hidro şekillendirme yöntemi geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha fazla avantaj sunmaktadır [15]. Hidro şekillendirmenin çok sayıda avantajı vardır ve bu avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

- **Ucuz Takımlar**

Pek çok hidro şekillendirme işleminde sadece erkek kalıp yada parçanın şeklinde bir hidro şekillendirme zımbası kullanılmaktadır. Hidro şekillendirme makinelerindeki kauçuk diyafram ortak bir dişi kalıp vazifesi görmektedir. Böylece takım maliyeti geleneksel pres kalıplarına oranla yaklaşık olarak %50 civarında azalmaktadır.

- **Çoklu Operasyonların Giderilmesi**

Geleneksel çekme yöntemleriyle 2 yada 3 işlemde üretilen parçaların, hidro şekillendirme yöntemi ile tek bir operasyonda üretilmesi mümkündür.

- **Karmaşık Şekil ve Biçimlerin Şekillendirilmesinde Esneklik**

Hidro şekillendirmeye, diğer çekme yöntemleri ile üretimi mümkün olmayan düzensiz ve karmaşık geometriler şekillendirilebilir.

- **Çok Çeşitli Malzemelere Uygunluk**

Neredeyse bütün sac malzemelerin hidro şekillendirme ile soğuk şekillendirilmesi mümkündür. Aynı ürün, farklı kalınlıklardaki farklı

malzemeler ile kalıp ekipmanlarını değiştirmeye ihtiyaç duymadan şekillendirilebilmektedir.

- **Hızlı Takım Değişimi**

Kalıp elemanlarının basitliğinden dolayı sistemin kurulumu kolay ve çabuktur.

- **Son İşlem Maliyetlerinin Giderilmesi**

Hidro şekillendirme ile üretim sonrasındaki son işlem maliyetleri ciddi oranda azalmakta ve giderilebilmektedir.

- **Sıkı toleransların Sağlanması**

Hidro şekillendirme, diğer metal şekillendirme yöntemlerinden farklı olarak ölçü tamlığını en iyi şekilde sağlarken, pahalı ikincil işlemler kullanmadan toleransları en sıkı aralıklarda tutabilmektedir.

- **Malzemedeki İncelmelerin Azlığı**

Hidro şekillendirme diğer şekillendirme işlemlerinin aksine malzemenin akmasına izin vermektedir. Sonuç olarak malzemedeki incelmeler en aza inmektedir. Böylece plastik deformasyon dağılımı en iyi şekilde gerçekleşmektedir.

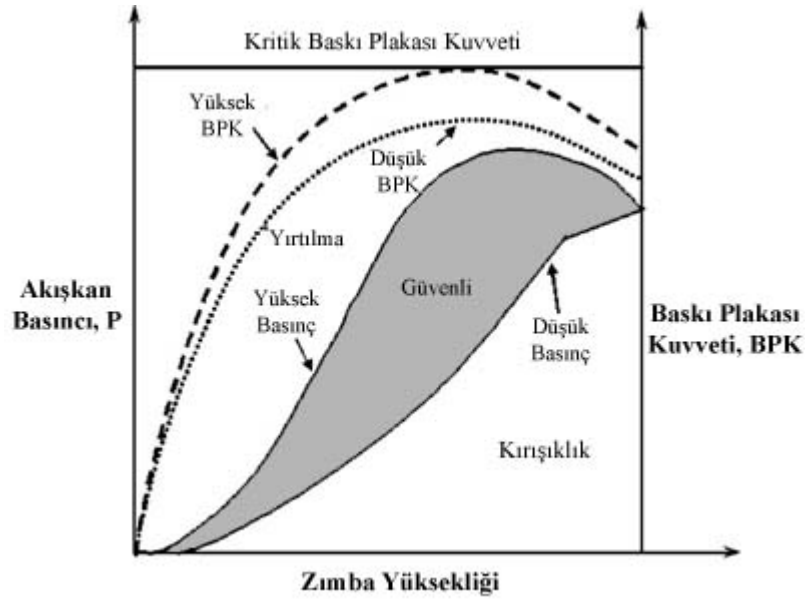
## **2.6. HİDRO şEKİLENDİRMEİNİN SINIRLILIKLARI**

Sac hidro şekillendirme işlemi boyunca karşılaşılan güçlükler 2 sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar; malzeme güçlükleri ve akışkan basıncı. Malzeme güçlükleri, sac malzemenin seğimine ve davranışına, akışkan basıncı güçlüğü ise, sistemdeki akışkanın kontrol edilmesine işaret etmektedir.

En büyük engellerden biri, hidro şekillendirme işlemi için seçilen malzemenin sünekliliği ve akışkan basıncı arasında bulunan hassas dengenin sağlanmasıdır. Akışkan basıncı, sac malzemeyi zımbanın şekline uyum sağlayacak eğrilik ve kıvrımlardan, bükme ve sündürmeye yeterli derecede yüksek olması gereklidir. İkinci zorluk ise işlem boyunca akışkan basıncı ve zımba stroğu arasındaki ilişkidir.

Çekme işleminde, akışkan basıncı uygulandığında, sac malzeme baskı plakasına karşı sıkıştırılmaktadır. Akışkan basıncının büyüklüğüne ve baskı plakasının sac malzeme ile temas alanına bağlı olarak baskı plakası kuvveti oluşturulmaktadır. Uygulanan basınç üst akışkan basınç seviyesini aştığında, sonuçlanan baskı plakası kuvveti, sac malzemenin kopmasına neden olan kritik baskı plakası kuvvetini aşmaktadır. Diğer yandan, uygulanan basınç alt akışkan basınç seviyesinden düşük olursa, sonuçlanan baskı plakası kuvveti, flanş bölgesinde meydana gelen sıkıştırıcı gerilmeleri durdurmaya yeterli derecede olmayacaktır. Böylece malzemede kırışıklıklar meydana gelecektir.

Kritik baskı plakası kuvveti, istenilen derinliğe ulaşmadan, sınırlardan malzemeyi kilitleyen ve saf sündürme şartı altında malzemede kopmanın meydana geldiği, düşük sürekli akışkan basıncıyla benzetilmektedir. Sac hidro şekillendirmede, sac malzemenin baskı plakası ile sürekli temas alanı azalmaktadır. Bu yüzden, hedeflenen tasarım için kritik akışkan basıncının tanımlanması zordur. En iyi akışkan basıncı-zımba stroğu ilişkisi yüksek ve düşük akışkan basıncı seviyeleri arasındadır. Bu sınırlar arasında ki değerlerle üretilen parçalarda, kopma ve kırışıklıkların olmadığı görülmektedir. Şekil 2.16'da akışkan basıncı-zımba stroğu arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Akışkan basıncı-zımba stroğu arasındaki ilişki.

## BÖLÜM 3

### SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu Elemanlar Metodu, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan sayısal bir çözüm yöntemidir. Bu metotta, ele alınan mühendislik probleminin çözüm bölgesi alt bölgelere ayrıştırılır ve her alt bölgede aranan fonksiyonun ifadesi polinom olacak şekilde seçilmektedir. Belirli işlemlerle, her alt bölgede polinom olarak kabul edilen çözümün katsayıları belirlenmeye çalışılmaktadır. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilen ve değişik sonlu elemanlar kullanılabilir. Gerektiğinde bazı alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir. Böylece, geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlanmaktadır. Bir sistem için SEM kullanıldığında, ilk olarak fiziksel problemin matematiksel modeli kurulmakta veya hazır alınmaktadır. Daha sonra, ele alınan probleme ait Varyasyonel İfade /Formülasyon kurulup, çözüm bölgesi sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrıştırılmaktadır. Bu işleme *ayrıştırma* veya *sonlu eleman ağı (mesh)* adı verilmektedir.

SEM, değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmekte ve anizotropik, nonlinear, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleriyle işlem yapabilmektedir. Sınır koşulları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, oldukça basit satır sütun işlemleriyle denklem sistemine dahil edilebilmektedir. SEM matematiksel olarak genelleştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için aynı model kullanılabilir. Yöntemin hem fiziksel anlamı hem de matematiksel temeli mevcuttur. Bunlara rağmen, bazı problemlere uygulanmasında zorluklar yaşanmakta, elde edilen sonucun doğruluğu her zaman verilerin doğruluğuna bağlı olmaktadır.

Bu bölümde, sonlu elemanlar metodu, tarihsel gelişimi, sac şekillendirmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında simülasyonu, çalışmada kullanılan nümerik analiz programı, kullanılan eleman ve malzeme tipleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

### **3.1. SONLU ELEMANLAR METODU**

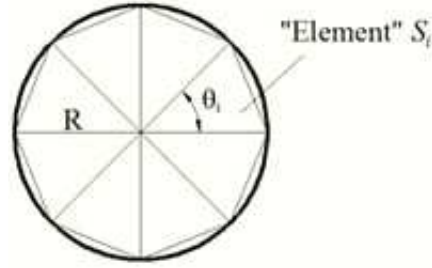
Tabiatta karşılaşılan her hadise fizik kanunları yardımıyla ve matematik diliyle anlaşılmalı çalışılır. Bu olayların biyolojik, jeolojik veya mekanik olması, durumu değiştirmemektedir. Her olay kendine ait büyüklükler yardımıyla cebirsel, diferansiyel veya integral denklemler yardımıyla büyük oranda ifade edilebilir [47].

İnsanlar çevresinde meydana gelen olayları ya da karşılaştıkları problemleri çoğu zaman kolayca kavrayıp doğrudan çözemezler. Bu yüzden karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir [47].

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkinci olarak, her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin, problemin çözümünde yeterli olmasıdır [47].

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir [47]. Kısaca problemi parçalara ayırarak basitleştir ve öyle çöz mantığından hareketle geliştirilmiş bir problem çözüm tekniğidir. İşlemin daha rahat anlaşılması

için Şekil 3.1’de bir dairenin alanının bulunması için elemanlara bölünmesi gösterilmiştir [48].



Şekil 3.1. Dairenin sonlu sayıda elemana bölünmesi.

Üçgenin alanı;

$$S_i = \frac{1}{2} R^2 \sin \theta_i \quad (3.1)$$

Dairenin alanı;

$$S_N = \sum_{i=1}^N S_i = \frac{1}{2} R^2 N \sin \left( \frac{2\pi}{N} \right) \rightarrow \pi R^2 \quad N \rightarrow \infty \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde N = Toplam üçgen sayısı (eleman)'dır.

Sonlu elemanlar metodundan (Finite Element Method (FEM)) yada sonlu elemanlar analizinden (Finite Element Analysis (FEA)) günlük yaşamın her yerinde hatta her aşamasında yararlanılmaktadır. Karmaşık problemlerin çözümü için endüstri dallarının çoğunda bu yöntem kullanılmaktadır. sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanlarını sıralarsak;

- Makine, uzay, havacılık, inşaat ve otomotiv sanayinde.
- Yapısal analizlerde (statik/dinamik, linear/nonlinear).
- Geometrik yapılarda.
- Biyomekanikte [48].

- Akışkanlar mekaniği, ısı transferi, elektromanyetik analiz ve akustik gibi pek çok fiziksel olayın çözümünde.

### 3.2. SONLU ELEMANLAR METODUNUN TARİHSEL GELİŞİMİ

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak yapı analizinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk çalışmalar Hrennikoff (1941) ve Mc Henry (1943) tarafından geliştirilen, yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtuel is prensibini kullanarak bir direkt yaklaşım metodu geliştirmişlerdir. Turner ve diğerleri (1956) bir üçgen eleman için rijitlik matrisini oluşturmuşlardır. “Sonlu Elemanlar” terimi ilk defa, Clough (1960) tarafından çalışmasında telaffuz edilmiştir. Metodun üç boyutlu problemlere uygulanması iki boyutlu teoriden sonra kolayca gerçekleşmiştir [48].

İlk gerçek kabuk elemanlar aksenal simetrik elemanlar olup (Grafton and Strome (1963)), bunları silindirik ve diğer kabuk elemanları izlemiştir (Gallagher (1969)). Araştırmacılar 1960’lı yılların başlarında nonlinear problemlerle ilgilenmeye başlamışlardır. Turner ve diğerleri (1960) geometrik olarak nonlinear problemler için bir çözüm tekniği geliştirmişlerdir. Sonlu elemanlar metodu ile stabilite analizi ise ilk Martin (1965) tarafından tartışılmıştır. Statik problemlerin yanı sıra, dinamik problemlerde sonlu elemanlar metoduyla incelenmeye başlanmıştır. (Zienkiewicz ve diğerleri (1966), Koenig ve Davids (1969)). 1943 yılında Courant bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir [48].

Yapı alanı dışındaki problemlerin sonlu elemanlar metoduyla çözümü 1960’lı yıllarda başlamıştır. Örneğin Zienkiewicz ve Cheung (1965) sonlu elemanlar metodu ile Poisson denklemini çözmüşlerdir. Doctors (1970) ise metodu potansiyel akışa uygulamıştır. Sonlu elemanlar metodu geliştirilerek ısı transferi, yer altı sularının akışı, manyetik alan ve diğer birçok alana uygulanmaktadır [48].

### 3.3. METALİK SAÇLARIN DEFORMASYONUNUN BİLGİSAYAR ORTAMINDA SİMÜLASYONU

#### 3.3.1. İmplicit Yöntem

Bu yöntemde, denge denklemleri  $t + \Delta t$  anında çözülmektedir. Sac şekillendirmedeki birçok nonlinear davranış nedeni ile denge konumu iterativ olarak elde edilmektedir. Genelde, denklem 3.1’de verilen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülmektedir.

$$\Delta u^{(i+1)} = \Delta u^{(i)} + K_t^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.3)$$

Burada  $K_t$  bilinen teğetsel direngenlik matrisi,  $F$  dış kuvvetlerin vektörü,  $I$  ise iç kuvvetlerin vektörü olup,  $\Delta u$  bir zaman adımıdaki deplasmanların vektörüdür. Bu yöntemde her iterasyon adımı, teğetsel direngenlik matrisinin yeniden oluşturulması ve ayrıştırılması gerekmektedir. Yöntem teoride iki artış arasındaki adım aralığı istenen büyüklükte seçilebilmesine karşın, pratikte nonlinear temas şartları nedeni ile sınırlı olmaktadır. Çözümde bir yakınsama kriterine ulaşıldığında hesaplama durmaktadır [48].

#### 3.3.2. 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.

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{\Delta t}{2})} \quad (3.4)$$

$$\dot{u}^{(i+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}^{(i-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta \tau^{(i-\Delta t)} + \Delta \tau^i}{2} \ddot{u}^{(t)} \quad (3.5)$$

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



$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (3.6)$$

formülü kullanılır. 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 eleman büyüklüğü;  $c$ , malzemedeki ses hızı olmak üzere, kararlı bir zaman adımı yaklaşık olarak  $\Delta t = \frac{1}{c}$  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 için  $10^5 - 10^6$  kadar zaman adımına gerek duyulabilir. Buda doğrudan hesaplama zamanına yansır. Bu problemi gidermek için şekillendirme işlemleri gerçekte olduğundan daha hızlı bir şekilde oluyormuş gibi benzeştirilir. Benzeşim sırasında ortaya çıkabilecek 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 hızının küçültülmesidir. Yoğunluğun 100 kat artırılması ses hızını 10 kat düşürür ve problem 10 kat hızlı çözülür [48].

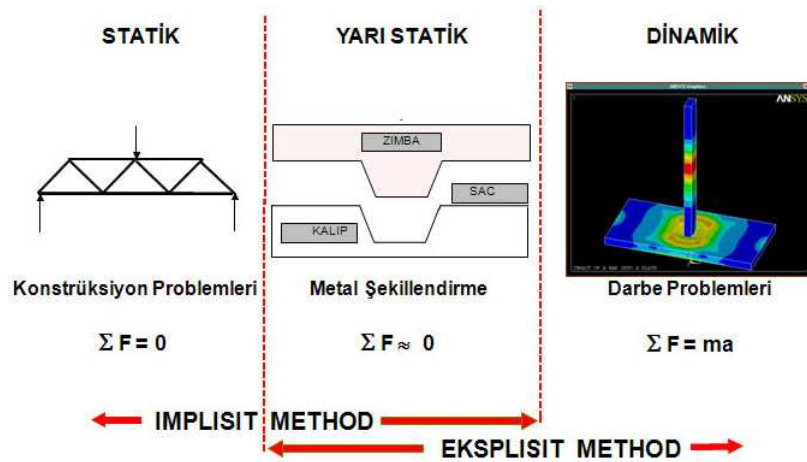
### 3.3.3. İmplicit ve Eksplisit Yöntemlerin Karşılaştırılması

Eksplisit Yöntem mevcut durumda daha az hesap zamanına ve hafızaya gerek duymaktadır. Yalnız bu tip programların, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak geliştirildiği unutulmamalıdır. İmplicit Yöntem ise mevcut yazılımların geliştirilmesi ile oluşturulmuştur. Eksplisit Yöntem çarpma gibi kısa süreli dinamik problemlerin çözümü için çok elverişlidir. Ancak çok sayıda zaman adımına gerek duyarlar. İmplicit Yöntem’de adım aralığı teorik olarak sınırsızdır. Hesap zamanını kısaltmak için Eksplisit Yöntem’lerde yapay olarak bir ivmelendirmeye yada yoğunluğu arttırmaya gidilir. Bunun sonucu ortaya çıkacak kütle etkileri ancak

yazılımı çok iyi bilen kullanıcılar tarafından alınacak önlemlerle giderilebilir. İmplicit Yöntem’de fiziksel sistemi değiştirmek gerekmez. Çünkü çözüm zaten iterativ olarak yapılmaktadır [48].

Eksplisit Yöntem nümerik açıdan oldukça kararlıdır. Temas şartları küçük zaman adımları sayesinde tam anlamı ile tarif edilebilir. Pot oluşması gibi kararsızlık olguları kolayca belirlenir ve yakınsama problemleri ile karşılaşılmaz. İmplicit Yöntem’de ise bu durum işlemeyebilir veya burkulma sonrası gibi ek hesaplara gereksinim duyulabilir [48].

Geri yaylanma ve iç gerilmeler konusunda İmplicit Yöntem daha üstündür. Bu tip hesaplamalarda takım parçalarının birbirlerinden uzaklaştırılmasının simülasyonu çok önemlidir. Bu yükleme boşaltması Eksplisit Yöntem’de ancak iş parçası hareketini tamamlamış ise, yani dinamik etkiler sönülmüş ise uygulanabilir. Hesap zamanını azaltma kaygısı, elemanlarda kullanılan düşük dereceli integrasyon gerilmelerinin hassas, hatta doğru hesaplanmasını engeller. Ancak, geriye yaylanmanın temel şartı, gerilmelerin doğru hesaplanmasıdır. Dolayısıyla Eksplisit Yöntem’le elde edilen geriye yaylanmalar ancak tendense olarak doğru sonuç verir. Eleman integrasyon derecesi yükseltilerek buna karşı gelinir. Ancak hesap zamanı oldukça artar ve İmplicit Yöntem’e karşı olan avantaj kaybedilir [48]. Şekil 3.2’de İmplicit ve Eksplisit yöntemlerin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İmplicit ve Eksplisit yöntemlerin karşılaştırılması.

### 3.4. ANSYS LS-DYNA

Livermore Software Technology Corporation (LSTC) tarafından üretilen LS DYNA yazılımı genel amaçlı zamana bağımlı dinamik problemlerin hesaplanmasında kullanılan bir eksplisit sonlu elemanlar kodudur.

Yüksek dereceden nonlinear zamana bağımlı dinamik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Çok geniş kontak tipleri kullanılarak, ileri düzeyde malzeme modelleme kapasitesi ile çok ayrıntılı deformasyon analizleri yapılabilmektedir.

ANSYS ve LS-DYNA yazılımları birbirleriyle entegre olarak çalışmaktadır. Eksplisit ve İmplicit çözüm teknikleri, mükemmel bir şekilde ANSYS'te bir araya getirilmiştir [48].

#### 3.4.1. LS-DYNA'nın Kullanıldığı Alanlar

LS-DYNA, zamana bağımlı dinamik problemlerin bulunduğu bütün endüstri dallarında kullanılmaktadır. Bunları sıralarsak;

- Otomotiv endüstrisi,
  - Araba, kamyon, otobüs, tren, gemi, uçak gibi araçların çarpışma ve devrilme analizleri için,
  - Araba parçaları yada komple çarpışma hasar analizleri için,
- İmalat (Şekillendirme) endüstrisi,
  - Derin çekme, hidro şekillendirme, süper plastik şekillendirme, ekstrüzyon, haddeleme, talaşlı imalat gibi işlemlerinin analizleri için,
- Havacılık endüstrisi,
  - Düşme, jet motoru fanı, sarkaç gibi etki-tepki ilişkisi bulunan analizler için,
  - “Bird Strike” ve “Blade Containment” adı verilen testler için,
- Savunma endüstrisi,
- Penetrasyon ve patlama analizleri,
- Zamana bağlı burulma, ses dalgası yayılımı ve hata analizlerinde kullanılmaktadır.

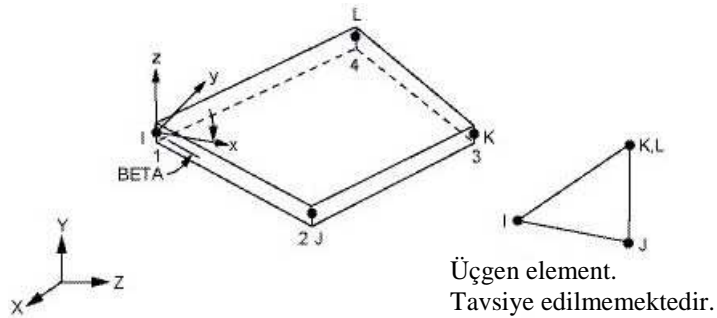
### 3.4.2. LS-DYNA’da Kullanılan Element Modelleri

ANSYS LS-DYNA programında 9 farklı eleman tipi tanımlanmıştır. Bunlar;

- LİNK 160** : Eksplisit nokta bağlantılı 3 serbestlik dereceli kiriş element.
- BEAM 161** : Eksplisit kiriş element.
- PLANE 162** : Eksplisit 4 noktalı 6 serbestlik dereceli 2 boyutlu düzlemsel element.
- SHELL 163** : Eksplisit 4 noktalı 12 serbestlik dereceli ince kabuk element.
- SOLİD 164** : Eksplisit 8 noktalı 9 serbestlik dereceli tuğla element.
- COMBİ 165** : Eksplisit 2 noktalı yay ve salınım element.
- MASS 166** : Eksplisit 1 noktalı 9 serbestlik dereceli yapısal kütle element.
- LINK 167** : Eksplisit 2 noktalı kablo element.
- SOLİD 168** : Eksplisit 10 noktalı 3 serbestlik dereceli element.

Eksplisit dinamik elementlerde 3 boyutlu elemanlar olduğu gibi 2 boyutlu elemanlarda mevcuttur. Elementlerin büyük bir çoğunluğu bütün malzeme modellerini desteklediği gibi, farklı malzeme modellerine tanımlanması gereken elemanlarda mevcuttur.

Bu çalışmanın teorik analizlerinde SHELL 163 eleman (element) tipi kullanılmıştır. Şekil 3.3’de SHELL 163 eleman tipi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SHELL 163 (Kabuk) eleman tipi.

Bu eleman tipine ait 11 farklı formülasyon bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri;

**Belytschko-Tsay (BT, KEYOPT(1)=2, geçerli olan):**

Basit kabuk elemandır. Bu eleman tipinin çözümü oldukça hızlıdır. Bükülmelerde yanlış sonuçlar verebilmektedir [4].

**Belytschko-Wong-Chiang (BWC, KEYOPT(1)=10):**

Performans faktörü  $1,25 \times BT$ 'dir. Belytschko-Tsay'a göre %25 daha yavaş çözümlenmektedir. İndirgenmiş tümleştirme kullanmaktadır. Bükülmelerde doğru sonuçlar vermektedir. Kullanımı tavsiye edilmektedir.

**Belytschko-Leviathan (BL, KEYOPT(1)=8):**

CPU faktörü,  $1,4 \times BT$ 'dir. Belytschko-Tsay'a göre %40 daha yavaş çözümlenmektedir. Tümleştirme formülasyonunu azaltır. Otomatik olarak Hourglass kontrolünü içermektedir.

**Fully integrated Belytschko-Tsay (KEYOPT(1) = 12)**

Çözümü, indirgenmiş tümleştirmesi olan Belytschko-Tsay kabuğa göre 2,5 kez daha yavaştır. Bir düzlemde 4 adet birleştirme noktası vardır ve Hourglass kontrol özelliğine ihtiyacı yoktur.

**Hughes-Liu (KEYOPT(1) = 1, 6, 7, 11)**

Hughes-Liu'nun kendi içinde 4 farklı formülasyonu bulunmaktadır.

- **KEYOPT(1) = 1**

Genel Hughes-Liu formülüdür. 1 adet birleşme noktası vardır. Çözümü Belytschko-Tsay'e göre 2,5 kez daha yavaştır.

- **KEYOPT(1) = 11**

Hughes-Liu'nun hızlı formülüdür. 1 adet birleşme noktası vardır. Çözümü Belytschko-Tsay'e göre 1,5 kez daha yavaştır.

- **KEYOPT(1) = 6 S/R Hughes-Liu**

Hourglass kontrolü olmadan 4 adet birleşme noktası vardır. Ama çözümü Belytschko-Tsay'e göre 20 kez daha yavaştır.

- **KEYOPT(1) = 7 S/R corotational Hughes-Liu**

Hourglass kontrolü olmadan 4 adet birleşme noktası vardır. Ama çözümü Belytschko-Tsay'e göre 8.8 kez daha yavaştır. Analizlerde Hourglass kontrolünün problem olduğu yerlerde tavsiye edilmektedir.

### **3.4.3. LS-DYNA'da Kullanılan Malzeme Modelleri**

ANSYS LS-DYNA, var olan malzeme davranışlarını karşılayabilecek şekilde, 40 tanenin üzerinde malzeme modelini içermektedir. Bu malzeme modelleri neredeyse tüm uygulamaları karşılayabilmektedir. ANSYS LS-DYNA malzeme kütüphanesi, ANSYS implisit malzeme kütüphanesi ile karşılaştırıldığında çok daha üstün özellikleri olduğu görülmektedir. Uygulamaya bağlı olarak, ANSYS LS-DYNA'da ki malzeme özellikleri; lineer veya lineer olmayan, izotropik veya anizotropik, sıcaklıktan bağımsız veya sıcaklığa bağlı, uzama oranına bağlı, denklem tanımlayarak olabilmektedir.

Oluşturulan model için hangi malzeme modelinin seçileceği yapılmak istenen analize ve elde edilebilen malzeme sabitlerine bağlıdır. Nonlinear sonlu elemanlar metodunda, analiz sonuçlarının doğruluğu büyük oranda kullanılan malzeme sabitlerine bağlıdır. En iyi sonucu elde etmek için kullanılan malzemenin, analiz öncesi çok iyi test edilmesi gerekmektedir.

ANSYS LS-DYNA'da plastiklik modelleri üç farklı kategoriye ayrılmaktadır.

- İzotropik malzemeler için uzama oranına bağlı olmayan plastiklikler,
- İzotropik malzemeler için uzama oranına bağlı plastiklikler,
- Anizotropik malzemeler için uzama oranına bağlı plastiklikler.

İzotropik malzemeler için uzama oranına bağlı olmayan plastikliklerde, iki temel plastiklik modeli bulunmaktadır. Bunlar, Klasik Bilinear Kinematics Hardening modeli ve Klasik Bilinear Isotropic Hardening modelidir. Her iki modelde, gerilme-uzama eğrisi üzerindeki, iki farklı eğimi (yani elastikiyet modülünü (EX) ve Tangent modülünü (ETAN)) malzemenin gerilim-uzama davranışlarında kullanılmaktadır.

Uzama oranına bağılı olmayan modeller, sac metallerin şekillendirmesi gibi, göreceli olarak zamana bağımlı olmayan işlemlerde kullanılmaktadır. Her iki modelde neredeyse bütün malzemelerde (çelik, alüminyum, dökme demir v.b.) kullanılmaktadır. İki model arasındaki tek fark "Sertleşme Farkı" varsayımdır. Yani kinematik sertleşme modelinde ikinci akma oluşumu  $2\sigma_y$  iken, izotropik sertleşme modelinde  $2\sigma_{max}$ 'dır. Bilinear Kinematics ve Bilinear Isotropic modelleri için gerekli yoğunluk (DENS), elastikiyet modülü (EX), akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ), Tangent modülü ( $E_{tangent}$ ) parametrelerinin ayrı ayrı girilmesi gerekmektedir [4].

Herhangi bir teorik malzeme modeli çok çeşitli malzemelerde kullanılabilirdiği gibi, özellikle bazı malzemeler için oluşturulmuş malzeme modelleri de bulunmaktadır. ANSYS LS-DYNA içerisinde alüminyum malzemeler için, Barlat Lian (3 Parameters Barlat Anisotropic) malzeme modeli bulunmaktadır. Barlat Lian'nın geliştirdiği bu malzeme modeli ile özellikle alüminyum malzemelerin teorik analizlerinde, anizotropik malzeme özelliğini de katarak simülasyonlar gerçekleştirilmektedir.

#### 3.4.4. Kontak Yüzeyler

ANSYS LS-DYNA programında, ANSYS implicitin aksine kontak elemanlar kullanılmaz. LS-DYNA programında kontaklar, kontak yüzeyleri ile tanımlanır. Kontak bir modelin bir üyesinin dış yüzeyi, diğer bir üyenin içine işleyerek oluşur. Kontak oluşan bölgeleri belirlemek için kontakçı önceden belirlemeye gerek yoktur. Buna ek olarak, gerçek sabitler, normal kontak sabiti,  $K_n$ 'yi özelleştirmeye gerek yoktur. LS-DYNA programında kontak yüzeyler ve etkilenecek yüzeyler kullanıcı tarafından gösterilmektedir. Yüzeyler arasındaki kontak tipi ve ilgili parametreler kullanıcı tarafından girilmektedir [4].

ANSYS LS-DYNA programında bütün fiziki sistemlere uyarlanabilecek 24 farklı kontak tipi bulunmaktadır. Bunları 3 ana başlık altında toplamak mümkündür.

- **Single Surface**

Single Surface kontak tipi bir parçanın, kendisine yada başka bir parçanın yüzeyine temas edeceği zaman uygulanmaktadır. Bu kontak tipinde ANSYS

LS-DYNA programı otomatik olarak model içerisinde hangi yüzeylerin temas edeceğini hesaplamaktadır. Hedef yada kontak yüzeyinin tanımlanmasına gerek olmadığından, Single Surface kontak tipi tanımlanması en basit kontak tipidir. Genel kontak alanlarının önceden bilinmediği geniş deformasyon problemleri ve kendi yüzeyine temas için bu özellik çok güçlü olabilmektedir.

- **Node To Surface**

Node To Surface kontak tipi, temas eden noktaların (node), bir hedef yüzeyin içerisinde geçeceği zaman uygulanmaktadır. Bu kontak tipi genellikle iki yüzey arasında kontak tanımlamak için kullanılmaktadır.

- **Surface To Surface**

Surface To Surface kontak tipi, bir parçanın bir yüzeyinin, başka bir parçanın herhangi bir yüzeyi ile temas edeceği zaman kullanılmaktadır. Surface To Surface kontak tipi genellikle göreceli olarak geniş kontak alanları olan düzensiz şekilli parçalar için kullanılan en geniş kontak tipidir. Bu kontak tipi bir kutunun, bir düzlem üzerinde kayması yada bir kürenin bir kanal içerisinde yuvarlanması gibi bağlı hareket eden parçalar için kullanıldığında daha çok verimlidir.

Bu 3 kontak tipi için, birbirinden farklı birçok alt kontak seçeneği de bulunmaktadır. Bunları sıralarsak;

- **General (Normal) Contact (SS, NTS, STS, OSTs)**

General kontak seçeneği, en basit algoritmaya sahip olan kontak tipidir. Uygulamaların geniş bir kısmında bu kontak tipi kullanılmaktadır. Gerçekte Node To Surface ve Surface To Surface seçenekleri ANSYS LS-DYNA için önerilen 3 seçenektен ikisidir. General kontak tipinin kullanılmasında öncelikli avantaj ciddi anlamda hızlı ve güçlü olmasıdır.

- **Automatic Contact (ASSC, AG, ASS2D, ANTS, ASTS)**

General kontak ailesi ile birlikte Automatic kontak seçeneği, en sık kullanılan kontak algoritmalarından biridir. Automatic ve General aileleri arasındaki



temel fark, kabuk elementler için kontak yüzey oryantasyonunun, Automatic kontak algoritması tarafından otomatik olarak saptanmasıdır.

- **Eroding Contact (ESS, ENTS, ESTS)**

Eroding kontak seçeneği, bir yada iki dış yüzeyin teması sırasında malzemedeki hataların ve bu hatalar doğrultusunda elemanların şekillenmesi için kullanılmaktadır. Bu kontak tipi içerde kalan elemanlara devam etmeye izin vermektedir. Eroding kontak tipi, içine işleme (kesme, delme gibi), içinden geçme ve diğer uygulamalar için katı elementlerle birlikte kullanılmaktadır.

- **Rigid Contact (RNTR, ROTR)**

Rigid parça kontak tipi, General kontak tipine benzerlik göstermektedir. Bu kontak tipi bütün parçaların Rigid olarak tanımlandığı, çok parçalı dinamiklerde kullanılmaktadır. Rigid parça kontak tipi, deforme olabilen elementlerin modellenmesine gerek olmadan, enerji emilimine izin verdiği için dolaylı yararlıdır. Ancak, Rigid parça kontak tipi deforme olabilen parçalarla birlikte kullanılamaz. Bir Rigid parçanın deforme olabilen başka bir parçaya kontağı General, Automatic yada Eroding seçeneklerinden birisi ile olmalıdır.

- **Tied Contact (TDNS, TDSS, TSES)**

Tied kontak tipi aslında kontak noktalarının (yada yüzeylerin) hedef yüzeye yapışmasından ibarettir. Kontak ve hedef yüzeylerin başlangıçta eş düzlemlilik olması gerekmektedir. Başlangıç hızlarının yada yüklerin uygulanması üzerine, kontak noktalarının (yada yüzeylerinin) hedef yüzeye birlikte izoparametrik pozisyonlarını sürdürmesine zorlanmaktadır. Tied kontak tipinin etkisi, hedef yüzeyin deforme olması ve hedef yüzeye bağlı noktaların bu deformasyona göre hedef yüzeyi takip etmesidir.

- **Tiebreak (Tied with Failure) Contact (TNTS, TSTS)**

Tiebreak kontak tipi, Tied kontak tipine benzer olarak kontak noktalarının (yada yüzeylerinin) hedef yüzeye, hata kriterinin aşılmasına kadar bağlanmasıdır. Bu bağlanma, kontak noktalarının (yada yüzeylerinin) hedefe Penalty Stiffness kullanılarak tutturulmasıyla sağlanmaktadır. Hata kriteri

aşıldıktan sonra, kontak noktalarının (yada yüzeylerinin) izafi bir biçimde hareket etmesine yada hedef yüzeyden ayrılmasına izin verilmektedir. Tiebreak kontak tipi çoğunluklu nokta kaynağı yada cıvata ile bağlanma uygulamalarında kullanılmaktadır.

- **Edge Contact (SE)**

Edge kontak tipi, kabuk yüzeyin normal yönüne dikey yönde kontak oluştuğu zaman kullanılmaktadır. Bu kontak tipinde, kontak yada hedef yüzeylerin tanımlanmasına gerek yoktur. Edge kontak tipi genellikle, yüzeylerin darbe doğrultusuna dikey olduğu sac metal uygulamalarında kullanılmaktadır.

- **Drawbead Contact (DRAWBEAD)**

Drawbead kontak tipi genellikle, sacın sabitleme işlemine önem verildiği metal şekillendirme operasyonlarında kullanılmaktadır. Çekme ve şekillendirme simülasyonları boyunca, sac için şekillendirme yüzeyi ile kontak temasını kaybetmesi mümkündür. Drawbead kontak, şekillendirme işlemi boyunca, sürtünme sabitleme ve bükme kuvveti ile bu temasın kaybolmasını önlemektedir.

- **Forming Contact (FNFS, FSTS, FOSS)**

Forming kontak tipi öncelikle metal şekillendirme uygulamaları için kullanılmaktadır. Bu kontak tipi için, sac malzeme kontak yüzey olarak tanımlanırken, zımba ve kalıplar hedef yüzey olarak tanımlanmaktadır. Forming kontak algoritması Automatic kontak tipine dayanmaktadır.

Hangi kontak tipi ile hangi kontak seçeneklerinin kullanılacağını gösteren liste Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kontak çeşitleri ve alt kontak seçenekleri.

<b>Single Surface</b>	
Automatic General (AG)	
Automatic (ASSC)	
Automatic 2D (ASS2D)	
Single Surface (SS)	
Eroding (ESS)	
Edge (SE)	
<b>Surface To Surface</b>	
	General (STS)
	One-way (OSTS)
	Automatic (ASTS)
	Rigid (ROTR)
	Tied (TDSS)
	Tied/Shell (TSES)
	Tied/Fail (TSTS)
	Eroding (ESTS)
	Forming (FSTS)
	Form/1-way (FOSS)
<b>Nodes To Surface</b>	
General (NTS)	
Automatic (ANTS)	
Rigid (RNTR)	
Tied (TDNS)	
Tied/Fail (TNFS)	
Eroding (ENTN)	
Forming (FNNT)	
Drawbead (DRAW)	

## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE METOT

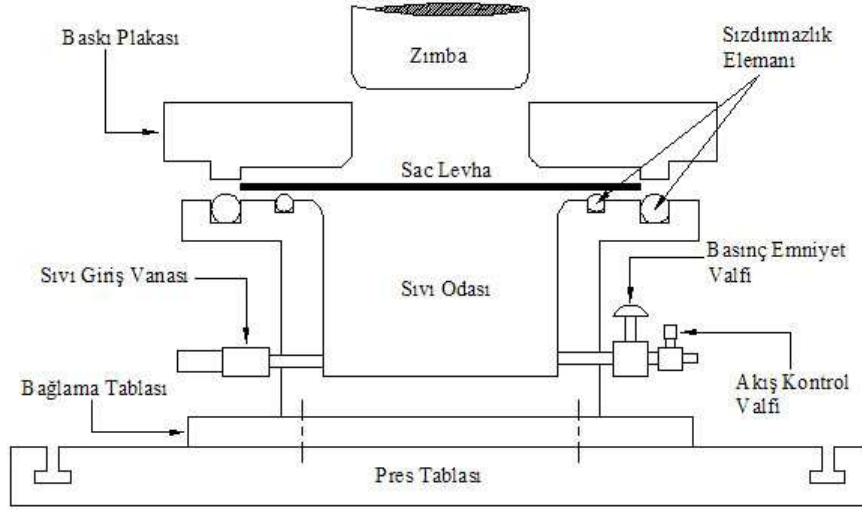
Herhangi bir sistemin oluşturulmasından önce hangi yöntemle, hangi araçların kullanılacağına belirlenmesi önemlidir. Kullanılacak yöntem doğru sonuçlara ulaşılmasında etken faktörlerden biridir. Tasarım aşamasından önce gidilecek yol haritasının belirlenmesi, hem maliyet hemde zamandan büyük tasarruf sağlamaktadır.

Çalışmada öncelikli olarak kurulacak sistemin bilgisayar ortamında modellenmesi yapılmıştır. Sistemin modellenmesi için SolidWorks 2007 programı kullanılmıştır. Bilgisayar ortamındaki modellemeye 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 simülasyonu için ANSYS LS-DYNA sonlu elemanlar analizi programı kullanılmıştır. Böylece teorik olarak şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde önceden belirlenen doğrultuda, hidro şekillendirme işlemi için kurulan sistem, şekillendirmenin yapıldığı kalıp ve tasarımı, şekillendirmeleri sağlayan zımba uçları ve tasarımları, şekillendirilen malzemeler ve özellikleri, sistemin ve kalıp elemanlarını teorik modelleri, şekillendirme deneylerinin teorik analizleri, analizlerde kullanılan malzemelerin ve eleman tiplerinin seçimi, kontak modellemesi gibi çalışmanın bilgisayar ortamındaki teorik bölümü ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

#### 4.1. SİSTEMİN TANITILMASI

Sac hidro şekillendirme için kurulan sistemin şematik resmi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kurulan hidro şekillendirme sisteminin şematik resmi.

Sistem 50 tonluk hidrolik prese bağlanarak üretim gerçekleştirilmiştir. Presin aşağı yukarı hareketi ile şekillendirme sağlanmıştır.

Sistemde şekillendirmeyi sağlayacak sıvı olarak Rubia 20W50 hidrolik yağ kullanılmıştır. Bu yağın, kalıp içerisine ve kalıptan dışarı tahliyesi elle kumandalı bir yağ pompasının kullanımıyla sağlanmıştır. Hidrolik akışkan, yağ tankından gelerek elle kumandalı bir giriş vanası ile kalıp içerisine konulması sağlanmıştır. Vananın kapatılması ile giriş kısmından akışkanın yağ tankına geri dönmesi önlenmiştir.

Sistemde kalıp, baskı plakası, zımba, zımba uçları kalıp elemanları olarak kullanılmıştır. Kalıp içerisine konulan hidrolik yağ, şekillendirme sırasında zımbanın ilerlemesi ile sıkışarak dişi kalıp görevi görmektedir. Sıkışan akışkan da meydana gelen basınç ile sac malzeme, zımbanın şeklini alarak şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Kalıp içerisindeki akışkan basıncı, şekillendirme için gerekli olan değeri aştığında, kalıptan yağ tankına tahliyesi için basınç kontrol valfi ve hız ayar valfi kullanılmıştır. Kalıp içerisindeki akışkan basıncının görsel olarak takip

edilebilmesi için basınç kontrol valfi üzerine bir adet gliserinli manometre bağlanmıştır. Manometre sayesinde akışkan basıncı gözlemlenebilmektedir. Hidrolik akışkanın kalıp içerisine dolması sırasında kalıpta kalan havanın tahliyesi için kalıp üst kenarına bir hava tahliye deliği açılmıştır. Bu delik setiskur cıvata ile sabitlenerek, akışkan dolması sırasında havanın tahliyesi sağlanmıştır. Şekil 4.2'de kurulan sistemin resmi gösterilmiştir.

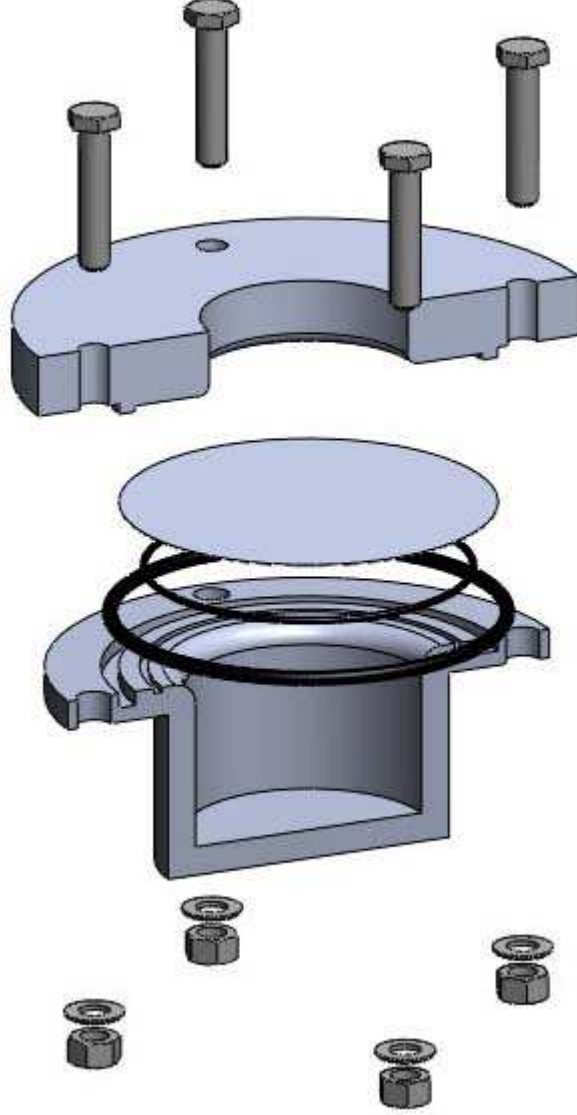


Şekil 4.2. Kurulan hidro şekillendirme sistemi.

#### **4.2. KALIBIN TANITILMASI**

Hidro şekillendirme sisteminde, şekillendirmenin yapılacağı kalıp tasarlanmış ve imal edilmiştir. Sistemde, dişi kalıp kullanılmadığından, dişi kalıp yerine akışkan sıvı kullanılmaktadır. Bu nedenle, çok karmaşık kalıp kullanmak yerine sadece akışkan sıvının konulabileceği bir kalıp tasarlanmıştır. Kalıp elemanları, sıvı odası, baskı plakası, zımba ve zımba uçlarından oluşmaktadır. Baskı plakasının pot baskısı cıvata-somun kullanımıyla gerçekleştirilmiştir.

Sistemde şekillendirmeyi sağlan kalıp elemanlarının katı model şeklindeki demonte resmi Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Kalıp elemanlarının demonte hali.

Sistemde akışkan sıvı kullanılması nedeniyle sızdırmazlık elemanları kullanılmıştır. Sızdırmazlığı sağlamak için çapı 6,5 mm ve 3 mm olan iki adet O-Ring kullanılmıştır. Şekillendirme sırasında sıvı odasında meydana gelen iç basınç, sac malzemeye ve baskı plakasına, zımba ilerleme yönünün tersi yönünde etki etmektedir. Böylece baskı plakasının yukarıya doğru kaldırılması söz konusudur. Bu nedenle baskı plakası kalıba M14 cıvata ve somun kullanılarak bağlanmıştır.

Cıvataların sıkılması ile sac malzemeye pot baskısı uygulanmaktadır. Sistemde kullanılan kalıp elemanları ile ilgili önemli ölçüler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kalıp elemanları ile ilgili önemli ölçüler.

<b>Parametreler</b>	<b>Ölçü (mm)</b>
Kalıp Dış Çapı	245
Kalıp Et Kalınlığı	14
Maksimum Çekme yüksekliği	81
Kalıp İç Çapı	120
Kalıp Kenar Kavis Yarıçapı	10
Baskı plakası Kalınlığı	31
Baskı Plakası Dış Çapı	275
Baskı Plakası İç Çapı	101
Baskı Plakası Kenar Kavis Yarıçapı	5
Zimba Çapı	99
Zimba Kenar Kavis Yarıçapı	9,5
Zimba Yüksekliği	110

Kalıbı oluşturan hareketli elemanlar arasındaki kalıcı boşluk, kalıplanan parçanın ölçü ve biçimine göre değişen birinci etkindir. Elemanlar arasındaki boşluk, tek taraflı olarak düşünülmektedir. Tek taraflı boşluk uygun seçilmemişse, kalıplanan parça simetrik olmayabilir veya ölçü tamlığı sağlanamaz [3].

Geleneksel çekme kalıplarında zimba çapı ve kalıp iç çapı arasında, tek taraflı çekme boşluğu ve malzeme kalınlığı kadar bir fark bulunmaktadır [3]. Bu fark malzeme kalınlığına ve kaç kademede çekileceğine göre değişmektedir. Çizelge 4.2’de örnek çekme boşlukları, Şekil 4.4’de ise ölçü farkı açıkça gösterilmiştir.

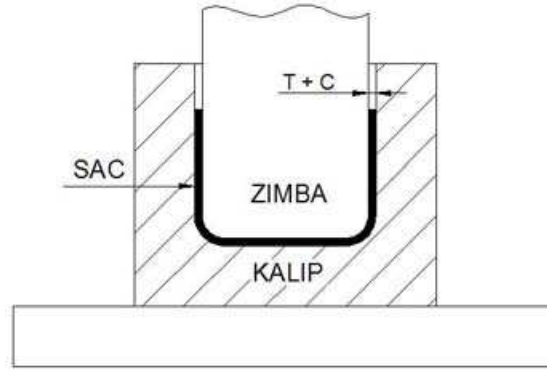
Kurulan sistemde, zimba çapı ve kalıp iç çapı (sıvı odası iç çapı) arasında, geleneksel çekme boşluklarından farklı olarak tek taraflı kalıp boşluğu (C) 10,5 mm bir fark olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede zımbanın ilerlemesi ile sıkışan akışkan basıncı malzemeye dikey yönde etki ederken, aynı zamanda yatay yönde de etki



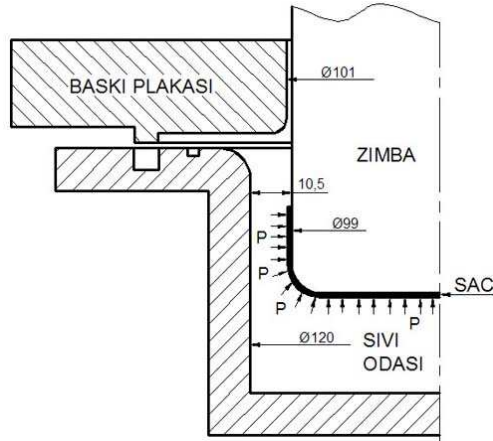
ederek malzemenin zımbayı sarması tam olarak sağlanmıştır. Şekil 4.5.'de bu ölçü farkı ve etki eden basınç gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Örnek tek taraflı çekme boşlukları [3].

Malzeme Kalınlığı T (mm)	Tek Taraflı Kalıp Boşluğu C (mm)		
	1. Çekme	2. Çekme	3. Çekme
0,50	(1,07-1,09)T	(1,08-1,10)T	(1,04-1,05)T
0,50 - 1,25	(1,08-1,10)T	(1,09-1,12)T	(1,05-1,06)T
1,25 - 3,25	(1,10-1,12)T	(1,12-1,14)T	(1,07-1,09)T
3,25 ve yukarısı	(1,12-1,14)T	(1,15-1,20)T	(1,08-1,10)T



Şekil 4.4. Geleneksel çekme kalıplarındaki tek taraflı çekme boşluğu.



Şekil 4.5. Kurulan sistemdeki tek taraflı ölçü farkı.

Kurulan hidro şekillendirme sisteminde tek tip ürün yerine, değişik ürünlerin üretilebilmesi için değişik şekilli ve ebatlı 2 adet zımba ucu tasarlanmıştır. Bu zımba uçları ile kalıp modüler hale getirilmiştir. Bu şekilde bir kalıpta birden fazla değişik ürünlerin üretilebilmesi mümkün hale gelmiştir.

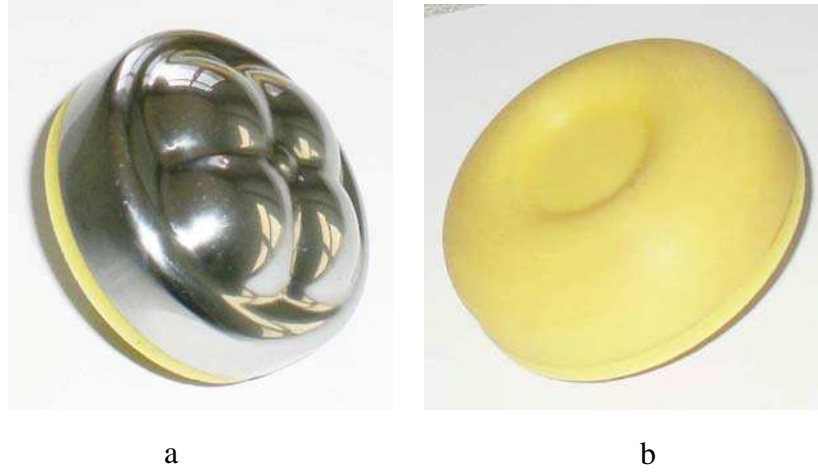
Zımba uçları tasarlanırken, zımba uçlarından biri kestamit malzemedan, diğeri ise çelik malzemedan üretilmiştir. Zımba uçları, ana zımbaya vidalı bağlantı ile birleştirilmişlerdir. Kullanılan çelik zımba ucuna ait ölçüler Çizelge 4.3'te, kestamit zımba ucuna ait ölçüler Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu zımba uçlarına ait resimler Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Çelik zımba ucuna ait ölçüler.

<b>Parametreler</b>	<b>Ölçü (mm)</b>
Dış Çap	70
Toplam Yükseklik	30
Desen Yüksekliği	10
Yan Duvar Kavis Yarıçapı	6

Çizelge 4.4. Kestamit zımba ucuna ait ölçüler.

<b>Parametreler</b>	<b>Ölçü (mm)</b>
Dış Çap	90
Toplam Yükseklik	32
Havuz Çapı	33,5
Havuz Derinliği	5,8
Havuz Üst Kavis Yarıçapı	3
Havuz İç Kavis Yarıçapı	2
Yan Duvar Kavis Yarıçapı	24



Şekil 4.6. Kullanılan zımba uçları. a. Çelik malzeme, b. Kestamit malzeme.

### 4.3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Genel olarak hidrolik şekillendirme uygulamalarında alüminyum tüp ve sac malzemeler kullanılmaktadır. Bunun sebebi alüminyum malzemenin kolay şekillenebilmesi ve uzama yüzdesinin diğer malzemelerden daha fazla olmasıdır. Çalışmada, şekillendirme için 0,8 mm kalınlığında AL 5754 serisi alüminyum alaşımlı sac malzeme kullanılmıştır. Çizelge 4.5’de alüminyum malzemenin kimyasal özelliği, Çizelge 4.6’te ise mekanik özelliği verilmiştir.

Çizelge 4.5. Al 5754 serisi alüminyum sacın kimyasal özelliği.

%								Diğer	
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 4.6. Al 5754 serisi alüminyum sacın mekanik özelliği.

<b>Malzeme Özellikleri</b>		
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	2,67x10 <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı	MPa	220
Akma Dayanımı	MPa	100
50mm'deki Uzama	%	26
Kayma Gerilmesi	MPa	130
Elastikiyet Modülü	GPa	71
Poisson Oranı	-	0,3
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

Deneysel çalışmada alüminyum malzemenin yanı sıra C 1006 serisi çelik sac malzemenin de şekillendirilmesine çalışılmıştır. Şekillendirme için 0,35 mm ve 0,6 mm kalınlığında C 1006 serisi sac malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeye ait kimyasal özellikler Çizelge 4.7'de, mekanik özellikler ise Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. C 1006 serisi çelik saca ait kimyasal özellikler.

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>
%	0,066	<0,005	0,194	0,019	<0,005	0,015	0,051
	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>Fe</b>
%	<0,010	<0,005	<0,002	0,017	<0,002	0,001	99,6

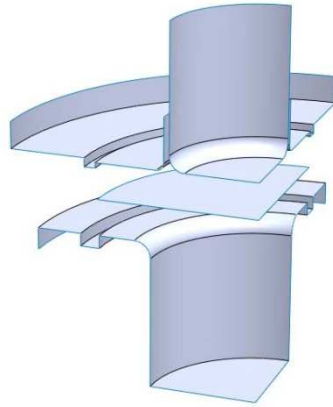
Çizelge 4.8. C1006 serisi çelik saca ait mekanik özellikler.

<b>Malzeme Özellikleri</b>		
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	7,85x10 <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı	MPa	330
Akma Dayanımı	MPa	285
50mm'deki Uzama	%	20
Elastikiyet Modülü	GPa	205
Poisson Oranı	-	0,3
Tangent Modülü	MPa	550

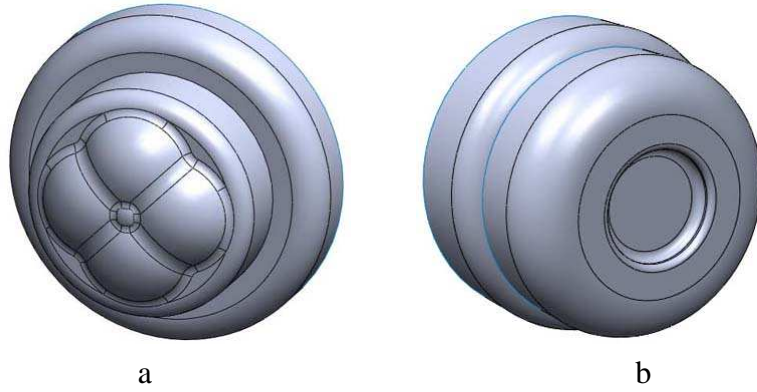
#### 4.4. TEORİK MODELİN OLUŞTURULMASI

##### 4.4.1. Modelin Tasarımı

Teorik analizlerde kullanılan modeller SolidWorks 2007 programı kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıp elemanları yüzey modelleme tekniği kullanılarak tasarlanmıştır. Yüzey modellenen parçaların et kalınlıklarına ve sistemdeki konumlarına dikkat edilmiştir. Üretilen parça tam simetrik olduğu için, analizlerde kolaylık olması ve hızlı çözüm sağlamasından dolayı kalıp elemanlarının ¼'ü modellenmiştir. Şekil 4.7'de SolidWorks 2007 programında, ¼ yüzey modelleme ile tasarlanan kalıp elemanları gösterilmiştir. Şekil 4.8'de sistemde kullanılan zımba uçlarının yüzey modelleri gösterilmiştir.



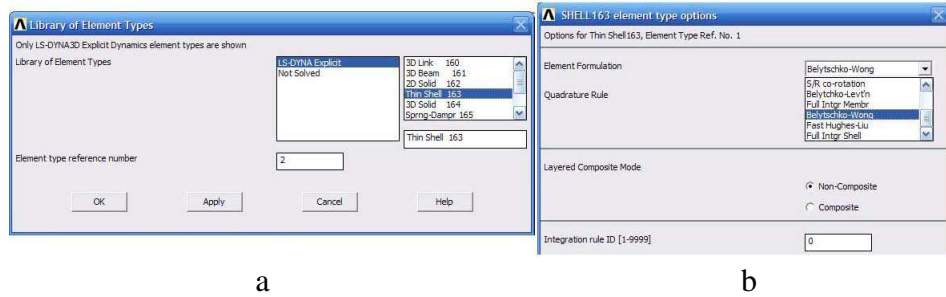
Şekil 4.7. Yüzey modellenen kalıp elemanları.



Şekil 4.8. Yüzeyle modellenen zımba uçları. a. Çelik, b. Kestamit.

#### 4.4.2. Eleman Tipinin Tanımlanması

SolidWorks 2007 programında modellenen parçalar IGES formatından ANSYS LS-DYNA programına aktarılmıştır. IGES formatındaki model ANSYS programına aktarıldıktan sonra, program içerisinde eleman tipi (Element Type) belirlenmiştir. Kalıp elemanları yüzeyle modellendiği için, et kalınlıklarının da hesaba katılmasıyla SHELL 163 eleman tipi kullanılmıştır. Eleman formülü olarak da Belytschko-Wong formülasyonu kullanılmıştır. Şekil 4.9.'da kullanılan eleman tipi ve formülasyon gösterilmiştir.



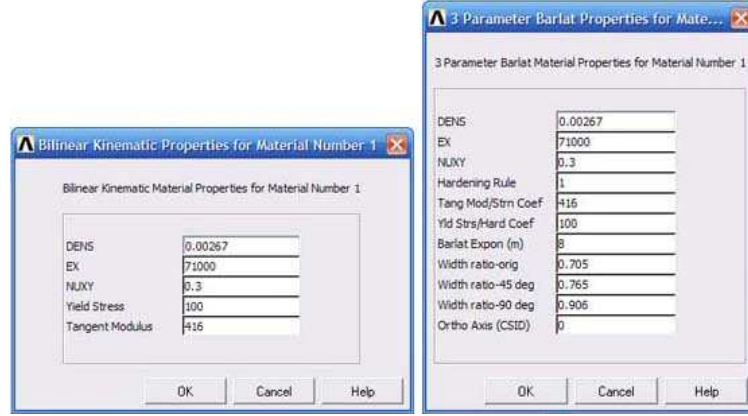
Şekil 4.9. Eleman tipinin belirlenmesi. a. Kullanılan eleman tipi (Element Type), b. Eleman formülasyonu.

#### 4.4.3. Malzeme Modelinin Tanımlanması

ANSYS LS-DYNA yazılımı içerisinde her ihtiyaca uygun malzeme modeli bulunmaktadır. Bu malzeme modelleri fonksiyonlarındaki değerlere göre farklı parametreler içermektedir.

Deneysel çalışmada alüminyum ve çelik olmak üzere 2 farklı malzeme kullanılmıştır. Teorik analizlerde, alüminyum ve çelik malzeme için iki farklı malzeme modeli kullanılarak kıyaslama yapılmış, bu kullanılan iki malzeme modeli arasındaki farklar ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara uygunluğu araştırılmıştır.

Teorik analizlerde AL 5754 serisi sac malzeme için, *Bilinear Kinematic* ve *3 Parameters Barlat Anisotropic* malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu malzeme modelleri için, Çizelge 4.5’de verilen değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10’da kullanılan *Bilinear Kinematic* ve *3 Parameters Barlat Anisotropic* malzeme modelleri gösterilmiştir.

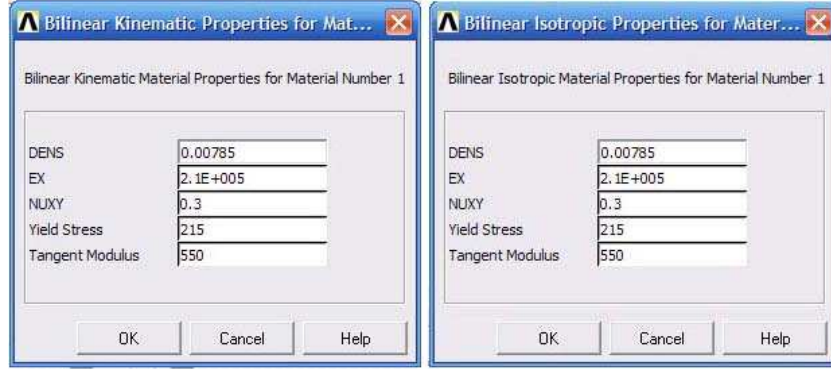


a

b

Şekil 4.10. Alüminyum için malzeme modelleri. a. Bilinear Kinematic, b. 3 Parameters Barlat Anisotropic.

Teorik analizlerde C 1006 serisi çelik malzeme için, *Bilinear Kinematic* ve *Bilinear Isotropic* malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu malzeme modelleri için, Çizelge 4.7’de verilen değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11’de kullanılan *Bilinear Kinematic* ve *Bilinear Isotropic* malzeme modelleri gösterilmiştir.

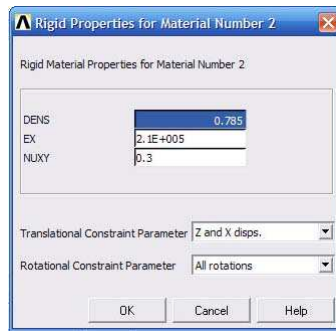


a

b

Şekil 4.11. Çelik malzeme için malzeme modelleri. a. Bilinear Kinematic, b. Bilinear Isotropic.

Teorik analizlerde, sac malzemede meydana gelen deformasyon göz önünde bulundurulmuştur. Kalıp elemanlarında meydana gelecek deformasyon göz ardı edilmiştir. Bu nedenle sac malzeme dışındaki diğer kalıp elemanları için *Rigid* malzeme tanımlanmıştır. Malzeme değerleri olarak C 1006 malzeme modelinin değerleri kullanılmıştır. Zımba ve baskı plakası için *Rigid* malzeme tanımlanırken, pres hareketi yukardan aşağı olduğu için, hareket serbestliği sadece Y yönünde verilmiştir. Z ve X yönündeki yer değiştirme sınırlandırılmıştır. Aynı zamanda dönme serbestliği hiç bir parçaya tanımlanmamıştır. Her yönde dönmeleri engellenmiştir. Şekil 4.12.'de tanımlanan *Rigid* malzeme ve yapılan sınırlılıklar gösterilmiştir.

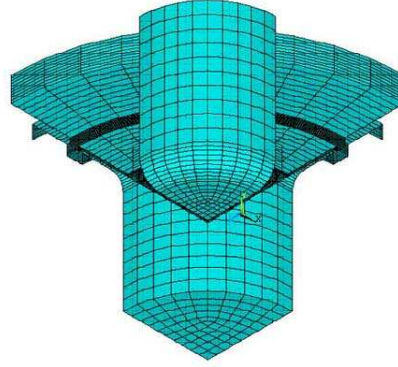


Şekil 4.12. Rigid malzeme ve sınırlılık tanımlanması.

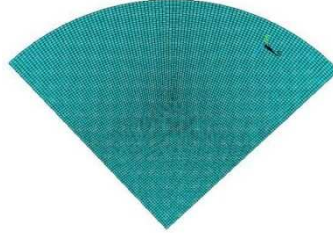


#### 4.4.4. Modele Ağ Örne

ANSYS ortamına aktarılan kalıp elemanları, kullanılan element tipi ve malzeme modeline göre ağ örülerek (Mesh) sonlu sayıda elemana ayrılmıştır. Şekil 4.13’de kalıp, baskı plakası, sac ve zımbanın ağ örülmüş şekli gösterilmiştir. Şekil 4.14’te sac malzemeye ait teorik model gösterilmiştir.



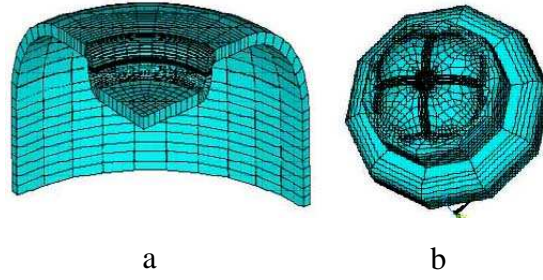
Şekil 4.13. Oluşturulan kalıba ait teorik model.



Şekil 4.14. Sac malzemeye ait teorik model.

Oluşturulan sistemde zımba uçları modüler olarak tasarlanmıştır. Bu şekilde tek kalıpta farklı ürünlerin şekillendirilebilmesi mümkündür. Bu zımba uçları için aynı kalıp elemanlarının kullanımı ile ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu zımba uçlarına ait teorik modeller Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

Nümerik analizlerde ağ örme (Mesh) işleminde sac malzemenin sonlu eleman sayısı yüksek tutulup, diğer kalıp elemanlarının sonlu eleman sayısı daha az tutulmuştur. Bu şekilde sadece sac malzemedeki deformasyon daha rahat gözlemlenmiştir ve analiz zamanlarında ciddi oranda azalma sağlanmıştır. Çizelge 4.9.’da kalıp, zımba, baskı plakası, sac malzeme ve zımba uçlarına ait sonlu eleman sayısı gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Zımba uçlarının teorik modelleri. a. Kestamit, b. Çelik.

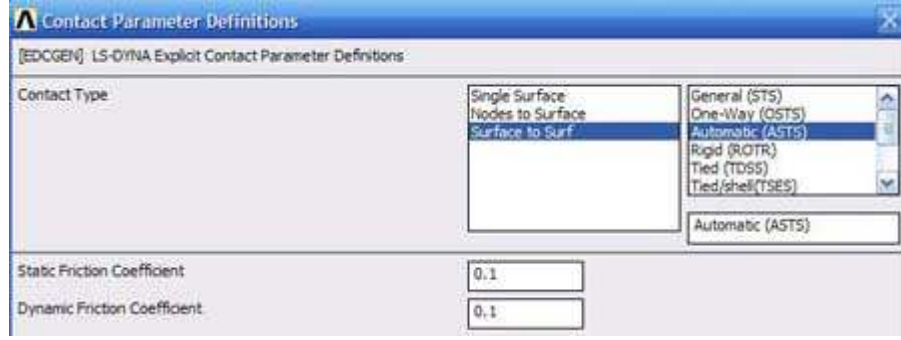
Çizelge 4.9. Kalıp elemanlarının sonlu eleman sayısı.

	Sonlu Eleman Sayısı
Sac	7500
Kalıp	275
Baskı Plakası	300
Zımba	375
Kestamit Zımba Ucu	700
Desenli Çelik Zımba	1876

#### 4.4.5. Kontak Modelinin Tanımlanması

ANSYS LS-DYNA’da dinamik analiz yapılırken, önemli noktalardan biri kontak modellemesidir. Parçalar arasındaki zamana bağlı analizlerde, parçaların birbiriyle temaslarında meydana gelecek durumlar kontak modelleme ile sağlanmaktadır.

Bu çalışmada parçalar arasında SURFACE TO SURFACE kontak modeli seçilmiştir. Kontak seçeneği ise AUTOMATIC olarak kullanılmıştır. Böylece seçilen parçaların teması halindeki davranışlarını, program algoritması otomatik olarak hesaplayacaktır. Kontak tanımlanırken statik ve dinamik sürtünme katsayısı 0,1 olarak kullanılmıştır. Şekil 4.16.’da kullanılan kontak modeli ve girilen değerler gösterilmiştir.



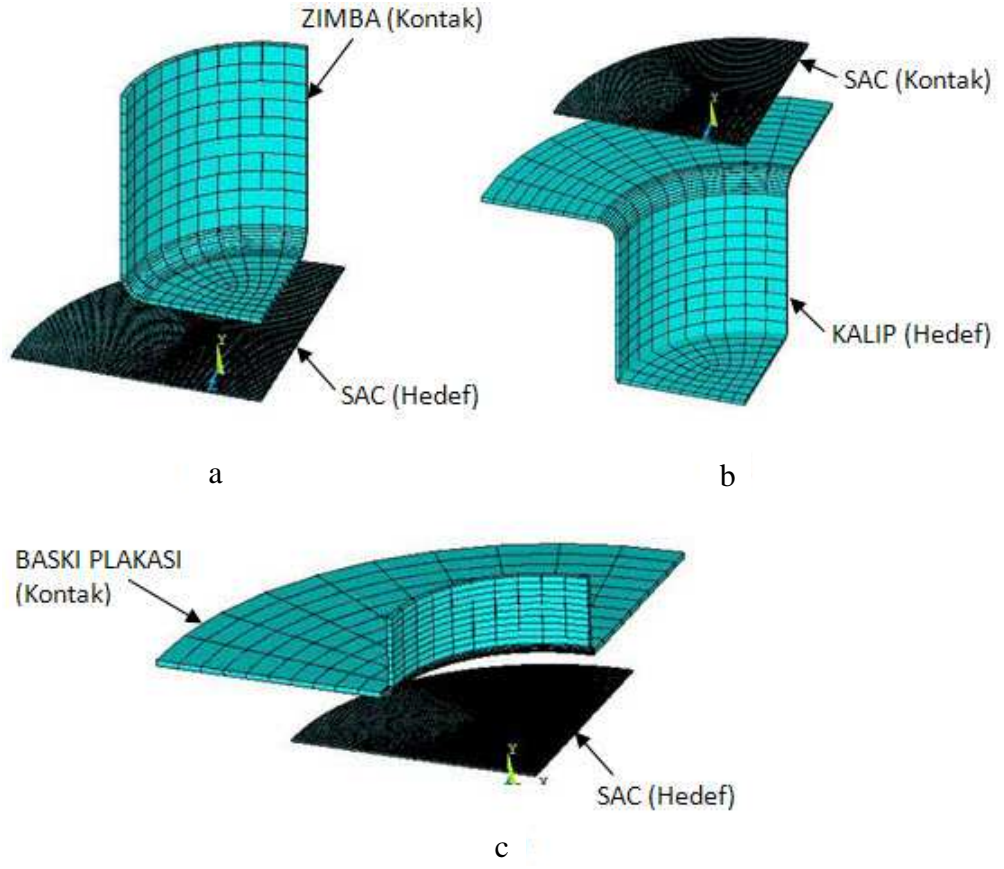
Şekil 4.16. Kullanılan kontak modeli.

Parçalar arasında kontak modellemesi yapılırken, kontak ve hedef parçaları tanımlanmaktadır. Bu parçalar belirlenirken hareketin başlangıç noktası referans alınmaktadır. Tanımlanan ilk parça kontak, ikinci parça ise hedef parçadır. Birbirleri arasında kontak tanımlanan parçalar;

- Zımba – Sac malzeme (Şekil 4.17-a).
- Sac malzeme – Kalıp (Şekil 4.17-b).
- Baskı Plakası – Sac malzeme (Şekil 4.17-c).

Kalıp sabit tutulup, baskı plakası ve zımba hareketli parçalar olarak tanımlanmıştır. Sabit kalıp üzerinde baskı plakası tarafından Y yönünde uygulanan kuvvet ile sac malzeme sıkıştırılmaktadır. Bu sıkıştırma sonrasında hareketli tanımlanan zımba baskı plakası kuvveti yönünde hareket ederek istenilen derinlikte sac malzemeyi şekillendirmektedir.

Teorik analizlerde kalıp içerisindeki akışkanın tanımlanması diğer bir önemli noktadır. Hızlı çözüm sağlaması açısından, kalıp içerisinde akışkan yerine, zımbanın hareketine ters yönde basınç tanımlanmıştır. Bu şekilde hem akışkanın kalıp içerisinde olması, hemde zımba ilerlemesiyle sıkışan akışkanın basınç değerinin sac malzemeye atanması sağlanmıştır.



Şekil 4.17. Birbirleri arasında kontak bulunan parçalar. a. Zimba-Sac, b. Sac-Kalıp, c. Baskı Plakası-Sac.

## BÖLÜM 5

### TEORİK VE DENEYSEL BULGULAR

Üretim işlemlerinde en çok kullanılan uygulama, bilgisayar ortamında işlemin simülasyon olarak gerçekleştirilmesidir. Bu sayede üretimde oluşan hatalar ve problemler tahmin edilmekte, üretim işlemi boyunca buna uygun önlemler alınmaktadır.

Bilgisayar ortamında işlemin simülasyonu için, modellenecek elemanlarda çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler, bilgisayar ortamında formülasyon tekniği ile modellenmektedir. Nümerik analizlerde kullanılan malzeme modeli, sonuçların doğruluğunu etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Teorik analizlerde, yanlış kullanılan malzeme modelleri, deneysel sonuçlarla yakın bir sonuç vermemekle birlikte, hataların meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Sonlu elemanlar yazılımlarında çok çeşitli malzeme modelleri bulunmaktadır. Bazı malzeme modelleri, sadece tek bir malzeme çeşidi için yapılmışken, bazı malzeme modelleri de birden çok malzeme çeşidi için kullanılabilir. Bu noktada ise hangi malzeme modelinin daha yakın bir sonuç vereceği konusu ortaya çıkmaktadır.

Bu bölümde, alüminyum ve çelik malzemeler için şekillendirme deneylerinin sonuçları verilmiştir. Bilgisayar ortamındaki simülasyon sonuçlarıyla, malzemelerde meydana gelecek deformasyonlar ve şekil değişimleri incelenmiştir. Deneysel ve teorik olarak ölçülen et kalınlıklarının karşılaştırılması, grafiksel olarak gösterilmiştir. Teorik analizlerde kullanılan çeşitli malzeme modellerinin, deformasyona ve kalınlık değişimlerine olan etkisi araştırılmıştır.

## 5.1. GİRİŞ

Şekillendirilen malzemedeki et kalınlığının değişimi, ürün kalitesine etki eden önemli faktörlerden birisidir. Et kalınlıklarındaki ani incelmeler ve ani değişimler, deformasyona olumsuz yönde etki etmektedir. Bu incelmeler, malzemelerin kolayca kopmasına, böylece şekillendirme sırasında istenmeyen durumların oluşmasına neden olmaktadır.

Teorik analizler, ANSYS LS-DYNA yazılımı kullanılarak eksplisit yöntemle bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Nümerik simülasyonlarda, alüminyum malzeme için Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri kullanılmıştır. Çelik malzeme için ise Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu malzeme modellerinin kullanımı ile malzemede meydana gelen deformasyonlar incelenmiştir. Malzeme modellerinin farklı olmasının, deformasyona ne gibi bir etkisi olduğu araştırılmıştır. Elde edilen teorik deformasyon sonuçlarından, malzemede meydana gelen kalınlık değişimleri gözlemlenmiştir. Deneyler sonunda üretilen parçalar, ortadan ikiye ayrılarak et kalınlıklarının ölçümleri yapılmış, kalınlık değişimleri incelenmiştir. Teorik ve deneysel kalınlık değişimleri karşılaştırılarak, aralarındaki farklar gösterilmiştir.

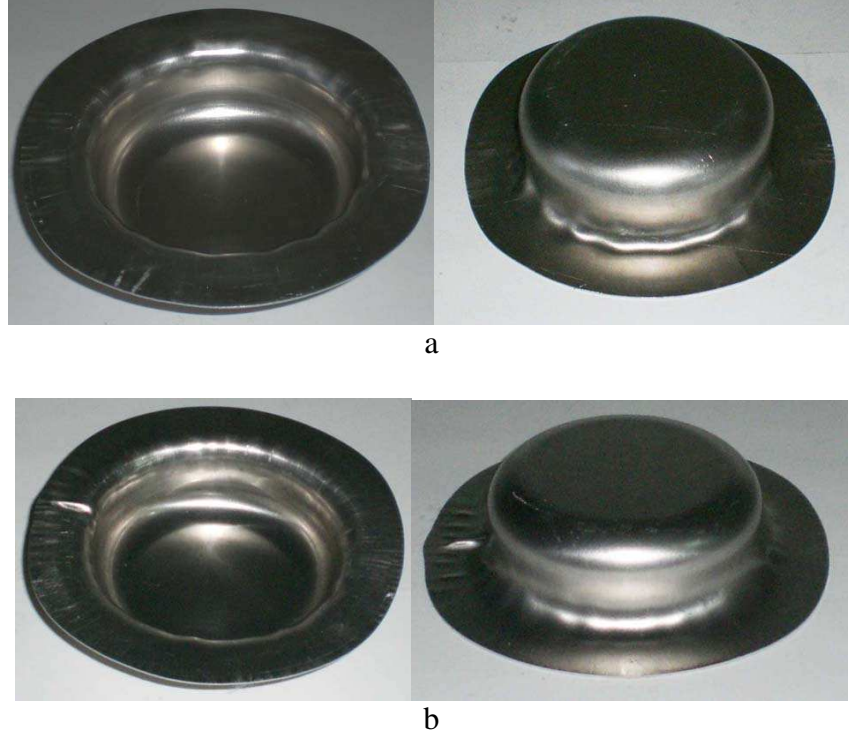
## 5.2. SİLİNDİRİK DÜZ ÇEKME

Kurulan sistemde, zımba uçları kullanılmadan önce, Al 5754 sac malzemenin silindirik şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Şekillendirme deneylerinde çekme yüksekliği ve akışkan basıncı parametreleri kullanılmıştır. Alüminyum malzemenin silindirik zımbanın şeklini almasına çalışılmıştır.

### 5.2.1. Al 5754

Bu deneylerde alüminyum malzemenin, zımbanın silindirik şeklini almasına çalışılmıştır. Şekillendirme deneylerinde, sıvı basıncı sabit 8 MPa olarak kullanılmıştır. Ön basınçlı ve ön basınçsız şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1'de (a) ön basınçlı ve (b) ön basınçsız şekillendirilmiş

alüminyum malzemeler gösterilmiştir. Şekillendirme işleminde kullanılan parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir.



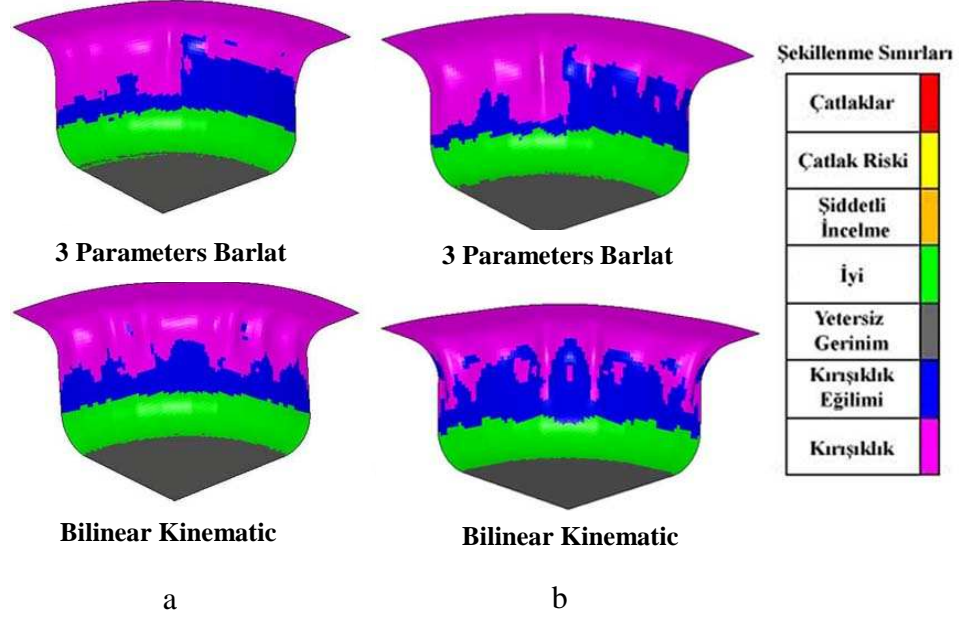
Şekil 5.1. Silindirik şekillendirilmiş alüminyum malzemeler. a. Ön basınçlı, b. Ön basınçsız.

Çizelge 5.1. Alüminyum malzemelerin silindirik şekillendirilme parametreleri.

Şekillendirilen Parça	Çekme Yüksekliği (mm)	Sıvı Basıncı (MPa)	Ön Sıvı Basıncı (MPa)
(a)	35	8	2
(b)	33	8	Yok

Deneilerin sonucunda alüminyum malzemenin, zımbanın şeklini tam olarak alması sağlanmıştır. Ön basıncın kullanılmadığı (b) şekillendirme deneylerinde flanş bölgelerinde kırışıklıklar ve katlanmalar görülmüştür. Alüminyum malzemenin silindirik şekillendirilmesinde en iyi sonuç, (a) 2 MPa ön basınç, 8 MPa akışkan basıncının kullanıldığı şekillendirme deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Yırtılmalar ve kopmalar gerçekleşmeden, düzgün ve pürüzsüz bir yüzey elde edilerek üretim yapılmıştır.

Teorik analizlerde alüminyum malzeme için Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri kullanılmıştır. Şekil 5.2’de (a) ön basınçlı ve (b) ön basınçsız şekillendirilmiş malzemelere ait, farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

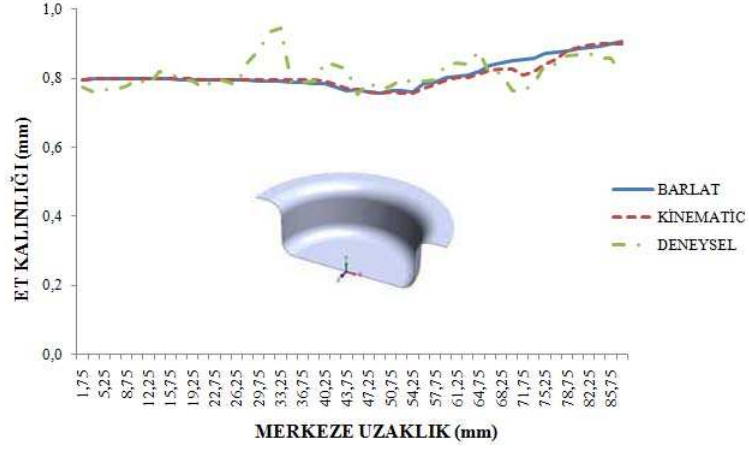


Şekil 5.2. Silindirik şekillendirilmiş alüminyum saclara ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları. a. Ön basınçlı, b. Ön basınçsız.

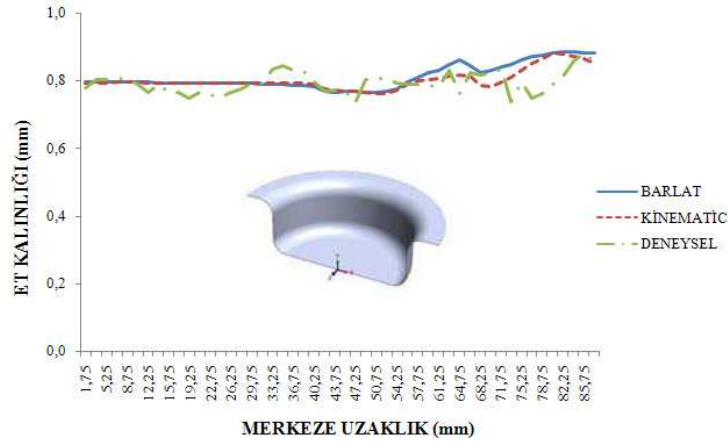
Simülasyon sonuçlarıyla, elde edilen deneysel sonuçlar arasında bir uyum olduğu görülmüştür. Teorik analizlerde şekillendirilen kabın duvar ve üst kıvrımlarında kırışıklıklar gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlarda bu noktalarda kısmen kırışıklık ve kırışıklık başlangıcı görülmüştür. Simülasyon sonuçlarıyla, malzemede meydana gelecek kıvrımların ve kırışmaların bölgesel tespitleri yapılabilmektedir. Bu bölgelerde meydana gelecek deformasyonlar önceden tahmin edilmiştir. Teorik analizlerde, Bilinear Kinematic malzeme modeli, yan duvarlarda daha fazla kırışıklık olabileceği sonucunu vermiştir. Fakat deneysel olarak şekillendirilen malzemelerde yan duvarlarda Bilinear Kinematic malzeme modelinin gösterdiği kadar çok kırışıklık gözlemlenmemiştir. 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modeli, deneysel sonuca daha yakın sonuç vermiştir.



Teorik analizlerden, farklı malzeme modellerine ait kalınlık değişimi elde edilmiştir. Bu kalınlık değişimleri, deneysel olarak şekillendirilmiş malzemenin kalınlık değişimleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 5.3'de (a) ön basıncılı ve (b) ön basıncısız şekillendirilmiş malzemelere ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri gsterilmiştir.



a



b

Şekil 5.3. Silindirik şekillendirilmiş malzemeye ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri. a. Ön basıncılı, b. Ön basıncısız.

(a) Ön basıncılı ve (b) ön basıncısız teorik şekillendirme deneylerinde, Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri arasında bir uyum gzlenmektedir. Parçanın merkezindeki kalınlık değişimleri Kinematic ve Barlat malzeme modellerinde aynıdır. Merkezden uzaklaştıka, yığılmalar artmakta ve malzeme modelleri arasında farklar oluşmaktadır. 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelinde, kenarlardaki yığılmalardan dolayı kalınlık artmıştır. Bilinear

Kinematic'te ise yığılma bölgelerinde, Barlat'a göre kalınlık daha az artmıştır. Deney sonunda elde edilen kalınlık değişimleri, teorik sonuçlara benzer sonuçlar vermekle birlikte, bazı noktalarda ani iniş ve çıkışlar görülmüştür.

### 5.3. KESTAMİT ZIMBA UÇLU ŞEKİLLENDİRME

Kestamit zımba ucu, silindirik zımbadan farklı olarak daha karmaşıktır. Kestamit zımba ucuyla şekillendirmede, Al 5754 serisi sac malzeme ve 0,35 mm kalınlığındaki C 1006 serisi çelik sac malzeme kullanılmıştır. Şekillendirme deneylerinde çekme yüksekliği ve akışkan basıncı parametreleri kullanılmıştır.

#### 5.3.1. Al 5754

Bu aşamada, farklı akışkan basınçlarında, malzemenin zımbada ki havuz boşluğunu doldurması gözlemlenmiştir. Alüminyum malzemenin şekillendirilmesinde kullanılan parametreler Çizelge 5.2'de, alüminyum malzemenin farklı sıvı basınçları ve çekme yükseklikleriyle şekillendirilmesinden elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Kestamit zımba ucuyla alüminyum sacların şekillendirme parametreleri.

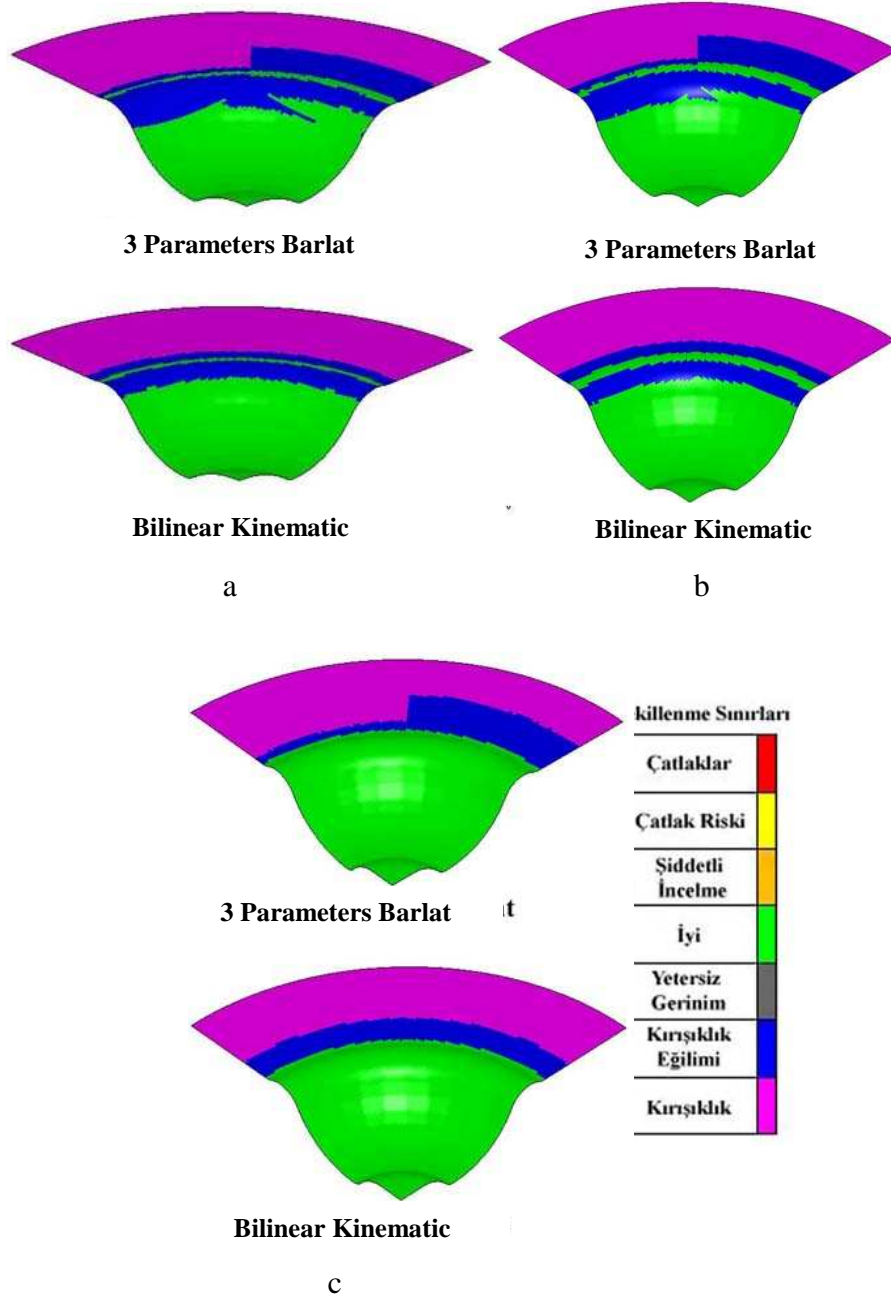
Şekillendirilen Parça	Çekme Yüksekliği (mm)	Sıvı Basıncı (MPa)	Ön Sıvı Basıncı (MPa)
(a)	15,05	7	Yok
(b)	20,2	10	Yok
(c)	15	15	Yok



Şekil 5.4. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum malzemeler. a. 7 MPa akışkan basınçlı, b. 10 MPa akışkan basınçlı, c. 15 MPa akışkan basınçlı.

Yapılan şekillendirme deneylerinde istenilen havuz doldurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kestamit zımba üzerindeki kıvrımlara malzemenin dolması ve sacın zımbanın şeklini alması sağlanmıştır. Deneylerde, ortalama 15 mm çekme yüksekliği elde edilmiştir. Bu çekme yüksekliğinde herhangi bir yırtılma veya kopma gerçekleşmemiştir. Şekillendirme deneyleri, 7 MPa ve 15 MPa akışkan basınçlarının kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden sadece bir tanesinde (b) sac malzemenin yırtılması gözlemlenmiştir.

Şekillendirilmiş alüminyum malzemeler için, Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modellerinin kullanıldığı teorik analizler yapılmıştır. Şekil 5.5’de şekillendirme deneylerinin yapıldığı alüminyum sac malzemelerin, farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları gösterilmiştir.



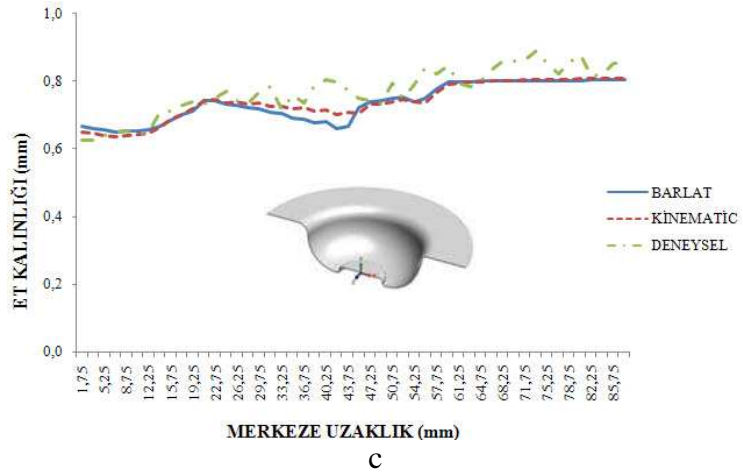
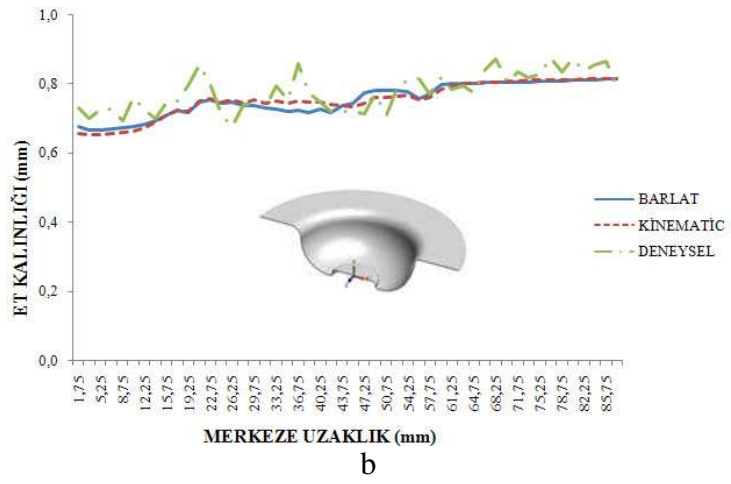
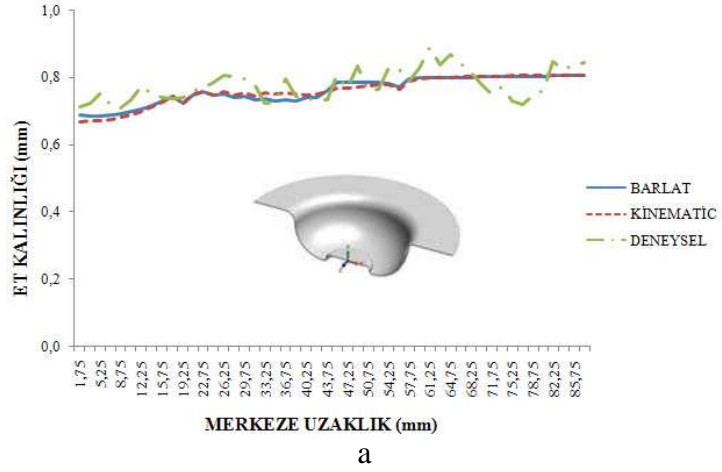
Şekil 5.5. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum saclara ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları. a. 7 MPa akışkan basıncı, b. 10 MPa akışkan basıncı, c. 15 MPa akışkan basıncı.

Teorik analizler ile deneysel sonuçlar arasında bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Teorik analizlerde, bütün parçalar için, şekillendirmenin parçanın duvar üst kıvrımına kadar düzgün bir şekilde meydana geldiği görülmektedir. Üst kenar kıvrımının, kırışıklığa eğilimli olabileceği belirlenmiştir. (c) 15 MPa akışkan basıncının kullanıldığı parçada, diğer parçalara göre, duvar üst kıvrımında şekillenmenin daha iyi olduğu görülmektedir. Malzemenin flanş bölgesinde

kırıksıklıkların meydana geleceği gözlemlenmiştir. Yırtılmanın meydana geldiği (b) parça için şekillenmenin düzgün olduğu görölmektedir. Bu parça için teorik analizlerde herhangi bir kopma yada yırtılma belirlenmemiştir. Deneysel çalışmada yırtılan bölge, analizlerde kırıksıklık eğiliminin olduğu bölge olarak saptanmıştır. Yırtılan parça için teorik analizler ile deneysel sonuç arasında bir zıtlık söz konusudur. Deformasyon yönünden, Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri aynı sonucu vermişlerdir.

Teorik analiz sonuçlarından, farklı malzeme modellerine ait kalınlık değişimleri elde edilmiştir. Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modellerine ait kalınlık değişimleri ve deneysel olarak ölçölen kalınlık değişimleri karşılaştırılmıştır. şekil 5.6'da bu kalınlık değişimlerinin grafiği gösterilmiştir.

Kalınlık değişimi grafiği incelendiğinde, Kinematic ve Barlat malzeme modellerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görölmektedir. Bu iki malzeme modeli arasında çok az bir fark meydana gelmiştir. Malzeme modelleri arasında, parçanın merkezinde küçük bir fark bulunmasına rağmen, merkezden uzaklařtıķa bu fark yerine bir uyumun meydana geldiği gözlemlenmiştir. (b) Yırtılan parça için, teorik malzeme modellerinde yırtılmanın oluşabileceğine dair herhangi bir veri görölmemiştir. Aksine malzeme modelleri kalınlık değişiminin düzgün bir şekilde elde edileceği sonucunu vermiştir. Deneysel kalınlık değişimi ile teorik kalınlık değişimi arasında bir fark olduğu saptanmıştır. (b) Yırtılmanın meydana geldiği parça için, deneysel kalınlık değişiminde, ani iniş ve çıkışların olduğu görölmektedir. Diğer parçalarda bu ani iniş ve ıkışlar görölmemiştir. Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modellerinin teorik analizlerde kullanılabileceği saptanmıştır.



Şekil 5.6. Kestamit zımba uçlu şekillendirmeye ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri. a. 7 MPa akışkan basınçlı, b. 10 MPa akışkan basınçlı, c. 15 MPa akışkan basınçlı.

### 5.3.2. C 1006 Çelik Sac Malzeme

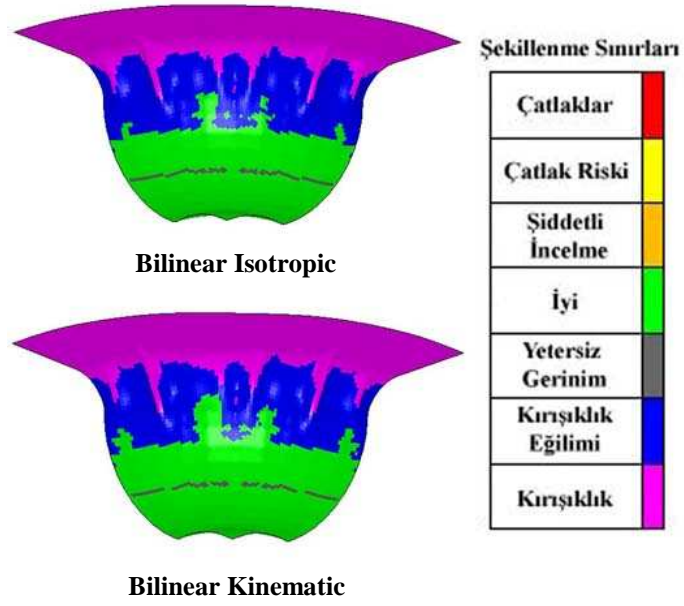
Alüminyum malzemenin şekillendirilmesinden sonra, kestamit zımba ucuyla 0,35 mm kalınlığında ki C 1006 serisi çelik sac malzemenin şekillendirilmesi üzerine çalışılmıştır. Şekillendirme deneylerinde en iyi sonuç 8 MPa akışkan basıncı, 25 mm çekme derinliğiyle elde edilmiştir. Şekil 5.7’de şekillendirilmiş çelik sac malzeme gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlıktaki çelik sac malzeme.

Deney sonucunda çelik malzemede yırtılmalar gözlenmezken, flanş kenarlarında ve duvar üst kıvrımında kırışıklıklar meydana gelmiştir. Malzeme, zımba havuzunu çok iyi bir şekilde doldurmuş, zımbanın alt tarafındaki köşe kıvrımları düzgün ve pürüzsüz bir şekilde oluşmuştur.

Çelik malzemenin teorik analizlerinde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu malzeme modelleri ile teorik şekillendirme analizleri yapılmış ve sac malzemedeki deformasyonlar gözlemlenmiştir. Şekil 5.8’de, 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzeme için farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları gösterilmiştir.

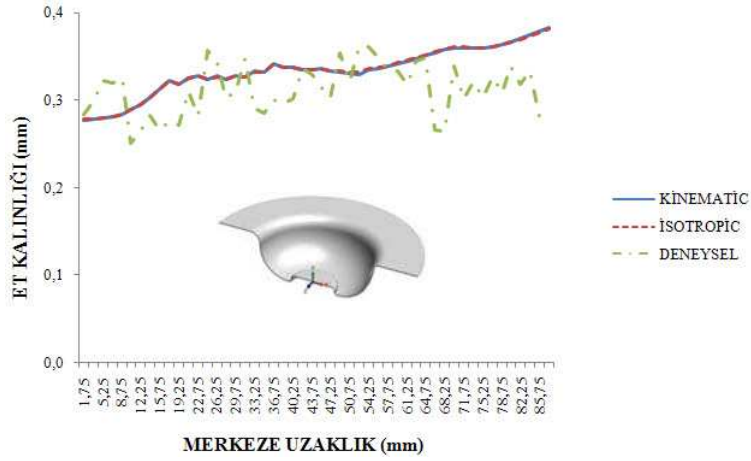


Şekil 5.8. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzemeye ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonucu.

Simülasyon sonuçları ile deneylerden elde edilen sonuçlar birbiriyle uyum göstermişlerdir. Simülasyon sonuçlarından, malzemenin alt tarafında şekillenmenin iyi olduğu, yan duvarlarda kırışıklıkların meydana geleceği, duvar üst kıvrımında ise yoğun şekilde kırışıklık gözleneceği belirlenmiştir. Duvar üst kıvrımında, malzemede yoğun şekilde katlanma bölgeleri tespit edilmiş, flanş kenarlarına doğru yine kırışıklıklar gözlemlenmiştir. Her iki malzeme modeli ile parçanın şekillenmesi esnasında meydana gelecek deformasyonlar önceden tahmin edilebilmiştir. Deformasyonların ön görülmesinde, iki malzeme modeli de deneysel sonuca uygun sonuçlar vermişlerdir. Teorik analizlerde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modelleri aynı sonucu vermişlerdir.

Teorik analizlerden elde edilen sonuçlarla, farklı malzeme modellerine ait kalınlık değişimleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 5.9'da şekillendirilmiş parçadan ölçülen kalınlık değişimleri ile farklı malzeme modellerinin kullanımı ile elde edilen kalınlık değişimlerinin karşılaştırıldığı grafik gösterilmiştir.





Şekil 5.9. Kestamit zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlıktaki çelik sac malzemenin teorik ve deneysel kalınlık değişimi.

Kalınlık değişimi grafiğinde, Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modellerinin, teorik analizlerde aynı sonucu verdiği görülmektedir. Deneysel olarak ölçülen kalınlık değişimleri, kısmen malzeme modellerine benzemektedir. Deneysel ölçümlerde, malzemenin ani bir şekilde incelendiği ve kalınlaştığı görülmektedir. Bu ani iniş ve çıkışların, sac malzemedeki kırışıklıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Analizlerde, Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modellerinin kullanılabileceği saptanmıştır.

#### 5.4. DESENLİ ZIMBA UÇLU ŞEKİLLENDİRME

Silindirik ve kestamit şekillendirme işlemlerinden sonra, daha zor olan desenli çelik zımba ucuyla şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde Al 5754 serisi alüminyum sac malzeme, 0,35 mm ve 0,6 mm kalınlığındaki C 1006 çelik sac malzemeler kullanılmıştır.

##### 5.4.1. Al 5754

Bu şekillendirme deneylerinde, formu daha karmaşık olan desenli çelik zımba kullanılmıştır. Sac malzemeye, bu desen şeklinin verilmesi üzerine çalışılmış, deneylerde farklı çekme yükseklikleri ve akışkan basınçları kullanılmıştır. Ön basınçlı ve ön basınçsız şekillendirme işlemleri yapılmış olup, Çizelge 5.3'te alüminyum malzemenin şekillendirme deneylerinde kullanılan parametreler

verilmiştir. Şekil 5.10’da desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum malzemeler gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Desenli zımba ucuyla alüminyum şekillendirme parametreleri.

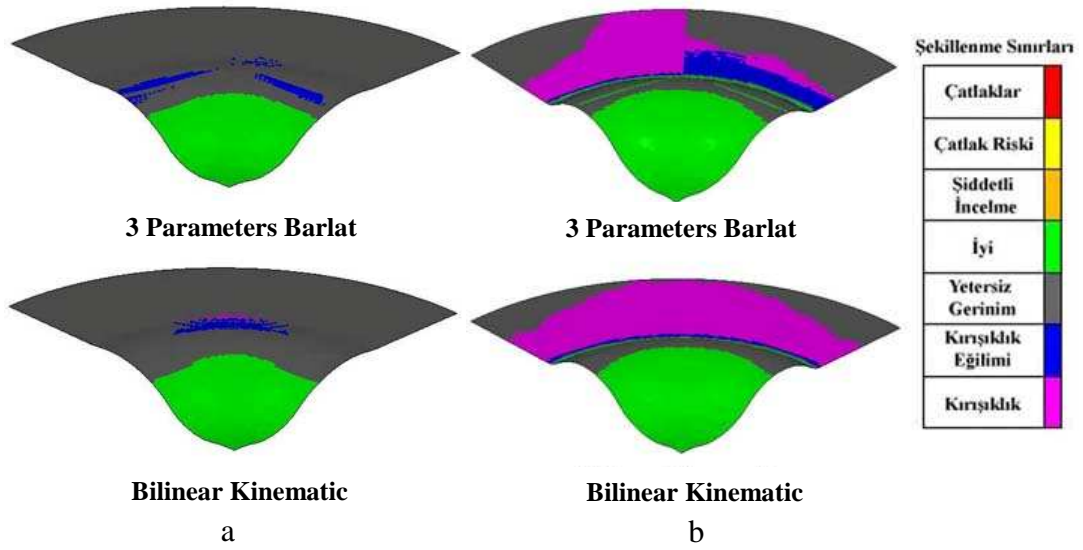
Şekillendirilen Parça	Çekme Yüksekliği (mm)	Sıvı Basıncı (MPa)	Ön Sıvı Basıncı (MPa)
(a)	14,28	2	Yok
(b)	8,2	4,5	1



Şekil 5.10. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş alüminyum malzemeler. a. Ön basınçsız 2 MPa akışkan basınçlı, b. Ön basınçlı 4,5 MPa akışkan basınçlı.

Desenli çelik zımba ucuyla alüminyum malzemenin şekillendirilmesinde hatalar meydana gelmiştir. Akışkan basıncının 2 MPa, çekme yüksekliğinin 14,28 mm olduğu şekillendirmede meydana gelen hatalardan sonra, akışkan basıncı 4,5 MPa yükseltilmiş, çekme derinliği 8,2 mm indirilmiştir. Ön basınç olarak, 1 MPa kullanıldığı halde malzemede gene yırtılmalar gözlemlenmiştir.

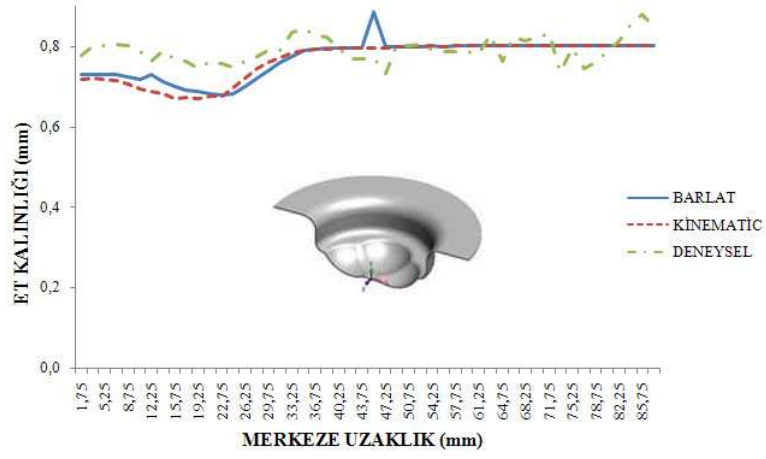
Şekillendirilmiş alüminyum malzemeler için Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri kullanılarak teorik analizler yapılmıştır. Şekil 5.11’de (a) ön basınçsız 2 MPa akışkan basıncının kullanıldığı simülasyon sonucu ve (b) 1 MPa ön basınçlı 4,5 MPa akışkan basıncının kullanıldığı simülasyon sonucu gösterilmiştir.



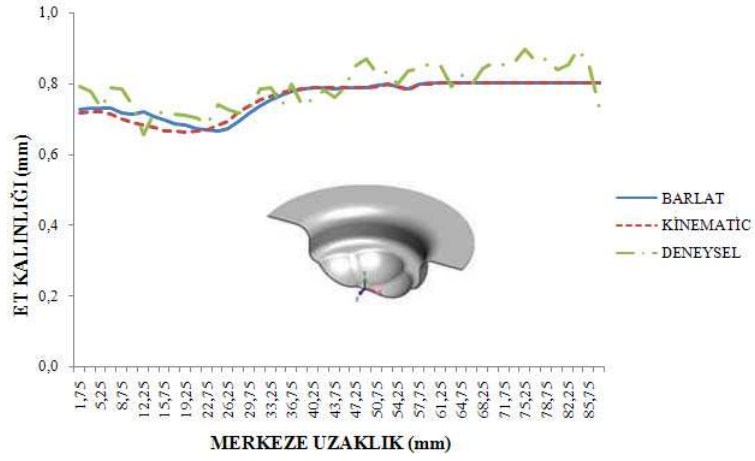
Şekil 5.11. Desenli zımba ucuyla alüminyum malzemelerin şekillendirilmesinin simülasyon sonucu. a. Ön basınçsız 2 MPa akışkan basınçlı, b. Ön basınçlı 4,5 MPa akışkan basınçlı.

Bu teorik analizler ile elde edilen deney sonuçları arasında bir zıtlık söz konusudur. Teorik analizlerde, desen yüksekliğinin bulunduğu noktada şekillendirmenin gayet iyi olduğu görülmektedir. Teorik sonuçlarda sac malzeme, desen formunu çok iyi bir şekilde almaktadır. Fakat deneysel sonuçlarda şekillendirmenin daha başlangıç seviyesinde, desen formunun bulunduğu noktada yırtılmalar meydana gelmektedir. Deformasyon analizlerinde, Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri birbirlerine yakın sonuçlar vermişlerdir.

Teorik analizlerden elde edilen kalınlık değişimi ile deneysel ölçümlerden elde edilen kalınlık değişimi arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 5.12’de malzeme modellerine ait teorik kalınlık değişimleri ile deneysel kalın değişimlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



a



b

Şekil 5.12. Desenli çelik zımba ucuyla şekillendirmeye ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri. a. Ön basınçsız 2 MPa akışkan basınçlı, b. Ön basınçlı 4,5 MPa akışkan basınçlı.

Kalınlık değişimi grafiğinde, Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri arasında bir uyum olduğu görülmüştür. Başlangıçta, parçanın merkezinde bu iki malzeme modeli arasında farklar meydana gelirken, merkezden uzaklaştıkça, birbirleriyle benzer sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bilinear Kinematic malzeme modeli (a) ve (b) parçaları için aynı grafiği verirken, 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modeli bu iki parça için farklı sonuçlar vermiştir. Özellikle (a) parçasında Barlat malzeme modeliyle, ani bir yükseliş ve ardından düşüş gözlemlenmiştir.

#### 5.4.2. C 1006 Çelik Sac Malzeme

Alüminyum malzemede meydana gelen hatalardan sonra, çelik sac şekillendirme deneylerine geçilmiştir. İlk olarak 0,35 mm kalınlığındaki C 1006 serisi çelik sac malzemenin şekillendirilmesine çalışılmıştır. Bu malzeme için yapılan deneylerde 4 MPa akışkan basıncında şekillendirilmiş parçada yırtılma meydana gelmiştir. Şekil 5.13'de yırtılmanın meydana geldiği sac malzeme gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Desenli zımba ucuyla 4 MPa akışkan basıncında şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzeme.

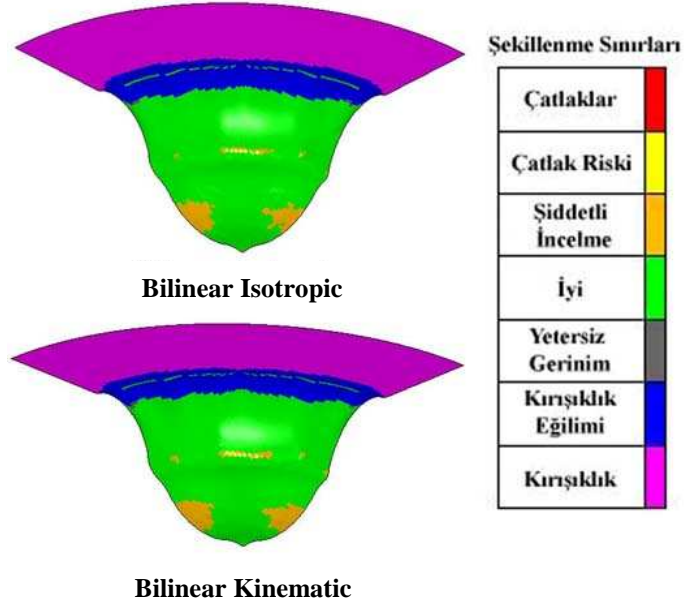
0,35 mm kalınlığındaki çelik sacda en iyi sonuç, 7 MPa akışkan basıncı ve 28,78 mm çekme derinliğinde elde edilmiştir. Şekil 5.14'de şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzeme gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Desenli zımba ucuyla 7 MPa akışkan basıncında şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzeme.

0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzemede desen formunun şekillendirilmesi düzgün bir şekilde başarılmıştır. Kabın alt yüzeyine desen formu düzgün ve pürüzsüz bir şekilde oluşturulmuştur. Fakat yan duvarlar ve üst kenar kıvrımında kırışıklıklar yoğun bir şekilde gözlemlenmektedir.

Alüminyum malzemelerin teorik şekillendirme analizlerinden sonra çelik sac malzemenin teorik şekillendirme analizleri yapılmıştır. Şekil 5.15’de 7 MPa akışkan basıncıyla şekillendirilmiş, farklı malzeme modellerinin kullanıldığı 0,35 mm kalınlığındaki çelik sac malzemeye ait simülasyon sonucu gösterilmiştir.

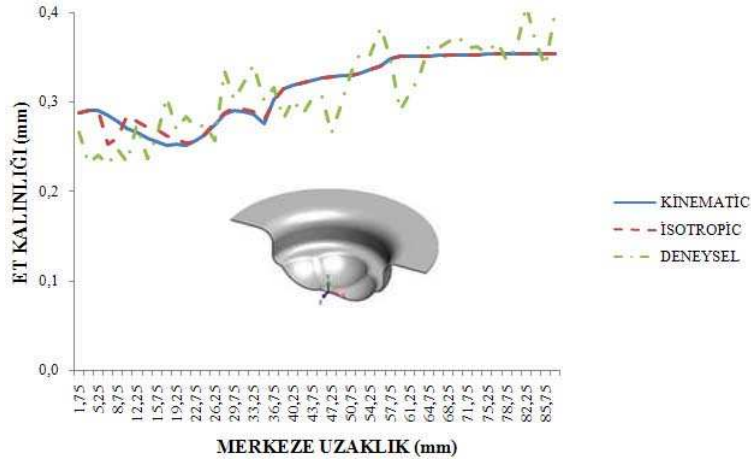


Şekil 5.15. Desenli zımba ucuyla 7 MPa akışkan basıncıyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki sac malzemeye ait farklı malzeme modeli simülasyon sonucu.

Teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında bir uyum söz konusudur. Teorik sonuçlarda, malzemedeki desen formunun düzgün bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Bu sonuç deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir. Üst kenara doğru yaklaşıldığında kırışıklığa meyilli olan bölgeler görülmektedir. Kabın üst kenar kıvrımında kırışıklık olma ihtimali gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlarda da bu bölgede kırışıklıklar görülmüştür. Kullanılan Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modelleri, deneysel sonuca yakın sonuçlar vermişlerdir. Deformasyon analizlerde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modellerinin kullanılabilmesi saptanmıştır.

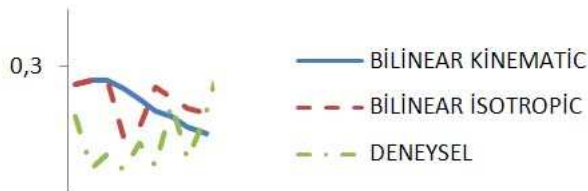
Teorik analizlerden, farklı malzeme modelleri kullanımı ile elde edilen sonuçlara göre kalınlık değişimleri incelenmiştir. Bu kalınlık değişimleri ile deneysel olarak

elde edilmiş kalınlık değişimleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya ait grafik Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,35 mm kalınlığındaki saca ait teorik ve deneysel kalınlık değişimi.

Kalınlık değişimi incelendiğinde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modellerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Parçanın orta ekseninde bir fark oluşmasına rağmen, merkezden uzaklaştıkça bu fark ortadan kalkmıştır. Ani bir düşüş noktası iki malzeme modeli için aynı yerde meydana gelmiştir. Deneysel sonuç teorik sonuçlara göre kısmen benzerlikler göstermektedir. Deneysel sonuçta gözlenen, merkezdeki malzeme kalınlığının ani düşüşü Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Bu ani düşüş, Bilinear Isotropic malzeme modeliyle tespit edilebilmiştir. Bilinear Kinematic malzeme modelinde düzgün bir azalış gözlemlenmiştir. Daha sonra deneysel sonuçla, malzeme modelleri arasında belirgin farklar meydana gelmiştir. Kalınlıktaki ani iniş ve çıkışlar, şekillendirme sırasında malzemedeki meydana gelen kırışmalardan kaynaklanmıştır.



Şekil 5.17. Desenli zımbayla 0,35 mm kalınlıktaki çelik saca ait kalınlık değişimi.

Desenli çelik zımba ile son olarak 0,6 mm kalınlığındaki çelik sac malzemenin şekillendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.4’de 0,6 mm kalınlığındaki çelik malzemenin şekillendirilmesine ait parametreler, Şekil 5.18’de şekillendirilmiş çelik sac malzemeler gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Desenli zımba ucuyla 0,6 mm kalınlıktaki sac malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan parametreler.

Şekillendirilen Parça	Çekme Yüksekliği (mm)	Sıvı Basıncı (MPa)	Ön Sıvı Basıncı (MPa)
(a)	26,83	8	Yok
(b)	32,5	14	Yok



a



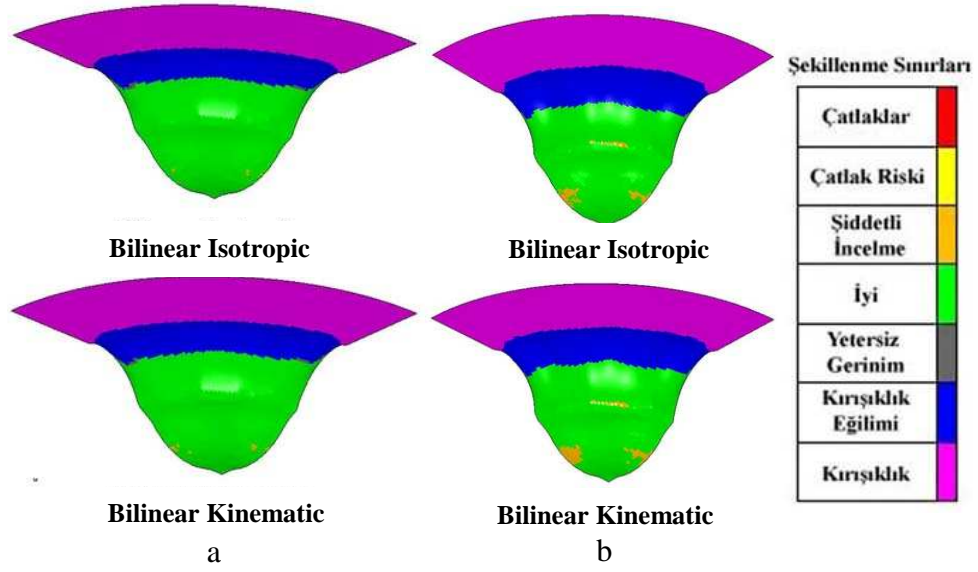
b

Şekil 5.18. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,6 mm kalınlıktaki çelik sac malzemeler. a. 8 MPa akışkan basınçlı, b. 14 MPa akışkan basınçlı.

Deney sonucunda, çelik malzemelere desen formu tam olarak oluşturulmuştur. Desen formu üzerinde, yan duvarlarda ve duvar üst kıvrımında kırışıklık ve katlanmalar meydana gelmemiştir. Malzemede düzgün bir şekilde, pürüzsüz bir şekillendirme oluşturulmuştur.

0,6 mm kalınlığındaki çelik sac malzemeler için, teorik şekillendirme analizlerinde Bilinear Isotropic ve Bilinear Kinematic malzeme modelleri kullanılmıştır. Şekil 5.19’da 0,6 mm kalınlığındaki sac malzemeye ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları gösterilmiştir.





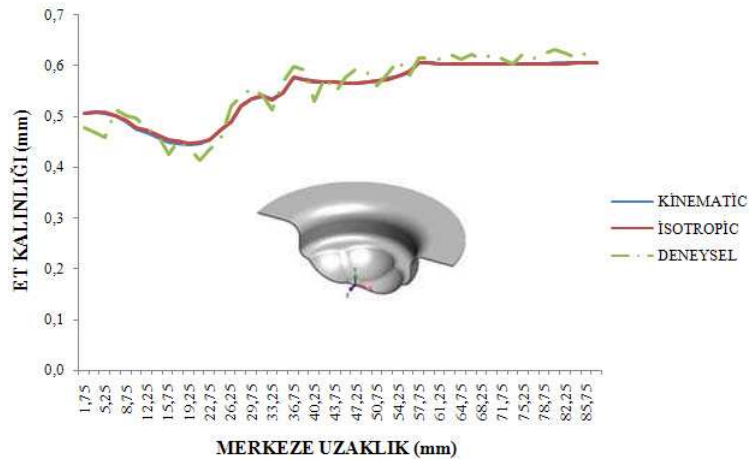
Şekil 5.19. Desenli zımba ucuyla şekillendirilmiş 0,6 mm kalınlıktaki çelik saclara ait farklı malzeme modellerinin kullanıldığı simülasyon sonuçları. a. 8 MPa akışkan basınçlı, b. 14 MPa akışkan basınçlı.

Teorik analiz sonuçlarıyla, deneysel sonuçlar arasında bir uyum gözlenmektedir. Teorik sonuçlarda, kabın alt yüzeyinde desen formunun düzgün bir şekilde oluştuğu görülmektedir. (a) Desen formunun düzgün bir şekilde şekillendiği, (b) desen formunun en tepe noktasında bölgesel olarak ciddi oranda incelme görülmektedir. Bilinear Isotropic ve Bilinear Kinematic malzeme modelleri, deneysel sonuçlara benzer sonuçlar vermişlerdir. (b) Parçada incelme bölgesi Bilinear Kinematic malzeme modeli ile daha fazla görülmektedir. Bilinear Isotropic malzeme modelinde, incelme daha küçük bir bölgede gerçekleşmiştir.

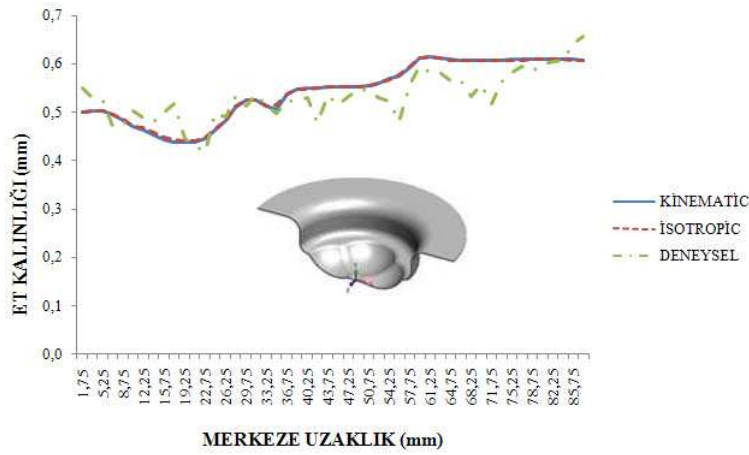
Teorik analizlerden, farklı malzeme modeli kullanımıyla elde edilen kalınlık değişimleriyle, deneysel olarak ölçülen kalınlık değişimleri incelenmiştir. (a) ve (b) parçalarına ait teorik ve deneysel kalınlık değişimleri Şekil 5.20’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Grafik incelendiğinde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modelleri arasında bir uyum gözlenmektedir. Bu iki malzeme modelinin kullanımıyla, birbirlerine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. (a) ve (b) parçaları için deneysel olarak elde edilen kalınlık değişimleri, teorik kalınlık değişimlerine yakın sonuçlar vermiştir. (a) 8 MPa akışkan basıncıyla yapılan şekillendirmeye ait deneysel kalınlık

değişimi teorik sonuçlara çok yakın olmuştur. Bu şekillendirme deneyinde iniş ve çıkışlar çok az miktarlarda meydana gelmiştir. Bu sayede malzemede ani incelemeler görülmemiştir. (b) 14 MPa akışkan basıncıyla yapılan şekillendirmeye ait deneysel kalınlık değişimlerinde ani iniş ve çıkışlar büyük değerlerde meydana gelmiştir. Bu yüzden, deformasyon analizlerinde desen formu üzerinde ani incelmeler görülmektedir. Teorik analizlerde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modellerinin kullanılabileceği saptanmıştır.



a



b

Şekil 5.20. Desenli zımbayla şekillendirilmiş 0,6 mm kalınlığındaki saca ait teorik ve deneysel kalınlık değişimi. a. 8 MPa akışkan basınçlı, b. 14 MPa akışkan basınçlı.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 6.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada AL 5754 serisi alüminyum sac malzeme ve C 1006 serisi çelik sac malzeme, hidro şekillendirme yöntemiyle plastik olarak, dişi kalıp olmadan sadece zımba kullanımıyla akışkan ortam içerisinde şekillendirilmiştir. İşlem sırasında malzemede meydana gelen kesit incelmeleri ve deformasyon miktarları ölçülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar, ANSYS LS DYNA programı ile teorik olarak simüle edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Hidro şekillendirme sistemiyle, kalıp tasarımındaki parça sayısı azaltılmaktadır. Bu metotla, dişi kalıp kullanılmadan sadece zımba ile şekillendirme gerçekleştirilmekte ve tek bir kalıp kullanımı ile birden fazla ürün üretilmektedir. Böylece maliyet oranları önemli oranda düşürülmektedir.
- Youssef ve Denault'un [15] çalışmalarıyla benzer şekilde, akışkan ortam kullanılması ile sac malzeme ve kalıp arasındaki sürtünme azaltılmakta ve sürtünmeden kaynaklanan aşınma gibi üretimi olumsuz etkileyen parametreler ortadan kaldırılmaktadır. Parçalar akışkan ortam sayesinde düzgün ve pürüzsüz bir şekilde üretilmektedir.
- Alüminyum malzemenin silindirik şekillendirilmesinde kullanılan ön basıncın, şekillendirme üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. 0,8 mm kalınlıktaki alüminyum malzemede, kullanılan ön basınç sayesinde minimum kalınlık 0,75 mm, ön basınç kullanılmadan yapılan şekillendirmede minimum kalınlık 0,72 mm olarak belirlenmektedir (Şekil 5.3).

- Silindirik şekillendirme deneylerinde, 0,8 mm kalınlıktaki AL 5754 sac malzeme, başarılı bir şekilde 8 MPa akışkan basıncı ile 35 mm çekme yüksekliği elde edilmektedir. Malzemenin taban, yan duvar ve kenar kıvrımlarında kırışıklık görülmemektedir. Alüminyum malzemede kalınlık 0,94 mm ile 0,75 mm arasında değişmektedir. 0,8 mm kalınlıktaki sac malzemede minimum 0,75 mm kalınlık elde edilmesiyle, malzemede 0,05 mm incelme olmaktadır.
- Kestamit zımba uçlu şekillendirme deneylerinde, zımba ucundaki havuz boşluğu başarılı bir şekilde şekillendirilmiştir. Köşe ve kenar kıvrımları başarılı bir şekilde doldurulmuştur. Şekillendirme deneylerinde farklı akışkan basınçları ile aynı çekme yükseklikleri elde edilmektedir. 7 MPa akışkan basıncının kullanıldığı şekillendirme sonucunda malzemede kalınlık değişimi maksimum 0,88 mm, minimum 0,71 mm'dir. Akışkan basıncı 15 MPa'a arttırıldığında kalınlık değişimi maksimum 0,89 mm, minimum 0,62 mm olduğu görülmektedir. Maksimum kalınlıklar flanş kenarlarında meydana gelmektedir.
- Desenli zımba ucuyla 0,6 mm C 1006 sac malzemenin şekillendirilmesinde, 8 MPa akışkan basıncında kalınlık değişimi maksimum 0,63 mm, minimum 0,41 mm olduğu görülmektedir. Akışkan basıncı 14 MPa'a arttırıldığında kalınlık değişimi maksimum 0,68 mm, minimum 0,41 mm olduğu görülmektedir.
- ANSYS LS DYNA programı hidro şekillendirme işlemlerinin nümerik simülasyonlarında kullanılabilen bir yazılımdır. Alüminyum malzeme için, teorik analizlerde Bilinear Kinematic ve 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelleri kullanılarak yapılan karşılaştırmada, bu iki malzeme modelinin birbirlerine benzer ve yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Zampoli ve arkadaşlarının da [27] çalışmalarında belirttiği gibi, deneysel sonuçlara en yakın sonuç ise 3 Parameters Barlat Anisotropic malzeme modelinin kullanıldığı nümerik simülasyonlarla elde edilmektedir. Çelik malzeme için teorik analizlerde Bilinear Kinematic ve Bilinear Isotropic malzeme modelleri kullanılarak yapılan karşılaştırmada, bu iki malzeme

modelinin birbirlerine çok yakın ve neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmektedir. Şekillendirme deneylerinde, 0,35 mm kalınlıktaki çelik sacda merkez noktada meydana gelen kalınlık düşüşü, Bilinear Isotropic malzeme modeli ile belirlenmektedir (Şekil 5.17). Bu küçük farka rağmen her iki malzeme modeli de çelik malzemelerin nümerik simülasyonlarında kullanılabilir.

- Teorik sonuçlarla, deneysel sonuçlar arasında malzemelerin şekillendirme miktarları ve kalınlık değişimleri açısından %85 oranında bir uyum saptanmaktadır. Bilgisayar ortamında yapılan analizlerde üretim esnasında karşılaşılabilecek sorunlar ve hatalar (kesit incelemeleri, kırışıklıklar, katlanmalar vb.) tespit edilmektedir.

## 6.2. ÖNERİLER

Kurulan sistem tamamıyla bilgisayar kontrollü olabilir. Bu sayede gerekli olan ilerleme ve akışkan basıncı gibi parametreler daha kontrollü bir şekilde üretim yapılabilir.

Kestamit zımba ucuyla şekillendirmede karşılaşılan yırtılma (Şekil 5.4.b) ve desenli zımba ucuyla yapılan şekillendirmelerde görülen yırtılmalar (Şekil 5.10, Şekil 5.13), baskı plakasının düzgün bir şekilde sac malzemeyi basmaması yüzünden meydana gelen çentik etkisiyle oluşmaktadır. Uygulanan yükün sürekli olması sebebiyle, çentik etkisinden meydana gelen çatlak büyümekte, zımbanın hareketine paralel olarak gelişmektedir. Daha kontrollü baskı plakası kuvveti kullanımıyla bu hatalar giderilebilir.

İleriki aşamalarda, zımba olmadan, zımba yerine akışkan sıvının da kullanılması ile şekillendirme çalışmaları yapılabilir. Akışkan sıvının ısıtılmasıyla şekillendirmeye olan etkileri araştırılabilir. Kalınlığı daha fazla olan malzemelerle çalışılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Cao, J. And Boyce M. C., “A predictive tool for delaying wrinkling and tearing failures in sheet metal forming”, *Journal of Engineering Material and Technology*, 119: 354-365 (1997).
2. Kawaka, M., Olejnik, L., Rosochowski, A., Sunaga, H. And Makinouchi A., “Simulation of wrinkling in sheet metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 109: 283-289 (2001).
3. Uzun, İ. ve Erişkin, Y., “Saç metal kalıpcılığı, 2. Basım”, *M.E.B. Devlet Kitapları*, İstanbul, 287-290 (1997).
4. Koçar, O., “Alüminyum 1050 tüplerin şekillendirilmesinin teoriksel ve deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, 2-3, 50-51, 55-56 (2006).
5. McClintock, F. A., “A criterion for ductile fracture by the growth of holes”, *Journal of Applied Mechanics*, 35: 363-371 (1968).
6. 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).
7. Tirosh, J., Yossifon, S., Eshel, R. And Betzer, “A hydroforming process of uniform wall thickness products”, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 99: 685-691 (1977).
8. 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).
9. Clift, S. E., Hartley, P., Sturgess, C. E. N. And Rowe, G. W., “Fracture prediction in plastic deformation process”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 32 (1): 1-17 (1990).

10. Hartley, P., Pillinger, I. And Sturgess, C., “Numerical modeling of material deformation processes research development and applications”, *Springer-Verlag*, 13: 243-255 (1992).
11. 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).
12. 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).
13. Marnalis, A. G., Manolakos, D. E. And Baldoukas, A. K., “Simulation of sheet metal forming using eksplisit finite-element techniques: Effect of material and forming characteristics part 1. Deep-drawing of cylindrical cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 72: 48-60 (1997).
14. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E. And Baldoukas, A. K., “Simulation of sheet metal forming using eksplisit finite-element techniques: Effect of material and forming characteristics part 2. Deep-drawing of square cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 72: 110-116 (1997).
15. Youssef, Y. And Denault, J., “Thermoformed glass fiber reinforced polypropylene microstructure”, *Mechanical Properties and Residual Stresses, Polymer Composites*, 19 (3): 301-309 (1998).
16. Brunet, M., Mguil, S. And Morestin, F., “Analytical and experimental studies of necking in sheet metal forming process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 80: 40-46 (1998).
17. Larsen, B., “Hydromechanical forming of sheet metal”, *Sheet Metal Industries*, 28: 162-166 (2000).
18. Zhang, S. H. And Danckert, J., “Development of hydromechanical deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 83: 873-882 (1998).
19. 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 (2000).

20. Mattiasson, K., "On finite element simulation of sheet metal forming process in industry", *European Congress on Computational Methods in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2000)*, Barcelona, 11-14 (2000).
21. Zhang, S. H., Nielsen, K. B., Danckert, J., Kang, D. C. And Lang, L. H., "Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes", *Journal of Materials Processing Technology*, 43: 102 (2000).
22. Vollertsen, F., "State of the art and perspectives of hydroforming of tubes and sheets", *Journal of Materials Science Technology*, 17 (3): 321-324 (2001).
23. Lei, L., Hwang, S. And Kang, S., "Finite element analysis and design in stainless steel sheet forming and its experimental comparison", *Journal of Materials Processing Technology*, 110: 70-77 (2001).
24. Gantar, G., Pepeinjak, T. And Kuzman, T., "Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations", *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131: 54-59 (2002).
25. Çelikayar, G., "Yüksek basınç altında metallerin şekillendirilmesi (Hidroforming)", *III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 29-38 (2003).
26. Zhang, S. H., Jensen, M. R., Nielsen, K. B., Danckert, J., Lang, L. H. And Kang, D. C., "Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups", *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 544-550 (2003).
27. Zampaloni, M., Abedrabbo, N. And Pourboghrat, F., "Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals", *International Journal of Mechanical Sciences*, 45: 1815-1848 (2003).
28. Şahin, S., "Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması", *Mühendis ve Makine*, 45 (533): 35-39 (2004).
29. Zhang, S. H., Wang, Z. R., Xu, Y., Wang, Z. T. And Zhou, L. X., "Recent developments in sheet hydroforming technology", *Journal of Materials Processing Technology*, 151: 237-241 (2004).
30. Lang, L. H., Wang, Z. R., Kang, D. C., Yuan, S. J., Zhang, S. H., Danckert, J. And Nielsen, K. B., "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube



- hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 151: 165-177 (2004).
31. Jain, N., Wang, J. And Alexander, R., “Finite element analysis of dual hydroforming processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 59-65 (2004).
  32. Kim, J., Son, B. M., Kang, B. S., Hwang, S. M. And 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).
  33. Palumbo, G., Pinto, S. And Tricarico, L., “Numerical/experimental analysis of the sheet hydro forming process using cylindrical, square and compound shaped cavities”, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156: 1435-1442 (2004).
  34. Xu, Y. C., Kang, D. C. And Zhang, S. H., “Investigation of SUS304 stainless steel with warm hydro-mechanical deep drawing”, *Journal of Materials Science & Technology*, 20 (1): 92-93 (2004).
  35. Hartl, Ch., “Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 383-392 (2005).
  36. Shim, H. And Yang, D. Y., “A simple method to determine pressure curve for sheet hydro-forming and experimental verification”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 134-142 (2005).
  37. Abedrabbo, N., Zampaloni M. A. And Pourboghrat, F., “Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47: 333-358 (2005).
  38. Li, M., Yan, Y., Peng, J. And Wu, R., “Soft-punch hydro-forming of 304 stainless steel sheet”, *Journal of Materials Science & Technology*, 22 (4): 478-482 (2006).
  39. Hama, T., Hatakeyama, T., Asakawa, M., Amino, H., Makinouchi, A., Fujimoto, H. And Takuda, H., “Finite-element simulation of the elliptical cup deep drawing process by sheet hydroforming”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 43 (3): 234-246 (2007).

40. Chen, F. K., Wang, S. J. And Lin, R. H., “A study of forming pressure in the tube hydroforming process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 404-409 (2007).
41. Zhao, S. D., Zhang, Z. Y., Zhang, Y. And Yuan, J. H., “The study on forming principle in the process of hydro-mechanical reverse deep drawing with axial pushing force for cylindrical cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188: 300-303 (2007).
42. Cherouat, A., Ayadi, M., Mezghani, N. And Slimani, F., “Experimental and finite element modelling of thin sheet hydroforming processes”, *International Journal of Material Forming*, 1 (1): 313-316 (2008).
43. Del Prete, A., Anglani, A., Primo, T. And Spagnolo, A., “Computer Aided Simulation as valid tool for sheet hydroforming process development”, *International Journal of Material Forming*, 1 (1): 317-322 (2008).
44. Önder, E. And Tekkaya, A. E., “Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 532-542 (2008).
45. Panda, S. K. And Kumar D. R., “Improvement in formability of tailor welded blanks by application of counter pressure in biaxial stretch forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 70-79 (2008).
46. Singh, H., “Fundamentals of hydroforming, 1st ed.”, *Society of Manufacturing Engineers*, United States of America, 1-35 (2008).
47. Topçu, M., Taşgetiren, S., “Mühendisler için sonlu elemanlar metodu”, *PAÜ Mühendislik Fakültesi*, Denizli, 1-2 (1998).
48. Esner, 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, 38-39 (2006).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Murat AYDIN 1982 yılında İzmir’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Mimar Sinan Anadolu Teknik Lisesi, Bilgisayar Yazılım Bölümü’nden mezun olduktan sonra 2000 yılında Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Meslek Yüksek Okulu Bilgisayar Destekli Tasarım Bölümü’ne girdi. 2003 yılında buradan mezun olduktan sonra Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği bölümünü kazandı. 2006 yılında buradan mezun olarak aynı sene Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda yüksek lisansına başladı. Yüksek lisansı halen devam etmekte olup, Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görevini sürdürmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Düzce Üniversitesi  
Teknik Eğitim Fakültesi  
Makine Eğitimi Bölümü  
Konuralp Yerleşkesi  
Merkez / DÜZCE

Tel: (380) 541 33 44

Faks: (380) 541 31 84

E-posta: [murataydin@duzce.edu.tr](mailto:murataydin@duzce.edu.tr)