İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAC HİDROLİK ŞEKİLLENDİRMEDE MALZEME ÖZELİKLERİNİN ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Burak ÇELİK

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : İMALAT PROGRAMI

MAYIS 2002

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAC HİDROLİK ŞEKİLLENDİRMEDE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Burak ÇELİK
(503991107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2002

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Şafak YILMAZ
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Murat VURAL
Doç.Dr. Erol ŞENOCAK

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Bir yıldır süren yüksek lisans tez çalışmam sırasında bana yol gösterip destek olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Y. Doç. Dr. Şafak YILMAZ'a, bana her zaman yardımcı olan araştırma görevlileri Serdar ŞAHİN, Ahmet PARASIZ, Canan GÜLERYÜZ, Umut TAPICI'ya, tecrübelerinden yararlandığım değerli ustalarımız Sami FİDANLI, Osman ÇELEBİ, Erdal DİNÇ'e ve beni bugünlere hazırlayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

13 Mayıs 2002 Burak ÇELİK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vı
ŞEKİL LİSTESİ vıı
SEMBOL LİSTESİ ıx
ÖZET x
SUMMARY xı

1. GİRİŞ 1

2. HİDRO-ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİ 4

2.1. Sac Hidrolik Şekillendirme (Hidro-Mekanik Derin Çekme) 4

2.1.1. Prosesin Tanıtılması ve Sınıflandırılması 7
2.1.1.1. Hidrolik Bastırıcı ile Derin Çekme 9
2.1.1.2. Hidro-Şekillendirme ile Derin Çekme 9
2.1.1.3. Tipik Hidro-Mekanik Derin Çekme Prosesi 11
2.1.1.4. Hidrodinamik Derin Çekme Prosesi 14
2.1.1.5. Radyal Basınçlı Derin Çekme Prosesi 15
2.1.2. Proses Üzerine Çalışmalar ve Gelişmeler 17
2.1.2.1. Proses Performansındaki Gelişmeler ve Önemli Buluşlar 17
2.1.2.2. Diğer Gelişmeler 21
2.1.2.3. Teorik Gelişmeler 24

2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme 33

2.3. Bütünleyici Hidro-Şişirme ile Şekillendirme (BHŞŞ) 38

2.3.1. Elipsoidal Kabuklar 40

2.4. Viskoz Basınçlı Şekillendirme (VBŞ) 43

2.4.1. Proses Değişkenleri 45
2.4.2. VBŞ Dome Test 47
2.4.2.1. Kritik Hasar Değeri Kullanılarak Şekillendirilebilirliğin Saptanması 48
2.4.2.2. VBŞ ile Sac Şekillendirilebilirliğinin Gelişmesi 48

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **52**

3.1. Deney Malzemeleri **52**

3.1.1. Isıl İşlem 53
3.1.2. İç Yapı İncelemeleri 53

3.2. Deneyler **54**

3.2.1. Tek Eksenli Çekme Deneyleri 54
3.2.2. Hidrolik Şişirme Deneyleri 54
3.2.2.1. Deney Düzeneği 54
3.2.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması 56
3.2.2.3. DeneyinYapılması 58

4. DENEY SONUÇLARI **61**

4.1. Deney Malzemeleri **61**

4.2. Deneyler **62**

4.2.1. Tek Eksenli Çekme Deneyleri 62
4.2.2. Hidrolik Şişirme Deneyleri 63
4.2.2.1. Hasar Bölgesi Civarındaki Birim Şekil Değişimleri 63
4.2.2.2. Yerel Birim Şekil Değişimleri 67
4.2.2.3. Şişme Yükseklikleri ve Şekillenme Profili 69
4.2.2.4. Hasar Tipleri 72
4.2.2.5. Basınç Değerleri ve Yükleme Eğrileri 72

5. SONUÇLAR VE İRDELEMELER **75**

5.1. Hidrolik Şişirme Deneyleri **75**

5.1.1. Hasar Bölgesi Civarındaki Birim Şekil Değişimleri 75
5.1.2. Yerel Birim Şekil Değişimleri 82
5.1.3. Şişme Yükseklikleri ve Şekillenme Profili 85
5.1.4. Hasar Tipleri 87
5.1.5. Basınç Değerleri ve Yükleme Eğrileri 88

6. GENEL SONUÇLAR **90**

7. KONU ÜZERİNDE İLERİDE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR **92**

KAYNAKLAR **93**

ÖZGEÇMİŞ **96**

KISALTMALAR

BTO	: Basınç taşıyabilen ortam
SÇO	: Sınır çekme oranı
MÇO	: Maksimum çekme oranı
BHŞŞ	: Bütünleyici hidro-şekillendirme ile şekillendirme
VBŞ	**:** Viskoz Basınçlı Şekillendirme
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Deney malzemeleri kimyasal bileşim aralıkları ……. 52
Tablo 4.1. 7114 (t=0,5mm) sacın farklı durumlardaki çekme deneyi sonuçları 62
Tablo 4.2. 7114 (t=0,7mm) sacın farklı durumlardaki çekme deneyi sonuçları 62
Tablo 4.3. 6114 (t=1,0mm) sacın farklı durumlardaki çekme deneyi sonuçları 62
Tablo 4.4. 1110 (t=0,5mm) sacın farklı durumlardaki çekme deneyi sonuçları 62
Tablo 4.5. 1110 (t=1,0mm) sacın farklı durumlardaki çekme deneyi sonuçları 63
Tablo 4.6. 1110 (t=1,5mm) sacın farklı durumlardaki çekme deneyi sonuçları 63
Tablo 4.7. 7114 sacın hasar bölgesi civarındaki birim şekil değişimleri..... 64
Tablo 4.8. 6114 sacın hasar bölgesi civarındaki birim şekil değişimleri..... 65
Tablo 4.9. 1110 sacın hasar bölgesi civarındaki birim şekil değişimleri..... 66
Tablo 4.10. 7114 sacın yerel birim şekil değişimleri 67
Tablo 4.11. 6114 sacın yerel birim şekil değişimleri 68
Tablo 4.12. 1110 sacın yerel birim şekil değişimleri 68
Tablo 4.13. 7114 ve 6114 sacların radyal konuma göre ortalama yükseklikleri 70
Tablo 4.14. 1110 sacın radyal konuma göre ortalama yükseklikleri 70
Tablo 4.15. Deney parçalarında oluşan yırtılma tipleri ve genişlikleri 72
Tablo 4.16. Hidrolik şişirme deneyinde okunan basınç değerleri 74
Tablo 5.1. Şekillenme profillerine ait R^2 değerleri 85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Hidro-mekanik derin çekmede oluşan etkiler 6
Şekil 2.2 : Hidrolik bastırıcı ile derin çekme 9
Şekil 2.3 : Hidro-şekillendirme ile derin çekme 10
Şekil 2.4 : Hidro-mekanik derin çekme 11
Şekil 2.5 : Hidro-mekanik derin çekme esnasında derin çekme boşluklarının oluşumu 12
Şekil 2.6 : Hidro-mekanik derin çekme işlem akışı ve konstrüksiyon 13
Şekil 2.7 : Hidro-mekanik derin çekmede ıstampa ilerlemesine bağlı olarak kuvvetlerin değişimi 13 14
Şekil 2.8 : Hidrodinamik derin çekme 15
Şekil 2.9 : Sadece ıstampa şeklinin değiştirilmesi ile hidrodinamik proseste elde edilmiş silindirik kap 15
Şekil 2.10 : Radyal basınçlı derin çekme 16
Şekil 2.11 : Radyal basınçlı çekme ve klasik çekme metotlarının örneklerle karşılaştırılması 16
Şekil 2.12 : Hidromek proseste halka conta yerine yüzeyi dalgalı kalıp kullanılması 18
Şekil 2.13 : Ön germe ile hidro-mekanik germe prosesi 18
Şekil 2.14 : Hidro-mekanik tekrar çekme metodu 19
Şekil 2.15 : Aktif hidro-mekanik çekme işlem akışı ve konstrüksiyon 20
Şekil 2.16 : Aktif hidromek pres 21
Şekil 2.17 : Hidrostatik ütüleme prosesi 22
Şekil 2.18 : Hidro-mekanik şekillendirme prosesindeki yeni gelişmeler 23
Şekil 2.19 : Tipik bir çalışma bölgesi ve elde edilen numuneler 25
Şekil 2.20 : Çekme oranı ve sürtünmenin çalışma bölgesi üzerine etkileri
Şekil 2.21 : Hidrodinamik derin çekme ve klasik derin çekmede sınır çekme oranı eğrileri 28
Şekil 2.22 : Hidrodinamik prosesle farklı kalıp profil yuvarlatmalarında çekilmiş kaplar 29
Şekil 2.23 : Hidrolik bastırıcı ile derin çekme yöntemiyle farklı kalıp profil yuvarlatmalarında çekilmiş kaplar 30
Şekil 2.24 : Yarı küresel ıstampa ile hidro-mekanik derin çekme 31
Şekil 2.25 : Kritik basınç eğrilerinin oluşturduğu çalışma bölgesi 31
Şekil 2.26 : Kritik basınç eğrilerine etkiler 32
Şekil 2.27 : Tüp hidrolik şekillendirme 34
Şekil 2.28 : Hasar modları 35
Şekil 2.29 : Dış hidrolik basınçla tüp şekillendirme 36
Şekil 2.30 : Dış hidrolik basınçla iki parçanın birleştirilmesi 36
Şekil 2.31 : Tüp hidrolik şekillendirme ile üretilmiş egzost sistemi parçaları 37
Şekil 2.32 : BHŞŞ teknolojisi ile yapılan ilk küresel LPG tankı 39

Şekil 2.33 : Basınçlı kap başlıklarının şekillendirmeden önceki kesitleri ... 39
Şekil 2.34 : Tek yönlü eğimli bir elipsoidal kabuk 40
Şekil 2.35 : Elipsoidal bir kabuğun geometrisi 41
Şekil 2.36 : Kırışmanın önlenmesi amacıyla radyal yönde deformasyonun sınırlandırılması 42
Şekil 2.37 : VBŞ proses işlem akışı 43
Şekil 2.38 : C 11'in birim şekil değişimi hızına bağlı akma dayanımı 44
Şekil 2.39 : VBŞ germe prosesinde viskozitenin sac deformasyonuna etkisi 45
Şekil 2.40 : VBŞ germe prosesinde, sacın ve viskoz malzemenin deformasyonu 46
Şekil 2.41 : VBŞ germe prosesinde ara yüzeydeki farklı sürtünme koşullarına göre sacın kalınlığının birim şekil değişimi dağılımı 46
Şekil 2.42 : VBŞ Dome deney takım seti 47
Şekil 2.43 : Kritik hasar değerinin saptanabilmesi için önerilen prosedür 49
Şekil 2.44 : VBŞ Dome deneyin SEY modeli 49
Şekil 2.45 : Yarı küresel ıstampa ile yapılan Dome deneyin geometrisi 50
Şekil 2.46 : Viskoz malzeme kullanılarak gerilen parçadaki tahmini hasar değerleri dağılımı 51
Şekil 2.47 : Yarı küresel ıstampa ile yapılan germede tahmini hasar değerleri dağılımı 51
Şekil 3.1 : Deney numunelerine uygulanan ısıl işlem 53
Şekil 3.2 : Hidrolik şişirme deneyi kalıp seti 55
Şekil 3.3 : Yarı küresel ıstampa ile yapılan Dome deneyi kalıp geometrisi 56
Şekil 3.4 : Hidrolik şişirme deney numunelerindeki işlem kademeleri 57
Şekil 3.5 : İçinde parça bulunan kalıp setinin önden, arkadan, deney sonrası görünüşü 60
Şekil 3.6 : Hidrolik şişirme deneyi sonucunda parçanın yakından görünüşü 60
Şekil 4.1 : Deney numunelerinde ısıl işlem neticesinde değişen ortalama tane büyüklükleri 61
Şekil 4.2 : 7114 kalite sacın farklı durumlardaki şekillenme profili 70
Şekil 4.3 : 6114 kalite sacın farklı durumlardaki şekillenme profili 71
Şekil 4.4 : 1110 kalite sacın farklı durumlardaki şekillenme profili 71
Şekil 4.5 : Hidrolik şişirme deneyleri neticesinde görülen hasar tipleri 73
Şekil 4.6 : 1110 sacın tavsız hallerdeki yükleme eğrileri 74
Şekil 5.1 : Mühendislik sınır birim şekil değişimleri a,b) 7114 c) 6114 76
Şekil 5.2 : Mühendislik sınır birim şekil değişimleri a,b,c)1110 77
Şekil 5.3 : Mühendislik büyük birim şekil değişimlerine etkiler 79
Şekil 5.4 : 7114 sacda mühendislik büyük birim şekil değişimlerine etkiler 80
Şekil 5.5 : 6114 sacda mühendislik büyük birim şekil değişimlerine etkiler 81
Şekil 5.6 : 1110 sacda mühendislik büyük birim şekil değişimlerine etkiler 82
Şekil 5.7 : Yerel birim şekil değişimleri a)7114_0,5 b)7114_0,7 c)6114_1 83
Şekil 5.8 : Yerel birim şekil değişimleri 1110 a)0,5 b)1,0 c)1,5 84
Şekil 5.9 : Şişirme yüksekliğine etkiler..... 86
Şekil 5.10 : Sac kalınlığı ile şişme yüksekliğinin değişimi 87
Şekil 5.11 : Hasar tiplerinin toplu olarak sayısal gösterilişi 87
Şekil 5.12 : Sac kalınlıklarına göre hasar tiplerinin dağılımı 88
Şekil 5.13 : Malzemelere göre hasar tiplerinin dağılımı 88
Şekil 5.14 : Hasar basıncının sac kalınlığına göre değişimi 89

SEMBOL LİSTESİ

t	**:** Sac kalınlığı
μ	**:** Coulomb sürtünme katsayısı
m	**:** Kayma sürtünme faktörü
η	**:** Viskozite
C	**:** Deforme olan iş parçasındaki belli bir nokta için hasar değeri
σ^*	**:** Maksimum asal çekme gerilimi
$\overline{\sigma}$	**:** Efektif gerilim
$\overline{\varepsilon}$	**:** Efektif birim şekil değişimi
$d\overline{\varepsilon}$	**:** Efektif birim şekil değişimi artımı
$\mathbf{h_f}$	**:** Hasar anındaki kubbe (şişme) yüksekliği
$\mathbf{F_p}$	**:** Istampa kuvveti
$\mathbf{F_b}$	**:** Bastırıcı kuvveti
a	**:** Istampa yarıçapı
b	**:** İş parçası yarıçapı
n	**:** Pekleşme üsteli
β	**:** Çekme oranı (=b/a)
$\mathbf{R_d}$	**:** Kalıp profil yuvarlatması
P	**:** Akışkan basıncı
ρ	**:** Kalıp profili eğrilik parametresi
h	**:** Istampa ilerleme miktarı (kap yüksekliği)
$\mathbf{S_s}$	**:** Standart sapma
$\mathbf{D_{ort}}$	**:** Ortalama benek çapı
$\mathbf{d_t}$	**:** Ortalama tane büyüklüğü
$\mathbf{\sigma_{ak}}$	**:** Akma dayanımı
$\mathbf{\sigma_ç}$	**:** Çekme dayanımı
$\mathbf{\varepsilon_{ün}}$	**:** Üniform birim şekil değişimi
δ	**:** Kopma uzaması
R	**:** Normal anizotropi
λ	**:** Elipsin eksen uzunlukları oranı
u	**:** Elipsin yatay (asal) eksen uzunluğu
v	**:** Elipsin dikey (yedek) eksen uzunluğu
S	**:** Tipik mikro yapılarda sabit katsayı (=1,5)
$\mathbf{n_L}$	**:** Birim uzunluktaki çizginin kestiği tane sınırı sayısı
M	**:** Büyültme oranı

SAC HİDROLİK ŞEKİLLENDİRMEDE MALZEME ÖZELLİKLERİNİN ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİSİ

ÖZET

Sac metal işçiliği, elektronik, otomotiv, tarım makinaları, havacılık ve uzay endüstrileri gibi birçok endüstriyel alanın belkemiğidir. Endüstriyel alanda meydana gelen gelişmelerle beraber sac metal parçaların boyutsal tamlığı, yüzey kalitesi ve şekil karmaşıklığı gibi gereksinimleri giderek daha önemli bir hal almaktadır. Klasik pres işçiliği teknolojisi bu ihtiyaçları sağlayamamaktadır. Bu yüzden, diğer alternatif teknolojilere geçiş giderek hızlanmaktadır.

Hidro-şekillendirme (hydroforming), 2. Dünya Savaşı öncesinden itibaren geliştirilmekte olan, klasik pres işçiliğine alternatif sac şekillendirme proseslerinden biridir. Kendine has sınırlamaları ve az araştırılmasından kaynaklanan tecrübe eksikliğinden dolayı uzun yıllar kullanımı kısıtlı kalmıştır fakat 1990'lı yıllardan itibaren endüstriyel alanda, özellikle de otomotiv endüstrisinde, sürekli artan bir oranda ilgi görmektedir. Hemen hemen bütün lider otomotiv kuruluşları pazardaki rekabetçi güçlerini arttırmak için hidro-şekillendirme teknolojilerini kullanmaya başlamıştır. Hidro-şekillendirme teknolojilerinin başlıca kullanım alanı karmaşık şekilli sac parçalar (sac hidrolik şekillendirme) ile tüp veya silindirik (tüp hidrolik şekillendirme) parçalardır. Bu parçalar, otomotiv, uçak, bisiklet ve ev aletleri uygulamalarında kullanılmaktadır. Hidro-şekillendirme teknolojisindeki son gelişmeler otomotiv endüstrisinin katkılarıyla sağlanmıştır.

Bu çalışmada farklı mekanik özelliklere sahip saclar kullanılarak sac hidrolik şekillendirmede şekillendirme özelliklerine bağlı olan değişkenler incelenmiştir. Deney malzemesi olarak Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları tarafından üretilmiş 7114, 6114 ve 1110 kalite kodlu saclar kullanılmıştır. Ayrıca, bu sac malzemeler 1000 ^{0}C'de değişik tav sürelerine tabi tutularak kendi içlerinde de farklı mekanik özelliklere sahip olması sağlanmıştır. Tek eksenli çekme deneyleri ile ısıl işlem neticesinde kazandırılan mekanik özellikler belirlenmiştir ve hidrolik şişirme deneyleri (hydraulic bulge test) yapılarak şekillendirmenin hangi özellikler ile değiştiği saptanmıştır.

THE EFFECT OF MATERİAL PROPERTIES ON FORMING IN SHEET METAL FORMING

SUMMARY

Sheet metal working is the backbone of the many industrial fields such as electronics, automobiles, agriculture machines and aeronautical astronautical industry. Since the requirements for dimensional accuracy, surface fineness and shape complication of the sheet metal press-working workpieces are becoming more important. Classical press working technology can not satisfy these demands. As a result of this, the popularity of these alternative technologies increases day by day.

Hydroforming or hydraulic forming has been one of the fundamental sheet metal forming processes for quite a long time, having been developed at least since pre-World War II. It's applications in the industry were still restrained in some specific fields because of particular drawbacks, relatively less research and practical experience, but since 1990's it has been attracting increasingly more attention in many industrial fields, especially in the automotive industries. Main use areas of hydroforming technologies are complex sheet and tube workpieces. These workpieces are used automotive, aircraft, bicycle and house equipment applications. The latest innovations in hydroforming technologies are results of automotive industries needs.

In this study, sheets with different mechnanical properties are used to determine the forming property related variables in flat sheet hydroforming are examined. Different mechanical properties of sheet are satisfied with different tempering times at 1000 ^{0}C. With uniaxial tensile tests the mechanical properties are identified. With hydraulic bulge tests the relations between the material properties and sheet metal hydroforming are determined.

1. GİRİŞ

Esnek kalıpla şekillendirme, (flexible die forming, FDF) sac metallerin şekillendirilmesinde klasik pres işçiliğine alternatif önemli bir teknolojidir. Bu teknolojide rijid ıstampa veya kalıp yerine basınç taşıyabilen ortamlar (pressure-carrying medium, PCM) kullanılır. Klasik basınç taşıyabilen ortamlar (BTO), akışkan (su, yağ), gaz (basınçlı veya genişliyen hava) ve elastik katıdır (kauçuk veya poliüretan). Bu yüzden, kullanılan BTO' ya göre esnek kalıpla şekillendirme farklı özelliklere sahip olur. BTO olarak kauçuk veya poliüretan kullanılan proseslerde, bu malzemelerin sınırlı miktarda deforme olabilmelerinden dolayı derin çekilen ve karmaşık şekilli parçaların üretiminde kullanılamazlar. Kauçuk kalıpla şekillendirme (Guerin proses), uçak fabrikalarında yaygın olarak kullanılmaktadır fakat ekipmanları pahalıdır ve büyük yerel deformasyonların mevcut olduğu iş parçaları bu prosesle imal edilemez. Süper-plastik şişirme (superplastic bulging) ve patlamalı şekillendirmede (explosive forming) BTO olarak gaz kullanılır fakat verimlilik düşüktür ve üretilen parçalarda büyük miktarda kalınlık azalması meydana gelir. Hidro-şekillendirme (hydroforming) teknolojisinde ise BTO olarak akışkan kullanılır. Şekillendirme esnasında akışkan basıncının kontrolünün zorluğu, şekillendirmenin başarısız olduğu durumlarda akışkan sıçraması ve sızdırmazlık problemleri gibi kendine has dezavantajlarına rağmen diğer esnek kalıpla şekillendirme teknolojilerine göre daha başarılı bir proses olduğu söylenebilir.

Hidro-şekillendirme, yumuşak takımla şekillendirme teknolojisinin (soft-tool forming technology / flexible die forming technology) bir çeşididir. Hidro-şekillendirme teknolojilerinde, yağ, su veya başka bir akışkan ıstampa veya kalıp olarak kullanılır. Hidro-şekillendirme (hydroforming) , hidrolik şekillendirme (hydraulic forming), hidro-şekillendirme ile derin çekme (hydroforming deep drawing), esnek şekillendirme (flexible forming), hidro-şişirme (hydrobulging), yüksek basınçlı şekillendirme (high-pressure forming), düşük basınçlı şekillendirme (low-pressure forming) ve hidro-mekanik derin çekme (hydro-mechnanical deep drawing) gibi değişik adlara sahiptir. Akışkan basıncından faydalanılan her proseste hidro-şekillendirme genel bir isim olarak kullanılabilmektedir [1].

.

Hidro-şekillendirme teknolojisi aşağıdaki karakteristik özelliklere ve üstünlüklere sahiptir [1]:

a) Sadece bir rijit takıma (dişi kalıp veya ıstampa) ihtiyaç duyulur ve diğer takım yerine akışkan kullanılır. Bu yüzden takım, parça ve işçilik maliyetleri azalır.

b) Ürünlerin kalitesinde önemli miktarda bir gelişme sağlanabilir. Bu teknoloji kullanılarak yapılan parçalar daha hafif, daha ucuz, daha sağlam ve daha kalitelidir. Malzemeler daha verimli kullanılır (özellikle yüksek dayanımlı çelikler). Klasik derin çekme yöntemiyle şekillendirilmiş parçalarla karşılaştırıldığında hidro-şekillendirme, boyutsal doğrulukta ve istenen toleransların sağlanması açısından daha iyidir, daha az geri yaylanma söz konusudur ve çok daha az iç gerilme oluşur.

c) Klasik imalat yöntemleriyle şekillendirilemeyecek kadar karmaşık parçalar bu teknoloji ile şekillendirilebilir. Böylece klasik imalat metotlarıyla ancak birkaç parçanın birleştirilmesiyle elde edilebilen, birbirlerine montajlanmış parçalar yerine hidro-şekillendirme ile şekillendirilmiş tek bir parça kullanılır. Bu yolla, hem birleştirilecek parça sayısı hem de kaynakla birleştirmeler azalır. Parça sayısının azalmasıyla toplam ağırlıkta bir azalma olur ve takım maliyetleri azalır. Ayrıca hurda miktarında da azalma olur.

d) Hidro-şekillendirme, otomotiv endüstrisinde kullanılan derin çekilecek parçaların az sayıdaki üretim miktarlarında bile ekonomik olmaktadır. Prototip parçaların üretiminde kullanılabilecek en iyi prosestir. Rijit takım pahalı olmayan malzemelerden yapılabilir. Farklı kalınlıktaki sacların ve farklı malzemelerin şekillendirilmesinde aynı takımlar kullanılabilir. Aynı pres çevriminde birden fazla parça şekillendirilebilir. Çekme boşluğundan da söz edilemez.

e) Klasik yöntemlerle şekillendirilebilen birçok malzeme hidro-şekillendirme teknolojilerinde de kullanılabilir. Malzemelerin hasarsız bir şekilde bükülebilmesi, çekilebilmesi veya gerilebilmesi için yeterli miktarda genleşebilme özelliklerine ihtiyaç vardır. Alüminyum, çeşitli bakır alaşımları, karbonlu çelik ve paslanmaz çelik hidro-şekillendirme teknolojilerinde kullanılabilir. Üretilecek parçalar da keskin yuvarlatmalar olmamalıdır.

Hidro-şekillendirme teknolojisi aynı zamanda bazı dezavantajlara da sahiptir:
a) Yavaş çevrim zamanları
b) Kalıplar çok iyi parlatılmış (pürüzsüz) olmalı
c) Düşük üretim hızları düşük hacimli parçaların prosesini sınırlar.

d) Istampanın ilerlemesine karşı koyan hidrostatik basıncı yenmek için daha yüksek tonajlı preslere ihtiyaç vardır.

Hidro-şekillendirme ekipmanları genelde klasik derin çekme takımlarına oranla %30'a kadar daha pahalıdırlar. Bu teknolojinin geliştirilmesindeki büyük zorluklardan bir tanesi de sızdırmazlık elemanlarıdır ve bu elemanların daha fazla standartlaştırılmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca hidro-şekillendirme kalıpları klasik çekme yönteminde kullanılan kalıplara göre daha yavaş değiştirilir (set-up) [1].

Bu çalışmada, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları tarafından farklı kalınlıklarda üretilmiş, 7114 (t=0,5 - 0,7 mm), 6114 (t=1,0 mm) ve 1110 (t=0,5 - 1,0 - 1,5 mm) kalite kodlu saclar ile malzemelerin değişik mekanik özelliklere sahip olması durumunda sac hidrolik şekillendirmede şekillendirmenin nasıl değiştiğinin belirlenmesi amaç edinilmiştir. Malzemelere farklı mekanik davranışlar tav süreleri farklı olan değişik ısıl işlemler ile kazandırılmıştır. Malzemelerin, tek eksenli çekme deneylerinden yararlanılarak mekanik davranışları belirlenmiş ve hidrolik şişirme deneylerinden yararlanılarak da birim şekil değişimleri bulunmuştur.

2. HİDRO-ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİ

Hidro-şekillendirme, sac hidrolik şekillendirme (hidro-mekanik derin çekme) ve tüp hidrolik şekillendirme (tube hydroforming) olarak ikiye ayrılabilir. Son yıllarda geliştirilen bütünleyici hidro-şişirme ile şekillendirme (integral hydrobulge forming, IHBF) ve viskoz basınçlı şekillendirme (viscous pressure forming, VPF) gibi yeni hidro-şekillendirme teknolojileri de bu ayrıma ilave edilebilir.

2.1. Sac Hidrolik Şekillendirme (Hidro-Mekanik Derin Çekme)

Hidro-mekanik derin çekme, hidro-şekillendirme teknolojisinin bulunması ile ortaya çıkan yeni bir sac şekillendirme teknolojisidir. Hidro-mekanik derin çekme prosesi ilk olarak 1890 yılında bulunmuştur. Ancak gerçek ilerleme 2. Dünya Savaşı'ndan sonra başlamıştır. Yakın zamandaki araştırma çalışmaları çoğunlukla Almanya ve Japonya'da olmuştur [2]. Bu teknoloji hem klasik derin çekme teknolojisinin hem de hidro-şekillendirme teknolojisinin özelliklerini barındırır. Hidro-mekanik derin çekmede, klasik derin çekme işleminde 2,2 olan sınır çekme oranı değerleri 2,7'e yükselir. Hidro-mekanik derin çekme prosesi başlangıcından itibaren sürekli artan bir oranda endüstride kullanım alanı bulmuştur, özellikle de otomobil ve uçak sanayinde. Gelişmeler ve yeniliklerle beraber daha özel donanımlar bulunmuş ve kullanıma konulmuştur. Hidro-mekanik derin çekme prosesi, verimlilik kaybı olmadan ürün kalitesinde artış sağlayabildiğinden diğer metal şekillendirme proseslerinin yerini alabilir.

Japon araştırmacılar bu prosesi araştırmaya ve geliştirmeye 1955 yılında başladılar. 1958 yılından 1964 yılına kadar bu alandaki araştırma çalışmalarının başında bulunan Y. Kasuga, basınçla yağlanan derin çekmeyi (pressure-lubricated deep drawing) ortaya çıkardı. 1970'li yılların ortalarından sonra K. Nakamura ve T. Nakagawa, karşı basınçlı akışkanla şekillendirme prosesi (hydraulic counter-pressure fluid forming process) üzerinde çalışmaya başladılar. Ayrıca, bu periyotta, daha derin parçaların elde edilmesi için radyal basınçlı derin çekme metodu (radial-pressure deep drawing method) ortaya çıkarıldı [3].

Alman araştırmacılar, 1950'li yıllarda çalışmalarına başladılar. Kalıpla sac arasındaki akışkan kaçışını önlemek amacıyla kalıp yüzeyinde halka şeklinde bir sızdırmazlık elemanı kullanıldı [2].

Benzer yöntemler olan daalderop yöntem 1961 yılında Hollandalı araştırmacılar tarafından ve akışkanlı/sıvılı-çekme (aqua-draw method), 1973 yılında Amerikalı araştırmacılar tarafından sunuldu. İsveçliler, özel ekipman ve donanımlar sağlayarak 1960'lı yıllarda proses ve gereçleri üzerine araştırmalarına başladılar [3]. Danimarkalı araştırmacı B. Larsen [4], 1977 yılında Danimarka'da çalışmaları üzerine bir makale yayınladı. Bu çalışma Aalborg Üniversitesi'nden Danckert Andersen ve Danimarka Teknik Üniversitesi'nden N. Bay tarafından halen devam ettirilmektedir.

Çinli araştırmacılar, bu teknoloji üzerindeki çalışmalarına çok yakın zamanda başladılar. Harbin Teknoloji Enstitüsü'nde yapılan çalışmaların başında D. C. Kang bulunmaktadır. Kang, 1980 yılından beri japon Nakamura ile beraber çalışmaktadır. Kang, parabolik kabukların ve kutu biçimindeki parçaların hidro-mekanik yöntemle şekillendirilmesini ve hidro-mekanik ütüleme/incelterek çekme (ironing) prosesini geliştirdi. Japonya'da Nakamura ile beraber bir dönem kalan ve Harbin Teknoloji Enstitüsü'nden bir diğer araştırmacı Guo, hidro-mekanik yöntemle çekilmiş kapların, kutuların ve konik kapların şekillendirilme tamlığı üzerine araştırmalar yapmıştır. Hidro-mekanik derin çekme teknolojisi üzerine yapılan çalışmalar Jinan Araştırma Enstitüsü ve bazı diğer üniversiteler tarafından da sürdürülmektedir [2].

Son yıllarda hidro-mekanik derin çekme teknolojisi bazı diğer ülkelerde de hızlı bir şekilde gelişmektedir. Bu ülkeler Fransa, USA, Rusya, İsrail, İsviçre, Kore ve hatta Kuveyt'tir [2]. J. Tirosh [5-9, 14, 17-19], İsrail'de teorik analiz ve deneylere dayalı bir araştırma makaleleri serisi yayınlamıştır.

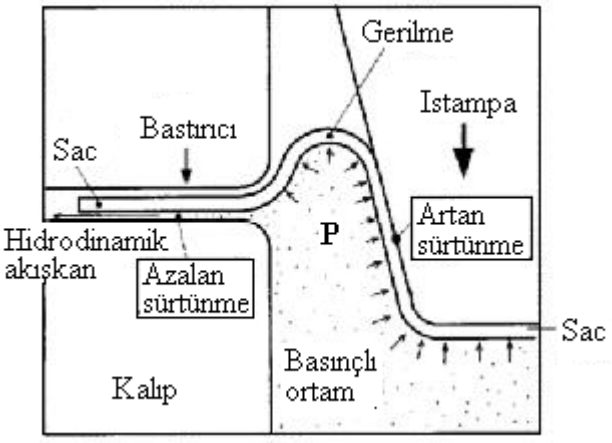
H. Amino ve T. Nakagawa'nın yapmış olduğu analizlere göre Hidro-mekanik derin çekme prosesi aşağıdaki özelliklere sahiptir [2, 10]:

a) Sürtünmeli tutma etkisine (friction-holding effect) sahiptir. Sac ile ıstampa arasında sürtünme kuvvetleri oluşur ve bu kuvvetler aynı zamanda şekillendirme kuvvetinin bir parçası olarak davranır.

b) Direnç indirgeme etkisine (resistance-reduction effect) sahiptir. Flanş ile kalıp arasındaki sürtünme direnci akışkan hareketinden (dışarı doğru kaçışından) dolayı azalır (Bazı hidro-mekanik derin çekme proseslerinde, örneğin; hidrodinamik derin çekme, radyal basınçlı derin çekme vs).

c) Başlangıç genişlemesi (gerilmesi) etkisine (initial extension effect) sahiptir. Ön gerilmeden (pre-bulging) dolayı kalıbın omuz kısmı civarındaki sacda genişleme (kabarma) meydana gelir, kalınlık böylece daha uniform bir hal alır. Ön gerilmenin kullanılmasıyla kalıp boşluğu üzerindeki malzeme başlangıçta gerilir bu da daha homojen bir kalınlık dağılımı sağlar (Şekil 2.1 ve Şekil 2.13).

Yukarıda bahsedilen 3 hasar önleme etkisinden dolayı bu prosesle klasik hasar sınırlarının üzerine çıkılabilir. Proses, ayrıca kırışıklık önleme etkisine de (wrinkle-prevention effect) sahiptir: gerilme basıncına maruz desteklenmeyen kısımlar çevresel çekme gerilimleri oluştururlar bu da kırışmaların oluşmasını engeller (Şekil 2.1 ve Şekil 2.5).



Şekil 2.1 Hidro-mekanik derin çekmede oluşan etkiler [10]

Hidro-mekanik derin çekme prosesi aşağıdaki avantajlara sahiptir [2, 10]:

a) Hasar önleme etkileri ve kırışıklık önleme etkisinden dolayı daha yüksek çekme oranlarına ulaşılır, şekillendirme adımları azalır, istenen kaliteye ulaşılır, ürün boyutları sorun değildir ve maliyetler azalır.

b) Sac ile ıstampa arasındaki kuvvet temasından ve flanş ile kalıbın arasındaki akışkanın yağlama etkisinden dolayı flanşda daha az sorunla karşılaşılır, ürünlerde daha iyi bir yüzey kalitesi meydana gelir, kırışmaların oluşması durdurulabilir, boyut doğruluğu artar ve kalıp aşınmasında önemli miktarlarda azalma görülür [7].

c) Sürtünmeli tutma etkisinden dolayı bölgesel incelmeler azalır ve kalınlık dağılımı daha düzgün olur.

d) Dişi kalıp yerine akışkan basıncından yararlanıldığından sadece ıstampa kullanılır ve çekme operasyonları azalır. Bu yüzden proses mali açıdan verimlidir ve düşük sayıdaki üretim miktarları içinde kullanılabilir.

e) Kompleks şekilli iş parçalarının imalatında ve orta sıcaklıklardaki işlemlere uygun olmayan bazı malzemelerin derin çekilmesinde bu proses kullanılabilir. Proses esnektir. Otomobil gövdesini oluşturan parçaların şekillendirilmesinde, parçanın rijitliğini arttırmak için yüksek deformasyonlar kolayca elde edilebilir [11].

Bunlarla beraber, hidro-mekanik derin çekme prosesinin sınırlamaları da vardır. Klasik derin çekme teknolojisi ile karşılaştırıldığında en büyük kısıtlama daha büyük bir çekme kuvvetine ve daha büyük bir bastırıcı (baskı plakası, pot çemberi) kuvvetine ihtiyaç duyulur [2].

2.1.1. Prosesin Tanıtılması ve Sınıflandırılması

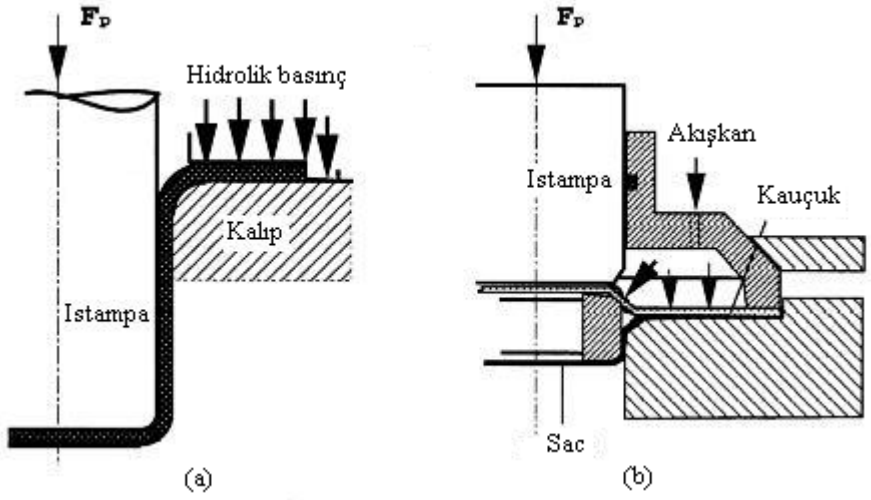
Hidro-mekanik derin çekme çeşitli adlara sahiptir, örneğin, hidromek (hydromec), akışkanlı/sıvılı-çekme (aqua-draw), karşı basınçla derin çekme (drawing with counter pressure / hydraulic counter-pressure deep drawing), akışkan basıncı yardımıyla derin çekme (deep drawing process with fluid-pressure assisted method), hidrolik şekillendirme (hydraulic forming) ve hatta hidro-şekillendirme (hydroform, hydroforming). Bunlardan bazıları kendilerine ait farklı özellikleri tanımlarken bazıları da değişik ülkeler tarafından farklı adlarla isimlendirilmesine rağmen aynı yöntemi temsil ederler. Aslında, hidro-mekanik derin çekme prosesi, yumuşak takımla şekillendirme teknolojisinin (soft-tool forming technology / flexible-forming method / flexible die forming) bir çeşididir [2]. Yumuşak takımla şekillendirme teknolojileri, basit ekipmanları ve uygun aletleri (aparatları), düşük enerji tüketimleri, kaliteli ürün vermeleri ve mali açıdan verimlilikleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Yumuşak takımla şekillendirme teknolojileri, kauçuk kalıpla şekillendirmeyi (rubber-die/rubber-pad forming) ve akışkan takımla şekillendirmeyi (fluid-tool forming) kapsar. Akışkan takımla şekillendirme, süper-plastik şişirme (superplastic bulging) ve patlamalı şekillendirme (explosive forming) yöntemleri gibi gazlı-şekillendirme (gas forming) ve hidro_şekillendirme (hydroforming) diye ikiye ayrılır. Hidro-şekillendirme, sac şekillendirmede ve tüp şekillendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidro-şekillendirme, yumuşak ıstampa ile şekillendirmeyi (soft-punch forming) (basınçlı su veya başka bir akışkan mesela yağ, ıstampa olarak görev alırken dişi kalıp rijittir) ve yumuşak kalıpla şekillendirmeyi (soft-die forming) (bu seferde basınçlı akışkan kalıp olarak görev alırken ıstampa rijittir.) kapsar. Bir çok araştırmacı tarafından yumuşak ıstampa ile

şekillendirme hidro-şişirme (hydro-bulging) olarak ve yumuşak kalıpla şekillendirmede hidro-mekanik derin çekme olarak tanımlanır. Ancak, yumuşak kalıpla şekillendirme bazı araştırmacılar tarafından hidro-şekillendirme ile derin çekme (hydroforming deep drawing) olarak da adlandırılır (özellikle sac ile akışkan arasında ince kauçuk bir diyafram kullanıldığında). Hidro-şişirme (hydro-bulging) otomobil endüstrisinde, özelliklede tüplerin ve geniş sac panellerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Hidro-mekanik derin çekme akışkan basıncının kullanım şekline göre hidrostatik tip ve hidrodinamik tip olmak üzere ikiye ayrılabilir. Hidro-şişirme de yükleme durumuna göre iki farklı durumda olabilir. Çoğu kez hidrostatik durum söz konusudur fakat bazı durumlarda akışkan dinamik de olabilir, örneğin akışkan ile patlamalı şekillendirmede (explosive forming with fluid) olduğu gibi [2].

Klasik derin çekme prosesinde sınır çekme oranı değeri 2,2 ila 2,3 arasındadır [4], buna karşın teorik yaklaşımlar bu değerin yaklaşık 2,715 olduğunu göstermektedir [7]. Bu farklılığın ana sebebi sacın flanş kısmı (dişi kalıbın omuzu ile temasta olan yerler) ile kalıp arasındaki sürtünmeden kaynaklanır [2]. Sac parça, derin çekme esnasında bir takım kuvvetlerin etkisi altındadır. Bu kuvvetler, kavis üzerindeki bükme kuvvetleri; sacın, kalıp, ıstampa ve bastırıcı (baskı plakası) ile sürtünmesinden doğan kuvvetler; kabın flanş kısmındaki basma gerilmeleri olmaktadır. Bu üç kuvveti yenmek için ıstampa kuvveti uygulanmaktadır. Dolayısıyla çekilen kabın yan cidarları çekme etkisi altında kalmakta, bu etki ve incelme özellikle dip kavisi yakınında yoğunlaşmaktadır. Bu yüzden, klasik derin çekme işlemindeki çatlama hataları daha ziyade burada meydana gelmektedir [12]. Hidro-mekanik derin çekme prosesinde basınçlı akışkan kullanıldığından sürtünme önemli miktarda azalır (flanş ile kalıp ara yüzeyinde) ve ıstampa ile sac arasında oluşan sürtünmeli tutma etkisi sacın ıstampa köşesinde hasar oluşmasını engeller. Böylece sınır çekme oranı değerinin arttırılması mümkün kılınır. Akışkan, uygulanan prosese göre farklı şekillerde kullanıldığından, farklı proseslerde elde edilen sınır çekme oranı değerleri de farklı seviyelerdedir. Genellikle hidro-mekanik derin çekme prosesinde tek bir strokta sınır çekme oranı değerleri 2,7'ye kadar arttırılabilmektedir. Radyal basınçla derin çekme metoduyla (radial-pressure deep drawing method) ise tek bir adımda 3,2'ye kadar çıkılabilmektedir. Yine aynı yöntemle 2 adımda sınır çekme oranının 6'ya kadar çıkabildiği kaydedilmiştir. Hidro-mekanik derin çekme prosesi aşağıdaki farklı tiplere bölünebilir [2].

2.1.1.1. Hidrolik Bastırıcı ile Derin Çekme (Deep drawing process with fluid-assisted blank holding)

Bu proses, Şekil 2.2'de görülmektedir (a) klasik, b) Yossifon ve Tirosh tarafından geliştirilen). Klasik rijit bastırıcı yerine kontrol edilebilir hidrostatik akışkan basıncından yararlanılır. 2.1.1.2.'de ki proses ile bazı benzerlikleri mevcuttur. Her iki proseste de ince kauçuk bir diyafram kullanılır. Bu diyafram aracılığıyla basınç flanşa iletilir. Sürtünme fark edilecek miktarda azalır. Ancak, hidro-şekillendirme ile derin çekmede geçiş yuvarlatması (kaptan flanşa geçiş) o an ki akışkan basıncının kontrolü altındadır ve bu yüzden bu kısmın kırışma hasarına uğraması muhtemeldir (yetersiz basınçta). Halbuki, hidrolik bastırıcı ile derin çekme prosesinde istenmeyen bir esneklik oluşmaz ve klasik proseste olduğu gibi bu kısım rijit bir kalıp tarafından desteklenir [8]. Bu proses, özellikle rijit bastırıcıların sakıncalı olabileceği ince sacların derin çekilmesinde kullanılır [6]. Sınır çekme oranı değerlerinde 2,3'e ulaşılır. Bu proses, hidro-mekanik derin çekme prosesi veya hidrostatik derin çekme olarak da tanımlanmaktadır [2].

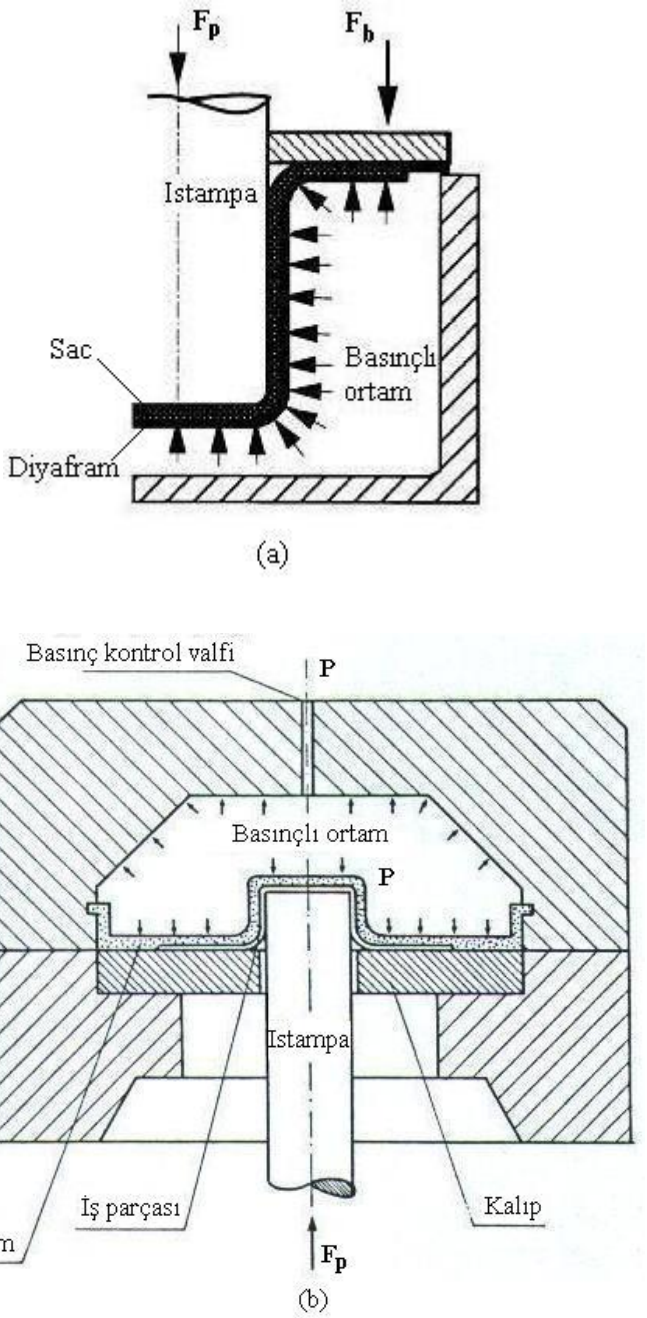


Şekil 2.2. Hidrolik bastırıcı ile derin çekme [2]

2.1.1.2. Hidro-Şekillendirme ile Derin Çekme

Şekil 2.3a'da da görüldüğü gibi dişi kalıp yerini tamamen basınçlı akışkana bırakmıştır. Sac ile basınçlı ortamı ayırmak için ince kauçuk bir diyafram kullanılır ve basınç saca bu diyafram aracılığıyla iletilir. İş parçasının en son şeklini ıstampa belirler. Istampa aşağıya doğru ilerlerken, basınçlı ortam sacı ıstampanın şeklini alması için zorlar. Akışkan basıncı bir valf veya pompa ile özel bir yükleme eğrisine göre kontrol edilebilmektedir. Bu proseste akışkan basıncı en önemli parametredir çünkü basınç yeterince yüksek olmazsa kırışıklıklar meydana gelebilir. Basınç çok

yüksek olduğunda ise iş parçası kırılmadan (yırtılma) dolayı hasara uğrayabilir. Akışkan, diyafram aracılığıyla sac üzerinde dirençli bir kuvvet oluşturur, böylece çoğunlukla bir bastırıcıya gerek kalmamış olur (Şekil 2.3b) [9].

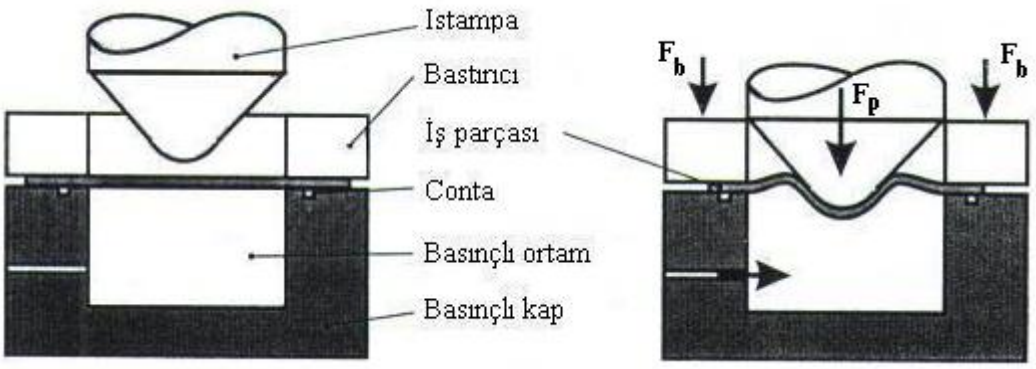


Şekil 2.3. Hidro-şekillendirme ile derin çekme (hydroforming deep drawing process) [2, 5]

Derin silindirik, prizmatik ve konik kaplar yalnızca ıstampa şeklinin değiştirilmesi ile şekillendirilebilir. Ayrıca geniş yüzeyli otomobil parçaları da bu teknoloji ile üretilebilmektedir. Düz veya sığ parçaların şekillendirilmesinde rijit takımlar, plastikler veya düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımlar (çinko alaşımları) gibi pahalı olmayan malzemelerden yapılabilir [1]. Bu proses araştırmacılar tarafından sadece hidro-şekillendirme (hydroforming) olarak da tanımlanmaktadır. Esnek şekillendirme (flexforming) veya yüksek iç basınçla metal şekillendirme (internal high-pressure metal forming) olarak da adlandırılmaktadır [2].

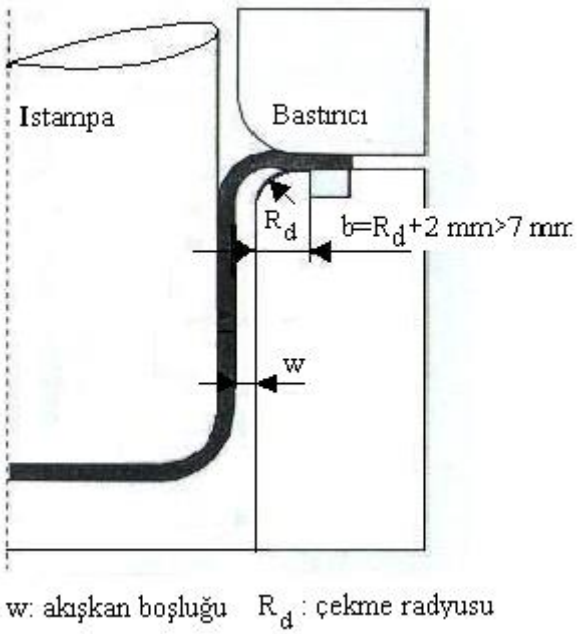
2.1.1.3. Tipik Hidro-mekanik Derin Çekme Prosesi

Hidro-mekanik derin çekme prosesinde de yine önceki bölümde anlatıldığı gibi basınçlı akışkan (genellikle yağ/su emülsiyonu) dişi kalıp görevi görür (bazı parçaların üretiminde yerel bir kalıp kullanılabilmektedir) ve ıstampa iş parçasının son şeklini belirler [1]. Ancak, burada diyafram kullanılmaz, sac basınçlı ortam ile temas halindedir. Flanş kısmından akışkan kaçışını önlemek için bir halka conta (O-ring) kullanılır. Buradaki bastırıcının fonksiyonu klasik derin çekme prosesindeki gibi hemen hemen aynı işlevi yapar. Proses, hidro-mekanik derin çekme veya hidromek olarak da adlandırılır. Alman araştırmacılar bu proses için patent aldıklarında hidromek (hydromec) ismini kullanmışlardır [2].



Şekil 2.4. Hidro-mekanik derin çekme [11]

Dişi kalıp ile ıstampa arasında kalan, akışkan basıncına maruz ve desteklenmeyen kısımda sac yukarı doğru bombeleşir (Şekil 2.5.). Bu deformasyon, radyal çekme gerilmelerine ve teğetsel basma gerilmelerine neden olur. Çekme işlemi rijid dişi kalıbın çekme radyüsünde değil de basınçlı akışkan tarafından oluşturulan bu şişkinlik üzerinde meydana gelir. Bu özelliğinde yardımıyla çekme oranlarında 2,7 mertebelerine ulaşılabilir.

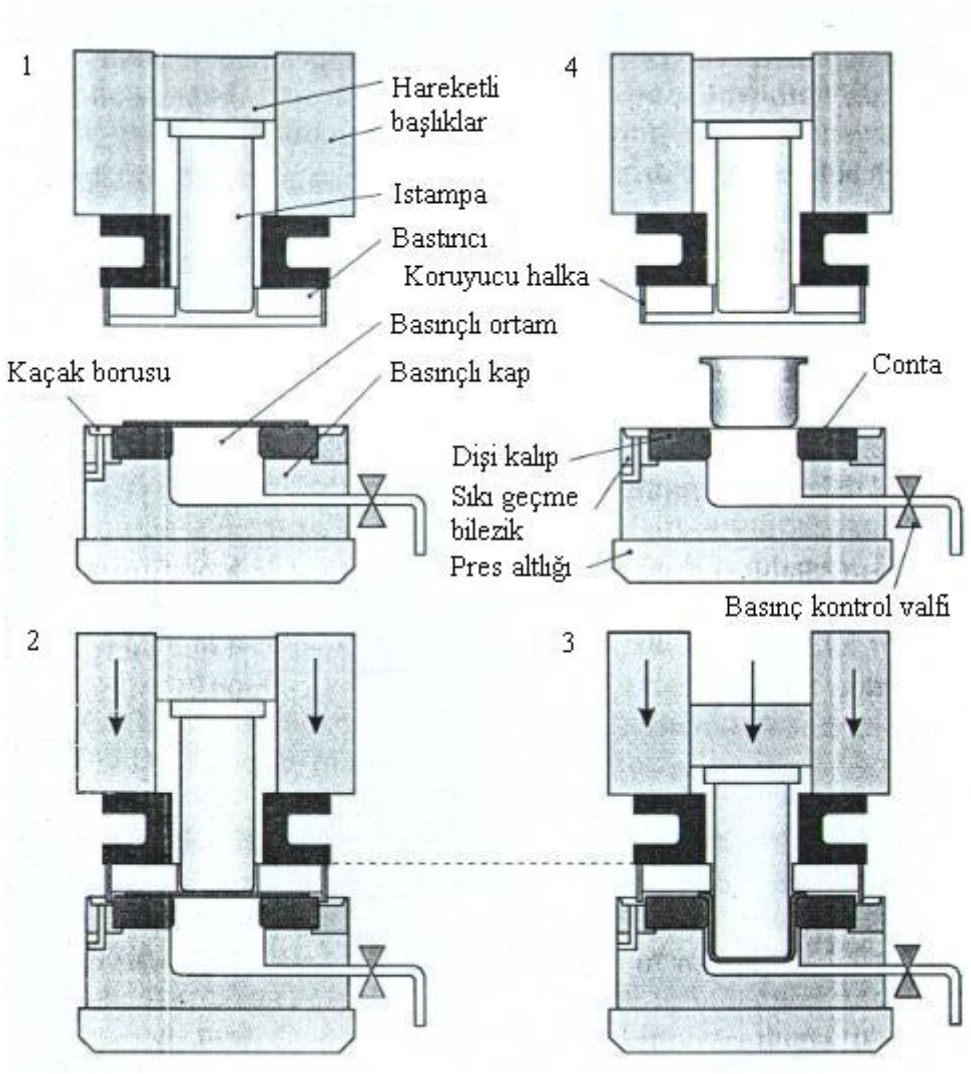


Şekil 2.5. Hidro-mekanik derin çekme esnasında çekme boşluklarının oluşumu [11]

Şekil 2.6.'da kalıp konstrüksiyonu ve işlem akışı görülmektedir. Alt kalıp basınçlı kap veya tank olarak adlandırılır. Bu tank bir basınçlı kap gibi tasarımlanır ve parçaya göre özel dişi kalıbı alttan destekler. Basınçlı ortam presteki basınç regülatörü ile bağlantılıdır. Basınçlı kabın üzerinde bulunan dişi kalıbın sıkıca tutturulması için sıkı geçme bir bilezik kullanılır. Bileziğin olukları vardır ve bu oluklar sızan akışkanı taşma (kaçak) borusuna taşır. Ayrıca, dişi kalıpta da poliüretan bir contanın yerleştirilmesi için çekme radyüsünün civarında dairesel bir oluk vardır. Kalıbın üst kısmı, bastırıcı ve ıstampayı içerir. Bastırıcı normalde dökümdür ve parçaya göre özel değiştirilebilir bastırıcı içine tutturulur. Ayrıca, bastırıcı sızan akışkanı toplamak için dairesel koruyucu bir halkada içerir. Istampa, bastırıcının içine yerleştirilmiştir ve hareketi bastırıcı tarafından kılavuzlanır. Bu tür imalat kalıplarında çekme derinliğini sınırlayan mekanik bir iç durdurucu bulunması gerekir.

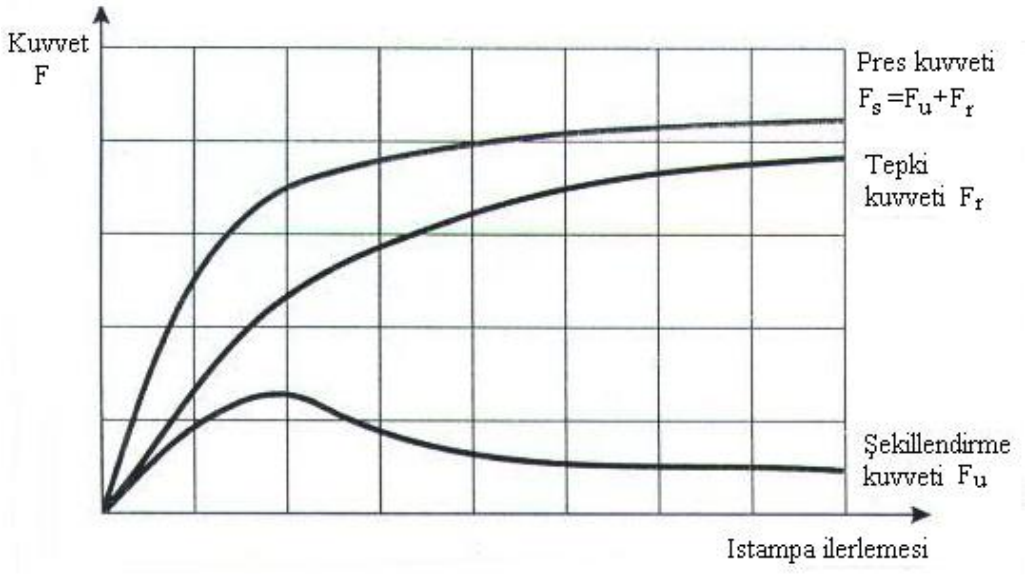
Pres açılır ve basınçlı kabın doldurulması ile proses başlar. Sac yerleştirildikten sonra pres kapanır ve bastırıcı saca temas eder. Pres üzerinden ayarlanabilen bastırıcı basıncı, basınçlı kaptan akışkan sızdırmazlığını da sağlar. Istampanın ilerlemesi ile şekillendirme başlar ve basınçlı kap içersinde akışkan basıncı artar. Şekillendirme esnasında, sac basınçlı ortam tarafından ıstampaya doğru preslenir ve basınçlı ortamla bağlantılı kontrol sistemi çekme derinliğine göre akışkan basıncını kontrol eder. Mekanik olarak sınırlı çekme derinliğine ulaşıldıktan sonra basınçlı kap içersindeki basınç serbest bırakılır ve üst kalıbın yukarı kaldırılması ile proses

tamamlanmış olur. Genelde çift etkili hidrolik presler kullanılmaktadır. Ayrıca, alt yastıklamadan yararlanılarak hidro-mekanik ters çekmede yapılabilmektedir.



Şekil 2.6. Hidro-mekanik derin çekme işlem akışı ve konstrüksiyon [11]

Hidro-mekanik derin çekme işlemi için gerekli pres kuvveti, basınçlı kap içersindeki tepki basıncından dolayı klasik metoda göre çok daha fazladır. Gerekli pres kuvveti F_s [KN], klasik şekillendirme kuvveti F_u [KN] ile basınçlı ortam tarafından ıstampa yüzeyine etkiyen tepki kuvvetinin F_r [KN] toplamıdır (Şekil 2.7.).



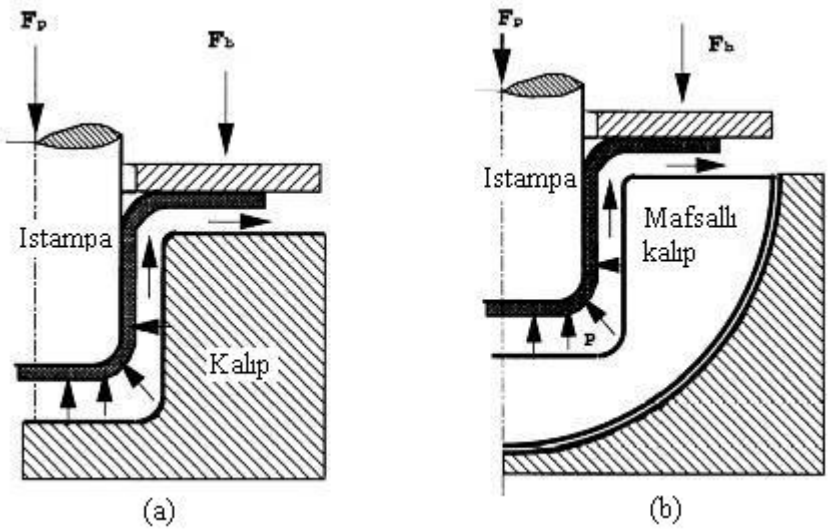
Şekil 2.7 Hidro-mekanik derin çekmede ıstampa ilerlemesine bağlı olarak kuvvetlerin değişimi [11]

Sac malzemesine bağlı olarak basınçlı kapta oluşan basınçlar aşağıda verilmektedir [11].

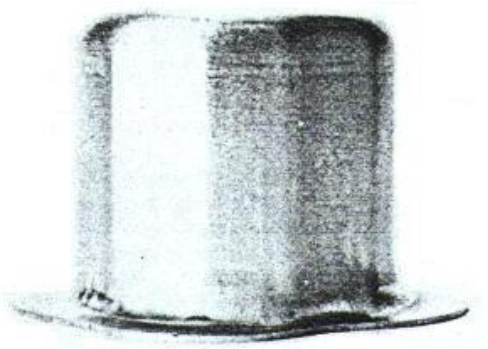
Alüminyum: 50 – 200 bar
Çelik: 200 – 600 bar
Paslanmaz çelik: 300 – 1000 bar

2.1.1.4. Hidrodinamik Derin Çekme Prosesi

Eğer akışkan sacın altından sızabiliyorsa, o zaman akışkan basıncı ıstampanın ilerlemesi ile beraber değişik değerler alabilecektir. Hidrodinamik derin çekmede böyle bir durum söz konusudur (Şekil 2.8.). Hidrodinamik akışkan kalıpla sac arasındaki sürtünmeyi büyük miktarda azaltır. Klasik derin çekme prosesine göre sınır çekme oranı değerlerinde %10'luk bir artış elde edilir. Klasik rijit bastırıcı, sacı üst taraftan destekleyerek hidrodinamik akışkanın geçişi için sabit bir aralık oluşmasını sağlar [7]. Şekil 2.8b'de ki proses komplekstir fakat farklı iş parçalarının şekillendirilmesinde kullanılabilir. Örneğin, mafsallı kalıbın (ball die) serbest olarak döndürülmesinden yararlanılarak değişken kalınlıkta bir kap üretilebilir. Akışkan basıncını kontrol etmek gereksizdir ve ince kauçuk bir diyaframa gerek yoktur çünkü diyaframın yerini hidrodinamik akışkan almıştır. Aynı zamanda bunun mali bakımdan da daha verimli olduğu görülmüştür. Bu proses ilk olarak Japon araştırmacı Kazuga tarafından 1958 yılında basınçla yağlanan derin çekme olarak ortaya konulmuştur ve aynı zamanda akışkanlı/sıvılı-çekme (aquadraw) veya daalderop yöntem olarak da tanımlanmaktadır [2].



Şekil 2.8. Hidrodinamik derin çekme [2]



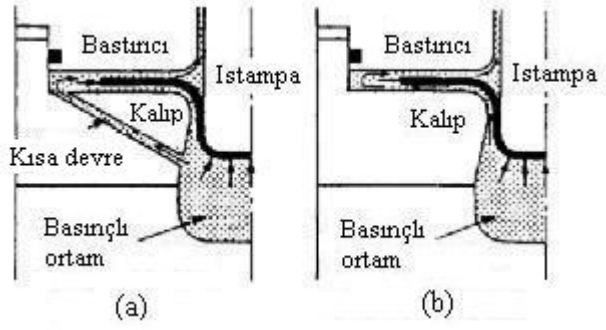
Şekil 2.9 Sadece ıstampa şeklinin değiştirilmesi ile hidrodinamik proseste elde edilmiş silindirik bir kap [7]

2.1.1.5. Radyal Basınçlı Derin Çekme Prosesi (Radial-pressure deep drawing method veya Hydro-rim Process)

Klasik derin çekme prosesi ile ancak belli sınır çekme oranlarına ulaşılır (2,2-2,3). Klasik derin çekme prosesinde böyle düşük çekme oranlarında kalınmasının en büyük sebebi sacın flanş kısmındaki radyal çekme gerilmelerin artışıdır. Bu çekme gerilmeleri, kalıp ile flanş arasındaki ara yüzey sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Radyal basınçlı derin çekme prosesi ile bu sorunun giderilmesi amaçlanmıştır. Saca çepeçevre kenarlarından basınçlı akışkan uygulanarak ara yüzey sürtünmesi azaltılır ve dolayısıyla radyal gerilmeler azalır. Böylece hasar ertelenerek daha yüksek çekme oranlarına erişilir [14].

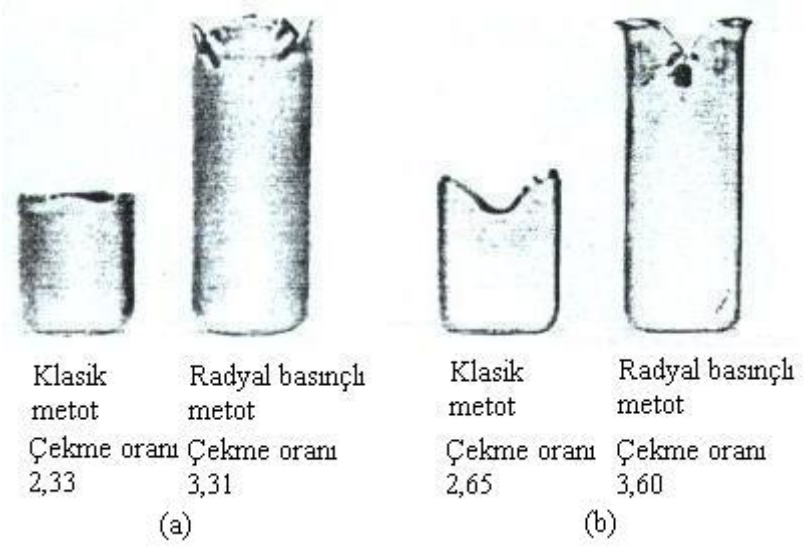
Bu proses Japon araştırmacılar Nakamura ve Nakagawa tarafından ortaya çıkartılmıştır. Zamanla başka araştırmacılar tarafından da yapılan gelişmeler prosese aktarılmıştır. Bu proses hidrodinamik derin çekme prosesinin modifiye edilmiş bir

halidir. Direkt ve en direkt metotları vardır (Şekil 2.10). Tek bir adımda sınır çekme oranı değerleri 3,2-3,3'e ulaşabilir [2]. Ayrıca, bu metotta daha büyük bastırıcı kuvvetlerine ihtiyaç vardır [10].



Şekil 2.10. Radyal basınçlı derin çekme a) Direkt metot b) En direkt metot [10]

Şekil 2.10a'da görüldüğü gibi basınçlı kabın bir kısa devre hattı vardır. Basınçlı hidrolik, bu hatla sacın çevresine ve yüzeyine gönderilir. Sacın çevresine etkiyen basınçlı akışkan, sacı radyal yönde iter. Sacın yüzeyine etkiyen basınçlı akışkan ise sac ile kalıp ve sac ile bastırıcı ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltır. Böylece çekmeye karşı olan dirençler önemli bir miktar azalır. Bu metotla, 25 MPa radyal basınç sağlanarak 0,8 mm kalınlığında alüminyum malzemeden çekilmiş derin silindirik bir kap (çekme oranı 3,3) ile derin kare kesitli bir kap (çekme oranı 3,6) Şekil 2.11.'de görülmektedir [3].



Şekil 2.11. Radyal basınçlı çekme ve klasik çekme metotlarının örneklerle karşılaştırılması a) silindirik kap b) kare kesitli kap [3]

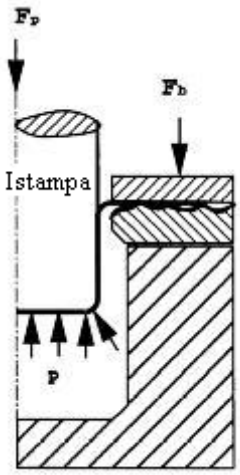
2.1.2. Proses Üzerine Çalışmalar ve Gelişmeler

2.1.2.1. Proses Performansındaki Gelişmeler ve Önemli Buluşlar

Buerk, hidro-mekanik çekme prosesi üzerine yaptığı çalışmaları 1967 yılında yayınlamıştır [15]. Kalıp ile sac arasında bir halka conta kullanmıştır. Deformasyonun germe, basma ve bükmenin bir kombinasyonu olduğu sonucuna varmıştır. Istampa aşağıya doğru hareket ederken artan basınç sebebiyle sacın serbest kısmında yukarıya doğru bir şişkinlik meydana gelir (Şekil 2.5.). Bu şişkinlik sacın flanş kısmında radyal ve teğetsel gerilmelere neden olur. Gerçek çekme kalıbın profil yuvarlatmasında değil bu şişkinlikte meydana gelir. Sınır çekme oranı 2,7 seviyelerine ulaşabilir. Halka conta aşınmaya dayanıklı bir plastikten yapılmıştır ve çok yüksek basınçlarda üzerine bakır bir halka (kılıf) geçirilmesi tavsiye edilmiştir. Buerk, aynı zamanda tekrar çekme (ikinci çekme) ve ters çekme prosesleri gibi hidro-mekanik çekmenin farklı kombinasyonlarını da önermiştir [2].

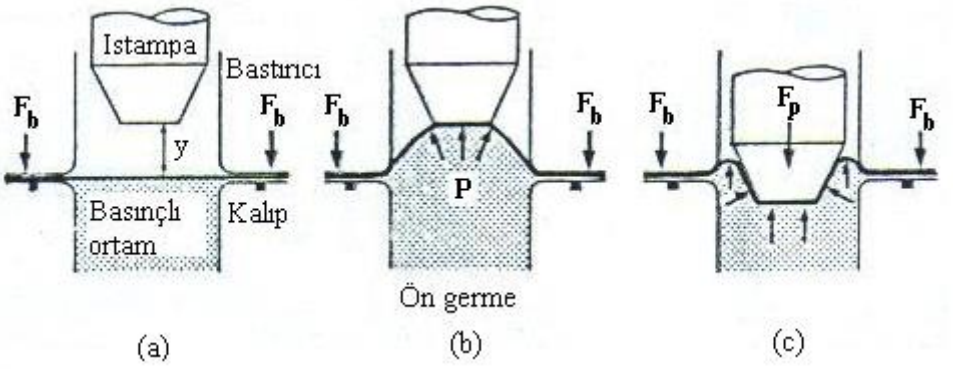
1977 yılında Larsen, hidrodinamik prosese (aqua-draw) bazı yenilikler katmıştır. Basınçlı akışkan olarak yağ kullanılmıştır. Eşik basıncı aşıldığı zaman, yağ sacın altından itilmektedir. Böylece yağ akışı bir yağlayıcı olarak davranır ve flanş ile kalıp arasındaki sürtünme minimum olur. Aynı zamanda, kritik bölge iş parçasının alt kısmından kalıbın köşe yuvarlatmasının olduğu bölgeye kayar. Istampa hareket etmeden evvel basınçlı kap bir pompa ile basınçlandırılabilir. Eğer böyle bir pompa sağlanırsa sac ile kalıbın profil yuvarlatması arasında temas olmaz. Böylece hem daha iyi bir deformasyon sağlanır hem de eşik basıncına ulaşmayı beklemeden deformasyon gerçekleşeceğinden zamandan tasarruf edilir. Basınç, bir valf ile ayarlanabilir. Birim şekil değişimi dağılımı, optimum ön basınç ve kalıbın profil yuvarlatmasının proses üzerindeki etkisi deneysel olarak saptanmıştır [4].

Becker ve Bensman hidromek proses üzerinde küçük bir değişiklik yapmışlardır (1983). Halka conta yerine yüzeyi dalgalı (pürüzlü) bir kalıp veya bastırıcı plakası kullanmışlardır (Şekil 2.12.). Bu proses aslında bir hidrodinamik prosestir [2].

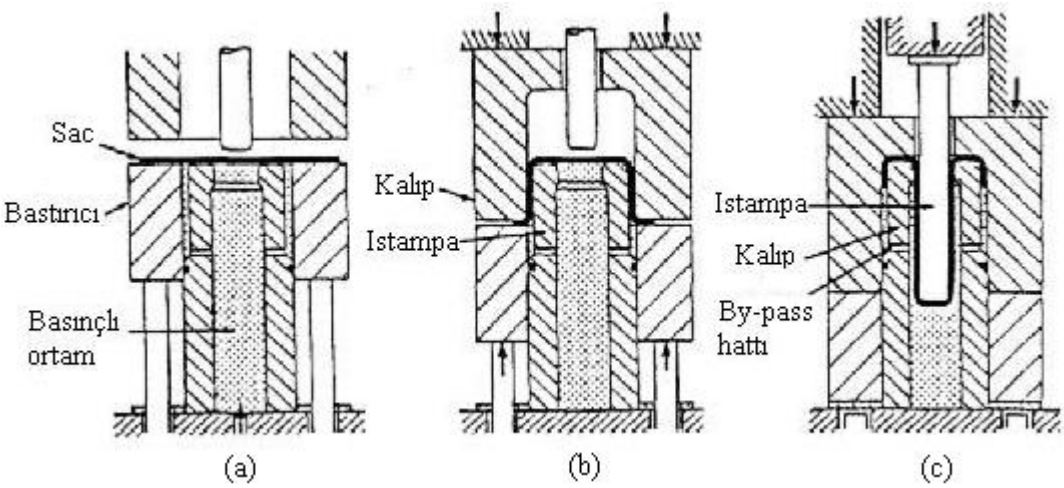


Şekil 2.12. Hidromek proseste halka conta yerine yüzeyi dalgalı kalıp kullanılması [2]

Nakamura ve Nakagawa, şekillendirme sırasında iş parçasının kırılma mekanizması üzerine bazı çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmalar Japonya'da prosesin uygulamalarına büyük bir katkıda bulunmuştur. Çalışmalar kanıtlamıştır ki; hidro-mekanik germe işleminden önce yapılan ön germe (pre-bulging) deformasyonun üniform olmasını sağlayarak daha yüksek şekillendirme limitlerine ulaşılabilmektedir (Şekil 2.13.). Bu ön germe işlemi, aktif hidro-mekanik proseste de uygulanmaktadır (Şekil 2.15.). Ayrıca, klasik çekme ile radyal basınçlı çekmenin tek bir strokta beraber uygulanmasıyla bir tekrar çekme metodu geliştirmişlerdir (Şekil 2.14.). Toplam çekme oranı 4,9 (ikinci çekme oranı 2,3) olan oldukça derin kaplar şekillendirilebilmiştir [3].



Şekil 2.13. Ön germe işlemi ile hidro-mekanik germe prosesi [3]



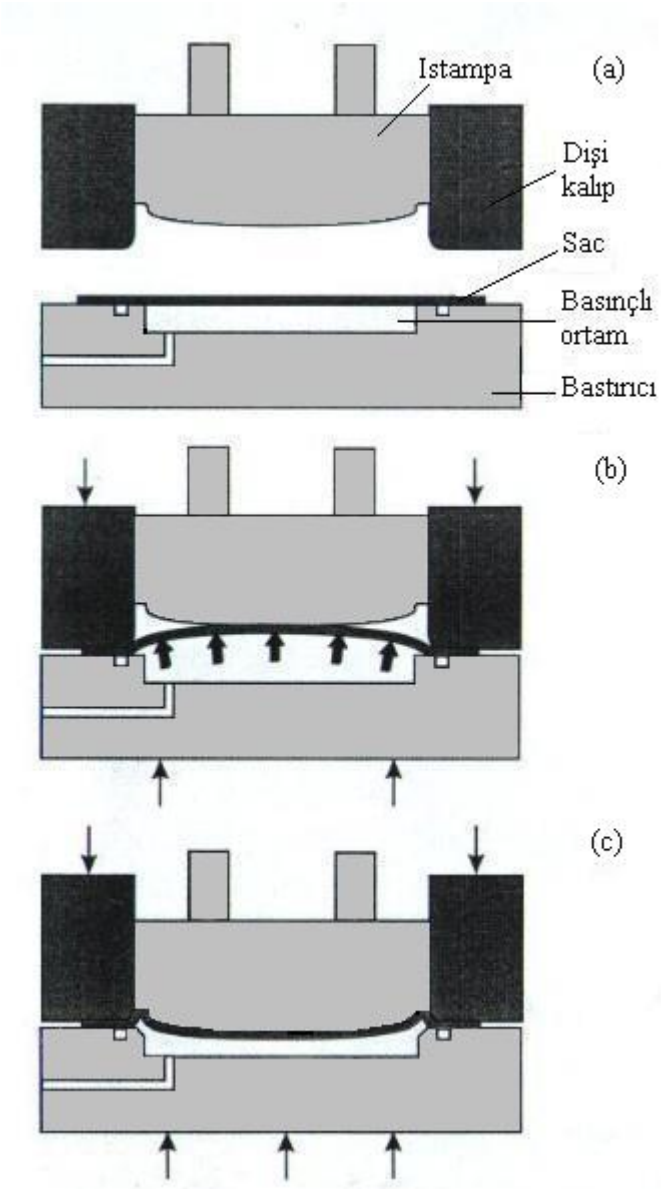
Şekil 2.14. Hidro-mekanik tekrar çekme metodu a-b) Birinci çekme (klasik çekme) c) ikinci çekme (radyal basınçlı çekme) [10]

Aktif Hidro-mekanik Proses. Otomotiv endüstrisinde kullanılan geniş paneller, merkez kısımlarında minimum çarpılma (burkulma) dayanımlarına sahiptirler. Bunun sebebi o kısımlarda deformasyon miktarının az olması dolayısıyla da yetersiz bir pekleşmenin meydana gelmesidir. Böyle parçalar, araçların kaza dayanımlarını olumsuz şekilde etkiler. Ayrıca, belli sürüş hızlarında istenmeyen titreşimler meydana gelir. Sonuç olarak, daha dayanıklı malzemeler kullanılır veya tasarım değişiklikleri yapılır. Bu gibi çözümler parça başına olan maliyeti ve parça ağırlığını arttırır. Halbuki, aktif hidro-mekanik proses ile tüm bu problemlerin üstesinden gelinir.

Hidro-mekanik çekme ilk olarak Almanya'da SMG Mühendislik tarafından kullanılmaya başlanmıştır. SMG Mühendislik hidro-mekanik çekmeyi geliştirerek yeni bir proses ortaya çıkartmıştır ve bu prosesi aktif hidro-mekanik şekillendirme (active hydro-mechanical forming) olarak tanımlamıştır. Aktif hidro-mekanik şekillendirme teknolojisi bütün geniş yüzeyli dış panellere uygulanabilir; örneğin, dış gövde parçaları, kaporta parçaları, kapılar ve çamurluklar. Daha fazla pekleşme için deformasyon miktarı arttırılabilir. Böylece sağlamlıkta bir artış olurken, kalite artar, ağırlık azalır ve maliyetler düşer. Bu prosesin bir diğer avantajı da, farklı malzemeler (çelik, alüminyum ve yüksek dayanımlı çelikler) ve farklı kalınlıktaki saclar tek bir kalıp setinde şekillendirilebilir [2].

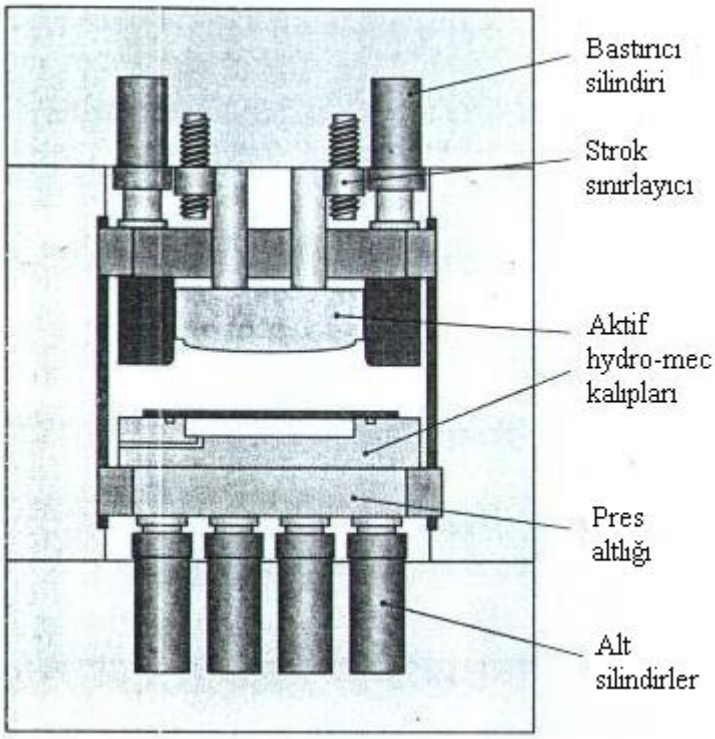
Aktif hidro-mekanik metotta basınçlı ortam olarak yağ/su emülsiyonu kullanılır. Şekil 2.15.'de operasyon aşamaları görülmektedir. İlk olarak, geniş boyutlu levha etrafı boyunca çepeçevre sızdırmaz bir conta ile beraber dişi kalıp ile bastırıcının (basınçlı kap) arasına sıkıştırılır. Bu durumda tanımlanmış, parçaya göre özel, sac ile ıstampa arasında bir boşluk oluşur. Bastırıcı basıncının arttırılmasından hemen sonra,

basınç arttırıcı tarafından basınçlı kap içersindeki emülsiyon basıncı parçaya bağlı olarak belli bir basınç düzeyine kadar arttırılır (20 – 30 bar). Bu basınç parçada kontrollü bir ön gerilmeye sebep olur. Parça yüzeyi ıstampa yüzeyine temas edinceye kadar gerilir. Bu ön-germe (pre-bulging) neticesinde parçada oluşan pekleşme ile çok daha iyi bir çarpılma dayanımı elde edilmiş olur. Ön-germe işleminden sonra aynen ters çekme prensibindeki gibi tüm sistem (bastırıcı, sac ve dişi kalıp) sabit olan ıstampaya karşı yukarı doğru zorlanır ve bu esnada emülsiyon yer değiştirir. Çekme işlemi boyunca basınç düzeyi sabit tutulabilir veya arttırılıp azaltılarak düzenlenebilir. Çekme işleminin tamamlanmasından sonra sacın ıstampanın şeklini tam olarak alabilmesi için emülsiyon basıncı daha da arttırılır (maksimum 600 bar).



Şekil 2.15. Aktif hidro-mekanik çekme işlem akışı ve konstrüksiyon [11]

Aktif hidro-mekanik proses için basınç kuvvetlendiricisi ve hızlı kalıp değiştirme sistemi olan çift etkili, düz yanlı (kolonlu) presler geliştirilmiştir. Böyle bir aktif hidro-mekanik pres şekil 2.16.'da görülmektedir. Pres tabanına yerleştirilmiş 8 silindir tarafından aşağıdan 50000 KN'luk pres kuvveti uygulanabilir. Pres başlığında bulunan 6 bastırıcı silindir, ön-germe aşaması sırasında maksimum 16000 KN'luk bastırıcı basıncı uygulayabilir. Çekme derinliğinin sınırlandırılması için mekanik durdurucular vardır.



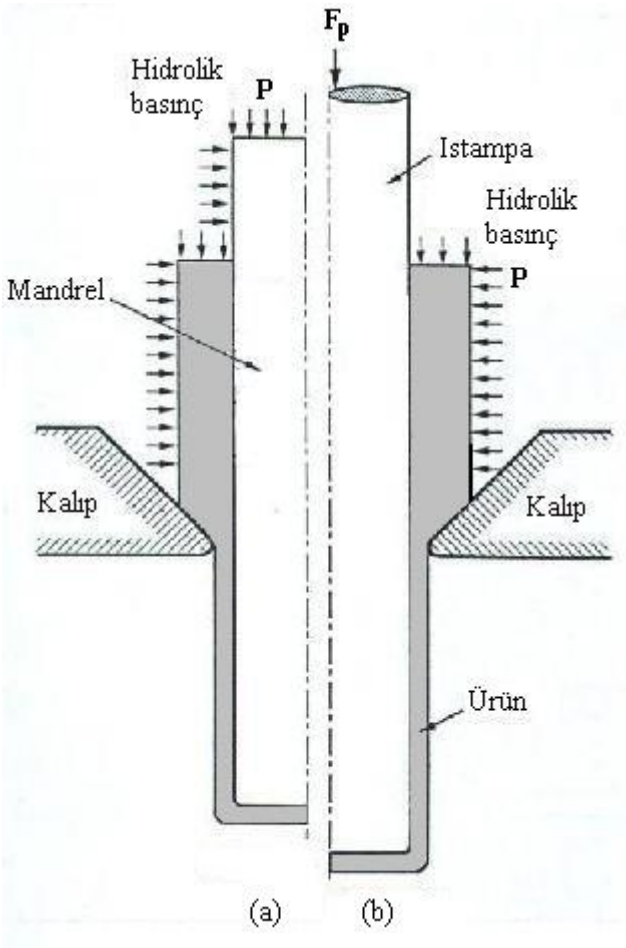
Şekil 2.16. Aktif hidromek pres [11]

Başlıca hidro-mekanik ekipmanları, basınç kuvvetlendirici (tranmisyon oranı emülsiyon:yağ = 2:1; maksimum emülsiyon basıncı 600 bar; maksimum volumetrik akış 20 1/s) ve emülsiyon tankıdır. Ana pres tahrik sistemindeki 200 Kw'lık bir motor ve bir pompa basınç kuvvetlendiriciyi işletmek için kullanılır. Hızlı kalıp değiştirme sistemi, hidrolik bağlantı elemanlarından ve kalıp çıkartma sisteminden oluşmaktadır. Böylece minimum kalıp değiştirme (set-up) zamanına ulaşılması mümkün kılınır. Bastırıcı taban plakası, dişi kalıp ve ıstampa hidrolik bağlantı elemanları ile sabitlenir [11].

2.1.2.2. Diğer Gelişmeler

Hidrostatik Ütüleme Prosesi. İncelterek çekme (ütülüme, ironing) prosesi, örneğin top mermisi kovanları gibi taban kalınlığı cidar kalınlığından büyük olan parçaların üretiminde kullanılır. Çekme sacı kalınlığı, iş parçasının taban kalınlığına eşit alınır,

iç çap sabit tutularak cidar kalınlığı inceltilerek istenen değere indirilir [16]. Tirosh, ıstampa ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi arttırmak için hidrostatik basınç yardımıyla yapılan hidrostatik ütüleme prosesini ortaya çıkartmıştır [2]. Böylece, kabın dip kısmına etkiyen ıstampa kuvveti azalır ve daha yüksek redüksiyonlara imkan sağlanır. Hidrostatik ütüleme prosesi için 2 seçenek önerilmiştir. Şekil 2.17b'de görülen metotta, iş parçasının çevresi basınçlı ortama maruz bırakılmıştır. Istampa yine sistemde mevcuttur. Şekil 2.17a'de görülen metotta ise ıstampa yerine basınçlı ortamın etkisinde olan bir mandrel kullanılır. Bu metot diğerine göre daha verimlidir fakat prosesin başlaması için bir eşik basıncının aşılması gerekir. Yapılan araştırmalar bu seçenek üzerinde yoğunlaşmıştır [17].



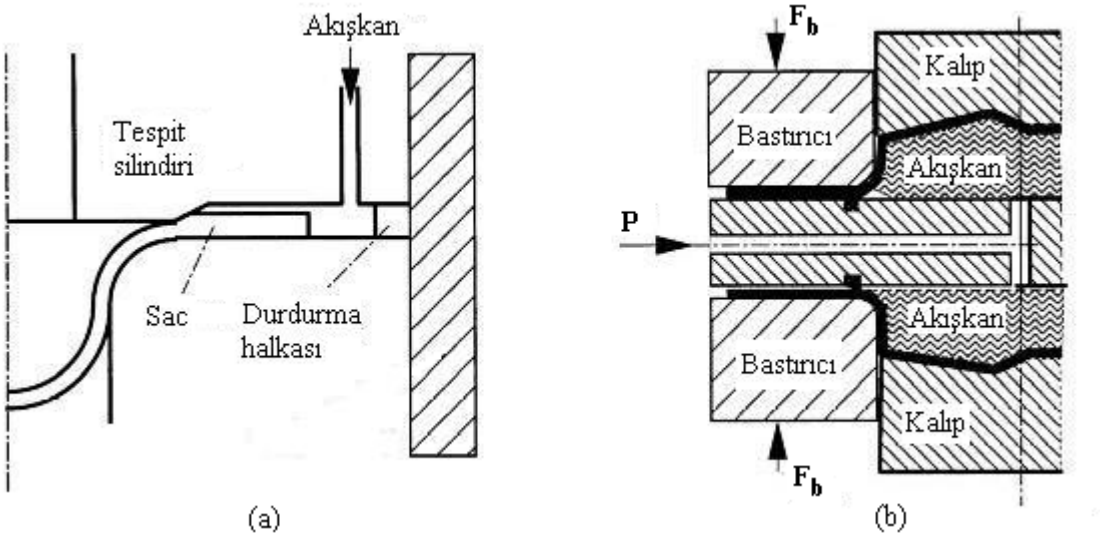
Şekil 2.17. Hidrostatik ütüleme (ironing) proses [17]

Hidrostatik basınç yeterince yüksek olursa kabın dip kısmına hiç yük etkimeyebilir ve ayrıca ıstampa ile kap arasındaki sürtünmenin artması ile kabın yan cidarlarında meydana gelen çekme gerilimi de azalır. Hidrostatik basınç çok yüksek olduğunda bir ayrılma söz konusu olabilir (Kap mandrelden daha hızlı hareket eder.). Bu yüzden, minimum bir eşik basıncı ile maksimum bir basınç hattı arasında bir çalışma bölgesi mevcuttur. Optimum bir kalıp açısı ile çalışma basıncı azaltılabilir.

Kabın yan yüzeyindeki çekme gerilimi akma düzeyine ulaştığında (2k) sınır ütüleme oranına ulaşılır. Klasik ütüleme prosesi ile cidar kalınlığındaki maksimum incelme miktarı %40'larda kalırken hidrostatik ütüleme prosesi ile çelik kaplardan yapılan deneylerde %60'lara ulaşılabilmiştir. Basıncın artırılması ile sınır ütüleme oranı da artar [17].

Yanal Akışkan Basınçtan Faydalanılarak Derin Çekme (Deep drawing utilizing lateral fluid pressure). Asakura, bu proses üzerinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bu proseste (Şekil 2.18a), sacın çevresi üzerinde yüksek bir basınç etkisi oluşturulur ve çok az bir ıstampa kuvvetine ihtiyaç duyulur. Yanal akışkan basıncın arttırılmasıyla gerekli ıstampa kuvveti azalır. Eğer basınç yeterince yüksek olursa ıstampa kuvveti sıfıra yaklaşır. Bu yüzden ıstampa kullanılmadan yapılan deneylerde olmuştur. Bu prosesle sert alüminyumdan yapılmış deney parçalarında 4 ila 6 sınır çekme oranı değerlerine ulaşılmıştır. Çekme oranına bağlı olarak (aynı zamanda kalıp çapına da bağlı) çekme parçaları burkulma nedeniyle hasara uğrayabilir [2].

Yüksek Basınçla Sac Metal Şekillendirme (High-pressure sheet metal forming, HBU process). Akışkan basıncı kullanılarak yapılan yeni bir derin çekme prosesidir ve HBU proses olarak tanımlanmıştır. Bu proseste basınçlı akışkan hidro-mekanik şekillendirmenin aksine ıstampa görevi görür (soft-punch forming). Her bir iş çevriminde iki iş parçası birden şekillendirilir ve iş parçalarının son şeklini dişi kalıp belirler (Şekil 2.18b). Bu proses kompleks sac parçalarının şekillendirilmesi ve az üretim miktarları için uygundur. Proses zamanı biraz daha uzun sürebilir ve kalıpların tam olarak pozisyon alması zor olabilir [2].



Şekil 2.18. Hidro-mekanik şekillendirme prosesindeki yeni gelişmeler [2]

2.1.3. Teorik Gelişmeler

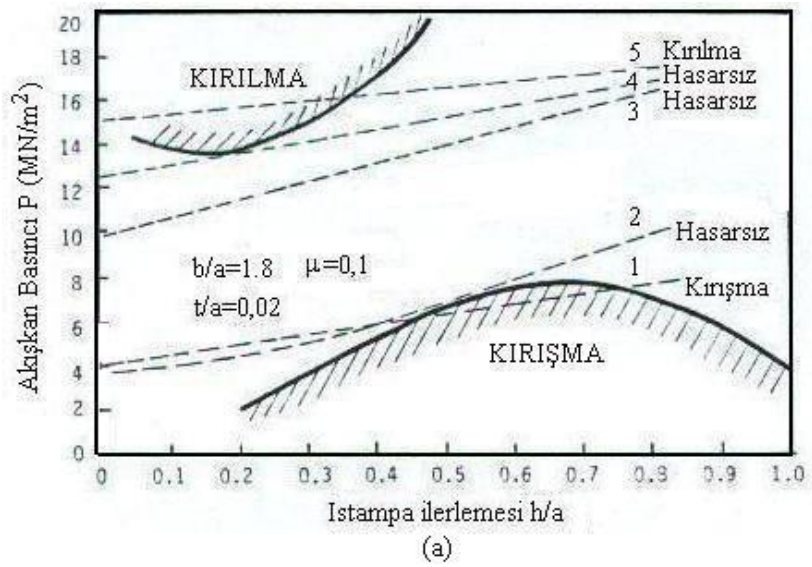
- Larsen, hidrodinamik proseste, sacın kalıp profil yuvarlatması (R_d) ile temas etmemesi için basınçlı kap içersindeki gerekli basıncının hesaplanmasında aşağıdaki denklemi önermiştir [4].

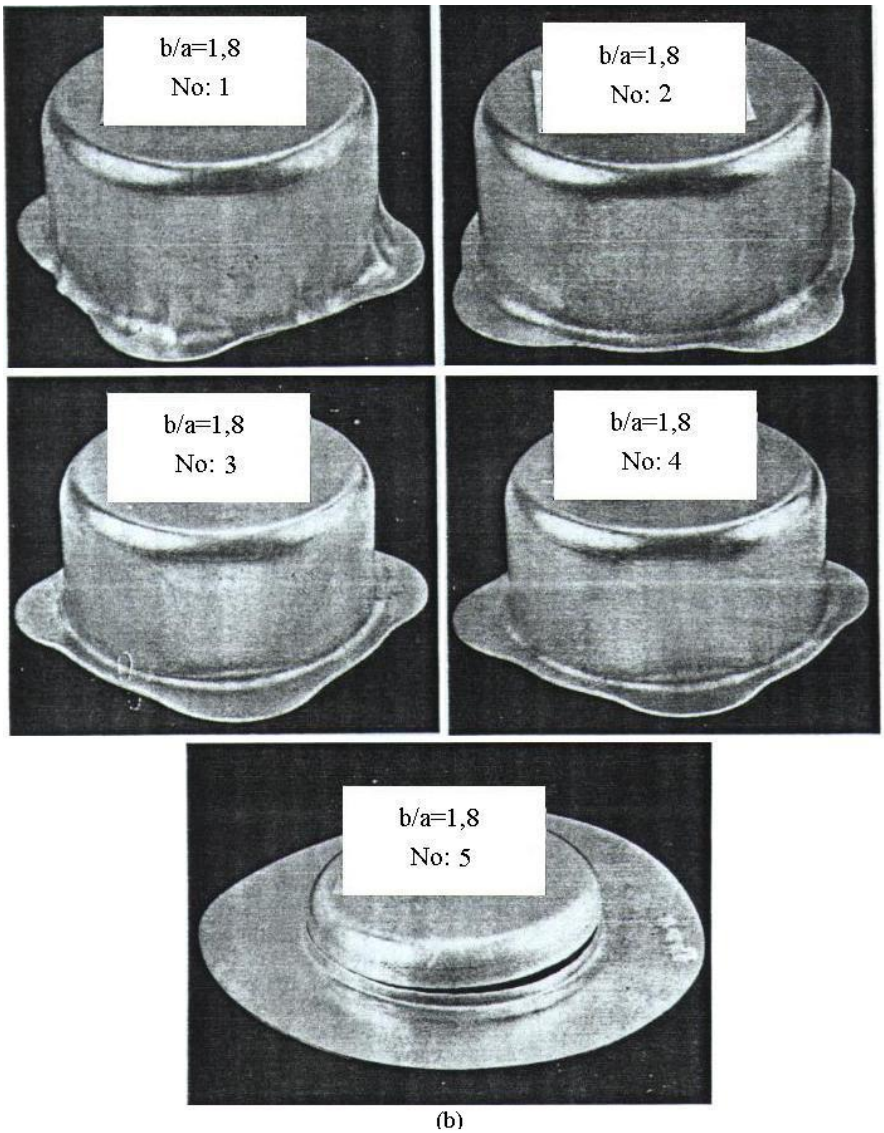
$$P = 2kt\frac{2\ln\beta}{R_d} \tag{2.1}$$

- Yossifon ve Tirosh, hidro-şekillendirme ile derin çekme prosesi için bir maksimum çekme oranı (MÇO) kavramı sunmuşlardır [5]. MÇO, iki temel hasar şekli (kırılma ve kırışma) oluşmadan elde edilebilecek en büyük çekme oranıdır. Aşırı basınç kırılmaya (rupture) [9] ve yetersiz basınçta kırışmaya (wrinkling/buckling) [18] sebep olmaktadır. Istampanın ilerlemesine bağlı olarak iki kritik basınç eğrisi vardır. İki eğrinin ortası hasarsız çalışma bölgesini temsil eder (Şekil 2.19a). Çekme oranının arttırılmasıyla (veya diğer bazı parametrelerin değiştirilmesiyle) iki eğrinin arasındaki aralık azalır. İki hasar eğrisinin aralarından geçecek bir basınç yolu için minimum boşluk kalacak şekilde birbirlerine yaklaşmasıyla (temasları da mümkündür) maksimum çekme oranına ulaşılır. Farklı koşullar altında iki eğrinin birbirlerine temas ettikleri noktaların geometrik yeri MÇO eğrisini oluşturur. Verilen bir pekleşme üssü (n) için normal anizotropi (R) ve sac kalınlığı (t) arttırıldığında MÇO artar. MÇO, n=0,1 ve n=0,2 arasında en küçük değerine varır ve bu aralıktan sonra artmaya başlar. Sürtünme katsayısı MÇO'yu önemli bir şekilde etkiler ve sürtünme katsayısının azalmasıyla MÇO değeri artar. Sürtünme katsayısının sıfıra yaklaşmasıyla MÇO değeri de 2,7'ye yaklaşır. Bu sonuçlar yapılan deneyler neticesinde kontrol edilmiştir.

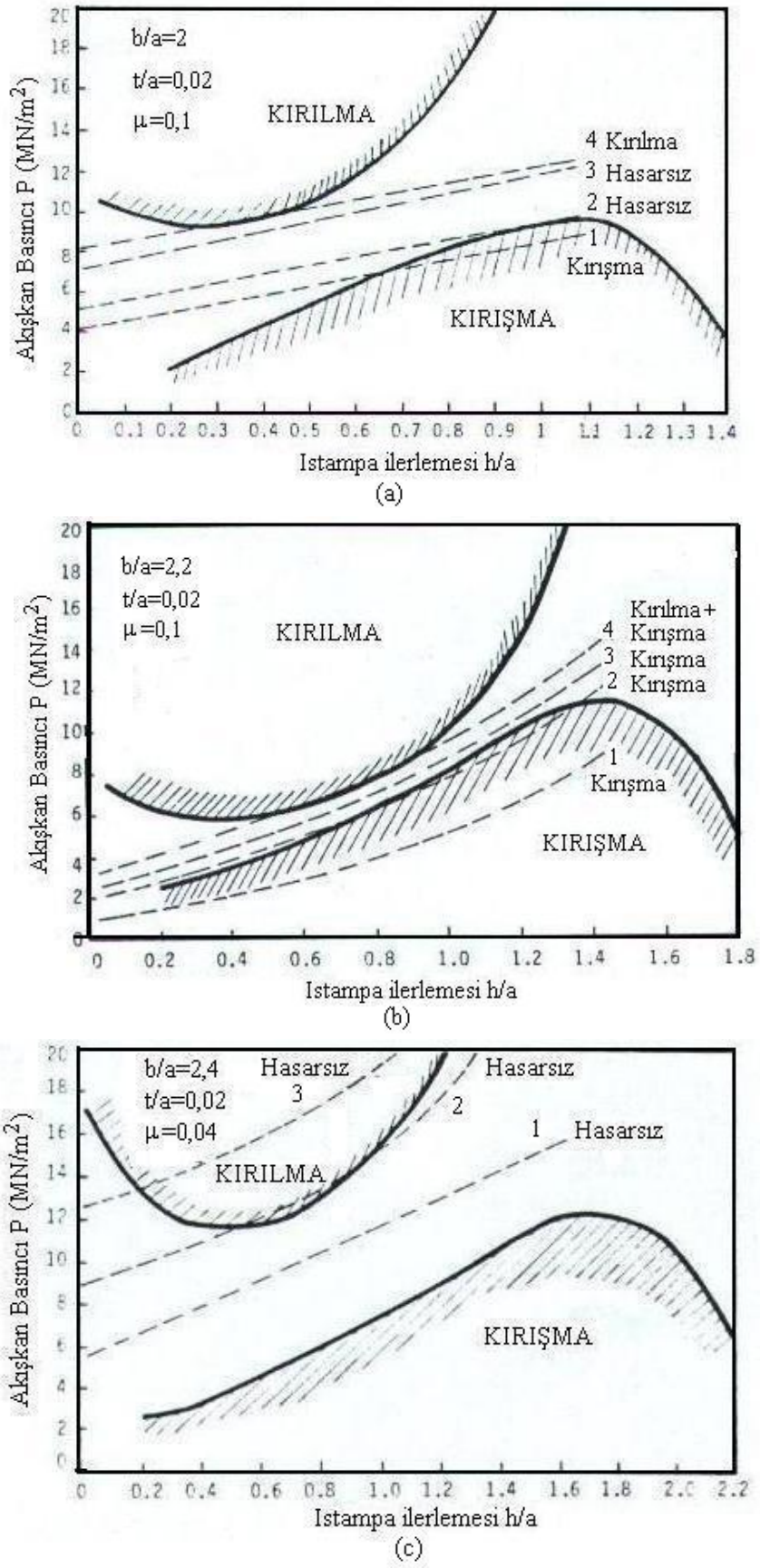
t=0,5 mm kalınlığında alüminyum malzemeden (AL 1100, R=0,8, n=0,215) deneyler yapılmıştır ve Şekil 2.19a ve 2.20a,b,c'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 2.19b'de Şekil 2.19a'ya ait deney numuneleri görülmektedir. Prosesin hasarsız olarak tamamlanabilmesi için basınç yolunun iki hasar eğrisine değmemesi gerekir. Aksi halde hangi hasar eğrisine temas edilmiş ise o hasar meydana gelir. Kırılma, klasik yöntemde olduğu gibi ıstampa yuvarlatması boyunca değil kalıp profil yuvarlatmasına yakın bir bölgede meydana gelmektedir. Kırışma ise ıstampa ile flanş arasında desteklenmeyen kısım boyunca meydana gelir. Şekil 2.20b'de çekme oranının 2,2'ye getirilmesiyle çalışma bölgesinin çok daraldığı görülmektedir. Çekme oranının 2,4'e çıkartılmasına rağmen sürtünme katsayısının 0,04'e indirilmesiyle güvenli bölgenin ne kadar genişlediği Şekil 2.20c'de görülmektedir.





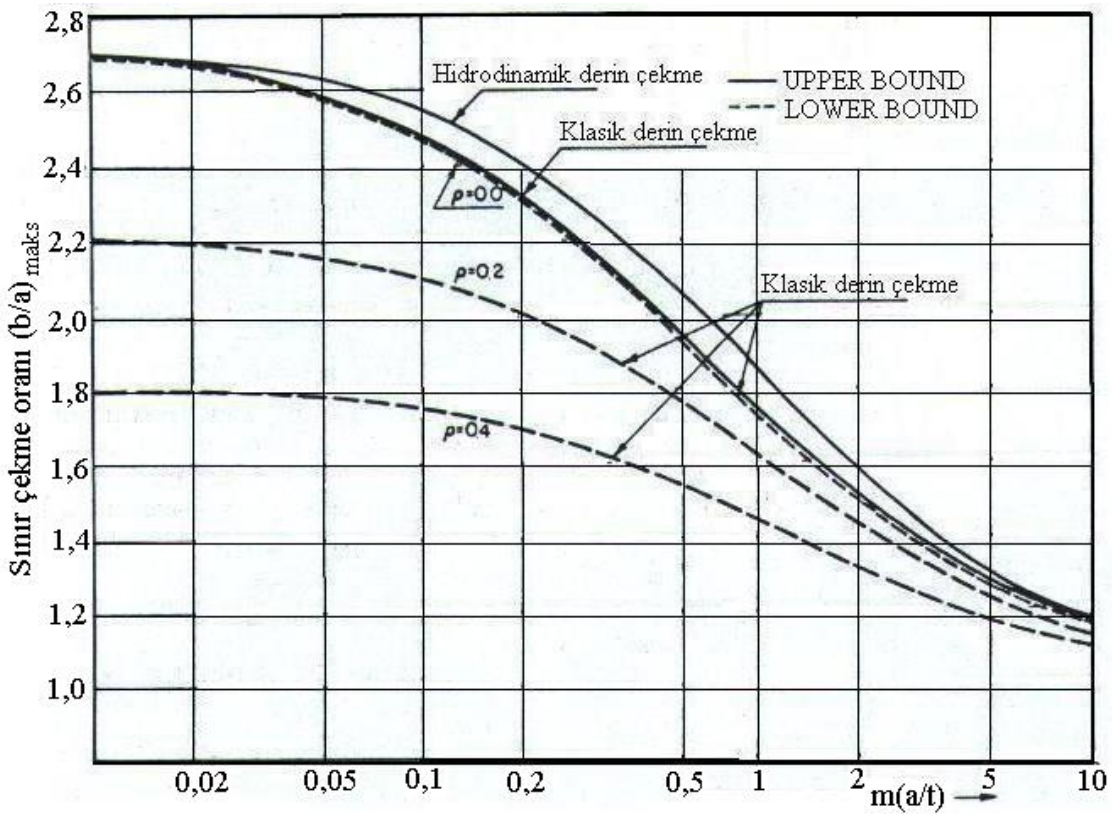
Şekil 2.19. a) tipik bir çalışma bölgesi b) bu çalışma bölgesinde farklı basınç yollarının denenmesiyle elde edilen deney numuneleri [5]



Şekil 2.20. Çekme oranı ve sürtünmenin çalışma bölgesi üzerine etkileri [5]

- Yossifon ve Tirosh, derin çekme işleminde flanş bölgesinde meydana gelen kırışma/dalgalanma (wrinkling) hasarı üzerine bir çalışma yapmışlardır [6]. Rijit bir bastırıcının kullanılmadığı derin çekme proseslerinde kırışma hasarı derin çekmeyi sınırlayan en büyük engellerden biridir. Kırışma, özellikle ince sacların derin çekilmesinde ve derin çekme oranının 2'den büyük olduğu durumlarda gözlenir. Kırışma hasarının önlenmesi için yanal hidrostatik bir akışkan basınç sağlayan özel bir mekanizma geliştirilmiş ve deneysel çalışmalar bu donanımda gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2b). Kırışma hasarının analizinde enerji metodunu kullanmışlardır ve kırışmayı önleyecek minimum basıncı ifade eden bir formül çıkartmışlardır. Belli bir basınç ve çevresel birim şekil değişimi altında dalgalanma adedi ve kırışmayı önleyen minimum akışkan basıncı tahmin edilebilmektedir. Farklı basınçlar altında dalgalanma adedi değişmektedir ve genelliklede basıncın artışı ile artmaktadır.

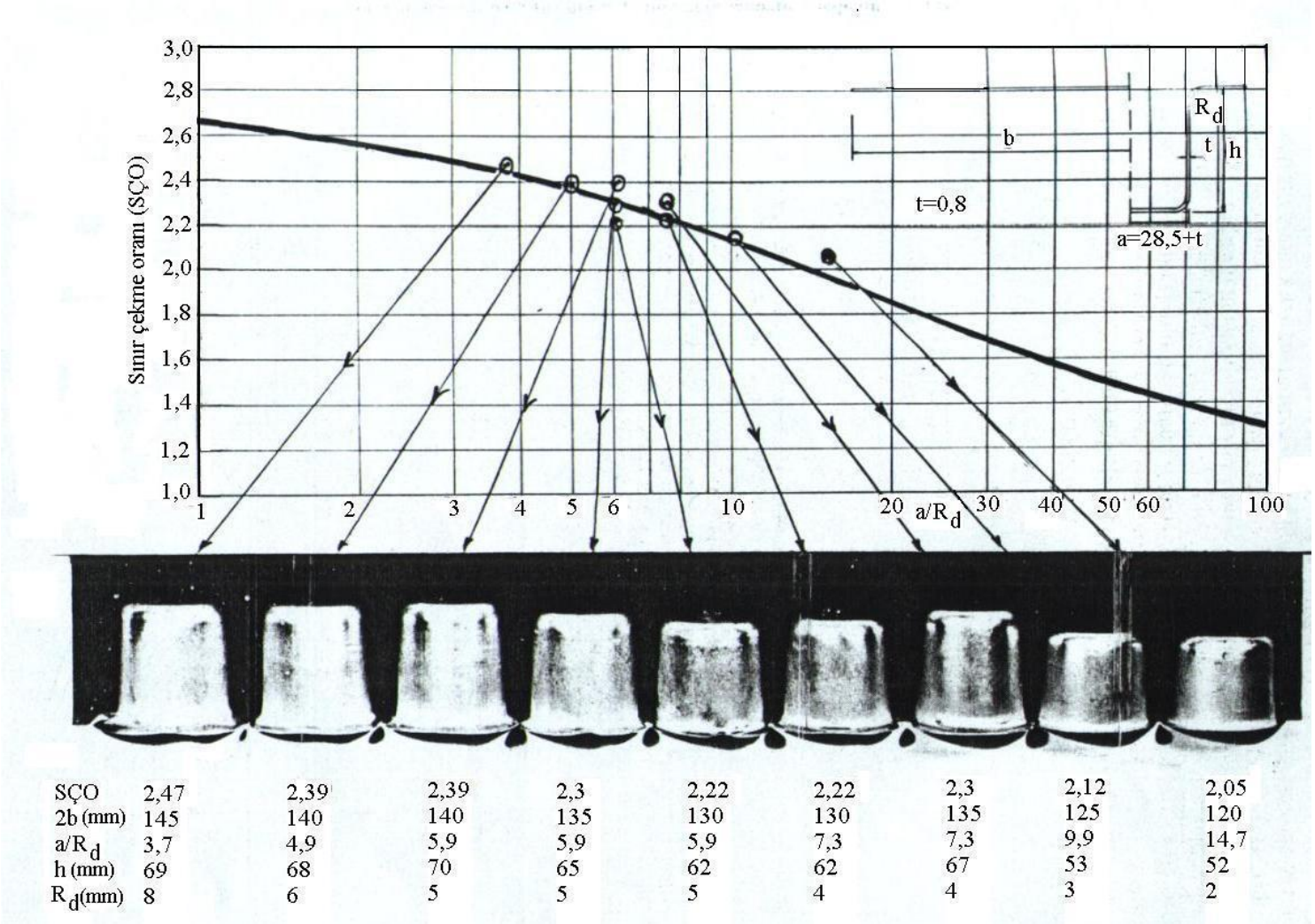
- Tirosh ve Konvalina, hidrodinamik derin çekme prosesinde sınır çekme oranı değerleri üzerine bir çalışma yapmışlardır [7]. Sınır çekme oranı değerleri üst-sınır, alt-sınır (upper-bound, lower-bound) yöntemleriyle teorik olarak saptanmıştır ve klasik derin çekme prosesi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.21.). İdeal sürtünmesiz (m=0) bir derin çekme prosesinde sınır çekme oranı değeri 2,718 olmaktadır. Şekil 2.21.'de de görüldüğü gibi sürtünmenin artması (m) veya (a/t) oranının büyümesi ile sınır çekme oranı azalmaktadır. Kalıp profili eğrilik parametresi ($0 \leq \rho \leq 1$, $\rho = 0$ ideal akış, $\rho = 1$ keskin köşe) azaldıkça sınır çekme oranı artmaktadır. Ayrıca, kalıp profil yuvarlatmasının (R_d) sınır çekme oranı değerleri üzerindeki etkisi Şekil 2.22.'de açıkça görülmektedir. Kalıp profil yuvarlatması arttığı zaman sınır çekme oranı artmaktadır. Ancak, bu yuvarlatma parçanın üst kısmındadır ve genelliklede kesilir. Bu yüzden kap yüksekliğinde bir azalma olur. Hem efektif kap yüksekliğinin maksimum olması hem de malzemeden en verimli şekilde yararlanmak için yuvarlatma en uygun değerde olmalıdır.



Şekil 2.21. Hidrodinamik derin çekme ve klasik derin çekmede sınır çekme oranı eğrileri ($\rho = 0$ için upper bound ve lower bound eğrileri çakışmaktadır.) [7]

Prosesin en önemli parametrelerinden biride hidrodinamik akışkanın kalıpla sac arasından geçtiği aralıktır. Bu aralık, akışkanın viskozitesine ve ıstampa hızına bağlıdır. Flanşın kalınlığı uniform olmadığından bu aralıkta uniform değildir. Eğer aralık çok dar olursa sacın en dış kısmındaki kalınlaşma akışı engelleyebilir. Uygun aralık yüksekliği için Sommerfeld Sayısı bir kriter olarak kullanılabilmektedir. Düzgün bir hidrodinamik akışın sağlanması için sommerfeld sayısının belirlenmiş bir değeri geçmesi gerekir.

Yapılan teorik çalışmalar deneysel çalışmalar ile de desteklenmiştir. Deneylerde t=0,55, 0,80, 1,00 ve 1,08 kalınlığında alüminyum saclar (n=0,265) kullanılmıştır.

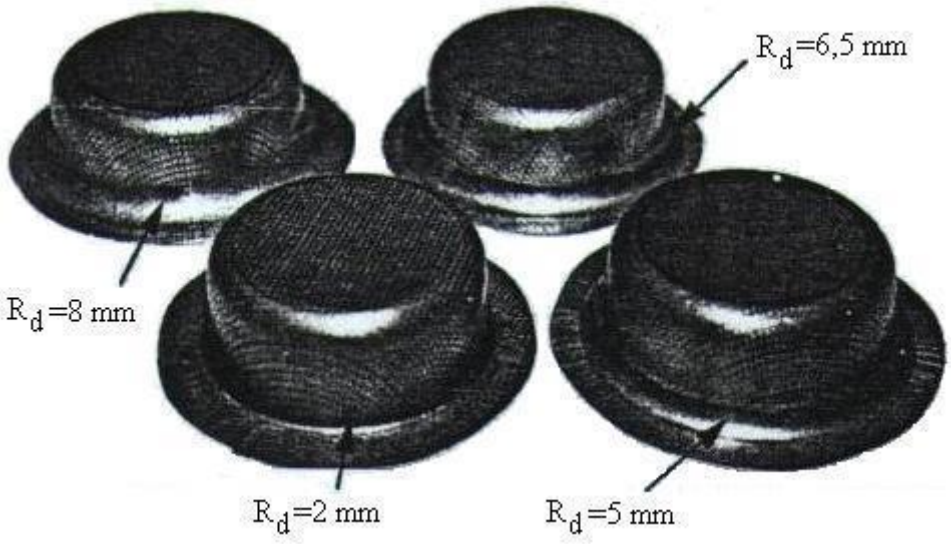


SÇO	2,47	2,39	2,39	2,3	2,22	2,22	2,3	2,12	2,05
2b (mm)	145	140	140	135	130	130	135	125	120
a/R_d	3,7	4,9	5,9	5,9	5,9	7,3	7,3	9,9	14,7
h (mm)	69	68	70	65	62	62	67	53	52
R_d(mm)	8	6	5	5	5	4	4	3	2

Şekil 2.22. Hidrodinamik prosesle farklı kalıp profil yuvarlatmalarında çekilmiş kaplar [7]

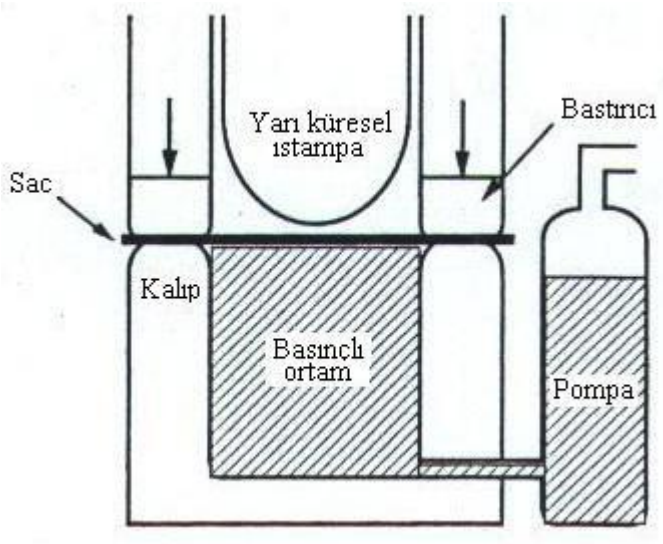
- Shirizly, Yossifon ve Tirosh, klasik bir rijid bastırıcı yerine hidrostatik akışkan basıncının kullanıldığı derin çekme prosesinde (Şekil 2.2a), kalıp profil yuvarlatmasının proses performansındaki rolü üzerine bir çalışma yapmıştır [8]. Üst-sınır ve alt-sınır metotları kullanılarak, farklı kalıp profil yuvarlatmalarındaki kuvvet yolları bulunmuştur. Profil yuvarlatmalarının artışı, derin çekme işlemi için gerekli kuvveti azaltmaktadır. Ayrıca, pekleşme üsteli (n) değerinin artışı ile de gerekli derin çekme kuvveti azalmaktadır. Hidrostatik basınç iki katına çıkartıldığı zaman (20 bardan 40 bara) gerekli kuvvette yalnızca %20'lik bir artış olmuştur.

Üst-sınır (upper-bound) ve alt-sınır (lower-bound) limit analizleri, farklı profil yuvarlatmalarına sahip kalıplarda yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Deneylerde t=0,47 mm kalınlığında AL 1100 alüminyum sac kullanılmıştır.

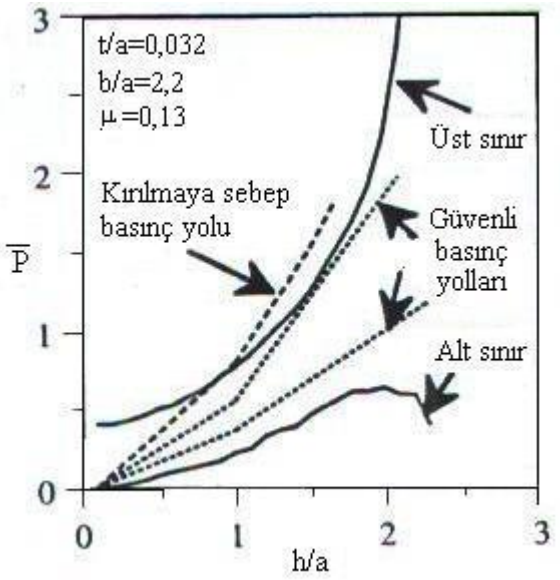


Şekil 2.23 Hidrolik bastırıcı ile derin çekme yöntemiyle farklı kalıp profil yuvarlatmalarında çekilmiş kaplar [8]

- Yossifon ve Tirosh'un kap hidro-şekillendirme proses üzerine yaptığı çalışmaların [9, 18, 19] bir benzerini Hsu ve Hsieh yarı küresel kap için (hidro-mekanik proseste) yapmışlardır [20]. Plastisite sınır teoremi kullanılarak kritik basınç eğrilerini temsil eden üst ve alt sınır çözümler bulunmuştur (Şekil 2.25). Deney mekanizması Şekil 2.24'de görülmektedir. Bastırıcı basıncı ile şekillendirme basıncı birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir (elde edilen sonuçlar bastırıcı basıncından bağımsızdır).

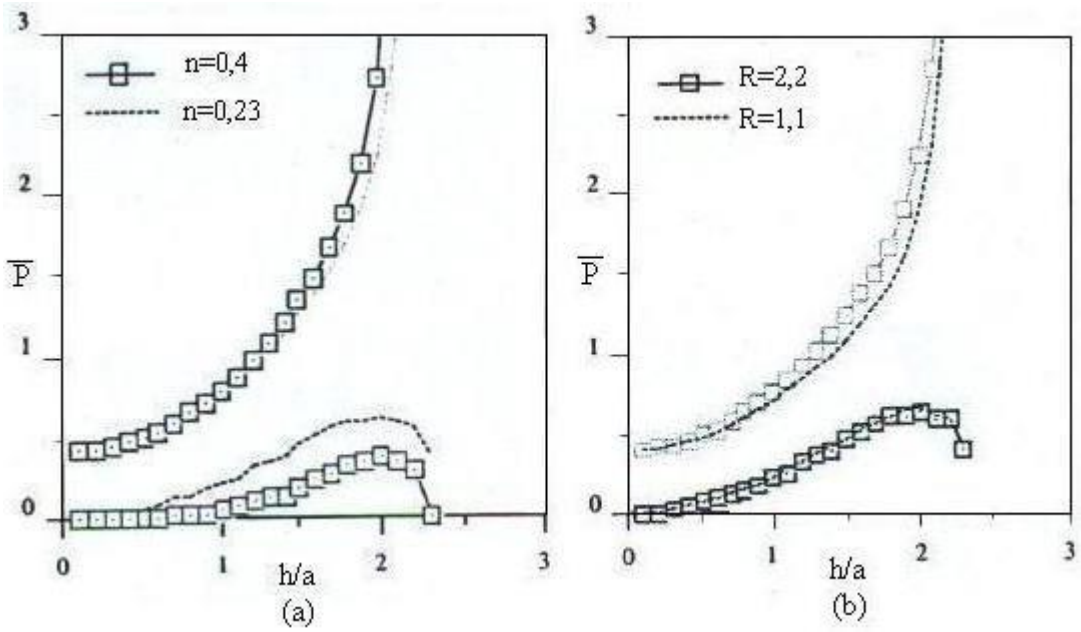


Şekil 2.24. Yarı küresel ıstampa ile hidro-mekanik derin çekme [20]



Şekil 2.25. Kritik basınç eğrilerinin oluşturduğu çalışma bölgesi (n=0,23, R=2,2, t=0,8, $\bar{P}$ akma dayanımı ile normalize edilmiş akışkan basıncı) [20]

Pekleşme üssü ve normal anizotropi değerlerinin çalışma bölgesi üzerindeki etkileri Şekil 2.26a ve b'de görülmektedir. Pekleşme üssünün artışı ile çalışma bölgesi genişlemektedir. Normal anizotropi değerinin artışı üst eğriyi (kırılma hasar eğrisi) yukarı doğru kaydırırken, alt eğri (kırışma hasar eğrisi) üzerinde çok az bir etki yapmıştır.



Şekil 2.26. Kritik basınç eğrilerine a) pekleşme üstelinin etkisi b) normal anizotropinin etkisi [20]

2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme

Tüp hidrolik şekillendirmede, silindirik parçalar hem iç basınç hem de eksenel yüklemenin beraber uygulanmasıyla şekillendirilirler. Aslında, bisiklet parçalarını şekillendirmek için geliştirilen ve yıllardır bu amaç için kullanılan bu proses, son yıllarda, otomotiv parçalarının şekillendirilmesi için daha da geliştirilmiş ve daha kaliteli ürünlerle beraber parça sayısı azaltılarak daha hafif otomobillerin üretimi mümkün kılınmıştır [1]. Bu teknolojide, basınçlı akışkan ıstampa görevi görür (soft-punch forming). Akışkan basıncı diğer hidro-şekillendirme proseslerine göre çok daha fazladır. Bu sebeple, proses düşük basınçlı şekillendirme (maksimum basınç 80-100 Mpa ve genelde cidar kalınlığındaki incelme %5'den az) ve yüksek basınçlı şekillendirme (basınç genellikle 690 Mpa'a kadar ulaşabilir, 1380 Mpa'a çıkıldığı da olmuştur) diye sınıflandırılabilir. Ayrıca, hem düşük hem de yüksek iç basıncın kullanıldığı 2 kademeden oluşan şekillendirmelerde yapılabilmektedir. Bu proseste, basınç sistemleriyle birlikte preslere de ihtiyaç vardır.

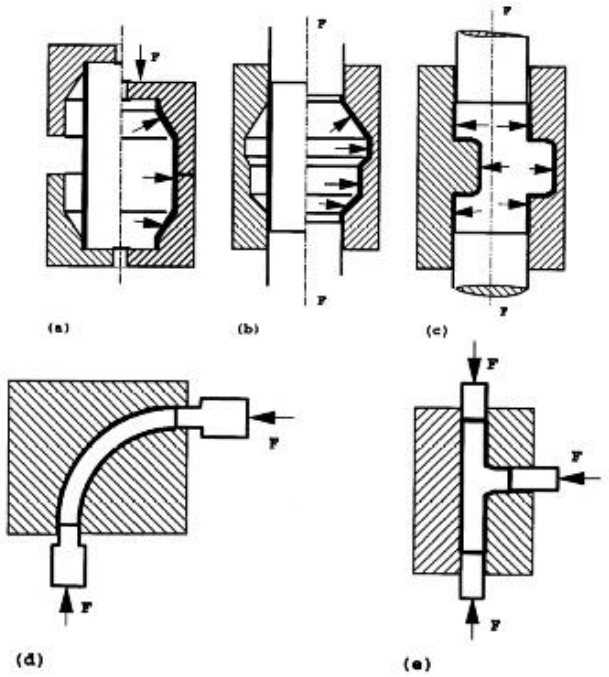
Tipik bir işlem akışı şöyle gelişmektedir; İş parçası, iki parçalı kalıbın içine koyulabilecek uygun şekle gelmesi için, silindirik parçaya genellikle önce bir ön kesim daha sonrada bir ön şekillendirme (çoğunlukla bükme) uygulanır. Kalıp yarıları kapanır ve parçanın her iki ucundan sızdırmazlık sağlanır. İş parçası hidrolik akışkan ile doldurulur ve sonra parçaya içinden hidrolik basınçla beraber her iki ucundan da eksenel yük uygulanmasıyla parçanın yüzeyi kalıp gravürüne doğru preslenir. Böylece parça kalıp gravürünün şeklini alır ve kalıp yarıları açılarak parça çıkarılır.

Tüp hidrolik şekillendirme teknolojisinde, klasik hidro-şekillendirme akışkanlarına ek olarak, düşük ergime sıcaklıklarına sahip alaşımlar ve sıvı solüsyonlarda kullanılabilmektedir [1]. Ayrıca, bu akışkanlara paslanma direncini arttırıcı maddelerde katılmaktadır. Bu proseste, açık (Şekil 2.27a) ve kapalı (Şekil 2.27b) kalıplar kullanılabilmektedir. Açık kalıplarda kalıp yarıları başlangıçta kapalı değildir, eksenel yükleme için ıstampaya gerek yoktur ve malzeme beslemesi kalıbın hareketi ile sağlanır. Kapalı kalıp sistemlerde ise kalıp yarıları kapalıdır ve malzeme beslemesi ıstampaların hareketi ile sağlanır.

Tüp hidrolik şekillendirme prosesinde, başlıca üç deformasyon modu kullanılmaktadır. Bunlar;
a) Genleşme (Şekil 2.27a, b ve e): Tüpün merkezi düz bir çizgisi vardır.
b) Kalibrasyon (Şekil 2.27d): Tüp, merkezi dairesel bir çizgi olacak şekilde

önceden dairesel bir şekilde bükülmüştür. Deformasyon miktarı azdır.

c) Yer değiştirme (Şekil 2.27c): Tüp, dirsekli bir parça olacak formda şekillendirilir.



Şekil 2.27.Tüp hidrolik şekillendirme a) Açık kalıp sistemi, b) Kapalı kalıp sistemi c) Yer değiştirme, d) Kalibrasyon, e) Bölgesel yer değiştirme [1]

Bu prosesle üretilecek silindirik parçalar çok karmaşık şekilli olabilirler. Böylece, birkaç parçadan montaj edilmiş bir elemanın, parça sayısı dolayısıyla da ağırlığı azaltılabilir. Ayrıca, kaynak dikişleri ve bağlantı flanşları kısaltılabilir hatta gerek kalmayabilirde. Aşağıdaki özelliklere sahip parçalar bu prosesle şekillendirilebilirler.

a) Değişken çaplı tüpler

b) Kademeli (basamaklı) tüpler

c) Kesit alanı kare veya daha karmaşık şekilli tüpler

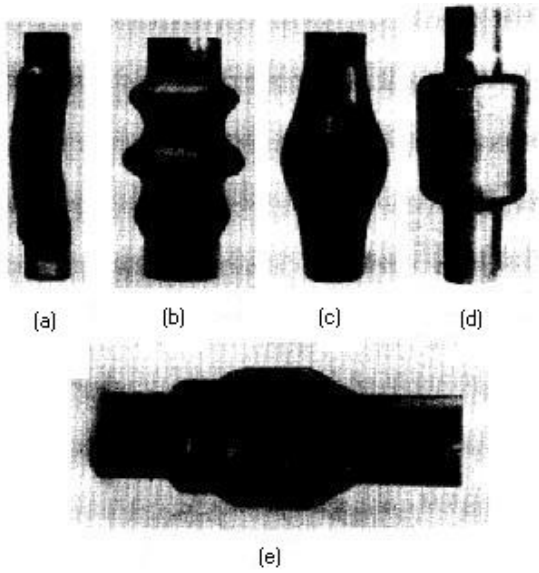
d) Uzunluğu boyunca kesit alanı sürekli değişen tüpler

e) T bağlantı gibi dallı tüpler

Yüksek basınçlı şekillendirme prosesi, iki veya daha çok katlı sandviç silindirik parçaların şekillendirilmesi için de kullanılabilmektedir. Farklı malzemelerden iki tüp içi içe geçirildikten sonra beraber şekillendirilir. Isı yalıtımı, ses yalıtımı veya titreşim önlenmesi amacıyla seramikler gibi araya bir malzeme konulabilmesi mümkündür.

Soğuk şekillendirmede kullanılan bütün metalik malzemeler bu proses için uygundur. Düşük dayanımlı ve iyi genleşebilen malzemeler tavsiye edilmektedir [1].

Başlıca 4 tip hasar modu vardır (Şekil 2.28.) [21].;
a) Burkulma (buckling): Proses başlangıcında aşırı eksenel yüklemeden dolayı meydana gelmektedir.
b) Kırışma (wrinkling): Yetersiz iç basınçtan veya uzun parçalarda aşırı eksenel yüklemeden kaynaklanır.
c) Patlama (bursting): Büyük genleşme oranlarında (d_1/d_0>1,4) aşırı basınçtan kaynaklanmaktadır. Bu yüzden, parça cidar kalınlığı gerektiğinden az olmamalıdır.
d) Geri bükülme (Folding back): İnce cidarlı tüplerde (s_0/d_0<0,05) aşırı genleşen bölgede (d_1/d_0>1,8) oluşabilmektedir. Kalın cidarlı tüplerde (s_0/d_0>0,1) ise aşırı eksenel kuvvet bükülmelere (yığılmalara) sebep olmaktadır.

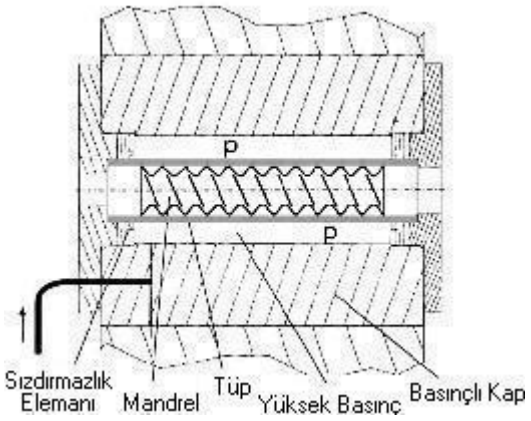


Şekil 2.28. Hasar modları: a) Burkulma, b) Kırışma, c) Patlama, d) Geri bükülme, e) Tüp cidarının yığılması [21]

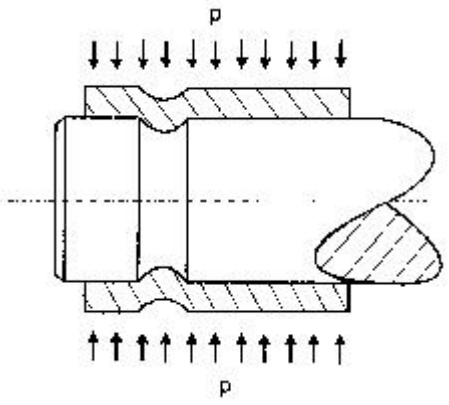
İç akışkan basıncı, tüpün genleşebilmesi için gereklidir ve tüpün tam olarak kalıp yarılarının şeklini alabilmesi için yeterli düzeyde olmalıdır. Parçanın uçlarından uygulanan eksenel yükleme, bir pres koçu tarafından sağlanır ve cidar kalınlığındaki incelmenin önlenmesi için gereklidir [1]. İç basınç ve eksenel yükleme ile oluşturulan gerilim durumu, çok iyi şekillendirme hızlarına ulaşılmasını sağlar [22]. Akışkan basıncı ve eksenel yükleme prosesin 2 ana parametresidir. Bunlar uygun değerlerde ve birbirleriyle uyumlu olmak zorundadırlar aksi halde prosesin hasarla sonuçlanması kaçınılmazdır (burkulma, kırışma, patlama vs.). Bunların yanında aşağıdaki sebeplerde başarısız şekillendirmelere sebep olmaktadır;

a) Eksenel yükün düzensiz uygulanması
b) Parça ile kalıp ara yüzeyinde akışkan olması (sıkışması)
c) Uygun olmayan kalıp gravür yuvarlatmaları
d) Kalıp veya parçanın, ıstampa (koç) ile eksen kaçıklığı
Akışkan basıncı, eksenel kuvvet ve sıkıştırma kuvveti (şekillendirme süresince kalıp yarılarının açılmasını engelleyen kuvvet), kalıpların geometrileri ve tüp malzemelerin özellikleri ile ilgilidir [1].

Tüp hidrolik şekillendirmede, eksenel kuvvetsiz iç hidrolik basınçla veya dış hidrolik basınçla da uygulamalar olabilmektedir [22]. Şekil 2.29.'da görüldüğü gibi dış basınçla şekillendirmede, tüp mandrelin şeklini alması için dış yüzeyine etkiyen hidrolik basınçla zorlanır. Ayrıca, Şekil 2.30.'da yine bu metotla iki parçanın birleştirilmesi görülmektedir.



Şekil 2.29. Dış hidrolik basınçla tüp şekillendirme [22]



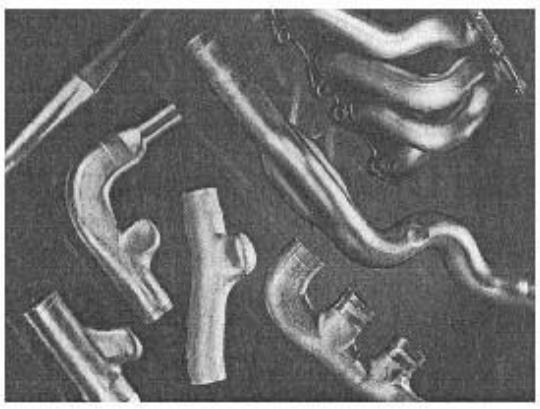
Şekil 2.30. Dış hidrolik basınçla iki parçanın birleştirilmesi [22]

Tüp hidrolik şekillendirme, özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Otomobil gövdesindeki çok parçalı, preslenmiş, kaynak edilmiş montajların ve şasi parçaların yerini daha ucuz hidro-şekillendirme ile şekillendirilmiş parçalar

almaktadır. Örneğin, bir dişli mili bu prosesle şekillendirilebilmektedir (dişler daha sonra işlenir). Mercedes firmasında kam millerinin üretiminde tüp hidrolik şekillendirme kullanıldığı açıklanmıştır (1999 yılında bir mil için çevrim zamanı 20 saniye olmak üzere günde 500 milin üretildiği tahmin edilmektedir.). Başka bir firma da, egzost manifoldu gibi bu teknoloji ile şekillendirilen ürünlerin yıllık üretim miktarı 1,5 milyon parçaya ulaşmıştır. Bu prosesle otomotiv endüstrisinde şekillendirilmiş en büyük parçalar kamyon şasileridir (GM, bir sütunun uzunluğu 4,57 m, ağırlığı 34 Kg ve cidar kalınlığı 2 mm). Otomotiv endüstrisinde bu teknoloji ile şekillendirilen silindirik parçalar aşağıdaki kategorilere ayrılabilir;

a) Bağlantı parçaları
b) Motor ve transmisyon parçaları
c) Egzost sistemi parçaları
d) Şasiler
e) Otomobil gövde parçaları ve diğer

Bu teknoloji, ana uygulama alanı olan otomotiv endüstrisi dışında motosiklet ve bisiklet şasi parçaları ve gidonlarının üretiminde de sık sık kullanılmaktadır [1].



Şekil 2.31. Tüp hidrolik şekillendirme ile üretilmiş (iç basınç + eksenel kuvvet) bir otomobil motoruna ait egzost sistemi parçaları [22]

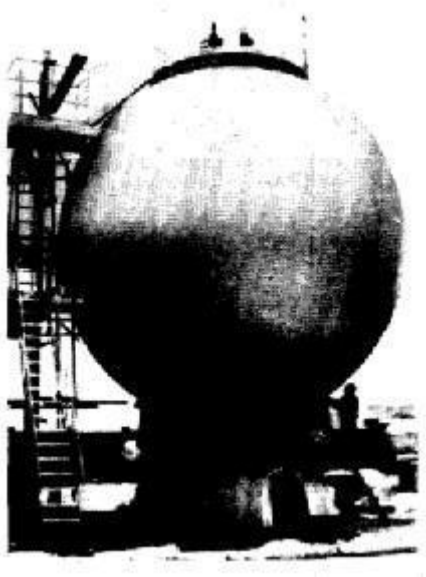
2.3. Bütünleyici Hidro-Şişirme ile Şekillendirme, BHŞŞ (Integral Hydrobulge Forming, IHBF)

BHŞŞ teknolojisi ile küresel kabukların şekillendirilmesi 1985 yılında Z.R. Wang tarafından ortaya çıkartılmıştır. Bu yeni hidro-şekillendirme teknolojisi ile küresel basınçlı kaplar, basık küremsi kabuklar ve basınçlı kap başlıkları akışkan basıncı yardımıyla, çoklu kalıp setlerine, preslere ve ıstampaya gerek duyulmadan şekillendirilebilmektedir. Akışkan ıstampanın işlevini görür. Çoğunlukla akışkan kullanılmasına rağmen patlamalı şekillendirme (explosive forming) tekniklerinin de kullanıldığı olmuştur. İlk olarak, metal levha (sac) önceden tasarlanmış şekillerde kesilir. Kesilen parçalar çok yüzeyli bir kabuk oluşturacak şekilde kaynakla birleştirilir. Daha sonra, oluşturulan kabuk bir akışkan ile doldurulur ve son olarak istenilen şekli alması için hidrolik olarak zorlanır. Bu teknoloji kullanılarak onlarca çeşit ürün yapılmıştır; örneğin, küresel çelik su kuleleri, 50 ila 900 m^3 hacminde su tankları ve 6 metre çapa kadar basık küremsi çelik inşaat yapılar. Bu yeni teknoloji mali bakımdan verimli, gelecek vadeden ve rekabetçi bir teknoloji olduğunu kanıtlamıştır.

Yapıları bakımından çok yüzeyli kabuklar, düz sac kabuklar ve tek yönlü eğimli kabuklar olmak üzere iki şekilde olabilir. Düz saclardan oluşmuş çok yüzeyli kabuklar, 12 tanesi beş köşeli ve 20 tanesi altı köşeli parçalardan olmak üzere 32 yapraklı bir kabuktan (aynen bir futbol topu gibi) oluşabildiği gibi 8 tanesi altı köşeli ve 6 tanesi dört köşeli parçalardan oluşmak üzere 14 yapraklı bir kabuktan da oluşturulabilir veya birçok farklı ikizkenar parçalardan konik kabuklarda oluşturulabilir. Bu kabuklar kolayca imal edilebilmektedir. Sac parçalar düzgün bir kesimden sonra birbirlerine kaynak edilebilmektedir, bazen de kaynak dikişi sayısını azaltmak için eğme işlemi tercih edilir. Tek yönden eğimli kabuklarda yanal parçaların çoğu tek bir yönde yuvarlatılarak bükülür ve diğer yön doğru bir hat olarak kalır. Sacların kesimi basittir. Düz saclardan oluşmuş çok yüzeyli kabuklar genellikle küçük veya orta boylu küresel kabukların yapımında kullanılır ve bu küresel kabuklar yapılarda dekorasyon olarak kullanılabilmektedir. Tek yönden eğimli kabuklar ise çoğunlukla su kuleleri ve sıvı petrol gazı tankları (LPG) gibi büyük boyutlu küresel tankların yapımında kullanılır. Kabuk yapının seçimi kullanıcıya bağlıdır [1].

Bu teknoloji kullanılarak yapılan ilk LPG tankı Şekil 2.32.'de görülmektedir. 200 m^3 hacminde ve 7,1 metre çapında olan bu küresel tank, 1992 yılında Çin'de inşa edilmiştir [23]. Tank, 24 mm kalınlığında alaşımlı çelikten (16MnR) yapılmıştır.

25 yanal parça ve 2 kutup başlığından oluşan tek yönlü eğimli bir kabuk olarak maksimum 1,77 MPa basınca dayanacak şekilde dizayn edilmiştir.



Şekil 2.32. BHŞŞ teknolojisi ile yapılan ilk küresel LPG tankı [23]

BHŞŞ teknolojisi, küresel ve küremsi kabukların imalatında kullanılabildiği gibi aynı zamanda çift veya çok katlı küresel kabukların imalatında da kullanılabilir. Ayrıca, BHŞŞ teknolojisi ile klasik proseslere (pres işçiliği ve sıvama) bir alternatif olarak dairesel düz levhalardan basınçlı kap başlıkları çift olarak şekillendirilebilmektedir, özellikle de klasik proseslerle üretilemeyecek kadar büyük çaplı (>6,5m) ve az üretim miktarlarında. İki dairesel düz sacın arasına bir halka eleman (dairesel bükülmüş bir tüp ekseninden kesilerek dış taraf bu amaçla kullanılabilir) konulduktan sonra kaynak ile birbirlerine tutturulurlar (Şekil 2.33.). Halka sağlam bir yapıya sahiptir ve rijit olarak davranır. Ara boşluk bir akışkan ile doldurulur, daha sonra akışkan, dairesel sacların gerilerek kesit alanı eliptik olan bir kabuk oluşturmasını sağlamak için basınçlandırılır. Böylece, basınçlı kap başlıkları çift olarak şekillendirilmiş olur [24].



Şekil 2.33. Basınçlı kap başlıklarının şekillendirmeden önceki kesiti [24]

Bu teknolojide kullanılacak malzemeler, saf karbonlu çelik, paslanmaz çelik ve bazı demirsiz metal saclar olabilir. Malzemelerin iyi genleşebilme miktarına, yeterli

plastik deformasyon kapasitesine ve iyi kaynak edilebilme özelliklerine sahip olmalıdır.

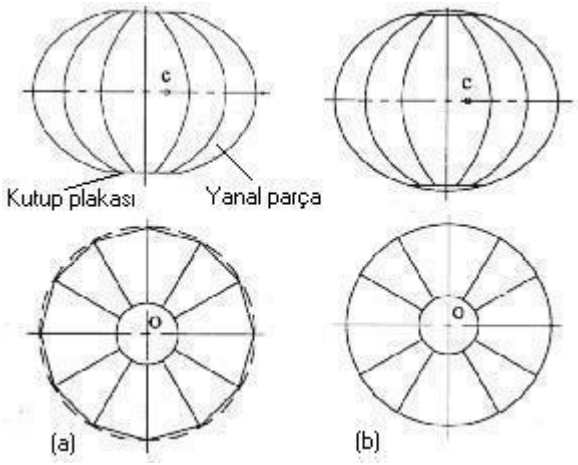
Akışkan olarak genelde su veya yağ tercih edilir. Büyük boyutlu kabuklar için elektrikli basınç pompaları, küçük boyutlu kabuklar için ise el pompaları kullanılabilir.

BHŞŞ teknolojisinin avantajları şunlardır:
a) Kalıplara ve büyük kapasiteli preslere gerek yoktur,
b) Ürün boyutları kolayca değiştirilebilir,
c) Kalınlık dağılımı homojen olarak sağlanır,
d) İç gerilmeler önemli bir miktar azalır.

Bunlardan dolayı üretim maliyetleri önemli derecede azalır ve küresel ve küremsi yapı uygulamaları artmaktadır [1].

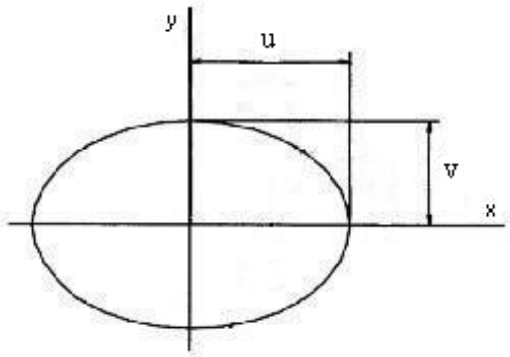
2.3.1. Elipsoidal kabuklar

Elipsoidal (basık) kabuklar, büyük kapasiteleri, düşük rüzgar yükleri ve hoş dış görünüşleri gibi bir çok avantaja sahiptir. Bu sebeple ki elipsoidal kabuklar her geçen zaman artan sayıda uygulamalar bulmaktadır; örneğin, yüksek konumlu su tankları, normal sıcaklıkta buharlaşan sıvıların depolanmasında kullanılan basınçlı kaplar ve özel yapı elemanları gibi. Şekil 2.34.'de 2 düz kutup plakasından ve yanal parçalardan (yapraklardan) oluşan tek yönlü eğimli bir elipsoidal kabuk görülmektedir [25].



Şekil 2.34. Tek yönlü eğimli bir elipsoidal kabuk: a) şekillendirmeden önce b) şekillendirmeden sonra [25]

Elipsoidal kabuklar, küresel kabuklar gibi merkezi simetrik olmadıklarından proses esnasında bir takım zorluklar meydana gelmektedir. Elipsoidal bir kabukta her bir bölge aynı anda plastik deformasyona uğrayamaz (zaman farklılıkları vardır). Ayrıca deformasyonda pekleşme üsteli n'nin de büyük bir etkisi vardır. Deformasyon düz kutup plakalarından başlayarak kademe kademe ekvator bölgesine doğru hareket eder. Bunun sebebi, daha az ön deformasyona uğramış kısmın daha az pekleşmesidir dolayısıyla da daha az bir kuvvete ihtiyaç duyar [26].



Şekil 2.35. Elipsoidal bir kabuğun geometrisi [25]

İç basınca maruz elipsoidal bir kabukta, eksen uzunlukları oranına (λ=u/v) bağlı olarak 3 farklı gerilim hali ortaya çıkmaktadır;

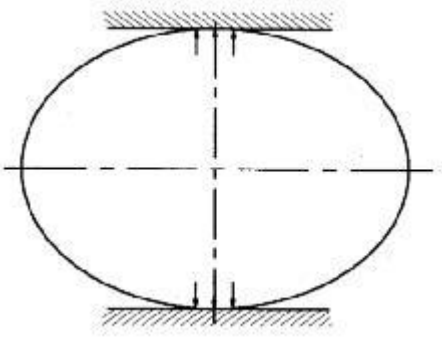
a) $\lambda < \sqrt{2}$, $\sigma_1>0$, $\sigma_2>0$

b) $\lambda = \sqrt{2}$, $\sigma_1>0$, $\sigma_2=0$

c) $\lambda > \sqrt{2}$, $\sigma_1>0$, $\sigma_2<0$

Eğer $\lambda < \sqrt{2}$ ise kabukta bası gerilmeleri oluşmaz, boylamasına gerilim (σ_1) ve çevresel gerilim (σ_2) pozitiftir ve iki eksenli çekme hali meydana gelir. Bu durumda kabuğun şekillendirilmesi kolaydır. Bunun tam tersi durumda ise ($\lambda > \sqrt{2}$) dik eksen boyunca daha fazla deformasyon meydana gelmesinden dolayı çevresel yönde bası gerilmeleri oluşur. Bu da kabuğun ekvatorunda kırışma meydana getirir (kararsızlık hali). Şekil 2.34.'de görülen c noktası içeriye doğru hareket eder. Bunun önlenmesi amacıyla kırışma başladığı anda kutup plakalarının radyal yer değiştirmesi engellenir (Şekil 2.36.).

İstenen elipsoidal kabuğun oluşturulması için dikkat edilmesi gereken bir konuda, şekillendirmeden sonra boyutlardaki değişikliktir; $v>v_0$, $u<u_0$, $\lambda<\lambda_0$ olmaktadır. İlk boyutlar buna göre ayarlanmalıdır.



Şekil 2.36. Kırışmanın önlenmesi amacıyla radyal yönde deformasyonun sınırlandırılması [25]

Elipsoidal kabukların λ değerine bağlı olarak 3 farklı yapı ortaya çıkmaktadır [25];

a) $\lambda>1$, elipsoidal (basık) kabuklar

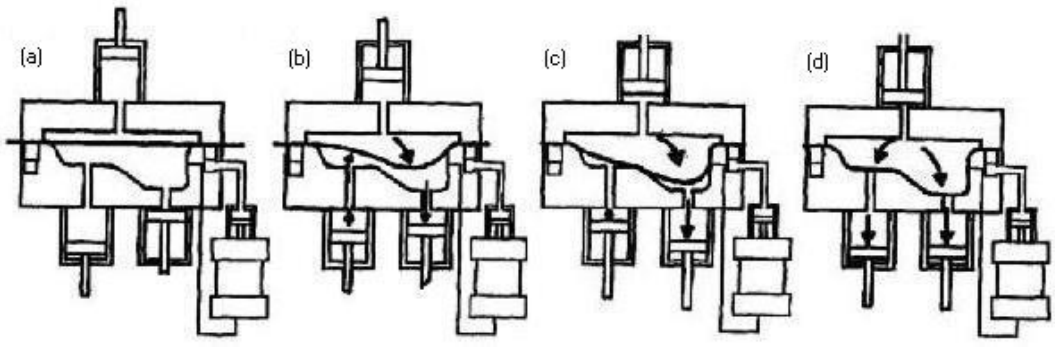
b) $\lambda=1$, küresel kabuklar

c) $\lambda<1$, uzun elipsoidal kabuklar

2.4. Viskoz Basınçlı Şekillendirme, VBŞ (Viscous Pressure Forming, VPF)

VBŞ prosesi yeni bir hidro-şekillendirme prosesidir ve J. Liu, B. Westhoof, M. A. Ahmetoğlu ve T. Altan tarafından geliştirilmiştir [1]. Son yıllarda geliştirilmiş ve henüz ticarileştirilmemiş olan VBŞ, az üretim miktarlarındaki sac parçaların şekillendirilmesine basit ve çok yönlü bir yaklaşım sunmaktadır. VBŞ prosesinde yüksek derecede viskoz olan fakat akabilen yarı katı malzemeler kullanılır ve genelde sacın her iki tarafına da uygulanır. En basit uygulamasında, viskoz malzeme sacın şekil alması için kalıp gravürüne doğru sacın bir tarafından basınçla pompalanır ve diğer taraftan kontrol edilebilir biçimde tek veya çoklu çıkış bölümlerine hareket eder (Şekil 2.37.). Bu yüzden VBŞ, kitlesel şekillendirme (viskoz ortam) ve sac şekillendirme proseslerinin bir kombinasyonundur.

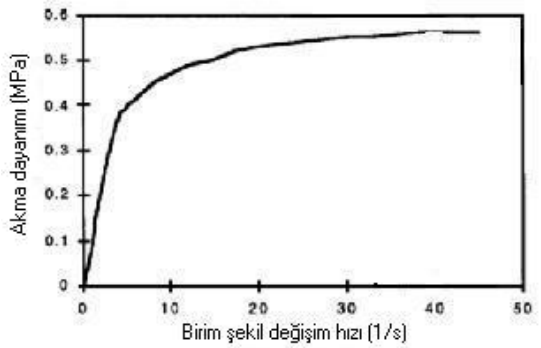
Şekil 2.37.'de prosesin aşamaları görülmektedir. İlk olarak sac, kalıp üzerine yerleştirilir. Kalıp yarıları kapanır ve bastırıcı devreye girer (Şekil 2.37a). Viskoz malzeme sacın her iki tarafına da tatbik edilir ve önceden belirlenmiş bir izostatik basınç düzeyine kadar kalıp doldurulur. Daha sonra sacın üst tarafından ek olarak viskoz malzeme tatbik edilirken çıkış akışını kontrol eden alet aracılığıyla kalıp gravüründeki malzeme geri çekilir. Bu öyle bir tarzda yapılır ki deforme olan sac üzerinde önceden belirlenmiş farklı basınç dağılımları oluşur (Şekil 2.37b). Prosese bastırıcı kuvvetiyle koordinasyon halinde devam edilir ta ki sac malzeme kalıp gravürüne doğru yeterli bir basınçla yönlendirilip kalıp gravürünün şeklini alıncaya kadar (Şekil 2.37c). Kalıp içindeki viskoz malzemenin basıncı düşürülür, kalıp yarıları açılır ve şekillenen parça alınır (Şekil 2.37d).



Şekil 2.37. VBŞ prosesi işlem akışı [27]

Viskoz malzeme oldukça komplike, özellikleri yeterince anlaşılamamış, çok fazlı, polimerik ve birim şekil değişim hızına duyarlı bir malzemedir. VBŞ prosesine yakın şartlar altında, ekstrüzyon deneyleri ve SEY (FEM) simülasyonlarının birlikte kullanılmasıyla viskoz malzemenin akma dayanımı bulunabilmektedir. C-11 viskoz

malzemenin (η=10000PaS) birim şekil değişim hızına bağlı akma dayanımı eğrisi Şekil 2.38.'de görülmektedir.



Şekil 2.38. C-11'in birim şekil değişim hızına bağlı akma dayanımı [27]

Zor şekillendirilen, alüminyum alaşımları, yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik (HSLA), karma malzemeler, titanyum ve nikel alaşımları gibi malzemelerden çekilecek veya gerilecek parçaların düşük veya orta hacimli üretimi VBŞ'nin uygulama alanındadır. Prosesin mevcut özellikleri şunlardır:

a) Tek bir takım yüzeyi işlendiğinden, takım imalatında zaman ve masraftan tasarruf sağlanır.

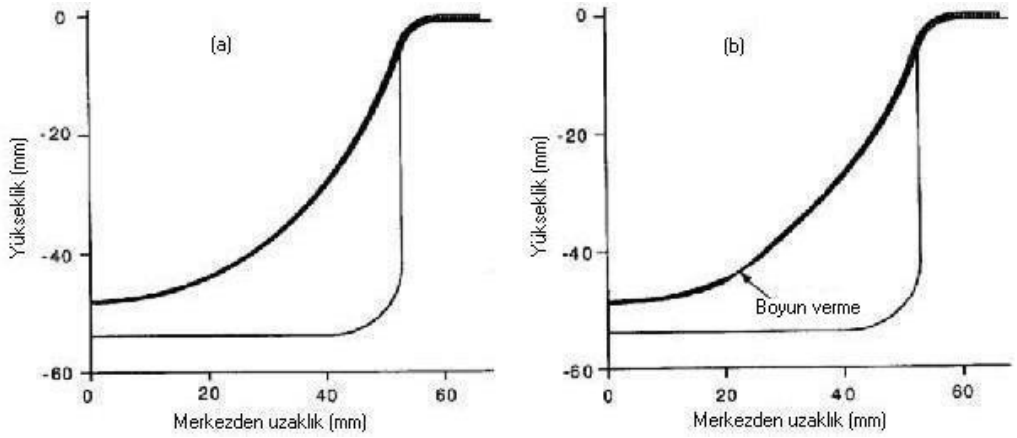
b) Şekillendirme esnasında iş parçası yüzeyi üzerinde oluşan kontrollü basınç dağılımı ile hem sac kalınlığı kontrol edilebilir hem de yerel boyun vermeler ertelenebilir.

c) Hidrostatik şekillendirme basıncı sacın şekillendirilebilirliğini arttırabilir.

Bunlara karşılık, VBŞ prosesi tam olarak ayrıntılarıyla anlaşılamamıştır ve prosesi etkileyen parametreler hakkında (kullanılan malzemenin viskozitesi, çıkış bölümünün yeri, alt taraftaki viskoz malzeme, karşı basınç ve ara yüzey sürtünmesi) çok az bilgi mevcuttur. VBŞ prosesin uygulamalarının artması için proses parametrelerinin, viskoz malzeme akışını ve sacın deformasyonunu nasıl etkilediğinin anlaşılması gerekmektedir. Bu sebeple, VBŞ prosesin SEY simülasyonları yapılarak bu sorulara cevap aranmaktadır. Başarılı bir VBŞ simülasyonu, viskoz malzemenin kitlesel şekillenmesinin, sacın şekillenmesinin ve de bunların arasındaki ara yüzeyin modellenmesini kapsamalıdır [27].

2.4.1. Proses Değişkenleri

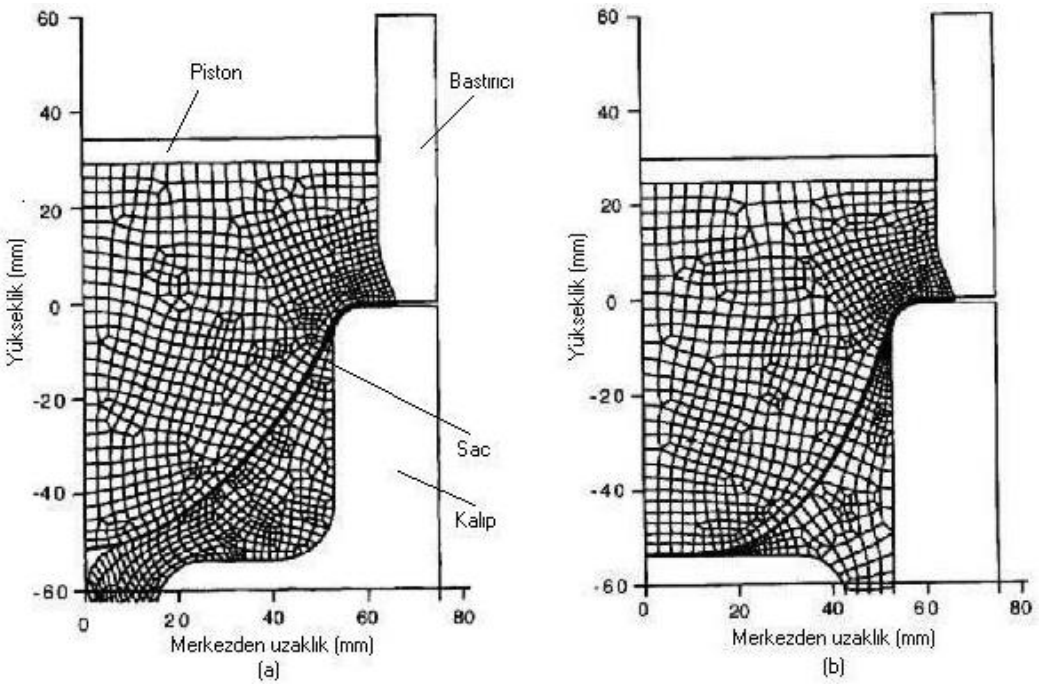
- Viskoz malzemenin özellikleri ve en önemlisi viskozitesi sacın deformasyonunda büyük bir etkiye sahiptir. Eğer daha düşük viskoziteli bir malzeme kullanılırsa sac, hidro-şekillendirme prosesinde olduğu gibi daha homojen gerilmektedir (Şekil 2.39a). Eğer daha yüksek viskoziteli bir malzeme kullanılırsa klasik ıstampa/kalıp eşleşmesinde olduğu gibi sacda yerel boyun vermeler meydana gelmektedir (Şekil 2.39b). Yüksek viskoziteli malzeme şekillendirme esnasında meydana gelen yüksek basınç altında kolayca akamaz.



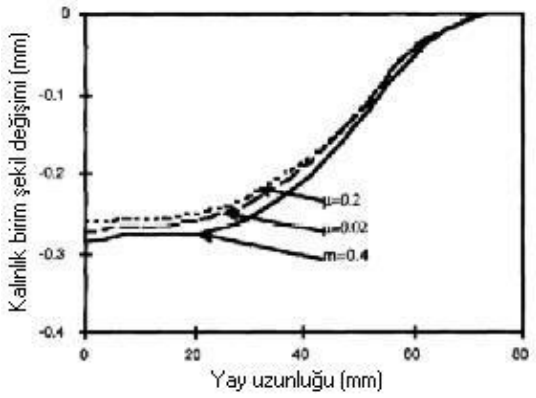
Şekil 2.39. VBŞ germe prosesinde viskozitenin sac deformasyonuna etkisi (viskoz malzeme sacın sadece üst tarafında): a) düsük viskozite (C-21, η=5000PaS) b) yüksek viskozite (C-11, η=10000PaS) [27]

- Viskoz malzeme sacın sadece üst tarafına değil aynı zamanda alt tarafına da koyulduğunda daha üniform bir deformasyon sağlanır. Eğer viskoz malzeme sacın her iki tarafına da tatbik ediliyorsa sac şekillenirken alt kısımdaki viskoz malzemenin dışarı atılabilmesi için kalıpta bir çıkış bölümü gereklidir. Çıkış bölümü kalıbın merkezinde olduğu zaman viskoz malzeme kalıp köşesi civarında sıkışır (Şekil 2.40a). Çıkış bölümü kalıbın köşesinde olduğu zaman ise viskoz malzeme kalıp alt yüzeyi ile sac arasında dar bir boşlukta sıkışır. Böylece sac, kalıp yüzeyiyle tamamen temas edemez. Bu dar bölgede sıkışan malzeme bir yağlayıcı gibi davranarak sacın daha kolay gerilmesini sağlar (Şekil 2.40b).

- VBŞ ile germede sac/viskoz malzeme ara yüzeyindeki sürtünme, sacın deformasyonunu etkiler. Eğer bu ara yüzeyde sürtünme fazla olursa sacdaki kalınlık azalması az olur (Şekil 2.41.). VBŞ proseste sac/viskoz malzeme ara yüzeyinde bir çekilme vardır ve ara yüzeydeki sürtünmenin artmasıyla bu çekilme artar. Ancak, farklılıklar küçüktür.



Şekil 2.40. VBŞ germe prosesinde, sacın ve viskoz malzemenin deformasyonu (C-11, sacın her iki tarafında): a) çıkış bölümü kalıbın merkezinde b) çıkış bölümü kalıbın köşesinde [27]

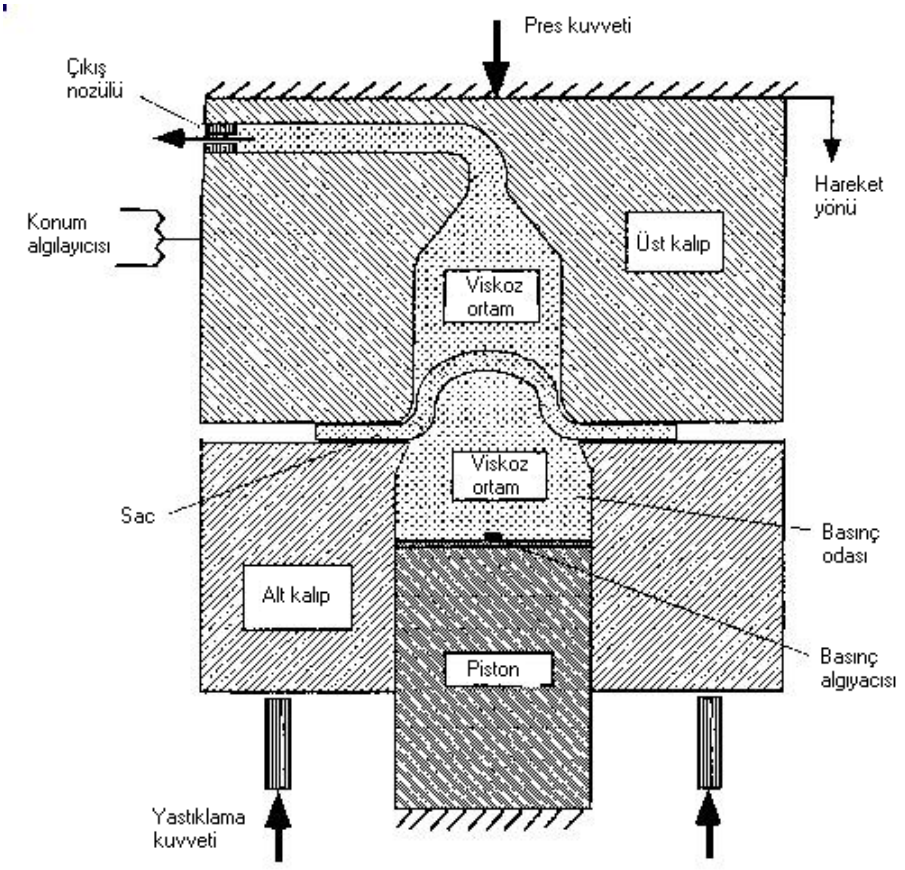


Şekil 2.41. VBŞ germe prosesinde, sac/viskoz ortam ara yüzeyindeki farklı sürtünme koşullarına göre sacın kalınlığındaki birim şekil değişimi dağılımı [27]

- Viskoz malzemenin kullanılmasıyla sacın alt ve üst yüzeyinde oluşturulabilen basınç farklılıkları, sacın istenen tarzda şekillenmesini kontrol ve optimize etmek için kullanılabilir [27].

2.4.2. VBŞ Dome Deneyi

VBŞ proses ile gerilen sacın şekillendirilebilirliğinin saptanabilmesi ve klasik yöntemle (rijid kalıp/ıstampa) karşılaştırılabilmesi için bir VBŞ Dome deney takım seti (Şekil 2.42.) yapılmıştır. Viskoz malzeme hem alt hem de üst kalıp gravürlerine doldurulur. Yastıklama pimlerinden sağlanan yastıklama (bastırıcı) kuvveti ile sac metal alt ve üst kalıp yarıları arasına sıkıştırılır. Böylece, sacın çekilmesine değil sadece gerilmesine izin verilir. Koç aşağı doğru hareket ederken, piston alt kalıp gravürü içindeki viskoz malzemeyi yukarı doğru iter ve viskoz malzeme içinde bir basınç oluşur. Bu basınç, sacın alt yüzeyine etkir ve sacı gerer. Bu sırada üst kalıp gravürü içindeki viskoz malzeme sıkışır ve sacın üst yüzeyinde karşı bir basınç oluşturur. Bu karşı basınç değeri çıkış memesi yardımıyla kontrol edilebilir. Şekillendirmenin sona ermesiyle koç yukarı doğru hareket eder ve sac parça üst kalıptan çıkarılır [28].



Şekil 2.42. VBŞ Dome deney takım seti [28]

2.4.2.1. Kritik Hasar Değeri Kullanılarak Şekillendirilebilirliğin Saptanması

Genel olarak sünek kırılma kriteri aşağıdaki fonksiyonel formda ifade edilebilmektedir.

$$\int F\left(deformasyo\quad n\ geçmişi\quad\right)d\bar{\varepsilon} = C \tag{2.2}$$

İş parçasındaki maksimum hasar değeri kritik hasar değerini aşınca sünek kırılma meydana gelir. Homojen bir malzeme için kritik hasar değeri, akma dayanımı veya çekme dayanımı gibi bir malzeme sabiti olarak değerlendirilebilir. Birkaç integral tipinde kırılma kriteri önerilmesine rağmen deney ve sonlu eleman analizleri göstermiştir ki; çeşitli soğuk dövme proseslerinde sünek kırılmayı tahmin etmekte Cockraft ve Latham'ın kriteri kullanılabilir (2.3). Ayrıca, integrale hiçbir malzeme sabiti dahil olmadığından pratik uygulamalar için en iyi seçimdir [28].

$$\int \left(\sigma^{*} / \bar{\sigma}\right)d\bar{\varepsilon} = C \tag{2.3}$$

(2.3)'de ki formülasyona göre hasar değeri dağılımı efektif birim şekil değişimi dağılımına çok benzerdir. Bu yüzden hasar değeri yeni bir parametre olarak sac şekillendirme operasyonlarında sacdaki hasarı tahmin etmek için kullanılabilir [27, 28].

Sac metallerin kritik hasar değeri, VBŞ Dome deneyleri ve SEY simulasyonları ile beraber belirlenebilmektedir (Şekil 2.43.).

a) VBŞ Dome deneylerinin yapılarak, hasar anında bombe yüksekliğinin ölçülmesi (h_f),

b) VBŞ Dome deneylerinin SEY simülasyonları yapılarak, parçadaki hasar değerlerinin dağılımının elde edilmesi,

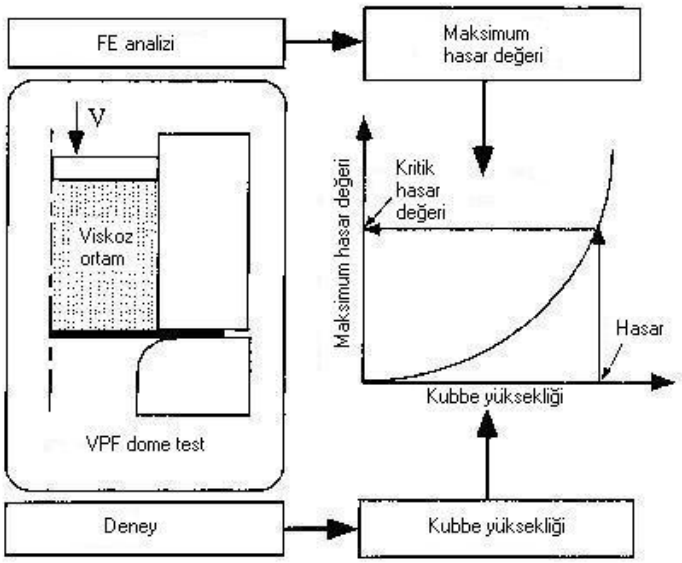
c) VBŞ Dome deneyi ile SEY simülasyonundaki bombe yüksekliğinin karşılaştırılması.

Parçadaki h_f yüksekliğindeki hasar değeri test edilen malzemenin kritik hasar değeridir [28].

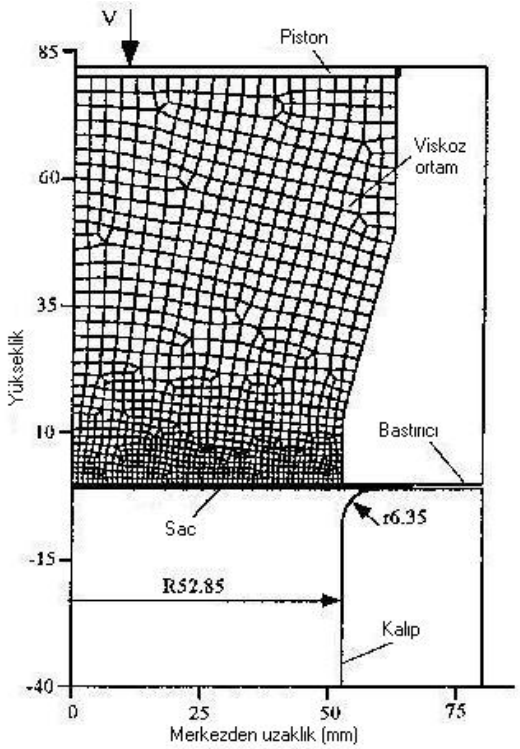
2.4.2.2. VBŞ ile Sac Şekillendirilebilirliğin Gelişmesi

VBŞ Dome deneyi ile yarı küresel ıstampa ile yapılan dome deneyin karşılaştırılabilmesi için, VBŞ deneylerinde ve simülasyonlarında viskoz malzeme sadece üst kalıp gravürüne doldurulur. Alt kalıp boştur (Şekil 2.44.). Simülasyon ve

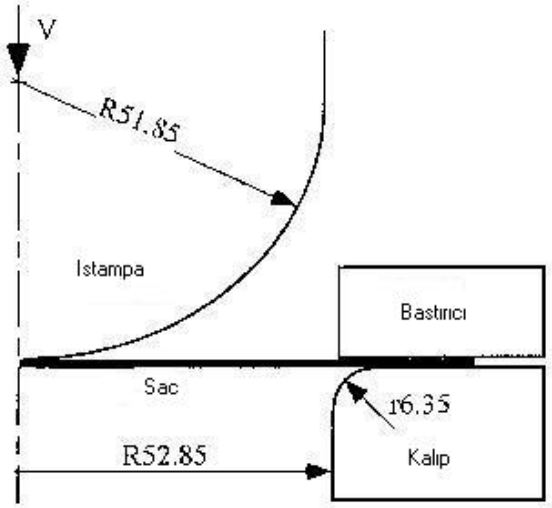
deneylerde C-11 viskoz malzeme kullanılmıştır. Yarı küresel rijit ıstampa kullanılarak yapılan Dome deneyin geometrisi Şekil 2.45.'da görülmektedir.



Şekil 2.43. Kritik hasar değerinin saptanabilmesi için önerilen prosedür [28]

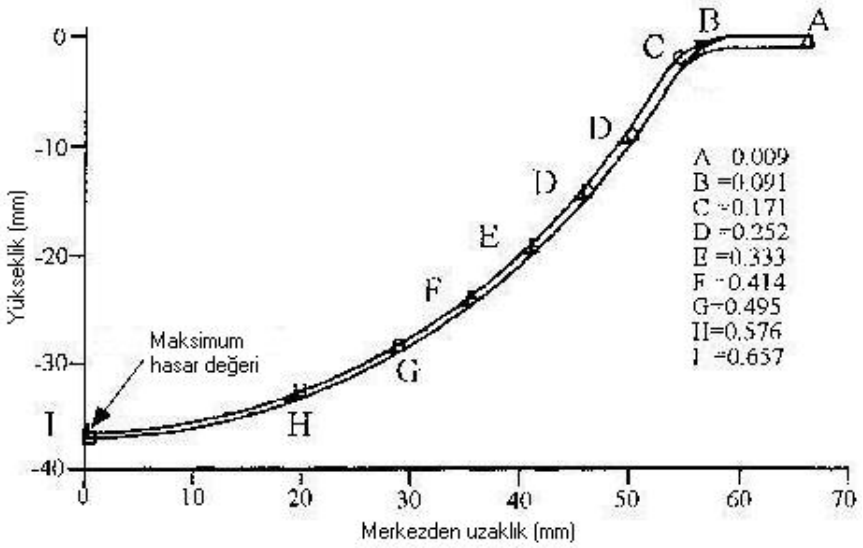


Şekil 2.44. VBŞ Dome deneyin SEY modeli [28]

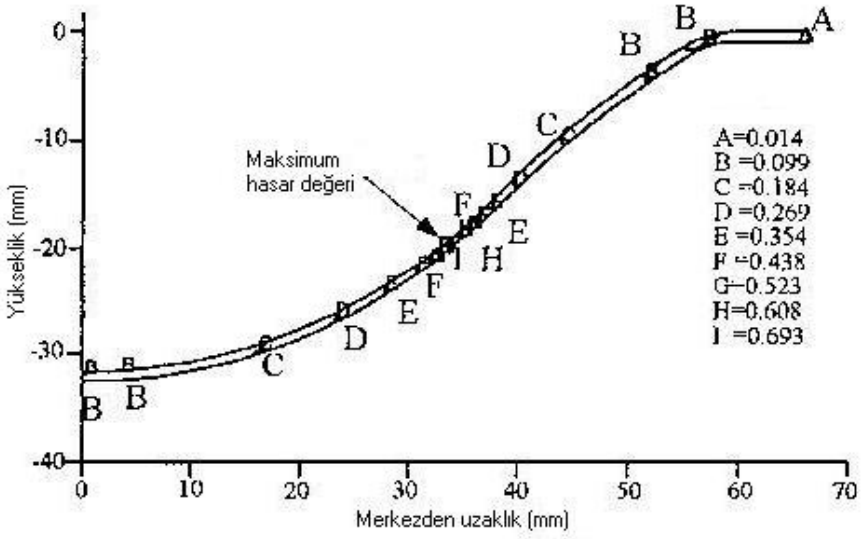


Şekil 2.45. Yarı küresel ıstampa ile yapılan Dome deneyin geometrisi [28]

Örnek olarak Şekil 2.46.'da viskoz malzeme kullanılarak gerilen parçadaki tahmini hasar değerleri dağılımı verilmektedir. Bu örneğe ait VBŞ deneyinde kırılma anındaki kubbe yüksekliği 37 mm'dir. Maksimum hasar değeri 0,657'dir ve kubbenin merkezindedir. Bu maksimum hasar değeri Al 6111-T4 ($\overline{\sigma} = 533\,\overline{\varepsilon}^{0,238}$ Mpa, t=1 mm) sac malzemesi için kritik hasar değeridir. Sac kalınlığı çevreden kubbe merkezine doğru üniform olarak azalır ve maksimum incelme kubbe merkezinde olur. Yarı küresel ıstampa ile yapılan germede tahmini hasar değeri dağılımı Şekil 2.47.'de görülmektedir ve 32,6 mm bombe yüksekliği elde edilmiştir. Maksimum hasar değeri 0,693'dür ve merkezden 35 mm uzaklıktadır ki burası aynı zamanda sacda en çok incelmenin meydana geldiği yerdir. Maksimum hasar değeri kritik hasar değerinden (0,657) büyüktür. Bu yüzden burada stampa 32,6 mm'ye gelmeden kırılmanın olacağı tahmin edilir. Kritik hasar değerine dayalı olarak, VBŞ ile gerilen sacın şekillendirilebilirliği, rijit yarı küresel ıstampa ile gerilen sacdan daha yüksek olduğu görülmektedir. VBŞ proseste sac/viskoz malzeme ara yüzeyindeki sürtünme etkileri azdır. Sonuç olarak, sac daha üniform gerilir ve daha iyi bir şekillendirilebilirlik sağlanır [28].



Şekil 2.46. Viskoz malzeme kullanılarak gerilen parçadaki tahmini hasar değerleri dağılımı, m=0,2 (sac/viskoz ortam ara yüzeyi), μ=0,09 (sac/kalıp ara yüzeyi) [28]



Şekil 2.47. Yarı küresel ıstampa ile yapılan germede tahmini hasar değeri dağılımı, m=0,15 (sac/ıstampa ve sac/kalıp ara yüzeyi) [28]

6. GENEL SONUÇLAR

7114, 6114 ve 1110 Erdemir kalite kodlu saclar ile malzemelerin değişik mekanik özelliklere sahip olması durumunda sac hidrolik şekillendirmede, şekillendirilebilirliğin nasıl değiştiğini gözlemlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmaların sonunda şu sonuçlar elde edilmiştir.

1) Bütün malzemelerin ısıl işlem neticesinde mekanik özellikleri ve iç yapıları değişmiştir. 1000 ^{0}C'de bekleme süresin artışı ile malzemelerin ortalama tane büyüklükleri artmıştır. 7114 ve 6114 kalite saclar imalat tarihlerinden uzun bir süre geçmesine rağmen belirgin akma göstermemiştir. Bu malzemelerin tavlı halleri ve diğer 1110 kalite sacın tüm halleri belirgin akma göstermiştir. 7114 ve 6114 sac malzemelerde ısıl işlem neticesinde kopma uzamalarında büyük düşüşler olmuştur. 1110 sac malzemelerde ise ısıl işlem neticesinde üniform ve kopma uzamaları büyük miktarlarda etkilenmeyip tavsız hallerine göre yüksek veya düşük değişik değerler almıştır.

2) Hidrolik şişirme deneyleri neticesinde tüm numunelerin hasar bölgesinde eş eksenli çekmeye yakın şartlar oluşmuştur ($\varepsilon_1 \cong \varepsilon_2$).

3) Malzeme değişkenlerine bağlı olarak (n, $\varepsilon_{ün}$ (%), δ (%) ve d_t) bu çalışmada incelenen aralıklar neticesinde kopma uzamasındaki artış (δ (%)) sınır birim şekil değişimlerini belirgin olarak arttırdığı görülmüştür.

4) Pekleşme üsteli (n) ısıl işlem neticesinde bütün malzemelerde artmıştır. Fakat bu çalışmada incelenen pekleşme üstelinin değişim aralığının sınır birim şekil değişimleri üzerinde etkisi açıkça görülememiştir.

5) Sac kalınlığının artmasıyla sınır şekil değişimlerinin arttığı açıkça görülmüştür ve buna paralel olarak da hem şişme yüksekliklerinin arttığı hem de şekillenme profillerinin daha fazla şiştiği anlaşılmıştır.

6) Hidrolik şişirme deneyleri neticesinde şekillenen parçaların, asal eksenleri aynı, dik eksenleri (şişme yükseklikleri) farklı olan kesik elipsoidler biçimini aldığı büyük bir yaklaşımla bulunmuştur.

7) Hasar basınçları orantılı olarak sac kalınlıklarının artmasıyla yükselmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Zhang, S.H.**, 1999. Developments in hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology,* **91**, 236-244.

[2] **Zhang, S.H. and Danckert, J.**, 1998. Development of hydro-mechanical deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology,* **83**, 14-25.

[3] **Nakamura, K. and Nakagawa, T.**, 1987. Sheet metal forming with hydraulic counter pressure in Japan, *Annals of the CIRP*, **36**, 191-194.

[4] **Larsen, B.**, 1977. Hydromechanic forming of sheet metal, *Sheet Metal Industries*, **Feb**, 162-166.

[5] **Yossifon, S. and Tirosh, J.**, 1990. The maximum drawing ratio in hydroforming processes, *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, **112**, 47-56.

[6] **Yossifon, S. and Tirosh, J.**, 1985. Buckling prevention by lateral fluid pressure in deep-drawing, *Int. J. Mech. Sci.*, **27**, 177-185

[7] **Tirosh, J. and Konvalina, P.**, 1985. On the hydrodynamic deep-drawing process, *Int. J. Mech. Sci.*, **27**, 595-607.

[8] **Shirizly, A., Yossifon, S. and Tirosh, J.**, 1994. The role of die curvature in the performance of deep drwaing (hydro-mechanical) processes, *Int. J. Mech. Sci.*, **36,** 121-135.

[9] **Yossifon, S. and Tirosh, J.**, 1985. Rupture instability in hydroforming deep-drawing process, *Int. J. Mech. Sci.*, **27,** 559-570.

[10] **Nakagawa, T., Nakamura, K., and Amino, H.**, 1997. Various applications of hydraulic counter-pressure deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology,* **71**, 160-167.

[11] **Schuler GmbH**, 1998. Metal Forming Handbook, Springer-Verlag, Berlin ; New York.

[12] **Yurci, M.E.,** 1997. Kalıp İmal Tekniği, Y.T.Ü. Basım – Yayın Merkezi, İstanbul.

[13] **Dieter, G.E.,** 1984. Workability Testing Techniques, Metals Park, Ohio.

[14] **Tirosh, J., Shirizly, A., Ben-David, D. and Stanger, S.**, 2000. Hydro-rim deep drawing processes of hardening and rate-sensitive materials, *International Journal of Mechanical Sciences,* **42**, 1049-1067.

[15] **Buerk, E.**, 1967. Hydromechanical drawing, *Sheet Metal Industries,* **March**, 182-188.

[16] **Çapan, L.,** 1990. Metallere Plastik Şekil Verme, 2. Baskı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

[17] **Tirosh, J., Iddan, D. and Silviano, M.**, 1992. Hydrostatic ironing-analysis and experiments, *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, **114**, 237-243

[18] **Yossifon, S., Tirosh, J. and Kochavi, E.**, 1984. On suppression of plastic buckling in hydroforming processes, *Int. J. Mech. Sci.*, **26**, 389-402.

[19] **Tirosh, J.**, **Yossifon, S., Eshel, R. and Betser, A.A.**, 1977. Hydroforming process for uniform wall thickness products, *Trans. ASME Journal of Engineering for Industry*, **August**, 685-691.

[20] **Hsu, T.C. and Hsieh, S.J.**, 1996. Theoretical and experimental analysis of failure for the hemisphere punch hydroforming processes, *Trans. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **118**, 434-438

[21] **Dohmann, F., and Hartl, Ch.**, 1997. Tube hydroforming – research and practical application, *Journal of Materials Processing Technology*, **71**, 174-186

[22] **Siegert, K., Haussermann, M., Lösh, B. and Rieger, R.**, 2000. Recent developments in hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, **98**, 251-258

[23] **ZHang, S.H., Wang, B.L., Shang, Y.L., Kong, X.R., Hu, J.D. and Wang, Z.R.**, 1996. Three-dimensional finite element simulation of the integral hydrobulge forming of a spherical LPG tank, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, **65**, 47-52.

[24] **Zhang, S.H., Danckert, J. and Nielsen, K.B.**, 1999. Integral hydro-bulge forming of pressure vessel heads, *Journal of Materials Processing Technology*, **86**, 184-189.

[25] **Yuansong, Z., Shijian, Y., Fengzhi, W. and Wang, Z.R.**, 1997. Research on the integral hydrobulge forming of ellipsoidal shells, *Journal of Materials Processing Technology*, **72**, 28-31.

[26] **Zhang, S.H., Zeng, Y.S. and Wang, Z.R.**, 1996. Theoretical analysis and experimental research into the integral hydro-bulge forming of oblate shells, *Journal of Materials Processing Technology*, **62**, 199-205.

[27] **Liu, J., Westhoff, B., Ahmetoğlu, M.A. and Altan, T.**, 1996. Application of viscous pressure forming (VPF) to low volume stamping of difficult-to-form alloys – results of preliminary FEM simulations, *Journal of Materials Processing Technology*, **59**, 49-58.

[28] **Liu, J., Ahmetoğlu, M.A. and Altan, T.**, 2000. Evaluation of sheet metal formability, viscous pressure forming (VPF) dome test, *Journal of Materials Processing Technology*, **98**, 1-6.

[29] **ASM Metals Handbook,** 1985. Metallography and microstructures, 9th Edition, Vol. 9, Metals Park, Ohio.

[30] **Annual Book of ASTM Standarts ,** 1998, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, **57-77**

[31] **Mielnik, E.M.,** 1991. Metalworking Science and Engineering, McGraw Hill.

[32] **Şahin, S.,** 2002. Tüp Hidrolik Şekillendirmede Malzeme Özelliklerinin Şekillendirmeye Etkisi, İ.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi,.

[33] **Hosford, W.F. and Caddell, R.M.,** 1993. Metal Forming, Mechanics and Metallurgy, Prentice-Hall.

[34] **Lange, K.,** 1985. Handbook of Metal Forming, McGraw Hill, New York.

7. KONU ÜZERİNDE İLERİDE YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR

1) Bu çalışmada, dairesel profilli dişi kalıp kullanılarak kesik elipsoidlere benzer parçalar elde edilmiştir. Eğer dişi kalıpta yükseklik sınırlandırması yapılırsa, kap şeklinde parçalar elde edilebilir. Farklı kalınlıkta ve farklı malzemeler kullanılarak kap yüksekliğinin nasıl değiştiği incelenebilir.

2) Dairesel profilli dişi kalıp yerine farklı profillerde kalıplar kullanılarak örneğin, kare, üçgen vs., sac hidrolik şekillendirmede daha farklı ε_1, ε_2 kombinasyonları elde edilebilir.

3) Sac hidrolik şekillendirmede farklı akışkanlar veya emülsiyonlar kullanılarak şekillendirilebilirliğin nasıl etkilendiği araştırılabilir.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul'da doğan Burak Çelik, 1994'de Etiler Lisesi'ni bitirdi. 1999 yılında Y.T.Ü. Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1999 yılında girdiği İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde imalat programında yüksek lisans öğrenimi görmektedir.