

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALIŞILMIŞ VE HİDROLİK ŞEKİLLENDİRME  
YÖNTEMLERİ İLE İMAL EDİLEN SAC PARÇALAR  
İÇİN TASARIM İLKELERİ

93726

Mak.Müh. Serhat KAYA

F.B.E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Mehmet Emin YURCI

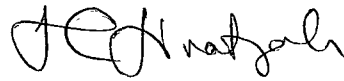
İSTANBUL, 2000

Prof. Dr. A. D. D. D.





Prof. M. Emin YURCI



Yrd. Doc. Dr. Haydar Livatjahi  
İTÜ Makina Fakültesi

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ .....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ - BASMA/DERİN ÇEKME PROSESİ .....	1
1.1 Prosesin Tanımı .....	1
1.2 Çekme Deneyi.....	4
1.3 Basma/Derin Çekme Prosesleri İçin Bazı Tasarım Kuralları .....	6
2. HİDROLİK BORU ŞEKİLLENDİRME .....	15
2.1 Giriş.....	15
2.2 Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesinin Temelleri .....	16
2.3 Hidrolik Boru Şekillendirmede Basınç ve Kuvvetler .....	17
2.4 Hidrolik Boru Şekillendirme Kalıpları .....	18
2.5 Yöntemin Kısıtlamaları.....	18
2.5.1 İncelme.....	18
2.5.2 Buruşma .....	19
2.5.3 Yırtılma .....	19
2.6 Silindirik İçi Boş Parçaların Malzeme Özelliklerine Duyulan İhtiyaç .....	19
2.7 Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesi İçin Malzeme Testinin Avantajları.....	21
3. AMAÇLAR VE YAKLAŞIM .....	22
3.1 Amaçlar.....	22
4. SİLİNDİRİK İÇİ BOŞ PARÇALARIN AKMA ÖZELLİKLERİNİ TESPİT METODU .....	24
4.1 Analitik Teknik .....	24
4.1.1 Ön gerinimin tespiti ( $\epsilon_0$ ).....	24
4.1.2 Efektif gerilme ve efektif gerinimin belirlenmesi.....	25
5. ŞİŞİK BÖLGESİNDEKİ MİNİMUM KALINLIĞIN HESAPLANMASI.....	28
5.1 Metot .....	28
5.2 Analitik Olarak Hesaplanan Kalınlık Değerlerinin Deneysel Sonuçlardan Elde Edilen Kalınlık Değerleri ile Karşılaştırılması.....	30
6. GALVANİZLENMİŞ DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK (1008) İLE	

GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSEL ÇALIŞMA .....	33
6.1 Düşük Karbonlu Çelik (AISI) 1008 .....	33
6.2 Deneysel Sonuçlar .....	33
6.2.1 Akma ve yırtılma basınçlarının hesaplanması .....	33
6.2.2 Düşük karbonlu çelik için yapılan deneylerin sonuçları .....	34
6.3 Analiz .....	35
6.3.1 Analitik model .....	35
6.4 Çekme Deneyi ile Hidrolik Boru Şişirme Testinin Mukayesesi .....	37
7. HİDROLİK BORU ŞEKİLLENDİRME TASARIM İLKELERİ .....	39
8. HİDROLİK BORU ŞEKİLLENDİRMENİN BASMA/DERİN ÇEKME YÖNTEMLERİNE GÖRE AVANTAJLARI .....	44
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	47
9.1 Sonuçlar .....	47
9.2 Öneriler .....	48
KAYNAKLAR .....	49
EKLER .....	56
Ek A İç Basınç, Teğetsel Gerilme ve Eksenel Gerilme Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi .....	57
EK B Eksenel Yöndeki Yarıçapın Hesaplanması .....	62
EK C Şişik Bölgesinin Üst Noktasındaki Eksenel Gerilmenin Tespiti .....	65
EK D Plastisite Teorisinin Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesine Uygulanması .....	67
ÖZGEÇMİŞ .....	69

## SİMGE LİSTESİ

$\epsilon_{\phi}$	Eksenel gerinim
$\epsilon_{\theta}$	Teğetsel gerinim
$\epsilon_t$	Kalınlık gerinimi
$l_i$	Birim boru uzunluğu
$l_o$	Boru uzunluğu
W	Şişik genişliği
$t_i$	Birim boru kalınlığı
$t_o$	Boru kalınlığı
$R_e$	Kalıp köşe yarıçapı
$r_i$	Birim boru yarıçapı
$r_o$	Boru yarıçapı
$\bar{\sigma}$	Akma gerilmesi
$\epsilon_o$	Ön gerinim
$\bar{\epsilon}$	Efektif gerinim
K	Malzeme dayanım katsayısı
n	Pekleşme üsteli
$P_i$	İç basınç
$\sigma_{\theta}$	Teğetsel gerilme
$\sigma_{\phi}$	Eksenel gerilme
$r_{\theta}$	Şişik bölgesindeki çevresel birim yarıçap
$r_{\phi}$	Şişik bölgesindeki aksenal birim yarıçap
h	Şişik yüksekliği
S	Mühendislik gerilmesi
e	Mühendislik gerinimi
%thinning	% incelme

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Silindirik Kap Derin Çekme İşlemi.....	1
Şekil 1.2	Tutucu Kuvvetinin Parça Derinliğine Olan Etkisi (Altan, 1992).....	2
Şekil 1.3	Tutucu Kullanılarak Yapılan Silindirik Parça Derin Çekme İşlemi.....	3
Şekil 1.4	Aksisimetrik Derin Çekmede Gerilme Dağılımı (Lange, 1985) .....	4
Şekil 1.5	Çekme Deneyi (Altan, 1983).....	5
Şekil 1.6	Düşük Karbonlu Çelik (AISI 1008) için Çekme Deneyinden Elde Edilmiş Akma Gerilme Eğrisi.....	6
Şekil 1.7	Minimum Bükme Yarıçapı - % Kesit Daralması Eğrisi (Kalpakjian,1991) .....	7
Şekil 1.8	Bükme Bölgesindeki Çatlama .....	7
Şekil 1.9	Parça Çekme Derinliğinin Şematik Olarak Gösterilişi (Pool,G., 1997).....	8
Şekil 1.10	Köşe Yarıçaplarının Şematik Olarak Gösterimi (Pool,G., 1997).....	9
Şekil 1.11	Basma İşleminde Parça Dış Duvar Cıdarı (Pool,G., 1997) .....	10
Şekil 1.12	Basma Prosesinde Parça İç Cebi (Pool,G., 1997) .....	11
Şekil 1.13	Basma Prosesinde Parça İç Cebi (Geniş) (Pool,G., 1997) .....	12
Şekil 1.14	Kalıp Yüzeyi Derinlik Açısı (Pool.G., 1997).....	13
Şekil 2.1	T-Şekline Sahip Parçaların Hidrolik Şekillendirme İşlemi.....	15
Şekil 2.2	Eksenel Kuvvet ile Basarak Şekillendirme .....	16
Şekil 2.3	İç Basıncın Arttırılması ile Şişirerek Şekillendirme.....	16
Şekil 2.4	Eksenel Kuvvet ve İç Basınç.....	17
Şekil 2.5	Prosesine ait Kuvvetlerin Gösterilmesi .....	17
Şekil 2.6	Boyuna Ayrılmış Kalıp .....	18
Şekil 2.7	Enine Ayrılmış Kalıp.....	18
Şekil 2.8	Yırtılmış Boru.....	19
Şekil 2.9	Tek Eksenli Gerilme Durumu Olan Çekme Deneyi ve İki Eksenli Gerilme Durumu Olan Hidrolik Boru Şişirme Testi .....	20
Şekil 4.1	Deformasyona Uğramış Boru Geometrisi ( $r_1 = r_0$ ) .....	26
Şekil 4.2	Hidrolik Boru Şekillendirmede Bulunan Gerilmeler .....	26
Şekil 5.1	Şişik Tepesindeki Kalınlık Değerinin Deneysel Sonuçlar ve Analitik Yöntem Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	31
Şekil 5.2	Şişik Tepesindeki Kalınlık Değerinin Deneysel Sonuçlar ve Analitik Yöntem Sonuçları ile Karşılaştırılması .....	32
Şekil 6.1	Düşük Karbonlu Çelik Malzemeler İçin Krupkowsky Kanununa ( $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$ ) Uygun, En Küçük Kareler Metodu Kullanılarak Elde Edilmiş Akma Gerilme Eğrisi.....	37
Şekil 6.2	Çekme Deneyinden Elde Edilen Akma Eğrisi ile Hidrolik Boru Şişirme Testinden Elde Edilen Akma Eğrisi .....	38
Şekil 7.1	Boru Çapı – Boru Bükme Yarıçapı .....	39
Şekil 7.2	Boru Köşe Yarıçapının Kalıp İçinde Şematik Gösterilişi .....	40
Şekil 7.3	Boru Köşe Yarıçapı Kuralına Bağlı Kalınarak İmal Edilebilen Boru Parçaların Kesitleri .....	40
Şekil 7.4	Bükme Yarıçapı Artımı ile Elde Edilen Şişik Yüksekliği Azalması.....	41
Şekil 7.5	Kalıp İçindeki Borunun Herhangi bir Yerindeki Minimum Yarıçap .....	42
Şekil 7.6	İç Basınç – Min.Yarıçap/ Boru Kalınlık Eğrisi (Schafer Company, 1996) .....	42
Şekil 8.1	Otomobilde Kullanılan Hidrolik Boru Şekillendirme Yöntemi ile İmal Edilmiş Parçalar (Variform, 1999) .....	44

Şekil 8.2	Radyatör Destek Parçası (Variform, 1999) .....	45
Şekil 8.3	Radyatör Alt Destek Parçası (Variform, 1999) .....	45



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Parça Çekme Derinliği İçin Değerler .....	8
Çizelge 1.2	Köşe Yarıçapı İçin Tavsiye Edilen Sayısal Değerler .....	9
Çizelge 1.3	Duvar Açısı, Duvar Yüksekliği ve Yarıçap için Değerler .....	10
Çizelge 1.4	Duvar Açısı, Minimum Yarıçap, Cep Derinliği ve Cep Genişliği İçin Önerilen Tasarım İlkeleri .....	11
Çizelge 1.5	Cep İçinde Müsaade Edilen Gerilme Miktarı Limitleri .....	12
Çizelge 1.6	Tavsiye Edilen Açı Değerleri.....	13
Çizelge 1.7	Aluminyum ve Çelik İçin Tavsiye Edilen Kalıp Ağız Yarıçapları .....	14
Çizelge 1.8	Istampa Köşe Yarıçapı için Tavsiye Edilen Değerler .....	14
Çizelge 3.1	Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemenin Türü ve Geometrik Özellikleri .....	23
Çizelge 6.1	Düşük Karbonlu Çelik İçin Geometri ve Malzeme Özellikleri.....	33
	Hollomon Kanunu ( $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ) (Kaynak: LTV Steel, USA, 1999).....	33
Çizelge 6.2	Düşük Karbonlu Çelik İçin Yırtılma Basıncı ve Akma Basıncının Analitik Olarak Belirlenmesi Sonucu Elde Edilen Değerler .....	34
Çizelge 6.3	Deneysel Çalışma Sonucu Elde Edilen Şişik Yükseklikleri ve Analitik Olarak Hesaplanan Boru Kalınlık Değeri $D_0 = 2.25$ in (57.15 mm), $L_0 = 8$ in (203.2 mm), $t_0 = 0.080$ in (2.042 mm).....	35
Çizelge 6.4	Her bir Basınç Değeri İçin Hesaplanan Efektif Gerilme ve Efektif Gerinim Değerleri.....	36
Çizelge 6.5	Düşük Karbonlu Çelik Malzemeler İçin Krupkowsky Kanununa ( $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$ ) Uygun Akma Gerilme Verileri .....	36
Çizelge 8.1	Proseslerin Parça Sayısı, Ağırlık ve Maliyetler Yönünden Karşılaştırılması ( <a href="http://www.hydroforming.net">www.hydroforming.net</a> , 2000) .....	46

## ÖNSÖZ

Alışılmış ve hidrolik şekillendirme yöntemleri ile imal edilen sac parçalar için tasarım ilkeleri başlıklı bu tez çalışması Amerika'da bulunan Ohio State Üniversitesi bünyesindeki Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM) de gerçekleştirilmiştir.

Burada bulunamadığım süre içerisinde her türlü konuda fikir danıştığım Arş.Gör. İbrahim ŞAHİN, Arş.Gör. Anıl NOMAK'a yardımlarını esirgemedikleri için en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimimden bugüne dek süregelen ve Amerika'da bulunduğum iki yıllık süre zarfında da tez danışmanım olarak tezim ile ilgili her noktayı danıştığım ve tavsiyeleri doğrultusunda hareket ettiğim hocam Sayın Prof. M.Emin YURCİ'ye teşekkür ediyorum.

Tez jürimde bulunarak değerli katkı ve tavsiyelerini esirgemeyen Sayın Prof.Dr.Ahmet Ulvi AVCI ve Sayın Yrd.Doç.Dr.Haydar LİVATYALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Amerika'da tez yapmış olmanın ve bunun üniversitemizdeki ilk örneğin olması açısından yaşadığım küçük zorluklarda her zaman desteklerini ve tavsiyelerini esirgemeyen Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü Sayın Prof.Dr.Hüseyin DEMİREL'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İki yıl önce beni ERC/NSM'e kabul ederek çalışma imkanı sağlayan, Sac ve Hidrolik Boru Şekillendirme konularındaki bilgilerini ve tecrübelerini bana aktaran ERC/NSM'in değerli direktörü ve hocam Sayın Prof.Dr.Taylan ALTAN'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak ise halen Amerika'da The Ohio State Üniversitesi, Ekonomi bölümünde doktorasını yapan kardeşim Neslihan KAYA'ya, Ankara'da lise eğitimine devam eden kardeşim Ferhat KAYA'ya, halen Ankara'da yaşayan babam Ahmet KAYA ve annem Neriman KAYA'ya maddi ve manevi desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum ve böylesine bir destekten yoksun olarak böyle bir çalışmanın ortaya çıkmasının imkansızlığını vurgulamak istiyorum.

Mak. Müh. Serhat KAYA  
Haziran, 2000

## ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte enerji tasarrufu ve maliyetlerin düşürülmesi doğal kaynaklardaki sınırlamalar sonucu özellikle son yıllarda oldukça konuşulup tartışılan iki unsurdur. Yakın zamanlarda üzerinde araştırmalara başlanan Hidrolik Boru Şekillendirme yöntemi, alışılmış sac şekillendirme yöntemleri olan basma ve derin çekme yöntemlerine nazaran imalat zamanının azaltılması, ağırlık ve maliyet açısından sağladığı önemli avantajlar yönünden oldukça önemli bir proses haline gelmiştir. Otomotiv sektörü bu yöntemi kullanarak motor destek parçaları ve ön cam destek profili gibi parçaları imal ederek kullanmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan konu, tek eksenli çekme gerilme testinden elde edilen malzeme akma özelliklerinin hidrolik boru şekillendirme prosesi için kullanılıp kullanılmayacağıdır. Bu amaç için ERC/NSM'de bulunan hidrolik boru şişirme düzeneği kullanılarak deneyler düşük karbonlu çelik 1008 için gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu analitik yöntemlerin de yardımı ile içi boş silindirik çelik parça (boru) için akma gerilme eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri çekme eğrisinden elde edilen eğri ile mukayese edilmiştir. Düşük karbonlu çelik için bir miktar farkın olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca şişik bölgesinin en üst noktasındaki kalınlık analitik bir yöntem geliştirmek sureti ile hesaplanmaya çalışılmıştır. Analitik yöntem sonucu elde edilen değerler ile deneyler sonucu ölçülen kalınlık değerleri karşılaştırılmış ve geliştirilen analitik yöntemin başarılı olduğu ortaya çıkmıştır.

Bu çalışma ile çekme testinden elde edilen malzeme akma özelliklerinin, hidrolik şekillendirme prosesinin simülasyonlarında kullanılmasının çok doğru olmadığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Derin Çekme, Hidrolik Boru Şekillendirme, Çekme Gerilme Testi, Hidrolik Boru Şişirme Testi, Akma Eğrileri

## **ABSTRACT**

The protection of environment and the conservation of energy are important issues that have been receiving a special emphasis as of late. This is especially true in the automotive industry, which needs new innovative methods in producing new products for cars without lowering the performances or significantly increasing the costs. To solve this problem, automotive companies have begun to design cars with integrated lightweight structures to reduce their total weights.

Flow stress that is commonly used for FEM is obtained from the uniaxial tensile test of sheet metals, not from tubes. A disadvantage of this approach is that it does not take the loss of formability into account when a metal sheet is transformed into a tube. Therefore, an innovative method for obtaining the flow stress directly from the tube should be implemented. The stand-alone bulging tooling has been constructed for measuring the flow stress from tubes. However, the method for determining the flow stress from the experimental data (pressure and bulge height) is not completed yet. Hence, a comprehensive approach for determining the flow stress from the bulged test should be developed.

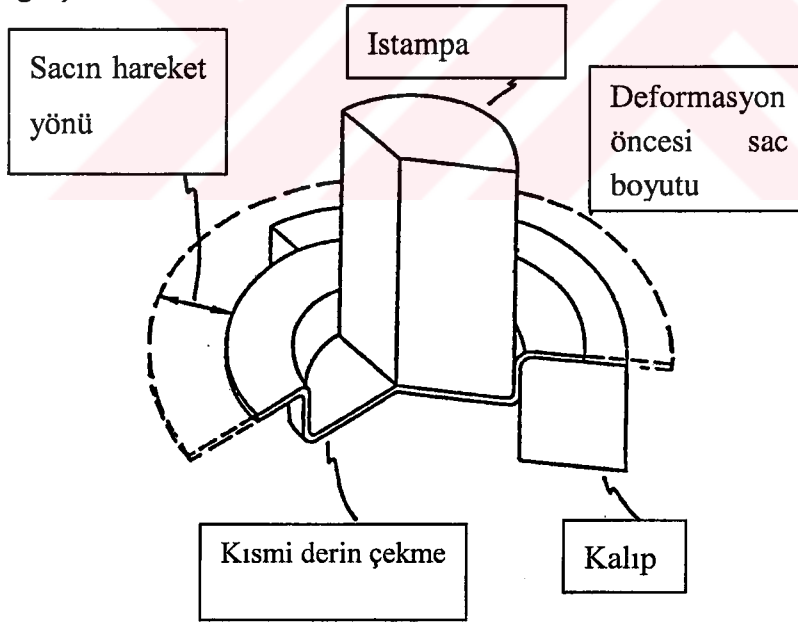
The main objectives of this study are to implement techniques to determine the flow stress of tubular materials from the bulging experiments. There is one technique being proposed in this study which is an analytical technique.

**Keywords:** Deep Drawing, Tube Hydroforming, Tensile Test, Hydraulic Bulge Test, Flow Stress

## 1. GİRİŞ - BASMA/DERİN ÇEKME PROSESİ

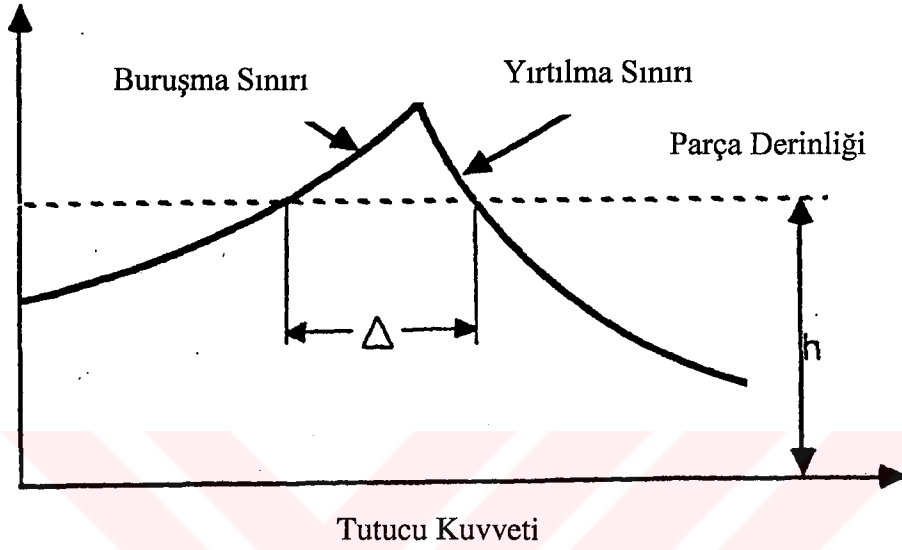
### 1.1 Prosesin Tanımı

Derin çekme işlemi düz metal sacın kalıp boşluğuna doğru hareketli bir zımbanın yardımı ile şekillendirilmesi prosesidir. (Şekil 1.1). Parça geometrisi silindirik kap olabileceği gibi dikdörtgen kutu şeklinde de olabilir. İstampa, metal sac malzemeyi kalıp boşluğuna doğru bastırdıkça parça kalıp boşluğunun şeklini alır. Deformasyon sonucu başarılı bir parçanın elde edilmesi belli başlı proses parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler, tutucu(pot çemberi) kuvveti, yağlama durumu, sac metal özellikleri ve ıstampa çapının sac metalin çapına oranı olarak sayılabilir. Bu parametreler derin çekme prosesini etkileyen en önemli parametrelerdir. Silindirik kapların derin çekme işleminde karşılaşılabilecek en önemli problem buruşma probleimidir. Buruşma parçanın kenar bölgelerinde oluşan teğetsel yöndeki yüksek basınç gerilmeleri sonucu meydana gelmektedir. Buruşmayı önleyebilmek için en etkili çözüm, tutucu(pot çemberi) kullanılmasıdır. Tutucu, metal sacı kalıba doğru belli bir kuvvette bastırarak o bölgede oluşacak buruşmayı engellemektedir. Tutucu kullanılarak sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin arttığı deneysel olarak da araştırmacılar tarafından tespit edilmiş bir gerçektir.



Şekil 1.1 Silindirik Kap Derin Çekme İşlemi

Şekil 1.2 tutucu kuvvetinin parça derinliğine, buruşma ve yırtılmaya olan etkisini göstermektedir. Tutucu kuvvetinin gerekenden yüksek olması durumunda çekme işlemi yerine germe meydana gelir ve böylece malzemenin kalıp boşluğuna olan akışı engellenmiş olur. Germe miktarı fazlalaştığı takdirde ise sac belli bir noktada yırtılır. Bu istenmeyen bir durumdur.

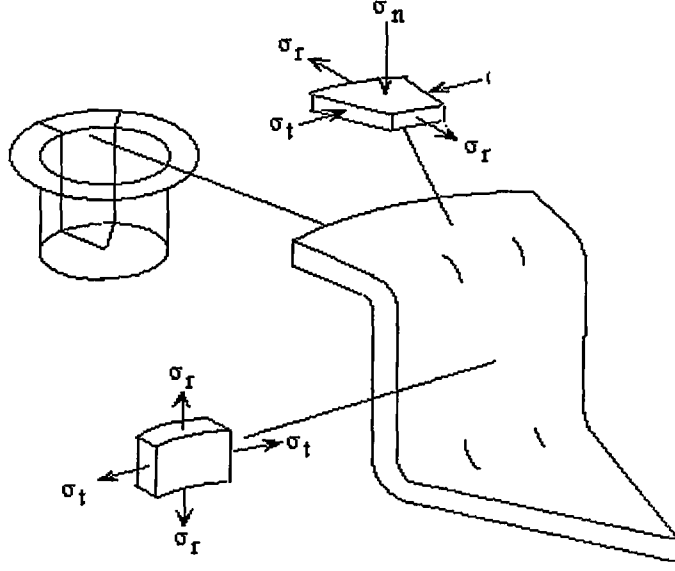


Şekil 1.2 Tutucu Kuvvetinin Parça Derinliğine Olan Etkisi (Altan, 1992)

Tutucu kuvvetinin gerekenden az olması, kenar bölgede buruşmayı önleyecek yeterli kuvvetin bulunmaması demektir. Bu sebeplerden dolayı tutucu kuvvetinin son derece dikkatlice seçilmesi sorunsuz parça imalatı açısından son derece önemli bir husustur. Hatta yapılan deneysel çalışmalar göstermiştir ki, sabit tutucu kuvveti yerine, derin çekme esnasında tutucu kuvvetinin değiştirilmesi derin çekme oranını arttırmaktadır. (Lange, 1985) Bu da daha derin parçaların imal edilebilmesi demektir.

Şekil 1.3 silindirik kap derin çekme işlemi sırasında parçanın hangi gerilmeler altında hangi fiziksel durumlarda bulunduğunu göstermektedir.



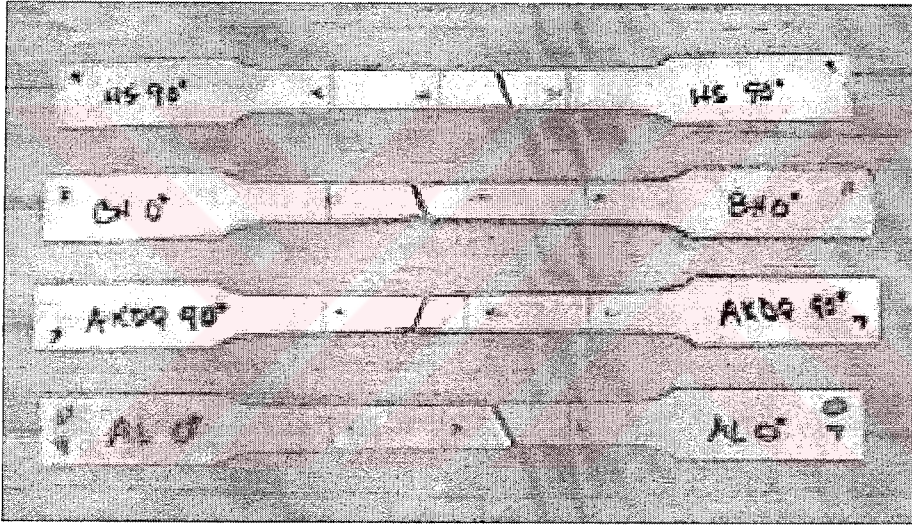
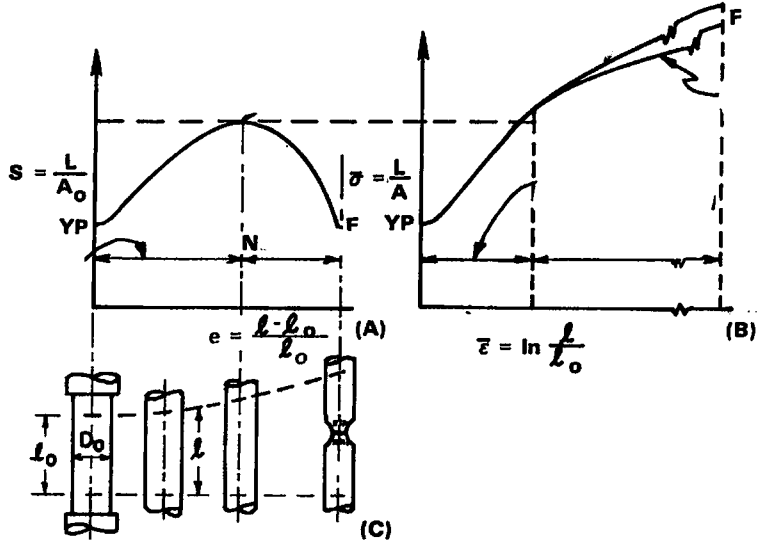


Şekil 1.4 Aksisimetrik Derin Çekmede Gerilme Dağılımı (Lange, 1985)

Şekil 1.4 ise silindirik parçaların derin çekme işlemide parça kenarında ve duvarında ne tür gerilmelere maruz kaldığını şematik olarak göstermektedir.  $\sigma_r$ : Çekme gerilmesi,  $\sigma_t$ : Bası gerilmesi,  $\sigma_n$ : Tutucunun etkisiyle oluşan normal gerilme

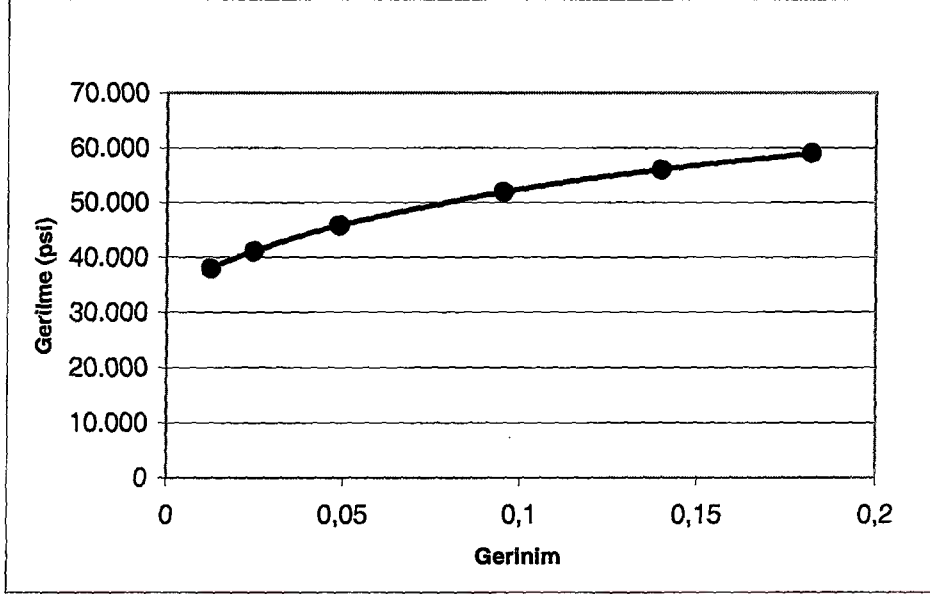
## 1.2 Çekme Deneyi

Çekme deneyi, sac şekillendirme prosesleri için gerekli malzeme akma özelliklerinin tesbitinde son derece yaygın bir şekilde kullanılan bir testtir. Test esnasında numune her iki tarafından tek eksenli gerilmeye maruz kalacak şekilde çekilir. Çekme gerilmesi malzemenin akma gerilme değerine ulaştığı zaman malzeme akmaya başlar. Gerilme değeri çekme gerilme noktasına ulaştığında boğum oluşumu başlar ve kısa bir süre sonra da parça kopar. (Şekil 1-5) Bu test sayesinde malzemenin akma, çekme ve kopma gerilmeleri ve azami birim uzama tespit edilir. Bunların tespiti parça işlem ve kalıp tasarımı yapanlar için son derece önemlidir. Yukarıda da belirtildiği gibi çekme gerilme testinde tek eksenli gerilme durumu sözkonusudur ve bu test halen sanayide malzeme özelliklerinin tespitinde kullanılan yegane testtir. Ancak genel olarak sac şekillendirme işlemlerine bakıldığında çift eksenli gerilme veya üç eksenli gerilme durumlarının olduğu görülmektedir. Bu durumda tek eksenli gerilme durumundan elde edilecek malzeme özelliklerinin sac şekillendirmede kullanımının doğruluğu ve hassasiyeti akıllarda soru işaretleri bırakmaktadır.



Şekil 1.5 Çekme Deneyi (Altan, 1983)

Şekil 1.6 da örnek olarak AISI 1008 düşük karbonlu çeliğe ait çekme gerilme testinden elde edilmiş akma gerilme eğrisi gösterilmektedir.

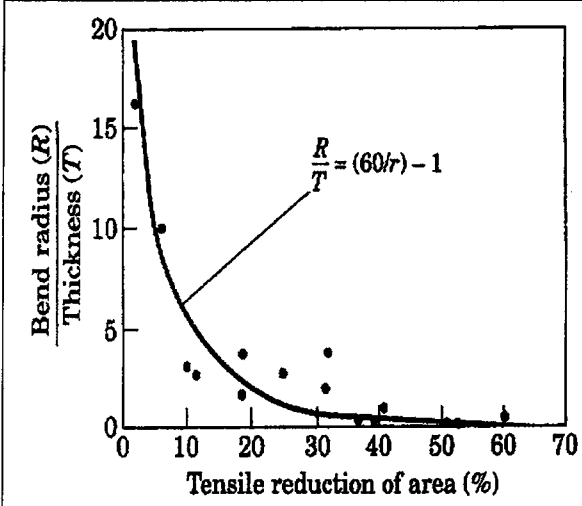


Şekil 1.6 Düşük Karbonlu Çelik (AISI 1008) için Çekme Deneyinden Elde Edilmiş Akma Gerilme Eğrisi

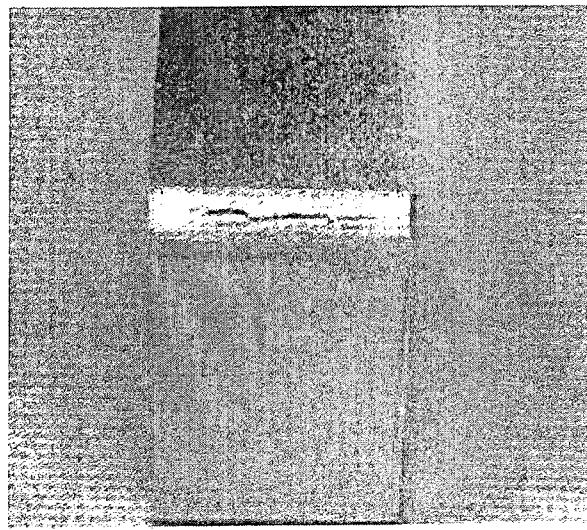
### 1.3 Basma/Derin Çekme Prosesleri İçin Bazı Tasarım Kuralları

#### Kural 1 – En Küçük Bükme Yarıçapı

Tasarım mühendislerinin dikkat etmeleri gereken en önemli konulardan biri ellerinde bulunan malzemeyi bükebilecekleri en düşük yarıçapı bilmeleridir. Bu önemli sayısal değer bilinmeden yapılan tasarımlar başarılı olamayabilir ve maliyetlerin yükselmesine sebep olabilir. Şekil 1-7, malzeme üreticisinden, malzemenin minimum bükme yarıçapı değerinin temin edilememesi durumunda malzemenin minimum bükme yarıçapının parça kalınlığına oranının analitik olarak basit bir şekilde hesaplanmasını sağlayan bir egridir. Bu basit kurala uyulmadığı durumda bükme köşesi boyunca çatlama etkisinin ortaya çıkabileceği Şekil 1-8 de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 Minimum Bükme Yarıçapı - % Kesit Daralması Eğrisi (Kalpakjian,1991)



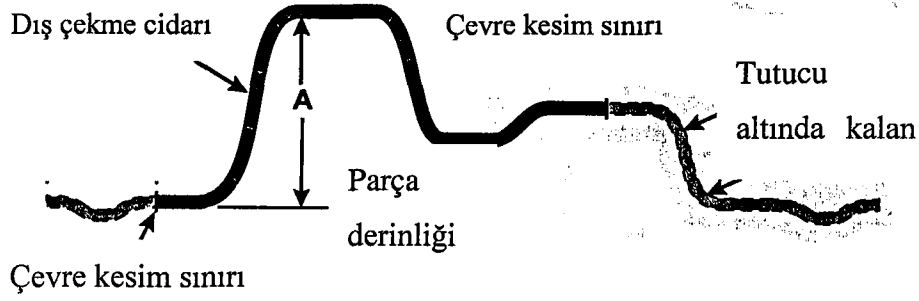
Şekil 1.8 Bükme Bölgesindeki Çatlama

Şekil 1.7 de gösterilen ve çelik malzemenin minimum bükülebilir yarıçapını hesaplamaya yarayan eğrinin yanısıra Alman standardı olan DIN 6935 daha kolay ve pratik bir tasarım kuralı önermektedir. Bu kural en küçük bükme iç yarıçapının parça kalınlığının 0.5 katından büyük olacak şekilde seçilmesini tavsiye eder.

### Kural 2 – Parça Kalınlığı - Buruşma

Parça kalınlığı arttıkça buruşma eğilimi azalmaktadır. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, silindirik kap derin çekme işleminde parça kalınlığının ıstampa çapına oranı % 2.5 veya daha fazla ise, meydana gelen buruşmayı önlemek için tutucuya gerek kalmamaktadır. (Karima and Donatelli, 1989). Parça kalınlığı azaldıkça buruşma eğilimi de beraberinde artmaktadır. Bu durumda tutucu(pot çemberi) kullanmak gerektiğinden ıstampa kuvveti de artmaktadır. Artan kuvvetler sonucu, silindirik kap duvarlarının bu kuvvetlere dayanıklı olması gerekmektedir. Sonuç olarak ince sac parçaları şekillendirmek kalın parçalara göre daha zordur.

### Kural 3 – Çekme Derinliği



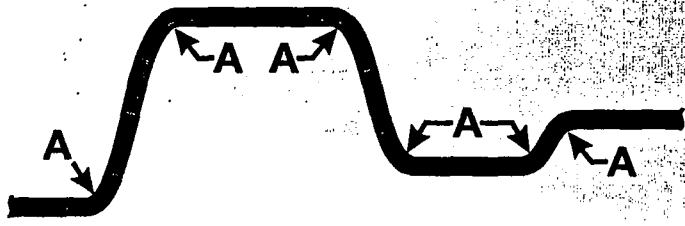
Şekil 1.9 Parça Çekme Derinliğinin Şematik Olarak Gösteriliđi (Pool,G., 1997)

Çizelge 1.1 Parça Çekme Derinliği İçin Değerler

A Parça Derinliği	
0 - 50 mm arası	Tavsiye edilir
50 - 100 mm arası	Müsade edilir (İmalat maliyeti artar)
100-200 mm arası	Müsade edilir (İmalat maliyeti çok artar)
200 mm üzeri	Maliyet sebebiyle tasarım değişikliği gerekir

#### Kural 4 – Parça Köşe Yarıçapı

A, Şekil 1.10 da görüldüğü üzere parçanın değişik bölgelerindeki köşe (bükme) yarıçap değeridir. Çizelge 1.2 ise A yarıçapı için üst ve alt sayısal değerleri göstermektedir. 6.0 mm'nin altında tasarlanan dizaynlar için tasarım değişikliği tavsiye edilmektedir.



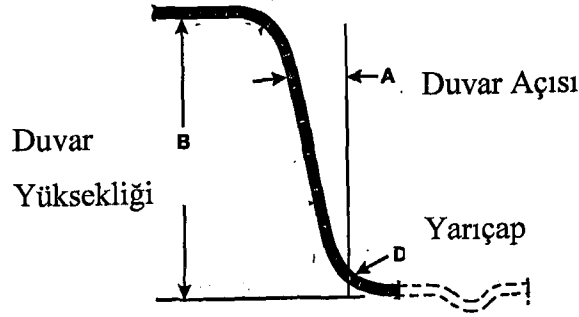
Şekil 1.10 Köşe Yarıçaplarının Şematik Olarak Gösterimi (Pool,G., 1997)

Çizelge 1.2 Köşe Yarıçapı İçin Tavsiye Edilen Sayısal Değerler

A Köşe Yarıçapı	
10.0 mm veya fazla	Tavsiye edilir
10mm ile 6.0 mm arası	Müsaade edilir (Maliyet artar)
6.0 mm altı	Çok yüksek maliyet Tasarım değişikimi tavsiye edilir

### Kural 5 - - Duvar Açısı ve Yüksekliği

A, duvar açısı ve B, duvar yüksekliğine göre gerekli en küçük C ve D yarıçapları aşağıda gösterilmiştir.



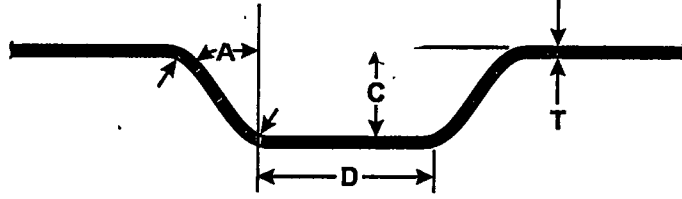
Şekil 1.11 Basma İşleminde Parça Dış Duvar Cıdarı (Pool,G., 1997)

Çizelge 1.3 Duvar Açısı, Duvar Yüksekliği ve Yarıçap için Değerler

A Duvar Açısı	B Duvar Yüksekliği	C Min Yarıçap	D Min Yarıçap
5°	12 mm ye kadar	6 mm	6 mm
	13 - 25	8	
	26 - 37	10	
	38 - 50	12	
	51 - 62	14	8 mm
	63 - 75	16	
	76 - 87	18	
	88 - 100	20	
	101 - 112	22	10 mm
	113 - 125	24	
	126 - 137	26	
	138 - 150	28	

### Kural 6 – Basma İşleminde Çekme Cebi Tasarımı

A, duvar açısı, B, en küçük yarıçap, C, cep derinliği ve D, cep genişliğine ait tasarımda kullanılabilen sayısal değerler aşağıda gösterilmiştir.



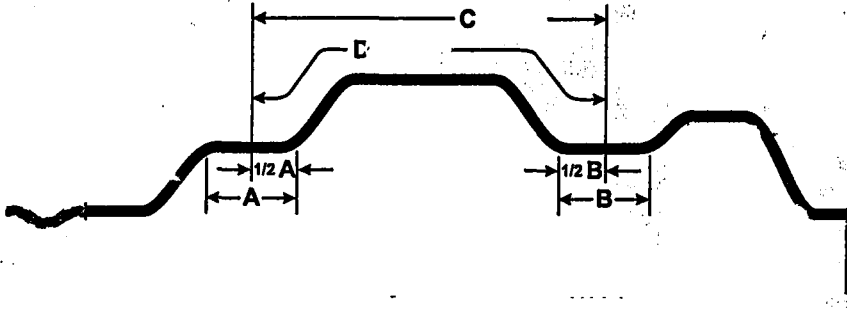
Şekil 1.12 Basma Prosesinde Parça İç Cebi (Pool,G., 1997)

Çizelge 1.4 Duvar Açısı, Minimum Yarıçap, Cep Derinliği ve Cep Genişliği İçin Önerilen Tasarım İlkeleri

A <b>Duvar Açısı</b>	45 - 26°	Tavsiye edilen minimum açı
	25 - 5°	Maliyet artışı sözkonusu
	5° altı	Tasarım değişikliği tavsiye edilir
B <b>Min.Yarıçap</b>	10mm veya fazla	Tavsiye edilen yarıçap
	10 mm – 6 mm	Müsaade edilir (maliyet artar)
	6 mm ve altı	Tasarım değişikliği tavsiye edilir (yüksek maliyet)
C <b>Cep Derinliği</b>	30 mm - 1xT arası	Tavsiye edilen derinlik
	30 mm üstü	Müsaade edilir (maliyet artar)
	1xT altı	Tasarım değişikliği
D <b>Cep Genişliği</b>	4xC üstü	Tavsiye edilen genişlik
	4xC - 2xC arası	Müsaade edilir
	2xC altı	Cep içindeki metalin gerilme yüzdesi ile ilgili tasarım kuralına bakınız. (Kural 7)

### Kural 7 – Cep Bölgesindeki Gerilme Miktarı Limitleri

Cep içindeki gerilme yüzdesini  $\frac{D-C}{C}$  formülü ile hesaplayabiliriz.



Şekil 1.13 Basma Prosesinde Parça İç Cebi (Geniş) (Pool,G., 1997)

Çizelge 1.5 Cep İçinde Müsaade Edilen Gerilme Miktarı Limitleri

Cep İçin Müsaade Edilen Gerilme Miktarları	
0 – 2 %	Parça tasarımı değiştirilmelidir
2 – 13 %	Tavsiye edilir
13 – 26 %	Müsaade edilir (Maliyet artar)
26 % ve üzeri	Yırtılma meydana gelebilir. Parça tasarımı değiştirilmelidir.

### Kural 8 – Kalıp Yüzeyi Derinlik Açısı



Şekil 1.14 Kalıp Yüzeyi Derinlik Açısı (Pool.G., 1997)

Çizelge 1.6 Tavsiye Edilen Açı Değerleri

A Kalıp Yüzeyi Derinlik Açısı	
20° ye kadar	Tavsiye edilir.
21° - 30°	Müsade edilir.(Maliyet artar)
30° üzeri	Parça tasarım değişikliği

### Kural 9 – Kalıp Ağız Yarıçapı

Kalıp ağız yarıçapı için aşağıdaki (1.1) nolu denklem geliştirilmiştir. (Oehler ve Kaisler, 1973).

$$r_d = 0.035[50 + (d_o - d_i)] \sqrt{s_o} \quad (1.1)$$

Koelzer (1949) 1.1 no'lu denklemde bulunan 0.035 katsayısının 0.08'e kadar çıkarılıp aynı denklemde kullanılabileceğini öne sürmüştür.

Sellin (1931) ise kalıp yarıçapının analitik olarak hesaplanabilmesi için sac kalınlığına bağlı aşağıda bulunan 1.2 no'lu denklemi geliştirmiştir.

$$r_D = (5 - 10) \times s_o \quad (1.2)$$

(s<sub>o</sub>: sac kalınlığı)

Kalıp yarıçapı değişik malzemelere göre değişim göstermektedir. Aynı kalıp yarıçapının hem çelik hem de alüminyum için kullanılması tavsiye edilen bir durum değildir. Bu yüzden

Çizelge 1-7 de dünyanın önde gelen kuruluşlarının ve Lange'nin araştırmaları sonucu tavsiye ettikleri kalıp yarıçapının sac kalınlığına bağlı olarak değerleri verilmektedir. (Lange, 1985)

Çizelge 1.7 Alüminyum ve Çelik İçin Tavsiye Edilen Kalıp Ağız Yarıçapları

Malzeme	Kaynak	Kalıp, $r_d$
Alüminyum	(SME, 1984)	(4 - 6) t
Alüminyum	(Lange, 1985)	(5 - 10) t
Çelik	(ASM, 1988)	10 t
Alüminyum	(ASM, 1988)	(6 - 8) t

### Kural 10 – İstampa Köşe Yarıçapı

Tasarım aşamasında ıstampa köşe yarıçapı da kalıp ağız yarıçapı gibi son derece dikkatlice seçilmelidir. Yanlış veya uygunsuz seçim başarılı parçalar elde edilmesini engeller. Çizelge 1-8, alüminyum ve çelik malzemeler için tavsiye edilen ıstampa köşe yarıçap değerlerini sac kalınlığına bağlı olarak vermektedir. İstampa köşe yarıçapının her zaman için kalıp ağız yarıçapının 3-5 katı fazla olması tavsiye edilmektedir. İstampa köşe yarıçapının kalıp ağız yarıçapından küçük olması durumunda ıstampa, sacı ıstampa köşesi veya çevresinde yırtabilir.

Çizelge 1.8 İstampa Köşe Yarıçapı İçin Tavsiye Edilen Değerler

Malzeme	Kaynak	İstampa, $r_p$
Alüminyum	(SME, 1984)	(4 - 10) t
Alüminyum	(Lange, 1985)	(8 - 10) t
Çelik	(ASM, 1988)	5 t
Alüminyum	(ASM, 1988)	(4 - 8) t

İstampa köşe yarıçapı sac kalınlığının 4 katı veya fazlası olarak seçilirse yırtılma, ıstampa köşesinden silindirik kap duvarına doğru yönelir.

Sac kalınlığının 10 katı ve üzerinde seçilen ıstampa köşe yarıçapı değerlerinde, silindirik kap derin çekme işlemi esnasında buruşmanın meydana gelmesi engellenemez. Buruşmanın sebebi, yüksek değerlere ulaşan teğetsel bası gerilmesidir. (Koelzer, 1949)

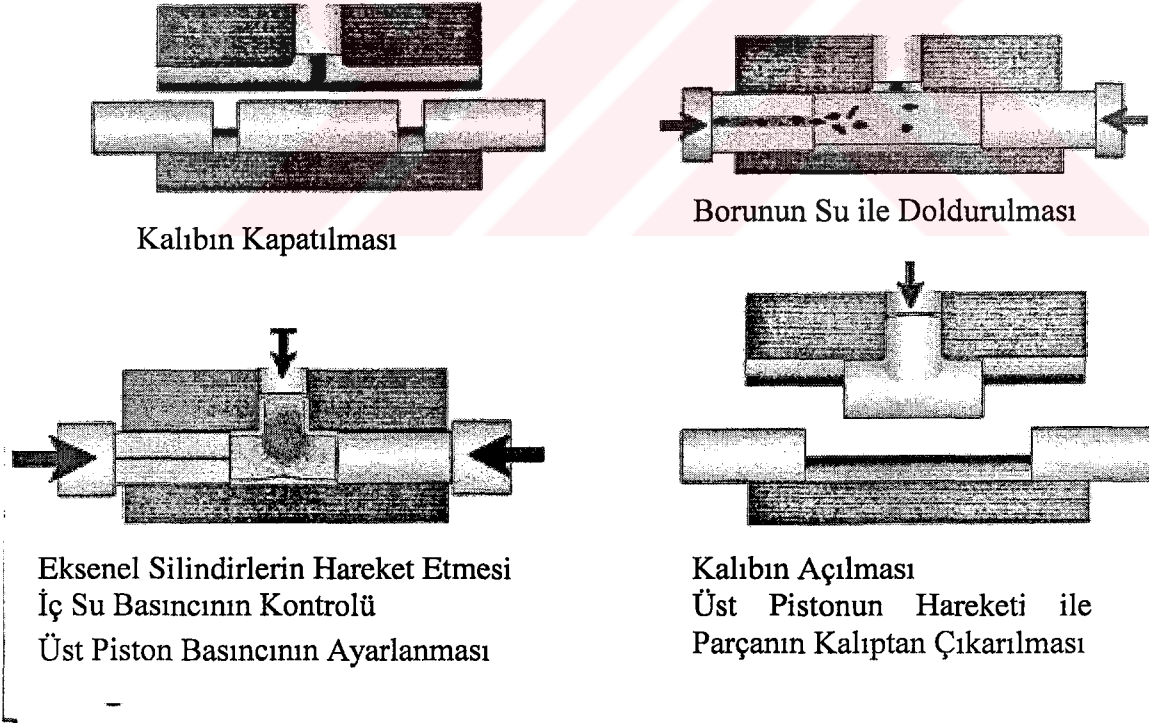
## 2. HİDROLİK BORU ŞEKİLLENDİRME

### 2.1 Giriş

Metal sac şekillendirme yöntemlerinin sahip olduğu sınırlı şekillendirebilme yeteneği sonucu araştırmacılar yeni alternatif şekillendirme prosesleri bulmaya yönelmişlerdir. Sınırlı şekillendirme kabiliyetine neden olan karakteristikler ve etkilerin düzeltilmesi ile, şekillendirme kabiliyeti de artmış olmakta bunun sonucu olarak da kullanıma hazır parça dizaynı ve imalatında önemli esneklikler ve kolaylıklar sağlanmış olmaktadır.

Hidrolik boru şekillendirme yöntemi daha çok otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde elde edilen en önemli avantaj, malzeme ve ağırlık tasarrufudur. Örneğin, derin çekme/basma işlemi ile birden fazla kalıp kullanarak üretilen ve daha sonra monte edilmek sureti ile bir araya getirilen bir parça, hidrolik boru şekillendirme yöntemi ile tek bir kalıp veya basma/derin çekme prosesine oranla çok daha az sayıda kalıp kullanılarak üretilmekte ve kullanıma hazır vaziyette kalıptan çıkmaktadır.

Hidrolik Boru Şekillendirme prosesi Şekil 2-1' de gösterilmiştir.

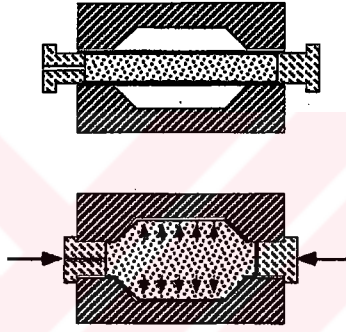


Şekil 2.1 T-Şekline Sahip Parçaların Hidrolik Şekillendirme İşlemi

## 2.2 Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesinin Temelleri

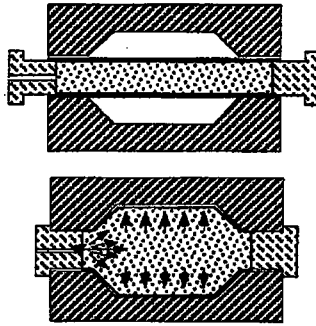
Hidrolik boru şekillendirme yöntemi, daha önceden bükülmüş bir borunun veya hiç bir işlem görmemiş düz borunun kalıp içine yerleştirilmek sureti ile şekillendirilmesi işlemidir. Boru uçları sızdırmazlık elemanları ile kapatılarak kesin bir sızdırmazlığın elde edilmesi gerekmektedir. (Şekil 2.2). Bu noktada, borunun şekillendirilebilmesi için temel olarak dört esas vardır. Bunlar;

a) Boruyu şekillendirebilmek için gerekli basınç aksel kuvvet olarak önce uygulanır daha sonra boru içinde bulunan sıvının uygulamış olduğu iç basınç ile parça asıl şekline getirilir. İç basıncın kullanılış amacı parçayı kalıba tam olarak sıvayabilmek içindir (Şekil 2.2).



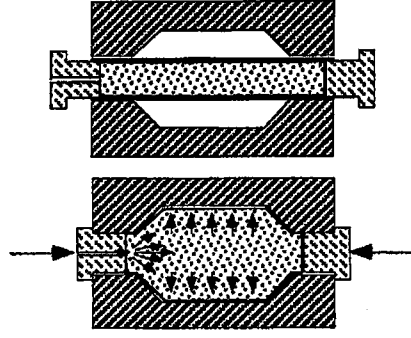
Şekil 2.2 Eksenel Kuvvet ile Basarak Şekillendirme

b) Boru içindeki iç basıncın artırılması sonucu borunun kalıp iç yüzeyine doğru genişleyerek son şekline getirilmesi esasına dayanır. Bu proses de eksenel kuvvet uygulanmamaktadır (Şekil 2.3).



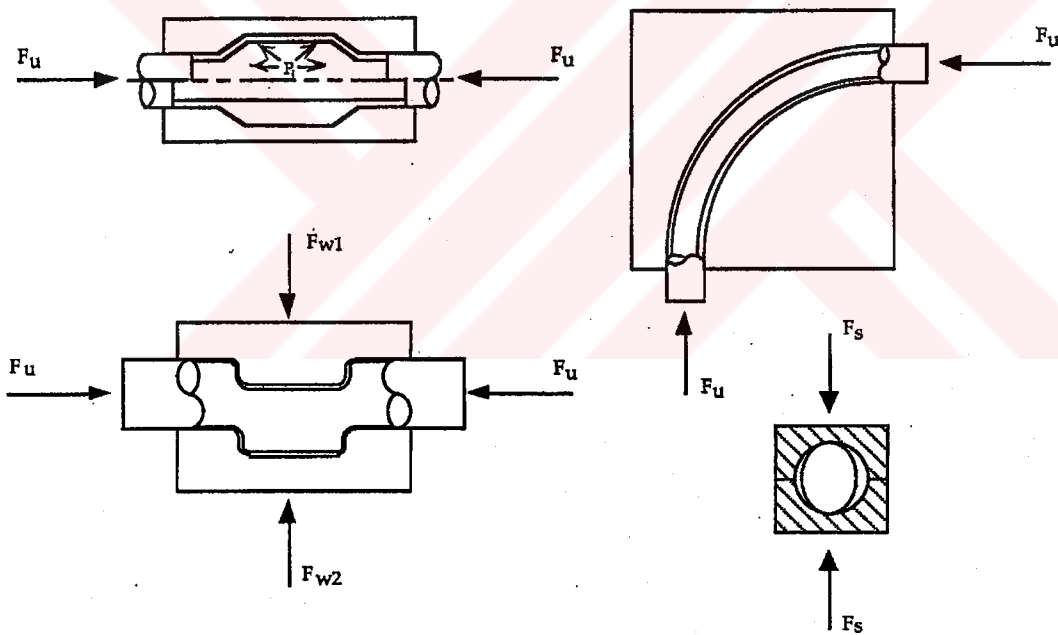
Şekil 2.3 İç Basıncın Arttırılması ile Şişirerek Şekillendirme

c) Borunun Hem aksel kuvvet hem de iç basınç artırılarak şekillendirilmesidir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4 Eksel Kuvvet ve İç Basınç

d) Önce aksel kuvvet uygulanmak sureti ile parça şekillendirilir. Aksel kuvvetin parçayı tam olarak şekillendirmesinde yetersiz kalması sonucunda iç basıncın artırılması ile tam olarak şekillendirilemeyen parça son şekline kavuşturulur. (Şekil 2-5)



Şekil 2.5 Prosesle ilgili Kuvvetlerin Gösterilmesi

### 2.3 Hidrolik Boru Şekillendirmede Basınç ve Kuvvetler

Hidrolik boru şekillendirme işleminde kullanılan üç adet temel kuvvet vardır. (Şekil 2.5) (Dohmann, 1994). Bunlar;

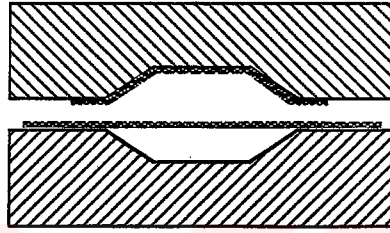
a) Kalıp kapatma kuvveti,  $F_s$ , kalıbı kapatmak için gereklidir.

b) Şekillendirme kuvveti,  $F_u$ , boruyu kalıp içine doğru iten aksenal kuvvettir.

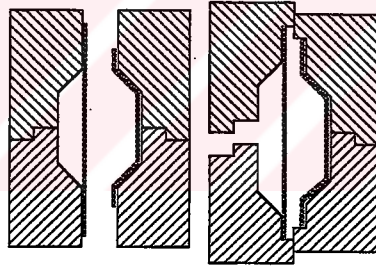
c) Kalıp kuvveti,  $F_w$ , kalıbı boru yüzeyine dik olarak hareket ettiren kuvvettir.

## 2.4 Hidrolik Boru Şekillendirme Kalıpları

Hidrolik boru şekillendirme prosesine ait kalıplar enine veya boyuna olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de enine ve boyuna ayrılmış hidrolik şekillendirme kalıplarına ait iki adet örnek gösterilmektedir. Boyuna ayrılmış kalıplar boruyu her iki uçtan tutmak için gerekli daha fazla kuvvet gerektirirler. Bu sebepten dolayı, enine kalıplar daha çok tercih edilmektedir.



Şekil 2.6 Boyuna Ayrılmış Kalıp



Şekil 2.7 Enine Ayrılmış Kalıp

## 2.5 Yöntemin Kısıtlamaları

### 2.5.1 İncelme

İç basınç sonucu borunun genişlemesi ile, doğal olarak boru kalınlığında incelme meydana gelmektedir. Boru, kalıp iç yüzeyi ile temas edene kadar incelme devam etmektedir. Temas ettikten sonra incelme işlemi durmaktadır. Temas esnasında boru yüzeyindeki teğetsel gerilme ve kalınlık yönündeki gerilme sabit kalmaktadır. Kalınlık yönündeki gerilmenin mutlak değeri boru yüzeyindeki gerilme değerinden büyüktür. (Fuchizawa, 1990)

Boruda meydana gelecek incelme miktarı fazla olunca boruda yırtılma meydana gelmektedir.

### 2.5.2 Buruşma

Hidrolik boru şekillendirme işleminde buruşma olayı prosesin başlangıcında meydana gelmektedir. İç basıncın aksenal kuvvete oranla daha az olması durumunda buruşma meydana gelmektedir. Buruşma iç basıncın yükseltilmesi ile engellenebilir, çünkü bu basınç boruyu destekleyen basınçtır. Gerekli iç basınç aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. (Dohmann, 1994)

$$P_{i \min} = 2k_f \left\{ \frac{s_t}{f} \right\}^2 \quad (2.1)$$

$P_{i \min}$ : İç basınç  $k_f$ : Akma Gerilimi,  $s_t$ : boru kalınlığı,  $f$ : buruşma yüksekliği

### 2.5.3 Yırtılma

İç basınç, malzemenin sahip olduğu çekme gerilmesini aştığı zaman yırtılma olayı meydana gelmektedir. Malzemenin genişleme oranı yırtılma ile sınırlandırılmıştır. (Şekil 2-8)



Şekil 2.8 Yırtılmış Boru

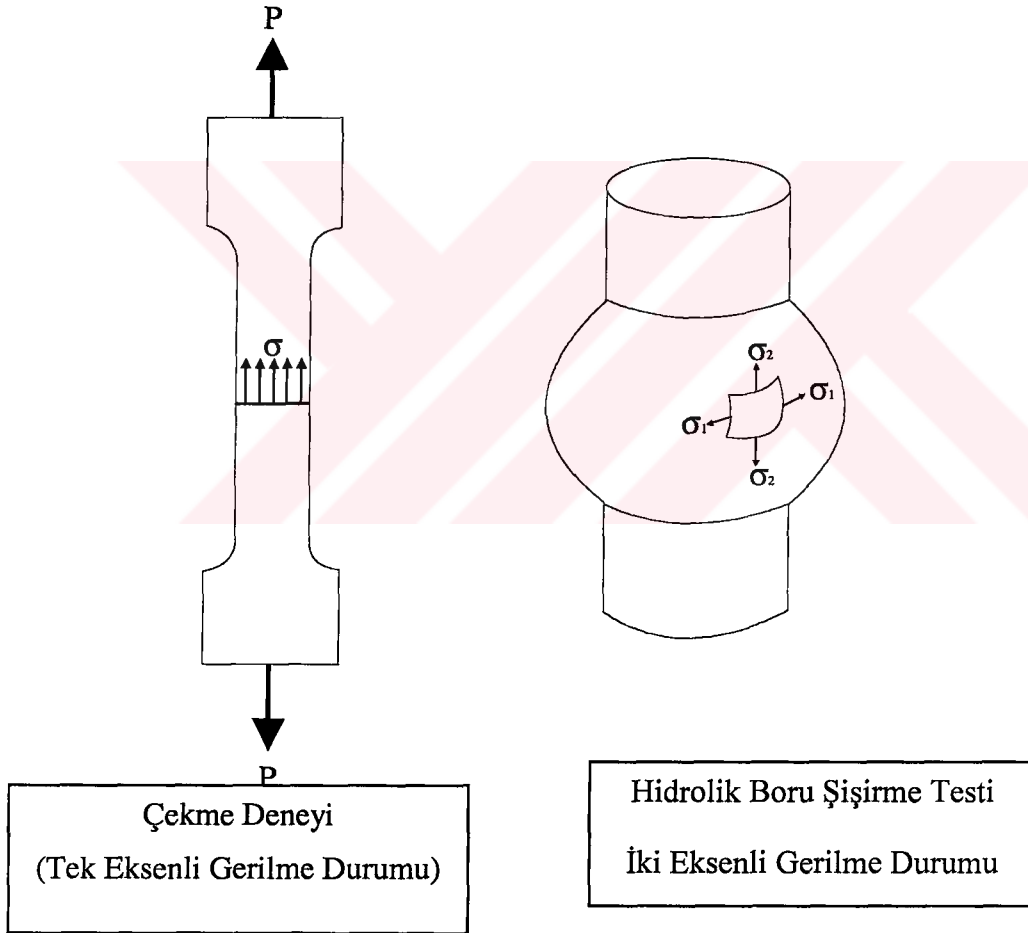
## 2.6 Silindirik İçi Boş Parçaların Malzeme Özelliklerine Duyulan İhtiyaç

Günümüzde, Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak geliştirilen bilgisayar programları ile gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde hemen hemen tüm metal şekillendirme proseslerinde parçanın nasıl bir deformasyona uğrayacağı gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilmek sureti ile tahmin edilmektedir. Gerçekçi sonuçların alınabilmesi için her değişik malzeme ve değişik geometriler için farklılaşan çekme özelliklerinin doğru bir şekilde tesbiti gerekmektedir. Bilgisayar yazılımlarının ihtiyaç duyduğu bu kriterler, akma gerilmesi, birim uzama ve

gerinim değerleri olarak sayılabilir.

Halen genel olarak çekme testinden elde edilen özellikler hidrolik şekillendirme prosesi için de kullanılmaktadır. Halbuki kullanılan malzeme aynı dahi olsa geometri değiştğinde malzemenin şekillendirilebilirliği de değişmektedir. Bu durumda silindirik boruların test edilebilmesi için bir düzeneğe ihtiyaç bulunmaktadır. Böyle bir düzenek ERC/NSM’de geliştirilmiştir ve hemen hemen her türlü malzeme test edilebilmektedir. (Sokolowski, 1998)

Bu testlerden elde edilen değerler daha sonra Sonlu Eleman programlarına girilerek proses gerçek koşullara en yakın bir şekilde simüle edilmektedir. Böylece kalıp imalatı yapılmadan parçanın nasıl bir deformasyon geçireceği ve bu deformasyonu etkileyen önemli geometrik ve malzeme faktörleri tespit edilebilmektedir.



Şekil 2.9 Tek Eksenli Gerilme Durumu Olan Çekme Deneyi ve İki Eksenli Gerilme Durumu Olan Hidrolik Boru Şişirme Testi

## 2.7 Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesi İçin Malzeme Testinin Avantajları

Silindirik içi boş bir parçanın şekillendirilebilirliği boru kalınlığına ve çapına, malzeme iç yapısına, önceden yapılan bükme işlemine, boru yapımında kullanılan kaynak tekniğine ve ısı işleme bağlıdır. Bu koşullara uygun şekilde imal edilen metal sacın küçük bir parçasını alıp çekme deneyi uygulanırsa ve yine aynı metal sac bükülüp boru haline getirilirse her ikisinin şekillendirilebilirliğinin farklı olacağı kesindir. Bu yüzden hidrolik boru şekillendirme için silindirik boru malzemenin kendine özgü bir test ile malzeme özelliklerinin tespiti gerekmektedir. Böylesine bir testin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Doğru bir test yöntemi ile malzeme üreticileri hidrolik boru şekillendirme prosesine yönelik malzemeler üretme imkanını yakalamışlardır.
- Tasarımcılar malzeme seçimlerini doğrudan gerçeğe çok yakın olan hidrolik boru testinden elde edilen sonuçlara göre seçmeye başlamışlardır. Bu çekme gerilme testinden elde edilen değerleri kullanarak yapılacak modifikasyonları engellemiş ve kalıp alıştırılmasındaki önemli zaman kaybını ortadan kaldırmıştır.

### 3. AMAÇLAR VE YAKLAŞIM

#### 3.1 Amaçlar

- Boru malzemelerin iç basınç etkisi ile yırtılma gerilmelerinin bulunması ve akma gerilme eğrilerinin bulunması.
- Şişik bölgesinin en üst noktasındaki kalınlığın analitik olarak hesaplanabilmesi.
- Analitik teknik ile deneysel çalışmaların mukayesesinin yapılması.
- Boru malzemelerin akma gerilmelerine ait bir veritabanının oluşturulması

Bu amaçlara ulaşabilmek için bu çalışma aşağıda sıralanan işlem sırasına bağlı kalınarak yapılmıştır.

#### İşlem 1: Literatür Taraması

- 1.1) Hidrolik Şişirme Testinden deneysel olarak elde edilen sonuçların hangi analitik yöntemler ile kontrol ve mukayese edildiğinin araştırılması.
- 1.2) Hidrolik Şişirme Testinden elde edilecek verilerden akma gerilme eğrilerinin tespiti için yeni bir metod geliştirilmesi.

#### İşlem 2: Deneilerin Yapılması

Bu deneyler Ohio State Üniversitesi, ERC/NSM de tasarlanan test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1 deneysel çalışma esnasında kullanılan malzemeyi ve bunun geometrik özelliklerini göstermektedir. Deneysel çalışmanın amacı, aşağıda sıralanan prosese ait sayısal ve deforme edilmiş parçaya ait geometrik verilerin elde edilebilmesidir. Bu veriler;

- 1) İç Basınç ( $P_i$ )
- 2) Şişik Yüksekliği ( $h_i$ )
- 3) Şişik bölgesindeki parça kalınlığı ( $t_1$ ) (Bu bilgi, analitik olarak şişik bölgesinin tam ortasındaki kalınlığın deneysel değerler ile karşılaştırılmasında kullanılacaktır.)

Çizelge 3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemenin Türü ve Geometrik Özellikleri

Malzeme Türü	Dış Çap (mm / in)	Cidar Kalınlığı (mm / in)	Boru Uzunluğu (mm / in)
AISI 1008 (EG)	57.15 / 2.25	2.00 / 0.079	203.2 / 8

### İşlem 3: Veri Analizi

- 3.1) Analitik olarak hesaplanan şişik bölgesinin tepe noktasındaki kalınlık değeri, deneysel çalışma sonucu ölçülen gerçek kalınlık değeri ile karşılaştırılması.
- 3.2) Deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak, analitik yöntem kullanılarak malzemenin akma gerilme eğrisinin elde edilmesi. ( $\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n$ )

## 4. SİLİNDİRİK İÇİ BOŞ PARÇALARIN AKMA ÖZELLİKLERİNİ TESPİT METODU

Bu çalışma için plastisite teorisine ve membran(zar) analizi tekniği'ne bağlı kalınarak bir analitik teknik geliştirilmiştir. Geliştirilen teknik aşağıda açıklanmıştır.

### 4.1 Analitik Teknik

Yapılan deneysel çalışma sonucunda şişik yüksekliği ve cidar kalınlığı verilerinin elde edildiği daha önceden belirtilmişti. Parçalar önceden tespit edilen değişik iç basınç değerlerinde deformasyona uğratılmıştır. Analitik yöntemde kullanılmak üzere, her basınç değeri için elde edilen şişik yükseklikleri ve şişik üst noktasındaki kalınlık değerleri ölçülmüştür. (Şekil 4-1)

Hesaplama işlemine önce malzemede bulunan ön gerinim (pre-strain) ( $\epsilon_0$ ) değerinin belirlenmesi ile başlanmıştır. Malzemede ön gerinimin bulunma sebebi, sac malzemenin imalatı esnasında maruz kaldığı gerilmelerdir. Boru ise, sac malzemenin bükülmesi ve daha sonra da kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ile imal edildiğinden ön gerinim değerinin hesaplamalarda kullanılması gerekmektedir. Daha sonra ise efektif gerilme ( $\bar{\sigma}$ ) ve efektif gerinim ( $\bar{\epsilon}$ ) değerleri hesaplanmıştır. Bulunan efektif gerilme ( $\bar{\sigma}$ ) ve efektif gerinim ( $\bar{\epsilon}$ ) değerleri daha Krupkowsky (Swift) Kanunu diye adlandırılan ( $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$ ) denkleminde yerlerine konulmuştur.

#### 4.1.1 Ön gerinimin tespiti ( $\epsilon_0$ )

Ön gerinim değeri, malzemenin akma dayanım değeri ve Hollomon denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ), malzeme dayanım katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) sözkonusu parça için yapılmış çekme gerilme testinden elde edilmiştir.

Hollomon Denklemi:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (4.1)$$

Bu hesaplamada yapılan kabullerden birisi, malzemenin gerinim özelliğinin plastik bölgede oluşudur. Zaten malzemenin gerinimi en azından akma noktasındaki gerinime aşağı yukarı eşit sayılmaktadır. Bu durumda ön gerinim değerinin malzemenin akma gerilmesini kullanarak hesaplamak yanlış olmayan bir yöntemdir.

Akma gerilmesi ( $\sigma_y$ ), kullanılarak ön gerinimin hesaplanması 4.2 nolu denklemde gösterilmiştir.

$$\varepsilon_0 = \left( \frac{\sigma_y}{K} \right)^{1/n} \quad (4.2)$$

#### 4.1.2 Efektif gerilme ve efektif gerinimin belirlenmesi

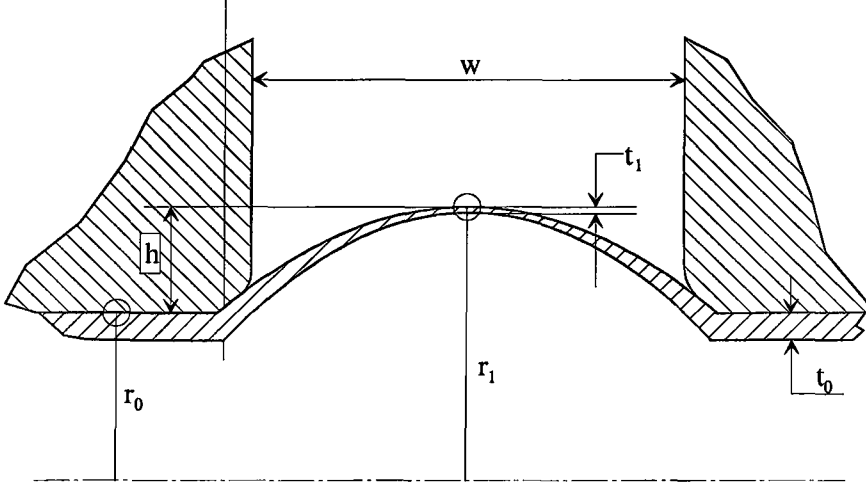
Krupkowsky Kanununa bağlı olarak akma gerilmesini belirleyebilmek için, öncelikle efektif gerilme ve gerinimi hesaplayabileceğimizi sağlayacak bir metoda ihtiyaç vardır. Tüm hesaplamalarda ince cidarlı boru ( $\frac{r}{t} \gg 20$ ,  $r$  = boru dış yarıçapı ve  $t$  = boru cidar kalınlığı) kullanılacağından, membran(zar) analizi efektif gerilme ve gerinim hesaplamalarında da kullanılabilir. Dolayısıyla, kalınlık yönündeki gerilme ( $\sigma_t$ ) ihmal edilebilmektedir. Şekil 4-2 de görüleceği üzere iki adet farklı gerilme söz konusudur. Bunlar teğetsel gerilme ( $\sigma_\theta$ ) ve eksenel gerilmedir ( $\sigma_\phi$ ). Bu gerilmelerin hesaplama yöntemi, Ek A, Ek B ve Ek C'de verilmiştir.

Teğetsel Gerilme:

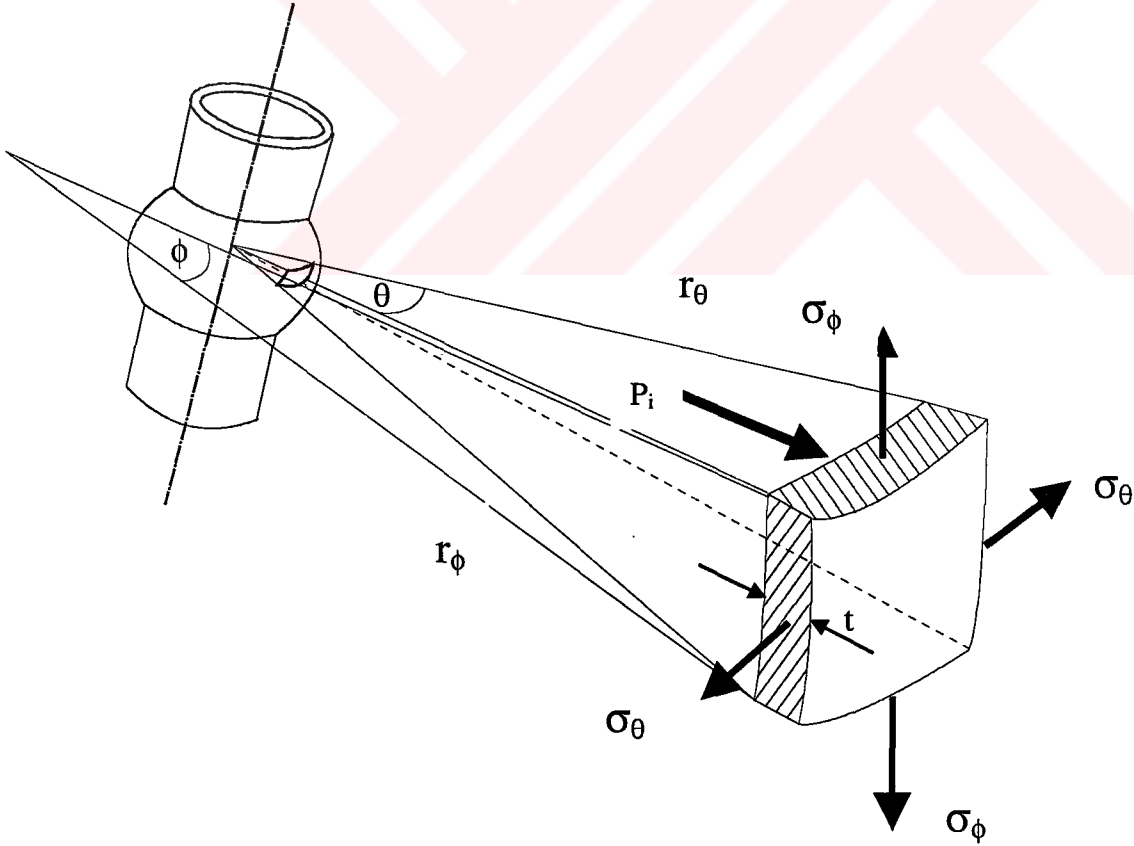
$$\sigma_\theta = \left( \frac{P_i}{t_i} - \frac{P_i r_\theta}{t_i r_\phi} \right) r_\theta \quad (4.3)$$

Eksenel Gerilme:

$$\sigma_{\phi} = \frac{P_i r_{\theta}}{2t_i} \quad (4.4)$$



Şekil 4.1 Deformasyona Uğramış Boru Geometrisi ( $r_1 = r_0$ )



Şekil 4.2 Hidrolik Boru Şekillendirmede Bulunan Gerilmeler

Borudaki gerinimler dikkate alındığında ise, üç değişik gerinimin olduğu hemen söylenebilmektedir. Bu gerinimler, teğetsel gerinim, aksenal gerinim ve kalınlık yönündeki gerinim'dir. Her bir gerinim aşağıda gösterilen formüller ile elde edilebilir.

Teğetsel Gerinim

$$\varepsilon_{\theta} = \ln\left(\frac{r_{\theta}}{r_0}\right) \quad (4.5)$$

Eksenal Gerinim

$$\varepsilon_{\phi} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (4.6)$$

Kalınlık Yönündeki Gerinim

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_i}{t_0}\right) \quad (4.7)$$

Bütün yönlerdeki gerilme ve gerinimler hesaplandıktan sonra, efektif gerilme ve efektif gerinim Von Mises Akma Kriterini kullanarak bulunabilir. İlgili denklemler aşağıda gösterilmiştir.

Efektif Gerilme

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 - \sigma_{\theta}\sigma_{\phi} + \sigma_{\phi}^2} \quad (\sigma_t=0) \quad (4.8)$$

Efektif Gerinim

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_{\theta}^2 + \varepsilon_{\theta}\varepsilon_t + \varepsilon_t^2} \quad (4.9)$$

## 5. ŞİŞİK BÖLGESİNDEKİ MİNİMUM KALINLIĞIN HESAPLANMASI

Değişik iç basınç ve germe koşullarında şişik bölgesinin en üst noktasındaki gerilme ve gerinim durumu bilindikten sonra, 1) şişik yüksekliği (deneysel olarak ölçülerek) ve 2) kalıp geometrisi bilgisi kullanılarak, şişik bölgesinin en üst noktasındaki kalınlık analitik olarak hesaplanabilmektedir. Aşağıda bahsi edilen noktadaki kalınlığın hesaplanma prosedürü detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 5.1 Metot

- 1) Bu metot plastisite ve membran(zar) teorisine dayanmaktadır.
- 2) Şişik yüksekliği (h) deneyler sonucu ölçülerek elde edilebilmektedir. Şişik bölgesi genişliği (w) ise zaten kalıp geometrisi olduğundan bilinmektedir.
- 3) Şişik yüksekliği ve genişliği bilindiği için teğetsel yöndeki yarıçap ( $r_\theta$ ) ve eksenel yöndeki yarıçap ( $r_\phi$ ) (Şekil 4-2) hesaplanabilmektedir. Hesaplama yöntemi Ek B de açıklanmıştır.

Teğetsel yöndeki yarıçap:

$$r_\theta = r_0 + h \quad (5.1)$$

Eksenel yöndeki yarıçap:

$$r_\phi = \frac{(w/2) + r_e (1 - \sin \theta)}{\sin \theta} = \frac{(w/2)^2 + h^2}{2h} \quad (5.2)$$

- 4) Membran analizi kullanılarak (Ek A), iç basınç (P), teğetsel gerilme ( $\sigma_\theta$ ) ve eksenel gerilme ( $\sigma_\phi$ ) arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir

$$\frac{P}{t} = \frac{\sigma_\theta}{r_\theta} + \frac{\sigma_\phi}{r_\phi} \quad (5.3)$$

5) Ek C deki C-5 denklemini kullanarak aksel gerilme ( $\sigma_\phi$ ), iç basınç, şişik yarıçapı ve kalınlık cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\sigma_\phi = \frac{Pr_\theta}{2t} \quad (5.4)$$

6) (5.3) ve (5.4) no'lu denklemleri kullanarak, teğetsel gerilme ( $\sigma_\theta$ ) aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\sigma_\theta = \frac{Pr_\theta}{t} - \frac{\sigma_\phi r_\theta}{r_\phi} \quad (5.5)$$

7) Ek D deki D-4 denkleminde faydalanılarak teğetsel ve kalınlık yönlerindeki gerilme ve gerinim ilişkisi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\frac{\epsilon_\theta}{\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_\phi} = \frac{\epsilon_t}{-\frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_\phi)} \quad (5.6)$$

5-6 denkleminde bulunan Radyal Gerinim ( $\epsilon_\theta$ ) ve Kalınlık Gerinimi ( $\epsilon_t$ ) aşağıdaki şekildedir.

$$\text{Teğetsel Gerinim } (\epsilon_\theta) \quad \epsilon_\theta = \ln \left[ \frac{r_\theta}{r_0} \right]$$

$$\text{Kalınlık Gerinimi } (\epsilon_t) \quad \epsilon_t = \ln \left[ \frac{t_1}{t_0} \right]$$

8) (5.4), (5.5) ve (5.6) no'lu denklemlerin düzenlenmesi sonucu şişik bölgesinin üst noktasındaki kalınlık aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$t_1 = e^A t_o$$

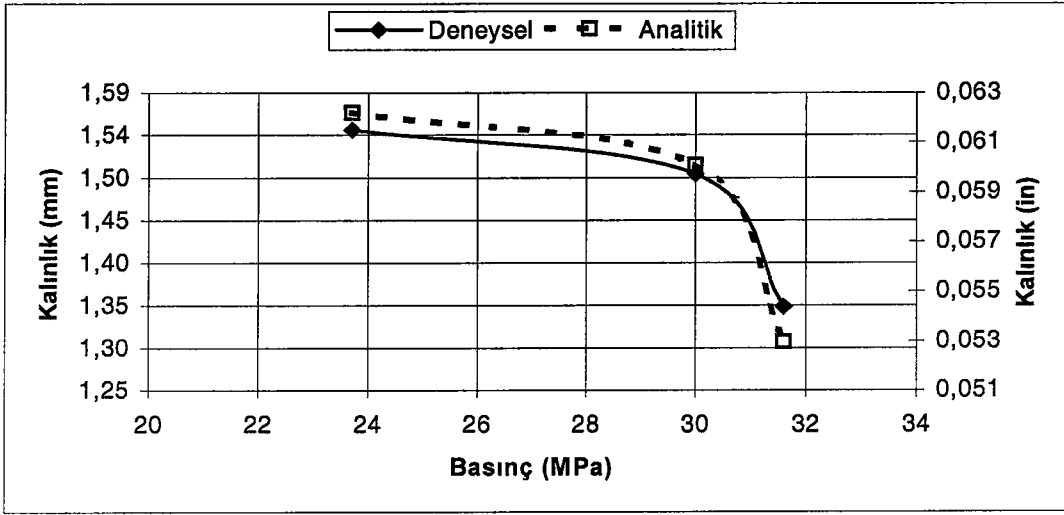
$$A = \frac{\ln \left[ \frac{r_\theta}{r_o} \right] \left[ \frac{3}{2} - \frac{r_\theta}{2r_\phi} \right]}{\frac{3}{2} - \frac{r_\theta}{r_\phi}}$$

## 5.2 Analitik Olarak Hesaplanan Kalınlık Değerlerinin Deneysel Sonuçlardan Elde Edilen Kalınlık Değerleri ile Karşılaştırılması

Şişirme işleminden sonra şişik bölgesinin tepesindeki kalınlık değerinin analitik olarak nasıl hesaplanabileceği bir önceki bölümde gösterilmişti. Düşük karbonlu çelik 1008 (AISI 1008) için yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen kalınlık ölçümleri ile analitik olarak hesaplanan değerlerin mukayesesi ve % hata oranı bu bölümde gösterilecektir. Yapılan mukayeseler grafikler halinde aşağıda Şekil 5.1, 5.2'de gösterilmiştir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 de sonuçları ve mukayesesi gösterilen düşük karbonlu çelik (1008 ) borular arasındaki tek farkın deformasyon öncesi sahip oldukları farklı boru kalınlıklarıdır. Şekil 5.1'deki borunun deformasyon öncesi kalınlığı 1.65 mm, Şekil 5.2'deki borunun deformasyon öncesi kalınlığı ise 2.0 mm'dir.

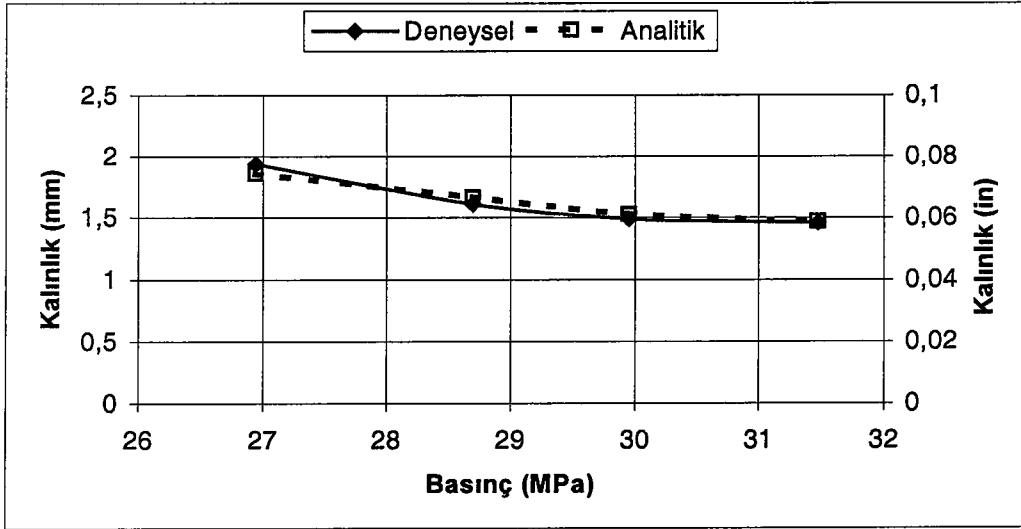
<b>Düşük Karbonlu Çelik (1008)</b>				
<b>İç Basınç</b> (MPa/ psi)	<b>Şişik</b> <b>Yüksekliği</b> (mm / in)	<b>Kalınlık</b> (Deneysel) (mm / in)	<b>Kalınlık</b> (Analitik) (mm / in)	<b>Hata</b> (%)
23.7 / 3436	1.32 / 0.052	1.55 / 0.061	1.57 / 0.062	-1.552
30.0 / 4350	2.39 / 0.094	1.50 / 0.059	1.51 / 0.059	-0.7905
31.6 / 4582	5.46 / 0.215	1.35 / 0.053	1.31 / 0.052	2.4469



Test Edilen Borunun Geometrik Özellikleri			
Boru Dış Çapı	Uzunluk ( $L_0$ )	Kalınlık ( $t_0$ )	Şişik Gen. (W)
2.25 in (57.15 mm)	8 in (203.2 mm)	0.065 in (1.65 mm)	2 in (50.4 mm)

Şekil 5.1 Şişik Tepesindeki Kalınlık Değerinin Deneysel Sonuçlar ve Analitik Yöntem Sonuçları ile Karşılaştırılması

Düşük Karbonlu Çelik 1008				
İç Basıncı (MPa / psi)	Şişik Yüksekliği (mm / in)	Kalınlık (Deneysel) (mm / in)	Kalınlık (Analitik) (mm / in)	Hata (%)
26.94 / 3906	2.08 / 0.082	1.94 / 0.076	1.86 / 0.073	4.2656
28.70 / 4161	5.12 / 0.202	1.61 / 0.063	1.67 / 0.066	-3.7728
29.95 / 4343	7.45 / 0.293	1.49 / 0.059	1.53 / 0.060	-2.51977
31.47 / 4563	8.45 / 0.333	1.46 / 0.057	1.47 / 0.058	-1.01134



Test Edilen Boru'nun Geometrik Özellikleri			
Boru Dış Çapı	Uzunluk ( $L_0$ )	Kalınlık ( $t_0$ )	Şişik Gen. (W)
2.25 in (57.15 mm)	8 in (203.2 mm)	0.0787 in (2.00mm)	2 in (50.4 mm)

Şekil 5.2 Şişik Tepesindeki Kalınlık Değerinin Deneysel Sonuçlar ve Analitik Yöntem Sonuçları ile Karşılaştırılması

## 6. GALVANİZLENMİŞ DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK (1008) İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSEL ÇALIŞMA

### 6.1 Düşük Karbonlu Çelik (AISI) 1008

Deneysel çalışmada kullanılan düşük karbonlu çelik (AISI 1008) malzeme, piyasada kolaylıkla bulunabilecek bir malzemedir. Deneyde kullanılan boru, sac malzemedен silindir makinasında soğuk bükme işlemi ve daha sonra da elektrik-direnç kaynağı yöntemi ile kaynak edilerek elde edilmiştir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi % 0.1 C, % 0.3-0.5 Mn, % 0.04 P, % 0.05 S şeklindedir. Malzeme ayrıca galvanizleme işlemine (EG) tabi tutulmuştur.

Borunun geometrik özellikleri ve çekme testinden elde edilmiş malzeme özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Düşük Karbonlu Çelik İçin Geometri ve Malzeme Özellikleri

Hollomon Kanunu ( $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ) (Kaynak: LTV Steel, USA, 1999)

Parametreler	Değerler
Boru Dış Çapı, $D_0$	57.15 mm (2.25 inch)
Kalınlık, $t_0$	2.00 mm (0.079 inch)
Çekme Gerilmesi, $\sigma_u$	312 MPa (45299 psi)
Akma Gerilmesi, $\sigma_y$	275 MPa (39943 psi)
Malzeme Dayanım Faktörü, (K)	490 MPa (71020 psi)
Pekleşme Üsteli, (n)	0.1587

### 6.2 Deneysel Sonuçlar

#### 6.2.1 Akma ve yırtılma basınçlarının hesaplanması

Akma ve yırtılma basınçları 6.2 ve 6.3 no'lu denklemlerin kullanılması ile yaklaşık olarak tahmin edilebilmektedir.

Yırtılma Basıncı;

$$P_{yirtilm} = \frac{\sigma_{UTS} t_0}{\left(r_0 - \frac{t_0}{2}\right)} \quad (6.2)$$

Akma Basıncı;

$$P_{akma} = \frac{\sigma_y t_0}{\left(r_0 - \frac{t_0}{2}\right)} \quad (6.3)$$

Yarıdaki formüllerde yer alan parametreler yerlerine konulduğunda aşağıda Çizelge 6.2 de verilen basınç değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 6.2 Düşük Karbonlu Çelik İçin Yırtılma Basıncı ve Akma Basıncının Analitik Olarak Belirlenmesi Sonucu Elde Edilen Değerler

Parametre	Değer
Hesaplanan Akma Basıncı	20.00 MPa / 2897 psi
Hesaplanan Yırtılma Basıncı	22.65 MPa / 3285 psi

### 6.2.2 Düşük karbonlu çelik için yapılan deneylerin sonuçları

Deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için tespit edilen basınç değerleri Çizelge 6.3'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmadan her bir basınç değeri için elde edilen şişik yükseklikleri de aynı çizelgede verilmiştir. Basınç ve şişik yükseklikleri bilgilerini kullanarak analitik olarak hesaplanan kalınlık değerleri de her bir basınç değeri için aynı çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Deneysel Çalışma Sonucu Elde Edilen Şişik Yükseklikleri ve Analitik Olarak Hesaplanan Boru Kalınlık Değeri  $D_0 = 2.25$  in (57.15 mm),  $L_0 = 8$  in (203.2 mm),  $t_0 = 0.080$  in (2.042 mm)

Basınç Değerleri (MPa / psi)	Ölçülen Şişik Yüksekliği ,h (mm / in)	Kalınlık, t (Analitik) (mm / in)	(%) İncelme (Analitik)
25.13 / 3644	2.35 / 0.092	1.836 / 0.072	49.40
25.87 / 3752	2.70 / 0.106	1.810 / 0.071	26.02
27.36 / 3967	3.73 / 0.147	1.735 / 0.068	20.15
28.41 / 4120	5.38 / 0.212	1.604 / 0.063	19.77
28.77 / 4172	5.47 / 0.215	1.597 / 0.062	13.25
29.68 / 4304	6.77 / 0.266	1.479 / 0.058	9.49
31.77 / 4607	10.35 / 0.407	1.357 / 0.053	8.20

### 6.3 Analiz

#### 6.3.1 Analitik model

Düşük karbonlu çelik malzemedeki bulunan ön gerinim değeri (4.2) no'lu denklemin kullanılması sureti ile 0.026 olarak hesaplanmıştır. Ön gerinim değeri hesaplandıktan sonra efektif gerilme ve efektif gerinimin hesaplanması gerekmektedir. Efektif gerilme ve efektif gerinim değerlerinin nasıl hesaplanacağına Bölüm 4'de değinilmiştir. Hesaplanan efektif gerilme ve efektif gerinim değerleri Çizelge 6.4'de verilmiştir.

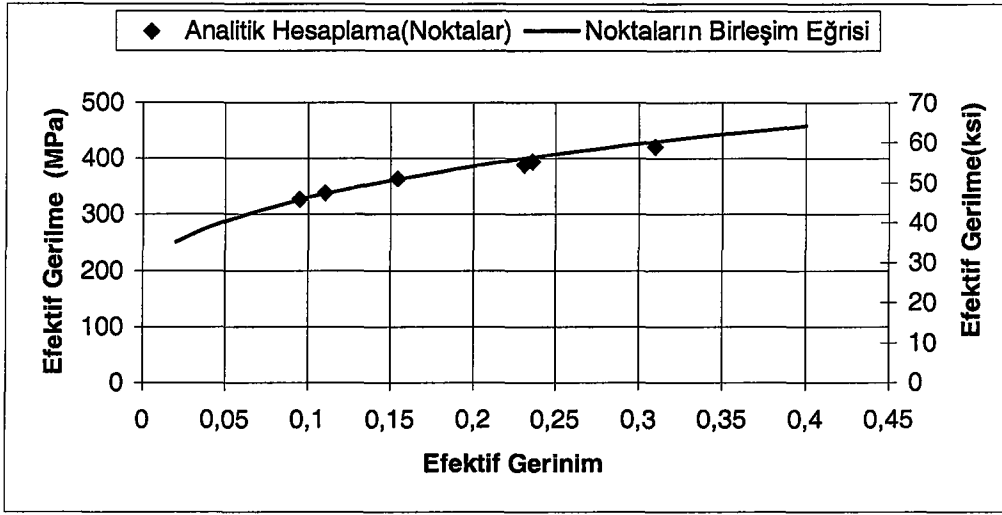
Çizelge 6.4 Her bir Basınç Değeri İçin Hesaplanan Efektif Gerilme ve Efektif Gerinim Değerleri

Efektif Gerilme (MPa / ksi)	Efektif Gerinim
327 / 47.40	0.095
338 / 49.10	0.110
364 / 52.80	0.154
389 / 56.43	0.231
394 / 57.54	0.236
421 / 61.05	0.310

Bulunan efektif gerilme ve gerinim değerleri, Krupkowsky denklemi kullanılarak malzemenin akma eğrisi çizilmiştir. Bu eğri Şekil 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.5 Düşük Karbonlu Çelik Malzemeler İçin Krupkowsky Kanununa ( $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$ ) Uygun Akma Gerilme Verileri

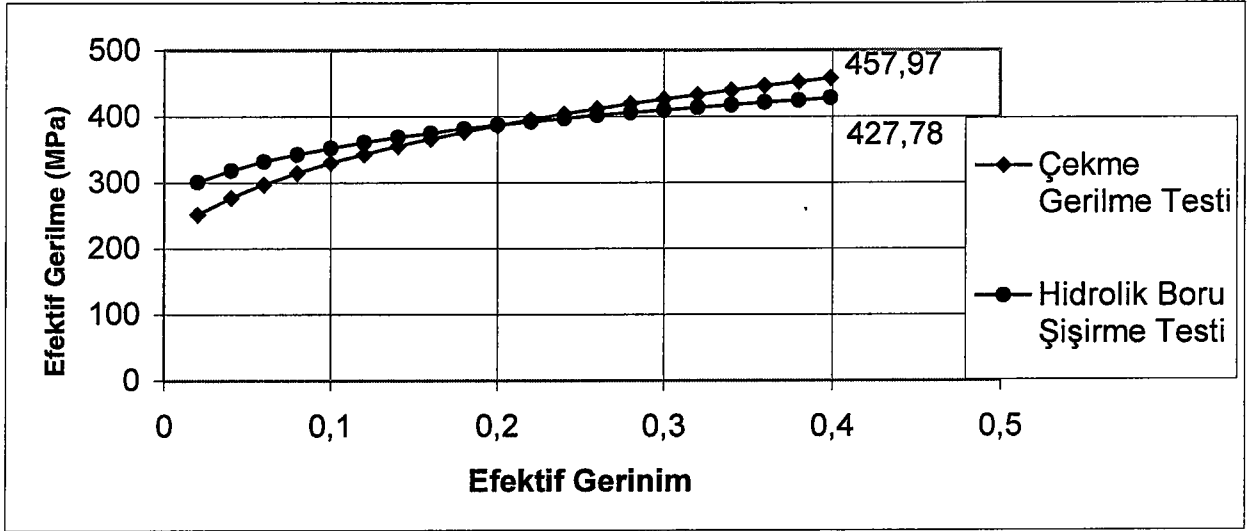
Parametre	Değer
Malzeme Dayanım Katsayısı (K)	577 MPa / 83.66 ksi
Pekleşme Üsteli (n)	0.27
Ön Gerinim ( $\epsilon_0$ )	0.026



Şekil 6.1 Düşük Karbonlu Çelik Malzemeler İçin Krupkowsky Kanununa ( $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n$ ) Uygun, En Küçük Kareler Metodu Kullanılarak Elde Edilmiş Akma Gerilme Eğrisi

#### 6.4 Çekme Deneyi ile Hidrolik Boru Şişirme Testinin Mukayesesi

Şekil 6.2, çekme deneyinden düşük karbonlu çelik için (AISI 1008) elde edilen akma gerilmesi ile Hidrolik Boru Şişirme testinden elde edilen akma gerilme eğrisini göstermektedir. Görüleceği üzere her iki test sonucu elde edilen eğriler tamamen aynı değildir. Ancak çok fazla fark da bulunmamaktadır. Bu sonuç bize göstermektedirki düşük karbonlu çelik için çekme deneyi ile hidrolik boru şişirme testi arasında çok önemli bir farklılık bulunmamaktadır. Ancak ERC/NSM'de değişik alaşımlı çelikler ve alüminyum malzemeler için bu farkın küçümsenmeyecek derecede fazla olduğu yapılan araştırmalar sonucu görülmüştür.



Şekil 6.2 Çekme Deneyinden Elde Edilen Akma Eğrisi ile Hidrolik Boru Şişirme Testinden Elde Edilen Akma Eğrisi

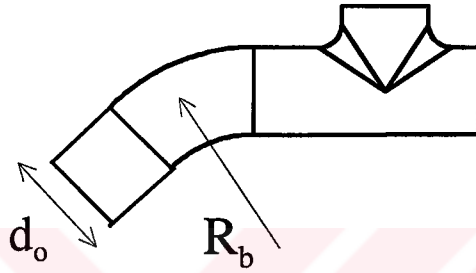


## 7. HİDROLİK BORU ŞEKİLLENDİRME TASARIM İLKELERİ

### Kural 1 – Boru Bükme Yarıçapı

Hidrolik boru şekillendirmede, Şekil 7.1 de görüldüğü gibi, hem iç basınç ile borunun belli bir bölgesini şişirme söz konusu hem de aynı boruyu belli bir yarıçapa bükme işlemi gerekli ise, şişirilmiş bölgenin hasar görmemesi veya deformasyona uğramaması için, bükme yarıçapı boru çapının 5 katından daha fazla olacak şekilde seçilmelidir.

$$R_b \geq 5d_o \quad (7.1)$$

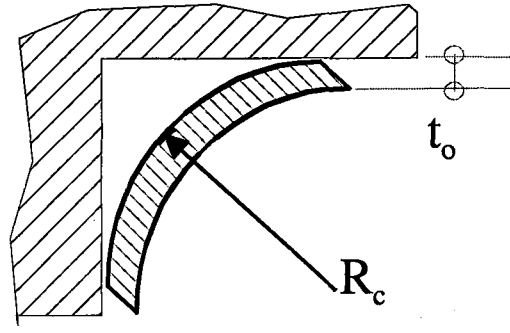


Şekil 7.1 Boru Çapı – Boru Bükme Yarıçapı

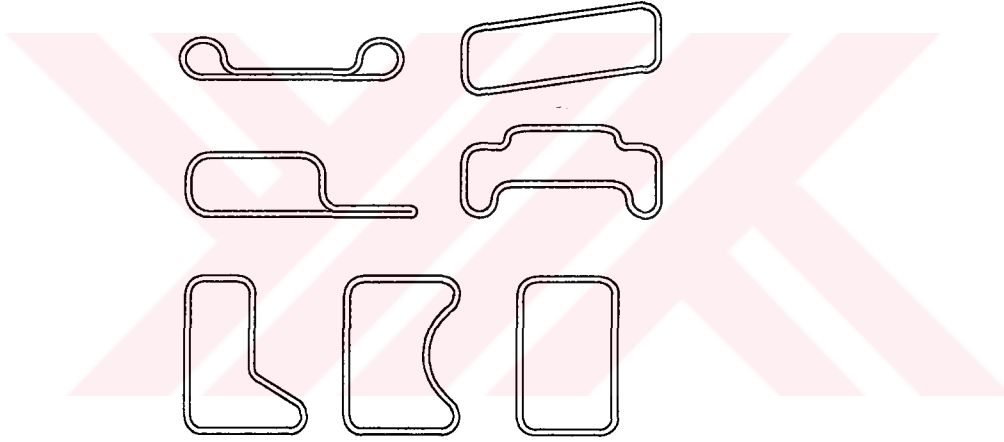
### Kural 2 – İç Basınç Artırımı ile Elde Edilebilecek Minimum Köşe Yarıçapı

Hidrolik Boru Şekillendirmede en önemli amaçlardan biri kalıp içinde bulunan parçanın uygun iç basınç artırımı ile kalıp boşluğunu dolduracak şekilde deforme edilmesidir. Kalıbın tasarımı sırasında, imal edilmesi planlanan parçanın şekillendirilebilirlik özelliğine göre kalıp köşe radyuslarının uygun değerlerde seçilmesi gerekmektedir. Bu radyus, çelik malzemeler için boru et kalınlığının 3 katından fazla olacak şekilde seçilmelidir. Bu orandaki bir köşe radyusu için gerekli iç basınç 2000 bar (200 MPa) civarındadır. Köşe radyusu küçük seçildikçe gerekli iç basınç da artmaktadır. İç basıncı arttırırken malzemenin şekillendirilebilirliği de mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. (Şekil 7.2)

$$R_c \geq 3t_o \quad (7.2)$$



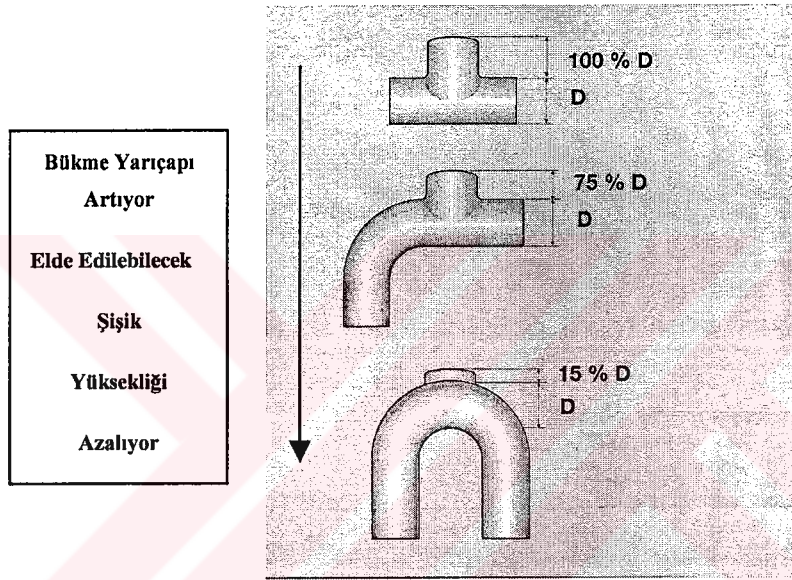
Şekil 7.2 Boru Köşe Yarıçapının Kalıp İçinde Şematik Gösterilişi



Şekil 7.3 Boru Köşe Yarıçapı Kuralına Bağlı Kalınarak İmal Edilebilen Boru Parçalarının Kesitleri

### Kural 3 – Asimetrik Şişik Yüksekliği Limiti

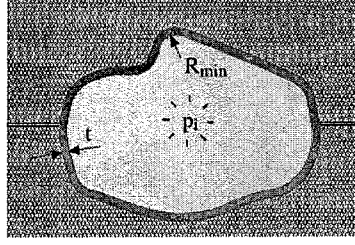
Hidrolik Boru Şekillendirme prosesinde önde gelen amaçlardan biri de uygun iç basınç artımı ile borunun istenen herhangi bir bölgesinde mümkün olduğu kadar fazla şişik yükseklikleri elde etmektir. Bu tür parçalar fonksiyonlu parçalar olup tek bir kalıpta imal edilebilmeleri açısından önemli derecede ekonomiktir. Yalnız bükme işlemi ile beraber şişirme işlemi bir anda olduğunda Şekil 7.4 de görüldüğü gibi bükme yarıçapının artması durumunda elde edilebilecek şişik yüksekliği de azalmaktadır.



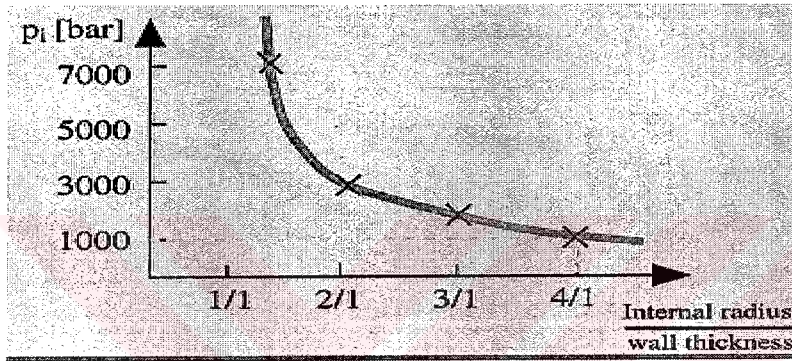
Şekil 7.4 Bükme Yarıçapı Artımı ile Elde Edilen Şişik Yüksekliği Azalması

### Kural 4 – Minimum Radyus için İç Basınç Değerleri

Gerekli iç basınç malzemenin akma gerilmesine, boru kalınlığına ve minimum yarıçapa bağlıdır. Şekil 7.5 kalıp içindeki borunun herhangi bir yerindeki minimum yarıçapı göstermektedir. Şekil 7.6 ise iç basınç ile minimum yarıçap / boru kalınlığı oranı eğrisidir. Minimum yarıçap ve boru kalınlığı bilindiği zaman gerekli basınç Şekil 7-6 da gösterilen eğri kullanılarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 7.5 Kalıp İçindeki Borunun Herhangi bir Yerindeki Minimum Yarıçap



Şekil 7.6 İç Basınç – Min.Yarıçap/ Boru Kalınlık Eğrisi (Schafer Company, 1996)

$$p_{i_{max}} = f(R_{min}, \bar{\sigma}, t) \quad (7.3)$$

$p_i$ : İç Basınç  $\bar{\sigma}$ : Akma Gerilimi

$R_{min}$ : Minimum Radyus  $t$ : Boru Kalınlığı

#### Kural 5 – Boru Çapının Boru Kalınlığına Oranı

Hidrolik şekillendirme işleminin, içi boş silindirik parçaların uygun iç basınç etkisi ile kalıp boşluğunu tam olarak alacak şekilde gerçekleştirilen bir proses olduğu daha önceden belirtilmişti. Parçanın son kademede kalıp boşluğuna iç basınç etkisi ile sıvanması işlemine kalibrasyon da denilmektedir. Başarılı bir proses için en önemli nokta uygun çapta ve kalınlıkta borunun seçilmesidir. Bunun için boru çapının boru kalınlığına oranı önemli rol oynar hale gelmiştir.

Optimum boru çapı – boru kalınlığı oranı  $D/t=20 - 45$  arasındadır.

Boru apı:  $D$  Boru Kalınlığı:  $t$

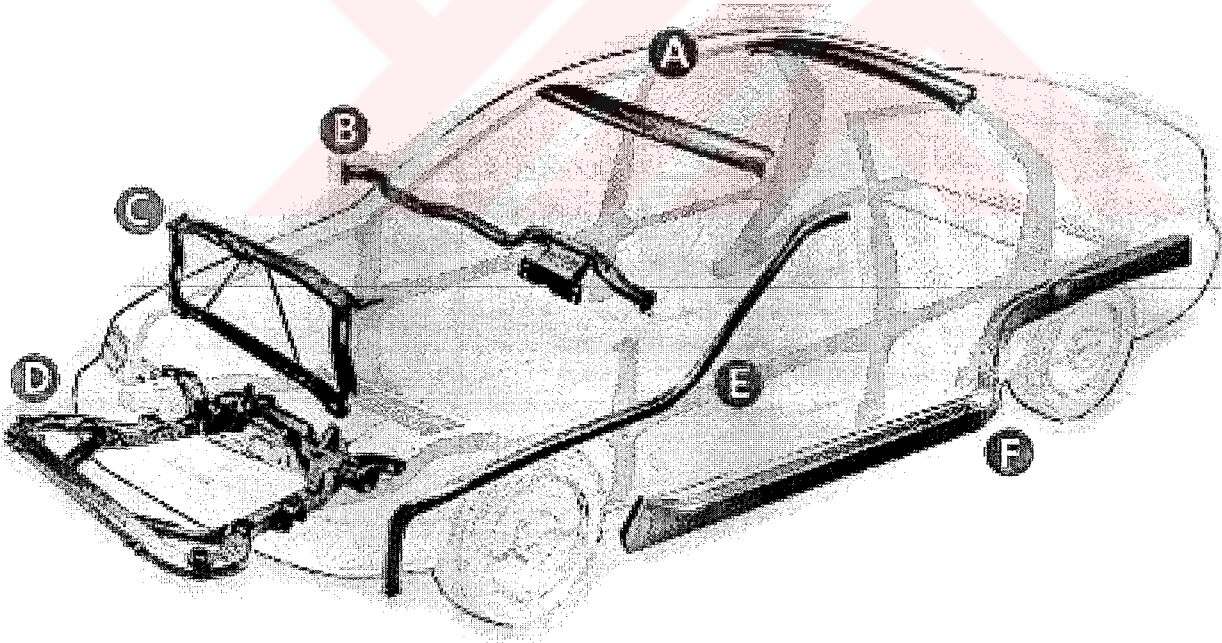
- $D/t > 45$ , ise yırtılma veya buruşma (buckling) riski oluşmaktadır.
- $D/t < 20$ , ise artan kalınlıklarda buruşma uzunluğu da artmaktadır.



## 8. HİDROLİK BORU ŞEKİLLENDİRMENİN BASMA/DERİN ÇEKME YÖNTEMLERİNE GÖRE AVANTAJLARI

Hidrolik boru şekillendirme prosesinin basma/derin çekme proseslerine oranla, ağırlık, proses hızı ve maliyet noktalarında daha önemli kazançlar sağladığı bilinmektedir. Daimler-Benz şirketinin son yıllarda yaptığı bir araştırmaya göre otomobil ağırlığındaki 100 kg'lık bir azalma, her 100 km için 0.15 ile 0.4 lt arasında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Yine aynı şirketin yaptığı deneysel çalışmalar sonucu hidrolik boru şekillendirme yöntemi sayesinde otomobilde, ağırlıktaki kazanım % 40'lara kadar ulaşmaktadır. Bu noktadan yola çıkılarak hidrolik boru şekillendirme'nin basma/derin çekme yöntemine olan üstünlükleri ile ilgili bazı örnekler verilmiştir.

Şekil 8.1 hidrolik boru şekillendirme yöntemi kullanılarak imal edilmiş bazı parçaları göstermektedir. Bu parçalar basma veya derin çekme prosesleri kullanılarak imal edilmiş olsalardı öncelikle birden fazla kalıba ve birleştirme işlemine ihtiyaç duyulacaktı.



Şekil 8.1 Otomobilde Kullanılan Hidrolik Boru Şekillendirme Yöntemi ile İmal Edilmiş Parçalar (Variform, 1999)

A. Tavan Destekleri

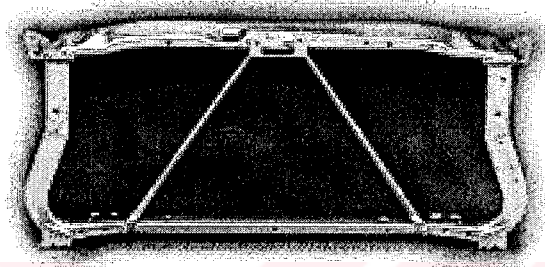
B. Ön Panel Desteği

C. Radyatör Desteği

D. Motor Alt Desteği

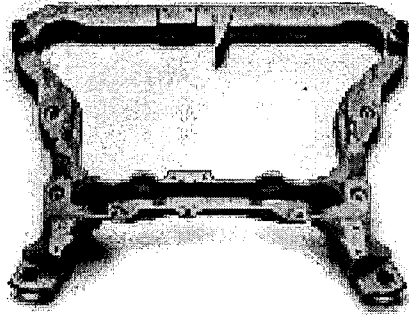
E. Yan Destekler

Şekil 8.2 ve Şekil 8.3 de örnek olarak gösterilen iki adet parçaya ait tablolardan da açıkça görüleceği üzere gerek parça adedi gerekse ağırlık noktalarında hidrolik boru şekillendirme yöntemi açık bir şekilde derin çekme/basma yöntemlerine nazaran üstündür.



Şekil 8.2 Radyatör Destek Parçası (Variform, 1999)

	<b>Derin Çekme/Basma</b>	<b>Hidrolik Boru Şekillendirme</b>
Parça Adedi	17	10
Ağırlık	16,5 kg	11,5 kg



Şekil 8.3 Radyatör Alt Destek Parçası (Variform, 1999)

	<b>Derin ÇekmeBasma</b>	<b>Hidrolik Boru Şekillendirme</b>
Parça Adedi	6	1
Ağırlık	12 kg	8 kg

Çizelge 8.1’de motor destek parçası için basma/derin çekme prosesi ile hidrolik boru şekillendirme prosesinin hem çelik hem de alüminyum parça kullanılması durumunda parça sayısı, ağırlık, takım ve parça maliyeti yönünden mukayesesi gösterilmiştir. Çelik parça için Hidrolik Boru Şekillendirme yönteminin alışılmış yöntemlere ve alüminyum’a oranla daha ekonomik olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.1 Proseslerin Parça Sayısı, Ağırlık ve Maliyetler Yönünden Karşılaştırılması  
([www.hydroforming.net](http://www.hydroforming.net), 2000)

İmalat Yöntemi	Parça Sayısı	Ağırlık (kg)	Takım Maliyeti (US \$)	Parça Maliyeti (US \$)
Basma/Derin Çekme	34	24,56	5,359,090	51
Hidrolik Boru Şekillendirme (Çelik)	30	20,50	3,712,636	42,83
Hidrolik Boru Şekillendirme (Alüminyum)	30	14,41	3,891,727	73,17

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 9.1 Sonuçlar

Çekme Gerilme testinden elde edilen malzeme akma özellikleri ile Hidrolik Şişirme testinden aynı malzeme için elde edilen akma özellikleri aynı değildir. Bu çalışmada düşük karbonlu çelik test edilmiş ve sözkonusu malzemenin çekme deneyi ve hidrolik boru şişirme testinden elde edilen akma eğrilerinin aynı olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak bu farklılığın da kabul edilebilir bir fark olduğu da söylenebilir. Unutulmamalıdır ki, farklı çelik alaşımları için bu farkın son derece fazla olduğu ERC/NSM'deki çalışmalardan bilinmektedir. Elde edilen K ve n değerleri Sonlu Elemanlar Analiz yazılımlarında kullanılacağından bu değerlerin son derece dikkatlice elde edilmesi gerekmektedir. Az miktarda bir fark bile prosesin simülasyonunu etkileyebilmektedir.

Şişik bölgesinin en üst noktasındaki deformasyon sonrası kalınlığın analitik olarak hesaplanabilmesi için geliştirilen analitik teknik, deneysel sonuçlar ile çok yaklaşık sonuçlar vermiştir. Böylece bu tekniğin başarılı olduğu da ispatlanmıştır.

Hidrolik Boru Şekillendirme yöntemi günümüzde alışılmış yöntemlere oranla çok daha ekonomik ve hızlı bir proses olma özelliğini sürdürmektedir. Hidrolik Boru Şekillendirme konusunda hala sürüp giden araştırmalara bu çalışma da malzeme özelliklerinin tespiti yönünden önemli katkıda bulunmuştur. Kısa başlıklar halinde sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Hidrolik boru şişirme testi boru malzemelerin akma özelliklerini tespit etme işleminde Kullanılabilir
- Hidrolik boru şekillendirme ve çekme deneyinden düşük karbonlu çelik (1008) için elde edilen akma eğrilerinin önemli oranda farklılık göstermedikleri tespit edilmiştir.
- Deformasyon sonrası şişik bölgesinin üst noktasındaki kalınlık değerinin analitik olarak hesaplanabilmesi için geliştirilen formül yaklaşık +/- %5 hata oranı ile deneysel sonuçlara yaklaşmaktadır.
- Hidrolik boru şekillendirme prosesi; parça sayısı, parça ağırlığı ve dolayısıyla sağladığı ekonomi itibarıyla diğer proseslere oranla oldukça önemli avantajlar sağlamaktadır.

## 9.2 Öneriler

Geleceğe yönelik olarak planlanan çalışmalardan bazıları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Şişik bölgesinin deformasyon sonrası en üst noktasındaki kalınlık değerinin analitik olarak hesaplanmasında ortaya çıkan % 5 hatanın analitik yöntemin geliştirilmek suretiyle daha da düşürülmesi
- Boru malzemeler için analitik yöntem ile elde edilmiş K ve n değerlerinin Sonlu Elemanlar Metodu programlarında kullanılarak prosese ait gerçek simülasyonların gerçekleştirilmesi
- Yapılan deneysel çalışmalara devam edilerek değişik dış çap ve kalınlık değerlerine sahip boru malzemelerin akma özelliklerine ait bir veritabanının oluşturulması
- Tüm deneysel çalışmaların sonuçlarının toparlanması ve elde edilen sonuçların yorumlanması ile hidrolik boru şekillendirme prosesine ait tasarım ilkelerinin geliştirilmesi

**KAYNAKLAR**

Ahmed, M., ve Hashimi, M.S.J., (1997), Estimation of Machine Parameters for Hydraulic Bulge Forming of Tubular Components. Journal of Materials Processing Technology, v.64, pp. 9-23.

Ahmetoğlu, M., Kinzel, G., ve Altan, T., (1992), Improvement of Part Quality in Stamping by Controlling Blank Holder Force and Pressure ERC/NSM Report# S-92-12 The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Ahmetoğlu, M., Coremans.A.L.P., Kinzel, G., ve Altan, T., (1992), Deep Drawing of Round Cups Using Variable Blank Holder Force”, ERC/NSM Report # 92-50-S, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Ahmetoğlu, M., Kinzel, G., ve Altan, T., (1996), “Advanced Techniques to Improve the Formability of Aluminum Alloys.” Proceedings of PMA Symposium on Manufacturing Strategies, Nashville-Tennessee, March 17-20

Aida, K., (1992), Aida Press Handbook, Aida Engineering Ltd.

Altan, T., (1996), Practice Oriented Research In Sheet Forming (Present and Potential Applications), Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9

Altan, T., Oh, S., ve Gegel, H. L. ( 1983). Metal Forming: Fundamentals and Applications. Metals Park, OH, American Society for Metals (ASM).

The Aluminum Association, Aluminum Standards and Data, (1997)

American Society of Metals (ASM), (1988), Metals Handbook, Forming and Forging, v.14.

Antonidis, J. E., (1949), Condensed Practical Aids for the Experienced Die Engineer, Die Designer and Die Maker, Chicago IL, Die Techniques Publishers

Arnold, B., Ahmetoğlu, M., ve Altan, T., (1998), Evaluation of Material Formability in Tube Hydroforming ERC/NSM Report # THF/ERC/NSM 99-R-9, The Ohio State University Columbus, OH, USA

Arnold, J., (1980), Die Makers Handbook, Jeffersontown KY, Arntech Publishers Inc.

Bhupatiraju, M., (1993), An Investigation of Bend Angle and Springback Control In Straight Line Bending, M.S. Thesis, Science and Engineering Library, THE:IND1993MS B58 The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Bobbert, S., Bischer, M., Ahmetoğlu, M., ve Altan, T., (1997), Tool and Process Design for THF- A State-of-the-Art Review and Applications of Computer Simulations, ERC/NSM Report #: THF/ERC/NSM-97-R-002, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

Bryant, J.D., (1996), Formability of Aluminum Autobody Sheet. Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9, 1996

Carden, D. William., (1997), Springback After Drawing and Bending of Metal Sheets, M.S. Thesis, Science and Engineering Library, THE:MTL1997MS C372, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Conrad, R., (1975), Drawbead Design for Deep Profiles, Automotive Engineering Congress and Exposition, Society of Automotive Engineers, SAE Paper # 750130, Detroit, MI, USA

Cope, R. S., (1953), "You Can Draw Rectangular Shells by Following Certain Rules", American Machinist, v.97, pp. 156-159

Cubberly, W. H., ve Bakerjian, R., (1989), Tool and Manufacturing Engineers Handbook. 4<sup>th</sup> ed. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan,

Davies, R.G., (1981), Springback in High Strength Steels. Journal of Applied Metalworking. Vol.1 no.4 pp.45-52

Designing for Sheet Metal Stampings Product, Process, Tooling, Material. Forming Technologies Incorporated ve Keeler, Romulus-Michigan, April 7-9, 1992

Dohmann, .F., ve Hartl, C., (1996), "Hydrofoming- A Method to Manufacture Light-Weight Parts", Journal of Materials Processing Technology, v.60, pp. 669-676

Dohmann, F., ve Hartl, C., (1998), "Hydroforming Components for Automotive Applications", Fabricator, February 1998, pp. 30-38.

Dohmann, F., (1998), Tube Hydroforming: Research and Practical Applications. 2<sup>nd</sup> International Conference on Innovations in Hydroforming Technology, Columbus-OH, September 15-17, 1997

Dutschke, W., (1958), The Basics of Deep Drawing of Noncircular Prismatic Components (Almanca), Dr.Ing., thesis, Technische Hochschule, Stuttgart

Eary, D. F., ve Reed, E. A., (1974) "Techniques of Pressworking Sheet Metal, An Engineering Approach to Die Design" 2<sup>nd</sup> ed, New Jersey, Prentice-Hall

Ebbinghaus, A., (1993), Precision Lightweight Construction Workpieces Made by Internal High Pressure Forming Reprint from Metallumformtechnik, pp. 15-19.

Gerdeen, J.C., ve Duncan, J.L., (1986), "Springback In Sheet Metal Forming", AISI Project, Project #1201-456

Gillanders, J., (1997), "Pipe and Tube Bending Manual" Rockford, IL, Fabricators & Manufacturers Association, International

Granelli, T., (1997), Applying Tube Bending Fundamentals to Production. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Hayashi, H., (1996), The Control of Shape Fixation and Springback of Aluminum Alloy Sheet in Model Forming, Society of Automotive Engineers, SAE Paper # 960819

Hayashi, H., (1996), The State-Of-Art Of Stamping Technology in Japan. Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9, 1996

Herderich, M.R., (1990), Experimental Determination of the Blankholder Forces Needed for Stretching Draw Die Design, Society of Automotive Engineers, SAE Paper # 900281

Hobbs, R., (1974), Section I: Classification of Sheet Metal Operations, Prediction and Analysis of Press Performance for Sheet Steels. BPH Technical Bulletin, 18, 1-13.

Holt, R., (1998), Advances in Forming of Aluminum Sheet for Automotive Applications. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Horton, F., (1997), Using Forming Simulation in the Development of Complex Hydroformed Shapes. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Hosford, W., ve Caddell, R. (1993) Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. New Jersey: Prentice Hall.

Kalpakjian, S., (1991), Manufacturing Processes for Engineering Material. Addison-Wesley.

Karafilis, P. Apostolos., ve Boyce, C.M., (1996), "Tooling and Binder Design for Sheet Metal Forming Processes Compensating Springback Error", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.36, no.4, pp.503-526

Karima, M., (1998), Formability & Springback Tools for Up-front Feasibility of Stampings. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Kaya,S., Thomas, W. ve Altan, T., (1999),"Manufacturing Design Rules for Stamping and Hydroforming of Light & Medium Truck Frames" ERC Report# S/ERC/NSM-99-R-17-A, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA

Keeler, S., (1997), Solving Sheet Metal Forming Problems with Data. Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9, 1996

Klass, F., (1997), Innovations in High-Pressure Hydroforming. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 15-7, 1998

Koc., M., (1998), "Development of Guidelines for Part, Process and Tooling Design in the Tube Hydroforming (THF) Process: Classification of THF Parts and Analytical Models for Prediction of Process Parameters", ERC Report # THF/ERC/NSM-98-R-34, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Koehr, R., (1998), ULSAB- A Steel Lightweight Design Concept for Body Structures. 2<sup>nd</sup> International Hydroforming Congress, Innovations and the Latest in R & D, Nashville-Tennessee, November 18-19, 1998

Koelzer, H., (1949) "The Behaviour of Deep-Drawing Sheets as a Function of the Testing Method", Dr.-Ing. Thesis, Technische Hochschule, Braunschweig

Kojima, N., "Effects of Drawbead Geometry on Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., Amagasaki, Hyogo, Japan.

Lange, K., (1985), Handbook of Metal Forming, New York, McGraw-Hill Company.

Laxhuber, T.,(1997), "Experimental Investigation of Flat Surface - Straight Edge and Flat Surface Convex Edge Flanging and Hemming", ERC Report #: ABC-ERC/NSM-97-R-022, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Leitloff, F.U., (1996), "Hydroforming of Automotive Components with Schaefer ASE Method", EFB-Colloquium, March 1996, Stuttgart, Germany.

Li, X., Sutter, K., Sokolowski, T., Koç, M., Ahmetoğlu, M., ve Altan, T., (1997), "Tube Hydroforming Using Viscous Medium- Tool Design, FEM Simulation, and Experimentation", ERC/NSM Report # THF/ERC/NSM-97-R-011, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

Limb, M.E., Chakrabarty, J., Garber, S., ve Roberts, W.T., (1976), "Hydraulic Forming of Tubes", Sheet Metal Industries, November 1976, pp. 418-424.

Longhouse, B., (1997), An Introduction to Recognizing Potential Applications and Product Design. 2<sup>nd</sup> Automotive Tube Conference: Tube Hydroforming, Producing, Bending, & Welding. Tube & Pipe Association, Dearborn-Michigan, May 13-14, 1997

Lorenz, U., Aust, M., Ahmetoğlu, M., ve Altan, T., (1997), "Evaluation of Friction in THF- Review of Existing Methods and Tool Design", ERC/NSM Report # THF/ERC/NSM-98-R-07, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

McDaniel, G., (1997), "Bending tube with short tangents: meeting the challenge when there is no alternative" Tube and Pipe Journal, May 1997, TPJ, pp.22-23.

Mehta, M., (1998), Control of Springback in Automotive Stamping. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Meuleman, D., (1996), The Formability of Sheet Steels-A Modern Prospective. Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9, 1996

Miedema, A., (1996), Six Critical Elements to Improve Progressive Stamping Die Performance, Proceedings of PMA Symposium on Manufacturing Strategies, Nashville-Tennessee, March 17-20, 1996

Miedema, A., (1997), , Taking the Mystery Out of Progressive Dies, Capitol Engineering Michigan, Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 6-8, 1997

Müderrisoğlu, A., (1998), Improved Design Methodology for Pre-hemming & Hemming of Auto Body Panels, 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Oehler, G., (1966) Design of Drawn Sheet - Metal Components (in German), Konstruktionsbucher, no.11, Berlin/Gottingen /Heidelberg, Springer.

Oldacre, L., (1997), Introduction to Tube Bending for Hydroforming Applications, 2<sup>nd</sup> Automotive Tube Conference: Tube Hydroforming, Producing, Bending, & Welding. Tube & Pipe Association, Dearborn-Michigan, May 13-14, 1997

PMA Design Guidelines for Precision Metal Stampings and Fabrication, (1992), OH, Precision Metalforming Association

Pool, G., (1996), Fundamentals of Stamping Dies, Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9, 1996

Pool, G., (1997), Design for Manufacturability (DFM) of Sheet Metal Die Stamped Parts, Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 6-8, 1997

Romanowski, E., (1959), Handbook of Blanking Technology (in German), Berlin, VEB Verlag Technik.

Sanchez, L.R., Robertson, D., ve Gerdeen, J.C., (1996), "Springback of Sheet Metal Bent to Small Radius/Thickness Ratios", Society of Automotive Engineers, SAE Paper #: 960595

Schäfer Company (April 1996) Technological Guidelines for ASE Components Method: Forming by Internal High Pressure, Wilnsdorf Germany, Schäfer Hydroforming GmbH & Co.

Schaeffler, Daniel J., Stoddard, David A., ve Horvath, Curt D. "Quasi-Static Dent Resistance Evaluations And Formed Panel Properties Of Door Assemblies." Proceedings from Materials & Body Testing Vol. 21, 1-3 Oct. 1996: 3.

Schuler GmbH. (1998) Metal Forming Handbook. Springer-Verlag, Berlin.

Semiatin, S. (Ed.). (1988) Deep Drawing. Metals Handbook, 14: Forming and Forging, American Society of Metals, 575-590.

Shah, S., ve Bruggeman, C., (1997), Hydroforming Product and Process & Requirements and Implementations. 2<sup>nd</sup> Automotive Tube Conference: Tube Hydroforming, Producing, Bending, & Welding. Tube & Pipe Association, Dearborn-Michigan, May 13-14, 1997

Shawki, G., (1961) Deep Drawing without Blankholder in Dies Having Various Throat Geometries (in German), Werkstattstechnik, 51,pp.476-479

Shiuan-Guang Shr, Koc, M., Ahmetoglu, M., ve Altan, T., (Jan.1999) Bending of Tubes for Hydroforming ERC Report, #: THF/ERC/NSM/-99-R-1, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Siebel, E., ve Beisswanger, H., (1955) "Deep Drawing" (in German), Munchen, Carl Hanser  
 Siegert, K., (1998), Recent Developments in Hydroforming Technology. 3<sup>rd</sup> International  
 Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Siegert, K., (1998), Design of Draw Dies. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal  
 Forming Technology, Columbus-OH, October 5-7, 1998

Siekirk, J. (1986) Process Variable Effects on Sheet Metal Quality. Journal of Applied Metal  
 Working, 4, #3, 262-269.

Smith, D. A., (1990), Die Design Handbook, 3<sup>rd</sup> ed., Dearborn Michigan, Society of  
 Manufacturing Engineers

Sokolowski, T., Gerke, K., Koç, M., Ahmetoğlu, M., ve Altan, T., (1998), "Evaluation of  
 Tube Formability and Material Characteristics in Tube Hydroforming", ERC/NSM Report #  
 THF/ERC/NSM-98-R-025, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

Sowers, H., Delbeke, R., ve Mallon, B., (1996), Latest Advances in Aluminum Formability  
 Technology Used in The United States, Canada, Mexico and Europe. Proceedings of Latest  
 Advances in Sheet Metal Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-  
 9, 1996

Suchy, I., (1997), Handbook of Die Design, New York, McGraw-Hill

Tang, C.S., (1996), Springback Prediction, Proceedings of Latest Advances in Sheet Metal  
 Forming Technology, University of Wisconsin-Milwaukee, May 7-9, 1996

T.G. Burk, K.V. Chandorkar, J.M. Story, A. Assempoor, J. Kolodziejcki, (1996), "Tool  
 Design for Aluminum Stamping", Aluminum and Magnesium for Automotive Applications,  
 The Minerals, Metals & Materials Society

Thomas, W., Alvarado, Ahmetoğlu, M., Akgerman, N., ve Altan, T., "State of the art Review:  
 Stamping Parameters and Their effect on Sheet Metal formability" ERC/NSM Report #  
 ERC/NSM-96-33-S, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

Thomas, W., ve Altan, T., (1998), Part & Process Design for Stamping, Using FEM  
 Simulations. 3<sup>rd</sup> International Conference on Sheet Metal Forming Technology, Columbus-  
 OH, October 5-7, 1998

Tüfekçi, S., Wang, C.T., Kinzel, G., ve Altan, T., "Drawbead Design and Estimation of  
 Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", ERC/NSM Report # 93-13-S, The Ohio State  
 University, Columbus, OH, USA

Waller, J.A., (1978), Drawing and Pressing, Press Tools and Presswork, Portcullis Press,  
 Burgess Hill, Great Britain.

Wenner, L. M., (1980), Research Report: An Analysis of Springback Under Combined  
 Bending/Tension, General Motors Research Laboratories, Report #: MA-195, Nov. 24 1980,  
 Warren, Michigan

Wick, Charles.,(1984) Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Forming, Vol 2., 4<sup>th</sup> ed.Dearborn Michigan, Society of Manufacturing Engineers

Wood, W. W., (1963), Final Report on Sheet Metal Forming Technology, Advanced Fabrication Techniques Branch, Manufacturing Technology Laboratory, v.1, Aeronautical Systems Division, US Air Force, Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA

Yoshida, K., (1987), Handbook of Ease or Difficulty in Press Forming. The Japan Sheet Metal Forming Research Group. Nikkan Kogyo Shimbun Sha, Japan. National Center for Manufacturing Sciences (NCMS)

Yurci, M.E., (1998), “Yüksek Lisans Talaşsız Şekil Verme 1 & 2 Ders Notları” Yıldız Teknik Üniversitesi

Zharkov, V.A., (1995), Theory and Practice of Deep Drawing, MEP Limited, London



**EKLER**

- Ek A İç Basınç, Teğetsel Gerilme ve Eksenel Gerilme Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi
- Ek B Eksenel Yöndeki Yarıçapın Hesaplanması
- Ek C Şişik Bölgesinin Üst Noktasındaki Eksenel Gerilmenin Tespiti
- Ek D Plastisite Teorisinin Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesine Uygulanması



## Ek A İç Basınç, Teğetsel Gerilme ve Eksenel Gerilme Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Hidrolik şekillendirme esnasında boruda bulunan iç basınç, teğetsel gerilme ve eksenel gerilme arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için membran teorisi kullanılmaktadır. Boru kalınlığının az olması sebebiyle bu teorem kullanılmaktadır. Dolayısıyla boruda kalınlık yönünde meydana gelebilecek bükme momenti ihmal edilmektedir. Membran(zar) teorisi aşağıdaki koşullar sağlandığında geçerlidir.

- 1)  $D/t \gg 20$  (Thin wall membrane theory) (Boru Çapı:  $D$  Boru Kalınlığı:  $t$ )
- 2) Şekillendirme esnasında boru sadece iki yönlü gerilmeye maruz kalmaktadır.  
Bunlar teğetsel ve eksenel gerilmelerdir.
- 3) Boruda kalınlık yönünde bükme gerilmeleri oluşmamaktadır.
- 4) Şişgin tepe noktasındaki en küçük eleman borunun akma gerilme bilgisini elde etmede kullanılacaktır.

Şekil A.1 de görüldüğü gibi herbir elemana etki eden değişik üç adet kuvvet bulunmaktadır. Bunlardan ilki iç basıncın etkisiyle ortaya çıkmaktadır ve A-1 de gösterilmiştir.

$$dF_p = PdA = P(r_\theta d\theta)(r_\phi d\phi) \quad (A-1)$$

İkincisi teğetsel gerilme olup çevresel olarak etki etmektedir ve A-2 de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$dF_{\theta 1} = dF_{\theta 2} = \sigma_\theta r_\phi d\phi t \quad (A-2)$$

Üçüncü kuvvet ise eksenel yönde etki etmektedir ve A-3 de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$dF_{\phi_1} = \sigma_{\phi} r_{\theta} d\theta t \quad (\text{A-3})$$

ve

$$dF_{\phi_2} = (\sigma_{\phi} + d\sigma_{\phi}) r_{\theta} d\theta (t + dt) \quad (\text{A-4})$$

Şekil A.2 den,  $\theta$ -ekseni yönündeki kuvvetler dengesinin yazılması A-5'i vermektedir.

$$dF_{\theta_1} \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) = dF_{\theta_2} \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (\text{A-5})$$

Doğal olarak;

$$dF_{\theta_1} = dF_{\theta_2} \quad (\text{A-6})$$

Şekil A.3 den, aksenal yöndeki (Z-ekseni) kuvvetler dengesi A-7 deki gibidir.

$$dF_{\phi_1} \cos\left(\frac{d\phi}{2}\right) = dF_{\phi_2} \cos\left(\frac{d\phi}{2}\right) \quad (\text{A-7})$$

Doğal olarak;

$$dF_{\phi_1} = dF_{\phi_2} \quad (\text{A-8})$$

Şekil A-2 ve Şekil A-3 kullanılarak normal yöndeki kuvvetler dengesi A-9 daki gibi yazılabilir.

$$dF_p - dF_{\phi_1} \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) - dF_{\phi_2} \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) - dF_{\theta_1} \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) - dF_{\theta_2} \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (\text{A-9})$$

A-6 ve A-8 denklemlerinin yardımıyla A-9 denklemi A-10 daki hale getirilebilir.

$$dF_p - 2dF_{\phi_1} \sin\left(\frac{d\phi}{2}\right) - 2dF_{\theta_1} \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (\text{A-10})$$

Küçük açılar için. ( $\sin(A) = A$ ) olduğundan A-10 denklemi A-11 deki hale indirgenebilir.

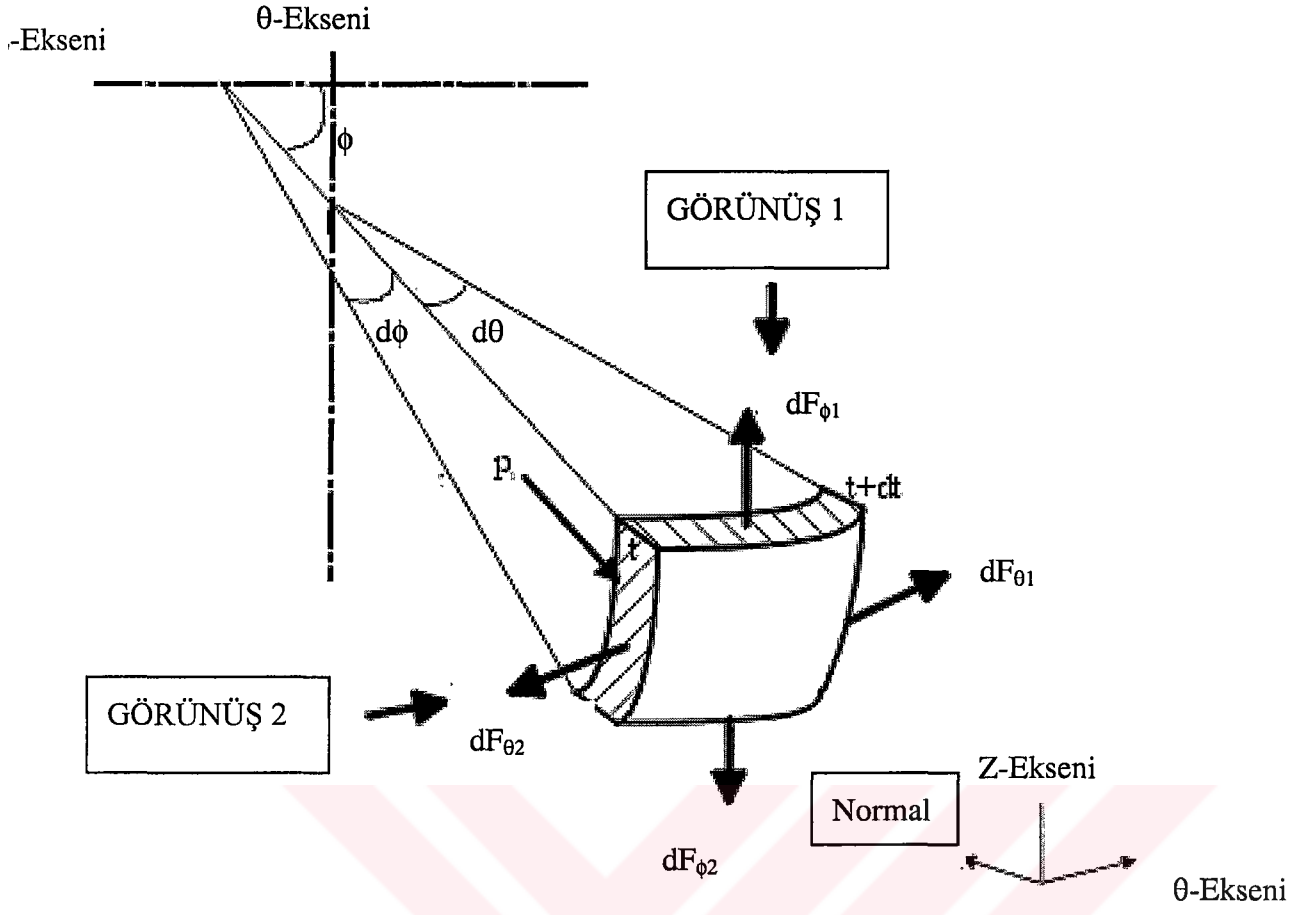
$$dF_p - 2dF_{\phi_1} \left(\frac{d\phi}{2}\right) - 2dF_{\theta_1} \left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (\text{A-11})$$

A-1, A-2 ve A-3 denklemleri A-11 denkleminde yerine konursa A-12 denklemi elde edilir.

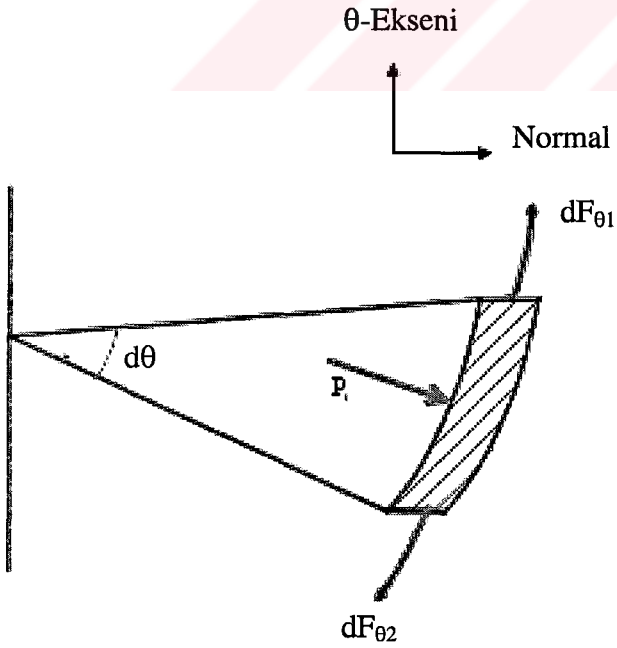
$$P(r_\theta d\theta)(r_\phi d\phi) - 2\sigma_\phi r_\theta d\theta t \left(\frac{d\phi}{2}\right) - 2\sigma_\theta r_\phi d\phi t \left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (\text{A-12})$$

Sonuç olarak, iç basınç, teğetsel ve eksenel gerilme arasındaki ilişki A-13 denklemi ile ifade edilebilmektedir.

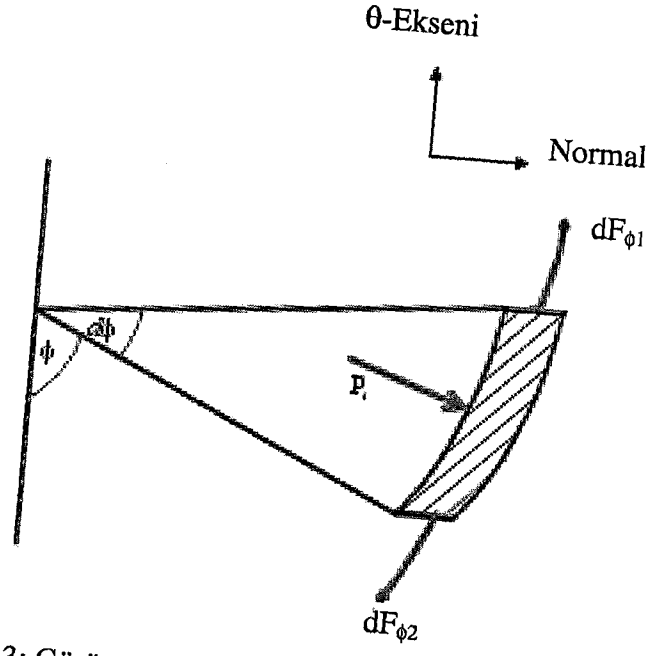
$$\frac{P}{t} = \frac{\sigma_\phi}{r_\phi} + \frac{\sigma_\theta}{r_\theta} \quad (\text{A-13})$$



Şekil A 1: Şişik Bölgesinin Ortasındaki Elemana Etki Eden Reaksiyon Kuvvetleri



Şekil A 2: Görünüş 1 de Elemana Etki Eden Kuvvetler



Şekil A 3: Görünüş 2 de Elemana Etki Eden Kuvvetler

### EK B Eksenel Yöndeki Yarıçapın Hesaplanması

Deneysel çalışmadan sonra şişik yüksekliğinin ölçülmesi ile eksenel yöndeki yarıçapın ( $r_\phi$ ) hesaplanması mümkündür. Bu hesaplama işleminde, şişik bölgesinin tam dairesel şekilde olduğu ve kalıp köşelerine teğet olduğu kabul edilmektedir. Şekil B.1 den anlaşılacağı üzere  $\Delta ABC$  üçgeni  $\Delta DEC$  üçgenine benzerdir. Bu benzerlikten dolayı CB kenarının AC kenarına oranı CE kenarının CD kenarına oranına eşittir. Eşitlik B-1 ve B-2 de gösterilmiştir.

$$\frac{\overline{CB}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{CE}}{\overline{CD}} \quad (\text{B-1})$$

$$\frac{(w/2) + R_e(1 - \sin \theta)}{r_\phi} = \frac{R_e \sin \theta}{R_e} \quad (\text{B-2})$$

B-2 den şişik bölgesinin yarıçapı ( $r_\phi$ ), temas açısı ( $\theta$ ) cinsinden hesaplanabilir. Bu işlem B-3 de gösterilmiştir.

$$r_\phi = \frac{(w/2) + R_e(1 - \sin \theta)}{\sin \theta} \quad (\text{B-3})$$

ABC dik üçgeni kullanılarak, temas açısı ( $\theta$ ) Pisagor kuralı kullanılarak belirlenebilir.

$$\overline{AC}^2 = \overline{AB}^2 + \overline{BC}^2 \quad (\text{B-4})$$

Şekil B-1 deki AB ve AC uzunlukları B-4 de yerine konulursa B-5 elde edilmektedir.

$$r_\phi^2 = \left[ \frac{w}{2} + R_e(1 - \sin \theta) \right]^2 + \left[ r_\phi - ((h - R_e(1 - \cos \theta))) \right]^2 \quad (\text{B-5})$$

B-3 denklemleri B-5 de yerine konulursa B-6 elde edilmektedir.

$$\left[ \frac{w/2 + R_e(1 - \sin \theta)}{\sin \theta} \right]^2 = \left[ \frac{w}{2} + R_e(1 - \sin \theta) \right]^2 + [r_\phi - (h - R_e(1 - \cos \theta))]^2 \quad (\text{B-6})$$

B-6 gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra B-7 deki şeklini almaktadır.

$$\frac{2}{\sin \theta} = \frac{\left[ \frac{w/2}{R_e} + 1 \right] - \sin \theta}{\left[ \frac{h}{R_e} - 1 \right] + \cos \theta} + \frac{\left[ \frac{h}{R_e} - 1 \right] + \cos \theta}{\left[ \frac{w/2}{R_e} + 1 \right] - \sin \theta} \quad (\text{B-7})$$

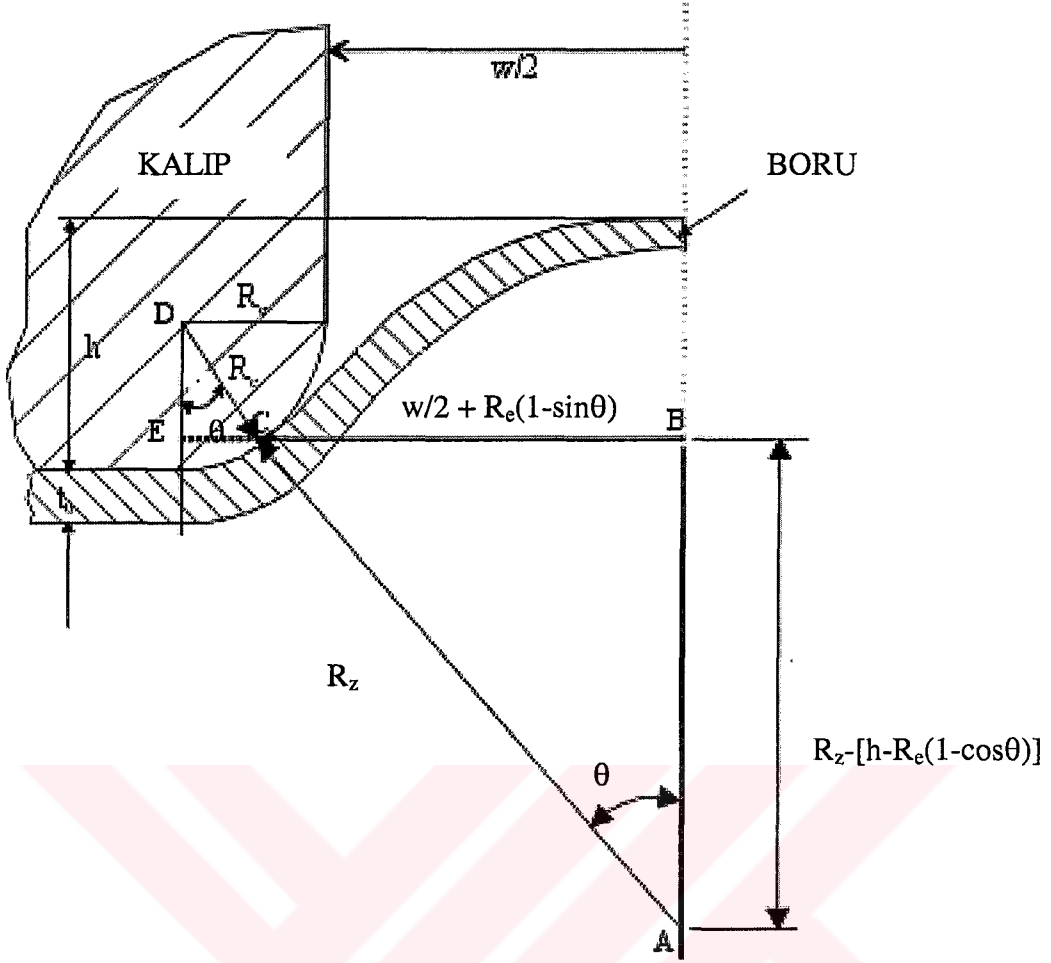
w = Şişik Genişliği

R<sub>e</sub> = Kalıp Köşe Radyusu

h = Şişik Yüksekliği

θ = Temas Açısı

Görülebileceği üzere B-7 de tek bilinmeyen temas açısı (θ) dır. Bu denklem iterasyonla temas açısı (θ) için çözülebilir.



Şekil B 1: Şişik Bölgesinde Bulunan Geometrik Parametrelerin Gösterilişi

### EK C Şişik Bölgesinin Üst Noktasındaki Aksenal Gerilmenin Tespiti

Şekil C.1 den görüleceği üzere, Z ekseni boyunca üç adet kuvvet vektör bileşeni bulunmaktadır. Bu kuvvet bileşenlerinden biri iç basınç ( $P_i$ ) sebebi ile ortaya çıkmıştır. Bu kuvvet bileşeni C-1 de gösterilmiştir.

$$F_{P_i} = \pi P_i r_\theta^2 \quad (C-1)$$

İkinci bileşen boru parçasının reaksiyon kuvvetidir. Buna dair kuvvet ise C-2 de gösterilmiştir.

$$F_{\sigma_\phi} = 2\pi r_\theta t \sigma_\phi \quad (C-2)$$

Z ekseni boyunca bulunan kuvvetlerin dengesinden C-3 elde edilmektedir.

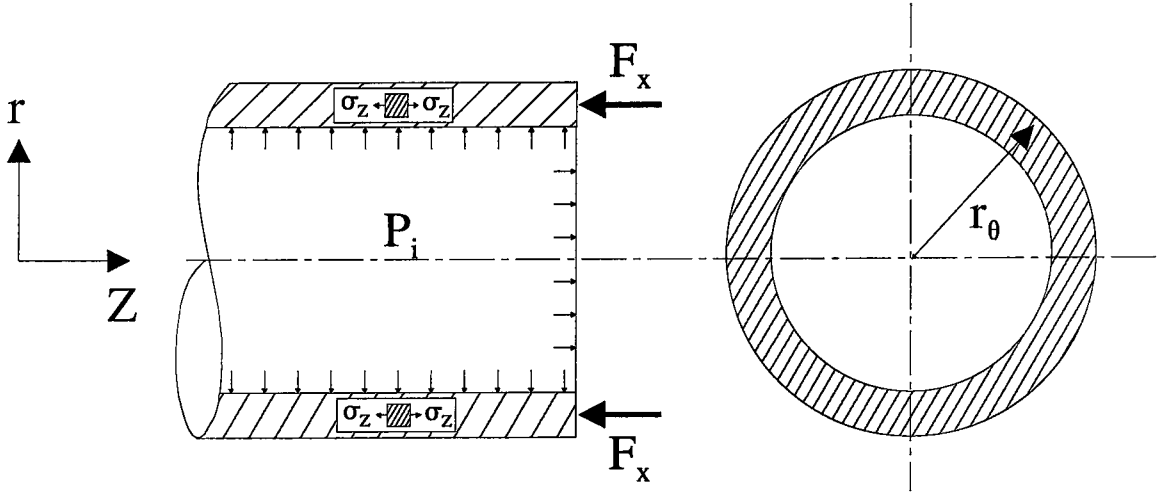
$$F_p - F_{\sigma_\phi} = 0 \quad (C-3)$$

C-1 ve C-2, C-3 de yerine konulursa C-4 elde edilir.

$$\pi P_i r_\theta^2 - 2\pi r_\theta t \sigma_\phi = 0 \quad (C-4)$$

Sonuç olarak aksenal gerilme C-5 deki şekli ile elde edilir.

$$\sigma_\phi = \frac{P_i r_\theta}{2t} \quad (C-5)$$



Şekil C 1: Z-Ekseni Yönünde Etki Eden Kuvvetler

## EK D Plastisite Teorisinin Hidrolik Boru Şekillendirme Prosesine

### Uygulanması

Çok eksenli gerilme-gerinim durumlarında gerilme-gerinim ilişkisini belirleyebilmek için Von Mises Akma Kriteri kullanılmaktadır. Bu kriter D-1 de gösterilmiştir.

$$\frac{d\varepsilon_1}{\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)} = \frac{d\varepsilon_2}{\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} = \frac{d\varepsilon_3}{\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)} = \frac{2}{3}d\lambda \quad (D-1)$$

Plastisite teorisinin en önemli kabullerinden biri, gerinim artımının toplam gerinim ile orantılı olduğudur. Bu durum D-2 de gösterilmiştir.

$$\frac{d\varepsilon_1}{\varepsilon_1} = \frac{d\varepsilon_2}{\varepsilon_2} = \frac{d\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \quad (D-2)$$

Dolayısıyla D-1 toplam gerinim cinsinden, D-2'nin D-1 de yerine konulması ile elde edilir. Bu işlem D-3 de gösterilmiştir.

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3)} = \frac{\varepsilon_2}{\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)} = \frac{\varepsilon_3}{\sigma_3 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (D-3)$$

İnce cidarlı borularda, asal gerilme ve gerinimler, ( $\theta$ -ekseni), (Z-ekseni), ve r-ekseni boyunca bulunan gerilim ve gerinimler cinsinden belirtilebilir. Buna ek olarak, r-ekseni boyunca bulunan gerilim, boru kalınlığının küçük olması ( $\frac{r}{t} \gg 10$ ) sebebiyle ihmal edilebilmektedir.

Dolayısıyla;

$$\begin{aligned}
 \text{Teğetsel Gerilme} & : \sigma_1 = \sigma_\theta \\
 \text{Eksenel Gerilme} & : \sigma_2 = \sigma_\phi \\
 \text{Kalınlık Yönündeki Gerilme} & : \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_t \equiv 0 \\
 \text{Teğetsel Gerinim:} & : \varepsilon_1 = \varepsilon_\theta = \ln\left[\frac{r_\theta}{r_0}\right] \\
 \text{Eksenel Gerinim} & : \varepsilon_2 = \varepsilon_\phi = \ln\left[\frac{l}{l_0}\right] \\
 \text{Kalınlık Gerinimi} & : \varepsilon_3 = \varepsilon_t = \ln\left[\frac{t_1}{t_0}\right]
 \end{aligned}$$

Bütün asal gerilme ve gerinimler D-2 de yerine konursa D-4 elde edilmektedir.

$$\frac{\varepsilon_\theta}{\sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_\phi + \sigma_t)} = \frac{\varepsilon_\phi}{\sigma_\phi - \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_t)} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma_t - \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_\phi)} \quad (\text{D-4})$$

İnce cidarlı boru kullanıldığından kalınlık yönündeki gerilme ihmal edilebilir ve D-4 sonuç olarak D-5 şeklini alır.

$$\frac{\varepsilon_\theta}{\sigma_\theta - \frac{1}{2}\sigma_\phi} = \frac{\varepsilon_z}{\sigma_\phi - \frac{1}{2}\sigma_\theta} = \frac{\varepsilon_t}{-\frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_\phi)} \quad (\text{D-5})$$

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	07.07.1973	
Doğum Yeri	İstanbul	
Lise	1985-1992	Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi
Lisans	1992-1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	1997-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, İmalat Programı

**Çalıştığı Kurumlar**

	1997-1998	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi
	1998-Devam ediyor	Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, OH, USA