

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DC04 OTOMOTİV SACININ HİDROMEKANİK YÖNTEM İLE
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Osman ANKET

Balıkesir, Şubat-2011

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DC04 OTOMOTİV SACININ HİDROMEKANİK YÖNTEM İLE
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Osman ANKET

Balıkesir, Şubat – 2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DC04 OTOMOTİV SACININ HİDROMEKANİK YÖNTEM İLE
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Osman ANKET

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İrfan AY (BAÜ)

Sınav Tarihi 04.02.2011

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İrfan AY (Danışman-BAÜ)

Prof Dr. Cevdet MERİÇ (FÜ)

Prof Dr. Ali BAYRAM (UÜ)

Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Ali ORAL (BAÜ)

Enstitü Yönetim Kurulunun 16/02/2011 tarih 2011-96 sayılı oturumunun
....29..... nolu kararı ile Mezun olmuştur.

Balıkesir, Şubat-2011

ÖZET

DC04 OTOMOTİV SACININ HİDROMEKANİK YÖNTEM İLE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Osman ANKET

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

(Doktora Tezi / Tez Danışmanı: Prof.Dr. İrfan AY)

Balıkesir, Şubat-2011

Bu çalışmada, sac şekillendirme prosesleri içinde yer alan ve son yıllarda dikkatleri üzerine çeken hidromekanik derin çekme yönteminin deneysel ve sayısal incelemesi yapılmıştır. Deneylerde, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan DC04 sac malzeme kullanılmıştır. Öncelikle sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarını ortaya koymak amacıyla çekme ve şekillendirilebilirlik sınır diyagramı testleri yapılmıştır.

Hidromekanik derin çekme deney düzeneği; 30 mm çapında zımba, sıvı basıncının sac malzemeye uygulandığı alt hazne (dişi kalıp), basıncı ayarlanabilir üst gurupla yekpare baskı yastığı ile basınç ayarlama ve ölçme ekipmanlarından oluşmuştur. Üst ve alt kalıp gurubu, derin çekme maksatlı hazırlanmış bir hidrolik prese montaj edilmiştir. Baskı yastığı basıncı, hidrolik presin yastık basıncından alınmış, alt hazne ise ön şişirme basıncı kullanılmaksızın manüel doldurulmuştur.

Deney değişkenleri olarak; farklı sac malzeme çapları, şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve baskı yastığı kuvveti kullanılmıştır. Farklı çaplardaki DC04 sac

malzemeler hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme proseslerinde şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve baskı yastığı kuvveti değiştirilerek test edilmişlerdir. Deneysel çalışmalar, sac malzeme şekillendirme süreçlerinde yaygın hata tipi olarak gözlenen kırışıklık ve kırılma açısından değerlendirilmiştir. Şekillendirilmiş parçadaki kalınlık değişimlerinde deney değişkenlerinin etkileri ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmalar öncesinde sac malzeme yüzeyinde lazer işaretleme tekniği ile 5 mm çapında dairesel ağlar oluşturulmuştur. Deney sonucunda ağlardaki uzama değişimleri ölçülmüş, uzama dağılımlarının, daha önceden belirlenmiş olan DC04 sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınır eğrisi üzerindeki konumları incelenmiştir.

Deney şartları ve değişkenleri, sac malzeme şekillendirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan AUTOFORM yazılımı ile sonlu elemanlar tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler neticesinde, hidromekanik ve geleneksel derin çekilerek şekillendirilmiş sac malzemedeki meydana gelen kalınlık değişimleri ve şekillendirilebilirlik sınır eğrisine göre uzama dağılımlarının konumu değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar neticesinde, hidromekanik derin çekme şartlarında şekil değiştirme hızının çok önemli bir etken olduğu gözlenmiş, düşük şekil değiştirme hızlarının şekillendirme sürecini olumlu etkilediği görülmüştür. Hazne basıncının en önemli şekillendirme etkeni olduğu ve sac malzeme için en uygun bir basınç değeri olduğu tespit edilmiştir. Hazne basıncının yüksekliğine bağlı olarak baskı yastığı kuvvetinin de artırılması gerekmiş, düşük baskı yastığı kuvvetinin hazne basıncının oluşturulmasına ve kırışıklık oluşmasına olumsuz etkileri tespit edilmiştir. Baskı yastığı kuvvetinin çok yüksek olması ise sac malzemenin kırılmasına sebep olmuştur. Hidromekanik derin çekme prosesinin geleneksel derin çekmeye göre, çekme oranını geliştirdiği, yüzey kalitesini artırdığı ve kalınlık değişimlerini ise azalttığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Hidromekanik derin çekme / derin çekme / şekillendirilebilirlik / şekillendirilebilirlik sınır diyagramı / DC04 / sayısal analiz.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FORMABILITY OF DC04 SHEET METAL BY HYDROFORMING METHOD BY FINITE ELEMENTS AND EXPERIMENTATION

Osman ANKET

**Balıkesir University, Institute of Science,
Department of Mechanical Engineering**

(Ph.D.Thesis / Supervisor : Prof.Dr.İrfan AY

Balıkesir –February, 2011

In this study, the experimental and numerical investigation of the hydromechanical deep drawing method which has drawn attention in recent years was performed. In the experiments, DC04 sheet metal which has been widely used in automotive sector was used. The tension and formability limit diagram tests were performed first to display formability limits of sheet material.

The experimental setup of hydromechanical deep drawing consisted of a 30 mm punch, the lower chamber (female mold) wherein fluid pressure is applied to the sheet material, the upper group with adjustable chamber pressure, a set-piece pressure pot and the measurement equipment. The upper and lower molds are mounted on a hydraulic press prepared for deep drawing purposes. Pressure-pot pressure was derived from the bearing pressure of hydraulic press whereas the lower chamber was filled out manually without using the pre-inflation pressures.

Various sheet metal diameters, drawing rate, chamber pressure and pressure-pot pressure were used as experimental variables. DC04 sheet materials of varying

diameters were tested changing the tensile rate, chamber pressure and pressure-pot pressure within hydromechanical and conventional deep drawing processes. Experimental studies were evaluated in terms of wrinkles and cutting which are commonly observed as errors in sheet material forming processes. The effects of experimental variables were displayed on thickness variability of the formed part. Prior to experimental manipulation, circular grids 5 mm in diameter were formed on the surface of the sheet metal using laser marking. After the treatment, elongation variation of grids were measured and the position of these on the predetermined formability limit curve of the DC04 sheet materials were examined.

Experimental conditions and variables were analyzed using AUTOFORM software widely used in the sheet metal forming processes and the finite element technique. Following analysis, thickness variability of sheet metal formed by hydromechanic and traditional deep drawing; and the location of strain distribution according to the formability limit curve were evaluated.

As a result of the experiments, it was observed that the speed of shape shifting under hydromechanic deep drawing conditions was a very important factor, and that slow shape shifting speeds had a positive effect on the formation process.

Reservoir pressure was identified as the the most important shaping factor and the most appropriate pressure value for the material. Pressure-pot pressure had to be increased depending on the highness of chamber pressure; and negative effects of low pressure-pot pressure on creating reservoir pressure and the forming of wrinkles were identified. High pressure-pot pressure caused sheet metal to break. It was found that deep drawing method as compared to traditional drawing method, improved the drawing rate, increased the surface quality and reduced thickness variability. The results of the experiment and numerical analysis were compared and were found to be in line with each other.

Key words: Hydromechanical deep drawing / deep drawing / formability / forming limit diagram / DC04 sheet metal / numerical analysis

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
ÖNSÖZ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Deney Malzemesi “DC04”	4
2.2 Sac Malzemelerin Şekillendirilebilirliğine Etki Eden Faktörler	4
2.3 Şekillendirme Sınır Diyagramı	6
2.4 Hidromekanik Derin Çekme	10
2.5 Geleneksel Derin Çekme	21
2.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz	25
2.7 Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	32
3. SAC ŞEKİL VERMENİN TEORİSİ	34
3.1 Metallere Plastik Şekil Verme	34
3.1.1 Birim Şekil Değiştirme Kavramı ve Birim Şekil Değiştirme Türleri	35
3.1.2 Plastik Şekil Değiştirmede Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkisi	37
3.1.3 Plastik Şekil Değiştirmenin Temel İlkeleri	38
3.1.4 Soğuk Şekil Değiştirme	38
3.1.5 Plastik Şekil Değiştirmeyi Etkileyen Faktörler	40
3.1.5.1 Mekanik İşlemlerde Şekil Değiştirme Hızının Etkisi	42

3.1.5.2	Sürtünme ve Yağlama	43
3.2	Mekanik Özellikler	45
3.2.1	Çekme Deneyi	47
3.2.1.1	Akma Mukavemeti ve Çekme Dayanımı	48
3.2.1.2	Kopma Uzaması, Şekil Değiştirme Sertleşmesi Üssü ve Mukavemet Katsayısı	49
3.2.1.3	Anizotropi	52
3.2.2	Erichsen Çökertme Testi	55
3.3	Şekillendirme Sınır Diyagramı	57
3.4	Hidromekanik Derin Çekme	64
3.4.1	Hidrolik Şekillendirmenin Temelleri	66
3.4.1.1	Zar Diyafram Kullanarak Hidrolik Şekillendirme	68
3.4.1.2	Hidromekanik Derin Çekme	69
3.4.1.3	Hidrolik Gererek Şekillendirme	70
3.4.1.4	Derin Çekme ve Gererek Şekillendirmenin Ortak Kullanımı	71
3.4.1.5	Çift Katlı Malzemenin Hidrolik Şekillendirilmesi	71
3.4.2	Üretim Kılavuzu	72
3.4.3	Hidromekanik Derin Çekme Kalıp Tasarımı	74
3.4.4	Hidromekanik Derin Çekme Kalıbının Çalışması	75
3.4.5	Hidromekanik Şekil Verme İşleminin Özellikleri	76
3.4.6	Hidromekanik Derin Çekmede Sac Malzeme Şekillendirilebilirlik Verilerinin Değerlendirilmesi	77
3.4.7	Hidromekanik Derin Çekme İşleminin Fonksiyonları	79
3.4.7.1	Kırışma ve Bölgesel İnceleme Kontrolü	79
3.4.7.2	Geri Yaylanma Kontrolü	82
3.4.7.3	Dişi Kalıbın Kullanılmaması	82
3.4.7.4	Ekipman Gereksinimi	82
3.4.7.4.1	Hazne Basıncı Kontrolü	82
3.4.7.4.2	Baskı Yastığı Kuvveti Kontrolü	85
3.4.7.4.3	Yastık Kullanımı	86
3.4.7.4.4	Daha Ucuz Malzeme Kullanımı	86

3.4.7.4.5	Daha Ucuz Kalıp Malzemesi Seçimi	86
3.4.7.4.6	Zor Malzemelerin Şekillendirilmesi	87
3.5	Geleneksel Derin Çekme	87
3.5.1	Örnek Çapının Hesaplanması	89
3.5.2	Çekme Kademelerinin Tespiti	90
3.5.3	Zımba ile Kalıp Arasındaki Boşluk (Çekme Aralığı)	92
3.5.4	Kalıp Kenarının (Çekme Kenarının) Yuvarlatılması	92
3.5.5	Zımba Kenarının Yuvarlatılması	92
3.5.6	Baskı Yastığı Basıncı	93
3.5.7	Çekme Kuvveti ve İş	94
3.6	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sayısal Analiz	95
3.6.1	Doğruluk, Hız ve Maliyet	95
3.6.2.	AUTOFORM Modülleri	96
3.6.2.1	AUTOFORM One Step Solver	96
3.6.2.2	AUTOFORM Incremental Solver	97
4.	MATERYAL VE METOT	98
4.1	DC04 Deney Örneğinin Mekanik Özelliklerinin Tespiti ve ŞSD'nın Çizimi	98
4.1.1	Mekanik Özelliklerin Tespiti	98
4.1.2	ŞSD'nın Çizimi	100
4.2	Hidromekanik Derin Çekme ve Geleneksel Derin Çekme	105
4.2.1	Çekme Kalıplarının Tasarımı	105
4.2.1.1	Zımba Çapı	106
4.2.1.2	Dişi Kalıp Çapı ve Kalıp Boşluğu	107
4.2.1.3	Kalıp Radyüsleri	108
4.2.1.4	Çekme Derinliği	108
4.2.1.5	Baskı Yastığı	108
4.2.1.6	Şekillendirme Sıvısı	111
4.2.1.7	Sac Malzemedede Ağ Oluşturulması	111
4.2.2	Sac Malzeme ve Kalınlığı	111
4.2.3	Deney Değişkenleri	112

4.2.3.1	Örnek Çapı	112
4.2.3.2	Şekil Değişirme Hızı	113
4.2.3.3	Hazne Basıncı	113
4.2.3.4	Baskı Yastığı Kuvveti	113
4.2.4	Deney Değişkenlerinin Uygulanması	114
4.2.5	Deneysel Sonuç Değerlendirme Kriterleri	114
4.2.5.1	Sac Malzeme Kalınlık Değişimi	114
4.2.5.2	Kırışma ve Kırılma Oluşumu	115
4.2.5.3	Derin Çekme Oranı Sınırı	115
4.2.5.4	ŞSD Üzerinde Gösterim	115
4.3	SEY ile Analiz	116
4.3.1	Kalıp Elemanlarının Modellenmesi	116
4.3.2	AUTOFORM Analiz Modellemesi	116
4.3.3	AUTOFORM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	121
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	122
5.1	DC04 Deney Örneğinin Mekanik Özelliklerinin ve ŞSD'nin Deneysel Olarak Elde Edilmesi	122
5.2	Hidromekanik Derin Çekme Yönteminin Deneysel Çalışması ve Sayısal Analizi	128
5.2.1	30 MPa Hazne Basıncının Hidromekanik Derin Çekme Prosesine Etkileri	128
5.2.2	40 MPa Hazne Basıncının Hidromekanik Derin Çekme Prosesine Etkileri	133
5.2.3	50 MPa Hazne Basıncının Hidromekanik Derin Çekme Prosesine Etkileri	139
5.3	Geleneksel Derin Çekme Prosesinin Deneysel Çalışması ve Sayısal Analizi	153
5.3.1	Şekil Değişirme Hızının Geleneksel Derin Çekme Prosesine Etkileri	153
5.3.2	Baskı Yastığı Kuvvetinin Geleneksel Derin Çekme Prosesine Etkileri	155
5.3.3	Deney Örneği Çapının Geleneksel Derin Çekme Prosesine Etkileri	160
5.4	Hidromekanik Derin Çekme ve Geleneksel Derin Çekme Prosesinin Çekme Derinliği ve Derin Çekme Oranı Kriterlerine Göre Mukayesesi	164
6.	GENEL SONUÇLAR	167
	KAYNAKLAR	172

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>		
<u>Numarası</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	Hidrolik şekillendirme prosesi	12
Şekil 2.2	Baskı yastıklı derin çekme prosesinde gerilme oluşumları	24
Şekil 3.1	Çekme gerilmesi, kayma gerilmesi ve hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değiştirmenin tanımı	35
Şekil 3.2	Şematik olarak soğuk şekil değiştirme oranının ve tavlama sıcaklığının mekanik özellik ve mikro yapıya etkisi	39
Şekil 3.3	Ara yüzey sürtünmesinin tanımlanması	43
Şekil 3.4	Şekil değiştirme sertleşmesi üssünün tayini ve şekil değiştirme sertleşmesi üssünün gerilme–birim şekil değiştirme grafiği üzerindeki etkisi	51
Şekil 3.5	Çekme deneyi örneği ve ölçme yönleri	52
Şekil 3.6	Derin çekme esnasında malzemede kulak oluşumu	54
Şekil 3.7	Erichsen çökertme testinin prensibi	56
Şekil 3.8	Metalik sac yüzeye çizilen ağ örneği	57
Şekil 3.9	Çekme deneyi örneği, Erichsen deney örneği ve çentikli çekme deneyi örneği	58
Şekil 3.10	Başlangıç dairesi ve başlangıç dairesinin şekil değiştirmesinden sonraki durum	59
Şekil 3.11	Sac malzemenin şekillendirilmesinde karşılaşılabilecek yük durumları	59
Şekil 3.12	Ölçüm değerlerinin diyagram üzerine aktarılması ve şekillendirme sınır diyagramının elde edilmesi	60
Şekil 3.13	Malzeme test prosedürü	62
Şekil 3.14	Kauçuk diyafram ile hidrolik şekillendirme	68
Şekil 3.15	Hidromekanik derin çekme	70

Şekil 3.16	Hidrolik gererek şekillendirme	70
Şekil 3.17	Derin çekme ve gererek şekillendirmenin ortak kullanımı	71
Şekil 3.18	Çift katlı malzemenin hidrolik şekillendirilmesi	72
Şekil 3.19	Hidromekanik derin çekme kalıbı	75
Şekil 3.20	Hidromekanik derin çekmede yarı çekilmiş pozisyon	76
Şekil 3.21	Hidromekanik derin çekme kızak kuvvetinin çekme miktarı ile değişimi	77
Şekil 3.22	Derin çekmede metalin yer değiştirmesi	87
Şekil 3.23	Çekilen parçayı etkileyen değişik kuvvetler	88
Şekil 3.24	Çekme prosesi	89
Şekil 3.25	Baskı plakalı çekme prosesinin oluşumu	89
Şekil 3.26	Silindirik bir kabın kademeli derin çekilmesi	91
Şekil 3.27	Zimba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi	93
Şekil 3.28	a.Kısmen derin çekilmiş bir kutuda, baskı yastığı kuvvetinin yetersizliği nedeniyle, flanşta kırışma oluşumu, b.Baskı yastığı kuvvetinin gereğinden büyük olması nedeniyle derin çekme sırasında kutunun kırılması	94
Şekil 4.1	Çekme deneyinde kullanılan örneğin boyutları	98
Şekil 4.2	Örneklerin hazırlanması	99
Şekil 4.3	Dartec marka çekme deneyi cihazı	99
Şekil 4.4	Erichsen deney örneği boyutları	101
Şekil 4.5	Çentikli deney örneği	102
Şekil 4.6	ŞSD elde edebilmek için hazırlanmış deney örnekleri	102
Şekil 4.7	Elektrokimyasal yöntem	103
Şekil 4.8	Erichsen deney makinesi ve küresel zimba	104
Şekil 4.9	Mylar bandı	105
Şekil 4.10	Zimba ve üst gurup	106
Şekil 4.11	Dişi kalıp ve alt gurup	107
Şekil 4.12	Alt ve üst kalıp gurubunun birleşmiş pozisyonu	109
Şekil 4.13	Kalıp sistemi montaj halinde	110
Şekil 4.14	Tasarlanmış deney düzeneğinin hidrolik prese montajı	110
Şekil 4.15	AUTOFORM açılış sayfası ve genel görünüm	117

Şekil 4.16	Birim sistemi ve mesh değerleri	117
Şekil 4.17	Sac malzemenin tanımlanması	118
Şekil 4.18	Kalıpların tanımlanması	118
Şekil 4.19	Yağlama ve proses verilerinin tanıtımı	119
Şekil 4.20	Sac malzeme çözümü ayarları	120
Şekil 4.21	Sac malzeme ve kalıp pozisyonu mesh görünümü	121
Şekil 4.22	Kalınlık değişimi, ŞSD, kırılma / kırılma	121
Şekil 5.1	DC04 sac malzemenin mühendislik gerilme-mühendislik birim uzama diyagramları	122
Şekil 5.2	Çekme örneklerine ait uzama ve kopma şekilleri	123
Şekil 5.3	DC04 sac malzemenin çekme makinesinde ve Erichsen makinesinde şekil değiştirmesi	126
Şekil 5.4	DC04 deney örneği için kırılma ve boğumlanma eğrileri	127
Şekil 5.5	30 MPa hazne basıncında şekillendirilmiş örnekler	128
Şekil 5.6	30 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi	129
Şekil 5.7	Kalınlık ölçüm noktaları ve ölçme aparatı	130
Şekil 5.8	30 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi	131
Şekil 5.9	71 mm çaptaki deney örneğinin 30 MPa hazne basıncında sayısal analizi	131
Şekil 5.10	73 mm çaptaki deney örneğinin 30 MPa hazne basıncında sayısal analizi	132
Şekil 5.11	40 MPa hazne basıncında şekillendirilmiş örnekler	134
Şekil 5.12	40 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi	135
Şekil 5.13	40 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi	136
Şekil 5.14	71 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 1000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	137
Şekil 5.15	71 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 2000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	138
Şekil 5.16	71 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 5000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	138
Şekil 5.17	73 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 2000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	139
Şekil 5.18	71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi	140

Şekil 5.19	71 mm mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi	140
Şekil 5.20	71 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi	141
Şekil 5.21	71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 10000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	142
Şekil 5.22	71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	142
Şekil 5.23	71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 40000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	143
Şekil 5.24	73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi	144
Şekil 5.25	73 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi	144
Şekil 5.26	73 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi	145
Şekil 5.27	73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 5000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	146
Şekil 5.28	73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	146
Şekil 5.29	73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 50000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	147
Şekil 5.30	75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi	148
Şekil 5.31	75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi sonucu oluşan kırılma çeşitleri	149
Şekil 5.32	75 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi	149
Şekil 5.33	75 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi	150
Şekil 5.34	75 mm çaptaki deney örneğininin 50 MPa hazne basıncında 5000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	151
Şekil 5.35	75 mm çaptaki deney örneğininin 50 MPa hazne basıncında 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	151
Şekil 5.36	75 mm çaptaki deney örneğininin 50 MPa hazne basıncında 40000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi	152
Şekil 5.37	67 mm çapta farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilmiş ürünler	153
Şekil 5.38	67 mm çapta şekil değiştirme hızının deney örneği kalınlık dağılımına etkisi	154

Şekil 5.39	67 mm çapta şekil değiştirme hızının ŞSD'na etkisi	155
Şekil 5.40	Baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkileri	155
Şekil 5.41	6000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmiş deney örneği	156
Şekil 5.42	Baskı yastığı kuvvetinin deney örneği kalınlık dağılımına etkisi	156
Şekil 5.43	Baskı yastığı kuvvetinin ŞSD'na etkisi	157
Şekil 5.44	2500 N baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi	158
Şekil 5.45	4000 N baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi	159
Şekil 5.46	6000 N baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi	159
Şekil 5.47	İlk örnek çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisi	160
Şekil 5.48	Deney örneği çapının kalınlık dağılımına etkisi	161
Şekil 5.49	Deney örneği çapının ŞSD'na etkisi	161
Şekil 5.50	65 mm deney örneği çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi	162
Şekil 5.51	67 mm deney örneği çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi	163
Şekil 5.52	69 mm deney örneği çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi	164
Şekil 5.53	Geleneksel ve hidromekanik derin çekme yöntemi ile üretilmiş örneklerin karşılaştırılması	165
Şekil 5.54	67 mm çaptaki deney örneğinin geleneksel derin çekme yöntemi ile sayısal analizi	165
Şekil 5.55	75 mm çaptaki deney örneğinin hidromekanik derin çekme yöntemi ile sayısal analizi	166

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>		
<u>Numarası</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1	Şekillendirme prosesi için kullanışlı olan ve çekme testlerinden elde edilen malzeme özellikleri	46
Tablo 3.2	Çekme sacı çapının hesaplanması için formüller	90
Tablo 3.3	Çeşitli malzemeler için kademelendirme sayıları	91
Tablo 3.4	Çeşitli malzemeler için baskı yastığı basıncı	93
Tablo 3.5	Derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında “d/D” oranına bağlı olarak “m” değerleri	94
Tablo 3.6	Derin çekme işinin hesaplanmasında “x” değerleri	94
Tablo 4.1	Deney değişkenleri	112
Tablo 5.1	Deneylerde kullanılan örneklerin mekanik özellikleri (t=0,9 mm)	123

SEMBOL LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Adı</u>
n	Şekil değiştirme sertleşmesi üssü
K	Mukavemet katsayısı
r	Normal anizotropi
Δr	Dikine (düzlemsel) anizotropi
$B_{0,max}$	Maksimum derin çekme oranı sınırı
A_s	Malzeme alanı
P_f	Şekillendirme basıncı
R_s	Radyüs
t	Sac malzeme kalınlığı
W	Çekme işi
h	Çekme derinliği
x	Çekme kuvveti değişimine bağlı katsayı
σ	Sacın çekme dayanımı
D	Malzeme çapı
d	Zımba (iç) çapı
A	Derin çekilerek elde edilen kabın yüzeyi
A_1	Çekme sacının yüzeyi
w	Kalıp ile zımba arasındaki boşluk miktarı
F_p	Baskı yastığı kuvveti
p	Baskı yastığı basıncı
F	Mekanik proseslerde uygulanan kuvvet
μ	Malzeme ile takım arasındaki sürtünme katsayısı
c	Geometrik faktör

T	Şekil değiştirme sıcaklığı
ε	Şekil değiştirme miktarı
$\dot{\varepsilon}$	Şekil değiştirme hızı
ΔL	Şekil değiştirme miktarı
L_0	İlk boy
L_i	Şekil değiştirme sonundaki boy
γ	Kayma birim şekil değiştirmesi
ω	Öteleme miktarı
G	Kayma elastisite modülü
τ_{\max}	Kayma gerilmesi
σ_p	Plastik şekil değiştirme gerilmesi
σ_i	Sürtünme gerilmesi
$\dot{\varepsilon}$	Mühendislik şekil değiştirme hızı
m	Şekil değiştirme hızı duyarlılığı
F_n	Normal kuvvet
τ_i	Ara yüzey kayma gerilmesi
τ_f	İş parçasının kayma plastik gerilmesi
σ_{AK}	Akma mukavemeti
ε_{100}	Kopma uzaması
$\sigma_{\check{C}}$	Çekme dayanımı
ε_w	Enine doğrultuda şekil değiştirme
ε_t	Kalınlık doğrultusunda şekil değiştirme
w_o, w	Deney parçası eni
\check{R}	Ortalama dikine normal anizotropi
e_1	En büyük birim şekil değiştirme uzaması
e_2	En küçük birim şekil değiştirme uzaması

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesi ile desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. İrfan AY'a, değerli görüş ve önerilerini aldığım hocam Sayın Prof. Dr. Cevdet MERİÇ'e, Yrd.Doç.Dr.Sare ÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamın deneysel aşamasında, büyük bir özveri göstererek bana yardımcı olan Sayın Mesut ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin kurulmasında ve deneysel çalışmalar esnasında desteklerinden dolayı Sayın İrfan DEMİRDÜZEN'e, Sayın Gürbüz EDEER'e, TKG Otomotiv A.Ş.'ye ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Sayısal analizler konusunda yardımlarını sunan Grup Otomasyon ve Bilgi İşlem Sistemleri Ltd.Şti'ye ve Sayın Nihat KURTULUŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Sac malzeme şekillendirilebilirlik limitlerinin belirlenmesi aşamasında desteklerini sunan İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç.Dr.Murat BAYDOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım. Malzeme ve bilgi desteğinde bulunan Sayın Naki POLAT'a ve TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Uzun soluklu doktora eğitimim esnasında her türlü desteklerini sunan, lise eğitimine başladığım günden bu güne kadar yanımda olan meslektaşlarıma, kıymetli eşim Gülcan'a, oğullarım Mehmet Arda'ya ve Mehmet Kaan'a ve aileme sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Osman ANKET – Balıkesir 2011

1. GİRİŞ

Günümüzde sac malzemelerin şekillendirilmesi proseslerinde; en hafif, en yüksek dayanıma sahip, en az miktarda malzeme gereksinimi ve en ucuz malzeme kullanımı gibi kavramlar ön plana çıkmaktadır. Artan rekabet şartları, güvenlik standartlarındaki gelişmeler sac malzeme şekillendirme sektöründe çalışan üreticileri ve bu sektöre teknik bilgi sağlayan araştırmacıları yeni üretim yöntemlerine yönlendirmektedir. Sac malzeme şekillendirme proseslerinden birisi olan geleneksel derin çekme, daha derin parçaların tek kademede çekilmesi, daha eşit dağılımlı sac malzeme kalınlığı, daha düzgün yüzey kalitesi, özellikle az miktarda parçaların basımında kalıp maliyetinin yüksek olması, üretime geçme süresinin uzun olması gibi bazı ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Bu durum, sistem mühendisliğinin zorunluluk haline geldiği proseslerde, zaman, malzeme ve emek kaybının çok az toleranslar içerisinde olduğu günümüzde, üreticilerin yeni arayışlara girmesini kaçınılmaz kılmıştır.

Hidromekanik derin çekme, hidrolik şekillendirme prosesleri içerisinde yer alan, hem geleneksel derin çekme hem de hidrolik şekillendirme teknolojisinin ortak özelliklerini sunan sac metal şekillendirme tekniğidir. Hidromekanik derin çekme prosesi; zımba, baskı yastığı, sıvı basıncını içerisinde tutan alt kalıptan meydana gelir. Sac malzemenin nihai formunu zımba vermektedir. Alt kalıbın şekilsel olarak sac malzeme ile doğrudan bir bağı yoktur. Alt kalıp, sıvı basıncına yataklık görevini yapmaktadır. Baskı yastığı ve alt kalıp arasında belirli bir baskı yastığı kuvveti ile tutulmuş olan sac malzemeye, zımba tarafından alt kalıba doğru kuvvet uygulanır. Daha önceden alt kalıba doldurulmuş olan sıvının basıncı zımba kursuna bağlı olarak yükselecektir. Yükselen basınç, alt kalıba monte edilmiş olan basınç tahliye valfi üzerinden, daha önce ayarlanmış olan değerde tahliye olacaktır. Zımba kursu boyunca sac malzeme, tahliye edilen basınç değeri etkisi altında kalacaktır.

Sac malzemelerin hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesi; daha az sac malzeme incilmesi, daha az atık malzeme, daha iyi yüzey kalitesi, daha az kalıp maliyeti, daha kısa sürede üretime geçme, daha az malzeme şekil değişimi, daha az işlem gerektirme, daha az kalıp aşınması, daha yüksek çekme oranı, daha az geri yaylanma, daha fazla ölçüsel doğruluk sunmaktadır. Bunlara karşılık olarak; bir parçanın üretim süresinin uzun sürmesi, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, proses hakkında yeterli bilgi birikiminin olmaması gibi olumsuzlukları bulunmaktadır.

Sac malzemelerin şekillendirilebilirlik verilerinin ortaya konması ve bu referanslar doğrultusunda, üretim süreçlerinde kritik şekillendirme bölgelerindeki uzamaların şekillendirilebilirlik sınır verileri üzerindeki konumunun bilinmesi, prosesin iyileştirilmesi aşamasında büyük katkılar sağlayacaktır. Bu maksatla, öncelikle sac malzemelerin Şekillendirme Sınır Diyagramının (ŞSD) belirlenmesi ve üretim aşamasında, kritik şekillendirme bölgelerinin bu sınır değerlerinin neresinde olduğunun tespit edilmesi gerekir. ŞSD dikkate alınmadan yapılan şekillendirme proseslerinde, gereksiz yere malzeme kullanılıyor demektir. ŞSD’nda eğriye çok yakın proseslerde ise istenilen ürün kalitesini yakalayamama olasılığı oluşmaktadır.

DeneySEL çalışmalarına başlamadan önce, sac malzeme şekillendirme prosesinin sayısal analiz programları ile analizlerinin yapılmasına ihtiyaç vardır. Sürecin önceden analiz edilmesi, deneme yanılma sürecini en aza indirecek, atık sac malzeme miktarını azaltacak, en kısa sürede, en az maliyet ile üretime geçilmesini olanaklı kılacaktır.

Bu çalışmada; hidromekanik derin çekme yöntemi geleneksel derin çekme yöntemi ile mukayese edilerek incelenmiştir. DeneySEL çalışmalarda, derin çekmeye uygun bir sac malzeme olan DC04 (Erdemir Kalite No:7114) kullanılmıştır. Deneylerden önce, DC04 sac malzemenin çekme ve şekillendirilebilirlik sınır eğrileri belirlenmiştir. DeneySEL çalışma esnasında hem hidromekanik derin çekme, hem de geleneksel derin çekme; farklı çaplarda kesilmiş sac malzemeler kullanılarak, şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve baskı yastığı kuvveti, deney değişkenleri kullanılarak test edilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test

sonucunda kırılma ve kırılma oluşumu, kalınlık değişimleri ve çekme oranı değişiklikleri değerlendirilmiştir. Sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerin, şekillendirme süreci sonucunda ölçülmesiyle elde edilen sonuçların ŞSD üzerine aktarılması sağlanmış ve bu eğri üzerindeki uzama konumları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, AUTOFORM sayısal analiz programında Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz edilmiş, deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları mukayese edilmiştir.

Deneysel çalışmalar neticesinde, hidromekanik derin çekme şartlarında şekil değiştirme hızının çok önemli bir etken olduğu gözlenmiştir. Düşük şekil değiştirme hızlarının şekillendirme sürecini olumlu etkilediği görülmüştür. Hazne basıncının en önemli şekillendirme etkeni olduğu ve sac malzeme için en uygun bir basınç değeri olduğu tespit edilmiştir. Basıncın yüksekliğine bağlı olarak baskı yastığı kuvvetinin de artırılması gerekmiş, düşük baskı yastığı kuvvetinin hazne basıncının oluşturulmasına ve kırışıklık oluşmasına olumsuz etkileri tespit edilmiştir. Baskı yastığı kuvvetinin çok yüksek olması ise sac malzemenin kırılmasına sebep olmuştur. Deneysel çalışmalar esnasında elde edilen uzama dağılımlarının ŞSD üzerine aktarılmasıyla, deney değişkenlerinin sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarına etkileri gözlenmiştir. ŞSD'na göre sac malzemenin çalışma bölgesinin belirlenebileceği, hidromekanik derin çekme prosesinde şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin çok kullanışlı olacağı gözlenmiştir. Hidromekanik derin çekme prosesinin geleneksel derin çekmeye göre, çekme oranını geliştirdiği, yüzey kalitesini artırdığı ve kalınlık değişimlerini azalttığı tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması aşağıda sunulan yedi başlık altında incelenmiştir. Bunlar; Deneş Malzemesi “DC04”, Sac Malzemenin Şekillendirilebilirliğine Etki Eden Faktörler, Şekillendirme Sınır Diyagramı, Hidromekanik Derin Çekme, Geleneksel Derin Çekme, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz, Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi'dir. Değerlendirme aşamasında literatür çalışması özetlenerek, tez çalışmasında gerçekleştirilecek deneyler belirlenmiştir.

2.1 Deneş Malzemesi “DC04”

Deneşler esnasında “DC04” sac malzeme kullanılmıştır. DC04, yaşlandırmaya dayanıklı ekstra derin çekmeye uygun düşük karbon içeren IF (interstitial free) çeliğidir [1]. Otomobil sektöründe ve filtre yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Düşük “C” içeren “IF” çelikleri yeni geliştirilmiş malzemelerdir ve mükemmel özelliklere sahiptir. “IF” çelikler çok az “C” ve “N” içerirler (DC04 % 0,25 Mn, % 0,006 C, % 0,015 F, % 0,10 S ve % 0,10 Ti içermektedir) ve tane sınırında karpid çökmesi içermemektedirler. Bu sebeple “IF” çelikler mükemmel işlenebilirlik ve mekanik özelliklere sahiptirler. “IF” çelikleri, “Ti” ve “Nb” ile kararlı hale getirilerek (stabilize) mükemmel çekilebilirlik yeteneğine sahip olurlar [2].

2.2 Sac Malzemelerin Şekillendirilebilirliğine Etki Eden Faktörler

Narayanasamy ve arkadaşları, farklı kalıp mekanizmalarında sac malzeme şekillendirmişlerdir. Çekme oranı sınırı sac kalınlığı artışı ile artmış, aynı zamanda plastik

uzama oranı ile de artmıştır. Malzeme, tractrix kalıpta çekildiğinde, çekme oranı sınırı daha yüksek çıkmıştır [3].

Wu ve arkadaşları, sac malzeme şekillendirilebilirliğine etki eden faktörleri incelemiştir. Çalışmada, 0,6 mm kalınlığında LZ61 alaşım sac için ŞSD belirlenmiştir. Şekil değiştirme karakteristiklerinde, anizotropi ve sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Ortalama plastik uzama oranı, planar anizotropi ve şekil değiştirme sertleşmesi üssü gibi şekillendirilebilirlik değişkenleri, çekme testi sonuçlarından belirlenmiştir. Bütün test sıcaklıklarındaki mekanik özelliklerde anizotropinin etkisi gözlenmiştir. Çekme özellikleri ve şekillendirilebilirlik değişkenleri ŞSD ile ilişkilendirilmiştir [4].

Narayanasamy ve arkadaşları, sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini ifade eden değişkenlerin incelemesini yapmışlardır. Çekme testlerinden, bütün “IF” çeliklerin, yüksek “n”, ”K” ve iyi süneklik sergilediği gözlenmiştir. Normal anizotropi “r”, sacların şekillendirilebilirliği ile ilişkilendirilmiştir. Bütün saclar iyi gerdirilebilirlik ve şekillendirilebilirlik sergilemektedir. Sacların gerdirilebilirliği ve çekilebilirliği, “n” ve “r” değerlerinden etkilenmektedir. 0,85 mm kalınlığındaki “IF” çeliği, yüksek “r” değeri sergilemiştir. “r” değerinin yüksek olması yüzünden, diğer saclar ile karşılaştırıldığında, bu sacın çekme-basma bölgesinde şekillendirilebilirliği yüksek olmaktadır. “r” değeri arttığı için, herhangi bir küçük uzama değerinde, çekme basma bölgesindeki maksimum büyük uzama değerinin arttığı gözlenmiştir [5].

Meriç ve arkadaşları, alüminyum alaşımı sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini mukayese etmişlerdir. Şekil değiştirme sertleşmesi üssü ve ortalama anizotropi gibi özellikler sac metallerin şekillendirilebilirliğini etkileyen çok önemli özelliklerdir. Çalışmada, alüminyum alaşımları test edilmiştir ve elde edilen değerler birbirleri ile mukayese edilmiştir. Al99.0 alaşımı, yüksek “n” ve “r” değeri sergilemiştir. Bu malzemenin diğerlerine göre, iyi akış ve derin çekme yeteneği gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer bir sonuç ise, AlMgCu alaşımının en az “ ΔR ” değerine sahip olduğudur. Buradan, bu malzemenin, diğer alaşımlara göre kulak oluşumuna karşı çok güvenli olduğu sonucu çıkmaktadır [6].

Narayanasamy ve arkadaşları, 3 farklı HSLA çelik sacın farklı gerilme-uzama oranları için, deneysel uzama değerlerinden elde edilen geliştirilmiş gerilme bazlı ŞSD ve kırılma sınır diyagramları üzerine çalışmışlardır. Burada, 3 sacın şekillendirme ve kırılma davranışları, mekanik özellikler ve içyapısı ile ilişkilendirilmiştir. Karbon-magnezyum çeliği, düzlem uzama ve germe-germe şartlarında iyi şekillendirilebilirlik sergilemiştir. Yüksek anizotropi ve “pancake” şeklinde içyapı sergileyen karbon-magnezyum çeliği, çekme operasyonlarına oldukça uygun bulunmuştur [7].

Khandeparkar ve arkadaşı, karmaşık basamaklı geometriye sahip metal kutuların hidromekanik derin çekilmesi konusunda çalışmışlardır. Düşük karbonlu bir çelik olan DC04 ve paslanmaz çelik DIN 1.4301 deney malzemesi olarak kullanılmıştır. 100 mm zimba çapı için, maksimum derin çekme oranı “ $\beta_{0,max}=3,0$ ” olan bir kalıp seti dizayn edilmiş ve kurulumu yapılmıştır. 200 MPa basınç seviyesine dayanacak şekilde kalıp seti tasarlanmıştır ve hazne basıncı, basınç kontrol valfi ile kontrol edilmiştir. İşlem, öncelikle LS-DYNA ile simüle edilmiştir. Deneyler, 2 farklı zimba geometrisi için gerçekleştirilmiştir. Karmaşık, pozitif ve negatif geometriler zimba ucuna oluşturulmuştur. Bu zimba ile ulaşılabilecek en yüksek derin çekme oranı araştırılmıştır. DC04 için “ $\beta_{0,max}=3,0$ ” ve DIN1.4301 için “ $\beta_{0,max}=2,875$ ” çekme oranı sınırına ulaşmıştır [1].

Chino ve arkadaşları, farklı sıcaklıklarda, AZ31 magnezyum alaşımının, Erichsen Testi kullanılarak, gererek şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Oda sıcaklıklarında düşük “r” değerine ve yüksek “n” değerine sahip örnekler mükemmel şekillendirilebilirlik göstermiştir. Sıcaklık farkının tane büyüklüğünü etkilediği ve bu durumun şekillendirilebilirliği geliştirdiği görülmüştür [8].

2.3 Şekillendirme Sınır Diyagramı

Özellikle otomotiv ve havacılık alanında yoğunluğu düşük, yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direncine sahip sac malzemelere ve bu malzemelere ait şekillendirme verileri olan kırılma, kırışma ve ŞSD’na olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [2,9].

Kırışma, boğumlanma ve kırılma, sac malzemelerin şekillendirilmesinde en sık karşılaşılan problem tipleridir. Araştırmacılar ve imalatçılar, sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında bu tür problemlerden kaçınmayı amaçlamaktadırlar. Bundan dolayı, sac malzemelerin şekillendirilebilirliği son elli yıldan beri geniş ölçüde araştırılmaktadır. Şekillendirilebilirlik verileri, sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında ortaya çıkan problemleri çözmek için hem imalatçılar hem de kullanıcılar açısından önemlidir. Sac malzeme seçme işlemi ile uğraşan üretim mühendislerinin, üretimde doğru malzemeyi tercih edebilmelerinde, malzemelerin şekillendirilebilirlik ve plastik şekil değiştirme özellikleri yol gösterici olmaktadır [10].

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden birisi de ŞSD'dır. ŞSD, malzemelerin farklı şartlarda uzamalarını değerlendirmek için çok önemli bir araçtır. Bu kavram, ilk olarak 1960'larda Keeler ve Goodwin tarafından ileri sürülmüştür [11]. Hecker ise ŞSD'yi yorumlayabilmek için basitleştirilmiş teknikler geliştirmiştir [2,12].

Son yıllarda sac malzemelerin şekillendirilebilirliği çalışmalarında, deneysel olarak değerlendirme yapabilmek ve teorik olarak tahmin yürütebilmek için birçok teknik geliştirilmiş ve bu konuda yeni bir teknik olan ŞSD'nin geniş ölçüde kullanılmasına başlanmıştır. Narayanasamy ve Narayanan, farklı kalınlıklarda, kaplanmış ve kaplanmamış, dokular arası çatlakları giderilmiş, düşük akma dayanımı ve yüksek anizotropi değerleri ile ekstra derin çekilebilme özelliğine sahip, düşük karbon içeren farklı kalınlıklarda çeliklerin; şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırışma sınır diyagramlarını ortaya koymuşlardır. Derin çekmeye uygun, düşük karbon içeren çeliklerin, gerilebilirlik özellikleri ve şekillendirilebilirlik değişkenleri ile şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırışma diyagramları arasındaki ilişkiyi göstermişlerdir [2].

Narayanasamy ve Narayanan, 2000 kN kapasiteli çift etkili hidrolik preste konik kalıp ve zimba şartlarını kullanarak, düşük karbon içeren 0,85 mm kalınlığındaki sac malzemelerin ŞSD'nı çıkartmışlardır [11].

Hangi, bir sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin çıkartılabilmesi için; derin çekme şartlarında çalışmaları temel alan Nakajima testinin, bilinen en iyi metot olduğunu ileri sürmüş ve Nakajima testinin yapılışını ortaya koymuştur [13].

Malzeme üreticileri, malzemelerin şekil verme sınır eğrilerini Nakajima ya da Marciniak testlerine göre tespit etmektedirler. Böylece, müşterilerin doğru malzeme seçimlerine yardımcı olabilecek malzeme kaliteleri tanımlanabilecektir [13]. Nakajima testi, sac metal malzemelerin ŞSD'nın belirlenmesinde sık kullanılan bir metottur. Nakajima testi, farklı geometrilerdeki malzemelerin; kırılma meydana gelinceye kadar küresel zımba kullanılarak şekil değiştirmesi prensibine dayanmaktadır. Farklı genişlikteki örneklerin kullanımı ile, farklı çekme derinlikleri ve farklı germe şekillendirme şartları sac malzeme yüzeyinde meydana getirilir. Bu örnekler büyük uzama şartlarında sac malzemenin şekil değiştirmesine izin veren örneklerdir [14]. Bu uygulamanın özelliği, malzemeye bağlı olarak en fazla şekil değişimi gerçekleştirmektir.

Sene ve arkadaşları, çok ince sacların şekillendirilebilirliğini ortaya koymak için 16 mm çapında daire şeklinde parçalar kullanarak ŞSD'nın elde edilmesi üzerine çalışmışlardır. Marciniak testi için, 0,1 mm kalınlığında, 24 mm tam daireden 6 mm genişliğe kadar değişen yedi farklı örnek kullanmışlardır. Bu örneklerdeki şekil değişimlerinin ölçümlerinden ŞSD elde edilmiştir [15].

Delijik ve Misoviç, otomobil gövde saclarında kullanılan alüminyum alaşımlarının çekilebilirlik özelliklerinde yüzey pürüzlülüğünün etkileri üzerine çalışmışlardır. Tek eksenli çekme testi, Erichsen Testi vb. testler yardımıyla ŞSD'nın elde edilmesi ve yüzey pürüzlülüğünün bu diyagrama etkileri üzerinde durmuşlardır. 3 mm çapındaki dairelerin ölçümleri ile ŞSD elde edilmiştir [16].

ŞSD'nın gelişiminde sayısal tahminine yönelik çalışmalar da yapılmıştır. İlk çalışma Marciniak ve Kuezyński tarafından yapılmış ve M-K (Marciniak ve Kuezyński) teorisi olarak literatüre geçmiştir [17].

Sac şekillendirme proseslerinde ŞSD'nı elde etmek için sayısal simülasyonlara yönelik oldukça fazla sayıda çalışma mevcuttur. Jurko ve arkadaşları, deneysel olarak elde edilen ŞSD ile sayısal simülasyonlardan elde edilen ŞSD'yi mukayese etmişlerdir. Program, Hill ve Barlat'ın akma kriterlerinden ve Swift ve Voce'nin şekil değiştirme pekleşme kriterlerinden farklı olarak Hutchinson-Neale akma modeline dayanmıştır. Program başarılı sonuçlar elde etmiştir [18].

ŞSD ile aynı diyagram üzerinde, malzemenin farklı uzama şartlarını değerlendirmek ve özel bir uzama kombinasyonu için, kırılma sınırlarını kararlaştırabilmek mümkündür. Sayısal simülasyonlar kullanılarak malzemelerin şekillendirilebilirlik sınırlarını belirlemek, zaman ve maliyeti önemli ölçüde azaltmıştır [19].

Boru hidrolik şekillendirmede, şekillendirme öncesinde örnekler üzerinde daireler oluşturulmuş ve bu dairelerin şekillendirme işleminden sonra şekillendirme sınır eğrisinin neresinde yer aldığı ve buna göre boğumlanma ve kırılma tehlikeli bölgeleri çıkartılmıştır [20].

Derin çekmede iki şekil değiştirme türü geçerlidir. Bunlar çekme ve gerdirmedir. Çekmede sac yüzeyindeki uzamaların birisi pozitif diğeri negatiftir. Germede ise her ikisi de pozitifdir. Derin çekmede, bir bölgede çekme baskın iken, diğerk bölgede germe baskındır. Sac malzemeler, şekillendirme sınır diyagramından da görüleceği gibi çekme ve germe şartlarında farklı özellikler sergilemektedir. Büyük uzamanın en düşük olduğu yer "plain strain" konumudur. Sac malzemedeki şekillendirme bu noktaya ne kadar yaklaşırsa o kadar verim elde edilmiş demektir. Çalışmada, sac malzeme üzerine daireler çizilmiş ve deneysel uygulamadan sonra durumları incelenmiştir. En büyük derin çekme noktasına ulaşmada baskı yastığı kuvveti çok etkili olmuştur [21].

Şekillendirilebilirlik ve ŞSD birçok faktöre ve malzeme özelliğine bağlı olduğu için, farklı zamanlarda, değişik kişiler tarafından farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [5,15,22,23,24].

2.4 Hidromekanik Derin Çekme

Lang ve arkadaşları; havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, karmaşık şekilli alüminyum alaşımı malzemelerin hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Havacılık ve otomotiv endüstrisinde, sac metal şekillendirme teknolojileri son yıllarda gittikçe daha da önemli hale gelmektedir. Müşteri ihtiyaçlarını karşılamak, güvenlik gereksinimi ve pazar rekabetini sağlamak için yeni üretim teknolojileri geliştirilmiştir. Mühendislik uygulamalarında yeni teknolojilerin kullanımı kesin ve sistematik araştırmalar yapılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada, bilinen ve yeni sac şekillendirme teknolojilerinin sistematik mukayesesine odaklanılmıştır. Üç şekillendirme yöntemi ele alınmıştır. Bunlar; derin çekme, hidromekanik derin çekme ve yüksek basınçlı şekillendirme yöntemleridir. Bu yöntemler şekillendirilebilirlik sınırlarını değerlendirmek için simülasyonlar ile incelenmiştir. Her üç yöntem, malzeme şekillendirilebilirliği açısından incelenmiş, farklı geometrilere sahip malzemeler analiz edilmiştir. Hidromekanik derin çekme prosesinin çok derin parçaların şekillendirilmesinde uygun olduğu görülmüştür. Geleneksel derin çekmenin ise, 2,25 derin çekme oranında seri üretim için uygun olduğu değerlendirilmiştir. Yüksek basınçlı şekillendirmenin ise derin parçaların şekillendirilmesine uygun olmadığı, karmaşık şekilli parçaların şekillendirilmesinde kullanılabileceği vurgulanmıştır. Endüstride; ürün maliyetlerinin, üretim süresinin, proses sayısının azaltılması, parçaların ölçüsel doğruluğunun yükseltilmesi, daha karmaşık yapıları parçaların şekillendirilmesi gibi kavramlar gittikçe önem kazanmaya başlamıştır. Müşteri ihtiyaçlarını karşılamak, üretilen parçaların güvenlik gereksinimlerini artırmak ve kuruluşların pazar rekabetini sağlamak için, yeni üretim teknolojilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [25].

Sac malzemelerin uçaklarda ve otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasından bu yana, sac metal şekillendirme prosesi çok önemli imalat prosesi olmuştur. Çeşitli parçalar, zımba ve kalıp kullanımıyla, bir ya da daha çok operasyonda, bir uygulama ağacı ile üretilir. Bu parçalar aynı zamanda karmaşık şekilli olabilmekte, son şekline ulaşabilmek için akma noktasının üzerinde gerilme uygulanmakta ve değişik açılarının kullanımı ile bükülebilmektedir. Hidrolik şekillendirme teknolojisi, karmaşık şekilli parçalarda, kırışma olmaksızın ve üretimde ekonomik olarak çok büyük avantajlar

sağladığı için, otomobil ve havacılık endüstrisinde kullanılan sac metal şekillendirme yöntemleri içerisinde çok kullanılan bir tekniktir. Hidrolik şekillendirmede erkek ya da dişi kalıptan birisine ihtiyaç yoktur. Hidrolik basınç bu kalıplardan birisinin yerini almıştır [26].

Matwick; sac hidrolik şekillendirme ve düşük hacimli derin çekmenin teknik maliyet modellemesi üzerinde durmuştur. Bilinen sac şekillendirme yöntemleri çok sayıda parçanın şekillendirilmesi için uygun iken, hidrolik şekillendirme az miktarlardaki parçaların şekillendirilmesinde uygundur. Sac hidrolik şekillendirme birkaç farklı türde çeşitlilik göstermekte olup, birçok araştırmacı çalışmalarında sac hidrolik şekillendirmenin rekabet yönüne dikkat çekmektedir. Bu kapsamda; bu çalışma hidrolik şekillendirmenin bir türü olan hidromekanik derin çekmeye odaklanmıştır. Sac hidromekanik derin çekme, geleneksel derin çekmeye göre birçok üstünlük sunar. Alet kurulum zamanı ve maliyetlerin azalması, daha az işlem türü gerektirmesi üstünlükleri arasındadır. Hidromekanik derin çekme, düşük kalıp maliyeti ile az miktarlardaki parçaların üretilmesi ihtiyacını karşılayabilmektedir. Farklı malzeme kullanılması, farklı kalıp kullanılması, otomasyonun azaltılması, parçanın basitleşmesi, düşük miktarlarda üretim, kalıp maliyetini önemli ölçüde azaltır. Böylece, geleneksel derin çekme ve sac hidrolik şekillendirme, aynı ihtiyacı karşılayabilir. Düşük miktarlardaki üretimde, sac hidrolik şekillendirmenin sergileyeceği davranışa yönelik bir anlayış geliştirmek, stratejik kararlarda, karar vericilere yardımcı olacaktır. Bu durum, maliyet modellerinin mukayesesi ile başarılabilir. Diğer taraftan, farklı kalıplarda, az ya da çok miktarlarda üretimin benzerlik gösterdiği de görülmektedir [27].

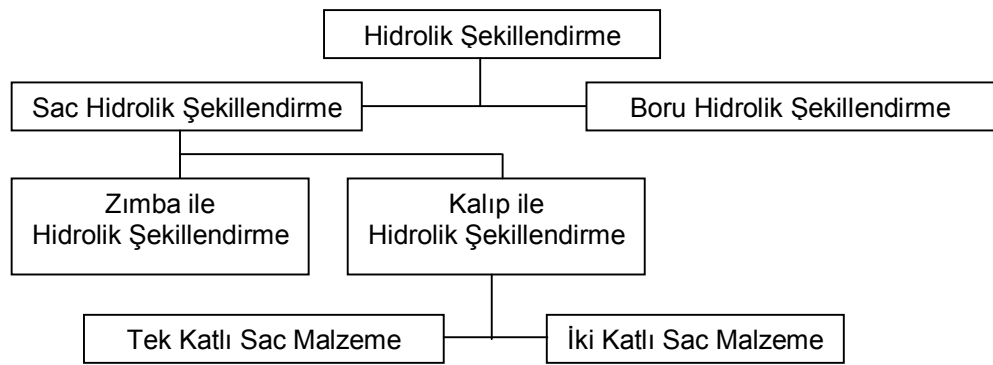
Palaniswamy ve arkadaşları, şekillendirilmesi zor, hafif malzemelerin, ileri sac malzeme şekillendirme teknolojileri ile şekillendirilmesini tarif etmişlerdir. Sac malzeme şekillendirme teknolojilerinden birisi hidromekanik derin çekme (zımba ile hidrolik şekillendirme)'dir. Bilinen derin çekme ile mukayese edildiğinde, bu yöntem daha yüksek çekilebilirlik sunar. Çünkü, sac malzeme basınç etkisiyle zımba yüzeyi ile temas zorlanır. Bu baskıdan dolayı, malzemenin zımba ile arasındaki sürtünme, gerdirilmesini engeller. Bu durum, daha yüksek çekilebilirlik ve eşit kalınlık dağılımına yol açar. Bu sebeple, hidromekanik derin çekme, düşük döngü zamanı olumsuzluğuna rağmen

şekillendirilebilirliği zor olan malzemelerin şekillendirilmesinde tercih edilmektedir. Üstelik dişi kalıp olmadığı için kalıp maliyeti azalmaktadır [28].

Nakagawa ve arkadaşları, hidromekanik derin çekme uygulamaları üzerinde durmuşlardır. Karmaşık şekilli parçaların şekillendirilmesi, sac malzeme ve kalıplarda maliyetlerin önemli ölçüde azaltılabilmesi vurgulanmış, teknolojinin farklı uygulamaları örneklerle açıklanmıştır. Zımba ucu bölgesinde görülen kırılmaların hidrolik şekillendirme teknolojisinde sıvı basıncı etkisiyle yok edildiği ifade edilmiştir. Sac malzemenin flanş bölgesindeki sıvı kaçağı yağlama kalitesini yükseltmektedir. Sürtünmedeki bu azalma sac malzemenin şekillendirilmesini kolaylaştırmaktadır [29].

Şahin, hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması konusunu literatüre dayanarak araştırmıştır. Yöntemin sınıflandırmasını, sac hidrolik şekillendirme, tüp hidrolik şekillendirme ve hidromekanik derin çekme şeklinde yapmıştır [30].

Hidrolik şekillendirme sac ve boru hidrolik şekillendirme olmak üzere ikiye ayrılır. Sac hidrolik şekillendirme, zımba ile ve kalıp ile hidrolik şekillendirme olmak üzere ikiye ayrılır. Bu durum Şekil 2.1’de görülmektedir [31].



Şekil 2.1 Hidrolik şekillendirme prosesi [31].

Geleneksel derin çekme yöntemiyle karşılaştırıldığında, bu yöntemle (zımba kullanılarak hidrolik şekillendirme); dişi kalıbın kullanılmaması nedeni ile kalıp

maliyetinin azaltılması; tek bir işlemde karmaşık şekilli parçaların üretilebilmesi, böylece birden çok kalıp seti ve prosesin azaltılması sağlanır [32].

Zhang ve arkadaşlarına göre, hidromekanik derin çekme yöntemi, şekillendirme esnasında dişi kalıp olarak su, yağ veya diğer sıvıların kullanıldığı bir şekillendirme teknolojisidir. İş parçasının son şeklini zımbanın şekli belirler. Sıvı basıncı, geleneksel derin çekme yönteminde kullanılan dişi kalıbın yerini almıştır. Böylece aynı sıvı basıncı ile farklı (aynı hazne kullanımıyla) şekillerdeki iş parçasını, sadece zımba değiştirerek imal etmek mümkün olacaktır [33].

Singh ve arkadaşı, hidromekanik derin çekmede, proses değişkenlerinin, sac malzeme yüzey kalitesine ve kalınlık dağılımlarına etkileri üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın bir kısmında, yeterli basınç oluşumunu sağlayarak, sac malzeme ile kalıp yüzeyi arasında kaçağa müsaade edecek şekilde, 4 adet boşluk sağlayıcı (flanş bölgesinde sac malzemenin preslenmemesi için) kullanılmıştır. Boşluk sağlayıcılar kullanıldığında basınç oluşabilmesi için çok daha yüksek baskı yastığı kuvveti (7-20 kat) kullanılmıştır [34].

Zhang ve arkadaşları; parabolik geometriye sahip iş parçasının hidromekanik yöntemle şekillendirilmesini deneysel olarak ve simülasyon çalışmaları ile incelemiştir. Alüminyum parabolik iş parçası hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmiştir. Derin çekme prosesi değişik değişkenler içerecek şekilde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Kırılma ve kırışma hataları, önceden belirlenmiş şekillendirme şartları için tahmin edilmiştir ve kalınlık dağılım sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Hazne basıncı ve baskı yastığı kuvvetinin, iş parçasının şekil değiştirmesindeki etkisi tartışılmıştır. Analiz sonuçları deneylerden elde edilen sonuçlar ile mukayese edilmiştir [35].

Khandeparkar ve arkadaşı, farklı geometriye sahip karmaşık şekilli sac malzemelerin hidromekanik derin çekilmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, düşük karbonlu çelik “DC04” ve paslanmaz çelik “DIN 1.4301” deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda “ $\beta_{0max} = 3,0$ ” derin çekme oranına ulaşılmış,

200 MPa hazne basıncı kullanılmıştır. Deneyle, LS-DYNA yazılımı ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Hazne basıncının, parça şekillendirilmesinde çok önemli bir değişken olduğu gözlenmiştir. Basıncın çok yüksek olması erken kırılmalara neden olurken, düşük olması, yeterli sürtünme oluşmaması sebebi ile zımba radyüs bölgesinde kırılmaya neden olmuştur. Gövdesel kırışmanın olmaması, hazne basıncının yeteri kadar yüksek olmasına bağlanmıştır. Deneysel çalışmada, 0,8 mm kalınlığında, akma dayanımı 138,7 MPa olan DC04 malzeme için 40 MPa maksimum hazne basıncı kullanılmıştır [1].

Zhang ve arkadaşları, yumuşak çelik malzemelerden silindirik kutu üretiminde hidromekanik derin çekme prosesini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyle, boşluk sağlayıcı malzeme kullanımı ve sabit baskı yastığı kuvveti kullanımı şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel malzemesi, şekil değişimi ve kalınlık değişimi açısından incelenmiştir. Parçanın son şeklinde anizotropi faktörü ve ön şişirme basıncının etkisi incelenmiştir. Şekillendirme süreci, SEY ile analiz edilmiştir. Sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Deneylelerde 8 mm/s şekil değiştirme hızı, sabit baskı yastığı kuvveti kullanılmıştır. Ön şişirme basıncı olarak 0,1-3 MPa basınç kullanılmıştır. Hazne basıncı, zımba yoluna bağlı olarak farklı seviyelerde olacak şekilde en fazla 60 MPa seviyesinde deneme yapılmıştır. Malzemenin akma dayanımı 182 MPa ve kalınlığı 1 mm'dir [36].

Kurz, hidromekanik derin çekme yönteminde sac malzemenin ısıtılması üzerinde durmuştur. Magnezyum alaşımlarının oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği sınırlıdır. 225 °C'de şekillendirilebilirliği artış gösterir. Çalışmada, ısıtılmış hidromekanik derin çekme prosesi uygulanmış, sıcaklık ve hazne basıncının derin çekme prosesine etkileri incelenmiş, hidromekanik derin çekme prosesi kullanılarak şekillendirme sıcaklığının düşürülmesi hedeflenmiştir. Farklı magnezyum alaşımı malzemelerin farklı sıcaklıklarda derin çekme oranları tespit edilmiştir. Derin çekme oranının, sıcaklıktan ve malzemenin kimyasal yapısından aşırı derecede etkilendiği tespit edilmiştir. Çalışmada, hidromekanik derin çekme prosesinde silindirik malzemenin duvarındaki incelmeyi, zımba ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin, hazne basıncına bağlı olarak artması sebebiyle daha az olduğu, ayrıca kalıp ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin azaldığı ileri sürülmüştür. Böylece, radyal gerilmeler azalmakta ve derin çekme sınırları

yükselmektedir. Farklı hazne basıncının kullanılması, sac malzemenin kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik meydana getirmemiştir. Deneysel çalışmada, hazne basıncı, alt kalıp bölgesinde oluşturulmuş, sıvı kaçakları baskı yastığı kuvveti ile önlenmiştir. 1 mm kalınlığında AZ31 malzeme için; ısıtılmış derin çekmede 225 °C’de 2,8 derin çekme oranına ulaşılırken, ısıtılmış hidromekanik derin çekmede 175 °C’de 3,8 derin çekme oranına ulaşılmıştır. Hidromekanik derin çekme ile bu alaşımların şekillendirilebilirlik sınırlarının artırılabilceği tespit edilmiştir. Şekillendirilebilirlikteki artış, kutu duvarındaki radyal gerilmelerin azalmasına bağlanmıştır [37].

Karaağaç ve Özdemir, sıvı basıncı ile sac şekillendirme yönteminin derin çekilebilirlik üzerine etkisi konusunda çalışmışlardır. Çalışmalarında, uluslararası imalat sektöründe sac metal şekillendirme konusunda sıklıkla kullanılmakta olan basınç ile şekillendirme yöntemleri, genel bir bakış ile derlenmiş ve literatürde konu ile ilgili yapılmakta olan çalışmalar belirtilmiştir. Basınç kullanarak şekillendirme üzerine teorik, deneysel ve bilgisayar destekli analiz ve simülasyon esaslı araştırmaların özeti verilmiştir. Ayrıca, basınç ile şekillendirme yöntemi, olumlu ve olumsuz yönleriyle incelenmiş ve geleneksel derin çekme yöntemleriyle karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır [38].

Markstaedter ve arkadaşı, hidromekanik derin çekme yönteminde bölümlenmiş temaslı baskı yastığı kuvvetinin sayısal simülasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile, “T” şekilli malzemenin hidromekanik derin şekillendirilmesinde bölümlenmiş baskı yastığı kuvvetinin etkileri incelenmiştir. Hidromekanik derin çekme yönteminin üstünlükleri şu şekilde sıralanmıştır.

1. Hazne basıncı, zımba ve malzeme arasındaki sürtünme kuvvetini artırır. Dolayısıyla kuvvet artımı, maksimum çekme oranını artırır. Üstelik ince yapılı parçalarda kırışma olmadan çekme sağlar. Bu durum, hazne basıncının zımba kursuna göre optimizasyonu ile sağlanır.

2. İnce parçalar geleneksel yöntemde birden fazla aşamada şekillendirilebilirken, bu yöntemde tek aşamada şekillendirilebilir. Karmaşık yapılı parçalar az sayıda aşama ile mükemmel yüzey kalitesinde şekillendirilebilir.

3. Kalıp ile parça, sıvıdan dolayı temas etmediğinden sürtünme olmaz. Bu durum malzemenin “A” sınıfı yüzey kalitesinde çıkmasını sağlar.

4. Parça üzerindeki gerilme dağılımları ve bu gerilmelerin miktarlarının yüksek olması malzemenin daha az geri yaylanmasına neden olur.

5. Daha büyük pekleşme elde edilir. Bu da aynı sac kalınlığına göre daha yüksek dayanım elde edilmesini sağlar.

6. Dişi kalıp yerine sıvı basıncı konulması, kalıp maliyetinin düşürülmesini sağlar.

Çalışmada, baskı yastığı kuvvetinin uygulama bölgesi sekize bölünmüştür. Bu sekiz bölgeye sabit ya da farklı baskı yastığı kuvveti uygulanmıştır. Farklı noktalara farklı baskı yastığı kuvvetinin uygulanması, en uygun kalıp sistemi tasarımını sağlamıştır. Analiz sonuçlarının deneysel çalışmalar ile uyum sağladığı görülmüştür [39].

Choi ve arkadaşları; sıcak hidromekanik şekillendirme şartları altında, farklı şekil değiştirme hızlarında, hazne basıncının ve baskı yastığı kuvvetinin en uygun değerlerini belirleyebilmek için metod geliştirmeyi amaçlamıştır. Şekil değiştirme hızının parça şekillendirilmesine etkisi incelenmiştir. SEY ile, hızlı bir şekilde, en uygun değişkenlerin bulunabileceği görülmüştür. Şekil değiştirme hızı arttığında akma gerilmesinin yükseldiği gözlenmiştir. Gerinim oranının artması, flanş bölgesindeki malzeme dayanımının da artmasına sebep olmuştur. Bu durumda, dişi kalıp radyüsünde, malzeme akma esnasında daha dayanımlı hale gelmiştir. Şekil değiştirme hızı arttığında, flanş bölgesindeki incelmenin daha az olması sebebiyle, baskı yastığı kuvveti ihtiyacı daha az olmuştur [40].

Sharma ve arkadaşı, dairesel kutuların hidromekanik şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Sac malzeme, öncelikle içerisine sıvı doldurulmuş olan alt kalıba yerleştirilmiş, sıvı kaçağı olmayacak şekilde baskı yastığı ile tutulmuş ve zımba ile şekil değişimine uğratılmıştır. Hazne basıncı sadece zımba hareketi ile yükseltilmiştir. Çalışmada, dairesel kutunun hidromekanik olarak şekillendirilmesi esnasında, farklı şekil değiştirme şartlarında, şekil değiştirme sertleşmesi üstelinin, anizotropinin ve sac malzeme ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetinin etkilerinin ortaya konmasına çalışılmıştır. SEY ile analiz yapabilmek için model oluşturulmuştur. Modelde, yukarıda geçen değişkenlerin, şekillendirme prosesine etkileri incelenmiştir. İncelmeyi etkileyen faktörlere bakıldığında, malzeme özelliğinden çok, sac malzeme ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünme etkili olmuştur. Geleneksel derin çekme yöntemleri ile mukayese

edildiğinde hidrolik şekillendirme; parçaların sağlamlaştırılması, ağırlık azaltılması, yapısal dayanım ve katılık sağlanması, alet kurulum maliyetinin azaltılması, daha az ikincil proses, ölçüsel toleransta kesinlik, düşük geri yaylanma ve daha az atık malzeme önermektedir. Bu üstünlüklerinin yanı sıra, bir parçanın üretim süresinin uzun olması, pahalı donanım ve alet kurulumunda bilgi eksikliği gibi olumsuzlukları vardır. Bu çalışmada ise hidrolik şekillendirmede etkili olan değişkenler (pekleşme, anizotropi) ve sürtünme üzerine (germe ve derin çekme şartlarında) durulmuştur. Deneyle, SEY ile analiz edilmiştir. Geleneksel yöntemle göre, hidrolik şekillendirme yöntemiyle daha yüksek çekme derinliğine ulaşılmıştır. Deneyledeki kalınlık dağılımı ile simülasyonlardaki kalınlık dağılımının birbiri ile uyum sağladığı görülmüştür. Analizlerde, iyi bir yağlama, pürüzlü zımba yüzeyi, yüksek şekil değiştirme sertleşmesi üssü “n” ve anizotropi “r” değeri ile daha düşük malzeme incelmesinin elde edildiği görülmüştür [41].

Kang ve arkadaşları; SEY kullanarak geleneksel derin çekme ve hidromekanik şekillendirme yöntemi ile otomobil yakıt deposunun üretiminin mukayeselerini yapmışlardır. Hidromekanik şekillendirme ile üretimde şekillendirme esnasında önemli değişkenler olan baskı yastığı kuvvetine ve hazne basıncına özel önem verilmiş, 3 farklı değişken uygulaması yapılmıştır. SEY ile yapılan analizler, deneysel sonuçlar ile doğrulanmış ve sonlu elemanlar yöntemi hidromekanik derin çekme ile şekillendirme de kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, geleneksel derin çekme ile hidromekanik şekillendirme mukayese edilmiştir. Hidromekanik şekillendirme yöntemi, geleneksel derin çekme yöntemi ile mukayese edildiğinde, kalınlık dağılımının çok daha dengeli olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yakıt tanklarının bükülmelere karşı daha dayanıklı olmasını sağlamıştır. Hidromekanik derin çekmede, sac ile kalıp yüzeyi arasında temas olmadığından, en iyi yüzey kalitesine ulaşılabilmektedir [42].

Rubin ve arkadaşları, alüminyum ve yumuşak çelik malzemelerin hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesini deneysel olarak ve SEY kullanarak incelemişlerdir. Elde edilecek ürünün kalitesine, değişkenlerin etkileri tartışılmıştır. Uygun bir maksimum hazne basıncı ile, şekillendirme bölgesi, deneylede elde edilmiştir. EksPLICIT sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılmıştır. Sayısal sonuçlar deneylelerden elde

edilen sonuçlar ile mukayese edilmiş, bölgesel incelemeler tahmin edilmiş, kalınlık değişimleri tartışılmıştır. Hidromekanik şekillendirme için, 0,18 mm kalıp boşluğu kullanılmıştır. Zımba ucuna yakın bölgedeki inceleme doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Bölgesel inceleme, hazne basıncı düşükse zımba ucuna yakın, yüksekse kalıp profilinde (alt ve üst radyüs bölgesi arasında) meydana gelmiştir [43].

Thiruvarudchelvan ve arkadaşı, hidromekanik şekillendirme yönteminin farklı uygulamaları üzerinde incelemeler yapmışlardır. 1 mm kalınlığında Al1100-H14 malzeme kullanmışlar, 100 MPa hazne basıncı denemişlerdir. Hazne basıncı miktarının, dişi kalıp radyüsünde, sac malzemeyi kalıba temas ettirmeyecek derecede, yukarıya doğru kaldıracak miktarda olması gerektiği ifade edilmiştir [44].

Danckert ve arkadaşı, hidromekanik şekillendirmede sac malzeme ile alt kalıp arasında sıvı kaçaqları meydana gelmesi sebebiyle düzenli bir basınç dağılımının sağlanmasının zor olduğu, bu sebeple bu sorunun kauçuk bir diyafram ile geliştirilebileceği üzerine durmuşlardır. Hidromekanik şekillendirme, deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve SEY ile yapılan analiz sonuçları ile mukayese edilmiştir [45].

Groche ve Metz, hidrolik şekillendirmenin diğer bir uygulaması olan yüksek basınçlı şekillendirme üzerine çalışmışlardır. Baskı yastığı kuvvetinin yüksek basınçlı hidrolik şekillendirmeye etkilerini incelemişlerdir. Baskı yastığı kuvvetinin optimizasyonu ile daha az cidar incelmeye sahip parça şekillendirilmiş ve daha yüksek çekme derinliğine ulaşılmıştır [46].

Zhao ve arkadaşları, hidromekanik derin çekmenin yeni bir uygulaması olan basınçlandırılmış hidromekanik derin çekme üzerine çalışmışlardır. İşlem, ikinci bir basınç silindiri vasıtasıyla, baskı yastığı ile alt kalıp arasında şekillendirilen sac malzemenin dış çapından basınç uygulanması esasına dayanır. Geleneksel derin çekme, endüstriyel üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır, fakat bu prosesinde, kutular için derin çekme oranları sınırlıdır. Çekme oranı, flanş bölgesindeki çekme direnci ve kutu duvarındaki maksimum çekme kuvveti sebebiyle 2,2'yi aşmamaktadır. Üretim verimini ve ürün kalitesini artırmak amacıyla yüksek bir çekme oranı elde etmek için birçok teknik

denenmiştir. Bu metotların çoğu, sac malzemeye basınç uygulanması esasına dayanır. Her bir prosesin diğerlerine göre eşsiz özellikleri olmasına rağmen tamamında yüksek derin çekme oranlarına ulaşılabilmektedir. Yüksek basınçlı hidromekanik şekillendirme ile 08Al çeliğinde 2,63 çekme oranına ulaşılmıştır [47].

Lang ve arkadaşları, dairesel dişi kalıp kullanılarak kare bir parçanın hidromekanik derin çekilmesini araştırmışlardır. Duvar kalınlık değişimi ve ölçüsel doğruluk incelenmiştir. Kare zımba şartları simülasyon yapılmış, sonuçların deneysel veriler ile uyum sağladığı görülmüştür. Normal hidromekanik derin çekmeden farklı olarak sıvı kaçağı olmaması için ön şişirme yöntemi kullanılmıştır. Sıvı basıncının sac malzemeyi kenar bölgesinden kalıp içerisine itmesi sağlanmıştır. Bu itme, çekme oranını geliştirmiştir. Kalıp girişinin yuvarlak olması, zımbanın kalıba göre kolay pozisyon almasını sağlamıştır. Kalıp girişindeki radyüsün büyük olması çekme oranını geliştirmiştir. Hazne basıncı ölçüsel doğruluğu etkilemiş, yüksek doğruluk yüksek basınç ile mümkün olmuştur. Basıncın yüksek olması duvar kalınlığında incelleme ile sonuçlanmıştır [48].

Pourboghrat ve arkadaşları; alüminyum sac malzemelerin hidromekanik derin çekilmesinde kırılma kontrolü üzerine çalışmışlardır. Kırılma davranışı, alüminyum malzeme kullanılarak, sayısal analizlerle ve deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Bu yöntemde dişi kalıba ihtiyaç yoktur. Basınç sac malzemedeki kırılmaları geciktirmektedir. Baskı yastığı kuvveti kırılma kontrolünde çok önemlidir. Çalışmada, kırılma meydana getirmeyecek en uygun hazne basıncı değeri simülasyonu yaratılmıştır [49].

Zahedi ve arkadaşları, silindirik hidromekanik derin çekmede kırılma probleminin araştırılması için bir analiz geliştirilmiştir. Teorik olarak ve SEY kullanılarak, iş parçasında kırılma ile sonuçlanan kritik sıvı basıncı üzerine çalışılmıştır. Sonuçlar, teorik basınç hattının, kırılma hattının üst sınırı olduğunu göstermiştir. Anizotropinin, çekme oranının, sac kalınlığının, şekil değiştirme sertleşmesi üssünün kırılmaya etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, kalıp profilinin çok etkili olduğunu göstermiştir. Teorik hesaplama ve SEY ile analizde kırılmada etkili olan hazne basıncı incelenmiş, teorik basınç analiz basıncından yüksek çıkmıştır. Analiz sonucunda daha büyük anizotropi,

daha büyük sac kalınlığı, daha büyük “n” değeri kırılma basıncının daha büyük olmasına neden olmuş, çekme oranının artması hazne basıncının düşürülmesini gerektirmiştir. Zımba kursu olarak bakıldığında basınç artışı ile daha uzun kurslar elde edilmiştir [50].

Parsa ve arkadaşları, bir otomobil parçasının üretiminde sac hidrolik şekillendirme prosesinin sayısal ve deneysel analizini yapmışlardır. Hidrolik şekillendirme esnasında, sıvı ile sac malzemeyi birbirinden ayırmak için kauçuk diyafram kullanmışlardır. Düşük karbon içeren St14 çeliği ve 2024 alüminyum sac malzeme kullanılmıştır. Önce prosesin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonları yapılmış, elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Karmaşık yapı bir parçada, hidrolik şekillendirme prosesinin yeteneklerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Karmaşık yapı parçaların geleneksel derin çekme yöntemleri ile tek kademede üretilmesinin zor olduğu üzerinde durulmuştur [51].

Zhang ve arkadaşları, hidromekanik derin çekmenin gelişimini incelemişlerdir. İşlem prensipleri ve olanakları tanıtılmış, teori, simülasyon ve proses performansındaki gelişmeler anlatılmıştır. Uygulamalar özetlenmiştir. Hidromekanik derin çekme yönteminin diğer hidrolik şekillendirme yöntemleri ile mukayesesi yapılmıştır. Hidromekanik derin çekme, geleneksel derin çekme ve hidrolik şekillendirme teknolojilerinin her ikisinin özelliklerini taşır. Hidromekanik derin çekmede, sıvı basıncı sayesinde kalıp sürtünmeleri azalırken, zımba ve sac arasındaki sürtünme tutma kuvvetinin artmasıyla, zımba burundaki kırılma önlenmektedir. Bu durum, çekme oranının artmasına olanak sağlamaktadır. Sıvı basıncının farklı uygulamaları ile 3,2 civarında çekme oranlarına ulaşılabilmektedir [52].

Dachang ve arkadaşları, süper alaşım malzemelerin hidromekanik derin çekilmesini araştırmışlardır. Alüminyum, bakır ve çelik gibi bilinen malzemelerde hidromekanik derin çekmenin yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandığı, süper alaşımlarda ise kullanımın yaygınlaşabilmesi için hidromekanik derin çekmede şekillendirme değişkenlerine ihtiyaç duyulduğu üzerinde durulmuştur. Çünkü, süper alaşımların yüksek dayanımından dolayı şekillendirilmesi zordur. Çalışmada, süper alaşım için bir çalışma alanı belirlenmiş ve kalınlık değişimleri ile kırılmalar tartışılmıştır [53].

Halkacı ve Türköz, sacların hidrolik şekillendirilmesinde proses değişkenlerinin belirlenmesi için deney tasarımı üzerine çalışmışlardır. Zimba ile sac hidrolik şekillendirme yönteminde, prosesi etkileyecek değişkenleri belirleyebilmek için, Taguchi metodu kullanılarak deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımında performans kriteri olarak sadece çekme oranı ele alınmıştır. Çekme oranına etki edebilecek olası değişkenler tahmin edilmiştir [54].

Karaağaç ve Özdemir, sıvı basıncı ile şekillendirmede deney düzeneği üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, sıvı basıncı ile şekillendirmenin otomotiv endüstrisinde uygulamaları detaylı olarak incelenmiş, bir sıvı basıncı ile şekillendirme işlemi, deney düzeneği tasarımından üretimine kadar aşamalar halinde incelenmiştir [55].

2.5 Geleneksel Derin Çekme

Karalı, derin sac çekme prosesi esnasında, baskı yastığı kuvvetine bağlı olarak, kutu ağzında oluşan kulaklaşmaları deneysel olarak incelemiştir. Model olarak, 2 mm kalınlığa sahip Al1050 sac malzeme kullanılmıştır. Zimba ilerlemesine bağlı olarak, sabit ve değişken baskı yastığı kuvvetlerinin etkileri karşılaştırılmıştır. Değişken baskılı çekmelerde, değişim eğrilerindeki farklılıkların kutu yüksekliğine ve kulaklaşmaya olan etkileri de incelenmiştir. Sabit baskı yastığı kuvvetinin, çekme derinliği ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Ancak, buna bağlı olarak kutu ağzında kulaklaşmaların arttığı gözlenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalardan, teorik, deneysel ve sayısal yollarla elde edilmiş farklı baskı tiplerinin, sonucu doğrudan etkilediği gözlenmiştir. Daha derin ve daha düzgün bir kutu elde etmek için, baskı yastığı kuvvetinin çekme boyunca değiştirilmesi gerektiği gözlenmiştir [56].

Yang ve arkadaşları, bir magnezyum malzemenin, soğuk derin çekilmesi esnasında göstermiş olduğu şekil değiştirme davranışları üzerine çalışmışlardır. Derin çekme, oda sıcaklığında ve silindirik zimba kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada; kırılma modelleri, sınır çekme oranı, şekil değiştirme yükü, kalınlık dağılımı, anizotropik etki, yaşlandırma ve alet konfigürasyonu üzerinde durulmuştur. Sonuçlar göstermiştir ki; kalıp

boşluğu yerine zimba yuvarlatması (radyüs), kalınlık değişimi üzerinde daha büyük etkiye sahiptir. Anizotropi, soğuk şekillendirmede önemlidir ve çekme oranı sınırını etkilemektedir. Yan duvarlarda sık sık kırılmalar gözlenmiştir. Anizotropi faktörünün, kutu duvarındaki değişimde ve kalınlık dağılımında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kalınlık değişimi ve şekilsel değişim, kutu duvarının yüksekliğinin artışıyla artmıştır [57].

Yıldız ve Kırılı, derin çekme prosesinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Derin çekme yoluyla şekillendirme prosesi, değişik sektörlerde kullanılan soğuk şekillendirme yöntemlerinin başında gelir. Çalışmada, karmaşık geometrilere sahip kalıp yüzeylerinde, çelik sac malzemenin ne doğrultuda akacağı ve şekillendirme esnasında incelen sacın kırılma, kırılma vb. şekil hatalarının; kalıp tasarımı aşamasında önceden görölüp önlem alınması, tasarım değişikliklerinin sonuçlarının kalıp imal edilmeden öngörülebilmesi için yapılması gerekenler incelenmiştir. Metal şekillendirme proseslerinde en çok problem yaşanan proses derin çekmedir. Plastik şekillendirme prosesleri için bazı tablolar hazırlanmıştır. Bu tablolar amprik metodlarla hazırlandığından, yalnızca deney malzemesinin kullanıldığı uygulamalarda işe yaramakta ve malzemenin iki boyutta aktığı kabulü ile oluşturulmaktadır. Karmaşık geometrilere sahip parçaların soğuk şekillendirilmesinde bu veriler yetersiz kalmaktadır. Karmaşık yüzeylere sahip her parça için defalarca denemeler yapılmakta, kalıp tasarımı değiştirilip istenen ürün elde edilinceye kadar deneme yanılma yoluyla sonuca ulaşılmaya çalışılmaktadır. Sac malzemede meydana gelen kırılmalar baskı yastığına açılan kilit bölgeleri ile engellenmeye çalışılmaktadır. Kilitlerin yeri ve miktarı da denemeyle belirlenmektedir. Ayrıca, kalıplar üzerine yapılan kaynak prosesleri kalıpta kalıcı iç gerilmeler oluşturmakta, kalıbın ömrünü kısaltmaktadır. Bu proseslerin tümü üretim maliyetini yükseltmektedir. Çalışmada, araç süspansiyon sisteminin önemli bir parçası olan askı desteği ve kalıpları, hasarsız bir şekilde imal edilmiştir. İlk modelden itibaren kalıp sistemine eklenen her sınır şartı ve özelliğin, şekillendirme prosesine etkisi rahatlıkla gözlenmiş ve üç boyutlu geometrik modelin nasıl değiştirilmesi gerektiği hakkında fikir vermiştir. Parçanın kalıptan kusursuz çıkması için gerçekleştirilecek deneme yanılmalar ortadan kaldırılmıştır. Kalıplara yapılacak kaynaklama ile malzeme ilavelerinin, kalıp ömrünü kısaltması ve imalat süresini uzatması engellenmiştir [58].

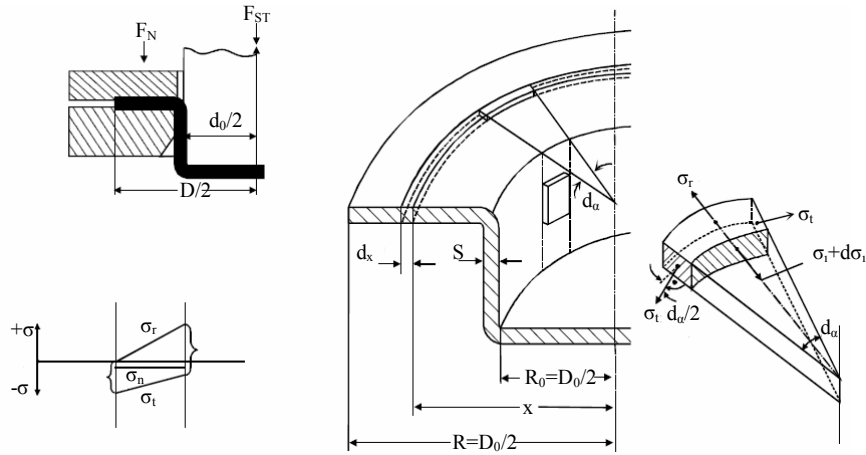
Gavas ve arkadaşı, anizotropik alüminyum sacdan hazırlanan değişik taslak malzeme şekillerini, kare kutu şeklinde derin çekerek incelemiştir. Çekilen tüm parçalarda herhangi bir kırılma/kopma meydana gelmemiş, yani kullanılabilir durumda elde edilmiştir. Optimum taslak malzeme şekilleriyle, çekilen kutularda hurda malzeme miktarı ve buna bağlı olarak maliyetler azalmakta, ancak, hafif kırışmalar meydana gelmekte ve bu nedenle de yüzey kalitesi bozulmaktadır. Diğer taslak malzeme şekillerinden elde edilen kutularda ise, kulaklaşma/kırışma oldukça fazla olduğundan hurda malzeme miktarı ve buna bağlı olarak maliyetler artmakta, fakat özellikle köşelerdeki yüzey kalitesi daha iyi elde edilmektedir [59].

Özek ve Bal, derin çekme kalıplarında, matris-zımba radyüsü ve çekme oranının et kalınlığı üzerindeki etkisi konusunda çalışmışlardır. Derin çekme, sac metal şekillendirmede kullanılan en önemli yöntemlerden biridir. Bu yöntemde en uygun parça üretimi, kalıp ve zımba profil radyüsü, parça şekli ve malzemenin şekillendirilebilirliği gibi proses değişkenlerine bağlıdır. Özellikle parça şekli, şekillendirilebilirliği doğrudan etkilediği için çok önemlidir. Bu çalışma, DKP 37 sacı kullanılarak kalıp ve zımbanın radyüs değişimlerinin, çekme oranı sınırının, baskı plakası ve kalıp açılarının et kalınlığı üzerindeki etkisini belirlemek için yapılmıştır. Baskı plakası yüzeylerine $\alpha=2,5^\circ$, $\alpha=7,5^\circ$, $\alpha=12,5^\circ$, $\alpha=15^\circ$ açılar, kalıp ve zımba köşelerine $R=10$ mm, $R=8$ mm, $R=6$ mm, $R=4$ mm radyüsler verilmiştir. Zımba çapı 30 mm, matris çapı 32,3 mm ve kalıp boşluğu 1,15 mm dir. Kalıp ve parça arasındaki sürtünmeyi azaltmak için Shell Tellus 68 yağ kullanılmıştır. Et kalınlığının ölçümü kutu üzerinde altı farklı bölgeden yapılmıştır. Çalışmada; çekme oranı sınırı “ β ”, baskı plakası açısı “ α ”, kalıp ve zımba radyüsünün artmasıyla et kalınlığının azaldığı görülmüştür [60].

Gürün; derin çekme kalıplarında çekmeyi etkileyen değişkenleri deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarda, değişik çekme değişkenleri kullanılarak, silindirik ve kare olmak üzere iki farklı geometride derin çekme prosesleri gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmalar, alüminyum, DKP ve pirinç malzemelerde uygulanmıştır. Derin çekme sırasında oluşan çekme kuvvetleri, ölçülmüştür. Kalıp kavisi, zımba kavisi, şekil değiştirme hızı, çekme boşluğu ve sac malzeme kalınlığı değişkenlerinin çekme prosesine etkileri incelenmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak deney örneklerinde oluşan kırışıklık,

kırılma, sac kalınlığı incilmesi ve çekme kuvvetleri incelenmiştir. Sac malzemenin ve çekme değişkenlerinin, sac malzemelerdeki kırışıklığı, kırılmayı ve miktarını, sac kalınlığında incelmeyi ve çekilebilirlik oranlarını doğrudan etkilediği görülmüştür [61].

Siegert ve Wagner, derin çekme prosesi üzerine çalışmışlardır. Silindirik kutuların derin çekilmesi esnasında, sac malzemenin baskı yastığı altında kalan kısmı çevresel çekme gerilmesi ve tanjantal basma gerilmesi etkisi altındadır. Sacın kırışmaması için mümkün olduğunca az normal gerilme uygulanmalıdır. Bu normal gerilme, baskı yastığı ve sac malzeme arasındaki sürtünmeyi etkilediği kadar, kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünmeyi de etkiler. Genel olarak, daha yüksek normal gerilme, daha yüksek baskı yastığı kuvveti, daha yüksek sürtünme kuvvetlerine yol açar. Derin çekme prosesinde etkili olan gerilmeler Şekil 2.2’de verilmiştir [62].



Şekil 2.2 Baskı yastıklı derin çekme prosesinde gerilme oluşumları [62].

Özçelik, derin çekme prosenin simülasyonunu yapmıştır. 0,6 mm kalınlıktaki ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sacdan, dikdörtgen derin çekme ürünü için, DYNAFORM sonlu elemanlar metodu simülasyonu çalışılmıştır. Bu çalışmada, 4 mm, 6 mm ve 8 mm ıstampa radyüsü, 10 mm/s, 30 mm/s ve 50 mm/s şekil değiştirme hızı değişkenlerinin en büyük kalınlık azalmasına ve hasarsız ürün yüksekliğine etkisi incelenmiştir [63].

Karalı, silindirik derin çekme prosesinde zımba uç şeklinin cidar kalınlık dağılımına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesini yapmıştır. Zımba uç şekli değiştirilerek farklı şekillendirmeler gerçekleştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan uç şekillerinden yuvarlak, eliptik ve küresel uçlar model olarak seçilmiştir. Yuvarlak ve eliptik uçlar için farklı yarıçap değerleri referans alınarak birbirlerine göre farkı incelenmiştir. Eliptik uçlu zımbanın, zımba ilerleme eksenindeki yarıçap değeri ile ona dik eksenindeki yarıçap değerleri yer değiştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Zımba uç şeklinin kutu köşesinin oluşumunda, cidar kalınlık değişiminde ve mukavemet açısından önem arz eden boğumlanma bölgesinde farklılıklar oluşturduğu gözlenmiştir. Elde edilen veriler literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır [64].

Kang ve arkadaşları, otomobil yakıt tankının derin çekilmesi aşamasında 80 tonluk baskı yastığı kuvveti ve 2 m/s çekme hızı kullanmışlardır. Sürtünme katsayısı 0,1 olarak alınmıştır. Kullanılan sac malzeme kalınlığı 0,8 mm'dir [65].

2.6 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

Gürün, kalıp kavisi, zımba kavisi, şekil değiştirme hızı, çekme boşluğu ve sac malzeme kalınlığı gibi çekme değişkenlerini kullanarak, SEY'ne dayalı çözüm yapan DYNAFORM ve AUTOFORM paket programları ile derin çekme prosesini analiz etmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ile analiz sonuçlarının çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür [61].

Zhongqi ve arkadaşları, otomotivde kullanılan alüminyum sacların kırılma sınırları üzerine çalışmışlardır. Otomobil iskelet sistemlerinin şekillendirilmesinde kullanılan SEY'nde doğru şekillendirme kriterleri çok önemlidir. Otomobillerde kullanılan alüminyum alaşımı sacların şekillendirilebilirliğini doğru bir şekilde geliştirebilmek için, SEY'nde kullanılacak sünek bir kırılma kriteri geliştirilmiştir. Barlat'ın akma ve Holloman'ın pekleşme eşitliklerine dayanan alüminyum alaşımı sacların simülasyonları yapılmıştır. Sünek kırılma kriterindeki malzeme sabitleri, tek eksenli çekme ve yarı küresel zımba ile germe testlerinden elde edilmiştir. Derin çekme ve germe modlarını

içeren silindirik karmaşık şekilli alüminyum alaşımlarının kritik zımba kursu, sünek kırılma kriterleri kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel değerler ile hesaplanmış sonuçların mukayesesi ile, deneylerde kullanılan 3 farklı alüminyum alaşımı sac malzeme için sünek akma kriteri başarılı tahminlerle tespit edilmiştir [9].

Dariani ve Fazli, hidromekanik derin çekme prosesinin teorik ve deneysel analizini yapmışlardır. Gerilme oluşumu ve kritik sıvı basıncı tartışılmıştır. İşlemin çekme safhası ve şişirme safhası için teorik yaklaşım tespit edilerek, başarılı çalışma bölgesi elde edilmiştir. Basınç sınırlarına, geometri ve sac malzeme özelliklerinin etkileri çalışılmıştır. Teorik çalışmaların güvenilirliğini kararlaştırmak için de deneysel yaklaşım kullanılmıştır [66].

Hariharan ve arkadaşı, sac metal parçalarda ham malzeme boyutunu azaltacak malzeme optimizasyonu üzerine odaklanmıştır. Bir otomobil parçası olan tavan, analiz için tercih edilmiştir. Sac metal şekillendirme prosesi analizlerinde ticari explicit çözücü kullanılmıştır. Analizlerde gerçek deney sistemi profillerini kullanabilmek için kalıp koordinatlarını ölçen bir bilgisayar destekli alet geometrisi geliştirilmiştir. ŞSD ve kalınlık değişimindeki “% azalma”, SEY ile analiz edilmiştir. Malzemelerin deneysel verileri, dairesel analiz tekniği ile elde edilmiştir. Büyük uzamalarda fark % 2-10 ve küçük uzamalarda % 0-6 arasında değişmiştir. Bu çalışma ile % 1,57 oranında ağırlık azalması elde edilmiştir [67].

Gök ve arkadaşları, sonlu elemanlar metodunun gerçek bir sanayi parçasında uygulanması üzerine çalışmışlardır. Karmaşık geometriler içeren kalıp yüzeylerinde, ince çelik sac malzemenin hangi doğrultuda akacağı ve şekillendirme esnasında incelenen sacın kırılma, kırılma ve benzeri şekil hatalarının; kalıp tasarımı aşamasında önceden görülüp önlem alınması büyük önem taşımaktadır. Derin çekme sonucu elde edilecek sac parçanın şeklini, kalınlığını, içerdiği ön gerilmeleri, çekme prosesinde kullanılacak minimum sac boyutunu, sacın malzemesini ve en uygun kalıp yüzeyleri tasarımını bilgisayar simülasyonları ile önceden görülerek maliyetten ve zamandan tasarruf etmek üreticiler için büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı “DYNAFORM 5.0” kullanılarak, AISI 1017 çelik sac malzemenin derin çekilmesi prosesi

gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda analiz şartları ile benzer deneysel derin çekme prosesi gerçekleştirilmiştir. Analiz ve deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, aralarında tutarlılık görülmüştür [68].

Karaağaç ve arkadaşları, AISI 304 paslanmaz çelik sac malzemenin geleneksel olarak ve sıvı basıncıyla derin çekilebilirliklerinin SEY'yle karşılaştırmalı analizi konusunu çalışmışlardır. Geleneksel yöntemlerle yapılan derin çekme proseslerinde, kalıp yapımının maliyetli, zaman alıcı ve zahmetli olmasından dolayı bu yöntem ile üretim ekonomik olmamaktadır ve şekillendirme problemleri yaşanmaktadır. Sıvı Basıncıyla Şekillendirme "SBŞ" teknolojisi kullanılarak derin çekme kalıplama yöntemi, geleneksel kalıplama yöntemlerine göre daha ekonomik ve uygulama yönünden pratik bir yöntem olarak yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada; çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmakta olan AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemenin dairesel ve karesel geometrili ürünler için, geleneksel ve SBŞ yöntemi ile derin çekilebilirlikleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sanal ortamda incelenmiştir. Analizlerde AUTOFORM ticari yazılımı kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar; gerilme dağılımı, kalınlık değişimi, şekillendirilebilirlik, kırılma ve kırışıklık oluşumu gibi ölçütler açısından değerlendirilmiştir [69].

Kumar ve arkadaşına göre, normal olarak bir şekillendirme düzeneği kurmak için birçok deneme yanılma çalışması yapmak gerekir. Sayısal simülasyonlar, alet sistemi kurmak için çok kullanışlıdır, çünkü en uygun proses değişkenlerinin bulunmasına yardımcı olur ve deneme yanılma çalışmalarını azaltır [34].

Zhang ve arkadaşları, yumuşak çelik malzemelerden silindirik kutu üretiminde hidromekanik derin çekme prosesini sayısal ve deneysel olarak incelenmişlerdir. Şekillendirme süreci SEY ile analiz edilmiştir. Sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile mukayese edilmiştir [36].

Yıldız ve Kırılı, derin çekme prosesinin doğrusal olmayan SEY yardımıyla modellenmesi üzerine çalışmışlardır [58].

Markstaedter ve arkadaşı, hidromekanik derin çekme yönteminde noktasal temaslı (bölümlenmiş) baskı yastığı kuvvetinin sayısal simülasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, SEY ile “T” şekilli malzemenin hidromekanik derin çekilmesinde bölümlenmiş baskı yastığı kuvvetinin etkileri incelenmiştir [39].

Zhang ve arkadaşları, alüminyum ve yumuşak çelikten dikdörtgen şekilli kutunun hidromekanik derin çekme yöntemi ile üretilmesini SEY ile incelenmiştir. Deneyler tarif edilmiş ve tartışılmıştır. İşlem, sayısal olarak explicit SEY ile analiz edilmiştir. Sayısal sonuçlar değerlendirilmiş ve deneyler ile mukayese edilmiştir. Değişik ölçülerdeki sekizgen ve dairesel deney malzemesi simülasyon yapılmış ve mukayese edilmiştir. Deneylerde meydana gelebilecek bölgesel incelmeye ve gövdesel kırılma hata çeşitleri tahmin edilmiştir [33].

Wu ve arkadaşları, basamaklı parçaların hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesinde, alt ve üst sınırlarının, SEY ile bulunmasını hedeflenmiştir. SEY ile analiz sonuçları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve SEY ile yapılan simülasyonların, deneylerin yerini alabileceği önerilmiştir [70].

Balendra ve Qin, karmaşık şekilli parçaların hidromekanik şekillendirilmesi üzerine çalışmışlardır. İç bükey şekilli parçanın dışbükeye göre daha zor şekillendirilebildiğini vurgulamışlardır. İç bükey malzemenin, hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesinde, basıncın etkilerinin görülebilmesi için SEY ile analizi yapılmıştır. Sonuçta, hidromekanik derin çekmede olması gereken alet konfigürasyonuna bilgi temin etme amaçlanmıştır. Şekillendirme başlangıcında hata olmaması için malzemenin yüksek kaliteye sahip olması gerektiği değerlendirilmiş, basıncın şekillendirilecek sac malzemenin şekillendirme sonrası geometrisine bağlı olduğu gözlenmiştir. Kırılma ve bölgesel incelemeler yetersiz ya da aşırı basınçtan kaynaklanmış, sac parçanın bölgesel özelliklerinde değişikliklerin bulunması, son ürün kalitesini yakalamakta zorluklara neden olmuştur [71].

Arwidson, çalışmasında; yüksek dayanımlı çelik sacların sayısal simülasyonlar ile şekillendirilmesi üzerinde durmuştur. Sac malzemelerin dayanımlarının artmasıyla şekillendirilebilirlikleri azalmaktadır. Bu malzemelerin sayısal olarak analizlerinin

yapılabilmesi için yeni plastik davranış modelleri ortaya koymak gerekir. Yüksek dayanımlı çelik saclarda geri yaylanma sıkça karşılaşılan problem tipidir. Uzama, incelme, bitmiş parça şekli, geri yaylanma, sayısal simülasyonlar ve deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Denemelerde, Hill 48 ve Hill 90 malzeme modeli kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı çelik sac malzemelerin akma modellerinde daha fazla çalışmalar yapılmasına ihtiyaç olduğu değerlendirilmiştir [72].

Duong ve arkadaşları; kaplanmış malzemenin geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesinde karşılaşılan kaplamanın hasar görmesi gibi problemlerin ortadan kaldırılması amacıyla sac hidromekanik şekillendirme yöntemini simülasyon şartlarında incelemiştir. Hidromekanik derin çekme yöntemi, kaplanmış veya önceden boyanmış sac malzemelerde başarılı sonuçlar vermiştir. Hidromekanik derin çekme yöntemi güçlü presler ve hidrolik aksam gerektirmiştir [73].

Jensen ve arkadaşları, hidromekanik derin çekmede basınç dağılımını ortaya koymak için sayısal model geliştirme üzerinde durmuşlardır. Geliştirilen sayısal model deneysel sonuçlar ile oldukça güzel örtüşmüştür. Hazne basıncı ve kalıp-sac malzeme arasındaki sıvı kaçağı üzerinde durulmuştur. Yüksek dayanıma sahip sac malzemede Holloman akma modeli kullanılmış, 44 MPa basınç denenmiştir [74].

Kang ve arkadaşları, bir yakıt tankının sayısal analiz kullanarak, hidrolik şekillendirme ve geleneksel derin çekme yöntemleri ile şekillendirilmesinin mukayeselerini yapmışlardır. Otomobil yakıt tankının her iki yöntemde de üretilebilmesi için, sayısal bir model ileri sürmüşlerdir. Bu model, geleneksel derin çekme yönteminde deneysel olarak doğrulanmıştır. Yakıt tankı, hidrolik şekillendirme yönteminde, geleneksel yöntemle göre daha eşit kalınlık dağılımlı olarak üretilebilmiştir. Karmaşık yapıları parçaların, hidrolik veya geleneksel yöntemler ile üretilmesi prosesinin SEY ile analiz edilmesi, alet tasarımını kolaylaştıracaktır [65].

Pourboghraat ve arkadaşları, alüminyum sac hidromekanik şekillendirmede kırılma davranışı üzerinde durmuşlardır. Barlat akma kriteri, prosesi analiz etmek için çok uygundur. SEY kırılma oluşumu ve kırılma tahmininde çok başarılıdır. Kırılma ve

kırılma, geleneksel derin çekme yönteminde gözlenen en önemli hata tipleridir. Bu durum; sac malzemenin geometrisini sınırlandırır. Kırışma, flanş bölgesinde ve zımba ucunda desteklenmeyen bölgede meydana gelir. Analizde, Von Misses izotropik malzeme modeli ve Barlat YLD 96 anizotropik malzeme modeli kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar ile mukayese edildiğinde, izotropik malzeme modelinin, kırışmaları tam tahmin edemediği, anizotropik modelin ise parça şekillendirilmesinde güzel sonuçlar verdiği gözlenmiştir [49].

Önder ve Tekkaya, farklı geometriye sahip iş parçalarının geleneksel ve hidromekanik derin çekme ile şekillendirilmesinin sayısal simülasyonunu yapmışlardır. Deneysel, elastoplastik malzeme modeli ve Hill 48 akma modeli kullanılmıştır. Sac malzeme olarak DC04 kullanılmıştır. Silindirik geometriye sahip zımba ile yapılan derin çekme deneyleri gayet başarılıdır. % 5-10 incelme, zımba ucuna yakın bölgede baskın olmuştur. Hidromekanik derin çekmede aynı bölgede çok az incelme gözlenmiştir. Hidromekanik derin çekmede sac malzemenin, geleneksel derin çekmeden daha az incelme olduğu, yüksek basınçlı hidrolik şekillendirmede ise en fazla incelme meydana geldiği gözlenmiştir. Derin parçaların şekillendirilmesinde hidromekanik derin çekme çok uygundur. Çünkü basınçlandırılmış sıvı, zımba ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvvetini artırır ki buda malzeme akışının kontrolü ile çekilebilirliğe ve iş parçasının üst köşesindeki boğumlanma oluşumundan kaçınmayı olumlu yönde etkiler. Hidromekanik derin çekmede baskı yastığı, kalıp ve iş parçası arasındaki sürtünme kuvveti çok küçüktür ki bu durum, sac malzemenin herhangi bir preslemeye maruz bırakılmadan dışı kalıp içerisine kolayca akışını sağlar. Hidromekanik derin çekmede incelmanın ve kalınlık dağılımının daha az olması, sürtünmeleri azaltıp daha dengeli malzeme akışı sağlar ki bu durum, malzemelerin daha derin çekilebilmesini sağlar. Derin çekmede seri üretim mümkündür, yüksek basınçlı hidrolik şekillendirme ise daha derine çekmeye uygun değilken daha karmaşık parçaların şekillendirilmesine uygundur. Çalışmada; derin çekme, hidromekanik derin çekme ve yüksek basınçlı hidrolik şekillendirme proseslerinin simülasyon sonuçları yardımıyla en uygun şekillendirme yöntemi ve en uygun proses değişkenleri üzerinde durulmuştur [75].

Lang ve arkadaşları, sac hidromekanik şekillendirme prosesinde değişkenlerin en uygun değerlerini tespit ederek deneysel ve simülasyonlar ile inceleme analizleri yapmışlardır. Hidromekanik derin çekmenin diğer uygulamalar ile mukayesesi yapıldığında, en büyük üstünlüğü sac malzemeye dengeli basınç uygulanabilmesi ve sınır şartlarının açık olmasıdır. Deneysel, 10 mm/s ile /30 mm/s arasında değişen şekil değiştirme hızı kullanılmıştır. Maksimum basınç 70 MPa olarak kullanılmıştır. Malzeme Al6016-T4'dür. Sac kalınlığı 1,15 mm ve kalıp boşluğu 0,8 mm olarak alınmıştır. Farklı kalıp boşluğu kullanılmış, kalınlık değişiminde büyük farklılık gözlenmemiştir. Özellikle zımba burnu bölgesi incelendiğinde, kalınlık dağılımının hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Burun bölgesinden sonra, büyük boşluk kullanımı ile sac kalınlığının bir miktar arttığı görülmüştür. Geleneksel derin çekmede ise bu boşluk çok önemlidir. Boşluk çoksa gövde kırışması olur. Hidrolik şekillendirmede ise büyük kalıp boşluğuna, sac malzeme zımbaya iyi bir şekilde temas edebilsin ve kalıp radyüsünde kalıp ile sürtünmeden kalkabilsin diye izin verilmiştir [76].

Fazlı ve Dariani, hidromekanik derin çekme ve proses değişkenlerinin, prosese etkileri konusunda sonlu elemanlar metodu ile çalışmışlardır. SEY'ni doğrulamak için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Başlangıçtaki hazne basıncı, kalıp radyüsü, sac malzeme kalınlığı, sürtünme etkisi gibi değişkenlerin etkileri araştırılmıştır. Maksimum çekme oranının elde edilebilmesi için, başlangıç hazne basıncının optimum değere sahip olması gerektiği görülmüştür. Düşük basınçlarda kalıp radyüsünün büyümesiyle sınır çekme oranı büyümüştür. Yüksek basınçlarda ise tespit yapılamamıştır. Sayısal sonuçlara göre, sac ile kalıp arasındaki ve sac ile baskı yastığı arasındaki sürtünmenin artması çekme oranı sınırını düşürürken, zımba ve sac malzeme arasındaki sürtünmenin artması çekme oranı sınırını artırmıştır [77].

Yıldız ve Kırılı, derin çekme prosesinin doğrusal olmayan SEY yardımıyla modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Derin çekme yoluyla şekillendirme prosesi, değişik sektörlerde kullanılan soğuk şekillendirme yöntemlerinin başında gelir. Bu yöntemde karşılaşılan problemlere bilgisayar destekli çözümler üretmek, hem zaman hem de para kaybını önleyecektir [58].

Hidromekanik derin çekmeyi geleneksel derin çekme ile mukayese edebilmek amacıyla son yıllarda bilgisayar simülasyonları çok hızlı gelişme göstermiştir. Simülasyonlar ile maliyetlerin düşürülmesi, zaman tasarrufu, daha çok bilgi ve daha çok grafiksel gösterimler hedeflenmiştir. Simülasyonlarda küresel elemanlar kullanılmıştır. Doğru prosesi belirleyebilmek için hazne basıncı ve baskı yastığı değerleri belirlenmiştir [52].

Lang ve arkadaşları, deneysel çalışmaların karmaşık, en uygun proses değişkenlerinin kararlaştırılmasının zor olması sebebiyle SEY'nin uygun proses değişkenlerini tespit etmede çok faydalı olduğu üzerinde durulmuştur. Sistem tasarlanmadan ve kurulmadan önce şekillendirme süreci SEY ile analiz edilirse tasarım ve imalat süreci oldukça kısaldır [78].

2.7 Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Literatürlerden de görüleceği gibi, sac malzemelere şekil verme prosesleri arasında hidromekanik derin çekme yöntemi dikkatleri üzerine toplamaktadır. Derin çekme ve diğer hidrolik şekillendirme yöntemlerine göre farklı ve büyük üstünlükler sunmaktadır. Derin çekme yöntemi seri üretime uygun iken, hidrolik şekillendirme yöntemleri karmaşık yapıları parçaların üretimine uygundur. Hidromekanik derin çekme yöntemi ise, diğer her iki yöntemde de üretilmeyen daha derin parçaların, daha ekonomik olarak üretilmesine uygundur. Bu yöntemde, tek kalıbın kullanılması nedeniyle daha kısa sürede, daha az deneme yanılma çalışması ile kalıp üretmek mümkündür. Şekillendirme sonunda daha homojen ürün elde edilebildiğinden, daha yüksek mukavemet elde edilebilmektedir. Sac malzemedeki eşit kalınlık dağılımı söz konusu olduğundan daha ince sac malzeme kullanmak mümkün olmuştur. Şekillendirme prosesi daha doğru proses değerleri ile gerçekleştirildiğinden, sac malzemenin kırılma, inceme sınırlarında çalışmak mümkün olmuştur.

Hidromekanik derin çekme prosesinin SEY ile analiz edilmesi, üretime geçme sürecinde zamanı ve maliyeti azaltmıştır. İhtiyaçlara daha kısa sürede cevap verebilmek

mümkün olmuştur. İşlemin sayısal olarak analiz edilmesi maliyetleri düşürmüş, en uygun malzeme üretimine yaklaşma sürecini en aza indirmiştir.

Sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarının bilinmesi ve deney sürecinde bu sınırlara ne kadar yaklaşıldığının değerlendirilmesi, sac malzemenin çok verimli kullanılmasını sağlamış, en az malzeme kullanarak en fazla ekonomi elde edilmesi sağlanmıştır. Sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarının önceden bilinmesi, şekillendirme sürecinde sac malzemelerin yüzeyine daire işaretlemelerinin yapılması ve bu dairelerden alınan uzama ölçülerinin ŞSD üzerine aktarılması, kritik şekillendirme bölgelerinin tespitinde önemli kolaylık sağlamıştır. Tespit edilen kritik bölgelerin düzeltilmesine olanak sağlamıştır.

Bu kapsamda, deneylere başlamadan önce sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırları ve mekanik özelliklerini ortaya koyacak çekme testleri ve Erichsen testleri yapılmıştır. Hidromekanik derin çekme prosesi ve geleneksel derin çekme prosesi AUTOFORM ticari yazılımı ile SEY kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme deney sonuçları AUTOFORM yazılımından elde edilen sonuçlar ile mukayese edilmiştir. AUTOFORM analiz sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen analiz sonuçları, ŞSD üzerinde de karşılaştırılmıştır.

3. SAC ŞEKİL VERMENİN TEORİSİ

Sac Şekil vermenin teorisi; metallere plastik Şekil verme, mekanik özellikler, ŞSD, hidromekanik derin çekme, geleneksel derin çekme, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz başlıkları altında incelenmiştir.

3.1 Metallere Plastik Şekil Verme

Metalik malzemeleri Şekillendirmede kullanılan en genel yöntemlerden birisi olan plastik Şekil verme proseslerinde, yani metalik proseslerde, metalik malzemeye bir kuvvet tatbiki ile malzemelerin plastik olarak Şekil değiştirmesi sağlanır. Bu durum metalik malzemelerin çok iyi plastik Şekil değiştirme özelliklerine sahip olmasından kaynaklanır. Mekanik prosesler sonucunda, malzemelerin genellikle mekanik ve fiziksel özellikleri değişir ve daha iyi özellik kazanırlar [79].

Plastik Şekil verme yöntemlerinde uygulanan kuvvet, malzemenin Şekil değiştirmesini sağlamalı fakat çatlama veya kırılmasına sebep olmamalıdır.

Mekanik proseslerde uygulanan kuvvete “F”; malzemenin Şekil değiştirme şartlarındaki mukavemeti “ σ ”, malzeme ile takım arasındaki sürtünme katsayısı “ μ ”, Şekillendirilecek malzemelerin Şekli ile ilgili geometrik faktör “c” etki eder. “ σ , μ , c”yi etkileyen faktörler, dolaylı olarak uygulanan mekanik prosesi de etkiler. Bu üç faktör içerisinde bulunan, Şekillendirilecek malzemenin Şekil değiştirme şartlarındaki mukavemetine “ σ ” etki eden faktörler; Şekil değiştirme sıcaklığı “T”, Şekil değiştirme miktarı “ ϵ ”, Şekil değiştirme hızı “ $\dot{\epsilon}$ ” ve malzemenin metalürjik yapısı “s”dır [79].

3.1.1 Birim Şekil Değişirme Kavramı ve Birim Şekil Değişirme Türleri

Tek eksende ortalama birim şekil değişirme; boyuttaki şekil değişirme miktarının ilk boyuta oranı olarak tanımlanmaktadır [79].

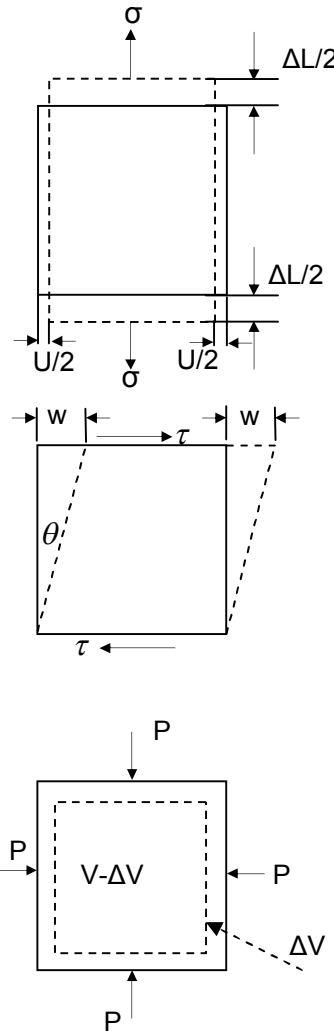
$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

e = Birim şekil değişirme

ΔL = Şekil değişirme miktarı

L_0 = İlk boy

L_i = Şekil değişirme sonundaki boy



Şekil 3.1 Çekme gerilmesi, kayma gerilmesi ve hidrostatik basınç hallerinde birim şekil değişirmenin tanımı [79].

Şekil 3.1’de çekme gerilmesi etkisi ile bir cisimde meydana gelen birim şekil değişimi görülmektedir. Birim şekil değiştirmeyi, boyuttaki değişimin ilk boyuta oranı yerine, tek eksendeki boyut değişiminin, o andaki boyuta oranı olarak tanımlamak daha doğru olup;

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_i}{L_0} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile gerçek birim şekil değiştirme “ ε ” belirlenebilir. Plastisite ve metal şekillendirme konularında gerçek birim şekil değiştirmeyi kullanmak daha faydalı olmaktadır.

Cisimde elastik şekil değişimleri sadece herhangi bir eksende şekil değişimi olarak kabul edilemez. İki çizgi arasındaki açının değişimi türünde de şekil değişimi söz konusu olabilir. Bir dik açıdaki açı değişimine “kayma birim şekil değiştirmesi” denir. (Şekil 3.1)

Uygulanan kayma gerilmesi sonucu “a” noktasındaki 90 derecelik açı, “ θ ” kadar küçülmüştür. Kayma birim şekil değiştirmesi “ γ ”, “ ω ” öteleme miktarının iki düzlem arasındaki “L” mesafesi arasındadır. Elastik şekil değiştirmelerde olduğu gibi, açı çok küçük ise, açının tanjantı açının radyan cinsinden değerine eşittir. Dolayısıyla kayma birim değiştirmesi, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\gamma = \omega / L = \tan \theta \quad (3.3)$$

Kenar uzunluğu “L” olan bir kübün altı yüzüne de “P” basıncı etkisinde, kübün hacminde “ V_0 ”, “ ΔV ” kadar bir küçülme olur. Hidrostatik basınç etkisiyle bir cisimde meydana gelen birim şekil değişimi, dilatasyon (hacimsel birim şekil değişimi) olarak bilinir ve “ $\Delta = \Delta V / V_0$ ” şeklinde ifade edilir.

3.1.2 Plastik Şekil Değiştirmede Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

Plastik şekil değiştirmenin değişik türleri, plastisite teorisindeki matematiksel formülleri elastisite teorisine oranla daha karmaşık hale sokmakta ve plastisite analizlerini zorlaştırmaktadır. Örneğin elastik şekil değiştirme, plastik şekil değiştirme sonuca varmak için izlenen yükleme yoluna bağlıdır. Ayrıca plastik şekil değiştirmede gerilme ile şekil değiştirme arasında, elastik şekil değiştirmede olduğu gibi doğrusal bir ilişki yoktur. Şekil değiştirme sertleşmesi olayını basit bağlantılarla plastisite teorisine uyarlamak oldukça zordur. Ayrıca, gerçek malzemelerde görülen plastik anizotropi, elastik histerizis ve Bausehinger olayı gibi olaylar plastisite teorisi ile tam olarak incelenememektedir [79].

Basit bir çekme deneyi sonucunda elde edilen grafik yardımı ile çizilen “gerçek gerilme (σ_g)-gerçek birim şekil değiştirme (ϵ)”, eğrileri plastisite çalışmalarında çok faydalıdır. Gerçek malzemelere ait tipik gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelenerek bunların ideal malzemelere ait teorik gerilme şekil değiştirme eğrilerinden hangisi ile bağdaştırılabileceğine karar verilebilir. Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisine genellikle plastik akış eğrisi adı verilir. Çünkü bu eğri, belirli bir şekil değiştirme oranı için metalin plastik olarak akışını sağlayacak gerekli gerilmeleri belirtmektedir. Plastik akış eğrisi matematiksel olarak;

$$\sigma_g = K \cdot \epsilon^n \quad (3.4)$$

şeklinde ki bir denklem ile ifade edilebilir [92].

Burada;

n =Şekil değiştirme sertleşmesi üssü,

K =Malzeme sabiti

olup $\epsilon=1$ için bulunan gerilmeye eşdeğerdir. Bu denklem plastik şekil değiştirmenin başladığı akma noktası ile boyun verme olayının başladığı maksimum yük noktası arasındaki homojen şekil değiştirme bölgesinde geçerlidir [79].

3.1.3 Plastik Şekil Değişirmenin Temel İlkeleri

Metalik malzemelerin plastik şekil değişirmesi en genel olarak belirli düzlemlerde ve doğrultularda atomların kayması ile gerçekleşir. Kaymanın kolaylıkla olmadığı durumlarda ise şekil değişirmeye ikizleme katkıda bulunur. Metalik malzemelerin şekil değişirme mekanizmaları; kayma, ikizlenme, tane sınırlarının kayması, yayınma sürünmesidir. Metalik malzemelerin elastik veya plastik şekil değişimine karşı direnci atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden ileri gelmektedir [79].

Bir atom düzleminin komşu atom düzleminde kayabilmesi için gereken gerilme;

$$\tau_{\max} = \frac{G}{2\pi} \quad (3.5)$$

Burada; G=Kayma elastisite modülüdür.

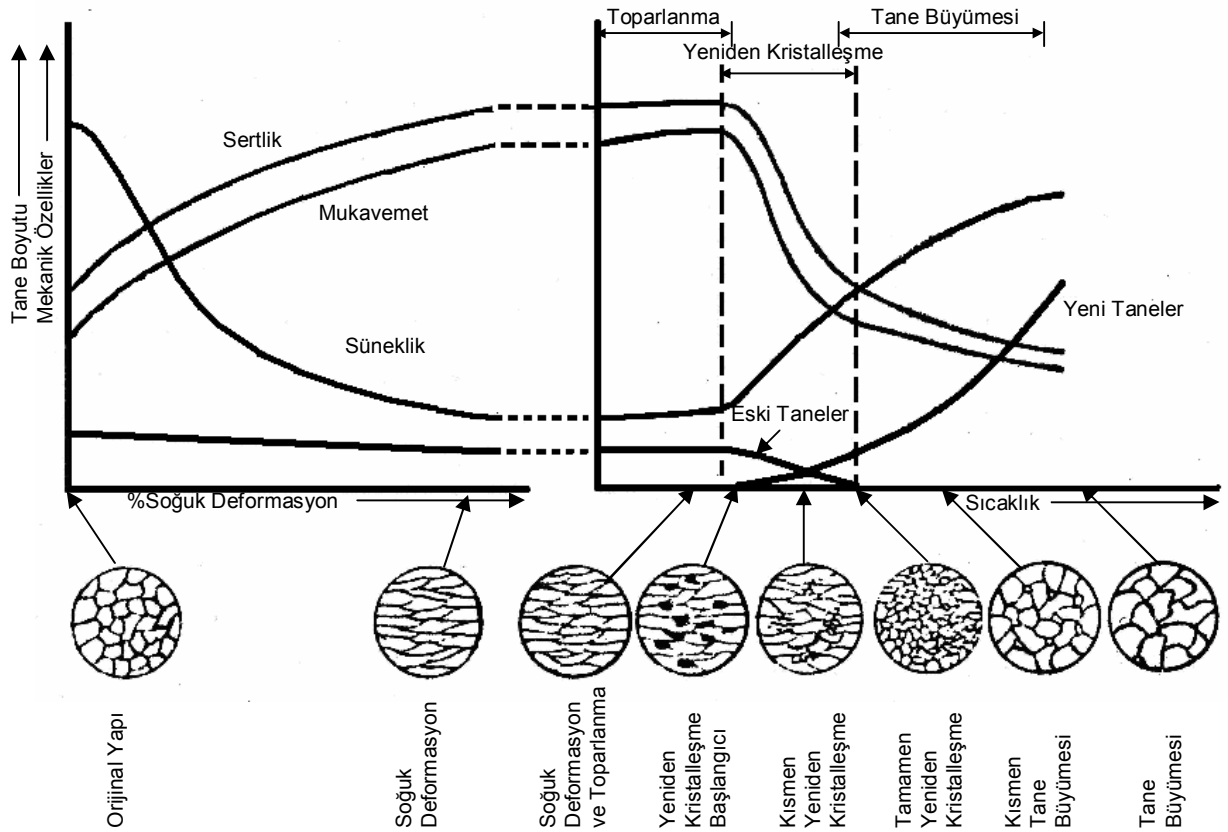
Deneyle, plastik şekil değişimine yol açan kayma gerilmesinin birçok metallerde 7 kg/mm² mertebesinde olduğunu göstermiştir. Oysa, metallerde kayma modülünün 700-7000 kg/mm² civarında olduğu göz önüne alınırsa, teorik kayma gerilmesi 70-700 kg/mm² olarak hesaplanır. Teorik ile pratik değerler arasındaki fark kristal hatalarından ileri gelmektedir.

3.1.4 Soğuk Şekil Değişirme

Soğuk şekil değişirme malzemeye plastik şekil verme yöntemleri ile uygulanır. Plastik şekillendirme hem dislokasyonların hareketini sağlar, hem de yeni dislokasyonların oluşumuna sebep olur. Soğuk şekil değişirme sonunda mukavemetin artması şekil değişirme sertleşmesi nedeniyledir. Şekil değişirme sertleşmesi, dislokasyonların birbirleri ve dislokasyonların hareketini zorlaştıran çeşitli engeller ile etkileşimi sonucunda oluşur. Soğuk şekil değişirme ile malzeme mukavemetindeki artış, soğuk şekil değişirme miktarı ile orantılıdır [79].

Soğuk şekil değiştirme sonucunda malzemenin taneleri şekil değişimi yönünde uzar ve belirli kristalografik doğrultularda yönelir. Tanelerde dislokasyon yoğunluğunun artması yanında birçok atom boşluğu da meydana gelir. Aynı zamanda malzemenin yoğunluğunda bir azalma görülür.

Soğuk şekil değiştirme sırasında sarf edilen enerjinin bir kısmı dislokasyon enerjisine çevrilir, bir kısmı ise ısı halinde kaybolur. Şekil 3.2’de soğuk şekil değiştirme de şekil değişimi miktarına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim görülmektedir.



Şekil 3.2 Şematik olarak soğuk şekil değiştirme oranının ve tavlama sıcaklığının mekanik özellik ve mikro yapıya etkisi [79].

Ön şekil değiştirme oranı arttıkça malzemenin akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinde artış, buna karşılık sünekliğinde azalma olur. Şekil değiştirme sırasında atom boşluklarının meydana gelmesi ve bunların konsantrasyonunun soğuk şekil değiştirme miktarı arttıkça artması malzemede çatlaklara sebep olur. Çatlak oluşumunu ve soğuk şekil değiştirme de azalan sünekliği artırmak amacıyla malzeme, zaman zaman tavlama tabii tutulur [79].

3.1.5 Plastik Şekil Değiştirmeyi Etkileyen Faktörler

Malzemenin yapısı ve mekanik özellikleri ile şekil değiştirme şartları malzemelerin plastik şekil değiştirme kabiliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunlar dışında, şekil değiştirmede uygulanan hidrostatik basınç, malzemedeki kalıntı gerilmeler ve şekillenecek malzemenin geometrik şekli gibi faktörlerde plastik şekil değiştirmesini etkiler. Plastik şekil değiştirmeyi gerçekleştirecek gerilmeyi ve/veya yapılabilecek şekil değiştirme oranını etkileyen faktörler: malzeme yapısı, mekanik özellikler, şekil değiştirme hızı, sıcaklık, sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler ve geometrik faktörlerdir [79].

Genel olarak, tek fazlı malzemelerin plastik şekil değiştirme kabiliyeti çok fazlı malzemelerden daha iyidir. Küçük taneli malzeme, yüksek kırılma tokluğu ve süneklik özelliğine sahip olmasına karşın, mukavemetin yüksek olması nedeniyle plastik şekil değiştirme için daha büyük gerilme uygulanmasını gerektirir. Malzeme yapısında bulunan metalik olmayan oksit, sülfür veya nitrür gibi kalıntılar (inklüzyonlar) genellikle plastik şekil değiştirme kabiliyetini azaltır [79].

Malzemelerde uygulanan şekil değiştirme hızı, mühendislik şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki şekilde ifade edilir. Mühendislik şekil değiştirme hızı, çekme veya basma deneyinde çene hızı ile doğru orantılıdır.

Mühendislik şekil değiştirme hızı örnek boyuna ve çene hızına bağlı olarak;

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[(L - L_0)/L_0]}{dt} = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (3.6)$$

bağıntısı ile bulunabilir. Burada;

L_0 =Örneğin şekil değiştirme öncesi uzunluğu,
 L = Örneğin şekil değiştirme sonrası uzunluğu,
 V = Çene hızı ($V=dL/dt$)

Gerçek şekil değiştirme hızı birim zamanda meydana gelen gerçek birim şekil değiştirme miktarını gösterir ve;

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir.

Gerçek şekil değiştirme hızının, örnek boyu ve çene hızı ilişkisini veren (3.7) bağıntısına göre, çene hızı sabit iken, örnek uzadıkça gerçek şekil değiştirme hızının azalacağı, örnek boyu kısaldıkça gerçek şekil değiştirme hızının artacağı anlaşılmaktadır. Gerçek şekil değiştirme hızı, örnek boyunun etkisini gösterdiğinden, mühendislik şekil değiştirme hızına göre daha doğru sonuç vermektedir.

Şekil değiştirme hızının mekanik özelliklere önemli ölçüde etkisi vardır. Şekil değiştirme hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar. Farklı şekil değiştirme hızları uygulanması halinde çekme eğrilerinin yukarıya doğru kaydığı, buna karşılık toplam birim şekil değiştirme miktarının azaldığı görülür. Şekil değiştirme hızının akma gerilmesine ve küçük birim şekil değiştirme miktarlarındaki plastik gerilmeye etkisi çekme mukavemetine etkisinden daha fazladır. Metalik malzemelerden hacim merkezli kübik yapıda olanlar diğer metalik malzemelere göre şekil değiştirme hızına daha duyarlıdır [79].

Genellikle, çeşitli sıcaklıklarda şekil değiştirme hızı artarken malzemenin sünekliği azalır. Şekil değiştirme hızı artarken sünekliğe bağlı olarak malzemenin şekil değiştirme

duyarlılığı üssü de azalır. Yüksek şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü, metalik malzemelerde süper plastikliği karakterize eder.

Metalik malzemelerde, şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü, oda sıcaklığında genellikle düşüktür ($m < 0,1$), “m” in en yüksek değeri “1” olabilir. Bu durumda malzeme sıcak cam gibi akar. Şekil değiştirme hızı duyarlılığı üssü, malzemenin süneklğini karakterize eder, şöyle ki;

$m \leq 0,1$	ise malzeme sünek değildir.
$m \approx 0,3-0,4$	ise malzeme sünektir.
$m \geq 0,5$	ise malzeme süperplastiktir.
$m = 1$	ise malzeme cam gibi akar.

3.1.5.1 Mekanik İşlemlerde Şekil Değiştirme Hızının Etkisi

Mekanik proseslerde şekil değiştirme hızının başlıca üç etkisi vardır. Bunlar;

- Metalin plastik gerilmesi şekil değiştirme hızıyla artar, dolayısıyla mekanik prosesde şekil değiştirmeyi gerçekleştirecek kuvvet artar,
- İş parçasının sıcaklığı, artan şekil değiştirme hızı ile adyabatik ısınma yüzünden artar,
- Şekil değiştirme hızının artması ile metal-takım ara yüzeyindeki yağ filmi dağılmadan şekil değiştirme tamamlanabileceğinden yağlama durumu geliştirilmiş olur [79].

Standart çekme deneyinde kullanılan çekme cihazlarının çene hızları “ 6×10^{-5} - 6×10^{-1} ” arasındadır. Endüstride kullanılan birçok plastik şekil verme cihazının hızı, çekme deneyi çene hızlarından daha fazladır. Birçok malzeme için endüstriyel plastik şekil verme proseslerinde kullanılan şekil değiştirme hızı sınırlarının üstündeki şekil değiştirme hızlarında “toplam % uzama” değeri artar, fakat kritik bir şekil değiştirme hızına erişildiğinde süneklık aniden azalır [79].

3.1.5.2 Sürtünme ve Yağlama

Plastik şekil değiştirmeyi gerçekleştirecek cihazda, kalıp veya bir alet ile iş parçasının teması sonucu gerçekleşmektedir. Temasta olan ve birbirine göre bağıl olarak harekette bulunan iki parçanın temas yüzeyi arasındaki sürtünme ve buna bağlı olarak aşınma, sıcaklık yükselişi ile enerji kaybı meydana getirir. Bu olayların etkisini azaltmak için alınması gereken önlemlerin en önemlisi yağlamadır [79].

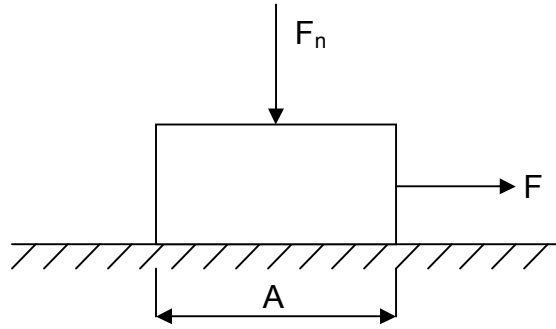
Genel anlamda sürtünme, birbirleri ile temas eden ve bağıl olarak hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir.

Mühendislik ve fiziksel olayların çoğunda sürtünmenin etkisi, sürtünme katsayısı “ μ ” ile tanımlanır (Şekil 3.3). Sürtünme katsayısı, “ $\mu = \frac{F}{F_n}$ ” şeklinde tanımlanır.

Burada;

F =Sürtünme Kuvveti,

F_n =Normal Kuvvettir.



Şekil 3.3 Ara yüzey sürtünmesinin tanımlanması [79].

Temas yüzeylerinin pürüzlülüğü nedeniyle, pürüzlülük mertebesinde ufak ve bölgesel alanlardan ibaret olan gerçek temas alanı “ A_g ”, temas yüzeyinin sınırlarını belirleyen metrik alandan “ A ” çok daha küçüktür. Buna rağmen gerilmelerin

hesaplanmasında genellikle uygulanan kuvvetin toplam alana “A” etkilediği kabul edilir. Buna göre ara yüzey basınç veya ara yüzeydeki basma gerilmesi “ σ ”,

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (3.8)$$

sürtünme gerilmesi veya ara yüzey kayma gerilmesi (τ_i);

$$\tau_i = \frac{F}{A} \quad (3.9)$$

olarak hesaplanır. Buradan;

$$\mu = \frac{F}{F_n} = \frac{\tau_i}{\sigma} \quad (3.10)$$

olur. Buna Coulumb sürtünme katsayısı denir.

Mekanik proseslerde, temas eden malzemelerden biri (iş parçası) plastik şekil değişimine uğrar, bu proses sırasında daha sert olan (kalıp veya takım), yüzeye sürtünerek kayar. Bu sırada da bir sürtünme gerilmesi “ τ_i ” meydana gelir. Sürtünme gerilmesi, iş parçasının kayma plastik gerilmesinden “ τ_f ” büyük olamaz. “ $\tau_i \geq \tau_f$ ” olduğunda iş parçası takım üzerinde kayamaz ve sürtünmenin etkisi ile şekil değişimine uğrar, bu durumda sürtünme katsayısının anlamı yoktur. Tresca kriterine göre kayma gerilmesi, çekme veya basma gerilmesinin yaklaşık olarak yarısı değerinde olduğundan, sürtünme katsayısının maksimum değeri, “ $\mu_{\max} = \frac{\tau_f}{\sigma_f} = 0,5$ ” olur. Bu sonuç, ara yüzey basıncı veya ara yüzey basma gerilmesi “ σ ”nin malzemenin plastik gerilmesi “ σ_f ”ye eşit olması durumunda doğrudur [79].

Sürtünme katsayısı arttıkça iş parçasının şekil değiştirme kabiliyeti azalır. Pratikte, sürtünme katsayısının değeri deneysel olarak saptanır. Sürtünmeyi azaltmak için yağlama yapılır. Mekanik proseslerde yağlama;

- a) Sürtünmeyi azaltır.
- b) Aşınmayı kısmen veya tamamen önler.
- c) Şekil değiştirme için uygulanması gereken kuvveti azaltır.
- d) İş parçasının şekil değiştirme oranını artırır.
- e) Sürtünme nedeniyle oluşması muhtemel yüzey hatalarını azaltır.
- f) Parça yüzeyinin düzgün çıkmasını sağlar.
- g) Takımın aşınmasını azaltarak ömrünü artırır.
- h) Parça ile takım arasında ısı yönünden yalıtkanlık sağlar.
- i) Adyabatik ısınmayı önleyerek parça ve takımını soğutur.

Yağlayıcı maddeler katı, sıvı, yarı katı ve gaz olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Sıvı yağlayıcılar sürtünme halinde bulunan yüzeyler arasına kolayca girip çıktıklarından ve bunun sonucu olarak ısıyı da kolayca dışarıya taşıdıklarından sanayide daha çok kullanılırlar. Sıvı yağlayıcı maddeler, organik, madensel ve sentetik olmak üzere üç guruba ayrılırlar.

Değişik şartlarda çalışan yağların yağlama özelliklerini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Yağların seçiminde özellikle çalışma şartları ve kalitesi göz önüne alınmalıdır. Çalışma şartları olarak, yağın kullanılacağı temas yüzeyinin durumu, sıcaklık, hız ve ara yüzey basıncı gibi faktörler düşünülmelidir. Yağın kalitesi olarak, ıslatma kabiliyeti, oksidasyona karşı dayanıklılık, temizleme yeteneği, katılaşma ve alevlenme noktası gibi özellikler düşünülmelidir [79].

3.2 Mekanik Özellikler

Akma mukavemeti " σ_{AK} ", çekme dayanımı " σ_C ", mukavemet katsayısı "K", şekil değiştirme sertleşmesi üssü "n", anizotropi faktörü "R", kopma uzaması " A_{100} " ve Erichsen numarası sacların şekillendirilebilirliğini ifade eden mekanik özellikler arasında yer almaktadır. Sacların bazı özelliklerinin tüm şekil verme prosesine önemli etkileri vardır. Tablo 3.1'de bu özellikler incelenmiştir.

Tablo 3.1 Şekillendirme prosesi için kullanışlı olan ve çekme testlerinden elde edilen malzeme özellikleri [10].

Malzeme Özelliği	Elde Edilişi	Malzeme Özelliğinin Etkiledikleri	Malzeme Özelliğinin Etkilendikleri
n (Şekil Değiştirme Sertleşmesi Üssü)	Logaritmik olarak gerçek gerilme-uzama eğrisinin eğimi	Büyük uzamalardaki gerdirilebilirlik, küçük uzamalardaki kırışma boğumlanma ve geri yaylanma	Tane büyüklüğü, artık gerilme, akma gerilmesi, sıcaklık, kimyasal içerik soğuk çalışma miktarı
R (Anizotropi Faktörü)	Genişlikçe uzamanın kalınlıkça uzamaya oranı	Derin çekilebilirlik, kulak oluşumu ve anizotropik davranış	Şekil değiştirme derecesi, artık gerilme, yaşlandırma sıcaklığı, proses sırası, kimyasal içerik
σ_{AK} (Akma Mukavemeti)	Gerilme-uzama eğrisinin %0,2'sinin kesişmesinden elde edilen değer	Geri yaylanma, düşük uzamalarda şekil değiştirme sertleşmesi, boğumlanma ve kırışma	Tane büyüklüğü, kimyasal içerik ve elastisite modülü
σ_C (Çekme Dayanımı)	Örneğin tutmuş olduğu max. yükten elde edilen değer, mühendislik gerilme-uzama eğrisinin sıfıra yöneldiği nokta	Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı, üniform uzama	Tane büyüklüğü, kimyasal içerik, çekme testinden önceki şekil değiştirme
Kopma Uzaması	Örneğin tutabildiği max. yükten elde edilir.	Şekil değiştirme sertleşmesi davranışı	Kimyasal içerik, artık gerilme, çekme testinden önceki şekil değiştirme

En çok tanınan sac metal şekillendirme prosesleri, derin çekerek veya gererek şekillendirme prosesini veya her ikisini birden kullanır. Derin çekme, düz şekilli saclara kutu şeklini verme prosesi olarak makalelerde tanımlanmaktadır. Üretilmiş olan kutunun duvar kalınlığı, şekillendirmeden önceki sac kalınlığı ile hemen hemen aynı kalmaktadır. Gererek şekillendirmede, sac kalınlığı ile ürün kalınlığı mukayese edildiğinde ise, sac kalınlığının azaldığı görülür. İyi çekilebilirlik özelliğe sahip bir sac, şekillendirme esnasında kalınlığında bir değişiklik meydana gelmeksizin kalınlık incelmeye karşı yüksek dirence sahip olmalıdır. “R” değeri incelmeye karşı direncin bir ölçüsüdür ve çekme deneyinden elde edilir [80].

Gererek şekillendirmede kullanılan sac metaller yumuşak olmalı ve boğumlanma meydana gelmeden dengeli şekil değiştirmelidir. “n”, gererek şekillendirilebilirliğin iyi bir ölçüsüdür. Büyük “n” değeri, daha yüksek yumuşaklık değeri ve daha yüksek plastik şekillendirme özelliği demektir. Erichsen testi, gerdirilebilirliği belirleyen iyi bir ölçümdür. Daha büyük kutu derinliği, daha büyük gerdirilebilirlik özelliğidir. Hataları kontrol etmenin diğer bir önemli tekniği ise şekillendirme sınır diyagramıdır [80].

Makine ve sistemlerin “statik” ve “sanki statik” (düşük yükleme hızlı) yüklemelerinde, o malzemeye ait göz önüne alınması gereken mekanik özellik değerleri elde edilir [81].

3.2.1 Çekme Deneyi

Çekme deneyi, uygulamada mekanik özelliklerden, dayanım ve sünekliğin belirlenmesi amacı ile en fazla kullanılan deneydir. Çekme deneyi ile elastik özellikler (elastisite modülü, elastik sınırı, rezilyans v.s.) ve plastik özellikler (akma mukavemeti, çekme dayanımı, kopma uzaması, % kesit daralması, tokluk v.s.) tespit edilebilir. Bunun dışında şekil değiştirme şartlarında elde edilen “gerilme-birim uzama” eğrilerinin şekli mekanik proses sırasında malzemenin şekil değiştirme özellikleri hakkında bilgi verir [79].

Çekme deneyinin pratik uygulanmasında standart ölçülerde hazırlanan bir deney örneğinin, geliştirilmiş çekme cihazlarında, iki ucundan sıkıştırılarak sabit bir şekil değiştirme hızı ile (başlangıçta gittikçe artırılarak) parçanın kopuncaya kadarki davranışı incelenir. “ ϵ =sabit iken cihaz üzerinde $F = f(\Delta R)$ ” kaydedilir. Seçilen şekil değiştirme hızını “ ϵ =sabit” gerçekleştirecek şekilde, yükü sürekli artırarak elde edilecek yükleme-uzama ilişkisi ve buna bağlı olarak hesaplanan gerilme-birim uzama oranı “ ϵ ” birer diyagram olarak gösterilebilir. Bu şekilde belirlenen gerilme genişleme diyagramlarına “pekleşme eğrileri”, “gerilme-uzama eğrileri” veya günlük kullanımda “çekme diyagramları” denir [79].

Şekil değiştirme davranışına göre metalik malzemelerin çekme diyagramlarını üç ana grupta toplamak mümkündür. Birçok saf metallerin, genellikle yüzey merkezli kübik kristal yapısına sahip metallerin (Al, Cu gibi) ve bunların alaşımlarının (Al alaşımları gibi) gerilme-birim uzama diyagramlarında elastik bölgeden plastik şekil değiştirme bölgesine geçiş belirgin değildir. Çekme-uzama eğrisi süreklilik gösterir. Genellikle hacim merkezli kübik metalleri, prınçlar ve bronzlar gibi bazı metal alaşımları ise çekme diyagramlarında süreksizlik gösterirler. Üçüncü tipte ise, plastik şekil değiştirmenin başlaması,

dislokasyonların bloke edilmesi ile belli bir gerilme değerine kadar geciktirilir. Bu değerler ölçülebilir kalıcı şekil değiştirmenin (makro plastik şekil değiştirme) başlaması ile sabit kalır ve hatta daha küçük sabit bir değere düşebilir. “ $\sigma=f(\epsilon)$ ” diyagramlarının çizilebilmesi için örneklerin standart alınması “ A_0 =kesit, l_0 =şekil değiştirme bölgesinin boyu olmak üzere” ve ilgili “ $\sigma = \frac{F}{A_0}[MPa]$ ” ve “ $\epsilon = \frac{\Delta l \times 100}{l_0}[\%]$ ” dönüşümlerinin hesaba katılmış olması gerekir [81].

3.2.1.1 Akma Mukavemeti ve Çekme Dayanımı

Akma mukavemeti, elastik şekil değişiminin bittiği yükleme sınırı değeridir. Akma sınırının altındaki yüklemelerde yükleme-uzama ilişkisi lineerdir. Hooke “ $\sigma = \epsilon \times E = E \times \epsilon$ ” bölgesindedir.

Özellikle Amerika’da akma noktasının tanımlanmasına birçok vurgu yapılmaktadır. Çünkü birçok metal (özellikle yüksek dayanımlı çelikler ve otomotiv endüstrisinde kullanılan alaşımlı çelikler) akma noktası ile tanımlanırlar. Akma mukavemeti çoğu kere makine konstrüksiyonlarının boyutlandırılmasında esas alınır. Yükleme sınırlarını belirler, çünkü makine ve sistem konstrüksiyonları genellikle sadece elastik şekil değişimine izin verecek şekilde boyutlandırılır. Gerçekte akma noktasını tanımlanmak zordur. Akma noktası uzama göstermeyen çelikler için, uzama ekseninin % 0,2’sinden çıkılan paralel doğrunun çekme eğrisini kestiği noktadaki gerilme değeri ile ifade edilir. Akma sınırı belirgin olmayan malzemelerde akma mukavemeti yerine “ ϵ_p ” kadar kalıcı şekil değiştirme üreten gerilme değeri “ R_p ” alınıp kullanılır. Uygulamada genellikle % 0,2 birim uzamaya karşılık gelen “ $R_{p0,2}$ ” değeri seçilir

Çekme dayanımı “ σ_c ” herhangi bir malzemenin birim kesit başına taşıyabileceği en büyük yükü gösterir. Çekme diyagramındaki en büyük gerilmedir. Özellikle çekme dayanımı açısından bakıldığında, Kuzey Amerika’da çok az ilgi vardır. Japonya’da ise yüksek dayanımlı çelikler çekme dayanımı ile tanımlanır ki, bu tanım yaygın boyun verme anındaki noktanın tanımı ile eşdeğer görülür. Çekme dayanımı deneylerden kesin olarak

elde edilebilir. Buna rağmen dayanımın tanımlanmasında, çekme dayanımına ilgi azdır [82].

Gendirilebilirliğin ölçümü için, daha çok çekme dayanımının akma dayanımına oranı “ σ_C / σ_{AK} ” kullanılmaktadır [66]. Çelik daha yüksek “ σ_C / σ_{AK} ” oranı ile daha yüksek şekil verilebilirlik gösterir, çünkü yüksek plastiklik özelliğine sahiptir [83].

Malzemenin sertliği veya akma mukavemeti derin çekme kabiliyeti açısından ölçü kabul edilemezler. Çünkü, alüminyum düşük karbonlu çeliğe oranla daha yumuşak olmasına rağmen, daha düşük derin çekme kabiliyetine sahiptir. Bu değerler derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında önem arz etmektedir. Çekme dayanımı, derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında; akma gerilmesi, baskı yastığı kuvvetinin belirlenmesinde önemlidir [79].

3.2.1.2 Kopma Uzaması, Şekil Değiştirme Sertleşmesi Üssü ve Mukavemet Katsayısı

Kopma uzama yüzdesi veya kısaca “kopma uzaması” ($\% \varepsilon$) değeri, deney parçasının başlangıçtaki boyu “ L_0 ” (şekil değişimine maruz bırakılan, çekme örneğinin çoğu kez işaretlenmiş çizgiler ile belirlenen ilk boyu), deney sonunda kopan iki parça yan yana getirilerek işaretler arası ölçülen kopma boyu “ L_k ” esas alınarak hesaplanır.

$$\% \varepsilon = [(L_k - L_0) / L_0] \times 100 \quad [\%] \quad (3.11)$$

(3.11) nolu eşitlikten elde edilen “ $\% \varepsilon$ ” değeri özel hallerde ne çeşit çekme örnekleri kullanılarak elde edildiğini gösteren bir indis ile gösterilir. Standartlaştırılmış çekme örneklerinin uzunlukları L_0 , kesitleri S_0 ile orantılıdır.

$$L_0 = k \sqrt{S_0} \quad (3.12)$$

(3.12) nolu eşitlikten “k” değeri bulunup, özellikle ince sacların çekilmesinde L_0 ’a atıf yapacak bir alt indis ile (Örnek, $\% \epsilon_{80}$, $k=80$) işaret edilir.

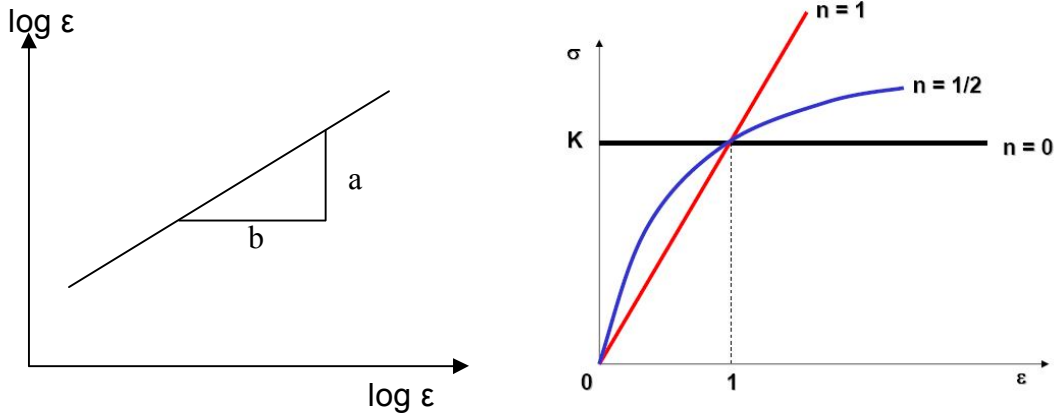
Çekme deneyinde deney parçası, akma noktasından itibaren en büyük yüke kadar tam ölçü boyunca uniform olarak şekil değiştirir. Çekme kuvvetinin en büyük değeri alması ile yerel kesit daralması (boğumlaşma) başladığı için bu noktadan sonra kırılma oluncaya kadar uzamada uniform olmaktan çıkar. Sacların şekillendirilmesinde malzemenin uniform uzama yüzdesinin yüksek olması istenir. Gerçek gerilme şekil değiştirme davranışı Holloman [84], denklemine göre “ $\sigma=K\epsilon^n$ ” ile gösterilebilen bir malzemenin; çekme deneyinde maksimum yükte “ $\epsilon=n$ ” olduğundan, plastik şekil verilecek bir sacın şekil değiştirme sertleşmesi üssünün yüksek olması faydalıdır.

Düşük karbonlu çeliklerde Holloman eşitliği plastik şekil değiştirme bölgesinde geçerli bir eşitliktir. “n” değeri gererek şekillendirmede çok önemli bir değişkendir. Malzemenin plastik şekillendirme bölgesi yüksek “n” değeri gösterir ve bu bölge boğumlaşmaya karşı yüksek direnç gösterecektir. Böylece sacda uniform plastik şekil değişimi meydana gelecektir. Boğumlaşma, “n” değerinin düşük olduğu bölgede görülecektir ve bölgesel olarak kalacaktır. İncelmenin çabuk meydana gelmesinin sonucu olarak, çatlak oluşumu çabuk meydana gelecektir [6,80].

Çekme deneyinde kopma uzaması, uniform uzama ile boğumlaşma uzamasının toplamıdır. Uniform uzamaya malzemenin “n” değeri etki eder. Dolayısıyla “n” değeri büyüdükçe toplam uzamada artar [2,85]. Bu değer gerilebilirlik ve şekillendirilebilirliği etkiler. “n” değerinin artışı ile gerilebilirlik artar. Mukavemet katsayısı şekillendirme ya da kırılma sınırları üzerinde doğrudan etkiye sahip değildir. “n” değeri ile ilgili bu “K” değeri şekillendirme karakteristiğini etkiler [12]. “K” değeri malzemenin dayanım seviyesini ifade etmede kullanılır ve şekillendirme için gerekli kuvvetin büyüklüğünü ifade eder. “n” değeri ise gerçek gerilme uzama eğrisinin eğimi ile ilgilidir ve malzemenin bölgesel şekil değişimini engelleme yeteneği olarak ifade edilir [86].

Şekil değiştirme sertleşmesi üssü plastik şekil değişiminin başladığı akma gerilmesi ile boğumlanmanın başladığı nokta arasında bulunan homojen şekil değiştirme

bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme değerlerine göre çizilen “ $\log \sigma_g - \log \epsilon_g$ ” grafiğinin eğimine eşittir (Şekil 3.4). Malzeme mukavemet katsayısı ise, “ $n=1$ ” ($\log \epsilon=0$) olduğu noktadaki gerçek gerilmedir. Şekil değiştirme sertleşmesi üssü, “ $n=0$ ” (ideal plastik malzeme) ile “ $n=1$ ” (elastik malzeme) değerleri arasında olabilir.



Şekil 3.4 Şekil değiştirme sertleşmesi üssünün tayini ve şekil değiştirme sertleşmesi üssünün gerilme–birim şekil değiştirme grafiği üzerindeki etkisi [87].

Holloman bağıntısının “ $\sigma=K\epsilon^n$ ”, logaritması alındığında, “ $\log \sigma = \log K + n \log \epsilon$ ” elde edilir. Bu ifade, “ $y = ax + b$ ” şeklinde yazılırsa, eğimi, “ $a=n$ ” olan bir doğru olduğu görülür [88]. Logaritmik koordinatlarda çizilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme diyagramları da bir doğru halini almakta ve bu doğrunun eğimi şekil değiştirme sertleşmesi üssünü vermektedir. Denklem çözülüp katsayılar bulunduğunda, “ n ” elde edilir. Deneyde, “ x ” değişkeni şekil değiştirme, yani, “ ϵ ”, ve “ y ” değişkeni ise gerçek gerilme, yani, “ σ ”, olduğuna göre, şekil değiştirme sertleşmesi üssü “ a ” ifadesi olarak; mukavemet katsayısı “ $n \log \epsilon$ ” ifadesinin sıfır olduğu yerde “ $\log \sigma = \log K$ ” ifadesinden “ K ” çekilerek hesaplanmaktadır [89]. Şekil değiştirme sertleşmesi üssünün hesaplanması için, gerçek gerilme gerçek şekil değiştirme eğrilerinden, akma sınırı ile maksimum yük arasındaki veriler kullanılmıştır. “ n ” ve “ K ” değerleri, hadde yönüne göre üç farklı doğrultu için hesaplandıktan sonra, deney malzemesinin ortalama şekil değiştirme sertleşmesi üssü ve ortalama mukavemet katsayısı ise (4.1) nolu formül yardımı ile hesaplanır.

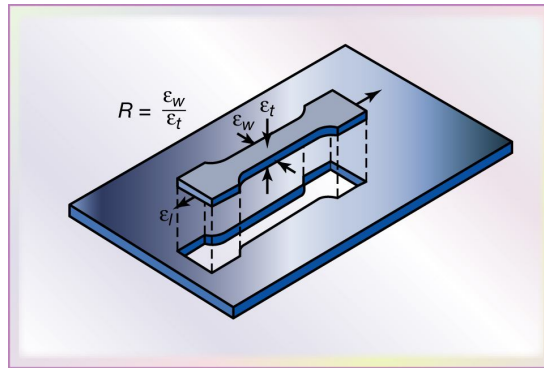
Literatürde, şekil değiştirme sertleşmesi üssü ve dikine anizotropinin beraber değerlendirildiği ve “nR” değerine göre malzemenin şekillendirilebilirliğinin ifade edildiği çalışmalar mevcuttur [11,83]. “nR” değerinin yüksek çıkması, sacların yüksek gerilebilirlik özelliğine sahip olacağını göstermektedir. ”nR” değeri ile malzemenin şekillendirilebilirliğine karar verilebilir. “nR” değeri artarsa malzemenin şekillendirilebilirliği de artacaktır [7,83].

3.2.1.3 Anizotropi

Özelliklerin yöne bağlı olması anlamını taşıyan anizotropi, sacların şekillendirilmesinde önemli olan bir faktördür. Belirli bir zımba çapı “d” için, yırtılmadan çekilebilecek en büyük çekme sacı çapı “D_{max}” olursa;

$$\text{Derin Çekme Oranı Sınırı} = D_{\max}/d \quad (3.13)$$

olarak ifade edilir. Bu oranın sacın mekanik özellikleri ile ilişkisi pek çok araştırmada incelenmiştir.



Şekil 3.5 Çekme deneyi örneği ve ölçme yönleri [90].

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi çekme deneyinde, enine doğrultuda şekil değiştirme “ε_w“, kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme “ε_t” ile gösterilirse, “R=ε_w/ε_t” dikine

anizotropi olarak anılır. “R” değeri Lankford katsayısı olarak ta ifade edilir [64]. Çekme deneyinden önce ve sonra, deney parçasının eni “w₀” ve “w”, kalınlığı ise “t₀” ve “t” ile gösterilirse, “ε_w=ln(w/w₀)”, “ε_t=ln(t/t₀)” olduğundan dikine anizotropi (3.14)’deki eşitlik ile bulunur.

$$R = \varepsilon_w / \varepsilon_t = \ln(w / w_0) / \ln(t / t_0) \quad (3.14)$$

Pozitif bir sayı olan dikine anizotropinin anlamı, “R>1” olduğu takdirde, malzemenin sac düzlemindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu şeklindedir; aksi halde “R<1”, izotrop bir malzemede ise “R=1”dir [79].

Haddelenmiş sacların mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişir. Bir plaka sactan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleri ile yapılan deneylerde değişik “R” değerleri bulunabilir. Böyle bir sacda düzlemsel anizotropi olduğu söylenir. Düzlemsel anizotrop bir sacta dikine anizotropi için bir ortalama değer tarif edilir. Ortalama dikine anizotropi “ \bar{R} ” (3.15) nolu formül ile hesaplanır. “ \bar{R} ” değeri arttıkça malzemenin şekillendirilebilirliği de artacaktır.

$$\bar{R} = (R_0 + 2R_{45} + R_{90}) / 4 \quad (3.15)$$

Titanyum gibi dikine anizotropisi büyük malzemelerde bir seferde daha derin malzemeler çekilebilmektedir. Çinko gibi dikine anizotropisi birden küçük malzemelerde plastik şekil değiştirme kalınlık yönünde oluşur. Kalınlığın bu şekilde plastik şekil değiştirmeye uğraması hasarın erken oluşmasına sebep olur. Çelik gibi malzemeler 1,5 gibi dikine anizotropi değeri ile derin çekme prosesinde iyi davranış gösterirler.

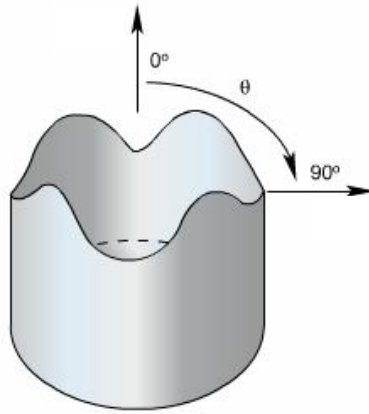
Düşük karbonlu çeliklerde “ \bar{R} ” değeri birden büyüktür ve yaklaşık olarak “1,35-1,96” arasında değişir [80]. Alüminyum alaşımları için “ \bar{R} ” değeri “0,60-0,85” arasındadır. “ \bar{R} ” değeri “0,85”den büyük ise malzeme iyi derin çekilebilir, “0,65”den küçük ise malzeme zayıf derin çekilebilirlik özelliğine sahiptir [6].

Dikine anizotropi sacın çekilebilirliğini, düzlemsel anizotropi ise kırışma sınırlarını etkiler. Alüminyum alaşımları incelendiğinde ise, yüksek “n” değeri, yüksek “ σ_C/σ_{AK} ” oranı ve yüksek “ \bar{R} ” değeri kırışma oluşumunu engelleyecek ve şekillendirilebilirliği olumlu yönde etkileyecektir [2,12].

Düzlemsel anizotropi, derin çekilmiş kutularda kulak oluşumuna yol açar (Şekil 3.6). Kulak sayısı 2, 4 veya 6’dır. Kulaklar, derin çekme prosesinden sonra kutunun çevresi boyunca kesilir. Dolayısı ile gerek malzeme kaybına yol açması, gerek ek bir kesme prosesi ile maliyeti yükseltmesi nedeni ile kulak oluşumu mümkün oldukça önlenmelidir. Kulak oluşumuna yol açan düzlemsel anizotropi " ΔR " ampirik bir değişken ile ifade edilir ve (3.16) nolu eşitlik ile hesaplanır.

$$\Delta R = (R_0 - 2R_{45} + R_{90}) / 4 \quad (3.16)$$

Flanşlı çekme prosesinin dışında, kutularda sık rastlanan hatalardan biridir. Çekme anında çekilen kutunun haddesi yönünde uzama meydana gelir. Çünkü, hadde yönünde malzeme yuvarlanması daha fazladır ve silindirik parçalar için çevrede kulaklaşma sayısı malzeme yuvarlanmasına göre değişkendir. Kulaklaşma oluşumunun giderilebilmesi için ilk çapın veya boyutların fazla alınması gerekir ve çekme prosesinden sonra kutu ağızında düzeltme prosesi yapılır [91].



Şekil 3.6 Derin çekme esnasında malzemede kulak oluşumu [92].

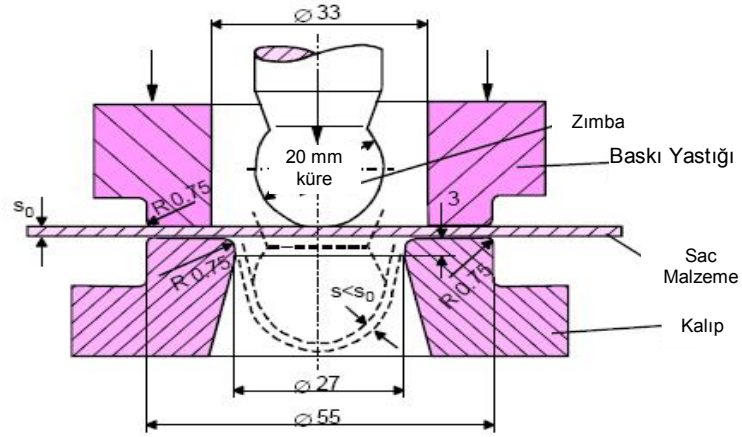
Anizotrop malzemelerde kulak oluşumunun kaçınılmaz olduğu fakat azaltılabileceği yönünde çalışmalar mevcuttur. Sabit baskı yastığı kuvveti ile çekme derinliğinin artırılabilirdiği, fakat aynı ölçüde kulak oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir. Sabit baskı yastığı kuvveti yerine değişken baskı yastığı kuvveti seçilerek kulak oluşumunun azaltılabileceği deneysel olarak görülmüştür [56].

3.2.2 Erichsen Çökertme Testi

Erichsen testi yardımıyla deney örneğinde hem derin çekme, hem de gererek şekillendirme gerçekleştirilebildiğinden, ŞSD'nin hemen hemen her bölgesine ait veri elde etmek mümkün olmaktadır.

Uçak kanatlarında veya tekerlek göbeklerinde olduğu gibi, farklı şekillerde üretilmiş olan birçok parça şekillendirme esnasında germe prosesine tabii olmaktadır. Bu şartları elde etmek için malzeme; zımba, küre ya da yarıküresel başlık tarafından gerdirilir. Bu proses *Olsen* ya da *Erichsen* testi olarak ta adlandırılır. Bu iki test birbirine benzer olmakla birlikte aralarındaki fark, aletlerin ölçülerindeki farktır. Özellikle Avrupa'da kullanılan Erichsen testinde 20 mm'lik küre, 27 mm'lik kalıp ve 0,75 mm'lik radius kullanılır. Şekil 3.7'de görülen Erichsen deneyinde, kalıpla çember arasında 10 kN ile sıkıştırılan deney sacı, 20 mm çapında çelik bilya ile yırtılmaya kadar çökertilir. Çökertme prosesi genellikle yağlamanın olmadığı ortamda gerçekleştirilir. İnce bir yağlama tabakası test sonuçlarının dağılımını azaltır ve simüle edilmiş şartlar ile gerçek şartları birbirine yaklaştırır. Yağlama yapılması kırılmadaki uzama germesini çok eksenli yapar. Birçok hatanın düzlem gerilme şartlarında meydana gelmesi sebebi ile yağlama, üretim simülasyonlarında istenmemektedir. Bilya'nın saca ilk temas ettiği noktadan kırılma görülünceye kadar olan "mm" cinsinden ilerlemesi "h" *Erichsen Çökertme* değeridir. "h" ne kadar büyükse malzemenin şekillendirilebilirliği de o kadar büyüktür [85]. Deneylerde [8], kırılma başlangıcına kadar olan zımba yolu (kursu) ölçülerek Erichsen değeri bulunmuştur. Farklı kaynaklar [93], benzer şekilde kırılma başlangıcına kadar olan zımba yolunun ölçülmesine işaret etmektedir. Erichsen yükseklik değeri, sac malzemenin "n" değeri ile ilişkilendirilebilir, fakat aralarında zayıf bir ilişki vardır.

Erichsen testi, üretim deneyiminde pek tercih edilir bir yöntem değildir [10]. Literatürde Erichsen testine yönelik çalışmalar [94] mevcuttur ve bu çalışmalarda, şekil değiştirmiş malzemenin en büyük yükseklik değeri, zımba altında en büyük şekil değiştirmeyi ifade eder. Bu derin çekme yüksekliği malzemelerin şekillendirilebilme özelliklerini karşılaştırmak amacı ile kullanılır. Çelik ve alüminyumdan yapılmış otomobil gövde ve panellerin kalite kontrolü olarak kullanılabilir. Erichsen çökertme testinin prensibi [95].



Şekil 3.7 Erichsen çökertme testinin prensibi [95].

Erichsen Testi, malzemenin şekillendirilebilirlik özelliklerini ifade etmekte yeterli bir veri olarak görülmesi de ülkemizde malzeme özelliklerini ortaya koyma açısından kullanılmaktadır. Bu husus standartlarımıza (TS 271, 07.07.1965) “Metalik Sac ve Bandların Çökertme Muayenesi (Erichsen Muayenesi)” olarak girmiştir [96].

Literatürde [97] 20 mm zımba ve 10 kN baskı yastığı kuvveti kullanılarak yapılmış olan bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada çatlak başlayıncaya kadar olan zımba yolu ölçülmüştür. Bu derinlik “mm” olarak ölçülür ve Erichsen sayısı olarak ifade edilen bir sayıyı bize verir. Aynı kaynakta ölçümlerde kırılma kuvvetinden de bahsedilmektedir. Erichsen testinde yağlama yapılması, Erichsen sayısını ve şekil değiştirme kuvvetini etkilememiştir. Yağlama sadece aktif parçaların ömrünü etkilemek adına önemlidir.

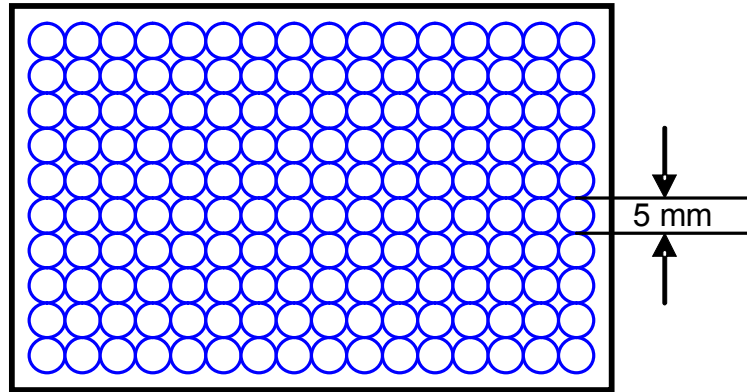
Erichsen yükseklik değeri genellikle düşük karbonlu çelikler için kullanılır. Daha yüksek derinlik değeri, malzemenin daha yumuşak olduğu anlamına gelmektedir [80].

3.3 Şekillendirme Sınır Diyagramı

Sac malzemeleri şekillendirme prosesi genellikle karmaşık bir prosesdir. Bir defa da bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme prosesleri parçaya birlikte uygulanır. Bu nedenle malzemenin çekme deneyi yardımı ile bulunan, akma mukavemeti, çekme dayanımı, şekil değiştirme sertleşmesi üssü, anizotropi gibi mekanik özellikleri tek başlarına şekillendirme özelliklerini ifade etmeye yetmezler. Sac malzemelerin özelliklerini daha iyi tanımlamak amacıyla, gererek şekillendirme prosesine benzediği için *Erichsen* veya *Olsen* deneyi, derin çekme prosesine benzediği için ise *Swift* deneyi son yıllarda büyük ölçüde kullanılmaktadır. Erichsen veya Olsen deneyinde tümsek yüksekliği, Swift deneyinde ise derin çekme oranı ölçü olarak kullanılır [79].

Sac malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler, belirli koşullar altında gerçekleştirilmektedir. Laboratuvar koşulları endüstriyel koşullardan farklıdır. Dolayısıyla bu deneyler, malzemenin deney şartları altındaki davranışı hakkında bilgi verir. Başka bir ifade ile, söz konusu deneyler malzeme sınıflandırma ve seçme konusunda yararlı olmaktadır. Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için ise plastik şekil değiştirme analizlerine ihtiyaç vardır.

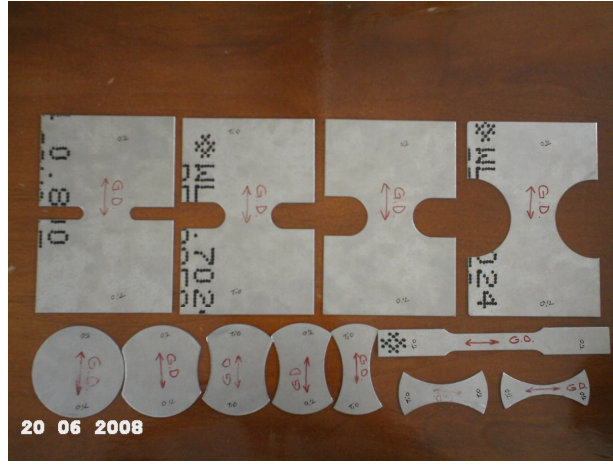
Sac malzemelerin plastik şekil değiştirme analizlerini yapabilmek için öncelikle sac malzemenin yüzeyine Şekil 3.8'de görüldüğü gibi elektrokimyasal vb. yollarla dairelerden oluşan bir ağ çizilir.



Şekil 3.8 Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örneği [98].

Daha sonra deney örneğinin boyutları, yağlama yöntemi ve yağlayıcı türü değiştirilerek; çekme, Erichsen, Swift veya benzeri deneyler yardımıyla plastik şekil değiştirme prosesi için farklı yük durumları oluşturulur. Bu yük koşulları altında, sac malzemede boğumlaşma veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme uygulanır.

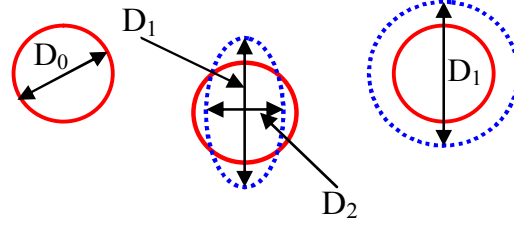
Şekil 3.9'daki Çekme Deneyi Örneği, Erichsen Deney Örneği ve Çentikli Çekme Deneyi Örneği gibi örneklerin şekil değiştirmelerinin ölçülmesinden elde edilen büyük ve küçük uzama miktarları Şekil 3.12'de örnek olarak konulmuş olan diyagram üzerine yerleştirilerek ŞSD elde edilir. Şekil 3.9'daki deney örnekleri, ŞSD elde etmek için kesilmiştir. Daha önce açıklandığı gibi ŞSD'yi elde etmek için standart bir örnek şekli ve boyutu bulunmamaktadır.



Şekil 3.9 Çekme deneyi örneği, Erichsen deney örneği ve çentikli çekme deneyi örneği [99].

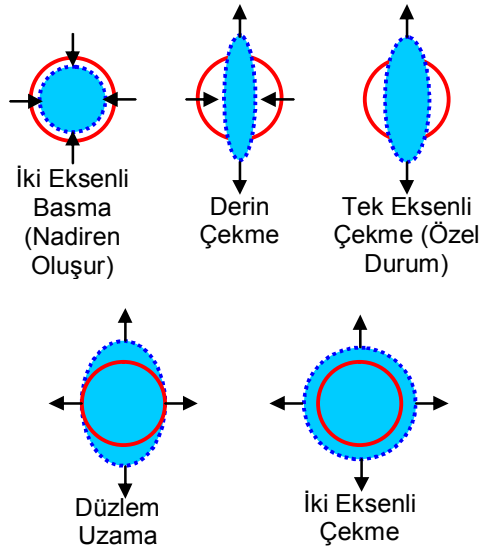
Örneklerin şekil değiştirmesi sonucunda, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, başlangıçta, sac malzemenin yüzeyine işaretlenmiş olan dairenin çapında " D_0 ", ya büyüme olur (dengeli iki eksenli çekme gerilmesi durumu) veya daire elipse dönüşür. Şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksenini " D_1 " ile, en küçük eksenini " D_2 " ölçülerek, en büyük " e_1 "

$[e_1=(D_1-D_0)/D_0]$ ve en küçük “ e_2 ” $[e_2=(D_2-D_0)/D_0]$ birim şekil değıştirme uzamaları bulunur.



Şekil 3.10 Başlangıç dairesi ve başlangıç dairesinin şekil değıştirmesinden sonraki durum.

“ e_1 ” ve “ e_2 ” değeri mühendislik uzaması değeri değildir. Literatürde gerçek uzama değeri kullanılır. Gerçek uzama değeri “ $\epsilon_{max}=\ln(D_1/D_0)$ ”, “ $\epsilon_{min}=\ln(D_2/D_0)$ ” eşitlikleri ile bulunur. ŞSD’nın pozisyonu malzeme dayanımına ve kalınlığa bağlıdır. Zımba çapı, ağ modeli ve alet geometrisine de bağlıdır. Deney esnasında malzemenin yağlanması, çatlağın malzemenin merkezinde oluşmasını sağlar [99].

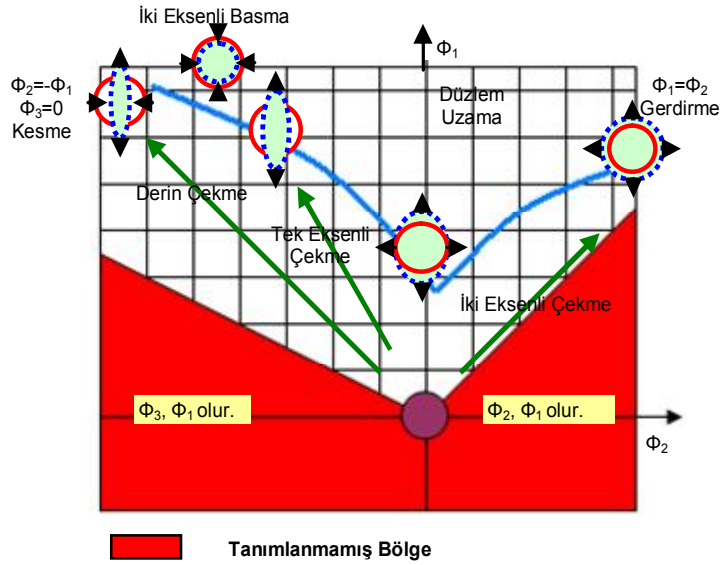


Şekil 3.11 Sac malzemenin şekillendirilmesinde karşılaşılabilecek yük durumları [100].

Sac malzemenin işlevsel bir parçaya dönüştürülmesi sırasında, malzemede meydana gelebilecek yükleme durumları Şekil 3.11’de verilmiştir.

Şekillendirme sırasında iki eksenli basma, derin çekme, tek eksenli çekme, düzlem uzama ve iki eksenli çekme şartları oluşmaktadır. Sacın üçüncü boyutta şekil değiştirmedeği kabul edilmektedir.

Farklı test yöntemleriyle, farklı farklı yükler altında sac malzemede meydana gelebilecek uzama durumları bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 3.12’de görülen ŞSD elde edilir. ŞSD incelendiğinde, şekil değişimlerinin derin çekme ve gererek şekillendirme bölgeleri arasında olduğu görülür.



Şekil 3.12 Ölçüm değerlerinin diyagram üzerine aktarılması ve şekillendirme sınır diyagramının elde edilmesi [100].

Şekil değişimi iki eksenle olduğundan ve başlangıç dairelerinden oluşan uzama miktarlarının yönünün önemi olmadığından (uzama yönüne bakılmaksızın, şekil değiştirmiş dairenin büyük çapından elde edilen uzama büyük uzama, dairenin küçük çapından elde edilen uzama küçük uzamadır) diyagram üzerinde boyalı alanda şekillendirme tanımlaması yapılmamaktadır.

Raghavan'a göre, ŞSD, düzlemde şekillendirme ve düzlem dışı şekillendirmeleri kapsamaktadır [101].

Düzlemde şekil değiştirme süreçleri;

1. Dar örnekler kullanan bilinen tek eksenli çekme testini,
2. Düzlem uzama testini (tek eksenli teste benzer fakat kısa ve geniş örnekler kullanılmıştır),
3. Holmberg tarafından ortaya konmuş, "V" şeklinde kesilmiş örneklerdeki çekme testini,
4. Dairesel yada eliptik zımba kullanılan, küçük uzama "0.58" ve büyük uzama "1" arasındaki uzamaları veren Tedros ve Meller tarafından modifiye edilmiş Marciniak Kutu Testini,
5. Raghavan tarafından kullanılan "V" şeklinde hazırlanmış örneklerden, küçük uzama "-0.5" ve büyük uzama "1" arasındaki uzamaları veren Marciniak Kutu Testini kapsar.

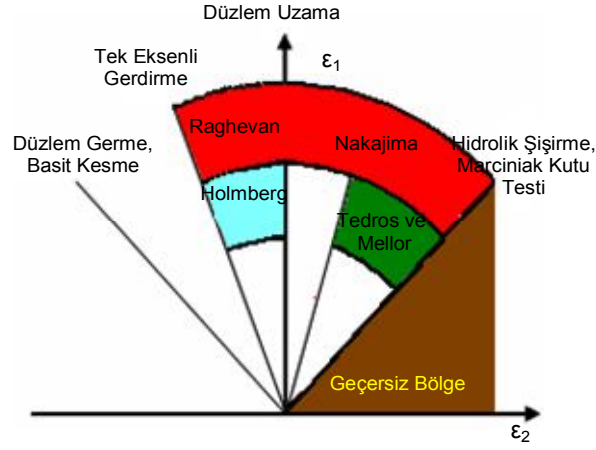
Düzlem dışı şekil değiştirme süreçleri;

1. Eşit iki eksenli uzamayı veren hidrolik şişirme testini,
2. "V" şeklinde kesilmiş dairesel parçaların rijit bir şekilde tutulması ve yarı küresel zımba ile gererek şekillendirilmesini içeren, küçük uzama "-0.5" ve büyük uzama "1" arasındaki uzama oranlarına izin veren Nakazima testini,
3. Eliptik şişirme testlerinde düzenli olmayan uzamaları içeren değişik kutu testlerini kapsar.

Bu testlerden elde edilen uzamaların ŞSD'na aktarılması sonucunda temsil edilen bölgeler Şekil 3.13'de görülmektedir.

Şekillendirme sınır eğrisinin üst bölgesi tehlikeli bölge, alt bölgesi ise emniyetli bölgedir. Diyagram ayrıca germe-germe veya çekme-basma tipi şekil değiştirme türlerinin bulunduğu iki bölgeye ayrılır. Germe-germe bölgesinde "e₂" pozitif işaretlidir, çekme-basma bölgesinde ise "e₂" negatif işaretlidir ŞSD'nda "e₂"nin sıfır olduğu nokta,

düzlemsel şekil değiştirmeyi belirleyen noktadır. Farklı malzemelerin birbiri ile karşılaştırılmasında bu noktaya ait değerler kullanılır.



Şekil 3.13 Malzeme test prosedürü [101].

Başarılı bir şekillendirme prosesinin gerçekleşebilmesi için; malzeme özellikleri, kalıp geometrisi ve yağlama prosesinin birbirlerine uyum sağlaması gerekir. Bu uyum, seri üretime geçilmeden önce deneme üretimi aşamasında sağlanmalıdır.

Seri üretim esnasında ŞSD'dan faydalanılır. Yüzeyine dairesel ağ çizilmiş sac malzeme şekillendirilerek kritik bölgelerde şekil değiştirme analizi yapılır. Sınır eğrisine yakın değerlerin bulunması, seri üretimde çatlama ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Bu durumda, şekillendirme prosesini emniyetli bölgeye çekecek önlemler alınmalıdır.

Örneğin, iki eksenli çekme gerilmesinin hâkim olduğu çekerek şekillendirme prosesine uğramış bir parçada, plastik şekil değiştirme miktarları şekillendirme sınır eğrisinin üst bölgesinde kalıyorsa malzemede çatlama olacaktır. Çatlamayı önlemek için ya küçük şekil değiştirme miktarını artırma veya büyük şekil değiştirme miktarını azaltma yoluna gidilmelidir. Küçük şekil değiştirme miktarını artırmak için malzemenin bu yöndeki hareketi sınırlandırılır. Bunun için sıkıştırma kalıbına girinti çıkıntı verilerek veya bu bölgedeki sürtünme artırılarak malzemenin hareketi zorlaştırılır. Büyük şekil değiştirme miktarını azaltmak için şekillendirme derinliğini azaltma veya bölgesel inceltme olayını önleme yoluna gidilir. Bölgesel inceltmeyi önlemek için, erkek kalıbın bu bölge ile

temas eden kısmında sürtünme artırılarak şekil değiştirme miktarı azaltılır. Bu anlatılanlar söz konusu örnek için geçerlidir. Her durum için önce bir şekil değiştirme analizi yapılarak, daha sonra çözüm yoluna gidilmelidir.

Genelde zımba veya erkek kalıp kuvvetini azaltacak önlemler, şekillendirme prosesinin emniyetli bölgede kalmasına katkıda bulunacaktır. Belirli bir kalıp tasarımı ile koşulları değiştirerek, şekillendirme prosesini emniyetli bölgeye çekmek mümkün değilse daha kaliteli malzeme seçimi yoluna gidilir. Bunun tersine, deneme çalışmaları sonunda şekillendirme prosesine ait veriler, şekillendirme sınır diyagramının çok altında bulunuyorsa, daha düşük kalitelere malzeme kullanımına geçilerek, maliyet açısından ekonomi sağlanmalıdır.

Kalıp aşınmasını incelemek için ara kontrol proseslerinde, yeni bir malzeme partisinin, yeni bir yağlayıcı partisinin davranışını belirleme proseslerinde veya koşullarda değişiklik yapmak gerektiğinde, plastik şekil değiştirme analizi ve şekillendirme sınır diyagramından yararlanma yoluna gidilir.

“Keeler-Goodwin diyagramı” genelde gerek şekillendirme ve derin çekme prosesleri için geçerlidir. Diğer şekillendirme prosesleri için plastik şekil değiştirme analizleri yapılarak farklı sınır diyagramları çizilebilir [79].

Eğrinin sol tarafı çekme - basma şartlarındaki şekillendirme ile ilgilidir. Büyük ya da küçük uzama şekillendirilebilirlik sınırının üstüne düştüğünde boğumlanma, uzamalar kırılma sınırlarına ulaştığında ise kırılma görülür. Bu ifade, eğrinin hem sağ hem de sol tarafı için geçerlidir. Sabit bir küçük uzama değeri için şekillendirme ve kırılma sınır eğrileri arasındaki açıklığın büyük olması, sac malzemenin çekme-basma şartlarında (derin çekme) şekillendirilebilirliğe daha yatkın olduğunu göstermektedir. Küçük uzama arttığında şekillendirme ve kırılma arasındaki fark düşmektedir. Bu, küçük uzama seviyesine sahip sacı daha da güvenli kılar. Aradaki farkın büyük olması eğrilerin sola kaymasına sebep olur. Küçük uzamadaki aşırı artış kırılma değişiminin daha büyük olmasına neden olur. Belirli bir küçük uzama için büyük uzamanın artması “n” değerinin artmasından dolayıdır. Normal anizotropinin büyük olması çekme- basma şartlarında

büyük uzama miktarının daha büyük olmasını sağlar. Buradan, çekme-basma şartlarında sacın şekillendirilebilirliğinin düzlem gerilme ve germe-germe şartlarından daha iyi olduğu anlaşılır. Bunun sebebi Mohr dairesinden de anlaşılabilirliği gibi, kesme uzamasının çekme basma şartlarında daha büyük olması nedeniyle olmaktadır. Mekanik özelliklerin yüksek olması kırılmaya karşı olan direnci geliştirerek şekillendirilebilirliği artırmaktadır [12].

Literatür, [2,7] benzer olarak dikine anizotropi artışı ile şekillendirme ve kırılma eğrileri arasındaki açıklığın artacağına işaret etmektedir.

Kalınlık artışı kırılma eğrisinin yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Kırılma ve şekillendirme eğrileri arasındaki açıklığın yüksek olması malzemenin yüksek çekilebilirlik (çekilerek uzatmaya yatkın) sergileyeceğini göstermektedir. Kalınlık, derin çekilebilirliği artırır ve iki eğri arasındaki açıklığı büyütür. Kalınlık düştüğünde ise açıklık azalacaktır [102].

3.4 Hidromekanik Derin Çekme

Hidromekanik derin çekme, hidrolik şekillendirme prosesleri içerisinde yer alan oldukça yeni bir sac malzeme şekil verme tekniğidir. Geleneksel derin çekme ile mukayese edildiğinde, hidromekanik derin çekmede 2,8 çekme oranlarına ulaşılabilmektedir [52,77]. Bu değer, geleneksel derin çekmede 2,2'dir. Bu özelliğinden dolayı hidromekanik derin çekme otomobil ve havacılık endüstrisinde artan bir uygulama alanına sahip olmuştur. Verim kaybı olmaksızın ürün kalitesinin yükseltilebilmesi, hidromekanik derin çekme yönteminin diğer sac şekillendirme yöntemleri arasında yerini almasına sebep olmuştur. Hidromekanik derin çekme prosesi ilk olarak 1890 yılında geliştirilmiş, gerçek gelişimi ise 2'nci Dünya Savaşı sonrası olmuştur. İlk çalışmalar Alman ve Japon araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Alman araştırmacılar 1950'lerde sıvıyı basınçlı olarak tutabilmek için yalıtım halkası üzerinde durmuşlardır. Son yıllarda hidromekanik derin çekme yöntemi Fransa, Rusya, Amerika gibi ülkelerde çok hızlı gelişmiştir [52].

Zhang'a [52] göre hidromekanik derin çekme yöntemi aşağıdaki üstünlüklere sahiptir.

1. Zımba ile sac malzeme arasındaki sürtünme kuvveti artar.
2. Sıvı kaçağı sebebiyle sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme direnci azalır.
3. Ön şişirme basıncının kullanılmasıyla sac malzemede pekleşme artışı olur.

Yukarıdaki üç kırılma önleme etkisinden dolayı bu proses kırılma sınırlarını geliştirir. Proses aynı zamanda kırılma önleme etkisine de sahiptir. Sac malzemenin desteklenmeyen bölgelerinin basınç etkisi altında olması kırılma oluşmasını önler. Hidromekanik derin çekme prosesi aşağıdaki üstünlüklere sahiptir.

1. Kırılma ve kırılma önleme etkileri daha yüksek derin çekme oranlarına erişilmesine, alet boyutlarının ve proses basamaklarının azalmasına, ürün kalitesinin yükselmesine ve maliyetlerin azalmasına imkân tanımıştır.

2. Zımba ile sac malzeme arasındaki sürtünme artışı ve sac malzeme ile kalıp arasındaki sürtünme azalması, sac malzemenin flanş bölgesinin daha az hasara uğramasına, geleneksel derin çekmeye göre daha iyi yüzey kalitesine ulaşılmasına, kırılmanın azalmasına, daha yüksek ölçüsel doğruluğa ve daha az kalıp aşınmasına imkân tanımıştır.

3. Sürtünme tutma etkisi bölgesel incelmeyi azaltmış, kalınlık dağılımını çok daha eşit hale getirmiştir.

4. Dişi kalıbın yerini sıvı basıncının alması prosesi çok verimli hale getirmiş, az miktarlardaki parçaların üretiminde kullanılabilir olmuş ve hatta sac metal malzemelerin özelliklerini belirleme testlerinde kullanılmaya başlanmıştır.

5. Proses karmaşık yapıları parçaların imalatında ve bazı ısıya uygun olmayan malzemelerin derin çekilmesinde kullanılabilir. Proses esnektir. Yüksek şekil değişikliği ile imal edilmiş bir otomobil parçasında yüksek dayanım elde edilebilmektedir. Prosesde yüksek bir geri itme kuvveti oluşmaktadır. Geleneksel derin çekme yöntemi ile mukayese edildiğinde daha yüksek baskı yastığı ve zımba kuvvetine ihtiyaç vardır [52].

Hidromekanik derin çekmede, sıvı basıncının etkisiyle kalıp sürtünmeleri azalırken zımba ve sac arasındaki sürtünme tutma kuvvetinin artmasıyla zımba burundaki kırılma önlenmektedir. Bu durum çekme oranı sınırının artmasına olanak sağlamaktadır.

Hazne basıncının farklı uygulamaları ile 3,2 gibi çekme değerlerine ulaşılabilir [52].

Aydınlatma ekipmanlarında kullanılan yansıtıcılar “spinning” yöntemi ile 6 kademede üretilirken, hidromekanik derin çekme ile tek bir kademede üretilmektedir. Bu tür parçalarda genel olarak alüminyum saclar kullanılmaktadır. Hidromekanik derin çekme yöntemi ile üretilen aydınlatma ekipmanları daha iyi iç yüzey kalitesi ve kalınlık dağılımı sunmaktadır. Düşük miktarlı üretimlerde kalıp maliyeti oldukça azalmaktadır. Havacılık endüstrisinde bölgesel incelmelerden arındırılmış yüksek dayanım standartlarına sahip parçalar bu yöntem ile üretilmektedir. Hidromekanik derin çekme yönteminde kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünmeler daha az olduğu için, kalınlık dağılımı da daha az olmaktadır. Otomobil parçalarında daha az operasyon gerektirmesi kullanımını sağlamaktadır. Aydınlatmaları da dâhil olmak üzere birçok otomobil parçası bu yöntem ile üretilmektedir. Bu parçalar hafif, ucuz ve yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Tek kalıp kullanılması dolayısıyla özellikle ilk örnek ve az miktarlı parçaların üretiminde büyük zaman ve maliyet tasarrufu sağlar [52].

Özellikle ilk örnek parçaların üretiminde vazgeçilmez bir üstünlüğe sahiptir. Sabit parçalar ucuz malzemelerden yapılabilir. Aynı kalıpta, farklı kalınlıklardaki ve farklı özelliklerdeki sac malzemeler şekillendirilebilir [103].

3.4.1 Hidrolik Şekillendirmenin Temelleri

Hidrolik şekillendirme, sünek metal malzemelere istenilen şekli vermek için sıvı basıncının kullanıldığı bir imalat prosesidir. Ham malzeme, sac ya da boru şeklinde olabilir. Sac malzeme kullanıldığında proses sac metal hidrolik şekillendirme, boru malzeme kullanıldığında tüp hidrolik şekillendirme olarak adlandırılır. Sac ve tüp metal hidrolik şekillendirme prosesi değişik teknikler ile ilişkilidirler [104].

Temel bir sac metal hidrolik şekillendirme prosesi, alt kalıp üzerine sac malzemenin konması, baskı yastığının malzemeyi tutması, zımbanın ya da kalıbın basınca

karşı malzemeyi şekillendirmesinden oluşur. Bilinen derin çekme operasyonları ile mukayese edildiğinde sac metal hidrolik şekillendirme tekniği ile, daha büyük çekme derinliği, düzgün dağılımlı malzeme uzaması, daha ucuz kalıp maliyeti elde edilebilmektedir. Daha uzun parça üretim zamanı, büyük parçaların imalatı için yüksek basınçlı pres gereksinimi, seri üretimde daha az miktarlarda ihtiyaç duyulan parçaların imalatında kullanılmasını sağlamıştır.

Sac metal hidrolik şekillendirme, derin çekme prosesine benzer. Sistem, kalıp, zımba ve baskı yastığından oluşur. Sac hidrolik şekillendirmede kalıp ya da zımbanın yerini sıvı almaktadır. Birçok şekillendirme periyodunda sacın bir tarafında ya sıvı ya da kauçuk zar veya diyafram vardır. Genellikle bu yöntem, sac yüzeyinde daha yüksek ve daha dengeli uzama dağılımı sunmaktadır.

Sac metal hidrolik şekillendirme kullanımıyla daha büyük çekme derinliği (1,5 kat) elde edilebilir [104]. Çekme kalıp operasyonları ile mukayese edildiğinde sistemin diğer üstünlükleri, yüzey kalitesini artırması, geri yaylanmayı azaltması, daha kısa sistem kurulum zamanı ve daha ucuz sistem tasarımıdır. Daha uzun döngü zamanı sebebiyle sac hidrolik şekillendirme, az miktarda üretimlere çok uygundur. Büyük paneller, genellikle büyük presler gerektirmektedir. Bu da büyük yatırım maliyeti gerektirmektedir.

Derin çekme ile mukayese edildiğinde hidrolik şekillendirmenin üstünlükleri şu şekilde açıklanabilir:

1. Bir yüzeyden sıvının temas etmesi nedeniyle sac malzemenin bütün yüzeylerinde daha büyük ve daha homojen uzama,
2. Çekme kalıp operasyonlarına göre 1,5 kata kadar daha derin parça üretimi,
3. Yüzey kalitesi ve geri yaylanmanın geliştirilmesi,
4. Daha kısa alet kurulum zamanı,
5. Daha düşük kurulum maliyeti.

Beş çeşit sac hidrolik şekillendirme yöntemi vardır [104]. Bunlar;

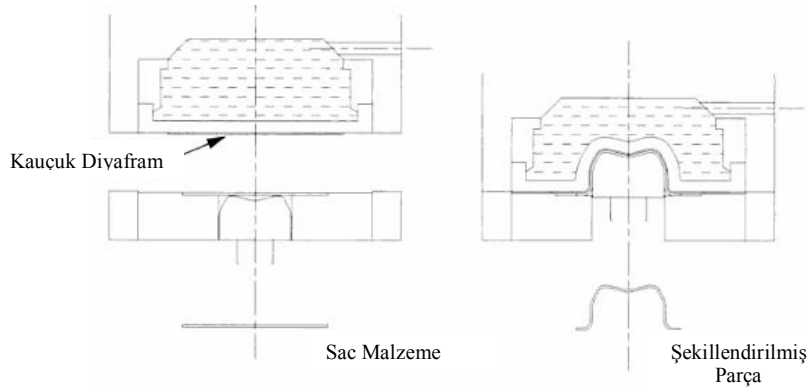
1. Zar diyafram kullanarak hidrolik şekillendirme,
2. Hidromekanik derin çekme,

3. Hidrolik gererek şekillendirme,
4. Derin çekme ve gererek şekillendirmenin ortak kullanımı,
5. Çift katlı malzemenin hidrolik şekillendirilmesidir.

3.4.1.1 Zar Diyafram Kullanarak Hidrolik Şekillendirme

Zar Diyafram Kullanarak Hidrolik Şekillendirme metodu ilk olarak 1940'ların sonlarında ve 1950'lerin başlarında geliştirilmiştir. Uçak parçalarının derin çekilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknik, az miktarlardaki derin çekme ile üretilen parçaların, daha düşük maliyetle üretilmesini sağlayabilmek için geliştirilmiştir.

Sistem, içi sıvı dolu bir kalıptan oluşmuştur. Kalıbın sıvı kaçaqları, bir elastik kauçuk diyafram vasıtasıyla engellenmiştir. Diyafram yüzeyi, baskı yastığı görevi görmektedir ve bilinen derin çekme kalıplarının tersine üst kalıbın, parçaya şekil vermek itibariyle herhangi bir fonksiyonu bulunmamaktadır. Alt kalıp zımba şeklindedir ve dış kısmı baskı yastığı olarak kullanılır. Başlangıçta, zımba baskı yastığı üzerindeki bir hatta pozisyon almaktadır. Bu durum, Şekil 3.14'de görülmektedir. Genel bir döngü zamanı 30 sn olan sistemin diğer özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir [104].



Şekil 3.14 Kauçuk diyafram ile hidrolik şekillendirme [104].

1. Sac malzeme, uygun yağlayıcı ile yağlanır ve baskı yastığı altına yerleştirilir. Genellikle sac malzemeye bir kılıf giydirilir. Amacı, kauçuk diyaframı koruyabilmek içindir.

2. Üst pozisyonda bulunan hazne sıvı ile doldurulur ve basınç uygun seviyeye kadar artırılarak şekillendirmeye hazır hale getirilir.

3. Zimba, ön şekillendirme için sıvıya doğru hareket ettirilir. Zimbanın ilerlemesiyle esnek kauçuk diyafram malzemeyi basınç etkisiyle sararak zımbaya doğru iter.

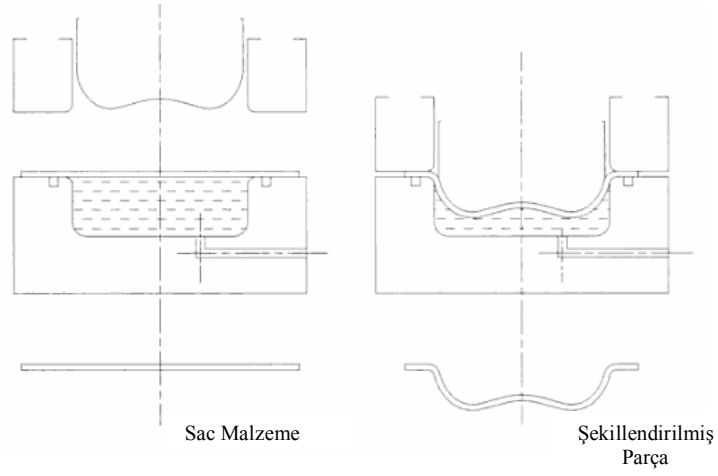
4. Zimba, kursun sonuna kadar ilerletilir ve basınç sistemden çekilir. Daha sonra şekillendirilen parça zimbadan çıkartılır.

Sistemde kullanılan kauçuk diyaframın ömrü 500-1500 adet basmaya yetecek kadardır. Hazne basıncı 35 MPa ile 104 MPa arasında değişebilmektedir. Çekme derinliği 305 mm civarında olabilmektedir. Daha yüksek çekme derinliği elde edebilmek için, çok basamaklı (tavlama prosesi gibi) prosesler gerekir. Proses, flanş kesme işlemleri ile son bulur. Böylece malzeme son şeklini almış olur [104].

3.4.1.2 Hidromekanik Derin Çekme

Hidromekanik Derin Çekme prosesinde; zimba, baskı yastığı ve basınç haznesinden oluşan temel parçalar kullanılır. Zimba, genelde üst pozisyondadır ve etrafında baskı yastığı vardır. İlk olarak, sac malzeme alt kalıbın (basınç haznesi ile birleştirilmiş) üstüne konur. Daha sonra baskı yastığı malzeme ve kalıp arasında sızdırmazlık sağlayacak şekilde aşağıya doğru (alt kalıba doğru) hareket ettirilir. Bu aşamadan sonra zimba, basınca karşı malzeme ile birlikte iner.

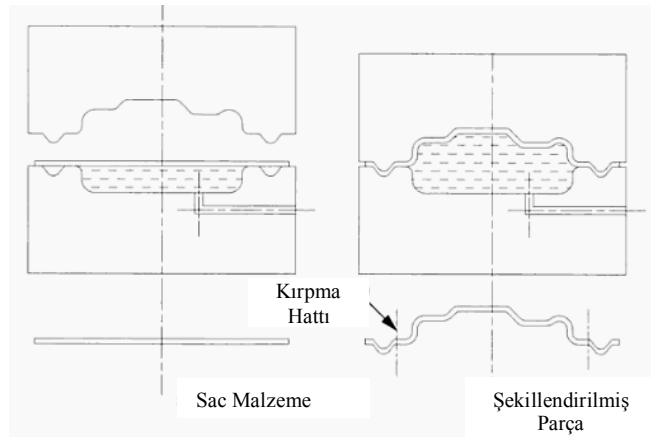
Bu şekillendirme prosesinde sac malzeme çekilirken baskı yastığındaki kuvvet kontrol edilir. Sistemde değişik baskı yastıkları (kontrollü malzeme akışını sağlayacak şekilde) kullanılabilir. Hazne basıncının aktif bir şekilde kontrolü, sac malzemeyi dengeli bir şekilde gerdirir ve zimba profiline yapışmasını sağlar. Proses, Şekil 3.15'de görülmektedir [104].



Şekil 3.15 Hidromekanik derin çekme [104].

3.4.1.3 Hidrolik Gererek Şekillendirme

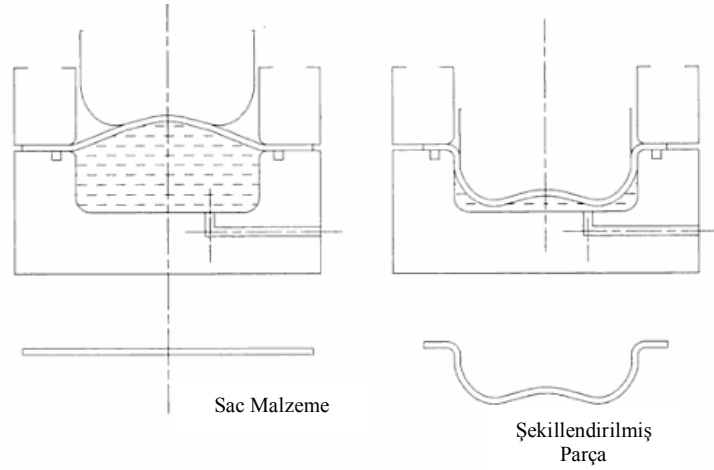
Hidrolik Gererek Şekillendirme prosesinde, bir kalıp ve bir hidrolik basınç odası vardır. Sistemde kalıp altta ya da üstte pozisyonlanabilir. Önce, sac malzeme takımların üzerine konur ve bu pozisyonda baskı yastığı ile tutularak yastıklar ile kilitlenir. Daha sonra basınç aktif olarak sac malzemeyi gerdirerek kalıbın şeklini aldracak şekilde artırılır. Bu prosede ulaşılabilecek derin çekme derinliği, sac malzemenin şekillendirilebilirlik özelliklerine bağlıdır. Proses, Şekil 3.16’da görülmektedir [104].



Şekil 3.16 Hidrolik gererek şekillendirme [104].

3.4.1.4 Derin Çekme ve Gererek Şekillendirmenin Ortak Kullanımı

Uygun sistem tasarımı ve sac malzemenin akışının tam kontrolü için derin çekme ve gerekerek şekillendirme aynı takım sisteminde beraber kullanılır. Bu birleştirilmiş sistem, otomobil gövdelerinde kullanılan paneller için çok uygundur. Sac malzemenin gerdirilmesi, pekleşme artımı ve girinti direncinin gelişimine yol açarak, malzemenin birçok yüzeyinin hemen hemen her yerinin düzenli ve eşit uzamalarına neden olur. Kursun derin çekme kısmı daha derine çekilme ile sonuçlanır, bu durum, sistemi, karmaşık parçaların imalatında çok uygun bir duruma getirir. Bu sistem ile, birinci sınıf yüzey kalitesine sahip parçalar üretilebilir. Proses, Şekil 3.17’de görülmektedir.

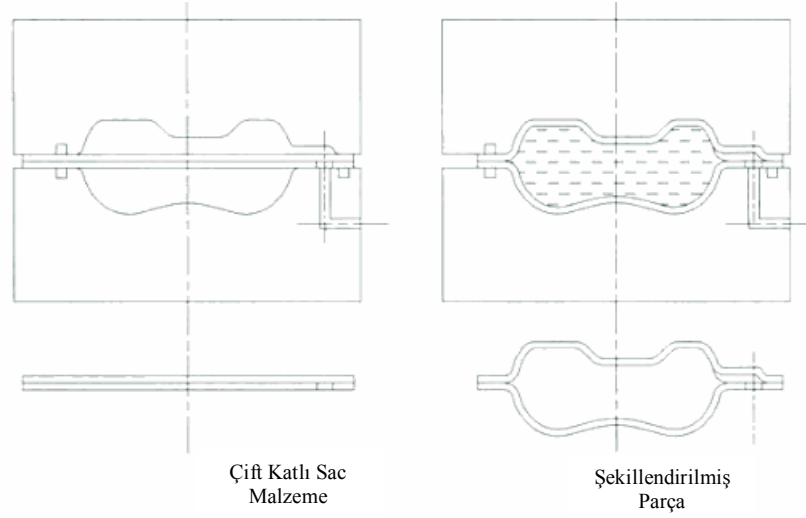


Şekil 3.17 Derin çekme ve gerekerek şekillendirmenin ortak kullanımı [104].

3.4.1.5 Çift Katlı Malzemenin Hidrolik Şekillendirilmesi

Sac hidrolik şekillendirmenin bu metodu yastık şekillendirme ya da paralel tabaka hidrolik şekillendirme olarak adlandırılır. Sistemde; geliştirilmiş iki sac metal malzeme çevresel olarak kaynatılarak üst ve alt kalıp arasına yerleştirilir. Daha sonra iki sac malzemenin arasına derin çekme ve gerekerek şekillendirme amacıyla sıvı basıncı uygulanır. İşlem, Şekil 3.18’de görülmektedir.

Bu proses, montaj yapılmış ve tek hatta bölmeleri birbiri ile ilişkilendirilmiş parçaların üretiminde kullanılabilir. Bu sistemde geliştirilmiş sac malzeme farklı kalınlıklarda kütle ihtiyacını ve yapısal performans ihtiyaçlarını karşılamayı sağlar. Geliştirilmiş baskı yastığı kuvveti sayesinde, flanş genişliği kontrol edilebilir ya da köşelerinden sac malzemenin kaynatılması ile tasfiye edilebilir.



Şekil 3.18 Çift Katlı Malzemenin Hidrolik Şekillendirilmesi [104].

3.4.2 Üretim Kılavuzu

Daha önce bahsedilen sac hidrolik şekillendirme teknolojilerinin tamamında, otomobil paneli tarzı malzemeleri şekillendirme prosesi esnasında, maksimum hidrolik şekillendirme basıncını, en küçük kalıp radyüsü belirler [104]. Çünkü, sıvı basıncı, panelin tüm yüzeyinde etkili olmaktadır. Özellikle büyük paneller için sıvı basıncı daha büyük olacağından, sistemi bir arada tutacak büyük tonajlı preslere ihtiyaç vardır.

Sac metal hidrolik şekillendirme prosesinde, sistem tasarımı esnasında, büyük tonajlı pres kullanmak çok önemlidir. Böylece, maksimum basınç değeri hesaplanabilir ve bu sayede en küçük radyüsler şekillendirilebilir. Şekillendirme basıncını belirleyen diğer değişkenler, panel kalınlığı ve sac malzeme özelliğidir. Bu değişkenleri tasarım öncesinde hesaplayarak bulmak, çok önemli maliyet düşümü sağlayacaktır.

Aşağıdaki eşitlikte görüldüğü gibi, pres tonajı, malzemenin alanı ve şekillendirme basıncı ile ilişkilidir.

$$F_p = A_s \times P_f \quad (3.17)$$

Burada;

F_p : Pres Kuvveti (N)

A_s : Malzemenin Yüzey Alanı (mm^2)

P_f : Şekillendirme Basıncı (MPa)

Örnek olarak;

$$F_p = 5\,000 \text{ kg}$$

$$A_s = \pi d^2 / 4 = \pi 3^2 / 4 = 7,065 \text{ cm}^2$$

Bu durumda kullanılabilir maksimum şekillendirme basıncı;

$$P_f = 5\,000 / 7,065 = 707,7 \text{ kg/cm}^2 \text{ dir.}$$

Şekillendirme basıncı; şekillendirilecek en küçük iç radyüs (R_s), kullanılan sac malzemenin kalınlığı (t) ve sac metalin maksimum çekme dayanımı (σ_C) ile ilişkilidir.

$$P_f = t \times \sigma_C / R_s \quad (3.18)$$

$$R_s = t \times \sigma_C / P_f \quad (3.19)$$

Burada;

t : Sac Malzemenin Kalınlığı (mm)

R_s : İç Radyüs (mm)

P_f : Şekillendirme Basıncı (MPa)

σ_C : Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)

Örnek olarak;

$$t = 0,9 \text{ mm}$$

$$\sigma_c = 325 \text{ MPa (DC04)}$$

$$P_f = 707,7 \text{ kg/cm}^2$$

Bu durumda şekillendirilebilecek maksimum radyüs;

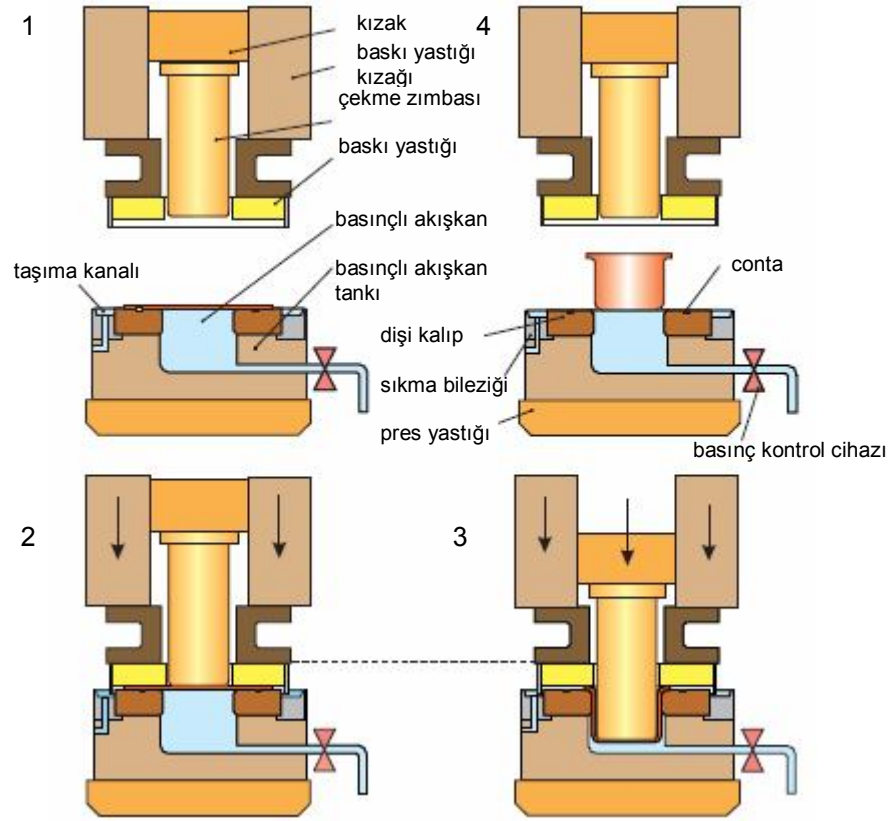
$$R_s = 0,09 \times 3250 / 707,7 = 0,413 \text{ cm}$$

Bu hesaplamalardan; 5 ton gibi iyi tonajlı bir pres kullanımı ile, 30 mm çapındaki silindirik şekilli, 325 MPa dayanıma ve 0,9 mm kalınlığa sahip bir sac malzemeden, en az, 4,13 mm veya daha büyük radyüse sahip malzemeler üretilebilecektir.

3.4.3 Hidromekanik Derin Çekme Kalıp Tasarımı

Alt kalıp sıvı haznesi olarak adlandırılmaktadır. Basınç odası olarak tasarlanmış ve dişi kalıp için tutma görevi yapmaktadır. Preste sıvı haznesi basınç düzenleyicisine bağlanmıştır. Dişi kalıbı sıvı haznesine bağlamak için mengene (kelepçe) veya çekme halkası kullanılmaktadır. Şekillendirme esnasında taşan sıvının toplanması için, çekme halkası üzerinde oluklar açılmıştır. Dişi kalıbın radyüsünde polietilen contası gibi tel yerleştirmek için yuvarlak bir oyuk vardır. Conta, boşluğuna yerleştirildiği zaman yüzeyle yaklaşık olarak 45°'lik açıyla örtüşür. Bu boşluk, dişi kalıp iyi tasarlanmışsa, simetrik dairesel boş parçalarda ihmal edilebilir. Söz konusu kalıbın şematik çizimleri Şekil 3.19'da görülmektedir.

Üst kalıp, çekme zımbası ve baskı yastığından oluşmaktadır. Baskı yastığı genellikle kalıp içerisine girmektedir ve bu durumda kalıptan sızan akışkanı engellemek için tasarlanmış bir dairesel koruma halkasını içerir. Bu bölgede oluşan sıvıyı tutmak için tasarlanmış sıçrama halkasından oluşur. Bu kısım, preslerde, daha büyük baskı yastığı açıklığını birleştirmekle birlikte bağlantıyı sağlar. Çekme zımbası baskı yastığının içine yerleştirilmiştir. Bu genelde eklenmiş bir parça ile sağlanmaktadır. Zımba eklentisi zımbanın kalıp içinde ilerlemesine kılavuzluk yapmaktadır. Üretim kalıplarında çekme derinliğini sınırlamak için dâhili mekanik durdurucular kullanılır [105].



Şekil 3.19 Hidromekanik derin çekme kalıbı [105].

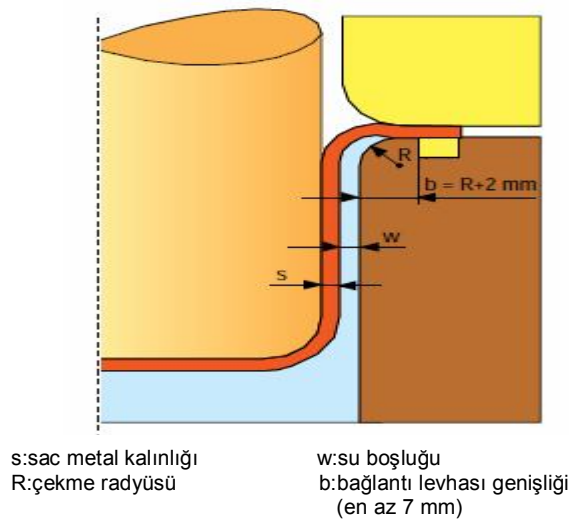
3.4.4 Hidromekanik Derin Çekme Kalıbının Çalışması

Çift etkili hidrolik presin üst gurubu yukarıya kaldırılarak pres açılır ve sıvı haznesi ana pozisyonda doldurulur. Daha sonra pres kapanır ve baskı yastığı boşluğu doldurur. Preste, ayarlanmış baskı yastığı basıncı, baskı çemberini sarmaya başladığı an şekil verme işlemi de başlamaktadır. Çekme zımbasının sıvı haznesine girmesi sonucu akışkanın basıncı artmaya başlar. Şekil değiştirme sırasında sac, çekme zımbasına doğru baskılanmaktadır. Şekil verme sırasında baskı yastığına bağlanmış basınç kontrol sistemi sayesinde çekme derinliği kontrol edilmektedir.

Mekaniksel olarak sınırlandırılmış çekme derinliğine ulaşıldıktan sonra baskı yastığındaki ve haznedeki basınç boşaltılır ve pres ana pozisyona geri gönderilir.

3.4.5 Hidromekanik Şekil Verme İşleminin Özellikleri

Çekme zımbasının sıvı haznesi içerisine girerek aktifleştirdiği basıncın çok yönlü etkisi vardır. Bu basınç sayesinde sac malzeme zımbaya doğru şekillendirilmeye zorlanmaktadır. Bu zorlanmadan dolayı zımba ile sac arasındaki sürtünme giderek artmaktadır. Sonuç olarak, bu basınçtan dolayı çekme kuvveti ihtiyacı, geleneksel derin çekmede oluşan kuvvetlerden daha yükseğe çıkabilmektedir. Aynı zamanda dişi kalıpla zımba arasındaki boşluk da meydana gelen basınç, malzemenin yukarıya doğru kalkmasını kolaylaştırmaktadır (Şekil 3.20). Bu şekil değiştirme, radyal gerilme basıncı ve teğetsel sıkılma basıncına neden olmaktadır (Şekil 2.2). Bu basınçlar sayesinde hidromekanik derin çekme, geleneksel derin çekmedeki derinliklere göre daha derin parça çekilmesini sağlamaktadır. Geleneksel derin çekmede çekme oranı " $\beta \approx 2$ " iken, hidromekanik derin çekmelerde bu oran " $\beta \approx 2,7$ "'ye kadar çıkabilmektedir. Ara çekme ve tavlama işlemi de gerektirmediği için daha ekonomik sonuçlar vermektedir. Gerekli şekil verme proseslerinin sayısını azaltarak takım maliyetleri de düşürülebilmektedir. Başka bir yararı da yüzey kalitesidir. Sac, sıvı yardımıyla çekildiği için, daha iyi bir yüzey elde edilmektedir. Bunların yanı sıra, sonlandırma proseslerinin maliyetleri ve düzeltme gibi son işlemlerin maliyetleri genelde büyük ölçüde azaltılabilir veya tamamıyla kaldırılabilir [105].

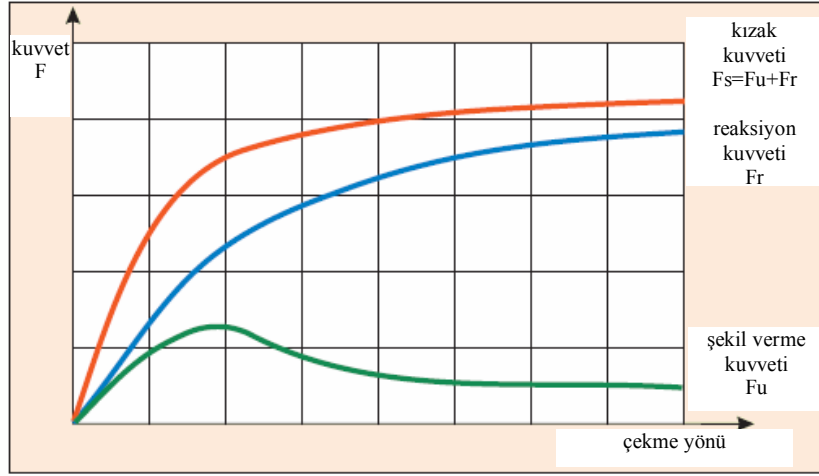


Şekil 3.20 Hidromekanik derin çekmede yarı çekilmiş pozisyon [105].

Zımbanın boşluğa doğru parçayı şekillendirmesi sonucu ölçüsel olarak daha hassas bir üretim mümkündür. Reflektör üretimlerinde bu çok önemlidir. Çünkü, reflektörlerin sadece ölçü toleransları değil, aynı zamanda görsel kaliteleri de test edilmektedir.

Hidromekanik çekmelerdeki pres kuvveti, diğer rijit şekil verme metotlarından yüksektir. Bunun sebebi sıvının ters basınç etkisidir. Zımba kızak kuvveti, şekil verme kuvveti (F_u) ve reaksiyon kuvveti (F_r) toplamına eşittir (Şekil 3.21). Kullanılan materyallere göre sıvı haznesinde aşağıdaki basınçlar oluşturulmaktadır.

Alüminyum	5-20 MPa
Çelik	20-60 MPa
Paslanmaz çelik	30-100 MPa



Şekil 3.21 Hidromekanik derin çekme kızak kuvvetinin çekme miktarı ile değişimi [105].

3.4.6 Hidromekanik Derin Çekmede Sac Malzeme Şekillendirilebilirlik Verilerinin Değerlendirilmesi

Boru hidrolik şekillendirme prosesinde, pekleşme, malzeme şekillendirilmesinde çok önemlidir ve iki eksenli gererek şekillendirmede “n” değerinin yüksek olması arzu

edilir. Serbest şişirmeli boru şekil değiştirmesinde, plastik şekil değiştirme için eşdeğer gerinim,

$$\varepsilon_f = (1 + r)xn \quad (3.20)$$

Bu eşitlik sabit bir “r” değeri için yüksek “n” değerinin yüksek şekillendirilebilirlik göstergesi olduğunu göstermektedir. “n” değeri duvar kalınlık dağılımında önemli bir etkiye sahip değildir [106].

Düşük “r” değeri kolay incelme göstergesidir. “r” değerinin büyük olması incelmeye karşı direncin büyük olacağını gösterir. Malzeme akışı büyük oranda anizotropik değerlere bağlıdır. Kırılma gerinimi aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir [106].

$$\varepsilon_f = \frac{(1 + r)n - \sqrt{\frac{4}{3} \ln\left(1 + \frac{t_0}{d_0}\right)}}{\sqrt{\frac{4}{3} (1 + \beta + \beta_2)^2}} \quad (3.21)$$

Burada;

$$\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$$

ε_1 : Dairesel uzama

ε_2 : Teğetsel uzama

Yukarıdaki eşitlik; diğer değişkenler sabit olmak şartıyla “r” değerinin azalması ile şekillendirilebilirliğin azalacağını göstermektedir [106].

Parça maliyetlerini azaltabilmek için sac kalınlığı olabildiği kadar ince tasarlanır. Alüminyum sacın “r” değeri düşük olduğu için kalınlığı 1 mm’nin altına düşürülememektedir. Çelik sacın “r” değeri yüksek olduğundan yüksek gerdirilebilirlik sağlamakta böylece 0,8 mm gibi kalınlık şekillendirme için yeterli olmaktadır. Simülasyonlarda, değişkenlerin uygun değerlerinin bulunamadığı, birçok durumda aşırı

incelme ve kırılmalar olduğu gözlenmiştir. Dairesel sac malzemenin karesel zımba ile şekillendirilmesinde sekizgen sac malzemeye göre çekme oranı sınırının daha düşük kaldığı gözlenmiştir. Bu durum, şekillendirilecek sac malzemenin, şekillendirme öncesi şeklinin çok önemli olduğunu göstermektedir [33] .

İyi bir yağlama, pürüzlü zımba yüzeyi, yüksek “n” ve “r” değeri ile daha düşük malzeme incelmesinin elde edildiği görülmüştür [41].

3.4.7 Hidromekanik Derin Çekme İşleminin Fonksiyonları

3.4.7.1 Kırışma ve Bölgesel İncelme Kontrolü

Derin çekmede flanş kırışmalarını engellemek çok zordur. Baskı yastığı kuvvetini biraz artırırsanız zımba burnunda kırılma ile sonuçlanır. Farklı çözüm yöntemleri ise fazladan uzmanlık gerektirir. Hidromekanik derin çekme yönteminde ise hazne basıncı yardımı ile sac malzemenin zımbaya temasa zorlanıyor olması bu kırışmaları azaltıcı etki yapmaktadır [29].

Hidromekanik derin çekmede iki çeşit hatadan söz edilir. Bunlar, düşük basınçtan dolayı kırışma, yüksek basınçtan dolayı kırılmadır [50].

Gövde kırışması, flanş kırışması ve bölgesel incelme üç çeşit hata tipi gözlenmiştir. Gövdesel kırışma her parçada meydana gelmiş, sık sık kırılmalara neden olmuştur. İncelme de genellikle meydana gelmiş, uygun proses değişkenleri ile incelmeyi önlemek mümkün olmuştur. Kırılma ve flanş kırışması, baskı yastığı kuvveti ve basınç gibi değişkenlerin uygun değerlerinin bulunmasıyla giderilmiştir. Parçanın şekli, kalıba yerleştirilmesi ile doğrudan ilişkili olduğundan, gövdesel kırışmadan kaçınmak çok zordur. Sac kalınlığının artması her üç tip hatanın giderilmesinde önemli bir faktördür. Çalışmada, sürtünme katsayısı zımba ile sac arasında 0,20, sac ile baskı yastığı arasında 0,05 ve sac ile alt kalıp arasında 0,02 olarak verilmiştir. Deneylerde, 1 mm alüminyum ve 0,8 mm çelik sac kullanılmıştır. Akma dayanımı Al1100 sacının 80 MPa, 08Al (A-K Çeliği) sacının

230 MPa'dır. Alüminyum sacın şekillendirilmesinde çoğu zaman ön şişirme kullanılmıştır. Çelik sacda ise kullanılmamıştır. [33].

Hidromekanik derin çekme prosesinde görülen hata tiplerinden birisi kırışmadır ve ikiye ayrılır. Gövde ve flanş kırışması. Gövde kırışmasının nedeni, kalıp radyüsünün çok büyük olması veya flanş kırışmasının mirası olmaktadır. Kalıp ve zımba arasında boşluk çok büyükse, basınç yeterli değilse de olabilir. Flanş kırışmasının başlıca nedenleri; baskı yastığı kuvvetinin çok düşük olması, baskı yastığı ile kalıp arasındaki boşluğun büyük olmasıdır. Deneylerde, flanş kırışması etkili olarak engellenememiştir. Hatta kalıp boşluğundaki basınç artırılrsa bile çözüm olmamıştır [107].

Hidromekanik derin çekmede kırışma ve kırılma hataları genel olarak gözlenmiştir. Flanş kırışması yetersiz baskı yastığı kuvvetinden oluşurken, zımba profilindeki kırılma yetersiz hazne basıncı sebebi ile oluşmuştur ya da çok yüksek basınç sebebi ile kalıp profilinde oluşmuştur. Süper alaşımda kalıp profilinde, malzemenin yüksek dayanımından dolayı nadiren kırılma gözlenmiştir. Hazne basıncı değerinin çekme oranı ile arttığı gözlenmiştir. Flanş kırışmasından kaçınabilmek için uygun kalıp ve baskı yastığı boşluğu 1 mm sac için 1,1 olarak tespit edilmiştir [53].

Proses, kırışma önleme etkilerine de sahiptir. Desteksiz bölgede hazne basıncının sac malzemeyi desteklemesi kırışma oluşumunu engellemektedir [77].

Geleneksel derin çekme yönteminde sac incelmesinin görüldüğü en büyük değer zımba ucuna yakın bölgeye gelmektedir. Bu bölgede kırılmalar sıkça gözlenmektedir. Özellikle bazı parçalar için bu incelmenin çok az olması istenmekte, malzeme mukavemetinden ödün verilmemektedir. Bazen bölgesel incelmelerden kurtulmak için şekillendirme basamakları artırılmaktadır. Hidrolik şekillendirmede ise hazne basıncı, sacı zımbaya bastırır. Bu basınç zımba uç bölgesinde meydana gelen bölgesel incelmeyi azaltır. Sac malzeme yüzeyindeki basıncın artması, flanş bölgesinin kalıp içerisine akışı esnasındaki kalınlaşmayı azaltır. Böylece sac malzemenin kalınlık dağılımının eşit olması sağlanır [29].

İncelme, zimba yolunun başlangıcında meydana gelirken, kırışma zimba kursunun sonunda meydana gelmiştir [35].

Hidromekanik derin çekme deneylerinde üç farklı yerde kırılma gözlenmiştir. Başlangıçta kırılma, ortada kırılma ve son aşamada kırılma. Başlangıçta meydana gelen kırılma iki farklı durumda olmuştur. Birincisi flanşa kırışma oluşmadan, ikincisi kırışma oluşuktan sonra ortaya çıkan kırılmadır. Başlangıçta meydana gelen kırılma, yetersiz hazne basıncı, kötü yağlama, baskı yastığı ile kalıp arasındaki açıklığın az olması veya çekme oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Başlangıçta oluşan kırılma ya çok düşük yada çok yüksek basınçtan kaynaklanmaktadır. Bunu önlemek için: ön şişirme uygulanabilir. Flanşa daha iyi yağlama yapılması, zimba pürüzlülüğünün artırılması, kalıp ve baskı yastığı arasında uygun boşluğun sağlanması bu kırılmaları önleyecektir. Aşamanın ortasında meydana gelen kırılma üç farklı durumda gözlenmiştir. Zimba kuvvetinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. İlki sac çekme kuvveti, zirve zimba kuvvetine ulaşmadan önce gözlenmektedir. İkincisi eşit, üçüncüsü ise sac çekme kuvveti zimba kuvvetini aştıktan sonra gözlenmektedir. Buna göre, bu kırılmalar genellikle toplam zimba kuvveti ve sac çekme kuvvetinin maksimum değere ulaşmasında meydana gelmektedir. Bunu önlemek için flanşa iyi bir yağlama, baskı yastığı ile kalıp arasındaki açıklığın artırılması, hazne basıncının artırılması gerekir. Son aşamadaki kırılma ise 2 farklı durumda görülür. Birincisi bütün flanşın sökülmesi, ikincisi bir ya da iki kulağın çıkartılmasıdır. Bu kırılma, derin kalıp radyüsünde çok az veya çok fazla bükmeden kaynaklanmaktadır. Bunu azaltmak için, son aşamada hazne basıncının azaltılması, flanşa iyi bir yağlama, boşluğun üniform olmasını sağlama ve başlangıç aşamasında kırışma oluşumunu engellemek gerekir. Kırılmadaki ana neden genellikle kutu duvarında çekme gerilmesinin çok yüksek olmasıdır. Sac malzeme flanşındaki direnç çok fazla ise veya kutu duvarındaki dayanım sac malzeme flanşını çekecek kadar dayanımlı değilse kırılma meydana gelir. Genelde, kırılmayı önlemek için iki metod kullanılır. Kutu duvarındaki yükü azaltmak veya iyi bir yağlama ile sac flanşındaki direnci azaltmaktır [107].

Hidromekanik derin çekme prosesinde üç tip kırılma gözlenmiştir. Zimba omuzunda kırılma, aşırı basınçtan dolayı kalıp omuzunda kırılma ve düşük itme kuvvetinden dolayı kırılma gözlenmiştir [108].

3.4.7.2 Geri Yaylanma Kontrolü

Geleneksel derin çekmede geri yaylanmadan dolayı parçanın ölçüsel doğruluğu azalır. Geri yaylanmayı azaltmanın yolu radyal (çevresel) gerilmeyi artırmaktır (Şekil 2.2). Sıvı basıncı bu gerilmeyi artırır. Sac malzeme kalıp ve zımba arasında temasta olmadığından ölçüsel doğruluk artar. Kalınlık yönünde basınç uygulanmasıyla tam doğruluk artar [29].

3.4.7.3 Dişi Kalıbın Kullanılmaması

Geleneksel derin çekme yönteminde sac malzemeye belirli şekillerin verilebilmesi için hem alt hem de üst kalıba ihtiyaç vardır. Sac malzeme her iki kalıp arasında preslenmelidir. Hidromekanik derin çekme yönteminde ise alt (dişi) kalıbın yerini sıvı almıştır. Dişi kalıbın maliyeti erkek kalıptan daha fazladır. Erkek kalıp ile alıştırılması daha fazla zaman almaktadır. Keskin ve karmaşık yapıları parçaların ise sıvı ile şekillendirilmesi zordur [29].

3.4.7.4 Ekipman Gereksinimi

3.4.7.4.1 Hazne Basıncı Kontrolü

Hazne basınçlı şekillendirmede çok yüksek basınca ve bu yüksek miktarlardaki basıncın ayarlanabilirliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Karmaşık şekilli parçaların şekillendirilmesinde özellikle ayarlanabilir basınçlara ihtiyaç vardır. Şekillendirmenin başlangıcında basıncın sac malzemeyi aşırı gerdirmesi engellenir. Bu düşük basıncın aksine sac malzemenin son halinin verilebilmesi, ölçüsel doğruluğun sağlanabilmesi için şekillendirmenin ilerleyen aşamalarında farklı basınç değerlerine ihtiyaç vardır [29].

Hazne basıncı ile baskı yastığı kuvveti arasındaki ilişki çok önemlidir. Literatürde hazne basıncı zımba kursu ile birlikte (100 mm zımba kursu için 20 mm'den itibaren) hızla

artmış ve 40 MPa'da sabit tutulmuştur. Baskı yastığı kuvveti ise 50 mm kursa kadar 25 kN seviyesinde iken, bu noktadan sonra artırılarak 100 mm kurs seviyesinde 300 kN mertebesine çıkarılmıştır. Hazne basıncın 40 MPa'da sabitlenmesi, sistemin daha yüksek basınca müsaade etmemesidir. Baskı yastığı kuvvetinin artırılmasının sebebi ise malzeme akışını sağlamak ve flanşta meydana gelecek aşırı kalınlaşmayı engellemektir. Çalışma, AKDQ çeliği ile gerçekleştirilmiştir [109].

Baskı yastığı kuvveti ve hazne basıncı en önemli değişkenler olup karşılığında, kırışma ve kırılma genel hatalar olarak gözlenmiştir. Deneylerde, çok erken veya çok yüksek hazne basıncının oluşturulması erken kırılma hatalarına yol açmıştır. Çok yüksek baskı yastığı kuvveti veya çok küçük boşluk sağlayıcı da kırılmalara yol açmıştır. Yetersiz basınç ve baskı yastığı kuvveti (veya çok büyük boşluk sağlayıcı) gövde kırışmalarına neden olmaktadır. Deneyler, sac malzemede gövde kırışması olmaması için, hazne basıncının yeteri kadar yüksek olması gerektiğini göstermiştir. Şekillendirme prosesinin başarılı olabilmesi için uygun hazne basıncı ve baskı yastığı kuvvetinin çok önemli olduğu gözlenmiştir. 20 MPa baskı yastığı basıncı kalıplar arasındaki boşluk azaltılarak basıncın erken oluşması sağlanmış, bu durumda kırılma hatası gözlenmiştir. 0-15 MPa seviyesinde hazne basıncı kullanılmış, en uygun basınca 9 MPa seviyesinde ulaşılmıştır. Malzemenin akma dayanımı 100 MPa'dır. Deneylerde, zımba ile sac malzeme arasındaki sürtünme kuvveti daha yüksek tutulmuştur. Çalışmada; sac malzemenin şekillendirilmesi; bölgesel inceltme, kırışma ve kırılma açısından incelenmiştir. Baskı yastığı ile kalıp arasında boşluk sağlayıcı kullanılmadığında ise (sabit baskı yastığı kuvveti denemelerinde) uygun baskı yastığı kuvveti ile hazne basıncının kararlaştırılması çok daha zor olmuştur. Baskı yastığı kuvveti çok daha düşük gerekmiştir. Hazne basıncı, gövde kırışması ve bölgesel incelmelerin baskı yastığı kuvveti değişimine çok duyarlı olduğu gözlenmiştir. Malzeme kalınlığının artması kırışmaları azaltmıştır [34].

Hazne basıncının çok yüksek olması erken kırılmalara neden olurken, düşük olması yeterli sürtünme oluşmaması sebebi ile zımba radyüs bölgesinde kırılmaya neden olmuştur. Gövdesel kırışma olmaması hazne basıncının yeteri kadar yüksek olmasına bağlanmıştır [1].

Bölgesel inceleme, hazne basıncı düşükse zımba ucuna yakın, yüksek ise kalıp profilinde (alt ve üst radyüs bölgesi arasında) meydana gelmiştir. Böylece radyüste sürtünmeler azalacaktır. İhtiyaç duyulan basınç değeri radyüs değerinin büyümesiyle azalacaktır. Hidrolik şekillendirme ile yüksek çekme oranı, kutu duvarında çok az inceleme ile üretim yapılmakta, simetrik olmayan malzemelerin şekillendirilmesi gerçekleştirilebilmektedir. Hazne basıncı, sac malzemenin bir tarafında yüzey gibi davranır. Böylece flanş çevresine, hazne basıncına eşit radyal basınç uygulanır. Bu basınç kutu duvarındaki gerilmenin, sac malzemenin maksimum çekme dayanımına ulaşmasından önce, daha yüksek derin çekme oranına ulaşılmasını sağlar. Kutuyu zımbaya doğru bastıran sıvı baskısı, sürtünme kuvvetini artırır ve zımba radyüsündeki en büyük çekme gerilmesinin kalıp radyüsüne doğru kaymasını sağlar. Bu durum, metalin pekleşmesini sağlayan çekme gerilmesinin, kutu duvarına transfer edilmesini sağlar. Böylece, çevredeki radyal baskı, kutu duvarındaki sürtünme desteği ve radyüsteki sürtünmenin yokluğu hidrolik şekillendirmede çekme oranının artırılmasına olanak sağlar. Basınç çok yüksek olursa sürtünme direnci yüksek olacağından kutu kırılır. Hazne basıncı düşük olduğunda ise kırılma görülecektir. Hidrolik şekillendirmede başarının elde edilebilmesi için kırılma ve kırılma yapmayacak en uygun zımba yolu-basınç değerlerinin bulunması gerekir [43].

1 mm kalınlığında Al1100-H14 malzeme kullanılarak, 100 MPa hazne basıncı denenmiştir. Basınç miktarının dışı kalıp radyüsünde sac malzemeyi temas ettirmeyecek şekilde yukarıya doğru kaldıracak miktarda olması gerektiği ifade edilmiştir. Böylece radyüste sürtünmeler azalacaktır. İhtiyaç duyulan basınç değeri radyüs değerinin büyümesiyle azalacaktır [44].

Hazne basıncı 7 MPa'dan aşağı olduğunda yoğun kırılma gözlenmiştir. Basınç 15 MPa'a yükseldiğinde ise gövde kırılması azalmış, basıncın artması üretilen parçayı etkilemiştir. 10 MPa seviyesinde gerilme ve uzama dağılımlarının daha iyi olduğu gözlenmiştir [51].

Çapan, hidrostatik basıncın malzeme özelliklerine etkisinin, çok yüksek basınçlara çıkılmadıkça ihmal edilebilir mertebede olduğunu söylemektedir. Hidrostatik basıncın en büyük etkisinin, malzemenin sünekliğini artırması ve dolayısıyla kopmadan önce, çok daha

büyük şekil değişimleri elde edilebilmesini sağlamasıdır. Hidrostatik basıncın büzülme başlangıcına kadar oluşan üniform uzamaya ve maksimum yüke ise etkisi yoktur. Hidrostatik basınç etkisinde kalmış olan metallerde mekanik özelliklerin değişime uğramadığı deneysel olarak saptanmıştır [85].

Aynı çekme oranında, süper alaşım malzemede düşük dayanımlı çeliklere göre daha yüksek hazne basıncına ihtiyaç duyulmuştur. Çekme oranı 2,45'e çıkınca hazne basıncı 100 MPa seviyesinde faydalı olmuştur. Çekme oranı artışı ile hazne basıncı ihtiyacının arttığı görülmüştür. Basınç çok yüksek ise malzemenin kalıp profilinde kırıldığı görülmüştür. En uygun basınç değerinde, kalıp profilinde sacın temas etmemesidir. Çalışmada, çekme oranı-maksimum basınç arasında bir çalışma eğrisi belirlenmiş ve basıncın bu eğri değerinden biraz yukarıda olması gerektiği değerlendirilmiştir. Hazne basıncının çok çabuk oluşması gereklidir. Bu çalışmada iki kalıp arasında boşluk sağlayıcı kullanıldığı için, kalıp ve baskı yastığı arasındaki açıklıktan dolayı kaçaklar oluşmuş ve basınç çabuk oluşmamıştır. Basıncın yavaş oluşması zımba profilinde kırılmaya neden olmuştur. Bunu önlemek için bir sızdırmazlık parçası kullanılmış ve başlangıçta yalıtım sağlanarak erken basınç oluşması sağlanmıştır. Hazne basıncının erkenden uygun değere gelmesiyle, zımba ve sac malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin artması sağlanarak zımba profilindeki sac malzemede radyal gerilmenin maksimum olması sağlanmış ve aşırı incelme oluşması engellenmiştir. Malzeme, zımba ile tam temaslı hale gelerek zımba profilindeki kırılmanın nadiren görülmesini sağlar [53].

Deneylede, yüksek dayanımlı malzemeler için daha yüksek basınca ihtiyaç duyulduğu görülmüştür [53].

3.4.7.4.2 Baskı Yastığı Kuvveti Kontrolü

Genelde pres şekillendirme yöntemlerinde baskı yastığı kuvveti sabittir. Baskı yastığı kuvveti hidrolik şekillendirmede sıvının kaçma miktarını etkilediğinden, yüksek hazne basıncında yüksek baskı yastığı kuvvetine, düşük hazne basıncında düşük baskı

yastığı kuvvetine ihtiyaç vardır. Bunlara ilave olarak gövde kırışmasını engellemek için şekillendirme esnasında baskı yastığı kuvveti ayarlanabilir olmalıdır [29].

Baskı yastığı kuvveti sac malzemeyi preslemeyecek kadar düşük, kaçaklara ve sızıntılara yol açmayacak kadar büyük olmalıdır. Baskı yastığı kuvveti kursun sonuna doğru artırılmalıdır [28].

Hidrokinamik derin çekmede baskı yastığı kuvveti malzeme akışını kontrol ederken aynı zamanda sıvı kaçaklarını da engeller [110].

3.4.7.4.3 Yastık Kullanımı

Ürünün dışarıya atılabilmesi için kalıp yastığına ihtiyaç yoktur. Hazne basıncı bazı durumlarda sacı şekillendirmeye yetmez. Bu durumda dişi kalıba yastık ilave edilir. Hidrokinamik şekillendirmede hazne basıncı dolayısıyla çok yüksek zımba kuvvetlerine ihtiyaç vardır. Bu büyük kuvveti azaltabilmek için yastık kullanımına ihtiyaç vardır [29].

3.4.7.4.4 Daha Ucuz Malzeme Kullanımı

Hidromekanik derin çekmede sac malzemedeki incelmeler kontrol altına alınabildiğinden daha ince sac malzeme kullanılabilen ve daha ucuz ve daha hafif malzemelerle aynı dayanım sağlanabilmektedir [29].

3.4.7.4.5 Daha Ucuz Kalıp Malzemesi Seçimi

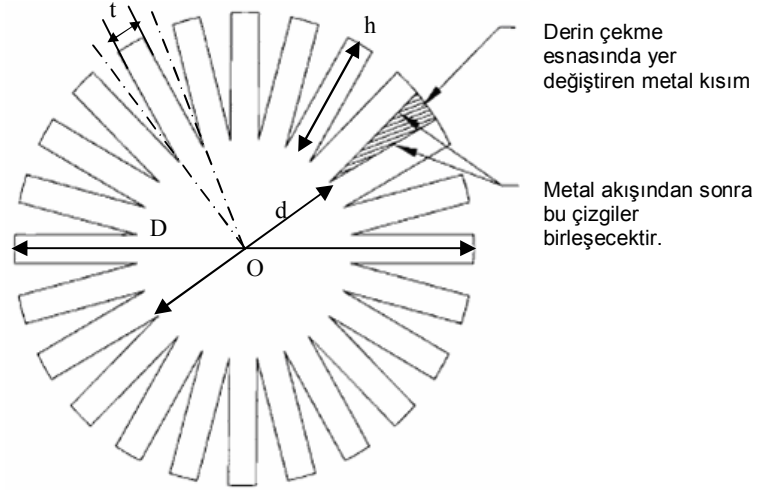
Hidromekanik şekillendirmede kalıplar arası mekanik temas olmadığından sürtünmeler azalmakta aynı ihtiyaç için daha zayıf kalıp malzemesi kullanılabilir [29].

3.4.7.4.6 Zor Malzemelerin Şekillendirilmesi

Titanyum gibi yüksek dayanımlı, alüminyum gibi şekillendirilmesi zor malzemelerin şekillendirilmesi bu yöntemle yapılmaktadır. Yüzey sürtünmesi olmadığından yüzeyi işaretlenmiş veya kaplanmış malzemelerin şekillendirilmesi mümkündür [29].

3.5 Derin Çekme

Saç levhalardan kutu şeklinde parçalar elde etmede kullanılan yöntemlerin en önemlisi derin çekmedir [86]. Şekil 3.22 ve 3.23 ve 3.24’de “D” çapında dairesel bir puldan (çekme sacı), iç çapı “d” olan silindirik bir kutunun derin çekilmesi görülmektedir.

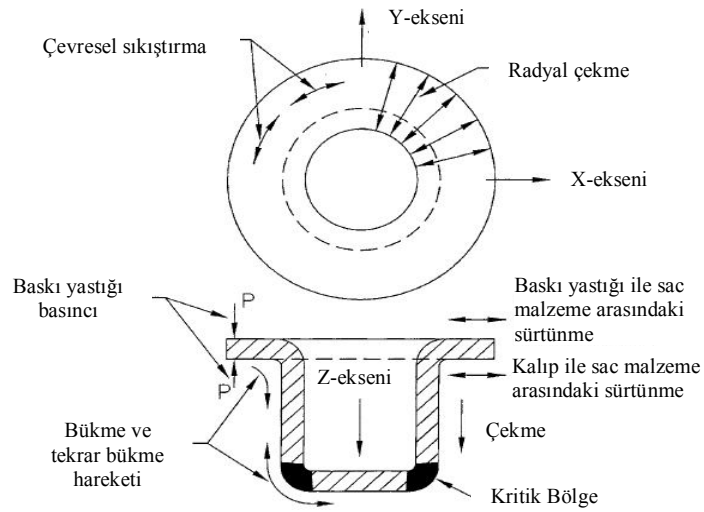


Şekil 3.22 Derin çekmede metalin yer değiştirmesi [85,111].

Şekillendirilecek sacının kalınlığı “t” olsun. Şekil 3.22’de, “d” çapındaki daire üzerinde, aralarındaki daire yayı uzunluğu “t” olan noktalar alarak “O” daire merkezine birleştirelim. Böylece “d” çapındaki daire üzerinde aralıkları “t” olan yarıçaplar elde edilir. Bu yarıçapları, “D” çapındaki daireye kadar uzatalım ve “d” ile “D” çapındaki bu

iki dairenin sınırladıkları halka üzerinde kenar uzunlukları “t” ve “h” olan dikdörtgenleri çizelim.

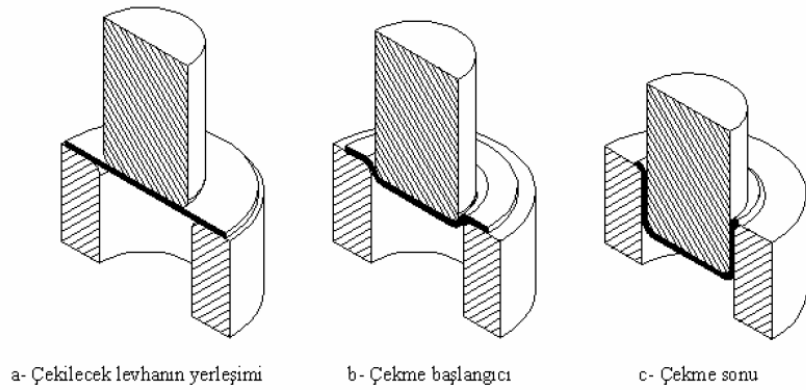
Bu dikdörtgenleri birbirinden ayıran üçgenlere karakteristik üçgenler denir. “D” çapındaki çekme sacından, “d” çapında bir kap elde edilmesi için, kenar uzunlukları “t” ve “h” olan dikdörtgenleri, ”d” çapındaki daire etrafında “90 derece” kadar kıvrırmak yeterlidir. Böylece, karakteristik üçgenlere ait malzemenin gereksiz olduğu görülmektedir.



Şekil 3.23 Çekilen parçayı etkileyen değişik kuvvetler [111].

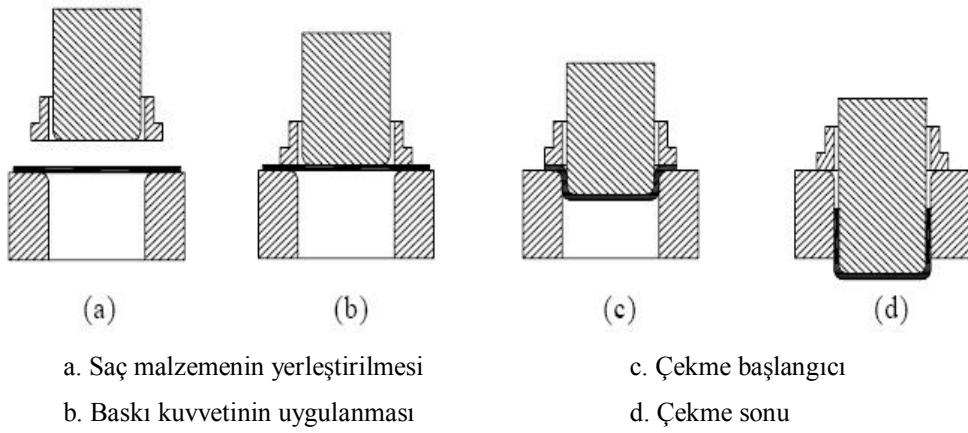
Derin çekmede karakteristik üçgenleri meydana getiren fazla malzeme katlanmalara neden olabilir. Bu katlanmalara engel olmak için baskı yastığı kullanılır. (Şekil 3.25) Bu şekilde derin çekme prosesinin dört ayrı kademesi görülmektedir.

- “D” çapındaki sac malzeme kalıp üzerine yerleştirilmiş durumda;
- Baskı yastığı ve zımbanın aşağı hareketi. Baskı yastığı zımbadan önce saca temas ederek onu kalıp üzerine bastırır;
- Zımba sacı kalıp deliğine iter;
- Derin çekme tamamlandıktan sonra zımba ve baskı yastığı yukarı çıkar. Elde edilen kutu pres tablasının deliğinden aşağı düşer.



Şekil 3.24 Çekme prosesi [61].

Baskı yastığı, sac malzemeyi radyal doğrultuda akmaya zorlayarak katlanmalara neden olur. Pratikte, $D/d > 21/20$ olduğu takdirde baskı yastığı kullanılır. $D/d < 21/20$ olduğunda ise karakteristik üçgenleri meydana getiren malzeme miktarı az olduğundan proses baskı yastığı kullanılmadan ve katlanmalar meydana gelmeden yapılabilir [85].



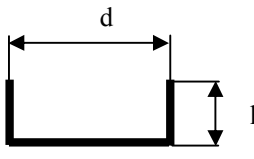
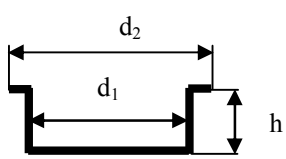
Şekil 3.25 Baskı plakalı çekme prosesinin oluşumu [61,112,113].

3.5.1 Örnek Çapının Hesaplanması

Derin çekme sırasında sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse, derin çekilerek elde edilen kabın yüzeyi “A” ile, çekilecek sacın yüzeyi “A₁” eşit olmalıdır. Dolayısıyla,

çekilecek sacın çapı “D” ile gösterilirse; “ $A_1=\pi D^2/4=A$ ”. Burdan; “ $D=\sqrt{4A/\pi}$ ” bulunur. Derin çekme ile elde edilecek kutu, elemanlara ayrılarak bu elemanların yüzeylerinin toplamı “ $\sum A$ ” ile gösterilirse, çekilecek sac çapının “ $D=\sqrt{\sum 4A/\pi}$ ” şeklinde hesaplanması en uygun yoldur [85]. Çeşitli kutu şekilleri için “D” değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Çekilecek sac çapının hesaplanması için formüller [85].

Kutu Şekli	Çekilecek Sac Çapı
	$\sqrt{d^2+4dh}$
	$\sqrt{d_2^2+4d_1h}$

3.5.2 Çekme Kademelerinin Tespiti

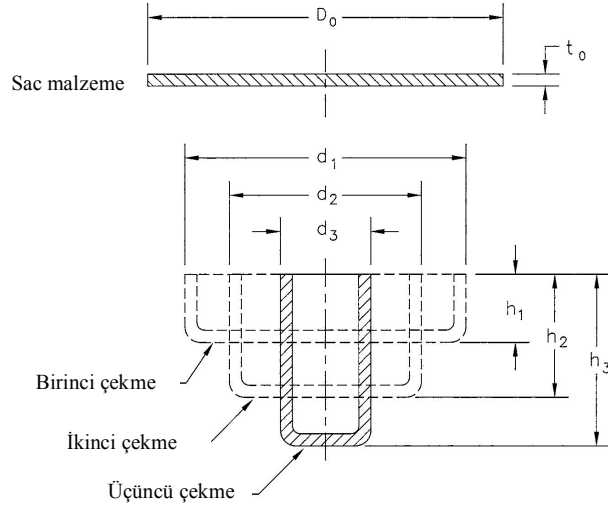
Derin çekme sırasında sac pekleşir. Pekleşme ise derin çekmede kutu yüksekliğini sınırlayan bir faktördür [85]. Diğer bir deyimle, derin kutular bir prosesde çekilemezler. Sünek metaller derin çekmeye en uygun olanlardır.

İlk kademede elde edilecek kutunun iç çapı “ d_1 ”, çekilecek sac çapı “D” ise; “ $d_1=m_1D$ ” ve ikinci ve daha sonraki kademeler için kutu çapı, “ $d_n=m_n d_{n-1}$ ” olarak hesaplanır. Kademelendirme sayısı olarak adlandırılan “m” değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3 Çeşitli malzemeler için kademelendirme sayıları [85].

Malzeme	Baskı yastıklı çekme		Baskı yastıksız çekme
	m_1	m_n	$m_1=m_n$
Çelik sac (kalınlık<2 mm)	0,56	0,80	0,90...0,93
Çelik sac (kalınlık>2 mm)	0,56	0,83	0,90...0,93
Prinç, bakır, gümüş (kalınlık<2 mm)	0,50	0,75	0,90...0,93
Prinç, bakır, gümüş (kalınlık>2 mm)	0,52	0,75	0,90...0,93
Çinko	0,75	0,91	0,90...0,93
Alüminyum (kalınlık<2 mm)	0,55	0,80	0,90...0,93
Alüminyum (kalınlık>2 mm)	0,55	0,83	0,90...0,93
Paslanmaz Çelik	0,60	0,80	0,90...0,93

Şekil 3.26’da ise silindirik bir kutunun ikinci ve/veya daha sonraki bir kademede derin çekilmesiyle ilgili örnek görülmektedir.



Şekil 3.26 Silindirik bir kabın kademeli derin çekilmesi [111].

3.5.3 Zımba İle Kalıp Arasındaki Boşluk (Çekme Aralığı)

Çekme aralığı için aşağıdaki deneye dayalı denklemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir:

Çelik için	$w=t+0,07\sqrt{10t}$
Alüminyum için	$w=t+0,02\sqrt{10t}$
Isıya dayanıklı alaşımlar için	$w=t+0,20\sqrt{10t}$
Diğer demir dışı malzemeler için	$w=t+0,04\sqrt{10t}$

Burada;

t: Deney malzemesinin kalınlığı,

w: Zımba ve kalıp arasındaki boşluk miktarıdır (saç malzeme dahil) [85].

3.5.4 Kalıp Kenarının (Çekme Kenarının) Yuvarlatılması

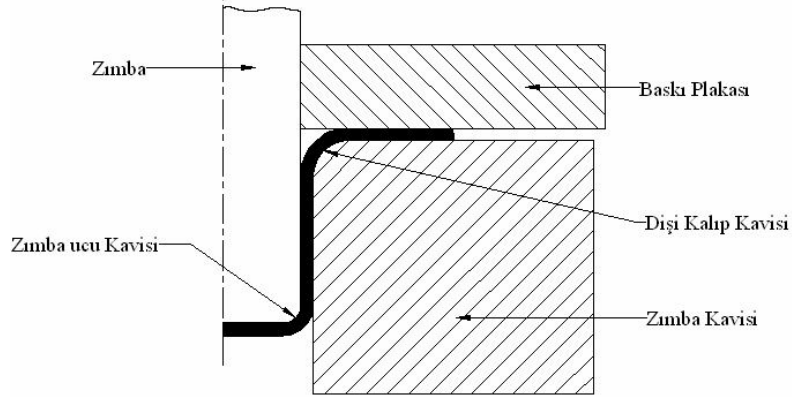
Bir derin çekme takımından iyi sonuç alınmasında çekme kenarı (dişi kalıp) yuvarlatmasının büyük etkisi vardır (Şekil 3.27).

Çelik için, birinci kademede “ $r=0,8\sqrt{(D-d)t}$ ” alınmalıdır. Alüminyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri daha düşük olduğundan, “r” değeri çeliğe kıyasla % 10 kadar büyük alınır: “ $r=0,9\sqrt{(D-d)t}$ ”. İkinci ve daha sonraki kademelerde ise çekme kenarı yuvarlatma yarıçapı “ $r_n=(d_{n-1}-d_n)/2$ ” alınır [85].

3.5.5 Zımba Kenarının Yuvarlatılması

Sacın zımba tarafından delinmemesi için zımba kenarı uygun şekilde yuvarlatılmalıdır (Şekil 3.27).

Saç kalınlığına bağlı olarak “ $5t < R < 10t$ ”, ıstampa çapına bağlı olarak da “ $R=(0,1 \dots 0,3)d$ ” alınabilir [85].



Şekil 3.27 Zimba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi [61].

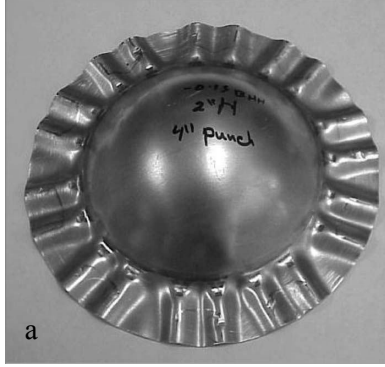
3.5.6 Baskı Yastığı Kuvveti

Çeşitli malzemeler için baskı yastığı basıncı Tablo 3.4’te verilmiştir. Baskı yastığı kuvveti ise; baskı yastığı basıncının, sacı baskı yastığı arasındaki temas alanının çarpımıdır. Dolayısıyla birinci kademe için baskı yastığı kuvveti; “ $F_p = \pi/4(D^2 - d^2)p$ ” denkleminde hesaplanır.

Tablo 3.4 Çeşitli malzemeler için baskı yastığı basıncı [85].

Malzeme	p (MPa)
Alüminyum	1...1,2
Çinko	1,2...1,5
Düralümin	1,5...1,6
Paslanmaz Çelik	2
Pirinç	2
Çelik	2,5
Kalay	3

Baskı yastığı kuvvetinin yetersiz olması halinde kırışmalara engel olunamayacağı açıktır (Şekil 3.28.a). Gereğinden büyük baskı yastığı kuvveti ise kırılmaya neden olur (Şekil 3.28.b).



Şekil 3.28 a.Kısmen derin çekilmiş bir kutuda, baskı yastığı kuvvetinin yetersizliği nedeniyle, flanşta kırışma oluşumu [26], b.Baskı yastığı kuvvetinin gereğinden büyük olması nedeniyle derin çekilme sırasında kutunun kırılması [107].

3.5.7 Çekme Kuvveti ve İşi

Derin çekme sırasında zımbanın uyguladığı maksimum kuvvet, birinci kademe için “ $F_d = \pi d t \sigma_c m$ ” denklemleriyle hesaplanır. Bu ifadede, “d” istampa çapı, “t” saç kalınlığı, “ σ_c ” saçın çekme dayanımı, “m” ise d/D oranına bağlı bir katsayıdır (Tablo 3.5).

Tablo 3.5 Derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında “d/D” oranına bağlı olarak “m” değerleri [85].

d/D	0,55	0,575	0,60	0,625	0,65	0,675	0,70	0,725	0,75	0,775	0,80
m	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40

İkinci ve daha sonraki kademelerde çekme kuvveti birinci kademe için hesaplanan değer 5/4 katı alınır. Çekme işi ise çift tesirli preste; “ $W = x F_d h$ ”, tek tesirli preste; “ $W = (x F_d + F_p) h$ ” denklemleri ile hesaplanır. Bu denklemlerde “h” çekme derinliği, “x” çekme kuvvetinin kurs sırasındaki değişimini göz önüne alan bir katsayıdır (Tablo 3.6).

Tablo 3.6 Derin çekme işinin hesaplanmasında “x” değerleri [85].

d/D	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
x	0,80	0,77	0,74	0,70	0,67	0,64

3.6 SEY ile Sayısal Analiz

AUTOFORM, kullanımı kolay, hassasiyeti yüksek ve çok hızlı sonuç veren bir sac şekillendirme simülasyonu ve çevre yüzeyle geliştirme yazılımıdır.

AUTOFORM, sac metal şekillendirme ve kalıp yapım endüstrileri için yazılım çözümleri içermektedir. AUTOFORM'un kullanımı, planlamadaki güvenilirliği artırır, kalıp deneme sayısı ve alıştırma zamanlarını azaltır, sonuçta güvenle üretilebilen en kaliteli parça imalatını ve kalıp tasarımlarının oluşmasını sağlar. Bunların yanında, üretimde preslerin boşa geçirdikleri zaman ve parçaların red oranları önemli ölçüde azalır.

Uygulama tecrübesine, endüstriyel bilgiye ve sac metal şekillendirme uzmanlığına dayanan AUTOFORM çözümleri, prosesin her aşamasını incelemek, analiz etmek ve optimize etmek için özel fonksiyonları bulunan entegre ve komple bir çözümdür.

AUTOFORM çözümleri sac metal şekillendirme prosesinin tamamını kapsar. İstenirse modüller tek tek kullanılabilirken, istenirse komple çözüm paketinden yararlanılabilir [114].

3.6.1 Doğruluk, Hız ve Maliyet

AUTOFORM yazılımı, doğru sonuçları, kısa süren hesaplama zamanları ile kullanımı çok pratik olan dizayn, mühendislik ve imalat ortamlarında güvenilir kullanım için hazırlanmış arayüzüyle bilinmektedir. Doğruluk, hız ve kullanım kolaylığının toplamı büyük maliyet ve zaman kazancı sağlamıştır.

AUTOFORM, aşağıdaki guruplar için en uygun yazılım seçimidir;

1. Ürün tasarımcıları,
2. Sac metal şekillendirme mühendisleri,
3. Derin çekme uzmanları,
4. Proses/Metot uzmanları,

5. Takımlama, sac parça ve imalat mühendisleri

AUTOFORM yazılımı, özel bir donanım gerektirmez ve standart bir bilgisayarda çalışmak üzere optimize edilmiştir. Bilinen tüm hesaplama platformlarında çalışır (UNIX, Windows ve Linux). Bütün önemli bilgisayar destekli sistemlerle uyumludur, farklı bölüm ve fonksiyonlardaki kişiler tarafından kolayca kullanılır. Kullanıcılar, çok hızlı bir eğitimle AUTOFORM yazılımında verimli hale gelirler. AUTOFORM yazılımı, var olan iş akışlarını yeni herhangi bir darboğaz oluşturmadan sorunsuz tamamlamak üzere dizayn edilmiştir.

3.6.2 AUTOFORM Modülleri

AUTOFORM yazılımı birden çok modülden oluşmuştur. Her modül farklı bir sac malzeme şekillendirme prosesini kapsamaktadır. Aşağıda AUTOFORM modüllerinden iki tanesi açıklanmıştır [114].

3.6.2.1 AUTOFORM One Step Solver

Kalıp yüzeyleri hazırlanmış son yüzey datasını kullanıp tersten açınımına geçerek, tek (zaman) adımda hızlı bir şekilde çözümünün yapılmasını sağlar. Sac şekillendirme doğrusal olmayan bir süreç olduğundan ve proses sırasında bizzat olayın birbirini etkileyen değişkenleri değiştiğinden, bu tarz çözümün doğruluk derecesi % 60-70 civarındadır. Daha çok fizibilite çalışmaları için önerilir. Sac parçanın tasarımında son karar verilmeden önce ve imalat prosesinin ilk aşamalarında fikir almak için kullanılır. One Step Solver çözücü;

1. Dakikalar içinde yüzey datasının sac kalıpcılığında imal edilebilirliğini kontrol edebilir.
2. Kalıp çalışması yapılmış bir parçanın kaba çekme simülasyonunu yapabilir.
3. Açınım bulur.
4. Minimum pres baskı kuvvetini bulur.

3.6.2.2 AUTOFORM Incremental Solver

Kalıp içerisinde sacın hareketi küçük zaman adımları ile çözülürken her zaman adımında pekleşme (stress hardening), sac geometrisinin o andaki durumu ve etkileri (örn. baskı yastığı üzerindeki alan), incelmeler, kırışmalar (malzeme yığılması) gibi birbirini etkileyen değişkenler dikkate alınmakta ve bir sonraki adımda kullanılmaktadır. Zamanda entegrasyon alınırken olayın nonlineerliği küçük zaman adımları sayesinde simülasyon edilebilmektedir. Çıkan sonuçlar, gerçek hayattaki sonuçla % 95 civarında bir doğrulukla uyum sağlamaktadır. Bu tip bir çözüm kullanıldığında pratik hayatta yapılan kalıp, istenilen kaliteyi sağlayacak, gereksiz maliyetlerden ve zaman kayıplarından kurtulmayı mümkün kılacaktır. AUTOFORM Incremental Solver çekme kalıplarında;

1. Sacın ağırlığını (gravite) dikkate alarak parçanın durumunu simülasyon yapar.
2. Dişi kalıp ile baskı yastığının teması durumunda parçanın simülasyonunu yapar.
3. İlk zımba temasındaki büyük kırışmaların simülasyonu yapar.
4. Sac parça üzerinde oluşabilecek incelme, kırışma, kırılma ve çekme sınırlarını ayrıntılı olarak gösterir.

Diğer operasyonlarda;

1. Kesme, bükme ve ütüleme simülasyonlarını yapar.
2. Trim modülüyle beraber optimum kırpma hattını verir.
3. Geri yaylanma (springback) etkilerinin hesaplanmasını sağlar [114].

Doğruluk oranının % 95 olması, bir önceki basamakta hesaplanan değerlerin bir sonraki basamakta kullanılması sebebiyle, deneysel çalışmaların SEY ile analizi, AUTOFORM yazılımının "Incremental Solver" modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

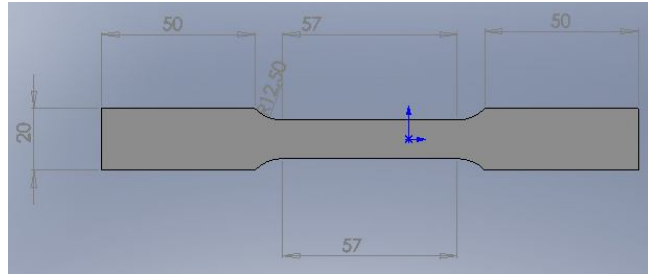
4. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar, “DC04 deney örneğinin mekanik özelliklerinin tespiti ve ŞSD’nın çizilmesi”, “hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme”, “SEY ile analiz” dir.

4.1 DC04 Deney Örneğinin Mekanik Özelliklerinin Tespiti ve ŞSD’nın Çizimi

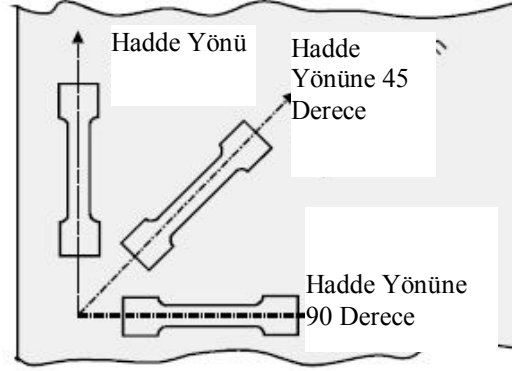
4.1.1 Mekanik Özelliklerin Tespiti

Deneysel olarak, sac malzemenin mekanik özelliklerini tespit edilebilmek için, standart çekme deney örneği kullanılmıştır. Örnekler ASTM E8M standartlarına göre hazırlanmıştır (Şekil 4.1) [102].



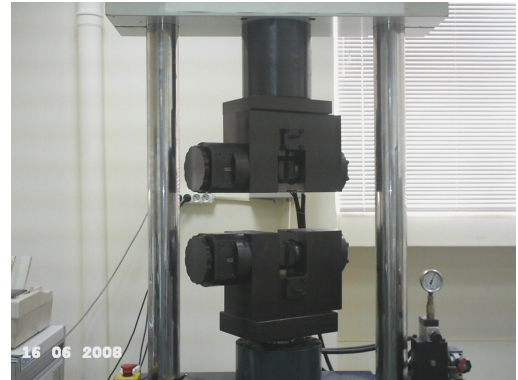
Şekil 4.1. Çekme deneyinde kullanılan örneğin boyutları.

Bu deney örneği, anizotropik özelliklerin tespit edilebilmesi için sac levhalardan hadde yönüne göre üç farklı açıda kesilmiştir. Literatür [99], kesme işleminin su jeti ile yapılması gerektiğine, kesme esnasında kesme sınırındaki ısının malzemenin özelliklerine etki yapmaması gerektiğine vurgu yapmaktadır. Deney örnekleri Şekil 4.2’de görüldüğü gibi hadde yönüne göre üç farklı doğrultuda kesilmiştir.



Şekil 4.2 Örneklerin hazırlanması [95].

Hadde yönüne göre üç farklı açıda hazırlanmış olan deney örnekleri 3 mm/dk. şekil değiştirme hızıyla, Dartec marka çekme deneyi cihazında test edilmiştir. Kopma uzaması değerlerini tespit edebilmek için, standart deney örneği üzerine 25 mm aralıklarla işaretleme yapılmış ve bu noktalardan uzama değerleri ölçülmüştür. Bütün deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi makinesinin alet kurulum sistemi Şekil 4.3’de görülmektedir. Sac malzemenin “n” ve “K” değerlerini tespit edebilmek için 25 mm’lik extensometre kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Dartec marka çekme deneyi cihazı.

Dikine anizotropi veya ortalama plastik uzama oranı “ \bar{R} ” ve düzlemsel anizotropi “ ΔR ”, hadde yönüne göre üç farklı dorultuda hazırlanmış olan örneklerden elde edilen

“R” değerinden (genişlik uzamasının kalınlık uzamasına oranından elde edilen plastik uzama oranı) (3.15) ve (3.16) nolu eşitlik ile hesaplanarak elde edilmiştir [4,10].

Hadde yönüne göre üç farklı doğrultudan elde edilen değerlerin ortalama değerleri ise (4.1) nolu eşitlik ile hesaplanmıştır. (4.1) nolu eşitlikte “X” değişkeni, Akma Mukavemeti, Mukavemet Katsayısı, Kopma Uzaması ve Şekil Değiştirme Sertleşmesi Üssünü ifade etmektedir [4,10,12].

$$Ortalama = (X_0 + 2X_{45} + X_{90}) / 4 \quad (4.1)$$

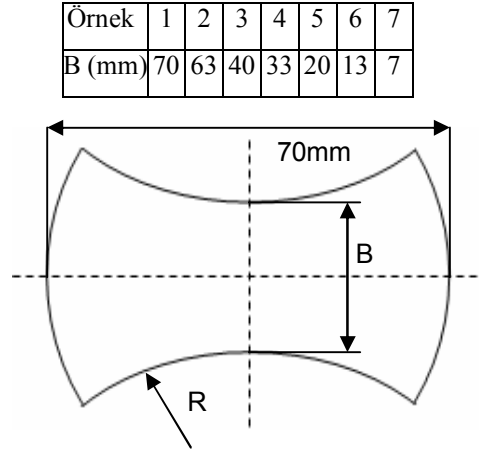
Şekil değiştirme sertleşmesi üssü “n” ve dayanım katsayısı “K”, “ $\sigma_g = K \epsilon_g^n$ ” Holloman eşitliğinden hesaplanmıştır. Literatürde alüminyum ve çelik sacların “n” ve “K” değerlerinin hesaplanmasında aynı denklem kullanılmıştır (Burada “ σ_g ” gerçek gerilmeyi, “ ϵ_g ” gerçek uzamayı ifade etmektedir) [4,7,10,12,79,102,115].

4.1.2 ŞSD’nin Çizimi

Bir sac malzemenin ŞSD’nı çizebilmek için, malzemenin farklı şartlarda (çekme-çekme, düzlem uzama ve çekme-basma) şekillendirilmelerine ihtiyaç vardır. Bu sebeple malzemenin farklı şartlarda şekil değişimine uğratılabilmesi için, farklı şekillerde ve ölçülerde deney örneklerinin hazırlanmasına gereksinim vardır. Burada önemli olan, sac malzemenin üç farklı tarzda şekil değiştirmesine sebep olabilecek deney ortamını hazırlayabilmektir. ŞSD’nın elde edilmesinde kesin olarak belirlenmiş ve tanımlanmış deneyler bulunmamaktadır. Daha önce açıklanmış olan Nakajima, Marciniak Testi veya Erichsen, Olsen Testleri yardımıyla bu şekil değişimlerinin malzemede oluşturulması sağlanır.

Birçok bilim adamı, birçok farklı deney şartlarını kullanarak, ŞSD’nın farklı bölgeleri üzerinde sac malzemenin plastik şekil değiştirme özelliklerini ortaya koyacak ŞSD’ları üzerine çalışmışlardır. Çekme deneyi örneği ile derin çekme şartlarında, çentikli

çekme deneyi örneği ile düzlem uzama şartlarında, Erichsen deney örneği ile derin çekme ve gererek şekillendirme şartlarında sac malzemede meydana gelebilecek plastik şekil değişimlerinin ŞSD'na aktarılması hedeflenir. Bu örnekler Şekil 4.1, 4.4 ve 4.5'de görülmektedir. DC04 sac malzemenin ŞSD'nın çıkartılması için, bu üç farklı örnek modeli hazırlanmıştır.

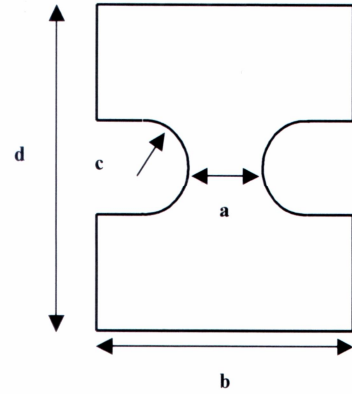


Şekil 4.4 Erichsen deney örneği boyutları [99].

Erichsen deneyi için literatürde geçen [99], 67 mm standart daire şeklinde kesilmiş örnekler (Şekil 4.4) kullanılmıştır. Hadde yönüne göre farklı doğrultulardaki örneklerden elde edilen Erichsen yükseklik değeri ve yüksekliğin ölçüldüğü andaki yük (4.1) nolu eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır.

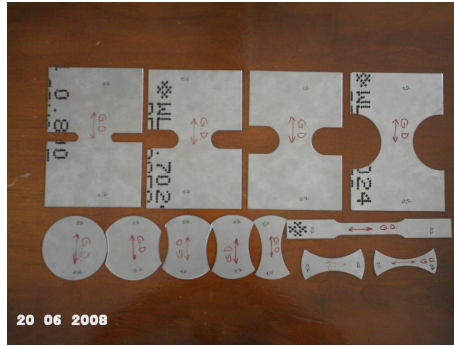
Bu örnekler ile, sac malzemede, yukarıda bahsi geçen farklı şartlardaki şekil değiştirme prosesinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Deney örnekleri Şekil 4.2'de görüldüğü gibi belirli kalınlıktaki sac malzemelerden hadde yönüne göre üç farklı doğrultuda ve en az üç seri olacak şekilde hazırlanmıştır. Böylece ölçümlere karışabilecek hatalar en aza indirilmiştir. Hazırlanan örnekler Şekil 4.6'da görülmektedir.

	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)
Örnek 1	34	100	5	150
Örnek 2	34	100	10	150
Örnek 3	34	100	15	150
Örnek 4	34	100	30	150



Şekil 4.5 Çentikli deney örneği [99].

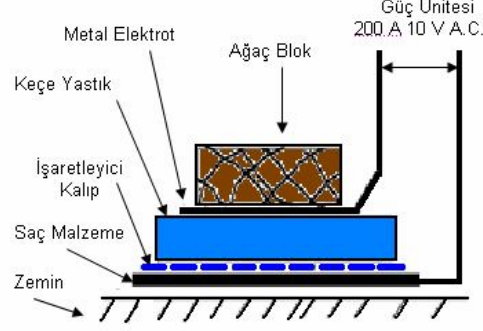
Sac malzemelerin levhalardan kesilmesi esnasında, malzemede oluşabilecek değişimleri önlemek için, kesme işleminin su jeti ile yapılması tavsiye edilmektedir.



Şekil 4.6 ŞSD elde edebilmek için hazırlanmış deney örnekleri.

Örnekler üzerindeki şekil değiştirme miktarlarını görebilmek için, hazırlanan $D_0=5$ mm'lik daireler elektrokimyasal olarak, Şekil 4.7'de gösterilen yöntem ile sac malzemeye dağlama yapılarak oluşturulmuştur. Söz konusu elektrokimyasal yöntemde $20 \mu\text{m}$ dağlama derinlikleri oluşabilmektedir. Dağlama işleminden sonra oksidasyonu önlemek için malzeme nötraltit çözeltiye alınmıştır [116]. Zaman zaman, dağlama yönteminin sac malzeme üzerindeki daireleri tam olarak işaretleyememesi gibi problemler yaşanmıştır. Bu sebeple daireler, sac malzeme yüzeyine lazer işaretleme yöntemi ile de çizilmiştir. Lazer işaretlemenin malzemeye zarar verip vermediği ise, deney sonucunda oluşacak kırılmaların, işaretlenmiş dairelerin ortalarından geçip geçmediğinin

belirlenmesiyle anlaşılabilir. Zira kırılmalar; işaretlenmiş dairelerin tam ortasından geçmiyor, işaretleri belirten çizgileri takip ediyor ise lazer işaretleme malzemeye önceden zarar vermiş demektir.

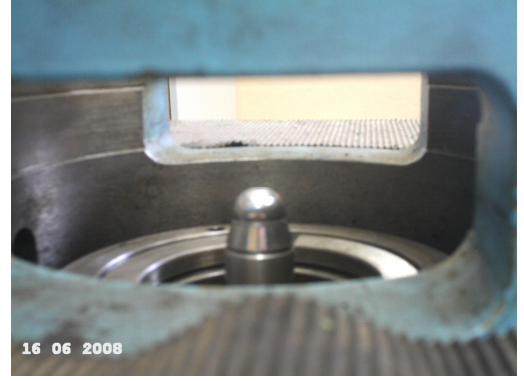


Şekil 4.7 Elektrokimyasal yöntem [98].

Literatürde örnekler üzerine $D_0=1$ mm ile $D_0=5$ mm arasındaki daire modellerinin elektrokimyasal, lazer veya printer ile işaretlendiği uygulamalar mevcuttur [14,67]. Dairelerin işaretlenmesinde hem elektrokimyasal hem de lazer ile işaretleme kullanılabilir.

0,9 mm kalınlığındaki DC04 deney malzemesinin ŞSD'nı elde edebilmek için, Şekil 4.1'de görülen çekme çubuğu, çekme deneyi makinesinde 3 mm/s hızla şekil değiştirme işlemine tabii tutulmuştur. Şekil 4.5'de görülen çentikli çekme örneği ise aynı makinede serbest şekil değiştirme hızında (makinenin kendi standartlarında) şekil değiştirmeye tabii tutulmuştur. Şekil değiştirme işlemi malzemede kopma gerçekleşinceye kadar devam etmiştir.

Şekil 4.4'de görülen Erichsen deney örneği ise, Erichsen test makinesinde baskı yastığı-kalıp arasına yerleştirilerek 1 mm/s hızda şekil değiştirmeye tabii tutulmuştur. Erichsen deney makinesi Şekil 4.8'de görülmektedir. Çatlak oluşumunda şekil değiştirme işlemi durdurulmuştur. Burada önemli bir husus şekillendirme esnasında uygulanan baskı yastığı kuvvetinin değeridir. Düşük baskı yastığı kuvvetlerinde sac malzemenin kalıp içerisine çekildiği görülmüştür.

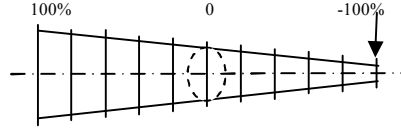


Şekil 4.8 Erichsen deney makinesi ve küresel zımba.

Marciniak testinde kullanılan yarı küresel silindirik zımba ucu ile 304 paslanmaz çelik şekil değişimine uğratılarak malzeme sınırları üzerine çalışılmış [117] kaynaklar gözlenmektedir. 75 mm zımba çapı ve 200 kN baskı yastığı kuvveti ile 200x200 mm'den 200x60 mm ebatlarına doğru değişen malzeme genişlikleri kullanılmıştır. Farklı genişliklerin kullanılması farklı uzama yolları elde etmek içindir. Yarı küresel zımba kullanılarak farklı malzemeler ile ilgili çalışmalar [9,118] bulunmaktadır.

Çekme deneyi, çentikli çekme deneyi ve Erichsen deney örneklerinin şekil değiştirmesinden sonra, daha önce sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerdeki uzama miktarlarının ölçülmesine geçilmiştir.

Çekme, çentikli çekme ve Erichsen deney örneklerindeki şekil değiştirmeler ölçülerek, elde edilen uzama değerleri $\dot{\epsilon}$ SSD'na aktarılmıştır. Bu proses esnasında iki daire ölçülmüştür. Bu dairelerden birisi çatlağa en yakın olan bütün tam dairedir [118]. Bu daire sınır diyagramında kırılma eğrisini vermektedir. İkinci ölçülen daire ise, ilk ölçülen tam daireye en yakın dairedir. Bu ölçü ise boğumlanma başlangıcını vermektedir. Sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerdeki şekil değişimlerinin ölçümleri "Mylar Bandı" ile gerçekleştirilmiştir. Bu band Şekil 4.9'da görülmektedir. Mylar bandında zaman zaman ölçme hataları gözlenmektedir. Literatür [67] benzer şekilde, Mylar bandında ölçme hatalarına rastlanacağına işaret etmektedir.



Şekil 4.9 Mylar bandı [98].

Mylar bandı ile gerçekleştirilen ölçümlerin ŞSD'na aktarılmasından sonra bu ölçümleri en iyi ifade eden eğrinin belirlenmesi işlemi yapılmıştır. Literatürde ölçüm noktalarını en iyi ifade eden eğrinin iki şekilde tanımlandığı görülür. Bir tanesi tüm ölçüm noktalarının en altından geçen eğri, diğeri ise ölçüm noktalarını en iyi temsil eden eğridir. Boğumlanma ve kırılma sınır eğrilerini belirlenmesi için, ikinci dereceden fonksiyon kullanılarak en iyi temsil eden polinom eğrileri çizilmiştir. Benzer eğri çizimleri literatürde [95] kullanılmaktadır.

Bazı çalışmalar da; örneklerdeki şekil değişiklikleri “yüksek çözünürlüklü kameralar” ile kayda alınmaktadır. Böylece, boğumlanma ve kırılma noktaları daha hassas olarak ölçülebilmektedir. Hassas şekil değiştirme miktarlarının ölçülmesiyle deney örneklerine ait ŞSD kolaylıkla çıkarılabilmektedir. Bu şekilde ölçümlerin en önemli avantajı; çatlak oluşumunun ve boğumlanmanın başladığı anın tespit edilebilmesidir. Kamera çözünürlüklerinin yüksek olması hassas ölçüm sağlamada önemli bir etkidir [14,119]. Deneysel çalışmada, Mylar Bandı ile ölçüm yapılmış, kamera sistemi kullanılmamıştır.

4.2 Hidromekanik Derin Çekme ve Geleneksel Derin Çekme

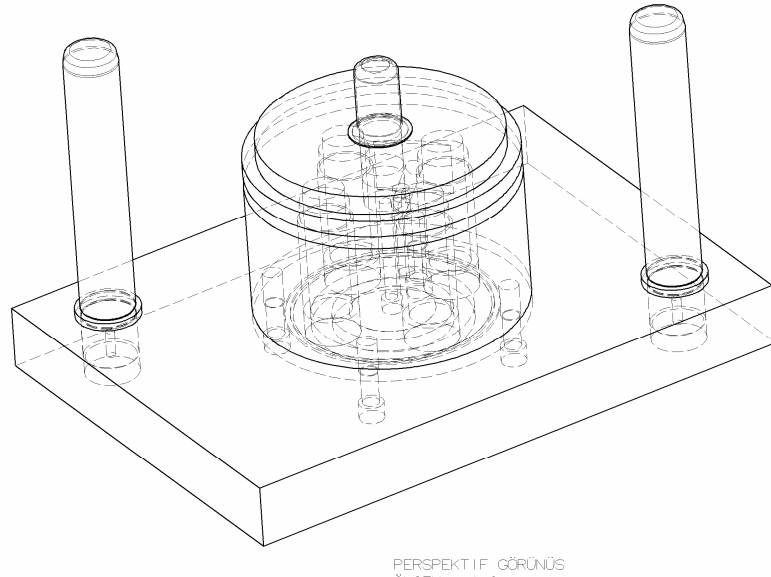
4.2.1 Çekme Kalıplarının Tasarımı

Hidromekanik ve geleneksel derin çekme deneysel çalışmaları aynı kalıp sisteminde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, literatürdeki hidromekanik derin çekme uygulamaları incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak kalıp sistemi literatür göz

önüne alınarak tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında ilk göz önüne alınan husus, mevcut hidrolik preslerde kalıp sisteminin kullanılabilir olmasıdır [120]. Bu kapsamda, öncelikle hidromekanik derin çekme yapabilecek pres tespit edilmiştir. Bunun için, çift etkili, 150 tonluk “Bursa Pres” marka hidrolik pres, hidromekanik derin çekme için uygun bir pres olmuştur. Çift etkili hidrolik presin üst gurubuna deney düzeneğinin zımbası bağlanmıştır. Alt guruba ise sıvı haznesi veya diğer bir isimle dişi kalıp bağlanmıştır. Üst gurupta bulunan baskı yastığı basıncı, presin baskı yastıklarından elde edilmiştir. Hazneye sıvı doldurma işlemi ise manuel gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak hidrolik pres belirlendikten sonra, kalıp sisteminin şartlarının belirlenmesine ve tasarımına geçilmiştir. Kalıp tasarımında “Catia V.5R.18” yazılımı kullanılmıştır.

4.2.1.1 Zimba Çapı

Literatürde silindirik malzemelerin hidromekanik derin çekilmesinde farklı zimba çapları kullanılmıştır. Hidromekanik derin çekmede silindirik geometriler haricinde çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. 60 mm çaptan daha yukarılara doğru çaplarda deneysel çalışmalar yapılmıştır.

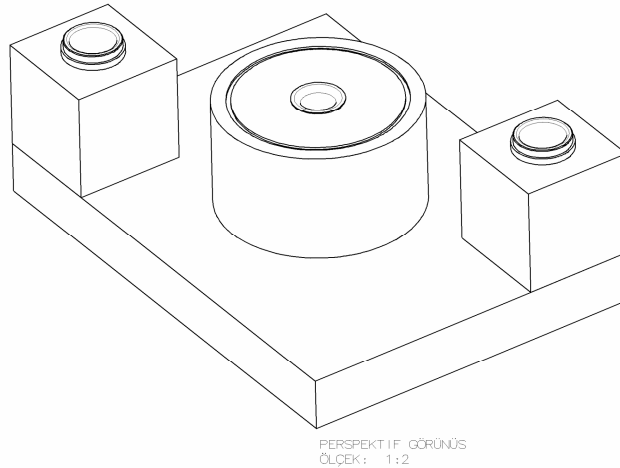


Şekil 4.10 Zimba ve üst gurup.

Deneysel çalışmada, zımba çapı 30 mm olarak kullanılmıştır. Zıt kuvvetlerin artmaması ve büyük tonajlı pres ihtiyacı oluşmaması için zımba çapı küçük tutulmuştur. Zımba yüzeyi mümkün oldukça pürüzlü bırakılmıştır. Hidromekanik derin çekmede sac malzeme ile zımba arasındaki sürtünme kuvvetinin büyük olması istenmektedir. Bu sebeple, zımba tornada imal edildikten sonra yüzey parlatma işlemine tabii tutulmamıştır. Deneysel çalışmalar esnasında şekil değişimine uğramaması için ısıl işleme tabii tutulmuştur. Zımba üst gurup ile birlikte Şekil 4.10'da görülmektedir.

4.2.1.2 Dişi Kalıp Çapı ve Kalıp Boşluğu

Sac malzemeye şeklini verecek, hem hidromekanik derin çekmede, hem de geleneksel derin çekmede kullanılabilecek dişi kalıp tasarımı, olması gereken kalıp boşlukları dikkate alınarak tasarlanmıştır. Literatüre göre, haznedeki sıvı, kalıbın yan duvarlarında hareket edebilmeli ve şekillendirme esnasında sac malzemeye basınç uygulayabilmelidir. Aynı zamanda dişi kalıp radyüsünde sac malzemeyi omuzlayabilmelidir. Bu kapsamda, 0,9 mm kalınlığındaki DC04 sac malzeme için, tek taraflı 0,2 mm boşluk verilerek dişi kalıp çapı 32,20 mm olarak belirlenmiştir. Bu değer, literatüre de uygundur [43,45]. Dişi kalıp ve alt gurup şekil 4.11'de görülmektedir. Deneysel çalışma esnasında kalıpların zarar görmemesi için ısıl işlem uygulaması yapılmıştır.



Şekil 4.11 Dişi kalıp ve alt gurup.

4.2.1.3 Kalıp Radyüsleri

Kalıp radyüsünün küçük olması aşırı bükme etkisinden dolayı çekme kuvvetinin artmasına, sac malzemenin incelmeye ve hatta kırılmasına neden olmaktadır. Radyüs çok büyük olursa çekme kuvveti düşecektir. İdeal değer “6-9t” arasında bulunmuştur. Zımba radyüsü incelendiğinde, oldukça düşük değerlerde kullanmak hidrolik şekillendirmede mümkün olmaktadır [76]. Bu kapsamda zımba ve kalıp radyüsü, 0,9 mm’lik sac malzeme için 5 mm olarak alınmıştır.

4.2.1.4 Çekme Derinliği

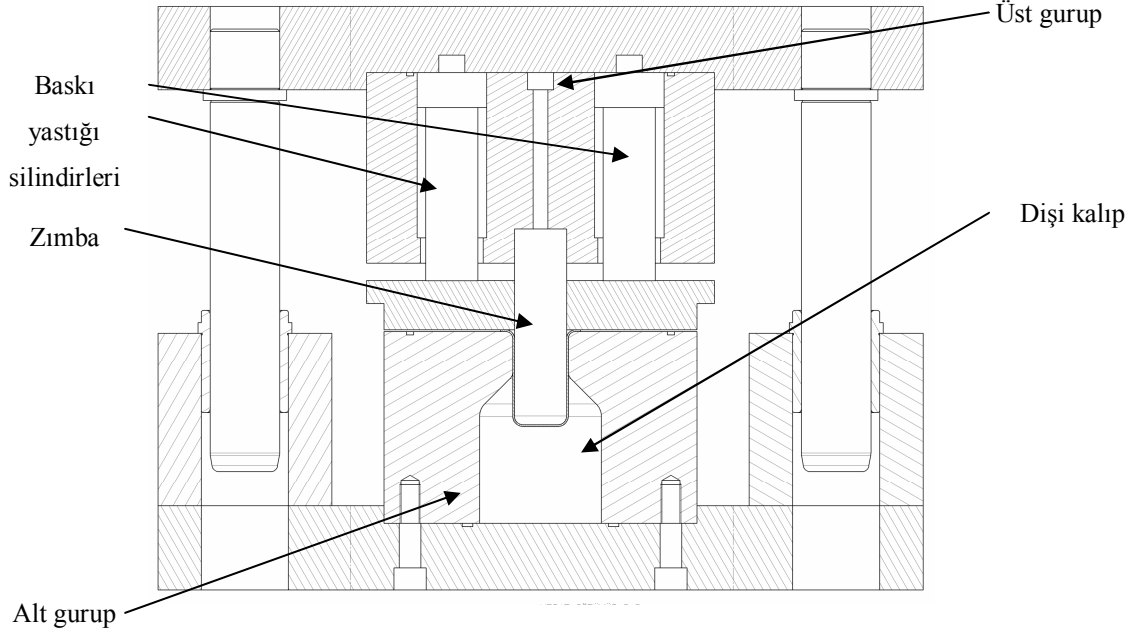
Kullanılacak deney düzeneğinin çekebileceği maksimum çekme derinliği geleneksel derin çekme hesaplamalarına göre yapılmıştır. Hidromekanik derin çekme yönteminde 2,8 derin çekme oranlarına ulaşmak mümkündür. Bu kapsamda, “d=30 mm”lik zımba çapı için, “D=30x2,8=84 mm” maksimum ham malzeme çapına ihtiyaç olacaktır. Bu iki veri üzerinden ve Tablo 3.1’deki “ $D_{max}=\sqrt{d^2+4dh}$ ” hesaplama formülü kullanılarak ulaşılabilecek maksimum çekme derinliği “h=51,3 mm” olacaktır. Tasarımda, zımba kursu, bu derinliği oluşturacak şekilde belirlenmiştir. Enerji kullanımını en aza indirmek için hidromekanik derin çekmede mümkün oldukça en kısa kurs kullanılmalıdır [120]. Tasarımda, kurs mümkün oldukça kısa tutulmuştur.

4.2.1.5 Baskı Yastığı

Hidromekanik derin çekme prosesinin geleneksel hidrolik preslerde kullanılabilmesi ve dışarıdan ilave ekipman gerektirmeksizin deneylerin yapılabilmesi için, özgün bir tasarıma gidilmiştir.

Baskı yastığı kuvvetini oluşturacak düzeneği, üst gurup içerisine monte edilmiştir. Baskı yastığı üst gurup ile beraber hareket edebilir durumdadır. Üst gurubun aşağı hareketi ile baskı yastığı kuvvetini oluşturan hidrolik silindirler üst gurubun içerisine girmekte ve

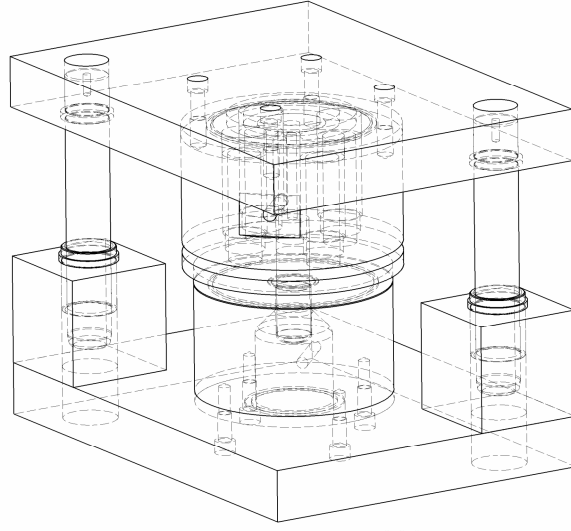
ayarlanmış olan basınç değerinde yeterli baskı yastığı kuvvetini oluşturmaktadır. Başlangıç pozisyonunda, bu silindirlerin pistonları dış pozisyonundadır. Bu amaçla, sac malzeme yüzeyinde eşit baskı kuvveti oluşturabilmek için dört adet piston üst guruba yerleştirilmiştir.



Şekil 4.12 Alt ve üst kalıp gurubun birleşmiş pozisyonu.

Pistonların çapları 40 mm olup, 10 MPa basınç verildiğinde yaklaşık 5 tonluk baskı yastığı kuvveti oluşturabilecek düzeydedir. Pistonların, sac malzeme yüzeyinde baskı kuvveti oluşturabilmesi için, 20 mm kalınlığında bir pleyt, zımbanın dış çapına bağlanmıştır. Bu durum Şekil 4.12’de görülmektedir. Baskı yastığı silindirleri ile pleyt arasında herhangi bir bağlantı söz konusu değildir. Şekil değişimine uğramaması için pleyte de ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Deneysel çalışmalar esnasında, baskı yastığı kuvvetini oluşturacak basınç, hidrolik presin yastık basıncından sağlanmıştır. Basınç, sadece üst gurubu doldurmak ve pistonları dışarıda tutabilmek için kullanılmıştır. Baskı yastığı kuvveti üst gurubun hareketi ile elde edilmiş, yeterli stabil basınca ulaşabilmek için baskı yastığı teması ile zimba teması arasında belirli bir boşluk bırakılmıştır.



Şekil 4.13 Kalıp sistemi montaj halinde.

Üst gruptaki basınç, basınç kontrol valfleri ile ayarlanmış, hassas manometreler ve hidrolik presin dijital basınç ölçme göstergeleri ile gözlenmiştir [12]. Şekil 4.13’de deneysel çalışmalarda kullanılacak kalıp sistemi montaj halinde görülmektedir. Şekil 4.14’de ise hidrolik prese bağlanmış durumda görülmektedir.



Şekil 4.14 Tasarlanmış deney düzeneğinin hidrolik prese montajı.

4.2.1.6 Şekillendirme Sıvısı

Sac malzemeye basınç uygulayacak sıvı seçiminde, su ve yağ göz önüne alınmıştır. Literatürde her ikisi de kullanılmaktadır [53,103]. Deneysel çalışmalar esnasında sıvı olarak, yağ tercih edilmiştir. Kullanılan sac malzeme paslanmaya müsait bir malzeme olduğundan ve mevcut pres sisteminde sıvı haznesini doldurmak için presin kendisi de kullanılabilirdiğinden, yağ tercih edilmiştir. Ayrıca yağ kullanımının, sürtünmeleri azaltma etkisi vardır. Deneysel çalışmada, köpüklenme direnci yüksek “Shell Tellus 46” yağı kullanılmıştır. Shell Tellus 46 yağının “Kinematik Vizkozitesi:40 °C cSt 46”dır. “Yoğunluğu 15 °C’de 0,879 kg/lt”dir. Kullanıcı firma, yağa yönelik olarak, “termal kararlılık” ve “mükemmel havayı üzerinden atma ve köpüğü önleme” üstünlüklerini ileri sürmektedir.

4.2.1.7 Sac Malzemedeki Ağ Oluşturulması

Deneysel çalışmalar esnasında, sac malzemedeki uzama değişimlerini görmek ve bu uzamaları ŞSD üzerine aktarabilmek amacıyla, malzeme yüzeyinde 5 mm’lik dairesel ağlar oluşturulmuştur. Dairesel ağlar bütün sac malzemelere uygulanmamış, her baskı yastığı kuvveti değişiminde belirli oranda denemelere katılmıştır.

4.2.2 Sac Malzeme ve Kalınlığı

Deneysel çalışmalarda sac malzeme olarak, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan, ekstra derin çekmeye uygun, düşük karbon içeren DC04 (Erdemir Kalite Nu. 7114) tercih edilmiştir. Bu sac malzemedeki, yaygın olarak kullanılan ve hidromekanik derin çekmede ihtiyaç duyulacak hazne basınç değerlerini çok yukarıda tutmayacak, 0,9 mm kalınlık tercih edilmiştir. Sac malzemeye ait kimyasal özellikler literatür incelemesinde verilmiştir. Mekanik özellikleri ise, deneysel çalışmalar ile elde edilmiş ve Tablo 5.1’de sunulmuştur.

4.2.3 Deney Değişkenleri

Deneysel çalışma aşamasında 4 deney değişkeni kullanılmıştır. Bunlar; örnek çapı, şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve baskı yastığı kuvvetidir. Değişkenlere ait değerler Tablo 4.1’de verilmiştir. Değişkenlere yönelik inceleme ise aşağıda yapılmıştır.

Tablo 4.1 Deney değişkenleri.

Örnek çapı (mm)	Şekil değiştirme hızı (mm/s)	Hazne basıncı (MPa)	Baskı yastığı kuvveti (N)
Hidromekanik derin çekme			
71	8	30	(0-50000) optimum değer elde edilinceye kadar.
		40	
		50	
	18	30	
		40	
		50	
	28	30	
		40	
		50	
73	8,18,28	30,40,50	
75	8,18,28	30,40,50	
Geleneksel Derin çekme			
65	8	-	(0-10000) optimum değer elde edilinceye kadar.
	18	-	
	28	-	
67	8,18,28	-	
69	8,18,28	-	

4.2.3.1 Örnek Çapı

Hidromekanik derin çekme deneylerinde kullanılmak üzere 71 mm, 73 mm ve 75 mm çaplarında 0,9 mm kalınlığında DC04 sac malzeme kullanılmıştır. Derin çekme prosesinde kullanılmak üzere ise, 65 mm, 67 mm ve 69 mm çaplarında sac malzeme

kullanılmıştır. Çalışılacak malzeme çaplarına AUTOFORM analiz sonuçlarına göre karar verilmiştir. Farklı malzeme çapları, her iki yöntemin çekme oranı sınırlarının bulunmasında kullanılmıştır.

4.2.3.2 Şekil Değişirme Hızı

Hidromekanik derin çekmede ve geleneksel derin çekmede şekil değiştirme hızı çok önemlidir [40,48,53]. Geleneksel derin çekmede maksimum zımba hızının kullanılmasına ihtiyaç vardır. Hidromekanik derin çekme ise, döngü zamanının uzunluğu sebebi ile olumsuzluğa sahiptir. Her iki yöntem de deneysel çalışmalarda kullanılacağından, ortak nokta olarak, mevcut hidrolik presin 8 mm/s, 18 mm/s ve 28 mm/s hızları, deney değişkeni olarak tercih edilmiştir.

4.2.3.3 Hazne Basıncı

Hidromekanik derin çekme prosesinde, hazne basıncı şekillendirme prosesini en fazla etkilenen ve ana unsur olarak göz önüne alınan deney değişkenidir. Düşük basınçlar hidromekanik derin çekme prosesini geleneksel derin çekmeye döndürmekte, yüksek basınçlar ise erken kırılmalara sebep olmaktadır [45,48]. 0,9 mm kalınlığa sahip DC04 sac malzemeyi şekillendirebilecek ortalama hazne basıncı değerleri, 30 MPa, 40 MPa, 50 MPa olarak alınmıştır. Geleneksel derin çekme prosesinde bu değişken göz ardı edilmiştir.

4.2.3.4 Baskı Yastığı Kuvveti

Baskı yastığı kuvveti, sac malzemenin dişi kalıp içerisine akışını doğrudan etkilemektedir. Düşük baskı yastığı kuvveti flanş kırışmalarına, büyük baskı yastığı kuvveti ise erken kırılmalara sebep olmaktadır. Hidromekanik derin çekmede zıt sıvı basıncından dolayı daha yüksek baskı yastığı kuvveti değerlerine, geleneksel derin çekmede ise daha düşük baskı yastığı kuvveti değerlerine ihtiyaç vardır. Her iki

şekillendirme prosesinde çözüm olması için, baskı yastığı kuvveti değişme aralığı açık tutulmuştur. Optimum baskı yastığı kuvveti değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

4.2.4 Deneysel Değişkenlerinin Uygulanması

Hidromekanik derin çekme esnasında önce ilk malzeme çapına 8 mm/s şekil değiştirme hızı, 30 MPa hazne basıncı ve değişken baskı yastığı kuvvetleri uygulanmıştır. Daha sonra hazne basıncı sırasıyla, 40 ve 50 MPa değerlerine getirilerek optimum baskı yastığı kuvvet değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Hazne basıncı değerleri bittiğinde, şekil değiştirme hızı 18 mm/s ve sırasıyla 28 mm/s'ye çıkarılmış, 30, 40, 50 MPa hazne basınçları ve değişken baskı yastığı kuvvetleri denenmiştir. Bu örnek çap bittiğinde diğer çaplarda aynı yol takip edilmiştir. Geleneksel derin çekme prosesinde de benzer yöntem uygulanmıştır.

4.2.5 Deneysel Sonuç Değerlendirme Kriterleri

Deneysel çalışmalar 4 başlık altında değerlendirilmiştir. Bu başlıklar ile ilgili inceleme izleyen basamaklarda verilmiştir.

4.2.5.1 Sac Malzeme Kalınlık Değişimi

Hidromekanik derin çekmede ve geleneksel derin çekmede müsaade edilebilir incelme oranı % 20'dir [53]. Sac malzeme, bu kritere göre, incelme yönüyle değerlendirilmiş, en az incelme ile en fazla derin çekme oranı elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel değişkenlerinin, sac malzeme kalınlık değişimine etkileri değerlendirilmiştir.

4.1.5.2 Kırışma ve Kırılma Oluşumu

Kırışma ve kırılma sac metal şekillendirme sürecinde en fazla gözlenen hata tipleridir. Deneysel sonuçlar kırışma oluşumu ve kırılma yönüyle değerlendirilmiştir. Kırışma ve kırılma oluşturmayacak uygun değer elde edilmeye çalışılmış, deney değişkenlerinin kırışma ve kırılma oluşumuna etkileri analiz edilmiştir.

4.2.5.3 Derin Çekme Oranı Sınırı

Hidromekanik derin çekmede ve geleneksel derin çekmede mümkün oldukça en yüksek derin çekme oranı sınırına ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, sac malzemelerin kabul edilebilir incelme değerlerinden de taviz verilmemiştir. Aynı zimba çapında daha derin sac malzeme üretebilmek, hedeflenen noktalardan birisidir. Daha derin parçalar daha fazla operasyon gerektirir. Derin parçaların tek kademedeki şekillendirilmesi önemlidir. Bu amaçla, deney değişkenlerinin derin çekme oranı sınırına etkileri bu başlık altında değerlendirilmiştir.

4.2.5.4 ŞSD Üzerinde Gösterim

Sac malzemelerin ŞSD'nin tespit edilmesi, deneysel çalışmalarda bu sınır değerlere ne kadar yaklaşıldığının bilinmesi, ŞSD'nin doğru değerlendirilmesi ve üretime geçme aşamasında verimli kullanılması, tasarımcıya büyük olanaklar sağlayacaktır. Bu kapsamda, deneysel çalışmaların belirli aşamasında sac malzeme yüzeyine işaretlenen 5 mm çapındaki dairelerin ölçülmesiyle daha önceden tespit edilmiş olan ŞSD'nde gerçekleşen uzamaların gösterimi sağlanmıştır. Sınır eğrisi değerlerine mümkün olduğunca yakın fakat üzerine çıkmamış bir şekillendirme prosesi doğru proses olacaktır. Bu kapsamda, deney değişkenlerinin şekillendirme sınır diyagramı üzerindeki uzamalara etkileri değerlendirilmiştir.

4.3 SEY ile Analiz

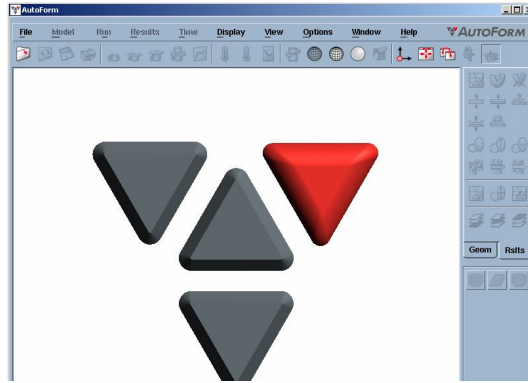
Sac malzeme yüzeyinde meydana gelen şekil değişimlerinin analizi SEY’ne dayalı olarak AUTOFORM 4.06 paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz programları explicit ve implicit yöntemle çözüm yapmaktadır [114]. AUTOFORM implicit yöntemle çözüm yapan, tamamen sac şekillendirmeye yönelmiş bir yazılımdır. İmplicit yöntemde her zaman basamağında denklem yeniden çözülür. AUTOFORM analiz programı kabuk eleman kullandığı için sac kalınlığı arttıkça gerçek analizlerden uzaklaşma ihtimali vardır [114]. AUTOFORM’da, geometriye ve uzama değerlerine göre değişen “refinement level” üçgen mesh kullanılmaktadır.

4.3.1 Kalıp Elemanlarının Modellenmesi

Kalıp elemanların modellenmesi Catia paket programı kullanılarak elde edilen katı model parça resimlerinin yüzey modellemeye çevrilmesi, “.iges” uzantılı olarak kaydedilmesi ve AUTOFORM analiz programında açılmasıyla sağlanmıştır. Sac malzemenin modellenmesi esnasında; kalıba ait, kalıp boyutları, zımba kavisleri, kalıp kavisleri, çekme derinliği, kalıp boşluğu gibi bütün özellikler göz önüne alınmıştır. Sac parçaya ait modeller bu şekilde hazırlanıp yüzey modelleme komutlarıyla yüzeye çevrildikten sonra “.iges” uzantılı olarak kaydedilmiştir. AUTOFORM paket programında oluşturulmuş olan modeller çağrılmıştır. Koordinat sistemi olarak Catia koordinatları kullanılmıştır.

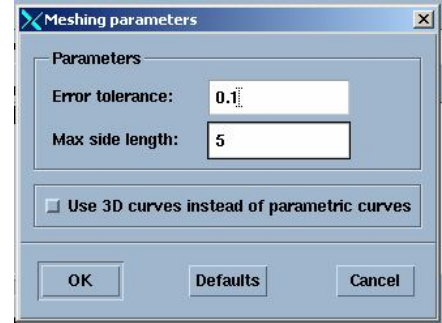
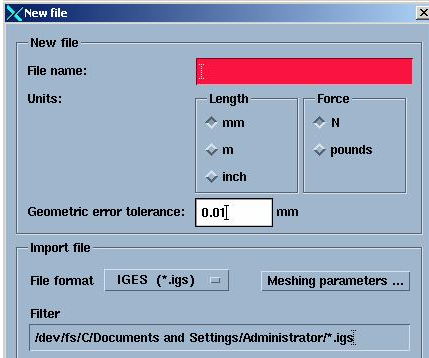
4.3.2 AUTOFORM Analiz Modellemesi

AUTOFORM paket programı açılış sayfası ve genel görünümü Şekil 4.15’de görülmektedir. Analizler, basamak basamak çözüm yapan “Incremental Seat” modülünde gerçekleştirilmiştir.



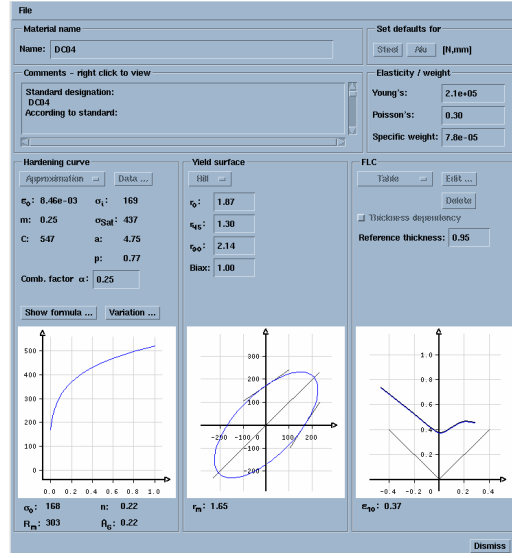
Şekil 4.15 AUTOFORM açılış sayfası ve genel görünüm.

Bir sonraki basamakta, programın birim sistemi ve mesh değişkenleri belirlenmiştir (Şekil 4.16). Küçük mesh değişkenleri hesaplama süresini uzatmakta, büyük mesh değişkenleri ise hesaplama süresini kısaltırken analiz güvenilirliğini düşürmektedir. Optimum mesh değerleri, analizin hazırlık aşamasında belirlenerek tüm analizler boyunca sabit tutulmuştur.



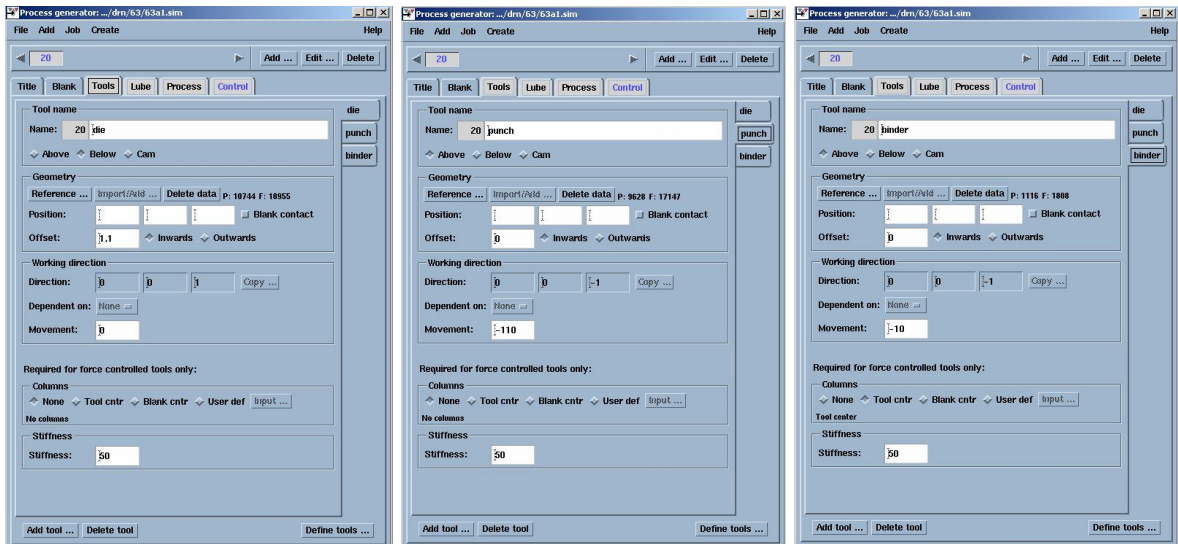
Şekil 4.16 Birim sistemi ve mesh değerleri.

Birim sistemi ve mesh değişkenleri girildikten sonraki basamakta sac malzemenin tanımlanması yapılmıştır. “.iges” formatındaki sac malzeme AUTOFORM yazılımına çağırılmıştır. Sac malzeme, programın kütüphanesinden çekilerek tanımlanmıştır. Sac malzeme ve tanımlanması Şekil 4.17’de görülmektedir.



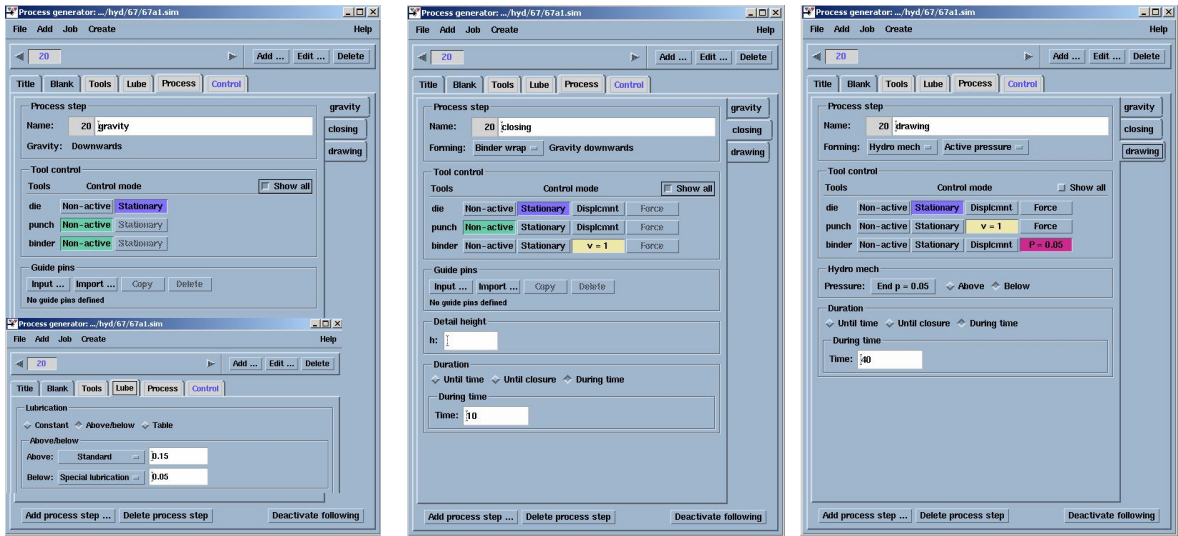
Şekil 4.17 Sac malzemenin tanımlanması.

Sac malzemedan sonra, dişi kalıp, erkek kalıp ve baskı yastığının tanımlaması yapılmıştır (Şekil 4.18).



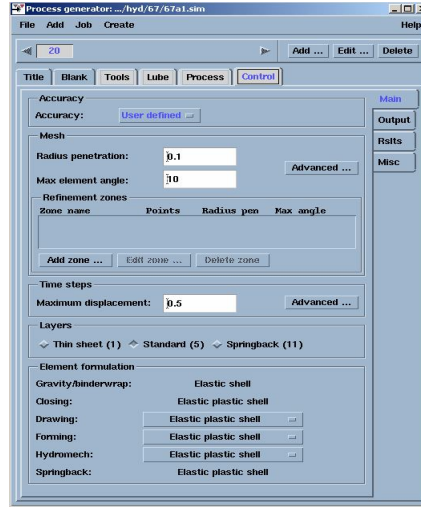
Şekil 4.18 Kalıpların tanımlanması.

AUTOFORM analiz programında kalıpların yağlanması ve hareket işleminin belirlenmesi bir sonraki aşama olarak gerçekleştirilmiştir. Yağlama, sac malzeme ile kalıp arasında oluşmakta, zımbanın yağlanması ise istenmemektedir [56]. Bu kapsamda iki farklı yağlama tercih edilmiştir. Zımba yüzeyi daha pürüzlü kabul edilmiştir. Proses penceresi Şekil 4.19’da görülmektedir. Boş pozisyonda, kalıp sabit, zımba ve baskı yastığı pasif durumdadır. Kapanma pozisyonunda kalıp sabit, zımba pasif, baskı yastığı ise hareketlidir. Çekme pozisyonunda ise Forming “Hydro Mech”, basınç “Active Pressure” alınmıştır. Pasif basınç, zımba sac malzemeye temas eder etmez oluşmaktadır. İşlem basamaklarına bağlı olarak basınç ayarı yapılamamaktadır. Basınç, proses boyunca sabit kalmaktadır. İşlem sonunda valf açılmasıyla basınç düşümü sağlanmaktadır. Aktif basınçta ise zaman değişimine bağlı olarak sac malzemeye hidrostatik basınç uygulanabilmektedir. Şekillendirme prosesinden bağımsız basınç ayarlanabilmektedir. Bu durum diğer alet sistemlerinin ve hareketinin basınçtan etkilenmemesini sağlar.



Şekil 4.19 Yağlama ve proses değişkenlerinin tanıtımı.

Deneysel çalışmaların öncesinde sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analiz değişkenleri ile deneysel çalışma değişkenleri paralel yürütülmüştür. Analiz çalışmalarında, sac malzemenin hız duyarlılık tanımlaması olmaması sebebi ile, hız değişkeni gerçekleştirilememiştir. Analizde gerekli denemeler yapılmış, fakat farklı hız denemelerinde aynı sonuçlar elde edilmiştir.

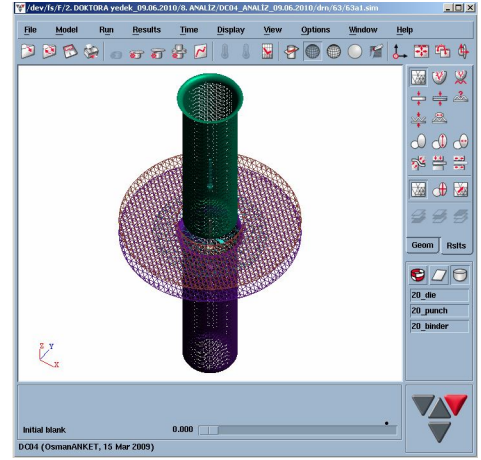
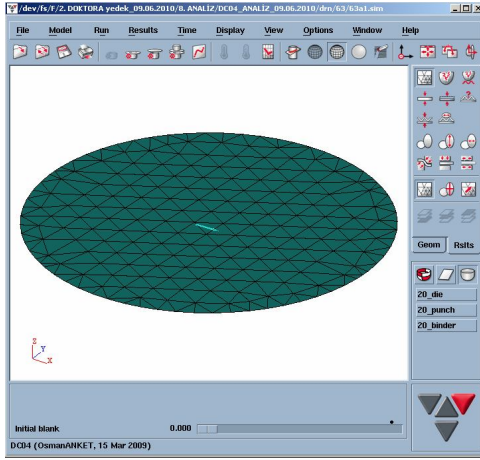


Şekil 4.20 Sac malzeme çözümleme ayarları.

Hazne basıncı, şekillendirme basamakları boyunca sabit tutulmuştur. Baskı yastığı basıncı ayarı “sabit basıncı” şeklinde ayarlanmıştır. Analiz çalışmasında baskı yastığı basıncı değişken olarak kullanılmış, daha sonraki basamakta hazne basıncı bir üst değere çıkartılarak tekrar baskı yastığı basıncı denenmiştir. Bu şekilde optimum değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Deney değişkeni olan malzeme çapının değeri büyüdüğünde analizin çekme derinliği artırılmıştır. Geleneksel derin çekme analizlerinde ise “Hydro Mech” yerine “Forming” kullanılmıştır.

Şekillendirme prosesi esnasında sac malzemedeki şekillenme sınırlarının ayarı “control” hücresinden yapılmıştır. En uygun ayar değerleri Şekil 4.20’de görülmektedir. Ayar değerleri, prosese başlamadan önce analiz çalışmaları ile belirlenmiştir.

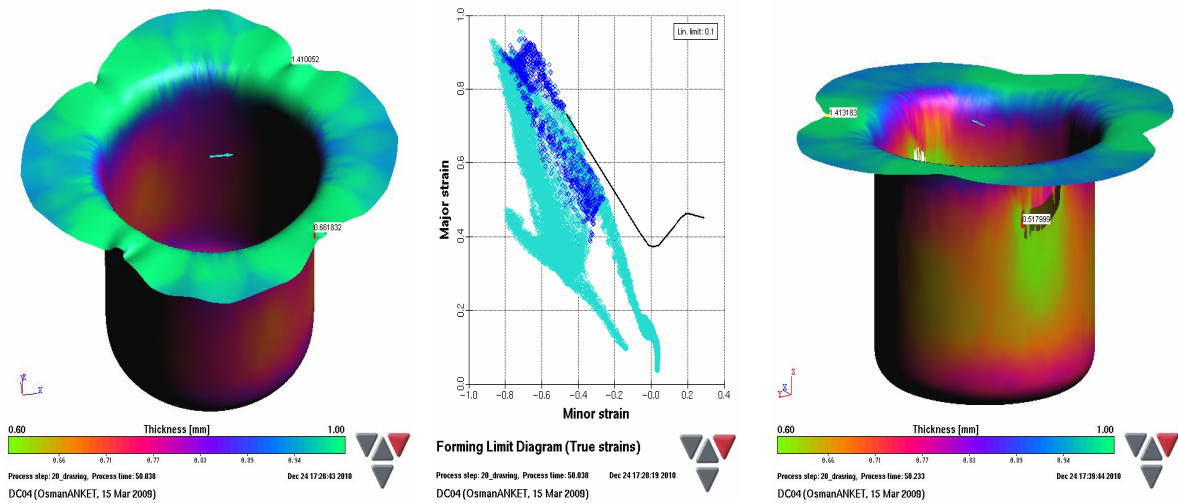
Sac malzeme çözüm formülleri “elastic” olarak belirlenmiştir. Sac malzeme, derin çekme şartlarında, bükme yerine daha çok çekmeye maruz kalmaktadır. Sac malzeme, aynı zamanda elastik bir malzemedir ve tercih edilen DC04 malzeme sünek kırılma sergilemektedir. Bu sebeple, daha çok bükme şartlarını simüle eden “Bending” kullanılmamıştır. Sac malzemenin “Bending” ayar değerinde analiz edilmesi daha erken kırılmalar ile sonuçlanmıştır. “Elastik” ya da “Bending” malzeme modeli analizlere başlanmadan test edilmiştir. İşleme başlangıç pozisyonu ve mesh durumu Şekil 4.21’de görülmektedir.



Şekil 4.21 Sac malzeme ve kalıp pozisyonu mesh görünümü.

4.3.3 AUTOFORM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

AUTOFORM analiz sonuçları, deney değişkenlerinin, sac malzemede meydana gelen incelmelere, ŞSD'na ve kırışma / kırılma oluşumuna etkileri açısından değerlendirilmiştir. Şekil 4.22'de kalınlık değişimi, ŞSD ve kırışma / kırılma oluşumu görülmektedir.

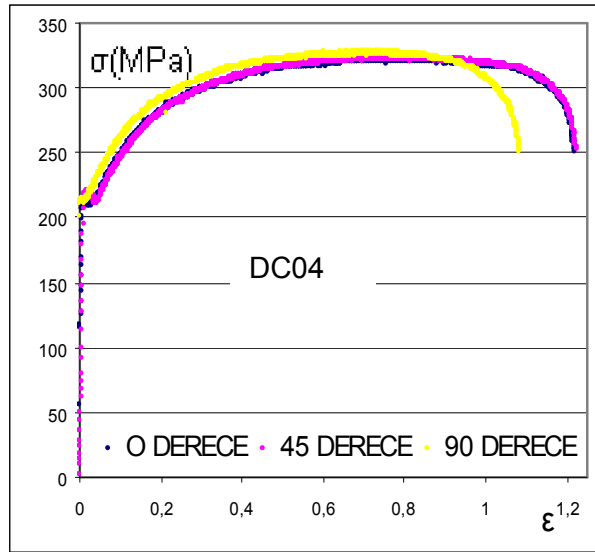


Şekil 4.22 Kalınlık değişimi, ŞSD, kırışma / kırılma.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 DC04 Deney Örneğinin Mekanik Özelliklerinin ve ŞSD'nın Deneysel Olarak Elde Edilmesi

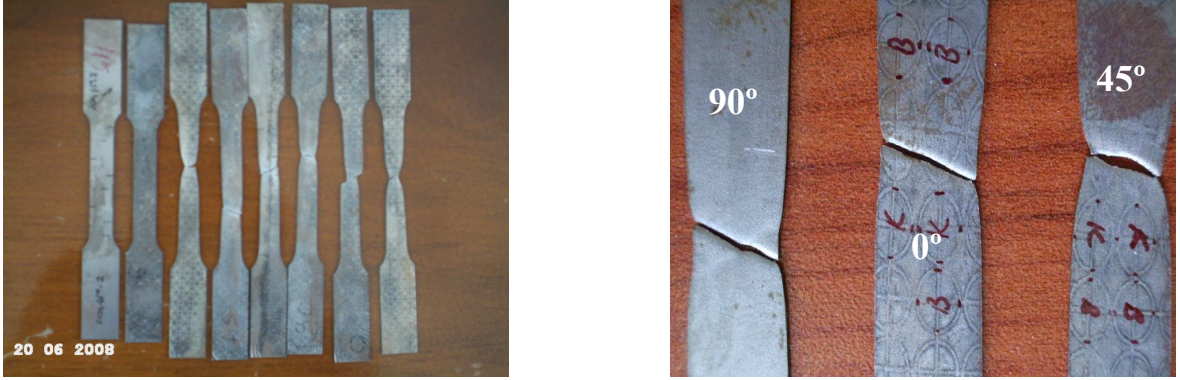
Dartec marka çekme deneyi cihazında, 3 mm/dk şekil değiştirme hızıyla gerçekleştirilen çekme testinden elde edilen parçalarının, yük (kN) ve uzama (mm) değerleri alınmış, mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim uzaması değerlerine dönüştürülmüşlerdir. Bu değerler üzerinden test edilen örneklerin mühendislik gerilme-mühendislik birim uzama eğrileri çıkartılmıştır.



Şekil 5.1 DC04 sac malzemenin mühendislik gerilme-mühendislik birim uzama diyagramları.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, DC04 sac malzeme 220 MPa seviyesinde akma mukavemeti ve 325 MPa seviyesinde çekme dayanımı sergilemiştir. Çekme deneyi eğrisi sünek malzeme eğrisine benzemektedir. Akma noktasına kadar gerilme artışına bağlı

olarak belirgin bir uzama değeri görülmemektedir. Akma noktası ile çekme dayanımı noktası arasında aşırı bir fark bulunmamaktadır. $\epsilon=1,15$ noktasında malzeme kopmuştur. Çekme deneyi sonucunda elde edilen uzama ve kopma şekilleri Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2 Çekme örneklerine ait uzama ve kopma şekilleri.

Kopma uzaması için, çekme deneyine tabii tutulan deney örnekleri üzerine işaretlenmiş olan 25 mm’lik izlerden kopma sonunda bütün olanlar ölçülmüştür. DC04 deney örneğine ait deneysel çalışma sonucu elde edilen mekanik özellikler Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Deneylerde kullanılan örneklerin mekanik özellikleri (t=0,9 mm).

Özellik	DC04
σ_{AK} (MPa)	220
σ_C (MPa)	325
Kopma Uzaması % ϵ	23,50
Şekil Değişirme Sertleşmesi Üssü “n”	0,24
Mukavemet Katsayısı “K” (MPa)	617
Dikine Anizotropi “ \bar{R} ”	0,848
Düzlemsel Anizotropi “ ΔR ”	0,100
Erichsen Derinliği (mm)	9,43
Erichsen Deneyi Hasar Anındaki Yük (kN)	14,20
“n \bar{R} ”	0,024

Şekil değiştirme sertleşmesi üssü, artan süneklikle doğru orantılıdır. Mukavemet katsayısı arttıkça şekil değiştirme sertleşmesi üssü de artar. Artan şekil değiştirme sertleşmesi üssü şekillendirme sınır diyagramlarının konumunu değiştirirken genel şekline etki etmez [121].

Holloman denkleminde elde edilen şekil değiştirme sertleşmesi üssü ve mukavemet katsayısı değerleri incelendiğinde DC04 sac malzeme oldukça yüksek “n” değeri göstermiştir. “n” değeri büyüdükçe toplam kopma uzaması da artar [85]. Literatür düşük C içeren IF çeliklerinde “n” değerinin yüksek çıktığı ve bu durumun IF çeliklerinin yüksek gerilebilirlik yeteneğine sahip olacağını ifade etmektedir [102]. Bu yaklaşım Tablo 5.1’de de gözlenmektedir. Şekil değiştirme sertleşmesi üssü ile kopma uzaması arasında doğru bir orantı vardır. Pekleşme sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini olumlu yönde etkiler [119]. Bu sebeple şekil değiştirme sertleşmesi üssü ne kadar büyükse sac malzeme o kadar kolay şekillendirilebilecek veya şekillendirilebilirlik sınırları o kadar yüksek olacaktır. En büyük “n” değeri en büyük şekil değişimini gösterir [94,102]. “n” değeri arttıkça malzemenin gerdirilebilirliği de artar [5,12]. Bu durumda, DC04 malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarının yüksek olacağı sonucu çıkartılabilecektir.

Mukavemet katsayısının büyük olması tane boyutunun küçük olduğunu gösterir [7]. Holloman denkleminde, mukavemet katsayısı ne kadar yüksek ise malzemenin gerçek mukavemetinin de o kadar yüksek olduğu sonucu çıkmaktadır. Literatür, “K” mukavemet katsayısının büyüklüğüne vurgu yapmaktadırlar [2,7,122].

Sac malzemelerden alınan anizotropi değerlerine göre dikine anizotropi değeri eşitlik (3.14) ile bulunmuştur. Eşitlik (3.15) ve (3.16)’dan hadde yönüne göre farklı açılardan elde edilen değerlerin ortalaması olan dikine ve düzlemsel anizotropi değerleri bulunmuştur. Deneylerden elde edilen bu değerler Tablo 5.1’de görölmektedir.

Ortalama dikine anizotropi değeri “ \bar{R} ” ne kadar büyükse malzeme o kadar yüksek çekilebilirlik sınırına sahip olacaktır. Çünkü, malzeme kalınlık yönündeki incelmeye karşı o kadar fazla direnç gösterecektir. Aynı durum hem alüminyum hem de çelik saclar için geçerlidir [2,5,7,91,102,122].

DC04 malzemenin de “ \bar{R} ” değeri yüksek çıkmıştır. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda IF elikler için yüksek “ \bar{R} ”değerinin, derin çekme esnasında kalınlık yönünde incelme direncinin yüksek olacağını, bu sebeple bu sacın yüksek derin çekilebilirlik yeteneğine sahip olacağını vurgulamaktadır [102]. Bu sonuç bizim bulduğumuz değerler ile uyuşmaktadır.

Düzlemsel anizotropi ifadesi kulak oluşumunu çağrıştıran kavramdır. Özellikle anizotropik malzemelerin derin çekilmesi esnasında kulaklaşma problemi yaşanabilmektedir [56]. Düzlemsel anizotropi değerlerine bakıldığında bu değerin sıfır olması istenir [91]. Bu değer ne kadar küçükse kulak oluşumu da o kadar az olacaktır [11,122]. Kulak oluşumu atık malzeme miktarını artıracaktır [4].

Tablo 5.1’de görülmekte olan Erichsen ykseklieği incelendiğinde olduğa iyi bir derinliğe ulaşıldığı gözlenmektedir. Literatürde her ne kadar şekillendirilebilirlik verisi olarak kullanılmasa da, lkemizde Erichsen numarası yüksek olan malzeme şekillendirilmeye daha yetenekli olarak görülmektedir. Erichsen deneyi derin çekme şartlarına benzerlik gösterdiği için, Erichsen numarası büyük olan malzeme derin çekerek şekillendirmeye daha yatkın olacaktır.

Örnekler üzerinde ölçülen büyük ve küçük uzama değerlerinin şekillendirme sınır diyagramına aktarılması ile şekil 5.4’teki diyagram elde edilmiştir. Kırılmaya en yakın tam dairelerden kırılma (fracture) ve ikinci sıradaki tam dairelerden boğumlanma (necking) eğrileri çıkartılmıştır. şSD’nda; çekme deneyi örneğinden alınan ölçülerin derin çekerek şekillendirme bölgesini (tension-compression), çentikli deney örneğinden alınan ölçülerin düzlem uzama (Plane Strain) bölgesini ve Erichsen deney örneğinden alınan ölçülerin derin çekerek şekillendirme ve gerdirerek şekillendirme bölgesini oluşturduğu gözlenmiştir. Çekme makinesinde ve Erichsen makinesinde test edilen örnekler şekil 5.3’te görülmektedir.

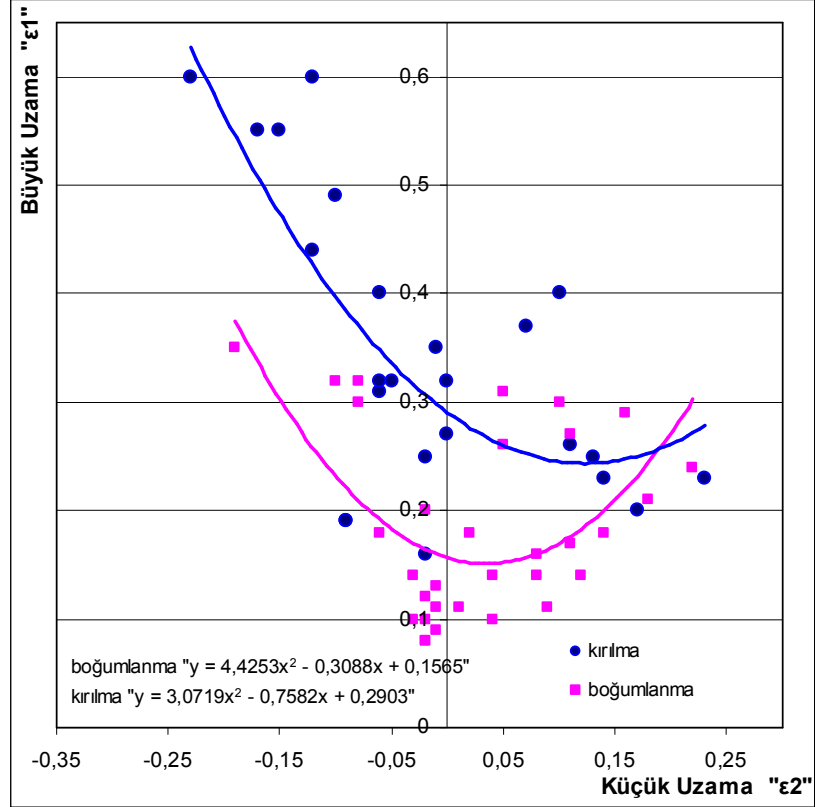


Şekil 5.3 DC04 sac malzemenin çekme makinesinde ve Erichsen makinesinde şekil değiştirmesi.

Literatürde, uzama ölçüm noktalarını en iyi ifade eden eğrinin iki şekilde tanımlandığı görülmektedir. Bir tanesi, tüm ölçüm noktalarının en altından geçen eğri, diğeri ise ölçüm noktalarını en iyi temsil eden eğridir. Şekil 5.4'te ölçüm noktalarının en iyi temsil edildiği *polinom eğrisi* görülmektedir. Örnekler üzerinden ölçülen büyük ve küçük uzama değerleri ŞSD'na aktarılmış ve ikinci dereceden fonksiyon kullanılarak boğumlanma ve kırılma eğrileri çizilmiştir. Benzer eğri çizimleri literatürde [123] kullanılmaktadır.

DC04 deney örneğinin kırılma ve boğumlanma eğrileri Şekil 5.4'te görülmektedir. Kırılma eğrisi incelediğinde, -0,28 küçük uzama değeri için 0,50 büyük uzama değeri gözlenmektedir. 0,20 küçük uzama değeri için ise 0,28 büyük uzama değeri gözlenmektedir. Bu durum, DC04 deney örneğinin derin çekme özelliklerinin

gerdirilebilirlik özelliklerine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Boğumlanma eğrisi incelendiğinde ise, -0,20 küçük uzama değeri için 0,37 büyük uzama değeri gözlenmektedir. 0,17 küçük uzama değeri için ise 0,17 büyük uzama gözlenmektedir. Kırılma ve boğumlanma eğrileri arasındaki fark yaklaşık % 13 çıkmıştır.



Şekil 5.4 DC04 deney örneği için kırılma ve boğumlanma eğrileri.

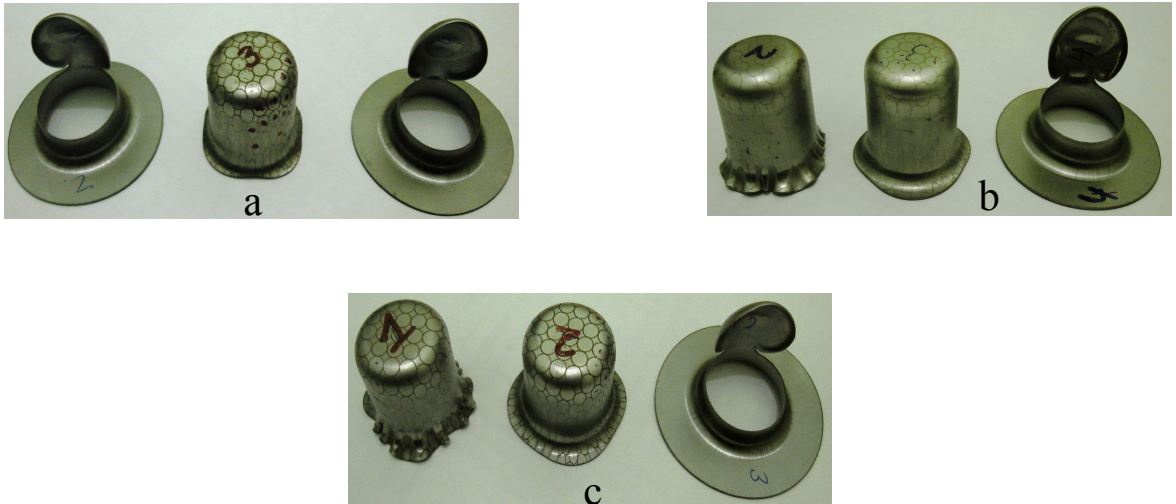
ŞSD'nı örnek kalınlığı, akma mukavemeti ve çekme dayanımı, "n" ve "R" değerleri etkilemektedir [124]. Örnek kalınlığı, sabit küçük uzama değeri için büyük uzama değerlerinin daha yüksek çıkmasına sebep olur. Deneyler esnasında kullanılmış olan t=0,9 mm kalınlığındaki DC04 sac malzemesinin ŞSD eğrileri çıkartılmış ve bu eğriler (Şekil 5.4) hidromekanik derin çekme çalışmalarında referans olarak kullanılmıştır.

5.2 Hidromekanik Derin Çekme Yönteminin Deneysel Çalışması ve Sayısal Analizi

Hidromekanik derin çekme yönteminin deneysel ve sayısal analiz çalışmalarında 3 farklı hazne basıncı denenmiştir. Bu hazne basınçları, 30 MPa, 40 MPa ve 50 MPa'dır. Deneysel düzeneğin dayanım problemi ve haznedeki sıvı basıncının değerini ayarlayan basınç ayar valfinin üst basınç değerinin sınırlı olması sebebi ile 50 MPa'nın üzerindeki hazne basınçlarında deneysel çalışma yapılmamıştır. 3 farklı hazne basıncında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar; şekil değiştirme hızı, baskı yastığı kuvveti ve farklı çaplardaki deney örneği değişkenleri kullanılarak, kırılma oluşumu, kalınlık değişimi, SSD üzerindeki uzama dağılımları ve derin çekme oranı sınırı kriterleri yönüyle değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma şartları, AUTOFORM sayısal analiz yazılımı ile simülasyon edilmiş ve sonuçlar mukayese edilmiştir.

5.2.1 30 MPa Hazne Basıncının Hidromekanik Derin Çekme Prosesine Etkileri

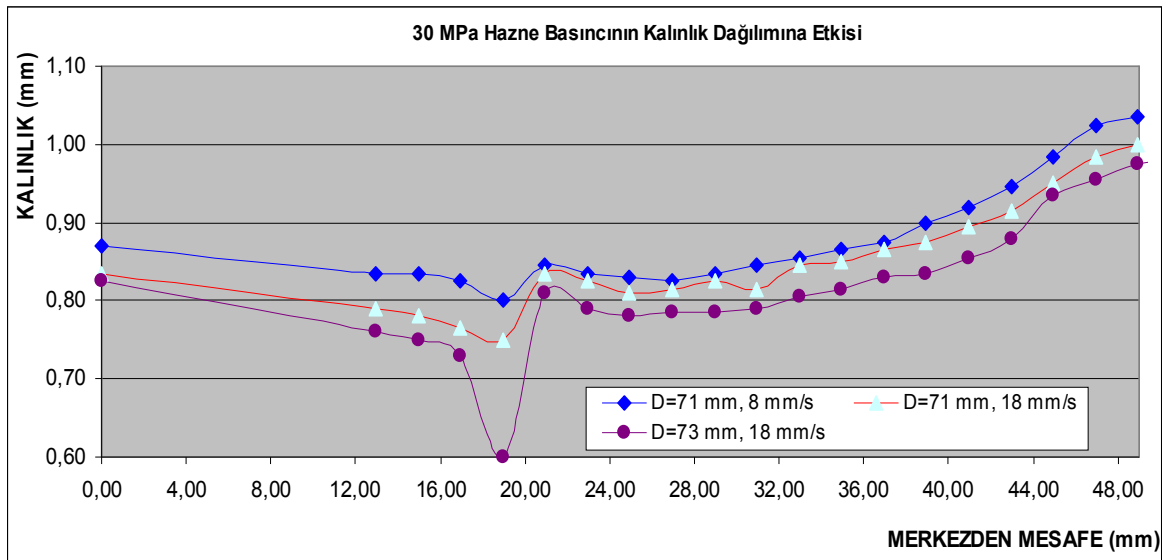
0,9 mm kalınlığındaki DC04 deney örneğinin hidromekanik derin çekilmesi esnasında, 30 MPa hazne basıncının, hidromekanik derin çekmeye etkisinin olmadığı görülmüştür. Hazne basıncının düşük olması, hidromekanik derin çekmeyi geleneksel derin çekmeye yaklaştırmıştır. 71 mm ve 73 mm ilk çaptaki deney örneklerinin, 30 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi sonrasındaki görünümü Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5 30 MPa hazne basıncında şekillendirilmiş örnekler.

Şekil 5.5.a'da soldan sağa doğru olmak üzere, 71 mm ilk çaptaki örneklerin, 1500 N, 2500 N ve 4000 N baskı yastığı kuvvetinde, 8 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilmesi sonrasındaki durumu görülmektedir. Şekil 5.5.b'de aynı çaptaki örnek malzeme, 1000 N, 2000 N, 3000 N baskı yastığı kuvvetinde 18 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilmiştir. Şekil 5.1.c'de ise 73 mm ilk çaptaki örnekler, 1000 N, 1500 N ve 2000 N baskı yastığı kuvvetinde 18 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilmiştir. Çekme derinliği 35 mm'dir. 30 MPa hazne basıncında, 2000 N baskı yastığı kuvvetinde, 71 mm ve 73 mm ilk çaptaki örneklerin şekillendirmesi mümkün olmuştur. Baskı yastığı kuvveti değişim aralığı çok sınırlı kalmıştır.

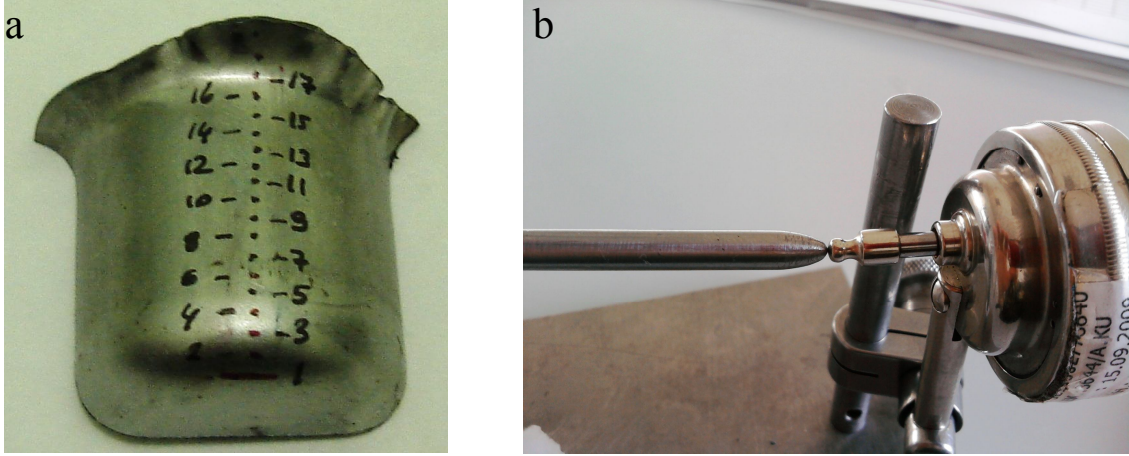
30 MPa gibi düşük hazne basınçlarında hidromekanik derin çekme geleneksel derin çekmeye benzediğinden, hazne basıncının sac malzemenin şekillendirilmesi üzerindeki etkisi az olmuştur. Şekil 5.5 incelendiğinde, 1000 N seviyesindeki baskı yastığı kuvveti kırışmalara sebep olurken, 3000 N'un üzerindeki baskı yastığı kuvvetleri kırışmalara sebep olmuştur. Kırışmaların zımba uç bölgesine yakın oluşması, 30 MPa hazne basıncının yetersiz olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.6 30 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi.

Şekil 5.6'da, 30 MPa hazne basıncının şekillendirilmiş parçadaki kalınlık dağılımına etkisi görülmektedir. Şekil 5.6'daki birinci eğri, 71 mm ilk çaptaki deney

örneğin, 8 mm/s şekil değiştirme hızıyla, ikinci eğri aynı örneğin 18 mm/s ve üçüncü eğri 73 mm ilk çaptaki örneğin 18 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilmesini ifade etmektedir. Kalınlık ölçümünün başlangıç noktası sac malzemenin orta noktasıdır. Ölçüm mesafelerinin örnek üzerindeki görünümü Şekil 5.7.a’da verilmiştir.

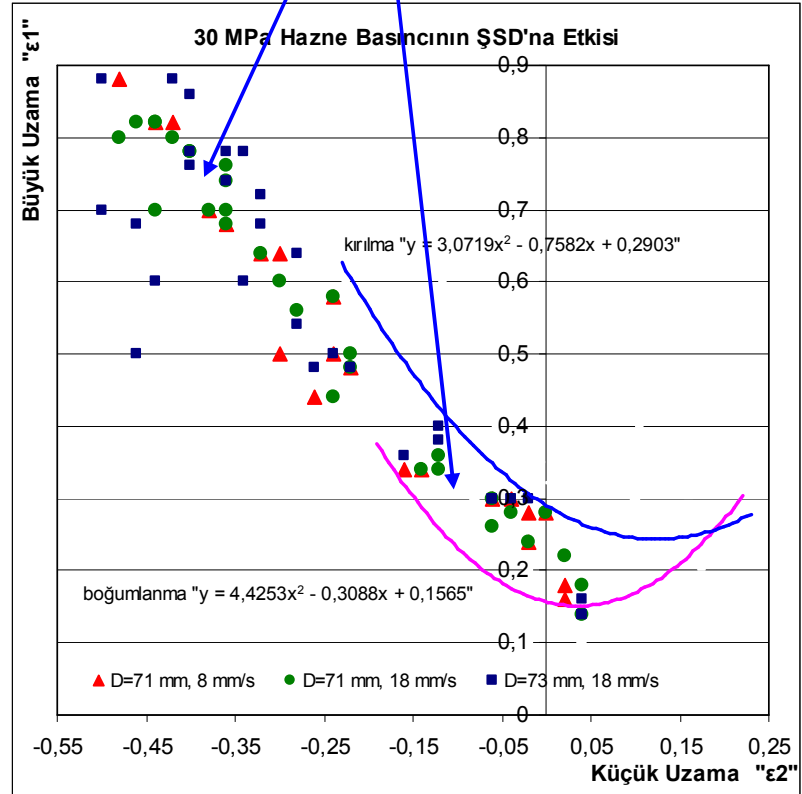
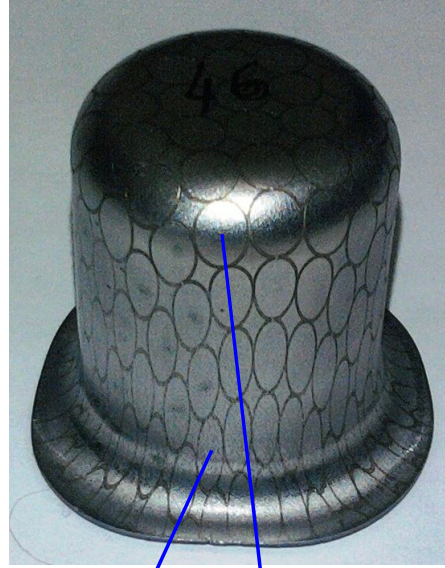


Şekil 5.7 Kalınlık ölçüm noktaları ve ölçme aparatı.

“0” numaralı ölçüm noktası şekillendirilmiş örneğin merkezine tekabül etmektedir. “1” numaralı ölçüm noktasından başlamak üzere, ölçüm noktaları arası mesafe 2 mm’dir. Şekil 5.7.b, deney örneğinin kalınlığını ölçmek amacıyla kurulmuş aparatı göstermektedir. Örnekteki cidar kalınlığı, sac malzeme şekil değiştirme hızının artışı ile ve sac malzemenin çapının büyümesi ile azalmıştır. “3” ile “6” noktaları arasında aşırı bir incelme meydana gelmiştir. Sac malzeme kırılma noktasına yaklaşmış, kalınlık 0,6 mm’ye kadar inmiştir. 73 mm ilk çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilememesi, baskı yastığı kuvveti aralığının aşırı daralmasına ve şekil değiştirme hızının düşük olması sebebi ile sıvı sızıntılarının artmasına bağlanmıştır.

Şekil 5.8’de, Şekil 5.5’de verilen örneklerin üzerine çizilmiş olan 5 mm çapındaki daireler üzerine alınan uzamaların, daha önceden deneysel yolla elde edilmiş olan ŞSD üzerine aktarılması sonucu elde edilen durum gözlenmektedir. “a” örneğinden “c” örneğine doğru uzamalar kırılma eğrisine çok yaklaşmıştır. “c” örneğinde şekillendirilmiş

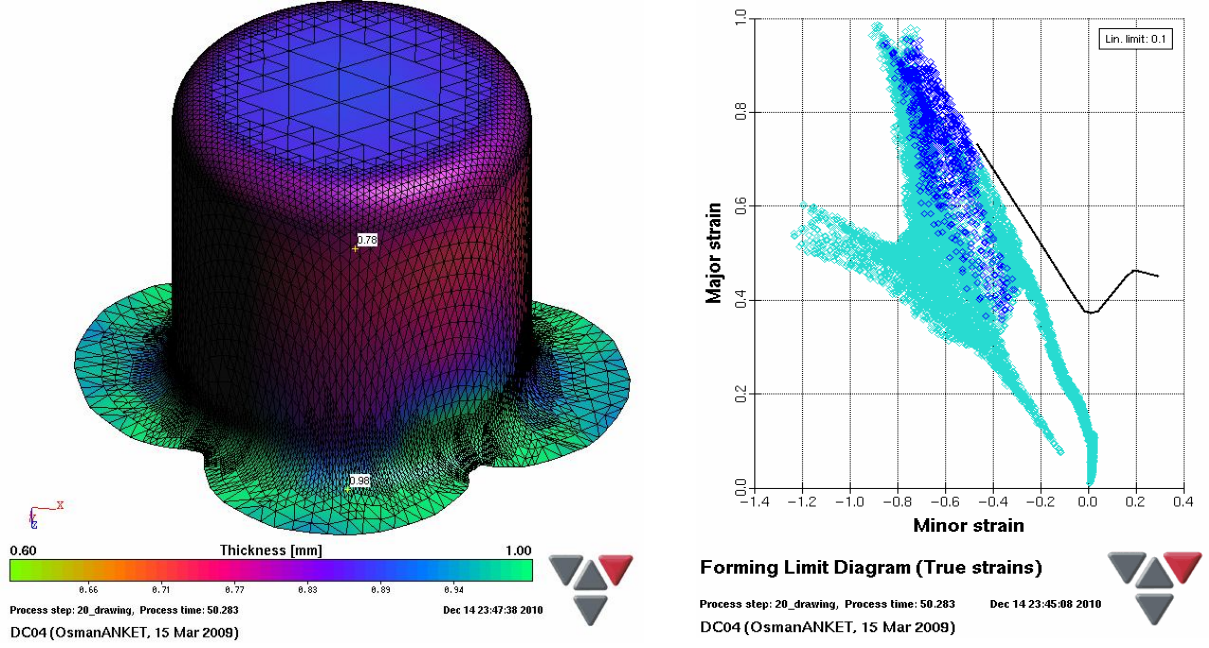
örnek kırılma noktasına gelmiştir. Bu durum, Şekil 5.6'da da belirgin olarak görülmektedir.



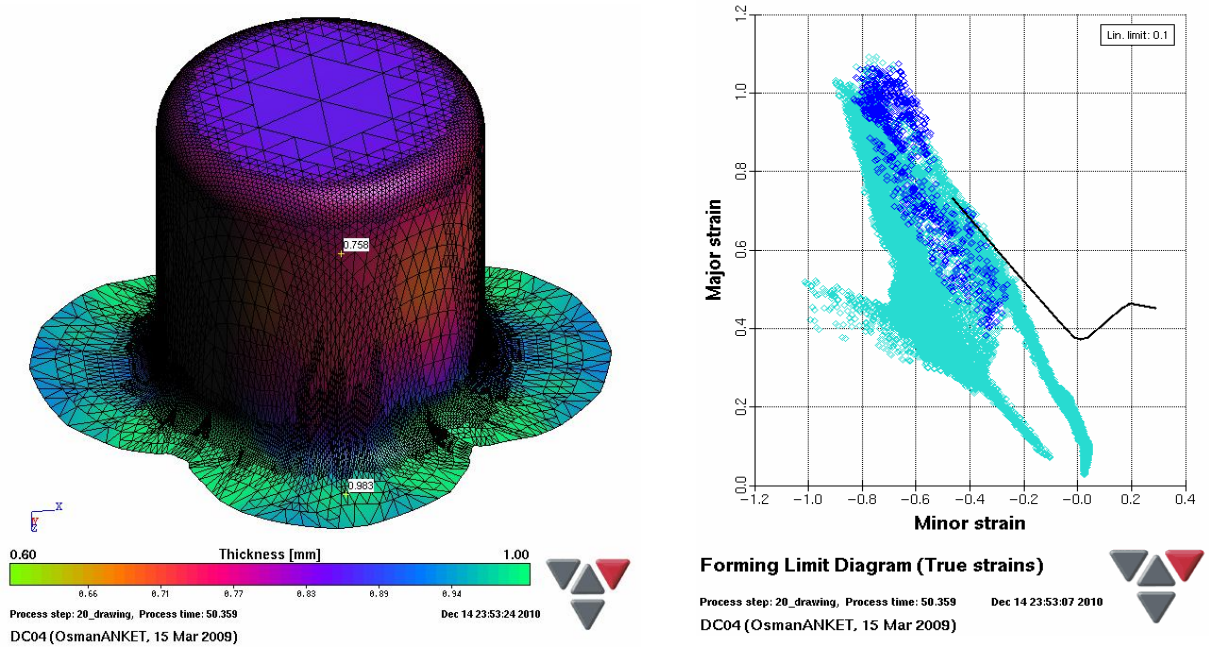
Şekil 5.8 30 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi.

30 MPa hazne basıncında, 71 mm'lik ilk çaptaki deney örneklerinin, AUTOFORM analiz programı ile, SEY'ne dayalı analizi sonucu Şekil 5.9 da, 73 mm çaptaki deney

örneğinin AUTOFORM sayısal analiz programında analizi sonucu Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.9 71 mm çaptaki deney örneğinin 30 MPa hazne basıncında sayısal analizi.



Şekil 5.10 73 mm çaptaki deney örneğinin 30 MPa hazne basıncında sayısal analizi.

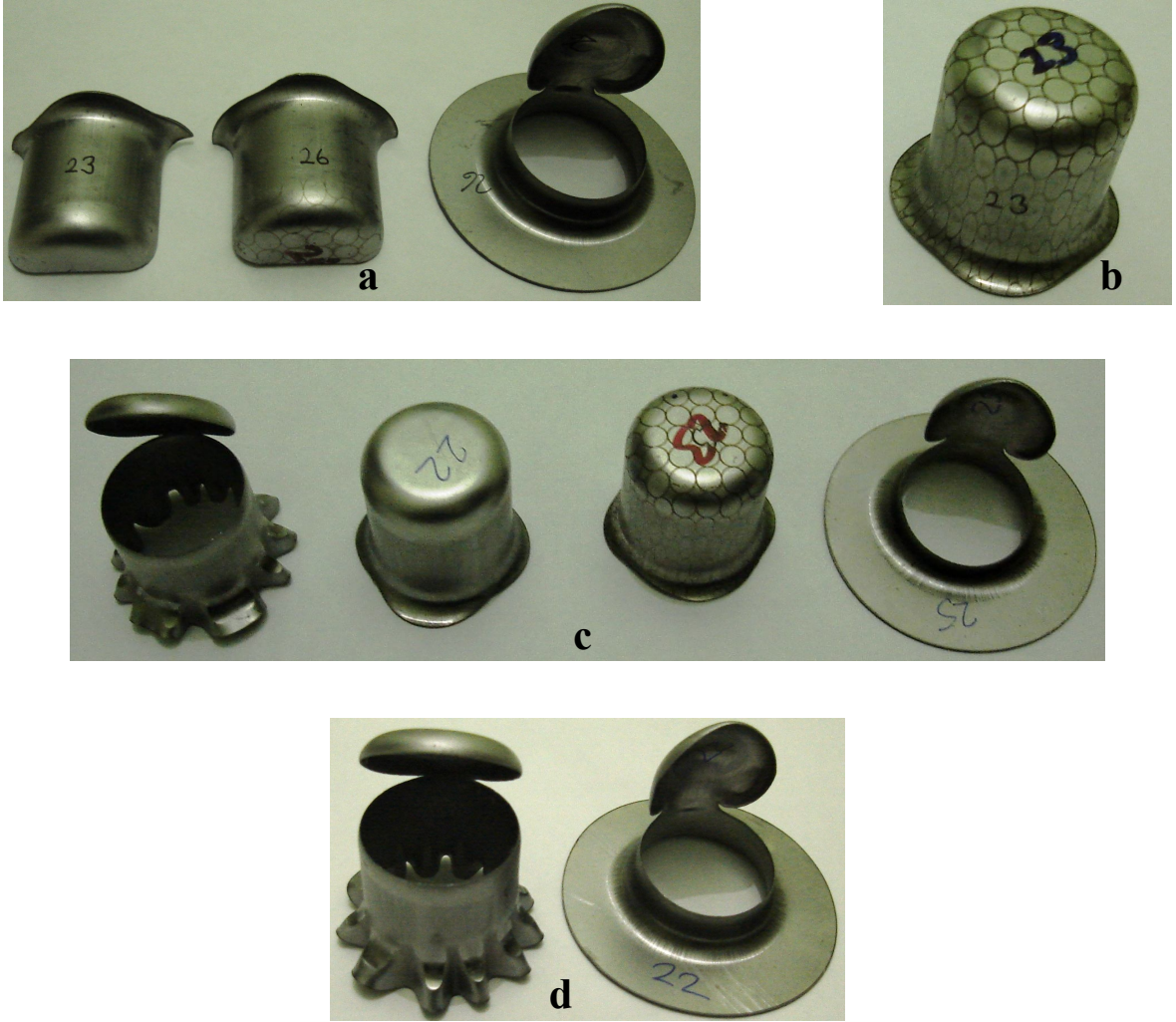
71 mm çaptaki deney örneğinin uzamaları kırılma eğrisine çok yakın, 73 mm çaptaki deney örneğinin uzamaları ise kırılma eğrisinin üzerinde çıkmıştır. Analiz sonucunda elde edilen kalınlık değişimi ve ŞSD üzerindeki uzama miktarlarının deneysel çalışmalar ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

30 MPa hazne basıncında, en fazla, 71 mm çaptaki DC04 deney örneği şekillendirilebilmekte ve bu durumda çekme oranı “ $D/d=71/30=2,37$ ” olmaktadır. 73 mm çaptaki deney örneğinde şekillendirme sonucunda aşırı incelme meydana geldiğinden, derin çekme oranı sınırının hesaplanmasına dâhil edilmemiştir.

5.2.2 40 MPa Hazne Basıncının Hidromekanik Derin Çekme Prosesine Etkileri

40 MPa hazne basıncında, deney örneğinin şekillendirme yelpazesi biraz daha genişlemiştir. Baskı yastığı kuvveti çalışma aralığı biraz daha artmıştır. Daha geniş baskı yastığı aralığında, daha az hatalı deney örnekleri üretmek mümkün olmuştur. 40 MPa hazne basıncında, 71 mm çaptaki deney örneklerinin hidromekanik derin çekme yöntemi ile şekillendirilmesi mümkün olmuştur. Baskı yastığı kuvvetinin düşük değerlerinde sızdırmazlığı sağlamak zorlaşmış ve sızıntılar artmıştır. Yüksek baskı yastığı kuvveti değerlerinde ise, 40 MPa hazne basıncı hidromekanik şekillendirme için yetersiz kalmıştır.

Şekil 5.11.a’da, 71 mm çaptaki deney örneğinin 8 mm/s, Şekil 5.11.b’de aynı örneğin 18 mm/s ve Şekil 5.11.c’de 28 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilmesi sonucu görülmektedir. “a”daki örnekler soldan sağa doğru 2000 N ve 5000 N baskı yastığı kuvveti ile şekillendirilmişlerdir. “b”deki örnek 2000 N baskı yastığı kuvveti ile şekillendirilmiştir. “c”deki örnek ise sırasıyla serbest baskı yastığı sürtünme kuvvetleri ile (herhangi bir baskı yastığı kuvveti ayarlanmamış), 2000 N, 5000 N ve 10000 N baskı yastığı kuvvetlerinde şekillendirilmişlerdir. Şekillendirme derinliği 35 mm’dir. Ortalama baskı yastığı şekillendirme kuvveti 2000 N olmuştur. 2000 N’un altındaki baskı yastığı kuvvetlerinde kırışmalar, üzerindeki baskı yastığı kuvvetinde ise kırılmalar gözlenmiştir. 40 MPa hazne basıncı şekillendirme prosesini biraz daha hidromekanik derin çekmeye yaklaştırmış fakat yetersiz kalmıştır.



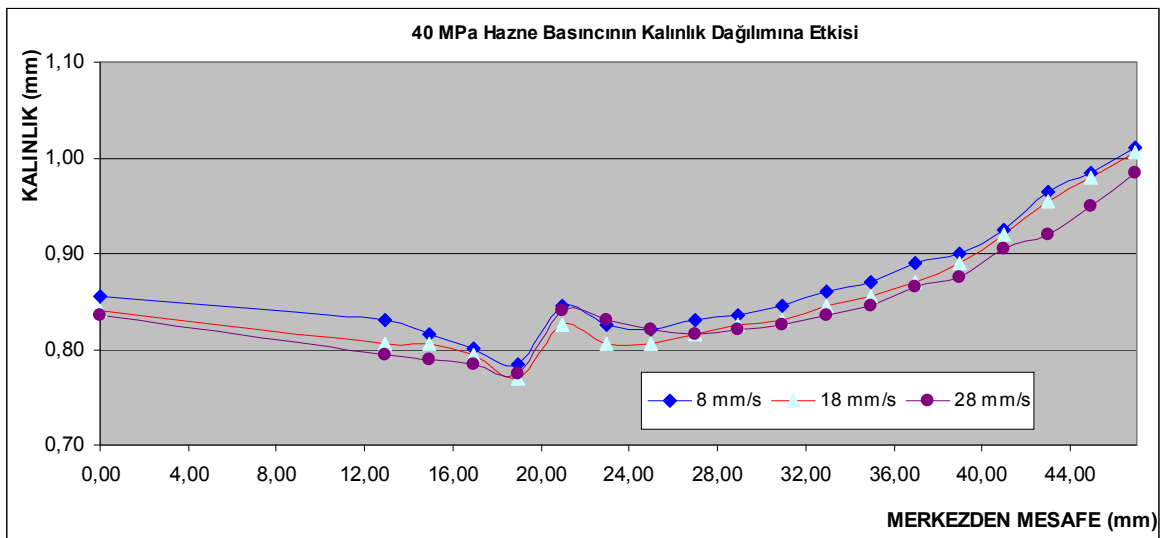
Şekil 5.11 40 MPa hazne basıncında şekillendirilmiş örnekler.

Baskı yastığı kuvveti değeri dar bir aralıkta değiştiğinden, şekil değiştirme hızının düşük değerlerinde baskı yastığı kuvveti de düşüğe sızdırmazlık problemi yaşanmış ve kalıp ile baskı yastığı arasındaki sızıntılar artmış, 40 MPa hazne basıncı değerini elde etmek zorlaşmıştır. Şekil değiştirme hızının yüksek değerlerinde (28 mm/s) sızıntı için gereken şartlar oluşmamış, 40 MPa hazne basıncını sabit tutmak mümkün olmuştur. Burada, şekil değiştirme hızı arttığında şekillendirme prosesi iyileşiyormuş gibi görünse de, aslında gerçek durum hazne basıncının sabit tutulabilme etkisindedir.

Şekil 5.11.d’de ise, 73 mm çaptaki deney örneğinin 18 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirme sonucu görülmektedir. Baskı yastığı kuvveti uygulamaksızın gerçekleştirilen şekillendirmede kırışmalar görülmüş, 1000 N baskı yastığı kuvvetinde ise deney parçası aşırı baskı yastığı kuvveti ile kırılmıştır. Deney örneğinin çapı arttıkça ihtiyaç duyulan baskı yastığı kuvveti azalmıştır. Bu sebeple, 40 MPa hazne basıncı değerinde, basınca bağlı olarak baskı yastığı kuvveti ihtiyacı artsa da, çap artışına bağlı olarak azaldığı için, baskı yastığı kuvveti çalışma aralığı azalmıştır. Baskı yastığı kuvveti aralığının azalması, 73 mm çaptaki deney örneğinde çalışma aralığını daraltmış, sadece 18 mm/s şekil değiştirme hızında deneysel çalışma yapılmıştır.

Şekil 5.12’de, 40 MPa hazne basıncının şekillendirilmiş parçadaki kalınlık dağılımına etkisi görülmektedir. 40 MPa hazne basıncında şekillendirilmiş örneklerdeki kalınlık değişimi, 30 MPa hazne basıncında şekillendirilmiş deney örneğinin kalınlık değişimi ile mukayese edildiğinde, daha eşit kalınlık değişimi sunmaktadır.

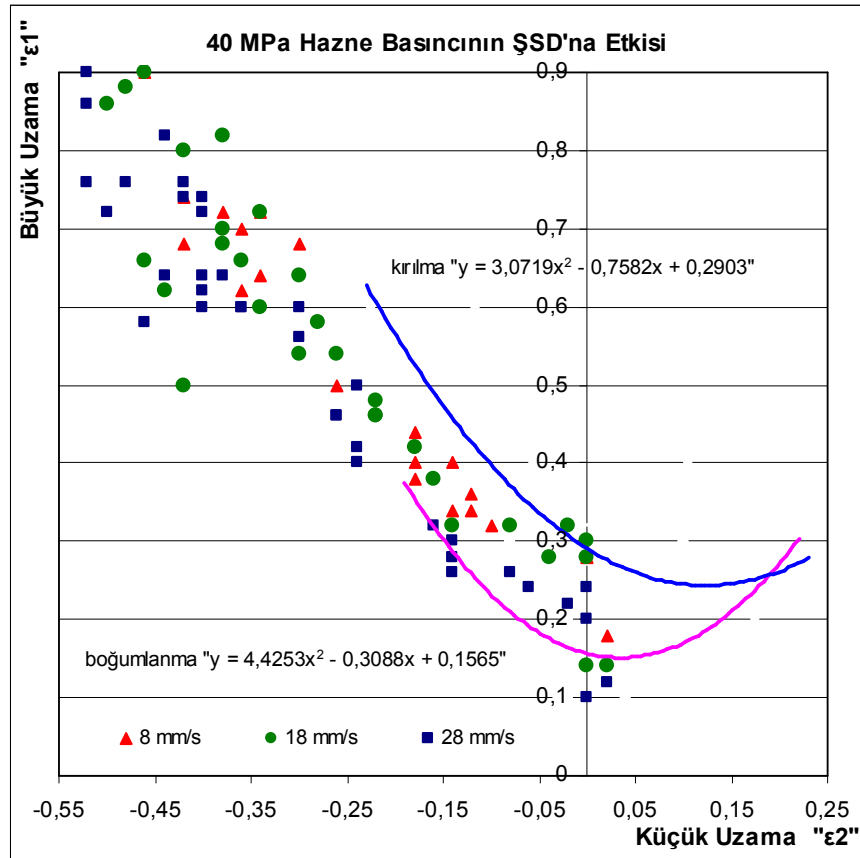
“3” ile “6” noktaları arasındaki incelme daha az olmuş, en ince nokta 0,77 mm olarak ölçülmüştür. Baskı yastığı kuvvetinden kurtulmuş en uç noktadaki kalınlık değişimi de daha az olmuştur. Hidromekanik derin çekmenin sunduğu daha eşit kalınlık dağılımı Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12 40 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi.

8 mm/s şekil değiştirme hızında sac malzemede incelme en az olmuş, 18 mm/s şekil değiştirme hızında ise en eşit kalınlık dağılımı elde edilmiştir. 18 mm/s ve 28 mm/s şekil değiştirme hızında ise eşit kalınlık dağılımı elde edilmiştir. Her iki hızda şekil değiştirme hızına bağlı olarak deney örneğindeki incelmelerin artmış olmasına rağmen sızıntıların azalmış olması, şekil değiştirme hızına bağlı olarak olumsuzlaşan şekillendirme prosesini dengeye getirmiştir. Bu kapsamda, 18 mm/s şekil değiştirme hızlarında yaklaşık eşit uzama dağılımları elde edilmiştir.

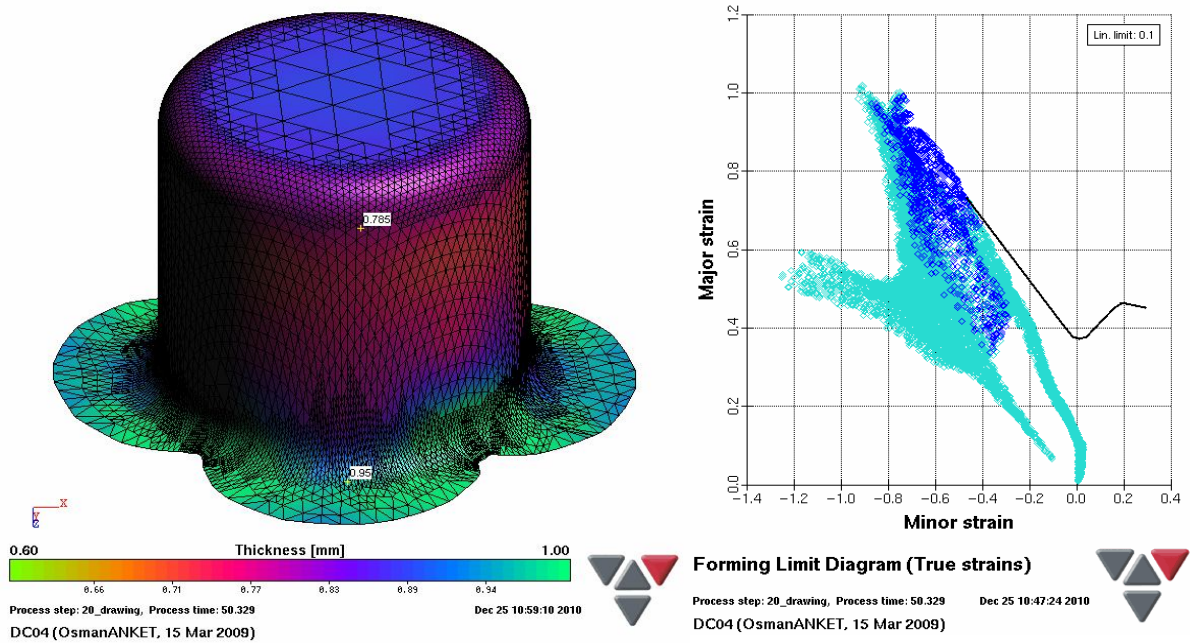
Şekil 5.13'de, Şekil 5.11'de verilen 71 mm çaptaki deney örnekleri üzerinden alınan uzamaların, daha önceden deneysel yolla elde edilmiş olan ŞSD üzerindeki durumu gözlenmektedir. 18 mm/s şekil değiştirme hızında kırılma bölgesine yaklaşılmış, fakat genel olarak kırılma eğrisi ile boğumlanma eğrisi arasında uzama dağılımları elde edilmiştir. 73 mm çaptaki deney örneğinde kırılma olduğu için, uzamalar ŞSD üzerinde gösterilmemiştir.



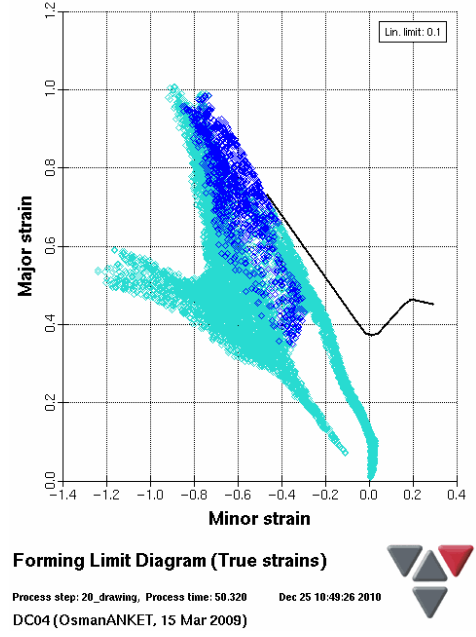
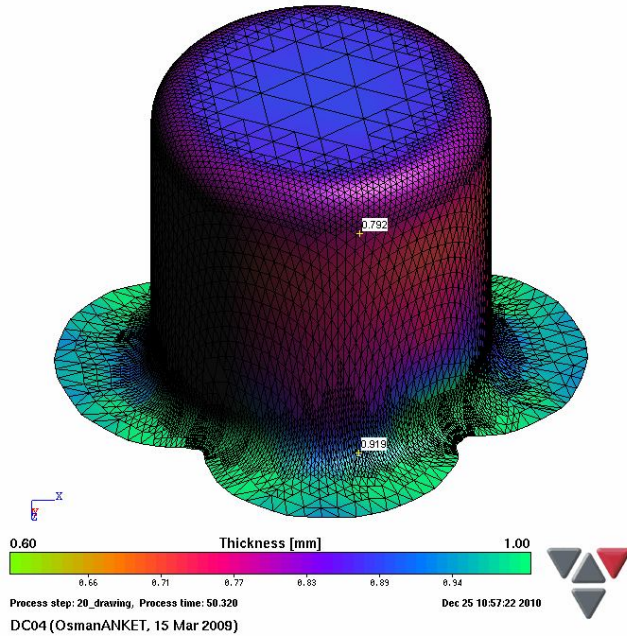
Şekil 5.13 40 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi.

Şekil 5.14’de, 71 mm çaptaki deney örneğinin 1000 N baskı yastığı kuvvetinde, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da aynı malzemenin 2000 N ve 5000 N baskı yastığı kuvvetlerinde AUTOFORM sayısal analiz programında şekillendirilmesi görülmektedir. 2000 N baskı yastığı kuvvetinde deney örneğinde en az incelleme gözlenmiştir. En az incelleme ŞSD eğrileri incelendiğinde de görülecektir. 2000 N baskı yastığı kuvvetinde ŞSD eğrisine en uzak uzama dağılımları elde edilmiştir. Analiz programı baskı yastığı kuvvetinin düşük değerlerinde kalıp açılmasına müsaade etmediğinden kırışma oluşumuna bağlı kırılmalar tam gözlenememiştir. Şekil 5.17’de ise, 73 mm çaptaki deney örneğinin 2000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmesi görülmektedir. Deney örneği çapının büyümesine bağlı olarak baskı yastığı kuvveti çalışma aralığı düşmüş, deney örneğinde aşırı baskı yastığı kuvvetine bağlı erken kırılmalar gözlenmiştir. 40 MPa hazne basıncında, 73 mm çaptaki deney örneğinde çalışılmamasının sebebi, hazne basıncının yetersiz olması sebebi ile daha hassas baskı yastığı kuvveti ihtiyacına bağlanmıştır.

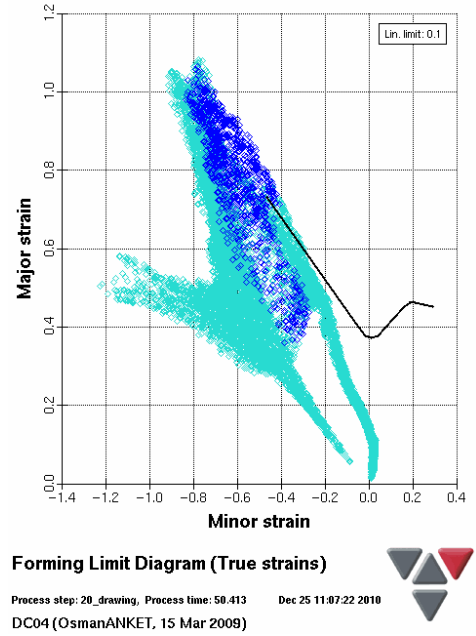
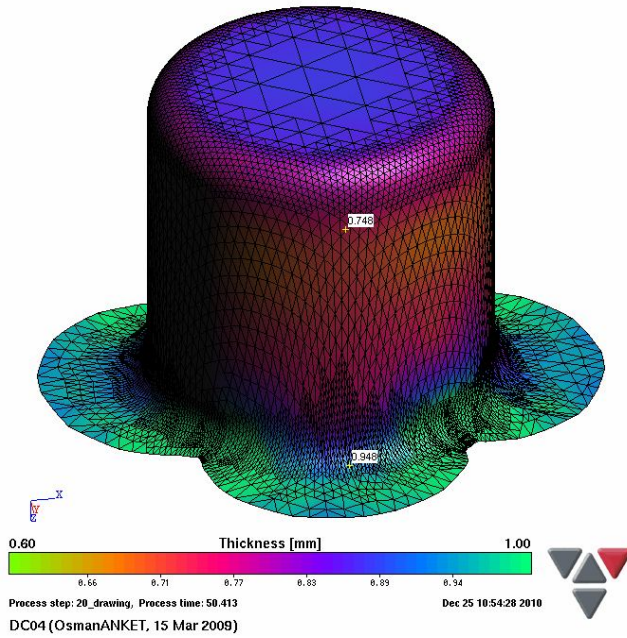
40 MPa hazne basıncında şekillendirme, derin çekme ile hidromekanik derin çekme bölgesine geçiş özellikleri sergilemiştir. Çekme derinliği 35 mm ve derin çekme oranı sınırı “ $D/d=71/30=2,37$ ” olarak gerçekleşmiştir.



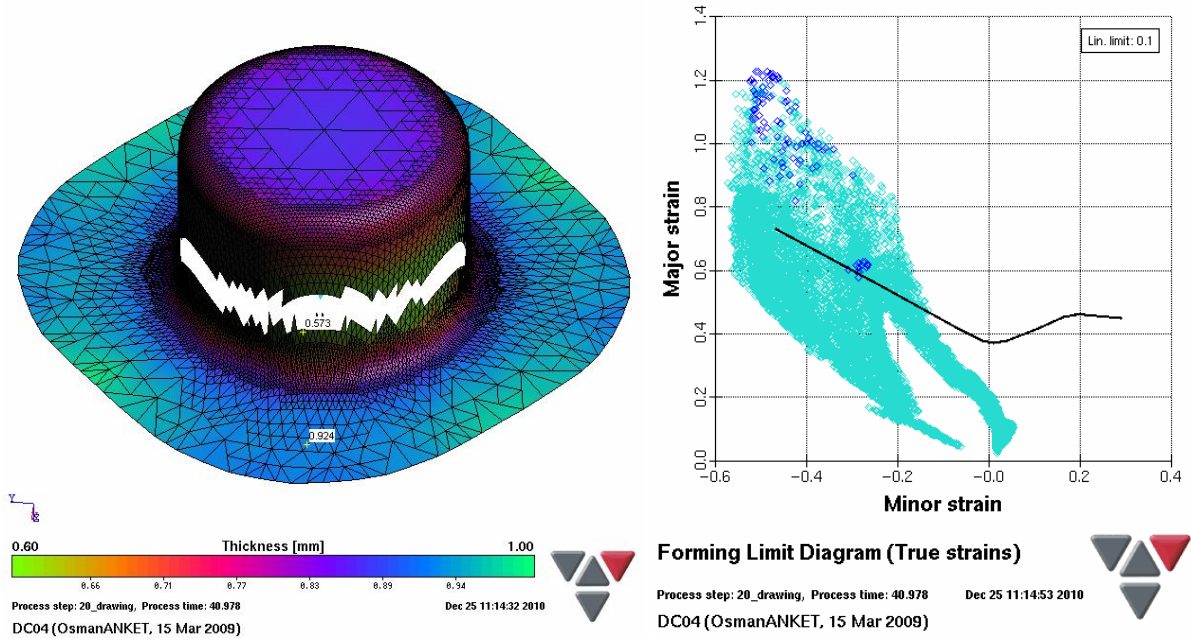
Şekil 5.14 71 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 1000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Şekil 5.15 71 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 2000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Şekil 5.16 71 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 5000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Şekil 5.17 73 mm çaptaki deney örneğinin 40 MPa hazne basıncında 2000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.

5.2.3 50 MPa Hazne Basıncının Hidromekanik Derin Çekme Prosesine Etkileri

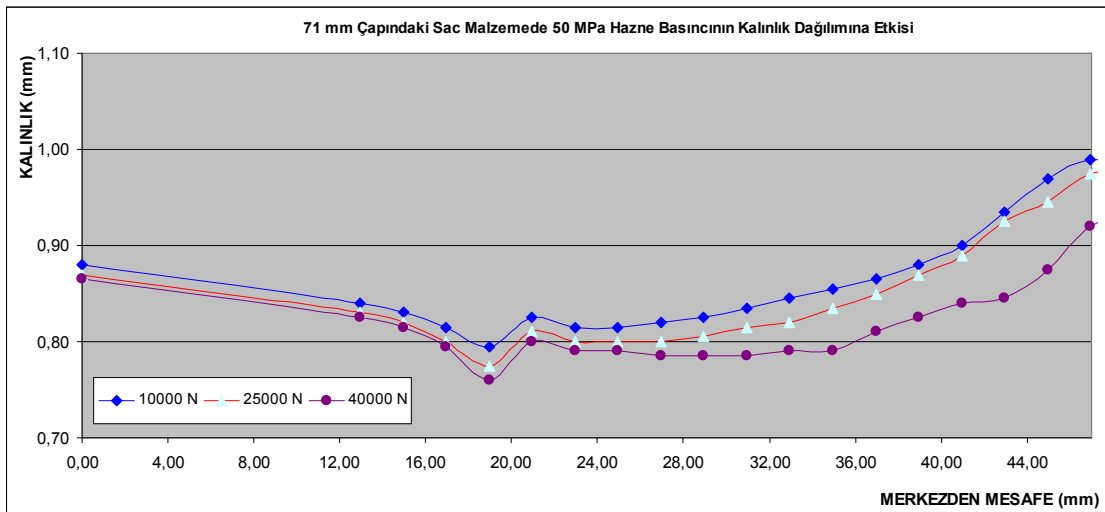
Deney örneğinin, 50 MPa hazne basıncında, hidromekanik yöntem ile şekillendirilmesi mümkün olmuştur. Şekil değiştirme hızı 8 mm/s ile sınırlı kalmış, bu hız değerinin üzerinde çalışma yapılamamıştır. Hidromekanik derin çekme yöntemi özünde şekillendirme hızının düşük olduğu ve bir parçanın üretim süresinin uzun olduğu üzerinde durmaktadır. Şekil 5.18’de, 71 mm çaptaki deney örneğinin 8 mm/s şekil değiştirme hızında şekillendirilmesi sonucu görülmektedir. Şekillendirme derinliği 35 mm’dir. Soldan sağa doğru olma üzere, 10000 N, 25000 N ve 40000 N baskı yastığı kuvvetlerinin şekillendirilmiş parça üzerindeki etkisi görülmektedir. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde ideal şekillendirme noktasına ulaşılmıştır. 40000 N’a kadar baskı yastığı kuvveti artırılabilmiştir. Şekillendirme sürecinde baskı yastığı kuvveti aralığı 1000 N ile 40000 N arasında değişmiştir. 40000 N baskı yastığı kuvveti değerinde deney örneğinin kalıp radyüsü bölgesinde kırılma meydana gelmiştir. Hidromekanik derin çekme

yönteminde, geleneksel derin çekme yönteminden farklı olarak, kırılmalar kalıp radyüsü bölgesinde gerçekleşmektedir. Deneysel çalışmada bu durum elde edilmiştir. Baskı yastığı kuvveti artışının kulak uzamasına etkisi Şekil 5.18’de görülmektedir. Baskı yastığı kuvvetinin artmasıyla deney malzemesindeki uzama artmıştır.



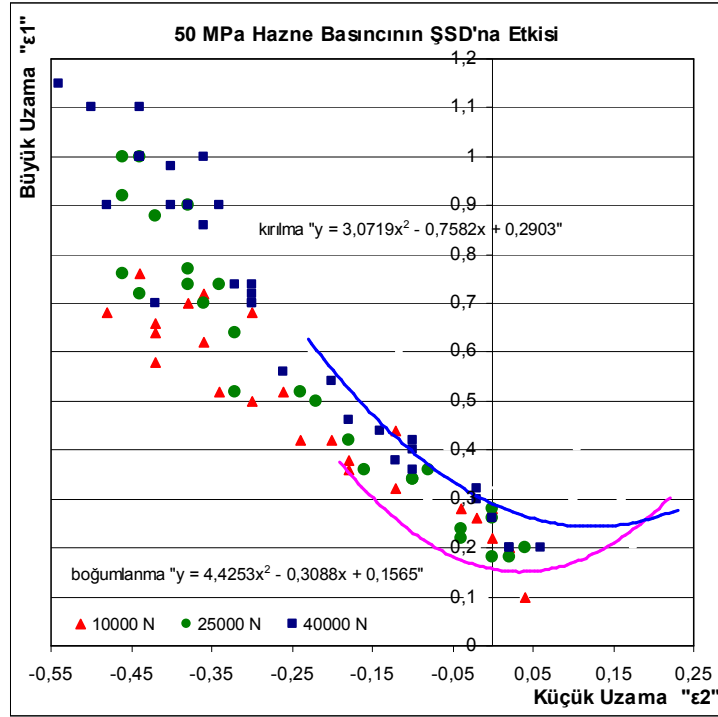
Şekil 5.18 71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi.

Şekil 5.19’da, 71 mm çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri görülmektedir. Baskı yastığı kuvvetinin artışına bağlı olarak deney örneğinde incelmeler artmıştır. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde kalınlık değişimi kabul edilebilir olmuş, 10000 N’da incelme az, 40000 N’da ise aşırı olmuştur. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde en ince nokta 0,775 mm olarak ölçülmüştür.



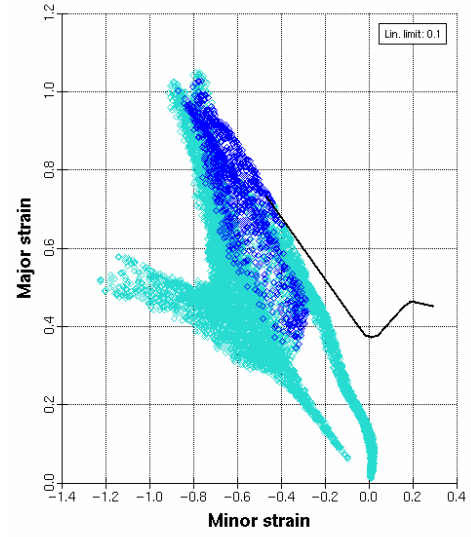
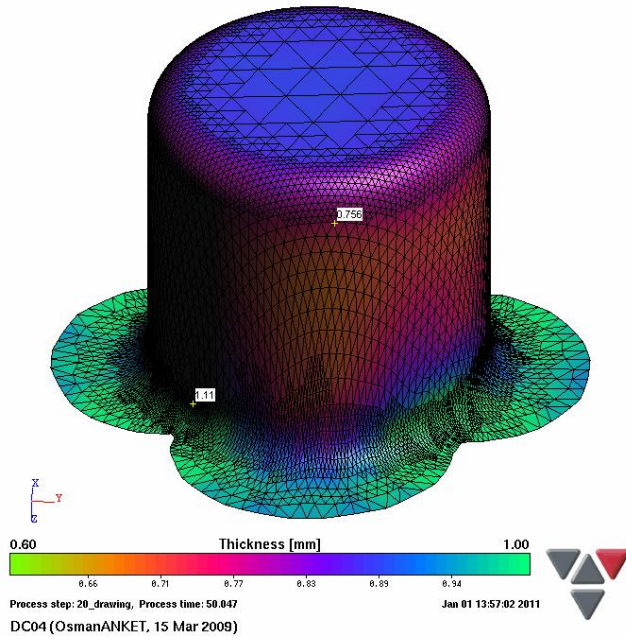
Şekil 5.19 71 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi.

Şekillendirilmiş deney örneği üzerinden ölçülen uzamaların ŞSD'na aktarılmasıyla elde edilen uzama dağılımları Şekil 5.20'de görülmektedir. 40000 N baskı yastığı kuvvetinde kırılma eğrisinin üzerine çıkmıştır. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde kırılma eğrisine yaklaşılmış, 10000 N'da ise kırılma eğrisinin uzağında uzama dağılımları elde edilmiştir. Sac malzemedeki kırılma meydana gelmeden kırılma eğrisine en yakın şekillendirme prosesinin elde edilmesi istenir. Bu kapsamda 25000 N baskı yastığı kuvvetinde ideal şekillendirme prosesinin oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 5.20 71 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi.

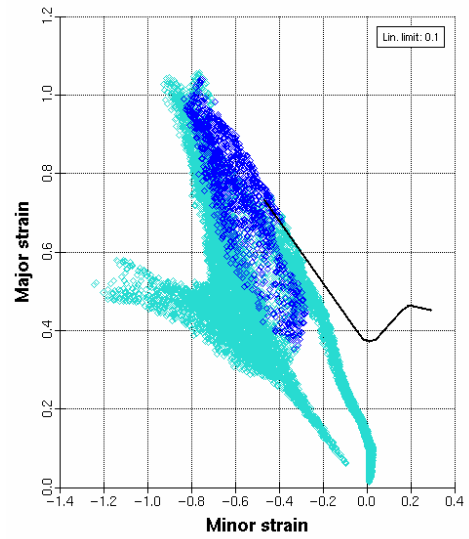
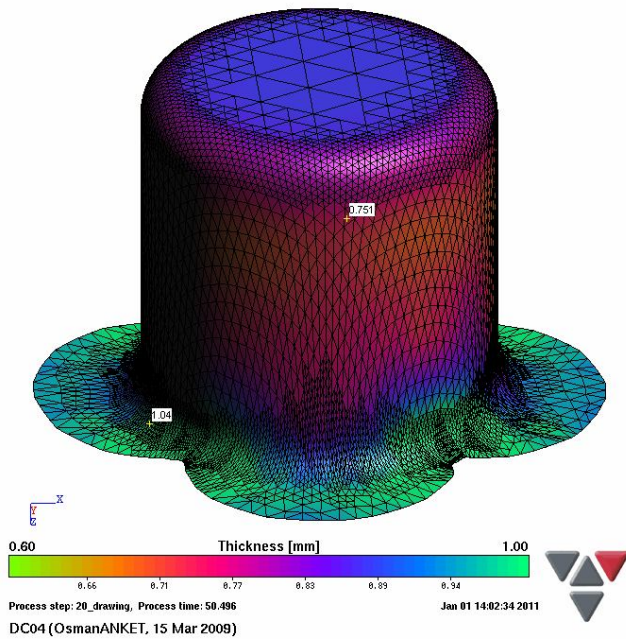
71 mm çaptaki deney örneğinin 10000 N, 25000 N ve 40000 N baskı yastığı kuvvetlerinde AUTOFORM sayısal analiz programında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri ve ŞSD Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'dedir. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. 10000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,756 mm, 25000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,751 mm, ve 40000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,747 mm deney örneğinin en ince noktası olarak tespit edilmiştir.



Forming Limit Diagram (True strains)

Process step: 20_drawing, Process time: 50.047 Jan 01 13:57:20 2011
DC04 (OsmanANKET, 15 Mar 2009)

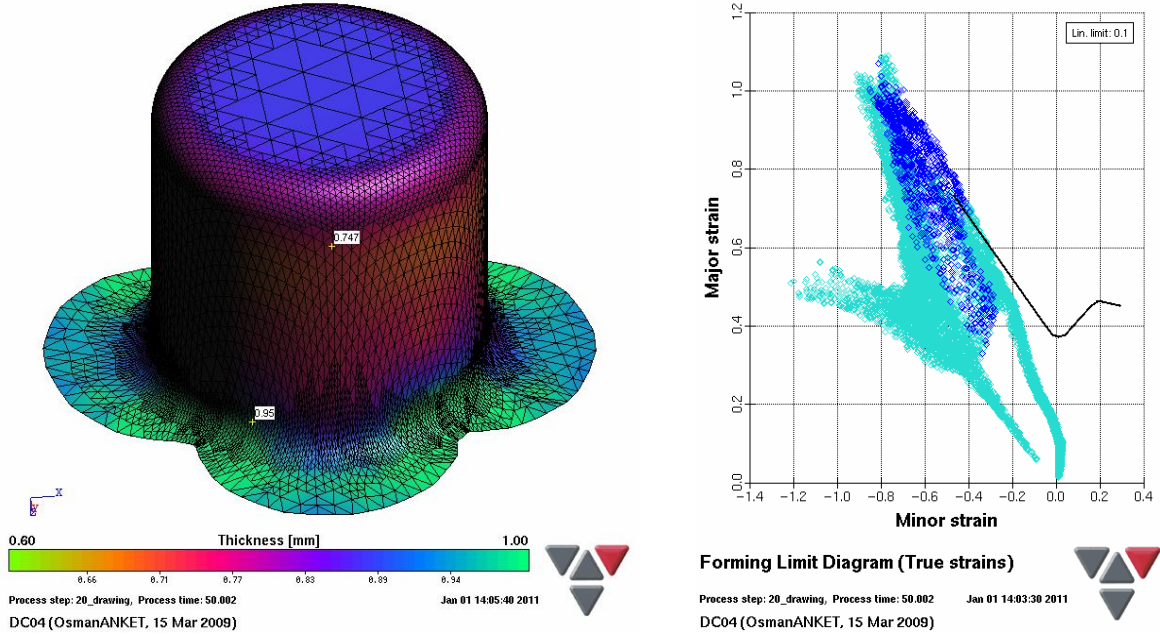
Şekil 5.21 71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 10000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Forming Limit Diagram (True strains)

Process step: 20_drawing, Process time: 50.496 Jan 01 14:00:21 2011
DC04 (OsmanANKET, 15 Mar 2009)

Şekil 5.22 71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Şekil 5.23 71 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 40000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.

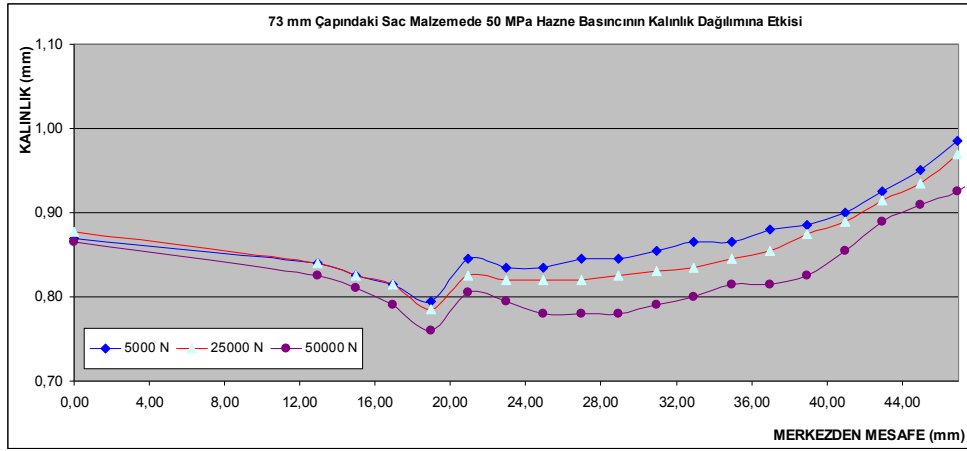
ŞSD'ları incelendiğinde, baskı yastığı kuvvetinin artışına paralel olarak, deney örneğindeki uzamaların diyagram eğrisi üzerine çıktığı görülmektedir. SEY yöntemine dayalı analizler, deneysel sonuçlara göre, deney örneğinde daha fazla incelmeye sebep olmuştur.

73 mm çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızıyla şekillendirilmesi sonu elde edilen ürünler Şekil 5.24'de görülmektedir. Soldaki parça, 5000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmiş, kuvvet yetersizliği sebebi ile flanş bölgesinde kırışmalar oluşmuştur. Kırışma oluşumu, haznedeki sıvının kalıp ile sac malzeme arasından erken sızmasına sebep olmuştur. Ortadaki parça, 25000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmiş ve en az sac malzeme incelmeye elde edilmiştir. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde deney örneğinin en ince noktası 0,785 mm olarak ölçülmüştür. Sağdaki parçada ise 50000 N baskı yastığı kuvveti uygulanmıştır. Soldan sağa doğru olmak üzere, baskı yastığının kuvvetinin artması sac malzemenin flanş bölgesinin büyümesine sebep olmuştur.



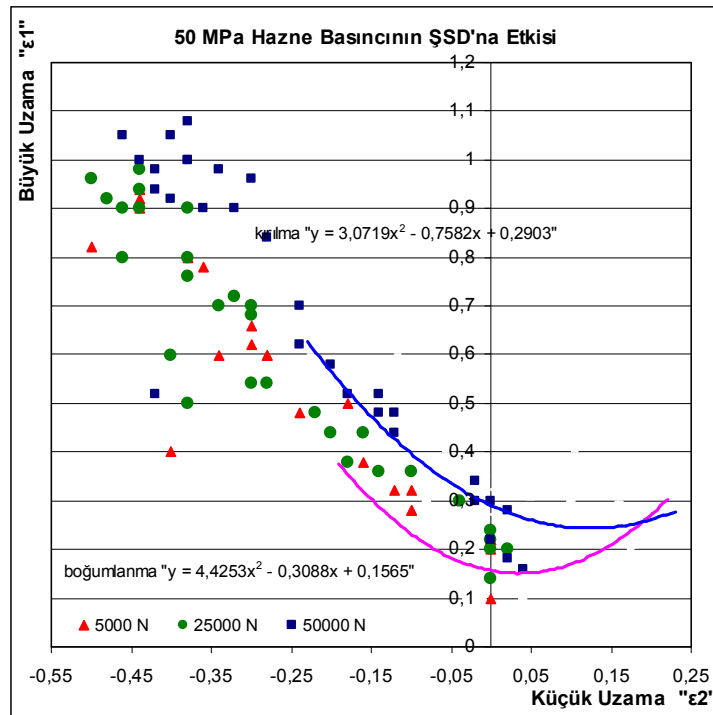
Şekil 5.24 73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi.

73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimi Şekil 5.25’de görülmektedir. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sac malzemenin en ince noktası 0,785 mm olmuş ve ölçüm hattı boyunca çok az değişikliğe uğramıştır. 50000 N baskı yastığı kuvvetinde sac malzemedeki incelmeler artmıştır. Kalınlık dağılımı eğrilerinden de görüldüğü gibi, 50 MPa hazne basıncında 5000 N ile 50000 N arasındaki baskı yastığı kuvveti, en ince noktalar arasındaki inceltme farkını 0,035 mm seviyesinde tutmuştur.



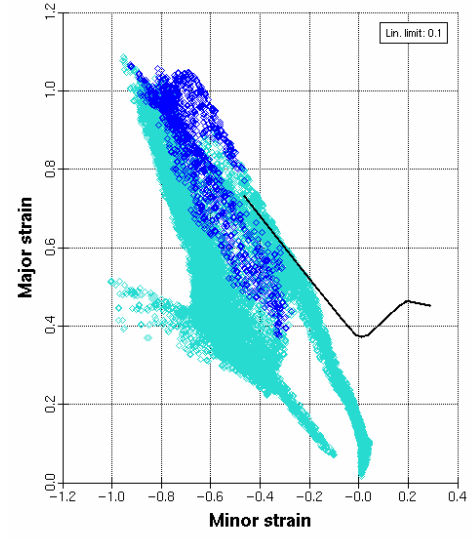
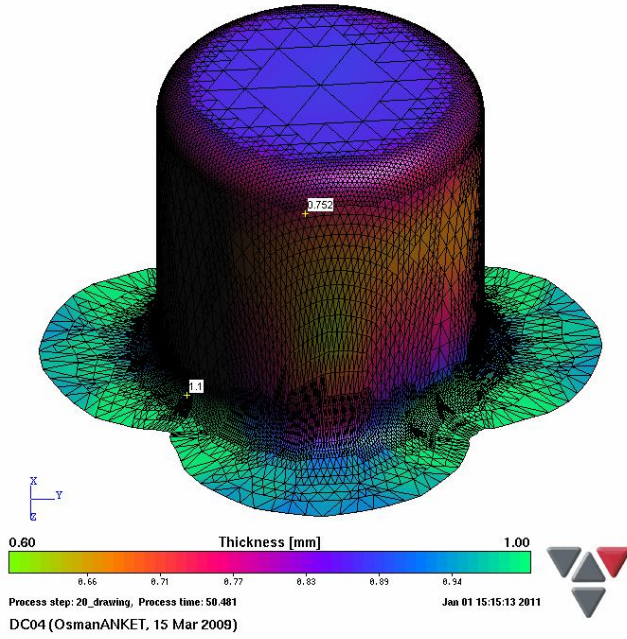
Şekil 5.25 73 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi.

73 mm çaptaki deney örneğinin, 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi esnasında elde edilen uzamaların ŞSD üzerine aktarılması sonucu elde edilen uzama dağılımları Şekil 5.26'da görülmektedir. 5000 N'da, yetersiz baskı yastığı kuvveti sebebi ile oluşan kırılma etkisi neticesinde uzamalar kırılma eğrisine yaklaşmıştır. 25000 N'da kırılma eğrisine yakın uzamalar elde edilmiş, 50000 N baskı yastığı kuvvetinde ise uzamalar kırılma eğrisinin üzerinde çıkarak tehlikeli bölgeye girmiştir.



Şekil 5.26 73 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi.

73 mm çaptaki deney örneğinin, 5000 N, 25000 N ve 50000 N baskı yastığı kuvvetlerinde AUTOFORM sayısal analiz programında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri ve ŞSD Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'dadır. 5000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,752 mm, 25000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,745 mm, ve 50000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,624 mm deney örneğinin en ince noktası olarak tespit edilmiştir.

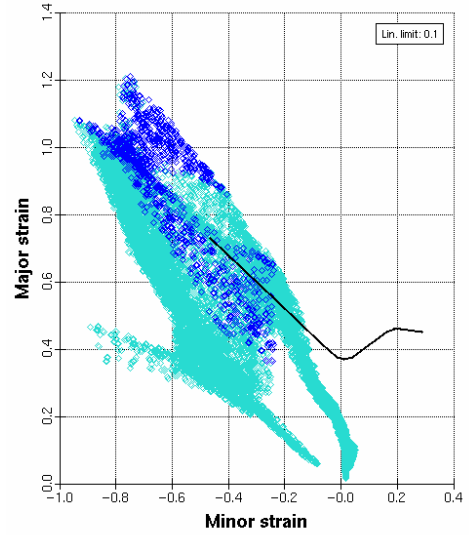
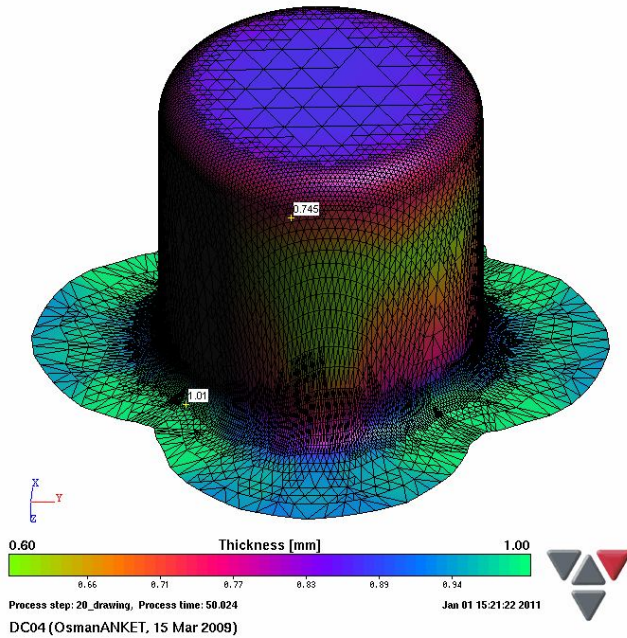


Forming Limit Diagram (True strains)

Process step: 20_drawing, Process time: 50.481 Jan 01 15:15:37 2011

DC04 (OsmanANKET, 15 Mar 2009)

Şekil 5.27 73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 5000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.

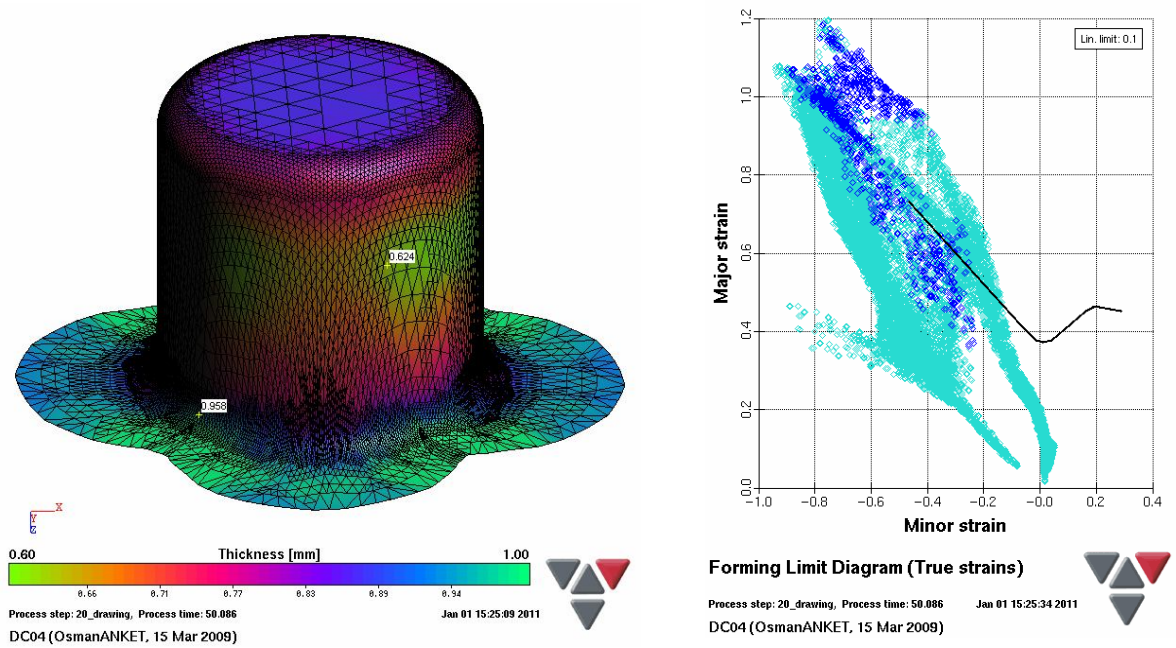


Forming Limit Diagram (True strains)

Process step: 20_drawing, Process time: 50.024 Jan 01 15:21:36 2011

DC04 (OsmanANKET, 15 Mar 2009)

Şekil 5.28 73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Şekil 5.29 73 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 50000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.

ŞSD'ları incelendiğinde, baskı yastığı kuvvetinin artışına paralel olarak, deney örneğindeki uzamaların diyagram eğrisi üzerine çıktığı görülmektedir. SEY yöntemine dayalı analizler, deneysel sonuçlara göre, deney örneğinde daha fazla incelmeye sebep olmuştur. 50000 N baskı yastığı kuvvetinde deney örneği kırılma noktasına gelmiştir. 50000 N baskı yastığı kuvvetinde, deneysel çalışmalardan elde edilen uzamalarda kırılma eğrisinin üzerinde çıkmıştır.

Deneysel çalışmalardaki kırılma eğrisi, uzama noktalarını en iyi temsil eden polinom eğrisi olduğundan, gerçek kırılma eğrisi bu eğrinin daha da altında olabilir. Bu durumda, deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının benzerlik gösterdiği sonucu çıkartılabilecektir.

75 mm çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızında şekillendirilmesi sonu elde edilen ürünler ise Şekil 5.30'da görülmektedir. Soldaki parçaya 2500 N baskı yastığı kuvveti uygulanmış, deney örnek çapının büyük, kalıp temas alanının daha fazla

olmasından dolayı kırışma başlangıcında, kalıp açılması oluşmadan sac malzemede kırılma meydana gelmiştir.

Ortadaki parça, 25000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmiş ve 40 mm çekme derinliğinde parça üretilmiştir. Sağdaki parça ise 40000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmiştir. 40000 N baskı yastığı kuvveti, şekillendirme prosesini kırılma sınırına yaklaşmıştır. Baskı yastığı kuvvetinin artışına paralel olarak kulak oluşumları da artmıştır.



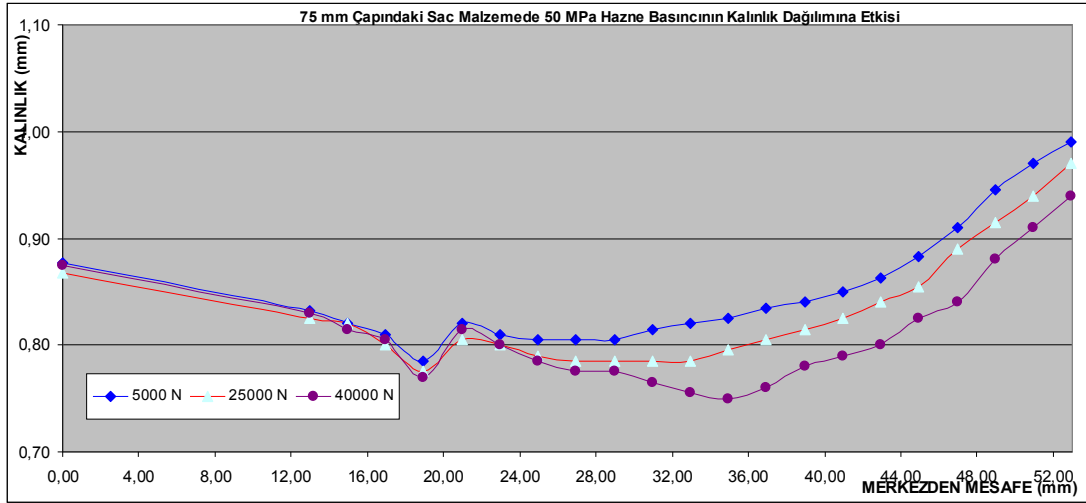
Şekil 5.30 75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi.

Hidromekanik derin çekmede farklı kırılma türleri gözlenebilmektedir. Şekil 5.31’de bu kırılma örnekleri görülmektedir. Soldaki ve ortadaki örnekte 75 mm çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızı ve 40000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmesi sonucu meydana gelen kırılma görülmektedir. Hazne basıncına bağlı olarak baskı yastığı kuvvetinin yüksek olması, şekillendirilmiş parçadaki en ince noktanın kalıp radyüsü bölgesine kaymasına sebep olmuş ve sac malzeme bu noktada kırılmıştır. Sağdaki örnekte ise aşırı baskı yastığı kuvveti sebebi ile (50000 N) sac malzeme daha şekillenmeden kırılma meydana gelmiştir.



Şekil 5.31 75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi sonucu oluşan kırılma çeşitleri.

75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimi Şekil 5.32’de görülmektedir. 25000 N baskı yastığı basıncında en ince nokta 0,775 mm olarak elde edilmiştir.

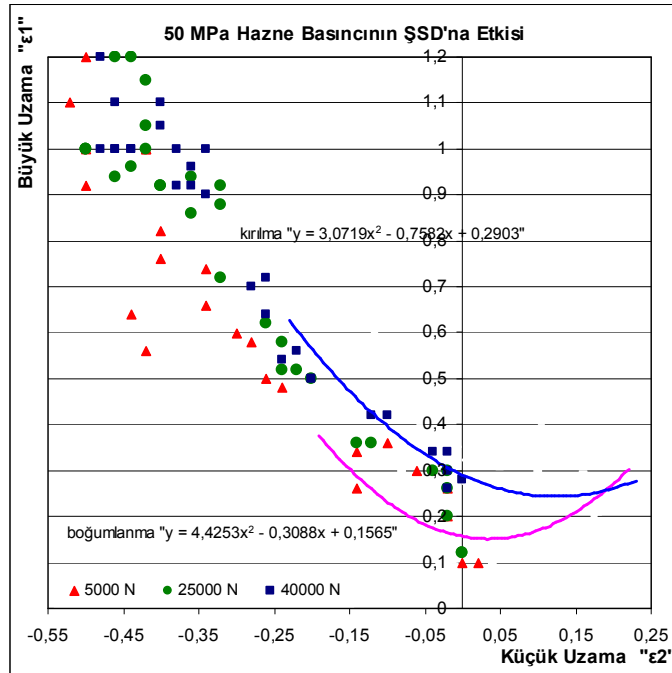


Şekil 5.32 75 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının kalınlık dağılımına etkisi.

Elde edilen deney örneğinin kalınlığı ölçüm hattı boyunca bir süre sabit kalmıştır. 40000 N baskı yastığı kuvvetinde 2 adet en ince nokta oluşmuştur. 12 nolu ölçüm

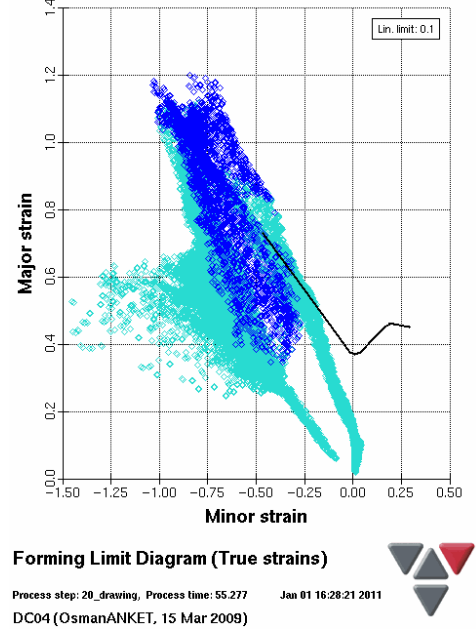
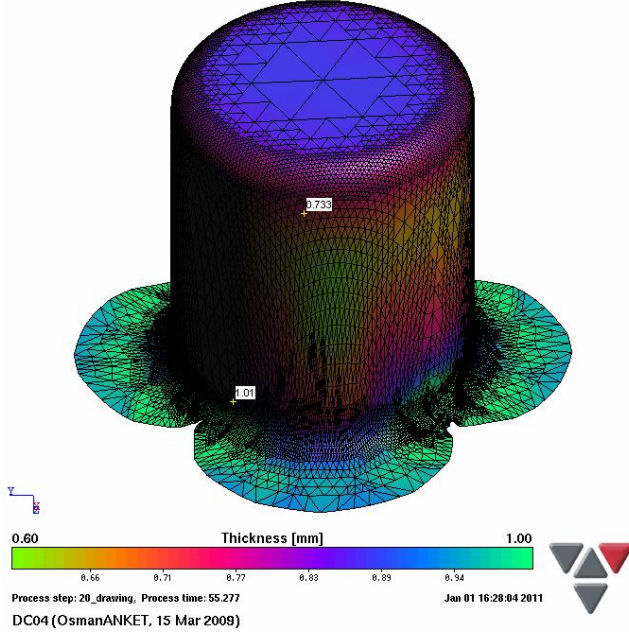
noktasında 4 nolu ölçüm noktasına göre daha fazla incelme meydana gelmiştir. 12 nolu ölçüm noktası kırılma incelmeye ulaşmıştır. 12 nolu nokta deney örneği merkezinden 35 mm mesafeye tekabül etmektedir. Deney örneği derinliği olarak ta 20 mm derinliğe tekabül etmektedir. 75 mm deney örneğindeki kırılma noktası gerçek hidromekanik derin çekme şartlarının oluştuğunu göstermektedir. Hidromekanik derin çekmede kalınlık değişimi geleneksel yöntemle göre daha az olmaktadır. Şekil 5.32’de bu durum görülmektedir. Baskı yastığı kuvvetinin artması en ince noktadaki kalınlık değişimini fazla etkilememiştir. En ince noktanın kalınlığının değişmemesi hazne basıncının uygunluğundan kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.33’de, 75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında şekillendirilmesi sonucu elde edilen uzama dağılımları görülmektedir. Düşük ve yüksek baskı yastığı kuvvetlerinde kırılma eğrisine daha uzak veya kırılma eğrisi üzerinde uzama dağılımları elde edilmiştir. 25000 N baskı yastığı kuvvetinde kırılma eğrisine en yakın, şekillendirme sonrasında hedeflenen uzama dağılımları elde edilmiştir. Çap büyümesine bağlı olarak negatif küçük uzamalar arttıkça büyük uzamada artmıştır. Deney örneğinin büyük kısmı çekme-basma bölgesinde şekillenmiştir.

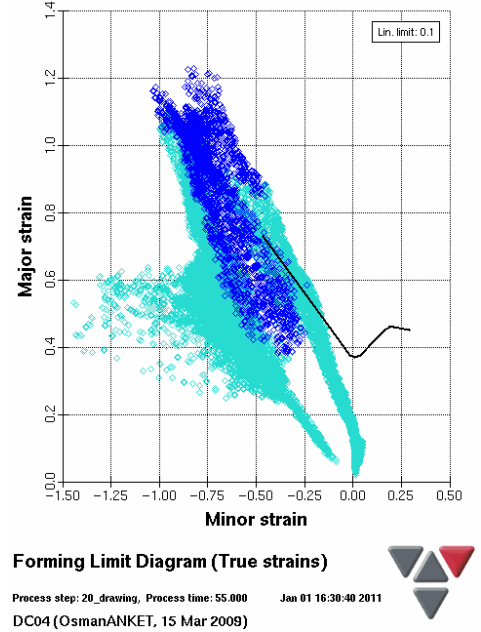
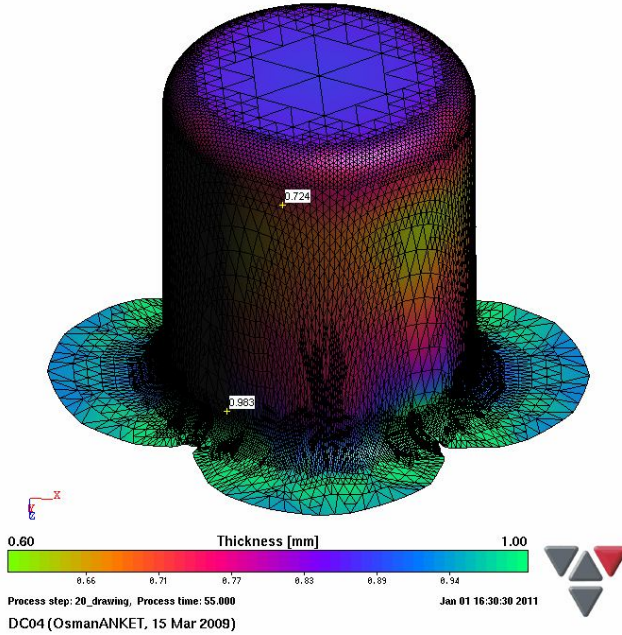


Şekil 5.33 75 mm çaptaki deney örneğinde 50 MPa hazne basıncının ŞSD'na etkisi.

75 mm çaptaki deney örneğinin, 50 MPa hazne basıncında, 5000 N, 25000 N ve 40000 N baskı yastığı kuvvetlerinde AUTOFORM sayısal analiz programı ile analizi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri ve ŞSD Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da görülmektedir.

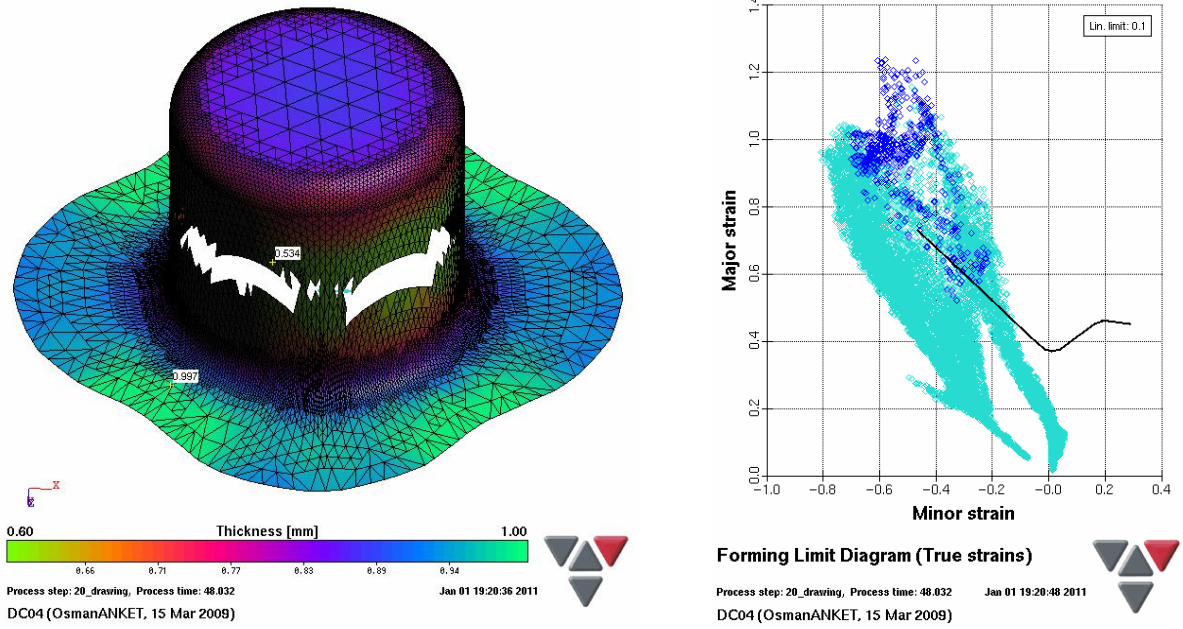


Şekil 5.34 75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 5000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.



Şekil 5.35 75 mm çaptaki deney örneğinin 50 MPa hazne basıncında 25000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.

5000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,733 mm, 25000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,724 mm, ve 40000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,534 mm deney örneğinin en ince noktası olarak tespit edilmiştir. 40000 N baskı yastığı kuvvetinde, deneysel çalışmalar esnasında, deney örnekleri hem kırılmış hem şekillendirilmiştir. Her iki durumda gerçekleşmiştir. Kırılma noktası, yaklaşık 20 mm deney örneği derinliğinde gerçekleşmiştir. ŞSD analiz sonuçlarına göre, ŞSD eğrisinin biraz üzerinde oluşturulan hidromekanik derin çekme prosesleri en doğru prosesler olacaktır. Baskı yastığı kuvveti artışına bağlı olarak kulak oluşumları da artmıştır.



Şekil 5.36 75 mm çaptaki deney örneğininin 50 MPa hazne basıncında 40000 N baskı yastığı kuvvetinde sayısal analizi.

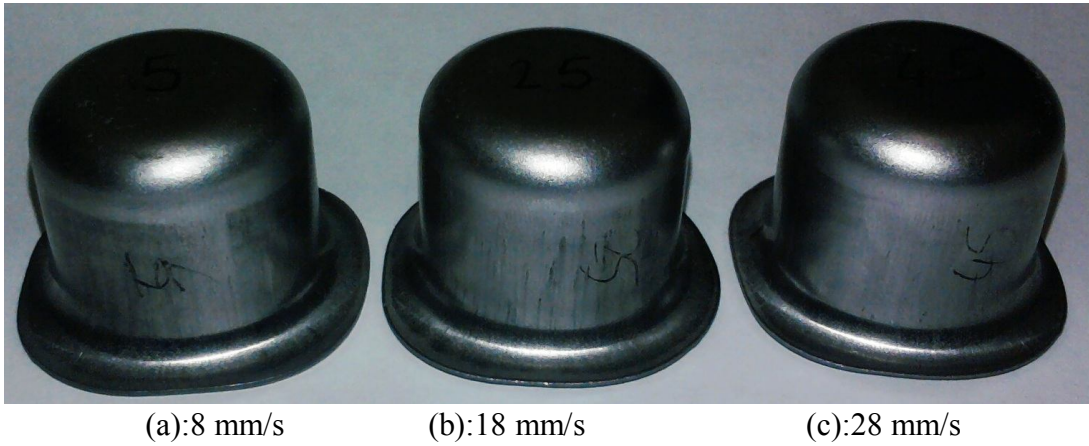
Analiz sonuçlarındaki uzamaların, deneysel çalışmada olduğu gibi çekme-basma bölgesinde olduğu gözlenmektedir. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

5.3 Geleneksel Derin Çekme Prosesinin Deneysel Çalışması ve Sayısal Analizi

Geleneksel derin çekme prosesinin deneysel ve sayısal analiz çalışmalarında; 3 farklı çapta deney örnekleri, şekil değiştirme hızı ve baskı yastığı kuvveti değişkenleri kullanılarak, kırışma/kırılma oluşumu, kalınlık değişimi, ŞSD üzerindeki uzama dağılımları ve derin çekme oranı sınırı kriterleri yönüyle değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma şartları, AUTOFORM sayısal analiz yazılımı ile simülasyon edilmiş ve elde edilen sonuçlar mukayese edilmiştir.

5.3.1 Şekil Değiştirme Hızının Geleneksel Derin Çekme Prosesine Etkileri

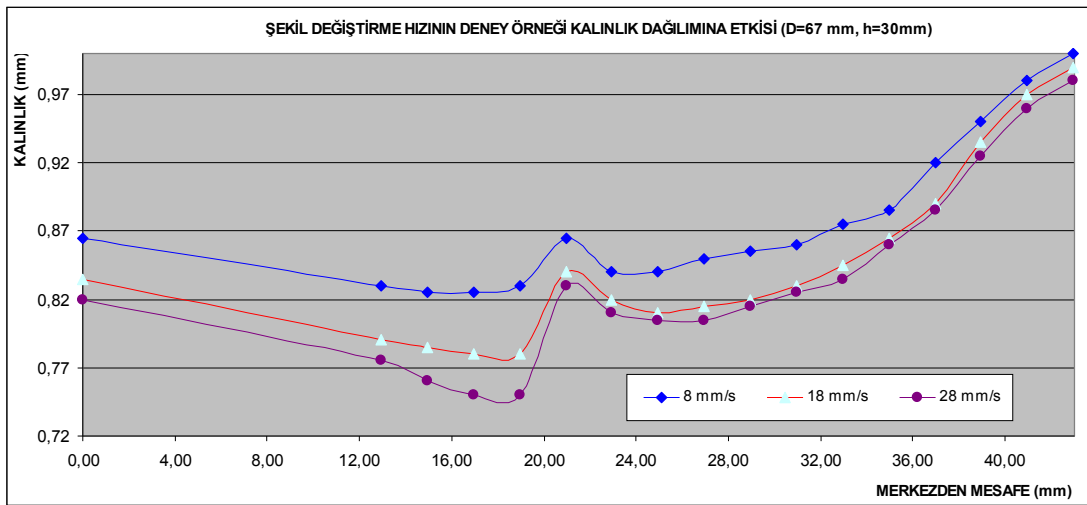
67 mm ilk çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s, 18 mm/s ve 28 mm/s şekil değiştirme hızlarında şekillendirilmesi sonucu elde edilen ürünler Şekil 5.37’de görülmektedir. Baskı yastığı kuvveti 2500 N olup çekme derinliği 30 mm’dir.



Şekil 5.37 67 mm çapta farklı şekil değiştirme hızlarında elde edilmiş ürünler.

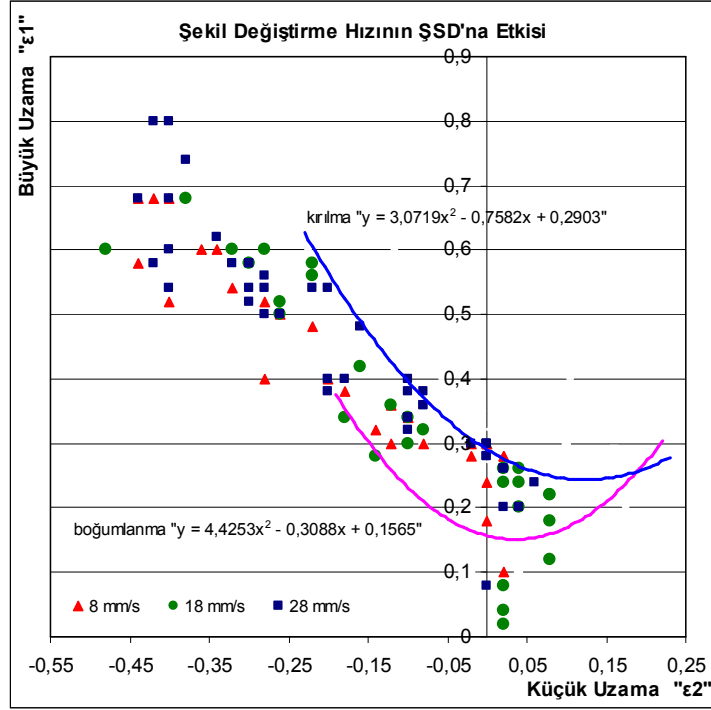
Geleneksel derin çekme prosesinde, şekil değiştirme hızının artması, deney örneğindeki incelmeyi artırmıştır. Şekil 5.38’de, geleneksel derin çekme yöntemi ile, 67 mm ilk çaptaki deney örneğinin, 2500 N baskı yastığı kuvvetinde, 30 mm çekme

derinliğinde, farklı şekil değiştirme hızlarında şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri görülmektedir. Deney örneği kalınlık ölçüm noktaları hidromekanik derin çekme yönteminde uygulanan noktaların aynısıdır. 8 mm/s şekil değiştirme hızında elde edilen deney örneğinde, en ince noktanın kalınlığı 0,825 mm olarak ölçülmüştür. Bu noktadaki kalınlık, şekil değiştirme hızının artmasına bağlı olarak düşmüştür. 18 mm/s şekil değiştirme hızında 0,780 mm ve 28 mm/s şekil değiştirme hızında 0,750 mm olmuştur. 8 mm/s şekil değiştirme hızında, deney örneğinin kulak kısmındaki kalınlık (flanş kısmı) ise 1 mm olmuştur. Deneysel çalışmalarda; geleneksel derin çekme yönteminde, daha az sac malzeme incelmesi için, daha düşük şekil değiştirme hızlarının tercih edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Fakat, geleneksel derin çekmede 1 parçanın üretim süresinin kısa olması istenir. Çünkü, geleneksel derin çekme prosesi seri üretime ve yüksek hacimli parçaların üretimine uygundur.



Şekil 5.38 67 mm çapta şekil değiştirme hızının deney örneği kalınlık dağılımına etkisi.

Şekil değiştirme hızına bağlı olarak deney örneğinin kalınlığındaki incelmeler artmıştır. Deney örneği üzerine çizilen dairelerin uzamaları da incelmelere bağlı olarak artmıştır. Daireler üzerinden alınan uzamaların ŞSD üzerine aktarılması sonucu elde edilen uzama değişimleri Şekil 5.39'da verilmiştir. 8 mm/s şekil değiştirme hızında elde edilen uzamalar, kırılma eğrisine en uzak çıkmış, 28 mm/s şekil değiştirme hızında elde edilen uzamalar ise en yakın çıkmıştır.



Şekil 5.39 67 mm çapta şekil değiştirme hızının ŞSD'na etkisi.

5.3.2 Baskı Yastığı Kuvvetinin Geleneksel Derin Çekme Prosesine Etkileri

Geleneksel derin çekme prosesinde, zıt basınç olmaması sebebi ile ihtiyaç duyulan baskı yastığı kuvveti azalmıştır. Şekil 5.40'da, farklı baskı yastığı kuvveti ile şekillendirilmiş deney örnekleri görülmektedir. Deney örneği çapı 67 mm, şekil değiştirme hızı 8 mm/s ve şekillendirme derinliği 30 mm'dir. Baskı yastığı kuvvetinin artışına bağlı olarak deney örneğinde incelmeler ve uzamalar artmıştır.



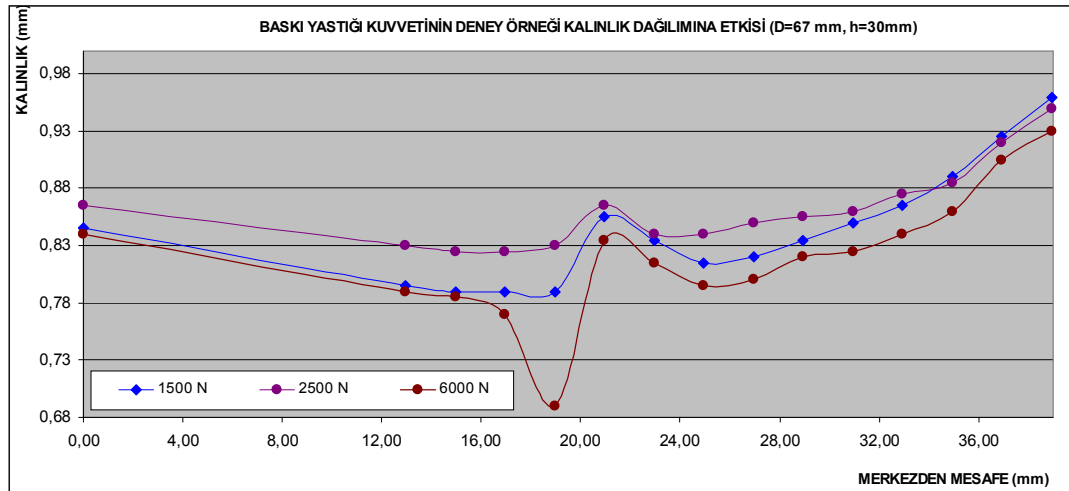
Şekil 5.40 Baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkileri.

1500 N baskı yastığı kuvvetinde deney örneğinde kırışmalar meydana gelmiştir. 6000 N baskı yastığı kuvvetinde ise deney örneğinde zımba burnu bölgesinde aşırı incelme meydana gelmiştir. 6000 N baskı yastığı kuvvetinde deney örneği bir şekillenmiş, bir kırılmıştır. Kırılma sonrası görünüm Şekil 5.41'dedir.



Şekil 5.41 6000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmiş deney örneği.

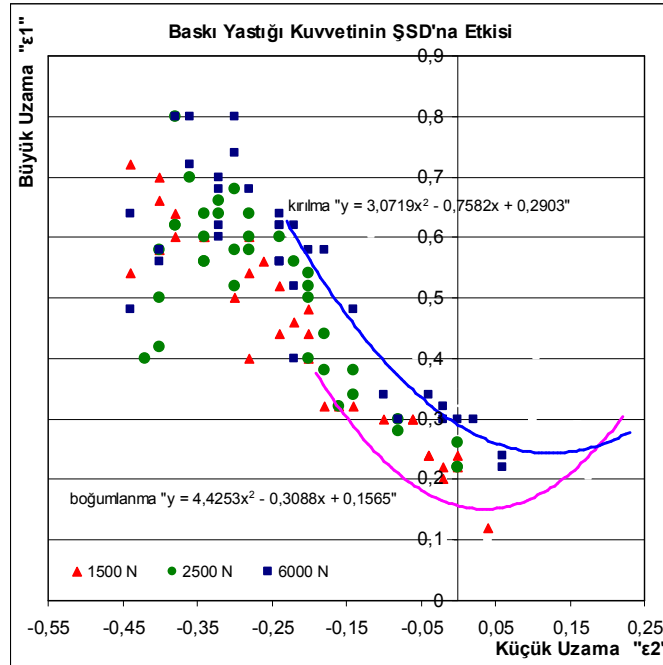
67 mm ilk çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızında, farklı baskı yastığı kuvvetlerinde şekillendirilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri Şekil 5.42'dedir. Şekillendirme derinliği 30 mm'dir.



Şekil 5.42 Baskı yastığı kuvvetinin deney örneği kalınlık dağılımına etkisi.

Baskı yastığı kuvveti artışına bağlı olarak deney örneğinin tüm yüzeylerinde incelme meydana gelmiştir. 1500 N baskı yastığı kuvvetinde en ince nokta 0,790 mm, 2500 N baskı yastığı kuvvetinde en ince nokta 0,825 mm ve 6000 N baskı yastığı kuvvetinde en ince nokta 0,690 mm olarak ölçülmüştür. 1500 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirme esnasında kırışmalar olduğundan, deney örneğinin flanş kısmındaki kalınlaşma diğer örneklerin üzerine çıkarak 0,96 mm olmuştur. 6000 N baskı yastığı kuvvetinde deney örnekleri kırılma noktasına gelmiştir. Kırılma oluşumu zımba uç bölgesine yakın gerçekleşmiştir. 2500 N baskı yastığı basıncında en az kalınlık değişimi elde edilmiştir.

Baskı yastığı kuvvetinin değişimine bağlı olarak deney örneğindeki uzamalar da değişmiştir. Baskı yastığı kuvvetinin artması deney örneğinin daha fazla uzamasına ve incelmeye sebep olmuştur. Şekil 5.43'de, 67 mm ilk çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızında şekillendirilmesi sonucu elde edilen ŞSD görülmektedir.

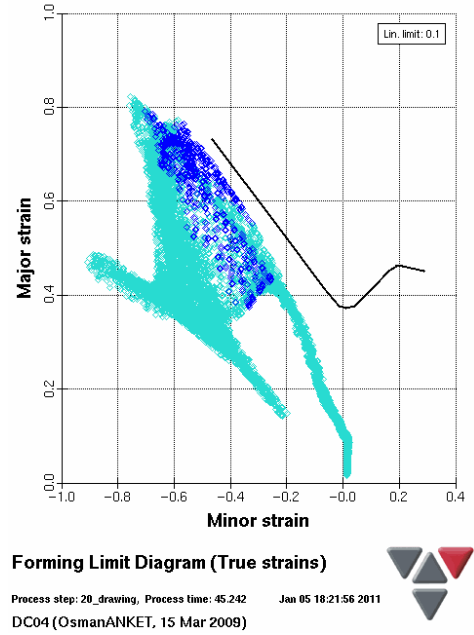
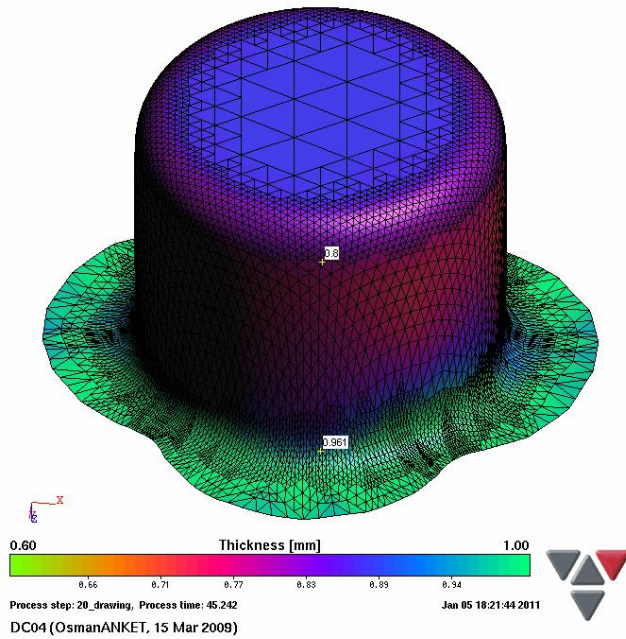


Şekil 5.43 Baskı yastığı kuvvetinin ŞSD'na etkisi.

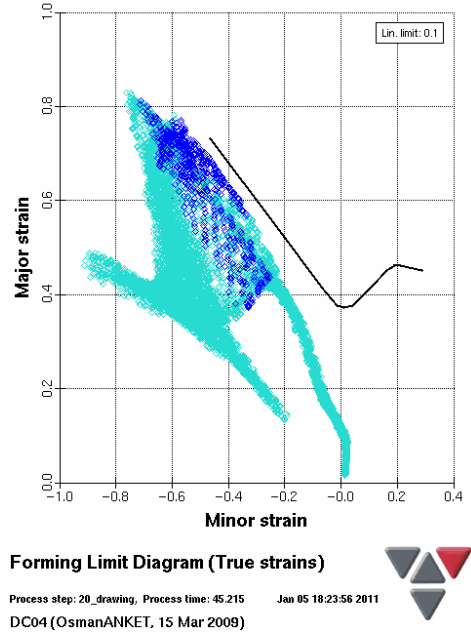
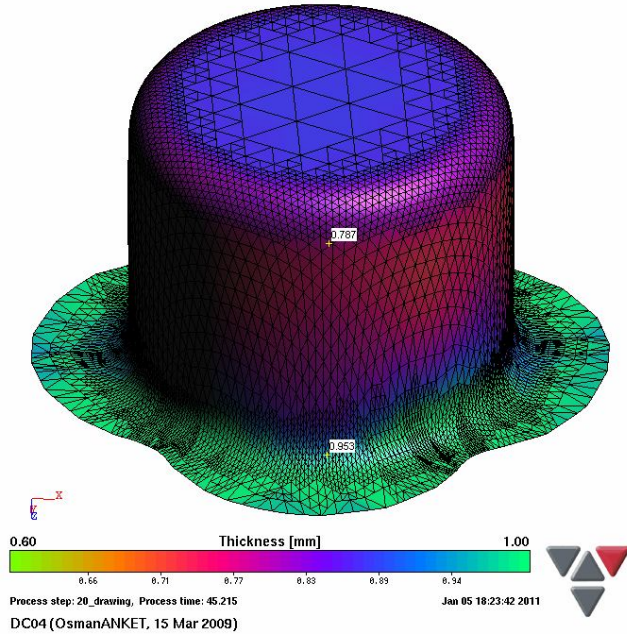
Şekillendirme derinliği 30 mm'dir. 1500 N baskı yastığı kuvvetinde, zımba uç bölgesine yakın incelme olduğu, baskı yastığı kuvvetinin ŞSD'na etkisi diyagramından

görülmektedir. 1500 N baskı yastığı kuvvetinde, büyük uzamaların, yani zımba radyüs bölgesindeki incelmelerin artışı grafikten gözlenmektedir. Çekme-çekme bölgesinde (zımba radyüs bölgesi) incelme daha fazla olmuştur. 6000 N baskı yastığı kuvvetinde ise uzamalar kırılma eğrisinin üzerine çıkmıştır.

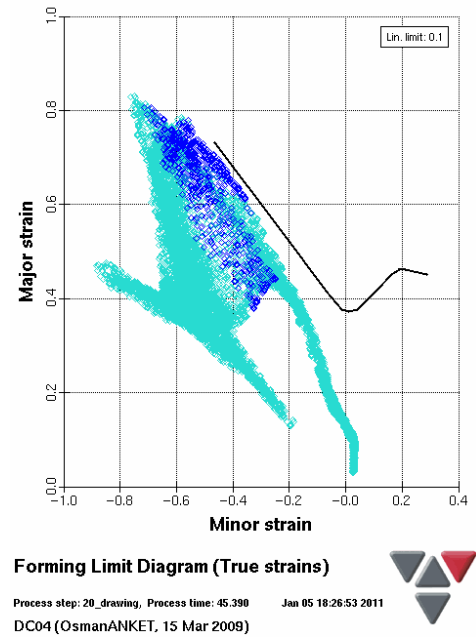
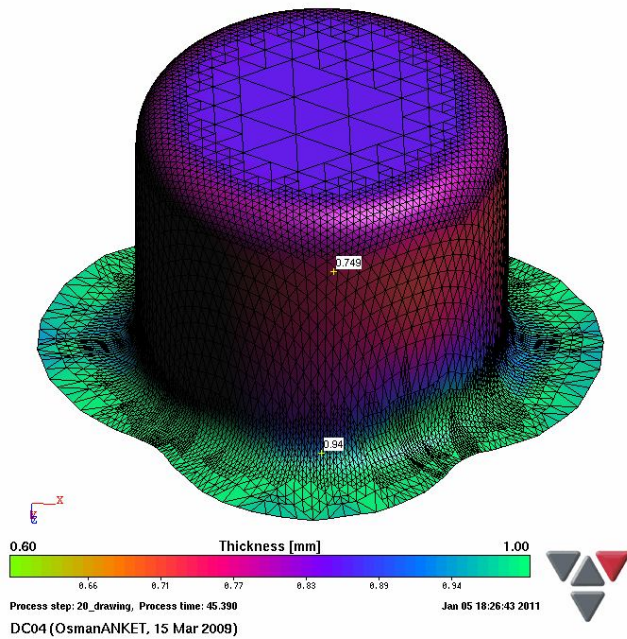
67 mm ilk çaptaki deney örneğinin, farklı baskı yastığı kuvvetlerinde, AUTOFORM sayısal analiz programı ile analiz edilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri ve ŞSD üzerindeki uzama dağılımları Şekil 5.44, Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da görülmektedir. Baskı yastığı kuvvetinin artışına paralel olarak deney örneğinde incelmeler artmış ve uzama dağılımları kırılma eğrisine yaklaşmıştır. Baskı yastığı kuvvetinin düşük değerlerinde, sayısal analiz programı, kalıp açılmasına müsaade etmediğinden, kırışma oluşumları ve kırışmalara bağlı kırılma oluşumları elde edilememiştir. 2500 N baskı yastığı kuvvetinde, deney örneğindeki en ince nokta 0,8 mm, 4000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,787 mm ve 6000 N baskı yastığı kuvvetinde 0,749 mm olmuştur. Deney örneğinin kalınlık değişimleri ve ŞSD üzerindeki uzamaları dikkate alındığında, deneysel sonuçlar ile AUTOFORM sayısal analiz programından SEY'ne dayalı elde edilen analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.44 2500 N baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi.



Şekil 5.45 4000 N baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi.



Şekil 5.46 6000 N baskı yastığı kuvvetinin geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi.

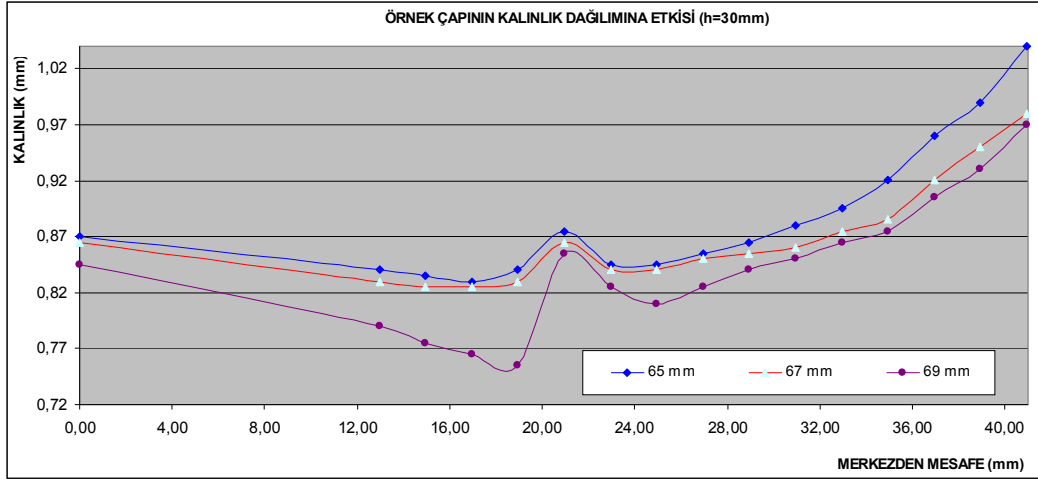
5.3.3 Deney Örneği Çapının Geleneksel Derin Çekme Prosesine Etkileri

Deney örneği çapının artmasına bağlı olarak, geleneksel derin çekme prosesinde iki kalıp arasındaki deney örneğinin kalan kısmının artması nedeniyle, kalınlıktaki incelmeler de artmıştır. Şekil 5.47’de 3 farklı çaptaki deney örneğinin, 8 mm/s şekil değiştirme hızında, 30 mm şekillendirme derinliğinde ve sırasıyla 3000 N, 2500 N ve 1000 N baskı yastığı kuvvetinde şekillendirilmesi sonucu elde edilen ürünler görülmektedir.



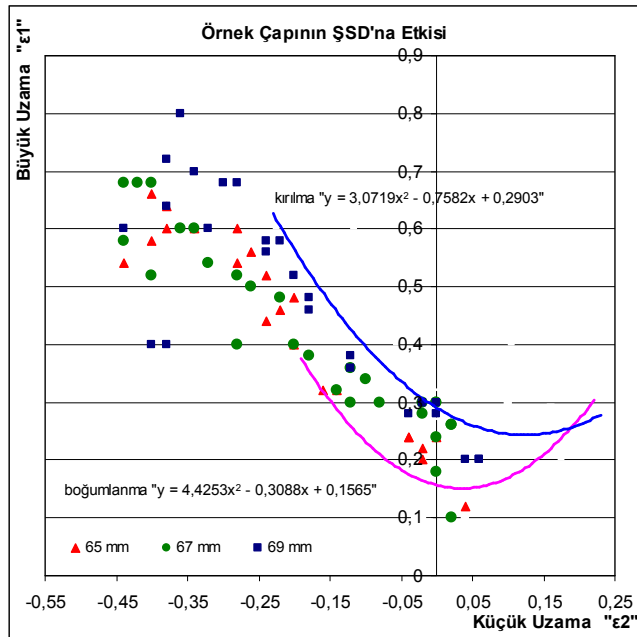
Şekil 5.47 İlk örnek çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisi.

Aynı örneklerden elde edilen kalınlık değişimleri ise Şekil 5.48’de görülmektedir. Deney örneğinin çapının artmasına bağlı olarak, ihtiyaç duyulan baskı yastığı kuvveti miktarı azalmıştır. 69 mm çaptaki deney örneğinde 1000 N’un altındaki ve üstündeki baskı yastığı kuvvetleri şekillendirmeyi olumsuz etkilemiştir. 1000 N’un altındaki baskı yastığı kuvvetleri kırışmaya, üzerindeki baskı yastığı kuvvetleri ise kırılmaya sebep olmuştur. Kalınlık dağılımı eğrisinden de bu durum görülmektedir. 69 mm çaptaki deney örnekleri çok dar bir aralıkta baskı yastığı kuvveti değişimi ile şekillendirilebilmiştir. Bu çaptaki çalışmanın çok sınırdaki olduğu, küçük baskı yastığı kuvvetlerinde kırışma veya kırılma meydana gelmesinden anlaşılmıştır. Geleneksel derin çekme prosesinde, mevcut kalıp radyüsü ve kalıp boşlukları ile, 67 mm çapın üzerindeki deney örneklerinin kabul edilebilir kalınlıkta üretilmesi mümkün olmamıştır. 65 mm çaptaki deney örneğinin en ince noktası 0,830 mm, 67 mm çaptaki deney örneğinin en ince noktası 0,825 mm ve 69 mm çaptaki deney örneğinin en ince noktası 0,755 mm olmuştur.



Şekil 5.48 Deneş örneği çapının kalınlık dağılımına etkisi.

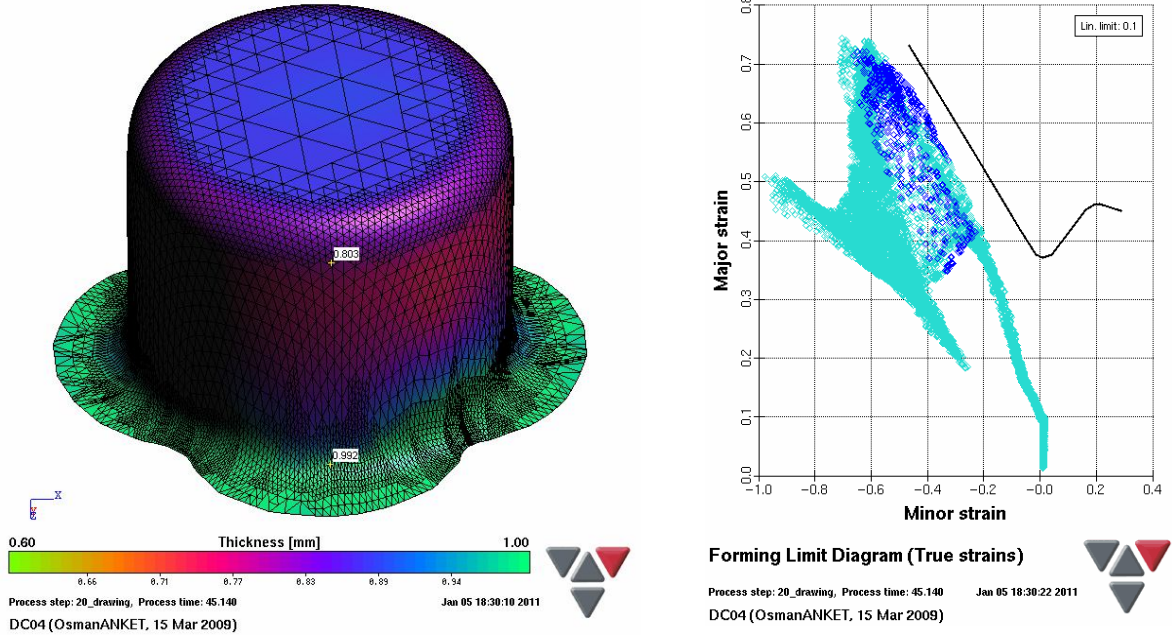
Örnek çapının artmasına bağlı olarak elde edilen uzama değişimleri Şekil 5.49’da görölmektedir. 65 mm ve 67 mm çaptaki deneş örneklerinin şekillendirilmesi sonucu elde edilen uzama miktarları kırılma eğrisinin uzağında, 69 mm çaptaki deneş örneğinin şekillendirilmesi sonucu elde edilen uzama dağılımları ise kırılma eğrisinin üzerinde çıkmıştır.



Şekil 5.49 Deneş örneği çapının ŞSD’na etkisi.

ŞSD'na göre, en ince noktaların zımba radyüs bölgesinde olduğu çekme-çekme şartlarındaki uzamalardan tespit edilebilmektedir. Deney örneğinde çap artışına bağlı olarak uzamalarda artmıştır. Küçük uzamanın negatif, büyük uzamanın pozitif olduğu, çekme-basma bölgesindeki şekillendirmede çap artışına bağlı olarak gerçekleşen uzama artışları görülmektedir. Uzamalardaki artış deney örneğinin incelenmesi sonucudur.

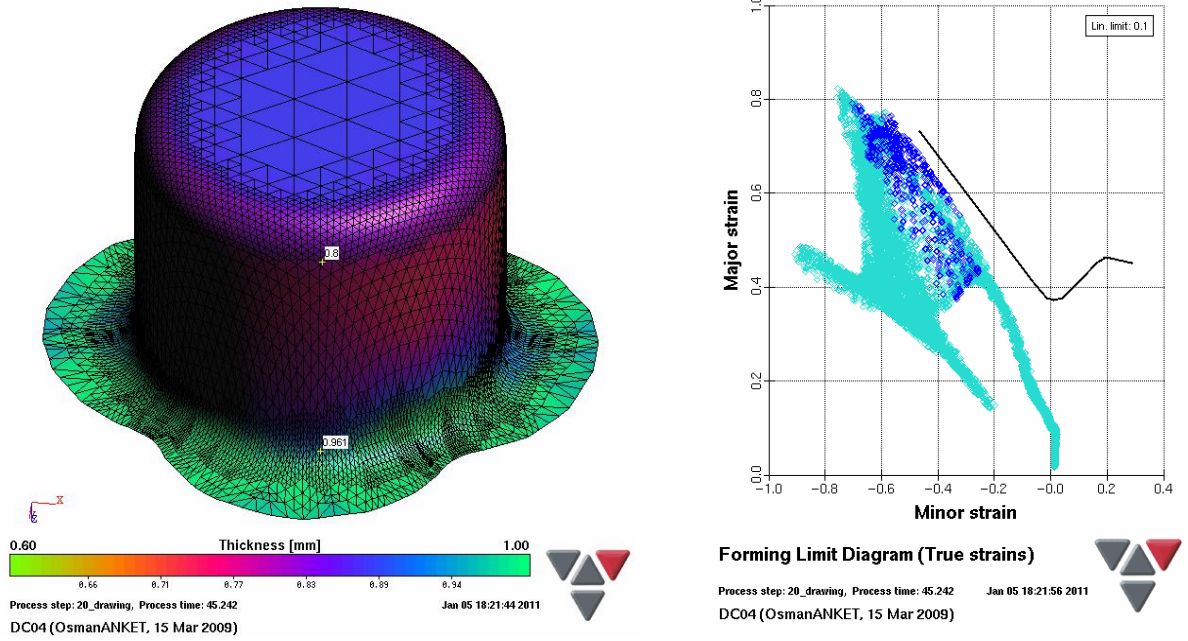
Farklı çaplardaki ilk örnek DC04 malzemenin AUTOFORM sayısal analiz programında analiz edilmesi sonucu elde edilen kalınlık değişimleri ve ŞSD Şekil 5.50, Şekil 5.51 ve Şekil 5.52'dedir.



Şekil 5.50 65 mm deney örneği çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi.

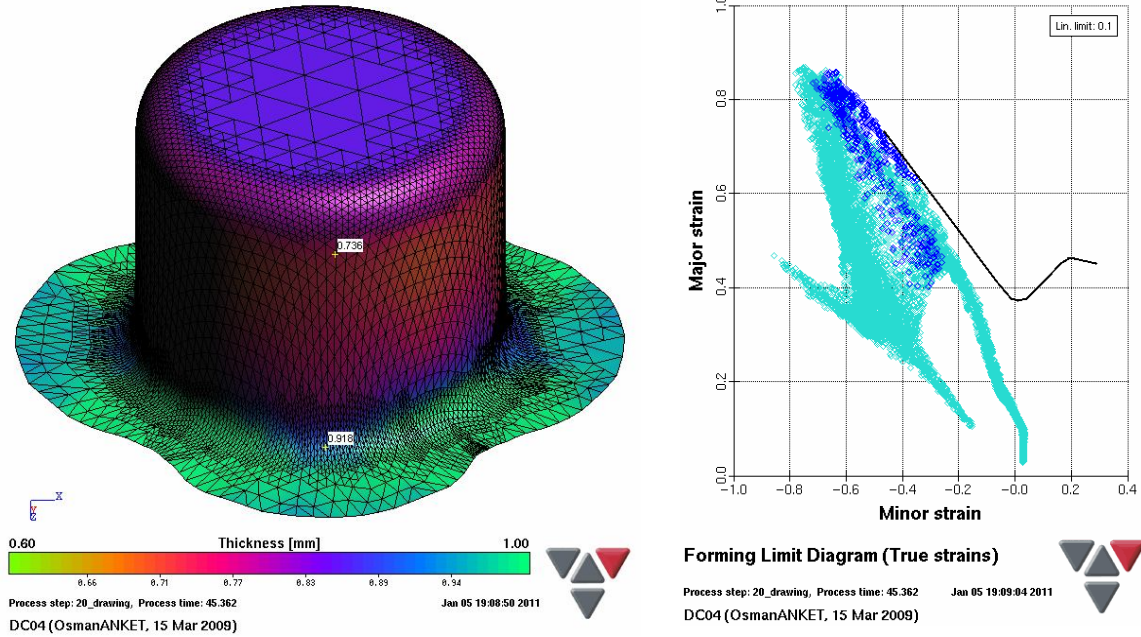
Bütün çaplarda çekme derinliği 30 mm'de sabit tutulduğundan, sac malzemenin flanş kısmındaki kısım çap artışına paralel olarak artmıştır. İlk örnek çapının artmasına paralel olarak deney örneğindeki incelmeler de artmıştır. Çap artışına bağlı olarak örnek üzerindeki uzamalar kırılma eğrisine yaklaşmıştır. 69 mm çaptaki deney örneğinin sayısal analizinde uzamalar kırılma eğrisi üzerindedir.

Hidromekanik derin çekmeden farklı olarak, geleneksel derin çekme yönteminde uzamalar kırılma eğrisine yaklaştığında kırılma meydana gelmiştir. Hidromekanik derin çekmede ise, hazne basıncının, deney örneğini zımbaya bastırıyor olması ve hazne basıncının sac malzemeyi kalıp radyüsünde kaldırıyor olması sebebi ile uzamalar kırılma eğrisinin üzerine çıkmıştır. Sayısal analiz sonucunda 65 mm çaptaki deney örneğinin en ince noktası 0,803 mm, 67 mm çaptaki deney örneğinin en ince noktası 0,8 mm ve 69 mm çaptaki deney örneğinin en ince noktası 0,736 mm olmuştur.



Şekil 5.51 67 mm deney örneği çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi.

Geleneksel derin çekme prosesinde ulaşılan derin çekme oranı, hidromekanik derin çekme prosesinin çok uzağında kalmıştır. “ $D/d=67/30=2,23$ ” derin çekme oranı elde edilebilmiştir. Mevcut şartlarda daha yüksek derin çekme oranı elde edilememiştir. Çekme derinliği 30 mm ile sınırlı kalmıştır.



Şekil 5.52 69 mm deney örneği çapının geleneksel derin çekme prosesine etkisinin sayısal analizi.

5.4 Hidromekanik Derin Çekme ve Geleneksel Derin Çekme Prosesinin Çekme Derinliği ve Derin Çekme Oranı Kriterlerine Göre Mukayesesi

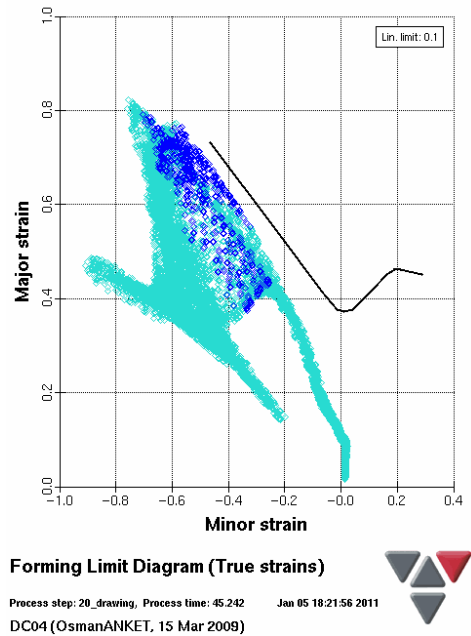
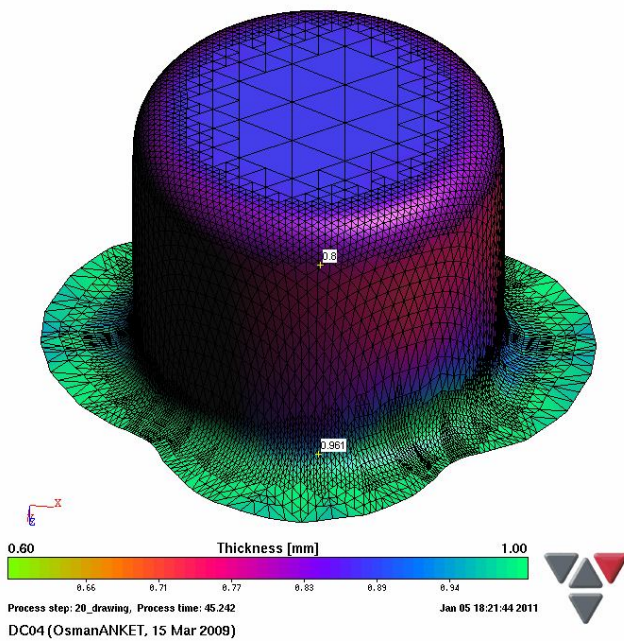
Hidromekanik derin çekme prosesinin deneysel çalışılması sonucunda 2,5 derin çekme oranı sınırına ulaşılmış, geleneksel derin çekme prosesinde ise bu değer 2,23'te kalmıştır. 2.5 derin çekme oranında şekillendirilecek parçaların, geleneksel derin çekme yöntemi ile, tek kademedede şekillendirilmesi mümkün görünmemektedir. Hidromekanik derin çekme prosesinde 40 mm çekme derinliğine, geleneksel derin çekme prosesinde ise 30 mm çekme derinliğine ulaşılabilmektedir.

Hidromekanik derin çekme yöntemi ile daha derin parçaların üretilebilmesi mümkün olmuştur. Şekil 5.53'de soldaki parça geleneksel derin çekme prosesi ile, sağdaki parça ise hidromekanik derin çekme prosesi ile üretilmiştir. Aralarında 10 mm çekme derinliği farkı meydana gelmiştir.

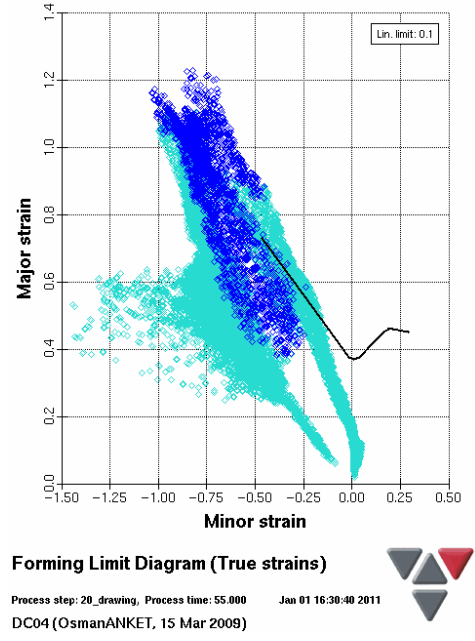
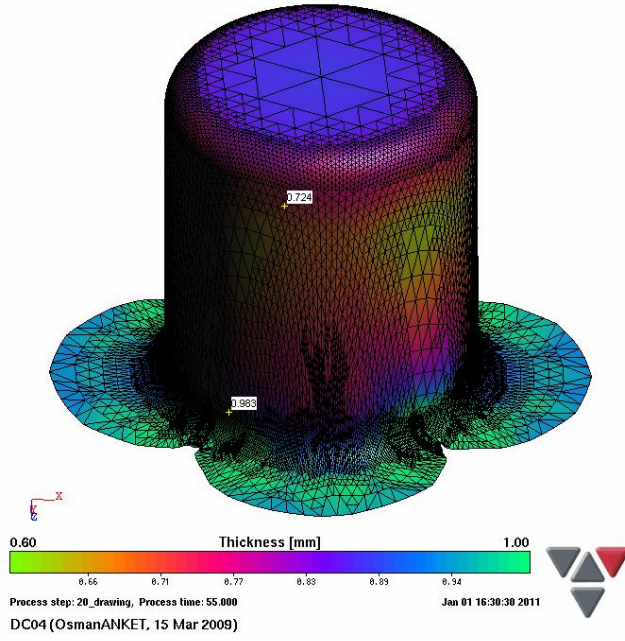


Şekil 5.53 Geleneksel ve hidromekanik derin çekme yöntemi ile üretilmiş örneklerin karşılaştırılması.

SEY'ne dayalı olarak her iki yöntemin mukayesesi Şekil 5.54 ve Şekil 5.55'dedir. Geleneksel derin çekme yöntemi ile 67 mm çaptaki deney örneği 30 mm derinliğe çekilebilirken, hidromekanik derin çekme yönteminde 75 mm çaptaki deney örneği 40 mm derinliğe çekilebilmiştir. 67 mm çaptaki deney örneğinin geleneksel derin çekme yöntemi ile, 75 mm çaptaki deney örneğinin hidromekanik derin çekme yöntemi ile sayısal analizinde elde edilen derin çekme oranları, deneysel çalışmalardan elde edilen derin çekme oranları ile uyumludur.



Şekil 5.54 67 mm çaptaki deney örneğinin geleneksel derin çekme yöntemi ile sayısal analizi.



Şekil 5.55 75 mm çaptaki deney örneğinin hidromekanik derin çekme yöntemi ile sayısal analizi.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, sac şekillendirme prosesleri içinde yer alan ve son yıllarda dikkatleri üzerine çeken hidromekanik derin çekme yönteminin deneysel ve sayısal incelemesi yapılmıştır. Deneysel olarak, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan 0,9 mm kalınlığındaki DC04 sac malzeme kullanılmıştır. Öncelikle deney malzemesinin şekillendirilebilirlik sınırlarını ortaya koymak amacıyla çekme ve şekillendirilebilirlik sınır diyagramı deneysel olarak elde edilmiştir. Deney değişkenleri olarak; farklı deney örneği çapları, şekil değiştirme hızı, hazne basıncı ve baskı yastığı kuvveti kullanılmıştır. DC04 deney örneği, deney değişkenleri kullanılarak, hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme prosesinde şekillendirilmiştir. Deneysel çalışmalar, kırılma/kırışma oluşumu, deney örneği kalınlık dağılımı, şekillendirme sınır diyagramı ve derin çekme oranı kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Deney şartları ve değişkenleri, sac malzeme şekillendirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan AUTOFORM yazılımı ile SEY kullanılarak analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçları mukayese edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. DC04 otomotiv sacının mekanik özelliklerinin ve ŞSD'nin tespit edilmesi amacıyla Çekme Testi ve Erichsen Testi yapılmıştır. Çekme testinde akma mukavameti 220 MPa, çekme dayanımı 325 MPa olarak bulunmuştur. Şekil değiştirme sertleşmesi üssü 0,24 olarak elde edilmiştir. Şekil değiştirme sertleşmesi üssünün yüksek olması deney örneğinin kopma uzamasının yüksek olacağını ifade etmektedir. Dikine anizotropi 0,848, düzlemsel anizotropi 0,1 olarak elde edilmiştir. Dikine anizotropinin büyük olması, deney örneğinin kalınlık yönünde incelmeye direncinin büyük olacağını, düzlemsel anizotropinin "0"dan farklı olması ise şekillendirilecek üründe kulak oluşacağını ifade etmektedir. ŞSD'nden, deney örneğinin, -0,28 küçük uzama değeri için 0,50 büyük uzama, 0,20 küçük uzama değeri için 0,28 büyük uzama sergilediği görülmüştür. Bu durum, deney örneğinin derin çekme özelliklerinin, gerdirilebilirlik özelliklerine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Kırılma eğrisi ile boğumlanma eğrisi arasındaki fark % 13

çıkıştır. Aradaki farkın büyük olması deney örneğinin kırılmadan daha fazla derin çekilebileceğini göstermektedir.

2. Hazne basıncı, hidromekanik derin çekme prosesine özelliğini veren deney değişkendir. Hazne basıncının düşük olması hidromekanik derin çekmeyi geleneksel derin çekmeye yaklaştırmıştır. Düşük hazne basıncı değeri, hem hidromekanik derin çekme şartlarını (kalıp radyüsünde deney örneğinin omuzlanması ve zımba ile deney örneği arasındaki sürtünme tutma kuvvetinin artırılması) oluşturmamış, hemde haznedeki basınçtan dolayı baskı yastığı kuvveti ihtiyacını artırmıştır. Baskı yastığı kuvveti ihtiyacının artmış olması, hazne basıncının ise yeteri kadar olmaması, deney örneğinin baskı yastığı tarafından baskılanmasına ve erken kırılmasına yol açmıştır. Doğru baskı yastığı kuvvetini tespit etmek zorlaşmıştır. 30 MPa ve 40 MPa hazne basınçları 75 mm deney örneğinin şekillendirilmesinde yetersiz kalmıştır. 50 MPa hazne basıncında, 8 mm/s şekil değiştirme hızında, 75 mm çaptaki deney örneğinin 30 mm zımba çapı ile şekillendirilmesi mümkün olmuştur. 50 MPa hazne basıncı değeri, hidromekanik derin çekme yöntemi için en uygun hazne basıncı olmuştur. Hazne basıncının düşük değerlerinde, şekillendirme başlangıcında kırılmalar gözlenmiştir. 50 MPa haricindeki hazne basıncı değerlerinde deney örneğindeki incelemeler artmıştır. Bu hazne basıncı değerinde ŞSD'na en uzak uzama dağılımları elde edilmiştir. 50 MPa hazne basıncında 2,5 derin çekme oranını elde edilmiştir.

3. Hidromekanik derin çekme yönteminde şekil değiştirme hızı önemli bir değişken olarak gözlenmiştir. 71 mm ve 73 mm deney örneği çaplarında, 8 mm/s ve 18 mm/s şekil değiştirme hızları kullanılabilirken, deney örneği çapı 75 mm'ye çıktığında sadece 8 mm/s şekil değiştirme hızında şekillendirme gerçekleştirilebilmiştir. 28 mm/s şekil değiştirme hızı ise şekillendirme sürecinde kullanılamamıştır. Şekil değiştirme hızının artması hidromekanik derin çekme prosesini olumsuz etkilemiştir. Şekil değiştirme hızının artışına paralel olarak uzama dağılımları ŞSD'nda kırılma eğrisine yaklaşmıştır. Deney örneklerindeki incelemeler artmıştır. Şekil değiştirme hızının 18 mm/s ve 28 mm/s'ye çıkmasıyla, 2,5 derin çekme oranının elde edilmesi mümkün olmamıştır.

4. Baskı yastığı kuvveti hidromekanik derin çekme prosesinde geniş bir aralıkta kullanılmıştır. 30 MPa ve 40 MPa hazne basınçlarında baskı yastığı kuvveti ihtiyacı 1000-5000 N aralığında değişirken, 50 MPa hazne basıncında baskı yastığı kuvveti ihtiyacı 5000-40000 N aralığında değişmiştir. Hazne basıncının artışına bağlı olarak baskı yastığı kuvveti ihtiyacı da artmıştır. 50 MPa hazne basıncında, 75 mm çaptaki deney örneğinde, 5000 N baskı yastığı kuvvetinin sıvı kaçaqlarına ve flanş bölgesinde kırışmalara sebep olduğu, 40000 N'un üzerindeki baskı yastığı kuvvetinin sac malzemenin flanş bölgesinde aşırı baskılanmasına ve şekillendirme esnasında kırılmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Kırılmalar kalıp radyüs bölgesinde meydana gelmiştir. 25000 N baskı yastığı kuvveti ideal baskı yastığı kuvveti olarak bulunmuştur. Baskı yastığı kuvvetini 25000 N'un altında ve üstünde olması, uzama dağılımlarının ŞSD'nda kırılma eğrisine aşırı yaklaşmasına sebep olmuştur.

5. Deney örneği çapının artması, ihtiyaç duyulan hazne basıncını ve baskı yastığı kuvvetini artırmıştır. Çap büyümesine bağlı olarak deney örneğinin flanş kısmının artmasına ve ihtiyaç duyulan baskı yastığı kuvvetinin azalmasına rağmen, hazne basıncının artması baskı yastığı kuvveti ihtiyacını da artırmıştır. 71 mm ve 73 mm çaplardaki deney örnekleri 30-40 MPa hazne basınçlarında şekillendirilebilirken, 75 mm çaptaki deney örneği 50 MPa hazne basıncında şekillendirilebilmiştir. Hidromekanik derin çekmede, mevcut şartlarda şekillendirilebilecek deney örneği çapı 75 mm olarak bulunmuştur. Örnek çapının artmasına bağlı olarak et kalınlığındaki incelmeler artmıştır. Örnek çapının artmasına bağlı olarak uzamalar kırılma eğrisine yaklaşmıştır. Hidromekanik derin çekmede, hazne basıncının etkisi sebebi ile, deney örneği daha fazla derin çekilebilmiş ve uzamalar kırılma eğrisinin üzerinde olmasına rağmen, kırılma oluşmadan şekillendirme mümkün olmuştur.

6. Geleneksel derin çekme yöntemi ile en fazla 67 mm çaptaki deney örneği derin çekilebilmiştir. Şekil değiştirme hızının artmasına bağlı olarak deney örneğindeki incelmeler de artmıştır. Deney örneğindeki uzamalar, şekil değiştirme hızının artmasına bağlı olarak ŞSD'nda kırılma eğrisine yaklaşmıştır. Çap artışına bağlı olarak baskı yastığı kuvveti ihtiyacı düşmüştür. 65 mm çapta 3000 N, 67 mm çapta 2500 N ve 69 mm çapta 1000 N baskı yastığı kuvveti ihtiyacı oluşmuştur. 67 mm çapta 1500 N baskı yastığı

kuvvetinde kırışmalar görülürken, 6000 N baskı yastığı kuvvetinde kırılmalar görülmüştür. Kırılmalar, zımba uç bölgesinde oluşmuştur. 2500 N baskı yastığı kuvvetinde ideal şekillendirme elde edilmiştir. İhtiyaç duyulan baskı yastığı kuvveti hidromekanik derin çekmeye göre 10 kat azalmıştır. Şekil değiştirme hızı artışı, çap artışı deney örneğindeki incelmeleri artırmış ve uzama dağılımlarını ŞSD’nda kırılma eğrisine yaklaştırmıştır. Geleneksel derin çekme yöntemi ile en fazla 67 mm çaptaki deney örneği şekillendirilebilmiş ve derin çekme oranı 2,23 olmuştur.

7. ŞSD, hidromekanik derin çekmede ve geleneksel derin çekmede başarı ile kullanılmıştır. DC04 malzemenin deneysel olarak tespit edilen kırılma ve boğumlama eğrileri her iki derin çekme yönteminde de yorumlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen eğrilerle, her iki yöntemden elde edilen uzamalar karşılaştırılmış, deney örneğinin uzamaları ŞSD üzerine aktarılmıştır. Kırılma eğrisinin üzerine düşen uzamalarda deney örneğinin kırıldığı görülmüştür. Kırılma eğrisine uzak uzama dağılımlarında ise deney değişkenlerinin değiştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. İdeal uzama dağılımlarının, kırılma eğrisine en yakın, fakat üzerine çıkmayan uzama dağılımları olduğu tespit edilmiştir. ŞSD, hidromekanik derin çekmede ve geleneksel derin çekmede başarı ile kullanılmıştır. Şekillendirme sınır diyagramlarının hidromekanik derin çekme proseslerinde kullanılması, deney örneğinin limitlerinde çalışılıp çalışılmadığını tespit etmede kolaylık sağlayacaktır. Malzemenin limitlerinde çalışılması en ekonomik üretimi olanaklı kılacaktır.

8. Deneysel çalışmalarda kullanılan bütün deney değişkenlerinin, sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak yapılan analizleri sonucunda, hidromekanik derin çekme ve geleneksel derin çekme deneylerinden elde edilen verilerle, geliştirilen modellerle hesaplanan değerler arasında çok iyi uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi için geliştirilen bu modellerin, üretime geçmeden önce, pratik uygulamalarda kullanılabileceği görülmüştür. Sac-metal kalıpcılığında, kalıp ve sac malzeme maliyetleri, toplam maliyeti etkileyen en önemli faktörlerdir. Hidromekanik derin çekme değişkenlerinin deneme yanılma yoluyla belirlenmesi, zaman kaybına, hata yapma olasılığının artmasına ve maliyetlerin önemli ölçüde yükselmesine sebep olmaktadır. Uygulanacak olan hidromekanik prosese en uygun değişkenlerin önceden belirlenebilmesi

ve belirlenen değişken değerlerinden elde edilecek sonuçlara ilişkin tahminlerin görülebilmesi ve çekilebilirlik oranlarının en yüksek olduğu değişkenlerin tayini, hata yapma olasılığını en aza indirerek maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesini sağlayacaktır.

9. Hidromekanik derin çekme prosesinin deneysel çalışılması sonucunda 2,5 derin çekme oranı sınırına ulaşılmış, geleneksel derin çekme prosesinde ise bu değer 2,23'te kalmıştır. 2.5 derin çekme oranında şekillendirilecek parçaların, geleneksel derin çekme yöntemi ile, tek kademede şekillendirilmesi mümkün görünmemektedir. Hidromekanik derin çekme prosesinde 40 mm çekme derinliğine, geleneksel derin çekme prosesinde ise 30 mm çekme derinliğine ulaşılabilmektedir. Hidromekanik derin çekme yöntemi ile daha derin parçaların üretilebilmesi mümkün olmuştur. Aralarında 10 mm çekme derinliği farkı meydana gelmiştir.

Hidromekanik derin çekme prosesinde, şekillendirme sürecine etki eden deney değişkenleri incelendiğinde, bu çalışma konusuyla ilgili olarak, bundan sonra yapılacak çalışmalara ışık tutması bakımından aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- a. 50 MPa hazne basıncı üzerindeki basınçların hidromekanik derin çekme prosesine etkileri incelenebilir.
- b. Şekillendirilmesi zor sac malzemeler üzerinde hidromekanik derin çekme prosesi uygulanabilir.
- c. Daha karmaşık yapıllı zımba kullanılarak hidromekanik derin çekme prosesi çalışılabilir.
- ç. Otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılan (prototip olmayan) gerçek bir parça üzerinde hidromekanik derin çekme uygulaması yapılabilir.
- d. Hidromekanik şekillendirme şartlarında DC04 sac malzemenin ŞSD çıkartılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Khandeparkar T., Liewald M., “Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries”, *Journal of Material Processing Technology*, **202**, (2008) 246.
- [2] Narayanasamy R., Narayanan C. S., "Forming, fracture and wrinkling limit diagram for if steel sheets of different thicness", *Materials and Design*, **29**, (2006) 1467.
- [3] Narasamy R., Narayan C. S., “Wrinkling behaviour of interstitial free steel sheets when drawn through tapered dies”, *Material and Design*, **28**, (2007) 254.
- [4] Wu H.Y., Zhou G.Z., Gao Z.W., Chiu C.H., “Mechanical properties and formability of an Mg-6%Li-1%Zn alloy thin sheet at elevated temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology*, **206**, (2008) 419.
- [5] Narayanasamy R., Narayanan S., Sarma S., “Forming limit diagram and crystallographic textures of annealed intersitial free steel sheets”, *Materials and Design*, (2007).
- [6] Varol R., Meriç C., “Comparision of the formability of Al 99.0-O, AlFeSi-O, AlMnCu-O aluminium alloy sheets”, Eurometal Working, Milano, İtaly, (1994) 1.
- [7] Narayanasamy R., Narayanan S., Parthasarathi N.L., “Some analysis on stres and strain limit for necking and fracture during forming of HSLA steel sheets”, *Materials Science and Engineering*, **A 445-446**, (2007) 427.
- [8] Chino Y., Iwasaki H., Mabuchi M., “Stretch formability of AZ31 alloy sheets at different testing temperatures”, *Materials Science and Engineering*, **A 406**, (2007) 90.
- [9] Zhongqi Y., Zhongqin L., Yixi Z., “Evaluation of fracture limit in automotive aluminium alloy shhet forming”, *Materials and Design*, **28**, (2007) 2003.
- [10] Andersson R., “Deformation characteristics of stainless steels”, Doctoral Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, (2005).
- [11] Narayanasamy R., Narayanan C. S., "Forming limit diagram for interstitial free steels supplied by Ford India Motors", *Materials and Design*, **28**, (2007) 16.

[12] Narayanasamy R., Satheesh J. Narayanan S., “Effect Of Annealing on combined forming, fracture and wrinkling limit diagram of Aluminium 5086 alloy sheets”, *Int.J. Mech. Des.*, (2008) 31.

[13] http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf.
25.07.2010

[14] Galanulis K., “Optical measuring technologies in sheet metal processing”, *Advanced Materials Research*, **6** (2005) 19.

[15] Sene N.A., Balland P., Arrieux R., “About necking detection to determine forming limit diagrams for mini stamping”, 17.th international scientific and technical conference, Poznan-Wasowo, (2008).

[16] Delijic K., Misovic M., “The influence of the surface roughness on the draing parameters of aluminium-alloy auto-body sheets”, *Materiali in Tehnologije*, **35**, (2001) 1.

[17] Campos H., Butuc M., Gracio J., Rocha J., Duarte J., “Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel”, *Journal Of Materials Processing Technology*, **179**, (2008) 56.

[18] Jurco P., Banabic D., “A user-friendly programme for calculating forming limit diagram”, Technical University of Cluj-Napoca, Daicoviciu 15, Cluj-Napoca, Romania (2010).

[19] Pepelnjak T., Kuzman K., “Numerical determination of forming limit diagrams”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **20**, (2007) 1.

[20] Keigler M., Bauer H., Harrison D., Silva A., “Enhancing the formability of Alüminium Components Via Temperature Controlled Hydroforming”, *Journal Of Materials Processing Technology*, **167**, (2005) 363.

[21] Shang, J., “Electromagnetically assisted sheet metal stamping”, Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate, The Ohio State University, (2006).

[22] Lee W.B., Chan K.C., “Effect of local texture on the development of m-k groove in biaxial deformation”, *Textures and Microstructures*, , **14-18**, (1991) 1221.

[23] Wang Z., Li Y., Liu J., Zhang Y., “Evaluation of forming limit in viscous pressure forming of automotive alüminium alloy 6k21-T4 sheet”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **17**, (2007) 1169.

[24] Hong Y., Jian C., “Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with prestrain induced backstress”, Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, USA, (2010).

[25] Lang L., Li T., An D., Chi C., Nielsen K.B., Dankert J., “Investigation into hydromechanical deep drawing of aluminum alloy—complicated components in aircraft manufacturing”, *Materials Science and Engineering*, **A 499**, (2009) 320.

[26] Pandya R.S., "Prediction of variation in dimensional tolerance due to sheet metal hydroforming using finite element analysis", A Thesis, Bachelor Of Engineering, Sardar Patel University, India, (2002).

[27] Matwick, S.E., “An economic evaluation of sheet hydroforming and low volume stamping and the effects of manufacturing systems analysis”, Master of Science in Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, (2003).

[28] Palaniswamy H., Yadav A., Kaya S., Altan T., "New technologies to form light weight automotive components" Center for Precision Forming, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, (2010).

[29] Nakagawa, T., Nakamura, K., Amino, H., "Various applications of hydraulic counter-pressure deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, **71**, (1997) 160.

[30] Şahin, S., "Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması", *Mühendis ve Makine*, **45**, (2004) 35.

[31] Yadav A., “Processes for hydroforming sheet metal-part I: sheet hydroforming with a die”, *Stamping Journal*, (2006) 40.

[32] Yadav A., “Processes for hydroforming sheet metal-part II: sheet hydroforming with a punch”, *Stamping Journal*, (2006) 44.

[33] Zhang S.H., Nielsen K.B., Danckert J., Kang D.C., Lang L.H., “Finite element analysis of the hydromechanical deep-drawing process of tapered rectangular boxes”, *Journal of Material Processing Technology*, **102**, (2000) 1.

[34] Singh S.K., Kumar D.R., “Effect of Process Parameters on Product Surface Finish and Thickness Variation in Hydro-Mekhanical Deep Darwing”, *Journal of Material Processing Technology*, **204**, (2008) 169.

[35] Zhang S.H., Lang L.H., Kang D.C., Danckert J., Nielsen K.B., “Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces-experiments and numerical simulation”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **40**, (2000) 1479.

[36] Zhang S.H., Jensen M.R., Nielsen K.B., Danckert J., Lang L.H., Kang D.C., "Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups", *Journal of Material Processing Technology*, **142**, (2003) 544.

[37] Kurz G., "Heated hydromechanical deep drawing of magnesium sheet metal", *The Minerals, Metals & Materials Society*, Institute for Metal Forming and Metal Forming Machine Tools, University of Hanover, Welfengarten, Hanover, Germany, (2004).

[38] Karaağaç, İ., Özdemir, A., "Sıvı basıncı ile sac şekillendirme (SBŞ) yönteminin derin çekilebilirlik üzerine etkilerinin incelenmesi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, (2009).

[39] Marksteadter H., Gehle A., "FEM process simulation using a segmented-elastic blank holder with LS-DYNA", 23rd CADFEM Users Meeting 2005, International Congress on FEM Technology with ANSYS CFX & ICEM CFD Conference, Bonn, Germany, (2005).

[40] Choi H., Koç M., Ni J., "Determination of optimal loading profiles warm hydroforming of lightweight materials", *Journal of Material Processing Technology*, **190**, (2007) 230.

[41] Sharma K.A., Rout K.D., Choi H., "Finite element analysis of sheet hydromechanical forming of circular cup", *Journal of Material Processing Technology*, **209**, (2009) 1445.

[42] Kim J., Son B.M., Kang B.S., Hwank S.M.; Park H.J., "Comparison stamping and hydro-mechanical forming process for an automobile fuel tank using finite element method", *Journal of Material Processing Technology*, **153-154**, (2004) 550.

[43] Zhang S.H., Jensen M.R., Danckert J., Nielsen K.B., Kang D.C., Lang L.H., "Analysis of the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups", *Journal of Material Processing Technology*, **103**, (2000) 367.

[44] Thiruvarudchelvan S., Travis F.V., "Hydraulic-pressure-enhanced cup-drawing processes-an appraisal", *Journal of Material Processing Technology*, **140**, (2003) 70.

[45] Danckert J., Nielsen K. B., "Hydromechanical deep drawing with uniform pressure on the flange", Department of Production, Aalborg University, Denmark, *Annals of CIRP*, **49**, (2000).

[46] Groche P., Metz C., "Investigation of active-elastic blank holder system for high-pressure forming of metal sheets", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **46**, (2006) 1271.

[47] Lin J., Zhao S.D., Zhang A.Y., Wang Z.W., "Deep drawing using a novel hydromechanical tooling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **49**, (2009) 73.

[48] Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B., Zhou, X., "Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method", *Journal of Materials Processing Technology*, **167**, (2005) 191.

[49] Abedrabbo, N., Zampaloni, M. A., Pourboghrat, F., "Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming", *International Journal of Mechanical Sciences*, **47**, (2005) 333.

[50] Zahedi, S.A., Shamsi, A., Gorfi, A., Hosseinipour, S.J., Jouybari, M.B., "Theoretical study and finite element simulation of tearing in hydroforming process", *Journal of Applied Sciences*, **9**, (2009) 178.

[51] Parsa, M. H., Darbandi, P., "Experimental and numerical analyses of sheet hydroforming process for production of an automobile body part", *Journal of Materials Processing Technology*, **198**, (2008) 381.

[52] Zhang S. H., Danckert J., "Development of hydro-mechanical deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, **83**, (1998) 14.

[53] Dachang K., Yu C., Yongchao X., "Hydromechanical deep drawing of superalloy cups", *Journal of Materials Processing Technology*, **166**, (2005) 243.

[54] Türköz, M., Halkacı, H. S., "Sacların hidrolik şekillendirilmesinde proses parametrelerinin belirlenmesi için deney tasarımı", *Mühendis ve Makine*, **50**, (2009) 19.

[55] Karaağaç, İ., Özdemir, A., "Sıvı basıncı ile şekillendirme deney düzeneğinin tasarımı", TMMOB Makina Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu, Bursa, (2009).

[56] Karalı M., Silindirik kapların derin çekilmesinde farklı baskı plakası kuvvetlerinin ve uygulama yöntemlerinin kulaklaşmaya olan etkilerinin incelenmesi", *Trakya Üniv. J. Sci.*, **9**, (2008) 41.

[57] Yang L., Mori K., Tsuji H., "Deformation behaviour of magnesium alloy AZ31 sheet in cold deep drawing", *Trans.Nonferrous Met.Soc.China*, **18**, (2008) 86.

[58] Yıldız H., Kırılı O., "Derin çekme prosesinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi", *Pamukkale Ü. Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **10**, (2004) 317.

[59] Gavas M., Küçükrendeci L., “Alüminyum kare kabın derin çekilmesinde taslak malzeme şekillerinin değerlendirilmesi”, *DPU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (2004) 185.

[60] Özek C., Bal M., “Derin çekme kalıplarında matris-zımba radyüsü ve çekme oranının et kalınlığına etkisi”, *Gazi Ü. Müh.Mim.Fak.Dergisi*, 24, (2009) 33.

[61] Gürün H., “Derin çekme kalıplarında parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini”, Doktora Tezi, Gazi Ü. Fen Bil. Ens., Ankara, (2008).

[62] Siegert K., Wagner, S., "Deep drawing", TALAT Lecture 3704, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, (1994).

[63] Özçelik, G., “Derin çekme prosesinin simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, (2008).

[64] Karalı M., "Silindirik derin çekme prosesinde zımba uç formunun cidar kalınlık dağılımına etkisinin SEY yöntemiyle incelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik*, 4, (2006) 53.

[65] Kang B. S., Son B. M., Kim J., "A comparative study of stamping and hydroforming processes for an automobile fuel tank using FEM", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, (2004) 87.

[66] Fazlı A., Dariani B. M., "Theoretical and experimental analysis of the axisymmetric hydromechanical deep drawing process", *Engineering Manufacture*, 220, (2006) 1429.

[67] Hariharan K., Balaji C., “Material optimization:a case study using sheet metal-forming analysis”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 209, (2009) 324.

[68] Gök, A., Demirci, H. İ., Gök, K., "Sonlu elemanlar metodunun gerçek bir sanayi parçası üzerinde uygulanması", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, (2009).

[69] Karaağaç, İ., Gürün, H., Özdemir, A., "AISI 304 Paslanmaz çelik sac malzemenin klasik olarak ve sıvı basıncıyla derin çekilebilirliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmalı analizi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, (2009).

[70] Wu J., Balendra R., Qin Y., “A Study on the forming limits of the hydromechanical deep drawing of component with stepped geometries”, *Journal of Material Processing Technology*, 145, (2004) 242.

[71] Qin Y., Balendra R., “design consideration for hydromechanical deep drawing of sheet components with concave features”, *Journal of Material Processing Technology*, **145**, (2004) 163.

[72] Arwidson, C., “Numerical simulation of sheet metal forming for high strength steels”, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Division of Manufacturing Systems Engineering, Sweden, (2005).

[73] Duong, P.H., Trung, N.D., "Influence of process parameters on the product properties by using hydro-mechanical forming", Hanoi University of Technology, (2008).

[74] Jensen. M.R., Olovsson, L., Danckert, J., "Numerical model for the oil pressure distribution in the hydromechanical deep drawing process", *Journal of Materials Processing Technology*, **103**, (2000) 74.

[75] Önder, E., Tekkaya, A. E., "Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **48**, (2008) 532.

[76] Lang, L., Li, T., Zhou, X., Kristensen, B.E., Danckert, J., Nielsen, K.B., "Optimized decision of the exact material modes in the simulation for the innovative sheet hydroforming method", *Journal of Materials Processing Technology*, **177**, (2006) 692.

[77] Fazli A., Dariani B. M., "Parameter study of the axisymmetric hydromechanical deep drawing process", *Engineering Manufacture*, **220** (2006) 1937.

[78] Lang, L.H., Danckert, J., Nielsen, K.B., Kang, D.C., Zhang, S.H., "Key technologies of the simulation of the hydrodynamic deep drawing of irregular parts", *Journal of Materials Processing Technology*, **150**, (2004) 40.

[79] Kayalı S., Ensari C. , “Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları”, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları, İstanbul, (1986).

[80] Meriç C., Köksal S., Karlık., “An investigation of deep drawig of low carbon steel sheets and applications in artificial neural Networks”, *Mathematical&Computational Applications*, **2**, (1997) 119.

[81] Demirci A. H., “Malzeme bilgisi ve malzeme muayenesi-seçilmiş temel kavramlar ve endüstriyel uygulamalar”, Alfa kitabevi, İstanbul, (2004) 233.

[82] Erdoğan M., “Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri”, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, (1998).

[83] Narasamy R., Parthasarathi N.L., Narayanan C., Venugopal T., Pradhan H.T., “A study on fracture behaviour of three high strength low alloy steel sheets during formation with different strain rations”, *Materials and Design*, **29**, (2008) 1868.

[84] Ay İ., “Gerçek gerilme gerçek uzama eğrileri için yaklaşık denklemler”, Balıkesir Ü., Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmalat yöntemleri II ders notları, (2010).

[85] Çapan L. “Metallere plastik şekil verme”, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, (1999).

[86] Akbarpour M.R., Ekrami A., “Effect of ferrite volume on work hardening behavior of high bainite dual phase (dp) steels”, *Materials Science and Engineering*, **A 477**, (2008) 306.

[87] Aslantas K., “Plastik şekil verme-I”, Afyon Kocatepe Ü. Fen Bil.Ens., Üretim Yöntemleri I ders notları (2007).

[88] Çapan L., “Metallerde pekleşme üstelinin hesaplanması ve sünekliğe etkisi”, *Metal Dünyası*, (2007).

[89] Atmaca, A., “Çelik fiber takviyeli alüminyum metal matriksli kompozit plakaların elastoplastik gerilme analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2006).

[90] Kalpakjian S., Schmid S.R., "Sheet Metal Forming Processes" Chapter 16, Manufacturing Engineering and Technology, Fifth Edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle Rive, Nj, (2001).

[91] Uzun İ., Erişkin Y. “Saç metal kalıpcılığı”, MEB, İstanbul , (1983).

[92] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=187&Pageid=2144416737>, 17.06.2010.

[93] Aran, A., “Manufacturing properties of engineering materials”, lecture notes, İTÜ Department of Mechanical Engineering, (2007) 48.

[94] Bedir F., Durak E., Delikanlı K., “Alüminyum alaşımlarının otomotiv endüstrisinde uygulanabilirliği ve mekanik özellikleri”, *Mühendis ve Makine*, **47** (2006) 37.

[95] K. Siegert K., Wagner S., “Formability characteristics of aluminium sheet”, Training in Alüminium Application Technologies, Lecture 3701, European Aluminium Association, Stuttgart, (1994).

[96] “Metalik sac ve bandların çökertme muayenesi” (Erichsen muayenesi), TS 271, (1965).

[97] Akrouf M., Amar B. M., Chaker C., Dommak F., “Numerical and experimental study of stamping of the erichsen test for metal stamping”, *Advances in Production Engineering and Management*, **3**, (2008) 92.

[98] Joshi A. M., “Strain studies in sheet metal stamping”, *B.E Mechanical*, A.M.I. Prod. E., (2007).

[99] Svensson, C., “The influence of sheet thickness on the forming limit curve for austenitic stainless steel”, Examensarbete, Örebro Ü. Department of technology, Örebro, Sweden, (2004).

[100] Duddeck F., “9-material models”, Department Of Engineering Queen Mary College, London University, London, UK (2007).

[101] Allwood J.M., Shouler D.R., “Generalized forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states, *International Journal of Plasticity*”, **25** (2009) 1207.

[102] Narayanasamy R., Narayanan S., “Some aspects on fracture limit diagram developed for different steel sheets”, *Materials Science and Engineering*, **A 417**, (2006) 197.

[103] Zhang S. H., "Developments in hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, **91**, (1999) 236.

[104] Singh H., “Fundamental Of Hydroforming”, Society Of Manufacturing Engineers, USA, (2003).

[105] Altan, T.; “Metal Forming Handbook/Schuler”, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, (1998) 185.

[106] Jain N., "Modeling and analysis of dual hydroforming process", A Thesis, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, (2003).

[107] Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K. B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, **148**, (2004) 119.

[108] Kim J. B., Lee D. W., Yang D. Y., Park C. S., "Investigation into hydromechanical reverse redrawing assisted by separate radial pressure-process development and theoretical verification", *Proc Instn Mech Engrs*, **21**, (1997) 451.

[109] Yadav A., “Processes for hydroforming sheet metal-part III: SHF-P and SHF-P case studies”, *Stamping Journal*, (2006) 26.

[110]Palaniswamy H., Braedel M., Thandapani A., Altan T., "Optimal programming of multi-point cushion systems for sheet metal forming", *Annals of the CIRP*, **55/1**, (2006).

[111]Suchy, I., "Handbook of die design", McGraw-Hill, (2006).

[112]Güneş, A.T., "Pres işleri tekniği Cilt-2", TMMOB, Ankara, (2003).

[113]Aran, A., Demirkol, M., "Plastik şekil verme ve teknolojisi", İTÜ Makine Fakültesi İmal Usulleri Ders Notları, (1995) 8.

[114] <http://www.grupotomasyon.com.tr/autoform.html>_10.06.2010

[115]Moshkar M. M., Mansorzadeh S., "Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet", *Journal Of Materials Processing Technology*, **141**, (2003) 138.

[116]"Erichsen Levha Metal İşaretleme Cihazı Kullanma Kılavuzu", Model 190.

[117]Makkouk R., Burgeois N., Serri J., Bolle B., Martiny M., Teace M., Ferron G., "Experimental and theoretical analysis of the limits to ductility of type 304 stainless steel sheet", *European Journal of Mechanics A/Solids*, **27**, (2008) 181.

[118]Korhonen A.S., Manninen T., "Forming and fracture limits of austenitic stainless steel sheet", *Material Science and Engineering*, **A 488**, (2008) 157.

[119]Zhang S.H., Wang Z.R, Xu Y., Wang Z.T, Zhou L.X., "Recent developments in sheet hydroforming technology", *Journal Of Materials Processing Technology*, **151**, (2004) 237.

[120]Langa L. H., Wang Z. R., Kang D. C., Yuan S. Y., Zhang S. H., Danckert J., Nielsen K. B., "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, **151**, (2004), 165.

[121]Güven A., Çapan L., "Metallerde pekleşme üstelini etkileyen faktörler", *Deformasyon ve Saç İşleme dergisi*, (2008).

[122]Narayanasamy R., Ravi M., Parthasarathi N.L., "Effect of annealing on formability of alüminium grade 19000", *Materials and Design*, **29**, (2008) 1633.

[123]Fundenberger j. J., Philippe M. J., Esling C., Lequeu P., Chenal B., "Calculation of yield surfaces and determination of forming limit diagrams of aluminum alloys", *Textures and Microstructures*, **21**, (1993) 93.

[124]Slota J., Spisak E., "Comparision of the forming-limit diagram (fld) models for drawing quality (dq) steel sheets", *Metalurgia*, **44**, (2005) 249.