

**AA 7075-T6 ALAŞIMLI SACIN HİDRO
ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE OPTİMUM
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**2013
DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

Hatice EVLEN

**AA 7075-T6 ALAŞIMLI SACIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE
OPTİMUM ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ**

Hatice EVLEN

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

KARABÜK

Haziran 2013

Hatice EVLEN tarafından hazırlanan “AA 7075-T6 ALAŞIMLI SACIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE OPTİMUM ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim KADI

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 18/ 06/ 2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İrfan YÜKLER (MÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa KURT (MÜ)

Üye : Prof. Dr. İbrahim KADI (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

...../...../2013

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

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

Hatice EVLEN

ÖZET

Doktora Tezi

AA 7075-T6 ALAŞIMLI SACIN HİDRO ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ İLE OPTİMUM ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Hatice EVLEN

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İbrahim KADI

Haziran 2013, 140 sayfa

Bu çalışmanın amacı, AA7075 - T6 alüminyum alaşımli sacın hidro şekillendirme yöntemi ile optimum şekillendirilebilirlik parametrelerini incelemektir. Sac malzemenin şekillendirme parametreleri 2 farklı kalıp çapı, 4 farklı kalıp köşe kavisi ve 3 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen hidro şekillendirme işlemleri ile incelenmiştir. Grid ölçüm metodu kullanılarak şekillendirme sınır diyagramları oluşturulmuş, şişme yüksekliği ve kubbe kavisi yarıçapı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca alaşımın tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, oda sıcaklığında malzemenin deformasyon kabiliyeti sınırlı iken, sıcaklık 140 °C'ye yükseldiğinde deforme edilen malzemenin şişme yüksekliği ve şekillendirme limitinin arttığı, ancak sıcaklık 250 °C'ye çıktığında şişme yüksekliği azalırken, şekillendirme limitinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde hem sıcaklık hem de kalıp köşe kavisinin AA7075 - T6 sac

malzemenin şekillenebilirliğini ve gerilme – birim şekil değiştirme eğrisini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Sıcaklığın artması ve / veya kalıp köşe kavisinin azalması çekme mukavemetini düşürmüştür, buda şekillenmeyi etkilemektedir. Bütün bunların yanısıra, farklı parametrelere göre (sıcaklık ve kalıp köşe kavisini) gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen şişme yüksekliği değerlerinden faydalanılarak dört farklı metoda göre korelasyon kurulmuştur. Kurulan korelasyonlardan, sıcaklık ve kalıp köşe kavisine göre şişme yüksekliğinin değişimini ifade eden interpolasyon denklemleri ve üç boyutlu grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen interpolasyon denklemlerinin standart sapma, bağıl ve mutlak hataları ile hata kareleri toplamları grafikleri değerlendirilerek, standart sapma ve hata kareleri toplamı sıfıra en yakın olan denklem belirlenmiştir. Böylelikle oda sıcaklığı - 250 °C sıcaklık ve 7 – 20 mm kalıp köşe kavisini değerleri aralığında, herhangi bir sıcaklık veya kalıp köşe kavisinde deney yapmadan şişme yüksekliğinin değişimi hakkında bir interpolasyon yapılabilecektir.

Anahtar Kelimeler : Hidro şekillendirme, AA7075, ılık şekillendirme, kalıp köşe kavisini, şekillendirme sınır diyagramı (FLD).

Bilim Kodu : 708.3.029

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF OPTIMUM FORMABILITY PARAMETERS OF AA 7075-T6 ALLOYED SHEET BY HYDROFORMING METHOD

Hatice EVLEN

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İbrahim KADI

July 2013, 140 pages

Aim of this study is the investigation of optimum formability parameters of aluminium alloy (7075 - T6) sheets by using hydroforming method. Forming parameters of these sheets was investigated by using a warm forming setup at two different die inner diameter, three different temperatures and four different die corner radii. Forming limit diagrams (FLD) were generated by measuring the grids of the sheet formed. Also tensile tests, bulge height and dome zone radius measurements performed. The results showed that the forming limit and bulge height of AA7075 - T6 improved when the blank is heated to 140 °C, but when temperature is increased to 250 °C, bulge height decreased and forming limit significantly improved while deformation capacity was poor at room temperature. Also the results indicate that both the die corner radius and temperature have a significant effect on the stress-strain curve and warm forming of AA7075 - T6 sheets. Increasing the temperature and/or decreasing the die corner radius will decrease the flow stress, hence,

enhancing formability. In this way, it became possible to make predictions. In addition to all of them, four different correlation established according to bulge height values which were obtained as a result of experiments conducted according to different parameters (temperature and die corner radius. Three dimensional surface graphs and interpolation equations, which shows bulge height variations according to temperature and die corner radius, obtained by using correlations. Interpolation equations standart deviation, relative error, absolute error and error sum of squares graphs established. The equation whose standart deviation and error sum of squares is closest to zero were determined. Thus, an interpolation can be made about change of the bulge height of the experiments at any temperature or die corner radius between room temperature - 250 °C and 7 - 20 mm range of values of the die corner radius.

Key Words : Hydroforming, AA7075, warm forming, die corner radius, forming limit diagram (FLD).

Science Code : 708.3.029

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışmanım Prof.Dr. İbrahim KADI'ya, çalışmam boyunca bilgisine sıkça başvurduğum Prof. Dr. Mustafa YAŞAR'a, tecrübeleriyle yardımcı olan Doç. Dr. Mehmet KARALI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili eşim ve aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Çalışmanın tek eksenli çekme testleri Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Başta Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK ve Arş. Gör. Serkan TOROS olmak üzere, tüm sorumlu öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca tamamlanan tez çalışması Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: **10D4571701**, Proje Başlığı: "AA7075 - T6 alaşımli sacın optimum şekillenebilirlik parametrelerinin hidro şekillendirme metoduyla incelenmesi". BAP Birimine ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI	2
BÖLÜM 2.	4
HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ	4
2.1. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TANIMI	4
2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ	5
2.2.1. Sac Hidrolik Şekillendirme	5
2.2.1.1. Sac Plakanın Bir Akışkan Vasıtasıyla Şekillendirilmesi	7
2.2.1.2. Sac Plakanın Bir Zimba Vasıtasıyla Şekillendirilmesi (Hidromekanik Derin Çekme).....	8
2.2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme	8
2.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİNİN KULLANILDIĞI ALANLAR	9
2.4. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE SIKLIKLA KULLANILAN MALZEMELER.....	10
2.5. SİSTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI	10
2.5.1. Avantajları	10
2.5.2. Dezavantajları	11

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3.	12
LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	12
3.1. DENEY PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİ İNCELEYEN ÇALIŞMALAR.....	13
3.1.1. Deformasyon Hızı (Strain Rate) ve Sıcaklığın Etkisi	13
3.1.2. Farklı Metotları Kıyaslayan Çalışmalar	17
3.1.3. Basıncın Etkisini İnceleyen Çalışmalar.....	19
3.1.4. Baskı Plakasının Etkisini İnceleyen Çalışmalar	20
3.2. ALUMİNYUM ALAŞIMLARIYLA GERÇEKLEŞTİRİLEN HİDRO ŞEKİLLENDİRME ÇALIŞMALARİ.....	21
3.3. TÜRKİYEDE HİDRO ŞEKİLLENDİRME	24
 BÖLÜM 4.	 25
SAC METALLERİN ŞEKİLLENEBİLİRLİĞİ.....	25
4.1. DEFORMASYON ORANI.....	26
4.2. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI	27
4.2.1. Şekillendirme Sınır Diyagramının Deneysel Olarak Oluşturulması.....	29
4.2.1.1. Tek Eksenli Çekme Testi	32
4.2.1.2. Hidrolik Şişirme Testi.....	30
4.2.1.3. Zımbayla Germe Testi	30
4.2.1.4. Keeler Testi	31
4.2.1.5. Hecker Testi	31
4.2.1.6. Marciniak Testi.....	31
4.2.1.7. Nakazima Testi.....	31
4.2.1.8. Hasek Testi.....	32
4.3. FARKLI TEST METOTLARININ KIYASLANMASI.....	31
4.4. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	32
4.5. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMININ (ŞSD-FLD) ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA KULLANIMI	32
4.6. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE ÖNEMLİ ÖLÇÜ VE PARAMETRELER	33
 BÖLÜM 5.	 36
ÖN DENEYLER İÇİN DENEY SİSTEMİ TASARIMI VE ASIL DENEY PARAMETRELERİNİN TESPİTİ.....	36

	<u>Sayfa</u>
5.1. ÖN SİSTEM TASARIMI	36
5.1.1. Hidrolik Güç Üniteleri	39
5.1.2. Kullanılan Yağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	39
5.1.3. Sistemin Çalışma Prensibi	40
5.1.4. Ön Deneyler	40
5.2. ASIL DENEY PARAMETRELERİNİN TESPİTİ	41
5.2.1. Kalıp İç Çaplarının Tespit Edilmesi.....	41
5.2.2. Uygun Pot Baskı Kuvveti Tespiti İçin Yapılan Deneyler	41
5.2.3. Uygun Şekillendirme Sıcaklığının Tespiti İçin Gerçekleştirilen Deneyler	44
5.2.3.1. Ilık Şekillendirme İçin Uygun Sıcaklık Tespiti Deneyleri.....	46
5.2.3.2. Sıcak Şekillendirme İçin Uygun Sıcaklık Tespiti Deneyleri	47
5.2.4. Ön Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Deney Parametrelerinin Tespiti.....	46
5.2.5. Kalıp Köşe Kavislerinin Tespit Edilmesi	47
5.2.6. Basınç Parametresinin Tespiti	49
 BÖLÜM 6.	 51
DENEY SİSTEMİ TASARIMI.....	51
6.1. HİDROLİK PRES.....	51
6.2. ALT KALIP YARIMI.....	52
6.3. ÜST KALIP YARIMI	53
6.4. İÇ KALIP TASARIMI.....	55
6.5. HİDRO ŞEKİLLENDİRMEDE KULLANILAN YAĞIN ÖZELLİKLERİ.....	57
6.6. O-RINGLER.....	58
6.7. REZİSTANSLAR	58
6.8. SICAKLIK AYARININ YAPILMASI VE SICAKLIK ÖLÇÜMÜ	60
6.9. BASINÇ SENSÖRÜ VE MATLAB VERİ AKTARIM SİSTEMİ.....	60
6.10. ÇELİK ÖRGÜLÜ HORTUMLAR	61
6.11. HİDROLİK GÜÇ ÜNİTESİ	62
6.12. ISI YALITIMI.....	62
 BÖLÜM 7.	 63
MATERYAL VE METOT.....	63

	<u>Sayfa</u>
7.1. MALZEME KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	63
7.2. TEK EKSENLİ ÇEKME TESTİ.....	64
7.3. SERTLİK ÖLÇÜMÜ.....	66
7.4. İLKEL PUL ÇAPI HESABI VE NUMUNE HAZIRLAMA	67
7.5. NUMUNELERİN KODLANMASI	68
7.6. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	69
7.6.1. Parametrelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi	70
7.6.2. Parametrelerin Kubbe Kavisi Yarıçapına Etkilerinin Teorik ve Deneysel Olarak Tespit Edilmesi	72
7.6.3. Parametrelerin Gerilme – Birim Şekil Değiştirme Diyagramına Etkisi	73
7.6.4. Parametrelerin Şekillendirme Sınır Diyagramına (ŞSD – Forming Limit Diagram FLD) Etkisi.....	73
7.7. KORELASYON GRAFİKLERİ VE İNTERPOLASYON DENKLEMİ	75
 BÖLÜM 8.	 78
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	78
8.1. TEK EKSENLİ ÇEKME TESTLERİ	78
8.2. SERTLİK ÖLÇÜMÜ.....	79
8.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRME	80
8.3.1. Parametrelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi	81
8.3.1.1. Parametrelerin 60 mm Çapa Sahip Kalıpla Şekillendirilen Numunelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi.....	81
8.3.1.2. Parametrelerin 102 mm Çapa Sahip Kalıpla Şekillendirilen Numunelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi.....	81
8.3.2. Parametrelerin Kubbe Kavis Yarıçapına Etkisi	86
8.3.3. Parametrelerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Diyagramına Etkisi	91
8.3.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram – FLD)	95
8.3.4.1. 102 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deneylere Ait Şekillendirme Sınır Diyagramı.....	96
8.3.4.2. 60 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deneylere Ait Şekillendirme Sınır Diyagramı.....	99
8.3.5. İnterpolasyon Denklemleri	100
8.3.5.1. 102 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deformasyon İşlemine Ait İnterpolasyon Denklemleri.....	101

Sayfa

8.3.5.2. 60 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deformasyon İşlemine Ait İnterpolasyon Denklemleri.....	104
BÖLÜM 9.	107
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
9.1. SONUÇLAR	107
9.2. ÖNERİLER.....	108
KAYNAKLAR.....	109
EK AÇIKLAMALAR A. GRİD ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	116
EK AÇIKLAMALAR B. TEKNİK RESİMLER.....	121
EK AÇIKLAMALAR C. NUMUNE FOTOĞRAFLARI	130
EK AÇIKLAMALAR D. BASINÇ – ZAMAN GRAFİKLERİ	134
EK AÇIKLAMALAR E. GRİD ÖLÇÜM FOTOĞRAFLARI	137
ÖZGEÇMİŞ.....	140

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Sac hidro şekillendirme yöntemiyle alüminyum malzemeden üretilmiş Volvo araç gövdesi.....	6
Şekil 2.2.	Sac plakanın bir akışkan vasıtasıyla şekillendirilmesi.....	6
Şekil 2.3.	Hidromekanik derin çekme işlemi.....	7
Şekil 2.4.	Hidromekanik derin çekme kalıp elemanları ve kalıplanan parça örneği.	8
Şekil 2.5.	Tüp hidro şekillendirme şematik gösterim.....	9
Şekil 2.6.	Schuler tarafından üretilmiş araç şasisi.....	9
Şekil 3.1.	Hidro şekillendirilmiş alüminyum gövde elemanları (BMW).	18
Şekil 3.2.	Sac hidroform metoduyla üretilmiş lüks bir otomobil tavan elemanı.	18
Şekil 3.3.	Bir alüminyum tüpün sıcak hidro şekillendirilmesiyle elde edilmiş otomobil modeli, uzunluğu yaklaşık 250 mm (SPS).	18
Şekil 3.4.	Haddelenmiş çelik sacların hidro şekillendirilebilirliğini inceleyen bir çalışma.	19
Şekil 4.1.	Metal şekillendirme işleminin basamakları.	26
Şekil 4.2.	Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örnekleri.....	27
Şekil 4.3.	Başlangıç daire ve şekillendirme sonrası boyutları.	28
Şekil 4.4.	Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı örneği.	28
Şekil 4.5.	Şekillendirme sınır diyagramının oluşturulmasında kullanılan farklı test metodlarının kıyaslanması.	31
Şekil 4.6.	Şişirme testi şematik resmi ve önemli ölçüler.....	33
Şekil 5.1.	Hidrolik silindir ve bağlantısı.....	37
Şekil 5.2.	Kumanda kolu montajı.....	38
Şekil 5.3.	Sistem genel görüntüsü.	38
Şekil 5.4.	Şekillendirmesi gerçekleştirilen parçalar.	40
Şekil 5.5.	Pot baskı kuvveti tespiti için yapılan deneylerden elde edilen şekillendirme sınır diyagramları.	42
Şekil 5.6.	Skalalı loop büyüteç.....	43
Şekil 5.7.	İlk şekillendirme sıcaklığının tespiti için yapılan deneylerin FLD sonucu.	45

Şekil 5.8. Sıcak şekillendirme için uygun sıcaklık tespiti deneyleri şekillendirme sınır diyagramları.....	46
Şekil 6.1. Hidrolik pres.....	52
Şekil 6.2. Kalıp alt yarımı.....	53
Şekil 6.3. Üst kalıp yarımı tasarımı.....	54
Şekil 6.4. Hidro şekillendirme kalıplama ünitesi.....	55
Şekil 6.5. 60 mm çapındaki dişi kalıp alt ve üst yarımları.....	57
Şekil 6.6. O-ringler.....	58
Şekil 6.7. Rezistans ve bağlantısı.....	59
Şekil 6.8. Hidro şekillendirme kalıp elemanları detayı.....	59
Şekil 6.9. Sıcaklık kontrol ünitesi.....	60
Şekil 6.10. Matlab programı veri aktarım sistemi.....	61
Şekil 6.11. Isı yalıtım elemanları.....	62
Şekil 7.1. Optik mikroskop görüntüleri.....	64
Şekil 7.2. Yüksek sıcaklıkta çekme testleri için numune boyutları.....	64
Şekil 7.3. Oda sıcaklığında çekme testi için numune boyutları.....	65
Şekil 7.4. Çekme testi numuneleri.....	65
Şekil 7.5. Hadde yönüne paralel (X), hadde yönüne dik (Y) ve hadde yönüne 45° (XY) açılı yönler.....	66
Şekil 7.6. Gridlenmiş sac malzeme yüzeyi.....	68
Şekil 7.8. Şişme yüksekliği ölçümlerinin yapıldığı dijital mihengir.....	71
Şekil 7.9. Hidro şekillendirme işlemi için hazırlanan bakır ve alüminyum pullar.....	71
Şekil 7.10. AutoCAD programında gerçekleştirilen deneysel kubbe kavisi ölçümü.....	72
Şekil 7.11. Skalalı loop büyüteç.....	74
Şekil 7.12. Grid fotoğraflama.....	74
Şekil 7.13. AutoCAD ortamında grid ölçümü.....	75
Şekil 8.1. Tek eksenli çekme testi grafikleri, a) Oda sıcaklığı, b) 140 °C, c) 250 °C.....	78
Şekil 8.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	80
Şekil 8.3. 102 mm iç çapa sahip kalıp ile hidro şekillendirilmiş hasarlı numuneler.....	81
Şekil 8.4. 60 mm iç çapa sahip kalıba ait kalıp köşe kavisi ve deformasyon sıcaklığına göre ortalama şişme yüksekliği grafiği.....	82

Şekil 8.5.	102 mm iç çapa sahip kalıba ait kalıp köşe kavis ve deformasyon sıcaklığına göre ortalama şişme yüksekliği grafiği.	84
Şekil 8.6.	Kalıp kavis deneysel ölçüm ve teorik hesaplama sonuçları.	87
Şekil 8.7.	60 mm iç çapa sahip kalıba ait kubbe kavis yarıçapı hd/Dc oranı.	88
Şekil 8.8.	102 mm iç çapa sahip kalıba ait kubbe kavis yarıçapı hd/Dc oranı.	90
Şekil 8.9.	Şişme yüksekliği – kubbe kavis yarıçapı değişiminin karşılaştırılması.	90
Şekil 8.10.	60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen hidro şekillendirme işleminden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları.	92
Şekil 8.11.	102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen hidro şekillendirme işleminden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları.	93
Şekil 8.12.	102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşturulan FLD.	96
Şekil 8.13.	60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşturulan FLD.	99
Şekil 8.14.	102 mm iç çapa sahip kalıba ait korelasyon grafikleri.	101
Şekil 8.15.	102 mm iç çapa sahip kalıpla şekillendirilen numunelere ait interpolasyon hata ve sapma grafikleri.	102
Şekil 8.16.	60 mm iç çapa sahip kalıba ait korelasyon grafikleri.	104
Şekil 8.17.	60 mm iç çapa sahip kalıpla şekillendirilen numunelere ait interpolasyon hata ve sapma grafikleri.	105
Şekil EK B.1.	Kalıp alt yarımı.	122
Şekil EK B.2.	Üst kalıp yarımı.	123
Şekil EK B.3.	İç kalıp teknik resmi.	124
Şekil EK B.4.	Kalıp –pres bağlantı flanşı.	125
Şekil EK B.5.	Kalıp bağlantı mili.	126
Şekil EK B.6.	Kolon mili.	127
Şekil EK B.7.	Rezistans kablo kapağı.	128
Şekil EK B.8.	Rezistans kapağı.	129
Şekil EK C.1.	102 mm iç çapa sahip kalıpla oda sıcaklığında şekillendirilmiş numuneler.	131
Şekil EK C.2.	102 mm iç çapa sahip kalıpla 140 °C sıcaklıkta şekillendirilmiş numuneler.	132
Şekil EK C.3.	102 mm iç çapa sahip kalıpla 250 °C sıcaklıkta şekillendirilmiş numuneler.	133

Sayfa

Şekil EK D.1. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneylere ait basınç- zaman grafikleri.	135
Şekil EK D.2. 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneylere ait basınç-zaman grafikleri.	136
Şekil EK E.1. 280 kN pot baskı kuvvetiyle şekillendirilen numunelere ait grid ölçüm fotoğraflarından örnekler.	138
Şekil EK E.2. Oda sıcaklığında 60 mm çap ve 16 mm köşe kavisliyle gerçekleştirilen şekillendirme işlemi sonrası çekilen grid ölçüm fotoğraflarından örnekler.	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Hidrolik güç üniteleri teknik özellikleri	39
Çizelge 5.2. Hidroteks DTA 10 kalite yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	39
Çizelge 5.3. Pot baskı kuvvetinin tespit edilebilmesi için uygulanan ön deneyler ...	42
Çizelge 5.4. Deney sıcaklık ve pot baskı kuvveti parametreleri	47
Çizelge 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp parametreleri.....	48
Çizelge 5.6. Çekme tipine göre kalıp kavisi.....	48
Çizelge 5.7. Sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavisi	48
Çizelge 5.8. Malzeme kalınlığına göre kalıp kavisi	48
Çizelge 5.9. Deney parametreleri	50
Çizelge 6.1. Hidrolik pres teknik özellikleri	51
Çizelge 6.2. Shell Thermia B ısı transfer yağı kimyasal ve fiziksel özellikleri.	57
Çizelge 7.1. Deneylerde kullanılan sac malzemenin kimyasal bileşimi.....	63
Çizelge 7.2. Hidro şekillendirme deney şartları	70
Çizelge EK A.1. Pot baskı kuvveti tespiti deneyleri grid ölçüm sonuçları.....	131
Çizelge EK A.2. Ilık şekillendirme sıcaklığı tespiti deneyleri grid ölçüm sonuçları.....	132
Çizelge EK A.3. Sıcak şekillendirme sıcaklığı tespiti deneyleri grid ölçüm sonuçları.....	134

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- d_b : Sac taslak çapı
 D_c : Kalıp iç çapı
 t_o : İlk sac kalınlığı
 t_d : Tepe bölgesi sac kalınlığı
 R_c : Kalıp köşe kavisi
 R_d : Kubbe kavisi yarıçapı
 h_d : Şişme yüksekliği
 p : Basınç
 σ : Gerilme
 ε : Birim şekil değiştirme
 σ_a : Akma mukavemeti
 σ_{ϕ} : Çekme mukavemeti
 σ_{aX} : Hadde yönüne paralel akma mukavemeti
 σ_{aZ} : Hadde yönüne 45° akma mukavemeti
 σ_{aY} : Hadde yönüne 90° akma mukavemeti
 $\sigma_{\phi X}$: Hadde yönüne paralel çekme mukavemeti
 $\sigma_{\phi Z}$: Hadde yönüne 45° çekme mukavemeti
 $\sigma_{\phi Y}$: Hadde yönüne 90° çekme mukavemeti
 ε_{ϕ} : Çekme Uzaması
 $\varepsilon_{\phi X}$: Hadde yönüne paralel çekme uzaması
 $\varepsilon_{\phi Z}$: Hadde yönüne 45° çekme uzaması
 $\varepsilon_{\phi Y}$: Hadde yönüne 90° çekme uzaması
 β : Çekme oranı
 D : Sac malzeme flanş çapı
 d : Kalıp iç çapı
 s : Sac malzeme kalınlığı

- a : Kalıp iç çapı
 $\overline{\varepsilon}$: Deformasyon hızı
t : Sac malzeme kalınlığı
 r_k : Kalıp köşe kavisini
 σ_I : X yönündeki asal gerilme
 σ_{II} : Y yönündeki asal gerilme
 σ_{III} : Kalınlık yönündeki asal gerilme
m : Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
n : Deformasyon sertleşmesi üssü
K : Malzeme mukavemet katsayısı
 x_r : Gerçek değer
 x_n : Yaklaşık değer
 e_r : Mutlak hata
 e_b : Bağıl hata

KISALTMALAR

- FEM : Finite Element Modelling (Sonlu Elemanlar Modelleme)
3D : Three Dimensional (Üç Boyutlu)
CNC : Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
FLD : Forming Limit Diagram (Şekillendirme Sınır Diyagramı)
HKT : Hata Kareleri Toplamı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Aluminyumun yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun yalnızca üçte biri kadar olmasına karşın, diğer metallerle alaşımlandığında oldukça yüksek mukavemet - ağırlık oranına sahip hale gelmekte, yeniden kullanılabilirlik, korozyon dayanımı, dayanım, süneklik, şekillenebilirlik ve iletkenlik gibi bazı özelliklerde üstün performans göstermektedir. Bu özelliklerin eşsiz kombinasyonu; güvenlik ve performanstan ödün vermeden kendi araç aksamalarının özellikleri içine yüksek mukavemetli, hafif malzemeler dahil etmek isteyen, otomotiv ve havacılık üreticileri tarafından büyük ilgi topladı. Bu alaşımların oda sıcaklığında kullanım alanları zayıf işlenebilirlik ve şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle sınırlı olsa da, son çalışmalar şekillendirme sınırının bazı şekillendirme metotları ve yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Hidro şekillendirme işlemi şekillendirilmesi güç, mukavemet ağırlık oranı yüksek malzemelerin şekillenebilirliğini arttıran metotlardan biridir [1-4].

Hidro şekillendirme işlemi endüstrinin ihtiyacını karşılamaya yönelik yeni geliştirilen metal şekillendirme süreçlerinden biridir. Bu metotta bir kalıp tarafından sıkıştırılan boru veya sac malzeme basınçlı akışkan vasıtasıyla dışı kalıbın içine doğru sıvanmaya zorlanır. Böylece borunun veya sacın cidarları kalıbın geometrisine göre genişler ve istenen şekle gelir. Diğer bir deyişle, hidro şekillendirme işlemi boru veya sac malzemenin üzerine basınçlı akışkan gönderilerek sacın veya borunun kalıba sıvanması ve istenilen formun verilmesi işlemidir.

Metal şekillendirme işlemlerine alternatif olan bu metot 1940'ın sonlarında geliştirilmiştir. Otomotiv, havacılık, uzay ve gemi endüstrisi gibi çeşitli alanlarda uygulanabilen metoda olan ilgi 1990 yılından sonra artmıştır.

Dayanımı yüksek malzemelerin şekillendirme limitini artırmak için oda sıcaklığında hidro şekillendirme (hidroforming) işleminin uygulanması, her ne kadar şekillendirme limitini artırsa da bazı malzemeler için tek başına yetersiz kalmaktadır. Bu sınırlılıkları aşmak için yeni metotlar geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ilık şekillendirme (warm forming) bu metotlardan biridir. Bu metot simetrik olmayan karmaşık geometrili bileşenleri daha az kırışıklık ve kulaklanmayla oluşturmak için araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [5-9]. Yöntem, geleneksel şekillendirme işlemlerinde karşılaşılan problemleri çözebilmekte ve sınırlılıkları ortadan kaldırebilmektedir.

Bu metotta şekillendirme parametreleri oldukça dikkatli belirlenmelidir. Malzeme şekillendirme işlemi, işlem parametreleri ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişir. Hidro şekillendirme işlemi üzerine, deformasyon hızı, deformasyon sertleşmesi üssü, kesme ve zımba geometrileri ve malzeme anizotropisi gibi birçok parametrenin etkileri farklı araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır [10,11].

Uçaklar, demiryolu araçları, özellikle yüksek mukavemet - ağırlık oranı nedeniyle savunma sanayi ve uzay araçları için tercih edilen AA7075 alaşımının şekillendirilmesi son yıllarda araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. AA7075 alaşımı araştırmacılar tarafından birçok farklı uygulama alanında kullanılmıştır. Bu uygulamalarda sıcaklık, deformasyon hızı, kalıp iç çapı, kalıp köşe kavis ve basınç gibi bazı parametrelerin etkileri araştırılmıştır [12-14].

Ilık şekillendirme teknolojisi (warm forming) alüminyum alaşımli levha şekillendirme işlemi için umut verici bir alternatif olarak kabul edilmiştir. Ancak alüminyum düşük ısı kapasitesine sahip olduğundan, şekillendirme hızı ve sıcaklık gibi işlem parametrelerinin kontrolünde hala sınırlılıklar yaşanabilmektedir.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Gerçekleştirilen çalışmanın amacı, sac şekillendirme metotlarından biri olan sac hidro şekillendirme metodunu kullanarak AA7075 - T6 sac malzemenin optimum

şekillendirilebilirlik parametrelerinin tespit edilmesi, şekillenebilirlik limitinin arttırılmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda;

1. AA7075-T6 malzemenin farklı sıcaklıklardaki mekanik özellikleri tek eksenli çekme testiyle tespit edilmiş,
2. Sıcak sac hidro şekillendirme ünitesi ve kalıpları tasarlanmış, kurulumu gerçekleştirilmiş,
3. İşlem parametrelerinin (sac malzeme, kalıp ve akışkan sıcaklığı, kalıp çapı, kalıp köşe kavisi vb) şekillenebilirliğe etkileri incelenmiş,
4. Derin çekme ve sıvama yöntemleri ile oda sıcaklığında tek kademede şekillendirilmesi güç olan, fakat mukavemet - ağırlık oranı yüksek konstrüksiyon talebine en uygun alternatifi sunan AA7075-T6 sacın termal hidro şekillendirme yöntemiyle şekillendirilebilme kabiliyeti arttırılmış,
5. Grid ölçüm metodu kullanarak şekillendirme sınır diyagramı (Forming Limit Diagram - FLD) oluşturulmuş,
6. Yapılan deneysel çalışmalara dayanarak bir korelasyon kurulup, denenmemiş ara parametrelerin deney sonuçları hakkında interpolasyon yapılmıştır.

BÖLÜM 2

HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNİN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

2.1. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TANIMI

Hidro şekillendirme işlemi metal şekillendirme alanında endüstrinin ihtiyacını karşılamaya yönelik geliştirilen yeni teknolojilerden biridir. İşlem, genel olarak, metal sac veya tüp malzemenin basınçlı bir akışkan vasıtasıyla/ortamında kapalı bir kaptaki şekillendirilmesidir. İlk olarak 1890'larda ortaya çıkmış, ancak asıl gelişimini II. dünya savaşı sonrasında gerçekleştirmiş bir imalat yöntemidir. İlk araştırmalar Almanya ve Japonya'da gerçekleştirilmesine rağmen; günümüzde Amerika, Rusya, Fransa, İsrail, Çin ve Kore gibi değişik ülkelerde gerek üniversite gerekse özel araştırma birimlerinde yoğun bir şekilde konu üzerinde çalışılmaktadır. Yöntem, yeterli bilgi birikimine ulaşamamış olmasından ve bazı teknik zorluklardan ötürü 1990'lara kadar gereken ilgiyi görmemiştir [15].

Günümüzde özellikle otomotiv, havacılık, hızlı trenler ve savunma sanayi gibi alanlarda tercih edilen hidro şekillendirme teknolojisi düşük adetli üretimlerde, prototip imalatında, alüminyum alaşımları ve yüksek dayanımlı çelikler gibi şekillendirilebilirliği göreceli olarak düşük, mukavemet/ağırlık oranı yüksek malzemelerin kullanıldığı durumlarda yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

2.2. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TÜRLERİ

Hidrolik şekillendirme bir tür esnek şekillendirme teknolojisidir. Değişken biçimli takımla şekillendirme teknolojileri basit ekipmanlar gerektirmeleri, mevcut donanımına uyum sağlayabilmeleri, düşük enerji tüketimleri, yüksek ürün kaliteleri ve fayda/maliyet oranlarının yüksek olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Hidrolik şekillendirmeyi 3 ana grup altında toplayabiliriz:

1. Sac hidrolik şekillendirme
2. Tüp hidrolik şekillendirme
3. Hidromekanik derin çekme

2.2.1. Sac Hidrolik Şekillendirme

Bu metotta baskı plakası vasıtasıyla sıkıştırılan sac malzeme basınçlı akışkanın etkisiyle dişi kalıbın içine doğru itilir. Dişi kalıbın içine sıvanan sac malzeme böylece şekillendirilmiş olur. Şekillendirme zımbasının yerini akışkan sıvının alabildiği bu metodun geleneksel şekillendirme metotlarına göre bazı avantajları bulunmaktadır.

Yüksek dayanımlı malzemelerin şekillendirilebilmesi, karmaşık olan ve simetrik olmayan parçaların daha az kırışıklıkla şekillendirilmesi, şekillendirme işleminde ve geleneksel şekillendirme proseslerinde karşılaşılan genel problemlerin (kırışıklık, kulaklanma, yırtılma vs.) en aza indirgenebilmesi ve hatta ortadan kaldırılabilmesi metodu avantajlı kılan özelliklerden birkaçıdır.

Günümüzde petrol kaynaklarının azalması ve petrolün değerinin artmasıyla birlikte özellikle kara ve hava araçları üretiminde aracın estetik, dayanım kaygısının yanında hafiflik de ön planda tutulmaktadır. Üreticiler dayanımı yüksek, ama hafif dolayısıyla az yakıt tüketen araç üretme yöntemleri arayışına girmiş, bilim dünyasını bu yönde araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Şekil 2.1’de Schuler tarafından hidrolik

şekillendirme yöntemiyle alüminyum malzemeden üretilmiş otomobil gövdesi görülmektedir.

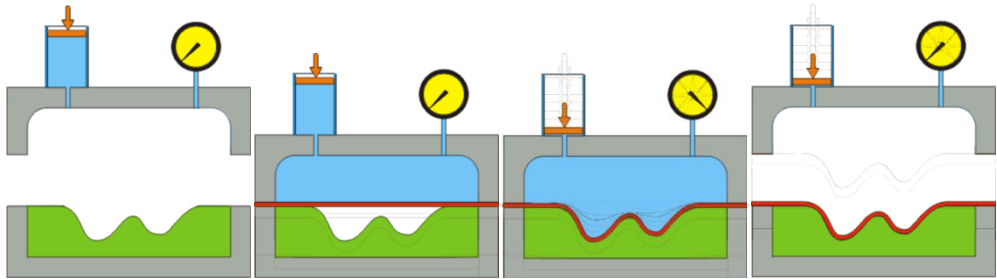


Şekil 2.1. Sac hidro şekillendirme yöntemiyle alüminyum malzemeden üretilmiş Volvo araç gövdesi [16].

Hidrolik sac şekillendirme genel olarak iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

2.2.1.1. Sac Plakanın Bir Akışkan Vasıtasıyla Şekillendirilmesi

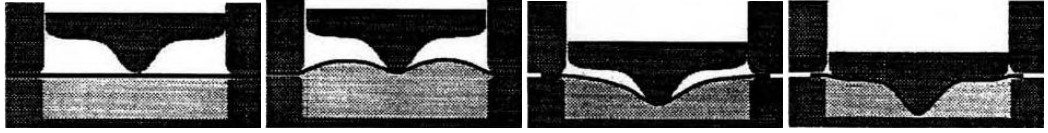
Bu yöntemde şekillendirme zımbasının yerini sadece akışkan sıvı almaktadır. Sac malzeme alt ve üst kalıp yarımları arasına sıkıştırılır ve dışı kalıbın içine basınçlı hidrolik akışkan vasıtasıyla itilir. Şekillendirme işlemi gerçekleşince basınç etkisi sac üzerinden kaldırılmaktadır. Böylece sac malzemeye istenen geometri verilmektedir. Şekil 2.2 sac plakanın sıvı basıncıyla şekillendirilmesi işleminin basamaklarını göstermektedir.



Şekil 2.2. Sac plakanın bir akışkan vasıtasıyla şekillendirilmesi [16].

2.2.1.2. Sac Plakanın Bir Zimba Vasıtasıyla Şekillendirilmesi (Hidromekanik Derin Çekme)

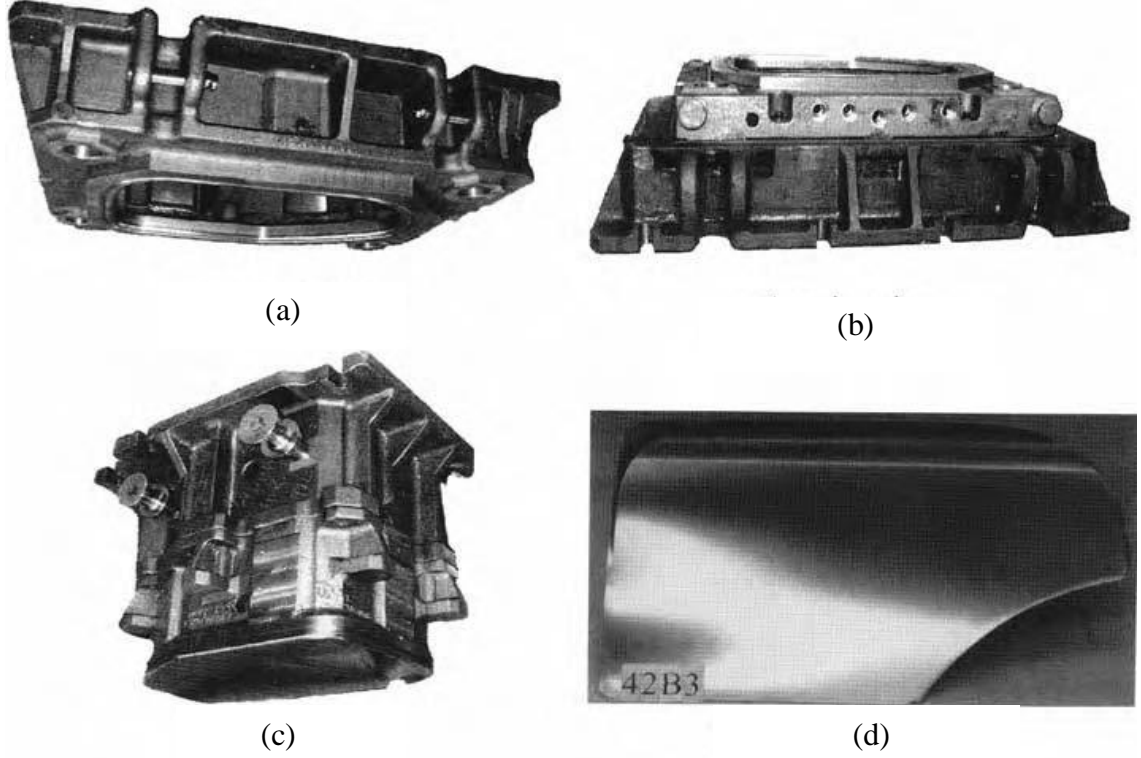
Sac malzeme kalıp alt ve üst yarımaları arasında belli bir baskı plası kuvvetiyle sıkıştırılır. Burada kalıp yarımaların biri aynı zamanda basınçlı akışkanın yer aldığı haznedir. Sıkıştırılan sac malzeme üzerine ortalama bir basınç uygulanarak ön şişirme uygulanır. Ön şişirme basıncı kaldırılmadan şekillendirme zımbası saca yaklaşır ve şekillendirme kuvvetini uygulayarak malzemeyi şekillendirir. Böylece basınçlı akışkan tarafından desteklenen sac malzeme maksimum baskı plakası kuvveti ile sıkıştırıldıktan sonra zimba ile şekillendirilmiş olur (Şekil 2.3) [17].



Şekil 2.3. Hidromekanik derin çekme işlemi [17].

Birçok farklı türe ayrılabilmesine rağmen temel olarak 2 ana sınıfta düşünebilir: (a) Hidrostatik hidromekanik derin çekme ve (b) Hidrodinamik hidromekanik derin çekme [15]. Hidromekanik çekme yönteminde klasik çekmeye oranla daha yüksek çekme oranlarına ulaşılabilir. Pratik uygulamalar hidromekanik çekmede 2,7 gibi yüksek derin çekme oranlarına rahatlıkla ulaşabildiğini göstermektedir. Bu durum bize klasik çekmede birden çok çekme kademesi gerektirecek profillere tek adımda ulaşma imkânı verir. Ayrıca bu işlem esnasında, malzemenin çekme zımbasına akışkan basıncı yardımıyla sıvanması sayesinde taban kavis bölgesinde malzeme incelmesi çok az olmaktadır. Bu büyük üstünlük, çok ince malzemelerin bile hidromekanik yöntem kullanılarak çekilmesine olanak sağlar. Küçük taban kavisleri kullanılabilir. Bu özellik, basınçlı kap imalatı gibi alanlarda, oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Klasik derin çekmede et kalınlığındaki yerel incelmelerden kaçınmak için, iş parçası için uygun görülen sac malzeme kalınlığından daha kalın levhalar kullanılırken; hidromekanik derin çekme yöntemiyle üretilen parçalarda, iş parçası için uygun görülen sac malzeme kalınlığına çok daha yakın malzemeler kullanılabilir. Yöntem otomobil parçalarının üretiminde (far kovanları, çamurluklar), uçak sanayinde ve mutfak ekipmanları üretiminde kullanılmaktadır [15]. Şekil 2.4'de

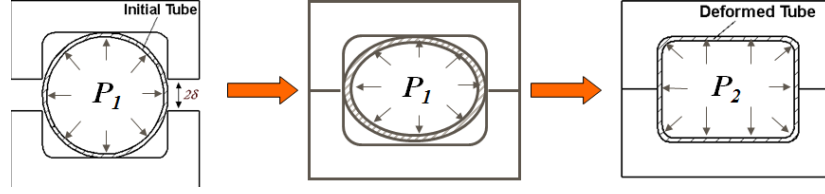
hidro mekanik derin çekme metoduyla şekillendirilmiş örnek bir otomobil kapısı ve kalıp elemanları görülmektedir.



Şekil 2.4. Hidromekanik derin çekme kalıp elemanları ve kalıplanan parça örneği a) baskı plakası, b) akışkan haznesi, c) zımba, d) hidromekanik derin çekme metoduyla şekillendirilmiş otomobil kapısı [18].

2.2.2. Tüp Hidrolik Şekillendirme

Öncelikle düz ve ön şekillendirilmiş boru, istenen geometriye göre hazırlanan kalıba yerleştirilir ve boru içerisine düşük oranda iç basınç uygulanır. Boru içindeki düşük miktardaki basınç sabit tutularak kalıp alt ve üst yarımı birbirleriyle birleştirilerek kapatılır. Sızdırmazlığı ve aynı zamanda aksenal stroku sağlayacak olan pistonlar harekete geçer, borunun iki tarafını kapatır ve ortam şekillendirmeyi sağlayacak akışkanla doldurulur. Uygulanan iç basınçtan ve eğer varsa aksenal sıkıştırmadan dolayı malzeme kalıbın içinde akmaya başlar, şişer ve kalıbın şeklini alır. İşlem sonunda kalıp açılır ve parça dışarıya alınır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Tüp hidro şekillendirme şematik gösterim [18].

Tüp hidro şekillendirme metoduyla şekillendirilen parçaları; gövde sistemleri (gösterge panosu, radyatör çerçeveleri, koltuk çerçeveleri), tavan yan kenarları, şasi sistemleri (motor beşiği, arka beşik, merdiven çerçeveleri, sönümleme çubukları), kontrol ve süspansiyon sistemleri (kontrol kolları, direksiyon milleri), motor ve çekiş sistemlerinde (egzoz manifoldu, kam mili) görmek mümkündür. Şekil 2.6 Schuler tarafından tüp hidro şekillendirme metoduyla üretilmiş bir araç şasisini göstermektedir [15].



Şekil 2.6. Schuler tarafından üretilmiş araç şasisi [15].

2.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRME TEKNOLOJİSİNİN KULLANILDIĞI ALANLAR

Hidro şekillendirme işlemiyle üretilen ürünler özellikle mukavemet ve düzenli malzeme kalınlık dağılımının arandığı bütün ortamlarda kullanılmaktadır. Özellikle;

1. Otomotiv endüstrisi (araç şasisi, far yuvaları, otomobil kapıları, kaporta, bagaj kapısı, jantlar, otomobil tavanı, motor gövde bloğu, eksoz boruları ve gövdesi, motor boruları, akslar),
2. Uçak sanayii (uçak gövde elemanları, motor şasisi),

3. Savunma sanayii (yüksek dayanım ve hafiflik gerektiren parçaların imalinde),
4. Mutfak ekipmanları (yemekhane sıcak yemek hazneleri, ankastre mutfak ekipmanları)
5. Uzay bilimi (ışıklandırma sistemi, ağır parçalar)

başlıca kullanım alanlarıdır.

2.4. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE SIKLIKLA KULLANILAN MALZEMELER

Hidro şekillendirme işlemi özellikle savunma sanayi, uçak ve uzay sanayinde kullanıldığı için yine bu alandaki üretimlerde kullanılan metal ve alaşımlarına sıklıkla uygulanabilen bir metottur. Günümüzde birçok malzemenin bu metotla şekillendirilebilirliği üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ancak en yoğun olarak;

1. Çelikler,
2. Paslanmaz çelikler,
3. Derin çekme sacları,
4. Yüksek mukavemet - ağırlık oranına sahip malzemeler,
5. Alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde tercih edilir.

2.5. SİSTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

2.5.1. Avantajları

Geleneksel şekillendirme metotları hidro şekillendirme metotlarıyla kıyaslanacak olursa; hidro şekillendirme işlemi klasik şekillendirme metotlarına göre %50 daha hafif, %45 daha az parçalı, %45 daha az kaynaklı ve daha sıkı toleranslıdır. Bu özellikler, sistemi diğer şekillendirme metotlarından daha avantajlı hale getirmektedir.

Günümüzde özellikle taşımacılık ve savunma sanayiinde kullanılan malzeme ve bu malzemenin şekillendirilmesinde kullanılacak teknolojinin önemi oldukça büyüktür.

Mukavemet/ağırlık oranı yüksek olan araçlar üretmek şu an olduğu gibi gelecekte de önemini koruyacaktır. Özel geometrideki ürünler ve mukavemet/ağırlık oranı yüksek malzemeler, diğer imalat yöntemlerine göre, hidro şekillendirme işlemiyle çok daha kaliteli üretilmektedir. Oysaki klasik şekillendirme yöntemleri kullanılarak üretilen ürün bazen birkaç aşamada şekillendirilebilmekte veya birkaç parçadan oluşturulup kaynak işlemi ile birleştirilebilmektedir. Bu durumda; üretimi gerçekleştirilen parça daha ağır olmakta ve boyutsal hassasiyeti de çok iyi olmamaktadır. Dolayısıyla bunların hepsi maliyet artışı olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidro şekillendirme işlemi ile özel geometrili ve mukavemet - ağırlık oranı yüksek parçalar tek kademede kaynaksız üretilmektedir; bu da zaman ve iş gücünden dolayısıyla maliyetten tasarruf sağlamaktadır.

Ayrıca derin çekme ile üretilen parçalarda kalınlık ve gerilim dağılımı homojen olamamakta dolayısıyla kulaklanma, kırışıklık, katlanma ve erken yırtılma ortaya çıkabilmektedir. Karmaşık geometrili ve simetrik olmayan parçaların daha az kırışıklıkla üretilmesini sağlayan bu metod, geleneksel metotların şekillendirme konusundaki sınırlılıklarını aşmayı sağlamaktadır.

Hidro şekillendirme metodunda, çevreyle uyumlu olmayan plastik parçalar yerine çevre ile daha uyumlu yeniden kullanılmaya daha uygun metal parçalar kullanabilmektedir. Diğer yöntemlere nazaran hidro şekillendirme metodu malzemenin yapısal sertliğini arttırmaktadır.

Ancak bütün bu sıralanan avantajlarının yanı sıra, sistemin ve kurulumun getirdiği bazı dezavantajlı durumlar da bulunmaktadır.

2.5.2. Dezavantajları

Hidro şekillendirme işleminin en önemli dezavantajları ürün çevrim sürecinin seri olarak gerçekleştirilememesi, ekipman ve kurulum maliyetinin yüksek olmasıdır. Bunların yanı sıra kalıp ve sistem tasarımı için geniş kapsamlı bilgi gereksinimi ve montaj için yeni kaynak teknolojilerinin sınırlı olması da sistemin dezavantajları arasında yer almaktadır.

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Sac metallerin şekillendirilebilirliğini incelemek amacıyla farklı araştırmacılar tarafından çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu metotlar dört başlık altında incelenebilir:

1. Simülasyon testleri,
2. Temel mekanik testler,
3. Sınır kubbe (dome) yüksekliği,
4. Biçimlendirme sınır diyagramı [1,19].

Klasik sac şekillendirme metotlarıyla şekillendirilmesi güç malzemelerin deformasyonu için hidrolik akışkanla şekillendirme teknolojisi kullanılmaktadır. Hidro şekillendirme konusunda son yıllarda yeni sistem ve teknolojiler denenmeye başlanmıştır.

Hidro şekillendirme konusunda geliştirilen yeni sistemlerin çoğu adım kontrollü hidro şekillendirme presleridir. Bu preslerin en büyük faydası, işlem parametrelerinin bilgisayar kontrollü olarak uygulanabilmesidir [20,21]. Ayrıca sadeleştirilmiş hidro şekillendirme sistem ekipmanları kullanarak, işlem maliyetinin düşürülmesini hedefleyen, genellikle deneysel çalışmalar yapmak amacıyla tasarlanmış tüp ve sac hidro şekillendirme sistemleri de geliştirilmektedir.

Son yıllarda birçok farklı malzemenin özellikle geniş uygulama alanları, hafiflikleri, dayanımı ve şekillenebilirlik özelliklerinden dolayı alüminyum ve magnezyum alaşımlarının şekillenebilirliği üzerine çok sayıda çalışma yapılmaktadır [22]. Bununla birlikte, yüksek dayanımlı bazı malzemelerin hidro şekillendirme işleminde sınırlılıklarla karşılaşabilmektedir. Bu sınırlılıkları aşabilmek için yeni metotlar

geliştirilmiştir. Ilık şekillendirme (warm forming) bu metotlardan biridir. Araştırmacılar bu metodu özellikle yüksek dayanım özelliğine sahip malzemelerin şekillenebilirliğini artırmasından dolayı oldukça yoğun kullanmışlardır.

3.1. DENEY PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİ İNCELEYEN ÇALIŞMALAR

Şekillendirme işlemi esnasında uygulanan sıcaklık, deformasyon hızı, deformasyon sertleşmesi üssü, kalıp ve zımba geometrisi, malzemenin anizotropi katsayısı gibi parametreler malzemenin şekillendirme oranını ve dolayısıyla da şekillenebilirliğini etkilemektedir. Bu parametrelerin etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır.

Hidro şekillendirme sistemi ile daha kaliteli üretim gerçekleştirebilmek için araştırmacılar sürekli arayışlarda bulunmuşlardır. Kalıp geometrilerinde, sistem ekipmanlarında ve kalıp malzemelerinde değişiklikler yapmışlardır. Öyleki kalıp sisteminin daha uzun ömürlü ve yüksek dayanımlı olması için beton kalıplar dahi kullanılmıştır [23]. Ancak kalıp kavisi küçük olan ve özel geometrili küçük parçaların şekillendirilmesinde bu kalıpların yeterli olamadığı görülmüştür [23].

3.1.1. Deformasyon Hızı (Strain Rate) ve Sıcaklığın Etkisi

Youssef et al. AA7475 alaşımını kullandıkları bir çalışmada şişirme testinde malzemenin reolojik parametrelerini ve bu parametrelerin şekillenmeye etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda malzeme parametrelerinin (deformasyon hızı duyarlılığı üssü m , malzeme mukavemet katsayısı K vb.) deformasyon hızı ile değiştiği ve bu değişimin zaman-şişme yüksekliği ve şişme yüksekliği-kalınlık dağılımı değişimlerini etkilediği görülmüştür [5].

Şekillendirme işlemi boyunca yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda işlem yapılması alüminyum alaşımlarının akma noktasını ve deformasyon sertleşmesi üssünü düşürmekte, böylece daha iyi şekillendirme işlemi gerçekleştirilebilmektedir [24].

Malzeme tane yapısının değiştiği yeniden kristalleşme safhasında; dislokasyon içeren toparlanmış taneler, kaybolur ve yerine yeni taneler çekirdeklenir. Çekirdeklenme genellikle hatalı bölgelerde, tane sınırlarında meydana gelir. Toparlanmış tanelerdeki dislokasyonlar yeni oluşan tanelerin sınırlarına kaçarlar. Böylece ilerinde dislokasyon miktarı çok az olan veya dislokasyon bulunmayan kk yeni taneler oluşur ki bu yeni yapıya yeniden kristalleşmiş yapı adı verilir. Yeniden kristalleşmiş yapıda soğuk işlemin etkisi tamamen giderildiği için uygulamada önemi çok büyüktür. Yeniden kristalleşme ile malzemenin mukavemet ve sertliğinde önemli ölçüde azalma, sünekliğinde ise artma olur. Yeniden kristalleşme ile dislokasyon yoğunluğu da önemli ölçüde azalmıştır ve deformasyon sertleşmesinin etkisi tamamen giderilmiştir.

Bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı, malzemenin plastik olarak bir saat içinde %50'sinin yeniden kristalleştiği sıcaklıktır ve yaklaşık olarak malzemenin ergime sıcaklığının $1/3$ ' ile $1/2$ 'si arasındadır.

Yeniden kristalleşen taneler, tavlama sıcaklığında uzun süre tutulursa veya yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda tavlınırsa yayınma ile zamanla büyürler. Tanelerin büyümesi, tavlama süresi ve sıcaklığa bağlıdır. Tane büyümesi ile malzemenin mukavemet ve sertliğinde azalma olur [25].

Kandil, basınç, sac malzeme kalınlığı, malzemenin mekanik özellikleri, zımba geometrisi, yk ve çekme oranının çekme performansını üzerine etkisini incelerken, Zhang, bu parametrelerin kırışıklık üzerine etkilerini deneysel ve analitik çalışmalarla vurgulamıştır [10,11].

Chung et al., sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş sac malzemelerin her birini hidro şekillendirme işlemine tabi tutmuştur. şekillendirme işlemi neticesinde kaynak bölgesinde gerilmenin azaldığı, sünekliğin arttığını vurgulamışlardır. Bunun dinamik yeniden kristalleşme bölgesindeki dislokasyon yoğunluğunun azalmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [26].

Ayrıca Takuda et al. yaptıkları çalışmaya göre ise, sıcak derin çekme işleminde sıcaklık arttıkça deformasyon sertleşmesi ve akma gerilmesi değerleri azalmış, sınır çekme oranı da düşmüştür [27].

Mahabunphachai and Koç ise 5052 ve 6061 alüminyum sacların yüksek sıcaklıkta şekillendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarına göre tek eksenli (çekme testi) ve iki eksenli (şişirme testi) yüklemeler altında alaşımların deformasyon davranışlarını incelemişlerdir [28]. Çalışma sonucunda mikroyapı analizleri, uygulanan farklı sıcaklık ve deformasyon hızının tane boyutu değişimine çok etkili olmadığını göstermiştir. Bunun nedeninin; termal işlemde aktif hale geçen dislokasyon çizgilerinin yüksek sıcaklık altında akma gerilmesini düşürmesi olduğu yorumunda bulunmuşlardır. Diğer yandan; şişirme testlerinden elde edilen gerilme eğrilerinin genellikle deneysel olarak ölçülen değerlerle uyum gösterdiği görülmüştür. Bundan dolayı; karmaşık geometri ve farklı yükleme koşullarının olduğu sıcak hidro şekillendirme analizleri için iki eksenli şişirme testi sonuçlarının kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

AZ31 alaşımının oda sıcaklığı ile 225 °C arasında hidrolik şişirme testlerini gerçekleştiren Kaya et al. oda sıcaklığında 12 mm, 225 °C’de 38 mm ile en büyük çekme yüksekliğine ulaşmışlardır [29].

Bir malzemenin deformasyon özellikleri, deformasyon parametrelerine göre değişim göstermektedir. Ayrıca, işlem sıcaklığına bağlı olarak malzeme yapısında yeniden kristalleşme meydana gelebilir [30].

Serhat Kaya yaptığı doktora çalışmasında Al 5754-O ve AZ31-O malzemelere 25 °C - 225 °C arasındaki sıcaklıklarda 0,025 ve 0,25 s⁻¹ defromasyon hızlarında şekillendirme uygulamış ve şekillenebilirlik açısından değerlendirmiştir. Hidro şekillendirme işlemi ile 5754-O malzemedeki deformasyon oranını 2,1’den 2,4’e çıkarmıştır. Yüksek sıcaklıkta ise bu değer 2,9’a çıkmıştır. AZ31-O malzemeyle ise deformasyon oranını 3,2’ye çıkarmıştır [3].

Aoura et al., farklı deformasyon sıcaklıklarının ve deformasyon hızının alüminyum alaşımlarının şekillenebilirliğine etkilerini incelerken [5], Yaşar vd. bu parametrelere iç basınç ve baskı plakası kuvvetinin etkilerini de eklemiş ve yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının mekanik ve deformasyon özelliklerini incelemiştir [6]. Cavaliere and Squillace ile Tran et al. sürtünme karıştırma kaynağı, sıcaklık değişimi ve deformasyon hızı parametrelerinin aynı malzemelerin deformasyon özellikleri üzerine etkilerini incelemişler ve yüksek sıcaklık ve düşük defromasyon hızının şekillenebilirliği artırdığını vurgulamışlardır [7,8].

Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunlukları büyük ebatlı geometrilerin oluşturulmasında tercih edilmelerini sağlamaktadır. Buna rağmen geleneksel derin çekme kalitesindeki çelik saclarla kıyaslandıklarında zayıf şekillenebilme kabiliyetleri bu alaşımları dezavantajlı duruma düşürmektedir. Bu sorun özellikle kompleks geometri parçaların şekillendirilmesinde daha çok görülmektedir.

Lee et al., sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış sac malzemeleri gererek şekillendirmiş ve yeniden kristalleşmenin deformasyonu etkilediğini vurgulamışlardır [31].

Keigler et al., tüp ve sac malzemelere oda sıcaklığı ile 450 °C arasındaki değerlerde sıcaklık uygulayarak termal hidro şekillendirme işlemine tabi tutmuş ve şekillendirme sınır diyagramını oluşturmuşlardır. Çalışmanın sonunda malzemelerin belli bir aralıkta şekillenebilirliğinin arttığını, ancak sıcaklık daha da arttırıldığında şekillenebilirliğin azaldığını vurgulamışlardır. Bu durumu yeniden kristalleşme sıcaklık aralığının şekillenebilirliğine etkileriyle açıklamışlardır [32].

Genellikle sıcaklığın artmasıyla şişme yüksekliği de artar. Ancak bazen bu durum tam tersi şekilde gerçekleşir. Sıcaklık artsa bile şişme yüksekliği veya deformasyon miktarı azalabilir. Örneğin, He et al. şişirme testlerinde sıcaklık arttıkça maksimum genleşme oranının arttığını ve 170 °C sıcaklıkta %30'a çıktığını, daha sonra sıcaklık 230 °C sıcaklığa ulaştığında genleşme oranının tekrar hızlı bir şekilde düştüğünü vurgulamışlardır [33].

Alüminyum alaşımlarının şekillenebilirliğini artırmak için geliştirilen metotlardan biri de malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı aralığında gerçekleştirilen ılık şekillendirmedir [34].

Yeniden kristalleşme sıcaklık aralığında, metallerin malzeme davranışı kristal kafes yapısı içindeki yenilenme yoluyla değiştirilir. Kafes yapı kusurlarının difüzyonu ve ayrıca tanelerin yer değişimi sonucu açığa çıkan enerjiyle malzemelerin şekillenebilirlik özellikleri arttırılır [35]. Ayrıca malzemenin akma gerilmesi ve sertliği azalırken, plastisitesinin önemli oranda arttığı açıkça görülebilir [36].

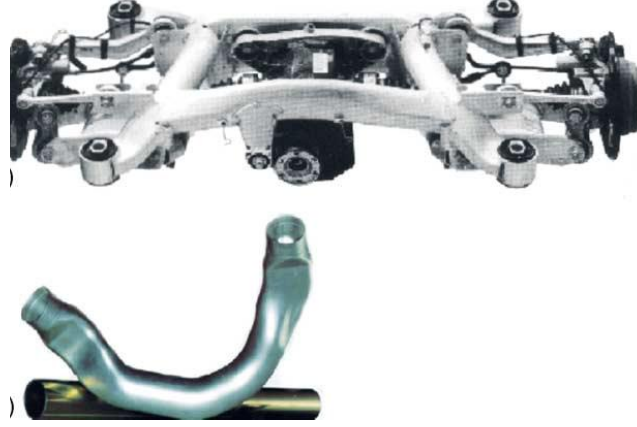
Gerçekleştirilen literatür taramasına göre malzemenin şekillenebilirliği sadece şişme yüksekliği ile direk olarak bağdaştırılmamalıdır. Literatürdeki çalışmaların sonuçları AA7075 malzemenin ılık şekillendirme sıcaklığında sünekliğinin arttığını göstermektedir [37,38].

3.1.2. Farklı Metotları Kıyaslayan Çalışmalar

Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunlukları büyük ebatlı geometrilerin oluşturulmasında tercih edilmelerini sağlamaktadır. Buna rağmen geleneksel derin çekme kalitesindeki çelik saclarla kıyaslandıklarında zayıf şekillenebilme kabiliyetleri bu alaşımları dezavantajlı duruma düşürmektedir. Bu sorun özellikle kompleks geometrili parçaların şekillendirilmesinde daha çok görülmektedir. Şekillendirme işlemi boyunca yeniden kristalleşme sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda işlem yapılması alüminyum alaşımlarının akma noktasını ve deformasyon sertleşmesi üssünü düşürmekte, böylece daha iyi şekillendirme işlemi gerçekleştirilebilmektedir [22].

Otomobil üreticilerinin, uluslararası çapta rekabet edebilmesi, uzay ve uçak teknolojisinin geliştirilebilmesi için, maliyeti azaltan, kaliteyi yükselten yeni teknolojilerin çok yakından takip edilmesi gerekmektedir. Daha az zararlı gaz emisyonu - daha az yakıt tüketimi, daha az yakıt tüketimi - daha düşük ağırlık, daha düşük ağırlık ise daha hafif malzeme demektir.

Şekil 3.1 -3.4’de daha önce hidro şekillendirme metoduyla gerçekleştirilen uygulama örnekleri yer almaktadır.



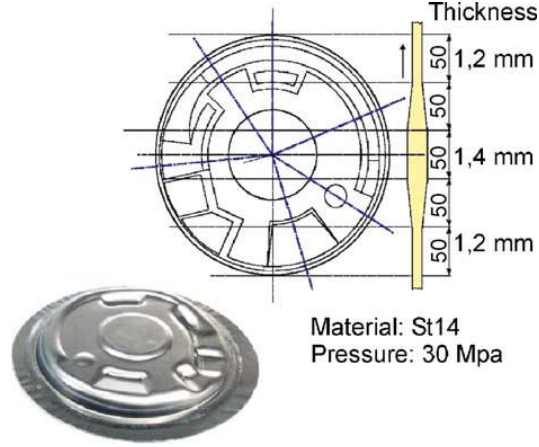
Şekil 3.1. Hidro şekillendirilmiş alüminyum gövde elemanları (BMW) [39].



Şekil 3.2. Sac hidroform metoduyla üretilmiş lüks bir otomobil tavan elemanı [39].



Şekil 3.3. Bir alüminyum tüpün sıcak hidro şekillendirilmesiyle elde edilmiş otomobil modeli, uzunluğu yaklaşık 250 mm (SPS) [39].



Şekil 3.4. Haddelenmiş çelik sacların hidro şekillendirilebilirliğini inceleyen bir çalışma [40].

3.1.3. Basıncın Etkisini İnceleyen Çalışmalar

Malzemelerin şekillenebilirliği işlem ve malzeme parametrelerine göre değişim göstermektedir. Hidro şekillendirme işleminde deformasyon hızı, deformasyon sertleşmesi üssü, kalıp ve zımba geometrisi, malzeme anizotropisi gibi bazı parametrelerin etkisi birçok çalışmada detaylı olarak incelenmiştir.

Otomobil üreticilerinin, uluslararası çapta rekabet edebilmesi, uzay ve uçak teknolojisinin geliştirilebilmesi için, maliyeti azaltan, kaliteyi yükselten yeni teknolojilerin çok yakından takip edilmesi gerekmektedir. Daha az zararlı gaz emisyonu daha az yakıt tüketimi, daha az yakıt tüketimi daha düşük ağırlık, daha düşük ağırlık ise daha hafif malzeme demektir. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir [2,3].

Hidro şekillendirme sistemi tasarımında dikkat edilmesi gereken başlıca unsurlar optimum sıvı basıncının ve baskı kuvvetinin uygulanması, ayrıca sistemin sızdırmazlığının sağlanmasıdır. Sıvı basıncı, çok yüksek olursa, malzeme sünekliğin izin verdiği orandan çok daha hızlı olarak kalıbın şeklini almaya zorlanacaktır. Bu da şekillenecek levhada beklenenden daha evvel yırtılmalara yol açar. Diğer taraftan, eğer sıvı basıncı çok düşük olursa, işlem esnasında yeterince uzama meydana gelmemesinden dolayı, malzeme buruşmaya daha meyilli olacaktır. Bundan dolayı,

üst ve alt limitler arasında sıvı basıncını ayarlamak gerekir. Optimum sıvı basıncının kontrolü, bitmiş üründe yırtılmaların ve buruşmaların en az olduğuna emin olunan basınç değeridir.

3.1.4. Baskı Plakasının Etkisini İnceleyen Çalışmalar

Birçok araştırmacı deformasyon problemlerinin (kulaklanma, kırışıklık, yırtılma) önüne geçebilecek alternatif tezler savunmuşlardır. Böylece kabın yırtılmadan yada kırışmadan çekilebilmesi ve daha optimum bir baskının uygulanması sağlanmıştır.

Kim et al., yaptıkları bir çalışmada 1 – 10 MPa arasında artan baskı plakası kuvvetiyle malzemenin çekme oranının %12'ye kadar düştüğünü vurgulamışlardır [41]. Karalı, pot baskı kuvvetinin belli bir miktar arttırılıp daha sonra azaltılması durumunda daha iyi bir şekillendirmenin meydana geldiğini vurgulamıştır [42]. Esner ise gerçekleştirdiği yüksek lisans çalışmasında derin çekme işleminde çekilen kabın derinliğinin, baskı plakasının sac üzerine uyguladığı kuvvetle doğru orantılı olarak değişeceğini vurgulamıştır [43]. Manabe et al. ise baskı plakası kuvvetinin kontrollü olarak uygulandığında kap derinliğinin arttığını göstermişlerdir [44]. Nantu ve Uncu yaptıkları lisans tezinde ve tübitak araştırma projeleri sonucunda bir hidro şekillendirme ünitesi kurmuşlardır [45]. Bu çalışmada baskı plakası kuvveti hidrolik pres tarafından uygulanmakta manuel olarak belirlenmektedir. Baskı plakası kuvveti şekillendirme işlemi boyunca sabit tutulmuştur. Bu durum bazı malzemeler için olumlu sonuç verirken bazı malzemeler için yetersiz kalmış ve kırışıklıklar oluşmuştur.

Genel olarak bakıldığında kimi araştırmacılar pot baskı kuvvetinin şekillendirme işlemi boyunca sabit tutulması gerektiğini savunurken kimi araştırmacılarda bu kuvvetin sıvı basıncıyla paralel olarak arttırılması gerektiğini savunmuş, bazıları ise pot baskı kuvvetinin akışkan basıncından en az 1 MPa daha az olması gerektiğini savunmuşlardır.

3.2. ALUMİNYUM ALAŞIMLARIYLA GERÇEKLEŞTİRİLEN HİDRO ŞEKİLLENDİRME ÇALIŞMALARI

Önceki yıllarda yüksek dayanıma sahip 7xxx ve 2xxx serisi alaşımlar düşük kaynak kabiliyetlerinden ve kötü korozyon dayanımlarından ötürü çok geniş bir kullanım alanına sahip değillerdi. Ancak sürtünme karıştırma kaynağının geliştirilmesi bu dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı hızlı trenlerde devam etmektedir. Örneğin Japon Shinkansen 5083 alaşımını kullanmakta ve ayrıca bir uzay aracı malzemesi olarak kullanımı karşımıza çıkan 7075 malzemesi de kullanılmakta. 7075 alaşımların dayanımının yüksek olmasına rağmen korozyon direnci düşüktür. Bu dezavantajı gidermek amacıyla yapılan araştırmalar sonucunda alaşıma Scandium elementi eklenerek alaşımın korozyon direnci artırılmıştır. 7xxx serisi alaşımlara scandium ilavesinin korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti gibi mekanik özelliklerde bir artış sağlayıp sağlamadığından çok daha önemli olan malzemenin maliyetini artırdığıdır. 7xxx serisi alaşımlarda scandium ilavesi bazı önemli sistem avantajları sağlayabilir. Örneğin 7xxx serisi alaşımlara scandium ilave miktarına göre günümüz tasarım gelişmelerine göre bütün montaj yapısında daha yüksek dayanımı ile hafif ama daha az malzemenin olduğu ve daha az yakıt tüketen araçlar için ekstrüzyon malzemesi olarak kullanılmaktadır [46].

Günümüzde olduğu gibi 1960'lı yıllarda da alüminyum alaşımları uçak elemanlarının yapımında oldukça sık kullanılmaktaydı. Alüminyum alaşımlarının temel yapı elemanı olarak kullanıldığı yerlerde çeşitli servis problemleri yaşanmıştır (Özellikle 2024 - T3, 7075 - T6, 7178 - T6 ve 7079 - T6 alaşımlarında).örneğin yapısal ağırlığı ve maliyeti azaltmak için 7178 - T6 özellikle KC - 135 Stratotanker için kullanılmıştır. Özellikle 2024 - T3 ve 7075 - T6 uçak gövde yapısını sertleştirmek için tasarlanmıştır. Günümüzdeki ileri teknolojinin kullanımıyla korozyon performansı ve hasar maliyetinin azaltılması için dayanım özelliği düşünülerek 7xxx serisi alaşımlar geliştirilmiş ve dayanım gerektiren yerlerde kullanılmıştır. Aşırı yaşlandırılmış T73 ve T76 temperleri 7075 alaşımının gerilme korozyon kırılması dayanımını artırmak için 1960'lı yılların başlarında geliştirilmiştir. Ayrıca 1970'lerde 7075 alaşımının kırılma tokluğunu artırmayı sağlayan 7075 türevleri geliştirilmiştir. 1980'lerde 7075 alaşımında 200 °C'nin üzerinde retragrasyon sıcaklığının büyük

ebatlı parçalara uygulanabileceği ve mekanik özelliklerin iyileşeceği araştırmalarla ispatlanmıştır. 7xxx serisi alaşımların temper özelliklerinden en yüksek akma dayanımı T6'da, en yüksek korozyon dayanımı ise T73'te bulunmaktadır. 7150 - T77 plaka ve ekstrüzyon ürünleri C17 kargo taşıma uçaklarında kullanılmakta, 7178 - T6 ve 7075 - T6 malzemeleri eski taşımacılık uçaklarının tavan ve koltuk raylarında ayrıca U.S. hava kuvvetleri KC - 135 Stratotanker'de kullanılmıştır [47].

Literatürde 7075 - T6 alaşımlı sac malzemelerle yapılan çalışmalara genel olarak bakıldığında alaşıma sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış ve hidro şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur [7,8].

Quan et al., 7075 alüminyum alaşımının sıcak deformasyon boyunca dinamik yumuşama davranışını izotermal sıcak sıkıştırma testleri ile 250 °C ~ 450 °C sıcaklık değerleri arasındaki 5 farklı sıcaklıkta ve dört farklı deformasyon hızıyla (0.01, 01, 1 ve 10 s⁻¹) incelemiştir. Sonuçlar sıcaklık değişiminin alaşımın dinamik yumuşama davranışında önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Dinamik yumuşama oranı ile dinamik yeniden kristalleşmenin birleşerek akma gerilmesinin düşmesine neden olduğu görülmüştür. Optik mikroyapılar; sıkıştırılan numunenin tane yapısının dinamik yumuşama, deformasyon sertleşmesi ve deformasyon oranının artışıyla daha homojen hale geldiği görülmüştür. 7075 alüminyum alaşımının sıcaklık etkisiyle oluşan deformasyon davranışı akma gerilmesi, sıcaklık, deformasyon hızı, gerinme ve dinamik yumuşama arasındaki ilişkilerle kesin olarak tanımlanabilmektedir ve plastik deformasyon davranışının sonlu elemanlar analizi için temel teşkil etmektedir. 450 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda dinamik yumuşama derecesi deformasyon boyunca gitgide küçülmektedir [9].

Tajally and Emadoddin yaptıkları çalışmada soğuk deformasyonla sertleştirilmiş numuneleri 270 °C – 450 °C sıcaklık aralığında derin çekme metodu ile şekillendirilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada tek eksenli çekme ve Erichson testleri yapılmış, derin çekme işlemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda 7075 malzemenin yaşlandırma sıcaklığı arttığında deformasyon kabiliyetinin de arttığını göstermiştir [48].

Lee et al., 7075 alaşımlı tp malzemenin oda sıcaklığı ve 50, 100, 150, 200, 250, 300 °C sıcaklıklardaki deformasyon davranışını incelemişlerdir. Bunun için malzemeyi önce 3 farklı gruba ayırıp her bir gruba farklı ısıl işlem uygulanmıştır (O, T6, W). Isıl işlem uygulanan sac malzemelere belirtilen sıcaklıklarda tek eksenli çekme testleri uygulanmıştır. Ardından ısıl işlem görmüş malzemelere tp hidro şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda yüksek dayanımlı alüminyum alaşımının karmaşık geometrili parçaların tek bir kademede hidroformingle başarılı bir şekilde elde edilebilmesinin malzemeye uygulanacak olan ısıl işleme ve hidroform esnasında uygulanacak sıcaklıkla sağlanabileceğini vurgulamışlardır. Malzemenin akma davranışının sıcaklığa bağlı olarak dinamik deformasyon yaşlanması, dinamik toparlanma ve dinamik çökeltilerden etkilendiğini vurgulamışlardır. Düşük sıcaklıklarda ve tavlanmış malzemelerde dinamik deformasyon yaşlanması akma davranışını daha fazla etkilemiştir. 100 – 200 °C arasındaki sıcaklıklarda ve solüsyona alınmış malzemelerde dinamik toparlanma ve çökelmenin dayanım ve uzamayı kontrol altında tuttuğunu belirtmişlerdir. 200 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda dinamik toparlanmanın en etkin mekanizma olduğu vurgulanmıştır [36].

Yeniay et al. alışmalarında 7075 alaşımının şekillendirilebilirliğini sonlu elemanlar analizleri ile incelemişlerdir. 0.01 s^{-1} , 0.001 s^{-1} , 0.02 s^{-1} , 0.002 s^{-1} olmak üzere 4 farklı deformasyon hızı kullanmışlardır. Numunelere derin çekme işlemi uygulamışlardır [13].

Dutta et al., alüminyum 7075 alaşımını ısıl işlem öncesi ve sonrasında 2 farklı strain rate kullanarak once friction stir weld ve ardından deep drawing işlemine tabi tutmuş, düşük strain rate ile yaptığı şekillendirme işleminin sonuçlarının daha iyi olduğunu çalışmasıyla göstermiştir [12].

Venkateswarlu et al., yaptıkları çalışmada AA7075 alaşımının derin çekme metoduyla şekillendirilmesinde sac malzeme sıcaklığı, kalıp köşe kavisi ve zımba hızı gibi parametrelerin şekillenebilirliğe etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda sac malzeme sıcaklığının alüminyum alaşımlı malzemenin

şekillenebilirliğinde önemli bir rol oynadığını, ardından sırasıyla zımba hızı ve kalıp köşe kavisinin şekillenebilirliği etkilediğini belirtmişlerdir [14].

Benzer bir çalışmada AA7075 alüminyum alaşımlı sac malzemenin şekillenebilirliğinin 140 - 220 °C sıcaklık aralığında önemli ölçüde arttığını, ancak sıcaklık 260 °C ve üzerine çıktığında şekillenebilirliğin ve mekanik özelliklerin önemli ölçüde azaldığını vurgulamışlardır. Çalışmanın sonunda bunun nedeninin ısıtma ve malzemenin temper özelliklerinden kaynaklandığını vurgulamışlardır [37].

Mori et al., ise sıcaklık ve kalıp köşe kavisinin magnezyum alaşımlı sac malzemenin şekillenebilirliğine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda kalıp köşe kavisinin artmasıyla şekillenebilirliğin azaldığını vurgulamışlardır [49].

Dariani and Azodi, AA7075 - T6 alaşımının da dahil olduğu 6 farklı sac malzemenin şekillendirme sınır diyagramlarını sonlu elemanlar analizi, deneysel uygulama ve teorik analiz metodlarıyla oluşturmuş sonuçları karşılaştırmıştır [50].

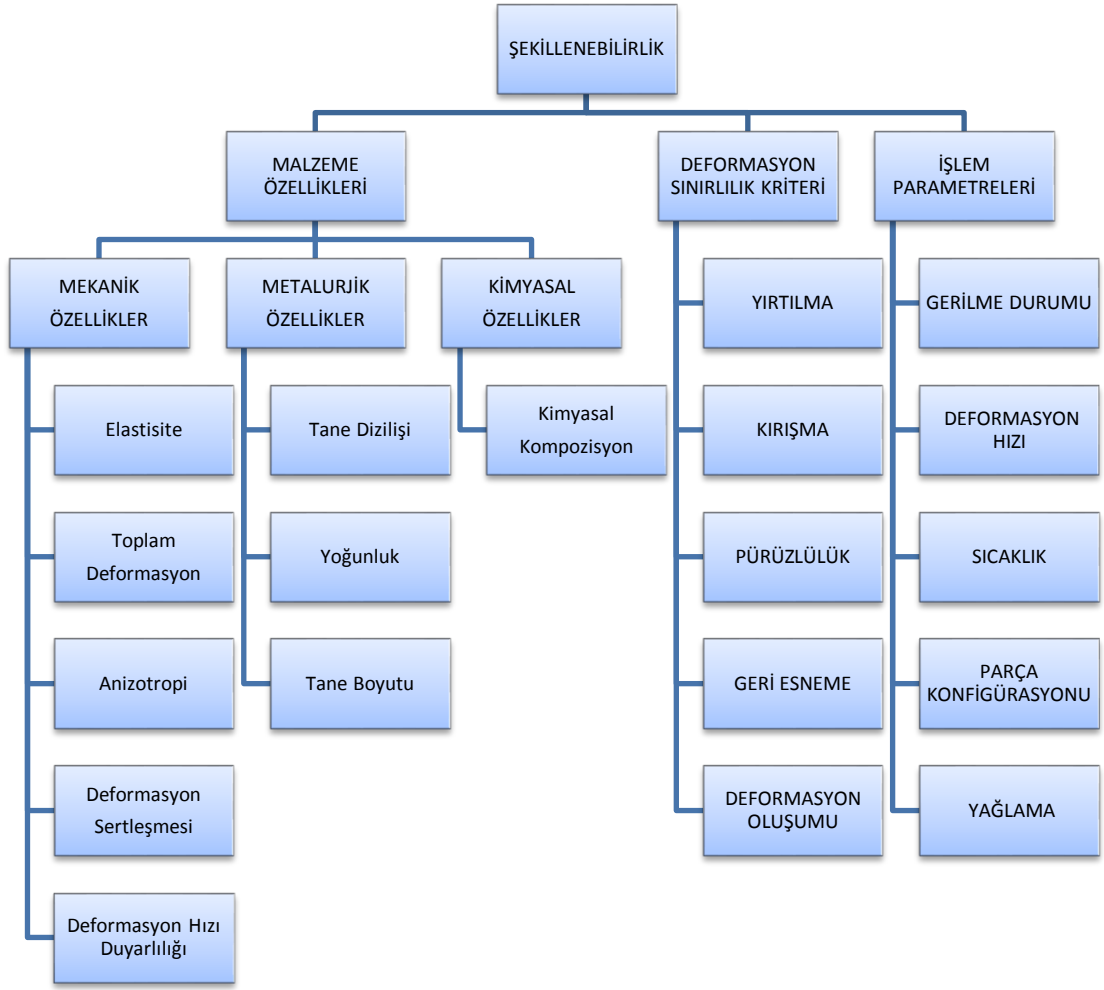
3.3. TÜRKİYEDE HİDRO ŞEKİLLENDİRME

Sıvı basıncı kullanılarak levhaların şekillendirilmesi işlemi, gelişmiş ülke sanayilerinde çok yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlgili yöntem ülkemizde yaygın olmamakla birlikte sadece 2 kuruluş (TAI ve 2. Hava İkmal Bakım Merkezi (HİBM) Komutanlığı) dışında (mevcut sistemleri satın alarak üretim hattında kullanmaktadırlar, sistemin geliştirilmesiyle ilgili bir çalışma yapılmamıştır) üniversitelerde de henüz pek kullanım alanı bulamamıştır. Bunun nedeni sistemin kurulum maliyetinin yüksek olması ve yeterli vasıflı eleman ve personelin bulunmamasıdır.

BÖLÜM 4

SAC METALLERİN ŞEKİLLENEBİLİRLİĞİ

Malzemenin kalın olması, tane yapısının ince olması, mümkün mertebe tek fazlı oluşu ve metalik olmayan kalıntılardan arındırılmış olması malzemelerin şekillenebilme kabiliyetlerini olumlu yönde etkilemektedir. Şekillenebilirlik, sac malzemenin plastik deformasyon kusurları olmadan belirli bir forma sokulabilme kapasitesidir. Plastik deformasyon kusurları, derin çekme ve gererek deforme etme gibi her bir temel sac metal şekillendirme işlemi için ayrı ayrı dikkate alınmalıdır. Plastik şekillendirme işlemlerinin arasındaki temel fark, şekillendirme işleminin mekaniğine dayanmaktadır. 19. Yüzyılın sonunda sac şekillendirme teknolojisindeki gelişmeler neticesinde sac metal şekillenebilirliği bir araştırma konusu haline dönüşmüştür. Bu alanla ilgilenen Bessemer ve Parkes, Adamson, Considere ve Erichsen ilk araştırmacılardan bazılarıdır [1]. Şekil 4.1 şekillenebilirliğin karmaşık yapısını ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Metal şekillendirme işleminin basamakları [1].

4.1. DEFORMASYON ORANI

Bir malzemenin çekilebilme kabiliyetinin ölçüsü olarak çekme oranı (β) kullanılır. Çekme oranı;

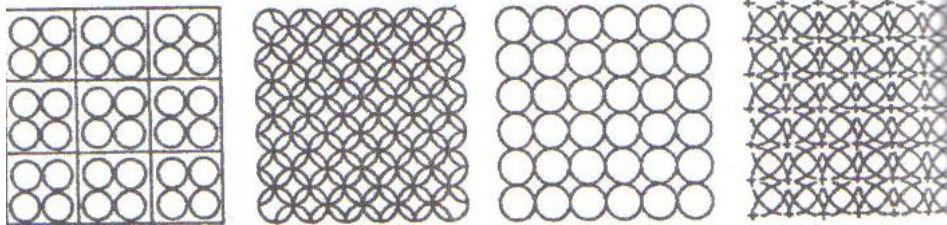
$$\beta = \frac{D}{d} \quad (4.1)$$

ile ifade edilebilir. “D” taslak çapı ve “d” ise kalıp çapı veya yaklaşık olarak elde edilen ürünün çapıdır.

Birçok araştırmacı hidro şekillendirme metodu kullanarak malzemelerin çekme oranını artırma yoluna gitmişlerdir. Tekkaya et al., hidro mekanik derin çekme işleminin karmaşık parça üretimini kolaylaştırdığı ve 2,25'in üzerindeki çekme oranına sahip ürünler için kullanılabileceğini belirlemişlerdir [51]. Bu oran bir başka çalışmada yumuşak çelik için 3,53; yumuşak alüminyum için 3,44 olarak elde edilebilirken [52], Thiruvarudchelvan and Lewis, bakır sac malzeme için maksimum 2,65 çekme oranını elde etmişlerdir [53]. Günümüzde havacılık ve uzay sektöründe çok geniş bir kullanım alanı olan süper alaşımların şekillendirilmesinde 2,45 çekme oranına ulaşılabildiği deneysel olarak kanıtlanmıştır [54].

4.2. şEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI

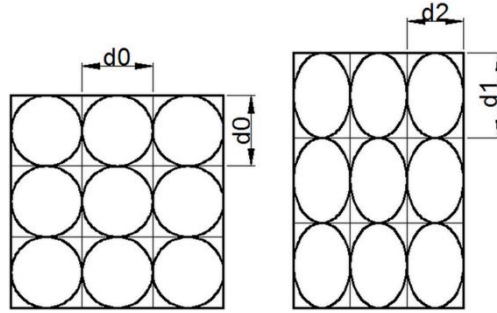
Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için, plastik şekil değiştirme analizlerine gerek vardır. Bu amaçla, metalik sac yüzeyine, elektrokimyasal yolla, şekil 4.2'deki örneklere benzer şekilde dairelerden oluşan bir ağ çizilir [25].



şekil 4.2. Metalik sac yüzeyine çizilen ağ örnekleri [25].

Deney numunesinin boyutlarını, yağlama yöntemini ve yağlayıcı türünü değiştirerek çekme, Erichsen, Swift veya benzeri deneylerle, plastik şekil değiştirme işlemi için farklı gerilme durumları oluşturulur. Bu gerilme koşulları altında malzeme boyun verme veya çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme işlemi sürdürülür. Deney sonrası değerlendirme için boyun verme bölgesindeki, çatlak bölgesindeki veya çatlağın bitişiğindeki 1. ve 2. komşu daire seçilir. Ancak bu seçim başlangıçta kesin yapılır ve tüm analizler için hep aynı bölgede daire değerlendirilir [25].

Şekillendirme işlemi sonunda başlangıç daire çapında (d_0) ya büyüme olur veya daire elipse dönüşür (Şekil 4.3).



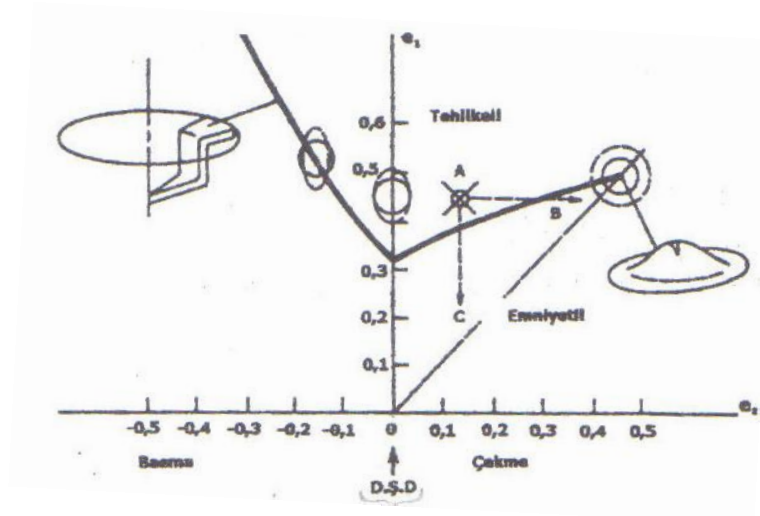
Şekil 4.3. Başlangıç daire ve şekillendirme sonrası boyutları.

Şekil değiştirmiş dairenin d_1 en büyük eksenini ile d_2 en küçük eksenini ölçülerek, en büyük (ϵ_1) ve en küçük (ϵ_2) birim şekil değiştirme miktarları bulunur.

$$\epsilon_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad (4.2)$$

$$\epsilon_2 = \ln \frac{d_2}{d_0} \quad (4.3)$$

Değişik deneylerde, değişik koşullar için bulunan değerler bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 4.4'de görülen "Şekillendirme Sınır Diyagramı" elde edilir [25].



Şekil 4.4. Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı örneği [25].

Şekillendirme sınır diyagramının üst bölgesi tehlikeli bölge, alt bölgesi emniyetli bölgedir. Ayrıca diyagram, çekme-çekme veya çekme-basma deformasyon türlerinin olduğu iki bölgeye ayrılır. Çekme-çekme bölgesinde ϵ_2 pozitif işaretlidir ve bu bölgeye ait ilk çalışmalar Keeler tarafından gerçekleştirilmiştir [25]. Çekme-basma bölgesinde ϵ_2 negatif işaretlidir ve bu bölge ile ilgili ilk çalışmalar Goodwin tarafından yapılmıştır [25]. Bu nedenle şekillendirme sınır diyagramları Keeler-Goodwin Diyagramları olarak da adlandırılmaktadır. Şekillendirme sınır diyagramında ϵ_2 'nin sıfır olduğu nokta, düzlemsel şekil değiştirmeyi belirleyen noktadır. Farklı malzemelerin karşılaştırılmasında bu noktaya ait değerler kriter olarak kullanılır [25].

4.2.1. Şekillendirme Sınır Diyagramının Deneysel Olarak Oluşturulması

Şekillendirme sınır diyagramının ifade edilmesi için uygulanan birçok farklı deneysel metot mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

4.2.1.1. Tek Eksenli Çekme Testi

Çekme testinin şekillendirme sınır diyagramını oluşturmadaki avantajı çekme numunelerinin kolay hazırlanabiliyor olması ve klasik çekme cihazında test edilebiliyor olmasıdır. Böylece numuneler test boyunca düzlemsel yapıda kalır ve bu da ölçümü kolaylaştırır. Bunların yanı sıra diyagramın sadece negatif kısmının oluşturulmasını sağlamaktadır ($\epsilon_2 < 0$) [1].

4.2.1.2. Hidrolik Şişirme Testi

Bu test ilk kez Olsen tarafından önerilmiştir. Testin en önemli avantajı sürtünmeyi hemen hemen ortadan kaldırmasıdır. Dezavantajı ise şekillendirme sınır diyagramının sadece pozitif kısmının oluşturulmasını sağlar ($\epsilon_2 > 0$) [1].

4.2.1.3. Zımbayla Germe Testi

Bu test ilk kez Keeler tarafından kullanılmış ve önerilmiştir. Sac malzemenin kalıp ve baskı plakası arasında sıkıştırıldıktan sonra eliptik bir zımba ile gerilmesi yöntemine dayanır. Uzama bölgesi sac malzemenin kalınlığına, zımba radüsü ve akışkana göre değişmektedir [1].

4.2.1.4. Keeler Testi

Bu test farklı radüslerdeki zımbalar kullanarak farklı uzama bölgeleri elde edilmesi mantığına dayanır. Büyük miktarlarda deneysel çalışma gerektirmesi, şekillendirme sınır diyagramının sadece pozitif bölgesini gösterebilmesi, şekillendirme sınırının zımba kavisinden dolayı değişim gösterebilmesi testin dezavantajlarıdır [1].

4.2.1.5. Hecker Testi

Farklı deformasyon bölgeleri oluşturabilmek için sürtünmenin farklı akışkan türleriyle oluşturulduğu bu testte sadece tek bir numune ve zımba kavisini kullanılır. Diyagramın sadece pozitif bölgesini vermesi testin dezavantajıdır [1].

4.2.1.6. Marciniak Testi

Bu test metodunda farklı şekil değiştirme bölgeleri elde etmek için farklı kesitlerde zımbalar kullanılmaktadır (dairesel, eliptik, dikdörtgen). Yırtılma, parçanın alt yüzeyinde görünür. Böylece ölçüm hataları ortadan kalkar. Bu durum bu testin avantajıdır. Dezavantajları ise, karmaşık geometrili zımba ve kalıp kullanılması, test sayısının sınırlı olması, ve diyagramın sadece pozitif bölgesini vermesidir [1].

4.2.1.7. Nakazima Testi

Test metodunun avantajı, takımların karmaşık olmaması, numune hazırlamadaki kolaylık sayılabilir. Dezavantajı ise; kırışıklıkların oluşabilmesi ve zımbanın temas bölgelerinde ölçüm hatalarının olabilmesidir. Bu metot "Metalik malzemelerin

şekillendirme sınır diyagramının tanımlanması” standardı olan ISO 12004 standardını kullanır [1].

4.2.1.8. Hasek Testi

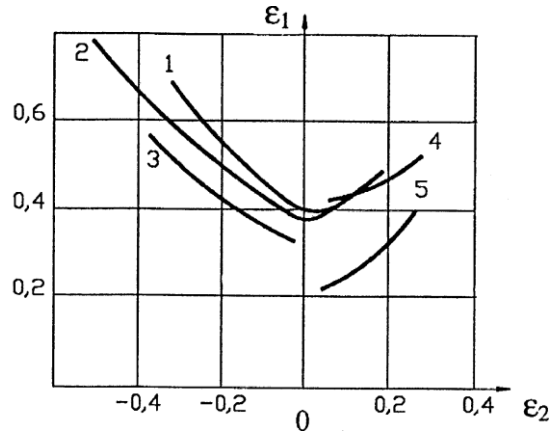
Kırışıklıkların engellenmesi için Hasek farklı çaplardaki dairesel numunelerin kullanılmasını önermiştir. Bu test metodu numunelerin üretilebilmesi için daha fazla iş gücünü gerektirmektedir [1].

4.3. FARKLI TEST METOTLARININ KIYASLANMASI

Yukarıda tanımlanan metotlara ek olarak bazı metotlar daha mevcuttur. Ancak bunların düşük deformasyon özelliğinden dolayı uygulama alanı oldukça az görülür (Myauchi testi kesmeyi kullanır, Marciniak testi sac burulmasını kullanır). Hasek bu test metotlarının şekillendirme sınır diyagramı üzerine etkilerini gösteren bir çalışma yapmıştır (Şekil 4.5).

Yukarıda tanımlanan testlerle ilgili şöyle bir yargıda bulunulabilir:

Sürtünmenin ortadan kaldırılması için Marciniak testi ya da hidrolik şişirme testi, sonuca basit olarak kısa yoldan ulaşılmak isteniyorsa tek eksenli çekme testi, farklı gerinim türlerinin ifade edilmesi için ise Nakazima testi kullanılabilir.



Şekil 4.5. Şekillendirme sınır diyagramının oluşturulmasında kullanılan farklı test metotlarının kıyaslanması [1].

4.4. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Metalik malzemelerin şekillendirme özelliklerinin ifade edildiği şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD - FLD); sac malzeme kalınlığı, grid boyutu, malzemenin uzama özellikleri, malzemenin mekanik özellikleri, zımba kavis, sıcaklık, deformasyon hızı ve normal basınç gibi parametrelerden etkilenmektedir [1].

4.5. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMININ (ŞSD-FLD) ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA KULLANIMI

Bir parçanın üretimindeki teknolojik olanakların tahmin edilmesi ve başarısız tasarımların önlenmesi için en gerçekçi ve verimli yöntem, şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD - FLD) yöntemi uygulamaktır. Yöntem; derin çekme için güvenlik aralığı, kritik boyun verme ve kırılma bölgeleri, uzama oranı ve uygun çalışma koşullarının (sıkıştırarak veya akışkanla gibi) tespit edilmesini sağlamaktadır.

Pratikte bu metot aşağıdaki gibi uygulanır. Malzeme kalitesi ve ölçüleri tasarımcı tarafından belirlenen parçanın şekillendirilmesi için, şekillendirme teknolojisi ve şekillendirmede kullanılacak elemanlar belirlenmelidir. Bütün bu işlemler için parçanın maksimum deformasyon kapasitesi şekillendirme sınır diyagramından tespit edilmelidir. Şekillendirme sınır diyagramıyla parçanın maksimum deformasyon bölgelerinin karşılaştırıldığı noktalardan bazılarında erken yırtılma veya çatlama ortaya çıkabilir. Eğer erken yırtılma ortaya çıktıysa bu hasarın eğriye ne kadar uzaklıkta meydana geldiğine bakılır. Eğer hasar eğrinin çok altında meydana geldiyse bazı düzenlemeler, modifikasyonlar yapılmalıdır. Örneğin;

1. Çalışma koşulları değiştirilebilir (baskı plakısıyla yada akışkanla şekillendirme gibi),
2. Parçanın kendi tasarımıyla ilgili değişiklikler yapılabilir (kavisleri, açıları gibi),
3. Malzeme değiştirilebilir (kalitesi, kalınlığı gibi).

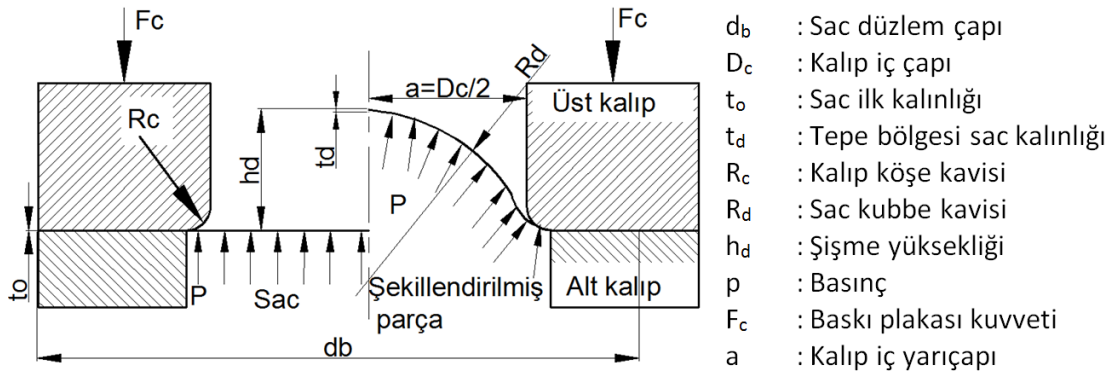
Karmaşık parçalarda şekillendirme sınır diyagramıyla maksimum deformasyonun tanımlanması zor olabilir ve dolayısıyla deformasyonlar analitik metotlarla

hesaplanamayabilir. Bu gibi durumlarda diğer iki metot uygulanarak maksimum deformasyon miktarı belirlenebilir: küçük ebatlı deneysel çalışmalar ya da nümerik benzetim yaparak.

Geçmişte deneysel metotlar oldukça yaygın olarak kullanılırdı. Ancak, son yirmi yıldır nümerik benzetim modelleri en çok tercih edilen metot haline dönüştü. Diğer yandan, nümerik çözüm metotlarıyla gerçekleştirilen çalışmalarla bu alanda önemli bir aşama kaydedilmiştir. Özellikle sonlu elemanlar metodu şekillendirme sınır diyagramlarıyla ilgili oldukça verimli olarak kullanılmaktadır.

4.6. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMİNDE ÖNEMLİ ÖLÇÜ VE PARAMETRELER

Şişirme deneyindeki efektif gerilme, deney parçasının geometrisine ve basınca bağlı olarak, bükme gerilmelerini ihmal eden membran teorisi ile de hesaplanabilmektedir. Küre formunda şiştiği kabul edilen parçanın ve kullanılan kalıbın karakteristik geometrisi Şekil 4.6'da görülmektedir [55].



Şekil 4.6. Şişirme testi şematik resmi ve önemli ölçüler [55].

Flanşı kilitlenmiş sac taslağın dairesel bir kalıpta şişirilmesinde dengelenmiş iki eksenli gerilme ve eksenel simetri gözönüne alınırsa ($R_{d-I} = R_{d-II} = R_d$), küre formunda şiştiği kabul edilen sacın tepe noktasındaki asal gerilmeler, membran teorisine göre Denklem (4.4) ile hesaplanabilmektedir [55,56]. Membran teorisinde bükme gerilmeleri ihmal edilmiştir. Dolayısıyla bu teori, sadece ince sac malzemelere uygulanabilmektedir.

$$\sigma_I = \sigma_{II} = \frac{pR_d}{2t_d} \quad (4.4)$$

Hidro şişirme testlerinde, basınç sacın iç yüzeyinden etki etmektedir. Sacın dış yüzeyine normal kuvvetler etki etmemektedir. Bundan dolayı sac yüzeyindeki ortalama normal gerilme kalınlık yönünde etkiler ve genellikle ihmal edilen normal gerilme de küçük asal gerilme olarak

$$\sigma_{III} = \frac{-p}{2} \quad (4.5)$$

eşitliği ile dikkate alınabilmektedir [3,55].

Şişirilen deney parçalarının küresel kabul edilen formunda, tepe noktasındaki profil yarıçapı R_d ve kalınlık t_d değerlerinin tahminine yönelik çeşitli ampirik bağıntılar ileri sürülmüştür. Ortalama R_d değerinin, şişme yüksekliği h_d değerine ve kalıp boyutlarına (kalıp iç çapı D_c ve profil yarıçapı R_c değerlerine) göre hesaplandığı Panknin tarafından geliştirilen (4.6) denklemi bunlardan birisidir [55,57].

$$R_d = \frac{\frac{D_c}{2} + R_c^2 + h_d^2 - 2R_c h_d}{2h_d} \quad (4.6)$$

Aynı değer Hill tarafından;

$$R_d = \frac{a^2 + h_d^2}{2h_d} \quad (4.7)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir.

Tepe noktasındaki kalınlık t_d ise, Hill tarafından (4.8) nolu denklemdeki şekliyle öngörülmüştür [55-58]. Hill, hidrolik şişirme testinde deformasyonu tanımlamak amacıyla analitik metotlar geliştirmiştir. Bu hesaplamalarda Hill, sac malzeme üzerindeki her bir noktanın yerinin deformasyon boyunca dairesel bir geometride olduğunu kabul etmiştir. Bu kabule göre de şişen malzemenin tepe bölgesindeki kalınlığı aşağıdaki denklemle açıklamıştır [55-58]:

$$t_d = t_o \frac{1}{1 + \frac{2h_d^2}{D_c}} \quad (4.8)$$

Şişen malzemenin tepe bölgesindeki kalınlık değeri Panknin ve Enikeev tarafından Denklem (4.9)'da verildiği gibi geliştirilmiştir [28].

$$t_d = t_o \frac{\sin \alpha}{\alpha} \quad (4.9)$$

Burada;

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{a}{R_d} \quad (4.10)$$

Ayrıca gerinme PankNin ve Enikeev tarafından [28];

$$\varepsilon = \ln \frac{t_o}{t_d} \quad (4.11)$$

ile ifade edilirken, deformasyon hızı (strain rate),

$$\overline{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} \quad (4.12)$$

denklemlerle tanımlanmaktadır. Burada t malzemenin şişirilme zamanını temsil etmektedir.

BÖLÜM 5

ÖN DENEYLER İÇİN DENEY SİSTEMİ TASARIMI VE ASIL DENEY PARAMETRELERİNİN TESPİTİ

AA7075-T6 malzemenin şekillenebilirliğini ve planlanan şekillendirme işleminin gerçekleştirilebilirliğini görmek, sistem parametrelerini ve eksiklerini tespit edebilmek amacı ile ön deneyler yapılmıştır. Ön deneyler için tasarlanan sistemde kalıp yarımları bir pres üzerine değil hidrolik kontrollü bir konsol üzerine yerleştirilmiştir. Bu sistem üzerinde AA5754, paslanmaz çelik ve farklı Erdemir sacları (St22, St33 vb.) ile farklı denemeler yapılmış, elde edilen sonuçların bir kısmı uluslararası sempozyumlarda bildiri olarak sunulmuştur. Gerçekleştirilen ön sistem tasarımı detaylarıyla aşağıda verilmiştir.

5.1. ÖN SİSTEM TASARIMI

Hidro şekillendirme kalıp sistemi tasarlanan bir çelik konstrüksiyon konsol gövde üzerine oturtulmuştur. Hidro şekillendirme kalıp sistemini ve bağlantı elemanlarını tek bir birim üzerinde toplamak ve kalıbı çalışır vaziyete getirmek için çelik konstrüksiyondan bir konsol tasarlanmıştır. Bütün sistem bu konsol üzerine oturtulmuştur. Konsolun tamamı U profili TS 912-C200-Fe37-2 profiller ile oluşturulmuştur. Toplamda altı metre boyunda 2 adet profil kullanılmıştır. Profiller kaynakla birleştirilmiştir.

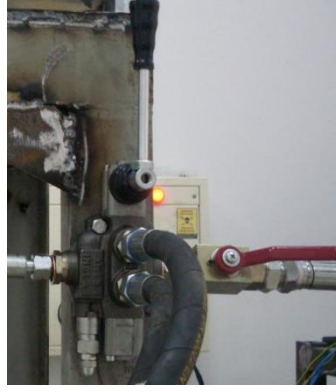
Konsola iş makinelerinden temin edilen 150 mm çapında ve 400 mm kurs boyundaki hidrolik silindir monte edilmiştir. Kalıp üst yarımının aşağı-yukarı hareketi ve pot baskısı bu silindir ile sağlanmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Hidrolik silindir ve bağlantısı.

Hidrolik silindir kaynak vasıtasıyla konsol ile birleştirilmiştir. Pot basıncını uygulayacak olan silindirin kalıba bağlantısı için ara eleman takmak gerekmiştir. Ara eleman için kalıp ve silindirin ölçüleri alınıp parça çelik malzemeden tasarlanmış ve talaşlı imalatı yapılmıştır. Kalıp ile silindir arasındaki bağlantıyı sağlamak için ise $\text{Ø}80*200$ mm boyutlarında çevrede 4 adet sıkma vidası bulunan ara eleman yapılmıştır. Ara parça piston koluna vidalı olarak geçirilmiştir. Alt yüzeye yerleştirilen kalıp çevredeki 4 adet vida ile sıkıştırılmıştır.

Ayrıca hidrolik silindirin hareketi için 4/3 kumanda kolu kullanılmıştır (Şekil 5.2). Böylece hidrolik silindirin hareketi kontrol edilebilmiştir. Kalıbın aşağı yukarı hareketini sağlayan ve baskı kuvveti uygulayan silindire güç 25 MPa basınç ve $0,05 \text{ dm}^3/\text{s}$ debiye sahip hidrolik güç ünitesinden iletilmiştir.



Şekil 5.2. Kumanda kolu montajı.

Şekillendirme ünitesinde ise ayrıca bir hidrolik güç ünitesi daha kullanılmıştır. Yağın kalıp içine gönderilmesi 160 MPa çalışma basıncına ve 0,00833 dm³/s debiye sahip hidrolik güç ünitesi ile sağlanmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Sistem genel görüntüsü.

5.1.1. Hidrolik Güç Üniteleri

Çalışmada kullanılan yüksek basınçlı hidrolik pompanın ve silindirin hareketini sağlayan hidrolik pompanın teknik özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Oluşturulan sistemde hidrolik silindirin hareketini 25 MPa basınç kapasiteli hidrolik güç ünitesi sağlamaktadır. Hidrolik şekillendirme işlemi ise 160 MPa basınç kapasiteli güç ünitesi ile sağlanmaktadır.

Çizelge 5.1. Hidrolik güç üniteleri teknik özellikleri.

	160 MPa Basınçlı Pompa	25 MPa Basınçlı Pompa
Model Tanımı	WW-RKP1200	
Çalışma Basıncı (MPa)	160	25
Gösterge	160 MPa Gliserinli Manometre	25 MPa Gliserinli Manometre
Basınç Ayarı	0-120 MPa	0-21,4 MPa
Valf Tipi	Tek etkili	Çift etkili
Pompalama Hızı (dm³/s)	0,00833	0,05
Yağ Tankı (l)	12	7
Elektrik Motoru	380 Volt 1,5 kW ya da 220 Volt 2,2 kW	380 Volt 1,5 kW ya da 220 Volt 2,2 kW
Kalite Standardı	TUV, CE, ISO 9001-2000	TUV, CE, ISO 9001-2000

5.1.2. Kullanılan Yağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Hidrolik silindirin hareketini gerçekleştirmek üzere Hidroteks DTA 10 yağ kullanılmıştır. Ayrıca ön deney çalışmaları oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinden şekillendirme işlemi için de aynı hidrolik yağ kullanılmıştır. Çizelge 5.2’de ön deneylerde kullanılan hidrolik yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Hidroteks DTA 10 kalite yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri [59].

Oksidasyon Stabilesi	FZG Yük Dayanımı	Köpürmeye Dayanıklılık	Hidrolik Stabilesi	Termal Stabilesi	Sudan Ayrılma Özelliği	Aşınma Önleme Kabiliyeti	Hava Bırakma
ASTM D-943 (saat)	DIN 51534 PART II (seviye)	ASTM D 892 (ml, 1. kademe)	ASTM D-2619 (mg/m ²)	Cincinnati Milacron A (mg/m ²)	ASTM D-1401 (dakika)	Vickers V104C (mg)	ASTM D-3427 (saniye)
1000-2000	11	100/0	1/0,4-5	25-18	20-40	100-150	200-300

5.1.3. Sistemin Çalışma Prensibi

25 MPa basınç kapasiteli güç ünitesi vasıtasıyla hidrolik silindire yağ basılmaktadır. Hidrolik silindirin aşağı hareketini sağlayan üst bağlantı girişinde vana bulunmaktadır. Vananın açılmasıyla akışkan pistonun içine dolmakta ve kalıp üst yarımını aşağıda yer alan kalıp alt yarımına doğru itmektedir. Kalıp alt yarımı üzerinde yer alan sac malzeme üst kalıp yarımının kapanması ile iki kalıp yarımı arasında sıkıştırılmış olur. Sıkıştırma işleminden sonra silindir girişindeki vana kapatılarak silindirin geriye kaçırması engellenmiş olur. 160 MPa basınçlı hidrolik güç ünitesinin basınç uygulamasıyla sac malzeme üzerine basınçlı akışkan gönderilir. Sac malzeme yağın baskı kuvvetiyle yukarı doğru itilerek üst kalıp yarımının içinde yer alan iç kalıba doğru itilir, ve sıvanarak kalıp geometrisini alması sağlanır. Şekillendirme işlemi sonrasında kalıbın alt kısmında yer alan vana açılarak kalıp içinde yer alan yağ pompa tankına tahliye edilir. Üst kalıp yarımı yukarı kaldırılarak numune kalıp içinden alınır. Böylece şekillendirme işlemi tamamlanmış olmaktadır.

5.1.4. Ön Deneyler

Mevcut sistem ile A 621 ve AISI 440 A paslanmaz çelik saclar, AA5754 alaşımlı sac malzeme ile hidro şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 102 mm iç çap, 50 mm derinlik, 10 mm köşe kavisine sahip kalıp ve otomobil jant geometrisinde ikinci bir kalıp kullanılarak ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerin neticesinde uluslararası bildiriler ve lisans tezleri yayımlanmıştır [6,45,60,61]. Şekil 5.4'te ön deneylerde şekillendirilen parça geometrileri görülmektedir.



Şekil 5.4. Şekillendirmesi gerçekleştirilen parçalar.

5.2. ASIL DENEY PARAMETRELERİNİN TESPİTİ

5.2.1. Kalıp İç Çaplarının Tespit Edilmesi

Gerçekleştirilmesi planlanan çalışmada 2 farklı kalıp iç çapı kullanılmasına karar verilmiştir.

Malzemelerin şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulduğu standart hidro şekillendirme testlerinde kullanılan kalıp çapı 100 – 102 mm'dir. Bundan dolayı deformasyon işlemi için kalıp kullanılacak kalıp çaplarından birinin 102 mm olmasına karar verilmiştir.

Hidro şekillendirme metodu, malzemelerin şekillenebilirliğini ve çekme oranını artırmak için kullanılan metotlardandır. Hidro şekillendirme metodu deformasyon oranı (β) 2,25 ve üzerinde olan malzemeler için uygundur. Dolayısıyla gerçekleştirilecek şekillendirme işleminde deformasyon oranı 2,25 ve üzerine çıkacak kalıp çapları ve deformasyon oranları tespit edilmiş, bunların arasından deformasyon oranı 2,3'ün üzerine çıkan $\phi 60$ mm'lik kalıp tercih edilmiştir.

Böylece deneylerde kullanılacak çekirdek kalıp iç çapları 102 ve 60 mm olarak tespit edilmiştir.

5.2.2. Uygun Pot Baskı Kuvveti Tespiti İçin Yapılan Deneyler

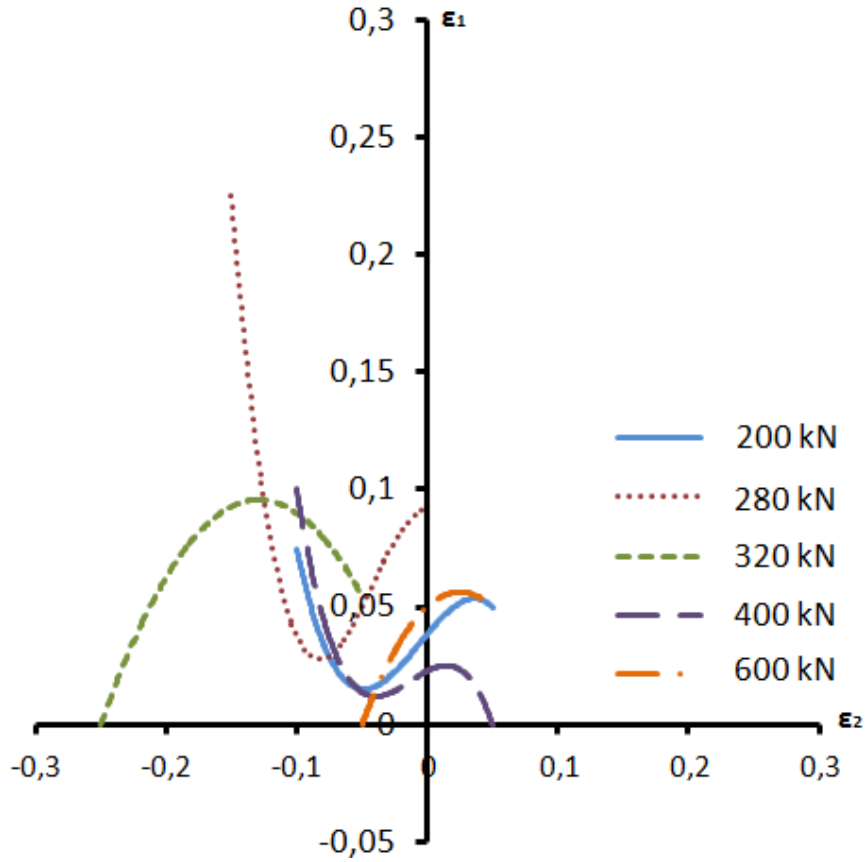
Gerçekleştirilecek çalışmada farklı sıcaklıklarda hidro şekillendirme işleminin yapılması planlanmaktadır. Deneylerin tamamında sıcaklık, kalıp çapları ve kalıp köşe kavisleri değişirken, pot baskı kuvveti sabit tutulacaktır. Şekillendirme esnasında kullanılacak baskı kuvvetinin belirlenebilmesi için farklı sıcaklık ve baskı kuvvetleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Pot baskı kuvvetinin ve deformasyon sıcaklığının tespiti için gerçekleştirilen deneyler 102 mm çap ve 7 mm köşe kavisine sahip kalıp ile gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin sonuçları şişme yüksekliği, şekillendirme sınır diyagramı (FLD) (Şekil 5.5), kulaklanma ve kırışıklık oluşumu açısından değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Pot baskı kuvvetinin tespit edilebilmesi için uygulanan ön deneyler.

Kuvvet (kN)	Deney Sıcaklıkları (°C)
200	20
280	20
320	20, 100, 200, 250
400	20, 100, 200, 250
480	20
600	20, 100, 200, 250
800	20

Çizelge 5.3’de verilen baskı kuvvetlerinde öncelikle oda sıcaklığında şekillendirme deneyleri yapılmış, şişme yükseklikleri ve grid ölçümleri değerlendirilmiştir.



Şekil 5.5. Pot baskı kuvveti tespiti için yapılan deneylerden elde edilen şekillendirme sınır diyagramları.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen numunelerin şişme yükseklikleri dijital mihengir ile ölçülmüş, grid ölçümleri ise Schweizer Tech Line marka 10X büyütme özelliğine sahip skalalı loop büyüteç ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6). grid ölçümleri sonucu elde edilen değerler EK AÇIKLAMALAR A. Çizelge Ek A.1’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Skalalı loop büyüteç.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde 200 kN ve 280 kN baskı kuvveti yetersiz kalmış, numunelerin flanş bölgelerinde kırışıklıklar oluşmuştur. 320, 400, 480, 600 ve 800 kN baskı kuvveti ile şekillendirilen numunelerin tüm ölçümleri alınabilmiş ve iyi bir şekillenme olduğu görülmüştür. Ancak baskı kuvveti 800kN üzerine çıktığında numunelerin ölçüm alınamayacak şekilde hasar aldığı, zorlanmadan ötürü flanş bölgelerinde eğilme ve bükülmelerin gerçekleştiği görülmüştür.

Ardından oda sıcaklığında en iyi sonuçların alındığı 320, 400 ve 600 kN baskı kuvveti ile gerçekleştirilen deneyler farklı sıcaklıklarda (100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 ve 250 °C) gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme sıcaklığı arttıkça malzemenin daha fazla şekillenmeye çalıştığı, bu durumda 320 ve 400 kN baskı kuvvetlerinin yetersiz kaldığı deneysel numunelerde oluşan kırışıklıklardan görülmüştür.

Gerçekleştirilmesi planlanan deneysel çalışmalarda pot baskı kuvveti olarak 600kN baskı kuvvetinin uygulanması uygun görülmüştür.

5.2.3. Uygun Şekillendirme Sıcaklığının Tespiti İçin Gerçekleştirilen Deneyler

Gerçekleştirilecek tez çalışmasında imkanlar çerçevesinde şekillendirme işleminin optimum parametreleri tespit edilip, AA7075 - T6 sac malzemenin en uygun şekillendirme sıcaklığı belirlenecektir. Bu kapsamda sac malzemenin oda sıcaklığı, ılık şekillendirme ve sıcak şekillendirme koşullarında şekillendirilebilirliği tespit edilmiştir.

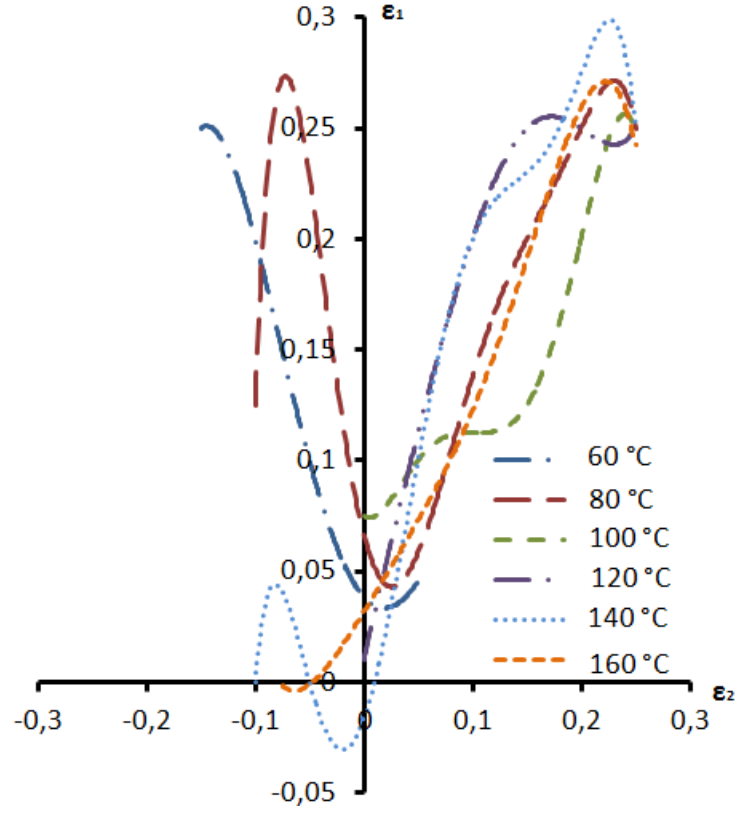
Metallerin şekillendirilmesinde deformasyon sıcaklığı önemli etkenlerden birisidir. Deformasyon sıcaklığı metalin ergime sıcaklığının 0,3 katından küçük ise ($T < T_m * 0,3$) soğuk şekillendirme, deformasyon sıcaklığı metalin ergime sıcaklığının 0,3 katından büyük 0,5 katından küçük ise ($T_m * 0,3 < T < T_m * 0,5$) ılık şekillendirme, sıcaklık ergime sıcaklığının 0,5 katından büyük ise ($T > 0,5 * T_m$) sıcak şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Ancak burada sıcaklık Kelvin ($^{\circ}K$) cinsinden alınmalıdır.

AA7075 – T6 sac malzemenin ılık şekillendirme ve sıcak şekillendirme sıcaklıkları tespit edilmiştir.

5.2.3.1. Ilık Şekillendirme İçin Uygun Sıcaklık Tespiti Deneyleri

AA7075 – T6 sac malzemenin ılık şekillendirme sıcaklığının tespiti için 600 kN sabit pot baskı kuvveti ile 102 mm iç çapa ve 7 mm köşe kavisine sahip kalıp kullanılarak, $T_m * 0,3 < T < T_m * 0,5$ aralığındaki 60, 80, 100, 120, 140 ve 160 $^{\circ}C$ sıcaklıklarda hidro şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar grid ölçümü yapılarak değerlendirilmiştir. Grid ölçümleri sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları EK AÇIKLAMALAR A. Çizelge Ek A.2’de verilmiştir.

Grid ölçümlerinin sonucunda şekillendirme sınır diyagramı (FLD) oluşturulmuş ve şekillendirilebilirlik açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. FLD Şekil 5.7’de verilmiştir.

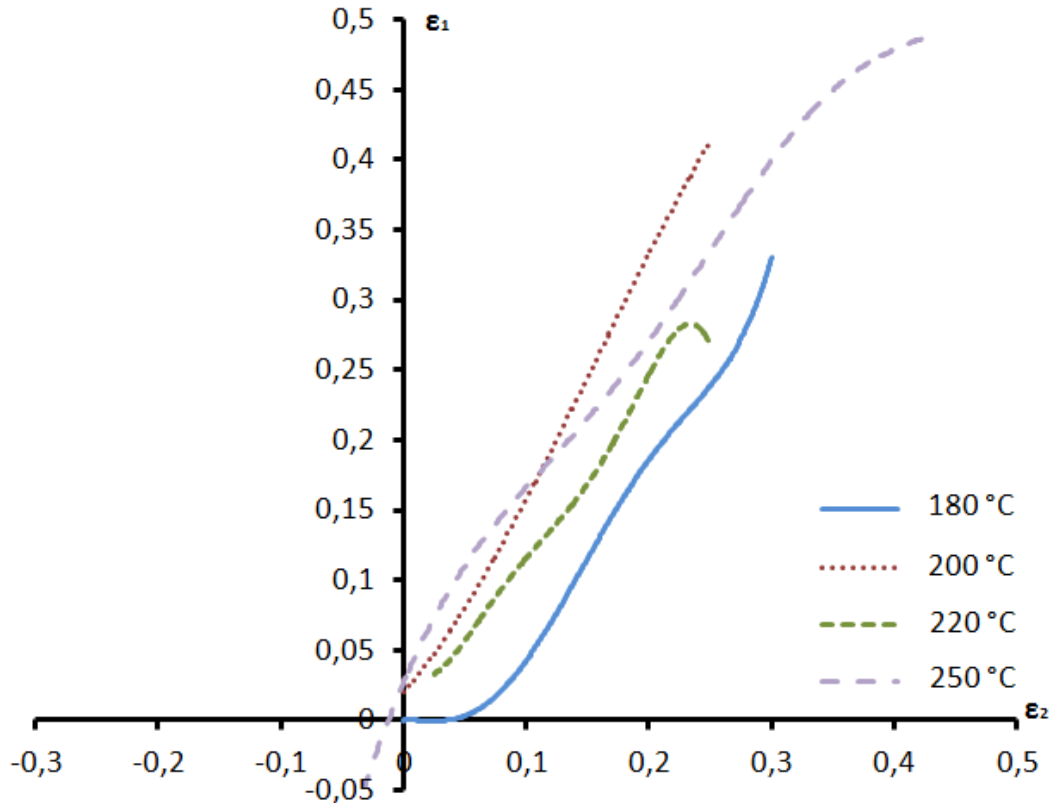


Şekil 5.7. Ilık şekillendirme sıcaklığının tespiti için yapılan deneylerin FLD sonucu.

Şekil 5.7'den de görüldüğü gibi 140 °C sıcaklık değerinde malzemenin şekillendirme sınırı, deformasyon sıcaklık değerleri arasında en büyük değere ulaşmıştır. Dolayısıyla en uygun ılık şekillendirme sıcaklığı şekillendirme sınırının en yüksek olduğu 140 °C olarak tespit edilmiştir.

5.2.3.2. Sıcak Şekillendirme İçin Uygun Sıcaklık Tespiti Deneyleri

En uygun sıcak şekillendirme sıcaklığının tespiti için $T > 0,5 \cdot T_m$ aralığında olan 180, 200, 220 ve 250 °C sıcaklıklarda hidro şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonucu elde edilen numunelerden grid ölçümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8). Grid ölçümü sonucunda elde edilen veriler EK AÇIKLAMALAR A. Çizelge Ek A.3'te verilmiştir.



Şekil 5.8. Sıcak şekillendirme için uygun sıcaklık tespiti deneyleri şekillendirme sınır diyagramları.

Şekilden de görüldüğü gibi mevcut sistem koşulları altında en iyi şekillendirme sıcaklığı 250 °C olarak tespit edilmiştir.

5.2.4. Ön Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve Deney Parametrelerinin Tespiti

Gerçekleştirilen pot baskı kuvveti tespiti deneyleri ve şekillendirme sıcaklığı tespiti deneylerinin ardından asıl deney parametreleri tespit edilmiştir.

Buna göre asıl deneylerde kullanılacak pot baskı kuvveti ve sıcaklık parametrelerinin Çizelge 5.4’de olduğu gibi yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deney sıcaklık ve pot baskı kuvveti parametreleri.

Deformasyon Sıcaklığı (°C)	Kalıp Çapı Ø (mm)	Pot Baskı Kuvveti Sabit (kN)
Oda Sıcaklığı	102	600
	60	600
140	102	600
	60	600
250	102	600
	60	600

5.2.5. Kalıp Köşe Kavislerinin Tespit Edilmesi

AA7075 - T6 sac malzemenin uygun şekillendirme koşullarının tespiti için gerçekleştirilen çalışmada farklı çap ve köşe kavislerine sahip kalıplar tasarlanmıştır. 2 farklı çapta ve her biri 4 farklı köşe kavisinde olmak üzere toplam 8 adet kalıp tasarlanmıştır. Tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen kalıpların parametreleri Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp parametreleri.

Kalıp Çapları Ø (mm)	Kalıp Köşe Kavisleri (mm)
102	7
	10
60	16
	20

Kalıp köşe kavisleri belirlenirken alüminyum sac malzeme ve kalıp çapı için uygun olabilecek kalıp kavislerinin verildiği Çizelge 5.6 – 5.8’den ayrıca denklem (5.1)’den faydalanılmıştır [62].

Çizelge 5.6. Çekme tipine göre kalıp kavisleri [62].

Çekme Tipi	s/d(%)
Silindirik	(5-8)s
Flanşlı	(10-15)s

s burada sac malzeme kalınlığı ve d kalıp iç çapını temsil etmektedir.

Çizelge 5.7. Sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavisleri [62].

Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Kavisleri (mm)		Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Kavisleri (mm)	
	Min	Max		Min	Max
1,5	6	9	0,7	5	7
1,4	6	9	0,6	5	7
1,3	6	9	0,5	4	7
1	5	8	0,4	4	6,5
0,8	5	8	1,6	6,5	10

Çizelge 5.8. Malzeme kalınlığına göre kalıp kavisleri [62].

Malzeme Kalınlığı (mm)	Kalıp Kavisleri (mm)
0,4	1,6
0,8	3,2
1,2	4,8
1,6	6,4
2	9,5
2,4	11
3,2	14

Denklem (5.1)'e göre [90];

$$r_k = 0,035 \sqrt{50 + D - d} \quad (5.1)$$

r_k = kalıp kavisi

D = şekillenmiş parça flanş çapı

d = kalıp iç çapı [62].

Buna göre Denklem 5.1'e göre hesaplandığında 7 mm, Çizelge 5.6'ya göre 10 ve 16 mm, deformasyon oranına göre en yüksek deformasyon oranını veren 20 mm kalıp köşe kavisi seçilmiştir.

5.2.6. Basınç Parametresinin Tespiti

Gerçekleştirilen pot baskı tespiti deneyleri ve şekillendirme sıcaklığı tespiti deneylerinin ardından deney basınç parametreleri tespit edilmiştir.

Hesaplanan ilkel pul çapında kesilen tüm sac numuneler belirlenen çap ve radüs değerine sahip kalplarda hasara uğrayana kadar hidro şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur. Ardından hasar deneylerinin tamamı zaman-basınç değerleri bakımından değerlendirilerek hasar öncesi basınç değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler tespit edilirken bütün deneyler için hasara uğramadan önceki ortak basınç değerinin tespiti hedeflenmiştir.

Buna göre deney parametreleri son halini almıştır. Buna göre asıl deney parametrelerinin Çizelge 5.9'da olduğu gibi yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 5.9. Deney parametreleri.

Deformasyon Sıcaklığı (°C)	Kalıp Çapı Ø (mm)	Kalıp Radüsü (mm)	Deformasyon Basıncı (MPa)	Pot Baskı Kuvveti Sabit (kN)
Oda Sıcaklığı	102	7	8	600
		10	9	
		16	HASAR BASINCI	
		20	HASAR BASINCI	
140	102	7	8	600
		10	9	
		16	HASAR BASINCI	
		20	HASAR BASINCI	
250	102	7	8	600
		10	9	
		16	HASAR BASINCI	
		20	HASAR BASINCI	
Oda Sıcaklığı	60	7	8	600
		10	9	
		16	HASAR BASINCI	
		20	HASAR BASINCI	
140	60	7	8	600
		10	9	
		16	HASAR BASINCI	
		20	HASAR BASINCI	
250	60	7	8	600
		10	9	
		16	HASAR BASINCI	
		20	HASAR BASINCI	

Her bir parametre için üçer adet şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın değerlendirilmesinin ardından hatalı kabul edilen deneysel uygulamalar tekrar edilmiştir. Toplamda tekrarlanan deneylerle birlikte yaklaşık olarak 543 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen numunelerin her birinin grid ölçümü ve şişme yüksekliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEY SİSTEMİ TASARIMI

Gerçekleştirilen ön deneyler ve prototip sistem kurulumunun ardından asıl deneylerin yapılacağı sistem kurulmuştur. Sistem elemanları aşağıda tek tek açıklanmıştır.

6.1. HİDROLİK PRES

Hidro şekillendirme işlemleri Hidroliksan marka 160 Ton kapasiteli motorlu tip, tek pistonlu sabit atölye tipi hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hidro şekillendirme alt kalıp yarımı iki çelik kütük vasıtasıyla presin üzerine yerleştirilmiştir. Presin teknik özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Hidrolik pres teknik özellikleri.

Özellik	Değer
Tonaj (Ton)	160
Basma Gücü (kN)	1600
Maksimum Çalışma Basıncı (MPa)	41,2
Strok (Kurs) (mm)	400
Motor Gücü (kW)	5,5
Motor Devri (d/d)	7,5
Voltaj (V)	380
Pompa Debisi (dm ³ /s)	0,25
Depo Hacmi (l)	40
İniş Hızı (mm/s)	6,57
Kalkış Hızı (mm/s)	11,62
Silindir İç Çapı (mm)	220
Rot (Koç) Çapı (mm)	145

Kalıp üst yarımı (baskı halkası ve iç kalıbın bulunduğu kalıp yarımı) hidrolik prese, pres koçunun ucundan ara elemanla vidalanmıştır. Kalıp üst yarımı presin üzerinde yer alan kumanda kolu ile aşağı indirilip kalıba baskı yapılmakta, şekillendirme işi bitince yukarı hareket ettirilmektedir. Kalıba uygulanan basınç miktarı pres

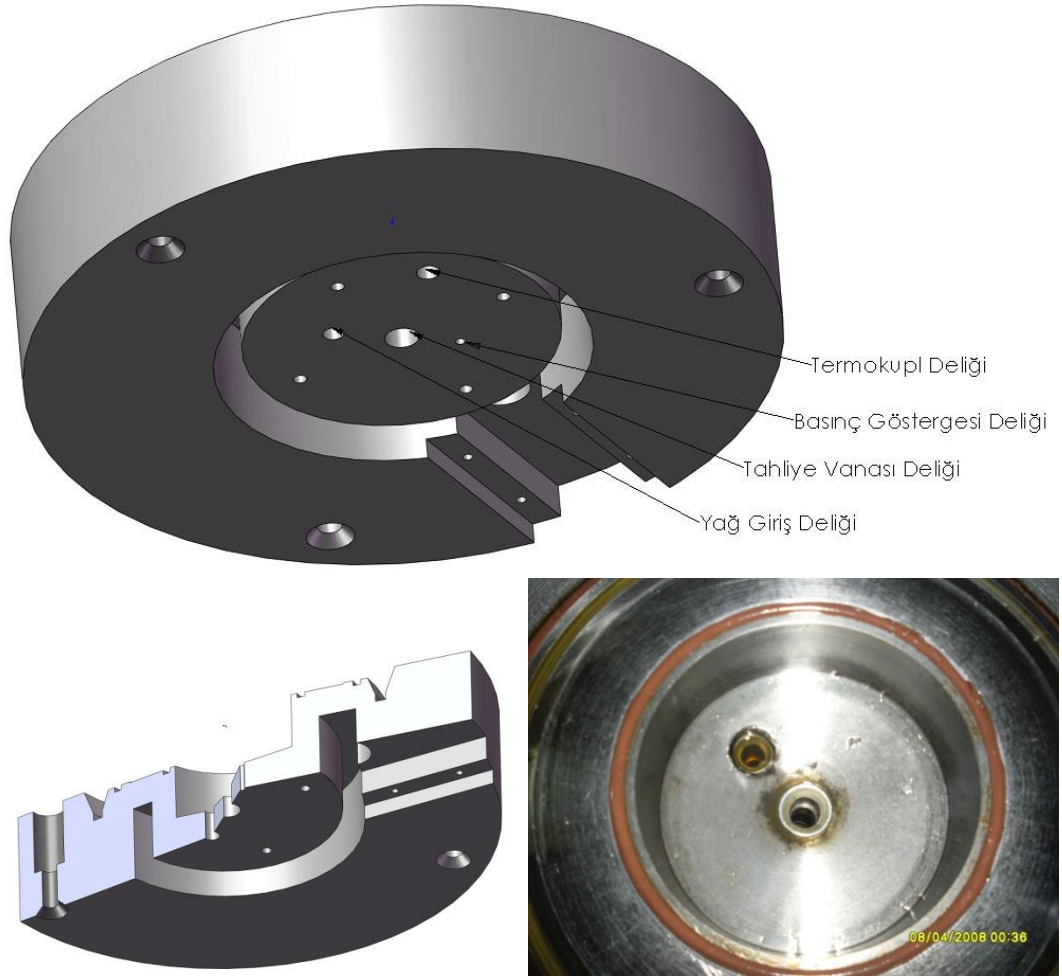
üzerindeki manometreden görülmektedir. Pres koçunda kilit mekanizması bulunmaktadır. Böylece koçun ucunda bulunan elemana aşağıdan yukarı doğru ters yönde kuvvet etki ettiğinde pres koçunun geri kaçması engellenmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Hidrolik pres.

6.2. ALT KALIP YARIMI

Kalıp alt yarımındaki yağ giriş kanalı, giriş hortumunun ucundaki rekorun dış hatvesine göre tasarlanmıştır. Kalıp içerisindeki basıncı ölçebilmek için güç ünitesindeki dışında ayrı bir basınç sensörü takılmıştır. Yağın tahliye deliği, yağın tamamının tahliye edilebilmesi için iç haznenin tabanına dıştan merkeze doğru 10° eğim verilerek merkezden delinmiştir. Şekillendirme işlemi bittikten sonra yağın tahliyesi yüksek basınç ve yüksek sıcaklığa dayanıklı vananın açılması ile yapılmaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Kalıp alt yarımı.

Kalıp alt yarımına ait teknik resimler EK AÇIKLAMALAR B. Şekil Ek B.1’de verilmiştir.

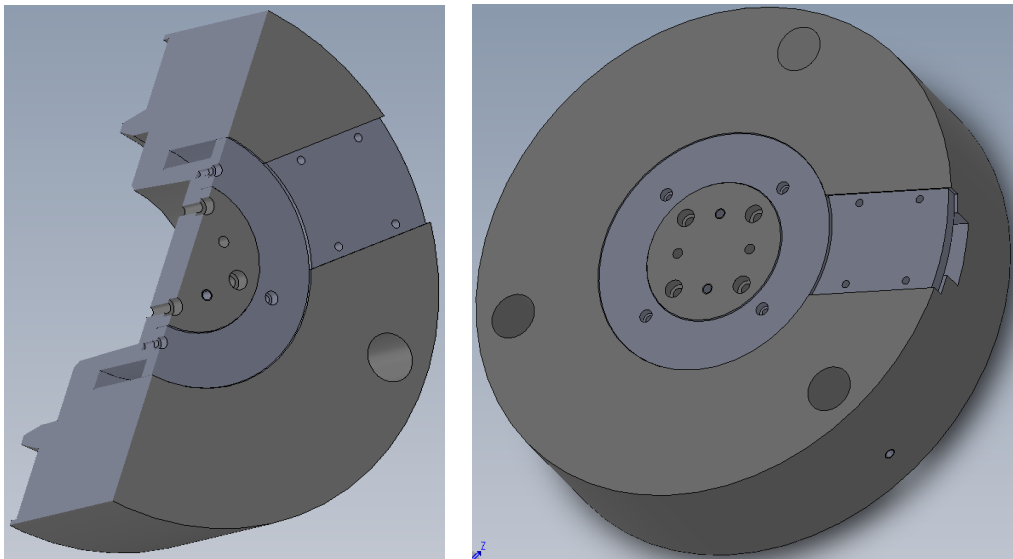
6.3. ÜST KALIP YARIMI

Üst kalıp yarımı Ç 1040 orta karbonlu imalat çeliğinden yapılmıştır. Kalıp yarımı dairesel olduğu için imalatı CNC tornada yapılmıştır.

Çekirdek kalıbın bağlandığı kısımdır. Çekirdek kalıbın kalıp üst yarımına rahat sökülüp takılabilmesi için yuvaya içerden dışarı doğru 3° açı verilmiştir. Şekillendirme sırasında yüksek iç basınç oluşacağından o-ringlerin patlaması veya herhangi bir sızıntı durumunda sıcak yağın çevreye saçılmasını önlemek için alt

tarafa 5 mm fatura açılmıştır. Böylece kalıptan taşan sıcak yağ kalıbın altına taşırılmakta, araştırmacılara zarar vermesi engellenmektedir. Alt ve üst kalıbı eş eksenli olarak merkezleyebilmek için çevrede 3 adet; eşit açı ile dağıtılmış, 25 mm çapında indüksiyonla sertleştirilmiş, krom kaplı kolon mili kullanılmıştır. Kolon millerini yataklamak için 50 Rc (Rockwell) sertliğinde 3 adet şapkalı burç yapılmıştır (Şekil 6.3).

Çalışmanın ön deneylerinde kalıp sisteminin sadece alt yarımı, sac ve yağ ısıtılarak hidro şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiş, malzeme 40 mm derinliğe kadar kubbe formunda şekillenip tepe noktasından patlamaya maruz kalmıştır. Bununla birlikte ön deneylerde istenilen geometrinin tam olarak alınmadan malzemenin patlaması dikkate alınarak her iki kalıp yarımının da ısıtılmasının problemleri gidermek açısından önemli bir değişken olabileceği düşünülmüştür. Bu düşünceden yola çıkılarak kalıp üst yarımına tıpkı alt yarımında olduğu gibi kanal açılmış ve açılan kanala helisel rezistans takılmıştır. Ayrıca literatürde buna benzer problemlerle karşılaşan araştırmacıların önerileri de karar aşamasında önemli bir yer tutmaktadır. Koç ve arkadaşları [41] yaptıkları çalışmada Al5083 alaşımını ılık şekillendirme ile şekillendirmişler ve her iki kalıp yarımı da ısıtıldığında şekillenmenin arttığı sonucuna varmışlardır. Bütün bu nedenler göz önünde bulundurularak, kalıp üst yarımının helisel rezistans takılarak ısıtılması sağlanmıştır.



Şekil 6.3. Üst kalıp yarımı tasarımı.



Şekil 6.4. Hidro şekillendirme kalıplama ünitesi.

Hidro şekillendirme sisteminin tamamı Şekil 6.4'te görülmektedir. Kalıp üst yarımına ait teknik resimler EK AÇIKLAMALAR B. Şekil Ek B.2'de verilmiştir.

6.4. İÇ KALIP TASARIMI

İç (çekirdek) kalıp farklı parametrelerle şekillendirme yapabilmek için 2 parça olarak tasarlanmıştır. Üst kalıp yarımına rahat girip çıkması için 3° açı verilmiştir. Kalıp tasarlanırken yüksek basınçlarda çalışılması planlandığı için çekirdek çeperine minimum 15 mm et kalınlığı verilmiştir. Çekirdek kalıba ısı ile sertleştirme yapılmıştır.

Kalıp çekirdeği Ç 1040 orta karbonlu imalat çeliğinden yapılmıştır. Kalıp çekirdeği dairesel olduğu için imalatı CNC tornada yapılmıştır. Alüminyum sac malzemenin

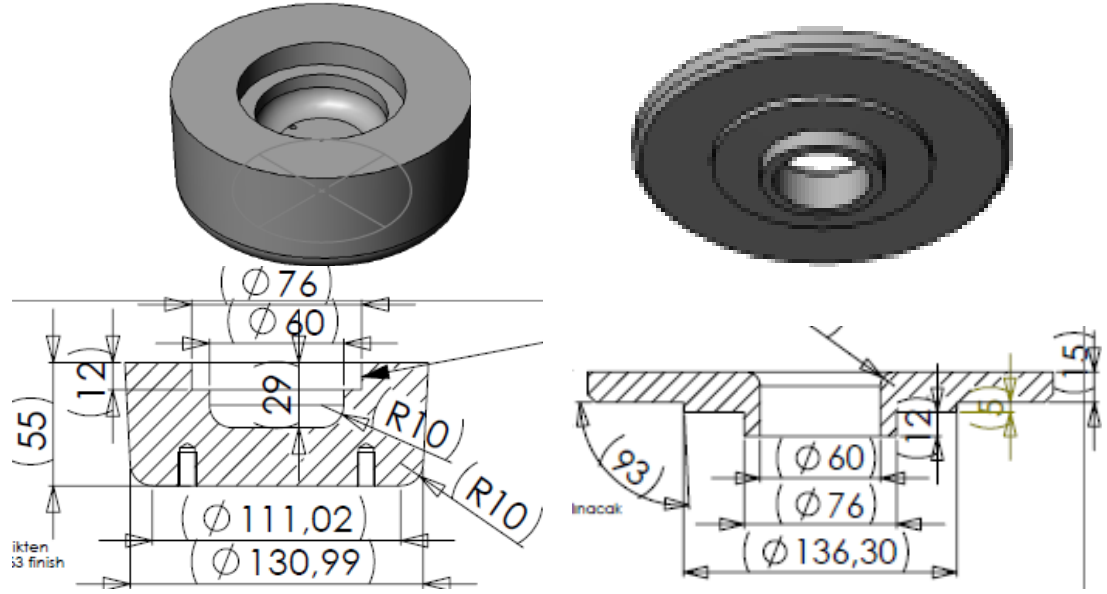
kalıp yüzeyinden rahat kayması ve kalıba sıvanmasını önlemek için 55 Rc (Rockwell) değerinde sertleştirilmiştir.

Kalıp çap ve radüsleri seçilirken deformasyon oranı dikkate alınmıştır. Hidro şekillendirme işleminde amaç, klasik şekillendirme metotlarında elde edilmesi zor olan 2,5 ve üzeri deformasyon oranının tek kademede elde edilebilmesi ve standart şekillendirme sınır diyagramı testleri kalıp boyutlarıyla aynı olmasıdır. Bu amaçla, deformasyon işlemi için deformasyon oranı 1,94 olan ve standart şekillendirme testleriyle aynı ölçülere sahip Ø102 mm çapındaki kalıp ve deformasyon oranı 3,3 olan Ø60 mm çapındaki kalıp tercih edilmiştir.

Hidro şekillendirme ile üretimde istenen tolerans ve boyut tamlığı sağlanabilmesi için tasarım işlemi, oldukça dikkatli ve bütün alternatif ve olasılıklar matematiksel temellere dayandırılarak gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle tasarım ve olay sonuç kurgusunun gerçekleştirilebilmesi için CAD destekli yazılımların kullanılması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu tasarımların çizimleri SolidWorks paket programında üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiş ve AutoCAD programında yapım resimleri alınmıştır.

Kalıplar kalıp maliyeti ve iş gücü dikkate alınarak modüler olarak tasarlanmıştır. Kalıp tabanı sabit kalmak koşulu ile belirlenen çaplarda farklı radüsler işlenmiştir. Kalıp tabanı ile radüs kısmı aynı hatvede açılan dişler vasıtasıyla birbirine bağlanmaktadır (Şekil 6.5). İmalatı gerçekleştirilen kalıplar mevcut deney ünitesine bağlanmıştır.



Şekil 6.5. 60 mm çapındaki dişi kalıp alt ve üst yarımları.

İç kalıplara ait teknik resimler EK AÇIKLAMALAR B. Şekil Ek B.3'te verilmiştir.

6.5. HİDRO ŞEKİLLENDİRMEDE KULLANILAN YAĞIN ÖZELLİKLERİ

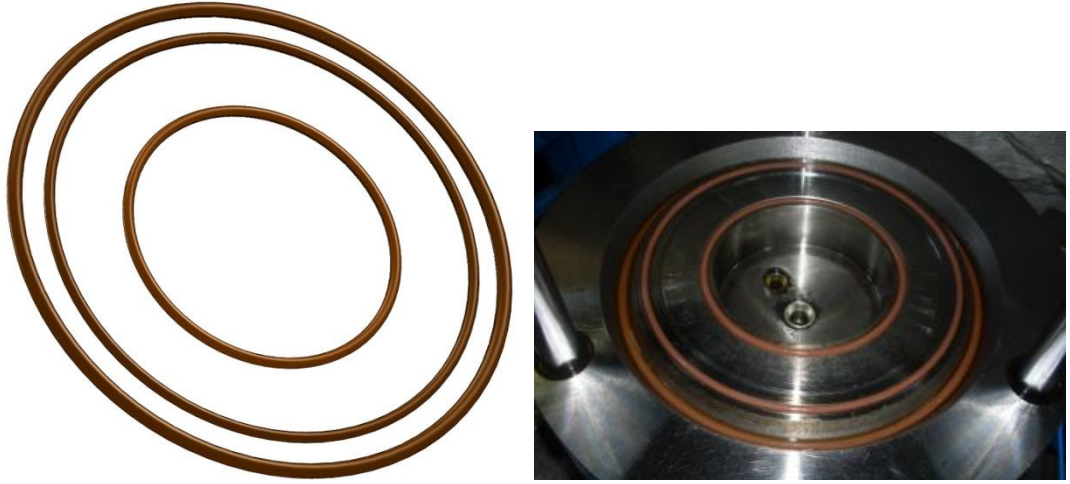
Hidro şekillendirme işleminde yüksek sıcaklıkta da şekillendirme gerçekleştirildiği için ısı transfer yağı kullanılmıştır. Yağın özellikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Shell Thermia B ısı transfer yağı kimyasal ve fiziksel özellikleri [63].

Tipik Fiziksel Özellikler	Uyduğu Standart	Yağın Özelliği
Yoğunluk 15 °C (kg/m ³)	ISO 12185	895
Parlama Noktası PMCC (°C)	ISO 2719	220
Parlama Noktası COC (°C)	ISO 2592	230
Akma Noktası (°C)	ISO 3016	-12
Kinematik Viskozite 40 °C (mm ² /s)	ISO 3104	32
Kaynama Başlangıcı (°C)	ISO 3771	>355
Nötralizasyon Değeri mg (KOH/g)	ASTM D974	<0,05
Genleşme Katsayısı (1/C)		0,0008

6.6. O-RINGLER

Alt kalıbın üst kısmında 3 adet 300 °C sıcaklığa dayanabilen viton o-ring kullanılmıştır. En küçüğü 130 mm çapında 5 mm et kalınlığındadır. Bu o-ring sac malzemeye temas etmektedir. O-ring yağın şekillendirilecek sacın arkasına geçmesini önlemekte ve iç basıncı sabit tutmaktadır. Ortadaki o-ring ise 208 mm çapında 5 mm et kalınlığındadır. Bu o-ring birinci emniyet o-ringidir. Herhangi bir durumda iç o-ringin patlaması durumunda basınçlı yağın dışarıya sızmasını önlemek için tasarlanmıştır. En dıştaki o-ring 230 mm çapında 7 mm et kalınlığında 2 inci emniyet o-ringidir (Şekil 6.6).



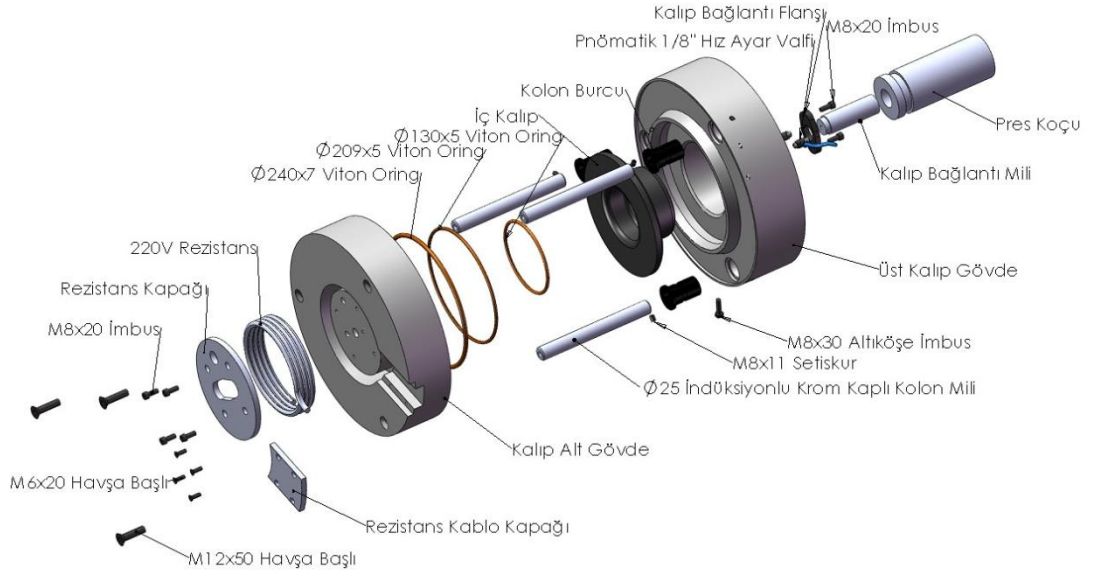
Şekil 6.6. O-ringler.

6.7. REZİSTANSLAR

Yağın 250 °C sıcaklığa kadar ısıtılabilmesi için 220 V enerji ile çalışan sarmal rezistans yaptırılmıştır. Rezistansın montajı için kalıbın alt kısmına rezistansın girebileceği ölçüde dairesel kanal açılmıştır. Dairesel kanal hazne içerisindeki yağı homojen bir şekilde ısıtabilmek için tasarlanmıştır. Rezistansın iç yüzeyi tamamen kaliba temas etmesi için kalıbın çapından 3 mm daha küçük yaptırılmıştır. Rezistans montajı yapılırken el yardımı ile açılıp sıkı geçirilmiştir. Sıcaklık ölçümü J tipi termokopul ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.7'de sistemde kullanılan rezistans ve rezistans kapakları, Şekil 6.8'de ise sistemin demontaj hali görülmektedir.



Şekil 6.7. Rezistans ve bağlantısı.



Şekil 6.8. Hidro şekillendirme kalıp elemanları detayı.

Hidro şekillendirme kalıp tasarımında kullanılan diğer elemanlar (kalıp bağlantı flanş, kalıp bağlantı mili, kolon mili, rezistans kablo kapağı, rezistans kapağı) EK AÇIKLAMALAR B. Şekil Ek B.4 – B.9’da verilmiştir.

6.8. SICAKLIK AYARININ YAPILMASI VE SICAKLIK ÖLÇÜMÜ

Kalıp sıcaklığını kontrol etmek için tasarlanmıştır. Sistem kalıp sıcaklığını ayarlanan değerde otomatik olarak PID kontrol ile tutmaktadır. Sistemin imalatında 2 adet 24 V çıkışlı Delta marka elektronik sıcaklık kontrol cihazı, 2 adet Schneider Elektrik-Merlin Gerin marka W otomat, 2 adet Enda marka solid state role, 2 adet 6 mm çapında 2 m kablo uzunluğunda J tipi termokopl kullanılmıştır. Sıcaklık kontrol ünitesi sayesinde kalıpların sıcaklığı PID kontrollü olarak ayarlanabilmekte, yine kalıplara bağlı termokupllardan ölçülen sıcaklık buradan okunabilmektedir (Şekil 6.9).

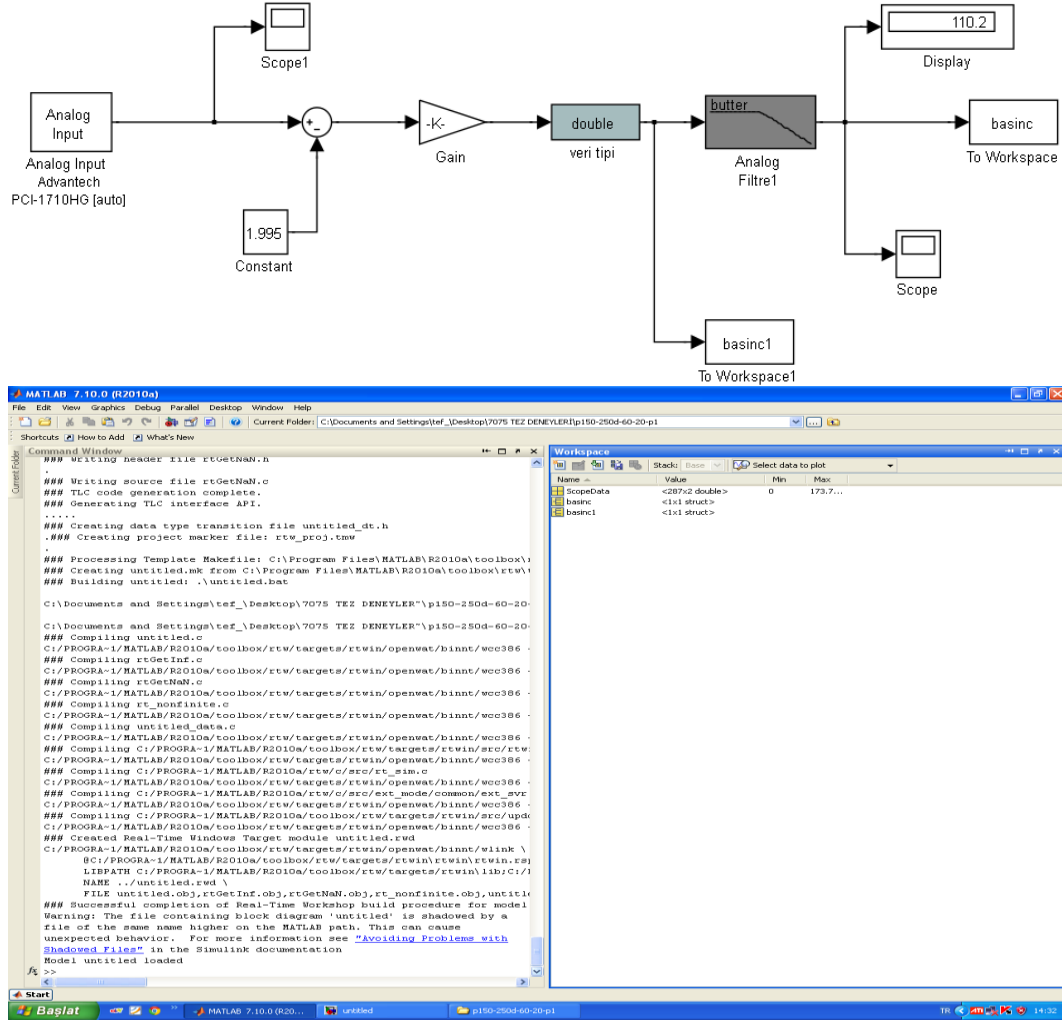


Şekil 6.9. Sıcaklık kontrol ünitesi.

6.9. BASINÇ SENSÖRÜ VE MATLAB VERİ AKTARIM SİSTEMİ

Şekillendirme işlemi esnasında kalıp içerisindeki akışkan basıncının ölçümü için kalıp alt yarımına WIKA marka 40 MPa basınç kapasiteli basınç transmitteri bağlanmıştır. PCI1710 HG Veri aktarım kartı (DAQ) ve güç kaynağı vasıtasıyla

transmitterin sistemden ölçtüğü basınç değeri bilgisayara aktarılmaktadır. Elde edilen veriler MATLAB R10 paket programı ve Simulinkte oluşturulan program ile işlenmekte ve basınç ölçüm sonuçları zamana bağlı olarak bilgisayara aktarılmaktadır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Matlab programı veri aktarım sistemi.

6.10. ÇELİK ÖRGÜLÜ HORTUMLAR

Sistemde kullanmış olduğumuz hortumlar; yüksek sıcaklık ve yüksek basınca dayanıklı çelik örgü telle desteklenmiş hidrolik hortumlarıdır. Yağın giriş hortumu 60 MPa basınca dayanıklı 1/2"tir. Yağın tahliye hortumu 40 MPa basınca dayanıklı 3/4"tir. Aynı zamanda kullanmış olduğumuz bağlantı elemanları, rekorlar ve vana yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklıdır.

6.11. HİDROLİK GÜÇ ÜNİTESİ

Şekillendirme işleminde akışkan basıncı 160 MPa basınç kapasitesine sahip 0,00833 dm³/s debili hidrolik güç ünitesi ile sağlanmıştır. Hidrolik güç ünitesinin özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

6.12. ISI YALITIMI

Kalıp ile pres gövdesi arasındaki ısı transferini engellemek için kullanılan levhalar Epoxy - Cam elyaf kumaş takviyeli kompozit bir malzemedir. Cam elyaf kumaş takviyeli bu epoxy levhalar oda sıcaklıklarında son derece yüksek mekanik mukavemete sahiptir. Kuru ve nemli ortamlarda iyi derecede dielektrik kayıp ve elektriksel mukavemet özelliklerine sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek eğilme mukavemetine sahiptir [64].



Şekil 6.11. Isı yalıtım elemanları.

BÖLÜM 7

MATERYAL VE METOT

Çalışmanın bu bölümünde gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ve bu çalışmalarda kullanılan numunelerin hazırlanışına yer verilmiştir.

7.1. MALZEME KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

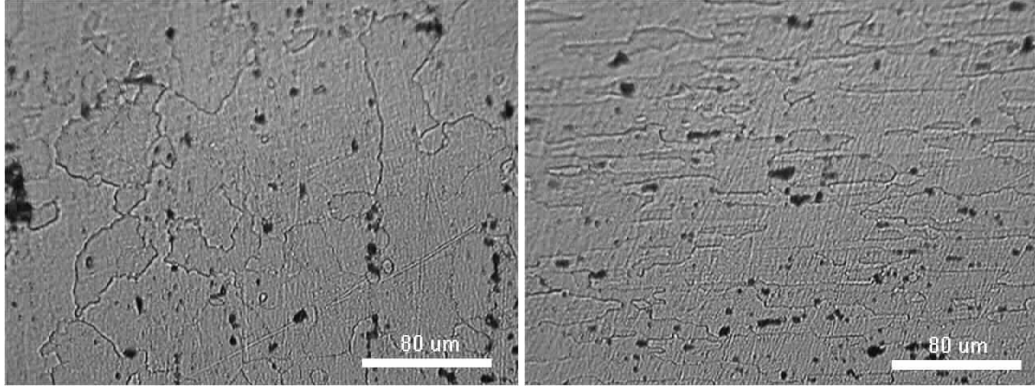
Yapılan deneysel çalışmalarda 2 mm kalınlığında AA7075 - T6 sac malzeme kullanılmıştır. Sac malzemedan 100*100*2 mm boyutlarında numune kesilerek Kardemir Karabük Demir Çelik fabrikasında ARC - MET 8000 mobil spektrom cihazda spektral analize tabi tutulmuştur. Numune üzerinden toplam 5 adet analiz alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre sac malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deneylerde kullanılan sac malzemenin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %).

Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Cr	Si	Diğer
89.29	5.983	2.325	1.592	0.421	0.189	0.101	0.099

Sac malzemenin metalografik özelliklerinin tespit edilebilmesi için malzemeye standart metalografik işlemler uygulanmıştır. Sac malzemedan 2 farklı yönde numune alınmıştır. Numuneler soğuk gömme kiti ile bakalite gömülmüştür. Ardından sıra ile numunelerin yüzeyi 180, 240, 600, 800, 1200’lük grid zımparalarla temizlenmiştir. Numune yüzeyindeki zımpara izlerinin giderilmesi için 1µm elmas solüsyon ile parlatılmış, ardından saf alkol ile temizlenerek Keller dağılayıcısı (5ml HF, 10ml H₂SO₄, 85ml H₂O) ile 10 s dağlanmıştır.

Standart metalografik işlemlerin ardından numune yüzeyleri optik mikroskop ile incelenerek hadde yönü tayin edilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.1’de verilmiştir.



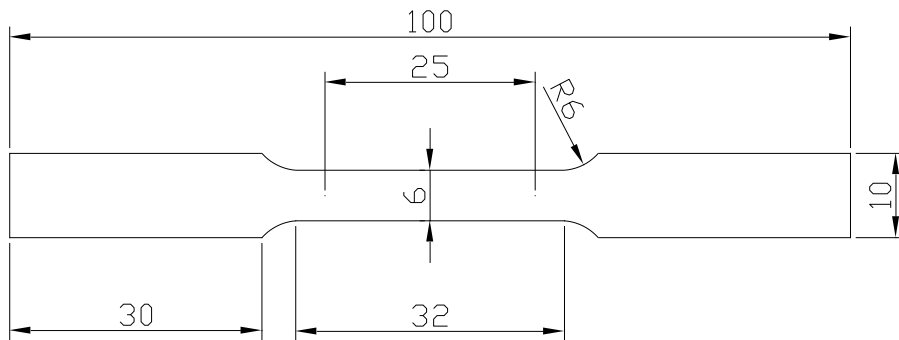
(a)

(b)

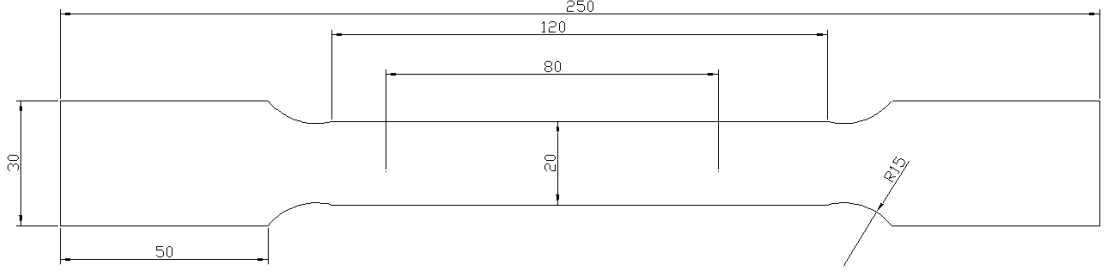
Şekil 7.1. Optik mikroskop görüntüleri, a) hadde yönüne dik, b) hadde yönüne paralel.

7.2. TEK EKSENLİ ÇEKME TESTİ

AA7075 - T6 sac malzemenin tek eksenli çekme testlerinin yapılması için numune hazırlamak üzere malzeme lazer kesime gönderilmiştir. Sıcak çekme ve oda sıcaklığında yapılacak çekme testleri için ayrı ayrı numune boyutları temin edilmiştir. Buna göre hadde yönüne paralel, hadde yönüne dik ve hadde yönüne 45 derece açılı olmak üzere $3*3*2=18$ adet sıcak çekme (Şekil 7.2), oda sıcaklığında $3*3=9$ adet çekme numunesi (Şekil 7.3) hazırlanmıştır (Şekil 7.4).



Şekil 7.2. Yüksek sıcaklıkta çekme testleri için numune boyutları.



Şekil 7.3. Oda sıcaklığında çekme testi için numune boyutları.

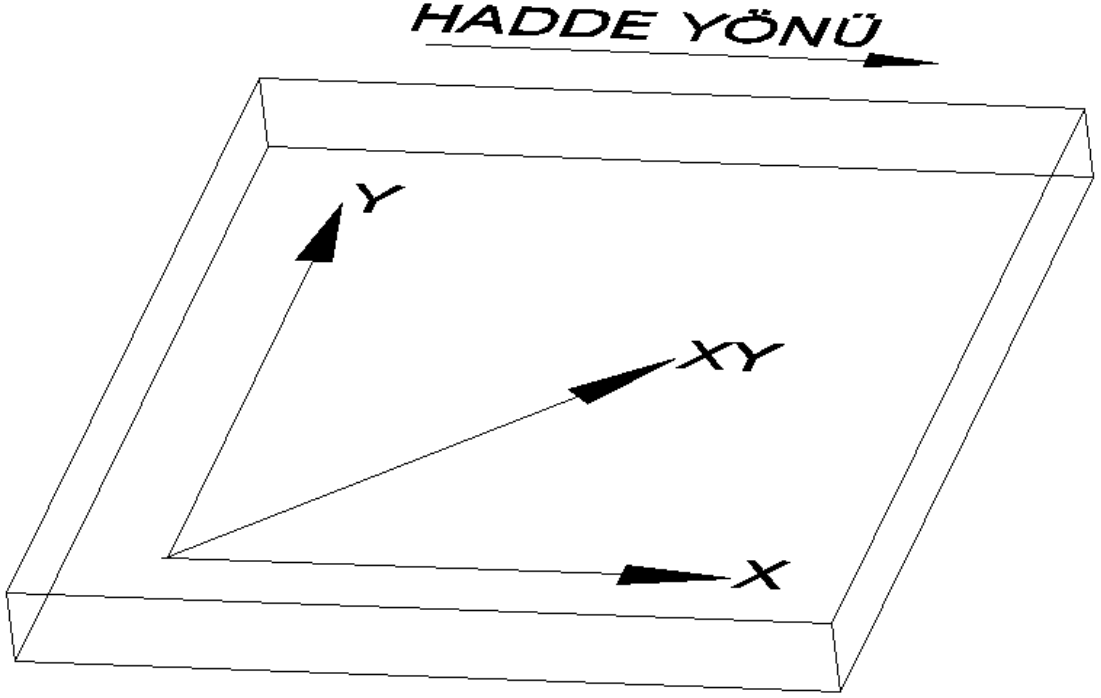
Oda sıcaklığında gerçekleştirilen tek eksenli çekme testleri Zwick Roell İstanbul Showroom laboratuvarında mevcut Zwick Roell marka 30 kN kapasiteye sahip çekme cihazında DIN EN ISO 6892 - 1 standardına uygun olarak ve 5 kN yük 0,48 mm/s çekme hızı ile tamamlanmıştır. Ilık ve yüksek sıcaklıkta yapılan çekme testleri ise Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında Shimadzu Autograph Marka ve 100 kN kapasiteli cihazda $\pm 0,001$ mm strain gage hassasiyeti ile 5 kN yük ve 0,48 mm/s çekme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Her bir sıcaklık değeri için 3 farklı yönde (hadde yönüne paralel, hadde yönüne 45 derece açılı ve hadde yönüne dik) üçer adet numune çekme testine tabi tutulmuştur. Toplamda 27 (3*3*3) adet çekme testi gerçekleştirilmiş, her bir gruptan 3'er numunenin ortalaması alınmıştır. Tek eksenli çekme testlerinden malzemenin mekanik değerleri ve gerilme – birim şekil değiştirme ($\sigma - \epsilon$) diyagramları elde edilmiştir.



Şekil 7.4. Çekme testi numuneleri.

Sac malzemenin tek eksenli çekmede, haddeleme yönü X, sac düzleminde haddeleme yönüne dik doğrultuyu veya rulonun eni doğrultusu Y, sac düzleminde haddeleme yönüne 45° lik diyagonal doğrultu ise XY ile tanımlanmıştır. Grafiklerde; X yönündeki çekme mukavemeti $\sigma_{\text{çX}}$, Y yönündeki çekme mukavemeti $\sigma_{\text{çY}}$ ve XY yönündeki çekme mukavemeti ise $\sigma_{\text{çXY}}$ ile ifade edilmiştir (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Hadde yönüne paralel (X), hadde yönüne dik (Y) ve hadde yönüne 45° (XY) açılı yönler.

7.3. SERTLİK ÖLÇÜMÜ

Optik görüntüsü alınan numunelerde hadde yönü tayin edildikten sonra sertlik ölçümü yapılmıştır. Numunelerin her birinden beşer adet sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümleri hadde yönünde ve hadde yönüne dik kesitlerde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi bünyesinde yer alan $\pm\%0,01$ ölçüm hassasiyetli, HMV - 2 SHIMADZU marka sertlik ölçüm cihazında 0,2 N yük 20 s uygulanarak yapılmıştır.

7.4. İLKEL PUL ÇAPI HESABI VE NUMUNE HAZIRLAMA

Şekillendirme işleminin deneysel uygulamaları için sac malzeme ilkel pul çapı hesaplamıştır.

Sac malzeme ilkel pul çapı [90];

$$D = \sqrt{(D_f^2 + 4d_h - 3,44r_d)} \quad (7.1)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Formülasyona göre;

D : ilkel pul çapı,

D_f : Flanş çapı,

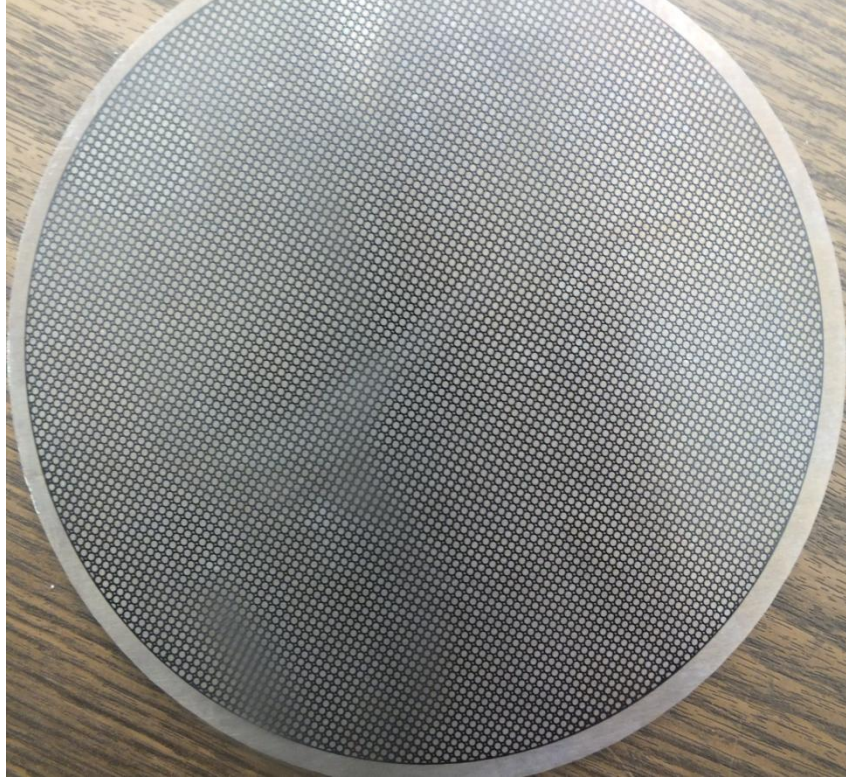
D : Kalıp iç çapı,

h : Kalıp derinliği,

r : Kalıp köşe radüsüdür.

Buna göre toplamda 600 adet numune kesilmiştir.

Kesilen sac malzemelerin üzerine fotokimyasal yöntemle 2 mm çapında dairesel gridler işaretlenmiştir. Dairesel gridlerin yüksek sıcaklık ve hidrolik yağın etkisiyle silinmemesi için baskı işleminden sonra sac malzemeler 150 °C sıcaklıkta 45 dakika fırınlama işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Gridlenmiş sac malzeme yüzeyi.

7.5. NUMUNELERİN KODLANMASI

Deney numuneleri yapılan işlem ve işlemin yapıldığı kalıp özelliklerine göre kodlanmıştır. Böylece numunelerin karışması önlenmiştir. Ayrıca numune üzerindeki kod bilgisayar ortamında deney esnasında basınç ve zaman parametrelerini elde etmemizi sağlayan Matlab program dosyalarında, grid ölçüm fotoğrafları ve AutoCAD dosyalarında, grafiklerin oluşturulduğu Excel dosyalarında da kullanılmıştır. Numuneler önce şeffaf poşetlerle ayrı ayrı muhafaza edilmiş, numune kodlamaları poşetlerin üzerine etiketle yapıştırılmıştır. Aşağıda örnek bir numune kodu açıklanmıştır.

P150-20°-102-7-P1

P150: Uygulanan pot kuvveti 102: Kalıp iç çapı

20°C: Deney sıcaklığı 7: Kalıp radüsü P1: Hasar gören 1. Numune

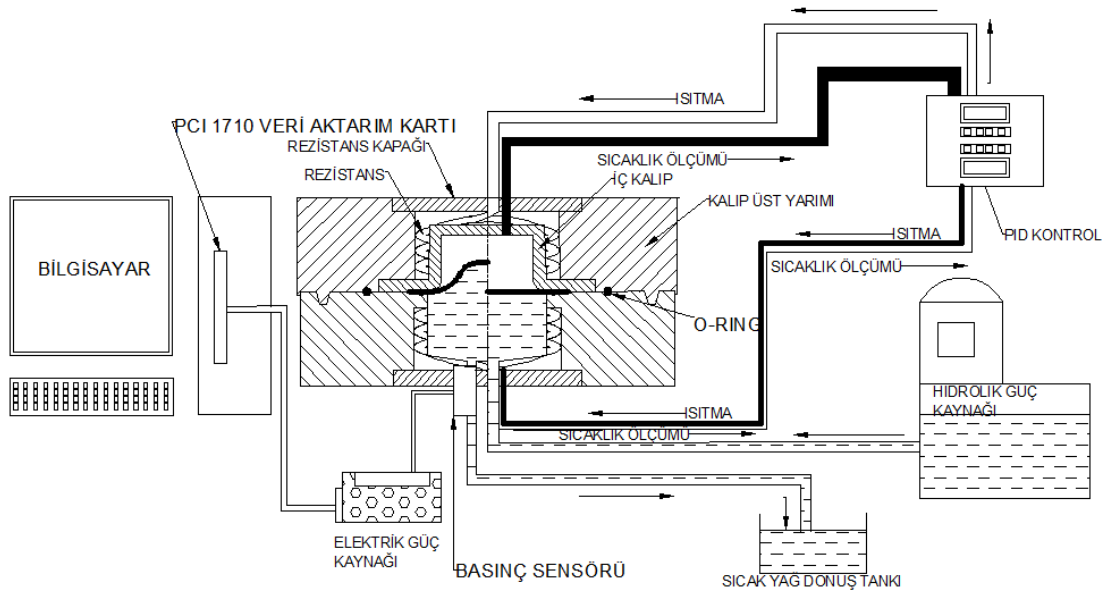
7.6. HİDRO ŞEKİLLENDİRME İŞLEMLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Deneyler Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Hidro şekillendirme atölyesinde bu çalışma kapsamında tarafımdan kurulan 160 tonluk Hidroliksan marka hidrolik prese bağlı bulunan hidro şekillendirme ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Hidro şekillendirme işleminde kullanılan pres özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Farklı parametrelere göre tasarımı yapılan kalıp sistemi (kalıp alt ve üst yarımları, iç kalıp) prese bağlanmıştır. Çizelge 7.2’de verilen deney şartları uygulanarak her bir parametre grubundan üçer adet olmak üzere toplamda 108 adet asıl deneyler için, 300 adet sıcaklık parametresinin tespiti için, 15 adet pot baskı kuvvetinin tespit edilmesi için, asıl deneylerin tekrarı ve doğrulama deneyleri için de 30 adet olmak üzere toplamda 583 adet numune üzerinde hidro şekillendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem için tasarımı yapılan iç kalıplar, kalıp üst yarımının içine açılan hazneye yerleştirilmiştir. İç kalıplar, kalıp üst ve alt yarımları ve sac malzeme; bu kalıp yarımları içine gömülmüş olan özel yapım sarmal rezistanslarla, PID control ünitesinden ayarlanan sıcaklık değerine kadar ısıtılmıştır. Aynı zamanda sistemin mevcut sıcaklığı alt ve üst kalıp yarımları ve iç kalıba yerleştirilen termokupllar ile ölçülmekte ve PID control ünitesinden okunabilmektedir. Sistem istenen sıcaklık değerine ulaştığında kalıplar açılmış ve sızdırmazlık elemanları kalıp içine yerleştirilmiştir. Sızdırmazlık elemanlarının kalıp ısıtıldıktan sonra kalıba yerleştirilmesinin nedeni sızdırmazlık elemanlarının sıcaklıkla erken deformasyonunu engellemek istenmesidir. Sızdırmazlık elemanları yerleştirildikten sonra kalıp sıcaklığı tekrar istenen değere gelene ve o sıcaklıkta sabitlenene kadar beklenmiştir. Sıcaklık sabitlenince 160 MPa basınç kapasitesine sahip hidrolik güç kaynağından sac malzemeyi şekillendirmek üzere sisteme yağ basılmıştır. Basınçlı akışkanın etkisiyle iç kalıbın içine itilen sac malzeme hasara uğrayana kadar sisteme akışkan basmaya devam edilmiştir. Sac malzemeyi şekillendirme işlemi tamamlanınca basınç kesilmiş, pres çalıştırılmış ve pres koçuna bağlı olan kalıp üst yarımı açılmıştır. Kalıp alt ve üst yarımları arasına sıkıştırılan malzeme alınarak şekillendirme işlemi tamamlanmıştır. Şekil 7.7 sistemin işlem basamaklarını şematik olarak göstermektedir.

Çizelge 7.2. Hidro şekillendirme deney şartları.

Parametre	Değer
Baskı Kuvveti (F_c)	600kN
Kalıp Köşe Kavisi (R_c)	7 mm
	10 mm
	16 mm
Sac malzeme ilk kalınlığı (t_0)	20 mm
	2 mm
Kalıp iç Çapı (D_c)	102 mm
	60 mm
Şekillendirme Sıcaklığı (T)	Oda Sıcaklığı
	140°C 250°C



Şekil 7.7. Hidro şekillendirme işlem basamakları.

Hidro şekillendirme işleminin neticesinde elde edilen numunelerden çeşitli ölçümler yapılarak şekillendirme parametrelerinin deformasyon üzerine etkileri incelenmiş, buna göre optimum parametreler tayin edilmeye çalışılmıştır.

7.6.1. Parametrelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi

Hidro şekillendirme işleminin ardından numunelerin şişme yüksekliği ölçümleri Mitutoyo marka $\pm 0,01$ mm okuma hassasiyetine sahip dijital mihengir ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.8).



Şekil 7.8. Şişme yüksekliği ölçümlerinin yapıldığı dijital mihengir.

Deneysel çalışmalar esnasında bazı güçlük ve aksaklıklarla da karşılaşmıştır. Çalışma boyunca en önemli sorun sızdırmazlık elemanı temini olmuştur. Deneyler esnasında viton o-ring kullanılmasına karar verilmiş idi. Çalışmanın büyük çoğunluğunda bu karar uygulanmıştır. Ancak kalıp çapı ve radüsünün giderek küçüldüğü deneylerde viton o-ringler uygulanan basınca yetersiz kalmıştır. Bunun yerine 3 mm kalınlığında bakır pul kestirilmiş ve tekrar denenmiştir. Ancak kesilen pul da yetersiz kalmıştır. Ardından alüminyum kütükten kesilen 7 mm kalınlığında bir pul CNC’de işlenmiş tekrar denenmiştir. Alüminyum pul da yetersiz kalınca sertleştirilmiş bakır plakadan 7 mm kalınlığında pul işlenmiştir. Küçük çap ve radüsteki deneyler bu pul ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.9).



Şekil 7.9. Hidro şekillendirme işlemi için hazırlanan bakır ve alüminyum pullar.

Ancak 60 mm çap ve 7 mm radüse sahip kalıpta şekillendirilen numuneler, deneyler esnasında 100 MPa basınca ulaşılmasına rağmen, mevcut sistemde hasara uğratılamamıştır. Dolayısıyla 60 mm çap ve 7 mm kalıp kavisine göre gerçekleştirilen şişirme işlemi neticesinde elde edilen numunelerin hasara uğradan önceki elde edilebilen en büyük yükseklik değerleri alınmıştır.

7.6.2. Parametrelerin Kubbe Kavisini Yarıçapına Etkilerinin Teorik ve Deneysel Olarak Tespit Edilmesi

Gerçekleştirilen hidro şekillendirme işleminin literatürle uyumunu, ne oranda başarılı olduğunu ve beklenen sonuçların elde edilip edilemediğini tespit edebilmek için hidro şekillendirme işlemine tabi tutulan numunelerin kubbe yarıçapı değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Şekillendirme işlemine tabi tutulan numuneler orta eksen boyunca kesilmiş, 1/1 ölçekle fotoğraflanıp, bu fotoğraflar AutoCAD programına çağırılmıştır. Ardından numunenin kubbe formu üzerinden yay çizme komutuyla tekrar bir kubbe çizilmiştir. Oluşturulan yayın yarıçapı ölçülmüştür. Böylece şişirme işlemine tabi tutulan numunenin kubbe yarıçapı deneysel olarak belirlenmiştir (Şekil 7.10).



Şekil 7.10. AutoCAD programında gerçekleştirilen deneysel kubbe kavisini ölçümü.

Ayrıca şişirme işlemine tabi tutulan sac malzemelerin kubbe kavisini yarıçapı hakkında bir öngöründe bulunmak için bilim adamları bazı teorik modeller geliştirmişlerdir. Bu modellerden en çok tercih edilen Panknin ve Hill modelleri Bölüm 4'te Denklem 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. AutoCAD programı ile gerçekleştirilen ölçümlerin yanı sıra şişme yüksekliği değerleri kullanılarak Denklem 4.6 ve 4.7'ye göre kubbe yarıçapı hesaplamaları da yapılmıştır.

7.6.3. Parametrelerin Gerilme – Birim Şekil Değişirme Diyagramına Etkisi

Hidro şekillendirme metodu ile sac metal malzemenin deformasyon davranışı daha objektif bir şekilde gözler önüne serilmiştir. Böylece hem iki eksenli gerilme durumu sağlanmış, hem de çekme testinden daha yüksek gerçek gerinmeye izin verilmiştir [74] .

Membran teorinsine ait Denklem 4.4 ve 4.10 kullanılarak hidro şekillendirme işlemine göre gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları oluşturulmuştur. Şekillendirme işlemine tabi tutulan numunelerin ölçüm sonuçlarından elde edilen şişme yüksekliği (h_d), basınç (p) ve (R_d) kubbe kavisi yarıçapı, (t_d) tepe bölgesi sac kalınlığı değerleri denklemlerde yerine yerleştirilerek gerilme ve gerinim hesaplanmıştır. Tepe bölgesi sac kalınlığı t_d için teorik olarak hesaplanan değer alınmıştır ve diyagramlar oluşturulmuştur. Diyagramlar Şekil 8.5 ve 8.6'da (Bkz. Bölüm 8) verilmiştir.

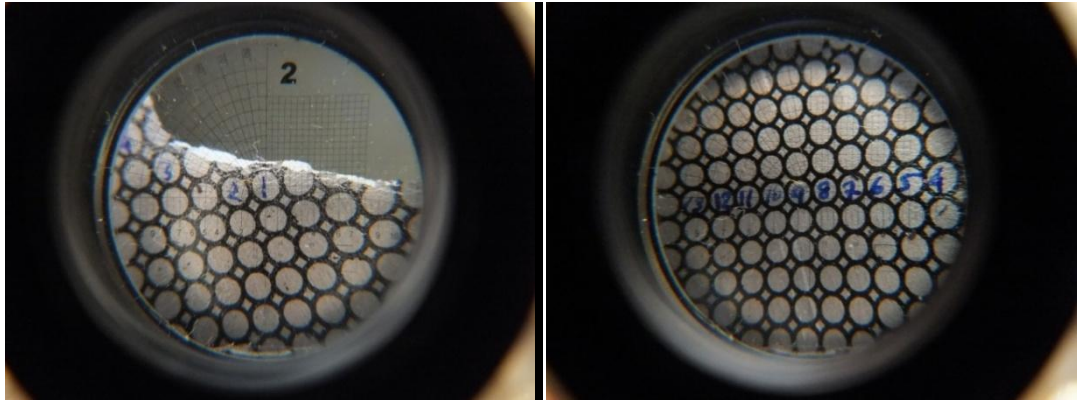
7.6.4. Parametrelerin Şekillendirme Sınır Diyagramına (SSD - Forming Limit Diagram FLD) Etkisi

Hidro şekillendirme işlemine tabi tutulan AA7075 - T6 sac malzemelerin yüzeyleri temizlendikten sonra şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulması için ölçümlere başlanmıştır. Grid ölçümleri Schweizer Tech Line marka 10X büyütme özelliğine sahip skalalı loop büyüteç ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.11).

Büyüteç, Fujifilm 30X optik zoom özelliğine sahip yarı profesyonel fotoğraf makinesinin objektifine takılmıştır. Ardından her bir numune için aynı büyütme oranı kullanılarak numunelerin üzerindeki gridler tek tek fotoğraflanmıştır. Fotoğraf çekme ve grid ölçme işlemi hasar bölgesine birinci derece yakın olup hasar görmemiş gridlere uygulanmıştır. Bir numune üzerinden yaklaşık 20 grid fotoğrafı çekilmiştir.



Şekil 7.11. Skalalı loop büyüteç.

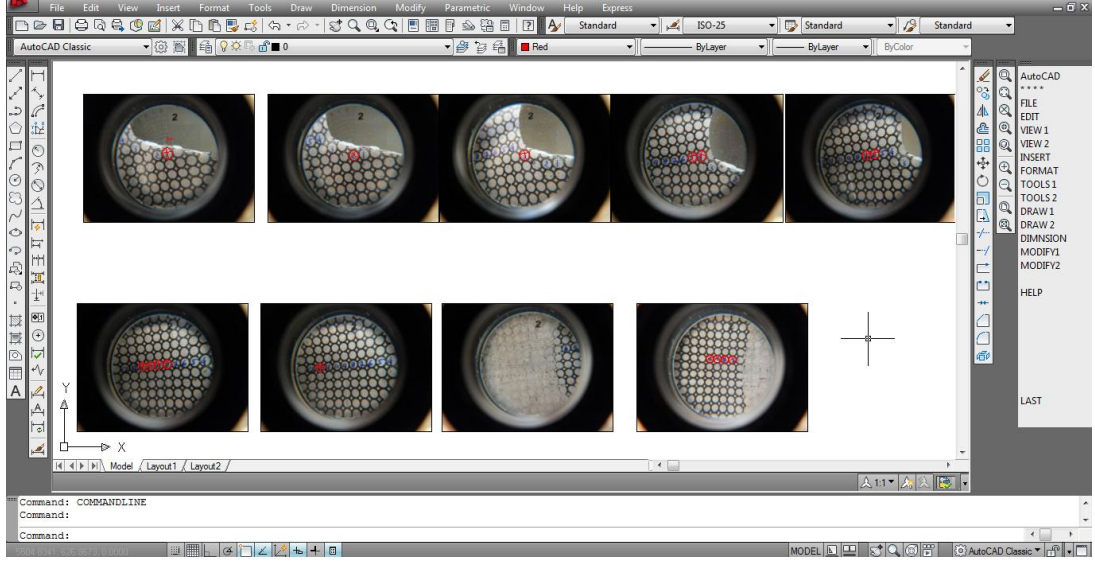


Şekil 7.12. Grid fotoğraflama.

Çekilen fotoğraflar AutoCAD paket programına numune ile aynı isimle açılmış dosyaya atılmıştır. Burada gridlerin üzerinde oluşan geometri tekrar üzerinden çizilerek ölçü alınmıştır (Şekil 7.12 ve 7.13). Ölçümler hasar eksenine paralel doğrultuda gerçekleştirilmiştir.

Ölçülen değerlere göre ϵ_1 ve ϵ_2 büyük ve küçük şekil değiştirme oranları Denklem 4.2 ve 4.3 vasıtasıyla hesaplanmış ve FLD (forming limit diagram) oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen ölçümler neticesinde elde edilen limit diyagramları Şekil 8.7’de verilmiştir.



Şekil 7.13. AutoCAD ortamında grid ölçümü.

7.7. KORELASYON GRAFİKLERİ VE İNTERPOLASYON DENKLEMİ

Deneysel çalışmanın tamamında 2 farklı kalıp çapı (102 ve 60 mm), 4 farklı kalıp köşe kavisi (7, 10, 16 ve 20 mm) ve 3 farklı sıcaklık (oda sıcaklığı, 140 ve 250 °C) parametresine göre deformasyon gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığı 20 °C olarak alınmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen numunelerden gerçekleştirilen şişme yüksekliği ölçümlerinden faydalanılmıştır. Her iki kalıp çapı için de ayrı ayrı gerçekleştirilmek koşuluyla kalıp köşe kavisi ve sıcaklığa göre şişme yüksekliğinin değişimini ifade etmek üzere $\pm 0,01$ hassasiyetli bir korelasyon kurulmuştur. Bu korelasyon neticesinde bu iki parametreye (sıcaklık ve kalıp köşe kavisi) göre şişme yüksekliğinin nasıl değişeceğini ifade eden bir interpolasyon denklemi elde edilmiştir. İnterpolasyon denklemlerinden hesaplanan ve deney numunelerinden ölçülen şişme yüksekliği (h_d) değerlerinin oluşturduğu dağılım grafikleri üç boyutlu olarak elde edilmiş ve Şekil 8.9 ve 8.10'da sunulmuştur. Ölçü ve interpolasyona göre hesaplanan h_d değerlerinden standart sapma, interpolasyon mutlak hataları, bağıl hatalar, hata kareleri toplamı (HKT) hesaplanarak sonuçlar grafiklerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler ölçülen şişme yüksekliği değerlerine en yakın sonucu veren 4 interpolasyon tekniği (Rational Taylor, Polynomial, Lorentz 2D, Fourier 2D) için

gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu grafik, hata ve standart sapma grafikleri değerlendirilerek en uygun interpolasyon yöntemi belirlenmiştir.

Sayısal yöntemler, analitik çözümlerden farklı olarak sayıları kullanarak işlem yapar ve belli bir hata payı içerir. Giriş verisi belirli deneyler, gözlemler veya hesaplamalar sonucu bulunuyorsa işlemlerin hassasiyetine göre belli bir hata payı içerecektir. Giriş verisinin ve kullanılan yöntemin hata içermesi, bulunacak sonuçların da belli bir hata içereceğini, yani sonuçların kesin değil yaklaşık değerler olacağını göstermektedir. Hatalar, sonuç üzerinde ve yöntemin geçerliliği üzerinde oldukça etkilidir. Sonuçların hata içermesinden ziyade bu hatanın kabul edilebilir tolerans değerleri sınırları içerisinde olması önemlidir.

Hesaplamalar süresince eğer hata azalıyorsa kullanılan yöntem “kararlı”, hata büyüyorsa “kararsız”dır. Hata, esas olarak gerçek değer ile hesaplanan yaklaşık değer arasındaki farktır. Bu şekilde tanımlanan hata iki şekilde ifade edilmektedir.

Bunlardan ilki; gerçek değer (x_r) ile hesaplama sonucu bulunan yaklaşık değer (x_n) arasındaki farkı ifade eden mutlak hatadır [65].

$$e_r = x_r - x_n \quad (7.2)$$

Daha anlamlı olması açısından; hatanın, mutlak olarak değil gerçek değere göre büyüklüğünün bilinmesi gerekir. Mutlak hatanın gerçek değere oranı bağıl hatayı vermektedir [65].

$$e_b = \frac{e_r}{x_r} \quad (7.3)$$

Veri noktalarının doğrudan uzaklıkları hata olarak nitelendirilirse en uygun doğru, bu hataların en küçük olduğu doğru olacaktır. Dolayısıyla bu problem bir “hatayı en küçüğe indirme (minimization)” problemidir [66].

Deneysel çalışmada veri değerlerinin bazıları gerçek değerden büyük okunmuşken bazıları daha küçük okunmuş olabilir. Bu durumda hataların bir kısmı pozitif işaretli

iken bazıları negatif işaretlidir. Şayet toplam hatayı bulmak için hatalar bu haliyle toplanırsa negatif ve pozitif işaretli büyüklüklerin bir kısmı birbirini yokedeceğinden, toplam hata olması gerekenden daha küçük bulunacaktır. Bu nedenle hataları toplamak yerine hataların karelerini toplamak daha doğru olur [66]. Doğru interpolasyon tekniğinin belirlenebilmesi için bu kriter göz önünde bulundurulmuştur.

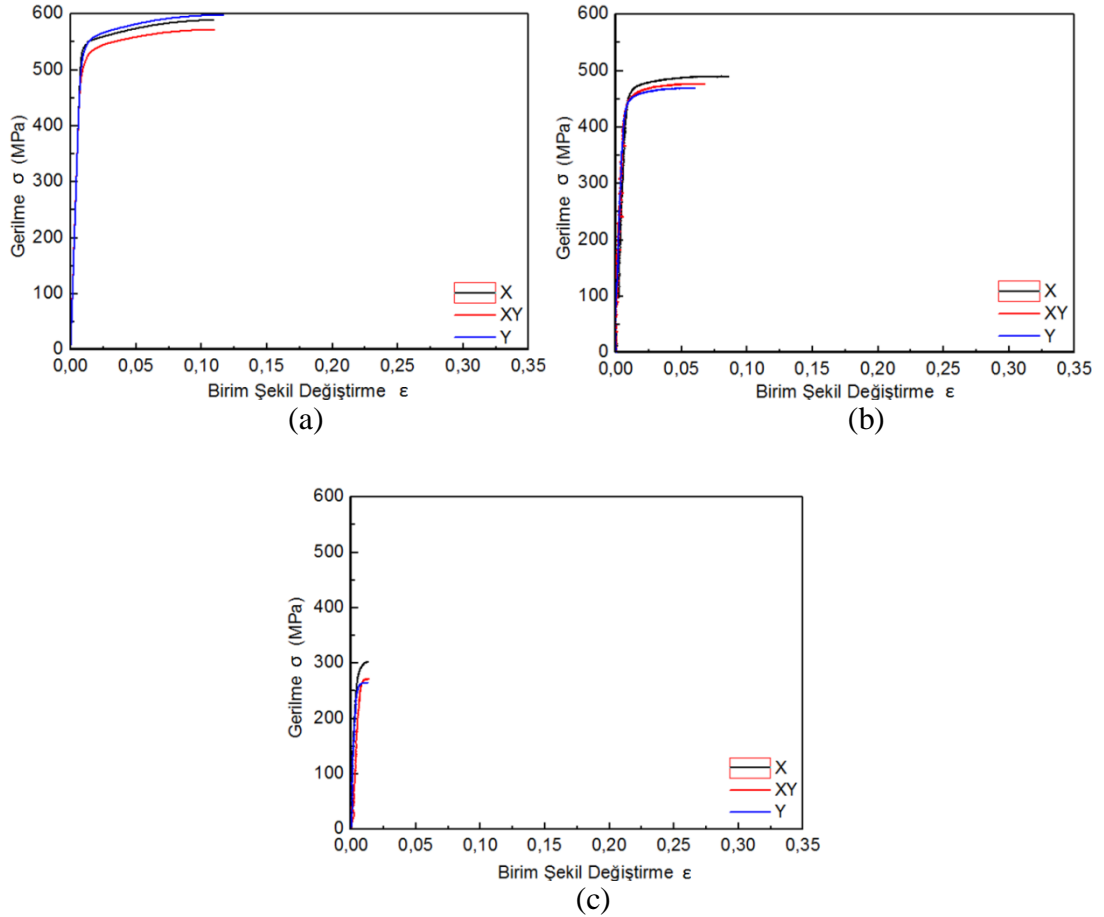
Oluşturulan interpolasyon denklemleri ile hesaplanan ve deneyler sonucu gerçekleştirilen ölçümler neticesinde elde edilen şişme yüksekliği verilerinin standart sapma, mutlak hata, bağıl hata, hata kareleri toplamı (HKT) grafikleri oluşturularak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, hata ve standart sapması sifıra en yakın olan interpolasyon denklemi belirlenmiştir.

BÖLÜM 8

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. TEK EKSENLİ ÇEKME TESTLERİ

Çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları Şekil 8.1’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Tek eksenli çekme testi grafikleri, a) Oda sıcaklığı, b) 140 °C, c) 250 °C.

Yukarıdaki grafikten de görüldüğü gibi oda sıcaklığında en büyük çekme mukavemeti (σ_c) 598 MPa ve en büyük birim şekil değiştirme (ϵ) değeri 0,116 olarak

hadde yönüne dik kesitte (Y) alınan numunede elde edilmiştir. Aynı sıcaklık değerinde en küçük σ_c XY yönünde alınan numunelerde 572 MPa elde edilirken; en küçük ϵ değeri ise X ve XY kesitinde alınan numunelerden 0,109 olarak elde edilmiştir.

140 °C sıcaklık değerinde gerçekleştirilen çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde ise en büyük σ_c 490 MPa ve en büyük ϵ değeri 0,086 olarak X yönünde alınan numunede görülürken, en küçük σ_c 470 MPa ve en küçük ϵ değeri 0,060 olarak Y yönünde alınan numunelerden elde edilmiştir.

Ilık şekillendirme işleminin sonuçlarına benzer şekilde sıcak şekillendirme işleminin (250 °C) sonucunda da en büyük σ_c 302 MPa olarak X yönünde elde edilirken, en büyük ϵ değeri 0,013 olarak XY yönünde elde edilmiştir.

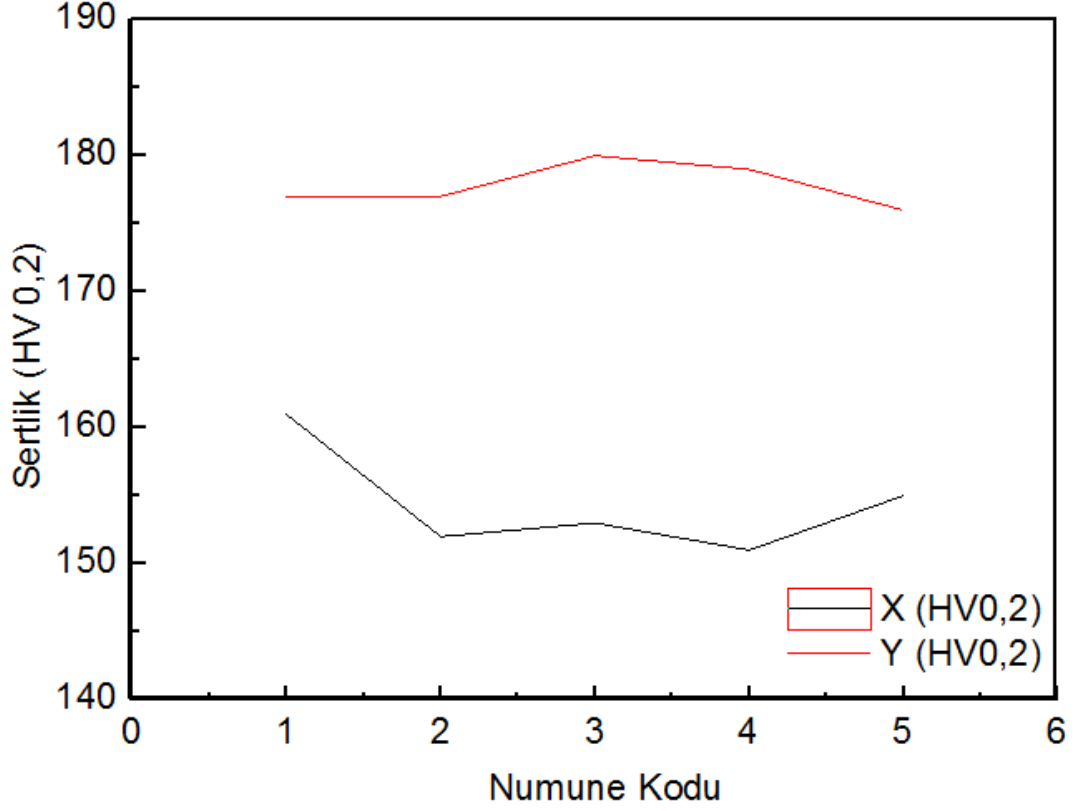
Genel olarak değerlendirildiğinde ise en yüksek σ_c ve en yüksek ϵ oda sıcaklığında Y kesitinde alınan numunelerden elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça sadece X yönünde ϵ artarken diğer yönlerde σ_c ile beraber ϵ de azalmıştır. Bu durumda AA7075 - T6 malzemenin oda sıcaklığında ve Y yönünde daha iyi uzama ve deformasyon özelliği göstereceği görülmüştür.

Ek olarak, AA7075 - T6 malzemenin tek eksenli çekme testinde sıcaklık arttıkça σ_c ve ϵ de azalma görülmüştür. Bu sonuçlar Mahabunphachai ve Koç'un çalışmalarında elde edilen sonuçlarla benzer yapıdadır [28]. Araştırmacılar Al5xxx malzemenin çekme testi sonuçlarında sıcaklık arttıkça σ_c azaldığı, ϵ 'in ise arttığını, ancak Al6xxx malzemedeki sıcaklık arttıkça σ_c ve ϵ 'in azaldığını vurgulamışlardır. Bu durumun; artan sıcaklıkla birlikte malzemenin içindeki alaşım elementlerinden hegzagonal kafes yapısındaki magnezyumun kayma düzlemlerinin artmasından kaynaklandığını vurgulamışlardır [28].

8.2 SERTLİK ÖLÇÜMÜ

Sertlik ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi bünyesinde yer alan $\pm 0,01\mu\text{m}$ ölçüm hassasiyetli, HMV - 2 SHIMADZU marka sertlik ölçüm cihazında

yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde uygulanan yük değeri 0,2 N, yük uygulama süresi 20 s'dir. HMV cinsinden sertlik ölçüm sonuçları Şekil 8.2'de verilmiştir.

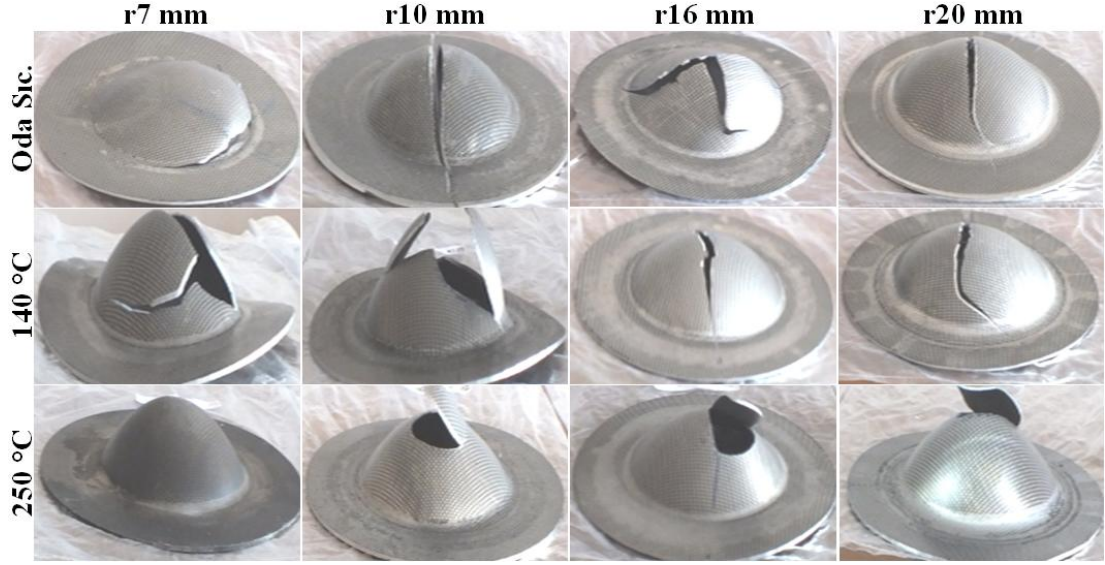


Şekil 8.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.

Şekil 8.2'den de görüldüğü üzere Y yönünde alınan sertlik değerleri X yönünde alınan değerlerden daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni Y yönünde tane yapısının daha eşksenel olması, X yönünde ise daha sütunsal yapıda olmasıdır. Böylece tane boyutu büyümüş ve tane boyutuyla ters orantılı olarak alaşımın sertliği düşmüştür.

8.3. HİDRO ŞEKİLLENDİRME

2 farklı kalıp çapı, 4 farklı kalıp köşe kavisi, 3 farklı sıcaklığa göre her bir parametreden en az 3 adet olmak üzere toplamda 543 adet numuneye hidro şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Çizelge 5.3'te belirtilen parametrelere göre uygulanan hidro şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen hasara uğramış numunelerden bazıları Şekil 8.3'de, örnek resimler ise EK AÇIKLAMALAR C. Şekil Ek C.1, C.2 ve C.3'te verilmiştir.



Şekil 8.3. 102 mm iç çapa sahip kalıp ile hidro şekillendirilmiş hasarlı numuneler.

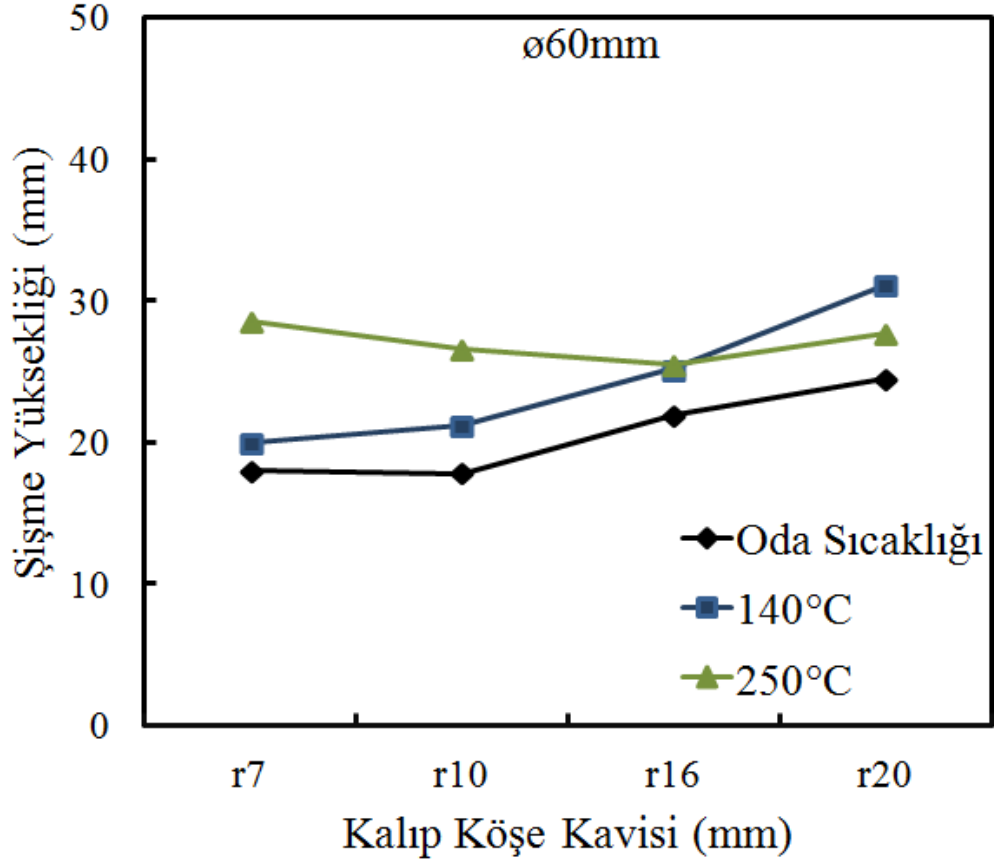
Hidro şekillendirme işlemine tabi tutulan numuneler üzerinden şişme yüksekliği ölçümü, şişirme testine göre gerilme gerinim eğrileri, kubbe kavis teorik ve deneysel ölçümü, kalınlık ölçümü gerçekleştirilmiş, interpolasyon - korelasyon denklemleri, grid ölçümleri ve şekillendirme sınır diyagramı (FLD - forming limit diagram) oluşturulmuştur. Diyagramlar parametrelerin deformasyona etkisi açısından değerlendirilmiş, optimum parametreler hakkında bir yargıya varılmaya çalışılmıştır.

Ayrıca hidro şekillendirme işleminde zamana göre basınç dağılımı grafikleri de EK AÇIKLAMALAR D Şekil D.1 ve D.2’de verilmiştir.

8.3.1. Parametrelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi

8.3.1.1. Parametrelerin 60 mm Çapa Sahip Kalıpla Şekillendirilen Numunelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi

Hidro şekillendirme işlemine tabi tutulan AA7075 - T6 alaşımlı alüminyum sac numunelerin şişme yükseklikleri Mitutoyo marka 0,01 mm okuma hassasiyetine sahip dijital mihengir ile ölçülmüştür. Ölçümler sonucu elde edilen değerler ortalamaları alınarak derlenmiş ve grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 8.4. 60 mm iç çapa sahip kalıba ait kalıp köşe kavisini ve deformasyon sıcaklığına göre ortalama şişme yüksekliği grafiğı.

Şekil 8.4'ten de görüldüğü gibi 60 mm iç çapa sahip kalıpta gerçekleştirilen şekillendirme işleminde oda sıcaklığında 7 mm köşe kavisine sahip kalıpla gerçekleştirilen şekillendirme işlemi neticesinde 18 mm şişme yüksekliği elde edilirken, kalıp kavis değeri 10 mm'ye yükseldiğinde oda sıcaklığında elde edilen en küçük şişme yüksekliği değeri 17,78 mm olarak elde edilmiştir. Aynı sıcaklık değerinde kalıp kavisini 16 mm olduğunda şişme yüksekliğinde tekrar artış gözlenmiş (21,91 mm), en büyük şişme yüksekliği değeri ise 20 mm kalıp köşe kavisinde 24,45 mm olarak elde edilmiştir. 140 °C sıcaklıkta ise en küçük şişme yüksekliği 7 mm köşe kavisini ile gerçekleştirilen şekillendirme işlemi neticesinde 20 mm olarak elde edilirken, kalıp kavisini 10 ve 16 mm'ye yükseldiğinde şişme yüksekliği değerleri sırasıyla 21,2 ve 25,2 mm değerlerine yükselmiş, en büyük şişme yüksekliği değeri ise 20 mm kalıp köşe kavisinde 31,16 mm olarak elde edilmiştir. 250 °C sıcaklıkta en büyük şişme yüksekliği (28,57 mm) 7 mm kalıp kavisiniyle elde edilirken, kalıp kavisini değeri 10 ve 16 mm olduğunda şişme yüksekliği değerleri giderek azalmış (sırasıyla

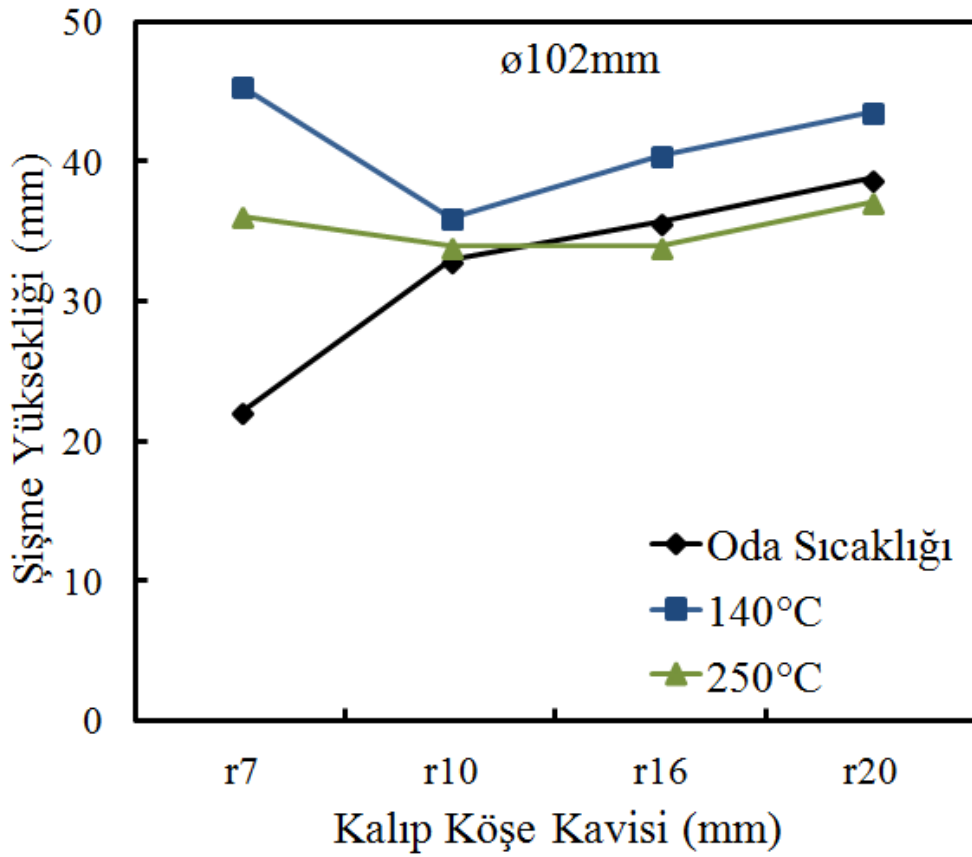
26,6 ve 25,53 mm), kalıp kavis değeri 20 mm'ye ulaştığında şişme yüksekliğinde tekrar artış gözlenmiştir (27,7 mm).

60 mm iç çapa sahip kalıp ile gerçekleştirilen deneylerin şişme yüksekliği değerleri genel olarak değerlendirildiğinde ise en büyük şişme yüksekliği 140 °C deformasyon sıcaklığı ve 20 mm kalıp köşe kavisinde 31,16 mm olarak elde edilirken, en küçük şişme yüksekliği oda sıcaklığında 10 mm köşe kavisini ile gerçekleştirilen deformasyon işleminde 17,78 mm olarak elde edildiği sonucuna varılmaktadır. Oda sıcaklığı ile 140 °C sıcaklık aralığında deformasyon sıcaklığı ve kalıp köşe kavisinin artması şişme yüksekliğini artırmıştır. Ancak 250 °C sıcaklıkta kalıp köşe kavisini arttıkça şişme yüksekliği azalmıştır. Fakat 20 mm kalıp kavisinde şişme yüksekliği tekrar artmaya başlamıştır.

8.3.1.2. Parametrelerin 102 mm Çapa Sahip Kalıpla Şekillendirilen Numunelerin Şişme Yüksekliğine Etkisi

Şekil 8.5'te ise 102 mm çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen şekillendirme işleminin sonuçları yer almaktadır. Oda sıcaklığında kalıp köşe kavisini arttıkça şişme yüksekliği de artmış, en büyük şişme yüksekliği 20 mm kalıp köşe kavisinde elde edilirken (39 mm), en küçük şişme yüksekliği değeri (22 mm) 7 mm kalıp köşe kavisini ile gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilmiştir. Aynı sıcaklık değerinde (oda sıcaklığı) 10 ve 16 mm kalıp köşe kavislerinde gerçekleştirilen deneyler neticesinde sırasıyla 33 ve 36 mm şişme yükseklikleri elde edilmiştir. Bununla birlikte 140 °C sıcaklığa çıkıldığında ise, en büyük şişme yüksekliği değeri 7 mm köşe kavine sahip kalıpla yapılan şekillendirme neticesinde 45 mm olarak elde edilirken, kalıp köşe kavisini 10 mm'ye çıktığında en küçük şişme yüksekliği değeri olan 36 mm'ye düşmüş, ardından köşe kavisinin 16 ve 20 mm değerine yükselmesiyle şişme yüksekliği değerleri de sırasıyla 40,4 ve 44 mm yüksekliğe ulaşmıştır. Sıcaklık değeri 250 °C'ye ulaştığında 7 mm kalıp köşe kavisinde 36 mm şişme yüksekliği elde edilirken, kalıp kavisini 10 ve 16 mm değerlerine yükseldiğinde en küçük şişme yüksekliği değeri olan 33,9 mm olarak elde edilmiş, aynı sıcaklıkta (250 °C) en büyük şişme yüksekliği (37 mm) 20 mm kalıp kavisini ile elde edilmiştir. 102 mm iç çapa sahip kalıp ile gerçekleştirilen deney sonuçları şişme yüksekliği açısından

değerlendirildiğinde ise; en büyük şişme yüksekliği değerinin 140 °C sıcaklık ve 7 mm kalıp köşe kavisinde 45 mm olarak elde edilirken, en küçük şişme yüksekliği değerinin oda sıcaklığında 7 mm köşe kavisiyle 22 mm olarak elde edildiğini söylemek mümkündür. Oda sıcaklığında kalıp köşe kavisinin artması şişme yüksekliğini artırmıştır. Ancak 140 - 250 °C sıcaklıklarda kalıp köşe kavisi arttıkça şişme yüksekliği önce azalmış, daha da arttırıldığında şişme yüksekliği tekrar artmaya başlamıştır.



Şekil 8.5. 102 mm iç çapa sahip kalıba ait kalıp köşe kavisi ve deformasyon sıcaklığına göre ortalama şişme yüksekliği grafiği.

Genellikle deformasyon sıcaklığı arttıkça şişme yüksekliğinin artması beklenir. Ancak bazen bu durum, tam tersi şekilde de görülebilir, sıcaklık arttırılsa bile şişme yüksekliği artmaz aksine azalmaya başlayabilir (Bkz. Şekil 8.5). Bu durum;

1. Yeniden kristalleşme sıcaklığıyla açıklanabilir. Bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı, malzemenin plastik olarak bir saat içinde %50'sinin

yeniden kristalleştiği sıcaklıktır ve yaklaşık olarak malzemenin ergime sıcaklığının 1/3'ü ile 1/2'si arasındadır [25]. Buna göre AA7075 malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı 30 – 181 °C aralığındadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığında malzemenin şişme yüksekliği en büyük değere ulaşmıştır. Ancak sıcaklık daha da arttırıldığında şişme yüksekliği tekrar azalmaya başlamıştır. Aynı sonuçlara literatürde farklı araştırmacıların yaptığı çalışmalarda da rastlanmaktadır. Örneğin He et al. hidro şişirme yaptıkları çalışmada sıcaklık arttıkça genleşme oranının arttığını, ve 170 °C sıcaklık seviyesinde en yüksek genleşme oranı olan %30 seviyesine ulaşıldığını, ancak sıcaklık daha da artırılıp 230 °C'ye ulaşığında bu oranın hızlı bir şekilde azalmaya başladığını vurgulamışlardır [33]. Wang et al. ise, AA7075 sac malzemenin şekillenebilirliğinin 140 - 220 °C aralığında önemli ölçüde arttığını, ancak sıcaklık 260 °C ve üzerine ulaşığında ise şekillenebilirliğin ve mekanik özelliklerin giderek kötüleştiğini vurgulamışlardır [37].

2. Ayrıca sıcaklık arttıkça ısı transfer yağının viskozitesi azalmış, bu da sürtünme kuvvetinin azalmasına neden olmuştur. Böylelikle şişme yüksekliği artmıştır. Ancak sıcaklık yağ film sıcaklığının üzerine çıkması yağ filminin incelerek kopmasına ve akabinde sınır sürtünmenin meydana gelmesine neden olmuştur. Bu durum sürtünme kuvvetinin artmasına neden olduğundan sac malzemenin hareket kabiliyetini azaltmıştır. Sürtünme kuvveti motorlarda da aynı etkiyi göstermektedir [67].
3. Şişme yüksekliği değerleri şekillendirme sınır diyagramları (FLD) ile birlikte değerlendirilecek olursa (Bkz. Şekil 8.2 ve 8.7); 250 °C sıcaklıkta şişme yüksekliği değeri düşerken, şekillendirme limiti (FL) artmıştır. Bunun nedeni; 250 °C sıcaklık değerinde malzemenin şekillenme hacmi artmış, malzeme yukarı doğru şişmek yerine, daha çok enine kesitte genleşmiştir.

Sıcaklığın şişme yüksekliğine etkisine benzer bir etki de kalıp kavisinde görülmüştür. Kalıp kavis değerinin optimum seviyenin üzerine çıkarılması şişme yüksekliğini olumsuz etkilemektedir. Bu durum literatürde daha önce yapılan çalışmalarda da görülmüştür [37, 49, 55-68]. Chen et al., magnezyum AZ31 alaşımlı sac malzemeye hidro şekillendirme yoluyla dörtgen kesitli bir geometri vermişlerdir. Çalışmanın sonucunda kalıp köşe kavis optimum bir seviyeye kadar arttırıldığında

şekillenebilirliğin arttığını, ancak kavis değeri artırılmaya devam edildiğinde şekillendirmeyi olumsuz etkilediğini vurgulamışlardır [30]. Harpet et al. alüminyum sacların şekillenebilirliğini açıklamak için sayısal bir tahmin denklemi oluşturmuş ve şekillenebilirliğin kalıp köşe kavisini optimum değerden aşağı indikçe şekillenebilirliğin azaldığını vurgulamışlardır [73].

Goodarzi et al., tüp malzemeyi farklı kalıp köşe kavisleriyle şişirme işlemine tabi tutmuşlar ve yaptıkları çalışma neticesinde küçük kalıp köşe kavisine şekillendirme işleminin çok fazla enerji gerektirdiğini ve şekillenmenin gerçekleştirilemediğini, büyük kalıp kavis değeri ise kırışıklıklara neden olduğunu, optimum kavis değerinin aşılması gerektiğini vurgulamışlardır [68].

8.3.2. Parametrelerin Kubbe Kavis Yarıçapına Etkisi

Şekil 8.6; Çizelge 7.2'deki parametrelere göre hasara uğratılmış numunelerin kubbe kavis yarıçapı ölçümlerinin deneysel ve teorik sonuçlarını karşılaştırmalı olarak vermektedir. Kubbe kavis yarıçapı teorik hesaplamaları Denklem 4.6 ve Denklem 4.7'ye (Bkz. Bölüm 4) göre gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Denklem 4.6'ya göre 60 mm iç çap ve 20 mm köşe kavisine sahip kalıpla oda sıcaklığında gerçekleştirilen hidro şekillendirme işlemi neticesinde 21,89 mm şişme yüksekliği elde edilmiştir. Denklem 4.6 kullanılarak Panknin denklemine göre;

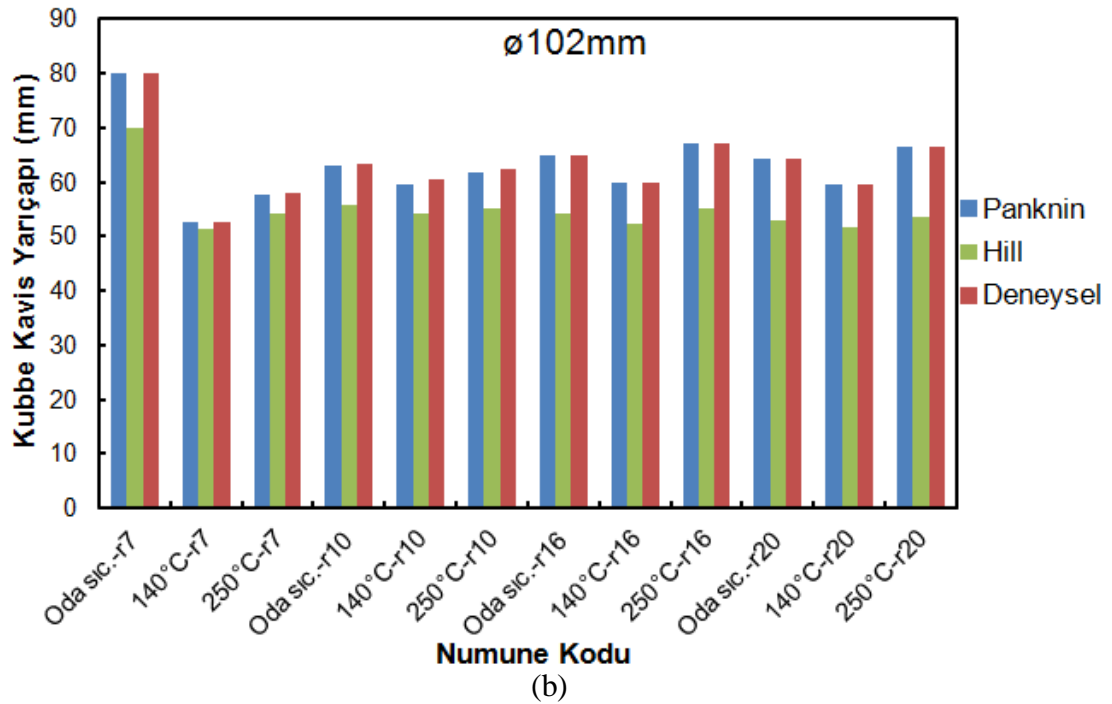
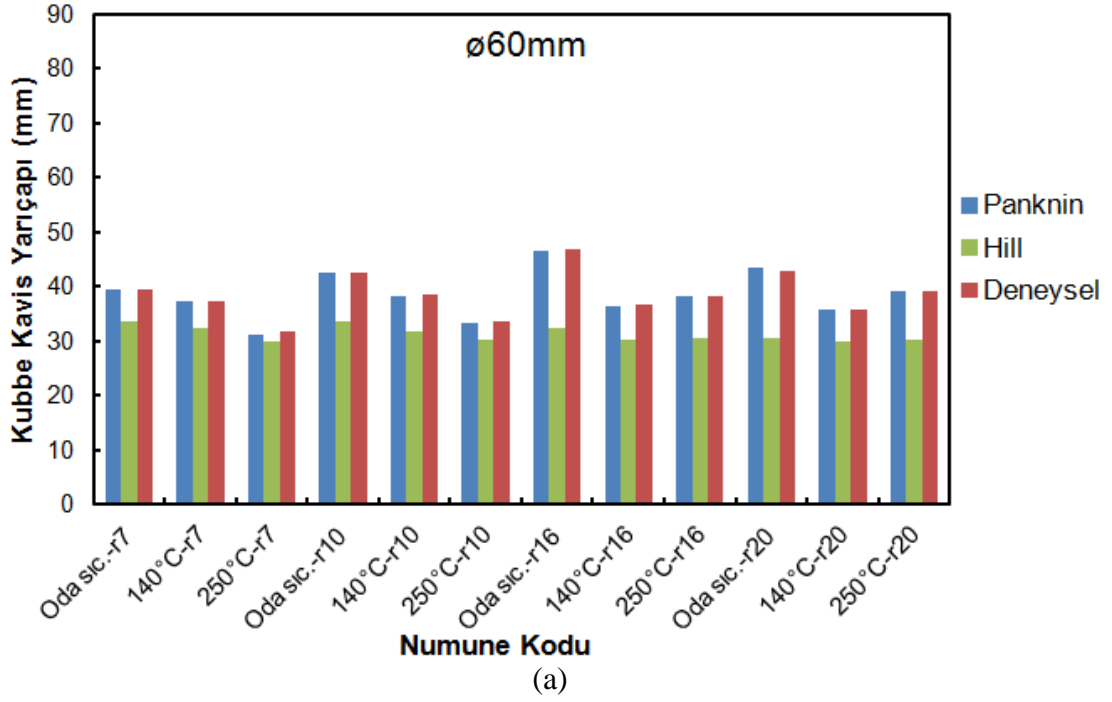
$$R_d = \frac{\frac{60}{2} + 20^2 + 21,89^2 - (2 * 20 * 21,89)}{2 * 21,89}$$

$$R_d = \frac{50^2 + 21,89^2 - 875,6}{43,78}$$

$$R_d = 48 \text{ mm}$$

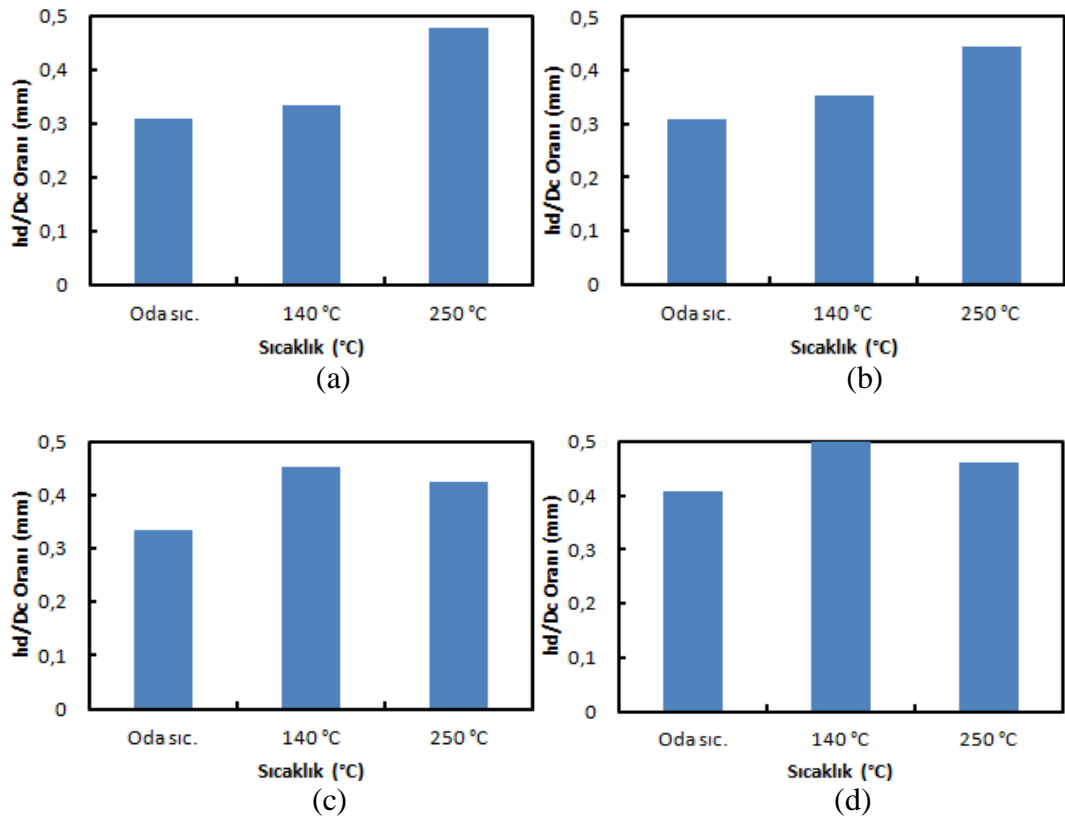
bulunurken, fotoğraflanan numunenin orijinal boyutuna göre CAD programına atıldıktan sonra tekrar çizilerek gerçekleştirilen ölçümleri sonucunda bu değer 47,97 mm olarak elde edilmiştir.

Şişme yüksekliği, kubbe kavis yarıçapını açıklamada en önemli faktördür [56]. Dolayısıyla grafikler değerlendirilirken Şekil 8.5’de verilen şişme yüksekliği, Şekil 8.6’da verilen kubbe kavis yarıçapı ve Şekil 8.9’da verilen şişme yüksekliği - kubbe kavis grafiğinden faydalanılacaktır.



Şekil 8.6. Kalıp kavis deneysel ölçüm ve teorik hesaplama sonuçları a) 60 mm, b)102 mm iç çapa sahip kalıp.

Şekil 8.6'dan da görüldüğü gibi kubbe kavis yarıçapının hesaplanması için kullanılan yaklaşımlardan Panknin tarafından geliştirilen yaklaşım, deneysel ölçüm sonuçlarına oldukça yakın, hatta bazı noktalarda birebir aynı sonuçları vermiştir. Hill tarafından geliştirilen denklemle gerçekleştirilen hesaplamalar ise deneysel sonuçlardan oldukça farklı değerler vermiştir. Ayrıca 60 mm iç çapa sahip kalıba ait kubbe kavis yarıçapı ölçüm ve hesaplarında Panknin yaklaşımı deneysel ölçümlerden ortalama 0,09 standart sapma ile sonuç verirken, Hill yaklaşımı 5,08 standart sapma ile sonuç vermiştir. 102 mm iç çapa sahip kalıba ait kubbe kavis yarıçapı ölçüm ve hesaplarında Panknin yaklaşımı deneysel sonuçlardan 0,16 standart sapma ile sonuç verirken, Hill yaklaşımı 5,8 standart sapma ile sonuç vermiştir. Panknin denkleminin deneysel sonuçlara Hill denklemine göre daha yakın sonuçlar verdiği Koç ve arkadaşlarının çalışmasında da vurgulanmıştır [56].



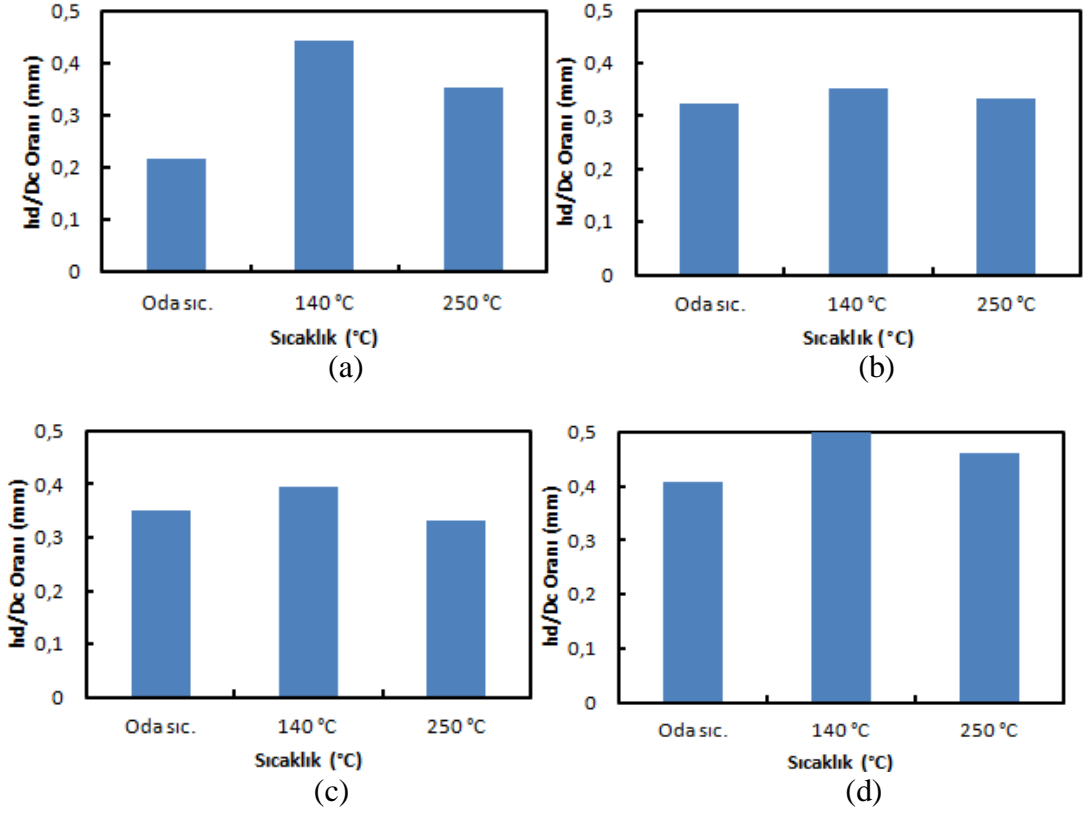
Şekil 8.7. 60 mm iç çapa sahip kalıba ait kubbe kavis yarıçapı hd/Dc oranı, a) 7 mm b) 10 mm, c) 16 mm ve d) 20 mm.

Gutscher et al., daha önceki çalışmalarında kubbe kavis yarıçapı hesaplanmasında Panknin'in yaklaşımının hd/Dc (şişme yüksekliği/kalıp iç çapı) oranı 0,56'ya ulaşana

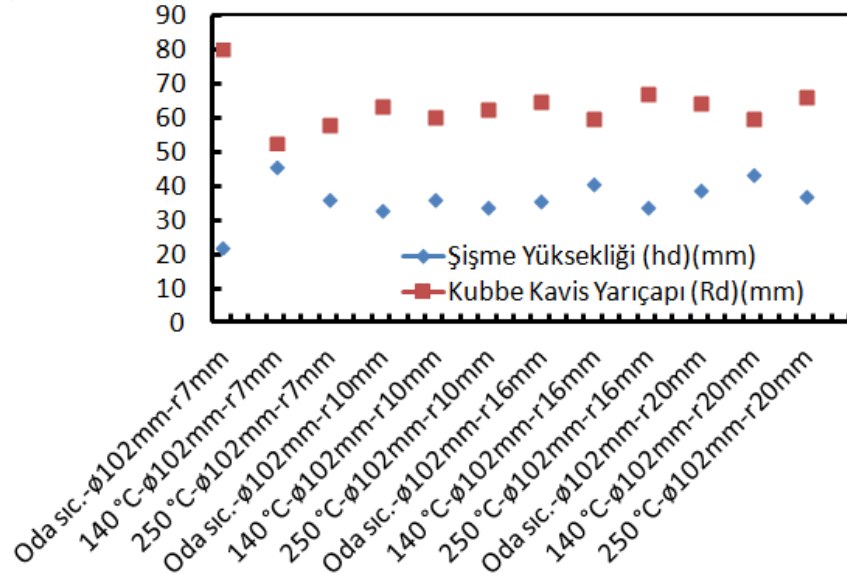
kadar geçerli olduğunu vurgulamışlardır [56,57]. Şekil 8.7’de verilen grafikte ise bu oranın 0,56’nın çok altında kaldığını göstermektedir.

Bu durumda şişirme işlemine tabi tutulacak numunelerin kubbe kavis yarıçapı hesabının Panknin denklemine (Bkz. Bölüm 4 Denklem 4.6) göre yapılmasının deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar vereceği söylenebilir.

Şekil 8.5 ve 8.8’den de görüldüğü gibi 102 mm iç çapa sahip numunelerde 140 °C sıcaklıkta şişme yüksekliği artmış dolayısıyla kalıp köşe kavis yarıçapı azalmıştır, 250 °C sıcaklıkta şişme yüksekliği azalmış dolayısıyla kubbe kavis artmıştır. Ancak, 60 mm iç çapa sahip kalıpta gerçekleştirilen şekillendirme işleminde küçük kalıp kavisinde (7 ve 10 mm) gerçekleştirilen şekillendirme işleminde basınç ve sistem elemanları yetersiz kaldığından numuneler hasara uğratılana kadar şişirilemediği daha önce belirtilmiş idi. Bundan dolayı; bu deneylerin ölçüm sonuçlarında şişme yüksekliklerine göre kıyaslandığında sapma mevcuttur. Ayrıca 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deney sonuçlarına bakıldığında 10 mm kalıp köşe kavis deney sonuçları ve Panknin yaklaşımı arasında normalin dışında bir sapma gözlenmiştir. Bu durumun nedeninin Koç et al., çalışmalarında açıklandığı gibi düşük deformasyon oranlarında artan geri esneme olabileceği söylenebilir [56].



Şekil 8.8. 102 mm iç çapa sahip kalıba ait kubbe kavis yarıçapı hd/Dc oranı, a) 7 mm b) 10 mm, c) 16 mm ve d) 20 mm.



Şekil 8.9. Şişme yüksekliği – kubbe kavis yarıçapı değişiminin karşılaştırılması.

8.3.3. Parametrelerin Gerilme-Birim Şekil Değişirme Diyagramına Etkisi

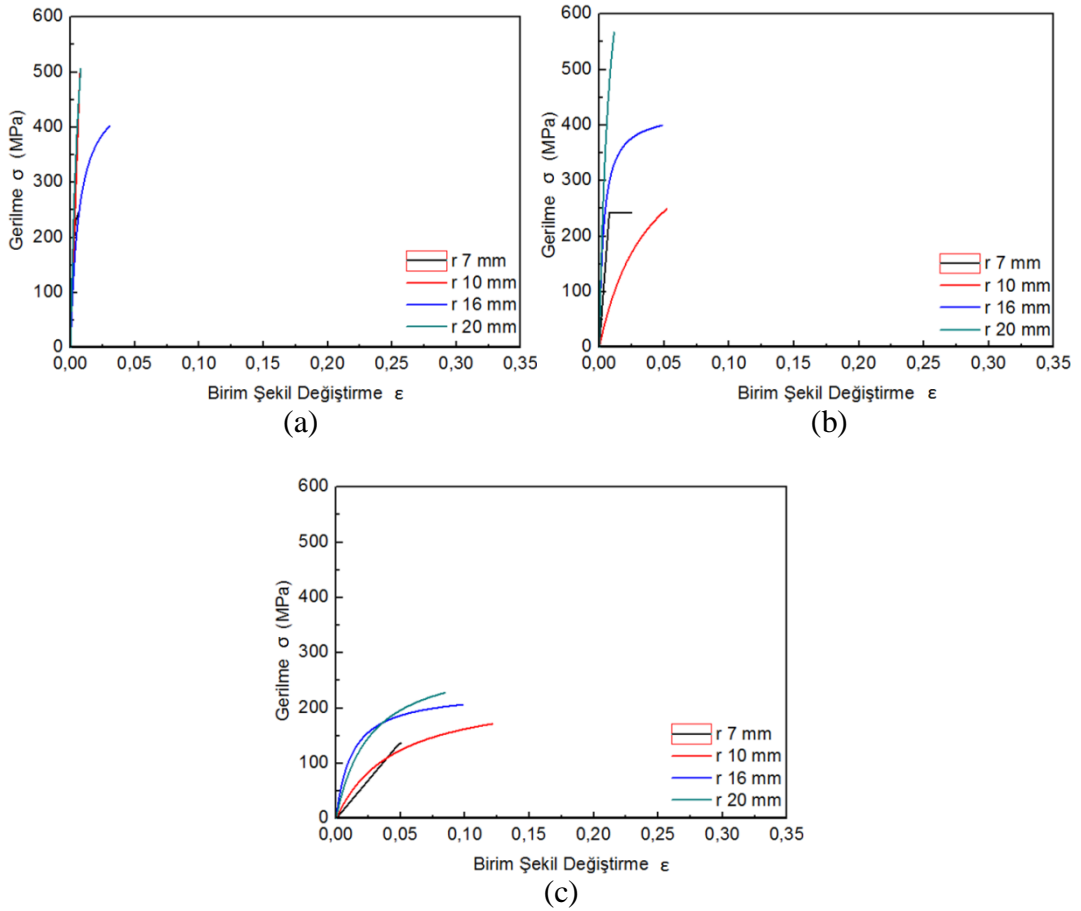
Şekil 8.10 ve 8.11’de malzemenin, 102 mm kalıp iç çapı ve farklı test parametrelerinde şişirme testine göre $\sigma - \epsilon$ eğrileri verilmiştir. Her bir parametre grubundan üçer adet numune teste tabi tutulmuş, bu numunelerin ortalaması alınarak diyagramlar oluşturulmuştur.

Kalıp köşe kavisi ve sıcaklığın çekme eğrisi üzerine oldukça önemli etkileri bulunmaktadır. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneylerin sonucunda en yüksek ϵ 250 °C sıcaklık ve 10 mm köşe kavisiyle 0,121 olarak elde edilirken, en yüksek σ_c değerine 140 °C sıcaklık ve 20 mm köşe kavisiyle 567 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 8.10). Oda sıcaklığında en düşük σ_c değerine 245 MPa ve en küçük ϵ değerine 0,006 olarak 7 mm köşe kavisiyle gerçekleştirilen deformasyon işleminden elde edilen numunelerde rastlanırken, sıcaklık 140 °C’ye ulaştığında aynı kalıp kavisinde σ_c 242 MPa’a düşerken, ϵ değeri 0,008’e ulaşmıştır. Deformasyon sıcaklığı 250 °C’ye ulaştığında ise σ_c 136 MPa’a düşmüş, ancak ϵ de olumsuz etkilenmiş 0,05 olmuştur.

10 mm kalıp kavisiyle gerçekleştirilen deneylerin sonucunda ise; oda sıcaklığında kavis 7 mm’ye göre oldukça yüksek σ_c 498 MPa gösterirken, 0,01’in altında ϵ göstermiştir (0,007). Aynı kalıp köşe kavisinde 140 °C sıcaklıkta σ_c 249 MPa’a düşerken, ϵ bir miktar artarak 0,05 olmuştur. 250 °C sıcaklığa ulaşıldığında ise σ_c 172 MPa ve 10 mm kalıp köşe kavisindeki en yüksek ϵ değerine 0,12 olarak ulaşılmıştır.

Oda sıcaklığında 16 mm kalıp köşe kavisi ile 10 mm’lik köşe kavisi $\sigma - \epsilon$ diyagramı sonuçları karşılaştırıldığında, σ_c ’nin 402 MPa’a gerilediği, ϵ ’in ise 0,03’e çıktığı görülmektedir (Şekil 8.10). Aynı kavis değerinde sıcaklığın 140 °C olması, σ_c ve ϵ değerinde fazla bir azalma yada artmaya neden olmamış, ϵ 0,048 değerine yükselirken, 3 MPa azalma ile 399 MPa σ_c elde edilmiştir. Sıcaklık 250 °C olduğunda ise σ_c değeri oda sıcaklığına göre neredeyse yarıya inerek 206 MPa’a ulaşırken, gerinim ise 3 katı artarak 0,098 olmuştur.

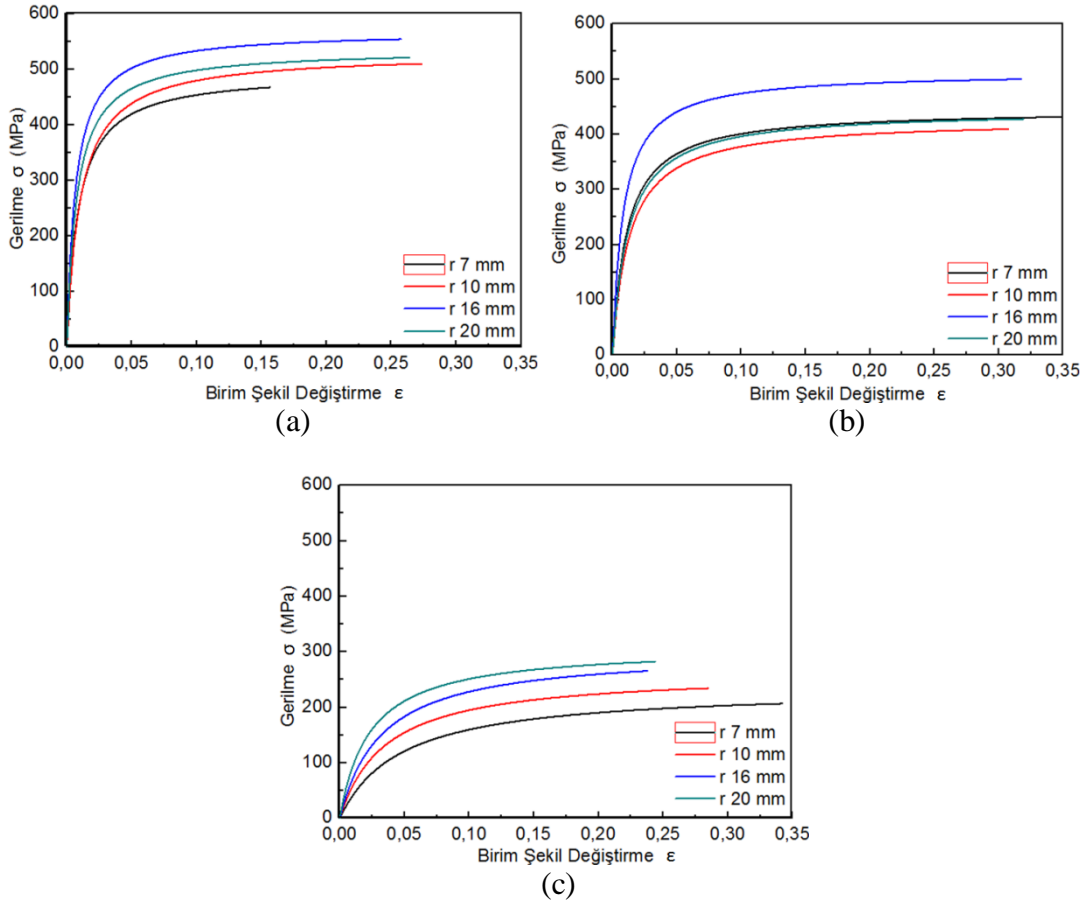
Kalıp kavisi 20 mm olduğunda ise oda sıcaklığında, 16 mm kalıp kavisine göre, tekrar σ_c 506 MPa'a yükselirken, ϵ ise 0,008'e düşmüştür. 20 mm kalıp kavisinde 140 °C sıcaklıkta ise eğrinin seyri aynı $\sigma - \epsilon$ eğrisi üzerinde (20 mm kalıp kavisi - oda sıcaklığı eğrisi) devam etmiştir. 20 mm kalıp kavisi ve 140° C sıcaklıkta 60 mm iç kalıp çapıyla yapılan deneyler arasında en yüksek σ_c değerine 567 MPa olarak ulaşılmıştır. 250 °C'de ise σ_c 'de önemli ölçüde azalma görülerek 228 MPa'a düşerken, ϵ 'de 0,08 seviyesine kadar artış gözlenmiştir.



Şekil 8.10. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen hidro şekillendirme işleminden elde edilen gerilme-birim şekil değişirme diyagramları, a) Oda sıcaklığı, b) 140 °C, c) 250 °C.

102 mm kalıp iç çapı, 7 mm kalıp köşe kavisine göre gerçekleştirilen deneyler değerlendirildiğinde; deformasyon sıcaklığının oda sıcaklığından - 140 °C'ye artırılmasının σ_c 'nin düşmesine (sırasıyla 468 – 434 MPa), ϵ 'in ise yaklaşık 2 - 3 katı artmasına (0,157 – 0,44) neden olduğu görülmektedir (Şekil 8.11). Bu da

şekillenebilirliği arttırmaktadır [14,30,58]. Bu artış tüm kalıp köşe kavislerinde geçerlidir. Bununla birlikte, oda sıcaklığından 140 °C sıcaklığa gelindiğinde artan ε değeri ve σ_c , sıcaklık daha da artırılıp 250 °C'ye ulaştığında tekrar azalmaya başlamıştır (207 MPa ve 0,34). Ayrıca, kalıp köşe kavisindeki azalma; bütün sıcaklık değerlerinde σ_c 'nin düşmesine neden olurken, ε değerini arttırmıştır (Şekil 8.11), bu da şekillenebilirliği arttırmaktadır [28].



Şekil 8.11. 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen hidro şekillendirme işleminden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme diyagramları, a) Oda sıcaklığı, b) 140 °C, c) 250 °C.

Oda sıcaklığı ile 250 °C arasında r10, r16 ve r20 mm kalıp köşe kavislerine ait çekme eğrileri birbirine oldukça yakın karakter göstermişlerdir. Ancak bütün sonuçlar içinde en yüksek ε değeri 7 mm kalıp köşe kavisine 140 °C deformasyon sıcaklığında gerçekleştirilen hidro şekillendirme işlemi neticesinde 0,44 olarak elde

edilmiştir. Bu durumun, yeniden kristalleşme sıcaklığından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Bu tip malzeme davranışlarında, literatürdeki bazı çalışmalarda da sıcaklıkla ortaya çıkan yeniden kristalleşmeye işaret edilmektedir. [24,74-76]. Lin et al., AZ31B magnezyum alaşımlı malzemenin farklı sıcaklıklardaki şekillenebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, toplam uzama ve uzama oranının oda sıcaklığı ile 160 °C sıcaklık arasında en yüksek değerine ulaştığını, sıcaklık daha da arttırıldığında bu değer tekrar hızlı bir şekilde düştüğünü göstermiştir [76].

Hidro şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen gerilme birim şekil değiştirme diyagramları genel olarak değerlendirildiğinde;

1. 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işlemi neticesinde en yüksek ϵ 7 mm kalıp köşe kavisini ile 140 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. En düşük ϵ ise yine 7 mm kalıp köşe kavisinde oda sıcaklığında elde edilmiştir.
2. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işlemi neticesinde en yüksek ϵ 10 mm kalıp köşe kavisini ile 250 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. En düşük ϵ ise 7 mm kalıp köşe kavisinde oda sıcaklığında elde edilmiştir.
3. 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işleminde sıcaklık arttıkça σ_c azalmış, ϵ önce artmış sıcaklık daha da arttırıldığında ϵ azalmaya başlamıştır.
4. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işleminde ise sıcaklık arttıkça σ_c azalmış, ϵ artmıştır.
5. Her iki kalıp çapıyla gerçekleştirilen deformasyon işleminde de bütün sıcaklık değerlerinde kalıp köşe kavisini arttırıldıkça σ_c artmış, ϵ önce artmış sonra azalmıştır.

Ayrıca hidro şekillendirme testi sonucunda elde edilen gerilme-gerinim diyagramı ile tek eksenli çekme testi sonucunda elde edilen diyagram karşılaştırıldığında AA7075-T6 malzemenin çekme testi sonucunda elde edilen uzama değeri (~19%) hidro şekillendirme işlemi sonucu elde edilen uzamadan (~30%) daha düşüktür.

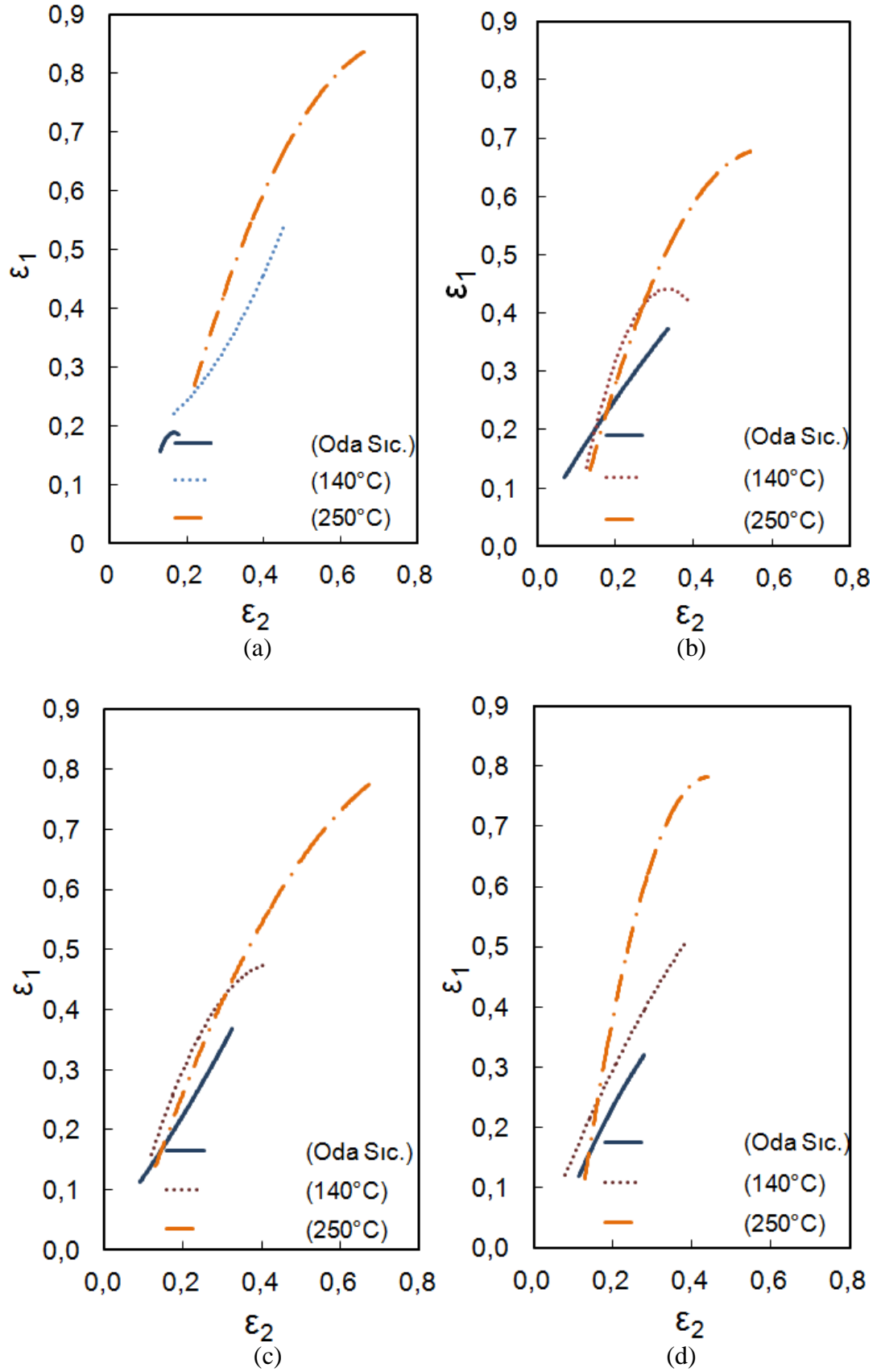
8.3.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram – FLD)

Deformasyon parametrelerinin sac malzemenin şekillenebilirliği üzerine etkilerini incelemek için grid ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sac malzemede hasar meydana gelene kadar şişirme işlemine devam edilmiştir. Hasar bölgesine en yakın, fakat hasar görmemiş birinci komşu gridler seçilmiş ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bütün numunelerde aynı konumdaki gridler üzerinden ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, numune üzerinden fotoğraf çekilip, bu fotoğraflar üzerinden gridlerin AutoCAD programında tekrar çizimiyle ölçülmüştür. Ölçüm fotoğraflarından örnekler EK AÇIKLAMALAR E. Şekil EK E.1 ve E.2’de verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre şekillendirme sınır diyagramları oluşturulmuştur. Numuneler üzerindeki dairesel gridler şekillendirme işleminin sonunda elipse benzer bir geometriye gelmiştir. Şekillendirme sınır diyagramları elipsin büyük ve küçük eksenindeki boyutsal değişimlerine göre (d_1 ve d_2) oluşturulmuştur. Grid ölçümleri

8.3.4.1. 102 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deneylere Ait Şekillendirme Sınır Diyagramı

Şekil 8.12’de 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen hidro şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen numunelerden yapılan ölçümler sonucu oluşturulmuş ŞSD (FLD)’ler mevcuttur. Buna göre; deformasyon sıcaklığı arttıkça, şekillendirme sınırının da arttığı diyagramlardan görülmektedir.

Bu artış bütün kalıp köşe kavislerinde görülmüştür. Oda sıcaklığında en yüksek şekillendirme limiti 10 ve 16 mm kalıp köşe kavisleriyle gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilirken (Şekil 8.12 b ve c), yine aynı sıcaklıkta en düşük şekillendirme limiti 7 mm kalıp köşe kavisleriyle gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilmiştir (Şekil 8.12 a).



Şekil 8.12. 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşturulan FLD, a) r7 mm, b) r10 mm, c) r16 mm, d) r20 mm.

140 °C sıcaklıkta, durum tam aksi yönde değişmiştir. Bu sıcaklık değerinde şekillendirme limitinde de şişme yüksekliklerine benzer bir sonuç ortaya çıkarak en iyi şekillendirme limiti 7 mm kalıp köşe kavisıyla gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilmiştir. 140 °C sıcaklıkta şekillendirme limiti 10 mm kalıp köşe kavisinde azalmış (Şekil 8.12 b.), kalıp köşe kavisini 16 mm ve ardından 20 mm olduğunda tekrar artmaya başlamıştır (Şekil 8.12 c-d). 140 °C sıcaklıkta en iyi şekillendirme limiti değerleri 7 mm kalıp köşe kavisini ile elde edilirken, en düşük şekillendirme limiti 10 mm kalıp köşe kavisiniyle elde edilmiştir.

250 °C sıcaklıkta en yüksek şekillendirme limiti 7 mm kalıp köşe kavisiniyle elde edilmiş (Şekil 8.12 a), bunu sırasıyla 16 ve 20 mm kalıp köşe kavislerinin şekillendirme sınır diyagramları takip etmiştir (Şekil 8.12 c-d). En düşük şekillendirme limiti 10 mm kalıp köşe kavisiniyle şekillendirilen numunelerde görülmüştür.

Bütün sonuçlar karşılaştırıldığında, en iyi şekillendirme limiti 250 °C sıcaklıkta 7 mm kalıp köşe kavisiniyle gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramları analiz edildiğinde, genel olarak sıcaklık arttıkça şekillendirme limitinin arttığı söylenebilir. Oda sıcaklığında kalıp köşe kavisinin artması şekillendirme limitini önemli ölçüde arttırmıştır. Bununla beraber, yüksek sıcaklıkta kalıp köşe kavisinin optimum seviyenin üzerine çıkması şekillenmeyi olumsuz etkilemiş, şekillendirme limitini düşürmüştür. Chen et al., AZ31 magenzyum alaşımlı sac malzemenin dairesel derin çekme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonuçları AZ31 sacın oda sıcaklığında şekillenebilirliğinin çok düşük olduğunu, ancak sıcaklık 200 °C ye kadar arttırıldığında şekillenebilirliğin de giderek önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Ayrıca incelemeler kalıp köşe kavisinin optimum bir seviyeye kadar arttırılmasıyla şekillenebilirliğinde arttığını, ancak kalıp köşe kavisini değeri daha da arttırıldığında şekillenebilirliğin tekrar azaldığını göstermiştir [77].

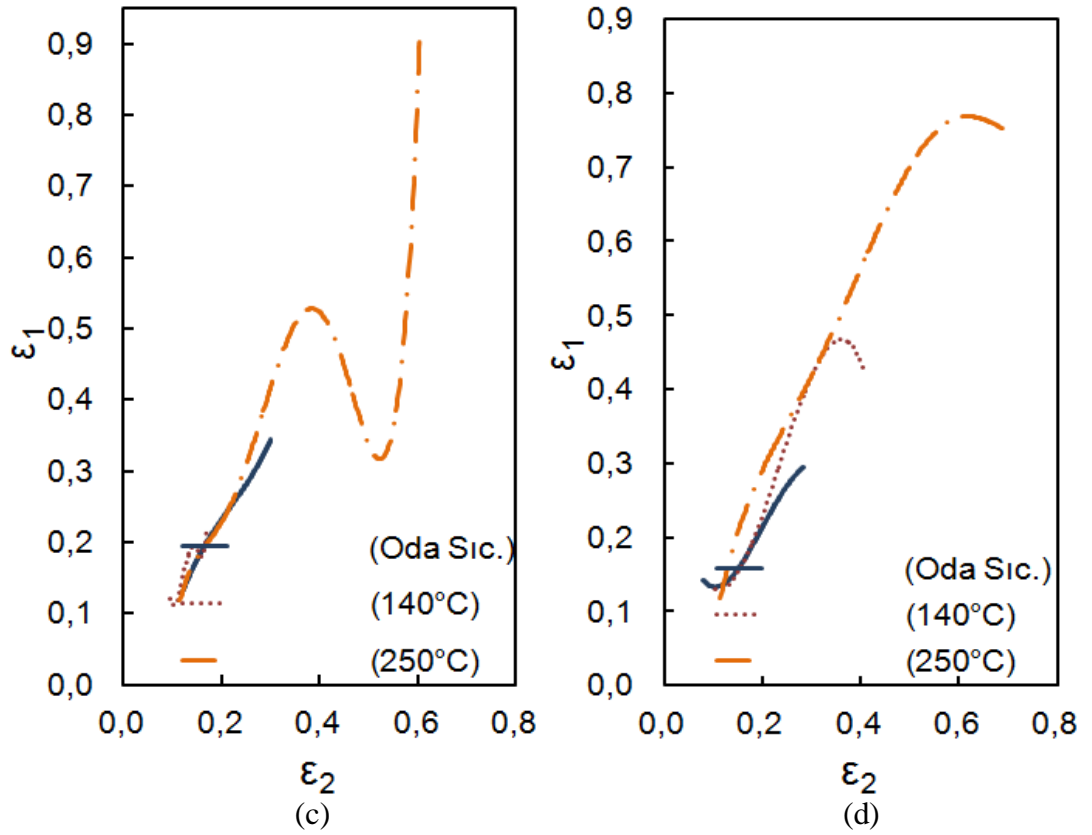
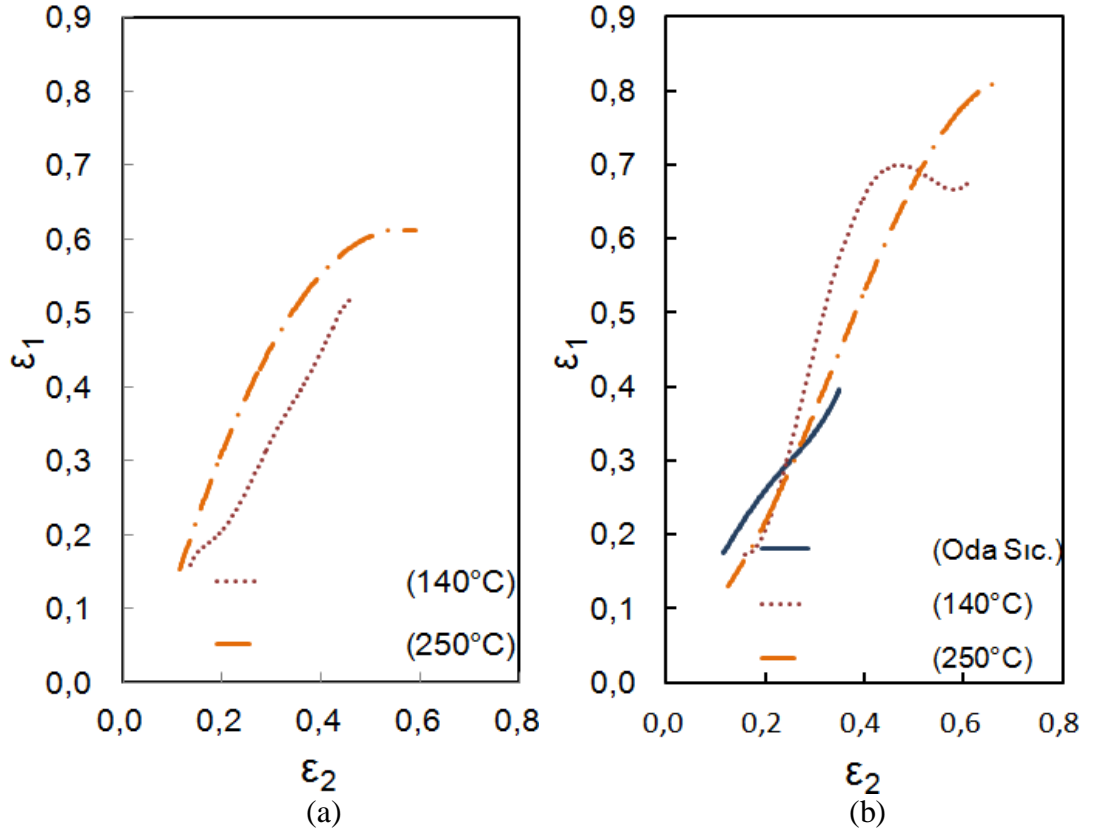
8.3.4.2. 60 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deneylere Ait Şekillendirme Sınır Diyagramı

Şekil 8.13'de 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen hidro şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen numunelerden yapılan ölçümler sonucu oluşturulmuş ŞSD (FLD)'ler mevcuttur. Ancak $\phi 60$ mm'lik kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işleminde küçük kalıp kavisinde (7 mm) malzeme mevcut koşullarda hasara uğratılamamıştır. Dolayısıyla ŞSD'ları bunun dışında kalan diğer deneylerin sonuçları değerlendirilerek oluşturulmuştur. Bu kalıp çapında da ($\phi 60$ mm) yine, deformasyon sıcaklığı arttıkça şekillendirme limitinin arttığı görülmektedir.

Bu artış bütün kalıp köşe kavislerinde görülmüştür. Oda sıcaklığında en yüksek şekillendirme limiti sırasıyla 10 ve 16 mm kalıp köşe kavisine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilirken (Şekil 8.13 b ve c), yine aynı sıcaklıkta en düşük şekillendirme limiti 20 mm kalıp köşe kavisine gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilmiştir (Şekil 8.13 d).

140 °C sıcaklıkta, durum tam aksi yönde değişmiştir. En iyi şekillendirme limiti 10 mm kalıp köşe kavisine gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilmiştir. 140 °C sıcaklıkta şekillendirme limiti 16 mm kalıp köşe kavisinde 7 mm kavisten dahi daha az şekillendirme limiti elde edilirken (Şekil 8.13 c), kalıp köşe kavisine 20 mm olduğunda tekrar artmaya başlamıştır (Şekil 8.13 d). 140 °C sıcaklıkta en iyi şekillendirme limiti değerleri 10 mm kalıp köşe kavisine ile elde edilirken, en düşük şekillendirme limiti 16 mm kalıp köşe kavisine elde edilmiştir.

250 °C sıcaklıkta en yüksek şekillendirme limiti 16 mm kalıp köşe kavisine elde edilmiş (Şekil 8.13 c), bunu sırasıyla 10 ve 20 mm kalıp köşe kavislerinin şekillendirme sınır diyagramları takip etmiştir (Şekil 8.13 b-d). En düşük şekillendirme limiti 7 mm kalıp köşe kavisine şekillendirilen numunelerde görülmüştür.



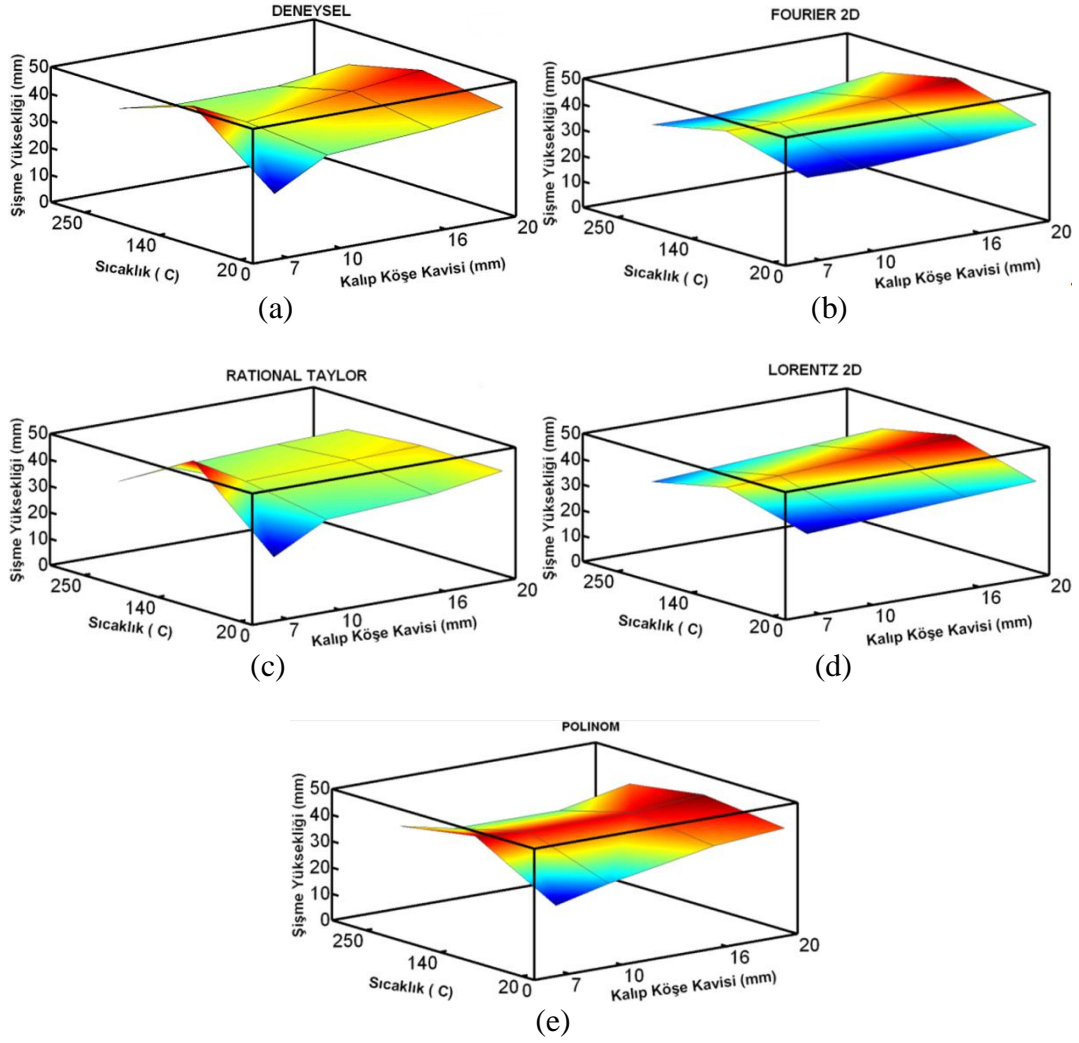
Şekil 8.13. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşturulan FLD, a) r7 mm, b) r10 mm, c) r16 mm, d) r20 mm.

Bütün sonuçlar karşılaştırıldığında, en iyi şekillendirme limiti 250 °C sıcaklıkta 16 mm kalıp köşe kavisıyla gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramları analiz edildiğinde, genel olarak sıcaklık arttıkça şekillendirme limitinin arttığı söylenebilir. Oda sıcaklığında kalıp köşe kavisinin artması şekillendirme limitini önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla beraber, yüksek sıcaklıkta kalıp köşe kavisinin optimum seviyenin üzerine çıkması şekillenmeyi olumsuz etkilemiş, şekillendirme limitini düşürmüştür (Şekil 8.13 d).

8.3.5. İnterpolasyon Denklemleri

8.3.5.1. 102 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deformasyon İşlemine Ait İnterpolasyon Denklemleri

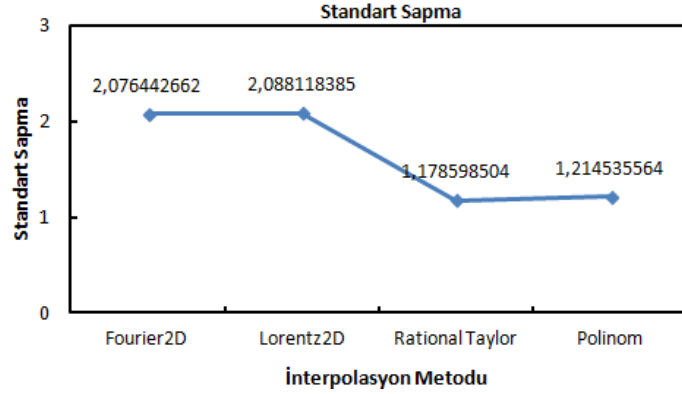
Şekil 8.14'de; deformasyon sıcaklığı (oda sıcaklığı, 140 ve 250 °C), kalıp köşe kavisini (7, 10, 16 ve 20 mm) ve deneyler sonucunda elde edilen numunelerin şişme yüksekliği verileri kullanılarak 4 farklı metotla (Rational Taylor, Fourier 2D, Lorentz 2D ve Polinom) oluşturulan korelasyon grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



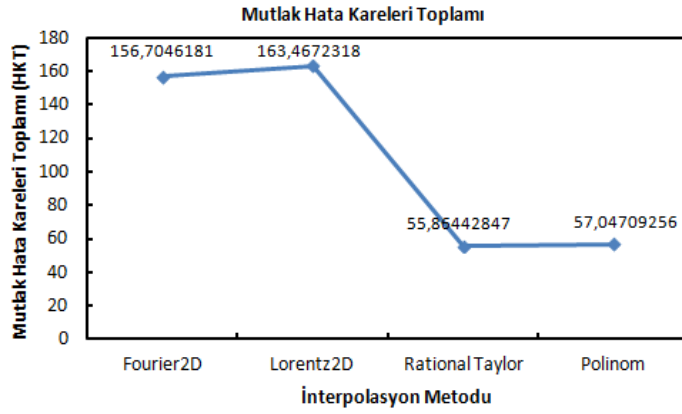
Şekil 8.14. 102 mm iç çapa sahip kalıba ait korelasyon grafikleri, a) Deneysel, b) Fourier 2D, c) Rational Taylor, d) Lorentz 2D, e) Polinom.

İnterpolasyon işlemleri değerlendirilirken standart sapma, mutlak hata kareler toplamı ve bağıl hata kareler toplamından faydalanılmıştır. Şekil 8.15, 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işleminin sonucunda oluşturulan interpolasyon denklemlerinin standart sapma, bağıl ve mutlak hata kareleri toplamı grafiklerini göstermektedir.

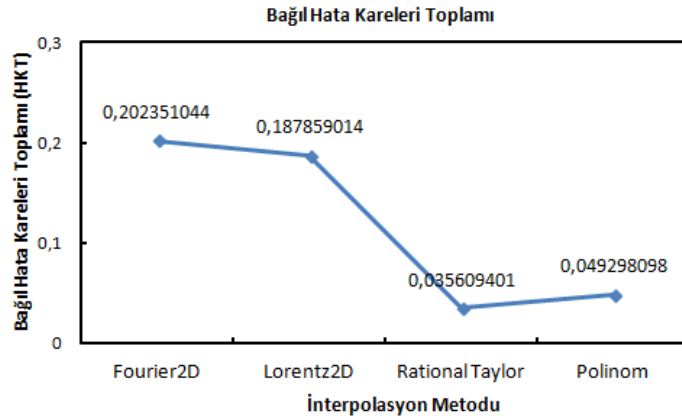
Bir interpolasyon denkleminin standart sapma, mutlak hata kareler toplamı ve özellikle bağıl hata kareler toplamı sıfıra yaklaştıkça deneysel sonuçlara uygunluğu artar.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8.15. 102 mm iç çapa sahip kalıpla şekillendirilen numunelere ait interpolasyon hata ve sapma grafikleri, a) standart sapma, b) mutlak hata kareleri toplamı, c) bağıl hata kareleri toplamı.

Şekil 8.15'ten de görüldüğü gibi 4 farklı metoda göre gerçekleştirilen interpolasyon denklemlerinden standart sapma, mutlak hata kareleri toplamı, bağıl hata kareleri toplamı sıfıra en yakın olan denklem Rational Taylor serisiyle oluşturulan korelasyon sonucu elde edilen interpolasyon denklemdir. 102 mm iç çapa sahip kalıpla

gerçekleştirilen deformasyon işlemi sonucu elde edilen şişme yüksekliği değerlerine en yakın şişme yüksekliği değerini veren en doğru interpolasyon Rational Taylor metoduyla gerçekleştirilen interpolasyon olmuştur.

T deformasyon sıcaklığında, R_c kalıp köşe kavisiyle gerçekleştirilen deformasyon işlemi sonucunda h_d şişme yüksekliğinde meydana gelecek değişimi deneysel verilere en yakın değerlerle ifade eden Rational Taylor interpolasyon denklemi;

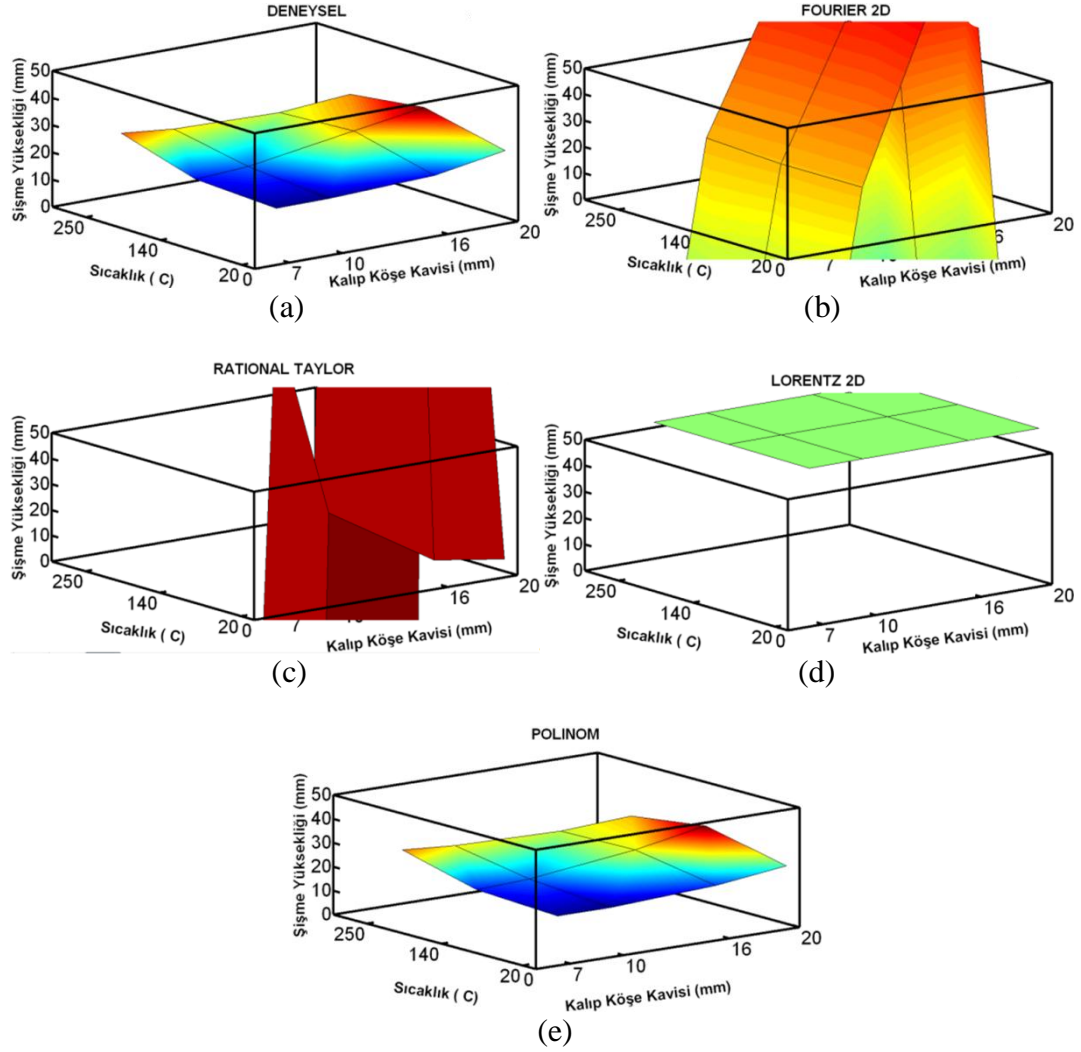
$$h_d = \frac{-283,45 + -10,84*R_c + 43,63*T + -0,16*T^2 + -2,75*R_c*T}{1 + -1,92*R_c + 1,20*T + 0,06*R_c^2 + -0,005*T^2 + -0,07*R_c*T} \quad (8.1)$$

şeklindedir.

Bu denklem vasıtasıyla 102 mm kalıp çapında, oda sıcaklığı ile 250 °C sıcaklık ve 7-20 mm kalıp kavisi aralığında herhangi bir parametreyle yapılan hidro şekillendirme işlemi neticesinde elde edilecek şişme yüksekliği hakkında deney yapmadan bir öngöründe bulunulabilecek, şişme yüksekliği tahmin edilebilecektir.

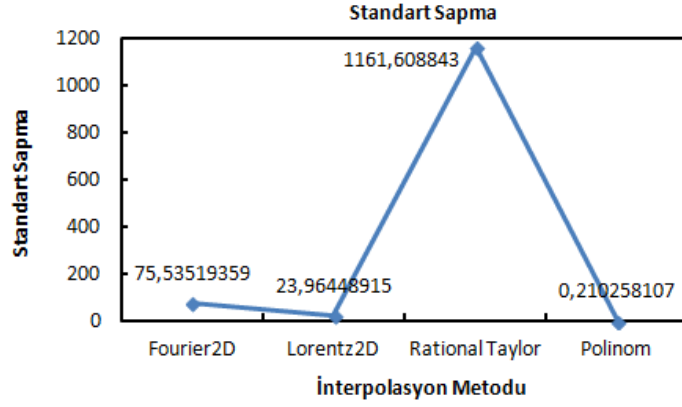
8.3.5.2. 60 mm İç Çapa Sahip Kalıpla Gerçekleştirilen Deformasyon İşlemine Ait İnterpolasyon Denklemleri

Şekil 8.16'da 4 farklı interpolasyon grafiği deneysel verilerin sonucunda oluşturulan korelasyon grafiğiyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

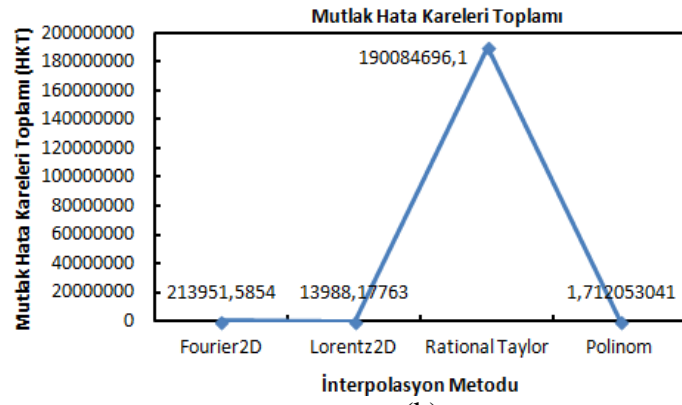


Şekil 8.16. 60 mm iç çapa sahip kalıba ait korelasyon grafikleri, a) Deneysel, b) Fourier 2D, c) Rational Taylor, d) Lorentz 2D, e) Polinom.

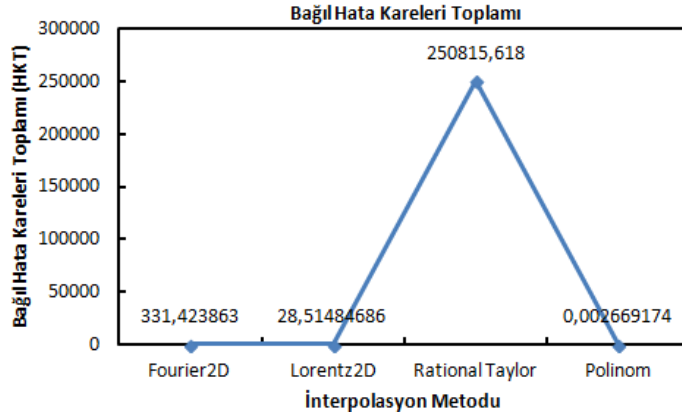
İnterpolasyon işlemleri değerlendirilirken standart sapma, mutlak hata kareler toplamı ve bağıl hata kareler toplamından faydalanılmıştır. Şekil 8.16, 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deformasyon işleminin sonucunda oluşturulan interpolasyon denklemlerinin standart sapma, bağıl ve mutlak hata kareleri toplamı grafiklerini göstermektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8.17. 60 mm iç çapa sahip kalıpla şekillendirilen numunelere ait interpolasyon hata ve sapma grafikleri, a) standart sapma, b) mutlak hata kareleri toplamı, c) bağıl hata kareleri toplamı.

Şekil 8.16'dan da görüldüğü gibi 4 farklı metoda göre gerçekleştirilen interpolasyon denklemlerinden standart sapma, mutlak hata kareleri toplamı, bağıl hata kareleri toplamı sıfıra en yakın olan denklem Polinom serisiyle oluşturulan korelasyon sonucu elde edilen interpolasyon denklemdir. 60 mm iç çapa sahip kalıpla

gerçekleştirilen deformasyon işlemi sonucu elde edilen şişme yüksekliği değerlerine en yakın şişme yüksekliği değerini veren en doğru interpolasyon Polinom metoduyla gerçekleştirilen interpolasyon olmuştur.

T deformasyon sıcaklığında, R_c kalıp köşe kavisiyle gerçekleştirilen deformasyon işlemi sonucunda h_d şişme yüksekliğinde meydana gelecek değişimi deneysel verilere en yakın değerlerle ifade eden Polinom interpolasyon denklemi;

$$h_d = 23,85 + -1,001 * R_c + -0,1139 * T + 0,04102 * R_c^2 + 0,01212 * R_c * T + 0,0006477 * T^2 + 0,000174 * R_c^3 + 0,00001464 * R_c^2 * T + -0,00005458 * R_c * T^2 \quad (8.2)$$

şeklindedir. Polinom, 3. Dereceden bir polinomdur.

Bu denklem vasıtasıyla 60 mm kalıp çapında, oda sıcaklığı ile 250 °C sıcaklık ve 7-20 mm kalıp kavisi aralığında herhangi bir parametreyle yapılan hidro şekillendirme işlemi neticesinde elde edilecek şişme yüksekliği hakkında deney yapmadan bir öngöründe bulunulabilecek, şişme yüksekliği tahmin edilebilecektir.

BÖLÜM 9

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. SONUÇLAR

Tez çalışmasının neticesinde AA7075 - T6 alüminyum alaşımlı sac malzemenin optimum hidro şekillendirme parametreleri hakkında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Tek eksenli çekme testlerine göre; AA7075 - T6 malzemenin oda sıcaklığında ve haddeye 45 derece açılı yönde daha iyi birim şekil değiştirme gösterdiği tespit edilmiştir.
2. Malzemenin hadde yönüne dik kesitte alınan sertlik değerleri hadde yönüne paralel kesitte alınan değerlerden daha yüksektir.
3. Deformasyon sıcaklığı ve kalıp köşe kavisi optimum seviyeye kadar arttırıldığında malzemenin şişme yüksekliği ve uzama miktarı (hidro şekillendirme testlerinden elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramına göre) artmış, kubbe kavisi azalmıştır. Ancak sıcaklık ve kalıp köşe kavisi değeri optimum seviyenin üzerine çıktığında malzemenin şişme yüksekliği ve birim şekil değiştirme miktarı tekrar azalmaya başlarken kubbe kavisi ise artmaya başlamıştır. Şişme yüksekliği açısından, büyük iç çapa sahip kalıplarda optimum kalıp köşe kavisi 7 mm iken küçük çaplarda bu değer 20 mm'ye ulaşmıştır. Her iki kalıp çapında da şişme yüksekliği ve hidro şekillendirme testlerinden elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme değerleri açısından optimum deformasyon sıcaklığı 140 °C olarak tespit edilmiştir.
4. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen şekillendirme sınır diyagramları değerlendirildiğinde ise sıcaklık arttıkça malzemenin şekillendirme sınırı artmıştır. Kalıp kavisi ise optimum seviyeye kadar arttırıldığında şekillendirme sınırı artarken, kavis değeri optimum değeri aştığında malzemenin şekillendirme limiti azalmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde

şekillendirme sınır diyagramları açısından optimum şekillendirme sıcaklığı 250 °C iken, büyük kalıp çapında optimum köşe kavis 7 mm, küçük kalıp çapında optimum kavis değeri 16 mm olarak tespit edilmiştir.

5. Mevcut koşullar altında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların neticesinde 7 mm kalıp köşe kavis ve 140 °C sıcaklık değeri AA7075 - T6 malzemenin optimum şekillendirme parametreleri olarak tespit edilmiştir.

9.2. ÖNERİLER

Gerçekleştirilen doktora tez çalışmasında; hidro şekillendirme işleminin sonuçları sadece deformasyon özellikleri açısından incelenmiş, deformasyon parametrelerinin malzemenin metalografik özelliklerine etkisi incelenmemiştir. Bundan sonraki gerçekleştirilecek çalışmalarda aşağıdaki çalışmaların yapılması önerilmektedir.

1. Hidro şekillendirilmiş numunelerin deformasyon sonrası sertlik ve tane boyutu ölçümleri yapılarak, bu deney parametrelerinin malzemenin metalografik özelliklerine etkileri vurgulanabilir.
2. Hidro şekillendirme ve tek eksenli çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM (Tarama elektron mikroskobu) incelemeleri yapılarak deformasyon parametrelerinin kırılma mekanizması üzerine etkileri incelenebilir.
3. AA7075-T6 malzemenin deformasyon öncesi, hidro şekillendirme işlemi sonrası ve tek eksenli çekme testi sonrasında meydana gelen çökelti ve bu çökelti parametrelere göre değişimi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Banabic, D., "Sheet Metal Forming Processes Constitutive Modelling and Numerical Simulation", *Springer Heidelberg Dordrecht*, New York, 142,145,147,156-162,175-177 (2010).
2. Williams, B. W., "A study of the axial crush response of hydroformed aluminum alloy tubes", Degree of Doctor of Philosophy, *University of Waterloo in Mechanical Engineering*, Waterloo, Canada, 1-10 (2007).
3. Kaya, S., "Improving the formability limits of lightweight metal alloy sheet using advanced processes - finite element modeling and experimental validation dissertation", Degree of Doctor of Philosophy, *The Ohio State University*, 18-27 (2008).
4. Jiang, S., "Formability models for warm sheet metal forming analysis", The Degree of Doctor Of Philosophy, *Oakland University*, Rochester, Michigan, 1-14 (2006).
5. Aoura, Y., Ollivier, D., Ambari, A. and Del Santo, P., "Determination of material parameters for 7475 Al alloy from bulge forming tests at constant stress", *Journal of Material Processing Technology*, 145: 352-359 (2004).
6. Yaşar, M., Kadı, İ. ve Evlen, H., "AA5754 sacının farklı sıcaklıklarda hidrolik akışkanla şekillendirilmesi", *6th International Advanced Technologies Symposium IATS'11*, Elazığ, 136-140 (2011).
7. Cavaliere, P. and Squillace, A., "High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminium alloy", *Materials Characterization*, 55: 136-142 (2005).
8. Tran, V.-X., Pan, J. and Pan, T., "Effects of processing time on strengths and failure modes of dissimilar spot friction welds between aluminium 5754-O and 7075-T6 sheets", *Journal Of Materials Processing Technology*, 209: 3724-3739 (2009).
9. Quan, G. Z., Liu, K. W., Zhou, J. and Chen, B., "Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19: 537-541 (2009).
10. Kandil, A., "An experimental study of hydroforming deep drawing", *Journal of Materials Processing Technology*, 134: 70-80 (2003).

11. Zhang, S. H., Zhou, L. H., Wang, Z. T. and Xu, Y., “Technology of sheet hydroforming with a movable female die”, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 43: 781-785 (2003).
12. Dutta, A., Charit, I., Johannes, L. B. and Mishra, R. S., “Deep cup forming by superplastic punch stretching of friction stir processed 7075 Al alloy”, *Materials Science Engineering A-Structural*, 395: 173–179 (2005).
13. Yenihayat, O. F., Mimaroglu, A. ve Unal, H., “Modelling and tracing the super plastic deformation process of 7075 aluminium alloy sheet: use of finite element technique”, *Materials and Design*, 26: 73–78 (2005).
14. Venkateswarlu, G., Davidson. M. J. and Tagore, G. R. N., “Influence of process parameters on the cup drawing of aluminium 7075 sheet”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2: 41-49 (2010).
15. Şahin, S., “Hidrolik şekillendirme yönteminin esasları ve sınıflandırılması”, *Mühendis ve Makine*, 45:35-39 (2004).
16. İnternet: Schuler Hydroforming, “Frame Parts”, http://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen_hydroforming_frame_parts/index.html (2013).
17. İnternet: Docstock, “Hydroforming”, <http://www.docstoc.com/docs/125070659/HydroForming> (2013).
18. Tschaetsch, H., “Metal Forming Practise Processes – Machines – Tools”, Translated by Anne Koth, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 100-178 (2006).
19. Çelikayar G., “Yüksek basınç altında metallerin şekillendirilmesi”, *III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 29-38 (2003).
20. Lin, J., Zhao, S. D., Zhang, Z. Y. and Wang, Z. W., “Deep drawing using a novel hidromechanical tooling”, *International journal of machine tools&manufacture*, 49: 73-80 (2009).
21. Karaağaç, İ. ve Özdemir, A., “Sıvı basıncı ile şekillendirme deney düzeneğinin tasarımı”, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu*, Bursa, (2009).
22. Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M. and Sterzing, A., “Sheet metal forming at elevated temperatures”, *Annals of the CIRP*, 55: 793-816 (2006).
23. Kleiner, M., Curbach, M., Tekkaya, A.E., Ritter, R., Speck, K. and Trompeter, M., “Development of ultra high performance concrete dies for sheet metal hydroforming”, *Production Engineering*, 2: 201–208 (2008).

24. Zhang, H., Lin, G. Y., Peng, D. S., Yang, L. B. and Lin, Q. Q., “Dynamic and static softening behaviors of aluminum alloys during multistage hot deformation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 148: 245-249 (2004)
25. Kayalı, E.S. ve Ensari, C., “Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, *İTÜ Kimya – Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi*, İstanbul, 389-401 (2000).
26. Chung, K., Lee, W., Kim, D., Kim, J., Chung, K. H., Kim, C., Okamoto, K. and Wagoner, R. H., “Macro-performance evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheets: Part I – Material properties”, *International Journal of Solids Structures*, 47: 1048–1062 (2010).
27. Takuda, H., Mori, K., Masachika, T., Yamazaki, E. and Watanabe, Y., “Finite element analysis of the formability of an austenitic stainless steel sheet in warm deep drawing”, *Journal of Materials Processing and Technology*, 143-144: 242-248 (2003).
28. Mahabunphachai, S. and Koç, M., “Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures”, *Materials & Design*, 31: 2422-2434 (2010).
29. Kaya, S., Altan, T., Groche, P. and Klo, C., “Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet at elevated temperatures using the hydraulic bulge test”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 550–557 (2008).
30. Chen, F. K., Huang, T. B. and Chang C. K., “Deep drawing of square cup with magnesium alloy az31 sheet”, *International Journal of Machine Tools&Manufacturing*, 43:1553-1559 (2003).
31. Lee, W., Chung, K. H., Kim, D., Kim, J., Kim, C., Okamoto K., Wagoner, R. H. and Chung, K., “Experimental and numerical study on formability of friction stir welded TWB sheets based on hemispherical dome stretch tests”, *International Journal of Plasticity*, 25: 1626-1654 (2009).
32. Keigler, M., Bauer, H., Harrison, D. and De Silva, A., “Enhancing the formability of aluminum components via temperature controlled hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 363–370 (2005).
33. He, Z., Yuan, S., Liu, G., Wu, J. and Cha, W. J. “Formability testing of AZ31B magnesium alloy tube at elevated temperature”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210: 877-884 (2010).
34. Wang, X., Brünger, E. and Gottstein, G., “The role of twinning during dynamic recrystallization in alloy 800H”, *Scripta Materialia*, 46: 875-880 (2002).

35. Demirci, H. İ. ve Evlen, H., “Effect of extrusion ratio on the wear behaviour of Al–Si and Al–Mg alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 510: 26-32 (2012).
36. Lee, M. Y., Sohn, M. S., Kang, C. Y., Suh, D. W. and Lee, S. Y., “Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156: 1337-1343 (2004).
37. Wang, H., Luo, Y. B., Friedman, P., Chen, M. H. and Gao, L., “Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075”, *Transaction Nonferrous Metal Soceity China*, 22: 1-7 (2012).
38. Kim, S. B., Huh, H., Bok, H. H. and Moon M. B., “Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, 211: 851-862 (2011).
39. Daehn, G. S., Vohnout, V. J. and DuBois, L., “Improved formability with electromagnetic forming fundamentals and a practical example”, *Sheet Metal Forming Technology*, 105-115 (1999).
40. Parsa, M. H. and Darbandi P. “Experimental and numerical analyses of sheet hydroforming process for production of an automobile body part”; *Journal Of Materials Processing Technology*, 198: 381–390 (2008).
41. Kim, H. S., Koç, M. and Ni, J., “Development of an analytical model for warm deep drawing of aluminum alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 197: 393-407 (2008).
42. Karalı, M., ”Silindirik kapların derin çekilmesinde farklı baskı plakası kuvvetlerinin ve uygulama yöntemlerinin kulaklaşmaya olan etkilerinin incelenmesi”, *Trakya University Journal of Science*, 9: 41-46 (2008).
43. Esner, C., “AA 5754 malzemesinde derin çekme işleminde baskı plakasının etkisinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-20 (2006).
44. Manebe, K., Koyama, H., Yoshihara, S., and Yagami, T., “Development of a combination punch speed and blank-holder fuzzy control system for the deep-drawing process”, *Journal of Materials Processing Tecnology*, 125-126: 440-445 (2002).
45. Nantu, S. ve Uncu, E. A., “Alüminyum sacların hidroforming yöntemi ile ılık şekillendirilmesi” , Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Metal Eğitimi Anabilim Dalı*, Karabük, 1-30 (2010).
46. Skillingberg, M. and Green, J., “Aluminum applications in the rail industry”, *Light Metal Age*, October: 1-5 (2007).

47. Bucci, R. J. Warren, C. J. and Starke Jr., E. A., “Need for new materials in aging aircraft structures”, *Journal of Aircraft*, 37: 122-129 (2000).
48. Tajally, M. and Emadoddin, E., “Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets”, *Materials & Design*, 32: 1594–1599 (2011).
49. Mori, K., Nishijima, S. and Tan, C. J., “Two-stage cold stamping of magnesium alloy cups having small corner radius”, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 49: 767–772 (2009).
50. Dariani, B. M. and Azodi, H. D., “Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram”, *Journal of Engineering Manufacture*, 217 (B): 1677-1683 (2003).
51. Önder, E. and Tekkaya, A. E., “Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 532-542 (2008).
52. Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K. B. and Zhou, X., “Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by around die based on an innovative hydromechanical deep drawing method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167: 191–200 (2005).
53. Thiruvardhelvan, S. and Lewis, W., “A note on hydroforming with constant fluid pressure”, *Journal of Materials Processing Technology*, 88: 51–56 (1999).
54. Dachang, K., Yu, C. and Yongchao, X., “Hydromechanical deep drawing of superalloy cups”, *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 243–246 (2005).
55. Erhuy, C. G., Yurci, M. E. and Altan, T., “Determining the effective stress – effective strain curve of a high-strength low-alloy steel sheet from the viscous Pressure bulge test”, *Journal of Engineering and Natural Sciences, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma*, 26: 281-300 (2009).
56. Koç, M., Billur, E. and Cora, Ö. N., “An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods”, *Materials & Design*, 32: 272-281 (2011).
57. Gutscher, G., Wu, H. C., Ngaile, G. and Altan, T., “Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test”, *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 1-7 (2004).
58. Hill, R., “The Mathematical Theory of Plasticity”, *Oxford University Press*, Oxford, 57-100 (1950).
59. İnternet: Düzenli İş Güvenliği ve Madeni Yağlar, “Hidroteks DTA 10”, www.duzenli.com.tr/index.php/urunguruplari (2010).

60. Kadı, İ., Yaşar, M. and Evlen, H., “Inox çelik sacların şekillendirilebilirliğinin incelenmesi”, *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, Türkiye, 1021-1025 (2012).
61. Evlen, H., Kadı, İ. and Evlen, B., “Investigation of formability of st22 steel sheet”, *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, Türkiye, 1032-1039 (2012).
62. Güneş, A. T., “Pres İşleri Tekniği Cilt 2”, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, 27, 28 (2002).
63. İnternet: Shell Madeni Yağ ve Gresleri, “Isı Transfer Sistemi Yağları”, <http://www.lsf.com.tr/urunpdf/ThermiaB.pdf> (2013).
64. İnternet: İzoreel Kompozit İzole Malzemeler, “Mühendislik Levhaları, Epoksi Levhalar”, www.izoreel.com.tr/tr/muhendislik-levhalari.html (2013).
65. Kethudaoğlu, A. ve Şen, B., “Sayısal kalem (digital pen) ile gerçekleştirilen çizimlerde giriş verisindeki hataların azaltılması”, *Akademik Bilişim’12 - XIV. Akademik Bilişim Konferansı*, Uşak, Türkiye, 253-259 (2012).
66. Chapra, S. C. and Canale, R. P., “Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler 4th ed.”, Çeviri Editörleri: Heperkan, H. ve Kesgin, U., *Literatür Yayınları*, İstanbul, 54-102 (2008).
67. Timur, M. Ve Kılıç, H., “Mermer atıkları kullanılarak üretilen otomotiv fren balatasının sürtünme katsayısının farklı fren balataları ile karşılaştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19: 10-14 (2013).
68. Goodarzi, M., Kuboki, T. and Murata, M., “Effect of die corner radius on the formability and dimensional accuracy of tube shear bending”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35: 66–74 (2007).
69. Dejmal, I., Tirosh J., Shirizy, A. and Rubinaky, L., “On the optimal die curvature in deep drawing processes”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44: 1245-1258 (2002).
70. Rao, K. P. and Prasad, Y. V. R. K., “Design and simulation of laboratory scale back ward extrusion process for magnesium alloys”, *24th AIMTDR Conference*, Vizag, India, 1: 17-22 (2010).
71. Rao, B. V. S., Reddy, P. V. R. R., Reddy, G. C. M. and Rao, G. K. M., “Optimization of blank holding force in deep drawing of cylindrical cups using taguchi approach”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2: 143-148 (2012).
72. Harped, E. T., Worswick, M. J., Finn, M., Jain, M. and Martin, P., “Numerical prediction of the limiting drawing ratio for alloy sheet”, *Journal of Materials Processing Technology*, 100: 131-141 (2000).

73. Kleiner, M., Geiger, M. and Klaus, A., "Manufacturing of lightweight components by metal forming", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52: 521-542 (2003).
74. Cavaliere, P., "Hot and warm forming of 2618 aluminium alloy", *Journal of Light Metals*, 2: 247-252 (2002).
75. Liu, G., Tang, Z. J., He, Z. B. and Yuan, S. J., "Warm hydroforming of magnesium alloy tube with large expansion ratio", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 2071-2075 (2010).
76. Lin, Y. L., He, Z. B., Yuan, S. J., Wu, J., "Formability determination of AZ31B tube for IHPF process at elevated temperature", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21: 851-856 (2011).
77. Chen, F. K., Wang, S. J. and Lin, R. H., "A study of forming pressure in the tube-hydroforming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 404-409 (2007).

EK AÇIKLAMALAR A.

GRİD ÖLÇÜM SONUÇLARI

Çizelge EK A.1. Pot baskı kuvveti tespiti deneyleri neticesinde ölçülen grid boyutları

1p50 (200KN)				1p70 (280KN)				1p80 (320KN)				1p100 (400KN)				1p150 (600KN)			
d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂
2,1	2	0,05	0	2,4	1,7	0,2	-0,15	2	1,5	0	-0,25	2,3	2	0,15	0	2,1	2	0,05	0
2,1	2	0,05	0	2,5	1,7	0,25	-0,15	2,1	1,8	0,05	-0,1	2,2	1,8	0,1	-0,1	2,1	2	0,05	0
2,1	2	0,05	0	2,4	1,8	0,2	-0,1	2,3	1,8	0,15	-0,1	2,2	1,8	0,1	-0,1	2,1	2,1	0,05	0,05
2	1,9	0	-0,05	2,4	2	0,2	0	2,3	1,8	0,15	-0,1	2,1	1,9	0,05	-0,05	2,1	2,1	0,05	0,05
2,1	2	0,05	0	2,2	1,9	0,1	-0,05	2,3	1,8	0,15	-0,1	2,1	1,9	0,05	-0,05	2,1	2,1	0,05	0,05
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2	0,1	0	2,3	1,8	0,15	-0,1	2,1	2	0,05	0	2,1	2	0,05	0
2,1	2	0,05	0	2,2	2	0,1	0	2,2	1,8	0,1	-0,1	2	2	0	0	2,1	2	0,05	0
2,1	2	0,05	0	2,2	1,9	0,1	-0,05	2,2	1,9	0,1	-0,05	2	1,9	0	-0,05	2,1	2	0,05	0
2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05	2,2	1,9	0,1	-0,05	2	1,9	0	-0,05	2	1,9	0	-0,05
2,1	2	0,05	0	2,1	2	0,05	0	2,1	1,9	0,05	-0,05	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2	1,9	0	-0,05	2,1	2	0,05	0	2,1	1,9	0,05	-0,05	2	1,9	0	-0,05	2	1,9	0	-0,05
2,1	2	0,05	0	2,1	2	0,05	0	2,1	1,9	0,05	-0,05	2	1,9	0	-0,05	2	1,9	0	-0,05
2	1,9	0	-0,05	2,1	1,9	0,05	-0,05	2	1,9	0	-0,05	2	2,1	0	0,05	2	1,9	0	-0,05
2,1	2	0,05	0	2	1,9	0	-0,05	2	1,8	0	-0,1	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2	2	0	0	1,9	1,8	-0,05	-0,1	2,1	1,8	0,05	-0,1	2,1	2	0,05	0	2	1,9	0	-0,05
2,1	2	0,05	0	2	1,8	0	-0,1	2,1	1,8	0,05	-0,1	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2	2	0	0	2	1,8	0	-0,1	2,1	1,8	0,05	-0,1	2,1	1,9	0,05	-0,05	2	1,9	0	-0,05
2,1	1,9	0,05	-0,05					2,1	1,9	0,05	-0,05	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2,1	1,9	0,05	-0,05					2,1	1,9	0,05	-0,05	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2,1	1,9	0,05	-0,05					2,1	1,9	0,05	-0,05	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2	1,9	0	-0,05					2,1	1,9	0,05	-0,05	2	2	0	0	2	1,9	0	-0,05
2	1,9	0	-0,05									2	1,9	0	-0,05				
2	1,9	0	-0,05									2	1,9	0	-0,05				
2,2	1,8	0,1	-0,1									2	1,9	0	-0,05				
2,2	1,8	0,1	-0,1																
2,1	1,8	0,05	-0,1																
2,1	1,8	0,05	-0,1																

Çizelge EK A.2. İlk şekillendirme sıcaklığı tespiti deneyleri neticesinde ölçülen grid boyutları

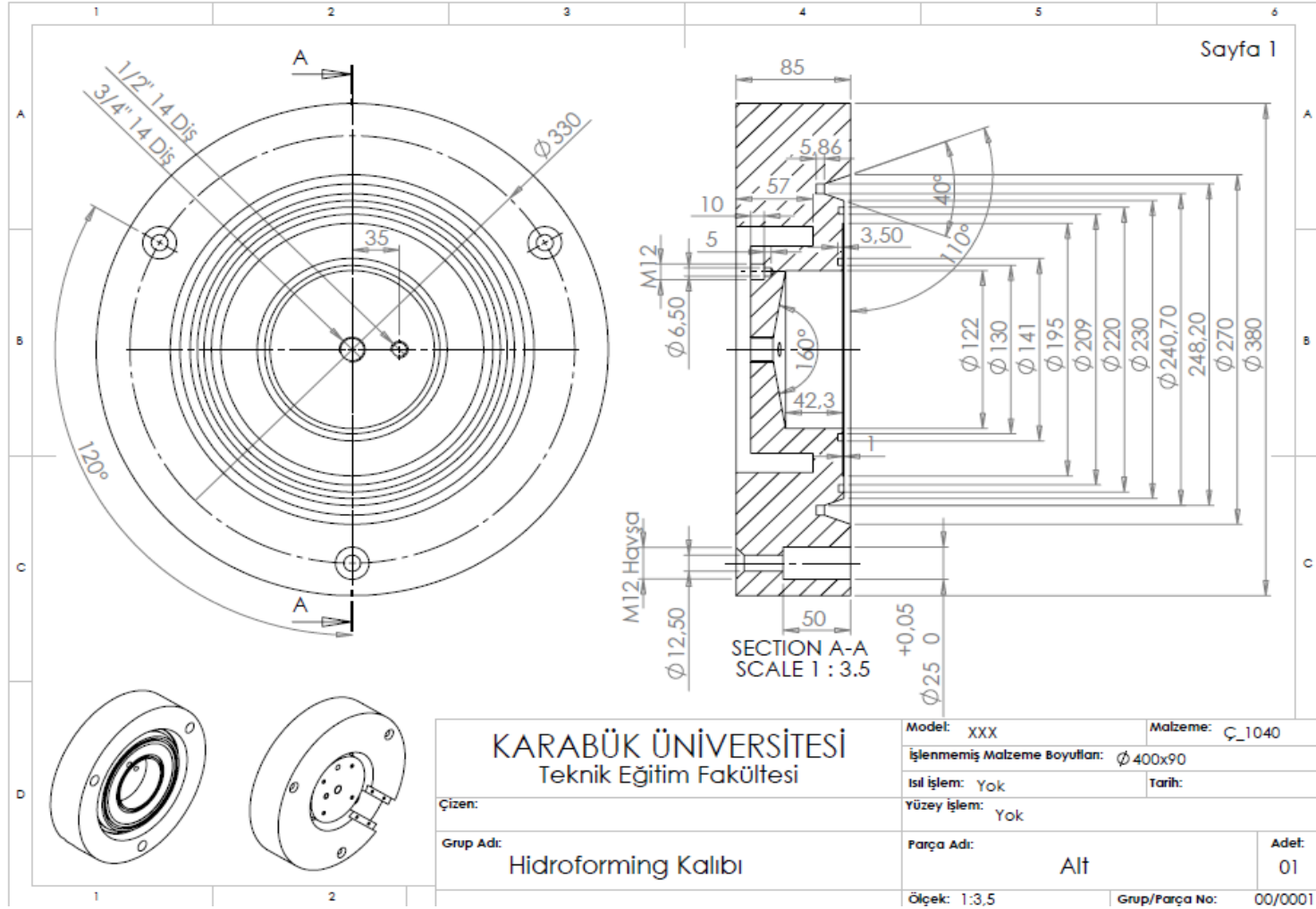
60°C				80°C				100°C				120°C				140°C				160°C			
d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂
2,1	2,2	0,05	0	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,5	0,25	0,25	2,63	2,5	0,3166	0,25	2,5	2,5	0,25	0,25
2,1	2,2	0,05	0	2,4	2,3	0,2	0,15	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,5	0,25	0,25	2,53	2,5	0,2666	0,25	2,5	4,5	0,25	0,25
2,1	2,2	0,05	0	2,5	2,4	0,25	0,2	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,4	0,25	0,2	2,5	2,4	0,2666	0,2333	2,55	2,4	0,275	0,2
2,1	2,1	0,05	0,05	2,4	2,3	0,2	0,15	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,4	0,25	0,2	2,46	2,4	0,2333	0,2	2,5	2,35	0,25	0,175
2,1	2,1	0,05	0,05	2,4	2,2	0,2	0,1	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,5	0,25	0,25	2,46	2,3	0,2666	0,3333	2,4	2,35	0,2	0,175
2,1	2,1	0,05	0,05	2,3	2,2	0,15	0,1	2,5	2,5	0,25	0,25	2,5	2,3	0,25	0,15	2,43	2,3	0,2333	0,1666	2,45	2,3	0,25	0,15
2,1	2,2	0,05	0	2,2	2,2	0,1	0,1	2,4	2,4	0,2	0,2	2,5	2,3	0,25	0,15	2,43	2,3	0,2666	0,15	2,35	2,3	0,175	0,15
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,2	0,1	0,1	2,4	2,4	0,2	0,2	2,5	2,3	0,25	0,15	2,36	2,3	0,2333	0,1666	2,3	2,25	0,15	0,125
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,1	0,1	0,05	2,4	2,4	0,2	0,2	2,4	2,2	0,2	0,1	2,3	2,3	0,2333	0,15	2,3	2,25	0,15	0,125
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,1	0,1	0,05	2,2	2,3	0,15	0,15	2,3	2,1	0,15	0,05	2,26	2,1	0,2333	0,1666	2,15	2,1	0,075	0,05
2,2	2,1	0,05	0,05	2,1	2,1	0,05	0,05	2,3	2,3	0,15	0,15	2,2	2,1	0,1	0,05	2,23	2,1	0,2666	0,1666	2,15	2,1	0,075	0,05
2,1	2,1	0,05	0,05	2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,2	0,1	0,1	2,1	2,1	0,05	0,05	2,33	2,1	0,2666	0,1666	2,15	2,15	0,075	0,075
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,1	0,05	0,05	2,3	2,2	0,15	0,1	2,3	2,1	0,15	0,05	2,26	2,1	0,2333	0,1666	2,1	2,05	0,05	0,025
2,2	2,2	0,05	0,05	2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,1	0,1	0,05	2,1	2,2	0,05	0,05	2,2	2,0	0,2666	0,1333	2,15	2,05	0,075	0,025
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	2,2	0,1	0,0	2,2	2,2	0,1	0,1	2,2	2,2	0,0	0,0	2,2	2,1	0,2333	0,1666	2	1,95	0,0	0,025
2,1	2,1	0,05	0,05	2,2	1,8	0,1	0,1	2,2	2,2	0,1	0,1	2,2	2,2	0,0	0,0	2,1	1,9	0,2666	0,05	2	1,85	0,0	0,075
2,2	2,2	0,05	0,05	2,3	1,8	0,15	0,1	2,2	2,2	0,1	0,0	2,2	2,2	0,0	0,0	2	1,8	0,2666	0,0667	2	1,9	0,0	0,05
2,2	2,2	0,05	0,05	2,2	2,2	0,1	0,0	2,2	2,2	0,1	0,0	2,2	2,2	0,0	0,0	2,06	1,8	0,2666	0,3333	2	1,9	0,0	0,0
2,2	2,2	0,05	0,05	2,2	2,2	0,0	0,0	2,1	2,2	0,05	0,0	2,2	2,2	0,0	0,0	2,03	1,8	0,2666	0,1666	2	1,8	0,0	0,0

Çizelge EK A.3. Sıcak şekillendirme sıcaklığı tespiti deneyleri neticesinde ölçülen grid boyutları

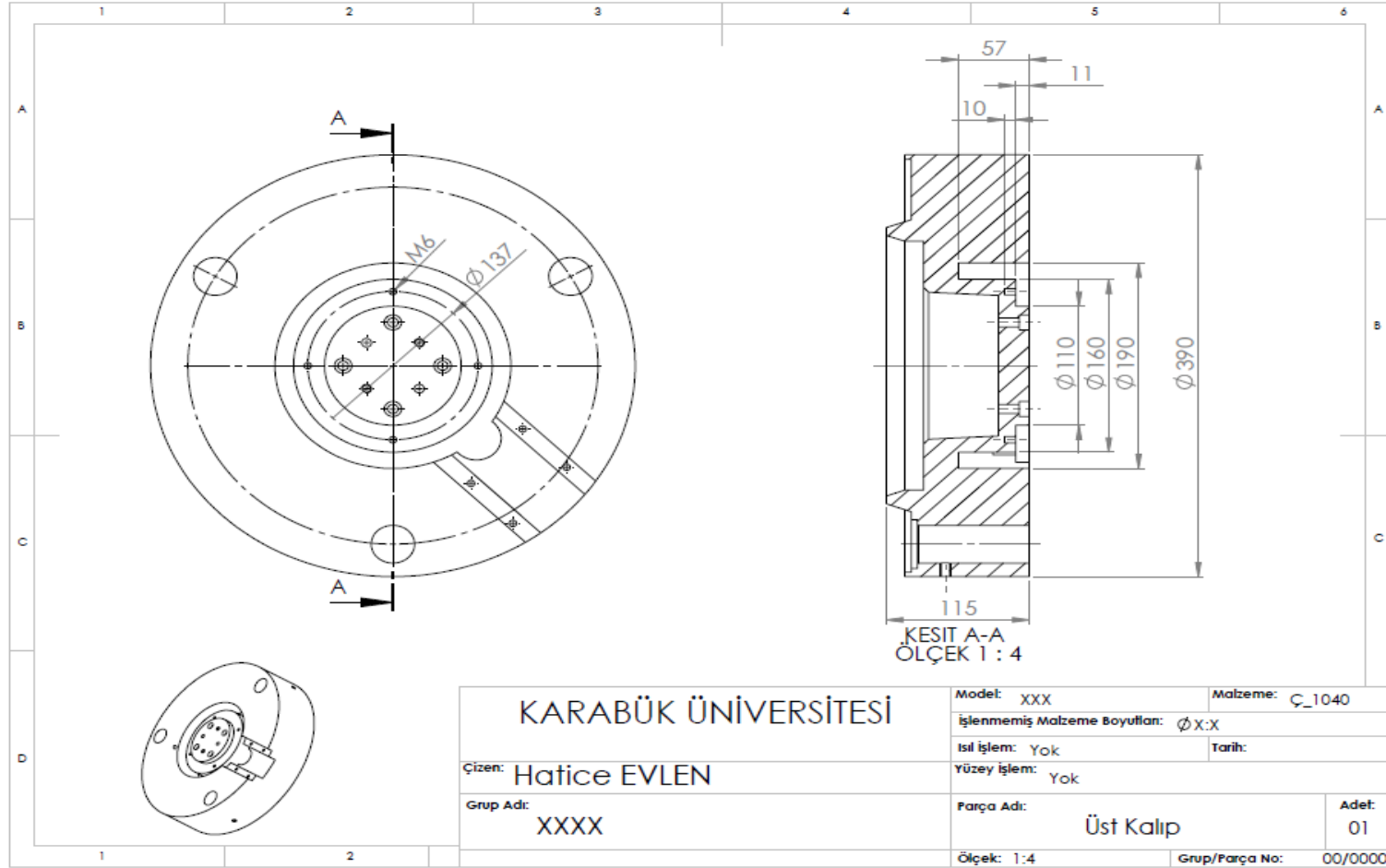
180°C				200°C				220°C				250°C			
d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂	d ₁	d ₂	ε ₁	ε ₂
2,9	2,6	0,45	0,3	2,8	2,5	0,4	0,25	2,55	2,5	0,275	0,25	3	2,8667	0,5	0,4333
2,9	2,6	0,45	0,3	2,8	2,3	0,4	0,15	2,5	2,45	0,25	0,225	2,933333	2,833333	0,466667	0,416667
2,7	2,5	0,35	0,25	2,7	2,3	0,35	0,15	2,6	2,4	0,3	0,2	2,966667	2,833333	0,483333	0,416667
2,6	2,6	0,3	0,3	2,5	2,3	0,25	0,15	2,55	2,4	0,275	0,2	2,966667	2,766667	0,483333	0,383333
2,5	2,6	0,25	0,3	2,5	2,3	0,25	0,15	2,5	2,4	0,25	0,2	2,866667	2,666667	0,433333	0,333333
2,4	2,5	0,2	0,25	2,5	2,2	0,25	0,1	2,4	2,35	0,2	0,175	2,8	2,6	0,4	0,3
2,4	2,5	0,2	0,25	2,4	2,1	0,2	0,05	2,4	2,4	0,2	0,2	2,6	2,466667	0,3	0,233333
2,4	2,5	0,2	0,25	2,3	2,2	0,15	0,1	2,4	2,3	0,2	0,15	2,6	2,433333	0,3	0,216667
2,4	2,6	0,2	0,3	2,3	2,2	0,15	0,1	2,3	2,3	0,15	0,15	2,433333	2,3	0,216667	0,15
2,3	2,4	0,15	0,2	2,3	2,2	0,15	0,1	2,3	2,2	0,15	0,1	2,4	2,266667	0,2	0,133333
2,6	2,4	0,3	0,2	2,3	2,1	0,15	0,05	2,25	2,3	0,125	0,15	2,366667	2,233333	0,183333	0,116667
2,3	2,4	0,15	0,2	2,2	2,3	0,1	0,15	2,3	2,25	0,15	0,125	2,366667	2,233333	0,183333	0,116667
2,3	2,4	0,15	0,2	2,2	2,2	0,1	0,1	2,2	2,2	0,1	0,1	2,266667	2,133333	0,133333	0,0667
2,3	2,3	0,15	0,15	2,1	2,2	0,05	0,1	2,15	2,15	0,075	0,075	2,266667	2,1	0,133333	0,05
2,2	2,3	0,1	0,15	2,1	2	0,05	0	2,1	2,05	0,05	0,025	2,2	2,066667	0,1	0,0333
2,2	2,3	0,1	0,15	2	2,2	0	0,1	2,05	2,05	0,025	0,025	2,133333	2,1	0,066667	0,05
2,2	2,3	0,1	0,15	2	2	0	0	2,05	2,05	0,025	0,025	2	1,966667	0	-0,0167
2,1	2,2	0,05	0,1	2	2	0	0					2	1,966667	0	-0,0167
2	2	0	0	2	2	0	0					2	1,966667	0	-0,0167
2	2,1	0	0,05	2	2	0	0					1,966667	1,966667	-0,01667	-0,01667
2	2	0	0									1,933333	1,966667	-0,03333	-0,01667
2	2	0	0									1,8	1,9	-0,1	-0,05

EK AÇIKLAMALAR B.

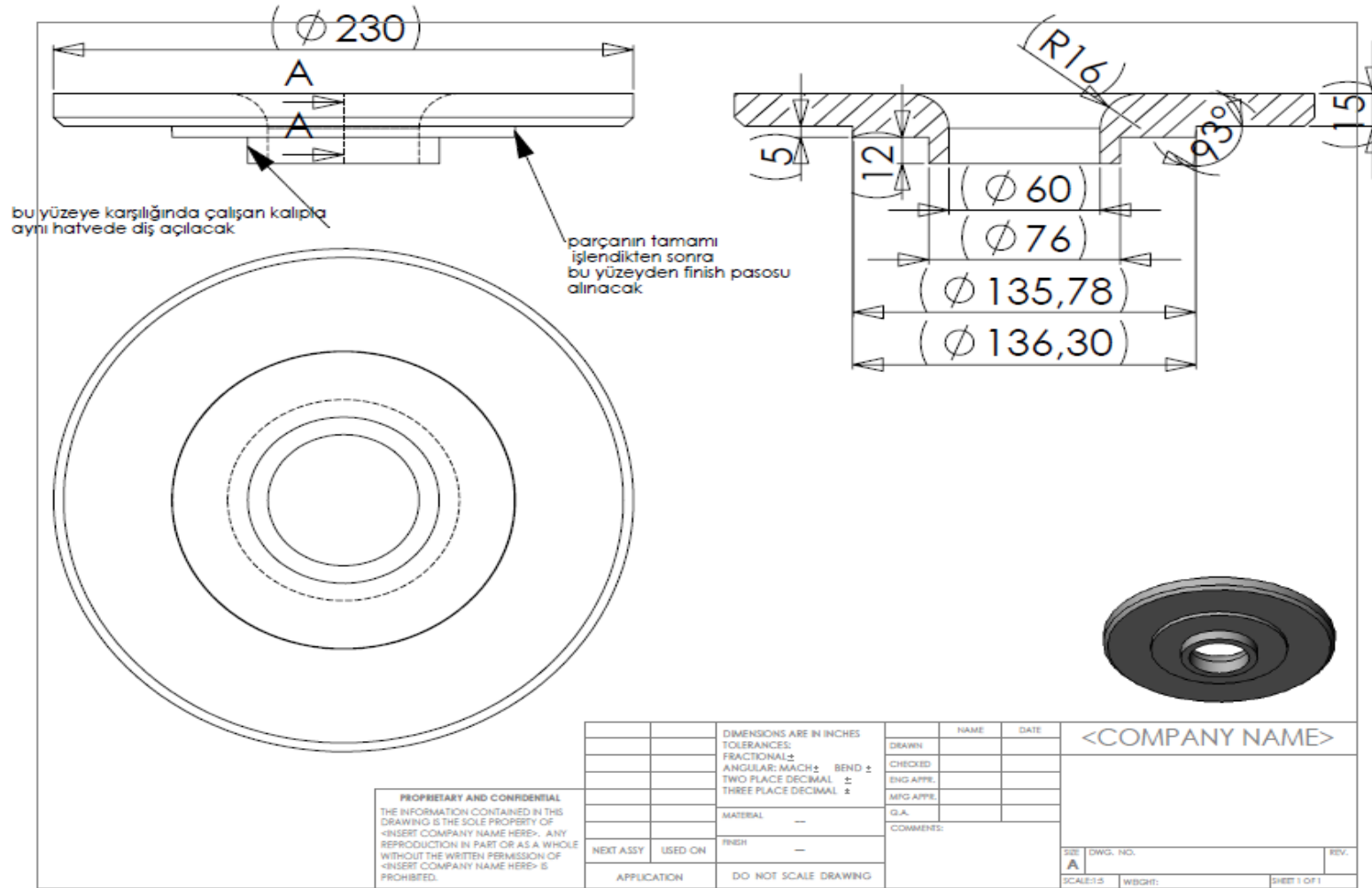
TEKNİK RESİMLER



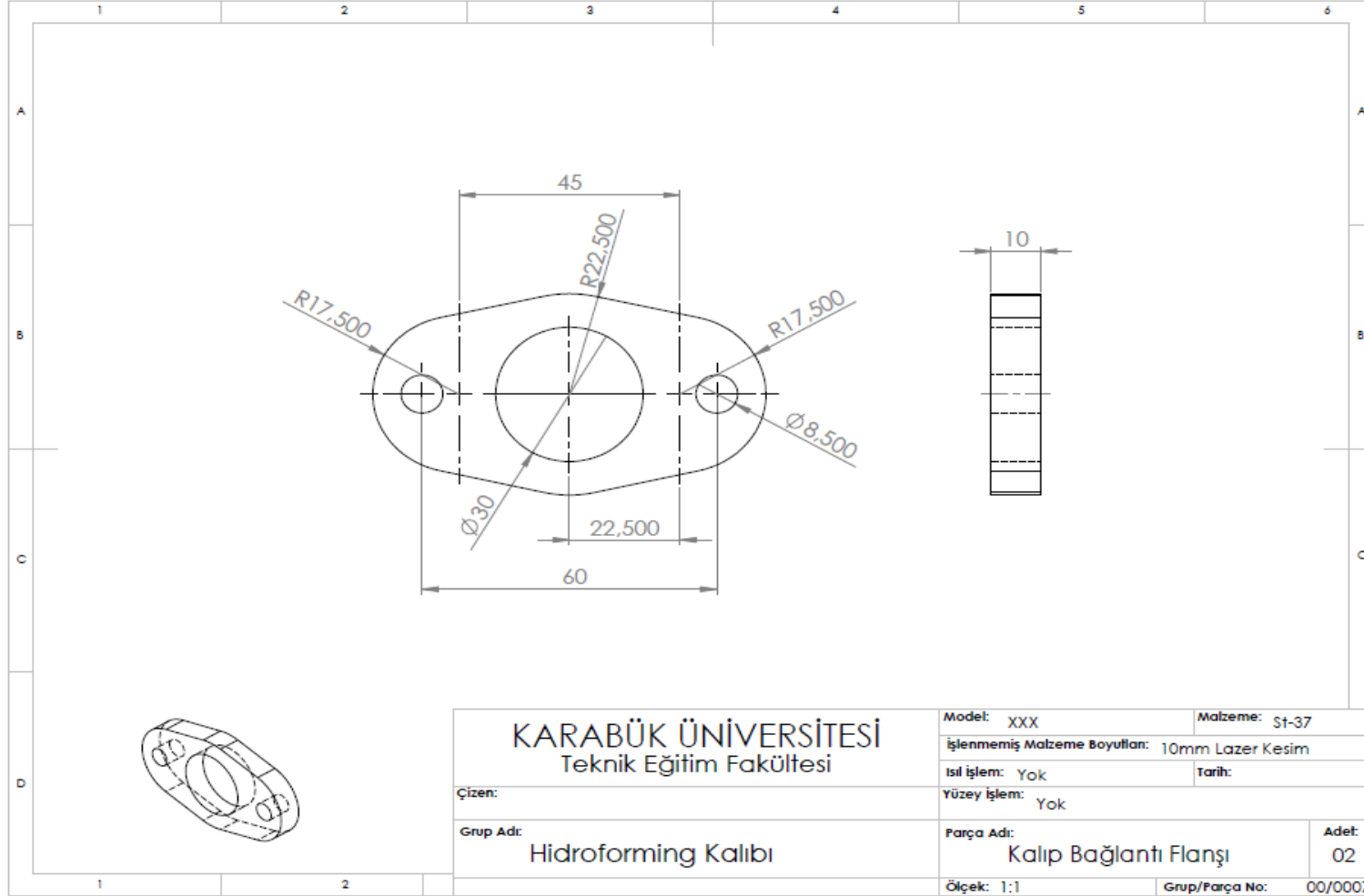
Şekil EK B.1. Kalıp alt yarımı.



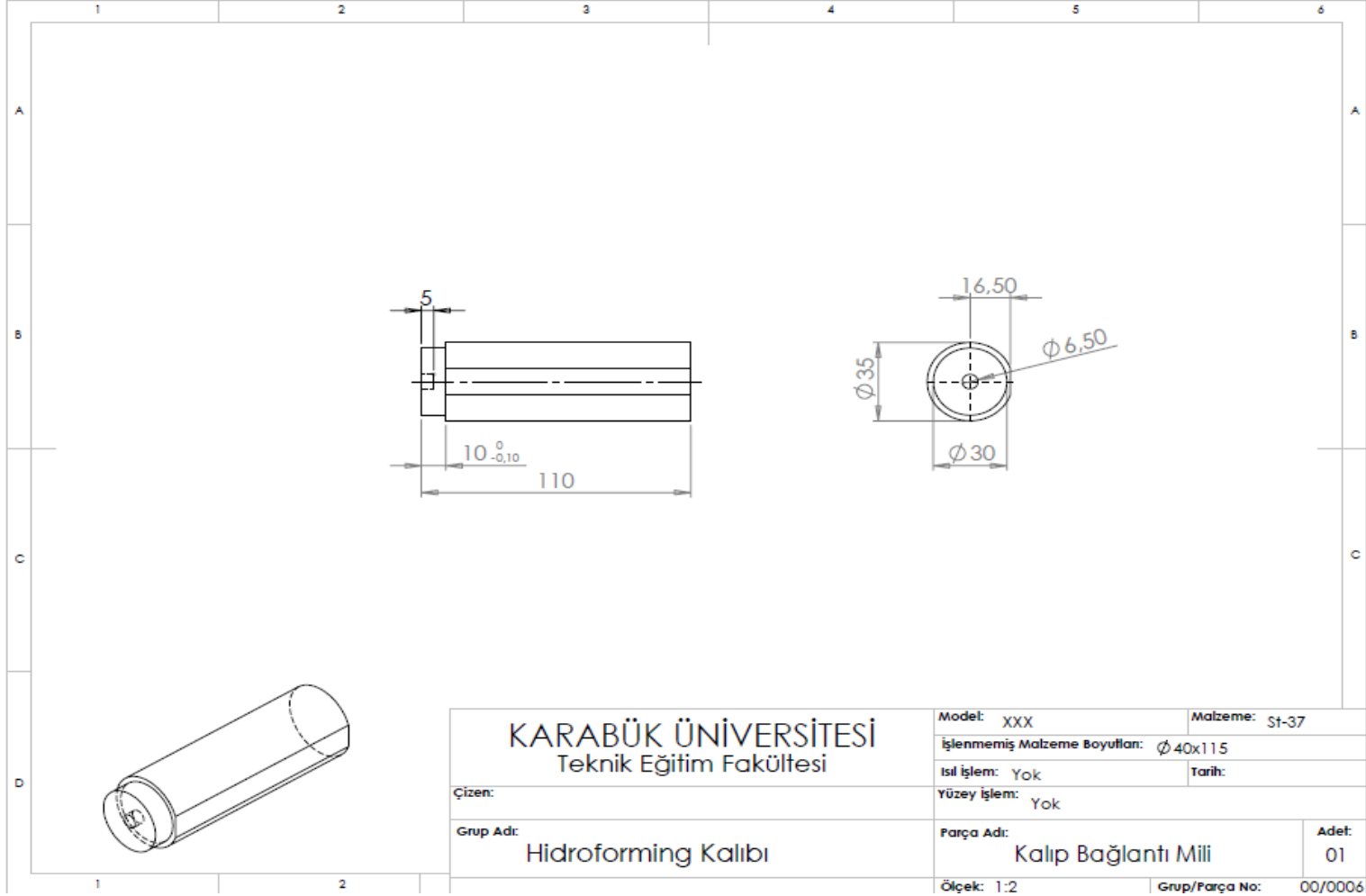
Şekil EK B.2. Üst kalıp yarımı.



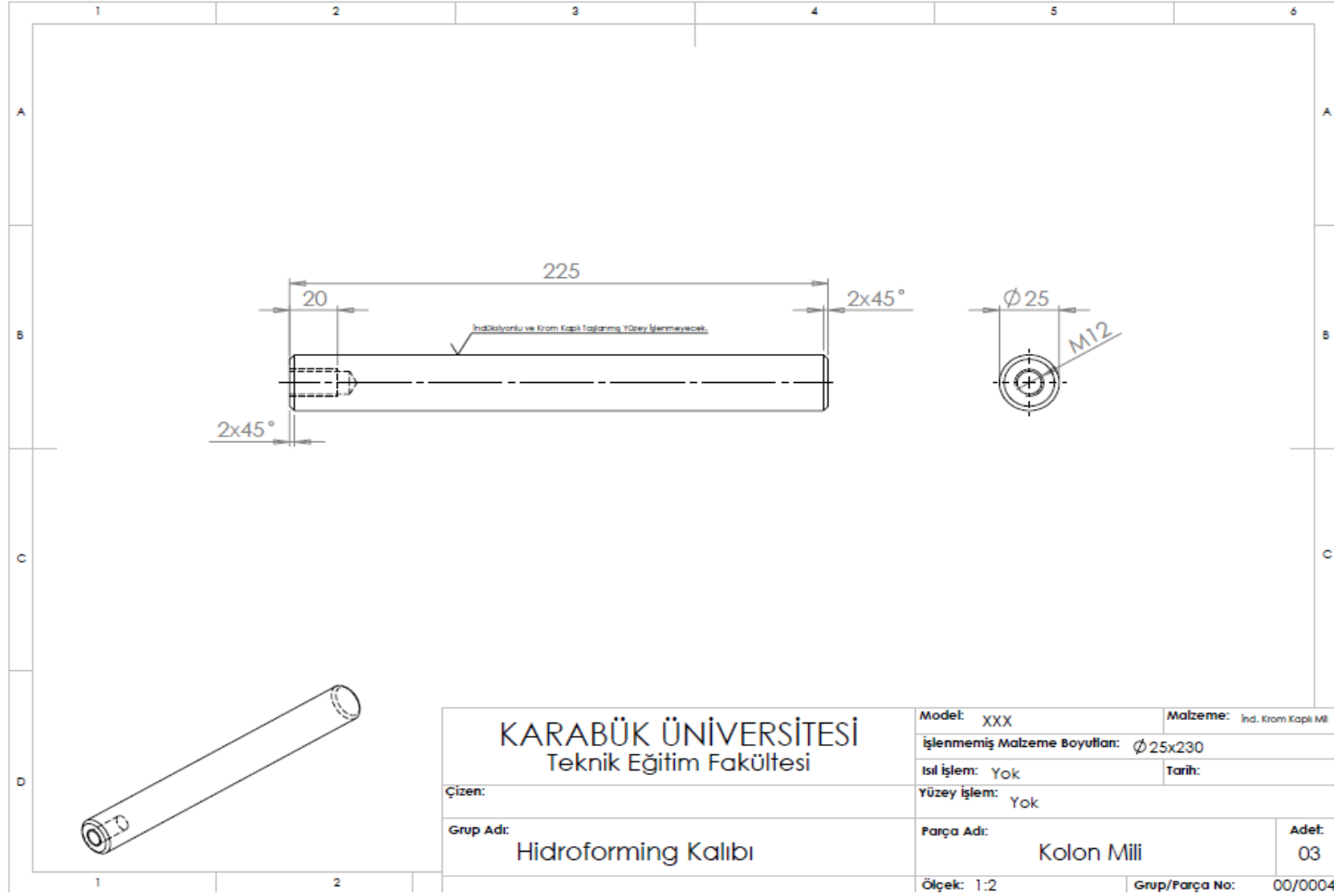
Şekil EK B.3. İç kalıp teknik resmi.



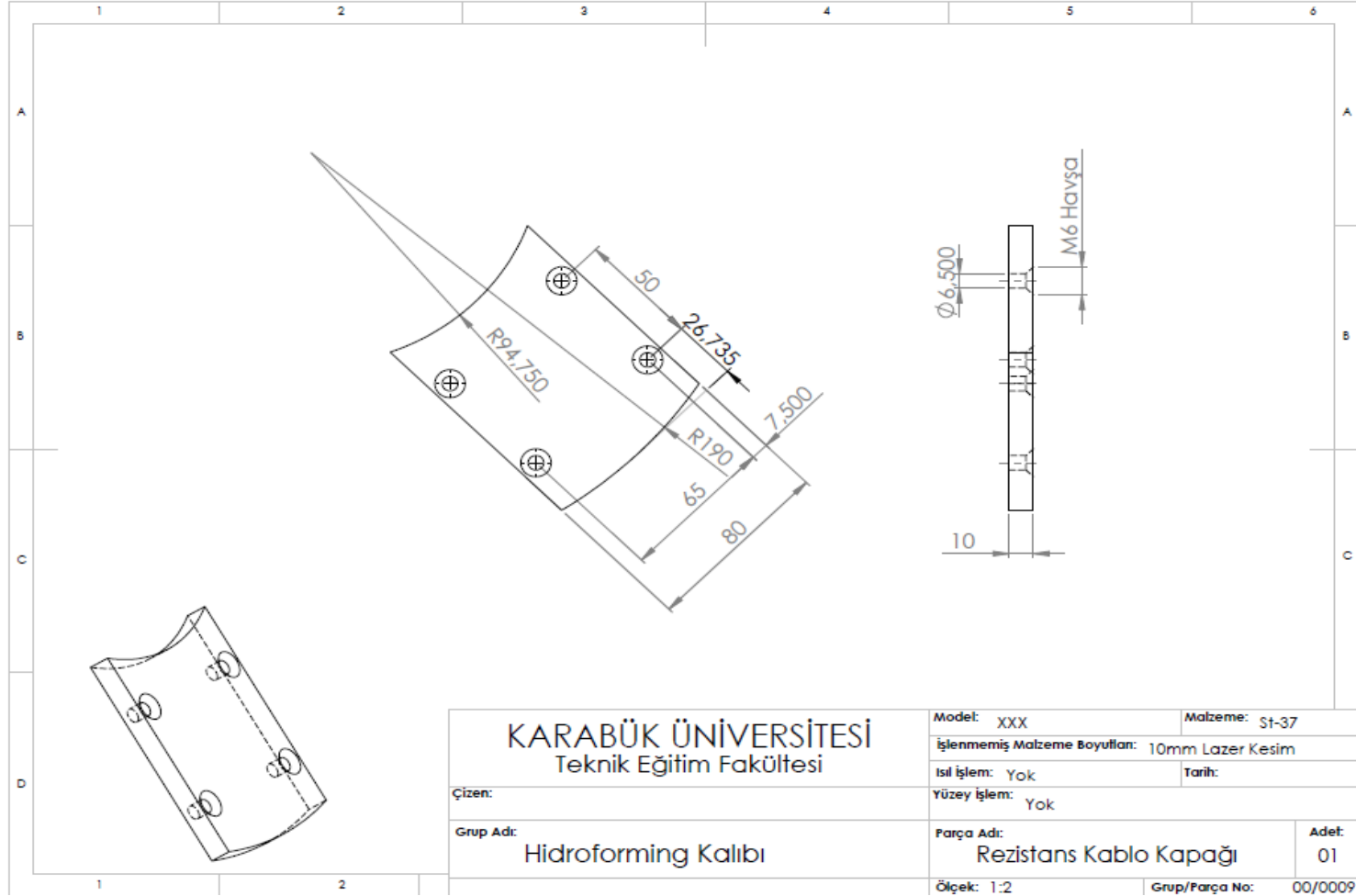
Şekil EK B.4. Kalıp –pres bağlantı flanşı.



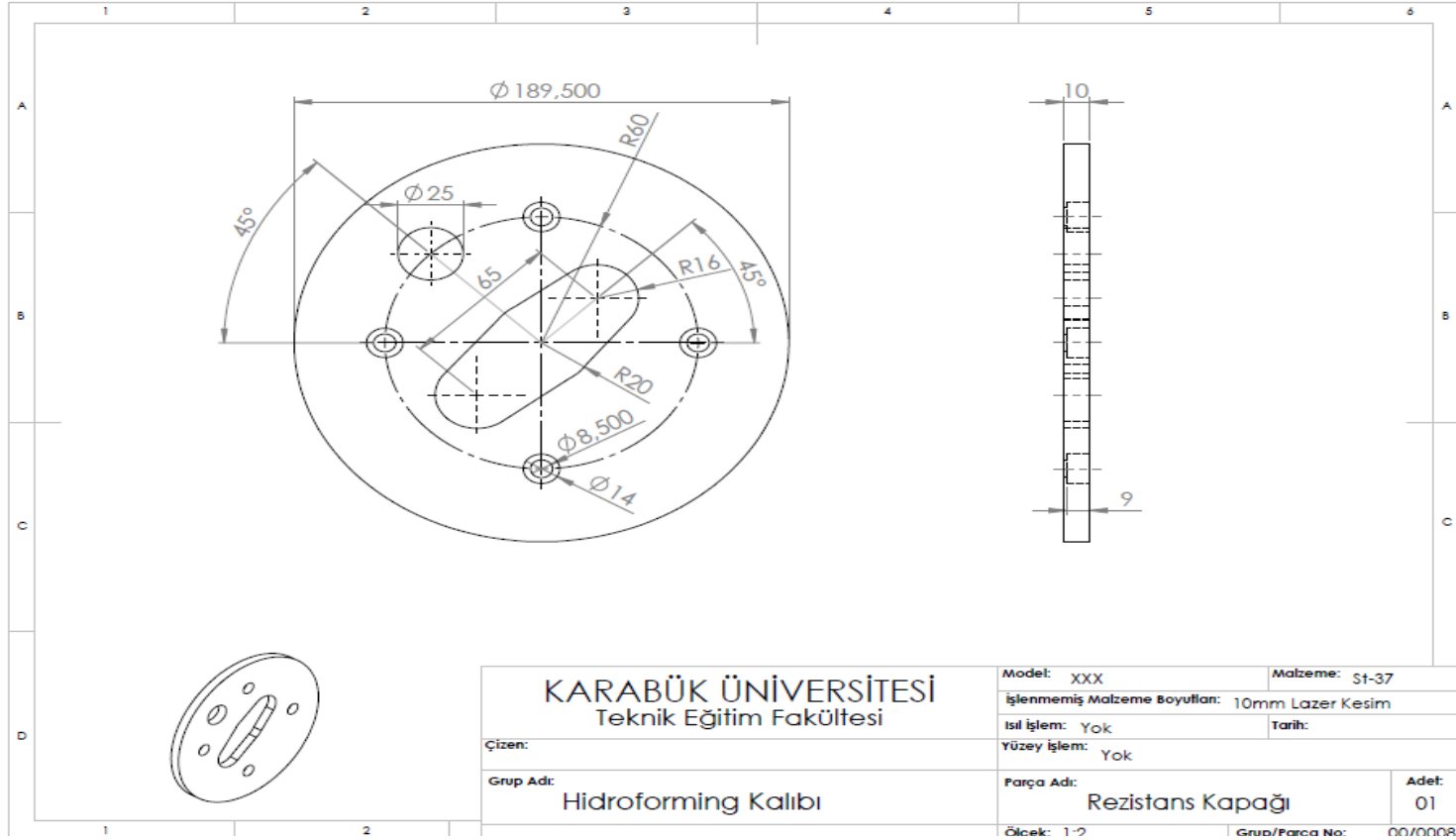
Şekil EK B.5. Kalıp bağlantı mili.



Şekil EK B.6. Kolon mili.



Şekil EK B.7. Rezistans kablo kapağı.



Şekil EK B.8. Rezistans kapağı.

EK AÇIKLAMALAR C.

NUMUNE FOTOĞRAFLARI



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil EK C.1. 102 mm iç çapa sahip kalıpla oda sıcaklığında şekillendirilmiş numuneler a) r7 mm, b) r10 mm, c) r16 mm, d) r20 mm.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil EK C.2. 102 mm iç çapa sahip kalıpla 140 °C sıcaklıkta şekillendirilmiş numuneler a) r7 mm, b) r10 mm, c) r16 mm, d) r20 mm.



(a)



(b)



(c)

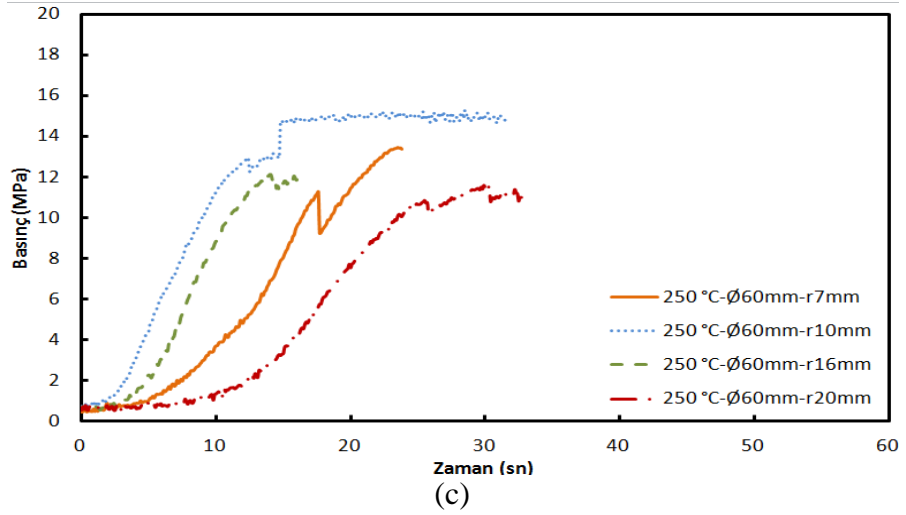
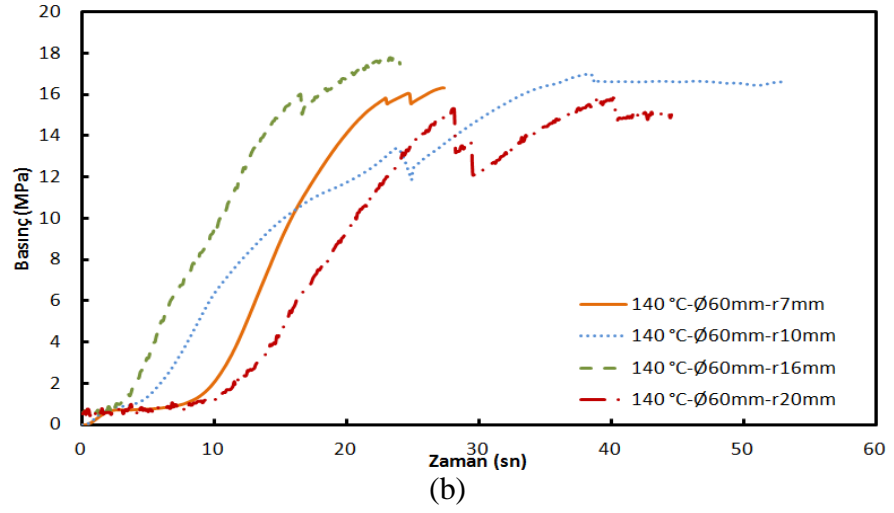
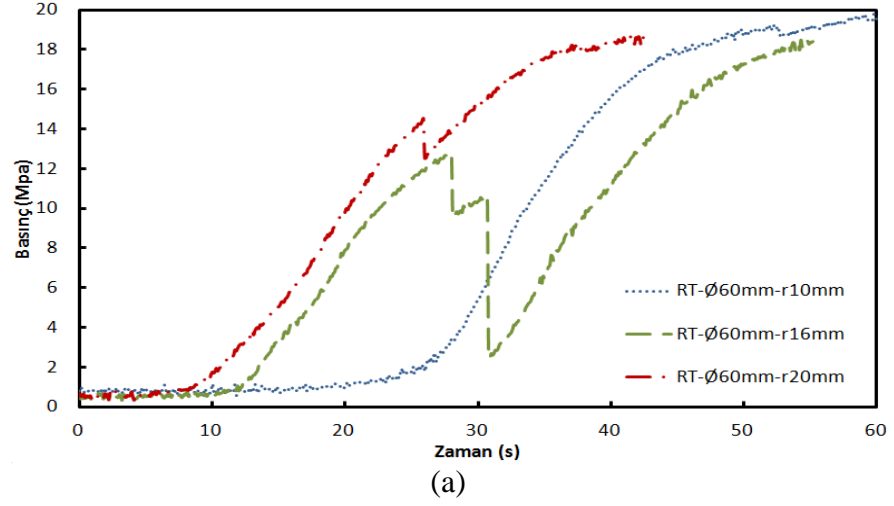


(d)

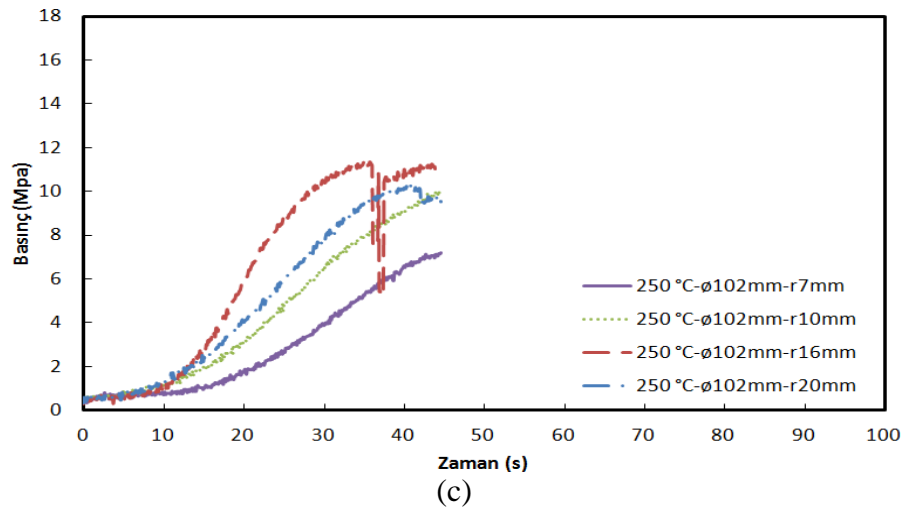
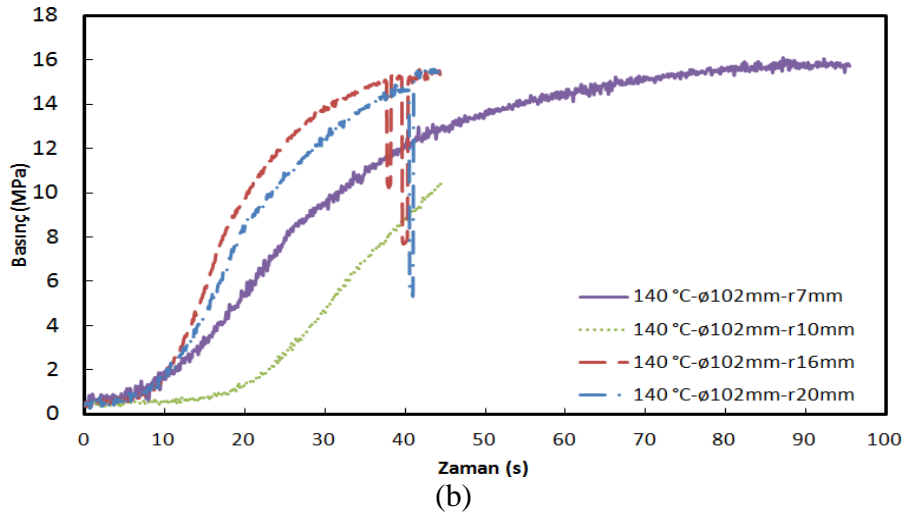
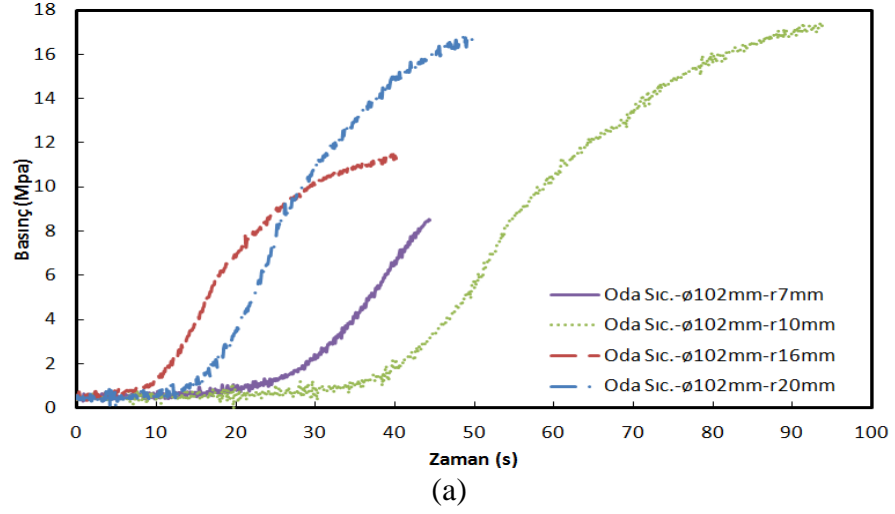
Şekil EK C.3. 102 mm iç çapa sahip kalıpla 250 °C sıcaklıkta şekillendirilmiş numuneler a) r7 mm, b) r10 mm, c) r16 mm, d) r20 mm.

EK AÇIKLAMALAR D.

BASINÇ – ZAMAN GRAFİKLERİ



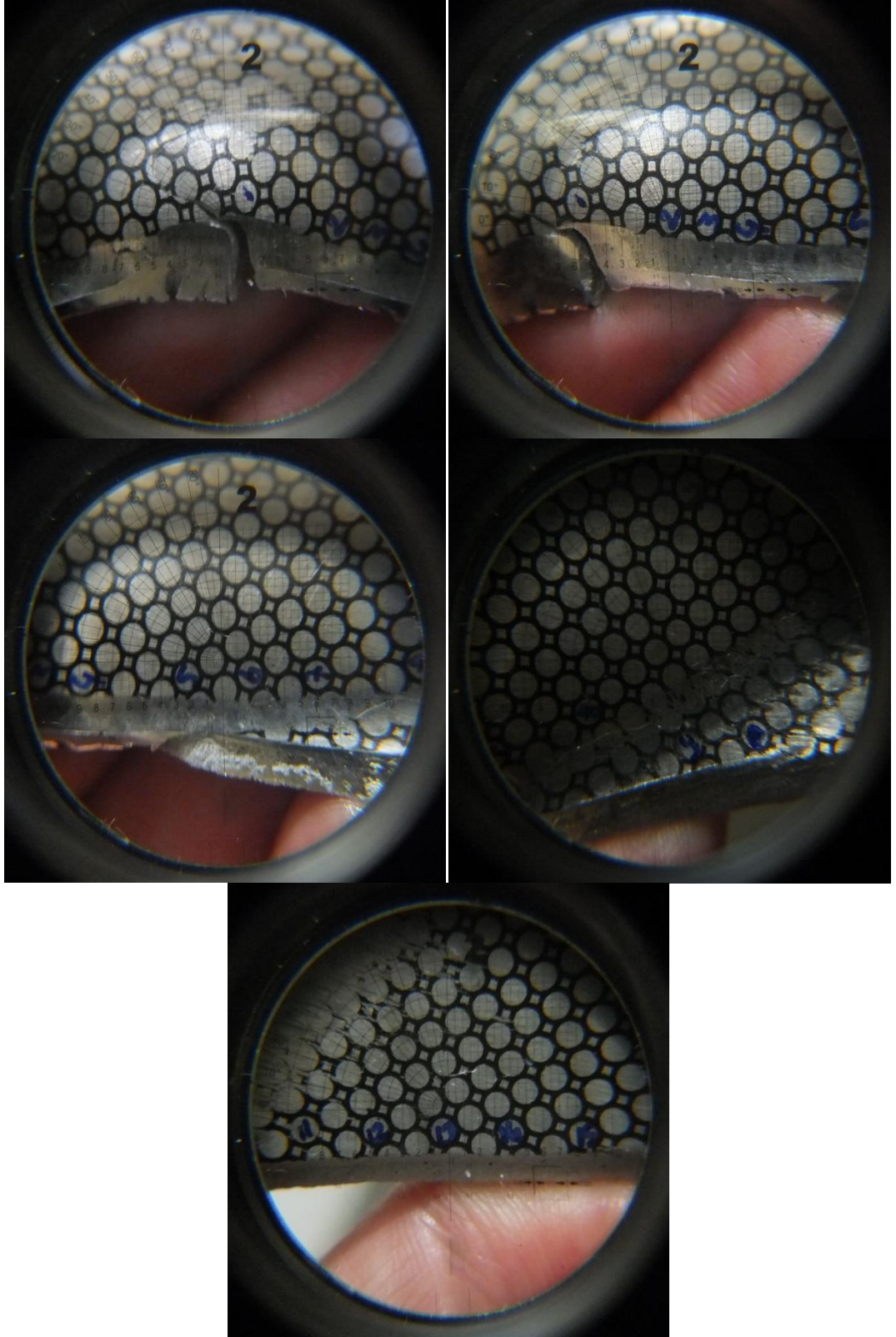
Şekil EK D.1. 60 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneylere ait basınç zaman grafikleri, a) oda sıcaklığında, b) 140 °C ve c) 250 °C.



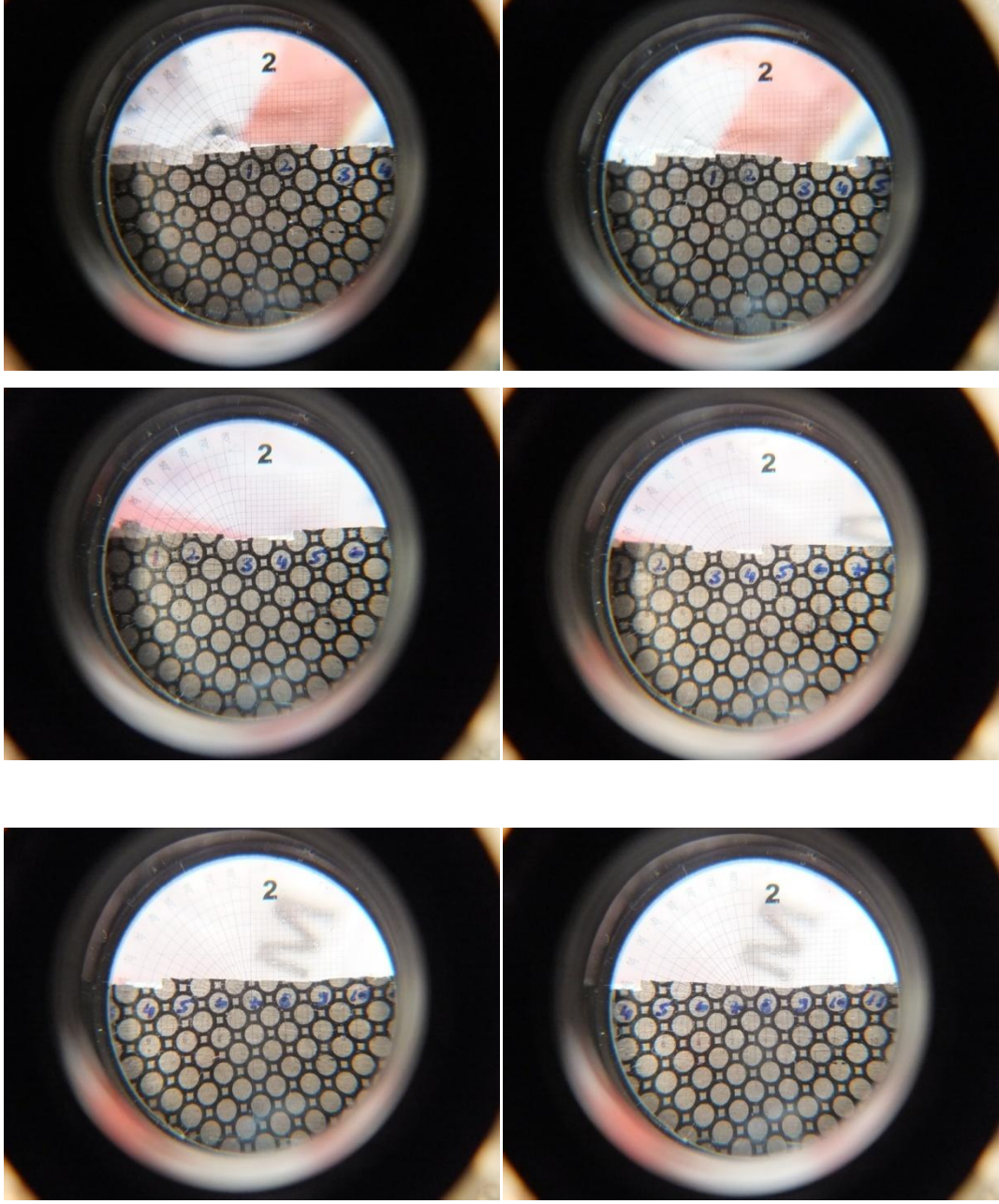
Şekil EK D.2. 102 mm iç çapa sahip kalıpla gerçekleştirilen deneylere ait basınç-zaman grafikleri, a) oda sıcaklığında, b) 140 °C ve c) 250 °C.

EK AÇIKLAMALAR E.

GRİD ÖLÇÜM FOTOĞRAFLARI



Şekil EK E.1. 280 kN pot baskı kuvvetiyle şekillendirilen numunelere ait grid ölçüm fotoğraflarından örnekler.



Şekil EK E.2. Oda sıcaklığında 60 mm çap ve 16 mm köşe kavisiyle gerçekleştirilen şekillendirme işlemi sonrası çekilen grid ölçüm fotoğraflarından örnekler.

ÖZGEÇMİŞ

Hatice EVLEN 1980'de Taşköprü'de doğdu; ilk ve orta öğrenimini İzmit'te tamamladı; İzmit Anadolu Meslek Lisesi, Grafik Tasarım Bölümü'nden mezun olduktan sonra 2000 yılında ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü'ne girdi; 2004'de "iyi" derece ile mezun olduktan sonra 2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2004 yılında ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını 2007 yılında bitirdi. Halen; 2008 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu doktora programını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : 100. Yıl Mah. Sembol Sitesi B Blok Kat 4 Daire 7 Karabük

Tel: : (506) 660 35 61

Faks : 0370 433 80 04

E-posta : hakgul@karabuk.edu.tr