

**ILIK DERİN ÇEKME PROSESİ İÇİN  
ŞEKİLLENDİRME SICAKLIKLARININ  
BELİRLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**2015  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**ILIK DERİN ÇEKME PROSESİ İÇİN ŞEKİLLENDİRME  
SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2015**

Muhammet Hüseyin ÇETİN tarafından hazırlanan “ILIK DERİN ÇEKME PROSESİ İÇİN ŞEKİLLENDİRME SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 25/06/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Osman YİĞİT (YBÜ)

Üye : Prof. Dr. Refik POLAT (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mehmet KARALI (NEÜ)



...../...../2015

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

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

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.”*

Muhammet Hüseyin ÇETİN

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **ILIK DERİN ÇEKME PROSESİ İÇİN ŞEKİLLENDİRME SICAKLIKLARININ BELİRLENMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU**

**Haziran 2015, 131 Sayfa**

Sıcaklık, ılık şekillendirme prosesinde şekillendirilebilirliği sağlayan en temel fiziksel parametredir. Bu sebeple, proses kararlılığının sağlanması sıcaklık parametresinin doğru bir şekilde ölçülmesi ve analizine bağlıdır. Ilık işlem için kalıplara monte edilecek ısıtıcı ve ölçüm elemanlarının kalıp geometrisine ve tasarımcıya göre montaj bölgelerinin değişmesi, her bir kalıp sistemi için farklı sıcaklık değerlerinin ölçülmesine sebep olacaktır. Gerçek şekillendirme sıcaklığı değerlerinin tespiti için kalıp odaklı sıcaklık değerlendirilmesi yerine şekillendirilecek iş parçası malzemesi odaklı değerlendirme yönteminin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, şekillendirilecek malzeme üzerinden alınan gerçek sıcaklık verileri proses parametresi olarak kullanılarak ılık şekillendirme prosesi analiz edilmiştir. Gerçek sıcaklık verilerini elde edebilmek için kapalı kalıp sisteminde sıcaklık ölçümünün yapılabileceği bir indeks malzeme geliştirilmiştir. İzotermal olmayan

koşullar nedeniyle malzeme üzerinden elde edilen sıcaklık verileri eğriler yoluyla karakterize edilmiş ve ilgili eğriler şekillendirme sıcaklığı eğrileri (ŞSE) olarak adlandırılmıştır. Elde edilen eğrilerin karakteristik davranışları, AA5754-O, AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının ılık derin çekilmesi yoluyla araştırılmıştır. Derin çekme prosesi sac metal şekillendirme yöntemleri içerisinde en yoğun kullanım alanına sahip olduğu için tercih edilmiştir. Deneysel çalışmada giriş parametresi olarak sıcaklık eğrileri, baskı levhası basıncı ve ıstampa hızı parametreleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmada öncelikli olarak kusursuz kap çekilebilirliğini sağlayan proses parametreleri belirlenmiş ve giriş parametrelerinin prosese etkileri analiz edilmiştir. Çıkış parametresi olarak derin çekilmiş numunenin fiziksel formu (marullanma ve yırtılma koşulları) niteliksel olarak, minimum kap yüksekliği değeri ise niceliksel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmanın bir sonraki adımında şekillendirmeyi arttırabilecek optimum sıcaklık koşulları, kap hacmi ve geri yaylanma parametreleri analiz edilerek araştırılmıştır. Optimum sonuçların yorumlanmasında varyans analizi (ANOVA) tekniğinden faydalanılmıştır. ŞSE eğrileri üzerindeki optimum noktaları belirleyebilmek için de her bir ŞSE üzerindeki sıcaklık ölçüm noktalarının birbirlerine göre farkları belirlenmiş ve elde edilen fark değerlerinin optimum ŞSE eğrisine göre trendi analiz edilmiştir. Elde edilen genel sonuçlar flanş-kap radyüsü bölgesinde yaklaşık 330 °C (rekristalizasyon sınırı), kap duvarı-ıstampa tabanı bölgesinde ise yaklaşık 100 °C sıcaklık değerlerinin ılık derin çekme prosesi için ideal optimum değerler olduğunu göstermektedir. İdeal optimum sıcaklıklara ulaşmak için geliştirilen yeni ŞSE'ler ile AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının limit çekme oranları arttırılmış ve ilgili alaşımlar için en uygun ŞSE değerleri belirlenmiştir. Ayrıca derin çekilmiş numunelerin cidarları boyunca kalınlık değişimleri incelenmiş ve korelasyon analizi ile sonuçlar değerlendirilmiştir. Cidar kalınlık değişimi grafiklerine göre inceleme bakımından süreklilik gösteren bölgenin ıstampa radyüsü bölgesi olması sebebiyle ilgili bölgeye ait SEM görüntüleri alınmış ve mikro çatlak oluşumu incelenmiştir.

**Anahtar Sözcükler** : ılık derin çekme, şekillendirme sıcaklığı, kusursuz şekillendirme, optimum şekillendirme, AA5754-O, AA6061-T6, AA7075-T6.

**Bilim Kodu** : 914.1.090

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **DETERMINATION AND CHARACTERIZATION OF FORMING TEMPERATURES FOR WARM DEEP DRAWING PROCESS**

**Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**Karabuk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU**

**June 2015, 131 Pages**

Temperature is the main effective physical parameter in warm deep drawing process which makes the process realizable. Therefore, stability of the process depends on the correct measurement and analyses of temperature parameter. Changeability of assembly region of heaters and measurement equipment according to the tool geometry and tool designer results in measurement of different temperature values in each tooling system. For determining real forming temperatures, development of work-piece material based temperature measurement system is needed instead of tool based measurement system.

In this study, warm forming process was analyzed by using real forming temperatures as a process parameter which was obtained on work-piece material. For obtaining real forming temperatures, index material was developed to measure temperatures in closed tool system. Due to the non-isothermal conditions, temperatures obtained from

work-piece material was defined by curves and these curves were named by term of forming temperature curves (FTC). The characteristic behavior of these curves was investigated by deep drawing process of AA5754-O, AA6061-T6 and AA7075-T6 alloys. Deep drawing process was chosen because of the most intensive usage area among the plastic forming processes. In experiments, FTCs, blank holder pressure and punch speed were used as input parameters. In experimentation, firstly, process parameters which ensure failure-free formability were determined and the effect on process parameters on process was analyzed. As an output parameter, physical form of deep drawn cup (wrinkling and tearing conditions) was investigated qualitatively and minimum cup height parameter was investigated quantitatively. In the next step of experimentation, optimum temperature conditions increasing formability was investigated by analyzing cup volume and spring-back parameters. Variance analyze (ANOVA) was used in explanation of output parameters. For determining optimum points on FTCs, differences of temperature measurement points on each FTC was calculated and trend of obtained differences to the optimum FTC was analyzed. Obtained general results show that, ideal optimum forming temperatures for warm deep drawing process are 330 °C and 100 °C for flange-cup radius region and cup wall-punch bottom region, respectively. Limit drawing ratios for AA6061-T6 and AA7075-T6 were increased by using new FTCs developed for ideal optimum temperatures. Additionally, thickness distribution along the cup wall of deep drawn cups was investigated and results were evaluated by using correlation analysis. Since the continuity region in terms of thinning is the punch radius region according to the thickness distribution graphs, SEM images of the related region were taken and micro crack formation was investigated.

**Keywords** : Warm deep drawing, forming temperature, failure free formability, optimum formability, AA5754-O, AA6061-T6, AA7075-T6.

**Science Code** : 914.1.090



## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmasının planlanmasında, yürütülmesinde, deney setinin kurulumunda ve deneysel verilen analizinde desteklerini, yönlendirmelerini, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU ve Prof. Dr. Osman YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmama verdikleri desteklerden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Refik POLAT'a, Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA'ya ve Doç. Dr. Mehmet KARALI'ya, atölye ve laboratuvar ortamlarını kullanmamı sağlayan Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Dekanlığına, Selçuk Üniversitesi laboratuvarlarını kullanmamı sağlayan Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI'ya ve Arş. Gör. Mevlüt TÜRKÖZ'e, deney setinin kurulumunda yardımcı olan Hidroliksan firmasına, Sn. Ömer Faruk USTA'ya ve kayınpederim Sn. Abdurrahman ÇİMEN'e, deneysel çalışmalarında yardımcı olan kardeşim Arş. Gör. Mehmet Emin ÇETİN'e ve öğrencilerim Sn. Mustafa ÖNCÜL'e ve Sn. Enes KILINÇARSLAN'a, tez metnindeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Abdullah UĞUR'a ve Arş. Gör. Enes KILINÇ'a, tezime verdikleri her türlü maddi ve manevi destekten dolayı Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmasına bilimsel araştırma projeleri desteği ile finansal olarak katkı sağlayan Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen, eğitimim için her türlü zorluğa katlanan anneme ve babama, her koşulda yanımda olan kardeşlerime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Doktora tez çalışması boyunca her zaman manevi desteğini yanımda bulduğum, yoğun çalışmalar esnasında sabırla beni destekleyen sevgili Eşime sonsuz teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xviii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	8
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	8
2.1. GİRİŞ .....	8
2.2. AL-MG ALAŞIMLARININ ILIK DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	10
2.3. ILIK DERİN ÇEKME İŞLEMİNDE OLUŞABİLECEK KUSURLAR .....	26
2.4. LİTERATÜRÜN GENEL DEĞERLENDİRMESİ.....	28
BÖLÜM 3 .....	30
ILIK DERİN ÇEKME PROSESİ İÇİN ISITMA VE SOĞUTMA SİSTEMİ ENTEĞRELİ KALIP TASARIMI VE İMALATI .....	30
3.1. GİRİŞ .....	30
3.2. ŞEKİLLENDİRME KALIPLARININ TASARIMI .....	36
3.3. KOMPONENT TEKNOLOJİLERİNİN TASARIMI .....	40
BÖLÜM 4 .....	45
ŞEKİLLENDİRME SICAKLIĞI EĞRİLERİNİN OLUŞTURULMASI.....	45

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.1. GİRİŞ .....	45
4.2. İNDEKS MALZEMENİN GELİŞTİRİLMESİ.....	46
4.3. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ İÇİN TERMOKUPLARIN SEÇİMİ VE MONTAJI.....	47
4.4. ŞSE'LERİN ELDE EDİLMESİ.....	48
4.4.1. Soğutma Suyu Sıcaklığı Değişiminin Belirlenmesi.....	50
4.4.2. Malzeme Yüzey Sıcaklıklarının Ölçülerek ŞSE'lerin Elde Edilmesi... 51	51
4.4.3. ŞSE'lerin Kontrollü Soğutma Şartlarındaki Davranışlarının Belirlenmesi .....	55
 BÖLÜM 5 .....	 61
MATERYAL VE METOT .....	61
5.1. GİRİŞ .....	61
5.2. DENEY DÜZENEGİ KURULUMU.....	62
5.2.1. Pres Ünitesinin Kurulumu .....	62
5.2.2. Ilık Derin Çekme Ünitesinin Şeması .....	66
5.2.3. Şekillendirme Ünitesinin Çalışma Prensibi .....	67
5.3. DENEY METODOLOJİSİ .....	68
5.3.1. Güvenilir Proses Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Deney Tasarımı. 69	69
5.3.2. Optimum ŞSE'nin Belirlenmesi ve ANOVA Analizi .....	71
5.3.3. Limit Çekme Oranı Belirleme Deneyleri.....	71
5.4. SAC MALZEME .....	72
5.5. YAĞLAYICI SEÇİMİ.....	74
5.6. ÖLÇÜM CİHAZLARI VE ÖLÇME METODOLOJİSİ .....	74
5.6.1. Kap Yüksekliği Ölçümü .....	75
5.6.2. Kap Hacmi Ölçümü .....	76
5.6.3. Geri Yaylanmanın Belirlenmesi İçin Hacim Ölçümü.....	76
5.6.4. Kalınlık Değişiminin Ölçümü.....	78
 BÖLÜM 6 .....	 79
DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	79
6.1. GÜVENİLİR PROSES PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ.....	80
6.2. OPTİMUM ŞSE'NİN ARAŞTIRILMASI VE ANOVA ANALİZİ .....	90

6.3. ŞSE'LER ÜZERİNDEKİ NOKTALARIN OPTİMUM DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ.....	97
6.4. KONTROLLÜ SOĞUTMA ÜNİTESİ İLE GELİŞTİRİLEN ŞSE'LER KULLANILARAK AA6061-T6 VE AA7075-T6 ALAŞIMLARININ LİMİT DERİN ÇEKME ORANLARININ ARAŞTIRILMASI.....	99
6.5. ILIK DERİN ÇEKİLMİŞ KAPLARDA CİDAR KALINLIĞI DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ VE İSTAMPA RADYÜSÜ BÖLGESİ İÇİN MİKRO ÇATLAK ANALİZİ.....	106
6.5.1. Sıcaklık ve Diğer Proses Parametrelerinin Cidar Kalınlığı Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi.....	106
6.5.2. İstampa Radyüsü Bölgesi İçin Mikro Çatlak Analizi .....	113
BÖLÜM 7 .....	116
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	116
7.1. SONUÇLAR.....	116
7.2. ÖNERİLER.....	124
KAYNAKLAR .....	125
ÖZGEÇMİŞ .....	131

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Fikstür malzeme ve sıcaklık-zaman eğrileri .....	11
Şekil 2.2.	Ilık derin çekme sistemi için belirlenen sıcaklık ölçüm noktaları. ....	13
Şekil 2.3.	Farklı şekillendirme hızlarında derin çekme prosesi esnasında oluşan sıcaklık farkı değerleri. ....	13
Şekil 2.4.	İncelenen proses parametreleri ve ulaşılan derin çekme oranları. ....	14
Şekil 2.5.	AZ31 için ılık derin çekme simülasyonları.....	15
Şekil 2.6.	135 mm/dak ıstampa hızında derin çekme esnasında oluşan sıcaklık dağılımı. ....	16
Şekil 2.7.	Kap derinliğinin ıstampa ve kalıp sıcaklığına göre değişimi.....	18
Şekil 2.8.	Baskı levhası basıncının farklı sıcaklık koşullarında kap derinliğine etkisi .....	18
Şekil 2.9.	Kalıp-ıstampa sıcaklıklarına bağlı olarak AA5754 için sabit baskı levhası basıncında elde edilen akma dayanımı ve uzama değerleri.....	19
Şekil 2.10.	Farklı sıcaklıklarda ılık derin çekme koşullarında ıstampa kuvvetinin, kalınlık dağılımının ve kap yüksekliğinin değişimi.....	20
Şekil 2.11.	AZ31 alaşımı için elde edilen akma eğrileri. ....	21
Şekil 2.12.	Ilık derin şekillendirme işlemleri için tasarlanmış deney sisteminin şematik görüntüsü. ....	21
Şekil 2.13.	Deney kurulumunun şematik gösterimi. ....	22
Şekil 2.14.	2, 2.5 ve 3 derin çekme oranlarında çekilmiş numune görüntüleri.....	23
Şekil 2.15.	PLC kontrollü deney ünitesi görüntüsü. ....	23
Şekil 2.16.	Bölgesel ısıtma ve soğutma sistemi entegre edilmiş ünite. ....	24
Şekil 2.17.	Sıcaklık değişimine göre çekme oranının değişimi. ....	25
Şekil 2.18.	AA7075 alaşımı için sıcaklıkla limit çekme oranının değişimi.....	26
Şekil 3.1.	Flanş bölgesi ve kap duvarına etkiyen gerilmeler. ....	31
Şekil 3.2.	Ilık derin çekme prosesi için şematik görünüş.....	31
Şekil 3.3.	Baskı levhası ve ıstampanın aynı yönlü tasarımı.....	33
Şekil 3.4.	Baskı levhası ve ıstampanın ters yönlü tasarımı. ....	33
Şekil 3.5.	Ilık derin çekme prosesi için tasarım hiyerarşisi. ....	35

Şekil 3.6.	Kalıp ölçüleri için şematik görünüm. ....	38
Şekil 3.7.	Istampa imalatı için çizilen teknik resim. ....	38
Şekil 3.8.	Dişi kalıbın imalatı için çizilen teknik resim. ....	39
Şekil 3.9.	Ilık derin çekme işlemi malzeme ısıtma yöntemleri. ....	40
Şekil 3.10.	Baskı levhasına monte edilmiş seramik rezistans ısıtıcı ve alt kalıpta kullanılan yaprak rezistans ısıtıcı. ....	42
Şekil 3.11.	Termokuplların montajı için şematik resim. ....	42
Şekil 3.12.	Basit soğutma sistemi görüntüsü. ....	43
Şekil 4.1.	4 noktadan sıcaklık ölçümü için tasarlanmış indeks malzeme. ....	47
Şekil 4.2.	8 noktadan sıcaklık ölçümü için tasarlanmış indeks malzeme. ....	47
Şekil 4.3.	Sıcaklık ölçüm düzeneği. ....	48
Şekil 4.4.	Sıcaklık ölçümü için kalıbın bekleme konumu. ....	49
Şekil 4.5.	Kalıp sıcaklıklarına göre soğutma suyu sıcaklığının değişimi. ....	51
Şekil 4.6.	4 saatlik ısınma süresinde soğutma suyu sıcaklığının değişimi. ....	52
Şekil 4.7.	Soğutulan ıstampanın tabanında ölçülen sıcaklık değeri. ....	53
Şekil 4.8.	Istampanın soğutulduğu şartlarda kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilmiş ŞSE'ler. ....	53
Şekil 4.9.	Soğutma yapılmadığı şartlarda kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilmiş ŞSE'ler. ....	54
Şekil 4.10.	Soğutma suyu sıcaklığının 0 °C'de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE'lerin davranışı. ....	56
Şekil 4.11.	Soğutma suyu sıcaklığının 0 °C'de olduğu ve 8 noktada ölçüm yapıldığı durumda ŞSE'lerin davranışı. ....	57
Şekil 4.12.	Soğutma suyu sıcaklığının 5 °C'de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE'lerin davranışı. ....	58
Şekil 4.13.	Soğutma suyu sıcaklığının 10 °C'de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE'lerin davranışı. ....	58
Şekil 4.14.	Soğutma suyu sıcaklığının 15 °C'de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE'lerin davranışı. ....	59
Şekil 4.15.	Soğutma suyu sıcaklığının 20 °C'de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE'lerin davranışı. ....	59
Şekil 5.1.	Deneylerde kullanılan prese ait görüntü. ....	63
Şekil 5.2.	Hidrolik devre elemanlarının görüntüsü. ....	64
Şekil 5.3.	Hidrolik devre elemanlarına ait şematik görüntü. ....	64
Şekil 5.4.	Kılavuz miller ile kalıpların merkezlenmesi. ....	65

## **Sayfa**

Şekil 5.5.	Ilık derin çekme işleminde kullanılan sistemin gerçek görüntüsü.....	66
Şekil 5.6.	Ilık derin çekme işleminde kullanılan sistemin şematik görüntüsü.....	67
Şekil 5.7.	Şekillendirme ünitesinin çalışma prensibi.....	68
Şekil 5.8.	Çıkış parametrelerinin değerlendirilmesi için oluşturulan algoritma..	70
Şekil 5.9.	Yükseklik ölçme mihengiri ve kap yükseklikleri.....	76
Şekil 5.10.	Minimum kap yüksekliğine kadar su doldurulmuş kap için şematik görüntü.....	77
Şekil 5.11.	40 mm kap yüksekliğine kadar su doldurulmuş kap için şematik görüntü.....	77
Şekil 5.12.	Kalınlık değişiminin ölçüldüğü kap düzlemleri.....	78
Şekil 6.1.	Deney sonuçları için akış şeması.....	79
Şekil 6.2.	Marullanma kusuru görülen derin çekilmiş kaplar.....	86
Şekil 6.3.	Tam formda derin çekilmiş ve kulaklaşma oluşan bir numuneye ait fotoğraf.....	86
Şekil 6.4.	Maksimum baskı levhası basıncının belirlenmesi deneylerinde elde edilen numunelerin görüntüsü.....	89
Şekil 6.5.	2,7 derin çekme oranında elde edilmiş numunelerin görüntüsü.....	90
Şekil 6.6.	ŞSE-4 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.....	92
Şekil 6.7.	ŞSE-3 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.....	92
Şekil 6.8.	ŞSE-2 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.....	93
Şekil 6.9.	ŞSE-1 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.....	93
Şekil 6.10.	Geri yaylanma davranışının analizi için ŞSE'lere göre ölçülmüş kap hacmi değerleri.....	94
Şekil 6.11.	İdeal optimum noktaları elde edebilmek için trend analizi.....	98
Şekil 6.12.	Farklı ŞSE koşullarında derin çekilmiş AA6061-T6 alaşımı malzemeler.....	105
Şekil 6.13.	SSS değerinin 0 °C olduğu koşulda derin çekilmiş AA7075-T6 alaşımı malzemeler.....	105
Şekil 6.14.	ŞSE-1 için kalınlık değişimi grafiği.....	107
Şekil 6.15.	ŞSE-2 için kalınlık değişimi grafiği.....	107
Şekil 6.16.	ŞSE-3 için kalınlık değişimi grafiği.....	108
Şekil 6.17.	ŞSE-4 için kalınlık değişimi grafiği.....	110
Şekil 6.18.	İş parçasında cidar kalınlığı değişimi.....	111

## **Sayfa**

Şekil 6.19.	Değişken baskı plakası değerlerinde cidar kalınlığı değişimi. ....	111
Şekil 6.20.	Farklı baskı plakası basınçlarında cidar kalınlığı değişimi. ....	112
Şekil 7.1.	AA5754-O alaşımı için optimum ŞSE bölgesi. ....	119
Şekil 7.2.	İdeal optimum ŞSE'e için ısıtma ve soğutma gereksinimi. ....	120
Şekil 7.3.	AA6061-T6 alaşımı için optimum ŞSE bölgesi. ....	121
Şekil 7.4.	AA7075-T6 alaşımı için optimum ŞSE bölgesi. ....	122



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1.1.	Al ve Mg alaşımları için literatürden alınan optimum sıcaklık aralıkları.....	3
Çizelge 2.1.	Çekme işlemi sırasında oluşan hatalar ve muhtemel sebepleri. ....	27
Çizelge 3.1.	Belirlenen erkek ve dişi kalıp ölçüsü değerleri. ....	37
Çizelge 3.2.	Soğutma suyu sıcaklığının kalıp ve baskı plakası sıcaklığına göre değişimi. ....	44
Çizelge 5.1.	Proses parametreleri ve seviyeleri. ....	69
Çizelge 5.2.	Limit çekme oranı deneyleri için belirlenen proses parametreleri ve seviyeleri.....	72
Çizelge 5.3.	AA5754-O alaşımının kimyasal kompozisyonu. ....	73
Çizelge 5.4.	AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	73
Çizelge 5.5.	AA5754-O, AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının mekanik özellikleri. ....	73
Çizelge 6.1.	ŞSE-4 için deneysel sonuçlar. ....	81
Çizelge 6.2.	ŞSE-3 için deneysel sonuçlar. ....	82
Çizelge 6.3.	ŞSE-2 için deneysel sonuçlar. ....	83
Çizelge 6.4.	ŞSE-1 için deneysel sonuçlar. ....	84
Çizelge 6.5.	Ilık derin çekme prosesi için kısıt fonksiyonları. ....	89
Çizelge 6.6.	Baskı levhası basıncı için maksimum limit aralığının belirlenmesi ..	90
Çizelge 6.7.	Minimum kap yüksekliği, kap hacmi ve geri yaylanma parametreleri için ANOVA değerleri. ....	94
Çizelge 6.8.	AA6061-T6 malzeme için limit derin çekme oranı belirleme deneyleri. ....	101
Çizelge 6.9.	AA7075-T6 malzeme için limit derin çekme oranı belirleme deneyleri. ....	102
Çizelge 6.10.	AA6061-T6 için ılık derin çekme deney sonuçları. ....	103
Çizelge 6.11.	AA7075-T6 için ılık derin çekme deney sonuçları. ....	104
Çizelge 6.12.	ŞSE-1 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.....	107
Çizelge 6.13.	ŞSE-2 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.....	108

**Sayfa**

Çizelge 6.14. ŞSE-3 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.....	108
Çizelge 6.15. ŞSE-4 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.....	110
Çizelge 6.16. Cidar kalınlığı değişimi için ANOVA değerleri. ....	112
Çizelge 6.17. Farklı ŞSE şartlarında düşük ıstampa hızında (2,4 mm/s) elde edilen mikro görüntüler. ....	113
Çizelge 6.18. Farklı ŞSE şartlarında yüksek ıstampa hızında (7,8 mm/s) elde edilen mikro görüntüler. ....	114
Çizelge 6.19. Farklı ıstampa hızı değerlerinde elde edilen mikro görüntüler. ....	115
Çizelge 6.20. Farklı derin çekme oranlarında elde edilen mikro görüntüler. ....	115

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

°	: Kısmi kusurlu numune
%	: Yüzde
°C	: Derece santigrat
✓	: Hatasız numune
AA	: Alüminyum alaşımı
Adj. R-Sq	: Düzeltilmiş regresyon katsayısı
Al	: Alüminyum
AZ	: Alüminyum çinko
Bar	: Basınç birimi
BLB	: Baskı levhası basıncı
C	: Karbon
c	: Özgül ısı
Cal	: Kalori
cm	: Santimetre
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
D	: Fark operatörü
D	: Taslak çapı
d <sub>1</sub>	: İstamp çapı
d <sub>2</sub>	: Kalıp çapı
F	: İstatistiki test oranı
Fe	: Demir
g	: Gram
H22	: Dörtte bir sertleştirme
K	: Termokupl tipi

kg	: Kilogram
L	: Termokupl tipi
m	: Kütle
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MoS <sub>2</sub>	: Molibden di-sülfür
MPa	: Mega paskal
n	: Pekleşme üssü
N	: Yüzey kalitesi
Ni	: Nikel
Ø	: Çap
p	: İstatistiki anlamlılık oranı
Q	: Isı
r	: Anizotropi katsayısı
R	: Yarıçap
r <sub>1</sub>	: Istamp radyüsü yarıçapı
r <sub>2</sub>	: Kalıp radyüsü yarıçapı
R <sub>a</sub>	: Yüzey pürüzlülüğü
R-Sq	: Regresyon katsayısı
s	: Saniye
S/G	: Sinyal/gürültü oranı
s <sup>-1</sup>	: Şekil değiştirme hızı
Si	: Silisyum
St	: Steel
t	: Sac kalınlığı
T	: Sıcaklık
T <sub>2</sub>	: 1. nokta sıcaklığı
T <sub>25</sub>	: 2. nokta sıcaklığı
T <sub>50</sub>	: 3. nokta sıcaklığı
T6	: Yapay yaşlandırma
T <sub>75</sub>	: 4. nokta sıcaklığı

Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
W	: Vat
x	: Tamamen kusurlu numune
Zn	: Çinko
$\Delta T$	: Sıcaklık farkı
$\mu m$	: Mikrometre

## **KISALTMALAR**

ANOVA	: Varyans Analizi
BHP	: Blank Holder Pressure (Baskı Levhası Basıncı)
C	: Pres Geometrisi
C	: Sigorta Tipi
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
ÇB	: Çekme Boşluğu
DÇO	: Derin Çekme Oranı
FTC	: Forming Temperature Curve (Şekillendirme Sıcaklığı Eğrisi)
H	: Pres Geometrisi
KS	: Kalıp Sıcaklığı
LDR	: Limit Drawing Ratio (Sınır Çekme Oranı)
MDF	: Kompozit Ahşap Malzeme
PID	: Proportional– Integral– Derivative (Kısmi- İntegral- Türev)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Kontrol)
PS	: Punch Speed (İstampa Hızı)
PTFE	: Katı Teflon Yağlayıcı
RD	: Rolling Direction (Haddelene Doğrultusu)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SSS	: Soğutma Suyu Sıcaklığı
SŞO	: Sınır Şekillendirme Oranı
STY	: Sınır Tepe Yüksekliği
ŞSE	: Şekillendirme Sıcaklığı Eğrisi

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Ilık şekillendirme, metalik malzemelerin akma dayanımlarını sıcaklık etkisiyle düşürerek daha kolay şekillendirilmelerine imkân sağlayan ve bu sebeple hafif konstrüksiyon odaklı endüstriler için (otomobil, savunma, elektronik, uzay ve havacılık) stratejik öneme sahip olan bir imalat yöntemidir [1-5]. Özellikle, oda sıcaklığında şekillendirilebilirliği zor olan, yüksek spesifik mukavemete sahip alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan yöntem; rijit elemanlardan oluşması, sıcaklık ve kuvvet akışı gibi iki fiziksel büyüklüğün sisteme yüksek oranda etkimesi, baskı levhası yükü, kalıp geometrisi, şekil değiştirme hızı ve yağlayıcı türü parametrelerinin sistem üzerinde etkisinin bulunması sebebiyle oldukça kompleks bir prosestir.

Ilık şekillendirme işleminde proses sıcaklığı değeri, şekillendirilecek malzemenin erime sıcaklığının 0,3 ile 0,5 katı aralığındadır [6,7]. Bu değer aralığı malzemenin kayma bantlarını aktif hale getirerek şekillendirilebilirliğinin artırılmasını sağlar [8]. Ayrıca ilgili aralığın üst sınırı yeniden kristalleşme sıcaklığı altında kaldığı için malzemede içyapı değişikliği oluşmadan şekillendirme sağlanmaktadır. Ilık şekillendirmede malzemede sıcaklıktan dolayı oluşabilecek sorun dinamik deformasyon yaşanması olayıdır ve bu durum sadece malzemenin yüzey kalitesini etkileyen, içyapıda değişikliğe sebep olmayan bir durumdur [9]. Bu sebeple ılık şekillendirmede sıcaklıkla ilgili problem, sıcaklık parametresinin malzeme yapısına etkisinden ziyade şekillendirme için gerekli sıcaklık değerlerinin kalıpta elde edilmesi ve malzeme yüzeyindeki sıcaklığın kontrolüdür.

Ilık derin çekme prosesinde pres harici bir ünite veya prese entegre ısıtma sistemi ile malzemeyi yüksek sıcaklıklara çıkarabilmek mümkündür. Fakat pres harici ısıtma sisteminde istenilen sıcaklık değerlerinde ve malzemenin istenilen bölgelerinde

sıcaklık oluşumu ile şekillendirmenin zor olması sebebiyle prese entegre çalışan ısıtma sistemlerinin tasarlanması ve imalatı gerekmektedir. Derin çekme işleminin mekaniği, çekilen kap duvarının sağlam, flanş bölgesinin ise kolayca deforme olabilir olmasını gerektirmektedir. Ilık derin çekmede, flanş bölgesinde oluşan sıcaklık deformasyonu kolaylaştırmakta fakat metalik malzemelerin yüksek iletkenlik özellikleri nedeniyle sıcaklık kap duvarı ve ıstampa radyüsü bölgesine yayılmaktadır. Bu bölgeye sıcaklığın etkimesi pekliği düşüreceği için malzemede boyunlaşma ve yırtılma kusurlarının oluşması kaçınılmaz hale gelir. Bu sebeple flanş bölgesi deformasyonun kolaylaştırılması amacıyla ısıtılırken, kap duvarı ve ıstampa radyüsü bölgesi de malzemede pekliğin düşmemesi için soğutulmalıdır. Hem ısıtma hem de soğutma işlemlerini içeren ılık derin çekme prosesi için pres konstrüksiyonuna ısıtıcı ünite ile beraber kalıp içi soğutma kanallarının veya soğutucu bir ünitenin entegre edilmesi derin çekilebilirlik oranının artırılması ve hatasız parça üretimi için önemlidir [10].

Tez çalışması kapsamında öncelikli olarak ısıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık şekillendirme kalıplarının tasarımı ele alınmış ve tasarım adımları sistematik bir şekilde anlatılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, kalıp sisteminin ısıtma soğutma sistemlerine göre dizaynı, istenilen sıcaklık değerlerini kararlılıkla sağlayabilecek rezistansların seçimi ve montajı, pres tezgahının termal etkilerden korunması için yalıtımı, soğutma ünitesinin tasarımı ve montajı, ıstampa - kalıp elemanlarının işlenmesi, ısıtma işlemi ve yüzey kalitelerinin belirlenmesi detaylı olarak değerlendirilmiştir. Ilık derin çekme prosesine ısıtma ve soğutma sistemlerinin entegre edilmesi prosesin bilimsel değil teknolojik olarak değerlendirildiğini düşündürse de, gerçekleştirilen atölye-laboratuvar çalışmaları prosesin bilimsel yapısına hakim olabilmek için teknolojik alt yapısının da bilinmesi gerektiğini göstermektedir. İstenilen yüksek sıcaklık değerinin malzemeye aktarılabilmesi, malzeme üzerinde homojen sıcaklık akışının sağlanması, sıcaklığın korunması, şekillendirilebilirliği arttırmak için soğutma sistemi ile gradyan oluşturulması ve bu gradyanın davranışının kapalı kalıp koşulları altında ölçülerek karakterize edilebilmesi malzeme ve fizik konusunda kapsamlı bilgi birikimi ve tecrübe gerektirmektedir. Ayrıca yeterince karakterize edilmemiş bir ısıtma-soğutma davranışının proses hakkında yanıltıcı analizlere sebebiyet vermesi kaçınılmazdır. Literatürde görülen

optimum şekillendirme sıcaklığı değeri farklılıkları bu çıkarımımızın doğruluğunu kanıtlamaktadır [1,11-17].

Ilık şekillendirme prosesinin analizinde şekillendirme sıcaklığı değerlerinin doğru tespiti, ilgili sıcaklık değerlerinin malzemenin akma davranışı ve yüzey yağlama-sürtünme davranışını etkilemesi sebebiyle büyük önem taşımaktadır [18]. Literatürde sıcaklık ölçümü kavramıyla baskı levhası, matris ve ıstampanın farklı bölgelerinden ölçülen takım sıcaklığı değerleri kast edilmektedir. Fakat takım sıcaklıkları, kalıp geometrilerinin şekillendirilecek malzemeye göre değişmesi nedeniyle değişkenlik gösterecektir. Ayrıca sıcaklık ölçüm noktalarının farklılığı aynı kalıp elemanından farklı sıcaklıklar elde edilmesine sebebiyet vermektedir. Bu sebeple takım sıcaklıklarının gerçek şekillendirme sıcaklığı değerleri olduğu söylenemez. Takım sıcaklıkları sadece geometrisi ve sıcaklık ölçüm noktaları tanımlanmış kalıplar için referans sıcaklık değerleri olarak kullanılabilir. Çizelge 1.1’de literatürden alınan, şekillendirilebilirliği arttırmak amacıyla deneysel olarak elde edilmiş optimum sıcaklık aralıkları verilmiştir. Çizelge 1.1’de aynı malzeme için farklı optimum sıcaklık değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu durum şekillendirme prosesinde sıcaklık parametresi için belirsizlik durumuna sebep olmaktadır. Literatürdeki bu veri farklılığı durumu sıcaklık parametresinin takım sıcaklıklarına göre belirlenmesiyle açıklanabilir. Her bir çalışmada farklı kalıp geometrisi, farklı kalıp malzemesi, farklı ısıtma stratejisi ve farklı noktalardan sıcaklık ölçümü yapılması değerlerin de farklılaşmasına sebep olmuştur.

Çizelge 1.1. Al ve Mg alaşımları için literatürden alınan optimum sıcaklık aralıkları.

Malzeme	Kaynak	Deneysel olarak elde edilmiş optimum sıcaklık aralıkları
Al alaşımı (AA5754)	Kaya ve arkadaşları [1]	250-300 °C
	Bolt ve arkadaşları [11]	100-175 °C
	Laurent ve arkadaşları [12]	200 °C
	Ozturk ve arkadaşları [13]	≈250 °C
	Koç ve arkadaşları [14]	≈267 °C
Al alaşımı (AA5083)	Naka ve arkadaşları [15]	150-180 °C
	Toros ve Ozturk [16]	100-300 °C
Mg alaşımı (AZ31)	Zhang ve arkadaşları [2]	105-170 °C
	Chang ve arkadaşları [17]	200-300 °C



Literatürde sıcaklık parametresi için görülen belirsizlik iş parçası malzemesi esaslı sıcaklık ölçümü ile önlenemez. Kalıp sıcaklıkları yerine doğrudan malzeme sıcaklığının belirlenmesi gerçek şekillendirme sıcaklığı verilerinin elde edilebilmesini sağlayacaktır. Kapalı ve dinamik kalıp koşulları altından malzeme yüzeyinden sıcaklık verilerinin elde edebilmesi ise teknik açıdan güç bir durumdur. Palumbo ve Tricarico yaptıkları çalışmada AA5754-O alaşımının ılık derin çekilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve baskı levhası radyüsü ile malzeme merkezinden sıcaklık ölçülebilmek için takım ve malzeme odaklı sıcaklık ölçüm yöntemini kullanmışlardır [19]. Malzeme merkezine yerleştirilen termokupl (ısı çiftleri) ile malzemeden sıcaklık verisi alınmış fakat bu veri sadece soğutma performansını ölçülebilmek için kullanılmıştır. Çalışmada iş parçası malzemesi odaklı sıcaklık ölçümü yapılsa da yetersiz veri eldesi nedeniyle şekillendirme sıcaklıkları konusunda bir veri elde edilememiştir. İş parçası malzemesinden sıcaklık ölçümü konusunda en dikkat çeken çalışma Kaya ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir [9]. 3 mm kalınlığında fikstür malzeme kalınlığa dik doğrultuda 20, 25, 30 ve 40 mm derinliklerde delinmiştir. Bu işlem kalıp altında gerekli ısınma süresini ve yüzey basıncının malzemede sıcaklık artışı üzerine olan etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmanın sıcaklık verilerinin iş parçası malzemesinden elde edilmesine yönelik yetersizliği, tasarlanan fikstür malzemenin kalınlığının gerçek iş parçası malzemesinden farklı olması ve ölçülen sıcaklık verileriyle şekillendirme üzerine bir analiz yapılmamasıdır. Fakat, tasarlanan fikstür malzeme, malzeme esaslı sıcaklık ölçüm sisteminin kurulumu için fikir vermesi açısından önem taşımaktadır.

Şekillendirme sıcaklıklarının ve malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımının tespiti için gerçekleştirilen diğer çalışmalar da sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve analitik modeller ile analizler gerçekleştirilmiştir [2,17,19-23]. SEY ve analitik modellerden elde edilen genel sonuç, ıstapmanın malzeme dayanımını arttırması için soğutulduğu ve kalıp ile baskı plakasının malzemede akma dayanımını düşürmesi için ısıtıldığı izotermal olmayan koşullarda şekillendirilebilirliğin arttığı şeklindedir. Deneysel sonuçlar ile SEY sonuçları arasındaki farkın kalıp elemanları ile malzeme arasındaki temas şartlarının yeterince tanımlanamamasından kaynaklandığı belirtilmiştir [22,23]. Bu sonuç kalıp sıcaklıkları ile iş parçası malzemesi sıcaklıkları arasında tutarsızlık bulunduğu yönündeki kanıtı desteklemektedir. El-Morsy ve Manabe deformasyon

süresince derin çekilen kap boyunca oluşan tahmini sıcaklık dağılımını araştırmışlar ve limit çekme oranının flanş bölgesinde sıcaklığı 300 °C’de, kap duvarı bölgesinde 20 °C ile 300 °C arasında, malzeme merkezinde ise 20 °C’de tutarak arttırılabileceğini belirtmişlerdir [20]. Elde edilen değerlerin proses parametresi olarak araştırılması sayısal analiz yöntemiyle mümkündür. Fakat takım tasarımının karmaşıklığı ve kalıp içinde sıcaklık kontrolünün zorluğu nedeniyle belirtilen sıcaklıkların gerçek deneylerde malzeme üzerinden oluşturulması çok güçtür. Bu güçlük konusunda en kayda değer sonuç Chen ve ark. tarafından belirtilmiştir [23]. Chen ve ark. sonlu elemanlar yöntemindeki kısıtlamaların takım sıcaklıklarının iş parçası malzemesi olarak kullanılmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [23]. Deneysel ve sayısal çalışmalarda elde edilen ortak sonuç malzeme üzerinde sıcaklık gradyanı oluşturmanın gerekliliği üzerinedir. Fakat çalışmalarda eksik kalan kısım sıcaklık gradyanının karakteristiğinin, nümerik değerlerinin ve trendinin belirsizliğidir.

Bu deneysel çalışmada, kapalı ve ısıtılmış kalıp koşulları altında malzemenin farklı bölgelerinden sıcaklık ölçümü gerçekleştirebilmek için iş parçası malzemesi ile aynı kalınlığa sahip indeks malzeme geliştirilmiştir. İndeks malzemedan elde edilen malzeme sıcaklığı verileri izotermal olmayan koşullar nedeniyle eğriler yoluyla ifade edilmiştir. Şekillendirme sıcaklığı eğrileri olarak adlandırılan bu eğriler ileri bölümlerde detaylı olarak analiz edilmiş ve tartışılmıştır.

Ilık derin çekme prosesinde sıcaklıkla beraber etkili diğer proses parametreleri baskı levhası kuvveti, ıstampa hızı, şekil değiştirme oranı, yağlama koşulları, malzemenin içyapısı, malzemeye uygulanan ısıl işlem, derin çekme oranı, sac kalınlığı ve takım geometrisidir (kalıp ve ıstampa radyüsü ile kalıp açıklığı). Sonuçları ölçülebilir ve kararlı bir derin çekme prosesi için proses parametreleri hatasız derin çekilebilirliği sağlayacak şekilde seçilmelidir. Hatasız derin çekilebilirlik kavramından amaçlanan işlem sonrası flanş kalmaması ve derin çekilmiş numunede yırtılma, çatlak ve marullanma kusurlarının gözlenmemesidir [1]. Hata oluşmuş numunelerde kusurdan dolayı kap kalınlık dağılımı, birim şekil değiştirme dağılımı, geri yaylanma ve kap yüksekliği parametrelerinin ölçülmesi kısıtlanmaktadır. Çıkış parametrelerinin kararsızlığı istatistiki metotların uygulanabilirliğini de kısıtlamaktadır. Bu nedenle, tutarlı çıkış parametreleri elde edebilmek için kararlı giriş parametrelerinin

belirlenmesi prosesin analizi için temel unsurdur. Literatürde, ılık derin çekme prosesi için güvenilir proses parametrelerinin belirlendiği yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Tari ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada hatasız kap elde etmek için sadece sıcaklık parametresi açısından güvenilir aralık değerleri belirtilmiştir [8]. Diğer proses parametreleri içinde güvenilir parametre aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir.

Tez çalışması kapsamında ŞSE'lerin karakteristik özellikleri ve güvenilir proses parametresi aralıklarının belirlenmesi için AA5754-O, AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemeleri ile izotermal olmayan koşullarda ılık derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Güvenilir şekillendirme parametreleri, ŞSE'ler, baskı levhası kuvveti ve ıstampa hızı parametrelerinin giriş parametresi olarak tasarlandığı deneylerde çıkış parametreleri olarak yırtılma, marullanma ve minimum kap yüksekliği değerleri analiz edilerek incelenmiştir. ŞSE'lerin optimum seviyeleri kap hacmi ve geri yaylanma parametreleri ölçülerek belirlenmiştir. Optimum seviyelerin anlamlılığı için ANOVA tekniği kullanılmıştır.

ŞSE'ler üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları içinde optimum değerler araştırılmıştır. Bu amaçla her bir sıcaklık eğrisi üzerindeki ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı değerleri hesaplanmış ve elde edilen fark değerlerinin optimum eğriye göre trendleri belirlenmiştir. Sıcaklık trendlerinden ilgili noktanın daha fazla ısınmaya veya daha fazla soğutulmaya olan ihtiyacı belirlenmiş ve optimum şekillendirilebilirlik için ulaşılması gereken ideal sıcak dereceleri akma eğrilerinden faydalanılarak elde edilmiştir. Burada ideal sıcaklık kavramının kullanılmasının nedeni, belirlenen sıcaklıkların elde edilebilmesi için ısıtma ve soğutma sistemleriyle beraber yeniden kalıp tasarımına ihtiyaç duyulmasıdır. Teorik olarak ideal sıcaklıklar belirlenmiş olsa da, bu sıcaklıkların kalıp altında elde edilebilirliği yeni bilimsel çalışmalara bağlıdır.

Tezin birinci bölümünde çalışmanın gerekliliği ve özgün değeri, ikinci bölümünde literatür araştırması, üçüncü bölümünde ısıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme kalıplarının tasarımı ve imalatı, dördüncü bölümde ise sıcaklık ölçümü için indeks malzemenin geliştirilmesi, malzeme yüzeyinden sıcaklık ölçümü, soğutma suyu davranışının tespiti ve ŞSE eğrilerinin elde edilmesi detaylı olarak anlatılmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde deney tasarımları, sonuç değerlendirme algoritması ve kullanılan ölçüm sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde ŞSE eğrileri proses parametresi olarak kullanılarak eğrilerin proses üzerinde olan etkileri belirlenmiş ve hatasız şekillendirilebilirliği sağlayan güvenilir proses parametreleri elde edilmiştir. Parametre çalışmasının devamı olarak parametrik optimizasyon uygulaması yapılmış ve optimum şekillendirme sıcaklıkları belirlenmiştir. AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının limit derin çekme oranları, geliştirilen ŞSE'ler kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca ılık derin çekilmiş kapların kalınlık değişimleri incelenmiş ve kap kalınlığı açısından kritik görülen bölgelere ait SEM görüntüleri alınarak mikro çatlak oluşumu analiz edilmiştir. Çalışmanın yedinci bölümünde sonuç ve öneriler verilmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 2.1. GİRİŞ

Ilık derin çekme prosesi, yüksek spesifik mukavemete, korozyon dayanımına ve kaynağa uygunluk özelliğine sahip olan Al-Mg alaşımlarının şekillendirilebilme kabiliyetini arttırmaktan dolayı araştırma kurumları ve global öneme sahip endüstriler için ar-ge faaliyetlerine konu olmaktadır. Prosesin henüz sanayi uygulaması açısından profesyonel bir örneği olmasa da, gelişmiş sanayi ülkelerindeki hafif konstrüksiyonlar ile enerji tasarrufu sağlamaya yönelik yaklaşım prosesin önemini arttırmaktadır [24]. Ayrıca Al-Mg alaşımlarının şekillendirmesinde yüzey kalitesi için sorun teşkil eden Lüder bantları probleminin ılık şekillendirme koşullarında (175 °C ve üstü) ve uygun şekil değiştirme hızlarında ( $= 0,0083 \text{ s}^{-1}$ ) deformasyon ile ortadan kalktığı belirlenmiştir [25]. Yüzey kalitesi probleminin önlenmesi özellikle otomotiv, elektronik, beyaz eşya gibi görüntü odaklı endüstriler için prosesi daha önemli konuma getirmiştir. Otomotiv üreticileri açısından alüminyum kullanımının araç ağırlığına %25 oranında olumlu etki ettiği ve her bir kilogram (kg) alüminyumun fazladan 2 kg çelik kullanımı ve 10 kg CO<sub>2</sub> salınımını engellediği belirtilmiştir [26]. Al-Mg alaşımlarının diğer bir avantajı da geri dönüşüm kabiliyetleridir. Al-Mg alaşımlarının geri dönüşüm özelliklerinin demir içeren metallere göre daha iyi olduğu ve daha az enerji ile geri dönüşümlerinin sağlanabildiği literatürde belirtilmiştir [27,28]. Sillekens ve arkadaşları geri dönüşüm yoluyla üretilmiş AA5017 alaşımının şekillendirilme kabiliyetini incelemişler ve geri dönüşüm prosesinin şekillendirilebilirliği çok fazla etkilemediğini belirlemişlerdir [29].

Ilık derin çekme prosesinin temel elemanı kalıplardır. Kalıp imalatı bilindiği gibi ağırlıklı olarak tecrübe ve deneme yoluyla gerçekleştirilmektedir. Kalıp ölçülerinin

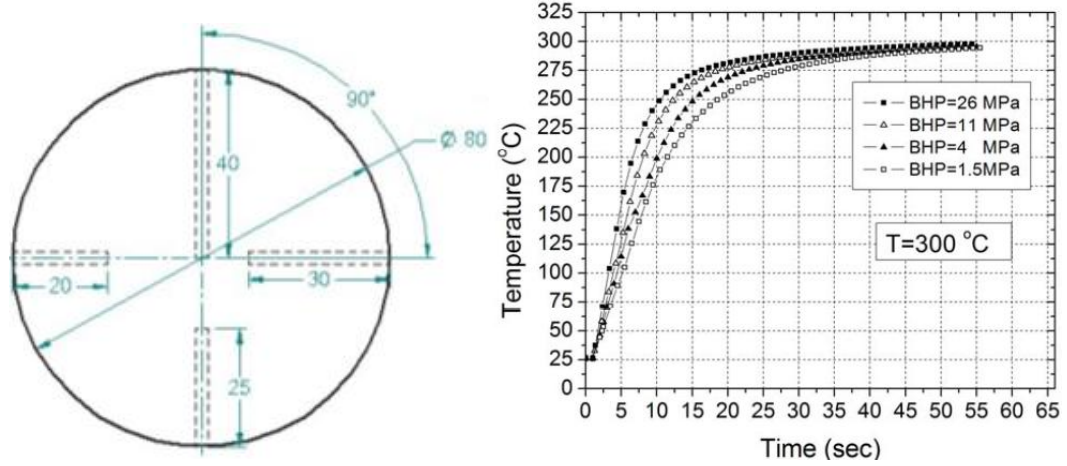
belirlenmesi amacıyla ampirik formüllerden yararlanılmakta fakat en uygun ölçüler yine kalıp tasarımcısı veya imalatçısı tarafından sezgisel olarak belirlenmektedir [24]. Ilık işlem şartlarında kalıp parametresinin yanında termal faktörlerde şekillenme üzerinde yüksek öneme sahiptir. Bu sebeple ılık şekillendirme kalıbı tasarımı ve imalatı için sıcaklığın proses üzerindeki etkileri de dikkate alınmak zorundadır. Sıcaklığın şekillenme üzerine etkisi konusunda bilgi sahibi olabilmek; kalıp, baskı plakası, ıstamp ve iş parçası malzemesindeki sıcaklık değerlerinin ölçümü ve malzeme yüzeyindeki sıcaklık dağılımının tespiti ile mümkündür. Burada ortaya çıkan temel sorun takım sıcaklıklarının şekillenme sıcaklığı olarak kabul edilebilirliği ve malzeme yüzey sıcaklıklarının kapalı kalıp koşulları altında ölçülebilmesidir. Çizelge 1.1’de verilen sıcaklık aralıkları kalıp sıcaklıklarının şekillenme sıcaklığı olarak kullanılabilirliğinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Bu sebeple gerçek şekillenme sıcaklıklarının tespiti için iş parçası malzemesi sıcaklıklarının belirlenmesi ve izotermal olmayan koşullarda çalışılıyor ise malzeme üzerinde oluşacak sıcaklık gradyanının davranışının tespit edilmesi gerekmektedir. Sıcaklık parametresinin doğru tespiti sayısal analizler için de büyük önem taşımaktadır. Ilık şekillendirme prosesinde sonlu elemanlar analizi uygulamaları tasarımcıya şekillenme davranışı hakkında bilgi sağlamaktadır. Sonlu elemanlar modelleriyle kalıp davranışının önceden belirlenebilir olması zaman ve maliyet açısından kalıp tasarımcısına-imalatçısına fayda sağlayabilecektir. Sonlu elemanlar modellerinin güvenilirliği modele doğru verilerin girilmesiyle mümkündür. Doğru verilerin elde edilebilmesi için analiz edilen şekillendirme sistemindeki şekil değiştirme hızı, sürtünme katsayısı ve sıcaklık verilerinin doğru tespit edilebilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı ılık derin çekme prosesi için iş parçası malzemesi sıcaklıklarının kapalı kalıp koşulları altında (gerçek şekillendirme şartları altında) doğru tespit edilebilmesini sağlamak ve bu değerlerin proses üzerindeki etkisini belirlemek ve optimize etmektir. Çalışmanın literatür taraması bölümünde ilk olarak ılık şekillendirme koşullarında sıcaklık ölçümü ile ilgili literatür bilgisi verilmiştir. Ilık şekillendirme prosesinin sanayi uygulamalarının zayıf olması prosesin teknolojisi hakkında da çalışma yapılması gerekliliğini göstermektedir. Bu sebeple literatür taraması bölümünde ısıtma ve soğutma sistemleri entegreli ılık derin çekme kalıplarının teknolojisi için yapılan çalışmalar da değerlendirilmiştir. Tez çalışması

kapsamında AA5754-O, AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemelerinin kullanılmasından dolayı proses parametrelerinin ilgili malzemelerin ılık derin çekilmesinde çıkış parametreleri üzerine olan etkileri konusunda elde edilen literatür verileri kapsamlı olarak analiz edilmiştir. ılık derin çekme prosesinin bir diğer adımı şekillendirilecek malzemenin özellikleri hakkında bilgi sahibi olunması gerekliliğidir. Bu sebeple ılık şekillendirilebilecek malzemelerin karakteristik özellikleri hakkında da literatür çalışması gerçekleştirilmiştir.

## **2.2. AL-MG ALAŞIMLARININ ILIK DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR**

ılık derin çekme prosesinde sıcaklık parametresinin tespiti ve analizi ile ilgili en kayda değer çalışma Kaya ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. AA 5754-O ve Mg AZ31-O alaşımlarının izotermal olmayan koşullarda ılık derin çekilebilirliği servomotor kontrollü pres kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada yağlayıcı etkisi, kap kalınlığı değişimi ve limit çekme oranları analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre AA5754-O malzeme için 300 °C sıcaklıkta ve 2,5 mm/s ıstampa hızında 2,9 limit çekme oranına ulaşıldığı belirtilmiştir. Malzemelerin ısıtılmış kalıp koşulları altında şekillenme öncesi ne kadar süreyle bekletilmesi gerekliliğinin belirlenmesi için fikstür malzeme geliştirilerek farklı baskı levhası basınçları altında sıcaklık-zaman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Fikstür malzemenin hazırlanması için 3 mm kalınlığında 80 mm çapında Al sac metal malzemeye 2 mm delik çapında, kalınlığa dik doğrultuda 20, 25, 30 ve 40 mm derinliklerde delikler açılmıştır (Şekil 2.1). Deneylerde E tipi termokuplla 40 mm derinlikte sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu nokta şekillendirilecek iş parçası malzemesinin merkez noktasını göstermektedir. Şekil 2.1’de kalıp sıcaklığının 300 °C olduğu koşullarda farklı baskı plakası basınçlarına göre elde edilmiş sıcaklık-zaman eğrileri verilmiştir. Fikstür malzeme 26 MPa baskı levhası basıncında 250 °C sıcaklığa 1,5 MPa baskı levhası basıncında ulaştığı süreye göre 7 saniye daha erken ulaşmıştır. Ayrıca 250, 275 ve 300 °C kalıp sıcaklıklarında ıstampada ve numuneyi kalıptan çıkarıcı elemanda sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Ölçüm sonuçları, kalıp elemanlarında sıcaklık artışıyla orantılı olarak ıstampanın 50-70 °C aralığında sıcaklık değerlerine ulaştığını, çıkarıcı elemanın ise 70-90 °C aralığında sıcaklık değerlerine ulaştığını göstermektedir [1,9].



Şekil 2.1. Fikstür malzeme ve sıcaklık-zaman eğrileri [1,9].

Kaya ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma, kalıp içi sıcaklık ölçümünün nasıl gerçekleştirilebileceği konusunda araştırmacılara fikir veren özgün bir çalışmadır. Ancak ilgili çalışmada sadece malzeme merkezinin sıcaklığı ölçülmüş ve 3 mm kalınlığında bir fikstür malzeme kullanılmıştır. Şekil 2.1’de görülen 4 farklı nokta, termokuplları değil sadece malzemeye açılmış kanalları göstermektedir. İş parçası olarak kullanılan malzeme ise 1,3 mm kalınlığındadır. Sıcaklığın iş parçası malzemesi üzerinde dağılımında kalınlığın etkisi ihmal edilebilir boyutta değildir. Bu sebeple gerçekleştirilen ölçümlerin malzemenin gerçek şekillendirme sıcaklıkları hakkında net bilgiyi verebilmesi mümkün değildir. Ayrıca ölçüm yapılan değerler sadece malzemenin ısınma süresi hakkında bilgi sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Tez çalışmamızın deneysel kısmında fark ettiğimiz problemlerden birisi de malzemenin ısınma süresi ile malzemenin mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişimi için gerekli sürenin farklı olduğudur. Tez çalışması kapsamında yapılan ölçümlerde malzemenin 300 °C sıcaklığa saniyeler içinde ulaşabildiği belirlenmiştir. Fakat 300 °C derecedeki sıcaklıkta göstermesi gereken mekanik davranış için 2 dakika veya daha fazla süre termal etkiye maruz kalması gerekmektedir.

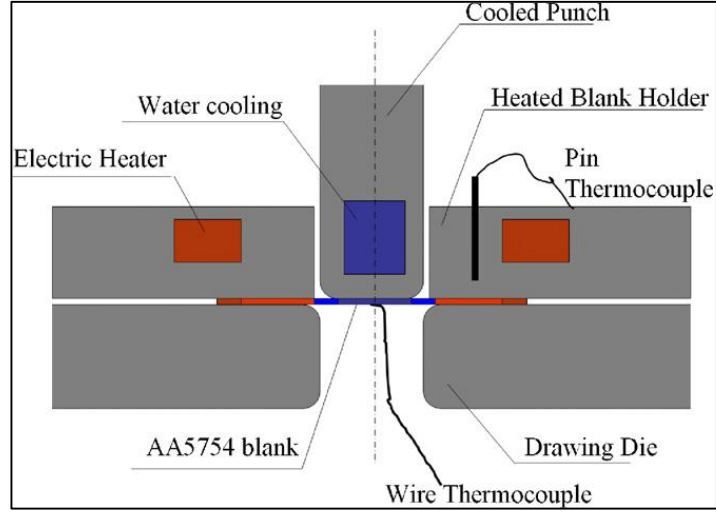
Tez çalışması kapsamında kullanılan indeks malzeme Kaya ve arkadaşları tarafından önerilen fikstür malzeme yaklaşımı temel alınarak geliştirilmiştir ve ılık derin çekme prosesi için temel sorunlardan biri olan gerçek şekillendirme sıcaklıklarının tespitinde kullanılmıştır. İndeks malzeme geliştirilirken iş parçası ile aynı kalınlığa sahip malzeme seçilmiş ve malzeme üzerinde, çap boyunca, sıcaklık değerlerinin kapalı



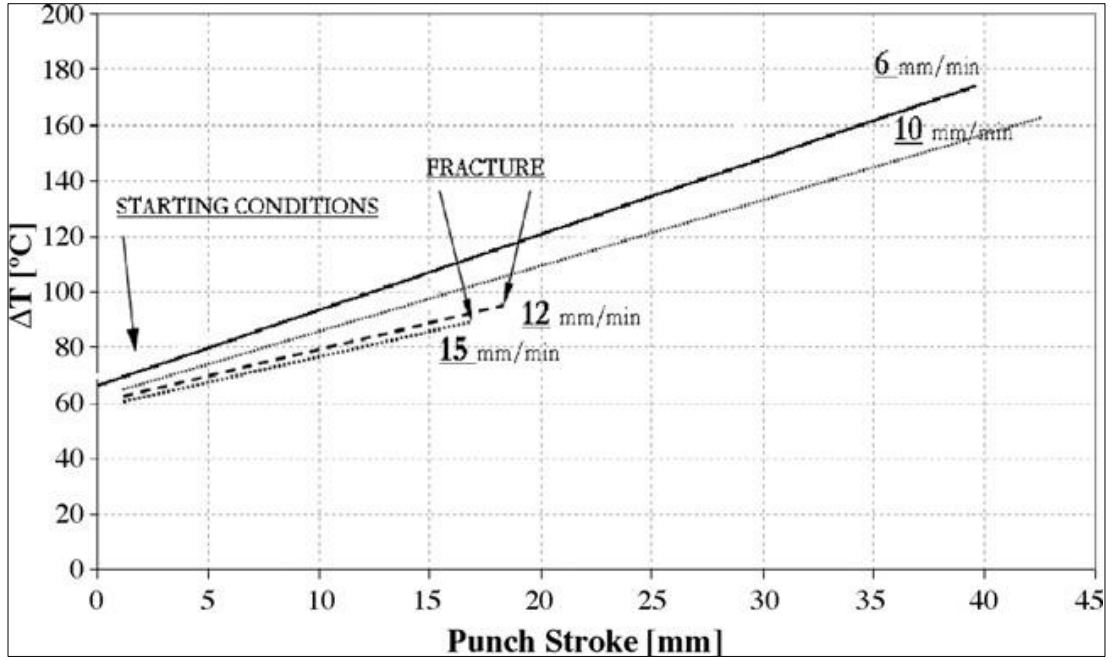
kalıp koşulları altında termokupullar ile ölçülebileceği kanallar açılmıştır. Bu sayede izotermal olmayan sıcaklık koşulları da karakterize edilebilmiştir.

Palumbo ve Tricarico yaptıkları çalışmada 0.8 mm kalınlığında AA5754-O sac metal alaşımının ılık derin çekilebilirliğini araştırmışlardır. Giriş parametresi olarak iş parçası malzemesinin merkez sıcaklığı ve şekillendirme hızı parametreleri kullanılmıştır. Isıtma işlemi için baskı plakasında 1 kW'lık rezistans çubuk kullanılmış ve 100-250 °C baskı levhası sıcaklığı aralığından şekillendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümü kalıp radyüsü ile malzeme merkezine yerleştirilen termokupullar ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2). Soğutma işlemi 20-25 °C sıcaklık aralığında su ile gerçekleştirilmiş ve akış oranının soğutma verimliliği üzerindeki etkisini ölçmek için 3 farklı debide (7, 14 ve 21 ml/s) ölçüm yapılmıştır. Baskı plakası 250 °C sıcaklığa ulaştığında malzeme merkez sıcaklığının her bir soğutma debisinde 110 °C sıcaklığa ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuç soğutma suyu debisinin sıcaklık değişimi üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını göstermektedir. Limit şekillendirme oranı deneyleri malzeme merkezi sıcaklığının 80, 110 ve 125 °C olduğu koşullarda, şekillendirme hızının etkisinin ölçüldüğü deneyler ise malzeme merkezi ile baskı levhası sıcaklık farkının 60 °C olduğu koşulda gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme hızı arttıkça derin çekme işlemi boyunca sıcaklık farkının arttığı belirtilmiş ve bu durumun malzemenin derin çekildikçe flanş bölgesi ile temas mesafesinin azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Şekil 2.3) [19].

Şekillendirme hızının etkisini belirlemek için ıstampa mesafesinin ve şekillendirme kuvvetinin ölçüldüğü deneylerde, yüksek şekillendirme hızlarının yırtılma kusuru oluşturduğu ve şekillendirme hızı sınırının maksimum 10 mm/dak olduğu belirtilmiştir. Limit şekillendirme oranı için yapılan çalışmada ise malzeme merkez sıcaklığının 110 °C ve şekillendirme hızının 1 mm/dak olduğu koşullarda 2,85 ile maksimum şekillendirme oranına ulaşıldığı belirtilmiştir. Farklı şekillendirme hızlarında ve farklı malzeme merkez sıcaklığı değerlerinde ulaşılan çekme oranları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



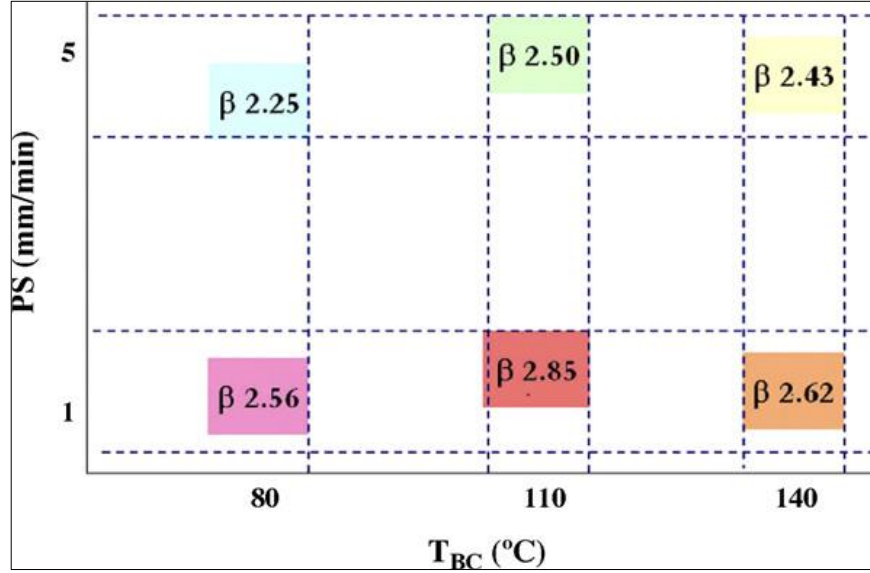
Şekil 2.2. Ilık derin çekme sistemi için belirlenen sıcaklık ölçüm noktaları [19].



Şekil 2.3. Farklı şekillendirme hızlarında derin çekme prosesi esnasında oluşan sıcaklık farkı değerleri [19].

Palumbo ve Tricarico'nun yaptıkları çalışma, malzeme yüzeyinde sadece merkez sıcaklığının tespit edilebilmesinden dolayı şekillendirme sıcaklıklarının belirlenmesi açısından yetersiz bir çalışmadır. Baskı levhasından ölçülen sıcaklık değerinin malzemenin flanş bölgesi sıcaklığı olduğunu iddia etmek mümkün değildir. Bu değer, ısıtma ve ölçümün hangi mesafelerde ve hangi tür kalıp malzemesinde yapıldığı belirtilmediği için endüstriyel uygulanabilirlik açısından bir anlam ifade

etmemektedir. Ayrıca belirtilen maksimum şekillenme hızının (saniyede 0,17 mm) AA5754-O malzeme için endüstriyel olarak bir karşılığı yoktur.

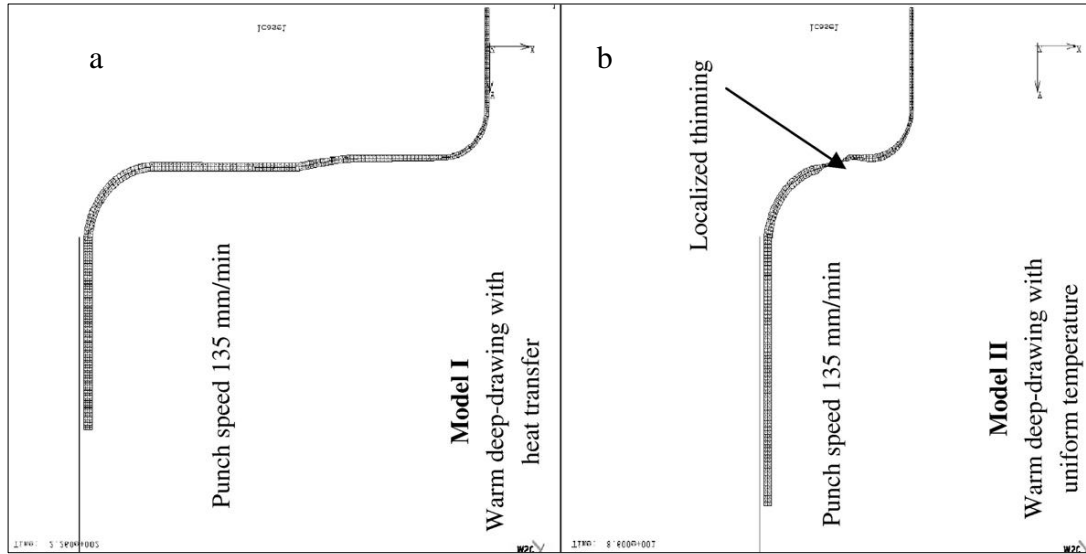


Şekil 2.4. İncelenen proses parametreleri ve ulaşılan derin çekme oranları [19].

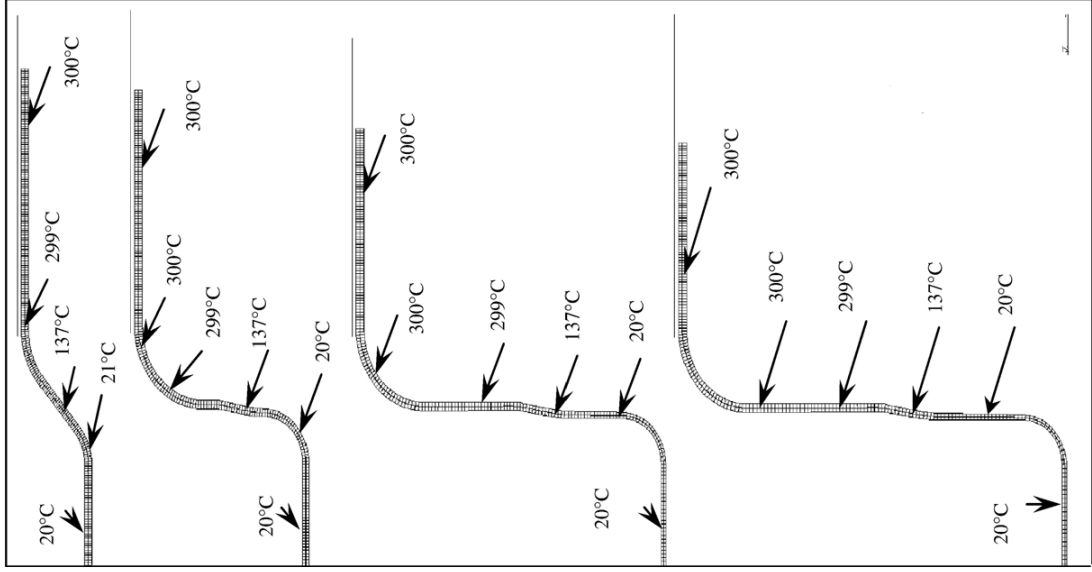
Palumbo ve Tricarico'nun çalışmasında ki eksik noktalar dikkate alınarak mevcut tez çalışması kapsamında malzemenin bütün yüzeyinin sıcaklık değerlerinin ölçülebileceği bir düzenek hazırlanmış ve pres tezgahının üst sınırı olan 7,8 mm/s şekillendirme hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Palumbo ve Tricarico'nun tez çalışmasına yaptığı katkı ise farklı soğutma debilerinin soğutma verimliliğine etkisi olmadığını belirlemiş olmalarıdır. Bu sebeple soğutma sisteminde farklı debilerde araştırma yapılmamış, bütün deneyler boyunca sabit debide çalışılmıştır.

Ilık derin çekme prosesinde sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için sonlu elemanlar analizi kullanılabilir. Malzeme-kalıp arasındaki ısı geçişinin yeteri kadar modellenebildiği analizlerden deneysel sonuçlara yakın verilerin elde edilmesi beklenebilir. Bunun için kalıp malzemesi, iş parçası ve şekillendirme ortamı (atmosfere açık bölgeler) arasındaki iletim ve taşınım ile oluşan ısı transferi için katsayıların doğru belirlenmesi gerekmektedir. El-Morsy ve Manabe sonlu elemanlar analizi ile ısı transfer etkisini dikkate alarak AZ31 magnezyum alaşımının şekillendirilebilirliğini ve şekillenme esnasında malzeme üzerinde oluşacak sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. İnceledikleri birinci sonlu elemanlar modelinde ısı transferi

dikkate alınmış ve kalıp-baskı levhası sıcaklığı 300 °C, malzemenin tamamının sıcaklığı ise 25 °C olarak belirlenmiştir. İkinci sonlu elemanlar modelinde ise ısı transferi dikkate alınmayarak şekillenecek malzeme ile beraber bütün kalıp sisteminin 300 °C sıcaklıkta olduğu dikkate alınmıştır. Simülasyon modelleri ısı transferi etkisinin Mg alaşımının derin çekilebilirliği için etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir. Birinci modelde derin çekilen malzemeler bölgesel incelemeler olmadan derin çekilebilmiş ve kap yüksekliği ikinci modele oranla çok daha yüksek değerlerde elde edilebilmiştir. 135 mm/dak ıstampa hızında ısı transfer etkisinin dikkate alındığı simülasyon sonucu oluşan kap formu ile 135 mm/dak ıstampa hızında eşit dağılımlı sıcaklık koşullarında oluşan kap formu ve bölgesel incelleme kusuru Şekil 2.5'te verilmiştir. Çalışmada 135 mm/dak ıstampa hızında deforme olan kap boyunca oluşan sıcaklık dağılımları da analiz edilmiştir (Şekil 2.6). Ayrıca farklı ıstampa hızlarının sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiş ve ıstampa hızı artışının kap tabanında sıcaklığı arttırdığı analiz edilmiştir. Kap tabanında sıcaklık artışı mukavemet azalmasına sebebiyet vereceği için bu bölgede incelleme kusurunun oluşacağı belirtilmiştir. Düşük ıstampa hızında elde edilen maksimum kap yüksekliği değerleri yüksek ıstampa hızında elde edilenden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, ısı transferi etkisinin düşük ıstampa hızlarında temas süresinin uzun olmasından dolayı kap tabanını soğutma açısından daha etkili olabileceği ile açıklanmıştır [20].



Şekil 2.5. AZ31 için ılık derin çekme simülasyonları a) Isı transfer etkisinin dikkate alındığı koşullar, b) Eşit dağılımlı sıcaklık koşulları [20].



Şekil 2.6. 135 mm/dak ıstampa hızında derin çekme esnasında oluşan sıcaklık dağılımı [20].

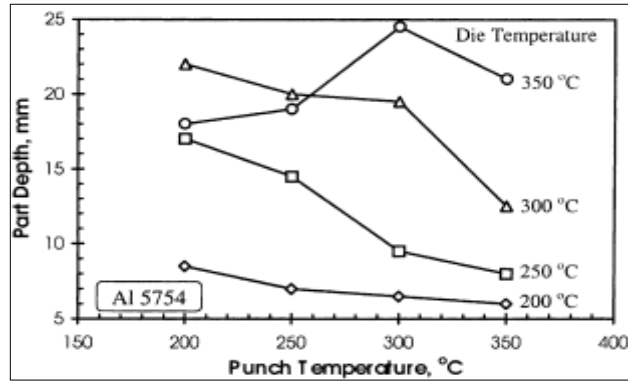
El-Morsy ve Manabe'nin yaptığı çalışma, şekillendirmenin malzeme üzerinde oluşan sıcaklık gradyanına göre değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Yapılan analizlerle kalıp sıcaklıklarına göre malzeme yüzeyindeki sıcaklık dağılımı sayısal olarak elde edilebilmiştir. Çalışmada eksik görülen kısım, çalışmanın deneysel verilerle yeteri kadar desteklenmemiş olmasıdır. Sadece şekillendirme hızının etkisi konusunda literatüre atıf yapılarak elde edilen bulgular desteklenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, elde edilen sıcaklık dağılımları, metalik malzemelerin ısı iletkenlik özellikleri dikkate alınarak incelendiğinde ısı transferi açısından izah edilebilirliği düşük değerlerin elde edildiği görülmektedir. İstampa duvarının kap tabanına yakın bölgelerinde sıcaklık değeri 137 °C iken, ıstampa radyüsü bölgesinde bu değerin 20 °C'ye düştüğü ve kap tabanı boyunca 20 °C olarak sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 2.6). Deneysel çalışma şartları altında böyle bir gradyenin elde edilebilirliği ancak çok kontrollü ısıtma ve soğutma sistemlerine sahip kalıplarda muhtemelen mümkün olabilir. Burada muhtemelen kelimesinden kasıt, kalıpta ısıtma soğutma sağlansa bile belirtilen gradyanın elde edilebilirliğinin belirsiz olmasıdır. Metalik bir malzemede, eğri üzerinde maksimum 3-4 cm'lik bir mesafede belirtilen sıcaklık farklarının oluşturulabilmesi izah edilebilirliği güç bir durumdur. Literatürdeki bu açığın kapatılabilmesi için deneysel olarak malzeme üzerinde oluşan sıcaklık dağılımının tespit edilmesi gerekmektedir.

Şekillendirme sıcaklığının alüminyum alaşımlarının derin çekilmesinde proses limitleri üzerindeki etkisi (AA1050, AA5754 ve AA6016), Bolt ve ark. tarafından kutu ve konik dikdörtgen geometride parçaların derin çekilmesi yoluyla araştırılmıştır. Deneysel sonuçları özellikle konik numuneler için şekillendirme işleminde yüksek sıcaklıkların numune yüksekliğini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca derin çekilmiş numunelerde sertlik değişimi araştırılmış ve elde edilen değerlerin oda sıcaklığında elde edilen değerlerden önemli bir farklılığı olmadığı görülmüştür. Kutu şeklinde derin çekme işleminde maksimum kap yüksekliği kalıp sıcaklığının 175 °C olduğu konumda %25 arttırılmıştır. Çalışma sonucunda takım elemanlarının bölgesel ısıtılması ve soğutulması konusunda çalışma yapılmasının gerekliliği belirtilmiştir [11].

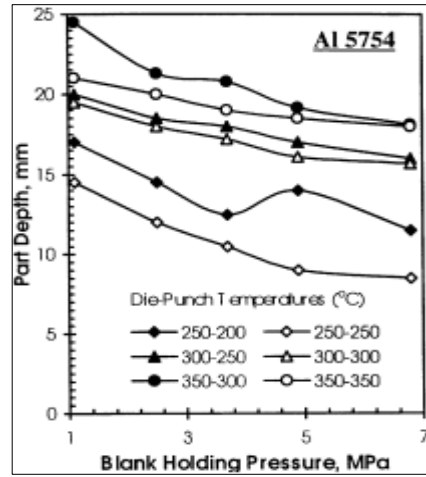
Li ve Ghosh, otomotiv parçası üretimi için kullanılan AA5754, AA5182 ve AA6111-T4 alaşımlarının iki eksenli ılık şekillendirme davranışını 200-350 °C sıcaklık aralığında incelemiştir. İzotermal koşullarda ve izotermal olmayan koşullarda gerçekleştirilen deneylerde, kalıp sıcaklığının ıstampa sıcaklığından nispeten daha fazla olduğu durumlarda şekillendirilebilirliğin arttığı belirlenmiştir. AA5754 malzemenin derin çekilebilirliği kap derinliği parametresi kullanılarak ölçülmüştür. İstampa sıcaklığının kalıp sıcaklığından yüksek olduğu durumlarda genel olarak kap derinliğinin düştüğü görülmüştür. İstampa sıcaklığının kalıp sıcaklığına eşit ve daha düşük olduğu durumlarda ise kap derinliğinde artış görülmüştür. Kalıp sıcaklığının 350 °C değerine çıkması ise artan şekil değiştirme hassasiyeti nedeniyle kap derinliğini olumsuz etkilemiştir [30].

Çalışmada farklı sıcaklık koşullarında baskı levhası basıncının kap derinliğine olan etkisi de incelenmiştir (Şekil 2.8). Artan baskı levhası basıncının sac metalin kalıp boşluğuna akmasında güçlük oluşturması sebebiyle kap yüksekliklerinde azalmaya neden olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, düşük sıcaklık değerlerinde oluşan marullanma kusurunun kap derinliğinin azalmasına sebebiyet verdiğini göstermektedir. Çalışmada optimum baskı levhası basıncının 1,1 MPa değerinden büyük olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, derin çekilmiş kapların tabanlarından çekme numunesi çıkartılarak çekme deneyleri yapılmıştır. Farklı ıstampa-kalıp sıcaklıkları referans alınarak sabit baskı levhası basıncı altında çekilen numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 2.9). Sabit kalıp

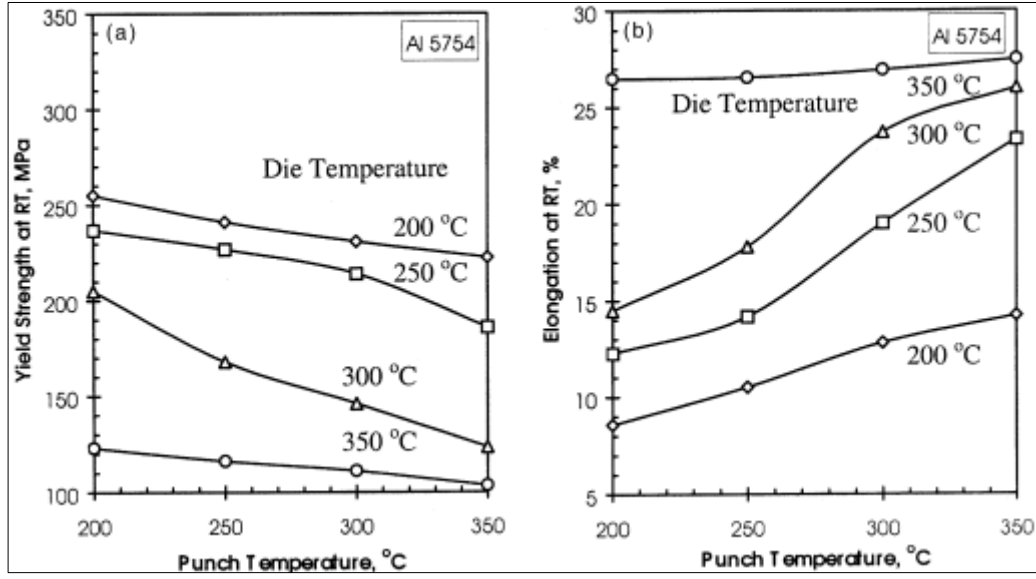
sıcaklığında ıstampacı sıcaklı artışı ile akma dayanımı düşmektedir. Benzer etki sabit ıstampacı sıcaklıklarında kalıp sıcaklığı artışı da görülmektedir. Uzama değerlerinin de akma dayanımının tersine sıcaklık arttıkça arttığı Şekil 2.9’da görülmektedir. ıstampacı sıcaklığının minimum ve kalıp sıcaklığının maksimum olduğu koşullarda minimum akma dayanımı ve maksimum uzama değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, derin çekme işleminde flanş bölgesi ile kap tabanı bölgesinde oluşturulması gereken sıcaklık değerleri için referans niteliğindedir.



Şekil 2.7. Kap derinliğinin ıstampacı ve kalıp sıcaklığına göre değişimi [30].



Şekil 2.8. Baskı levhası basıncının farklı sıcaklık koşullarında kap derinliğine etkisi [30].

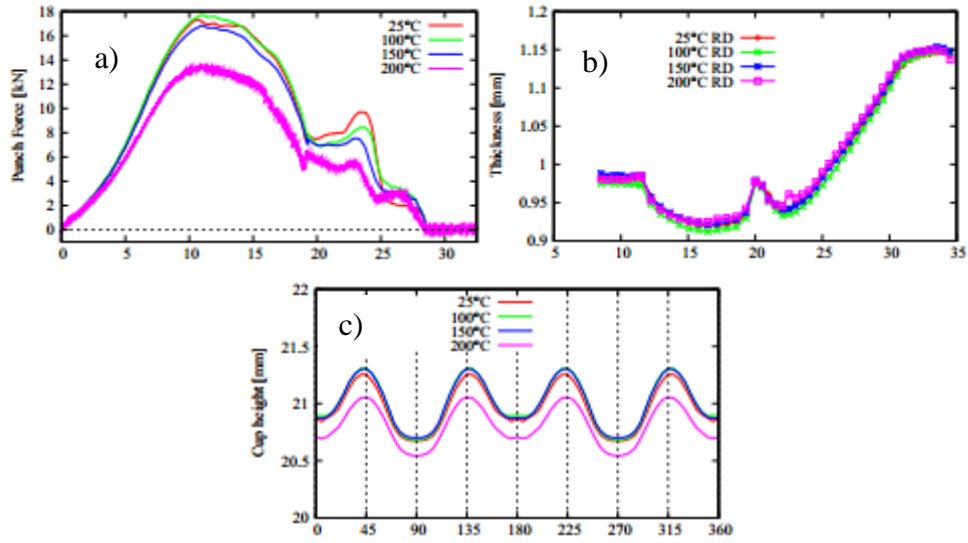


Şekil 2.9. Kalıp-ıstampa sıcaklıklarına bağlı olarak AA5754 için sabit baskı levhası basıncında elde edilen a) akma dayanımı ve b) uzama değerleri [30].

Laurent ve ark. AA5754-O alüminyum alaşımının silindirik kalıpta derin çekilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının Al alaşımı için 350 °C ve altı sıcaklıklar olduğu belirtilen çalışmada kalıp sıcaklıkları için 250 °C ve üstü sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirilmiş, iş parçası malzemesi de kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak 100-200 °C sıcaklık aralığına kadar ısındığı koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Çıkış parametresi olarak ıstampa kuvveti, kalınlık değişimi, geri yaylanma ve kap yüksekliği parametreleri ölçülmüştür. Sıcaklığa göre ıstampa kuvvetinin ıstampa ilerlediği mesafeye göre değişimi Şekil 2.10-a'da verilmiştir. Grafiğe göre 200 °C sıcaklıkta maksimum ıstampa kuvvetinin oda sıcaklığına göre %43 oranında düştüğü belirtilmiştir. Oda sıcaklığı, 100 °C ve 150 °C sıcaklıklarda görülen ıstampa kuvvetleri arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Şekillendirme sıcaklıklarına göre haddeleme doğrultusunda kap duvarı boyunca oluşan kalınlık dağılımı ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.10-b'de verilmiştir. En kritik bölgenin kalıp radyüsünde olduğu belirlenmiş ve kap duvarının en üst kısmının ıstampa-kalıp boşluğuyla eşit mesafede kalınlığa sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, sıcaklığa bağlı olarak kalınlık dağılımında önemli bir farklılık oluşmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple sıcaklığın kap kalınlığı üzerinde ihmal edilebilir etkisi olduğu, kap kalınlığının ise kalıp geometrisine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Şekillendirme sıcaklıklarına bağlı olarak ölçülen kulaklaşma profilleri Şekil 2.10-c'de



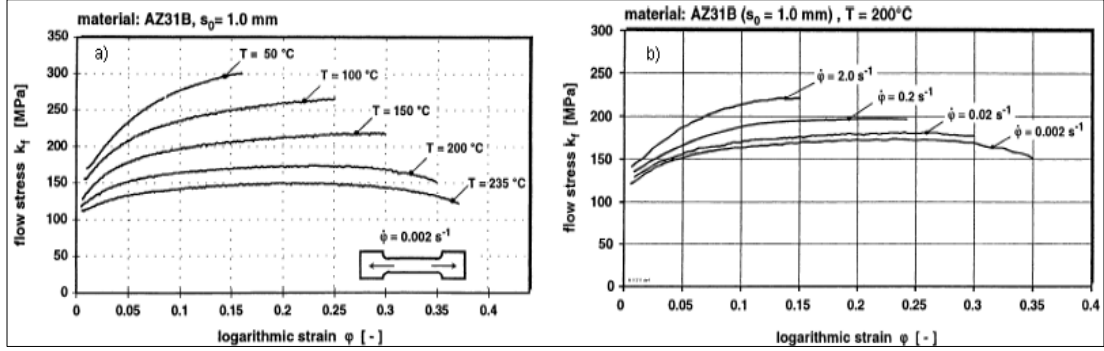
gösterilmiş, sadece 150 °C üstü sıcaklık değerlerinin kulaklaşma profili üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir. 200 °C sıcaklıkta kulaklaşma profilinin genişliğinin düşerek 0,3 mm değerine ulaştığı belirlenmiştir. Geri yaylanma analizinde de benzer şekilde 150 °C'ye kadar anlamlı bir değişme gözlenmemiştir. 200 °C sıcaklıkta ise oda sıcaklığındaki geri yaylanma miktarına göre %20,45 oranında bir azalma olduğu belirlenmiştir [12]. Çalışma kapsamında elde edilen veriler ılık derin çekme davranışının incelendiği çalışmalar için referans alınabilecek niteliktedir.



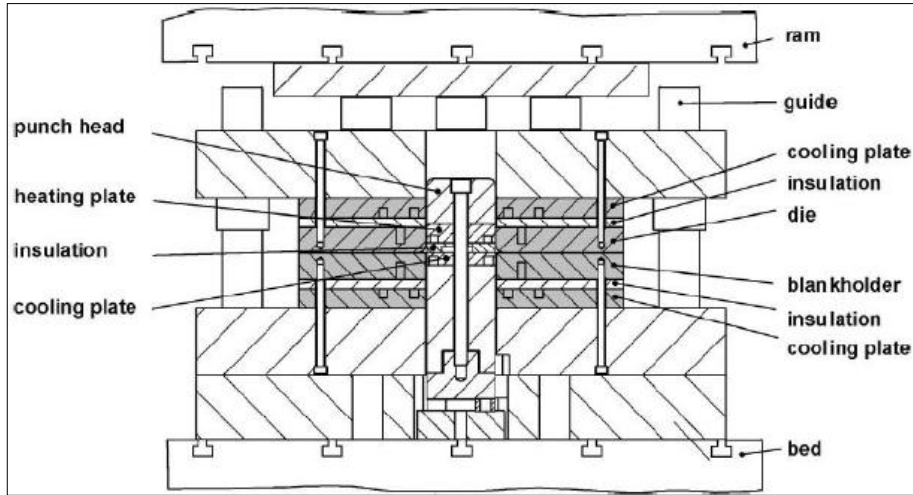
Şekil 2.10. Farklı sıcaklıklarda ılık derin çekme koşullarında a) ıstampa kuvvetinin, b) kalınlık dağılımının, c) kap yüksekliğinin değişimi [12].

Doege ve Dröder magnezyum sac metal levhaların şekillendirilebilirliklerini değerlendirebilmek için farklı sıcaklık ve şekil değiştirme hızlarında çekme deneyleri yapmışlardır. AZ31B, AZ61B ve M1 magnezyum alaşımlarının 50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C ve 235 °C (Şekil 2.11-a) sıcaklık, 0,002 s<sup>-1</sup>, 0,02 s<sup>-1</sup>, 0,2 s<sup>-1</sup> ve 2,0 s<sup>-1</sup> (Şekil 2.11-b) şekil değiştirme hızlarında akma eğrilerini elde etmişlerdir. Şekil değiştirme hızının araştırıldığı deneylerde eğriler, düşük sıcaklık değerlerinde şekil değiştirme hızının düşük olması sebebiyle, 200 °C sıcaklık koşullarında elde edilmiştir. Yapılan derin çekme deneylerinde AZ31B magnezyum alaşımının AZ61B ve M1 magnezyum alaşımlarına göre daha iyi derin çekilebilirliği olduğu ve 200 °C ile 250 °C aralığında 2,52 çekilebilirlik oranına ulaşıldığı belirtilmiştir. Ilık şekillendirme yöntemi için tezgâh ve kalıp tasarımı konusunda sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu sebeple Hannover Üniversitesi Metal Şekillendirme Enstitüsü tarafından, ılık şekillendirme

yönteminde kullanılabilecek bir deney tezgahı geliştirilmiştir (Şekil 2.12). Şekil 2.12'te görülen pres tezgahında kalıp, baskı plakası ve ısıtma elektrikli ısıtma elemanları ile ısıtılmış, bu elemanlardan tezgaha ısı geçişi ise yalıtım tabakaları ve ilave su soğutma kanalları ile önlenmeye çalışılmıştır [31].



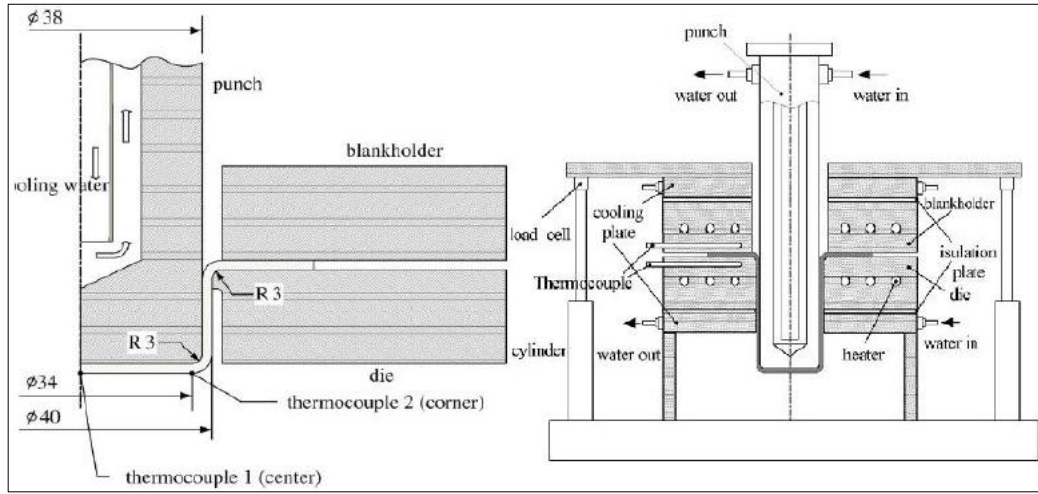
Şekil 2.11. AZ31 alaşımı için elde edilen akma eğrileri a) Sıcaklığa bağımlı olarak tek eksen çekme deneyinde akma eğrilerinin elde edilmesi, b) Şekil değiştirme hızına bağımlı olarak tek eksen çekme deneyinde akma eğrilerinin elde edilmesi [31].



Şekil 2.12. Ilık derin şekillendirme işlemleri için tasarlanmış deney sisteminin şematik görüntüsü [31].

Huang ve arkadaşları, AZ31B magnezyum alaşımının izotermal olmayan koşullarda ve yüksek sıcaklık derecelerinde derin çekilebilirliğini deneysel olarak ve sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemiştir. Deneysel parametreler şekillendirme sıcaklığı, parça kalınlığı ve yağlayıcı olarak belirlenmiştir. 0,5 mm kalınlığında AZ31B magnezyum alaşımlı malzeme için en yüksek sınır şekillendirme oranı 200 °C

sıcaklıkta 2,5 olarak, 0,58 mm kalınlığındaki malzeme için 260 °C sıcaklıkta 2,63 olarak elde edilmiştir. MoS<sub>2</sub> katı yağlayıcının kullanıldığı deneylerde sınır şekillendirme oranının %10 arttığı belirlenmiştir. Deneyler 100, 150, 200, 230, 260 ve 300 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş, sıcaklık kontrolü PID ile sağlanmıştır. Malzeme üzerindeki ısının deney sistemini etkilememesi için yalıtım tabakaları ve su kanalları ile soğutma yapılmış, ıstampa sıcaklığı 10-15 °C aralığında tutulmuştur (Şekil 2.13) [32].

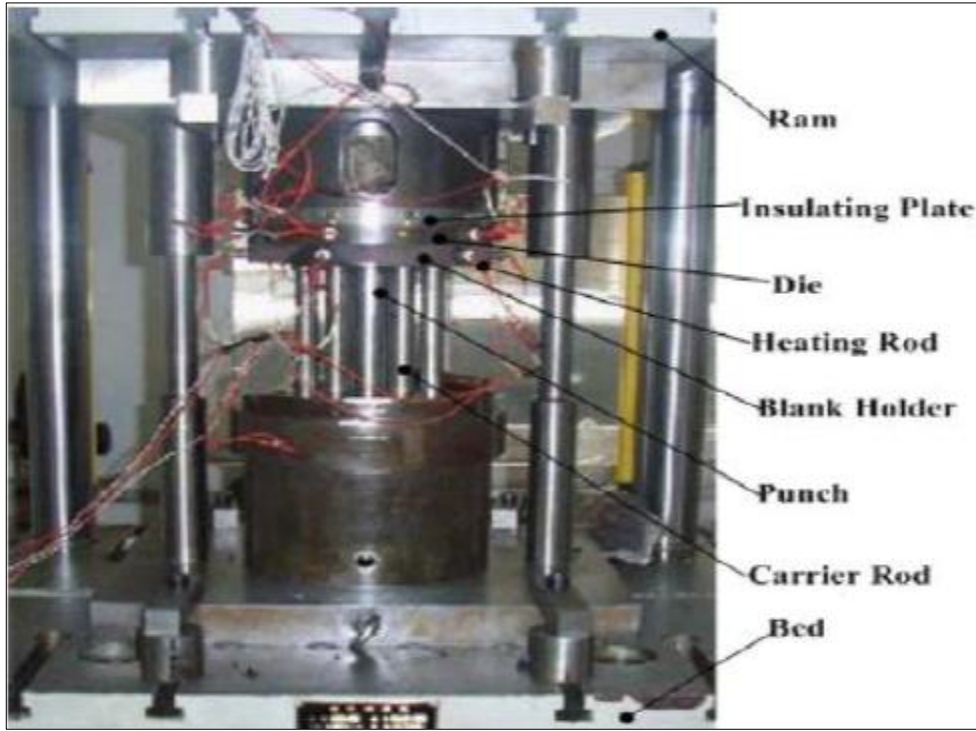


Şekil 2.13. Deney kurulumunun şematik gösterimi [32].

Chang ve arkadaşları AZ31 magnezyum alaşımını ince taneli ve homojen dağılımlı bir içyapıya sahip olacak şekilde mekanik ve ısıl işlemlerden geçirmişler, içyapısı geliştirilen malzemeyi farklı sıcaklık ve şekil değiştirme hızlarında çekme testlerine tabi tutarak malzemenin mekanik özelliklerini belirlemişler ve sınır çekme oranı deneylerini yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre 15 mm/s ıstampa hızında 150 °C sıcaklıkta 2,0 çekme oranı elde edilmiş, 200-300 °C sıcaklık aralığına çıkıldığında ise sınır çekme oranı 3,0 değerine çıkmıştır (Şekil 2.14). İşlem sıcaklığı ve baskı plakası basıncının şekillendirilebilirlik üzerine olan etkileri sonlu elemanlar analizleri ile değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, değişken baskı plakası basıncının sınır çekme oranını %17 oranında arttırdığını, kap duvarı incelme oranını ise %15.21'den %12.35'e düşürdüğünü ortaya koymuştur. PLC kontrol ünitesi ile sıcaklık, baskı plakası basıncı, ıstampa hızı ve strok mesafesinin kontrol edilebildiği deney düzeneği Şekil 2.15'te gösterilmiştir [33].



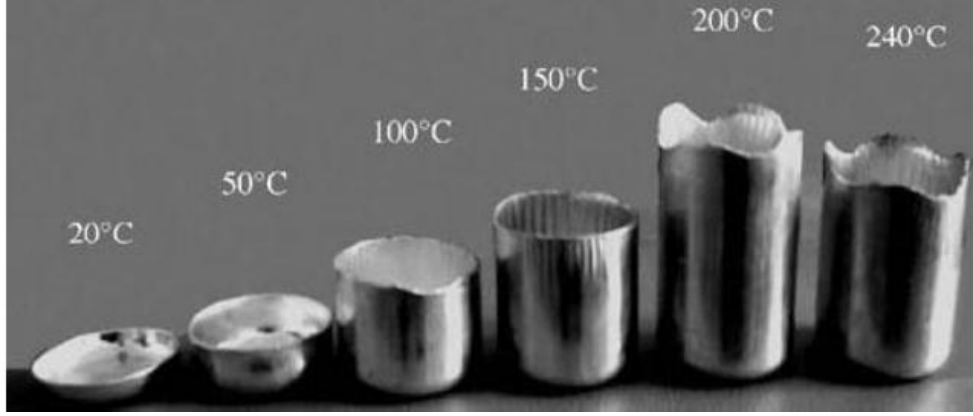
Şekil 2.14. 2, 2.5 ve 3 derin çekme oranlarında çekilmiş numune görüntüleri [33].



Şekil 2.15. PLC kontrollü deney ünitesi görüntüsü [33].

Yoshihara ve arkadaşları oda sıcaklığında şekillendirilmesi çok zor olan magnezyum alaşımlarının şekillendirilebilmesi için bölgesel ısıtma ve soğutma tekniğini geliştirmişlerdir (Şekil 2.16). 0,5 mm kalınlıkta AZ31-O magnezyum alaşımının kullanıldığı deneylerde iş parçası, kalıp ve baskı levhası 400 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış, değişken baskı levhası yükü altında ve 200 mm/dak ıstampa hızında 115 mm kap derinliğine ulaşılmıştır. Bölgesel ısıtma ve soğutma tekniği ile uygun sıcaklık dağılımının sağlanması ve değişken baskı levhası basıncının uygulanması ile



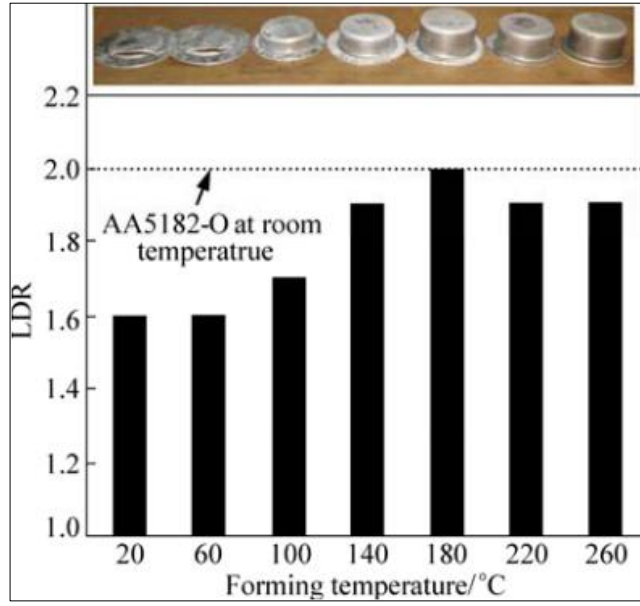


Şekil 2.17. Sıcaklık değişimine göre çekme oranının değişimi [35].

Hui ve arkadaşları AA7075 alaşımının ılık şekillendirilmesini deneysel olarak incelenmişlerdir. Malzemenin derin çekilebilirliği limit çekme oranı deneyleri ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar AA7075 alaşımının derin çekilebilirliğinin, iş parçası sıcaklığının 140-220 °C aralığında olduğu koşullarda önemli oranda arttırılabileceğini göstermektedir. 260 °C üzeri sıcaklık derecelerinde ise termal etkilerin malzemenin sertliğini etkilemesinden dolayı şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Limit çekme oranı deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Sonuçlar, sıcaklık parametresinin derin çekilebilirlik üzerinden yüksek etkisi olduğunu göstermektedir. 100 °C’ye kadar AA7075 numuneler 1,6 derin çekme oranında şekillendirilememiştir. Sıcaklık 140 °C ve üzerine çıktığında ise artan sıcaklıkla birlikte limit çekme oranı da önemli bir artış göstermiştir. Şekillendirme sıcaklığı 180 °C’ye ulaştığında ise limit çekme oranı 2,0 değerine ulaşmıştır. 220 °C ve 260 °C şekillendirme sıcaklıklarında ise limit çekme oranı 1,9 değerine düşmüştür. Elde edilen sonuçlar AA7075 malzeme için optimum limit çekme oranı değerinin ~180 °C olduğunu göstermektedir [36].

Hui ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ılık derin çekme prosesi için sıcaklık parametresini yeteri kadar açıklayamamaktadır [36]. Çalışmada iş parçası malzemeleri kalıp içi ısıtma sistemi ile ısıtılmamıştır. Kalıp dışında ön ısıtıcıda istenilen sıcaklık değerlerine kadar ısıtılan malzemeler sıcak kalıpların içine taşınarak şekillendirme yapılmıştır. Bu durumda çalışma kapsamında belirtilen sıcaklıkları şekillendirme sıcaklıkları olarak değerlendirmek doğru olmayacaktır. Malzemenin fırından çıkartılıp kalıp içine taşınmaya kadar kaybedeceği ısı miktarı belirsizdir. Ayrıca kalıp

sıcaklıkları da belirsizdir. Malzemenin kalıba yerleştirilip, şekillendirme için gerekli diğer parametreler ayarlanıncaya kadar geçen sürede malzeme sıcaklığının kaç dereceye ulaşacağı bilinmemesi proses için belirsizlik oluşturmaktadır. Çalışmanın literatüre katkısı, AA7075 malzemenin derin çekilebilirliği konusunda gerçekleştirilmiş en kapsamlı çalışma olması ve optimum şekillendirme sıcaklıklarının ne olacağı konusunda sonraki araştırmacılara fikir vermesidir.



Şekil 2.18. AA7075 alaşımı için sıcaklıkla limit çekme oranının değişimi [36].

### 2.3. ILIK DERİN ÇEKME İŞLEMİNDE OLUŞABİLECEK KUSURLAR

Ilık derin çekme işleminde oluşabilecek kusurlar ve muhtemel sebepleri Çizelge 2.1’de detaylı olarak verilmiştir [37]. Belirtilen kusurlar ılık derin çekme prosesinin çıkış parametrelerini analiz edebilmek açısından önem taşımaktadır. Çizelge 2.1’e göre proses kalıp geometrisi, malzemenin iç yapısı, malzemenin yüzey kalitesi, yağlama koşulları, sıcaklık, şekillendirme hızı, baskı levhası kuvveti vb. gibi birçok değişkenden ciddi bir şekilde etkilenmektedir. Bu durum ılık derin çekme prosesinin kompleks bir yapıya sahip olduğunu ve oluşabilecek kusurlar nedeniyle analiz edilebilirliğinin güç olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2.1. Çekme işlemi sırasında oluşan hatalar ve muhtemel sebepleri [37].

<b>Hata</b>	<b>Muhtemel Sebepleri</b>
Buruşma	<p>Uygunsuz baskı plakası kuvveti</p> <p>Baskı plakası kuvvetinin tüm yüzeylerde eşit olmaması</p> <p>Baskı plakası yüzeyinin düzgün olmaması</p> <p>Sac malzeme kalitesinin düşük olması</p> <p>Kalıp kavisinin çok büyük olması</p> <p>Çekme boşluğunun çok büyük olması</p> <p>Malzeme yüzeyinin kirli veya çapaklı olması</p>
Parçada yırtılma veya kırılma	<p>Aşırı baskı plakası kuvveti</p> <p>Kalıp kavisinin çok küçük olması</p> <p>Zimba kavisinin çok küçük olması</p> <p>Çekme boşluğunun çok küçük olması</p> <p>Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması</p> <p>Uygunsuz veya eksik yağlama</p> <p>Sac malzeme kalitesinin düşük olması</p> <p>Pres hızının çok yüksek olması</p> <p>Çekme oranının çok yüksek olması</p> <p>Kalıp veya baskı plakası üzerinde oluşan çizik veya çentikler</p>
Düzensiz çekme veya kulaklanma	<p>Malzeme akışını önleyen keskin köşeler</p> <p>Çekme boşluğunun uygunsuz olması</p> <p>Presin veya kalıbın eksenden kaçık olması</p> <p>Sac malzemenin kalıp içerisine uygun yerleştirilmemesi</p> <p>Uygunsuz yağlama</p>
Parça kenarlarında yırtılma veya dalgalanma	<p>Çekme boşluğunun uygun olmaması</p> <p>Fazla yağlama</p> <p>Kalıp kavisinin çok büyük olması</p> <p>Eşit olmayan baskı kuvveti</p> <p>Kalıp kenarlarının dışa esnemesi</p>
Parçanın dip kısımlarında pürüzleşme	<p>Sac malzeme kalitesinin düşük olması</p> <p>Baskı plakasının yetersiz olması</p> <p>Baskı plakası üzerinde yağ birikmesi</p> <p>Hava çıkışının olmaması</p> <p>Parçadaki uygunsuz esneme</p>



## 2.4. LİTERATÜRÜN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Isıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme kalıplarının tasarımı ve imalatı sistematik olarak değerlendirilmesi gereken bir konudur. Isıtma ve soğutma elemanlarının derin çekme kalıplarına uyumlu olarak üretilmeleri, ısıtma ve soğutma ile oluşacak ısı akısının kalıp ortamında muhafaza edilebilmesi ve iş parçası malzemesine kontrollü bir şekilde aktarılması şekillendirme kalıplarının tasarımıyla doğrudan bağlantılıdır. Literatürde genellikle ılık derin çekme prosesi için geliştirilen ünitelere ait şematik görüntüler verilmiş fakat tasarım ve imalatın nasıl gerçekleştirilmesi gerektiği konusunda kapsamlı bilgiye ulaşamamıştır. Prosesin endüstriyel olarak kullanılabilirliği de tasarım ve imalat aşamalarının detaylı ve anlaşılabilir şekilde ifade edilmesiyle mümkündür. Bu sebeple tez çalışması kapsamında ılık derin çekme prosesi için kalıp tasarımı ve imalatı detaylı bir şekilde incelenmiş, ısıtma ve soğutma sistemlerinin prosese nasıl entegre edilebileceği en ince detayına kadar belirtilmiş ve ısıtma-soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme prosesi için bir tasarım hiyerarşisi oluşturulmuştur.

Ilık derin çekme prosesini gerçekleştirilebilir kılan parametre sıcaklıktır. Literatürde malzeme sıcaklıklarının kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak tespiti ve şekillendirmeyi sağlayacak en uygun sıcaklık değerlerinin belirlenmesi konusunda yapılmış yeterli bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Literatüre getirilebilecek en büyük eleştiri kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak şekillendirilme sıcaklıklarının değerlendirilmesi üzerinedir. Sıcaklık değişkeni ile ilgili tek bir sıcaklık derecesine göre veya bölgesel olarak (flanş, radyüsler, kap duvarı vb.) belirlenecek sıcaklık derecelerine göre analiz yapmak gerçekçi sonuçlara uzak kalacaktır. Kalıp tasarımının ve ısıtma ve soğutma sistemlerinin standart olmaması, her çalışmada farklı geometri ve ısı iletim koşullarında çalışma yapılmış olması sebebiyle gerçek şekillendirme sıcaklığı değerlerinden bahsedebilmek ve bu sıcaklık değerlerini genelleyebilmek mümkün değildir. Yapılan çalışmaların her birinde elde edilen sıcaklık değerleri sadece çalışmanın yapıldığı ünite için geçerlilik sağlayacak, genelleştirme yapılamayacaktır. Bu sebeple tez çalışmasında öncelikli olarak, malzeme sıcaklıklarının kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak tespit edilebilmesi için taslak malzeme imalatı ve sensörlerin taslak malzemeye farklı noktalarda konumlandırılması konularında

çalışılmıştır. Bu adım, sıcaklık değişkenini kalıp tasarımı, ısı iletim koşulları vb. nedenlerle oluşabilecek değişkenlikten kurtarmış, değişkenin bağımsız olarak değerlendirilmesine ve genellenebilirliğine imkân tanımıştır. Ön çalışmalardan elde edilen değerler, malzeme üzerinde kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak bir sıcaklık gradyanı oluştuğu ve bu gradyanın da ancak sıcaklık eğrileri yoluyla karakterize edilebileceğini göstermektedir. Bu sebeple çalışmada özgün değer olarak izotermal olmayan koşullarda şekillendirme sıcaklığı eğrilerinin karakterize edilmesi düşünülmektedir. Konunun literatüre katkısı, ılık derin çekme prosesi için karakteristik şekillendirme sıcaklığı eğrilerinin belirlenmesi olacaktır. Elde edilecek eğrilerin literatüre girecek yeni çalışmalar için referans teşkil edeceği düşünülmektedir.

## BÖLÜM 3

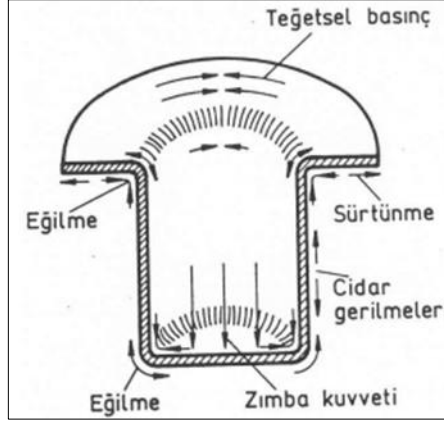
### ILIK DERİN ÇEKME PROSESİ İÇİN ISITMA VE SOĞUTMA SİSTEMİ ENTEĞRELİ KALIP TASARIMI VE İMALATI

#### 3.1. GİRİŞ

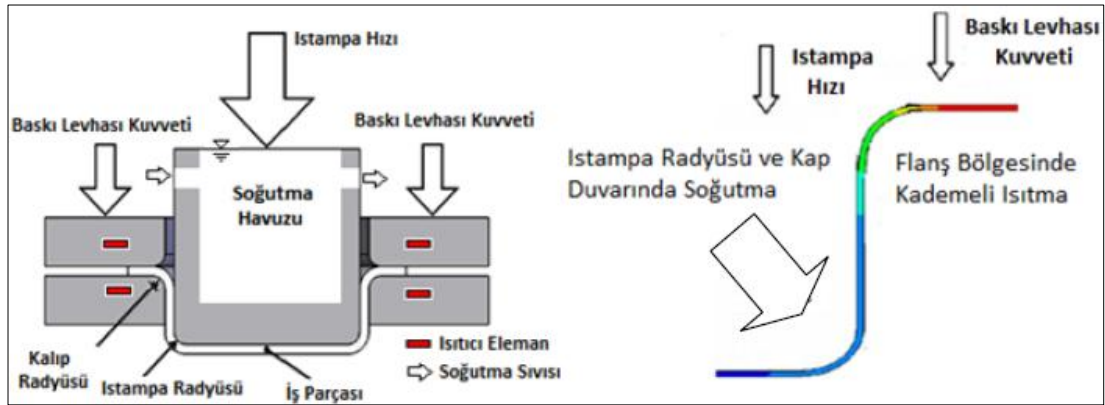
Ilık derin çekme prosesi özel mukavemete sahip mühendislik malzemelerinin, özellikle de Al-Mg alaşımlarının, şekillendirilebilmesini sağlayan önemli bir plastik şekil verme yöntemidir. Al-Mg alaşımları için derin çekmede ihtiyaç duyulan limit çekme oranlarına ulaşabilmek için malzemelerin kayma bantlarının sıcaklık etkisiyle aktif hale getirilmesi gerekmektedir. Derin çekme işleminde flanş bölgesi ve kap duvarı bölgesinin farklı gerilme davranışına maruz kalmaları, proseste sadece ısıtma değil aynı zamanda soğutma işleminin de gerekliliğini göstermektedir (Şekil 3.1). Burada amaç iş parçası malzemesi üzerindeki gerilme durumu ile bağlantılı bir sıcaklık gradyanı oluşturabilmektir. Derin çekme işleminin mekaniği, çekilen kap duvarının sağlam, flanş bölgesinin ise kolayca deforme olabilir olmasını gerektirmektedir. Ilık derin çekmede, flanş bölgesinde oluşan sıcaklık deformasyonu kolaylaştırmakta fakat metalik malzemelerin yüksek iletkenlik özellikleri nedeniyle sıcaklık kap duvarı ve ıstampa radyüsü bölgesine yayılmaktadır. Bu bölgeye sıcaklığın etkimesi pekliği düşüreceği için malzemede boyunlaşma ve yırtılma oluşması kaçınılmaz hale gelir [3]. Bu sebeple flanş bölgesi deformasyonun kolaylaştırılması amacıyla ısıtılırken, kap duvarı ve ıstampa radyüsü bölgesi de malzemede pekliğin düşmemesi için soğutulmalıdır [4]. Hem ısıtma hem de soğutma işlemlerini içeren ılık derin çekme prosesi için pres konstrüksiyonuna ısıtıcı ünite ile beraber kalıp içi soğutma kanallarının ve soğutucu bir ünitenin entegre edilmesi derin çekilebilirlik oranının artırılması ve hatasız parça üretimi için önemlidir [5-7].

Tez çalışmasının bu bölümünde, ülkemizde teknolojisi mevcut olmayan ve etkin kullanılabilirliği bilimsel altyapı gerektiren ısıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık

derin çekme ünitesi, ilgili alanda yapılacak araştırma faaliyetlerine kaynak olabilecek ve endüstriyel olarak da kullanılabilirliği sağlanacak şekilde detaylı olarak incelenmiştir. Isıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme prosesi için şematik bir görünüş Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Flanş bölgesi ve kap duvarına etkiyen gerilmeler [38].



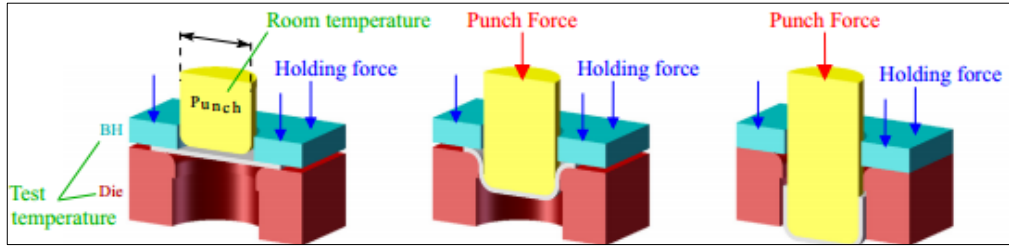
Şekil 3.2. ılık derin çekme prosesi için şematik görünüş.

ılık derin çekme prosesi, şekillendirme kalıplarının tasarımı ve komponent teknolojilerin (ısıtma-soğutma sistemlerini ifade etmek için kullanılmıştır) tasarımı olarak iki temel başlıkta sınıflandırılabilir [10]. Şekillendirme kalıplarının tasarımı; şekillendirme oranına göre ıstampa - kalıp tasarımı ve boyutlandırılması, ıstampa ve kalıp yarıçaplarının boyutlandırılması, ıstampa-kalıp boşluğunun boyutlandırılması, baskı levhası tasarımı, kılavuz elemanların tasarlanması (tij milleri ve yataklamalar) ve kalıp matrisinin tasarlanması aşamalarını içermektedir. İstampa ve kalıp

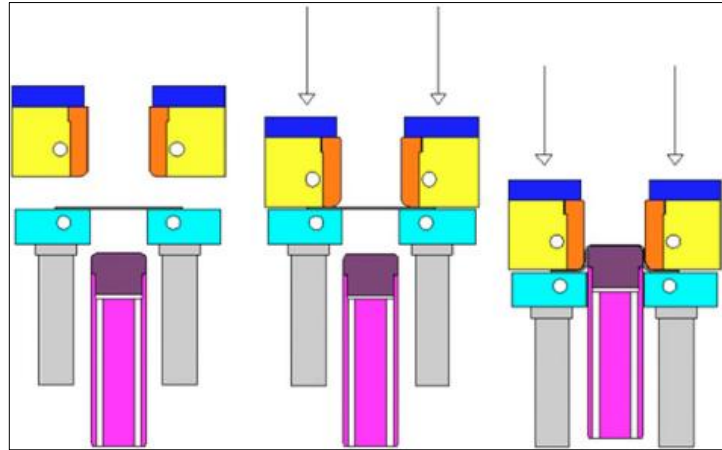
yarıçaplarının tasarımı ve belirlenen ölçülerde işlenebilirliği hatasız numune elde edebilmek için önem taşımaktadır. Ampirik formüllerle belirlenen yarıçap değerlerinin CNC tezgâhlarda işlenmesi operatör kaynaklı hataların oluşmasını önleyecektir. Yarıçapların konvansiyonel tezgâhlarda işlenmesi durumunda ise operatör kaynaklı hatalar kalıbın kesme kalıbı gibi davranmasına sebebiyet verebilir. Yırtılma kusuru ağırlıklı olarak gerilme yığılmalarından dolayı ıstampa-kalıp yarıçaplarında meydana geleceği için kalıp yarıçapında oluşabilecek en ufak bir form bozukluğu yırtılma kusurunun oluşmasında hızlandırıcı etki oluşturacaktır [38].

Hatasız numune elde edebilmek için önemli bir diğer faktör ise baskı levhası basıncıdır. Yetersiz baskı levhası basıncı marullanma kusurunun oluşmasına sebebiyet verebilecek iken, yüksek baskı levhası basıncı da kap kalınlığında aşırı incelleme ve derin çekilen kaptaki boyun verme hatalarının oluşmasına sebep olabilir [39]. Ayrıca baskı levhası basıncının flanş bölgesine eşit bir şekilde dağılması, homojen bir gerilme dağılımı ile gerilme yığılması oluşmadan derin çekme işleminin gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Bu durum baskı levhası silindirlerinden gelen basıncın tij millerine dağıtılması ve baskı levhası sisteminin (silindirler, basınç uygulama yüzeyi, tij milleri) merkez şekillendirme silindirine ters montajı ile sağlanabilir. Bu uygulama ayrıca faydalı kalıp kullanım alanının artmasını sağlayacaktır. Merkez şekillendirme silindiri (ıstampanın bağlı olduğu silindir) ile baskı levhası silindirlerinin aynı yönlü çalışması faydalı kalıp kullanım alanını kısıtlayıcı etki göstermektedir. Aynı yönlü tasarımda merkez şekillendirme silindiri iş parçası malzemesine ulaşmak için baskı levhası elemanını geçmek zorundadır. Bu durum şekillendirme işi için ihtiyaç duyulandan daha büyük ölçülerde ıstampa tasarımına neden olmaktadır. Kalıp elemanlarının gerekli ölçülerden büyük tasarımı hem faydalı kalıp kullanım alanının azaltmakta hem de çalışma bölgesinde, kalıp montajında ve derin çekilen numunenin kalıptan çıkarılmasında zorluklara sebebiyet vermektedir. Şekil 3.3'te baskı levhası ile ıstampanın aynı yönlü tasarımı için, Şekil 3.4'te ise ters yönlü tasarımları için şematik görüntüleri verilmiştir [1,12]. Şekil 3.4 ve 3.5 kalıp tasarımı için referans alınabilecek şematik görüntüler olmasına rağmen sistemin kurulumu için gerçekleştirilecek atölye-laboratuvar çalışmalarında daha fazla bilgi birikimi ve tecrübe gerekmektedir. Derin çekme prosesinin endüstriyel uygulamalarında ters yönlü tasarımın tercih edildiği görülmüştür. Fakat, ılık derin çekme prosesinde ısıtma ve soğutma elemanlarının da

kalıba monte edileceği göz ardı edilmemeli, kalıp ve baskı plakasının birbirlerine göre göreceli hareketleri, ısıtma ve soğutma elemanlarının konumları dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Ilık derin çekme prosesinin profesyonel bir endüstriyel uygulaması bulunmaması sebebiyle ısıtma-soğutma sistemleri entegreli kalıp tasarım ve imalatı için hem endüstriyel açıdan hem de bilimsel açıdan daha fazla araştırmaya gereksinim duyulmaktadır.



Şekil 3.3. Baskı levhası ve ıstampanın aynı yönlü tasarımı [12].



Şekil 3.4. Baskı levhası ve ıstampanın ters yönlü tasarımı [1].

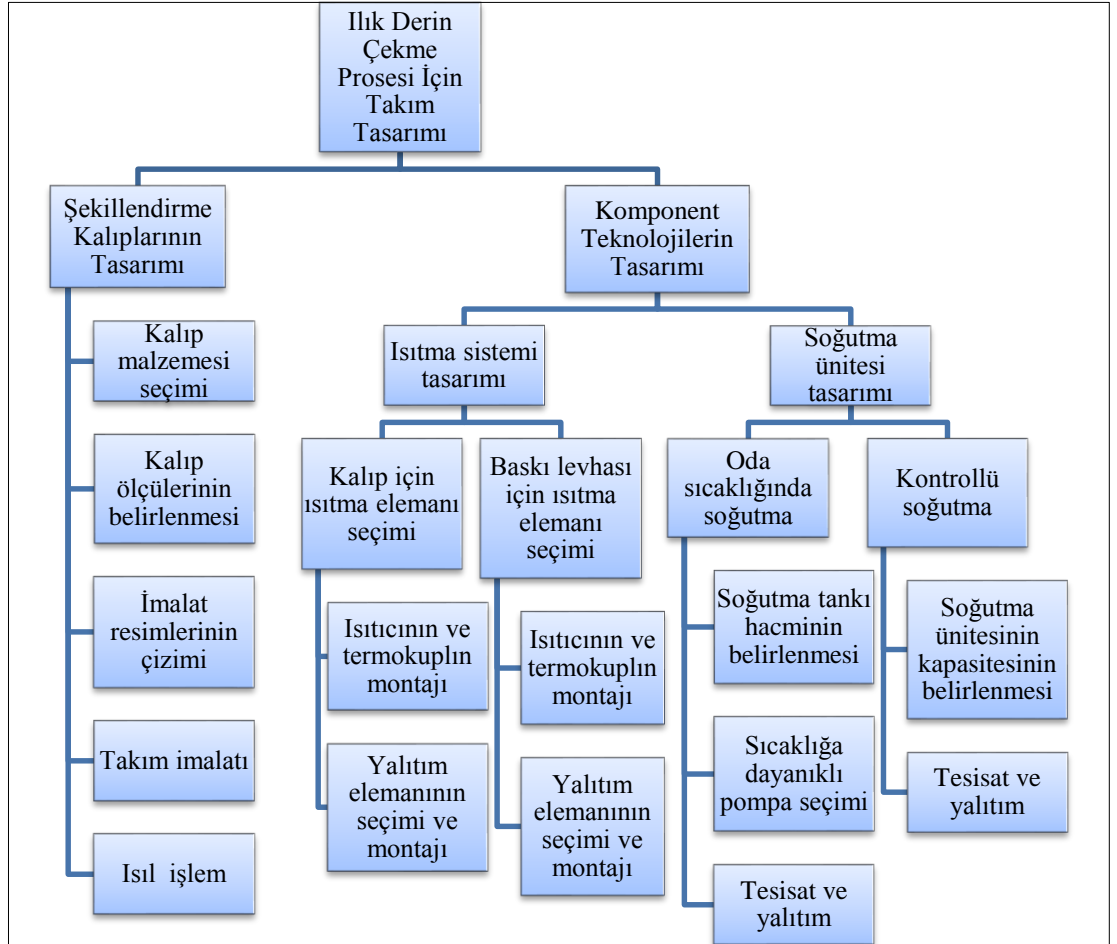
Ilık derin çekme prosesinde yüksek derin çekme oranlarına ulaşılmasını sağlayan ve oda sıcaklığında şekillenemeyen alaşımların şekillendirilmesini sağlayan sistem elemanları komponent teknolojilerdir. Komponent teknolojilerin tasarımı ısıtma ünitesinin tasarımı, soğutma ünitesinin tasarımı, yalıtım, sızdırmazlık ve sıcaklık ölçümü olmak üzere 5 adımda incelenebilir. Isıtma ünitesinin tasarımı rezistans seçimi-kalıba monte edilmesi, termokupl seçimi-kalıba monte edilmesi ve ısıtma sistemi ile ölçüm sisteminin kontrolünü kapsamaktadır. Soğutma ünitesi ise oda sıcaklığında soğutma ve kontrollü soğutma olmak üzere iki adımda incelenebilir. Oda

sıcaklığında soğutma işlemi için gerekli elemanlar soğutucu sıvı için tank, soğutucu sıvının ısınabileceği derecelerde çalışabilen bir pompa, soğutulacak bölge için tesisat ve sızdırmazlık sağlayıcı malzemelerdir (sıcaklığa dayanıklı sıvı conta ve teflon conta). Kontrollü soğutma soğutucu sıvının sıcaklığının kontrol edilebildiği, bu sayede kalıpta sürekli sabit sıcaklıkta soğutma gerçekleştirilebildiği sistemdir. İş parçası malzemesi yüzeyinde oluşturulacak sıcaklık gradyanlarının kontrol edilebilirliği ancak kontrollü soğutma ile gerçekleştirilebilir. Burada kullanılan temel eleman soğutma çevrimine göre çalışan soğutucu ünitedir.

Sıcaklık ölçümü ve yalıtım da komponent teknolojiler kapsamında dikkate alınması gereken tamamlayıcı faktörlerdir. Sıcaklık ölçümü ıstampadan, baskı levhasından, kalıp matrisinden ve iş parçası malzemesi üzerinden gerçekleştirilebilir. Burada dikkat edilecek temel husus, gerçek şekillendirme sıcaklıklarının elde edilebilmesi ve ısıtma-soğutmanın sistemlerinin fonksiyonelliğinin belirlenebilmesi için termokuplların mümkün olduğu kadarıyla iş parçası malzemesine yakın montaj edilebilmesidir. Mümkünse iş parçası malzemesinden sıcaklık ölçümü en doğru sonucu verecek uygulamadır. Fakat endüstriyel açıdan (seri üretim için) bu durum mümkün olmayacağı için termokuplların kalıp radyüsü ve flanş bölgesinde iş parçası malzemesine en yakın konumda tespiti şekillendirme sıcaklıkları ve analiz edilebilirlik açısından gerçeğe en yakın sonucu verecektir. Ilık derin çekmede ulaşılan sıcaklıklar (oda sıcaklığı ile 350 °C arası) yalıtımın gerekliliğini göstermektedir. Yalıtım hem presi kalıp sıcaklıklarından korumak hem de rezistanslardan elde edilen ısının etkisinin sadece kalıp içinde kalması sağlanarak iş parçası malzemesinin ısıtılabilmesi ve sıcak tutulabilmesi amacıyla gereklidir. Kalıp sistemi ile pres arasında oluşturulacak yalıtımdan hidrolik silindirlere ve merkezleme elemanlarını sıcaklıktan koruması beklenmelidir. Özellikle merkezleme elemanlarında sıcaklık etkisiyle oluşacak çarpılma, derin çekme esnasında kuvvet akışında düzensizliğe sebebiyet verebilecek düzeyde etki gösterecektir. Hidrolik silindirlere ısı geçişi ise hidrolik yağın daha fazla ısınmasına, hidrolik pompanın ömrünün azalmasına ve azalan viskozite ile sızdırmazlık problemlerine sebebiyet verebilecektir. Yalıtım açısından çok kapsamlı endüstriyel çözümler mevcuttur. Fakat burada dikkat edilecek husus kullanılacak yalıtım malzemesinin kimyasal yapısıdır. Amyant vb. malzemeler yalıtım açısından tatmin edici çözümler sunmakta fakat kanserojen etki göstermektedirler. Ilık derin

çekme prosesinin endüstriyel uygulamalarında sağlığı tehdit etmeyen cam yünü ve mika tipi malzemeler yalıtım için kullanılabilir.

Ilık derin çekme prosesinde takım tasarımı, yüksek oranlarda şekillendirilebilirliğin sağlanabilmesi için en temel unsurdur. Proseste ısıtma ve soğutma ünitelerinin kullanımı sistemi karmaşık hale getirmekte ve analiz edilebilirliğini güçleştirmektedir. Bu sebeple, gerçekleştirilebilir bir ılık derin çekme prosesi için, her bir sistem elemanının teknik özelliği tanımlanmalıdır. Şekil 3.5'te ılık derin çekme prosesi için takım tasarımı kapsamlı olarak gösterilmiş ve her bir tasarım adımı detaylı olarak alt başlıklarda incelenmiştir.



Şekil 3.5. Ilık derin çekme prosesi için tasarım hiyerarşisi.



### 3.2. ŞEKİLLENDİRME KALIPLARININ TASARIMI

Şekillendirme kalıplarının tasarımında Şekil 3.5'te gösterilen iş adımları takip edilmiştir. Bu adımlar kalıp malzemesinin seçimi, ıstampa ve kalıp (dişi kalıp) boyutlarının belirlenmesi, takımların teknik resimlerinin çizimi, imalat ve ısıtma işleminden oluşmaktadır.

Ilık derin çekme prosesi açısından kalıp malzemesinden minimum ısı genleşme, kolay işlenebilirlik, yüksek aşınma direnci ve sertleştirilebilirlik özellikleri beklenmektedir. Kalıp malzemesi olarak kolayca temin edilebilecek bir malzemenin seçilmesine özen gösterilmiş ve temin edilebilirlik açısından en kolay (farklı çap ve uzunlukta) 1040, 4140 ve 8180 çeliklerinin bulunduğu belirlenmiştir. Bu malzemeler içinde dayanım, sertleştirilebilirlik ve maliyet göz önünde bulundurularak 0.40 karbon (C), 0.88 mangan (Mn), 0.95 krom (Cr) ve 0.20 molibden (Mo) ihtiva eden 4140 kalıp çeliğinin kullanılması kararlaştırılmıştır. 4140 çeliğinin genel adı krom-molibden çeliğidir. Karbon, molibden ve mangan içeriği çeliğin çekme mukavemeti, yüksek sıcaklıkta mukavemet ve aşınma direncini, krom ilavesi ise çeliğin sertleştirilebilirlik, dayanım ve aşınma direncini arttırmaktadır. Ayrıca alaşım elementlerinden hepsinin sertleşme derinliğini arttıracak etkisi vardır. Sertleşme derinliği kalıpların talaşlı imalat sonrası sertleştirilme işlemleri için önemli bir özelliktir.

Kalıp malzemelerinin temininden sonra imalat resimlerinin oluşturulabilmesi için, derin çekme işleminde yüksek etkisi bulunan kalıp ölçülerinin (ıstampa radyüsü, kalıp radyüsü, yüzey hassasiyeti ve toleranslar) belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Kalıp ölçüleri tez çalışmada kullanılan her bir derin çekme oranı için ayrı ayrı belirlenmiştir. Derin çekme oranı malzemelerin şekillendirilebilirliğinin bir ölçüsüdür ve iş parçası malzemesi çapının ıstampa çapına bölünmesiyle elde edilir. Daha yüksek çekme oranı daha derin çekilmiş kabı ifade etmektedir ve ılık derin çekme işlemi için amaç daha yüksek çekme oranlarına ulaşabilmektir. Tez çalışması kapsamında 1,8, 2,0, 2,3, 2,5 ve 2,7 derin çekme oranlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Kalıp radyüsü ve matris radyüsü ölçülerinin belirlenmesinde sırasıyla Denklem 3.1-3.4'te verilen ampirik denklemler kullanılmıştır [40]. Derin çekme işleminde en fazla hata kalıp radyüsü bölgesinde yırtılma olarak meydana gelmektedir. Bu sebeple bütün

kalıplar için mümkün olduğu kadar yüksek ölçüde kalıp radyüsü değeri belirlenmiştir. Denklem 3.1-3.4'e göre hesaplanan kalıp ölçüleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

$$5t < r_1 < 10t \quad (3.1)$$

$$r_2 = 0,9((D-d_1) t)^{0,5} \quad (3.2)$$

$$ÇB = t + (0.02 (10t)^{0,5}) \quad (3.3)$$

$$d_2 = d_1 + 2 * ÇB \quad (3.4)$$

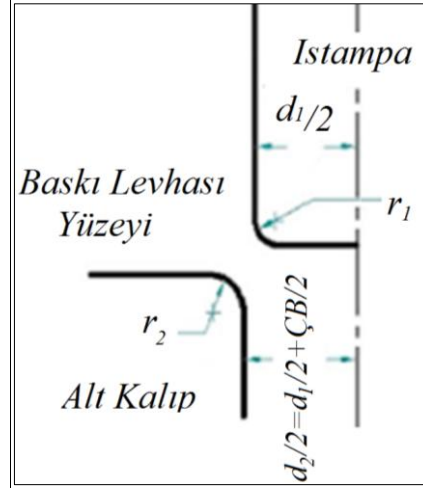
Denklem 3.1'de  $t$  değişkeni sac kalınlığını,  $r_1$  değişkeni ise ıstampa radyus yarıçapını göstermektedir. Denklem 3.2 ve 3.3'te  $r_2$  değişkeni kalıp radyus yarıçapını,  $D$  değişkeni iş parçası malzemesi çapını,  $ÇB$  değişkeni ıstampa-kalıp arası açıklık mesafesini (çekme boşluğu),  $d_1$  değişkeni ise ıstampa çapını göstermektedir. Denklem 3.4'te  $d_2$  değişkeni kalıp çapını göstermektedir (Şekil 3.6). İstampa çapı ( $d_1$ ) değişkeni, taslak çapının deneylerin gerçekleştirileceği derin çekme oranlarına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1. Belirlenen erkek ve dişi kalıp ölçüsü değerleri.

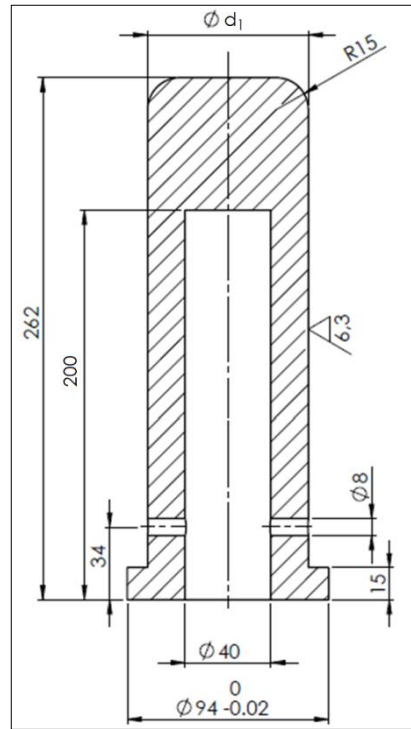
Çekilebilirlik oranı (Taslak çapı/ $d_1$ )	İstampa çapı ( $d_1$ ) (mm)	İstampa omuz yarıçapı ( $r_1$ ) (mm)	Kalıp omuz yarıçapı ( $r_2$ ) (mm)	Kalıp çapı ( $d_2$ ) (mm)
1,8	83,33	15	10,39	87,51
2	75	15	11,02	79,17
2,3	65,21	15	11,71	69,39
2,5	60	15	12,07	64,17
2,7	55,55	15	12,36	59,73

Erkek kalıpların yüzey hassasiyetleri 6,3 µm yüzey kalitesinde işlenmiştir. Erkek kalıbın malzeme yüzeyinde sürtünme katsayısını arttırarak malzemeyi yırtmadan derin çekebilmesi için erkek kalıp yüzeyleri kaba ölçüde bırakılmıştır. Dişi kalıpların işlenmesinde ise ince tornalama yapılmış, 0,4-1,6 µm aralığında işlenmiştir. Bu sayede

flanş bölgesinde oluşacak sürtünmenin azaltılarak derin çekilebilirliğin kolaylaştırılması hedeflenmiştir. Kalıp ölçülerinin toleransları ise -0.02 ile -0.05 mm aralığında belirlenmiştir. Kalıpların teknik resimleri Solid ticari paket programında çizilmiştir. Örnek bir erkek ve dişi kalıp teknik resimleri sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir.

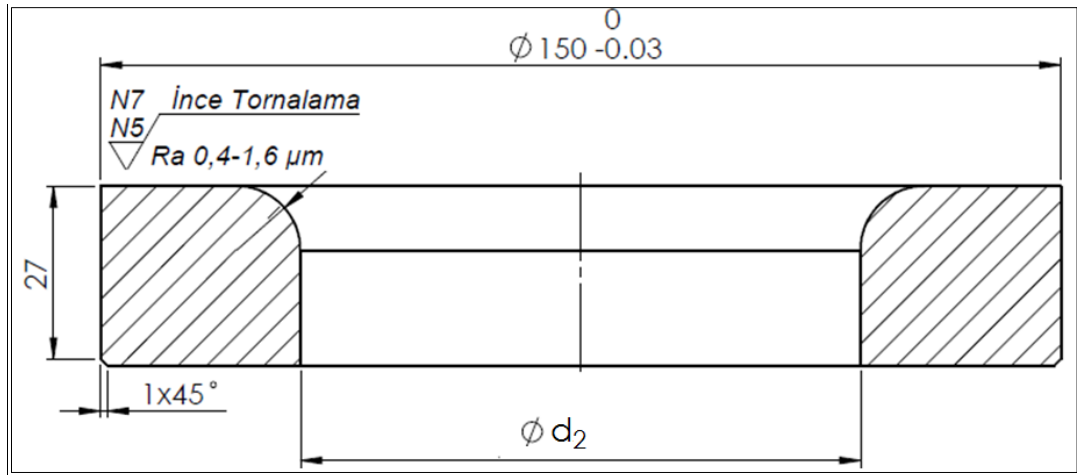


Şekil 3.6. Kalıp ölçüleri için şematik görünüm.



Şekil 3.7. Istampa imalatı için çizilen teknik resim.

Kalıplardaki yarıçapların istenilen ölçü ve toleranslarda işlenebilmesi kusursuz malzeme üretimi için büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple tezgâhtan ve operatörden kaynaklı hataları minimize edebilmek ve ölçü tamlığı sağlayabilmek için kalıp imalatında CNC işleme tercih edilmiştir. Malzemeler erkek kalıplar için Ø100x300 mm, dişi kalıplar için Ø160x32 mm boyutlarında temin edilmiştir. İş parçaları için ilk olarak boyuna tornalama işlemi yapılarak istenilen çap değerleri elde edilmiştir (kalıp oturma yüzeyleri ile taslak çap değerleri). Bir sonraki adımda ise radyüsler işlenerek kalıplara son şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Dişi kalıbın imalatı için çizilen teknik resim.

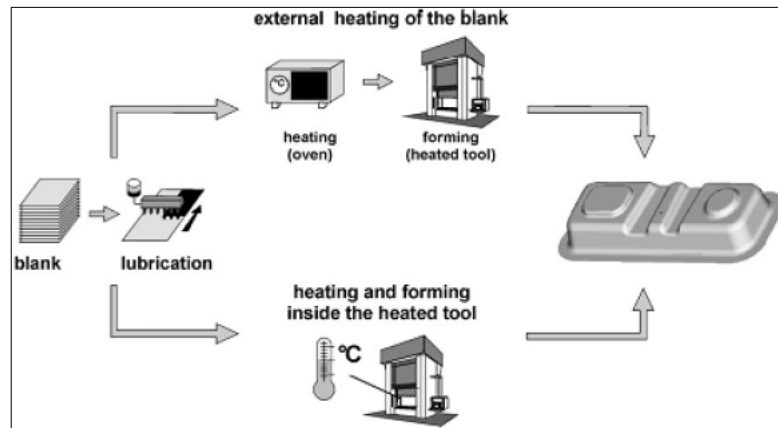
Kalıp yüzeylerinin sertleştirilmesi, kalıp aşınmasının azaltılması, uzun süreli kullanımlarının sağlanması ve yük altında esneme miktarlarının azaltılması yani rijitliklerinin artırılması açısından önemlidir. CNC’de işlenen kalıplara sertlik kazandırmak amacıyla kalıplar sementasyon işlemine tabi tutulmuştur. Sementasyon işlemi sementasyon sıcaklığında (850-950 °C) malzeme yüzeyine karbon emdirilmesi işlemidir. Bu yöntemle sertleştirilen kalıplar, sıcaklık sebebiyle oluşan ölçü kaçıklığının minimize edilmesi amacıyla tekraren yüzey tornalama işlemine tabi tutulmuştur.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde şekillendirme kalıplarıyla ilgili herhangi bir problem oluşmamıştır. Belirlenen ıstampa-kalıp yarıçaplarıyla, uygun şekillendirilebilirlik oranlarında hatasız numuneler elde edilebilmiş ve kalıpların imalatından kaynaklanan herhangi bir sorunla da karşılaşılmamıştır. Şekillendirme

kalıplarında dikkat edilmesi gereken temel unsurlardan biri, sertleştirme ısı işleminden önce kalıplara nihai formun verilmiş olması ve talaşlı imalat işlemlerinin tamamlanmış olmasıdır. Sertleştirme işleminden sonra oluşan sertlik değeri kalıbın ölçü değişikliğine izin vermemektedir. Kalıplar ile ilgili dikkat çeken diğer bir unsur ıstampa uzunluğudur. Şekil 3.7’de görülen ıstampa mesafesi, daha önce bahsedilen baskı plakası ile ıstampa hareket alanlarının aynı yönlü olmasından dolayı şekillendireceği kap mesafesinden çok daha uzun tasarlanmış ve imal ettirilmiştir.

### 3.3. KOMPONENT TEKNOLOJİLERİNİN TASARIMI

Komponent teknolojilerin tasarımı, ısıtma sistemi tasarımı ve soğutma ünitesi tasarımı olmak üzere iki bölümde incelenebilir (Şekil 3.5). Isıtma işlemi şekillendirme ünitesine entegre olarak veya ünite harici ısıtma ile gerçekleştirilebilir (Şekil 3.9) [31]. İş parçasının pres harici bir ısıtma ünitesinde ısıtılarak daha sonra kalıba taşınması, taşıma esnasında oluşacak ısı kaybı sebebiyle sıcaklığın hızlı bir şekilde düşmesine sebep olacak ve istenilen sıcaklık derecelerinde şekillendirmeyi zorlaştıracaktır. Ayrıca bu yöntem zaman kaybına sebebiyet vereceği için endüstriyel olarak kullanılabilirliği düşüktür. Robot ellerle çok hızlı bir şekilde ısınan malzeme prese taşınabilse bile malzeme üzerinde sıcaklık gradyeni oluşturabilmek mümkün değildir. Bu sebeple ısıtma ünitesinin şekillendirme ünitesine entegre olarak çalışması gerekmektedir.



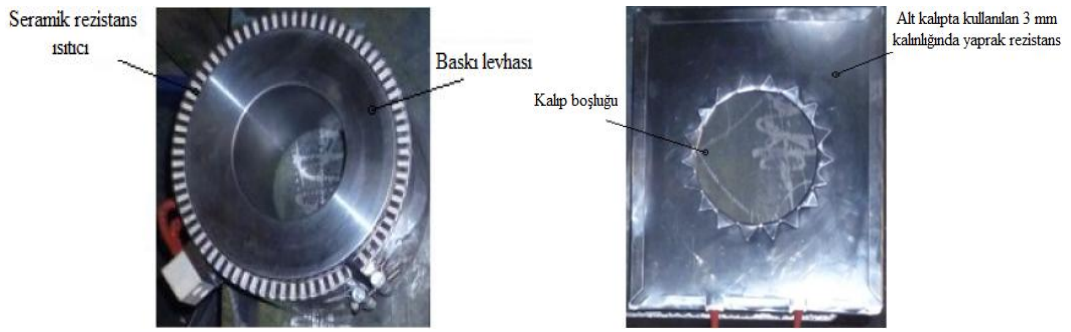
Şekil 3.9. Ilık derin çekme işlemi malzeme ısıtma yöntemleri [31].

Tez çalışması kapsamında ısıtma sistemi tasarımı için ilk olarak baskı levhası ve alt kalıp için ısıtıcı seçimi gerçekleştirilmiştir. Isıtıcıların belirlenmesinden sonra, kalıp içinde ısı akışı malzemeye doğru sağlanabilecek şekilde, ısıtıcıların baskı plakası ve alt kalıba en uygun pozisyonda montajı kalıp geometrisi de dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra sıcaklık ölçümü için termokupllar belirlenen sıcaklık ölçüm noktalarına monte edilmiş ve kalıp sistemi yalıtım malzemeleriyle adyabatik konuma getirilmeye çalışılmıştır.

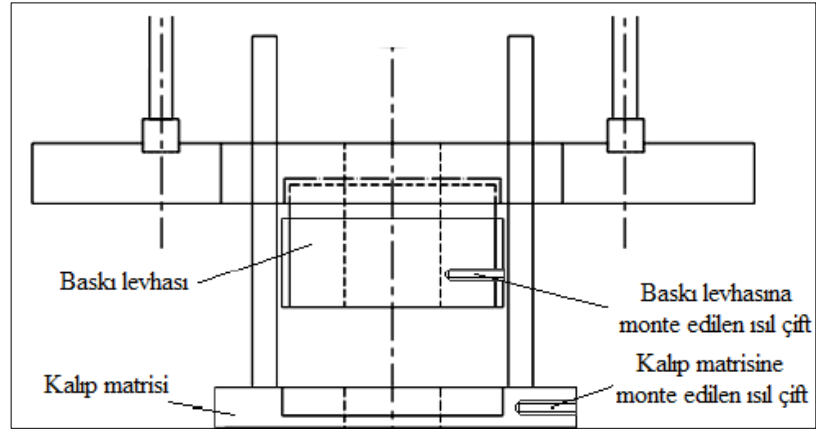
Ilık derin çekme prosesinin kararlılığı sıcaklık parametresinin yeterli derecelerde ve istenilen bölgelere etki etmesiyle mümkündür. Bu sebeple ısıtıcıların seçimi ve montajı sistemin kurulumunda en önemli aşamadır. Literatürde kalıpların ısıtılabilmesi için ağırlıklı olarak fişek rezistanslar kullanılmıştır [41]. Fişek rezistansların ısı iletimi için kalıba tatlı-sıkı toleransta montaj edilmeleri gerekmektedir. Aksi durumda fişek rezistansların sıkı sarımları nedeniyle oluşacak yüksek sıcaklık dereceleri rezistansın yanmasına sebebiyet verecektir. Fişek rezistansların avantajı yüksek sıcaklıklara çok hızlı çıkabilmeleridir. Fakat sürekli olarak yüksek sıcaklıklarda çalışmaları mümkün olmadığı için endüstriyel uygulamalar açısından tercih edilebilir değildirler. Fişek rezistansların bu özelliklerinden dolayı, takım geometrisine uygun monte edilebilecek farklı rezistanslar araştırılmıştır. Baskı plakası için yüksek sıcaklıklara hızlı çıkabilen ve endüstriyel olarak kullanılabilirliği mümkün olan seramik rezistansın, alt kalıp içinde kalıp geometrisine uygun olarak kullanılacak yaprak rezistansın kullanımına karar verilmiştir. Baskı plakasına 2400 W gücünde seramik kelepçe rezistans, alt kalıba ise 1100 W gücünde yaprak rezistans ısıtıcı monte edilmiştir (Şekil 3.10). Baskı levhasına monte edilen seramik rezistans baskı plakasını ısıtarak malzemenin flanş bölgesinin ısınmasını sağlamaktadır. Alt kalıba monte edilen yaprak rezistans ise baskı plakası ile kalıp matrisi arasında bir ısı kafesi oluşmasını sağlayıcı etki göstermektedir.

Yalıtım uygulaması, ısıtıcılar için içten yalıtım, pres tezgahı ile kılavuz mil için ise dıştan yalıtım olmak üzere iki aşamada uygulanmıştır. Isıtıcılardan elde edilen ısıyı verimli bir şekilde iş parçası malzemesine yönlendirebilmek için seramik kelepçe rezistans taş yünü malzeme ile, yaprak rezistans ise mika malzeme ile yalıtılmıştır. Pres gövdesi, kılavuz mil ve silindirlerin yalıtımı ise 3 mm kalınlıkta amyant malzeme

ve 6 mm kalınlıkta MDF malzeme (kompozit ahşap malzeme) ile sağlanmıştır. MDF malzeme, amiyant malzeme için yüzey düzleştirici etki sağlaması amacıyla kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri kalıp elemanları içinden, 700° C'ye kadar ölçüm yapabilen L tipi termokupllar ile ölçümlenmiştir. Termokuplların şekillendirilecek olan malzemeye alt ve üst kalıptan mesafesi 30 mm'dir (Şekil 3.11). Sıcaklık kontrolü dijital termostatlar ve kontaktör elemanları ile sağlanmıştır. Kontaktörlerde ve/veya kontrolörlerde oluşabilecek kısa devre ve aşırı akım problemleri için C tipi 4 amperlik ve 10 amperlik sigortalar devreye eklenmiştir.



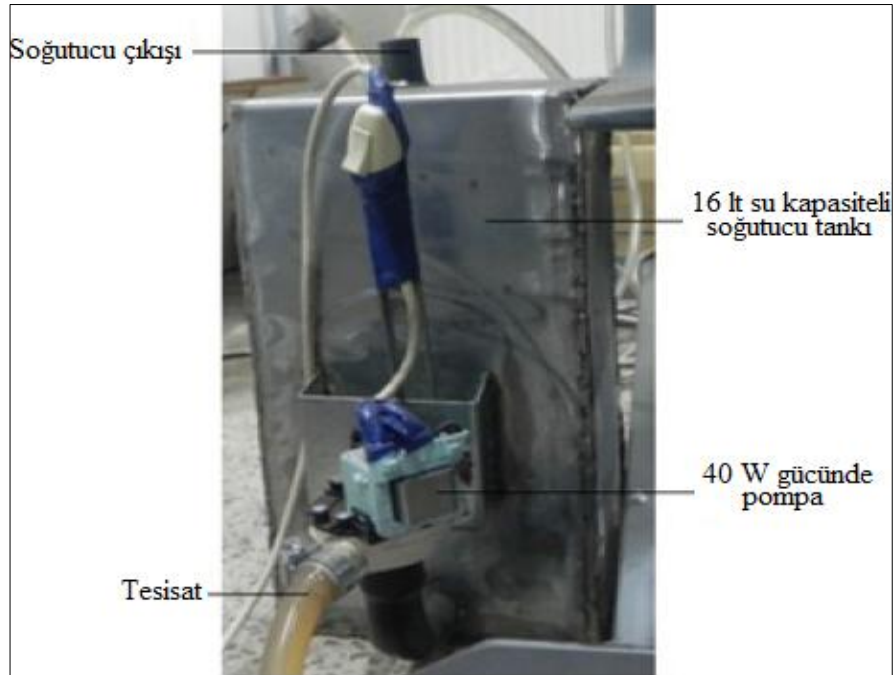
Şekil 3.10. Baskı levhasına monte edilmiş seramik rezistans ısıtıcı ve alt kalıpta kullanılan yaprak rezistans ısıtıcı.



Şekil 3.11. Termokuplların montajı için şematik resim.

İş parçası malzemesi üzerinde sıcaklık gradyeni oluşturarak şekillendirilebilirliğin artırılması, malzemenin merkezi ve kap duvarı bölgesinin soğutulması ile mümkündür. Tez çalışmasında ıstampa soğutulmuş iş parçası malzemesinin soğutulması hedeflenmiş ve bu işlem için ıstampa merkezine soğutma kanalı

açılmıştır. Şekil 3.7’de ıstampanın imalatı için gösterilen teknik resimde, ıstampanın merkez eksenini etrafında 40 mm’lik çapta 200 mm boyunda delme işlemi uygulanan soğutma kanalı görülmektedir. Çalışma kapsamında soğutma işlemi, oda sıcaklığında su ile soğutma ve kontrol edilebilir soğutma olmak üzere iki adımda incelenmiştir. Soğutma işlemi için galvanizli sactan imal edilmiş 16 litre su kapasiteli tank kullanılmıştır (Şekil 3.12). Tanka 25 °C’de su konulmuş ve soğutma işlemi devam ettiği sürece sisteme müdahale edilmemiştir. Soğutma tankında yüksek sıcaklığa (100 °C’ye kadar) dayanıklı 40 W’lık pompa kullanılmıştır. Soğutma suyu akış debisi 75 ml/s olarak ölçülmüştür. Literatürde farklı debilerin soğutma davranışına etkisi olmadığı belirtildiği için sabit debide çalışma gerçekleştirilmiştir [19]. Su dolaşımı şeffaf hava hortumlarıyla sağlanmış, sızdırmazlık için teflon conta ve yüksek sıcaklığa dayanıklı sıvı conta kullanılmıştır. Çalışmada, tankın içindeki su sıcaklığının ve tank hattına dönen su sıcaklığının kalıp sıcaklıklarına ve süreye göre değişimi incelenmiştir. Bu sayede soğutma suyu sıcaklığının davranışı belirlenebilmiş ve chiller tipi soğutma ünitesinin soğutma kapasitesi için referans değerler elde edilebilmiştir. Çizelge 2.2’de soğutma suyu sıcaklığının referans alınan kalıp çalışma sıcaklığı değerlerine göre değişim değerleri verilmiştir. Elde edilen değerler 4 saatlik ısınma süresinde elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Basit soğutma sistemi görüntüsü.



Su devir-daimi ile soğutmanın gerçekleştirildiği sistemden alınan referans değerlere göre ünite için gerekli soğutma yükü hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre sistemin soğutulması için yaklaşık 480 kcal soğutma yükünün yeterli olacağı belirlenmiştir ( $Q=m*c*\Delta t$ ,  $m=16$  kg,  $c=1$  Cal/gr $^{\circ}$ C,  $\Delta T=49-21=28$   $^{\circ}$ C). Daha düşük sıcaklık değerlerinde çalışılabileceği de düşünülerek 2000 kcal soğutma yükü kapasiteli, ayarlanabilir, chiller tipi bir soğutma ünitesi ile soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan soğutucu ünite ile ıstampa tabanında -2  $^{\circ}$ C dereceye kadar soğutma yapılabilmektedir.

Çizelge 3.2. Soğutma suyu sıcaklığının kalıp ve baskı plakası sıcaklığına göre değişimi.

Baskı Plakası Sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)	Alt Kalıp Sıcaklığı ( $^{\circ}$ C)	Tank Çıkışı ( $^{\circ}$ C)	Tank Dönüşü ( $^{\circ}$ C)
25	25	21	21
50	50	21	22
75	75	21	22
100	100	21	22
125	125	22	23
150	150	22	23
175	175	23	24
200	200	25	26
225	225	28	29
250	250	32	34
275	275	39	41
300	300	48	49

Çalışmanın bu bölümünde, ısıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme prosesi için kalıp tasarımı kapsamlı bir şekilde anlatılmaya çalışılmıştır. Tasarım, şekillendirme kalıpları tasarımı ve komponent teknolojilerin tasarımı olmak üzere iki adımda incelenmiştir. Şekillendirme kalıpları tasarımı başlığı altında temel kalıp elemanları olan alt kalıp, ıstampa ve baskı levhası tasarımı incelenmiştir. Isıtma ve soğutma üniteleri komponent teknolojilerin tasarımı başlığı altında incelenmiştir.

## BÖLÜM 4

### ŞEKİLLENDİRME SICAKLIĞI EĞRİLERİNİN OLUŞTURULMASI

#### 4.1. GİRİŞ

İmalat işlemlerinde proses parametrelerinin uygun değerlerde belirlenmesi, kararlı bir imalat işlemi ve istenilen kalitede ürün elde edilebilmesi için kritik önem taşımaktadır. Özellikle plastik şekil verme yöntemlerinde, prosesin karakteristiğinin lineer denklemlerle ifade edilebilmesinin zorluğu sebebiyle proses parametrelerinin uygun değerlerde seçilmesi daha da önem kazanmaktadır. Derin çekme işlemi için uygun olmayan parametrelerle çalışmak yırtılma, aşınma, çatlak oluşumu, yüzey kalitesinin düşüklüğü, form bozukluğu vb. gibi kusurların oluşmasına sebebiyet verebilir. Burada karşılaşılan diğer bir problem ise sıcaklık, kuvvet akışı, sürtünme katsayısı gibi parametrelerin kontrol edilebilirliğinin güçlüğüdür. Hem prosesin anlaşılabilirliğinin güç olması hem de sisteme etkileyen parametrelerin kontrol edilebilirliğinin güç olması, uygun parametre değerlerinin bulunması hususunda ileri araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, ılık derin çekme prosesini gerçekleştirebilmesini sağlayan sıcaklık değişkeninin doğru bir şekilde ölçülebilmesi ve izotermal olmayan koşullarda malzeme üzerinde oluşan sıcaklık dağılımının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Şekillendirme sıcaklıklarının kalıplar (baskı plakası, ıstampa, kalıp matrisi) yerine iş parçası malzemesi üzerinden tespiti, ılık derin çekme prosesi açısından sıcaklık parametresinin kesinliğini arttırabilecektir. Kapalı kalıp koşulları altında, sıcaklıkların malzeme yüzeyinden doğru bir şekilde tespiti ise teknik açıdan zor bir uygulamadır. Tez çalışmasının bu bölümünde kapalı ve ısınan kalıp koşulları altında iş parçası malzemesinin sıcaklığını yüksek doğrulukta tespit edebilecek bir yöntem geliştirilmiştir. Sıcaklık ölçümü için iş parçası malzemesi kullanılarak indeks malzeme geliştirilmiş ve termokupllar indeks malzemeye monte edilerek sıcaklıklar

yüksek doğrulukta tespit edilebilmiştir. Deneysel izotermal olmayan koşullarda gerçekleştirildiği için ölçülen sıcaklıklar ölçüm mesafesine göre çizdirilen eğriler yoluyla ifade edilmiştir. Elde edilen eğriler şekillendirme sıcaklığı eğrileri olarak adlandırılmış ve ŞSE kısaltması ile ifade edilmiştir.

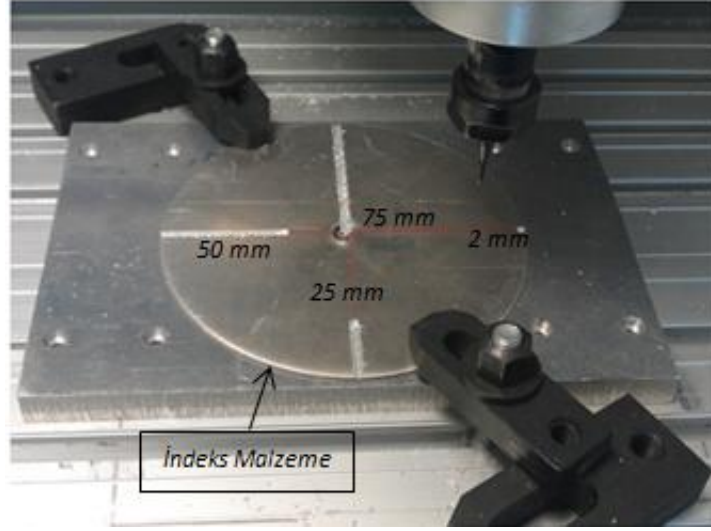
## 4.2. İNDEKS MALZEMENİN GELİŞTİRİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde sıcaklıkların iş parçasından tespiti için geliştirilmiş indeks malzeme yaklaşımı araştırılmıştır. İndeks malzeme, iş parçası malzemesi kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede hem ısı iletim katsayısından hem de kalınlık farklılığından kaynaklanabilecek sıcaklık değişkenliği engellenmiştir. Çalışma, sıcaklık ölçüm noktalarının sayısına göre 4 noktadan ölçüm ve 8 noktadan ölçüm olmak üzere iki aşamada değerlendirilmiştir.

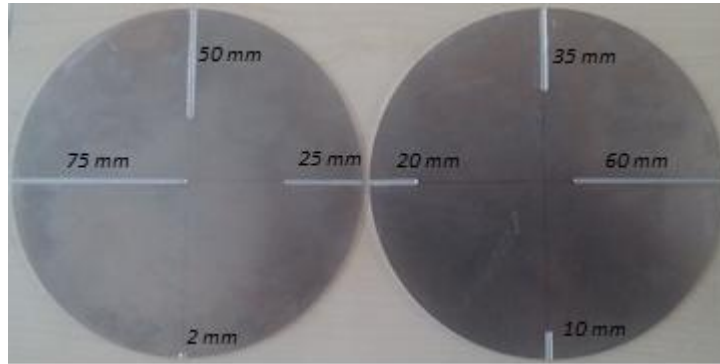
İş parçası malzemesi yüzeyinden sıcaklık ölçümü için 4 farklı ölçüm noktasının kullanıldığı çalışmada dış çaptan iç çapa doğru 2 mm, 25 mm, 50 mm ve 75 mm mesafelerde ölçüm yapılmıştır. 75 mm mesafedeki ölçüm noktası iş parçası malzemesinin merkezi ile kesişmektedir. Termokuplların indeks malzemeye montajı için, malzeme kalınlığına dikey doğrultuda, 1,5 mm derinliğinde ve malzeme merkezine doğru belirlenen mesafelerde frezeleme işlemi ile kanallar açılmıştır. İndeks malzemenin frezelenmiş görüntüsü ve frezeleme mesafeleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Kanallar, termokuplların sıcaklık ölçüm noktasına ulaşması için kılavuzluk etmesi ve termokuplları baskı levhası basıncından korumak için açılmıştır.

4 noktadan ölçülen değerlerin malzeme üzerinde oluşan sıcaklık gradyanını yeteri kadar ifade edemeyeceği düşünülerek ve sıcaklık eğrisi davranışını daha detaylı inceleyebilmek için 8 noktalı ölçüm sistemi geliştirilmiştir. 8 noktalı ölçüm sisteminde hedef tek bir indeks malzeme üzerine 8 kanal açılması şeklinde düşünülmüş fakat imalattan kaynaklanan problemler nedeniyle bu işlem gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle 10 mm, 20 mm, 35 mm ve 60 mm mesafelerde sıcaklık ölçüm kanalı açılan bir indeks malzeme daha kullanılmıştır (Şekil 4.2). 8 noktalı ölçüm düzeneğinde diğer bir kısıt da yeterli termokupl sayısıdır. Mevcut sistemimizde 4 adet termokupl kullanıldığı için aynı anda 8 noktadan ölçüm alınamamıştır. Çalışmanın sağlıklı

yürütülebilmesi tek bir indeks malzeme üzerinden aynı anda 8 noktadan sıcaklık ölçümü alınmasıyla mümkündür. Çalışma kapsamında bu durum gerçekleştirilememiş olsa bile aynı kalıp sıcaklıkları referans alınarak iki indeks malzemedenden de sıcaklık verisi alınmıştır.



Şekil 4.1. 4 noktadan sıcaklık ölçümü için tasarlanmış indeks malzeme.

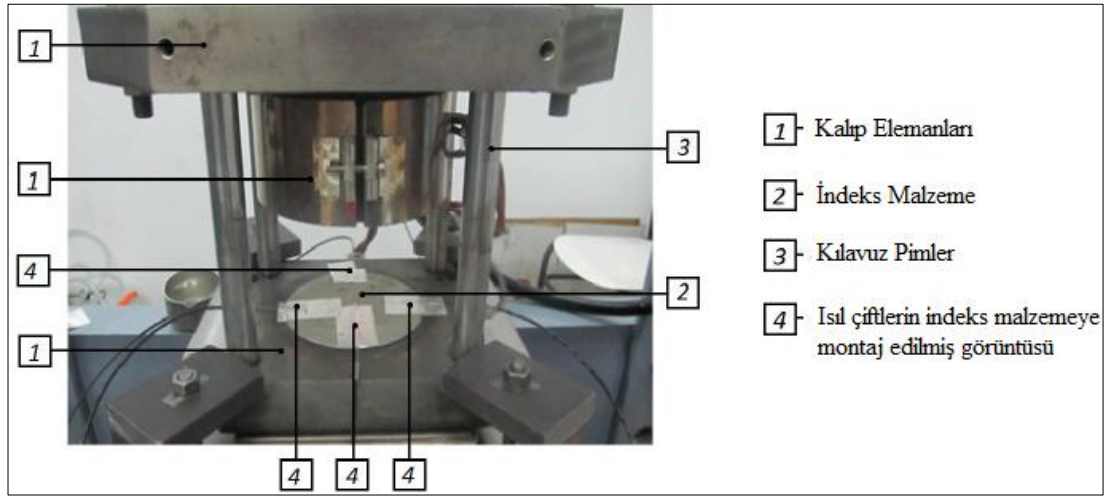


Şekil 4.2. 8 noktadan sıcaklık ölçümü için tasarlanmış indeks malzeme.

### 4.3. SICAKLIK ÖLÇÜMÜ İÇİN TERMOKUPLLARIN SEÇİMİ VE MONTAJI

Kalıp içi malzeme sıcaklıklarının tespitinde 1 mm çapında 100 mm uzunluğunda K tipi mineral izoleli termokupllar kullanılmıştır. Mineral izoleli termokupllar çelik bir kılıf içine yüksek saflıkta metal oksit tozları ile sıkıştırılarak izole edilmişlerdir. Sıcaklıkların görüntülenebilmesi için 16 bit çözünürlükte yüksek okuma hassasiyeti

olan, 8 kanallı gösterge satın alınmıştır. Sıcaklık ölçüm hassasiyeti  $\pm 1$  °C'dir. termokupllar indeks malzemeye kanal boyunca monte edilmiş ve alüminyum folyo yapıştırıcı ile temas noktalarına sabitlenmişlerdir. Kullanılan alüminyum folyo yapıştırıcı 0,1 mm kalınlıktadır ve bu değer in takımla iş parçası malzemesi arası ısı transferi için ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmiştir. Deneysel koşulların tam olarak benzetimi için malzemenin her iki yüzeyine de yağlayıcı sürülmüştür. Şekil 4.3'te ölçüm koşullarının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.3. Sıcaklık ölçüm düzeneği.

#### 4.4. ŞSE'LERİN ELDE EDİLMESİ

İndeks malzeme ile oluşturulan sıcaklık ölçüm düzeneği bir şekillendirme prosesi değildir. Sadece kalıp sıcaklıklarına ve soğutma suyu sıcaklığına (SSS) göre malzeme yüzey sıcaklıklarının değişiminin tespit edildiği bir takım sıcaklığı referanslı ölçüm düzeneğidir. Ölçüm işlemi, şekillendirme işleminin tam olarak başladığı koşullar sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu koşul baskı levhasının flanş bölgesine yeteri kadar basınç uyguladığı (10 Bar) ve ıstampa alt yüzeyinin iş parçası malzemesine tam olarak temas ettiği durumdur (Şekil 4.4). Ölçüm için fiziki ortam sağlandıktan sonra ısıtma ve soğutma sistemleri çalıştırılarak malzeme yüzeyinden sıcaklık değerleri ölçülmeye başlanmıştır. Farklı baskı levhası basıncı değerlerinin iş parçası malzemesinin ısınmasına olan etkisinin araştırılması düşünülmüş fakat literatürden elde edilen veriler nedeniyle sabit baskı levhası basıncında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kaya yaptığı



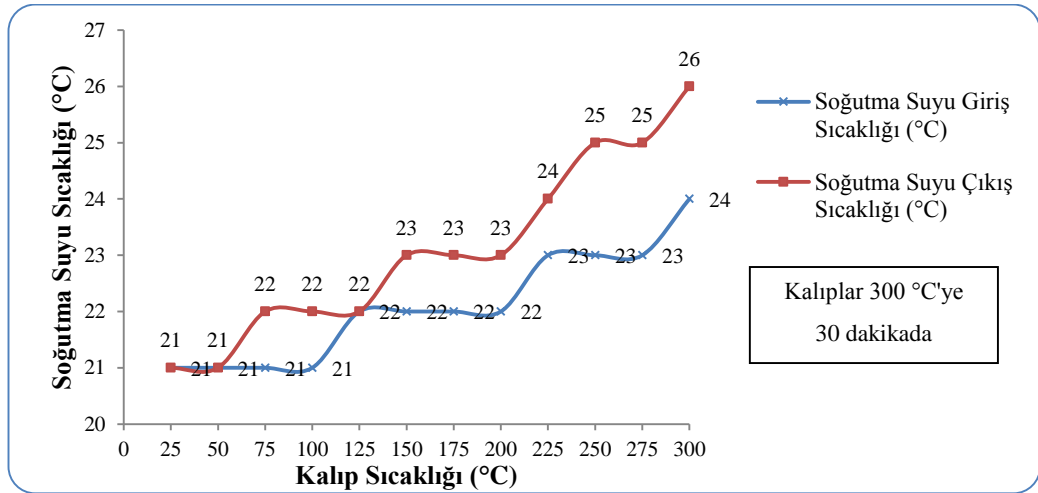
bir unsurda, daha önce de bahsedilen malzemenin gerekli şekillenme sıcaklıklarına ulaşması ile şekillenmesi için gerekli sıcaklıklarda bekleme sürelerinin farklılığıdır. Malzeme ısınmış kalıplara temas ettiği andan itibaren en geç 30 saniye içinde 300 °C sıcaklığa ulaşabilmektedir. Fakat malzemenin 300 °C'deki mekanik özellikleri sağlaması için en az 2 dakika kalıp içinde beklemesi gerekmektedir. Şekillendirme süresi ise en düşük şekillendirme hızında (2,4 mm/s) yaklaşık 30 saniyedir. Malzemenin bu süre içinde, kalıpta bekleme anında oluşan mekanik özelliklerini değiştirip, şekillenme anında oluşan sıcaklığın mekanik özelliklerini sağlaması beklenen bir durum değildir. Fakat çok düşük şekillenme hızlarında şekillendirilen malzemeler için sıcaklık değişiminin derin çekilme mesafesine göre değişiminin tespit edilmesi gereklidir. Bu işlem için, verilerin güvenilirliği açısından endüstriyel bir tezgâhta değil, laboratuvar şartlarında özel tasarlanmış kalıplarda deneyler gerçekleştirilmelidir.

ŞSE'lerin davranışını etkileyen faktörler kalıp sıcaklıkları ve soğutma suyu sıcaklıklarıdır. Bu sebeple ŞSE'ler bu iki değişkene göre elde edilmiştir. Kalıp sıcaklıkları pres tezgahına monte edilen kontrolörler ile 1 °C hassasiyette ayarlanabilmektedir. Soğutma suyu sıcaklığının davranışını hakkında ise herhangi bir literatür verisi bulunmamaktadır. Bu sebeple ŞSE'ler elde edilmeden önce soğutma suyunun kalıp sıcaklığına göre değişimi incelenmiştir. Soğutma suyu sıcaklıkları belirlendikten sonra ŞSE'ler elde edilmiştir.

#### **4.4.1. Soğutma Suyu Sıcaklığı Değişiminin Belirlenmesi**

Soğutma suyu sıcaklıkları ölçümü, soğutucu su tankına oda sıcaklığında doldurulan suyun basit devir daim düzeneği ile ıstampada dolaştırılması koşulları için gerçekleştirilmiştir. Soğutma çevrimine göre çalışan soğutma düzeneğinde ise soğutma suyu sıcaklığı ayarlanabildiği ve işlem süresince sabit tutulabildiği için ölçüm yapılmamıştır. Soğutma suyunun sıcaklığı, ıstampada bulunan soğutma kanalının su giriş ve çıkış hortumlarına monte edilen termokupllar ile ölçülmüştür. Ölçümlerde toplam kalıp ısınma süreleri de referans alınmıştır. Kalıp sıcaklığının 30 dakikada 300 °C sıcaklığa ulaştığı koşullarda gerçekleştirilen ölçüm sonuçları Şekil 4.5'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Kalıbın kademeli yükselmeyle (her bir kalıp sıcaklığında

yaklaşık 30 dakika beklendiği koşullar) 300 °C sıcaklığa 4 saatte ulaştığı koşullarda elde edilen ölçüm sonuçları da Şekil 4.6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiklerden elden edilen sonuçlar kısa süreli ılık şekillendirme işlemlerinde soğutma suyu sıcaklığının fazla yükselmediği, fakat uzun süreli ılık şekillendirmede belirli bir süre sonra sıcaklığın hızla yükselmeye başladığı görülmektedir. Şekil 4.6'da görülen grafiğin artan bir davranış göstermesi endüstriyel uygulamalar için soğutma işlemlerinin soğutucu bir ünite ile kontrollü olarak sağlanması gerektiğini göstermektedir. Tez çalışmamızda uzun süreli ısıtma soğutma işlemi uygulanmadığı, sadece araştırma amaçlı deneyler gerçekleştirildiği için Şekil 4.5'te görülen değerler referans alınmıştır. Bu sebeple basit soğutma düzeneğinin kullanıldığı ölçümler için, soğutma suyu sıcaklığı parametresi olarak 25 °C sıcaklığın kullanılmasına karar verilmiştir. Soğutma çevrimi ile çalışan, soğutma suyunun sıcaklığının kontrol edilebildiği düzenekte ise 0 °C soğutma suyu sisteme pompalanmıştır. İstampa devir daim edilen su sıcaklığının ise ıstampa tabanında -2 °C'ye kadar düştüğü belirlenmiştir (Şekil 4.7). Elde edilen bu değer soğutmanın aktif olarak çalıştığını göstermektedir.



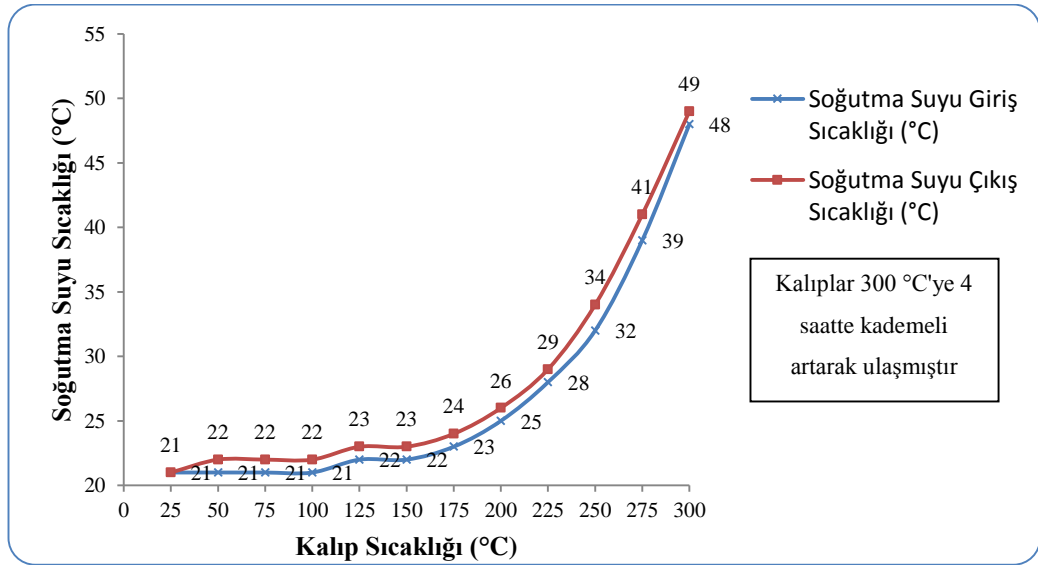
Şekil 4.5. Kalıp sıcaklıklarına göre soğutma suyu sıcaklığının değişimi.

#### 4.4.2. Malzeme Yüzey Sıcaklıklarının Ölçülerek ŞSE'lerin Elde Edilmesi

İndeks malzeme referans alınarak elde edilen şekillendirme sıcaklıkları 25 °C artırımla 25 °C'den 300 °C'ye kadar kalıp sıcaklıkları ve SSS değerine göre elde edilmiştir (Şekil 4.8). Şekillendirme sıcaklıkları izotermal olmayan koşullar sebebiyle indeks



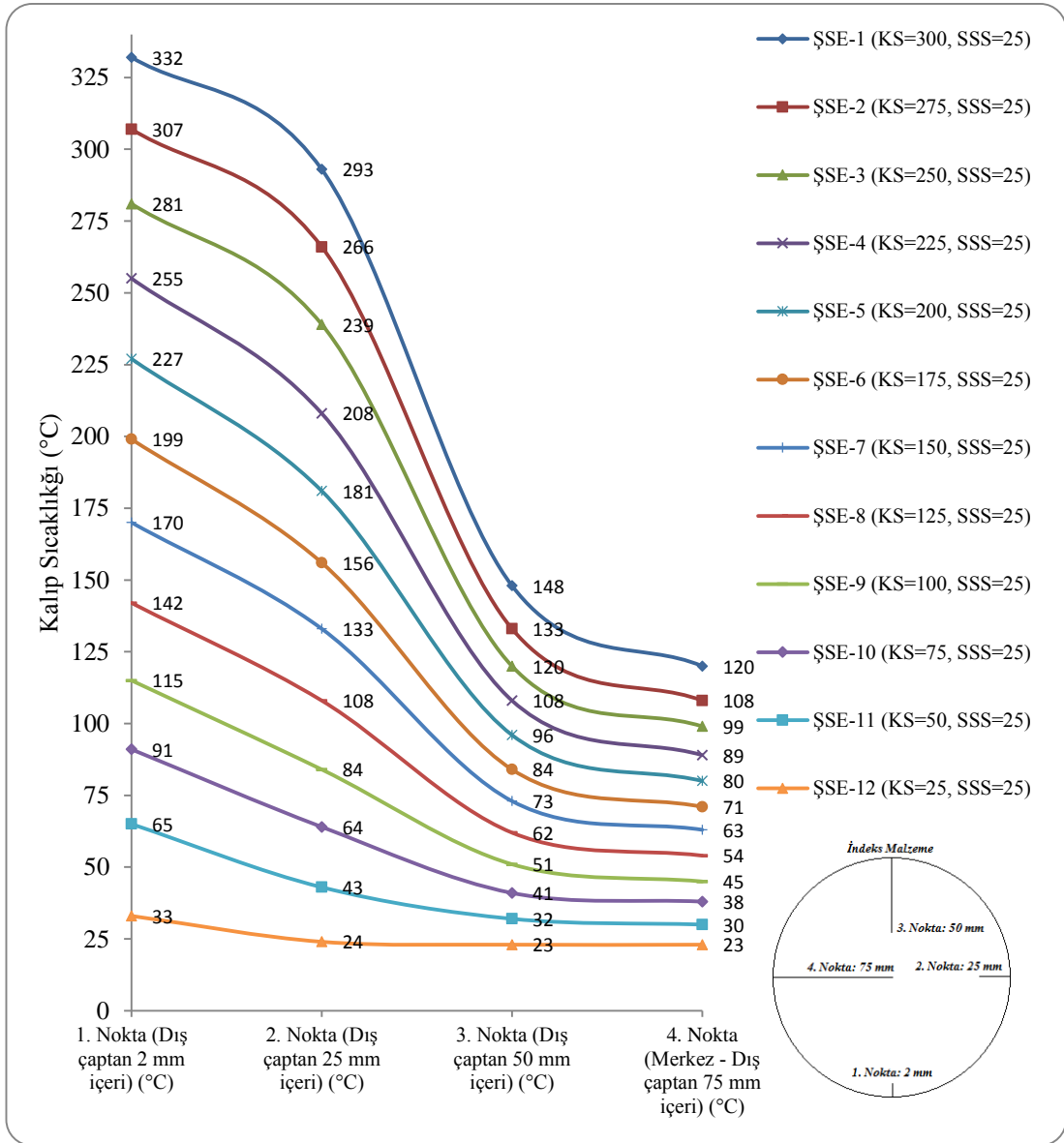
malzemenin 4 farklı noktasından ölçülmüş ve ısı akısı nedeniyle eğriler ile karakterize edilmiştir. Şekillendirme sıcaklık eğrileri ve eğrilerin kalıp sıcaklıklarına göre davranışı Şekil 4.8’de detaylı bir şekilde görülmektedir. ŞSE eğrileri; 1. İş parçası malzemesindeki sıcaklık gradyanının karakterizasyonu, 2. Istampı içi soğutma sisteminin soğutma kapasitesi, 3. Takım sıcaklıklarına göre iş parçası malzemesinin sıcaklığının nasıl değiştiği konularında bilgi vermektedir. ŞSE eğrilerinde görülen en önemli sonuç kalıp sıcaklıkları ile iş parçası malzemesi sıcaklıklarının farklılığıdır. Kalıp sıcaklığı 300 °C’ye ulaştığı anda, iş parçasının en dış çapında sıcaklık 332 °C olarak ölçülmüştür. Benzer durum bütün kalıp sıcaklığı ve iş parçası sıcaklığı değerleri için geçerlidir. Bu durum ısıtma sisteminin kalıba göre pozisyonuna, takım geometrisinin farklılığına ve sıcaklık ölçüm noktalarının farklılığına bağlı olarak her şekillendirme ünitesi için farklılık gösterecektir. Elde edilen ŞSE’ler, takım sıcaklıklarının şekillendirme sıcaklığı olarak kullanımının hatalı analizlere sebebiyet vereceğini göstermekte ve Çizelge 1’deki literatür değerlerinin farklılığının sebebini açıklamaktadır.



Şekil 4.6. 4 saatlik ısınma süresinde soğutma suyu sıcaklığının değişimi.

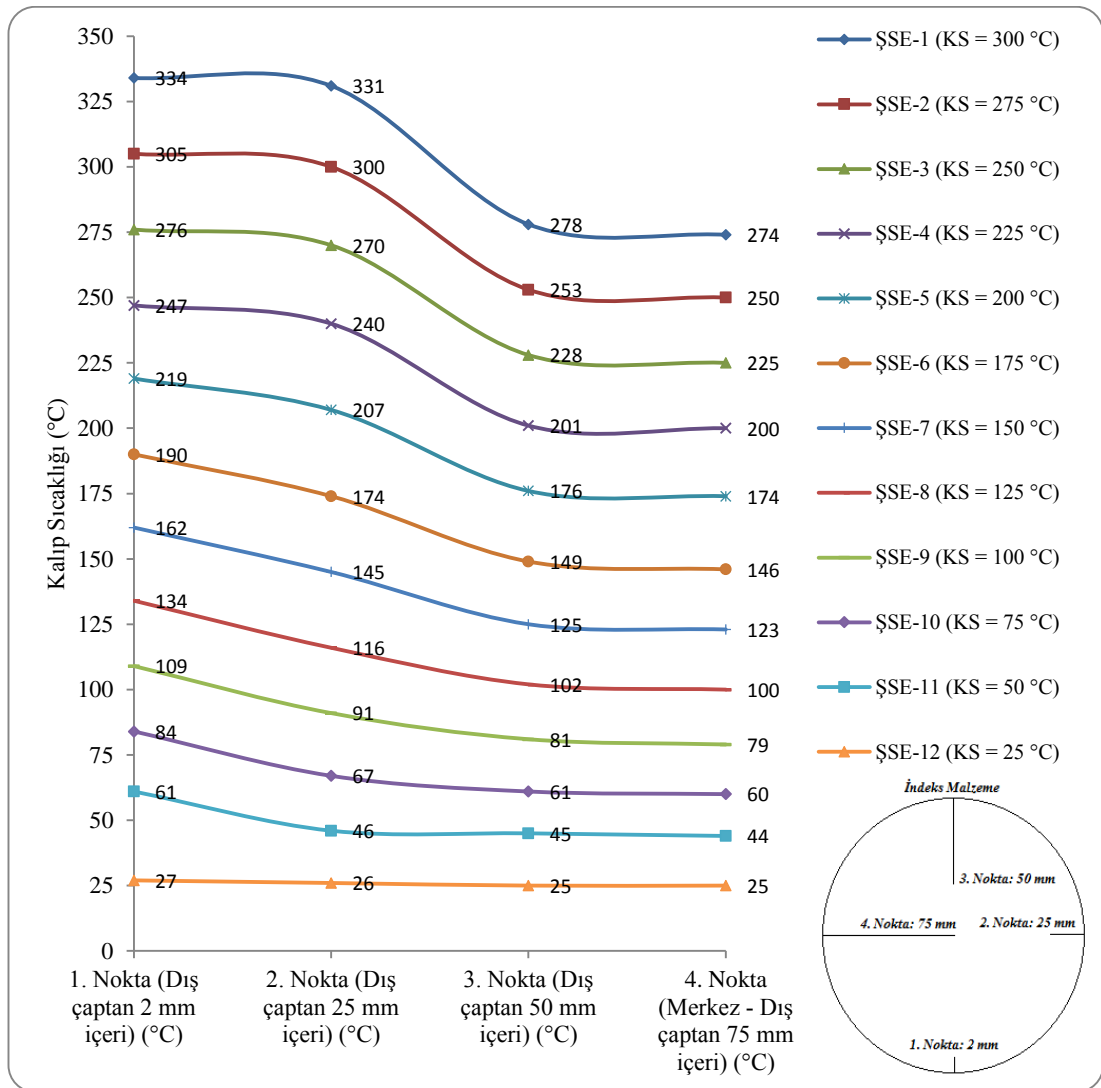


Şekil 4.7. Soğutulan ıstampa tabanında ölçülen sıcaklık değeri.



Şekil 4.8. İstampa soğutulduğu şartlarda kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilmiş ŞSE'ler.

ŞSE'ler ıstampanın soğutma verimliliğini değerlendirebilmek açısından da önem taşıtmaktadır. Eğrilerin genel davranışı, ısıtma işleminin malzeme üzerinde dış çaptan içe doğru 25 mm'lik mesafede etkili olduğu (flanş bölgesi – 1. ve 2. noktalar arası), soğutma işleminin ise malzeme merkezinden dış çapa doğru 25 mm'lik çapta etkili olduğunu göstermektedir. Soğutma işleminin eğrilere olan etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için soğutma yapılmadan sadece ısıtma işleminin yapıldığı koşullarda da sıcaklıklar llmştr. şekil 4.9'da sadece ısıtma koşullarında kalıp sıcaklıklarına göre iş parçası malzemesi sıcaklığının değişimi sıcaklık eğrileri yoluyla gösterilmiştir.



şekil 4.9. Soğutma yapılmadığı şartlarda kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak elde edilmiş ŞSE'ler.

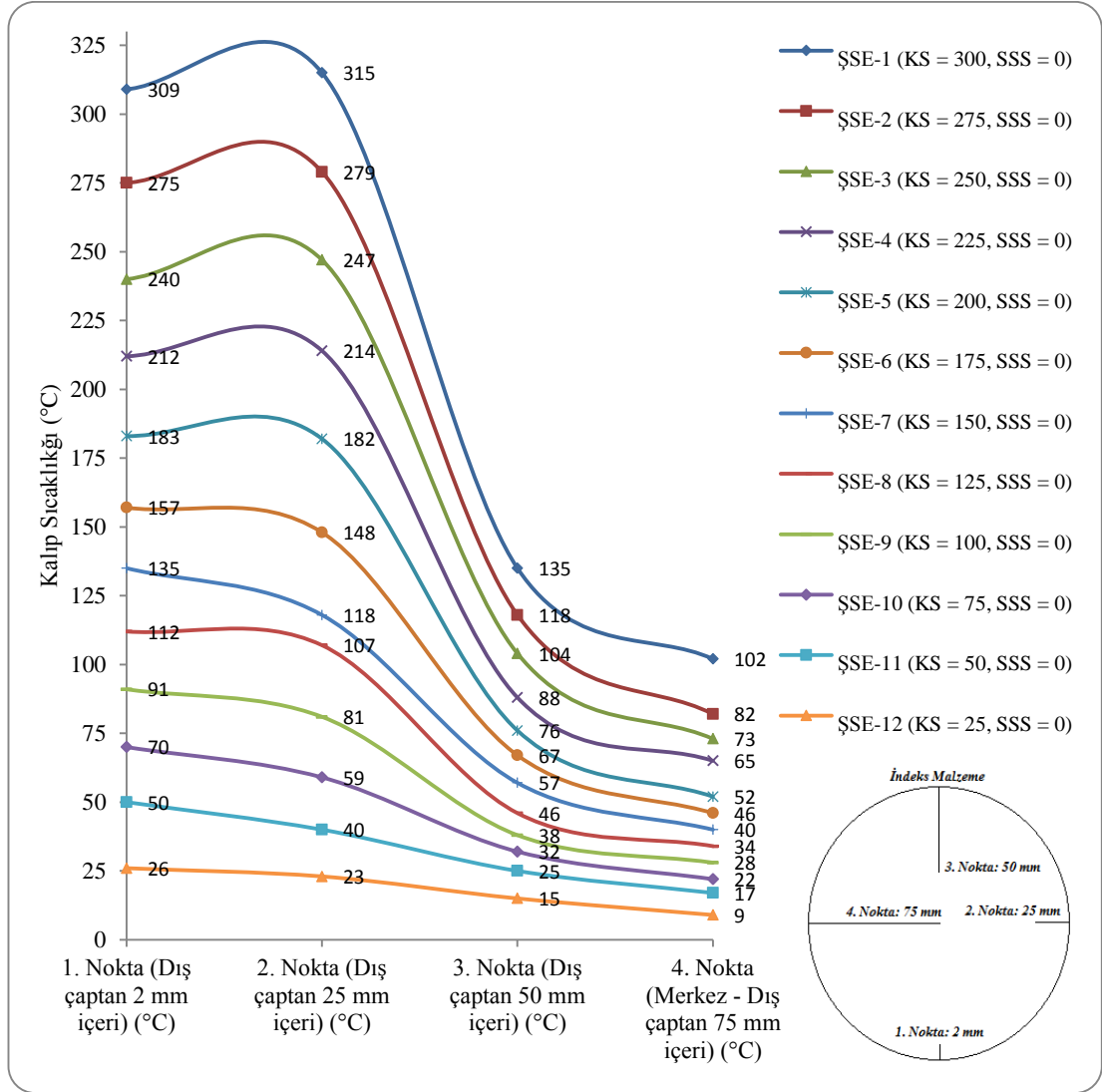
#### 4.4.3. ŞSE'lerin Kontrollü Soğutma Şartlarındaki Davranışlarının Belirlenmesi

ŞSE'lerin geliştirilmesinden sonra ŞSE'lerin davranışlarının değiştirilebilirliği incelenmiştir. ŞSE'lerin davranışlarının değişebilirliği iki sebepten dolayı araştırılmıştır. Bunlardan birincisi soğutma sisteminde kontrollü soğutma sağlanırsa eğrilerin davranışının nasıl değişeceğinin belirlenmesidir. İkinci sebep ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ideal optimum sıcaklık derecelerine erişebilirliğin incelenmesidir. Bu amaçla, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, soğutma işlemi için 2000 kcal soğutma yükü kapasiteli bir soğutma ünitesi temin edilmiş ve ıstampa 0 °C'de soğutma suyu ile soğutulmuştur. Soğutma suyu sıcaklığında ılık şekillendirme işlemleri boyunca artış gözlenmemiştir. Ayrıca sıcaklık ölçümü için farklı ölçüm mesafeleri olan iki indeks malzeme kullanılmış ve eğrilerin davranışı daha hassas bir şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4.10'da sadece 4 noktadan ölçüm alınmış ŞSE'ler, Şekil 4.11'de de aynı ölçüm şartlarında 8 noktadan sıcaklık ölçümü alınmış ŞSE'ler görülmektedir.

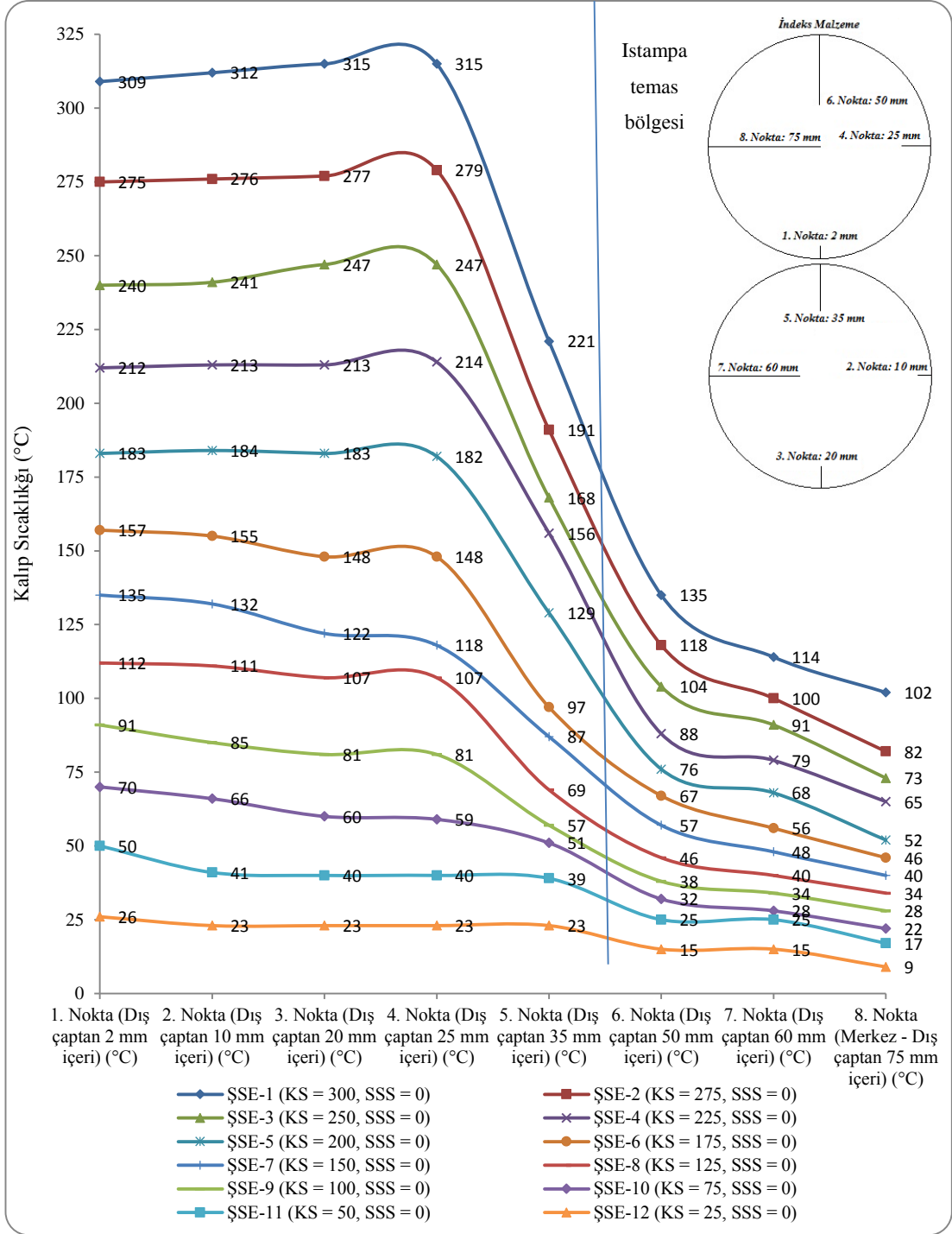
Şekil 4.10'da elde edilen veriler soğutma suyunun 0 °C'de sabit tutulduğu durumda malzeme yüzeyinde soğutma kapasitesinin arttırılabildiğini ve eğrilerin davranışının değiştiğini göstermektedir. İstampanın temas ettiği bölgede daha düşük sıcaklıklar elde edilebilmiştir.

Şekil 4.10'da soğutmanın flanş bölgesini etkilediği görülmektedir. Flanş bölgesinde kalıp sıcaklıklarına yakın değerlerde sıcaklıklar elde edilmiştir. Şekil 4.8'e göre 300 °C kalıp sıcaklığında flanş bölgesinin ilk sıcaklık ölçüm noktası (1. Nokta – Dış çaptan 2 mm içeri) 332 °C iken, Şekil 4.10'a göre bu değer 309 °C olarak ölçüldüğü görülmektedir. Bu durum ıstampa bölgesi için ideal optimum sıcaklıkları elde edebilmek açısından olumlu olsa da, flanş bölgesi için olumsuz sonuç oluşturmaktadır. Ayrıca kalıp sıcaklığının 175 °C ve üzeri olduğu durumlarda flanş bölgesinde ölçülen sıcaklıklarda (Şekil 4.10'a göre 1. ve 2. noktalar arası) dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanmalar ıstampanın 0 °C'ye kadar soğutulmasından kaynaklanan terleme olayıyla açıklanabilir. Ölçümler esnasında ıstampa yüzeyinde yoğun su damlacıklarının oluştuğu görülmüştür. Su damlacıklarının malzemenin ısınması aşamasında malzeme yüzeyine akması malzemedeki soğutma etkisi oluşturmakta ve

sıcaklıkların dalgalanmasına neden olmaktadır. Bu durum sıcaklık ölçüm hassasiyetini olumsuz etkileyen bir durumdur. Bu sebeple ölçülen sıcaklıklar gerçek şekillendirme sıcaklıklarına en yakın değerler olarak değerlendirilebilir.

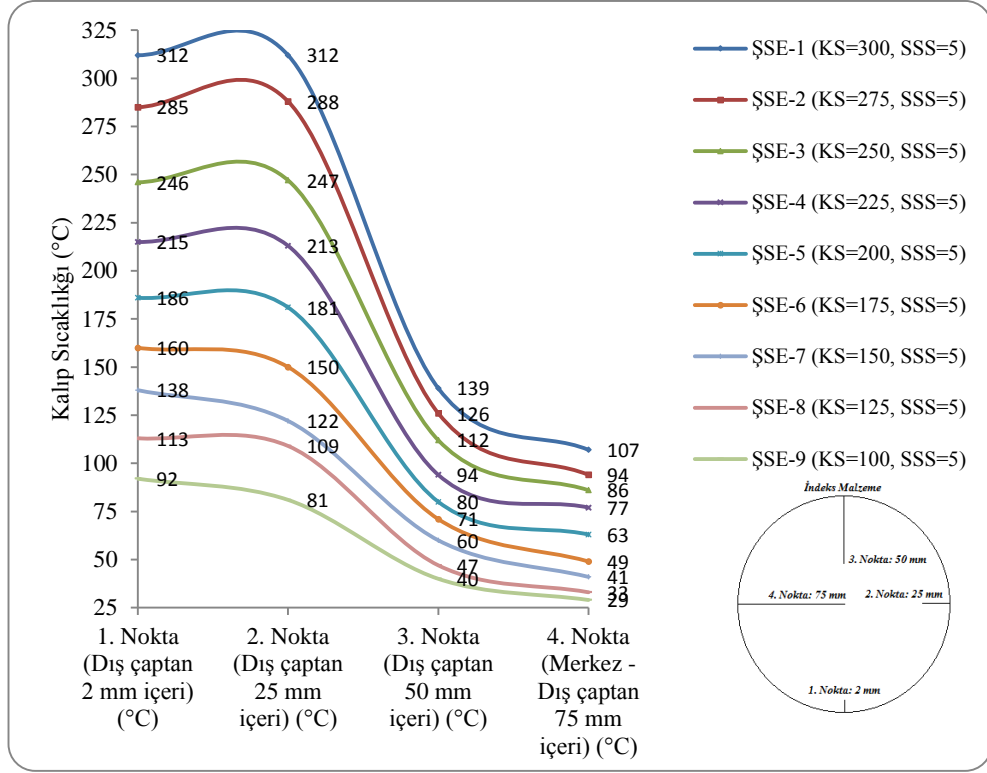


Şekil 4.10. Soğutma suyu sıcaklığının 0 °C’de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE’lerin davranışı.

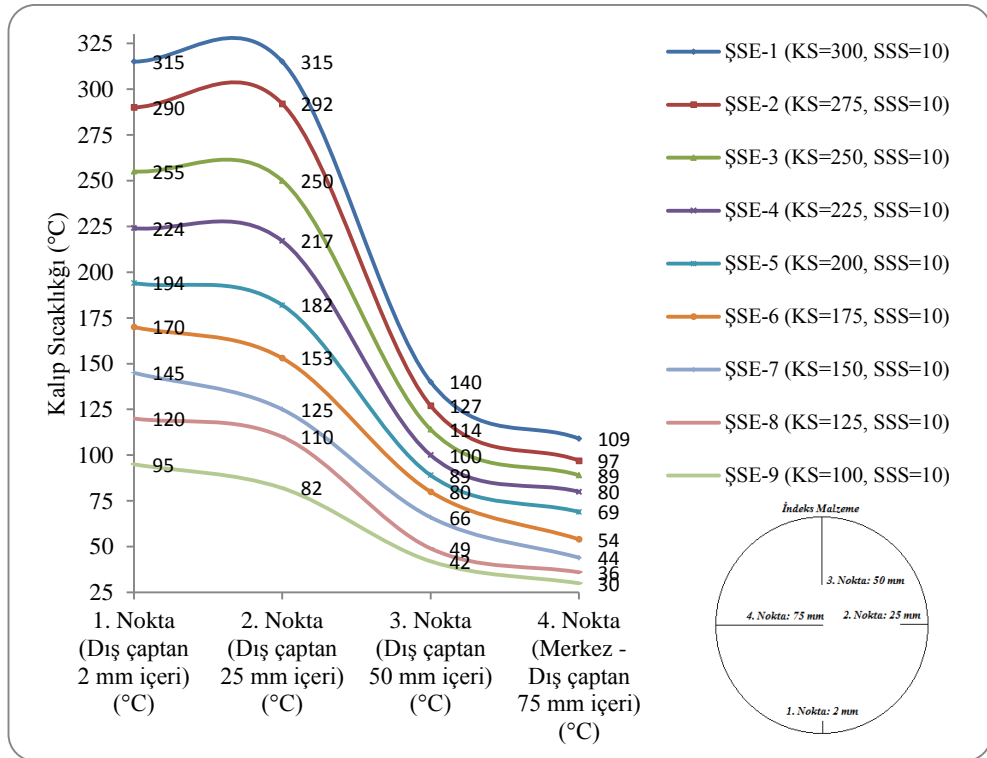


Şekil 4.11. Soğutma suyu sıcaklığının 0 °C’de olduğu ve 8 noktada ölçüm yapıldığı durumda ŞSE’lerin davranışı.

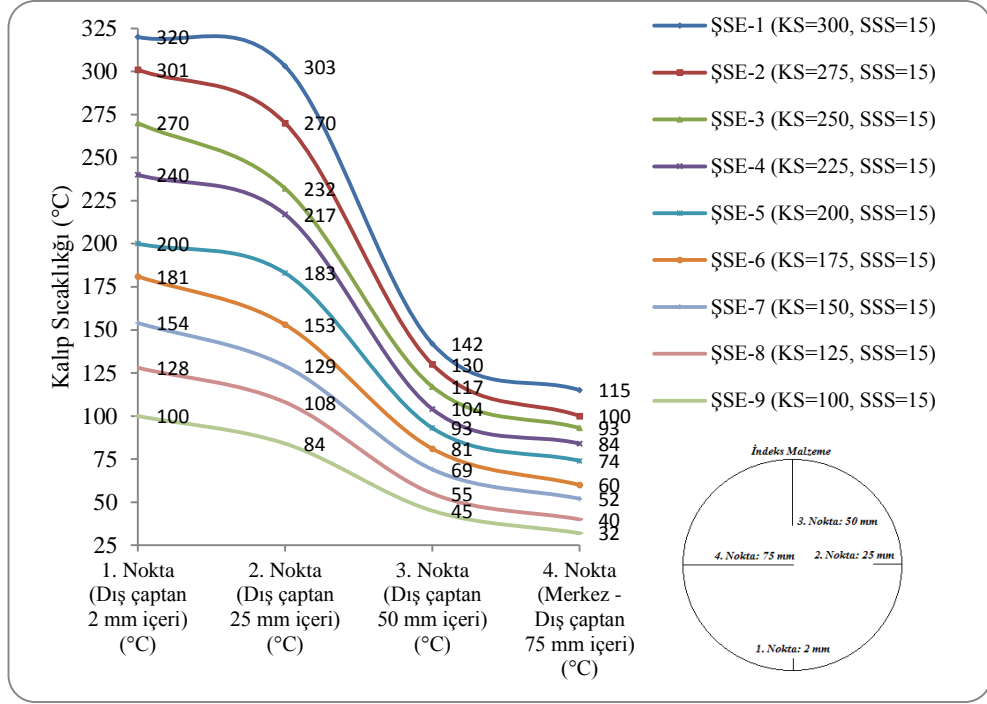
ŞSE eğrileri SSS’nin 5, 10, 15 ve 20 °C olduğu durumlar içinde elde edilmiş ve elde edilen eğriler Şekil 4.12-4.15’te verilmiştir.



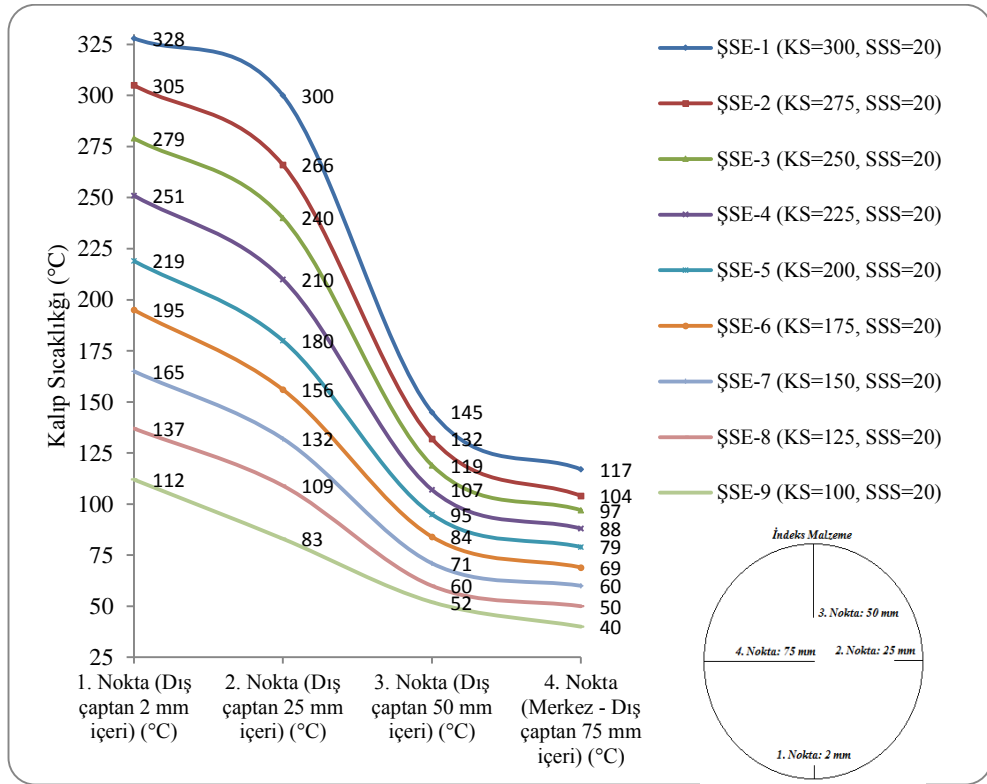
Şekil 4.12. Soğutma suyu sıcaklığının 5 °C’de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE’lerin davranışı.



Şekil 4.13. Soğutma suyu sıcaklığının 10 °C’de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE’lerin davranışı.



Şekil 4.14. Soğutma suyu sıcaklığının 15 °C’de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE’lerin davranışı.



Şekil 4.15. Soğutma suyu sıcaklığının 20 °C’de olduğu ve 4 noktadan ölçüm yapıldığı durumda ŞSE’lerin davranışı.



Şekil 4.12-4.15'te elde edilen eğriler, SSS değeri arttıkça ıstampa temas bölgesinde anlamlı bir sıcaklık yükselmesinin gerçekleştiğini, fakat kalıp radyüsü bölgesinde (2. nokta) SSS değişimiyle orantılı olarak anlamlı bir değişimin oluşmadığını göstermektedir. Kalıp radyüsü bölgesinin SSS değişiminden etkilenmemesi ılık derin çekilebilirlik açısından olumlu bir durumdur. Çevresel ve radyal gerilmelerin en fazla yoğunlaştığı bölümün ıstampa radyüsü bölgesi olması sebebiyle şekillendirilebilirliği arttırmak için bu bölümde sıcaklık artışının sağlanması gerekmektedir [42]. Farklı SSS derecelerinde elde edilen ŞSE'lerin davranışları, eğrilerin AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının ılık derin çekilebilirliğine etkisi incelenerek araştırılmıştır.

## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE METOT

#### 5.1. GİRİŞ

Ilık derin çekme prosesi, sıcaklığın akma dayanımına olan etkisinden yararlanarak yassı bir metalik sacdan üç boyutlu derin bir kap elde etme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu işlem için kap formunu verecek olan kalıplara, sac malzemeyi kalıplara itecek kuvveti sağlayan pres ünitesine, kalıp elemanlarının akslenlenmesini sağlayan kılavuz elemanlara, kalıp geometrisine ve termal etkilere uygun şekillenme davranışı gösterecek sac malzemeye, uygun malzeme kalınlığına, malzemenin kırışmasını engelleyecek baskı plakası basıncına, uygun proses parametrelerine ve şekillendirme kuvvetleri altında oluşacak sürtünmeyi azaltabilecek yağlayıcıya ihtiyaç vardır. Materyal ve metot bölümünde ilk olarak, ılık derin çekme işlemi için pres ünitesi kurulumu detaylı olarak incelenmiş ve presin çalışma prensibi açıklanmıştır. Materyal metot bölümünün deney metodolojisi başlığı altında, deneyler için belirlenen proses parametreleri ve seviyeleri ile parametre seçim kriterleri belirtilmiştir. Bir sonraki bölümde deneylerde kullanılan iş parçası malzemesinin kimyasal içeriği, mekanik özellikleri ve malzemeye uygulanan ısı işlem anlatılmıştır. Ilık derin çekme prosesi için en kritik aşamalardan birisi yağlayıcı seçimidir. Yüksek sıcaklık koşulları altında kararlılığını sürdürecekt ve prosesin yapısına uygun yağlayıcı seçimi araştırılmış ve en uygun yağlayıcılar belirtilmiştir. Derin çekme işlemi sonucu elde edilen numuneler için değerlendirme parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelerin ölçülebilirliği, işlemin en zor adımlarından birisidir. Yırtılma, marullanma gibi kusurlar ancak görsel ve niteliksel olarak değerlendirilebilecek çıkış parametreleridir. Kap yüksekliği, geri yaylanma gibi niceliksel olarak değerlendirilebilecek parametrelerin sağlıklı bir şekilde ölçülebilmeleri için de ileri tekniklere ihtiyaç duyulduğu, tez çalışması kapsamında görülmüştür. Ayrıca niceliksel olarak ölçülecek parametrelerin malzemenin anizotropisi, sac malzemenin

üreticisinden kaynaklanan farklılıklar, malzemenin kesim metodu, derin çekilmiş kabın kalıptan çıkarılma yöntemi gibi incelenebilirliği zor olan birçok değişkenden yüksek oranda etkilendiği de belirlenmiştir [1]. Ölçüm cihazları ve ölçme metodolojisi başlığı altında ılık derin çekilmiş kaplar için belirlenen çıkış parametreleri ve bu parametrelerin değerlendirme ve ölçüm yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır.

## **5.2. DENEY DÜZENEGİ KURULUMU**

Ilık derin çekme ünitesinin kurulumundan önce gerçekleştirilen ön deneyler için Karabük Üniversitesi Metal Atölyesinde kullanılan hidrolik preslere derin çekme kalıpları bağlanmış ve kalıp dışında ısıtılan malzemeler belirlenen sıcaklık derecelerine ulaştıkları anda kalıp içine taşınarak ılık derin çekme işlemi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar da elde edilen veriler, ılık derin çekme prosesinde pres harici ısıtma sistemlerinin kullanımının proses parametrelerinin kontrolünü imkansız hale getirdiğini göstermiştir. Ayrıca pres üzerine monte edilen baskı levhası elemanı ile ıstampanın bağlı olduğu hidrolik silindirin kalıba göre merkezlenmesi sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilememiştir. Bu sebeplerden dolayı sadece bu prosese yönelik pres tezgahının kurumunun gerekli olduğu belirlenmiştir. Deney düzeneği kurulumunda, ılık derin çekme prosesinin kararlılığını etkileyen en önemli parametreler rijit bir pres tezgahının kullanımı (yekpare üretilmiş pres tezgahı), kalıp elemanlarının birbirlerine göre en doğru şekilde merkezlenmeleri ve proses parametrelerinin doğru seçimi ve kontrol edilebilirliğidir. Bu unsurlar dikkate alınarak, pres üretimi yapan Hidroliksan firmasında ılık derin çekme presi üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sürecinde firmanın derin çekme presleri konusundaki tecrübesinden yararlanılmış, presin tasarım ve imalatı literatür referans alınarak ve üretimin her safhası prosesin gerekleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

### **5.2.1. Pres Ünitesinin Kurulumu**

Ilık derin çekme işleminde oluşan kuvvet akışının prosesi negatif etkilememesi için yekpare gövdeye sahip C veya H tipi konstrüksiyonlu preslerin kullanılması gerekmektedir. Bu tip presler rijitliklerini koruyabildikleri için, deney ünitesinde sehimden kaynaklı eksen kaçıklığı ve kuvvet akışı düzensizliği problemi

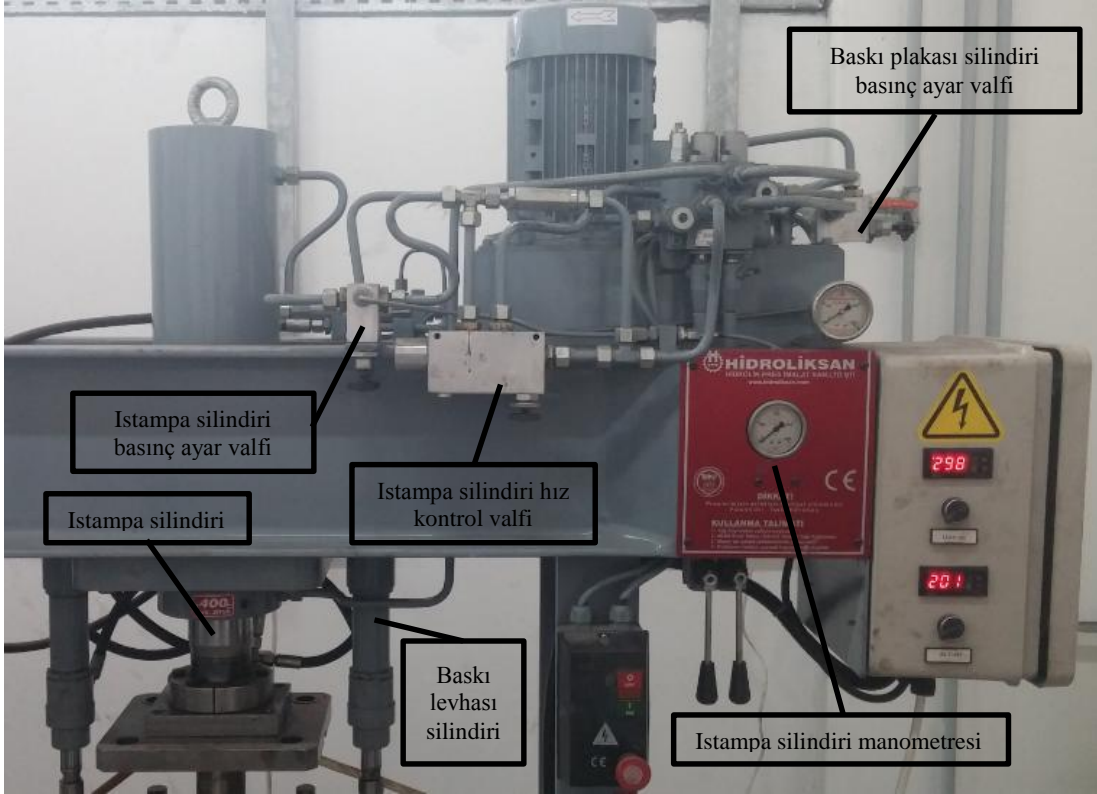
oluşmamaktadır. Tez çalışması kapsamındaki imkanlar doğrultusunda C veya H tipi bir pres temin edilememiştir. Fakat bu preslerin fonksiyonunu büyük ölçüde yerine getirebilecek, şasesi güçlendirilmiş 30 tonluk bir atölye presi temin edilmiştir. Ilık derin çekme prosesine uygun konuma getirilmiş, ısıtma ve soğutma sistemi entegreli presin görüntüsü Şekil 5.1’de verilmiştir.



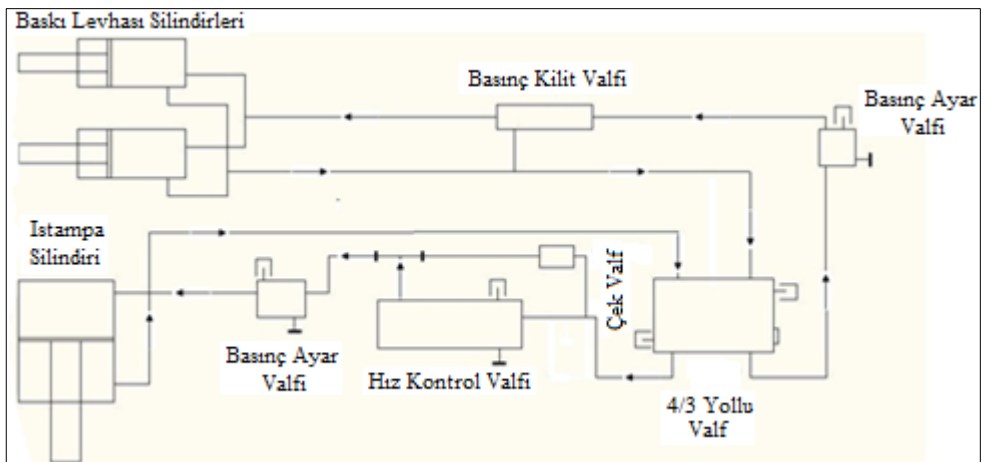
Şekil 5.1. Deneyleerde kullanılan prese ait görüntü.

Presin hidrolik güç ünitesinde 6,5 litre kapasiteli dişli pompa ve pompayı tahrik etmek üzere 3 kW’lık (4 Beygir) bir elektrik motoru kullanılmıştır. Hidrolik pres 300 bar basınçta 49 ton yük uygulayabilme kapasitesine sahiptir. Istampanın bağlı olduğu hidrolik silindirin ve baskı levhalarını tahrik eden yan hidrolik silindirlerin basınç ayarı için üniteye hat tipi basınç regülatörleri eklenmiştir (Şekil 5.2). Mekanik olarak kontrol edilebilen basınç değerleri ünite üzerindeki manometrelerden okunabilmektedir (Şekil 5.2). Şekillendirme hızının ılık şekillendirme prosesine etki eden bir parametre olması sebebiyle hız kontrolü için ünite üzerine 3 yollu hat tipi kısıcı eklenmiş, bu sayede mekanik olarak merkez silindirin hızı kontrol edilebilir duruma gelmiştir (Şekil 5.2). Hidrolik sisteme ait şematik görüntü Şekil 5.3’te verilmiştir. Ilık şekillendirme prosesinde etkili olan diğer bir faktör de baskı levhası basıncıdır. Baskı levhası silindirleri 400 mm çalışma yüksekliğine sahip olup 300 bar basınçta 7,5 ton yük

uygulayabilme kapasitesine sahiptir. Baskı levhası kuvvetinin sabit bir değerde kalabilmesi için ünite üzerine hat tipi basınç kilidi monte edilmiştir. Ayrıca kalıpların hareketi esnasında merkezleme problemi oluşmaması için pres şasesi üzerine kılavuz miller monte edilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.2. Hidrolik devre elemanlarının görüntüsü.



Şekil 5.3. Hidrolik devre elemanlarına ait şematik görüntü.



Şekil 5.4. Kılavuz miller ile kalıpların merkezlenmesi.

Pres şasesinin rijitliğini arttırmak ve kalıp bağlama işlemlerinde kullanılmak üzere pres şasesi üzerine 510 x 415 x 60 mm ebatlarında St37 malzemeden imal edilmiş çapraz kanallı ek bir tabla monte edilmiştir. Tabla yüzeyindeki pürüzlülük ve form hatalarından dolayı düzlemsellik sorunu oluşmaması için tablanın yüzeyi dik işlem merkezinde taranarak yüzey kalitesi artırılmıştır. Kalıp matrisi bu tabla üzerine monte edilerek merkezleme ve yan kolonların yük altında esnemesi ile ilgili oluşabilecek problemler minimize edilmeye çalışılmıştır. Tablanın merkezi 100 mm çapında delinerek kalıp boşluğu oluşturulmuş, bu sayede derin çekilen kabın matris içinden çıkarılması kolaylaştırılmıştır. Baskı plakası silindirleri şasesinin üst kirişine civatalı bağlantılar ile monte edilmiş, bağlantı noktalarındaki lamalar ise kaynaklı bağlantı ile şaseye sabitlenmiştir. Erkek kalıpların rijitliğini sağlamak için de merkez silindir üzerine segman bağlantısı atılmış, erkek kalıp elemanları civatalı bağlantı elemanları ile merkez silindir üzerindeki segmana sabitlenmiştir. Yapılan işlemler ile pres şasesi güçlendirilerek deneysel çalışmaya uygun hale getirilmiştir.

### 5.2.2. Ilık Derin Çekme Ünitesinin Şeması

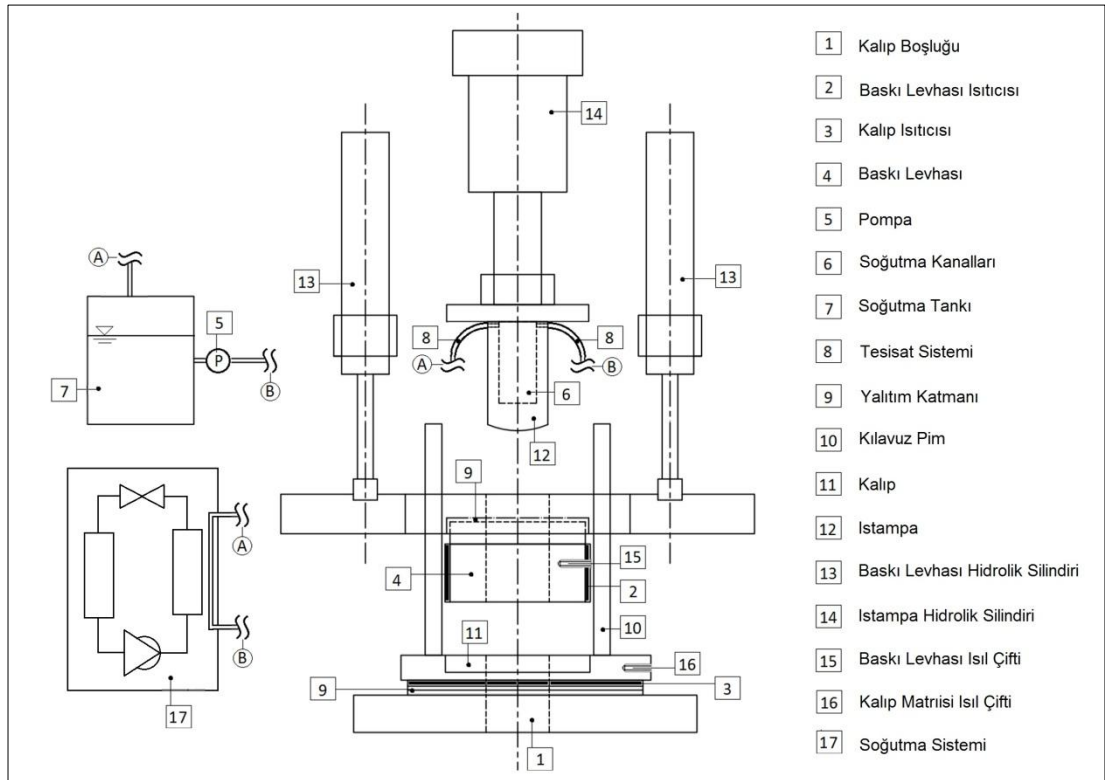
Tez çalışması kapsamında kullanılan ısıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme ünitesi için bütün sistem elemanlarının gösterildiği gerçek sistem Şekil 5.5'te, şematik sistem ise Şekil 5.6'da görülmektedir. Deney ünitesinin daha iyi anlaşılabilmesi için şematik görüntüden önce gerçek sistem görüntüsü verilmiştir. Şematik görüntüde tez çalışmasının 3. bölümünde anlatılan şekillendirme kalıpları ve komponent teknolojiler (ısıtma ve soğutma sistemleri, yalıtım, tesisat) ile 5. bölümünde anlatılan pres elemanlarının (baskı levhası, kılavuz pimler, hidrolik silindirler) ılık derin çekme işlemi için bütünleşmiş yapısı görülmektedir.



Şekil 5.5. Ilık derin çekme işleminde kullanılan sistemin gerçek görüntüsü.

Şekil 5.6'da verilen şematik görüntüde 13 numaralı eleman baskı levhası için kullanılan hidrolik silindirleri (maksimum 7,5 ton kapasiteli), 4 numaralı eleman da baskı levhasını göstermektedir. 10 numaralı eleman kalıp ile baskı levhasını merkezleyebilmek için kullanılan kılavuz pimlerdir. 12 numaralı eleman ıstampayı, 14 numaralı eleman ise ıstampanın bağlı olduğu hidrolik silindirleri (300 barda 49 ton kapasiteli) göstermektedir. Şekilde 11 numaralı eleman kalıbı, 1 numaralı eleman ise derin çekilen kapların kalıptan çıkarılabilmesi için işlenen kalıp boşluğunu

göstermektedir. 2 numaralı eleman baskı levhasının etrafına sarılmış seramik rezistansı, 3 numaralı eleman ise kalıbın altına yerleştirilmiş yaprak rezistansı göstermektedir. Bu rezistanslara ait kontrolörler Şekil 5.2’de gösterilen sistem üzerindeki panoda görülmektedir. Kalıbın sıcaklığının belirlenmesi için kullanılan termokupllar ise 15 ve 16 numaralı elemanlar ile gösterilmiştir. 9 numaralı eleman hem baskı levhasına monte edilen hem de kalıba monte edilen yalıtım tabakalarını göstermektedir. 6 numaralı eleman ıstampa içerisinde açılmış soğutma kanalını, 8 numaralı eleman kanala soğutma suyu giriş çıkışını sağlayan tesisat sistemini, 5 numaralı eleman soğutma sıvısını devir daim ettiren pompayı, 17 numaralı eleman soğutma ünitesini ve 7 numaralı eleman ise soğutma sıvısı tankını göstermektedir.



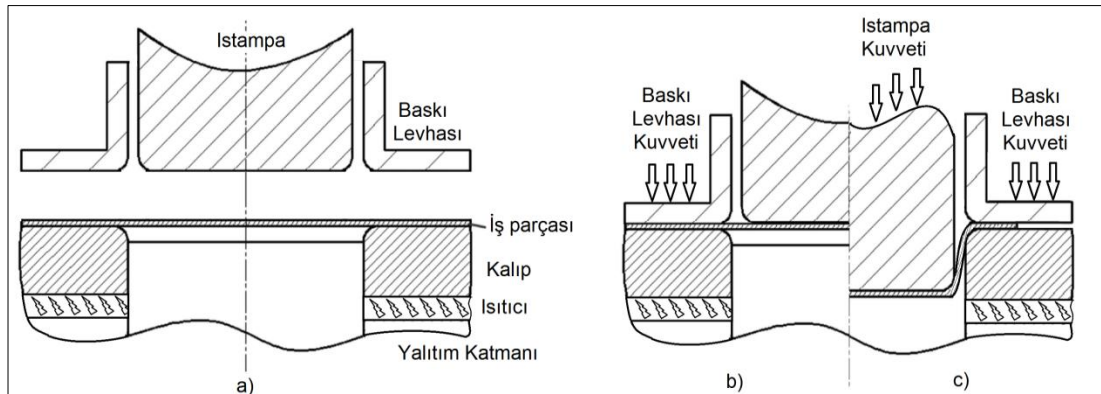
Şekil 5.6. Ilık derin çekme işleminde kullanılan sistemin şematik görüntüsü.

### 5.2.3. Şekillendirme Ünitesinin Çalışma Prensibi

Şekillendirme ünitesinin çalışma prensibi Şekil 5.7’de detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 5.7’de görüldüğü üzere ilk işlem olarak 150 mm çapındaki iş parçası matris üzerine konulmuştur. Matris üzerine konulan iş parçasının her iki flanş yüzeyi de bakır



pasta ile yağlanmıştır. Matris çapı  $150 \pm 0,1$  mm çapında olacak şekilde işlenmiştir. Bu sayede malzemenin erkek kalıba göre merkezlenmesi kolayca sağlanmaktadır. İkinci adımda, baskı levhası istenilen basınç değerinde malzemenin flanş bölgesine etki edecek şekilde kuvvet uygulamaktadır. Bu aşama hem baskı levhası basıncının sağlandığı aşama hem de malzemenin ısıtılması aşamasıdır. Baskı levhasına bağlı kelepçe rezistans ve kalıbın altına yerleştirilen yaprak rezistans devreye girerek malzemeyi istenilen şekillendirme sıcaklığına çıkarmaktadırlar. Sıcaklık kontrolü erkek ve dişi kalıpların üzerine monte edilmiş termokupllar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte ıstampa da soğutma uygulamak amacıyla malzemeyle temas halindedir. İş parçası malzemesinin ısıl dengeye ulaşması için malzeme 2 dakika süreyle baskı levhası ve ıstampayla temas halinde bekletilmiştir. Son aşama şekillendirme aşamasıdır. İstenilen şekillendirme hızına ve kuvvetine ayarlanan ıstampa malzemenin kalıbın içine doğru akmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.7. Şekillendirme ünitesinin çalışma prensibi.

### 5.3. DENEY METODOLOJİSİ

Derin çekilebilirliği olumsuz yönde etkileyen parametreler flanş bölgesinde oluşan marullanma kusuru, kap duvarında oluşan malzeme yığılmaları ve malzemenin herhangi bir bölgesinde oluşan yırtılma kusurudur [43]. Derin çekilmiş kaptaki herhangi bir kusur prosesin değerlendirilmesini zorlaştırmakta ve anlamlı sonuç veya sonuçlar elde etmek güçleşmektedir. Bu sorunun çözümü için, deneylerde öncelikle proses parametrelerinin ılık derin çekilebilirliğe olan etkisi araştırılmış ve hatasız derin çekilebilirliği sağlayan proses parametresi aralıklarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu aşama proses parametreleri için kısıt fonksiyonlarının elde edildiği aşamadır. Bir sonraki adımda gerçekleştirilen deneyler için ölçüm parametreleri değiştirilerek parametrik optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmasında ŞSE'ler için optimum seviyenin belirlenmesi hedeflenmiş ve elde edilen verilerin anlamlılığı ANOVA tekniği ile değerlendirilmiştir. Ayrıca ŞSE'ler üzerinde de trend analizi uygulanarak her bir sıcaklık ölçüm noktası için optimum değerin ne olması gerektiği belirlenmeye çalışılmıştır. ŞSE eğrilerindeki sıcaklık ölçüm noktaları için optimum değerler belirlendikten sonra bu değerlere ulaşılabilirlik incelenmiş ve mümkün olduğu kadar ilgili değerlere yaklaşılmaya çalışılmıştır. Elde edilen yeni ŞSE'ler ile iki farklı malzeme için limit çekme oranları araştırılmış ve optimum sıcaklıklara yaklaştıkça limit çekme oranının artırılabilirdiği belirlenmiştir.

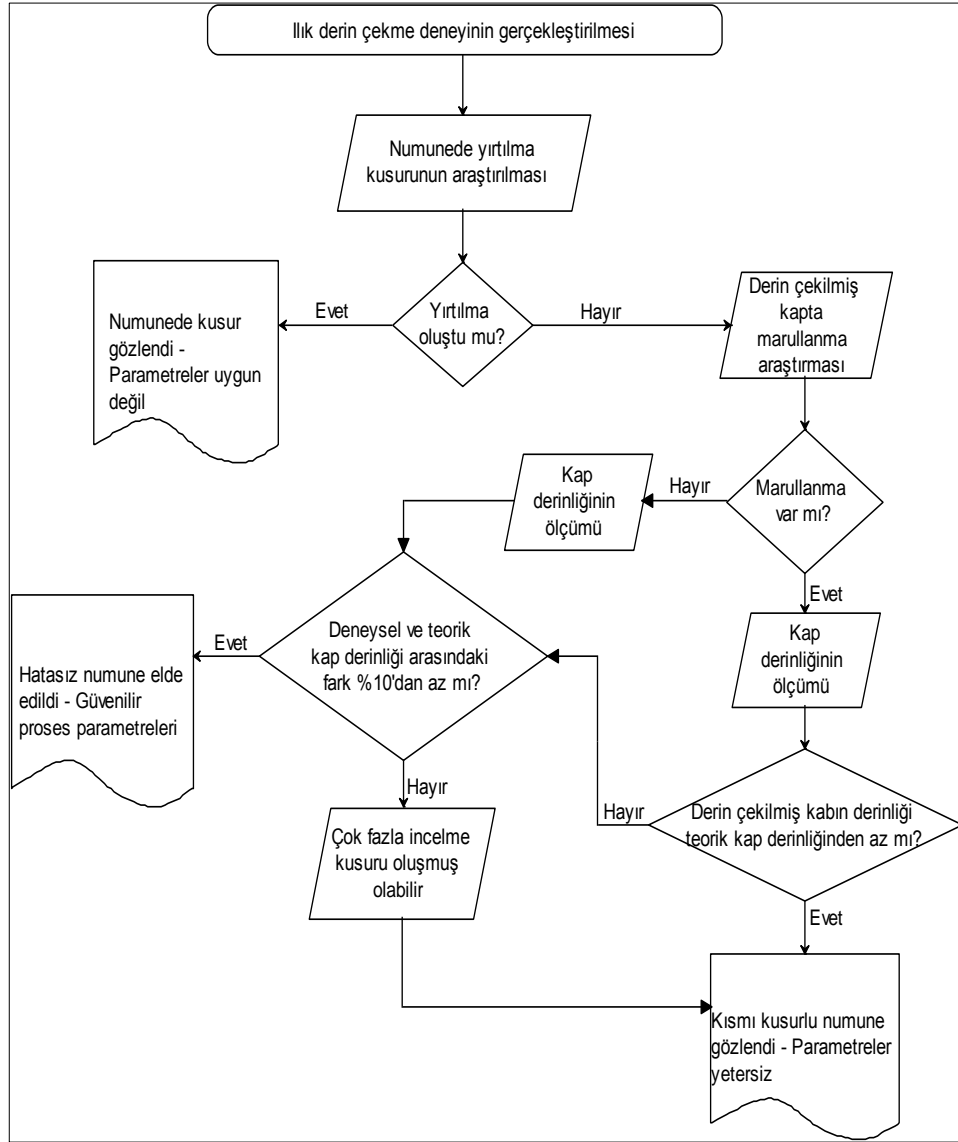
### 5.3.1. Güvenilir Proses Parametrelerinin Belirlenmesi İçin Deney Tasarımı

Güvenilir proses parametrelerinin belirlenmesi için 2,3 derin çekme oranlarında (DÇO) deneyler gerçekleştirilmiştir. Ön deneylerde 2,3 DÇO'da şekillendirilebilirliğin 225 °C ve üstü kalıp sıcaklıklarında gerçekleştirilebildiği belirlenmiştir. Deneylerde ŞSE, ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı proses parametresi olarak kullanılmıştır. Baskı levhası basıncı değerleri şekillenmenin başlangıç anında malzemeye etkiyen değerlerdir. Parametrelerin seviyeleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Proses parametreleri ve seviyeleri.

Proses Parametreleri	Birim	Seviyeler								
DÇO	-	2,3								
ŞSE	°C	ŞSE-1	ŞSE-2	ŞSE-3	ŞSE-4	-	-	-		
		(KS:300, SSS:25, T <sub>2</sub> :332, T <sub>25</sub> :293, T <sub>50</sub> :148, T <sub>75</sub> :120)	(KS:275, SSS:25, T <sub>2</sub> :307, T <sub>25</sub> :266, T <sub>50</sub> :133, T <sub>75</sub> :108)	(KS:250, SSS:25, T <sub>2</sub> :281, T <sub>25</sub> :239, T <sub>50</sub> :120, T <sub>75</sub> :99)	(KS:225, SSS:25, T <sub>2</sub> :255, T <sub>25</sub> :208, T <sub>50</sub> :108, T <sub>75</sub> :89)	-	-	-		
		Istampa Hızı	mm/s	2,40	4,50	7,80	-	-	-	
		Baskı Levhası Basıncı	MPa	0,16	0,39	0,78	1,18	1,57	2,35	3,92

Deney tasarımı için giriş parametresi olarak 4 farklı ŞSE, 3 farklı ıstampaya hızı ve 7 farklı baskı levhası basıncı değerleri kullanılmıştır (Tablo 5.1). Giriş parametreleri değerleri, prosesin karakterini kapsamlı bir şekilde analiz edebilmek için geniş aralıklarda belirlenmiştir. Tam faktöriyel tasarımda toplam (4x3x7) 84 adet deney gerçekleştirilmiştir [44]. Çıkış parametresi olarak yırtılma, marullanma ve minimum kap yüksekliği parametreleri analiz edilmiştir. Yırtılma ve marullanma hataları görsel ve niteliksel (az, çok, ihmal edilebilir gibi) olarak, minimum kap yüksekliği mesafesi de teorik kap yüksekliği mesafesi ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Çıkış parametrelerinin değerlendirilme kriterleri için oluşturulan algoritma Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Çıkış parametrelerinin değerlendirilmesi için oluşturulan algoritma.

### **5.3.2. Optimum ŞSE'nin Belirlenmesi ve ANOVA Analizi**

Tez çalışmasının optimizasyon aşamasında ŞSE'lerin optimum seviyesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çıkış parametresi olarak güvenilirlik deneylerinde elde edilen derin çekilmiş kapların hacimleri ve geri yaylanma miktarları ölçülerek analiz edilmiştir. Elde edilen optimum değerlerin anlamlılığının sınanması için ANOVA tekniği uygulanmış ve proses parametrelerinin ılık derin çekme prosesi üzerinde hangi oranda etkili oldukları niceliksel olarak belirlenmiştir. ANOVA tekniği, deney sonuçlarına göre giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerinde ne oranda etkili olduğunu sayısal olarak belirleyen istatistiksel bir yöntemdir. Bu teknik sayesinde deneysel tasarımda belirlenen parametrelerin sistemi ne oranda açıklayabildiği belirlenebilmiştir. Ayrıca, giriş parametrelerin sistem üzerinde ne oranda etkili oldukları kıyaslanmış ve deney sistemi için önemlilik dereceleri belirlenmiştir.

Sıcaklık ölçüm noktalarının analizi için ŞSE eğrileri üzerindeki sıcaklık verileri kullanılmıştır. Optimum ŞSE belirlendikten sonra, ŞSE'ler üzerindeki sıcaklık ölçüm noktalarının arasındaki sıcaklık farklarının optimum ŞSE'ye göre trendleri analiz edilerek, her bir sıcaklık ölçüm noktası için ideal optimum sıcaklıklar elde edilmiştir.

### **5.3.3. Limit Çekme Oranı Belirleme Deneyleri**

Belirlenen ideal optimum sıcaklıkların elde edilebilirliğini araştırmak amacıyla kontrollü bir soğutma ünitesi temin edilerek ŞSE eğrileri yeniden çizilmiştir. Elde edilen ŞSE'ler Şekil 4.10 ve 4.11'de verilmiştir. İlgili eğrilere göre, belirlenen optimum sıcaklık dereceleri sadece malzemenin merkezi için elde edilebilmiş diğer noktalar içinde optimuma yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu eğrilerin ılık şekillendirmeye olan etkisini belirlemek için AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemelerin limit çekme oranlarının arttırılabilirliği incelenmiştir. Deneylerde kullanılan parametreler Çizelge 5.2'de verilmiştir. Limit çekme oranı literatürde AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzeme için 2,0 olarak belirtilmiş, bu değerlerin üstünde çekme oranlarına ulaşıldığı bir çalışma görülmemiştir [36,45]. Bu sebeple tez çalışması kapsamında AA6061-T6 malzeme için 2,0 ile 2,3 DÇO aralığında, AA7075-T6 malzeme için de 2,0 ile 2,5 DÇO aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2. Limit çekme oranı deneyleri için belirlenen proses parametreleri ve seviyeleri.

Malzeme	DÇO aralığı	ŞSE (°C)	Istampa Hızı	Baskı Levhası Basıncı
AA6061-T6	2,0 - 2,3	ŞSE-1 (KS:300, SSS:0, T <sub>2</sub> :309, T <sub>25</sub> :315, T <sub>50</sub> :135, T <sub>75</sub> :102)	4,5 mm/s	1,57 MPa (15393 N – 9817,48 mm <sup>2</sup> alanda)
AA7075-T6	2,0 - 2,5	ŞSE-1 (KS:300, SSS:0, T <sub>2</sub> :309, T <sub>25</sub> :315, T <sub>50</sub> :135, T <sub>75</sub> :102)	4,5 mm/s	1,57 MPa (15393 N – 9817,48 mm <sup>2</sup> alanda)

#### 5.4. SAC MALZEME

Deneylerin güvenilir proses parametrelerinin belirlenmesi aşamasında AA5754-O sac malzeme ile, limit çekme oranı deneyleri aşamasında ise AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzeme ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Malzeme kalınlıkları 2 mm olarak belirlenmiştir ve 150 mm ( $\pm 0,01$  mm) çapında kesilmiş numuneler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Numuneler lazer kesim tezgâhı kullanılarak dairesel plaka haline getirilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri AA5754-O için Çizelge 5.3'te, AA6061-T6 ve AA7075-T6 için Çizelge 5.4'te verilmiştir. Çizelge 5.3'e göre AA5754-O alaşımının içinde en yoğun bulunan element %3,0 ağırlık oranıyla Mg elementidir. Mg hegzagonal atomik yapısı nedeniyle ılık şekillendirmeye duyarlıdır [17]. Bu sebeple, sıcaklığın şekillendirme üzerine etkisini yeterince anlayabilmek için deneylerin önemli bir bölümünde AA5754-O alaşımı tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ise Çizelge 5.5'te verilmiştir. AA6061-T6 alaşımı silikon ve magnezyum alaşımı, AA7075-T6 alaşımı ise çinko alaşımı malzemelerdir ve bu özelliklerinden dolayı ılık şekillendirmeye uygun niteliktedirler. Bu malzemelerin şekillendirilmesi, AA5754-O gibi havacılık ve uzay sanayisi için önem taşımaktadır. Literatürde bu malzemelerin ılık derin çekilebilirliğine ilişkin yeterli çalışma mevcut değildir. Bu sebeple limit çekme oranı deneyleri için bu iki malzeme ile çalışma gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.3. AA5754-O alaşımının kimyasal kompozisyonu [46].

Element	Mg	Fe	Mn	Cr	Cu	Zn	Ti	Al
İçerik (%)	3,0	0,292	0,15	0,062	0,006	0,02	0,024	96,45

Çizelge 5.4. AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu [47].

Malzeme	Si	Zn	Mg	Cu	Fe	Ni	Mn	Cr	V	Al
AA6061-T6	0,61	0,081	0,92	0,25	0,20	0,001	0,07	0,097	0,016	97,7
AA7075-T6	0,09	5,620	2,12	1,78	0,28	0,001	0,08	0,19	0,044	89,8

Çizelge 5.5. AA5754-O, AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımlarının mekanik özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Malzeme		
	AA5754-O [48]	AA6061-T6 [49]	AA7075-T6 [50]
Akma Gerilmesi (MPa)	90	276	503
Çekme Dayanımı (MPa)	212	310	572
Yüzde uzama (%)	22,05	17	11

Çalışmada kullanılan AA5754 malzeme H22 temperi halinde temin edilmiştir. H22 temperi deformasyonla dörtte bir sertleştirilmiş durumda olan malzemeyi ifade etmektedir [51]. Esasen ısıtım işlem uygulanamayan alaşımlar sınıfına giren Al 5754-H22 tavlanaarak O temperine dönüştürülmüştür. Böylece deformasyonun etkisi giderilerek malzeme en yüksek süneklığe sahip olacak duruma getirilmiştir. Süneklığın artmasını sağlayan fiziksel etmen ise tavlama ile kristal yapıda bulunan dislokasyon yoğunluğunun en düşük seviyeye inmesidir. Çalışmada Al 5754-H22 malzemesi 380°'de 4 saat tavlandıktan sonra oda sıcaklığında havada soğutulmuştur. Bu değerler en yüksek süneklığı sağlayan ve malzeme mukavemetini önemli miktarda düşürmeyen değerler olduğu için kullanılmıştır [51].

## 5.5. YAĞLAYICI SEÇİMİ

Derin çekmede yağlama fonksiyonunun, malzemenin flanş bölgesinin kalıba akıncaya kadar sürekli olarak sağlanabilmesi önem taşımaktadır. Soğuk derin çekmede parafin ve polietilen film yağlama için yeterli kalınlıkta ve homojen bir film meydana getirebilmektedir. Ilık derin çekmede ise basınçla beraber sıcaklığın etkili olması yağlayıcı için kapsamlı bir çalışmanın gerekliliğini göstermektedir. Sıcak çalışma koşulları için yapılan yağlayıcı araştırmalarında bu işlem için en uygun yağlayıcının teflonlu katı yağlayıcılar ve bakır içerikli gres yağlar olduğu tespit edilmiştir. Gres ve sprej şeklinde temin edilebilen katı teflon yağlayıcı (PTFE) ve bakır içerikli gres yağların sıcaklık ve basınç altında gerekli sınır yağlamayı sağlayabildikleri gerçekleştirilen ön deneylerde görülmüştür. Bakır içerikli gresin içerisindeki bakır partikülleri sayesinde kalıptan iş parçasına ısı geçişini kolaylaştıracağı düşünüldükçe bütün deneyler yağlayıcı olarak bakır gres (bakır pasta) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yağlayıcıların olumsuz özellikleri buharlaşma, kötü koku oluşturma ve yüksek maliyetleridir.

## 5.6. ÖLÇÜM CİHAZLARI VE ÖLÇME METODOLOJİSİ

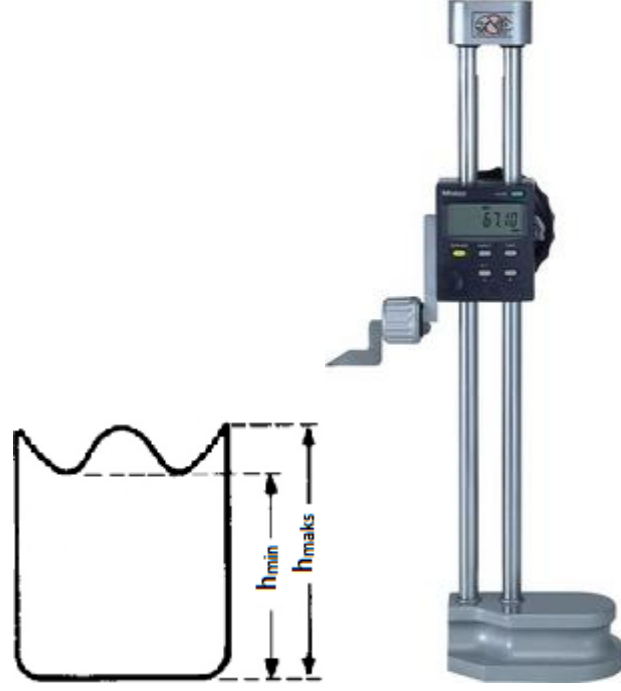
Ilık derin çekme prosesi, araştırmacılar için ölçülebilirliği zor ve kısıtlı olan bir imalat prosesi olarak nitelendirilebilir. Derin çekmede en temel değerlendirme kriteri limit çekme oranıdır. Limit çekme oranı ölçülebilir bir parametre değil malzeme çapının ıstampa çapına oranıyla hesaplanan bir limit değer, bir şekillendirilebilirlik ölçeğidir. Derin çekilmiş kaplar için ölçülebilir değerler birim şekil değişimi, minimum-maksimum kap yükseklikleri, kulaklaşma profili, kalınlık değişimi, ıstampa-baskı plakası kuvveti, sürtünme katsayısı, kap hacmi ve geri yaylanma davranışının belirlenmesi olarak sıralanabilir [52]. Bu ölçüm parametrelerinin, sıcaklık, baskı levhası basıncı ve ıstampa hızı parametreleri hariç malzemenin iç yapısı, yağlama koşulları, malzemeye uygulanan ısıl işlem, anizotropi, hadde yönü gibi birçok değişkenden büyük oranda etkilendiği söylenebilir. Örneğin kulaklaşma profilinin azaltılması büyük oranda haddeleme işlemi sonrası gerçekleştirilecek yumuşatma tavına bağlıdır [40]. Bu durumda sıcaklık, hız, kuvvet gibi temel proses parametrelerine bağlı olarak ölçülebilir olmayı zorlaştırmaktadır.

Tez çalışması kapsamında minimum-maksimum kap yükseklikleri, kap hacmi, geri yaylanma ve kalınlık değişimi parametreleri ölçülmüştür. Birim şekil değişiminin ölçümü için malzemeler üzerine grid ördürme işlemi uygulanmış fakat sonuç alınamamıştır. Gridleme yöntemi iş parçası üzerine kimyasal yöntemler (serigrafi veya elektrokimyasal yöntem) ile ağ örme işlemidir. Plastik şekil değişimine uğramış malzemenin kalınlık değişimini de (hacim sabitliği kuralından faydalanarak) gridleme yöntemi ile ölçebilmek mümkündür [53]. Tez çalışması kapsamında serigrafi yöntemi ile grid ördürülmüş, fakat ipek malzemenin sıcaklıkta yanması sebebiyle gridlerin bozulduğu görülmüş ve sonuç alınamamıştır. Tez çalışması kapsamında minimum-maksimum kap yüksekliklerinin ölçümü için yükseklik mihengiri, kap hacminin ölçümü ve geri yaylanma miktarının tespiti için hassas terazi ve kap kalınlığı değişimi ölçümü için ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı kullanılmıştır.

#### **5.6.1. Kap Yüksekliği Ölçümü**

Derin çekilmiş numunelerde, düzlemsel anizotropiden kaynaklanan kulaklaşma kusuru sebebiyle minimum ve maksimum kap yükseklikleri oluşmuştur. Tez çalışması kapsamında derin çekilmiş numunelerde oluşan minimum ve maksimum kap yükseklikleri ölçülmüştür. Faydalı kap hacminin minimum kap yüksekliğine bağlı olması sebebiyle çalışma kapsamında sadece minimum kap yüksekliği parametresi incelenmiştir. Maksimum kap yükseklikleri için elde edilen grafiklerin anlamlı sonuçlar vermediği de görülmüştür. Kap yüksekliğinin ölçümü için 0,01 mm hassasiyetinde yükseklik ölçüm mihengiri kullanılmıştır (Şekil 5.9). Mihengirin temas noktasına derin çekilmiş kabın tepe kısmında oluşan dalga profili temas ettirilerek minimum ve maksimum kap yükseklikleri ölçülmüştür. Kap yüksekliklerinin kumpasla belirlenmesinin operatör ve kap geometrisinden kaynaklı hatalı ölçüme sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Bu sebeple en doğru ölçüm için yükseklik mihengiri tercih edilmelidir.





Şekil 5.9. Yükseklik ölçme mihengiri ve kap yükseklikleri.

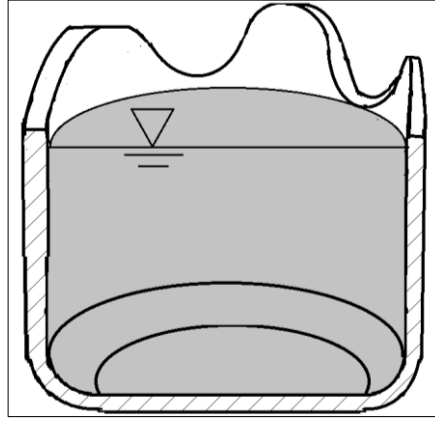
### 5.6.2. Kap Hacmi Ölçümü

Derin çekilmiş kapların minimum kap yüksekliğine kadar su doldurularak hassas terazi ile ağırlık ölçümü yapılmış ve faydalı kap hacimleri belirlenmiştir (Şekil 5.10). Derin çekme, derin çekilen kaba çekme ve bükülme işlemlerinin uygulandığı bir prosestir. Derin çekilen kapların hacimlerinin ölçümü ile kapta çekme ve bükülmeden kaynaklı değişimler tespit edilebilmiştir. Kap hacmi ölçümü için 0,1 gr hassasiyetinde hassas terazi kullanılmış, derin çekilen kabın darası alındıktan sonra minimum kap yüksekliğine kadar su doldurularak faydalı kap hacmi ölçülmüştür. Ölçüm hatalarını minimize etmek için minimum 3'er kez ölçüm alınmış ve elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak kap hacmi belirlenmiştir.

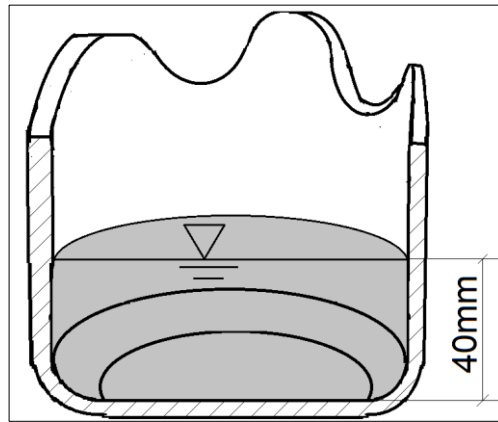
### 5.6.3. Geri Yaylanmanın Belirlenmesi İçin Hacim Ölçümü

Geri yaylanma davranışının belirlenmesi için her bir kabın 4 cm kap yüksekliğine kadar su doldurularak 0,1 gr hassasiyetinde hassas terazi ile ağırlık ölçümü yapılmıştır (Şekil 5.11). 4 cm kap yüksekliğinin belirlenmesi için derin çekilmiş kapların içerisine lineer cetvel yerleştirilmiş ve su mesafesi 4 cm'ye ulaşınca kadar kaplara su

doldurulmuştur. Ölçüm işleminden önce, içine yerleştirilen cetvel ile birlikte boş kabın darası alınmıştır. Düzlemsel anizotropiden kaynaklı hataların oluşmadığı seviyede ölçüm yapabilmek amacıyla kaplara 4 cm yüksekliğe kadar su doldurulmuştur. Ölçüm hatalarını minimize etmek için minimum 6'er kez ölçüm alınmış ve elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak derin çekilmiş kapların geri yaylanma davranışları belirlenmiştir. Malzemenin geri yaylanma isteği azaldıkça ıstampada aldığı formu koruyacağı, geri yaylanma davranışı arttıkça da kap duvarlarında açılma meydana geleceği düşünülerek hacim değişimiyle geri yaylanma tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu sebeple, ölçülen hacim değerlerinde minimizasyon kriteri dikkate alınmış, kabın geri yaylanma davranışı azaldıkça daha az hacime sahip olacağı düşünülmüştür.



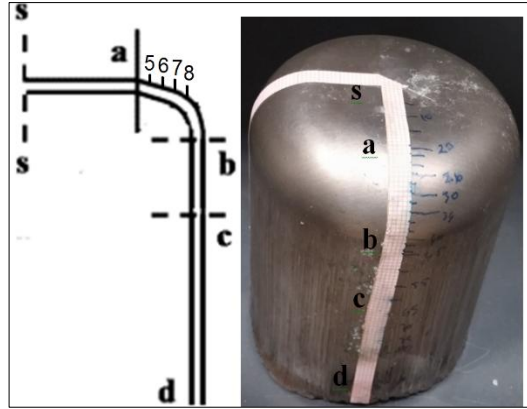
Şekil 5.10. Minimum kap yüksekliğine kadar su doldurulmuş kap için şematik görüntü.



Şekil 5.11. 40 mm kap yüksekliğine kadar su doldurulmuş kap için şematik görüntü.

#### 5.6.4. Kalınlık Değişiminin Ölçümü

Kalınlık değişimi ölçümü için Selçuk Üniversitesi Hidroşekillendirme laboratuvarında bulunan ultrasonik kalınlık ölçüm cihazı kullanılmış ve numuneler kesilmeden haddeleme yönü doğrutusunda kalınlık değişimi belirlenebilmiştir. Derin çekilmiş kapların taban merkezinden kap duvarının sonuna kadar 25 farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Ölçüm yapılan mesafeler için gösterilen Şekil 5.12’de; “sa” mesafesi kap tabanını, “ab” mesafesi ıstampa radyüsünü, “bc” ile “cd” mesafesi ise kap duvarı mesafesini göstermektedir. Kap tabanı mesafesinde 5 mm aralıklarla 4 noktadan ölçüm, ıstampa radyüsü mesafesinde 2 mm aralıklarla 13 noktadan ölçüm, kap duvarının “bc” ve “cd” mesafesinde 5 mm aralıklarla sırasıyla 4 ve 5 noktadan ölçüm alınmıştır. Şekil 5.12’de 5, 6, 7, 8 numaraları ile gösterilen noktalar, ANOVA uygulanan noktaları göstermektedir.

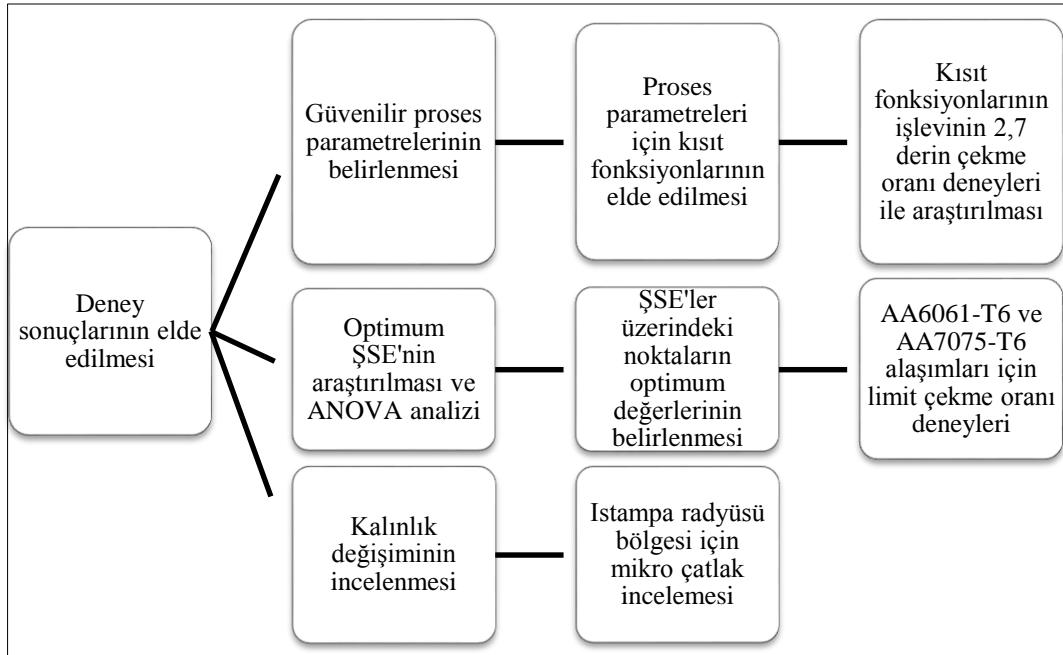


Şekil 5.12. Kalınlık değişiminin ölçüldüğü kap düzlemleri.

## BÖLÜM 6

### DENEY/ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Ilık derin çekme deneylerinde öncelikli olarak ŞSE'lerin ılık derin çekme prosesine olan etkilerinin belirlenmesi, optimum ŞSE'nin belirlenmesi ve ŞSE'ler üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları için optimum sıcaklık derecelerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, ŞSE'lerin ve diğer proses parametrelerinin derin çekilmiş kap kalınlığı üzerine olan etkileri araştırılmış ve SEM cihazı kullanılarak kalınlık değişiminin en kritik olduğu ıstampa radyüsü bölgesinde oluşan mikro çatlaklar incelenmiştir. ŞSE'ler üzerindeki noktalar için belirlenen ideal optimum sıcaklık noktalarının elde edilebilirliği tez çalışmasının 4. Bölümünde detaylı olarak incelenmiştir. Belirlenen optimum değerlere erişebilirlik için 0 °C soğutma suyu koşullarında elde edilen ŞSE'ler ile iki farklı alüminyum alaşımının derin çekme oranlarının artırılabilirliği incelenmiştir. Deney sonuçlarına ilişkin akış şeması Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deney sonuçları için akış şeması.

## 6.1. GÜVENİLİR PROSES PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Proses parametrelerinin analizi aşaması, proses parametrelerinin derin çekilen kabın fiziksel formu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı aşamadır. Güvenilir proses parametrelerini elde edebilmek için gerçekleştirilen deneyler Şekil 5.8’te gösterilen algoritmaya göre değerlendirilmiş ve ŞSE’lere göre elde edilen deney sonuçları Çizelge 6.1-6.4’te verilmiştir. Çizelge 6.1-6.4’te yırtılma, marullanma ve minimum kap yüksekliği parametreleri için elde edilen deney sonuçları görülmektedir. Çizelge 6.1-6.4’te proses parametrelerinin belirlenmesinde karar kriteri olarak hatasız numune kavramı dikkate alınmıştır. Derin çekilen kap Şekil 5.8’te belirtilen değerlendirme adımlarını başarılı bir şekilde geçerse hatasız numune olarak adlandırılmış ve Çizelge 6.1-6.4’te “√” indeksi ile hatasızlık özelliği tanımlanmıştır. Çizelge 6.1-6.4’te kısmi kusurlu numuneler (yarı şekillenmiş kaplar) için “o” indeksi, tamamen kusurlu (yırtılan veya aşırı marullanan) numuneler için ise “x” indeksi kullanılmıştır. Çizelge 6.1-6.4’ten elde edilen verilerle proses parametreleri için kısıt fonksiyonları elde edilmiş ve Çizelge 6.5’te gösterilmiştir. Kısıt fonksiyonları, derin çekme prosesi için güvenilir proses parametresi aralıklarını göstermesi bakımından önem taşımaktadır.

Çizelge 6.1-6.4’te elde edilen sonuçlara göre hiçbir deney koşulunda yırtılma kusuru gözlenmemiştir. Yırtılma kusuru, parametre aralığı belirleme ile ilgili gerçekleştirilen ön deneylerde, 175 °C (ŞSE-6) ve 200 °C (ŞSE-5) kalıp sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilen bütün deney şartlarında oluşmuştur. ŞSE-5 ve ŞSE-6 koşullarında gerçekleştirilen deneylerde, farklı baskı levhası basıncı ve şekillendirme hızı parametreleri ıstampanın ilerleme mesafesini arttırarak yırtılmayı geciktirici etki göstermişler, yırtılma kusuru oluşmasına rağmen çekilen kap yüksekliğini arttırmışlardır. Şekil 6.2-a’da kalıp radyüsü bölgesinde yırtılma kusuru oluşmuş bir numuneye ait resim görülmektedir. Çıkış parametresi ölçümlenebilir numuneler elde edebilmek amacıyla deneyler şekillenebilirliğin tam olarak sağlanabildiği 225 °C ve üzeri kalıp sıcaklığı değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.1-6.4’te elde edilen sonuçlara göre, 225 °C ve üzeri kalıp sıcaklığı değerlerinde elde edilen sıcaklık gradyenleri (ŞSE 1-4), malzemenin akma gerilmesini, malzemede yırtılma kusurunun oluşmasını önleyebilecek değerlerde farklılaştırabilen parametrelerdir.

Çizelge 6.1. ŞSE-4 için deneysel sonuçlar (Taslak çapı: 150 mm, d<sub>1</sub>: 65 mm).

ŞSE (KS, SSS) 2, 25, 50, 75 mm mesafelerde ki malzeme sıcaklıkları ile birlikte (°C)	Istampa Hızı (mm/s)	Baskı Levhası Basıncı (MPa)	Yırtılma Oluşumu	Marullanma		Minimum Kap Yüksekliği (mm)			Fiziksel Form
				Marullanma Mevcutiyeti	Marullanma Formu	Deneysel	Teorik	Fark (%)	
ŞSE-4 (KS:225, SSS:25) T <sub>2</sub> : 255 T <sub>25</sub> : 208 T <sub>50</sub> : 108 T <sub>75</sub> : 89	2,4	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	60,17	70,20	-14,29	°
		0,39	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	64,96	70,20	-7,46	°
		0,78	Yok	Gözlendi	İhmal Edilebilir	72,00	70,20	2,56	✓
		1,18	Yok	Yok	-	73,40	70,20	4,56	✓
		1,57	Yok	Yok	-	74,56	70,20	6,21	✓
		2,35	Yok	Yok	-	72,50	70,20	3,28	✓
		3,92	Yok	Yok	-	71,25	70,20	1,50	✓
ŞSE-4 (KS:225, SSS:25) T <sub>2</sub> : 255 T <sub>25</sub> : 208 T <sub>50</sub> : 108 T <sub>75</sub> : 89	4,5	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	68,34	70,20	-2,65	°
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	70,35	70,20	0,21	✓
		0,78	Yok	Yok	İhmal Edilebilir	71,56	70,20	1,94	✓
		1,18	Yok	Yok	-	72,10	70,20	2,71	✓
		1,57	Yok	Yok	-	73,88	70,20	5,24	✓
		2,35	Yok	Yok	-	72,96	70,20	3,93	✓
		3,92	Yok	Yok	-	73,82	70,20	5,16	✓
ŞSE-4 (KS:225, SSS:25) T <sub>2</sub> : 255 T <sub>25</sub> : 208 T <sub>50</sub> : 108 T <sub>75</sub> : 89	7,8	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	70,34	70,20	0,20	✓
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	72,11	70,20	2,72	✓
		0,78	Yok	Yok	İhmal Edilebilir	72,16	70,20	2,79	✓
		1,18	Yok	Yok	-	72,88	70,20	3,82	✓
		1,57	Yok	Yok	-	72,94	70,20	3,90	✓
		2,35	Yok	Yok	-	72,60	70,20	3,42	✓
		3,92	Yok	Yok	-	74,35	70,20	5,91	✓

x: Tamamen kusurlu numune, °: Kısmi kusurlu numune, ✓: Hatasız numune

Çizelge 6.2. ŞSE-3 için deneysel sonuçlar (Taslak çapı: 150 mm, d<sub>1</sub>: 65 mm).

ŞSE (KS, SSS) 2, 25, 50, 75 mm mesafelerde ki malzeme sıcaklıkları ile birlikte (°C)	İstampa Hızı (mm/s)	Baskı Levhası Basıncı (MPa)	Yırtılma Oluşumu	Marullanma		Minimum Kap Yüksekliği (mm)			Fiziksel Form
				Marullanma Mevcutiyeti	Marullanma Formu	Deneysel	Teorik	Fark (%)	
2,4	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	60,20	70,20	-14,25	°	
	0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	68,20	70,20	-2,85	°	
	0,78	Yok	Gözlendi	-	72,20	70,20	2,85	✓	
	1,18	Yok	Yok	-	72,24	70,20	2,91	✓	
	1,57	Yok	Yok	-	74,58	70,20	6,24	✓	
	2,35	Yok	Yok	-	71,20	70,20	1,42	✓	
	3,92	Yok	Yok	-	71,30	70,20	1,57	✓	
ŞSE-3  (KS:250, SSS:25)  T <sub>2</sub> : 281 T <sub>25</sub> : 239 T <sub>50</sub> : 120 T <sub>75</sub> : 99	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	71,93	70,20	2,46	✓	
	0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	73,60	70,20	4,84	✓	
	0,78	Yok	Yok	-	73,62	70,20	4,87	✓	
	1,18	Yok	Yok	-	74,61	70,20	6,28	✓	
	1,57	Yok	Yok	-	74,88	70,20	6,67	✓	
	2,35	Yok	Yok	-	72,95	70,20	3,92	✓	
	3,92	Yok	Yok	-	72,22	70,20	2,88	✓	
7,8	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	72,72	70,20	3,59	✓	
	0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	72,79	70,20	3,69	✓	
	0,78	Yok	Yok	-	72,81	70,20	3,72	✓	
	1,18	Yok	Yok	-	73,28	70,20	4,39	✓	
	1,57	Yok	Yok	-	75,04	70,20	6,89	✓	
	2,35	Yok	Yok	-	74,07	70,20	5,51	✓	
	3,92	Yok	Yok	-	76,01	70,20	8,28	✓	

x: Tamamen kusurlu numune, °: Kısmi kusurlu numune, ✓: Hatasız numune

Çizelge 6.3. ŞSE-2 için deneysel sonuçlar (Taslak çapı: 150 mm, d<sub>1</sub>: 65 mm).

ŞSE (KS, SSS) 2, 25, 50, 75 mm mesafelerde ki malzeme sıcaklıkları ile birlikte (°C)	İstampa Hızı (mm/s)	Baskı Levhası Basıncı (MPa)	Yırtılma Oluşumu	Marullanma		Minimum Kap Yüksekliği (mm)			Fiziksel Form
				Marullanma Mevcutiyeti	Marullanma Formu	DeneySEL	Teorik	Fark (%)	
ŞSE-2 (KS:275, SSS:25) T <sub>2</sub> : 307 T <sub>25</sub> : 266 T <sub>50</sub> : 133 T <sub>75</sub> : 108	2,4	0,16	Yok	Gözlendi	Çok Fazla	67,24	70,20	-4,22	°
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	71,30	70,20	1,57	✓
		0,78	Yok	Gözlendi	-	72,36	70,20	3,08	✓
		1,18	Yok	Yok	-	73,36	70,20	4,50	✓
		1,57	Yok	Yok	-	74,74	70,20	6,47	✓
		2,35	Yok	Yok	-	72,54	70,20	3,33	✓
		3,92	Yok	Yok	-	72,66	70,20	3,50	✓
	7,8	0,16	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	71,04	70,20	1,20	✓
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	72,54	70,20	3,33	✓
		0,78	Yok	Yok	-	73,34	70,20	4,47	✓
		1,18	Yok	Yok	-	73,42	70,20	4,59	✓
		1,57	Yok	Yok	-	73,45	70,20	4,63	✓
		2,35	Yok	Yok	-	73,64	70,20	4,90	✓
		3,92	Yok	Yok	-	73,00	70,20	3,99	✓
7,8	0,16	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	71,89	70,20	2,41	✓	
	0,39	Yok	Gözlendi	Orta Düzey	72,32	70,20	3,02	✓	
	0,78	Yok	Yok	-	72,84	70,20	3,76	✓	
	1,18	Yok	Yok	-	73,20	70,20	4,27	✓	
	1,57	Yok	Yok	-	74,40	70,20	5,98	✓	
	2,35	Yok	Yok	-	72,56	70,20	3,36	✓	
	3,92	Yok	Yok	-	71,90	70,20	2,42	✓	

x: Tamamen kusurlu numune, °: Kısmi kusurlu numune, ✓: Hatasız numune



Çizelge 6.4. ŞSE-1 için deneysel sonuçlar (Taslak çapı: 150 mm, d<sub>1</sub>: 65 mm).

ŞSE (KS, SSS) 2, 25, 50, 75 mm mesafelerde ki malzeme sıcaklıkları ile birlikte (°C)	Istampa Hızı (mm/s)	Baskı Levhası Basıncı (MPa)	Yırtılma Oluşumu	Marullanma		Minimum Kap Yüksekliği (mm)			Fiziksel Form
				Marullanma Mevcutiyeti	Marullanma Formu	DeneySEL	Teorik	Fark (%)	
	2,4	0,16	Yok	Gözlendi	Orta DüzeY	69,40	70,20	-1,14	°
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta DüzeY	73,75	70,20	5,06	✓
		0,78	Yok	Gözlendi	-	75,60	70,20	7,69	✓
		1,18	Yok	Yok	-	72,25	70,20	2,92	✓
		1,57	Yok	Yok	-	72,56	70,20	3,36	✓
		2,35	Yok	Yok	-	73,50	70,20	4,70	✓
		3,92	Yok	Yok	-	72,76	70,20	3,65	✓
ŞSE-1 (KS:300, SSS:25) T <sub>2</sub> : 332 T <sub>25</sub> : 293 T <sub>50</sub> : 148 T <sub>75</sub> : 120	4,5	0,16	Yok	Gözlendi	Orta DüzeY	71,52	70,20	1,88	✓
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta DüzeY	72,75	70,20	3,63	✓
		0,78	Yok	Yok	-	74,50	70,20	6,13	✓
		1,18	Yok	Yok	-	73,60	70,20	4,84	✓
		1,57	Yok	Yok	-	73,16	70,20	4,22	✓
		2,35	Yok	Yok	-	72,72	70,20	3,59	✓
		3,92	Yok	Yok	-	72,06	70,20	2,65	✓
	7,8	0,16	Yok	Gözlendi	Orta DüzeY	71,14	70,20	1,34	✓
		0,39	Yok	Gözlendi	Orta DüzeY	72,54	70,20	3,33	✓
		0,78	Yok	Yok	-	75,30	70,20	7,26	✓
		1,18	Yok	Yok	-	75,08	70,20	6,95	✓
		1,57	Yok	Yok	-	74,80	70,20	6,55	✓
		2,35	Yok	Yok	-	75,12	70,20	7,01	✓
		3,92	Yok	Yok	-	75,00	70,20	6,84	✓

x: Tamamen kusurlu numune, °: Kısmi kusurlu numune, ✓: Hatasız numune

Çizelge 6.1-6.4'te analiz edilen diğer bir parametre de flanş bölgesinde oluşan marullanma kusurudur. Numunenin marullanma formu, numune üzerindeki buruşmanın yoğunluğuna göre derecelendirilmiştir. Buruşma yoğunluğu kavramı; buruşma sıklığı, buruşmanın yüksekliği, buruşmanın kap duvarında ilerlemesi ve faydalı kap yüksekliğini etkilemesi unsurlarına göre değerlendirilmiştir. Bu kritere göre yoğun buruşma görülen numunelerde “çok fazla” (Şekil 6.2-b), orta seviye buruşma olan numunelerde “orta düzey” (Şekil 6.2-c), numunenin fiziksel formunda önem taşımayacak seviyede olan buruşma hatalarında ise “ihmal edilebilir” (Şekil 6.2-d) notasyonları kullanılmıştır (Çizelge 6.1-6.4). Marullanma kusuruna ait sonuçlar, baskı levhası basıncının marullanma üzerinde yüksek sıcaklık kademelerinde dahi yüksek oranda etkisi olduğunu göstermektedir. Yüksek sıcaklık kademelerinde (ŞSE 1-2), malzemenin akma gerilmesi büyük oranda düşmüş olmasına rağmen, yetersiz baskı levhası basıncının uygulanması durumunda çok fazla ve orta düzey seviyelerinde marullanma kusuru oluşmuştur. Baskı levhası basıncı 0,78 MPa değerine erişinceye kadar ŞSE'lerin marullanma üzerine bir etkisi gözlenmemiştir. Sıcaklığın marullanmayı engelleme açısından olumlu olarak değerlendirilebilecek tek durum ŞSE-1 koşulunda (300 °C kalıp, 332 °C malzeme) yoğun buruşma şartlarının görülmemiş olmasıdır. Soğuk derin çekme prosesi için Demirci ve arkadaşları optimum baskı levhası basıncının 3 Mpa olduğunu belirtmişlerdir [39]. Literatür verisi ile Çizelge 6.1-6.4'e göre elde edilen baskı levhası basıncı arasında ki fark sıcak çalışma koşulu ile açıklanabilir. Termal etki ihtiyaç duyulan minimum baskı levhası basıncını yaklaşık olarak %30-70 seviyelerinde düşürmüştür.

Çizelge 6.1-6.4'teki tek sayısal değerlendirme parametresi minimum kap yüksekliği değerleridir. Derin çekilen kaplarda, düzlemsel anizotropiden dolayı oluşan kulaklaşma problemi nedeniyle minimum ve maksimum kap yükseklikleri oluşmaktadır. Derin çekilen kabın ürün olarak kullanılabilmesi için bu kusurlu alanın kesilmesi gerekmektedir. Bu sebeple minimum kap yüksekliği değeri derin çekilen kabın faydalı kullanılabilir alanını tanımlamaktadır. Kulaklaşma kusurundan kaynaklı olarak oluşan maksimum ve minimum kap yüksekliklerinin fotoğrafı Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.2. Marullanma kusuru görülen derin çekilmiş kaplar.



Kulaklaşma hatası oluşan tam derin çekilmiş bir kap  
Koşullar: KS: 200 °C Istampma Hızı: 4,5 mm/s  
Baskı Levhası Basıncı: 1,57 MPa DÇO: 2,3  
Maksimum ve minimum kap yükseklikleri fotoğrafta görülmektedir

Şekil 6.3. Tam formda derin çekilmiş ve kulaklaşma oluşan bir numuneye ait fotoğraf.

Minimum kap yüksekliği parametresinin değerlendirilmesinde teorik kap yüksekliği değeri kıyaslama amacıyla kullanılmıştır. 2,3 derin çekme oranında teorik kap yüksekliği değeri 70,20 mm'dir. Çizelge 6.1-6.4'te verilen sonuçlara göre, 2,4 mm/s ıstampma hızında düşük baskı levhası kuvvetlerinde gerçekleştirilen deneyler haricinde bütün deney koşullarında ölçülen minimum kap yüksekliği değerleri teorik kap yüksekliği değerine eşit veya bu değerden daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca minimum kap yüksekliği değerinin artan şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak arttığı

görülmüştür. ŞSE-1 koşullarında elde edilen deney sonuçlarına göre (Çizelge 6.4) ortalama kap yüksekliği değeri 73,29 mm olarak ölçülmüştür ve bu değer 2,38 derin çekme oranına karşılık gelmektedir. Bu sonuç, artan sıcaklığın malzemenin gerinim ve radyüslerde bükülme kapasitesini arttırarak derin çekme oranını arttırdığını kanıtlamaktadır. Minimum kap yüksekliğini olumsuz etkileyen faktör ise marullanma yüksekliğidir. Bu sebeple düşük baskı levhası basıncı koşullarında yarı şekillenmiş numuneler elde edilmiştir. Baskı levhası basıncının etkisine bağlı olarak görülen önemli bir diğer sonuç ise minimum kap yüksekliği değerinin, bütün ıstampa hızlarında, 1,57 MPa baskı levhası basıncına kadar artış göstermesidir. Bu artış trendi sadece ŞSE-1 (Çizelge 6.4) koşulunda 0,78 MPa seviyesine kadar gözlenmiştir. Bu sonuç proses parametrelerinin çıkış parametreleri üzerinde belirtilen baskı levhası değerlerine kadar önemli oranda etkili olduğunu göstermektedir. Bu seviyeden sonra yağlama, sürtünme, kalıpta bekleme süresi, tane büyümesi, kalıp geometrisi vb. gibi faktörler proses üzerinde sıcaklık, baskı levhası basıncı ve ıstampa hızından daha etkili olmaktadır. Çizelge 6.1-6.4'te görülen dikkate değer ve yorumlanabilir diğer bir sonuç ise bütün ŞSE koşullarında yapılan deneylerde artan ıstampa hızıyla beraber minimum kap yüksekliği değerlerinin de artmış olmasıdır. Literatüre göre artan ıstampa hızı, malzemenin akma dayanımını arttırarak şekillendirme için daha fazla ıstampa kuvvetine ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. Artan ıstampa kuvveti değerleriyle malzemenin gerinimi artmış ve minimum kap yüksekliği değerini olumlu etkilemiştir. Bu durum, alüminyum alaşımının yüksek sıcaklıklarda pozitif şekil değiştirme hassasiyetine sahip olmasıyla çelişen bir durum gibi gözükmektedir. Fakat deneylerde kalın sac malzeme kullanımının malzemede hata oluşmasını engellemiş olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu durum, tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde ıstampa hızının mikro çatlak oluşumuna etkisinin incelenmesiyle açıklığa kavuşturulacaktır.

Elde edilen sonuçlara göre, derin çekilen kaplar için şekillendirme sıcaklığı, ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı parametrelerine bağlı olarak bir kararlılık seviyesi sınırı olduğu iddia edilebilir. Bu kararlılık seviyesi, derin çekilen kabın optimum fiziksel formuna ulaştığı parametre değerlerini göstermektedir. Deneysel olarak açıklanamayan sonuçlar, kararlılık seviyesinden sonra tane büyümesi, yağlama, sürtünme, sac kalınlığı vb. gibi faktörlerin etkisiyle ortaya çıkmakta ve bu faktörlerin etkisi için bu faktörlere yönelik deney tasarımları yapılması gerekmektedir. Fakat,

şekillendirme sıcaklığı parametresi, ilgili derin çekme oranında çekilebilirliği sağlayan temel faktör olması sebebiyle, tanımlanan kararlılık seviyesinden önce ve sonra proses üzerinde sürekli etkili parametredir.

Çizelge 6.1-6.4'ten elde edilen genel sonuçlara bağlı olarak proses parametreleri için kısıt fonksiyonları elde edilmiş ve Çizelge 6.5'te gösterilmiştir. Kısıt fonksiyonlarının önemi şu şekilde açıklanmıştır: 1. Belirtilen aralıklardaki bütün proses parametresi değerleri kusursuz kap üretimini sağlayan parametrelerdir ve bu parametrelerde yapılan deneylerde çıkış parametreleri niceliksel olarak analiz edilebilir, 2. İlgili kısıt fonksiyonları deney tasarımı ve optimizasyon çalışmalarında güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Çizelge 6.5'te kalıp sıcaklığı ve ŞSE'ye ait noktalar güvenilir sıcaklık aralığını belirtmek için beraber kullanılmıştır. Bu aşamada, noktasal sıcaklık değerleri doğrudan kalıp sıcaklığına bağlı olarak belirlenmiştir. ŞSE'lerin bir anlam ifade edebilmesi için ŞSE'ler üzerindeki sıcaklık ölçüm noktalarının yönelimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yönelim kelimesiyle anlatılmak istenen durum, ilgili sıcaklık ölçüm noktasının daha fazla ısıtmaya veya soğutmaya olan gereksiniminin belirlenmesidir. Çizelge 6.5'te ıstampa hızı parametresi için verilen aralıkların dışında da (düşük veya yüksek hızlarda) şekillendirme yapabilmek mümkündür. Bu çalışmada belirlenen aralık, çalışma yapılan tezgâhın kapasitesine göre belirlenmiştir. Literatürde daha yüksek hızlarda daha yüksek derin çekme oranlarında gerçekleştirilmiş çalışmalar da mevcuttur [1,9]. Fakat literatürde tavsiye edilen şekillendirme hızı değerleri (5-15 mm/s) mevcut çalışmada elde edilen değerler ile uyumludur [1]. Çizelge 6.5'te kısıt fonksiyonu verilen diğer bir parametre de baskı levhası basıncıdır. Çizelge 6.1-6.4'e göre baskı levhası basıncının yüksek değerlerinde kusursuz numuneler elde edilmiş olmasına rağmen, baskı levhası basıncı parametresi maksimum 2,35 MPa seviyesinde kısıtlanmıştır. Bu durum yukarıda bahsedilen kararlılık seviyesi sınırından kaynaklanmaktadır. Kararlılık seviyesinden sonra baskı levhası için elde edilen sonuçlar flanş bölgesinde oluşan yağlama ve sürtünme koşullarının analizi ile mümkündür. Çalışma kapsamında ŞSE 1-4 için 7,8 mm/s ıstampa hızında baskı levhası basıncının maksimum sınırlarının belirlenebilmesi için ek deneyler yapılmıştır. Çizelge 6.6'da gerçekleştirilen deneylere göre elde edilen maksimum baskı plakası basıncı aralıkları ve Şekil 6.4'te ise yırtılan ve çekilebilen bazı deney numunelerinin görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 6.5. Ilık derin çekme prosesi için kısıt fonksiyonları.

Parametre	Aralık
Kalıp Sıcaklığı ( $^{\circ}C$ )	$225^{\circ}C \leq KS \leq 300^{\circ}C$
$T_2$ ( $^{\circ}C$ )	$255^{\circ}C \leq T_2 \leq 332^{\circ}C$
$T_{25}$ ( $^{\circ}C$ )	$208^{\circ}C \leq T_{25} \leq 293^{\circ}C$
$T_{50}$ ( $^{\circ}C$ )	$108^{\circ}C \leq T_{50} \leq 148^{\circ}C$
$T_{75}$ ( $^{\circ}C$ )	$89^{\circ}C \leq T_{75} \leq 120^{\circ}C$
Istampa Hızı ( $mm/s$ )	$2.4 mm/s \leq \text{Istampa Hızı} \leq 7.8 mm/s$
Baskı Levhası ( $Mpa$ )	$0,78 MPa \leq \text{Baskı Levhası Basıncı} < 2,35 MPa$

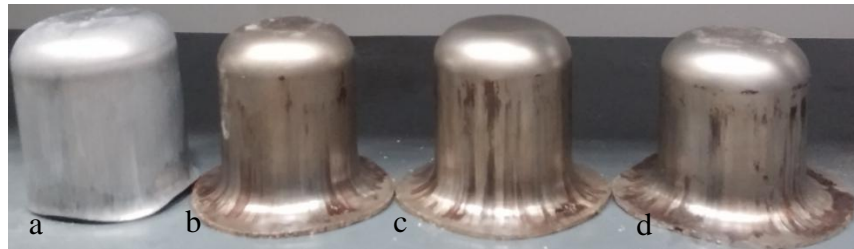
Elde edilen kısıt fonksiyonlarının anlamlılığını tespit edebilmek için laboratuvarında mevcut bulunan 2,7 derin çekme oranına göre işlenmiş kalıplar kullanılarak ılık derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2,7 derin çekme oranı AA5754-O malzemenin limit çekme oranına en yakın değerdir. Bu oranda derin çekilebilir numune elde edebilmek için uygun parametre aralıklarının araştırılması gereklidir. Çizelge 6.5'te verdiğimiz kısıt fonksiyonlarını referans alarak 2,7 derin çekme oranı için ŞSE-1 ( $KS=300^{\circ}C$ ,  $SSS=25^{\circ}C$ ) şartlarında, 2,4, 4,5 ve 7,8 mm/s ıstampa hızlarında ve 1,57 MPa baskı levhası basıncı altında gerçekleştirilecek deneylerden hatasız numune elde edilebileceği belirlenerek derin çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen 3 ılık derin çekme deneyinde numunede herhangi bir imalat kusuru oluşmadan derin çekme işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu durum kısıt fonksiyonlarının işlevselliğini kanıtlamaktadır. Şekil 6.5'te 2,7 derin çekme oranında farklı hızlarda çekilmiş numune görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.4. Maksimum baskı levhası basıncının belirlenmesi deneylerinde elde edilen numunelerin görüntüsü; a) ŞSE-4, 5,48 MPa, b) ŞSE-4, 11,76 MPa, c) ŞSE-1, 11,76 MPa, d) ŞSE-1, 15,68 MPa.

Çizelge 6.6. Baskı levhası basıncı için maksimum limit aralığının belirlenmesi.

Derin Çekme Oranı: 2,3 Malzeme: AA5754-O					
ŞSE (SSS=25 °C)	Istampa Hızı (mm/s)	Baskı Levhası Basıncı (MPa)	Sonuç	Fiziksel Form	Maksimum Baskı Levhası Basıncı Aralığı
ŞSE-1	7,8	11,76	Çekildi	✓	$\geq 11,76$
		15,68	Yırtıldı	x	$< 15,68$
ŞSE-2	7,8	11,76	Yırtıldı	x	$\geq 7,84$
		7,84	Çekildi	✓	$< 11,76$
ŞSE-3	7,8	11,76	Yırtıldı	x	$\geq 7,84$
		7,84	Çekildi	✓	$< 11,76$
ŞSE-4	7,8	11,76	Yırtıldı	x	$\geq 5,48$
		7,84	Yırtıldı	x	$< 11,76$
		5,48	Çekildi	✓	



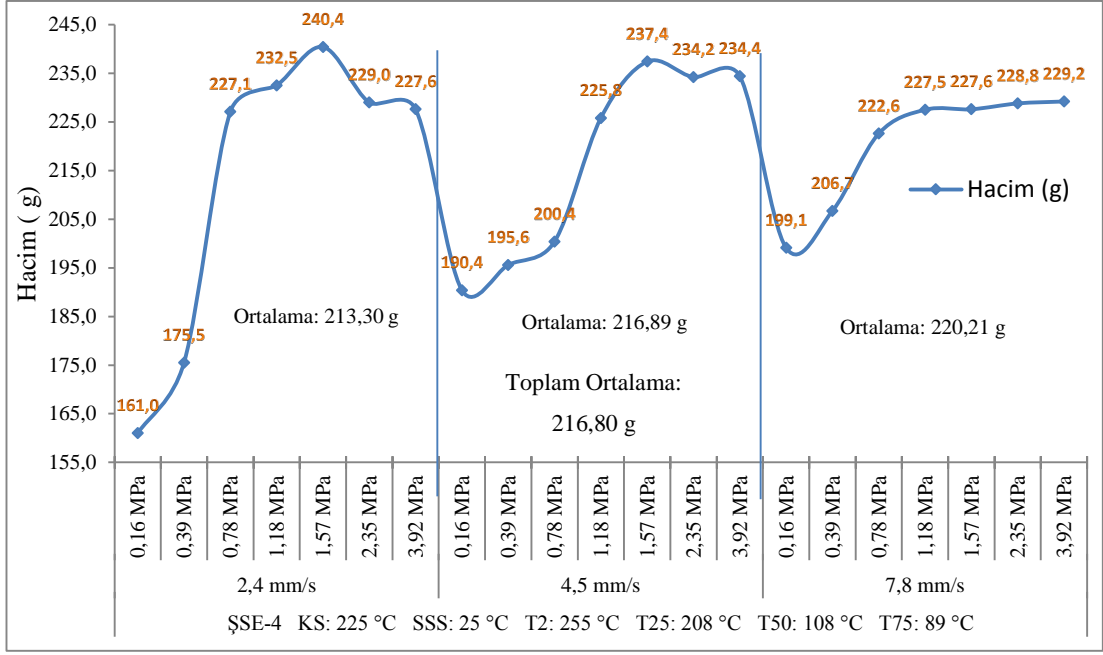
Şekil 6.5. 2,7 derin çekme oranında elde edilmiş numunelerin görüntüsü; a) 2,5 derin çekme oranında çekilmiş numune (kıyaslama amaçlı), b) 7,8 mm/s ıstampa hızında elde edilmiş numune, c) 4,5 mm/s ıstampa hızında elde edilmiş numune, d) 2,4 mm/s ıstampa hızında elde edilmiş numune.

## 6.2. OPTİMUM ŞSE’NİN ARAŞTIRILMASI VE ANOVA ANALİZİ

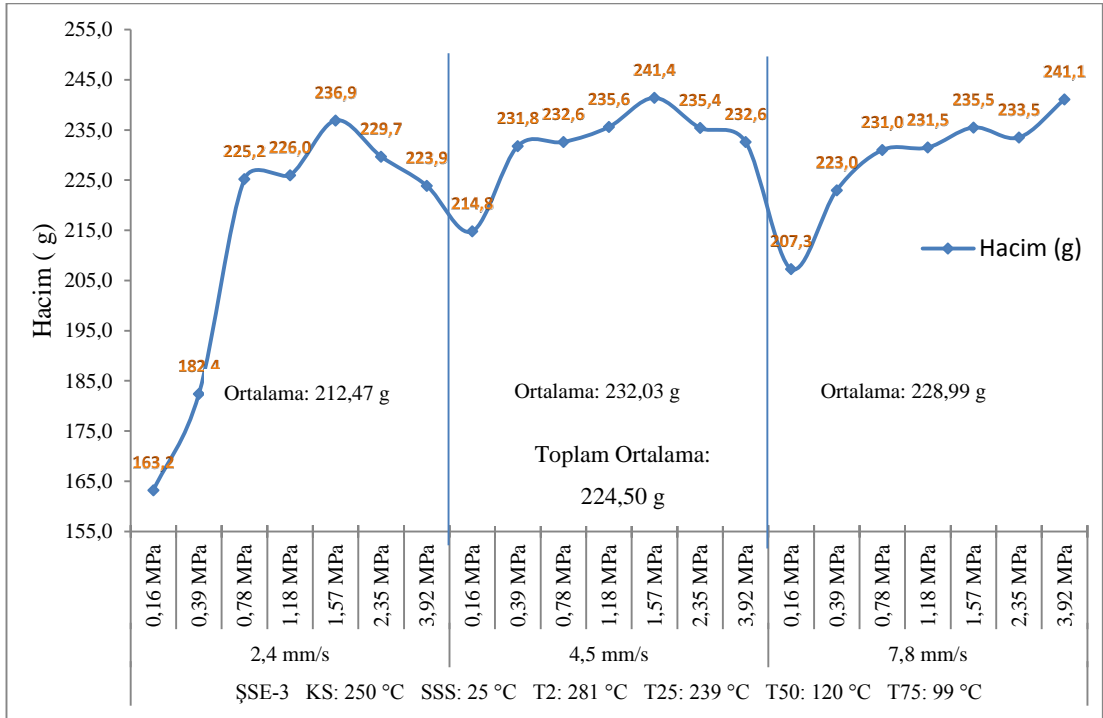
Çalışmanın optimizasyon aşamasında kap hacmi ve geri yaylanma parametreleri araştırılmıştır. Yöntem olarak parametrik optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Kap hacmi parametresi için her bir ŞSE'ye göre ölçüm sonuçları Şekil 6.6-6.9'da verilmiştir. Şekil 6.6-6.9'da yatay ekseninde proses parametreleri, dikey ekseninde ise gram (g) cinsinden hacim değerleri görülmektedir. Parametrik optimizasyon yapabilmek amacıyla ilk olarak her bir ıstampa hızı parametresi için kap hacimlerinin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. İstampa hızları için elde edilen verilerin de her bir ŞSE için yeniden aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. Bu sayede baskı levhası ve ıstampa hızı parametreleri için sonuçlar sabitlemiş, sadece ŞSE'ler için optimum noktanın aranması hedeflenmiştir. Şekil 6.10'da ise geri yaylanma davranışının analizi için elde edilmiş ölçüm sonuçları yer almaktadır. Geri yaylanmanın incelenmesi için teorik hacmin kullanılması akla gelse, iş parçasının şekil değiştirme esnasında kalınlığının azalmasından dolayı oluşacak hacmin teorik hacme eşit olmayacağı açıktır. Bu nedenle de geri yaylanmanın değerlendirilmesinde çeşitli şartlarda çekilen numuneler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama esnasında, çekilen numunelerde 4 cm yüksekliğine kadar doldurulan suyun kütlesi karşılaştırma büyüklüğü olarak kullanılmıştır. Kap hacmi için uygulanan parametrik yöntem geri yaylanma parametreleri için de benzer şekilde uygulanmıştır. Maksimizasyon kriterine göre, kap hacmi için ŞSE-1 koşullarında elde edilen 227,18 g (Şekil 6.9) değeri ve minimizasyon kriterine göre geri yaylanma için yine ŞSE-1 koşullarında elde edilen 128,08 g (Şekil 6.13) değeri optimum değerlerdir. ŞSE-1 parametresi 300 °C kalıp sıcaklığı koşullarında elde edilmiştir ve elde edilen bu sonuç Kaya ve ark. tarafından yapılan çalışma ile tutarlılık göstermektedir [1]. Optimum seviyeler ANOVA (Çizelge 6.7) sonuçları kullanılarak daha kapsamlı değerlendirilmiştir. İş parçası malzemesi sıcaklıklarının optimum seviyelerinin belirlenmesi için de ŞSE'ler üzerindeki her bir noktanın optimum ŞSE'deki ilgili noktaya göre trendi analiz edilmiştir.

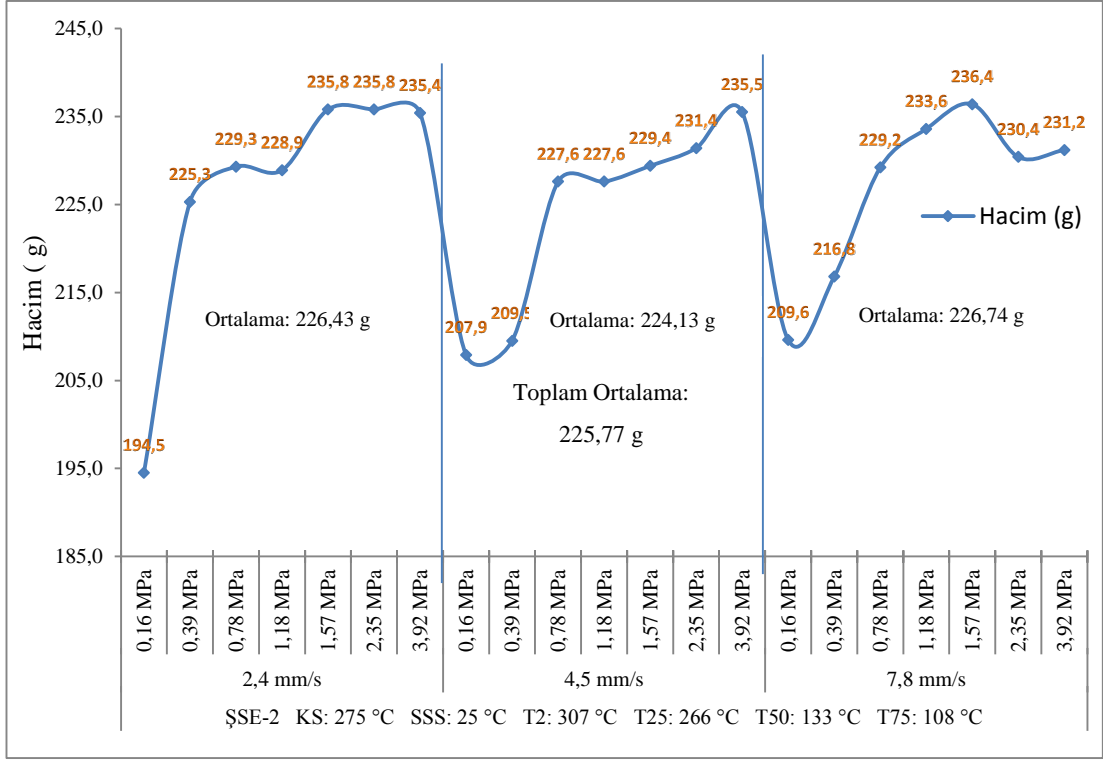




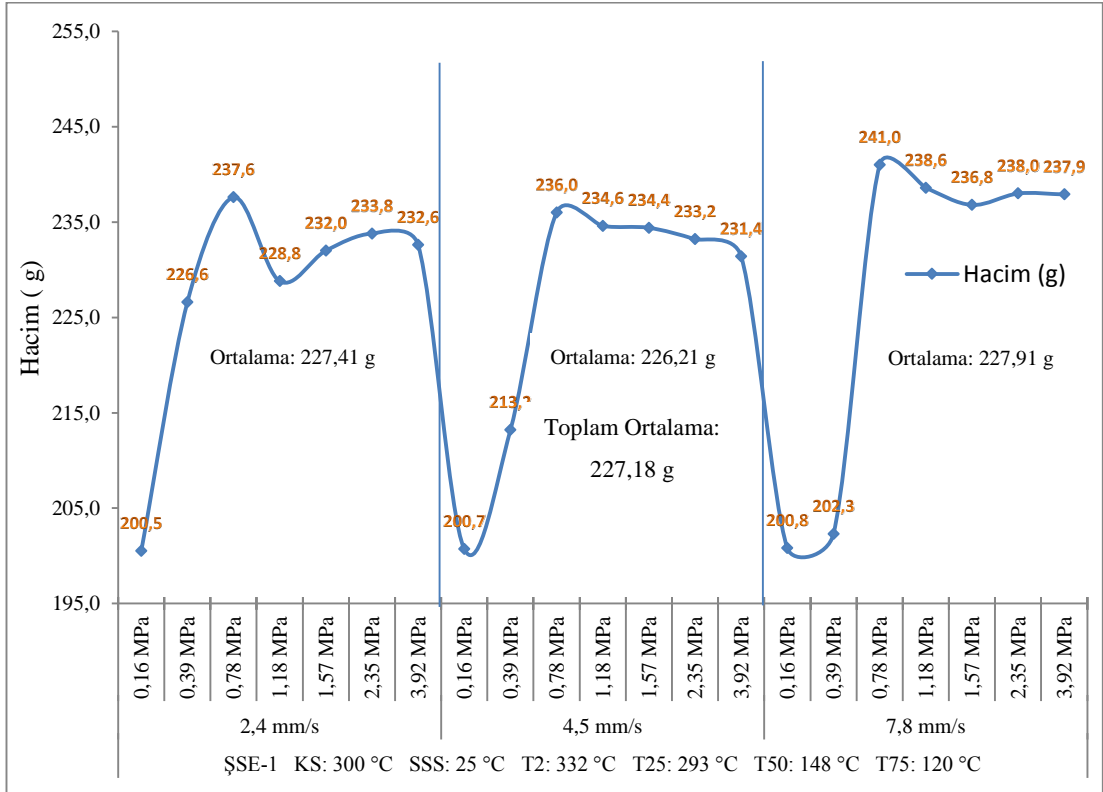
Şekil 6.6. ŞSE-4 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.



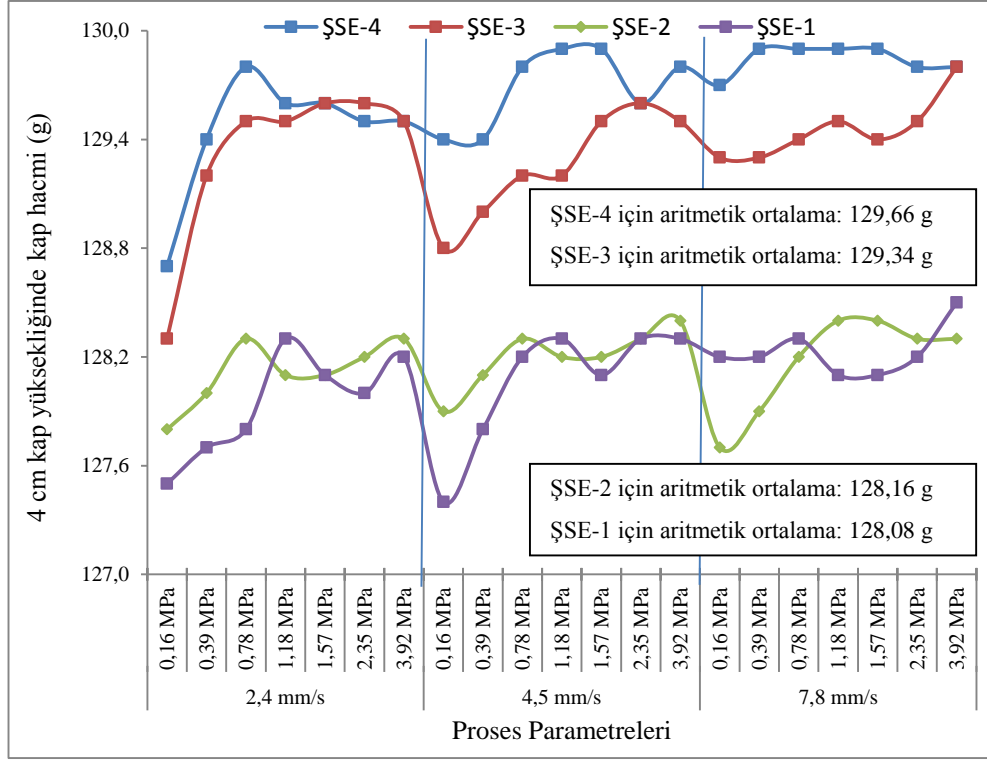
Şekil 6.7. ŞSE-3 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.



Şekil 6.8. ŞSE-2 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.



Şekil 6.9. ŞSE-1 koşullarında ortalama kap hacmi değerleri.



Şekil 6.10. Geri yaylanma davranışının analizi için ŞSE'lere göre ölçülmüş kap hacmi değerleri.

Çizelge 6.7. Minimum kap yüksekliği, kap hacmi ve geri yaylanma parametreleri için ANOVA değerleri.

Parametre	Giriş Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	F Oranı ( $\alpha = 5\%$ )	p	Faktör Etkileri (%)	Regresyon Katsayısı
Minimum kap yüksekliği	Sıcaklık (ŞSE)	3	38.532	3.83	0.013	6.74	
	İstampa hızı	2	68.438	10.21	0.000	11.94	<i>R-Sq (R):</i> 57,89 %
	Baskı levhası basıncı	6	224.698	11.18	0.000	39.22	<i>Adj R-Sq:</i> 51,46 %
	Hata	72	241.213			42.10	
	Toplam	83	572.882			100	
Kap hacmi	Sıcaklık (ŞSE)	3	1355.6	4.96	0.003	5.45	
	İstampa hızı	2	580.3	3.18	0.047	2.34	<i>R-Sq (R):</i> 73,61 %
	Baskı levhası basıncı	6	16369.2	29.93	0.000	65.82	<i>Adj R-Sq:</i> 69,58 %
	Hata	72	6562.8			26.39	
	Toplam	83	24867.9			100	
Geri yaylanma için kap hacmi	Sıcaklık (ŞSE)	3	41.1619	433.37	0.000	86.94	
	İstampa hızı	2	0.6902	10.90	0.000	1.45	<i>R-Sq (R):</i> 95,19 %
	Baskı levhası basıncı	6	3.2207	16.95	0.000	6.80	<i>Adj R-Sq:</i> 94,45 %
	Hata	72	2.2795			4.81	
	Toplam	83	47.3524			100	

ANOVA analizi, elde edilen optimum değerlerin anlamlılığını analiz edebilmek açısından önem taşımaktadır. Sıcaklık parametresi (kalıp sıcaklığı ve ŞSE), ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı minimum kap yüksekliği parametresini sırasıyla %6,74, %11,94 ve %39,22 oranında, kap hacmi parametresini sırasıyla %5,45, %2,34 ve %65,82 oranında ve geri yaylanma parametresini sırasıyla %86,94, % 1.45 ve %6,80 oranında etkilemektedir. Çizelge 6.7'ye göre, baskı levhası basıncının minimum kap yüksekliği ve kap hacmi üzerinde, sıcaklık ve ıstampa hızından daha etkili olduğu görülmektedir. Bu durum düşük baskı levhası basıncı değerlerinde oluşan marullanma kusurunun kap yüksekliğini olumsuz etkilemesiyle açıklanabilir.

ANOVA analizine göre sıcaklık parametresi, kap hacmi ve minimum kap yüksekliği üzerinde düşük oranda etkili gözükmemektedir (sırasıyla %6,74 ve %5,45). Sıcaklık parametresi prosesi gerçekleştirilebilir kılın tek parametre olması sebebiyle sıcaklık parametresini bu değerlere bakarak değerlendirmek yanıltıcı olacaktır. Bu değerler proses gerçekleştirildikten sonra sıcaklık parametresinin etkisini gösteren değerlerdir. Sıcaklık ve diğer parametrelerin etkileşimiyle kusursuz derin çekilebilirlik sağlandıktan sonra sıcaklık parametresinin çıkış parametreleri üzerinde ki etkisi azalmaktadır. Bu sonuca göre her ne kadar kap hacmi için optimum sıcaklık değeri 300 °C olarak belirlenmiş olsa da, şekillendirilebilirliğin gerçekleştiği 225 °C ve üstü sıcaklık kademeleri de optimuma yakın parametre seviyeleri olarak tanımlanabilir.

Geri yaylanma için ANOVA sonuçlarına bakıldığında ise, geri yaylanma parametresinin minimizasyonu için sıcaklığın %86,94 oranıyla yüksek oranda etkili olduğu görülmektedir. Sıcaklığın geri yaylanmanın minimizasyonu üzerinde yüksek oranda etkili olması beklenen bir durumdur. Fakat bu etki, plastik bölgeyi matematiksel olarak ifade etmek için kullanılan deformasyon sertleşmesi üssü, malzeme sabiti ve şekil değiştirme hızı hassasiyeti faktörlerine bağlı değil, elastik bölgede hesaplanan elastikiyet modülünün sıcaklıkla değişimiyle bağlantılıdır. Malzeme plastik şekil değişimine uğradıktan sonra elastik sınır kadar eski formuna dönmek isteyecektir. Sıcaklıkla kafes noktalarında ki titreşimlerin artması sonucu atomlar arası denge mesafesinde meydana gelen değişim elastikiyet katsayısını azaltacağı için geri yaylanma miktarının da azalması beklenmektedir. Deneysel

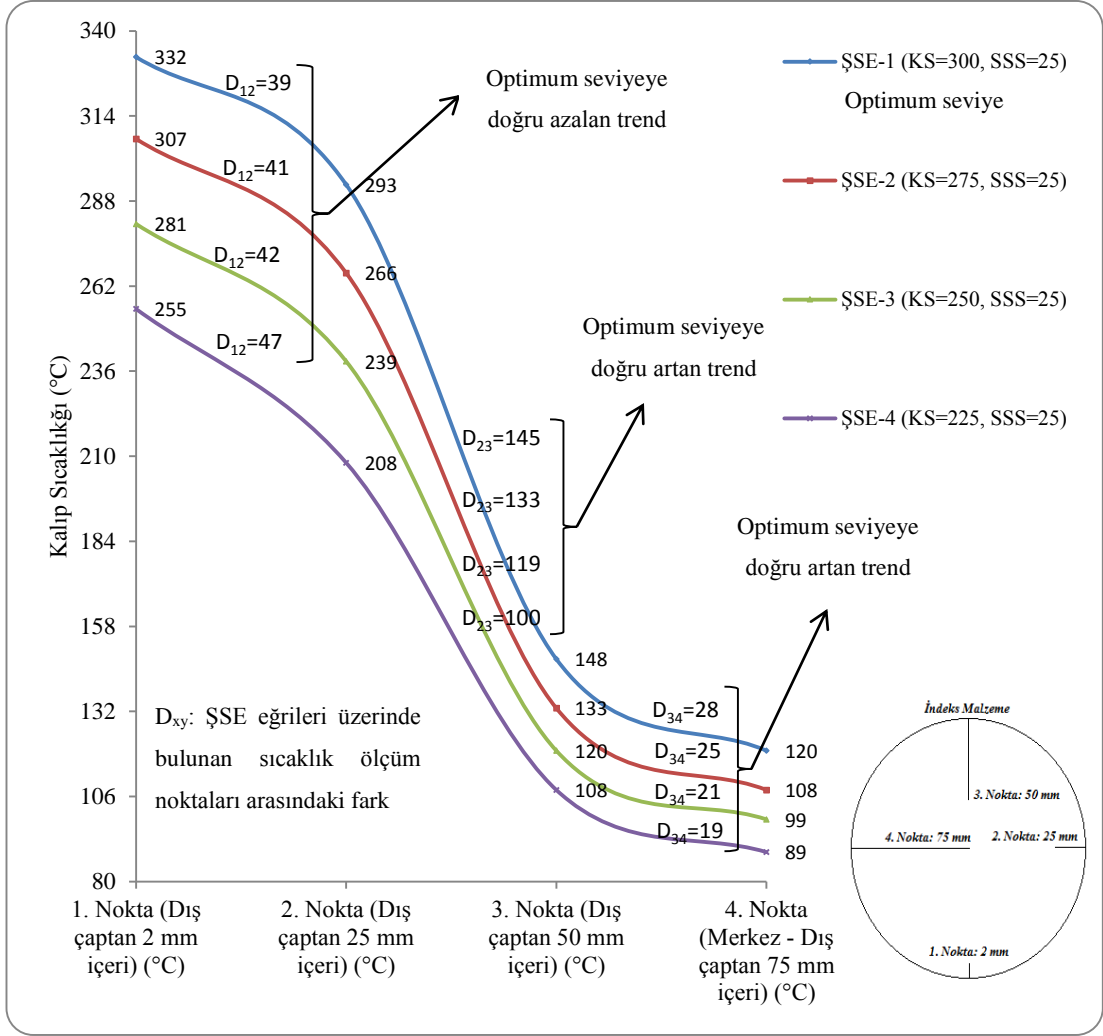
sonuçlar bu hipotezi doğrular niteliktedir. Burada görülen önemli bir diğer unsur ise geri yaylanmanın toplam %8,25 oranında baskı levhası basıncı ve ıstampa hızından etkileniyor olmasıdır. Her ne kadar düşük bir etki oranına sahip olsalar da, baskı levhası basıncı ve ıstampa hızı parametreleri geri yaylanmanın azaltılmasında istatistiksel ve fiziksel olarak anlamlılık göstermektedirler (her iki parametre için de izelge 6.7’de p değeri 0,05’den kk kmıştır). Ayrıca geri yaylanma parametresi için regresyon katsayısı %94,45 olarak hesaplanmıştır. Bu değer geri yaylanma parametresinin belirlenen proses parametreleri tarafından güçlü bir şekilde açıklanabildiğini göstermektedir. İstatistiksel açıdan elde edilen bulgular güçlü olmasına rağmen, geri yaylanmanın tespiti için gerçekleştirilen ölümler tatmin edici bulunmamıştır. şekil 6.10’da verilen aritmetik ortalama değerlerinin birbirilerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir. lme hata payı düşünüldüğünde elde edilen verilere güvenilirlik azalmaktadır. Ayrıca proseste ısıtma ve soğutma etkisinin aynı anda iş parçası malzemesine etkimesi, sıcaklık farkından dolayı malzemede oluşabilecek çarpılma kusurunu da düşündürmektedir. Bu sebeple llen değerlerin ne oranda geri yaylanma durumundan etkilendiği belirsizdir. Elde edilen veriler doğrultusunda geri yaylanma ölümü için ileri tekniklere ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Literatürdeki geri yaylanma ölümüne ilişkin elde edilen veriler de tutarlı gözükmemektedir [12].

Çizelge 6.7’de önemli görülen bir diğer sonuçta minimum kap yüksekliği ve kap hacmi parametreleri için hesaplanan regresyon katsayılarıdır. Bu değerler minimum kap yüksekliği parametresinin neden optimizasyon çalışmasında kullanılmadığını açıklamaktadır. Minimum kap yüksekliği, giriş parametrelerinin malzemenin çekilmesi üzerine olan etkisi hakkında bilgi vermektedir. İlık derin çekme prosesi ise gerinim, bükme ve derin çekme proseslerinin kombinasyonu ile gerçekleşmektedir. Kap hacmi parametresi ise, minimum kap yüksekliğine kadar kap hacmi suyla doldurulduğu için kapta meydana gelen çekme ve radyslerdeki bükme işleminden kaynaklı oluşabilecek değişimleri içermektedir. Bu durum izelge 6.7’deki regresyon katsayıları ile doğrulanabilir. Regresyon katsayısı minimum kap yüksekliği değer için %51,46, kap hacmi değer için ise %69,58 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, ılık derin çekme prosesinin karakteristiğini açıklama bakımından, kap hacmi parametresinin minimum kap yüksekliği parametresinden daha anlamlı olduğunu göstermektedir.

### 6.3. ŞSE'LER ÜZERİNDEKİ NOKTALARIN OPTİMUM DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

ŞSE'lerin karakteristik davranışı, ŞSE'ler üzerindeki noktaların sıcaklık farklılıklarının optimum ŞSE eğrisine göre trendleri belirlenerek analiz edilmiştir (Şekil 6.11). İlk adım olarak, her bir şekillendirme eğrisinin ölçüm noktaları arasında ki sıcaklık farkları hesaplanmış ve Şekil 6.11'de "D<sub>xy</sub>" notasyonu ile gösterilmiştir. İkinci adımda, sıcaklık ölçüm noktalarının ısıtma veya soğutmaya olan ihtiyacının belirlenebilmesi için hesaplanan değerlerin ŞSE-1 eğrisine göre trendleri (azalan veya artan) belirlenmiştir. ŞSE'ler üzerindeki 1. (dış çaptan 2 mm merkeze doğru) ve 2. (dış çaptan 25 mm merkeze doğru) nokta arasındaki sıcaklık farkı ŞSE-4 için 47 °C, ŞSE-3 için 42 °C, ŞSE-2 için 41 °C ve ŞSE-1 için 39 °C 'dir (Şekil 6.11). Bu trend ŞSE-1'e doğru azalan eğilim göstermektedir. Bu duruma göre şekillendirilebilirliğin artırılması için ŞSE'ler üzerindeki 2. nokta sıcaklığının artırılması gerekmektedir. Bu nokta kalıp radyüsü bölgesine denk gelmektedir. Kalıp radyüsü bölgesi çevresel ve radyal gerilmelerin en fazla yoğunlaştığı ve bu sebeple yırtılma, boyun verme vb. kusurların en fazla görüldüğü bölgedir [42]. Bu bölgede rekristalizasyon sıcaklığına kadar sıcaklığın artırılması numunede kusur oluşmasını engelleyerek derin çekilebilirliği arttıracaktır.

ŞSE'ler üzerindeki 2. (dış çaptan 25 mm merkeze doğru) ve 3. (dış çaptan 50 mm merkeze doğru) nokta arasındaki sıcaklık farkı ŞSE-4 için 100 °C, ŞSE-3 için 119 °C, ŞSE-2 için 133 °C ve ŞSE-1 için 145 °C'dir (Şekil 6.11). Bu bölge kap duvarı bölgesine denk gelmektedir ve bu bölgedeki artış trendi kap duvarı bölgesinde soğutmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Kap duvarı bölgesine etkiyen sıcaklık nedeniyle tokluğun düşmesi bu bölgede duvar buruşması ve boyun verme kusurlarının oluşmasına neden olabilecektir. İlgili bölge için deneysel sonuçlara dayalı olarak elde edilen soğutma ihtiyacı, derin çekilen kabın derin çekme esnasındaki gerilmeye maruz oluşabilecek kusurlarını engelleme açısından anlamlılık taşımaktadır. ŞSE'ler üzerindeki 3. (dış çaptan 50 mm içeriye) ve 4. (dış çaptan 75 mm ileriye) nokta arasındaki sıcaklık farkı ŞSE-4 için 19 °C, ŞSE-3 için 21 °C, ŞSE-2 için 25 °C ve ŞSE-1 için 28 °C'dir (Şekil 6.11). Bu bölge kap tabanı bölgesidir ve bu bölgedeki artış trendi, ilgili bölgede soğutma ihtiyacı duyulduğunu göstermektedir.



Şekil 6.11. İdeal optimum noktaları elde edebilmek için trend analizi.

Optimum sıcaklık eğrisine göre elde edilen trend verileri, optimum şekillendirilebilirlik için 3. ve 4. noktalarda soğutma gereksinimini, flanş ve kap radyüsü bölgesinde ise ısıtma gereksinimini göstermektedir. 1. ve 2. noktadaki yüksek sıcaklık gereksinimi ile 3. ve 4. noktalardaki soğutma gereksinimi malzeme üzerinde yoğun ısı akışı oluşturacaktır. Oluşan ısı akışının kapalı kalıp koşulları altında kontrol edilebilirliğinin zor olması sebebiyle ilgili noktalarda istenilen sıcaklık derecelerinin elde edilebilmesi oldukça güçtür. Bu problemi çözebilmek için, ilgili sıcaklık ölçüm noktaları için sıcaklık limitleri tanımlanabilir ve çalışmalar belirlenen sıcaklık derecelerini sağlayabilecek ısıtma ve soğutma sistemlerini barındıran kalıp tasarımlarına yönlendirilebilir. Bu koşulda cevaplanması gereken soru her bir sıcaklık ölçüm noktası için sıcaklık limitlerinin kaç derece olacaktır. Isıtma ihtiyacı duyulan 1. ve 2. noktalar için üst sıcaklık limiti yeniden kristalleşme sıcaklığıdır ve bu değer

AA5754-O alaşımı için yaklaşık 330 °C'dir. 3. ve 4. noktalar için ise yoğun ısı akısı altında ulaşılabilecek en düşük sıcaklık değerlerinin sınırları belirlenmelidir. İlgili sınır değerler soğutma kapasitesinin ne büyüklükte olması gerektiğini de belirleyecektir. Soğutma ihtiyacı olan noktaların sınır değerlerini belirleyebilmek için tek eksenli ılık çekme deneyi sonuçları veya iki eksenli ılık şişirme test sonuçları kullanılabilir. Takuda ve arkadaşları ve Türköz ve arkadaşları yaptıkları testlerde AA5754-O malzeme için akma dayanımının 100 °C üzeri sıcaklıklarda azalmaya başladığını, bu sıcaklık derecesine kadar akma dayanımında kayda değer bir değişiklik oluşmadığını belirtmişlerdir [54,55]. Bu sonuç derin çekme deneyleri açısından, oda sıcaklığı ile 100 °C arasında yapılan deneylerde anlamlı bir farklılık oluşmayacağını göstermektedir. Bu sebeple, 3. ve 4. sıcaklık ölçüm noktaları için 100 °C'ye kadar soğutma yapılması yeterli olacaktır. Elde edilen bu sonuçlara göre, 1. (flanş bölgesi) ve 2. (kalıp radyüsü bölgesi) noktalar için 330 °C ve 3. ve 4. noktalar için 100 °C sıcaklık değerleri optimum koşullara ulaşılabilmesi için hedef sıcaklık değerleridir. Bu değerler ideal optimum noktalar olarak tanımlanabilir.

#### **6.4. KONTROLLÜ SOĞUTMA ÜNİTESİ İLE GELİŞTİRİLEN ŞSE'LER KULLANILARAK AA6061-T6 VE AA7075-T6 ALAŞIMLARININ LİMİT DERİN ÇEKME ORANLARININ ARAŞTIRILMASI**

Belirlenen ideal optimum sıcaklıkların elde edilebilmesi için kullanılan soğutma ünitesi ve soğutma suyunun 0 °C olduğu koşullarında elde edilen ŞSE'ler önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır. Elde edilen yeni ŞSE'ler ile ıstampa tabanı bölgesinde ideal optimum sıcaklıklara yaklaşılmış, flanş bölgesinde ise soğutma yoğunluğu nedeniyle istenilen sıcaklık derecelerinin yaklaşık 30 °C altında kaldığı görülmüştür (Şekil 4.11).

Çalışmanın bu bölümünde geliştirilen ŞSE eğrilerinin çekme oranı üzerinde ne oranda etkili olduğu limit çekme deneyleri ile araştırılmıştır. Deneylerde AA6061-T6 ve AA7075-T6 alaşımları kullanılmıştır. Bu alaşımlar için literatürde belirtilen limit çekme oranı 2,0'dır [36,45]. Tez çalışması kapsamında iki farklı soğutma durumu ile çalışma yapılmasından dolayı, limit çekme oranları her iki durum içinde araştırılmıştır. Çizelge 6.8'de AA6061-T6 malzeme için adım adım arttırılan çekme oranı değerleri












ve her bir derin çekme oranında elde edilmiş numuneler verilmiştir. Çizelge 6.9'de AA7075-T6 malzeme için adım adım arttırılan çekme oranı değerleri ve her bir derin çekme oranında elde edilmiş numuneler verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre AA6061-T6 alaşımı için derin çekme oranı SSS değerinin 25 °C olduğu koşullarda 2,15-2,20 aralığına kadar çıkarılabilmektedir. Bu değer SSS değerinin 0 °C olduğu koşullarda ise 2,25-2,30 aralığına kadar çıkartılabilmektedir. Literatüre göre AA6061-T6 alaşımı için derin çekme oranında %12,5'luk bir artış sağlanabilmektedir.












Deney sonuçlarına göre AA7075-T6 alaşımı için derin çekme oranı SSS değerinin 25 °C olduğu koşullarda 2,30-2,40 aralığına kadar çıkarılabilmektedir. Bu değer SSS değerinin 0 °C olduğu koşullarda ise 2,45-2,50 aralığına kadar çıkartılabilmektedir. Literatüre göre AA6061-T6 alaşımı için derin çekme oranında %25'lik bir artış sağlanabilmektedir. AA7075-T6 alaşımının çinko alaşımı olması sebebiyle uygun ısıtma ve soğutma koşullarında daha yüksek derin çekme oranlarına çıkılabilmektedir.

Tez çalışması kapsamında AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemelerinin ılık derin çekilebilirliğini sağlayan diğer ŞSE'ler de incelenmiştir. Her bir malzeme için Çizelge 6.8-6.9'da belirlenen limit çekme oranlarında, 0, 10 ve 20 °C SSS değerlerinde elde edilen ŞSE 1-5 (Şekil 4.10, 4.13, 4.15) şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Giriş parametresi olarak sadece ŞSE'ler, çıkış parametresi olarak da yırtılma, marullanma, minimum kap yüksekliği ve kap hacmi parametreleri incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar AA6061-T6 alaşımı için Çizelge 6.10'da, AA7075-T6 alaşımı için Çizelge 6.11'de verilmiştir. Derin çekilmiş numune görüntüleri AA6061-T6 için Şekil 6.12, AA7075-T6 için Şekil 6.13'te verilmiştir.

Çizelge 6.8. AA6061-T6 malzeme için limit derin çekme oranı belirleme deneyleri.

Derin Çekme Oranı	Malzeme: AA6061-T6, Baskı Plakası Basıncı: 1,57 MPa, İstampa Hızı: 4,5 mm/s			
	KS=300 °C SSS=0 °C		KS=300 °C SSS=25 °C	
	Görüntü	Yorum	Görüntü	Yorum
2,00		Baskı levhası basıncı yetersizliğinden dolayı kap duvarında ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.		Baskı levhası basıncı yetersizliğinden dolayı kap duvarında ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.
2,05		Kulaklaşma ve baskı levhası basıncı yetersizliğinden dolayı kap duvarında ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.		Kulaklaşma kusuru oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanmıştır.
2,10	-	-		Kulaklaşma kusuru oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanmıştır.
2,15	-	-		Kulaklaşma kusuru ve ihmal edilebilir seviyede marullanma oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanmıştır.
2,20		Baskı levhası basıncı yetersizliğinden dolayı kap duvarında orta seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.		Kalıp radyüsü bölgesinde yırtılma kusuru oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanamamıştır.
2,25		Baskı levhası basıncı yetersizliğinden dolayı kap duvarında orta seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.	-	-
2,30		Kap duvarı bölgesinde boyun verme ve yırtılma oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanamamıştır.	-	-
Derin çekme oranı: $2,25 \leq D\check{C}O < 2,30$			Derin çekme oranı: $2,15 \leq D\check{C}O < 2,20$	

Çizelge 6.9. AA7075-T6 malzeme için limit derin çekme oranı belirleme deneyleri.

Derin Çekme Oranı	Malzeme: AA7075-T6, Baskı Plakası Basıncı: 1,57 MPa, İstampa Hızı: 4,5 mm/s				
	KS=300 °C SSS=0 °C		KS=300 °C SSS=25 °C		
	Görüntü	Yorum	Görüntü	Yorum	
1,80		Kap duvarında orta seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.	-	-	
2,00		Kulaklaşma ve ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.		Kulaklaşma ve ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.	
2,30		Kap duvarında ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.		Flanş bölgesinde aşırı seviyede marullanma kusuru oluşmuş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.	
2,35		Kap duvarında ihmal edilebilir seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır.	-	-	
2,40		Kap duvarında aşırı seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır. Yetersiz kalıp alanı nedeniyle eğilme oluşmuştur.		Kalıp radyüsü bölgesinde yırtılma kusuru oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanamamıştır.	
2,45		Kap duvarında aşırı seviyede marullanma görülmüş fakat derin çekilebilirlik sağlanmıştır. Yetersiz kalıp alanı nedeniyle eğilme oluşmuştur.		Kalıp radyüsü bölgesinde yırtılma kusuru oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanamamıştır.	
2,50		Kap duvarı bölgesinde boyun verme ve yırtılma oluşmuştur. Derin çekilebilirlik sağlanamamıştır.	-	-	
		Derin çekme oranı: $2,45 \leq D\check{C}O < 2,50$		Derin çekme oranı: $2,30 \leq D\check{C}O < 2,40$	

Çizelge 6.10. AA6061-T6 için ılık derin çekme deney sonuçları.

Malzeme: AA6061-T6 DÇÖ: 2,25 BLB: 2,35 MPa İstampa Hızı: 2,4 mm/s						
ŞSE (°C)	Yırtılma	Marullanma		Minimum Kap Yüksekliği (mm)	Kap Hacmi (g)	Fiziksel Form
	Var mı?	Var mı?	Durumu			
ŞSE-1 <sub>KS=300 SSS=0</sub>	Yok	Yok	-	69,55	316,2	✓
ŞSE-2 <sub>KS=275 SSS=0</sub>	Yok	Yok	-	69,12	316,0	✓
ŞSE-3 <sub>KS=250 SSS=0</sub>	Yok	Yok	-	67,09	306,6	✓
ŞSE-4 <sub>KS=225 SSS=0</sub>	Yok	Yok	-	66,65	303,2	✓
ŞSE-5 <sub>KS=200 SSS=0</sub>	Var	-	-	19,57	-	x
ŞSE-1 <sub>KS=300 SSS=10</sub>	Yok	Yok	-	69,48	320,1	✓
ŞSE-2 <sub>KS=275 SSS=10</sub>	Yok	Yok	-	69,31	316,7	✓
ŞSE-3 <sub>KS=250 SSS=10</sub>	Yok	Yok	-	66,40	311,8	✓
ŞSE-4 <sub>KS=225 SSS=10</sub>	Var	-	-	29,97	-	x
ŞSE-5 <sub>KS=200 SSS=10</sub>	Var	-	-	18,86	-	x
ŞSE-1 <sub>KS=300 SSS=20</sub>	Var	-	-	30,18	-	x
ŞSE-2 <sub>KS=275 SSS=20</sub>	Var	-	-	35,35	-	x
ŞSE-3 <sub>KS=250 SSS=20</sub>	Var	-	-	29,63	-	x
ŞSE-4 <sub>KS=225 SSS=20</sub>	Var	-	-	31,32	-	x
ŞSE-5 <sub>KS=200 SSS=20</sub>	Var	-	-	17,42	-	x

BLB: Baskı levhası basıncı, DÇÖ: Derin çekme oranı

x: Tamamen kusurlu numune, °: Kısmi kusurlu numune, ✓: Hatasız numune

Çizelge 6.11. AA7075-T6 için ılık derin çekme deney sonuçları.

Malzeme: AA7075-T6 DÇO: 2,45 BLB: 2,35 MPa İstampa Hızı: 2,4 mm/s						
ŞSE (°C)	Yırtılma	Marullanma		Minimum Kap Yüksekliği (mm)	Kap Hacmi (g)	Fiziksel Form
	Var mı?	Var mı?	Durumu			
ŞSE-1 <sub>KS=300</sub> SSS=0	Yok	Yok	-	80,34	287,5	✓
ŞSE-2 <sub>KS=275</sub> SSS=0	Yok	Yok	-	81,35	297,3	✓
ŞSE-3 <sub>KS=250</sub> SSS=0	Yok	Yok	-	81,33	295,3	✓
ŞSE-4 <sub>KS=225</sub> SSS=0	Yok	Yok	-	83,01	302,4	✓
ŞSE-5 <sub>KS=200</sub> SSS=0	Yok	Yok	-	80,66	305,0	✓
ŞSE-6 <sub>KS=175</sub> SSS=0	Var	-	-	18,82	-	x
ŞSE-7 <sub>KS=150</sub> SSS=0	Var	-	-	18,75	-	x
ŞSE-1 <sub>KS=300</sub> SSS=10	Yok	Yok	-	83,43	293,0	✓
ŞSE-2 <sub>KS=275</sub> SSS=10	Yok	Yok	-	82,93	303,3	✓
ŞSE-3 <sub>KS=250</sub> SSS=10	Yok	Yok	-	77,80	284,7	✓
ŞSE-4 <sub>KS=225</sub> SSS=10	Yok	Yok	-	81,45	301,3	✓
ŞSE-5 <sub>KS=200</sub> SSS=10	Var	-	-	18,95	-	x
ŞSE-6 <sub>KS=175</sub> SSS=10	Var	-	-	19,86	-	x
ŞSE-7 <sub>KS=150</sub> SSS=10	Var	-	-	18,13	-	x
ŞSE-1 <sub>KS=300</sub> SSS=20	Yok	Yok	-	82,47	294,7	✓
ŞSE-2 <sub>KS=275</sub> SSS=20	Yok	Yok	-	82,77	278,8	✓
ŞSE-3 <sub>KS=250</sub> SSS=20	Var	-	-	18,91	-	x
ŞSE-4 <sub>KS=225</sub> SSS=20	Var	-	-	19,74	-	x
ŞSE-5 <sub>KS=200</sub> SSS=20	Var	-	-	18,55	-	x
ŞSE-6 <sub>KS=175</sub> SSS=20	Var	-	-	18,37	-	x
ŞSE-7 <sub>KS=150</sub> SSS=20	Var	-	-	17,97	-	x

BLB: Baskı levhası basıncı, DÇO: Derin çekme oranı

x: Tamamen kusurlu numune, °: Kısmi kusurlu numune, ✓: Hatasız numune



Şekil 6.12. Farklı ŞSE koşullarında derin çekilmiş AA6061-T6 alaşımı malzemeler.

Çizelge 6.10'da elde edilen sonuçlar, AA6061-T6 alaşımı için sadece ılık derin çekilebilirliğin dikkate alındığı koşullarda optimum parametrelerin 0 °C SSS değeri için ŞSE 1-4, 10 °C SSS değeri için de ŞSE 1-3 olduğunu göstermektedir. Minimum kap yüksekliği ve kap hacmi parametreleri incelendiğinde ise 275 °C ve üzeri kalıp sıcaklığı koşullarının daha iyi sonuçlar verdiği, optimum noktanın ise 0 °C SSS değerinde ŞSE-1 koşulu olduğu görülmektedir.



Şekil 6.13. SSS değerinin 0 °C olduğu koşulda derin çekilmiş AA7075-T6 alaşımı malzemeler a) ŞSE-6, b) ŞSE-5, c) ŞSE-4, d) ŞSE-3, e) ŞSE-2, f) ŞSE-1.

Çizelge 6.11'de elde edilen sonuçlar, AA7075-T6 alaşımı için sadece ılık derin çekilebilirlik kriterinin dikkate alındığı koşullarda optimum eğrilerin 0 °C SSS değeri için ŞSE 1-5, 10 °C SSS değeri için ŞSE 1-4, 20 °C SSS değeri için ŞSE 1-2 olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 2.18'de Hui ve arkadaşları tarafından elde

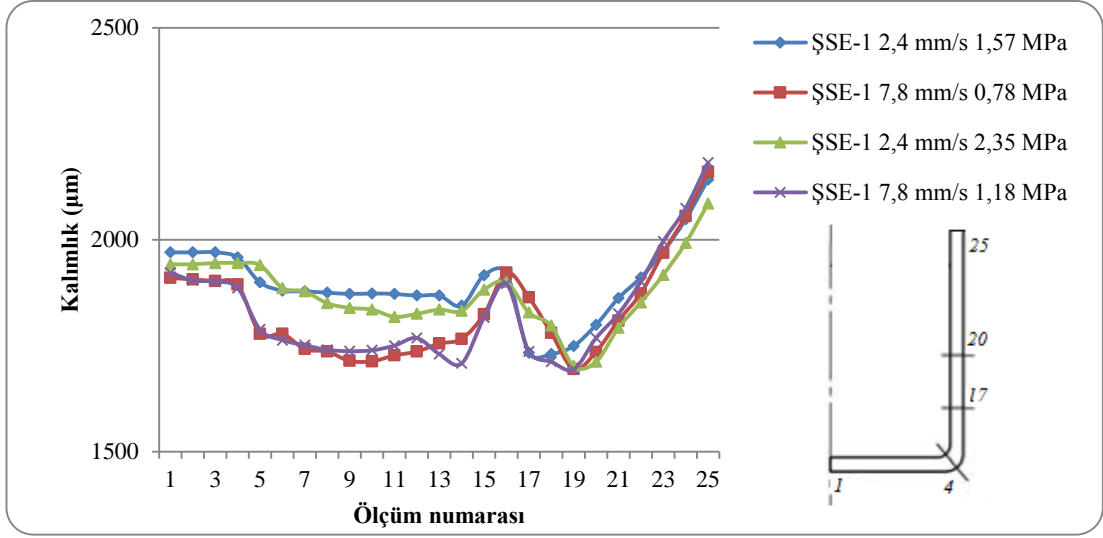
edilen limit çekme oranı değerlerinin arttırıldığını göstermektedir [36]. AA7075-T6 malzeme için, minimum kap yüksekliği ve kap hacmi parametreleri, optimum ŞSE'nin belirlenmesi amacıyla değerlendirilmemiştir. Faydalı kalıp alanı yetersizliğinden dolayı flanşlı ılık derin çekme işlemi yapılabildiği için minimum kap yüksekliği ve kap hacmi parametreleri yeteri hassasiyette ölçülememiştir.

## **6.5. ILIK DERİN ÇEKİLMİŞ KAPLARDA CİDAR KALINLIĞI DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ VE İSTAMPA RADYÜSÜ BÖLGESİ İÇİN MİKRO ÇATLAK ANALİZİ**

AA5754-O malzemenin ılık derin çekilmesinin araştırıldığı deneylerde elde edilen kapların kalınlık değişimleri, giriş parametrelerinin kalınlık değişimi üzerine etkileri analiz edilerek değerlendirilmiştir. Cidar kalınlığı için kritik görülen ıstampa radyüsü bölgesinde oluşan mikro çatlaklar SEM görüntüleri yoluyla incelenmiş ve proses parametrelerinin cidar kalınlığı üzerine olan etkileri için bulunan sonuçlar mikro çatlak görüntüleriyle desteklenmiştir.

### **6.5.1. Sıcaklık ve Diğer Proses Parametrelerinin Cidar Kalınlığı Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi**

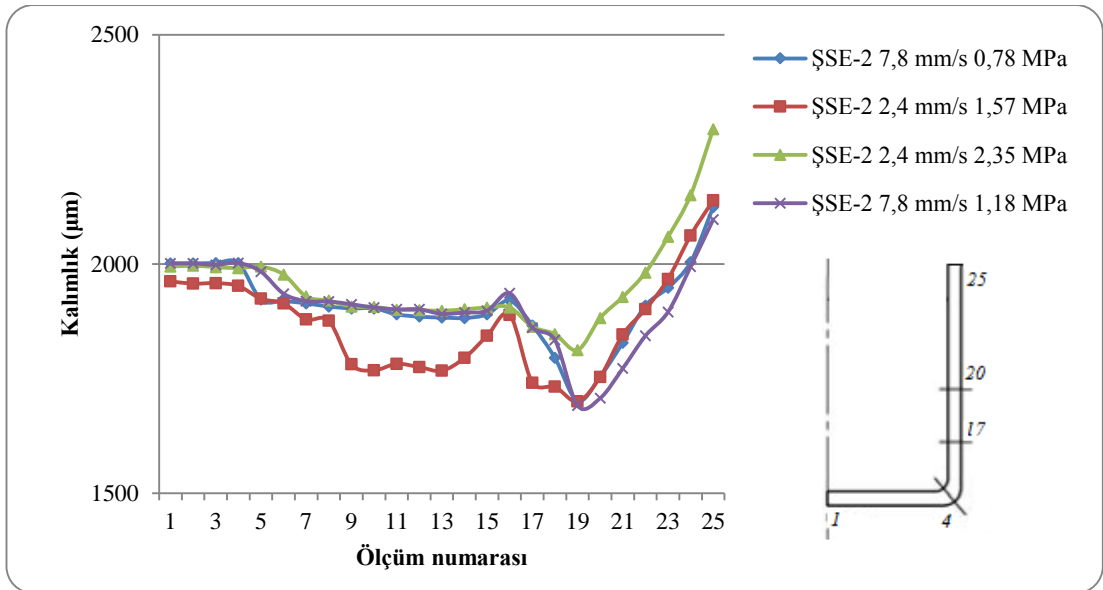
Kalınlık ölçümü gerçekleştirilecek ılık derin çekilmiş kaplar, Çizelge 6.1-6.4'te verilen derin çekilmiş kaplar arasından Taguchi metoduna göre oluşturulmuş deney tasarımına göre seçilmiştir [44]. L<sub>16</sub> deney tasarımına göre belirlenen kaplar için hadde doğrultusu boyunca ölçülen cidar kalınlığı değerleri Şekil 6.14-6.17'de ŞSE'lere göre grafiksel olarak verilmiştir. Cidar kalınlığı değerlerinde taslak kalınlığına göre maksimum incelmenin ŞSE-3, 7,8 mm/s ve 2,35 MPa deney şartlarında %15,95 oranında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu değer, cidar kalınlığı incelmesi açısından kabul edilebilir limitler dâhilindedir [40]. Cidar kalınlığı değerlerinde taslak kalınlığına göre maksimum kalınlaşmanın ŞSE-4, 7,8 mm/s ve 2,35 MPa deney şartlarında %16,05 oranında gerçekleştiği belirlenmiştir. Çizelge 6.12-6.15'te ölçülen değerler için hesaplanan korelasyon katsayıları verilmiştir. Korelasyon değerleri eğrilerin birbirlerine göre uyumluluklarının belirlenmesi için hesaplanmıştır.



Şekil 6.14. ŞSE-1 için kalınlık değişimi grafiği.

Çizelge 6.12. ŞSE-1 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.

Parametreler	ŞSE-1 2,4 mm/s 1,57 MPa	ŞSE-1 7,8 mm/s 0,78 MPa	ŞSE-1 2,4 mm/s 2,35 MPa	ŞSE-1 7,8 mm/s 1,18 MPa
ŞSE-1 2,4 mm/s 1,57 MPa	1,0000	-	-	-
ŞSE-1 7,8 mm/s 0,78 MPa	0,7917	1,0000	-	-
ŞSE-1 2,4 mm/s 2,35 MPa	0,8939	0,8145	1,0000	-
ŞSE-1 7,8 mm/s 1,18 MPa	0,8929	0,9536	0,8101	1,0000

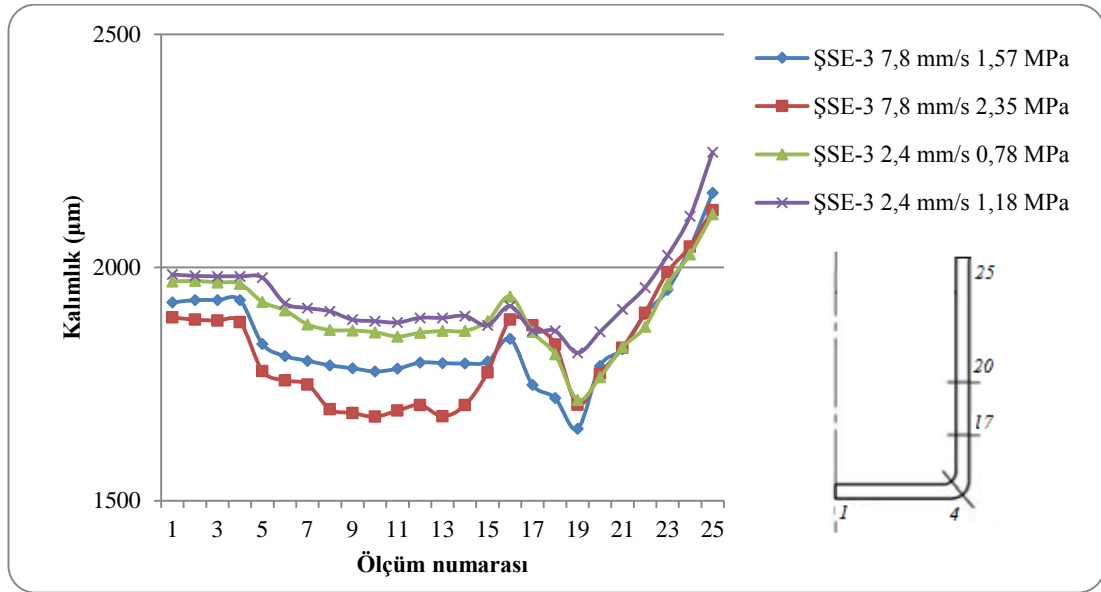


Şekil 6.15. ŞSE-2 için kalınlık değişimi grafiği.



Çizelge 6.13. ŞSE-2 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.

Parametreler	ŞSE-2 7,8 mm/s 0,78 MPa	ŞSE-2 2,4 mm/s 1,57 MPa	ŞSE-2 2,4 mm/s 2,35 MPa	ŞSE-2 7,8 mm/s 1,18 MPa
ŞSE-2 7,8 mm/s 0,78 MPa	1,0000	-	-	-
ŞSE-2 2,4 mm/s 1,57 MPa	0,8774	1,0000	-	-
ŞSE-2 2,4 mm/s 2,35 MPa	0,8363	0,9313	1,0000	-
ŞSE-2 7,8 mm/s 1,18 MPa	0,9497	0,7730	0,7114	1,0000



Şekil 6.16. ŞSE-3 için kalınlık değişimi grafiği.

Çizelge 6.14. ŞSE-3 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.

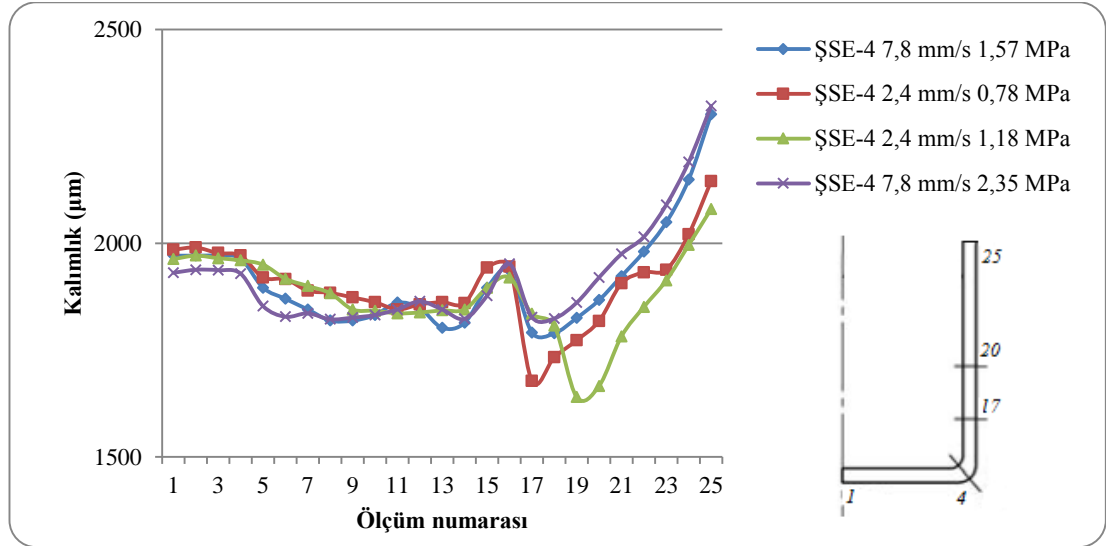
Parametreler	ŞSE-3 7,8 mm/s 1,57 MPa	ŞSE-3 7,8 mm/s 2,35 MPa	ŞSE-3 2,4 mm/s 0,78 MPa	ŞSE-3 2,4 mm/s 1,18 MPa
ŞSE-3 7,8 mm/s 1,57 MPa	1,0000	-	-	-
ŞSE-3 7,8 mm/s 2,35 MPa	0,8465	1,0000	-	-
ŞSE-3 2,4 mm/s 0,78 MPa	0,9225	0,7591	1,0000	-
ŞSE-3 2,4 mm/s 1,18 MPa	0,9666	0,8330	0,9100	1,0000

Şekil 6.14-6.17’de elde edilen sonuçlar cidar kalınlığının ıstampa tabanından itibaren ıstampa radyüsüne yaklaştıkça incelmediğini, köşelerde ani incelmelerin olduğunu, radyüs mesafesi boyunca incelmenin korunduğunu, köşelerden sonra bir boyun verme

bölgesinin oluştuğunu ve boyun verme bölgesinden sonra derin çekilen kabın ağız kısmına doğru gidildikçe kalınlaşmaların olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu sonuç Çizelge 6.12-6.15'teki her bir kalınlık değişim grafiği için hesaplanan korelasyon katsayılarına bakarak genellenebilir. Hesaplanan bütün korelasyon katsayısı değerleri grafikler arasında güçlü ve pozitif yönlü bir ilişkinin varlığını göstermektedir. Elde edilen değerler literatür ile benzerlik göstermektedir. Calgon ve Monaghan'ın derin çekme prosesini deneysel ve SEY ile inceledikleri çalışmalarında derin çekilen kaplarda oluşan boyunlaşma bölgeleri, ıstampa radyüsünde meydana gelen incelleme bölgesi ve kap duvarında oluşan kalınlaşma bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 6.18) [56]. Calgon ve Monaghan'ın elde ettiği cidar kalınlığı dağılımı Şekil 6.14-6.17'de elde edilen cidar kalınlığı dağılımı ile örtüşmektedir. Karalı'nın pot baskısının cidar kalınlığına etkisini incelediği çalışmasında elde ettiği sonuçlar Şekil 6.19'da verilmiş olup, çalışmada değişken pot baskıları altında ölçülen cidar kalınlığı değişimleri için anlamlı bir farklılığın oluşmadığı belirtilmiştir [57]. Karalı tarafından elde edilen soğuk derin çekmedeki cidar kalınlığı değişimleri ile Şekil 6.14-6.17'de elde edilen cidar kalınlığı değişimleri benzerlik göstermektedir. Literatür verileri ile tez çalışması kapsamında elde edilen verilerin örtüşmesi, sıcaklık değişkeninin proses üzerine olan etkisinin belirlenememesine sebep olmuştur. Bu sebeple bütün ölçüm noktaları için ANOVA uygulaması yapılarak proses parametrelerinin cidar kalınlığı üzerine olan etkileri araştırılmıştır (Çizelge 6.16). ANOVA analizinden elde edilen regresyon katsayısı değerleri, radyüs bölgesi hariç istatistiki olarak anlamlılık göstermediği için sadece radyüs bölgesinde ki 5, 6, 7, 8 numaralı (Şekil 5.12) ölçüm noktaları için varyans analizi sonuçları verilmiştir. Bu durum, ıstampa radyüsü bölgesi hariç diğer bölgelerde cidar kalınlığı değişiminin, sıcaklık, ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı değerlerinden yeteri kadar etkilenmediğini göstermektedir. Karalı'nın farklı baskı plakası basıncı altında elde ettiği cidar kalınlığı değişimi grafikleri de bu durumu doğrulamaktadır (Şekil 6.19).

Çizelge 6.16'ya göre bütün ölçüm noktalarında cidar kalınlığı üzerinde istatistiki ve fiziki öneme sahip olan parametre ıstampa hızıdır ( $p \geq 0,05$ ). Ayrıca Taguchi analizi için hesaplanan sinyal/gürültü (S/G) oranlarına göre de ıstampa hızı arttıkça cidar kalınlığının azalacağı sonucu elde edilmiştir (2,4 mm/s için S/G = 65,5430, 7,8 mm/s için S/G = 65,3967) [44]. Bu durum alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda

pozitif şekil değiştirme hassasiyetine sahip olmasıyla açıklanabilir [58]. Yüksek hızlara çıkıldıkça pozitif şekil değiştirme hassasiyeti sebebiyle malzemede boyunlaşma kusuru oluşması ihtimali artmaktadır. Boyunlaşma kusuru cidar kalınlığının düşmesi sebebiyle meydana gelen bir kusurdur. Bu sebeple ıstampa hızı cidar kalınlığının değişimi üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir.



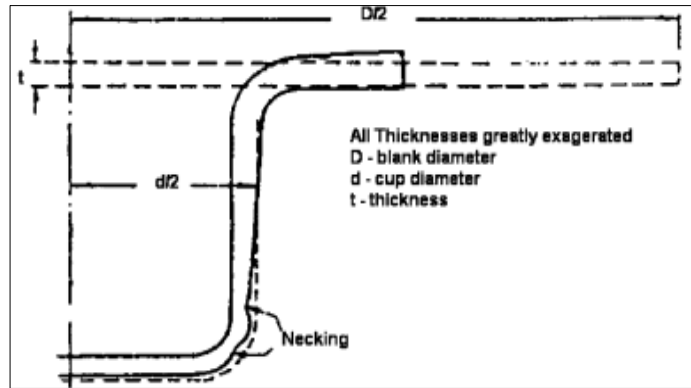
Şekil 6.17. ŞSE-4 için kalınlık değişimi grafiği.

Çizelge 6.15. ŞSE-4 koşulunda elde edilen kalınlık değişimi grafikleri için hesaplanan korelasyon değerleri.

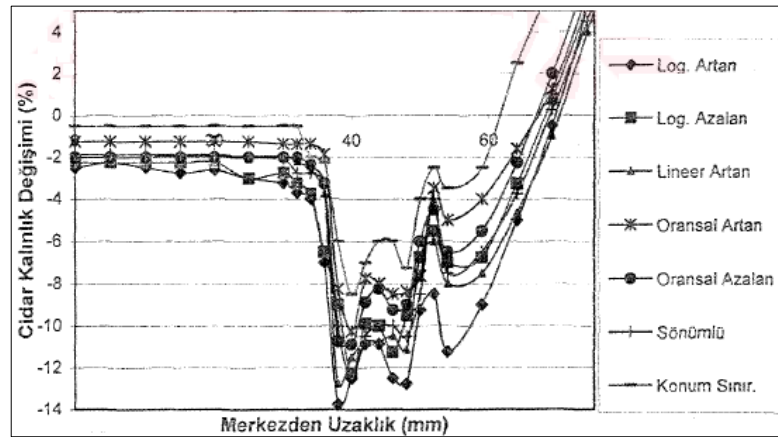
Parametreler	ŞSE-4 2,4 mm/s 0,78 MPa	ŞSE-4 2,4 mm/s 1,18 MPa	ŞSE-4 7,8 mm/s 2,35 MPa	ŞSE-4 7,8 mm/s 1,57 MPa
ŞSE-4 2,4 mm/s 0,78 MPa	1,0000	-	-	-
ŞSE-4 2,4 mm/s 1,18 MPa	0,7909	1,0000	-	-
ŞSE-4 7,8 mm/s 2,35 MPa	0,7315	0,5166	1,0000	-
ŞSE-4 7,8 mm/s 1,57 MPa	0,8511	0,6751	0,9656	1,0000

Çizelge 6.16'ya göre sadece 6 numaralı ölçüm noktasında sıcaklık parametresi (ŞSE eğrisi) cidar kalınlığı üzerinde istatistiki ve fiziki öneme sahip bulunmuştur ( $p \geq 0,05$ ). 6 numaralı ölçüm noktasında cidar kalınlığını sıcaklık %40,71 oranında, ıstampa hızı %40,92 oranında, baskı levhası basıncı ise %1,90 oranında etkilemektedir. Diğer ölçüm noktalarında ise sıcaklık parametresinin, istatistiki olarak anlamlı olmamasına rağmen cidar kalınlığı üzerinde %30'dan fazla etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum

sıcaklık parametresi için hesaplanan S/G oranı değerleri ile açıklanabilir [44]. S/G oranı değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmadığı için sıcaklık artışı veya azalışının cidar kalınlığını artırma veya azaltma yönünde bir etkisi bulunduğu söylenemez [44]. Laurent ve arkadaşları da farklı sıcaklıklarda derin çekme deneyleri gerçekleştirmişler ve sıcaklığın cidar kalınlığı üzerinde ihmal edilebilir etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.10) [12]. Sıcaklık parametresinin kalıp geometrisi ile arasında gerçekleşen etkileşim nedeniyle cidar kalınlığını etkilediği düşünülebilir. Bu iddianın ispatı için farklı geometrilerde ılık derin çekme işleminin araştırılması gerekmektedir. ANOVA çizelgesinde dikkat çeken diğer bir unsur da baskı levhası kuvvetinin cidar kalınlığı üzerindeki düşük etkisidir. Şekil 6.20’de farklı baskı plakası basıncında gerçekleştirilen deneyler için elde edilen cidar kalınlığı değişimi grafiklerinden de baskı plakasının cidar kalınlığı üzerine önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir [57].



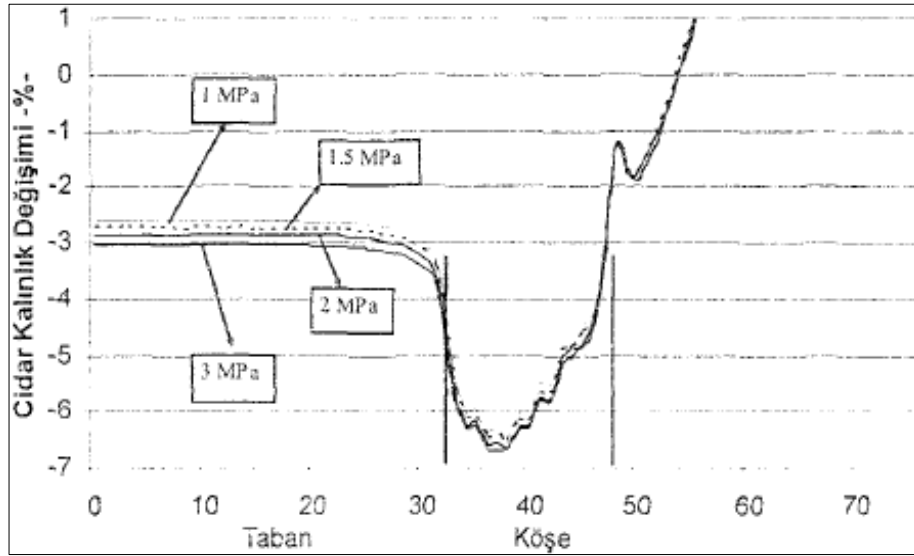
Şekil 6.18. İş parçasında cidar kalınlığı değişimi [56].



Şekil 6.19. Değişken baskı plakası değerlerinde cidar kalınlığı değişimi [57].

Çizelge 6.16. Cidar kalınlığı değişimi için ANOVA değerleri.

Parametre: Cidar Kalınlığı	Giriş Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	F Oranı ( $\alpha = 5\%$ )	p	Faktör Etkileri (%)	Regresyon Katsayısı
5 numaralı ölçüm noktası (Istampa radyüsü bölgesi)	Sıcaklık (ŞSE)	3	23633	3,37	0,075	30,85	
	Istampa hızı	1	30363	13,00	0,007	39,63	<i>R-Sq (R):</i> % 75,60
	Baskı levhası basıncı	3	3915	0,56	0,657	5,11	<i>Adj R-Sq:</i> % 54,25
	Hata	8	18691			24,41	
	Toplam	15	76602			100	
6 numaralı ölçüm noktası (Istampa radyüsü bölgesi)	Sıcaklık (ŞSE)	3	27089	6,60	0,015	40,71	
	Istampa hızı	1	27225	19,91	0,02	40,92	<i>R-Sq (R):</i> % 83,55
	Baskı levhası basıncı	3	1270	0,31	0,082	1,90	<i>Adj R-Sq:</i> % 69,16
	Hata	8	10942			16,47	
	Toplam	15	66526			100	
7 numaralı ölçüm noktası (Istampa radyüsü bölgesi)	Sıcaklık (ŞSE)	3	21721	3,74	0,060	36,17	
	Istampa hızı	1	21609	11,18	0,010	35,98	<i>R-Sq (R):</i> % 74,24
	Baskı levhası basıncı	3	1246	0,21	0,883	2,07	<i>Adj R-Sq:</i> % 51,70
	Hata	8	15467			25,78	
	Toplam	15	60043			100	
8 numaralı ölçüm noktası (Istampa radyüsü bölgesi)	Sıcaklık (ŞSE)	3	26384	3,82	0,058	36,10	
	Istampa hızı	1	24964	10,84	0,011	34,15	<i>R-Sq (R):</i> % 74,80
	Baskı levhası basıncı	3	3316	0,48	0,705	4,53	<i>Adj R-Sq:</i> % 52,74
	Hata	8	18420			25,22	
	Toplam	15	73084			100	

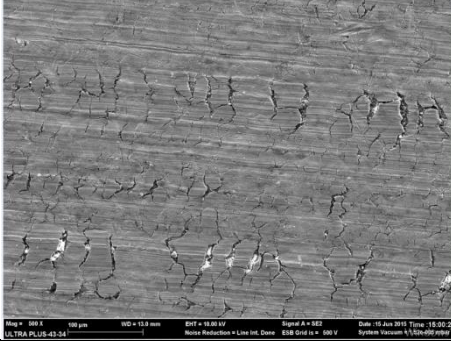
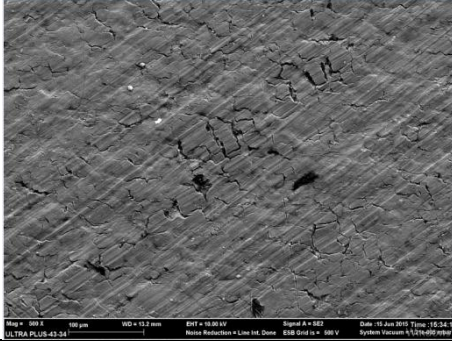


Şekil 6.20. Farklı baskı plakası basınçlarında cidar kalınlığı değişimi [57].

## 6.5.2. İstampa Radyüsü Bölgesi İçin Mikro Çatlak Analizi

İstampa radyüsü bölgesinin tamamında cidar kalınlığının düşük olması sebebiyle ilgili bölgede oluşan mikro çatlaklar SEM görüntüleri yoluyla incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda, farklı ıstampa hızlarında ve farklı derin çekme oranlarında mikro çatlak görüntüleri alınarak proses parametrelerinin mikro çatlak oluşumu üzerine etkileri belirlenmeye çalışılmıştır (Çizelge 6.17-6.20).

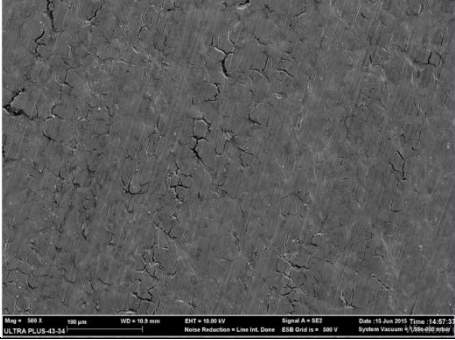
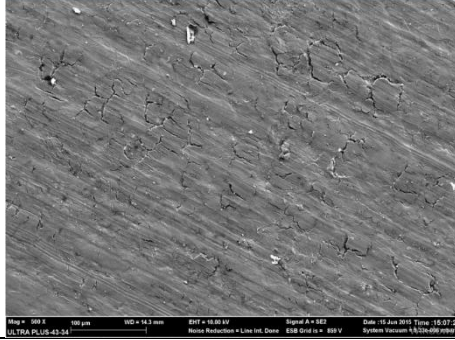
Çizelge 6.17. Farklı ŞSE şartlarında düşük ıstampa hızında (2,4 mm/s) elde edilen mikro görüntüler.

Parametre	ŞSE-4 KS: 225 °C SSS: 25 °C	2,4 mm/s DÇO: 2,3	0,78 MPa	ŞSE-1 KS: 300 °C SSS: 25 °C	2,4 mm/s DÇO: 2,3	0,78 MPa
Görüntü						

Çizelge 6.17’de elde edilen görüntüler şekillendirme sıcaklığı arttıkça çatlak oluşumunun azaldığını göstermektedir. ŞSE-4 şartlarına elde edilen görüntüde malzeme üzerinde yoğun bir çatlak oluşumu görülmekte iken, ŞSE-1 şartlarında daha az yoğunlukta ve daha kısa mesafeli çatlaklar görülmektedir. Çizelge 6.18’de yüksek ıstampa hızında farklı ŞSE’ler için elde edilen görüntüler de sıcaklık arttıkça mikro çatlak oluşumunun azaldığını göstermektedir. Çizelge 6.18’de, ŞSE-4 koşulunda oluşan mikro çatlakların ŞSE-1 koşulunda oluşan mikro çatlaklardan daha belirgin olduğu görülmektedir. Şekillendirme sıcaklığı arttıkça malzemenin akma dayanımının düşmesi sebebiyle malzeme daha düşük ıstampa kuvvetleriyle şekillendirilebilir [13,59,60]. Gerekli ıstampa kuvvetinin artan sıcaklıkla beraber düşmesi, ıstampa radyüsü bölgesinde mikro çatlak oluşumu açısından daha olumlu sonuçlar vermiştir. Elde edilen bu sonuç, sıcaklık parametresinin cidar kalınlığı üzerine etkisini belirlemek için elde edilen ANOVA sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir (Çizelge 6.16). ANOVA sonuçlarına göre sıcaklık, ıstampa radyüsündeki kalınlık dağılımı



üzerinde %30 ve üzeri etki göstermiştir. Çizelge 6.17 ile bu etki görsel olarak kanıtlanmıştır. Mikro çatlakların azalması, cidar kalınlığının azaldığı bölgelerde yırtılma oluşma ihtimalini azaltacağı için artan sıcaklığın cidar kalınlığı üzerinde dolaylı olarak olumlu etki gösterdiği iddia edilebilir.

Çizelge 6.18. Farklı ŞSE şartlarında yüksek ıstampa hızında (7,8 mm/s) elde edilen mikro görüntüler.

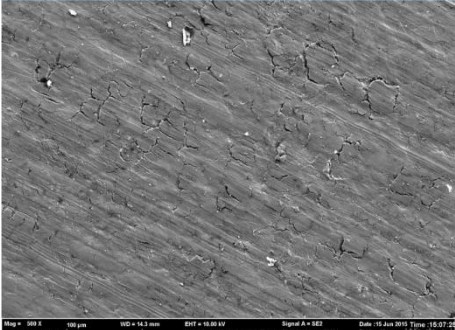

Parametre	ŞSE-4 KS: 225 °C SSS: 25 °C	7,8 mm/s DÇÖ: 2,3	1,18 MPa	ŞSE-1 KS: 300 °C SSS: 25 °C	7,8 mm/s DÇÖ: 2,3	1,18 MPa
Görüntü						

Çizelge 6.19’da farklı ıstampa hızı değerlerinde elde edilen mikro görüntüler, ıstampa hızının artışının mikro çatlak oluşumunu arttırdığını göstermektedir. 7,8 mm/s ıstampa hızında çekilen numunede 2,4 mm/s’de çekilen numuneye kıyasla mikro çatlak yoğunluğunun, çatlak derinliklerinin ve genişliklerinin arttığı görülmektedir. ıstampa hızı arttıkça malzemeyi şekillendirmek için ihtiyaç duyulan kuvvetin artması sebebiyle yüksek hızlarda şekillenen numunelerde mikro çatlakların yoğunlaşması beklenen bir durumdur [61]. Yüksek hızlara çıkıldıkça cidar kalınlığının incilmesi ve incelmeye başladığı bölgede mikro çatlak yoğunluğunun ve çatlak derinliklerinin artması, yüksek hız koşullarının ılık şekillendirme işlemleri için uygun olmadığını göstermektedir. Tez çalışması kapsamında, deneysel sonuçlara göre ıstampa hızı arttıkça minimum kap yüksekliği değerinin arttığı görülmüştür. Bu her ne kadar olumlu bir sonuç gibi görünse de cidar kalınlığı değişimlerinden ve mikro çatlaklardan elde edilen sonuçlar bu durumun numune kalitesi açısından olumsuz olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmalarda yüksek hızlarda çekilen numunelerde yırtılma oluşmaması durumu, seçilen numune kalınlığının yüksek olmasıyla açıklanabilir (2 mm). Bu durum numune kalınlığının da ılık derin çekilebilirlik üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.19. Farklı ıstampa hızı değerlerinde elde edilen mikro görüntüler.

Parametre	ŞSE-2 KS: 250 °C SSS: 25 °C	2,4 mm/s DÇO: 2,3	1,57 MPa	ŞSE-2 KS: 250 °C SSS: 25 °C	7,8 mm/s DÇO: 2,3	1,57 MPa
Görüntü						

Çizelge 6.20. Farklı derin çekme oranlarında elde edilen mikro görüntüler.

Parametre	ŞSE-1 KS: 300 °C SSS: 25 °C	7,8 mm/s DÇO: 2,3	1,18 MPa	ŞSE-1 KS: 300 °C SSS: 25 °C	7,8 mm/s DÇO: 2,7	1,18 MPa
Görüntü						

Çizelge 6.20'de 2,3 ve 2,7 ılık derin çekme oranlarında elde edilen numunelerin görüntüsü verilmiştir. 2,7 derin çekme oranında elde edilen numunelerde 2,3 derin çekme oranında elde edilen numunelere oranla daha yoğun ve daha geniş mikro çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Derin çekme oranı arttıkça flanş bölgesinde ve kalıp radyüsünde oluşacak gerilmelerin artması sebebiyle şekillendirme işlemi için daha yüksek ıstampa kuvvetlerine ihtiyaç duyulacaktır. Yüksek derin çekme oranlarında ıstampa kuvvetinin artışı mikro çatlak oluşumunu arttırmıştır.



## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 7.1. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında temel olarak, ılık derin çekme prosesinin uygulanabilir olmasını sağlayan sıcaklık parametresi üzerinde yoğunlaşmıştır. Tez başlığında belirtilen “sıcaklıkların belirlenmesi” kelimesiyle şekillendirme sıcaklıklarının doğru bir şekilde ölçülebilmesi ve kesinliğinin artırılması için gerçekleştirilen çalışmalar ifade edilmiş, “karakterizasyon” kelimesiyle de izotermal olmayan koşullarda ılık derin çekme işlemleri için en uygun şekillendirme sıcaklığı değerlerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ifade edilmiştir. Ayrıca deneysel çalışma için kurulan ısıtma ve soğutma sistemi entegreli ılık derin çekme ünitesi bütün detaylarıyla incelenmiş, tasarım ve imalat adımları sistematik bir şekilde ifade edilmiş ve tasarım hiyerarşisi oluşturulmuştur.

Tez çalışması kapsamında öncelikli olarak, şekillendirme sıcaklıklarını kapalı kalıp sistemi içinden ve doğrudan iş parçası malzemesi yüzeyinden tespit edebilecek bir sistem geliştirilmiştir. Sıcaklık ölçümü için iş parçası malzemesi yüzeyine farklı mesafelerde, 1 mm kalınlıkta termokuplların yerleştirilebileceği kanallar açılarak indeks malzeme elde edilmiştir. Prosesle ısıtma ve soğutma işlemlerinin etki etmesi nedeniyle, iş parçası malzemesi yüzeyinden elde edilen sıcaklıklar eğriler yoluyla ifade edilmiş ve “şekillendirme sıcaklığı eğrileri” (ŞSE) kavramıyla tanımlanmıştır.

ŞSE’ler kalıp sıcaklıkları ve soğutma suyu sıcaklıklarına göre (SSS) elde edilmiştir. Oda sıcaklığında soğutma işlemi için basit bir su devir-daim ünitesi kullanılmış, daha düşük soğutma derecelerinin elde edilebilmesi için üniteye 2000 kcal kapasiteli soğutma ünitesi eklenmiştir. Oda sıcaklığında soğutma şartlarında, SSS’nin kalıp sıcaklığına ve zamana göre değişimi belirlenerek proses parametresi olarak

kullanılabilirliği sağlanmıştır. ŞSE'lerin değişebilirliğini incelemek için SSS değerinin 0, 5, 10, 15 ve 20 °C olduğu koşullarda ŞSE'ler elde edilmiş ve şekillendirme işlemi için optimum ŞSE'leri elde edebilmek amacıyla SSS değerinin 0, 10 ve 20 °C olduğu koşullarda deneyler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada giriş parametresi olarak ŞSE'ler, ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı değerleri, çıkış parametresi olarak da yırtılma-marullanma kusurları, minimum kap yüksekliği, kap hacmi, geri yaylanma ve cidar kalınlığı değişimi parametreleri incelenmiştir. İş parçası malzemesi olarak 2 mm kalınlıkta AA5754-O, AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemeleri kullanılmıştır. AA5754-O alaşımının kullanıldığı deneylerde ŞSE'lerin proses üzerindeki etkileri belirlenmiş ve şekillendirilebilirliği arttıracak olan ideal optimum sıcaklıklar tespit edilmiştir. AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemeler ŞSE'lerin limit çekme oranına olan etkisini araştırmak için kullanılmıştır.

AA5754-O malzemenin ılık şekillendirme davranışının incelendiği deneylerde elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

- SSS değerinin 25 °C, kalıp sıcaklığının ise 225 °C ve üzeri değerlerde olduğu koşullarda elde edilen sıcaklık gradyanlarının, malzemenin akma gerilmesini, malzemede yırtılma kusurunun oluşmasını önleyebilecek değerlerde farklılaştırabilen parametreler olduğu belirlenmiştir.
- Marullanma kusuruna ait sonuçlar, baskı levhası basıncının marullanma üzerinde yüksek sıcaklık kademelerinde dahi yüksek oranda etkisi olduğunu göstermiştir. Fakat bu etki, marullanmayı önleyebilecek yeterli baskı levhası basıncı seviyesine kadar dikkate alınabilir. Diğer bir ifadeyle, artan kalıp sıcaklığı 0,78 MPa baskı levhası basıncı değerine kadar marullanma kusurunu engelleyememiştir.
- Termal etkinin ihtiyaç duyulan minimum baskı levhası basıncını yaklaşık olarak %30-70 seviyelerinde düşürdüğü görülmüştür.
- Minimum kap yüksekliği değerinin artan şekillendirme sıcaklığına bağlı olarak arttığı görülmüştür. ŞSE-1<sub>SSS:25°C</sub> koşullarında elde edilen deney sonuçlarına göre ortalama kap yüksekliği değeri 73,29 mm olarak ölçülmüştür ve bu değer 2,38 derin

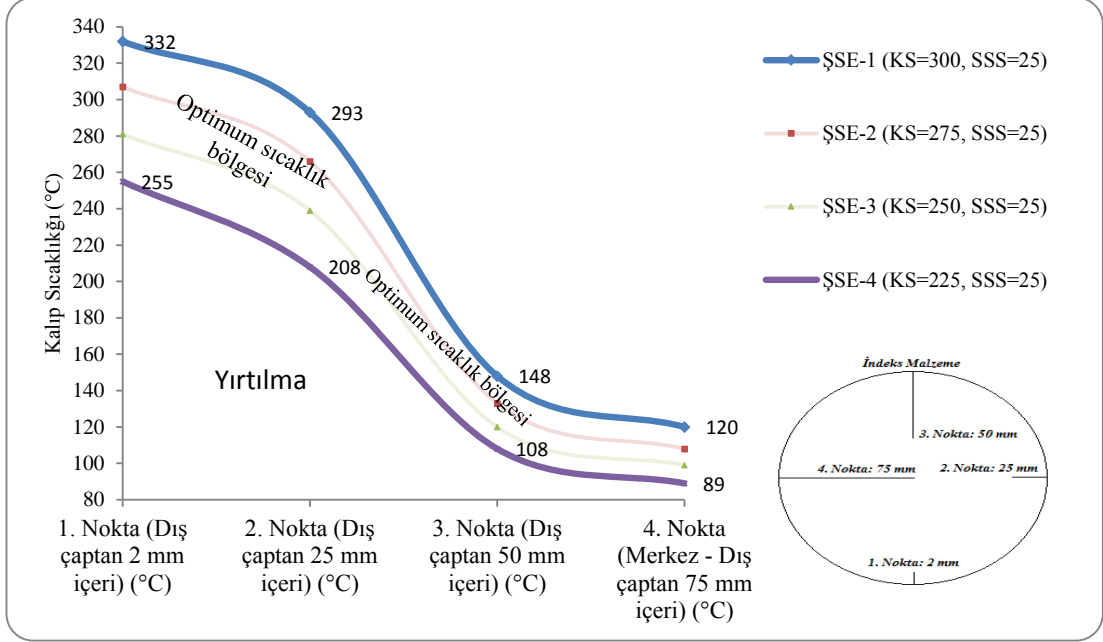
çekme oranına karşılık gelmektedir. Bu sonuç, artan sıcaklığın malzemenin çekme ve bükülme kapasitesini artırarak derin çekme oranını arttırdığını kanıtlamaktadır.

- Deneysel sonuçlara göre, derin çekilen kaplar için şekillendirme sıcaklığı, ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı parametrelerine bağlı olarak bir kararlılık seviyesi sınırı olduğu iddia edilebilir. Bu kararlılık seviyesi, derin çekilen kabın optimum fiziksel formuna ulaştığı parametre değerlerini göstermektedir. Fakat, şekillendirme sıcaklığı parametresi, ilgili derin çekme oranında çekilebilirliği sağlayan temel faktör olması sebebiyle, tanımlanan kararlılık seviyesinden önce ve sonra proses üzerinde sürekli etkili parametredir.
- Baskı levhası basıncının üst limitinin ŞSE-1<sub>SSS:25°C</sub> koşulunda 15,68 MPa değerine kadar, ŞSE-2<sub>SSS:25°C</sub> koşulunda 11,76 MPa değerine kadar, ŞSE-3<sub>SSS:25°C</sub> koşulunda 11,76 MPa değerine kadar, ŞSE-4<sub>SSS:25°C</sub> koşulunda ise 7,84 MPa değerine kadar olduğu belirlenmiştir.

AA5754-O için optimum ŞSE'nin araştırılması aşamasından ve ANOVA analizinden elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

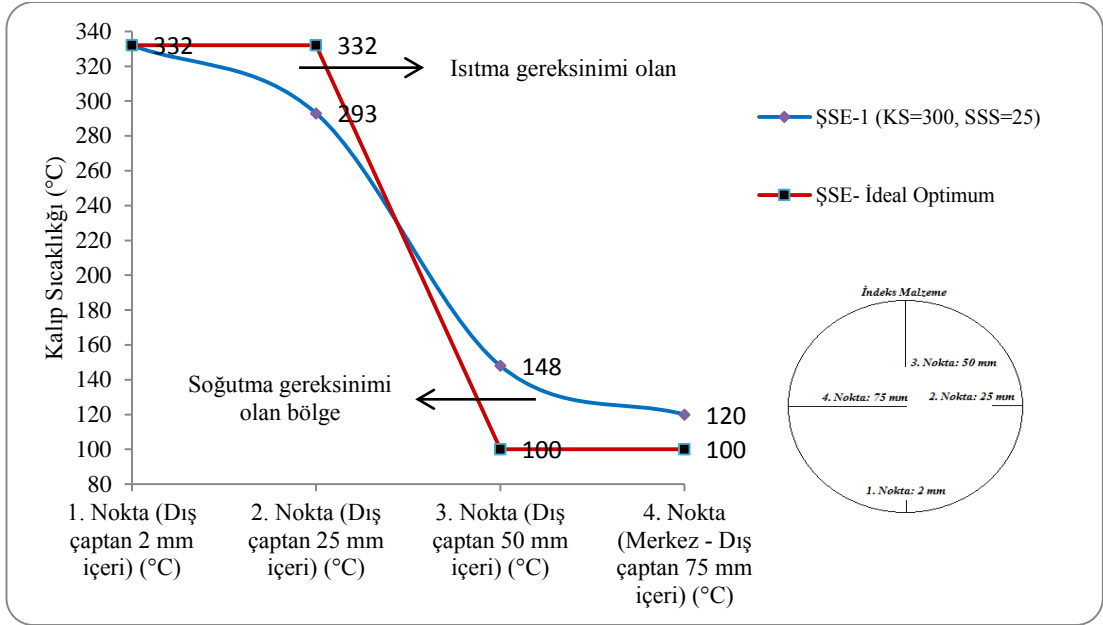
- Sadece şekillendirilebilirliğin referans alındığı durumda, ŞSE 1-4<sub>SSS:25°C</sub> koşullarında ve uygun baskı plakası - ıstampa hızı değerlerinde AA5754-O malzeme için kusursuz derin çekilebilirliğin elde edileceği belirlenmiştir. Bu durum, kalıp sıcaklığının 225-300 °C arası olduğu, SSS değerinin ise 25 °C olduğu koşullarda elde edilecek bütün ŞSE eğrilerinin AA5754-O malzeme için derin çekilebilirliği sağlayacağını göstermektedir (Şekil 7.1).
- Kap hacmi ve geri yaylanma parametrelerine göre optimum koşulların arandığı durumda ise, maksimizasyon kriterine göre kap hacmi için ŞSE-1<sub>SSS:25°C</sub> koşullarında elde edilen 227,18 g değeri ve minimizasyon kriterine göre geri yaylanma için yine ŞSE-1<sub>SSS:25°C</sub> koşullarında elde edilen 128,08 g değeri optimum değerlerdir.
- ANOVA analizine göre sıcaklık parametresi, kap hacmi ve minimum kap yüksekliği üzerinde düşük oranda etkili gözükmemektedir (sırasıyla %6,74 ve %5,45). Sıcaklık parametresi prosesi gerçekleştirilebilir kılan tek parametre olması sebebiyle, parametreyi bu değerlere bakarak değerlendirmek yanıltıcı olacaktır. Bu değerler, proses şekillenmeyi sağlayabilir konuma geldikten sonra sıcaklık parametresinin

etkisini gösteren değerlerdir. Kusursuz derin çekilebilirlik sağladıktan sonra sıcaklık parametresinin çıkış parametreleri üzerinde ki etkisi azalmaktadır.



Şekil 7.1. AA5754-O alaşımı için optimum ŞSE bölgesi.

- Geri yaylanma için ANOVA sonuçlarına bakıldığında, geri yaylanma parametresinin minimizasyonu için sıcaklığın %86,94 oranıyla yüksek oranda etkili olduğu belirlenmiştir.
- Optimum sıcaklık eğrisine göre elde edilen trend verileri, optimum şekillendirilebilirlik için ıstampa tabanı bölgesinde soğutma gereksinimini, flanş ve kap radyüsü bölgesinde ise ısıtma gereksinimini göstermektedir (Şekil 7.2). Isıtma gereksiniminin limiti malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı altıdır. Soğutma gereksiniminin limiti de malzemeye ait sıcaklığa bağlı akma eğrileri incelenerek belirlenebilir. Oda sıcaklığındaki akma değerlerinin korunduğu en üst sıcaklık derecesi soğutma limiti olarak alınabilir. Bu değer AA5754-O malzeme için 100 °C'dir.
- Elde edilen bulgular doğrultusunda optimum ısıtma ve soğutma derecelerinin belirlenmesi için şu şekilde bir genelleme yapılabilir: Flanş ve kap radyüsü bölgesinin ilgili malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı altına kadar ısıtıldığı, ıstampa tabanı, ıstampa radyüsü ve kap duvarı bölgesinin ise akma değerlerinin azalmaya başladığı ilk noktaya kadar soğutulabildiği değerlerdir.



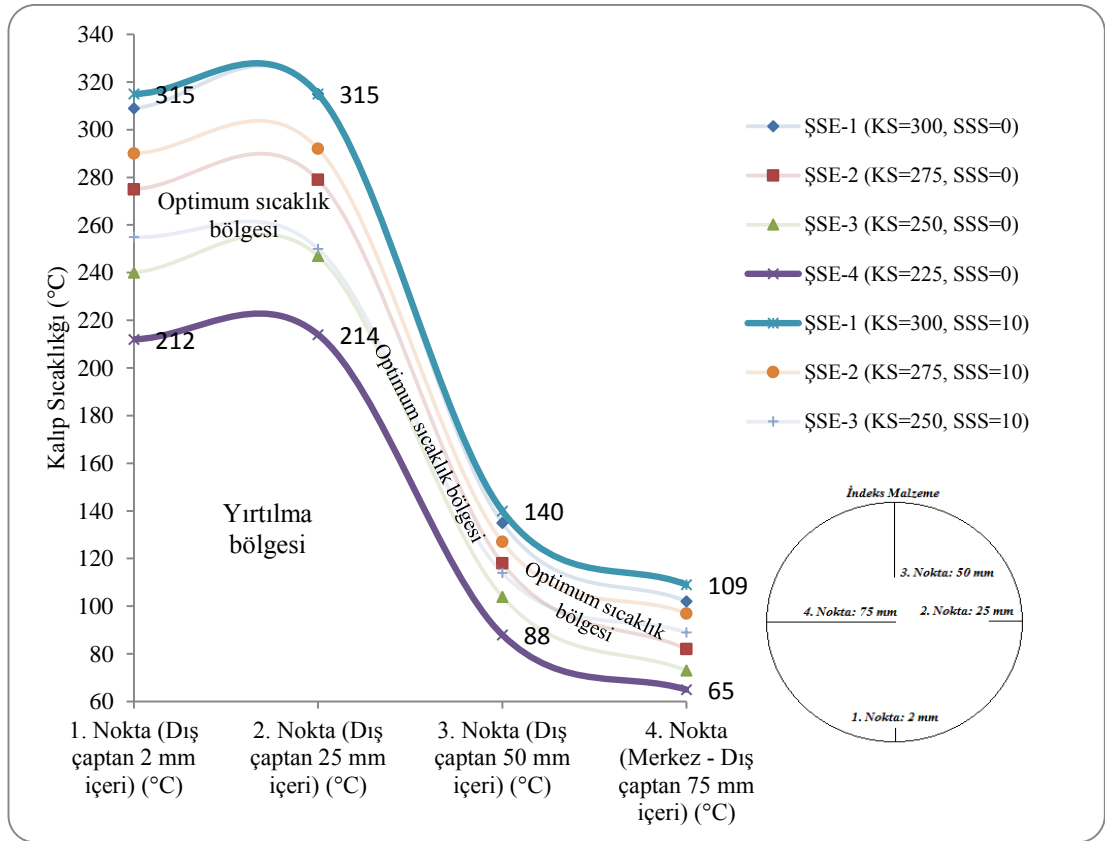
Şekil 7.2. İdeal optimum ŞSE'ye için ısıtma ve soğutma gereksinimi.

Farklı soğutma koşullarında elde edilen ŞSE'ler kullanılarak AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemelerinin limit çekme oranlarının araştırıldığı deneylerde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Elde edilen yeni ŞSE'ler ile ıstampa tabanı bölgesinde ideal optimum sıcaklıklara yaklaşılmış, flanş bölgesinde ise soğutma yoğunluğu nedeniyle istenilen sıcaklık derecelerinin yaklaşık 30 °C altında kaldığı görülmüştür.
- AA6061-T6 alaşımı için derin çekilebilirlik oranı SSS değerinin 25 °C olduğu koşullarda 2,15-2,20 aralığına kadar çıkarılabilmştir. Bu değer SSS değerinin 0 °C olduğu ŞSE-1 koşulunda ise 2,25-2,30 aralığına kadar çıkartılabilmştir. Literatüre göre AA6061-T6 alaşımı için derin çekme oranında %12,5'luk bir artış sağlanabilmştir.
- Deney sonuçlarına göre AA7075-T6 alaşımı için derin çekilebilirlik oranı SSS değerinin 25 °C olduğu koşullarda 2,30-2,40 aralığına kadar çıkarılabilmştir. Bu değer SSS değerinin 0 °C olduğu ŞSE-1 koşulunda ise 2,45-2,50 aralığına kadar çıkartılabilmştir. Literatüre göre AA7075-T6 alaşımı için derin çekme oranında %25'lik bir artış sağlanabilmştir. AA7075-T6 alaşımının çinko alaşımı olması

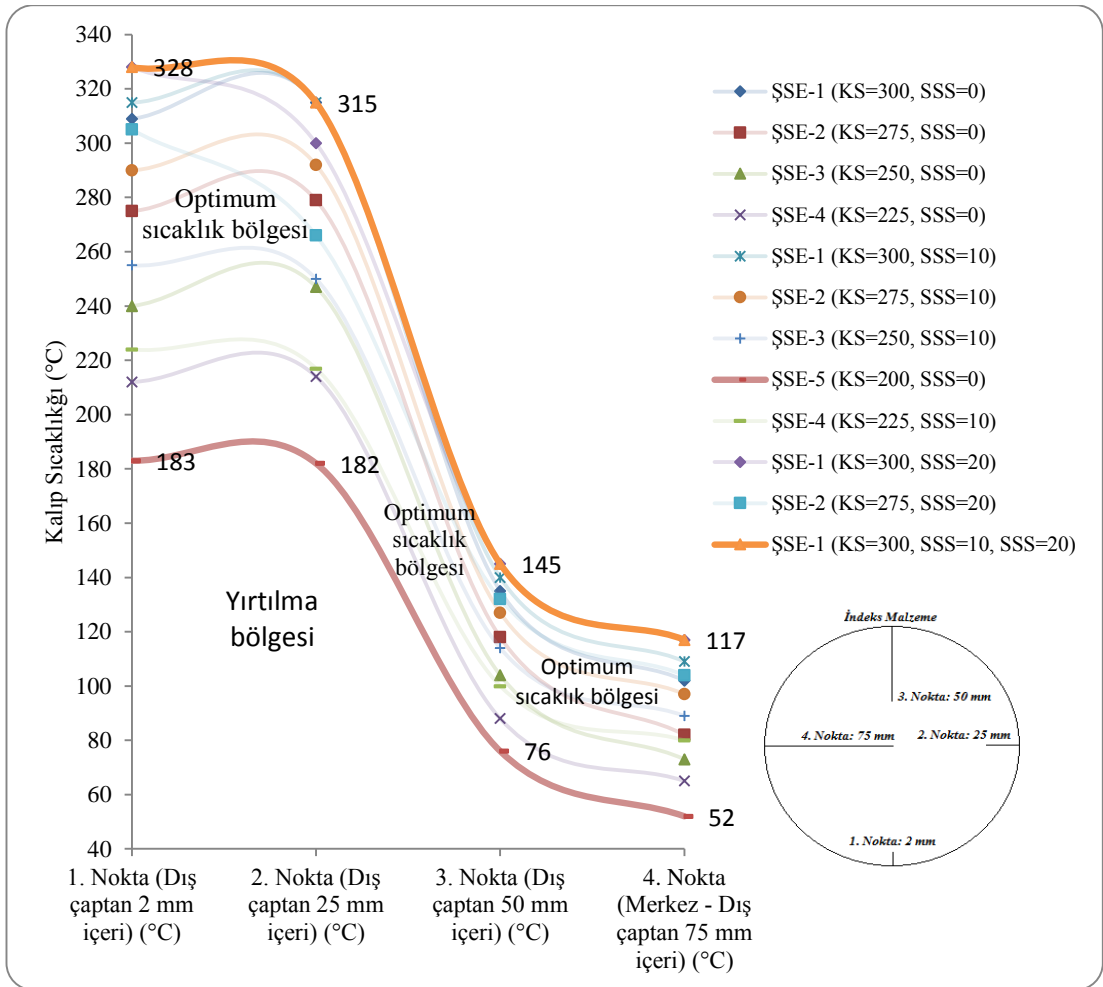
sebebiyle uygun ısıtma ve soğutma koşullarında daha yüksek derin çekme oranlarına çıkılabilmektedir.

- Tez çalışması kapsamında AA6061-T6 ve AA7075-T6 malzemelerinin ılık derin çekilebilirliğini sağlayan diğer ŞSE'ler de incelenmiştir. AA6061-T6 malzeme için 2,25, AA7075-T6 malzeme için 2,45 limit çekme oranlarında, 0, 10 ve 20 °C SSS değerlerinde elde edilen ŞSE 1-5 şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. AA6061-T6 alaşımı için sadece ılık derin çekilebilirliğin dikkate alındığı koşullarda optimum parametrelerin 0 °C SSS değeri için ŞSE 1-4, 10 °C SSS değeri için de ŞSE 1-3 olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.3). Minimum kap yüksekliği ve kap hacmi parametreleri incelendiğinde ise 275 °C ve üzeri kalıp sıcaklığı koşullarının daha iyi sonuçlar verdiği, optimum noktanın ise 0 °C SSS değerinde ŞSE-1 koşulu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.3. AA6061-T6 alaşımı için optimum ŞSE bölgesi.

- AA6061-T6 malzemesi 300 °C kalıp sıcaklığı ve 20 °C SSS sıcaklığında derin çekilememişken, kalıp sıcaklığının 250 °C ve soğutma suyunun 10 °C olması halinde çekme işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Benzer sonuçlar AA7075-T6 malzemenin derin çekilmesinde de elde edilmiştir.
- AA7075-T6 alaşımı için sadece ılık derin çekilebilirliğin dikkate alındığı koşullarda optimum parametrelerin 0 °C SSS değeri için ŞSE 1-5, 10 °C SSS değeri için ŞSE 1-4, 20 °C SSS değeri için ŞSE 1-2 olduğunu göstermektedir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. AA7075-T6 alaşımı için optimum ŞSE bölgesi.

Proses parametrelerinin cidar kalınlığına olan etkisinin belirlenmesi için ve ıstampa radyüsü bölgesinde oluşan mikro çatlak incelemesi için elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

- Cidar kalınlığı değişimi grafikleri, cidar kalınlığının ıstampa tabanından itibaren ıstampa radyüsüne yaklařtıķa incelendiğini, köşelerde ani incelmelerin olduğunu, radyüs mesafesi boyunca incelmelerin korunduğunu, köşelerden sonra bir boyun verme bölgesinin olduğunu ve boyun verme bölgesinden sonra derin çekilen kabın ağız kısmına doğru gidildikçe kalınlaşmaların olduğunu göstermektedir.
- Elde edilen bu sonuç her bir kalınlık değişim grafiği için hesaplanan korelasyon katsayılarına bakarak genellenebilmiştir. Hesaplanan bütün korelasyon katsayısı değerleri grafikler arasında güçlü ve pozitif yönlü bir ilişkinin varlığını göstermektedir.
- Her bir cidar kalınlığı ölçüm noktası için hesaplanan regresyon katsayısı değerleri, ıstampa radyüsü bölgesi hariç diğer bölgelerde cidar kalınlığı değişiminin, sıcaklık, ıstampa hızı ve baskı levhası basıncı değerlerinden yeteri kadar etkilenmediğini göstermektedir.
- Deneysel sonuçlar ıstampa hızı arttıķa cidar kalınlığının azalacağını, sıcaklık parametresinin ise cidar kalınlığını arttırma veya azaltma yönünde dikkate değer bir etkisi bulunmadığını göstermektedir.
- Mikro atlak görüntülerinden şekillendirme sıcaklığı arttıķa çatlak oluşumunun azaldığını belirlenmiştir. Mikro çatlakların azalması, cidar kalınlığının azaldığı bölgelerde yırtılma oluşma ihtimalini azaltacağı için artan sıcaklığın cidar kalınlığı üzerinde dolaylı olarak olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir.
- Mikro görüntüler, ıstampa hızının artışının mikro çatlak oluşumunu arttırdığını göstermiştir. Yüksek hızlara çıkıldıkça cidar kalınlığının incilmesi ve incelmelerin olduğu bölgede mikro çatlak yoğunluğunun ve çatlak derinliklerinin artması, yüksek hız koşullarının ılık şekillendirme işlemleri için uygun olmadığını göstermiştir.
- Derin çekme oranı arttıķa flanş bölgesinde ve kalıp radyüsünde oluşacak gerilmelerin artması sebebiyle şekillendirme işlemi için gereken daha yüksek ıstampa kuvvetlerinin iş parçası malzemesine etkimesi mikro çatlak oluşumunu arttırmıştır.



## 7.2. ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda ılık derin çekme prosesinin endüstriyel olarak kullanılabilirliğinin artırılması için daha ileri araştırmalara ve tekniklere ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ileriki çalışmalar için aşağıda belirtilen önerilerin prosesin endüstriyel olarak kullanılabilirliğini arttıracığı düşünülmektedir.

- Prosesin temeli kalıp tasarımına dayanmaktadır. Isıtma işlemleri için kalıp radyüsü bölgesinde yeterli sıcaklığı kararlılıkla sağlayabilecek rezistanların yerleştirilmesi derin çekilebilirliği arttıracaktır. Soğutmanın şekillenme üzerine önemli derecede etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple ıstampa içi soğutma kanallarının soğutmayı daha etkili gerçekleştirebilecek bir geometriye göre tasarlanması önem taşımaktadır.
- Isınma süresi seri imalat açısından olumsuzluk arz etmektedir. Malzemenin ısıtma işlem şartları araştırılarak termal etkiye daha çabuk cevap vereceği ısıtma işlem koşulları belirlenmelidir.
- Sıcaklık parametresi ile kalıp geometrisi arasındaki bağlantıların araştırılması gerekmektedir. Özellikle cidar kalınlığının araştırıldığı bölümde elde edilen veriler bu bağlantının araştırılması gerektiğini göstermiş ve bu durumla ilgili literatürde de yeterli veri bulunmadığı belirlenmiştir.
- İş parçası malzemesinin şekillenme işlemi için gerekli sıcaklığa ulaşmasının (~30 sn) şekillenme için yeterli olmadığı, bu koşullarda en az 2 dakika beklenmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu durumun sebebi araştırılmalıdır. Elde edilecek verilerle, seri üretimi engelleyen bekleme süresinin azaltılması için de çözüm üretilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Kaya, S., Spampinato, G. and Altan, T., “An experimental study on non isothermal deep drawing process using aluminum and magnesium alloys”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130 (6): 061001 (2008).
2. Zhang, S. H., Zhang, K., Xu, Y. C., Wang, Z. T. and Yu, Z. G., “Deep-drawing of magnesium alloy sheets at warm temperatures”, *Journal of Materials Processing Technology*, 185: 147–151 (2007).
3. Kirchain, R. and Cosquer, A., “Strategies for maintaining light metal reuse: in sights from modeling of firm-wideraw materials availability and demand”, *Resources, Conservation and Recycling*, 51: 367–396 (2007).
4. Schultz, R. A., “Aluminium for light vehicles – an objective look at the next ten to twenty years”, *In: 14th int’l aluminum conference*, Montreal, Canada (Ducker Research) (1999).
5. Kaya, S., “Using servo-drive presses to determine the effect of blank holder pressure on temperature change in warm forming of sheet”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 133 (6): 10-24 (2011).
6. Kim, H. S., Koç, M. and Ni, J., “Determination of proper temperature distribution for warm forming of aluminum sheet materials”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128 (3): 622–33 (2006).
7. Kaya, S., “Sheet Metal Forming-Fundamentals”, *ASM International*, Ohio (2011).
8. Ghaffari, T. D., Worswick, M. J. and Winkler, S., “Experimental studies of deep drawing of AZ31B magnesium alloy sheet under various thermal conditions”, *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 1337–47 (2011).
9. Kaya, S., “Improving the formability limits of light weight metal alloy sheet using advanced processes –Finite element modeling and experimental validation-”, PhD thesis, *University of Ohio State*, USA (2008).
10. Cetin, M. H., Turkoz, M., Ozalp, A. F., Yigit, O. and Arcaklıoglu, E., “Tool design including heating and cooling units for warm deep drawing process”, *ISIDE Symposium*, Turkey, 82-86 (2014).

11. Bolt, P. J., Lamboo, N. and Rozier, P., "Feasibility of warm drawing of aluminium products", *Journal of Materials Processing Technology*, 115 (1): 118–21 (2001).
12. Laurent, H., Coër, J., Manach, P. Y., Oliveira, M. C. and Menezes, L. F., "Experimental and numerical studies on the warm deep drawing of an Al–Mg alloy", *International Journal of Mechanical Sciences*, 93: 59-72 (2015).
13. Ozturk, F., Pekel, H. and Halkaci, H. S., "The effect of strain rate sensitivity on formability of AA5754-O at cold and warm temperatures", *Journal of Materials Processing Technology*, 20 (1): 77–81 (2010).
14. Koc, M., Agcayazi, A. and Carsley, J., "An experimental study on robustness and process capability of the warm hydroforming process", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133: 1–13 (2011).
15. Naka, T. and Yoshida, F., "Deep draw ability of type 5083 aluminum–magnesium alloy sheet under various condition soft emperature and forming speed", *Journal of Materials Processing Technology*, 89/90: 19–23 (1999).
16. Toros, S. and Ozturk, F., "Modeling uniaxial, temperature and strain rate dependent behavior of Al–Mg alloys", *Computational Materials Science*, 49: 333–339 (2010).
17. Chang, Q. F., Li, D. Y., Peng, Y. H. and Zeng, X. Q., "Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 436–443 (2007).
18. Nshama, W., and Jeswiet, J., "Evaluation of temperature and heat transfer conditions at the metal-forming interface", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44: 201–204 (1995).
19. Palumbo, G. and Tricarico, L., "Numerical and experimental investigations on the warm deep drawing process of circular aluminum alloy specimens", *Journal of Materials Processing Technology*, 184 (1): 115–123 (2007).
20. Wahab, A., Morsya, E. and Manabeb, K. I., "Finite element analysis of magnesium AZ31 alloy sheet in warm deep-drawing process considering heat transfer effect", *Materials Letters*, 60: 1866–1870 (2006).
21. Palumbo, G., Sorgente, D. and Tricarico, L., "Experimental procedure definition for evaluating the formability at warm temperatures of AZ31 magnesium alloy", *Key Engineering Materials*, 344: 39–46 (2007).

22. Kim, H. S., Koc, 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).
23. Chen, P., Lin, Z., Chen, G. and Koc, M., "Parametric analysis of warm forming of aluminum blanks with FEA and DOE", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16: 267–273 (2006).
24. Öztürk, F. ve Alkan, M., "Sıcaklık ve deformasyon hızının şekillendirilebilmeye etkisinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi", *TÜBİTAK MAG Proje 106M058*, 1-203 (2008).
25. Van Den Boogaard, A. H., Werkhoven, R. J. and Bolt, P. J., "Modelling of Al-Mg sheet forming at elevated temperatures", *International Journal of Forming Processes*, 4: 361-375 (2001).
26. Ungureanu, C. A., Dasi, S. and Jawahir, I. S., "Life-cycle cost analysis: aluminum versus steel in passenger cars", *The Minerals, Metals & Materials Society*, 11: 24-30 (2007).
27. Martchek, K. J., "Modeling more sustainable aluminum: case study", *International Journal Life Cycle Assessment* 11 (1): 34-37 (2006).
28. Mildenerger, U. and Khare, A., "Planning for an environment-friendly car", *Technovation*, 20: 205-214 (2000).
29. Sillekens, W. H., Sano, T., Terasaki, M., Matsuno, K. and Kals, J. A. G., "Formability of recycled aluminum alloy 5017", *Journal of Materials Processing Technology*, 65: 252-260 (1997).
30. Li, D. and Ghosh, A., "Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 145: 281–293 (2004).
31. Doege, E. and Droder, K., "Sheet metal forming of magnesium wrought alloys – formability and process technology", *Journal of Materials Processing Technology*, 115 (1): 14–19 (2001).
32. Huang, T. B., Tsai, Y. A., and Chen, F. K., "Finite element analysis and formability of non-isothermal deep drawing of AZ31B sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 177: 142-145 (2006).
33. Chang, Q. F., Li, D. Y., Peng, Y. H. and Zeng, X. Q., "Experimental and numerical study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47: 436-443 (2007).

34. Yoshihara, S., Yamamoto, H., Manabe, K. and Nishimura, H., "Formability enhancement in magnesium alloy deep drawing by local heating and cooling technique", *Journal of Materials Processing Technology*, 143/144: 612–615 (2003).
35. Zhang, K. F., Yin, D. L. and Wu, D. Z., "Formability of AZ31 magnesium alloy sheets at warm working conditions", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1276-1280 (2006).
36. Wang, H., Yingbing, L., Friedman, P., Minghe, C. and Lin, G., "Warm forming behaviour of high strength aluminium alloy AA7075 Trans", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22: 1–7 (2012).
37. Szumera, J. A., "The Metal Stamping Process", *Industrial Press Inc.*, New York, 96-140 (2003).
38. Güneş A. T., "Pres İşleri Tekniği", *Türk Mühendis Ve Mimar Odaları Birliği*, 2: 15-149, Ankara (2002).
39. Demirci, H. I., Esner C. and Yasar, M., "Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: theoretical and experimental investigation", *Journal of Materials Processing Technology*, 206: 152–160 (2008).
40. Çapan, L., "Metallere Plastik Şekil Verme", *Çağlayan Basımevi*, İstanbul (1999).
41. Toros, S., Ozturk, F. and Kacar, I., "Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 207: 1–12 (2008).
42. Woo, D. M., "Analysis of the cup drawing process", *Journal Mechanical Engineering Science*, 2 (6): 116-131 (1964).
43. Lin, Z., Wang, W. and Chen, G., "A new strategy to optimize variable blank holder force towards improving the forming limits of aluminum sheet metal forming", *Journal of Materials Processing Technology*, 183: 339–346 (2007).
44. Gökçe, B. ve Taşgetiren, S., "Kalite için deney tasarımı", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (1): 71-83 (2009).
45. Ghosh, M. A., Miroux, R. J., Werkhoven, P. J., Bolt, L. and Kestens, A. I., "Warm deep-drawing and post drawing analysis of two Al–Mg–Si alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (4): 756–766 (2014).

46. Halkacı, H. S., Turkoz, M. and Dilmeç, M., "Enhancing formability in hydromechanical deep drawing process adding a shallow draw bead to the blank holder", *Journal of Materials Processing Technology*, 214: 1638-1646 (2014).
47. Sevim, I., Sahih, S., Cug, H., Cevik, E., Hayat, F. and Karalı, M., "Effect of aging treatment on surface roughness, mechanical properties, and fracture behavior of 6xxx and 7xxx aluminum alloys," *Strength Materials*, 46 (2): 190–197 (2014).
48. Halkacı, M., Turkoz, M., Dilmeç, M., Halkacı, H. S. and Daghan, B., "Increasing the limiting drawing ratio of AA 5754 aluminum sheet by hydromechanical deep drawing process", *10th International Conference Technology Plasticity (ICTP 2011)*, Aachen, Germany, 472-476 (2011).
49. Howard, E. Boyer. and Timothy. L., Gall, Eds., "Metals Handbook", *American Society for Metals*, Materials Park, Ohio (1985).
50. "Metals Handbook - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", *American Society of Metals, Metals Park*, Ohio (1990).
51. Türköz, M., "Al 2024 ve Al 5754 alaşımlı alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması", *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2009).
52. Kayalı, E. S., Ensari, C., "Metallere Plastik Şekil Verme-İlke ve Uygulamaları", *İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi*, İstanbul (1986).
53. Dilmeç, M., "2024-T4 alüminyum sacların şekillendirme sınır eğrilerinin kalınlığa göre değişimi", Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2012).
54. Takuda, H., Mori, K., Masuda, I., Abe, Y. and Matsuo, M., "Finite element simulation of warm deep drawing of aluminum alloy sheet when accounting for heat conduction", *Journal of Materials Processing Technology*, 120: 412–418 (2002).
55. Turkoz, M., Halkacı, S. and Koc, M., "The effect of temperature and strain-rate sensitivity on formability of AA 5754", *Applied Mechanics and Materials*, 1596: 217-219 (2012).
56. Colgan, M. and Monaghan, J., "Deep drawing process: analysis and experiment" *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 35–41 (2003).
57. Karalı, M., "Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2005).

58. Li, D. and Ghosh, A., "Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures", *Materials Science and Engineering*, 352: 279–286 (2003).
59. Pourboghraat, F., Venkatesan, S. and Carsley, J. E., "Limiting drawing ratio and hydroforming limit for deep drawing of AA5754 aluminum sheet", *Journal of Manufacturing Processes*, 15 (4): 600–615 (2013).
60. Abedrabbo, N., Pourboghraat, F. and Carsley, J., "Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models", *International Journal of Plasticity*, 23 (5): 841–875 (2007).
61. Palaniswamy, H., Ngaile, G. and Altan, T., "Finite element simulation of magnesium alloy sheet forming at elevated temperatures" *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 52–60 (2004).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Muhammet Hüseyin ÇETİN, 1986 yılında Konya’da doğdu. İlkokulu Mersin’de, orta öğrenimini ise Konya’da tamamladıktan sonra 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2004 yılında hak kazandığı çift anadal programı ile aynı zamanda Makine Mühendisliği Bölümünde de öğrenim gördü. 2008 yılında Endüstri ve Makine Mühendisliği programlarından 3,14 ortalama ile mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği bölümünde başladığı yüksek lisans öğrenimi “Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Tornalamadaki Performansının Araştırılması” başlıklı tez çalışması ile tamamladı. İmalat teknolojileri alanında yayınlanmış 7 adet SCI indeksli makalesi, 3 adet uluslararası sempozyum bildirisi, 3 adet de ulusal sempozyum bildirisi vardır. 2008 Kasım ayında başladığı Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki araştırma görevliliği vazifesine halen devam etmektedir. Makine Mühendisliği ve İşletme bölümlerinde doktora öğrencisidir. İngilizce bilmektedir. Evlidir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Emek Mah. Burç Sok. Kalekent Sit. E Blok 4/7  
Safranbolu/KARABÜK  
Tel : 0 551 905 43 54  
E-posta : hcetin@karabuk.edu.tr