



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ŞEKİLLENDİRME**  
**SINIR EĞRİSİNİN ÇEŞİTLİ YÖNTEMLERLE**  
**VE YÜKLEME KOŞULLARINDA ELDE**  
**EDİLMESİ**

**Ömer Faruk GÖKCEPINAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz-2023**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer Faruk GÖKCEPINAR tarafından hazırlanan “Ti-6Al-4V Alaşımının Şekillendirme Sınır Eğrisinin Çeşitli Yöntemlerle ve Yükleme Koşullarında Elde Edilmesi” adlı tez çalışması 03/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Haydar LİVATYALI

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜKÖZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 219M489 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ömer Faruk GÖKCEPINAR

Tarih:25.07.2023

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# Ti-6Al-4V ALAŞIMLI LEVHANIN ŞEKİLLENDİRME SINIR EĞRİSİNİN ÇEŞİTLİ YÖNTEMLERLE VE YÜKLEME KOŞULLARINDA ELDE EDİLMESİ

**Ömer Faruk GÖKCEPINAR**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI**

**İkinci Danışman: Prof. Dr. Murat DİLMEÇ**

**2023, 77 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI**

**Prof. Dr. Haydar LİVATYALI**

**Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ**

2000’li yıllarda yüksek mukavemet, termal kararlılık, korozyon direnci gibi üstün özellikleri ile öne çıkan titanyum alaşımlarının endüstriyel uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Ti-6Al-4V, titanyum alaşımları içerisinde en çok kullanılan tür olarak dikkat çekmektedir. Ti-6Al-4V havacılık ve enerji sektörlerinde gaz türbinleri, tıp alanında eklem implantları gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yüksek lisans tezinde oda sıcaklığında sınırlı şekillendirilebilirliğe sahip Ti-6Al-4V levhaların şekillendirme sınır eğrisi (ŞSE) deneysel olarak bulunmuştur. ŞSE’nin çizilebilmesi için Nakajima ve hidrolik şişirme deneyi olarak iki farklı yöntem kullanılmıştır. Hidrolik şişirme deneyi ile ŞSE verileri üretilirken şekillendirilebilirliği artırdığı bilinen salınımlı yükleme de uygulanmıştır. Hidrolik şişirme deneyi ile bulunan ŞSE, salınımlı yükleme uygulandığında %23.7 oranında artış göstermiştir. Ayrıca Nakajima testi ile belirlenen ŞSE’nin, hidrolik şişirme deneyi ile belirlenen ŞSE’ye göre daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçların sebeplerini incelemek üzere durum çalışmaları yapılmıştır. Nakajima testinin sürtünme içermesi sebebiyle hasarı geciktirdiği görülmüştür. Sürtünme içeren bir şekillendirme yöntemi olan dişi hidro şekillendirme (DHŞ) yöntemiyle endüstriyel parçalar imal edilmiş ve bu parçaların birim şekil değişimi (BŞD) ölçülmüş ve sonuçlar Nakajima testi ile belirlenen ŞSE’yi doğrulamıştır. Hidrolik şişirme testi ile belirlenen ŞSE’yi doğrulamak için hidrolik şişirme yöntemiyle küresel kubbeler imal edilmiştir. Bu işlem hem monoton hem de salınımlı yükleme ile yapılmıştır. Ölçülen BŞD dağılımları incelenmiş ve sonuçlar hidrolik şişirme testi ile elde edilen ŞSE’yi doğrulamıştır. Ayrıca salınımlı yükleme ile üretilen küresel kubbenin BŞD dağılımları, salınımlı yüklemeye elde edilen ŞSE’de olduğu gibi artmıştır. Bunun sonucunda sürtünme etkileri içeren üretim yöntemlerinde Nakajima testi ile belirlenen ŞSE’nin, sürtünme etkileri içermeyen üretim yöntemlerinde hidrolik şişirme deneyi ile belirlenen ŞSE’nin kullanılmasının daha uygun olacağı ve salınımlı şekillendirmenin şekillendirilebilirlikte önemli bir artış sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik Şişirme Deneyi, Nakajima Testi, Sac Şekillendirme, Şekillendirilebilirlik, Şekillendirme Sınır Diyagramı, Şekillendirme Sınır Eğrisi, Ti-6Al-4V

## ABSTRACT

## MS THESIS

### GENERATION OF FORMING LIMIT CURVE OF Ti-6Al-4V ALLOY SHEET BY VARIOUS METHODS AND LOADING CONDITIONS

**Ömer Faruk GÖKCEPINAR**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI  
Second Advisor: Prof. Dr. Murat DİLMEÇ**

**2023, 77 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI  
Prof. Dr. Haydar LİVATYALI  
Asst. Prof. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ**

The use of titanium alloys, which stand out with their superior properties such as high strength, thermal stability, and corrosion resistance, has become widespread in industrial applications in the last two decades. Ti-6Al-4V draws attention as the most widely used type among titanium alloys. Ti-6Al-4V alloy is used in critical applications such as gas turbines in the energy and aviation industries, and joint implants in the medical field. In this master's thesis, the forming limit curve (FLC) of Ti-6Al-4V alloy, which has limited formability at room temperature, was produced. Two different methods including the Nakajima and the hydraulic bulging tests were used in the process. Pulsating, which is known to increase formability, was also used during the hydraulic bulging tests. The FLC found by the hydraulic bulging test shifted upwards by 23.7% when pulsating was applied. In addition, it was observed that the FLC produced by the Nakajima test reached higher levels than the one from the hydraulic bulge test, and the reasons for this were investigated by running a case study. It has been seen that damage is delayed due to friction in the Nakajima test. Cylindrical parts were made by female-die hydroforming, in which friction is dominant, and strain distribution was measured on these parts. These strain measurements confirmed the Nakajima test FLC. Spherical domes were fabricated by hydraulic bulge method to verify the FLC determined by the hydraulic bulge test. This process was performed with both monotonous and pulsating loading. The measured strain distributions were examined, and the results confirmed the FLC obtained by the hydraulic bulge test. In addition, the strain distributions of the spherical dome produced with pulsating loading increased as in the FLC obtained with pulsating loading. Consequently, the Nakajima test FLC is usable in sheet metal forming processes with dominant friction effects, the FLCs developed by the hydraulic bulge tests are valid for hydroforming processes and pulsating forming provides a significant increase in formability.

**Keywords:** Hydraulic Bulge Test, Nakajima Test, Sheet Forming, Formability, Forming Limit Diagram, Forming Limit Curve, Ti-6Al-4V

## ÖNSÖZ

Yapılan bu tez çalışmasının, salınımlı yüklemeye ile şekillendirilebilirliğin artırılması ve Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliğinin araştırılması konularına katkı sağlamasını ümit ediyorum.

Yaptığım çalışmalar boyunca bana her yönden destek veren, akademik hayatımda yoluma rehberlik eden, gerekli disiplini ve çalışma ahlakını öğreten, sadece akademik alanda değil, hayatın her alanında bana örnek olan danışmanım Prof. Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI 'ya ve ikinci danışmanın Prof. Dr. Murat DİLMEÇ'e, bilimsel bakış açısı kazanmamda etkisi olan ve deneysel çalışmalar sırasında destek veren Dr. Öğr. Üyesi Mevlüt TÜRKÖZ'e, deneysel çalışmalarında katkı sağlayan Arş. Gör. Dr. Osman ÖZTÜRK'e ve Arş. Gör. Gürkan ATAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca bana her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan babam Abdullah GÖKCEPINAR'a, annem Züleyha GÖKCEPINAR'a, ablam H. Kübra GÖKCEPINAR'a ve kardeşim M. Erkam GÖKCEPINAR'a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte desteğini esirgemeyen nişanlım Zeliha'ya teşekkür etmek isterim.

Ayrıca tezim, ikinci danışmanım Prof. Dr. Murat DİLMEÇ yürütücülüğünde, Necmettin Erbakan Üniversitesi tarafından Bilimsel Araştırma Projesi olarak da desteklenmiş ve bir adet şişirme kalıbı temin edilmiştir. Bu nedenle Necmettin Erbakan Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamındaki şişirme kalıplarının imal ve revizyon işlemleri sırasında destek veren Yük. Mak. Müh. Dedecan EVCEN'e teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışması 219M489 numaralı 1001 projesinin bazı iş paketleri kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle TÜBİTAK kurumuna da teşekkürlerimi sunarım.

Ömer Faruk GÖKCEPINAR  
KONYA-2023

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
2.1. Ti-6Al-4V Alaşımli Saclar.....	3
2.2. Sac Metallerin Şekillendirilebilirliğini Belirlemede Kullanılan Testler.....	5
2.2.1. Benzetim testleri (Simulating test) .....	5
2.2.2. Sınır kubbe yüksekliği testi.....	6
2.2.3. Mekanik testler .....	7
2.2.4. Şekillendirme sınır diyagramları .....	7
2.3. Şekillendirme Sınır Eğrilerini Belirlemede Kullanılan Teorik Modeller .....	10
2.5. Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi.....	10
2.5.1. Deney numunelerinin gridlenmesi.....	11
2.5.2. Şekillendirme deneyleri .....	11
2.5.3. Gridlerin Ölçülmesi .....	13
2.6. Salınımlı Hidroşekillendirme Yöntemi.....	14
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>21</b>
3.1. Deney Düzeneginin Kurulması.....	21
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	21
3.3. Deneylerin Yapılması .....	22
3.3.1. Nakajima testiyle ŞSE'lerin elde edilmesi.....	23
3.3.2. Nakajima ile salınımlı yüklemenin uygulanabilirliğinin araştırılması .....	25
3.3.3. Elips kalıplarla ŞSE'nin belirlenmesi .....	26
3.4. ASAME Yazılımı ile Numunelerin BŞD Dağılımlarının Ölçülmesi.....	33
3.5. ISO 12004-2 Standardına Göre Sınır BŞD'lerin Hesaplanması .....	35
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>37</b>
4.1. Şekillendirme Sınır Diyagramları .....	37
4.2. ŞSE'lerin Karşılaştırılması .....	40
4.3. ŞSD Durum Çalışmaları .....	42
4.3.1. Dişi hidro-şekillendirme ile silindirik kap imalatı .....	43
4.3.2. Şişirme ile küresel kubbe imalatı.....	48
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>51</b>
5.1. Sonuçlar .....	51
5.2. Öneriler .....	52

<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>56</b>
EK-1 Nakajima Testi ile Değişken Yükleme Durumunda Yapılan Deneyler .....	56
EK-2 Tasarlanan Elips Kalıpların İmalat Resimleri .....	58
EK-3 BŞD <sub>0</sub> Noktasını Belirlemek İçin Yapılan Çalışmalar .....	61
EK-4 Gridleme İşleminin Malzemenin Şekillenebilirliğine Etkisi.....	68





## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$r_s$	:	(mm)	Stampa çapı
$e$	:	-	Mühendislik birim şekil değişimi
$F$	:	(N)	Kuvvet
$t$	:	(mm)	Sac kalınlığı
$\varepsilon_1$	:	-	Gerçek majör birim şekil değişimi
$\varepsilon_2$	:	-	Gerçek minör birim şekil değişimi
$^{\circ}\text{C}$	:	(Santigrat)	Sıcaklık birimi
$\emptyset$	:	(mm)	Çap

### Kısaltmalar

LDH	:	Sınır kubbe yüksekliği
BŞD	:	Birim şekil değişimi
EMF	:	Elektromanyetik şekillendirme
SEY	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
M-K	:	Marciniak Kuczynski modeli
EI	:	Erichsen indeksi
ŞSE	:	Şekillendirme sınır eğrisi
ŞSD	:	Şekillendirme sınır diyagramı
THŞ	:	Tüp hidroşekillendirme
HNC	:	Hidrolik nümerik kontrol

## 1. GİRİŞ

Günümüzde sac metallerin kullanım alanı oldukça yaygındır. Sac metal teknikleriyle üretilen otomobil ve uçak parçaları, ofis mobilyaları, oyuncaklar, bilgisayar parçaları gibi endüstriyel ve tüketici ürünlerinde çoğunlukla kullanılmaktadır. Sac metal işleminde kalıp tasarımı ve imalatı önemlidir. Kalıplar istenilen geometriye göre imal edilerek sac şekillendirme işlemine başlanır. Kalıp imalatı oldukça zahmetli ve pahalı olduğundan dolayı kalıp tasarımının en optimum şekilde yapılması gerekmektedir. Bu durum da sac metal kalıp imalatının önemini artırmıştır. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle bu şekillendirme prosesleri bilgisayar ortamında simüle edilebilmektedir. Ancak bu bilgisayar programlarına sac metalin ne kadar şekillendirilebileceği bilgisinin verilmesi gerekmektedir. Malzemelerin şekillenme sınırı ile ilgili birçok deney mevcuttur. Bunlardan çoğu sac malzemelerin belirli özelliklerini karşılaştırmak ve bazı şekillendirilme durumlarını ortaya koymak için yapılmaktadır. Ancak sac malzemelerin tüm gerilme durumlarındaki şekillenme sınırını göstermemektedir. Bu durumda sac malzemelerin şekillenme sırasında hangi sınırlara kadar şekil değiştireceği bilgisini veren şekillendirme sınır diyagramları (ŞSD) etkin olarak kullanılmaktadır.

Sac metallerin birçok çeşidi mevcuttur. Malzeme seçimi istenilen özellikler ve tasarım amacına göre yapılır. Son yıllarda havacılık ve sağlık sektöründeki gelişmeler ile birlikte sac metallerin kullanımı artırmakta aynı zamanda kullanım alanlarına göre sac metallerden farklı özellikler beklenmektedir. Örneğin havacılık sektöründe kullanılan jet motorları ve gövde elemanlarında yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygunluk gerekmektedir. Bu özellikleri sağlayan malzeme olarak Ti-6Al-4V alaşımı sıklıkla tercih edilmekte ve gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Ancak oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğinin düşük olması, bu alaşımın kullanımını zorlaştırmaktadır. Şekillendirilebilirliği artırmak için farklı yöntemler mevcuttur. Ancak sıcak şekillendirme, malzeme kalınlığını artırma ve ısıl işlem gibi uygulamalar malzemelerin özelliklerini etkilemekte, maliyeti artırmakta aynı zamanda üretim zorluğunu kayda değer miktarda artırmaktadır. Bundan dolayı son zamanlarda değişken yükleme ile şekillendirilebilirliğin artırılması konusu üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntem ile maliyet ve malzeme özellikleri değişmeden sadece yükleme durumu değiştirilerek şekillendirme artırılabilir. Bu sebeplerden dolayı literatüre ve

endüstriye katkı sağlanacağı düşünülerek bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmış ve değişken yükleme durumu için şekillendirilebilirliği araştırılmıştır.

Çalışmanın 2. Bölümünde bu çalışmada kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir. Sac metallerin şekillendirilebilirliğini belirlemede kullanılan deneyler anlatılmıştır. Şekillendirme sınır eğrilerinin (ŞSE) deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan aşamalar olan malzemelerin standartlara göre hazırlanması ardından birim şekil değişimlerinin (BŞD) ölçülebilmesi için malzeme yüzeylerine oluşturulan gridler ve bu gridlerin ölçülmesinde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Son dönemde şekillendirilebilirliği artırdığı bilinen değişken yükleme durumu ile ilgili çalışmalar anlatılmıştır.

Çalışmanın 3. Bölümünde ŞSE'yi belirlemek için kullanılacak olan deney düzeneği ve bu düzeneğin kurulmasından bahsedilmiş, deney numunelerinin hazırlanarak deneylerin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. ŞSE'ler iki farklı yöntemle oluşturulmuştur. Bunlar Nakajima testi ve hidrolik şişirme deneyidir. Bu yöntemler kullanılarak yapılan deneyler sonucunda şekillenmiş numuneler üzerinden ASAME yazılımı ile BŞD değerlerinin ölçülmesi ve ardından ISO 12004-2 standardına göre sınır BŞD'lerin belirlenmesi açıklamıştır.

Çalışmanın 4. Bölümünde belirlenen sınır BŞD değerlerinin bir diyagram üzerinde aktarılması ile ŞSD'lerin oluşturulması ve oluşturulan bu ŞSD'ler için yapılan durum çalışmaları anlatılmıştır.

Çalışmanın 5. Bölümünde ise bu tez çalışması neticesinde ortaya koyulan sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan Ti-6Al-4V alaşımlı saclar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra sac metallerin şekillendirilebilirliğini belirlemek için kullanılan deneyler üzerinde durulmuş ve çalışmanın konusu olan ŞSE'nin teorik ve deneysel olarak nasıl belirlendiği araştırılmıştır. ŞSE'nin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan aşamalar açıklanmıştır. ŞSE'nin etkilendiği parametreler izah edilmiştir. Hidroşekillendirme yöntemi ve bu yöntemin avantajları belirtilmiştir. Salınlı hidroşekillendirme yönteminin malzemelerin şekillendirilebilirliğine etkisi ve ŞSE'nin salınlı yüklemeye ile elde edilmesi konusundaki araştırmalara yer verilmiştir.

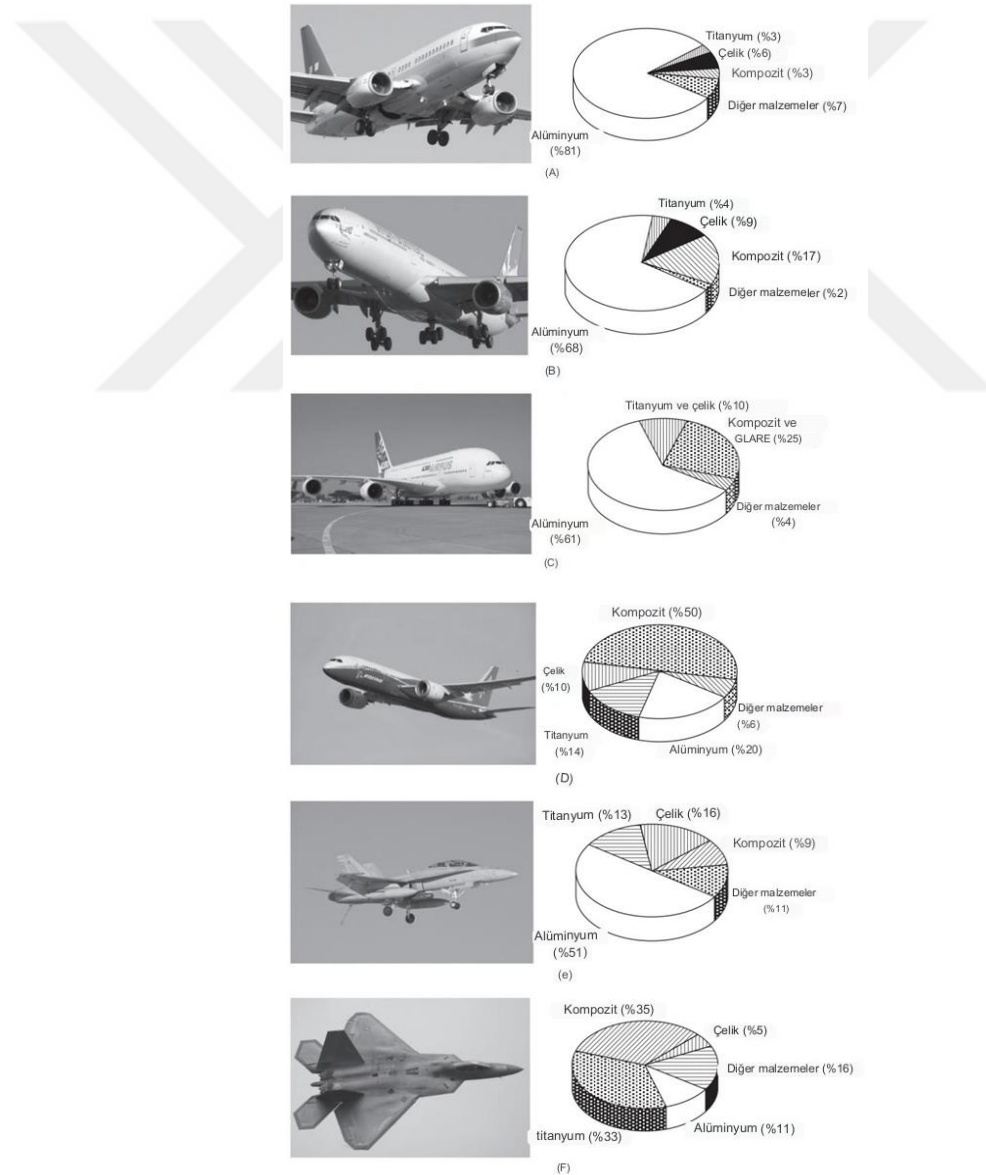
### 2.1. Ti-6Al-4V Alaşımlı Saclar

Titanyum alaşımlar yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet özellikleri göstermesi sebebiyle özellikle havacılık sektöründe tercih edilmektedir. Ti-6Al-4V alaşımı havacılık endüstrisi, kimya, otomotiv sanayi, spor ve tıp aletleri sanayisinde önemli kullanım alanlarına sahiptir. Titanyumun bu sektörlerde kullanılmasının sebebi yüksek korozyon direnci, yüksek kimyasal direnç, düşük yoğunluk ve üstün termal kararlılık özellikleridir. Bu özellikleri nedeniyle Ti-6Al-4V alaşımı, toplam titanyum üretiminin % 60'ını oluşturmaktadır (Dhal ve ark., 2021).

Titanyum havacılıkta ilk olarak 1950'lerde askeri ve ticari uçaklarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu ihtiyaç, Mach hızı 2'yi aşan süpersonik uçakların tasarlanması sırasında ortaya çıkmıştır. Bu uçakların gövdeleri, ses hızını aşmaları durumunda sürtünmenin getirdiği ısınma etkisi nedeniyle mukavemetini koruyamamaktadır. Geleneksel alüminyum alaşımları uçak hızı Mach 1.5'i aştığında mukavemetini kaybederken, titanyum ise Mach 4-5'e kadar özelliklerini korumaktadır. Bu duruma örnek olarak SR-71 Blackbird modeli keşif uçağı verilebilir. Bu uçak tamamen titanyum kaplama ile geliştirilmiştir. SR-71, Mach hızı 3'ü aşan maksimum hıza sahip bir yüksek irtifa keşif uçağıdır ve o zamanlar dünyanın en gelişmiş ve en hızlı uçaklarından birisidir.

Titanyum alaşımlarının farklı bileşimde türleri kullanılsa da en yaygın olanı uçak yapılarında ve motorlarında kullanılan Ti-6Al-4V alaşımıdır. Daha pahalı ve ağır olmasına rağmen, titanyumun yapısal özellikleri diğer alaşımlardan daha iyidir. Titanyum genellikle en az yer kaplaması istenen ve yüksek kuvvetlere maruz kalan iniş takımları,

kanat gövde bağlantıları gibi alanlarda kullanılır. Ticari ve sivil alanlarda kullanılan uçaklarda titanyumun oranı %10'un altındadır. Daha modern olan Boeing 787 ve Airbus A350 gibi uçaklarda biraz daha yüksek miktarlarda kullanılır. Ancak savaş uçaklarında maliyetin daha az kritik olması ve daha yüksek mukavemet gerektiğinden titanyum daha fazla kullanılır (Şekil 2.1). Titanyum F-15 ve F-16 uçaklarının yaklaşık % 25'ini, F-35 uçağının yaklaşık %35'ini oluşturur. Ayrıca modern jet motorlarının ağırlığının %25-30'u titanyum alaşımından oluşmaktadır. Bunun sebebi jet motorlarında 400-500 °C sıcaklıklarda çalışması gereken parçalar bulunmasıdır. Fan kanatları, düşük basınçlı kompresör parçaları, egzoz bölümündeki nozul tertibatları jet motorlarında titanyum ile üretilen parçalar arasında gösterilebilir (Mouritz, 2012).



**Şekil 2.1.** Sivil ve askeri uçakların gövdelerinde kullanılan yapısal malzemeler (a) Boeing 737, (b) Airbus 340-330, (c) Airbus A380, (d) Boeing 787, (e) F-18 Hornet (C/D), (f) F-22 Raptor (Mouritz, 2012)

## 2.2. Sac Metallerin Şekillendirilebilirliğini Belirlemede Kullanılan Testler

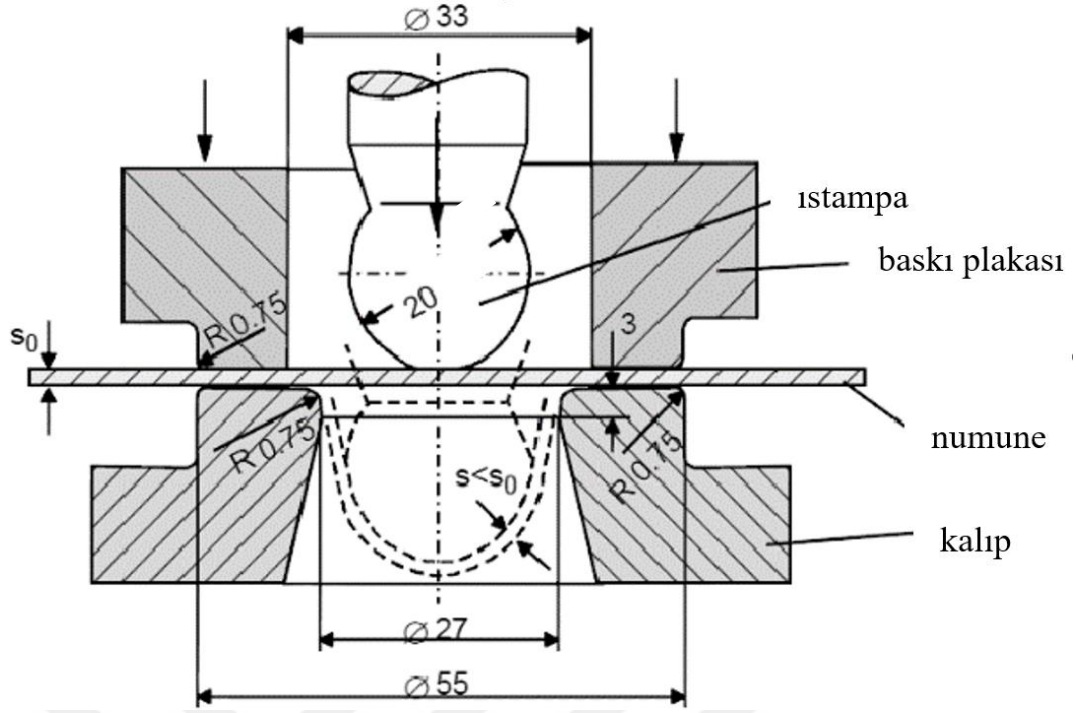
Sac metaller endüstrinin farklı alanlarında sıklıkla kullanılmakta ve kullanım alanlarına göre farklı şekillendirme işlemleri uygulanarak istenilen özellik ve geometrilere üretilmektedir. Sac metaller şekillendirilirken eğme, derin çekme, gerdirme, bükme gibi işlemler kullanılabilir. Şekillendirme işlemleri bunlardan birisi olabildiği gibi bu işlemlerin kombinasyonu şeklinde de uygulanabilmektedir.

Şekillendirilebilirlik, sac malzemelerin şekillendirilme sırasında hasara uğramadan önce deformasyona uğrayabileceği sınırı tanımlar (Altan ve Tekkaya, 2012). Şekillendirme işleminin başarılı olabilmesi için kullanılan malzemede işlem sonunda yırtılma, buruşma, boyunlaşma olmamalı, üretilen malzemenin yüzeyi pürüzsüz olmalıdır.

Sac malzemeler farklı sınırlarda şekillenmektedir. Bu şekillenme sınırlarını ortaya koyabilmek ve karşılaştırmak için farklı testler geliştirilmiştir. Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini belirlemek için kullanılan testler benzetim testleri, sınır kubbe yüksekliği testi (LDH), mekanik testler ve şekillendirme sınır eğrisinin belirlendiği testler olarak sınıflandırılabilir. Bu test yöntemleri aşağıda detaylıca açıklanmıştır.

### 2.2.1. Benzetim testleri (Simulating test)

Benzetim deneyleri, bir malzemenin şekillendirilebilirlik ölçüsünü belirlemekten ziyade farklı malzemelerin birbirlerine göre şekillendirilmelerini kıyaslamak için kullanılır. Örneğin Erichsen deneyinde sac malzeme kalıplar arasında kilitlenerek gerdirme işlemi uygulanır. Hasar oluşuncaya kadar şekillendirilmiş numuneden ölçülen maksimum yükseklik Erichsen indeksi (EI) olarak tanımlanır. Erichsen deney düzeneği Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

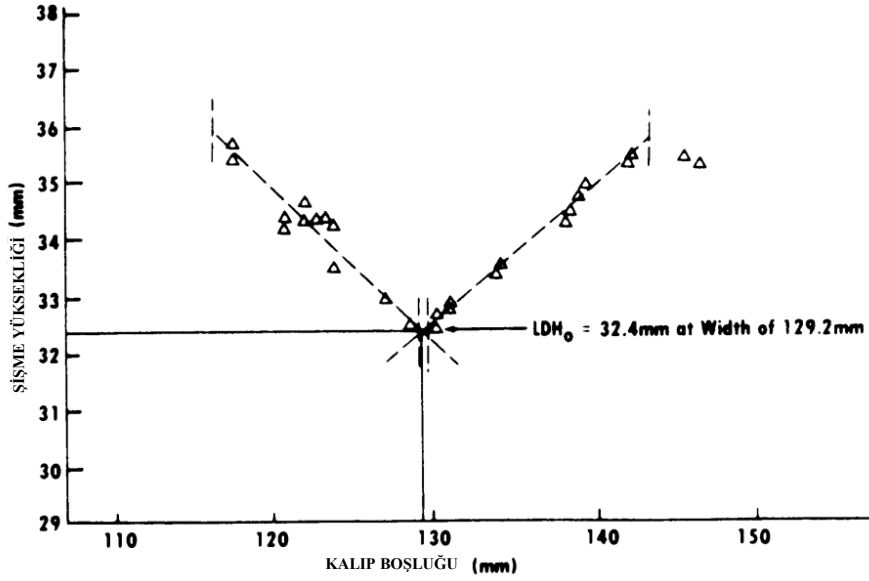


Şekil 2.2. Erichsen deney düzeneği (Eliaser, T., 2018)

Derin çekme deneyleri ve birleştirilmiş derin çekme deneyleri ise sac malzemelerde kullanılan şekillendirme işlemlerine daha gerçek birim şekillendirme kombinasyonları oluşturmaktadır. Eğme deneyi ise malzemenin hangi değerlere kadar eğilebileceğini tespit etmek amacıyla oluşturulmuştur. Gerdirerek eğme deneyi, sadece eğmeye maruz kalan işlemlerde yeterli olmadığı için hem eğilme hem de gerdirme altında malzemelerin ne kadar şekillenebileceğini belirlemek için kullanılmaktadır.

### 2.2.2. Sınır kubbe yüksekliği testi

Sınır kubbe yüksekliği testi ilk olarak Ghosh tarafından 1975 yılında önerilmiştir. Amacı şekillendirilebilirliği daha kısa bir yoldan elde etmektir. Bu deney yönteminde numuneler farklı genişlikte olacak şekilde hazırlanır. Şekillendirme işlemi 100 mm çapında stampa ile gerçekleştirilir. Numuneler daire şeklindeki süzdürme çubukları ile kaymayacak şekilde sabitlenir ve hasar oluşuncaya kadar şekillendirme devam eder. En küçük şişme yüksekliği (limit dome height)  $LDH_0$  olarak adlandırılır ve şekillendirilebilirliği değerlendirmek için en kritik nokta olarak değerlendirilir. Bu değer önemlidir çünkü yırtılma hasarlarının çoğu  $\pm\%2$  minör BŞD içerisinde meydana gelir. Tipik bir sınır kubbe yüksekliği grafiği Şekil 2.3'te gösterilmiştir (Meuleman ve ark, 1985).



Şekil 2.3. Tipik bir sınır kubbe yüksekliği deney sonucu (Meuleman ve ark, 1985)

### 2.2.3. Mekanik testler

Mekanik testler, benzetim testlerine göre daha genelleştirilebilir durumları ortaya koymaktadır. Malzeme şekillendirilebilirliğinde anizotropi katsayısı ve pekleşme üssü parametreleri etkili olmaktadır. Çekme testi ile bu parametreler ve malzemelerin diğer mekanik özellikleri belirlenebilmektedir. Dolayısıyla malzemeler hakkında daha detaylı bilgiler edinilmektedir.

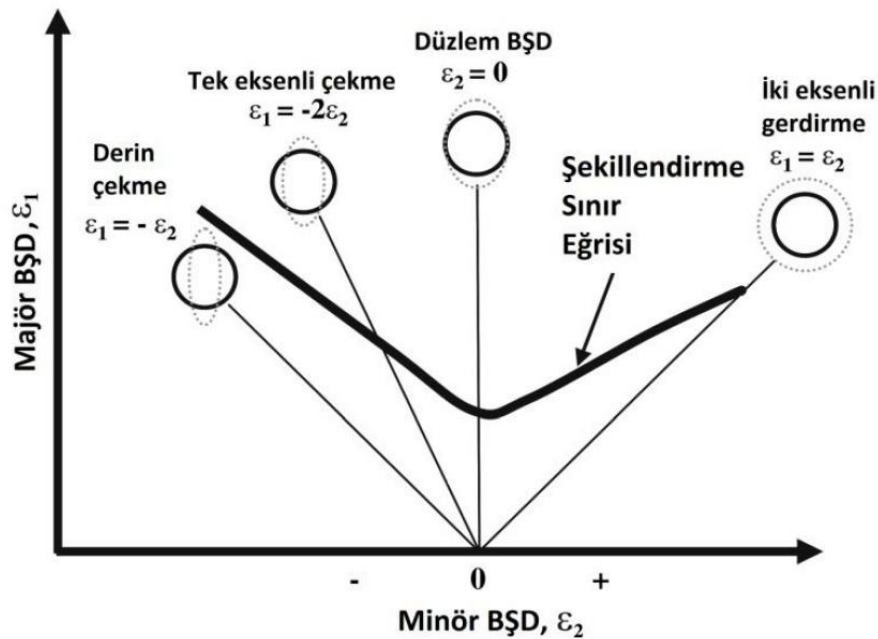
### 2.2.4. Şekillendirme sınır diyagramları

Bir önceki başlıkta açıklanan benzetim testleri, sınır kubbe yüksekliği testi ve mekanik testler şekillendirilebilirlik hakkında yeterli bilgi verememektedir. Bunun nedeni, benzetim testlerinde gerçek şekillendirme proseslerinin tam olarak temsil edilememesi, deney esnasında oluşan şartların, malzeme geometrisinin yağlama durumunun deney sonuçlarını fazla etkilemesidir. Ayrıca elde edilen şekillendirme kriterleri sadece belirli bir şekillendirme işlemine uygulanabilmekte ve genelleştirilememektedir. Yani bu testler malzemelerin şekillendirilebilirliğini kıyaslamak için kullanılır.

Şekillendirme sınır diyagramları ise, bir sac metalin gerçek şekillendirme proseslerinde karşılaşılabileceği tüm birim şekil değiştirme olasılıklarını içeren ve malzemenin şekillendirilebilirlik sınırını ortaya koyan etkili bir araçtır. Şekillendirme sınır eğrisi ise bu diyagramdaki hasarın oluştuğu yerleri gösteren eğri olarak



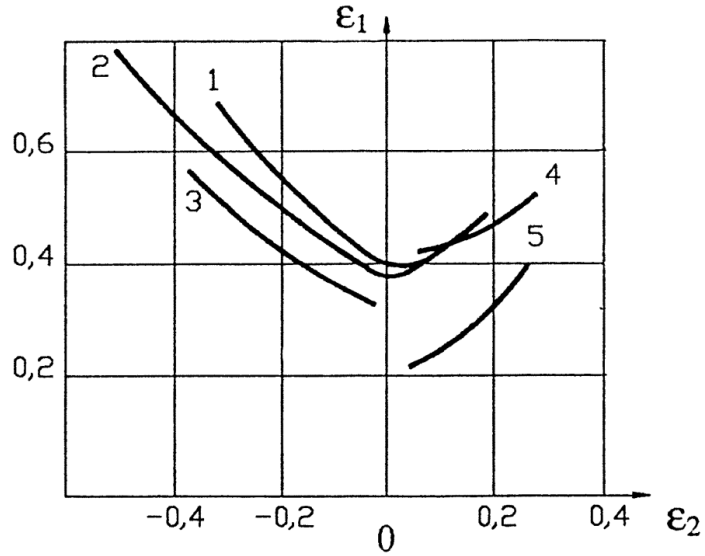
tamamlanabilir. ŞSE, yüzeyi farklı geometrilerle gridlenen numunenin boyun verdiği veya hasara uğradığı duruma kadar şekillendirilmesi sonucu gridlerdeki minör ( $\varepsilon_2$ ) ve majör ( $\varepsilon_1$ ) BŞD kombinasyonlarının diyagrama aktarılması ile elde edilir. ŞSE tek eksenli çekme, düzlem BŞD ve iki eksenli gerdirme durumlarını içermektedir. Minör BŞD değerinin 0 olduğu durum ( $\varepsilon_2=0$ ) düzlem BŞD olarak ifade edilmektedir ve ŞSE<sub>0</sub> ile gösterilmektedir. Sac şekillendirme işlemleri esnasında hasar bölgesi çoğunlukla ŞSE<sub>0</sub> noktasında oluşmaktadır (Marciniak ve ark., 2002). Genel bir ŞSD ve oluşan BŞD kombinasyonları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Şekillendirme sınır diyagramı ve oluşan BŞD kombinasyonları (Lamberts, 2005)

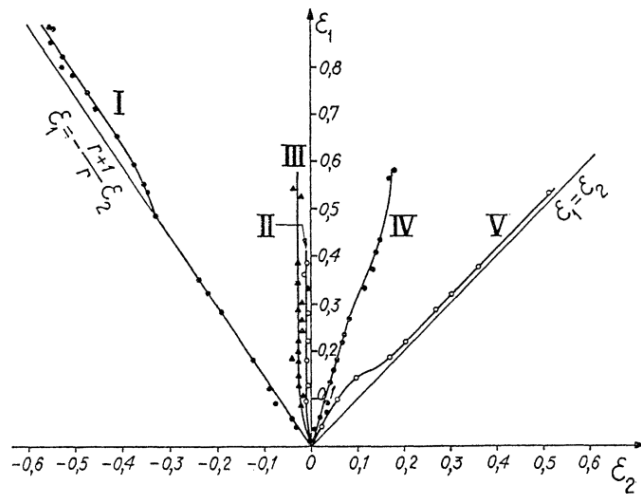
ŞSE, sadece malzemelerdeki şekillenebilirlik sınırını göstermekle kalmaz aynı zamanda üretilcek endüstriyel ürünlerin kalıplarının tasarlanmasında ve ürünlerin hasar oluşmayacak şekilde başarılı bir şekilde üretilmesine de olanak sağlar (Stoughton ve Zhu, 2004).

ŞSE'leri belirlemek için kullanılan farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Sürtünme etkilerini ortadan kaldırmak için Marciniak testi ve hidrolik şişirme deneyi kullanılır. Basit bir yöntem isteniyorsa tek eksenli çekme testi ve çok çeşitli gerilme durumlarını elde etmek için ise Nakajima testi kullanılabilir. Yapılan bir çalışmada farklı yöntemlerle elde edilmiş çeşitli ŞSE'ler gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** Farklı test metodları kullanılarak elde edilen ŞSE'ler; 1. Hasek, 2. Nakajima testi, 3. Tek eksenli çekme testi, 4. Keeler, 5. Hidrolik şişirme deneyi (Hasek, 1978)

Basit şekillendirme işlemlerinde oransal BŞD ( $\beta = \varepsilon_1/\varepsilon_2$ ) lineerdir. ŞSD'lerin diğer sac metal şekillendirme deneylerine göre farkı ve en büyük zaafı BŞD yolunun lineer olmamasıdır. Sıfır BŞD'den yırtılmanın oluştuğu BŞD'ye kadar minör ve majör BŞD'nin aralarındaki oran her zaman sabittir. Ancak karmaşık şekillendirme işlemlerinde minör ve majör BŞD oranları deformasyon boyunca değişir. Şekil 2.6'da farklı testler uygulanarak elde edilmiş BŞD yolları görülmektedir.



**Şekil 2.6.** Farklı testlerle elde edilmiş BŞD yolları; 1.ISO 50, 2.TPE 1, 3. Swift 50, 4.Hidrolik şişirme testi (Grumbach, 1972)

### 2.3. Şekillendirme Sınır Eğrilerini Belirlemede Kullanılan Teorik Modeller

ŞSE'leri deneysel olarak oluşturmak, özel ekipmanlar isteyen, tecrübe gerektiren ve uzun zaman gerektiren bir yöntem olduğundan, sac metallerde BŞD sınırını hesaplayarak ŞSE'lerin oluşturulması üzerine çeşitli teorik çalışmalar yapılmış ve sonuçta birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Bu teorik modellerin ilk örnekleri Hill ve Swift'in ortaya koyduğu (Hill, 1952) lokal boyunlaşma ve yayılmış boyunlaşma modelleridir. Daha sonra Marciniak ve Kuczynski (1967) sac metalin homojen olmayacağını dikkate alarak teorik bir model geliştirmişlerdir. Sonraki yıllarda bu modeller temel alınarak birçok çalışma yapılmıştır (Paraiyanu ve ark 2005). Sünek kırılma kriteri ise malzemenin hasara uğradığı duruma kadar depoladığı enerjiyi hesap eden bir ŞSE belirleme yöntemidir. Genel olarak ŞSE belirlemede kullanılan teorik modeller şu şekilde sıralanabilir:

- Hill bölgesel boyunlaşma modeli
- Swift yayılmış boyunlaşma modeli
- Marciniak ve Kuczynski modeli
- Malzemedeki boşluğa dayalı modeller
- Stören-Rice modeli
- Sünek kırılma kriteri
- Gotoh modeli

ŞSE'lerin teorik olarak belirlenmesine yönelik bu çalışmalar tüm malzemeler için uygulanamamaktadır. Aynı zamanda teorik modeller, ileri düzeyde matematik ve mekanik bilgisi de gerektirmektedir. Teorik modellerin çoğu ŞSD'nin belirli bir bölgesini tahmin etmek için geliştirilmiştir.

ŞSD'ler malzemelerin homojensizliği, yöne bağlı özelliklerinin değişmesi, tane boyutları ve pekleşme gibi birçok farklı parametreden etkilenmektedir. Bunun sonucunda teorik modeller ŞSD'leri yeterli hassasiyette tahmin edememektedir. ŞSD'lerin deneysel olarak belirlenmesi ve teorik modellerin doğrulanması önem arz etmektedir.

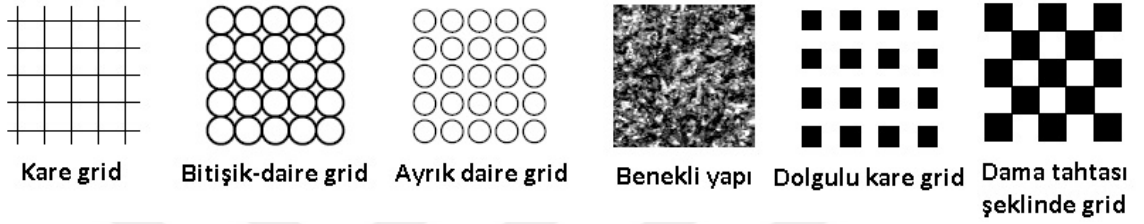
### 2.5 Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

ŞSE belirlenirken farklı genişlikteki numunelerin üzerine farklı geometrilerde gridler oluşturularak şekillendirme sonrasında hasar bölgelerinin hangi BŞD değerlerinde

olduğu belirlenir. Bu sınır BŞD değerleri bir diyagram üzerine aktarılarak ŞSE oluşturulmuş olur.

### 2.5.1. Deney numunelerinin gridlenmesi

Numunelerin sınır BŞD'lerinin ölçülebilmesi için numunelerin üzerlerine şekillendirilmeden önce farklı geometrilere gridler oluşturulur. Bu yöntem ilk olarak Keeler tarafından önerilmiştir (Keeler, 1968). Numune yüzeylerine Şekil 2.7'de görülen gridler oluşturulabilir.



Şekil 2.6. Grid analizi için yaygın olarak kullanılan grid şablonları (ASAME Reference Manual)

Bu gridlerin boyutları 1.25-6 mm aralığında olabilmektedir. Ancak çok küçük boyutlu gridler ile ölçüm yapıldığı zaman ölçmedeki veya gride olabilecek bir kusur BŞD sınırlarını büyük oranda etkileyecektir. Büyük gridler ise hasar bölgesindeki hassasiyeti azaltarak yeterli ölçüm doğruluğunu sağlayamayacaktır (Smith ve Lee, 1997).

Malzeme yüzeylerine gridleme işlemlerinin birkaç farklı yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler ipek baskı, fotokimyasal gridleme, lazer ile gridleme, elektrokimyasal dağlama olarak belirtilebilir.

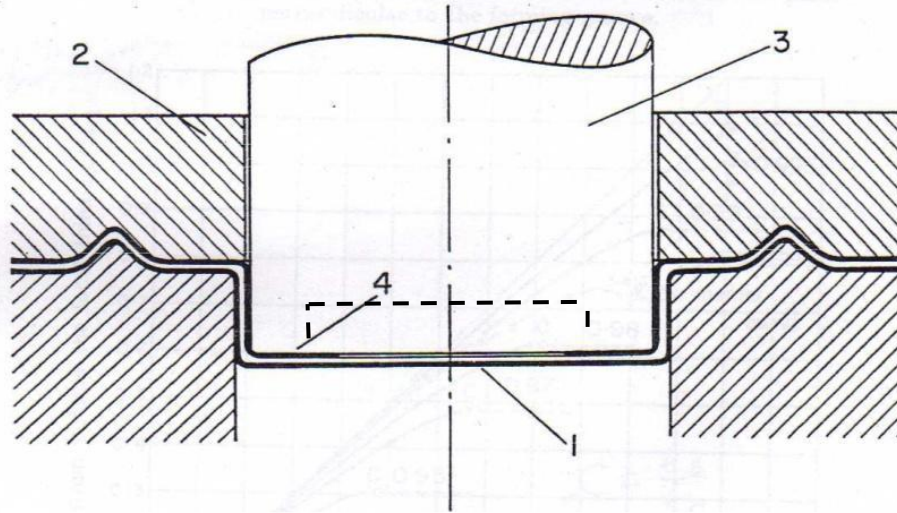
Gridleme işleminin hangi yöntem ile yapılacağı seçilirken gridlerin boyutlarının hassas bir şekilde yüzeye işlenmesine, malzemedeki çentik etkisi oluşturmaması, yağlama işleminden etkilenmemesi, şekillenme esnasında malzeme yüzeyinden ayrılmaması gibi özelliklerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu etkiler göz önüne alındığında en uygun yöntemin ipek baskı olduğu belirlenmiştir (Öztürk ve ark., 2009).

### 2.5.2. Şekillendirme deneyleri

ŞSE'lerin belirlenebilmesi için deney numunelerinin farklı BŞD kombinasyonlarını oluşturacak şekilde şekillendirilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı ŞSE'leri belirlemek için farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde ŞSE'yi elde etmek için düzlem dışı ve düzlem şekillendirme deneyleri tercih edilmektedir.

### 2.5.2.1. Düzlem şekillendirme deneyleri

Düzlem şekillendirme deneylerinde numuneler düz tabanlı ve ortası boşluklu bir stampa ile gerdirerek hasar oluşuncaya kadar şekillendirilmektedir. Bu deneyler Marciniak ve Kuczynski tarafından önerilmiştir (Marciniak ve Kuczynski, 1967). Marciniak deneyi şematik olarak Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bu deneylerde stampanın ortasının boş olması ve düz tabanlı olması, sürtünmenin ve eğilmenin etkisini en aza indirmektedir. Marciniak deneyi bazı avantajlara sahip olmasının yanı sıra eğrilik ve sürtünme etkilerini içermediği için BŞD değerleri, gerçek şekillendirme işlemlerinden uzaklaşmaktadır. Bundan dolayı ŞSE’nin belirlenmesinde aşağıda anlatılacak olan Nakajima testi daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

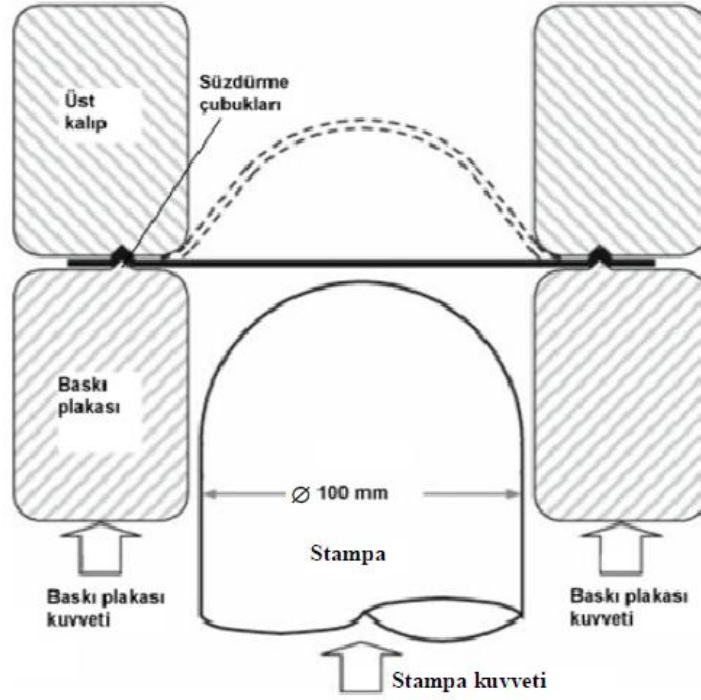


Şekil 2.8. Marciniak düzlem şekillendirme deneyi (Marciniak ve Kuczynski, 1967)

### 2.5.2.2. Düzlem dışı şekillendirme deneyleri

Bu deneylerde numune farklı geometrilerdeki stampa ile şekillendirilmektedir. Düzlem dışı şekillendirme deneyleri ilk defa Keeler ve Backofen tarafından 1963 yılında önerilmiştir (Keeler ve Backofen, 1963). Bu yöntemde deney numunesi hareketli tabla ile kilitlenerek küresel stampa ile hasara uğratılmaktadır ve ŞSE’nin sağ tarafı elde edilebilmektedir.

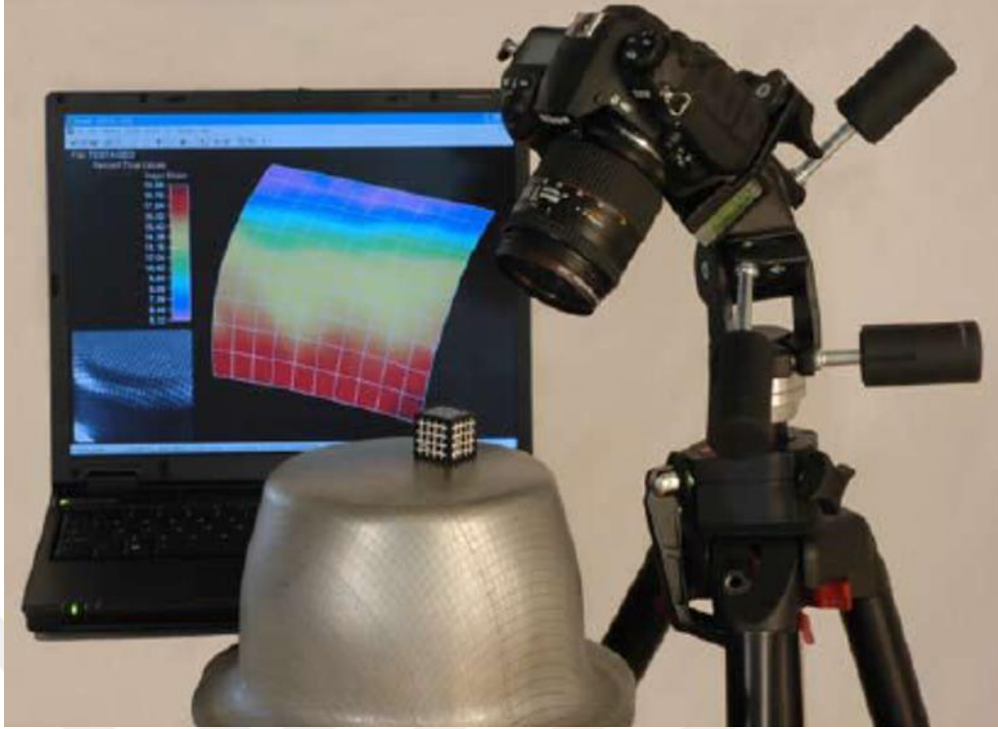
Düzlem dışı şekillendirme deneylerinden bir diğeri ise Nakajima testidir. Bu test farklı genişlikteki numunelerin 100 mm çaplı yarı küresel stampa ile şekillendirilmesini içermektedir. Bu yöntemde ŞSE’nin tüm bölgeleri elde edilebilmektedir. Nakajima deney düzeneği Şekil 2.9’da şematik olarak gösterilmiştir (Emilie ve ark., 2008).



Şekil 2.9. Nakajima test düzeneği (Emilie ve ark., 2008)

### 2.5.3. Gridlerin Ölçülmesi

Numuneler şekillendirildikten sonra sınır BŞD değerlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi gereklidir. Gridler ölçülürken yırtılma veya boyunlaşmanın başladığı bölgeden BŞD değerleri belirlenir. Gridler temelde iki yöntemle ölçülebilmektedir. Bunlar manuel ve otomatik ölçümdür. Manuel ölçüm için skalalı mikroskop, büyüteç ve Mylar şeridi kullanılmaktadır. Otomatik ölçümlerde ise görüntü işleme yöntemi ile ölçme yapılmaktadır (Uysal, 2011). Manuel ölçümlerin hassasiyetinin az oluşu, tecrübe gerektirmesi ve zahmetli oluşu nedeniyle otomatik ölçümler daha fazla tercih edilmektedir. Gridlerin fotoğraflarının çekilerek görüntü işleme ile BŞD değerlerinin ölçülmesi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



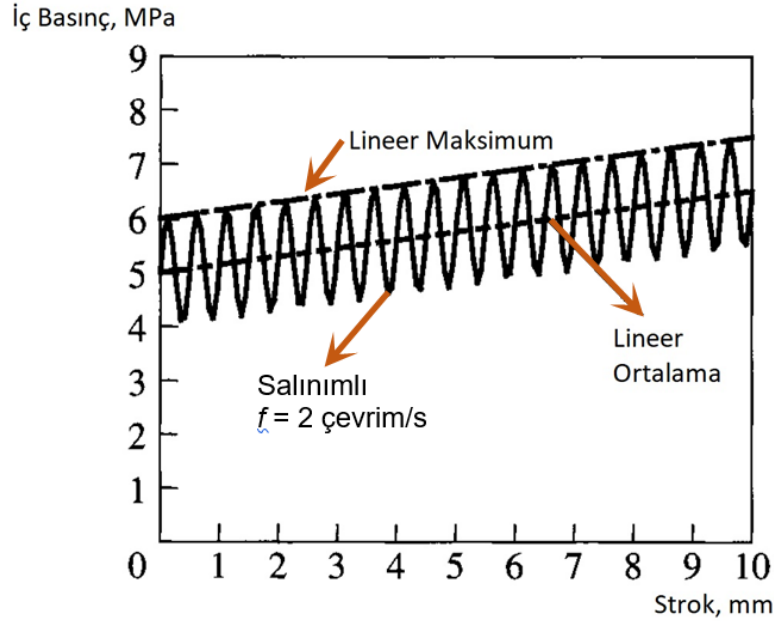
Şekil 2.10. Gridlerin görüntü işleme ile ölçülmesi (Uysal, 2011)

## 2.6. Salınlı Hidroşekillendirme Yöntemi

Alternatif şekillendirme yöntemlerinden biri de son yıllarda çalışmaların arttığı salınlı yükleme ile şekillendirme prosesidir. Salınlı yükleme, şekillendirme işlemlerinde seçilen parametrelerin zamana göre monoton olarak artması yerine belirli bir genlik ve frekansta değişken şekilde uygulanmasına denir (Yang ve ark. 2011). Şekillenebilirliğe katkı sağlayacak bu işlem son yıllarda ortaya çıkmış olup literatürde konu ile ilgili sınırlı sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Literatürde salınlı yüklemenin, hidroşekillendirme, derin çekme ve dövme gibi imalat yöntemlerinde kullanıldığı tespit edilmiş olup çalışmalar daha çok salınlı-hidroşekillendirme üzerine yoğunlaşmaktadır. Salınlı hidroşekillendirme yönteminde sıvı basıncı, zamana bağlı olarak monoton artan yerine salınlı olarak verilmektedir. Basıncın salınlı uygulanmasının, şekillendirilebilirliği artırdığı ifade edilmektedir (Yang ve ark. 2011).

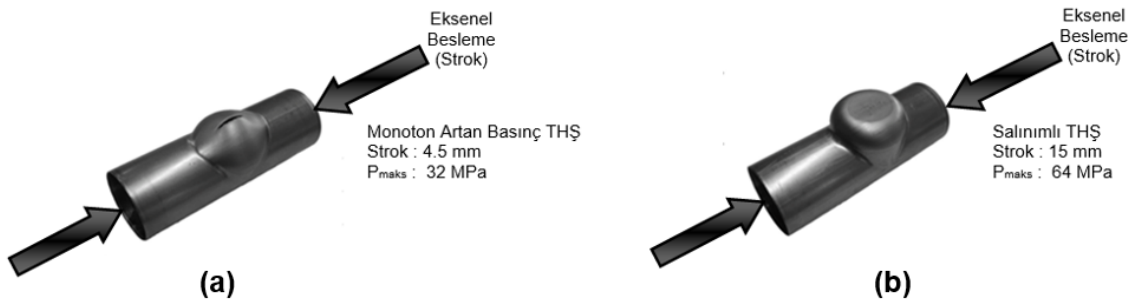
Tüp hidroşekillendirme (THŞ) yönteminde şekillendirilebilirlik sınırının artırılması için, uygulanan akışkan basıncın sabit bir şekilde değil, değişken yükleme ile uygulanması yöntemini ilk ortaya koyan Mori vd. (2003, 2004) olmuştur. Bu çalışmalarda THŞ'de iç basıncın Şekil 2.11'deki gibi monoton yerine değişken yükleme ile uygulanması sonucu malzemedeki oluşan hasarların engellendiği görüşmüştür. Ayrıca

salınlı basınç uygulamanın kalınlıktaki incelmeyi azalttığı böylece malzemenin şekillendirilebilirliğini iyileştirdiği bulunmuştur.



Şekil 2.11. Salınlı THŞ'de basınç profili (Mori, 2003)

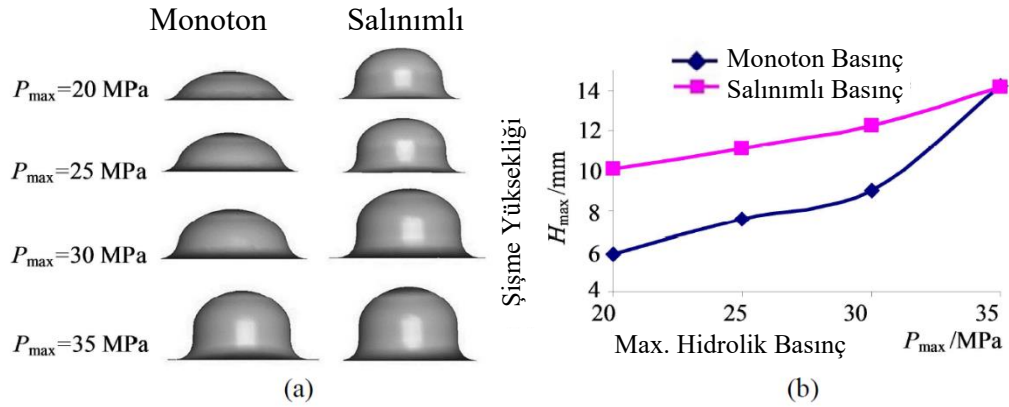
THŞ'de yapılan diğer bir çalışmada basınç sabit artan bir şekilde uygulanmış ve kalıp boşluğu istenilen şekli almadan Şekil 2.12a'da olduğu gibi hasara uğramıştır. Ancak basınç salınlı olarak uygulandığında ilk durumda yırtılan parça hasara uğramamış ve istenilen şekli alabilmiştir (Şekil 2.12b) (Loh-Mousavi, 2007).



Şekil 2.12. (a) Monoton yüklemeye tabi tutulan parçanın şekillendirilmesi, (b) Salınlı yüklemeye tabi tutulan parçanın şekillendirilmesi (Loh-Mousavi, 2007)

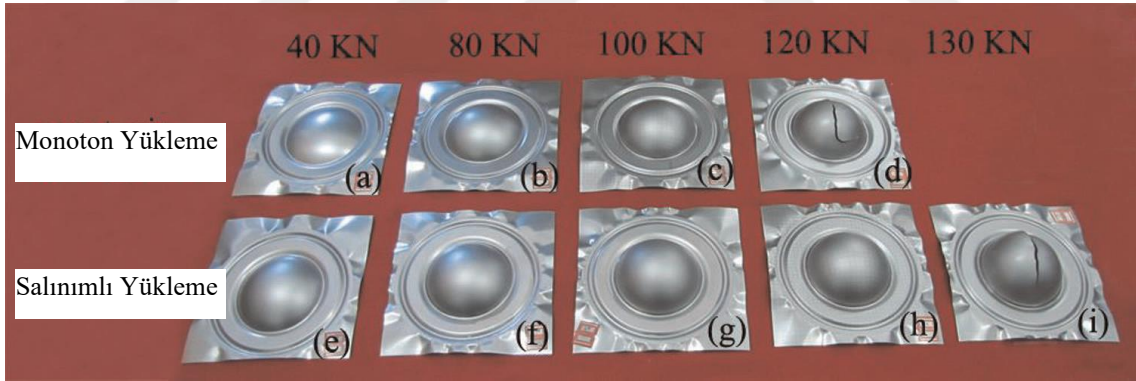
Yang vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada AZ31B Magnezyum Alaşımına sacın şekillendirilebilirliği salınlı hidrolik basınçla, önemli ölçüde geliştirmiştir. Salınlı hidro şekillendirme sırasında, hidrolik basıncın uygun bir titreşimli frekansı, en büyük maksimum şişme yüksekliğini  $H_{max}$  ve minimum duvar kalınlığını  $\delta_{min}$  oluşturabilir, böylece duvar kalınlığı ve şekillendirilebilir parça ile şekillendirilebilirlikte mükemmel bir homojenlik sağlar (Şekil 2.13).





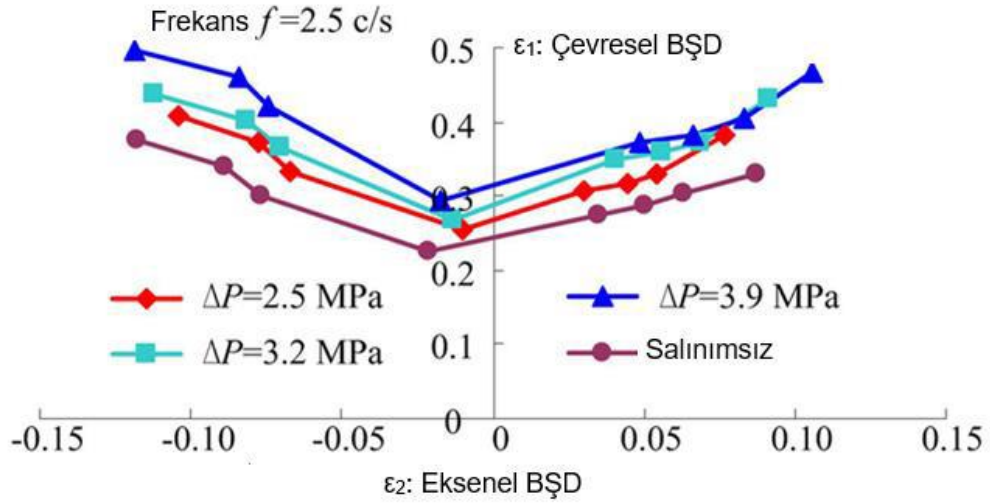
**Şekil 2.13.** İki yükleme yolu altında maksimum şişme yüksekliklerinin eğrileri: (a) oluşturulmuş parçaların karşılaştırılması; (b) maksimum şişme yüksekliği'nin varyasyon eğrisi (Yang, 2011)

Salınlı hidroşekillendirme ile östenitik paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirliğinin iyileştirilmesi çalışması da salınlı yükleme ile yapılan bir diğer deneysel değerlendirmedir (Yong vd. 2014). Bunun sonucunda büyük genlikli titreşimli yük uygulamak, aşırı lokal incelmeyi önlemek için daha homojen bir kalınlık dağılımı elde edilmiş ve daha iyi kalıp doldurma performansı ile daha homojen bir deformasyon elde edebilmesi olmuştur (Şekil 2.14).



**Şekil 2.14.** Farklı yükleme modları için hidrolik şişirme uygulanmış saclar (Yong vd. 2014)

Tüp hidroşekillendirmedeki salınım parametrelerinin SS304 malzemenin şekillendirilebilirliğine etkisini inceleyen Yang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise üç farklı genlik ve frekansın malzemenin Şekillendirme Sınır Eğrisine (ŞSE) etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.15'te farklı genlik ve frekanslara göre ŞSE seviyesi elde edilmiştir.

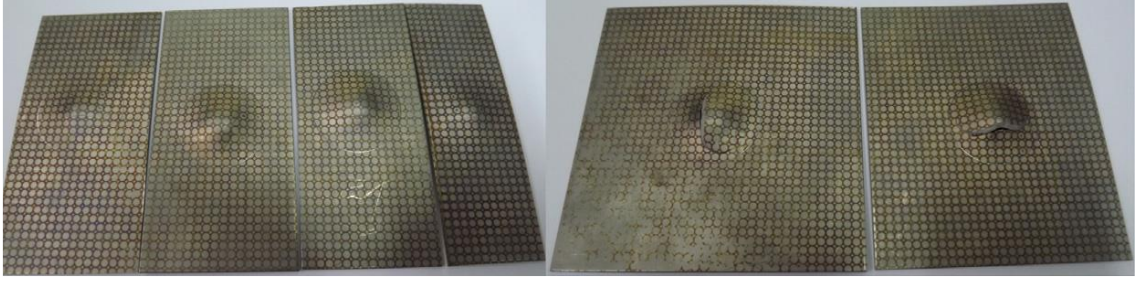


Şekil 2.15. THŞ’de farklı genlik ve frekans parametrelerinin ŞSE’ye etkisi (Yang vd., 2017)

Bronhead ve Grieve (1982) tarafından yapılan çalışmaya göre düşük karbonlu çelik için BŞD hızının ŞSE’ye etkisi incelenmiştir. BŞD hızları  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  ile  $70 \text{ s}^{-1}$  arasında incelenmiştir. Düşük hızda şekillendirme prosesi için ana eksen 102 mm daire ve küçük eksenleri 90 mm, 78.5 mm ve 64.5 mm olan eliptik kalıplar kullanılmıştır. Bu kalıplarla yağ basıncı altında hidrolik şişirme deneyleri yapılmıştır. Daha yüksek BŞD oranı elde etmek için, eliptik kalıplar ile birlikte sıvı darbesi ile şekillendirme tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte, sıvı çekici teçhizatı ile düşen ağırlıktan gelen enerji sıvı kolonu vasıtasıyla sac metale ileterek şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlar artan BŞD hızının ŞSE üzerinde genel bir düşüşe sebep olduğunu göstermiştir.

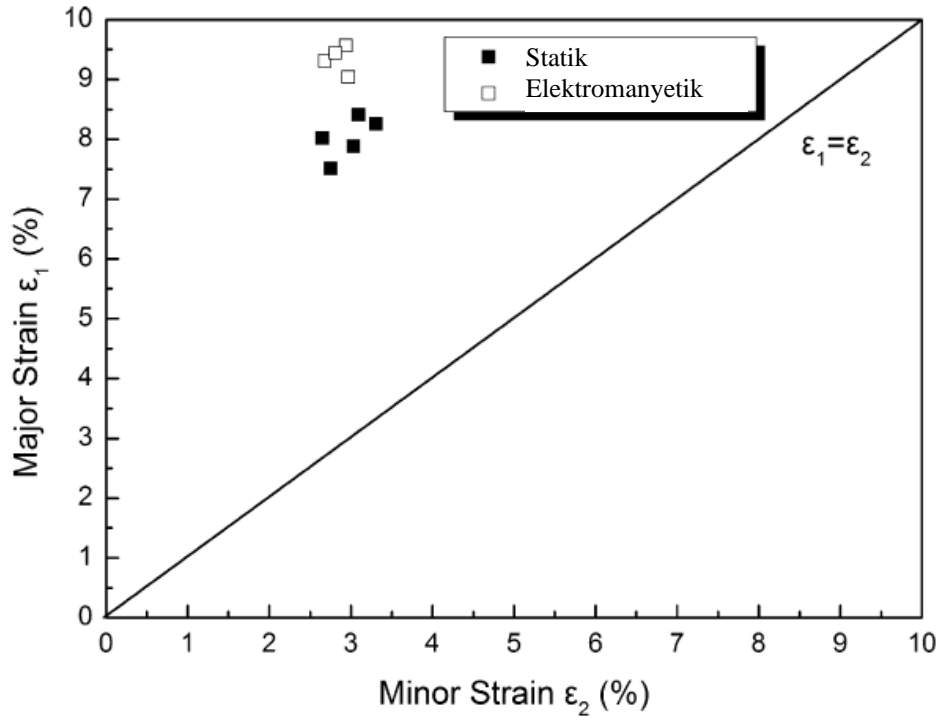
Salınlı şekillendirme ile ilgili yapılan diğer bir çalışmada ise Ti – 6Al – 4V titanyum (tavlanmış) alaşımlı levhanın yüksek hızlı şekillendirme işleminde şekillendirilebilirliğini araştırmak için, elektromanyetik şekillendirme (EMF) salınlı olarak gerçekleştirilmiştir. Salınlı elektromanyetik şekillendirme altında şekillendirilebilirlik, monoton durumdaki ile karşılaştırılmıştır. Şekillendirme sınırı Ti-6Al-4V için %24.37 artmıştır (Li vd. 2013).

Monoton yükleme durumunda bir malzemenin şekillenme sınırı, standart Erichsen testi kullanılarak elde edilebilir. Farklı gerinim durumları elde etmek için farklı boyutlarda numuneler kullanılmıştır. 20 mm çaplı bir yarım küre zımba kullanılarak Erichsen testinden sonra deforme olmuş numuneler Şekil 2.16’da gösterilmiştir.

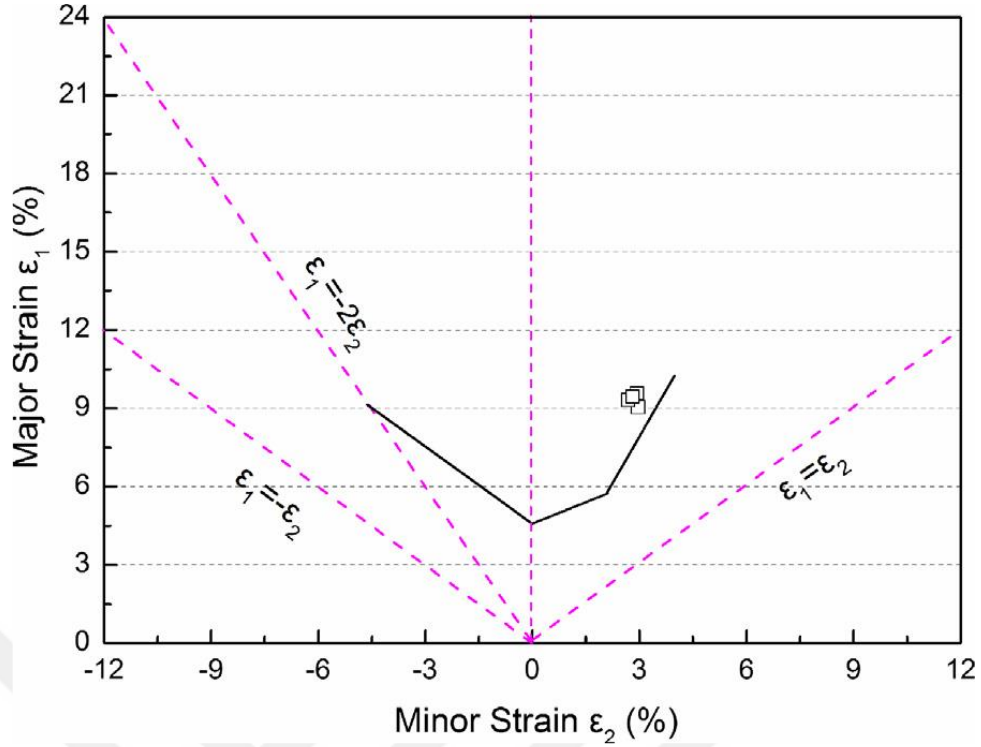


Şekil 2.16. Erichsen testi sonrası kubbe şekilleri (Li vd. 2013)

Elektromanyetik şişirmede, majör ve minör BŞD'ler sırasıyla %9.04–9.57 ve %2.68–2.97'dir. Erichsen testinde %7.51–8.41 majör ve %2.65–3.31 minör BŞD'ler elde edilmiştir. Böylece, monoton yükleme kullanılarak ulaşılanlara kıyasla salınımlı elektromanyetik şekillendirme ile eşdeğer BŞD'de yaklaşık %24.37'lik bir artış elde edilmiştir (Şekil 2.17 ve 2.187).

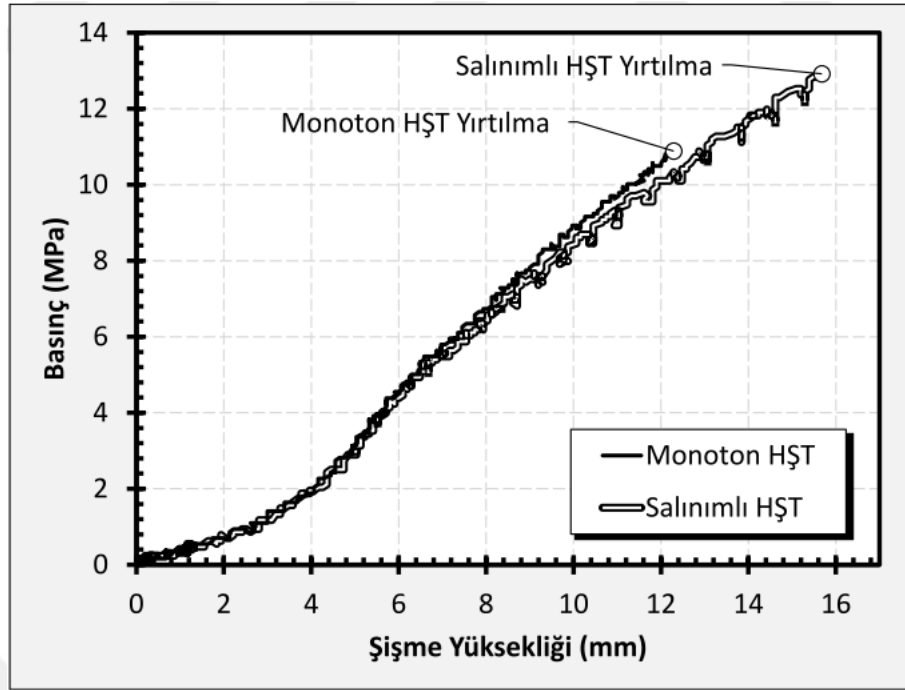


Şekil 2.17. Yarı statik ve elektromanyetik şekillendirmede Ti-6Al-4V sacın şekillendirilebilirliği ile ilgili sonuçlar (Li vd. 2013)



Şekil 2.18. Ti-6Al-4V için birleştirilmiş Erichsen testi ve elektromanyetik şekillendirilebilirlik sonuçları (Li vd. 2013)

Öztürk (2022) tarafında yapılan çalışmada 0.5mm kalınlığında Ti-6Al-4V alaşımının salınımlı şekillendirme ile yapılan deneylerinde farklı genlik, frekans ve başlangıç basıncının şekillendirilebilirliğe etkisi incelenmiştir. Hidroşekillendirme yöntemi ile 100 mm çapında kalıplar kullanılarak basıncın monoton olarak uygulanması yerine salınımlı olarak uygulanması sonucunda şekillendirilebilirlikte artış olduğu ortaya koyulmuştur. Optimum parametreler 0.5 MPa genlik, 2 Hz frekans ve 7 MPa başlangıç basıncı olarak belirlenmiştir. Bu basınç profili ve ile yapılan deneylerde şişme yüksekliği 13.39 mm'den 15.45 mm'ye yükselmiştir(Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Salınlı ve monoton yükleme ile yapılan deneyler (Öztürk, 2022)

Bu tezde ŞSE'nin hidrolik şişirme deneyi ile belirlenmesinde Şekil 2.18'deki salınlı yükleme parametreleri esas alınarak aynı basınç profili kullanılmıştır. Çünkü tezde de Öztürk'ün (2022) çalışmasındaki 0.5 mm Ti-6Al-4V sac malzeme kullanılmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde deney düzeneğinin kurulması, deney numunelerinin hazırlanması ve yapılan deneyler anlatılmıştır. Şekillenmiş numuneler üzerinden grid analizi ile BŞD dağılımlarının ölçülmesi ve sınır BŞD'lerin belirlenmesi açıklanmıştır.

#### 3.1. Deney Düzeneğinin Kurulması

Ti-6Al-4V sac malzemesinin ŞSE'lerini belirlemek için malzemeyi hasara uğratabilecek kapasitede ve hata oranı düşük bir deney düzeneği gerekmektedir. Ayrıca deney düzeneğinin malzemeleri gerdirme işlemi sırasında kalıplar arasında kilitleyerek hasar oluşuncaya kadar kaymadan tutacak kapasitede olması önemlidir. Salınlı yüklemeye ile şekillendirme yapılabilmesi için pres, hidrolik nümerik kontrol (HNC) yazılımıyla kullanılmaktadır. Deneyler bu özelliklere sahip Konya Teknik Üniversitesi Hidroşekillendirme Laboratuvarı'nda bulunan hidro-şekillendirme işlemi de yapabilen bir hidrolik pres deney ünitesinde yapılmıştır (Şekil 3.1).



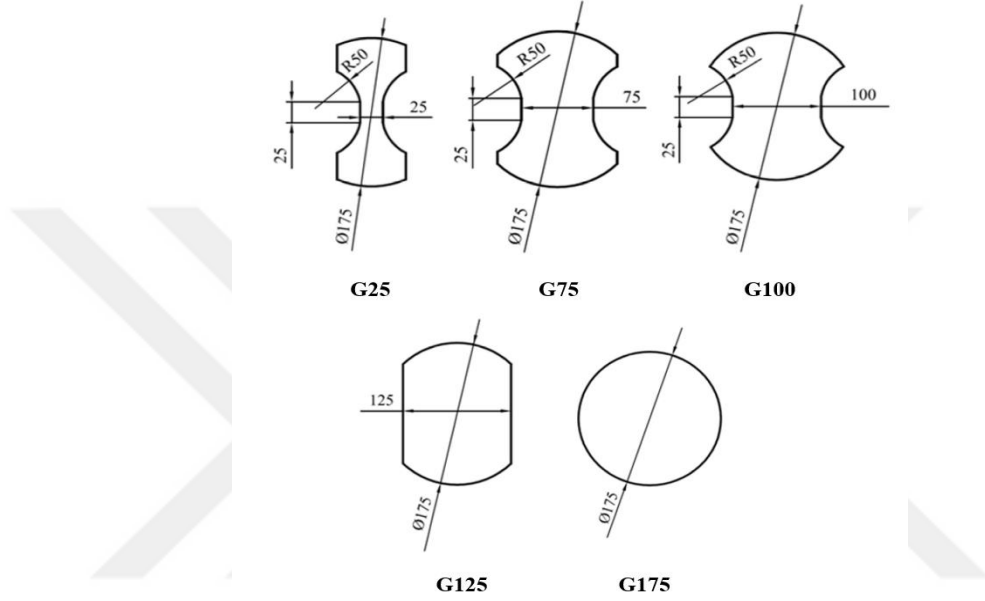
Şekil 3.1. Deney düzeneği (hidro-şekillendirme presi)

#### 3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

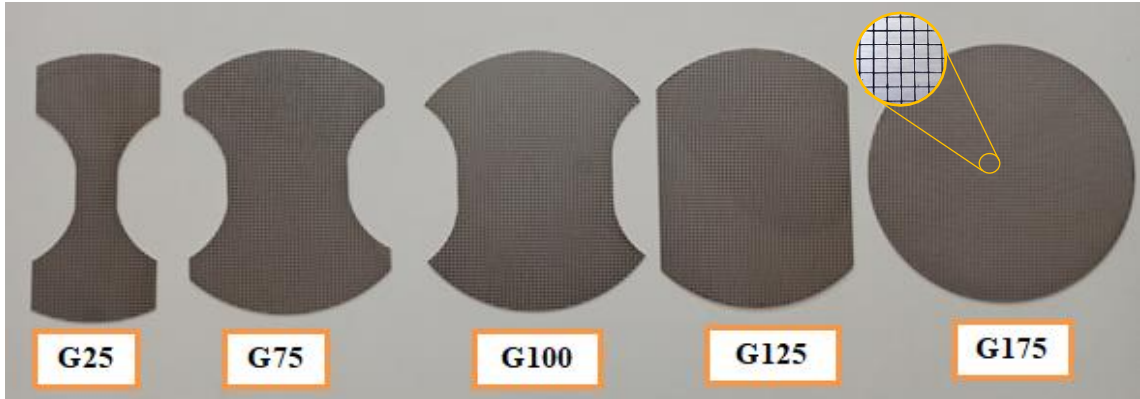
Deney numuneleri Şekil 3.2'de görüldüğü gibi ISO 12004-2 standardına göre lazer ile kestirilmiş ve bir yüzeyleri üzerine Şekil 3.3'teki gibi 2.5 mm kare gridler



oluşturulmuştur. Gridler serigrafi yöntemi ile oluşturulmuş ve bu yöntem 250°C’de, 45 dk fırınlama ile yüzeye işlenmiştir. Şekillendirmeden sonra gridlerde herhangi bir bozulma oluşmamış ve çizgiler yüzeye düzgünce tutunmuştur. Bu nedenle gridlemede ısıl değişiklikler oluşturan lazer yöntemi ve çentik etkisi oluşturabilecek elektro kimyasal gridlemeye gerek kalmamıştır. Aynı şekilde hidrolik şişirme deneyi ve durum çalışmaları için numuneler, gerekli kalıp ölçülerine göre lazer ile kestirilerek serigrafi yöntemi ile gridlenmiştir.



Şekil 3.2. ISO 12004-2 standardında belirtilen Nakajima test numune geometrisi



Şekil 3.3. Standartlara göre kesilmiş ve serigrafi yöntemiyle gridlenmiş numuneler

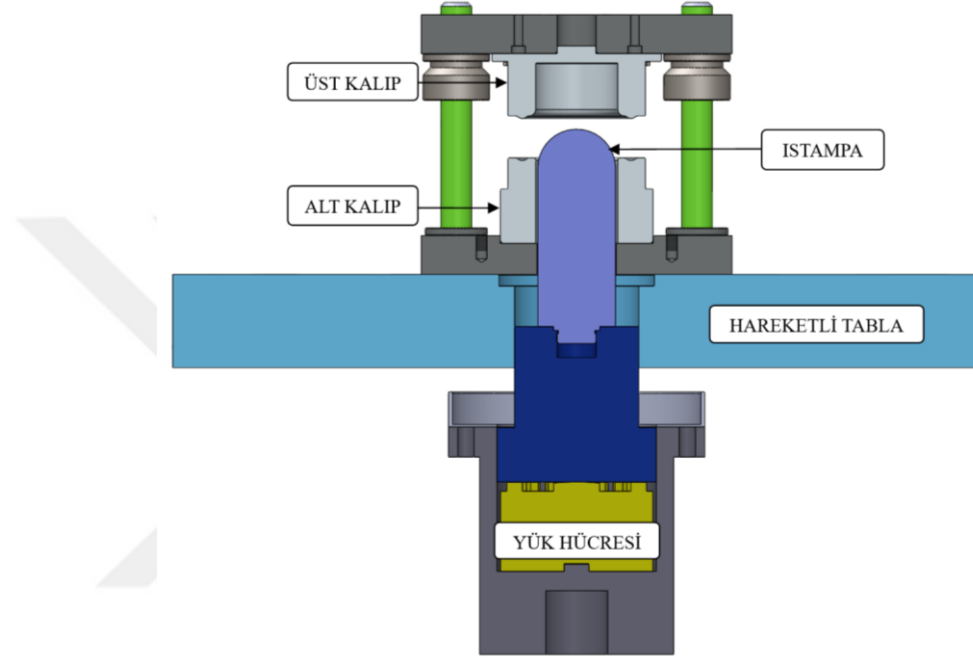
### 3.3. Deneylerin Yapılması

Bu çalışmada ŞSE’ler, monoton yükleme durumu için Nakajima testiyle elde edilmiştir. Salınlı yükleme durumu için ise önce Nakajima’nın kullanılabilirliği araştırılmış sonra elips kalıplarla şişirme deneyi yapılmıştır. Bu deneylerin önemli bir

kısmı, yazarın da bursiyer olarak görev aldığı, TÜBİTAK tarafından desteklenen 219M489 nolu projenin bazı iş paketleri kapsamında gerçekleştirilmiştir (Türköz, 2022).

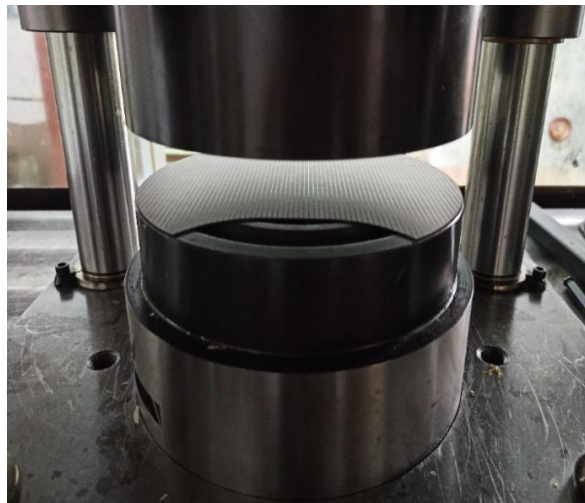
### 3.3.1. Nakajima testiyle ŞSE'lerin elde edilmesi

Nakajima testi alt, üst kalıplar ve ıstampa olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır ve kalıpların montaj durumu şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.4). Nakajima testi deney numuneleri ISO 12004-2 standardına göre hazırlanmıştır.



Şekil 3.4. Nakajima deney düzeneğinin hidrolik prese montajı

Gridlenmiş test numuneleri kalıplar arasında Şekil 3.5'te görüldüğü gibi hizalanarak yerleştirilir.



Şekil 3.5. Kalıba merkezlenerak yerleştirilmiş test numunesi



Standartlarda malzeme ıstampa ile şekillendirilirken sürtünmenin etkilerinin azaltılması istenmektedir. Bundan dolayı ıstampa ile sac arasına parafin ve gres uygulanmıştır. Numune hareketli tabla yardımıyla kalıplar arasında kilitleme çubukları vasıtasıyla sabitlenir ve böylece gerdirilirken sacın kayması engellenir. Şekillendirme boyunca presin tam kapasitesi olan 60 Ton uygulanmıştır. Böylece numune monoton yarı küresel bir ıstampa ile malzeme yırtılıncaya kadar şekillendirilmiştir.

Gridlenmiş 5 çeşit Nakajima test numunesi ıstampanın monoton ilerlemesi ile 3 tekrarlı olmak üzere hasar oluşuncaya kadar şekillendirilmiştir (Şekil 3.6). Yapılan testlerden sonra Asame yazılımı ile ölçülen BŞD dağılımları kullanılarak sınır BŞD'ler ISO 12004-2 standardında belirtilen hesaplama yöntemine göre hesaplanmıştır.



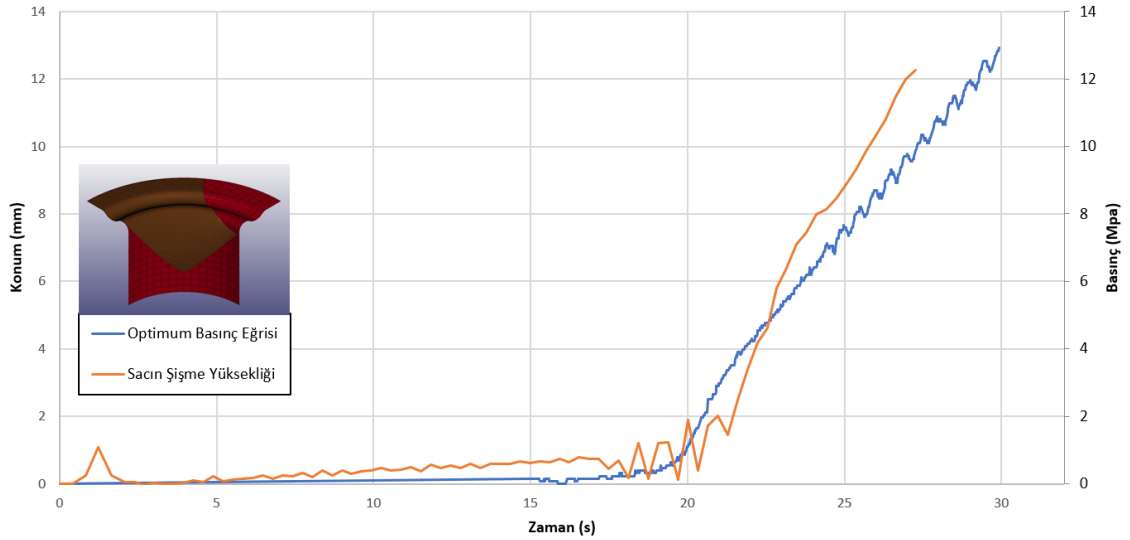
Şekil 3.6. Hasar oluşuncaya kadar şekillendirilmiş test numuneleri

Deneyler önce standarttaki gibi monoton yükleme ile yapılmıştır. Daha sonra salınımlı yükleme koşullarını simüle etmek için, ıstampaya farklı geri çekme miktarları uygulanarak da deneyler yapılmıştır ve detaylı sonuçlar Ek 1'de verilmiştir. Ancak bu deneylerde istenen salınım etkisi oluşturulamamıştır. Bu nedenle Nakajima testi ile sadece monoton yükleme durumunda ŞSD elde edilmiştir.

### 3.3.2. Nakajima ile salınımlı yüklemenin uygulanabilirliğinin araştırılması

Salınımlı yükleme durumunda da ŞSE'yi belirlemek için Nakajima testinde ıstampaya salınımların verilmesi düşünülmüştür. Bunun için Şekil 2.17'deki basınçlara karşı elde edilen şişme yüksekliği değerlerinin ıstampaya verilmesi gerekir. Ancak tam daire dışındaki numunelere sıvı basıncının verilmesi gerçek hayatta mümkün olmaz. Bu nedenle sonlu elemanlar analiziyle sıvı basıncı verilerek bu basınçlara karşılık şişme yüksekliklerinin ıstampayla verilmesi düşünülmüştür. Ancak maalesef salınımlı basınca karşılık gelen şişme yüksekliği konumu için Şekil 3.7'de görüldüğü gibi anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Sonuç olarak konum değişiminin salınımı temsil etmediği ve ıstampaya uygulanacak netlikte olmadığı görülmüştür.

Ayrıca ikinci bir çözüm olarak ıstampaya farklı genlik ve frekanslarda salınım uygulanması denenmiştir. Ek 1'de verilen bu deneme sonuçlarından da maalesef şekillendirilebilirlikte anlamlı bir değişim elde edilememiştir. Bunun nedeninin ıstampanın konum kontrolü ile yapılan deneylerde gerilme genliğinin yeterli hassasiyette kontrol edilememesi olduğu yorumu yapılmıştır. Bunun araştırmalardan sonra basınç kontrolü vasıtasıyla sacda gerilme genlikleri oluşturabilmek için eliptik kalıplarla şişirme yöntemine geçilmiştir.



Şekil 3.7. Analiz sonucu salınımlı basınç uygulanan test numunesinin zamana göre şişme yüksekliği değişimi

### 3.3.3. Elips kalıplarla ŞSE'nin belirlenmesi

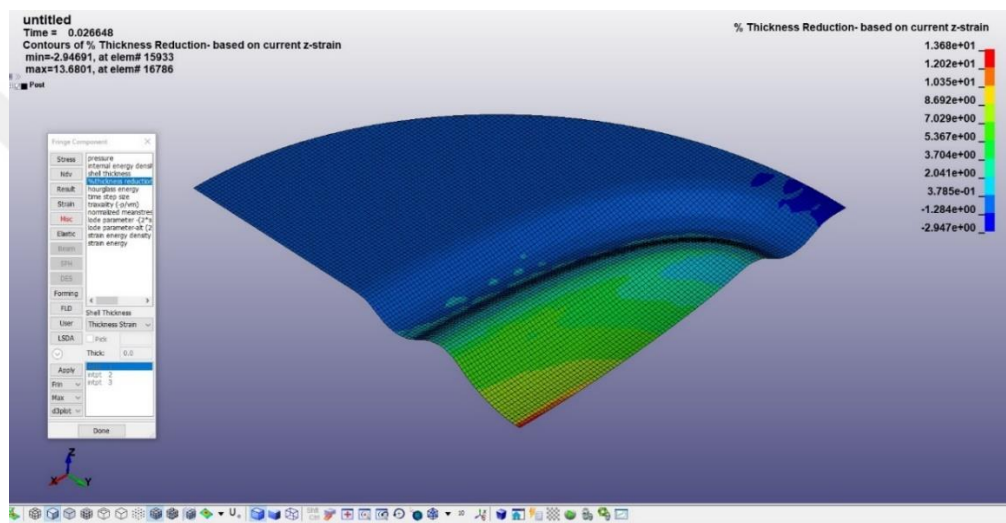
Salınımlı yükleme şartlarının oluşturulması için elips kalıplarla şişirme deneyleri yapılmıştır. Tabii ki hidrolik şişirme deneyiyle diyagramın sadece sağ tarafı elde edilebilmiştir. Farklı minör ve majör BŞD kombinasyonları oluşturmak için farklı elips oranlarında kalıplar kullanılmıştır. Literatürde hidrolik şişirme için kullanılmış olan elips kalıplar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Literatürde kullanılmış olan elips şişirme kalıpları

Yazar- Yayın Yılı	Kullanılan Kalıpların Elips Uzunlukları
Rees, 1995	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 101 mm -101 mm</li> <li>• 101 mm - 90 mm</li> <li>• 101 mm - 78,3 mm</li> <li>• 101 mm - 64 mm</li> <li>• 101 mm - 50,5 mm</li> <li>• 101 mm - 42 mm</li> </ul>
Broomhead, vd., 1982	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 102 mm - 102 mm</li> <li>• 102 mm - 90 mm</li> <li>• 102 mm - 78,5 mm</li> <li>• 102 mm - 64,5 mm</li> </ul>
Lenzen ve Merklein, 2018	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 200 mm – 75 mm</li> </ul>
Lazarescu vd., 2012	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 80 mm - 80 mm</li> <li>• 80 mm - 64 mm</li> <li>• 80 mm - 48 mm</li> <li>• 80 mm - 32 mm</li> </ul>
Wang, Y vd., 2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 mm - 100 mm</li> <li>• 100 mm - 90 mm</li> <li>• 100 mm - 80 mm</li> <li>• 100 mm - 60 mm</li> </ul>
Tez Kapsamında Tasarlanan Kalıplar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 mm – 100 mm</li> <li>• 100 mm – 75 mm</li> <li>• 100 mm – 50 mm</li> <li>• 100 mm – 25 mm</li> </ul>

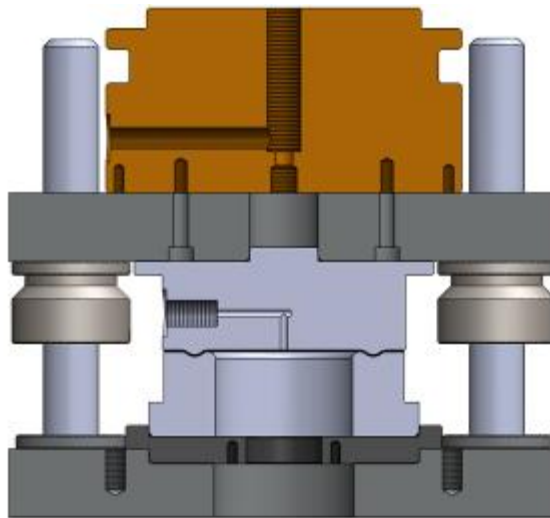
Tez kapsamında, birisi 100 mm çaplı dairesel ve 3 tanesi de elips olmak üzere 4 hidrolik şişirme kalıbı kullanılmıştır. Elips oranı olarak; 0.3, 0.5 ve 0.75 uygulanmıştır. Kalıpların imalat resimleri Ek-2'de verilmiştir. Elips kalıpların hareketli tablanın kapandığı durumda numuneyi kalıp radyüsünden hasara uğratmaması için, en küçük oranlı kalıp tasarımı için hidro-şekillendirme prosesinin sonlu elemanlar analizi yapılarak

kalıp radyusleri belirlenmiştir (Şekil 3.8). Sonlu elemanlar analizinde Mat 125 malzeme modeli kullanılmıştır. Malzeme kalınlığı: 0.5 mm, kalıp radyusu: 7.5 mm, mesh boyutu: 0.8 olarak analiz gerçekleştirilmiştir. Hareketli tabla tam kapandığı henüz basınç uygulanmadan maksimum incelmenin %3.5 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Bu incelmenin de kalıp radyusünden herhangi bir hasara yol açmayacağı düşünülmektedir. Ayrıca sacın şekillendirme analizinde hasarın elipsin orta kısmında oluştuğu görülmüştür. Dolayısıyla kalıp radyusu 7.5 mm olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan kalıplarda başarılı deneyler yapılamamıştır. Bu durumla ilgili çalışmalar Ek-3'te detaylı şekilde anlatılmıştır.



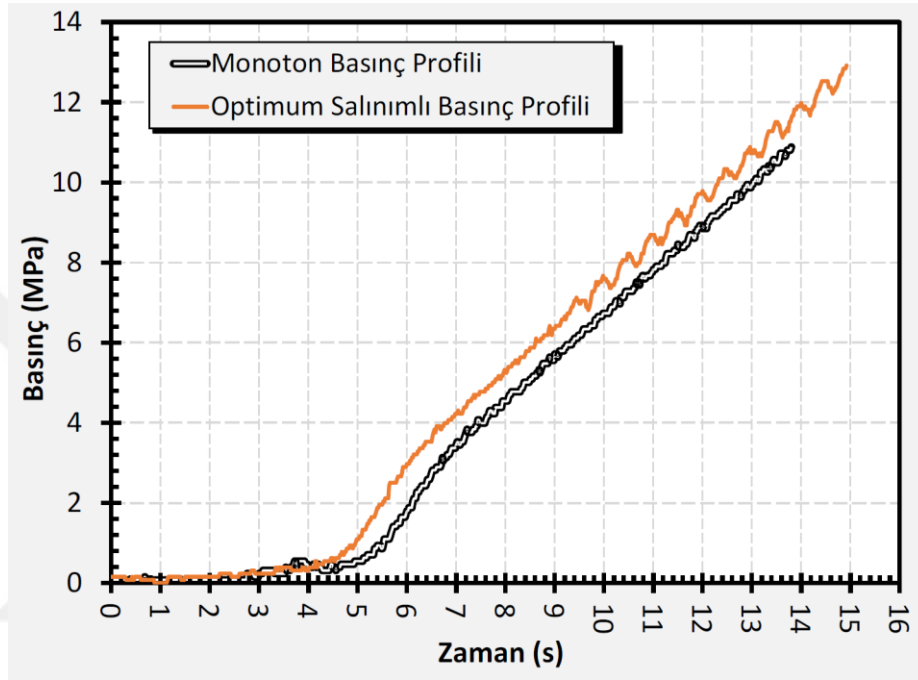
Şekil 3.8. Hidro-şekillendirme analizi sonucu kalınlık incelmesi

Tasarlanan kalıpların hidrolik prese montajı Şekil 3.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi sacın kaymaması için kilitleme çubukları kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Hidrolik şişirme kalıplarının prese montajı

Bilindiği gibi şişirme deneyi ile ŞSE'nin sadece sağ tarafı elde edilebilir. Şişirme deneylerinde öncelikle 100 mm çapındaki dairesel kalıplar kullanılarak monoton yükleme ve optimum salınım parametreleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylere ait basınç profili Şekil 3.10'da ve deney numuneleri ve Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Salınımlı yükleme ile ŞSE belirlenirken tüm elips kalıplarda şekillendirme bu basınç profili ile yapılmıştır.



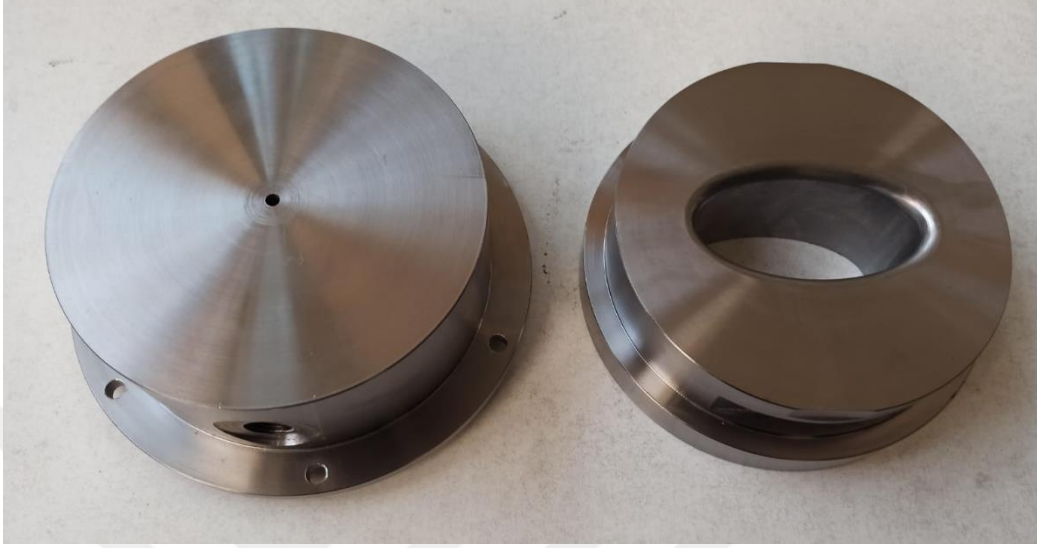
Şekil 3.10. Dairesel deney numunesi için uygulanan monoton ve salınımlı basınç profilleri (Öztürk, 2022)



Şekil 3.11. Monoton ve salınımlı yükleme ile 100 mm çaplı dairesel kalıplarda şekillendirilmiş deney numuneleri



Kilitleme çubuğundaki problemlerden dolayı 0.5 elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı kilitleme çubuksuz olarak imal edilmiştir. Kalıba gerektiği durumda kilitleme çubuğu işlenebilmesi için ısıl işlem uygulanmamıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. 0.5 Elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı

İlk olarak uzun kenarı hadde yönüne paralel olan numuneler ile monoton yükleme profili ile deneyler gerçekleştirilmiştir. 2 adet numune hadde yönünde (uzun kenar) yırtılmış, diğer tekrarda ise numune kenar bölgesinden yırtılmıştır. Yırtılmanın hadde yönü ile bağlantılı olup olmadığını incelemek için numunenin uzun kenarı hadde yönüne dik olacak şekilde numune kesilerek deneyler tekrarlanmıştır. Hadde yönüne dik olan numuneler de aynı şekilde uzun kenara paralel olacak şekilde yırtılmış, bir adet numune de kenar bölgeden yırtılmıştır. Sonuç olarak yırtık yönünün hadde yönüne bağlı olmadığı görülmüştür (Şekil 3.13).

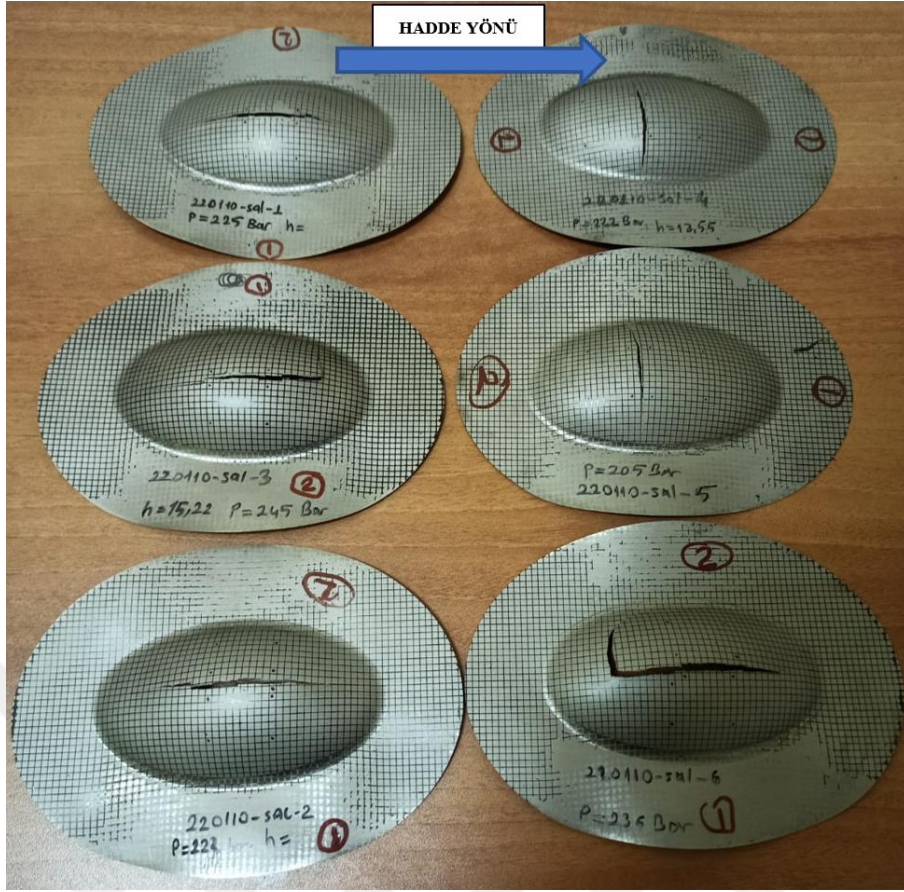
Monoton ve salınımlı yükleme durumları için 6 tekrarlı olarak gridli numuneler ile deneyler yapılmıştır. Deney numunelerinin uzun kenarı hadde yönünde olacak şekilde hazırlanmıştır. Monoton ve salınımlı yükleme ile yapılan deneyler Şekil 3.14 ve 3.15'te gösterilmiştir. Monoton yükleme profili ile numuneler ortalama 228 Bar, salınımlı yükleme ile ise ortalama 226 Bar basınçta hasara uğramıştır. Salınımlı yükleme ile şekillendirilen numunelerde yırtılma basıncında bir artış görülmemiştir.



Şekil 3.13. Yapılan ön deneyler (oklar hadde yönünü göstermektedir)

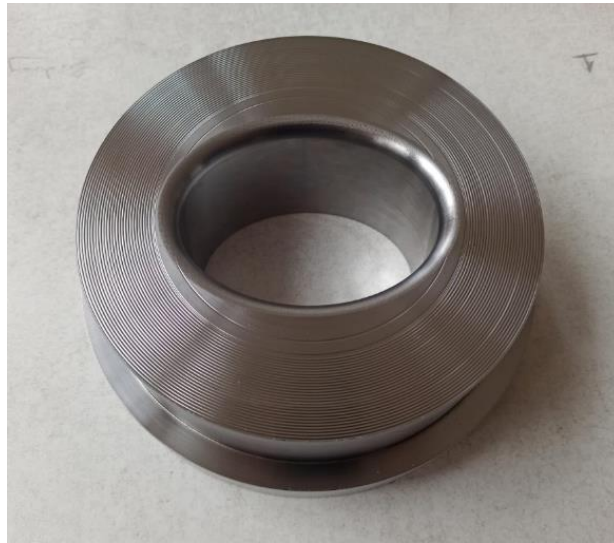


Şekil 3.14. Monoton yüklemeye ile 0.5 elips oranlı kalıplarda gerçekleştirilen deneyler



Şekil 3.15. Salınlı yüklemeye ile 0.5 elips oranlı kalıplarda yapılan deneyler

Kilitleme çubuksuz olarak imal edilen 0.75 oranlı hidrolik şişirme kalıbı, Şekil 3.16'da görüldüğü gibi, deney sırasında numunenin içeriye doğru kaymasını önlemek için yüzeyde ince dairesel izlerle imal edilmiştir.



Şekil 3.16. 0,75 Elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı

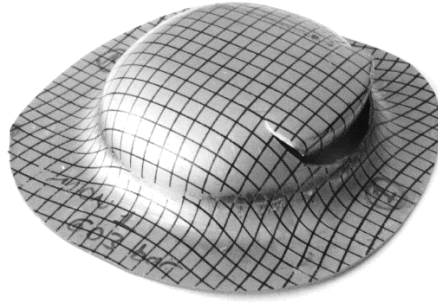


0.75 elips oranlı kalıpla monoton ve salınımlı yükleme durumlarında 3'er tekrarlı deneyler yapılmıştır. Monoton yükleme ile numuneler ortalama 146 Bar basınçta yırtılırken, salınımlı yükleme ile ortalama 154 Bar basınçta yırtılmıştır. Yapılan deney numuneleri Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Numuneler merkez bölgeden standartlara uygun olarak hasara uğramıştır.

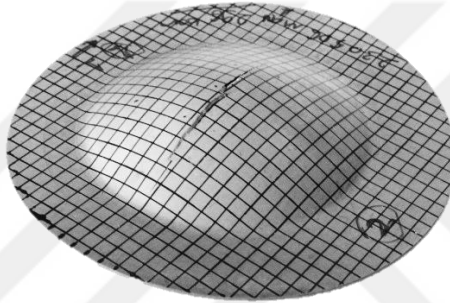
Deneyler sonucunda Nakajima testi kullanılarak monoton yükleme, elips şişirme kalıpları kullanılarak monoton ve salınımlı yükleme durumlarında ŞSD'ler elde edilmiştir. Elde edilen ŞSD'lerin seviyeleri birbirinden farklılık göstermektedir. Bu farklılıkları doğrulayabilmek amacıyla her bir deneyin etkilerini içerecek şekilde doğrulama deneyleri (durum çalışmaları) yapılmıştır. Nakajima testi için dişi hidroşekillendirme (DHS) yöntemiyle üretilen gridli endüstriyel parçalar Şekil 3.18'deki gibi şekillendirilmiştir. Elips kalıplarla belirlenen ŞSE'yi doğrulamak amacı ile de 40 mm çapında kalıpta numuneler serbest olarak gerdirilerek hasara uğratılmıştır (Şekil 3.19).



**Şekil 3.17.** 0.75 Elips oranlı kalıpla monoton ve salınımlı durumda yapılan hidrolik şişirme deney numuneleri



**Şekil 3.18.** DHŞ ile şekillendirilmiş numune

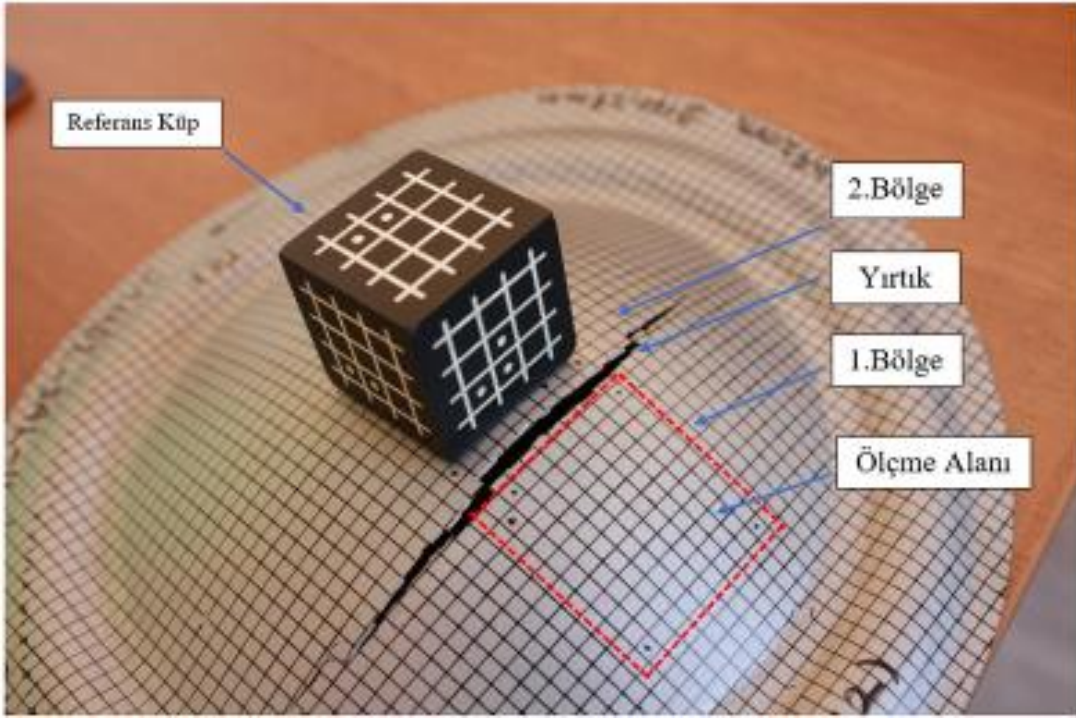


**Şekil 3.19.** Serbest şişirme ile imal edilen küresel kubbe

### **3.4. ASAME Yazılımı ile Numunelerin BŞD Dağılımlarının Ölçülmesi**

Malzeme yüzeyine oluşturulan BŞD'leri ölçmek için grid analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde numune şekillendikten sonra BŞD değerleri gridlerin boyutlarındaki değişime göre hesaplanır. Şekillenmiş deney numunesi üzerine referans küp koyularak profesyonel bir fotoğraf makinesiyle iki farklı açıdan fotoğrafları çekilir. Bu fotoğraflar ASAME yazılımı ile görüntü işleme kullanılarak işlenir ve BŞD değerleri belirlenir.

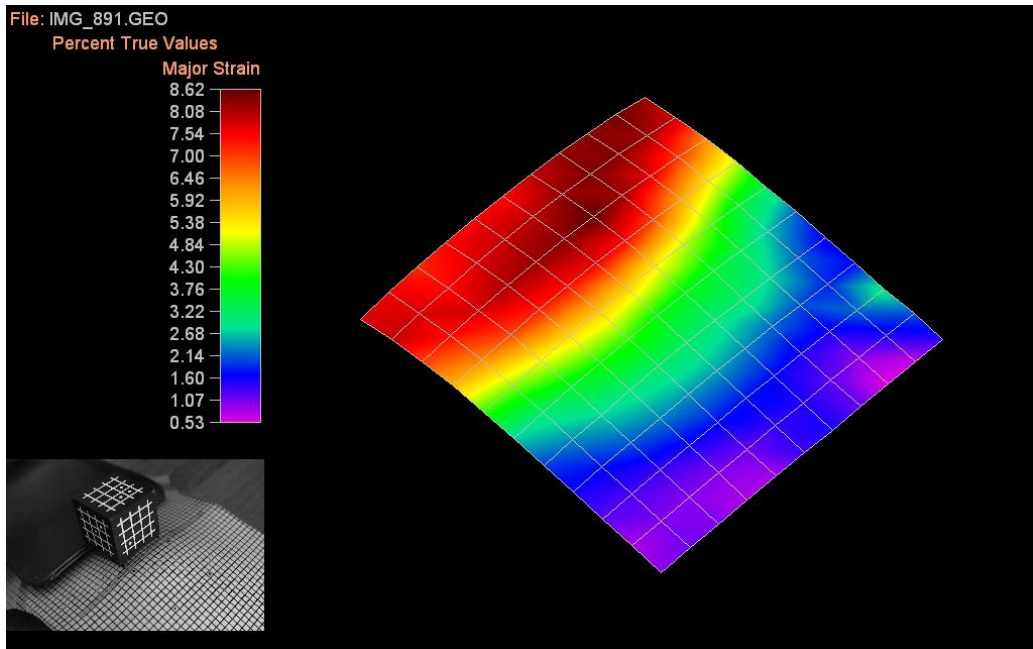
Nakajima ve hidrolik şişirme deney numunelerinin yırtığın (hasar) önü ve arkası olmak üzere iki bölgesi vardır. Ölçümler en az 10x10 gridleri kapsayacak şekilde yapılmıştır. Ölçüm bölgesi ve referans küp yerleşimi Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Referans küpün yerleşimi ve ölçülecek bölgenin tespit edilmesi

Türköz vd. (2009) çalışmalarında, yapay ışık kaynağı kullanılarak yapılan ölçümlerde tekrarlanabilirliği 0,0224 BŞD, doğal ışık altında yapılan ölçümlerde tekrarlanabilirliği 0,0062 BŞD olarak ölçmüştür. Bundan dolayı fotoğraflar gün ışığında ve fotoğraf çekim parametreleri değiştirilmeden yapılmıştır.

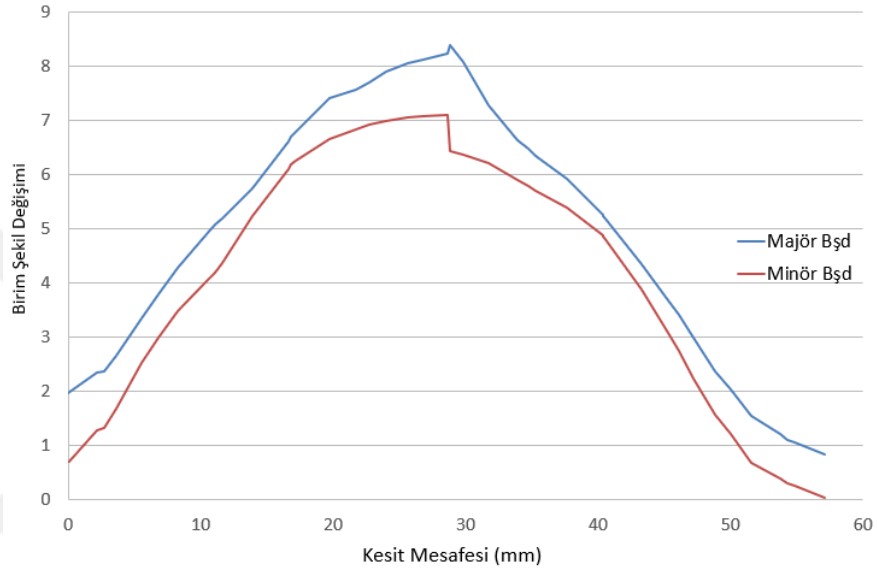
Ölçülen örnek bir deney numunesinin BŞD dağılımı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. ASAME ara yüzünde ölçülen bir deney numunesinin BŞD dağılımı

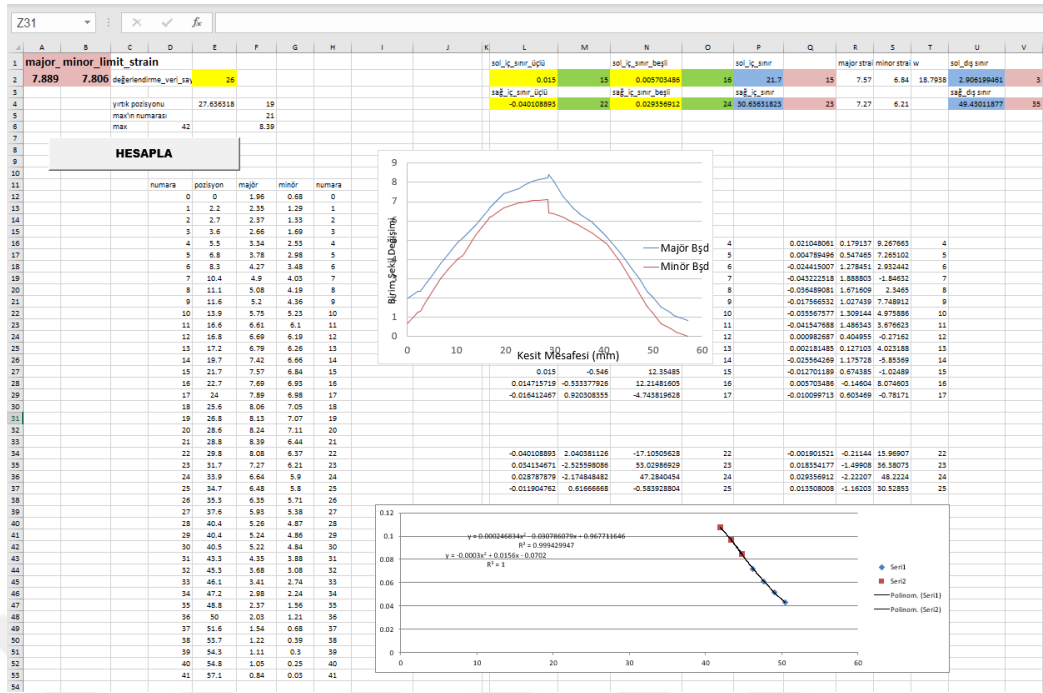
### 3.5. ISO 12004-2 Standardına Göre Sınır BŞD'lerin Hesaplanması

ASAME ile yapılan ölçümlerde her bir yırtık bölgesi için en az 30 mm olacak şekilde 3 adet ortogonal kesit çizilmiştir. Bu kesitler üzerinde kalan majör ve minör BŞD değerleri ölçülmüştür (Şekil 3.22). ISO-12004-2 standardı incelendiğinde bu kesitlerin oluşturduğu eğrilerin türevleri alınır. Bu parabolün maksimum noktası malzemenin sınır BŞD değeridir. Her bir kesitten hesaplanan BŞD değerlerinin ortalaması alınarak o numunenin sınır BŞD değerleri belirlenmiştir (Dilmeç, 2012).



Şekil 3.22. Dairesel deney numunesinin çizilen kesit üzerindeki majör ve minör BŞD değerleri

Sınır BŞD'ler bir excel algoritmasında hesaplatılmıştır. Hesaplatılan algoritma arayüzü ve sınır BŞD değerleri Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



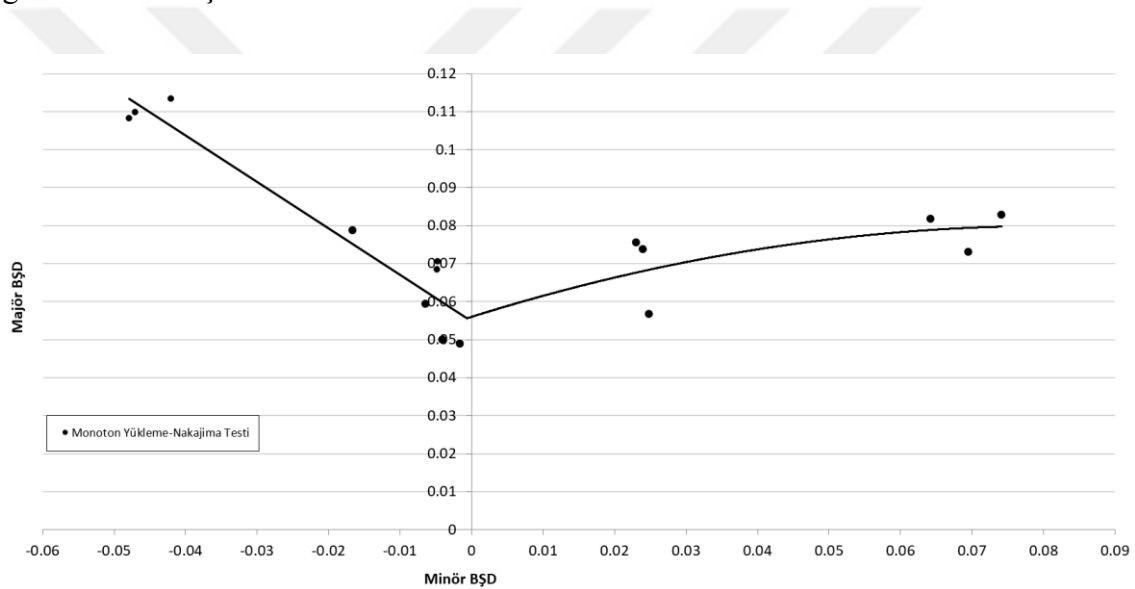
Şekil 3.23. Sınır BŞD değerlerinin algoritma ile belirlenmesi

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Sac malzemelerde şekillendirme kabiliyetinin önemli bir göstergesi ŞSD'lerdir. ŞSD'de hasarın meydana geldiği sınır birim şekil değiştirme kombinasyonunu gösteren ŞSE'nin yukarıya doğru kayması ve/veya genişlemesi malzemeye ait şekillenebilirliğin arttığını gösterir. Bu çalışmada monoton ve salınımlı şekillendirme durumunda Ti-6Al-4V malzemesine ait ŞSD'ler elde edilerek yöntemler yorumlanmıştır.

##### 4.1. Şekillendirme Sınır Diyagramları

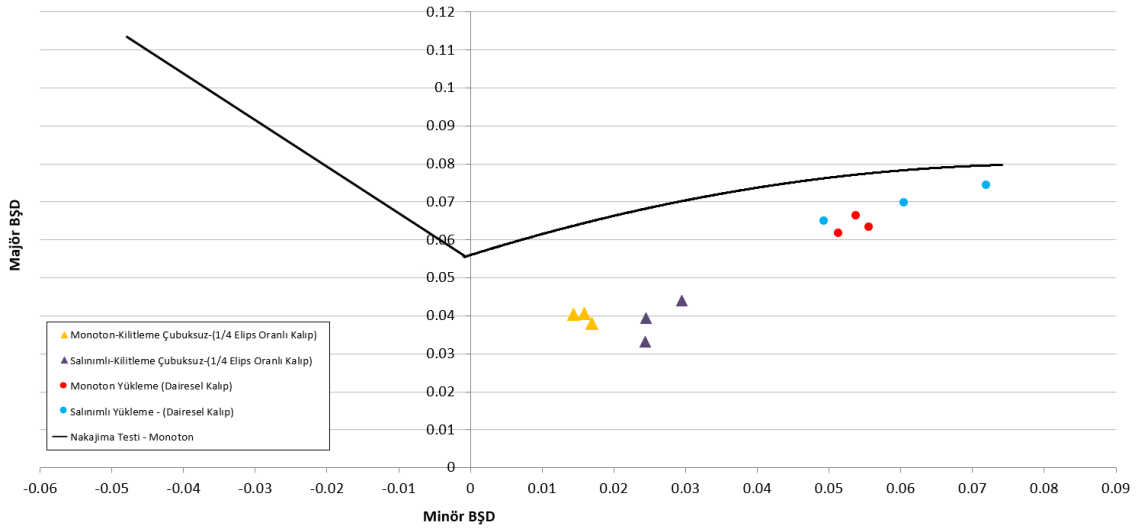
Nakajima testi kullanılarak monoton yükleme ile elde edilen ŞSD Şekil 4.1'deki gibi elde edilmiştir.



**Şekil 4.1.** Ti-6Al-4V malzemenin Nakajima testi ile monoton yükleme durumunda şekillendirme sınır eğrisi

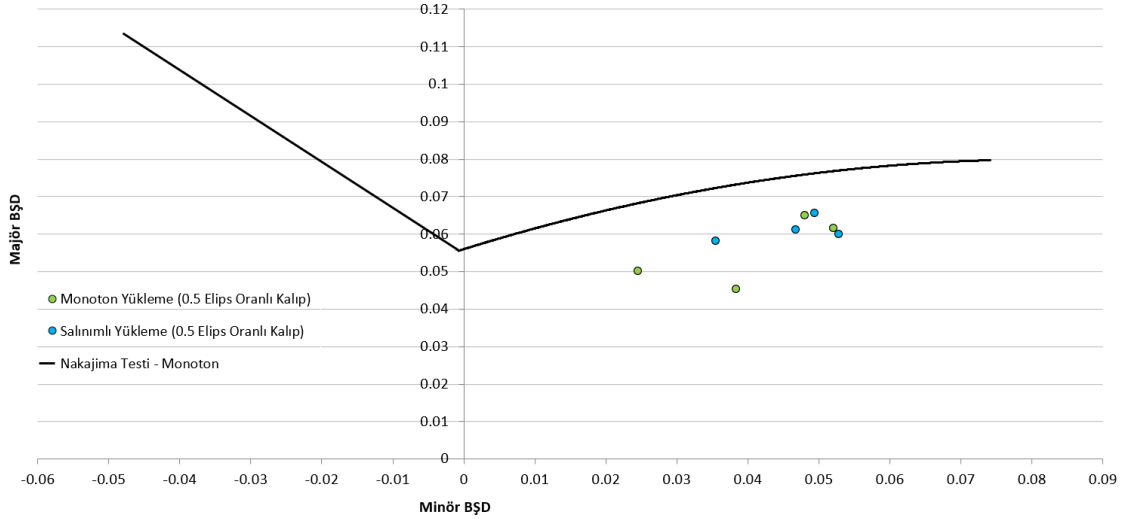
Salınımlı yükleme durumunda ŞSD'yi Nakajima testiyle elde etmek için istampaya farklı geri çekme miktarları uygulanmıştır. Ancak monoton yüklemeye göre şişme yüksekliğinde belirgin bir artış görülmemiştir. Bu nedenle elips kalıplarla hidrolik şişirme deneyi kullanılmıştır. Elipsin bir yarıçapı sabit tutulmuş ve diğer yarıçapı azaltılmıştır. Bundan dolayı malzeme iki ekseninde de eşit şekilde gerilmemiştir. Bu durum ŞSE'nin farklı noktalarda çizilebilmesi için gerekli bir durumdur. Şekil 4.3 incelendiğinde minör BŞD değerlerinin majör BŞD değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bundan dolayı elipsin bir yarıçapı kademeli olarak azaltılmış ve minör BŞD değerlerinin sıfıra yaklaşması sağlanmıştır. Dairesel kalıplarla ve 0.25 oranlı elips kalıplarla hidrolik şişirme deneyi yapılarak, monoton ve salınımlı yükleme için minör ve

majör sınır BŞD'ler diyagram üzerine aktarılmıştır (Şekil 4.2). Ancak 0.25 elips oranlı kalıplarda kilitleme çubuğu numunelerin radyus bölgelerinden yırtılmasına neden olduğu için kilitleme çubuğu silinmiş ve deneyler yapılmıştır. Diğer Numuneler şekillenme esnasında kalıp içerisine kaydığından dolayı BŞD değerleri sağa kayarak BŞD<sub>0</sub> noktasından uzaklaşmıştır. Bundan dolayı 0.25 oranlı kalıp ile yapılan BŞD'ler ŞSE oluşturulurken kullanılmamıştır.



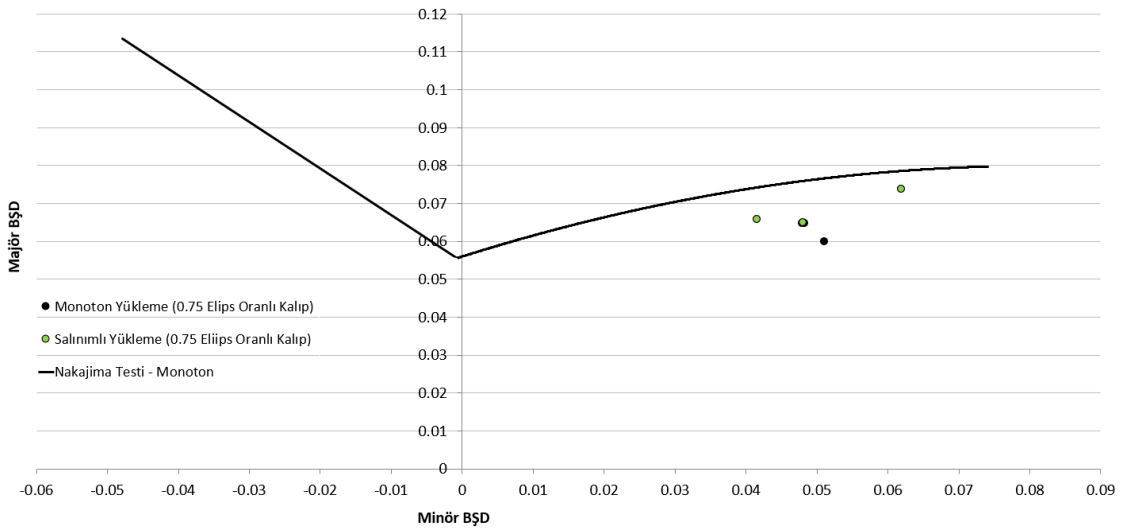
**Şekil 4.2.** Dairesel deney numunesinin hidrolik şişirme deneyi uygulanarak şekillendirilmiş durumdaki BŞD dağılımları

0.5 elips oranlı kalıplar ile yapılan hidrolik şişirme deneyleri standartlara uygun olarak merkez bölgelerden hasara uğramıştır. Yapılan ölçümlerde hem salımlı yüklemeler hem de monoton yüklemelerdeki en yüksek ve en düşük değerler ortalamadan uzak olduğu için grafiğe eklenmemiştir. Daha önceki BŞD değerleriyle karışmaması için ayrı ayrı grafiklerde gösterilmiştir. Hesaplanan sınır BŞD değerleri ŞSD üzerinde Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. 0.5 Elips oranlı kalıpta yapılan deneylerin BŞD dağılımları

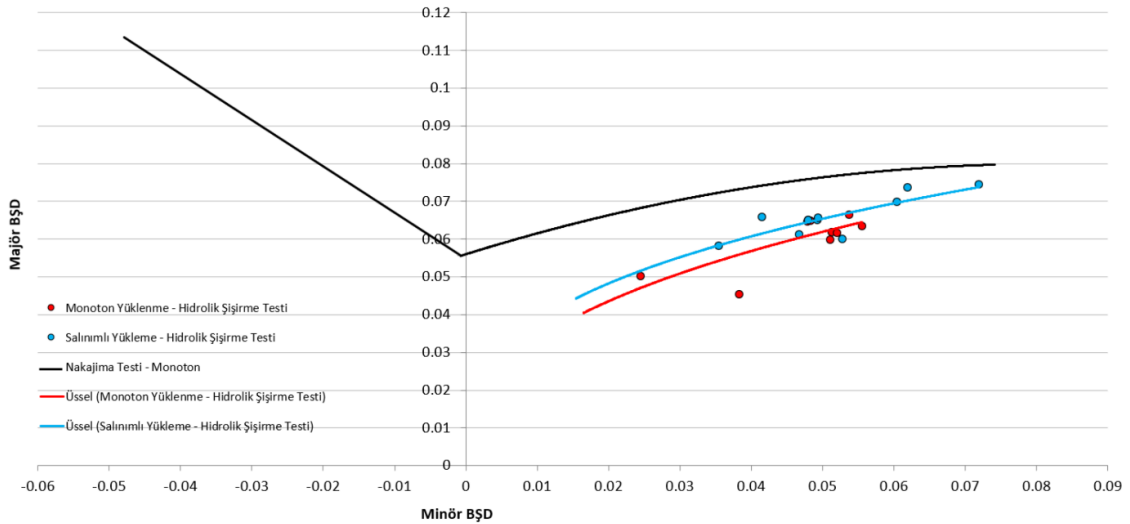
0.75 elips oranlı kalıpla yapılan deneylerin sınır BŞD değerleri ŞSD üzerinde görülmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. 0.75 Elips oranlı kalıpta yapılan deneylerin BŞD dağılımları

Salınlı ve monoton yükleme durumunda Ti-6Al-4V sac malzemesinin ŞSD'leri karşılaştırılmak için yapılan tüm salınlı ve monoton yükleme deneylerinin BŞD dağılımları tek bir ŞSD üzerinde Şekil 4.5'te gösterilmiştir.





**Şekil 4.5.** Salınlı ve monoton yükleme ile yapılan deneylerin ŞSD üzerinde gösterilmesi

Grafikte ŞSD'nın sağ tarafı için 0.5, 0.75, 1.00 elips oranlı kalıplarda yapılan monoton ve salınlı yükleme durumundaki deneylerden elde edilen veriler görülmektedir. Ancak BŞD<sub>0</sub> noktasını elde etmek için yapılan deneylerde 0.25 ve 0.3 elips oranlı kalıplarda numunelerin şekillenme sırasında kayması ve kenardan yırtılma sorunları çözülememiştir. Bundan dolayı BŞD<sub>0</sub> noktası belirlenememiştir.

#### 4.2. ŞSE'lerin Karşılaştırılması

Monoton ve salınlı yükleme uygulanarak hidrolik şişirme testi ile elde edilen ŞSE'leri kıyaslamak için sınır BŞD'leri en iyi temsil eden eğriler belirlenmiştir. Bu eğriler Şekil 4.5'te görülen mavi ve kırmızı renkli ŞSE'lerdir. Mavi renkli eğri salınlı yükleme ile belirlenen ŞSE, kırmızı renkli eğri ise monoton yükleme ile belirlenen ŞSE'dir. Grafikte görüldüğü gibi salınlı yükleme ile elde edilen ŞSE, monoton yüklemeyle elde edilen ŞSE'ye göre daha yüksek seviyededir. ŞSE seviyesinin yukarı yönde ötelenmesi majör BŞD değerlerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum şekillendirilebilirliğin arttığının bir göstergesidir. Bu artış miktarı ŞSE'leri temsil eden eğrilerden belirlenebilir. Monoton yükleme ile elde edilen ŞSE'nin denklemi Denklem 4.1'de ve salınlı yükleme ile elde edilen ŞSE'nin denklemi Denklem 4.2'de verilmiştir.

$$y = 0.1767 \cdot x^{0.3317} \quad (4.1)$$

$$y = 0.196 \cdot x^{0.3845} \quad (4.2)$$

Majör BŞD değerlerindeki artışı hesaplayabilmek amacıyla 0.015-0.055 BŞD aralığında, 0.05 artışlarla 9 adet minör BŞD değeri seçilmiştir. Her bir minör BŞD değerine karşılık gelen majör BŞD değerleri ŞSE denklemlerinden hesaplanmış ve ŞSE seviyelerindeki iyileşme belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Majör BŞD değerlerindeki iyileşme

Minör BŞD	Monoton Majör BŞD	Salımlı Majör BŞD	% İyileşme
0.015	0.044	0.039	12.534
0.020	0.048	0.044	10.837
0.025	0.052	0.047	9.539
0.030	0.055	0.051	8.490
0.035	0.058	0.054	7.610
0.040	0.061	0.057	6.854
0.045	0.063	0.059	6.192
0.050	0.065	0.062	5.603
0.055	0.068	0.064	5.073

ŞSE seviyesindeki iyileşme her bir minör BŞD değerine karşılık gelen majör BŞD değerlerindeki artış olarak hesaplanmıştır. Bu iyileşme değerlerinin ortalaması alınmıştır. Hidrolik şişirme deneyleri ile yapılan başarılı deneylerin sonucunda salımlı yükleme ile elde edilen ŞSE, monoton yükleme ile elde edilen ŞSE’ye göre **%8.08** oranında yukarı yönde ötelenmiştir.

Diğer yandan Şekil 4.5 incelendiğinde monoton durumdaki ŞSD 0.056 minör BŞD seviyesine kadar ilerlemişken salımlı durumda minör BŞD değeri 0.072 değerine kadar ilerlemiştir. Bu nedenle ŞSD’deki iyileşmeyi, sadece majör BŞD değerindeki artış yani ŞSE’nin yukarı yönde ötelenmesi ile değil, hasarın meydana geldiği minör BŞD değerinin de artmasını dikkate alarak da hesaplamanın uygun olacağı değerlendirilmiştir. Minör BŞD değerlerindeki artış eş değer birim şekil değişiminden hesaplanabilir. En sağ noktadaki monoton ve salımlı yükleme ile belirlenen sınır BŞD’ler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** ŞSE’nin en sağ noktasındaki BŞD değerleri

Yükleme/BŞD	Majör BŞD ( $\epsilon_1$ )	Minör BŞD ( $\epsilon_2$ )	Kalınlık Yönündeki BŞD ( $\epsilon_3$ )
Monoton Yükleme	0.063	0.056	-0.147
Salımlı Yükleme	0.075	0.072	-0.119

Belirlenen sınır BŞD değerleri ile eş değer birim şekil değişimi Denklemi 4.3 (Marciniak ve ark., 2002) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (4.3)$$

Bu durumda majör ve minör BŞD değerlerindeki toplam artışı dikkate alarak, ŞSE'nin en sağ ucundaki ötelenme, eş değer birim şekil değişiminden hesaplandığında monoton durumdaki **0.119** BŞD değeri, salınımlı şekillendirmede **0.147** BŞD değerine artmıştır. Bu durumda ŞSE'deki iyileşme **%23.4** olarak hesaplanmıştır. Bu değer salınımlı şekillendirmenin şekillenebilirlikte önemli oranda artış sağladığını göstermesi açısından önemlidir.

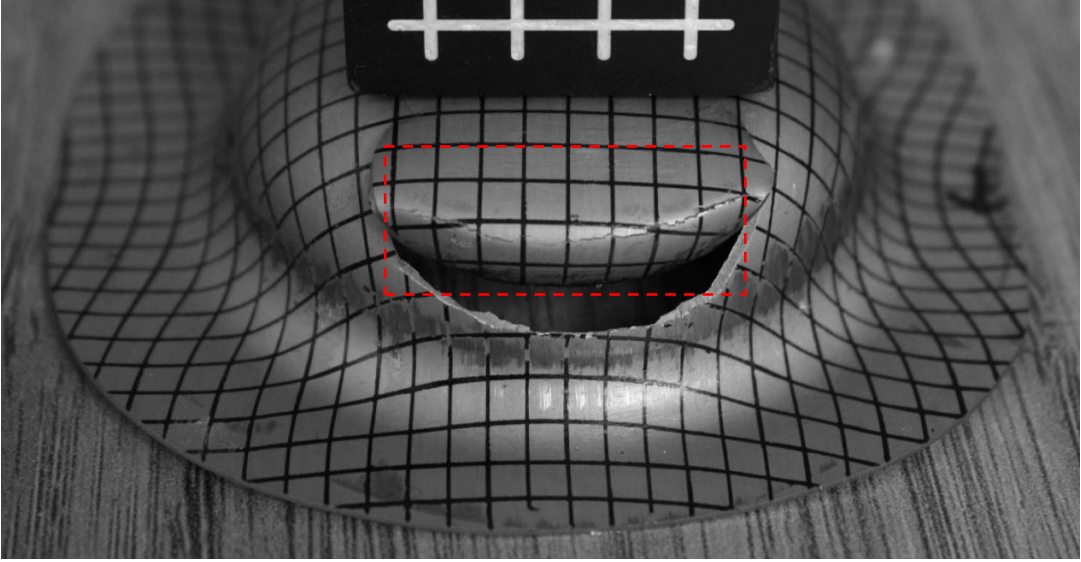
Ayrıca Nakajima testi ile monoton yükleme kullanılarak oluşturulan ŞSE'nin hidrolik şişirme deneyi kullanılarak oluşturulan ŞSE'ye göre daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise her ne kadar Nakajima testinde parafin ve gres yağı gibi yağlayıcılar kullanılarak ıstampa ve sac arasındaki sürtünmenin en aza indirildiği düşünülse de hidrolik şişirme deneyindeki sıvı sürtünmesinden fazla olması ve ıstampa ve sac arasında sürtünmenin hasar anında bölgesel olarak yoğunlaşarak mikro çatlakların ilerleyişini geciktirerek malzemenin daha yüksek oranda şekil değiştirmesine neden olması ve bundan dolayı da BŞD değerlerini artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca ŞSE'lerdeki bu fark da Şekil 2.5'te yapılan çalışmayla da (Hasek, 1978) teyit edilmektedir.

### 4.3. ŞSD Durum Çalışmaları

Yukarıda değerlendirildiği gibi Nakajima testi ve hidrolik şişirmeye elde edilen ŞSD'ler birbirlerinden farklıdır. Bu farklılıklar Nakajima deneylerinde az da olsa sürtünme etkileriyle açıklanmıştır. Ayrıca hidrolik şişirme deneyinde kullanılan salınımlı yükleme, monoton yüklemeye göre ŞSE seviyesini artırmıştır. Bu değerlendirmeyi desteklemek üzere durum çalışması yapılmıştır. Sürtünmeli prosesi temsil etmek için DHŞ ile silindirik kap üretilmiştir. Şişirme deneyi için ise 40 mm çapında gerdirerek yarı küresel kubbe şeklinde bir kap imal edilmiştir. Bu kaplardan elde edilen BŞD dağılımı aşağıda detaylıca incelenmiştir.

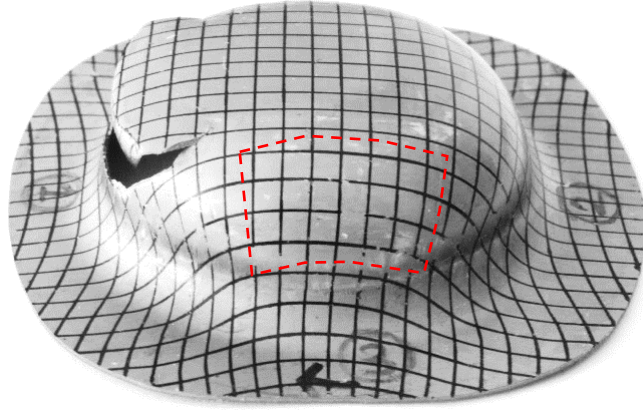
#### 4.3.1. Dişi hidro-şekillendirme ile silindirik kap imalatı

İlk olarak Nakajima testi ile oluşan sürtünmeli şekillendirme dikkate alınarak DHŞ yöntemi ile endüstriyel parça imal edilmiştir. Bu şekillendirme prosesinde sac metal önce bir miktar serbest şişmekte, daha sonra kalıp içerisinde kayarken sürtünerek şekillenmektedir. Deneysel doğrulama amacıyla en yüksek BŞD değerlerinin olduğu yer yani hasar bölgesinden ölçümler alınması planlanmıştır. Ancak numunenin hasarlı bölgesi yırtılma esnasında içeriye doğru eğilerek bükülmüş ve katlanmıştır (Şekil 4.6). Yırtığın alt ve üst bölgesinden alınan ölçümler doğru sonuçlar vermemiştir. Bundan dolayı numunenin yırtık bölgesinden BŞD sağlıklı bir şekilde ölçülememiştir.

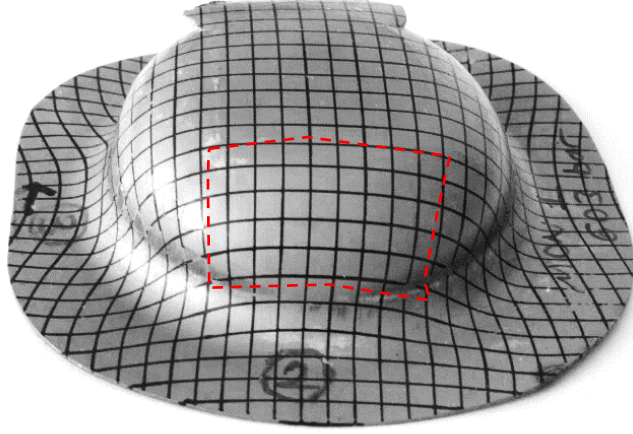


Şekil 4.6. Ölçüm alınamayan yırtık bölgesi

Bu durumdan dolayı ölçümler hasar bölgesinden değil hasarın karşısından ve yan bölgelerinden alınmıştır. Ölçüm alınan bölgeler Şekil 4.7’de gösterilmiştir. DHŞ ile üretilen parçanın BŞD’lerinin Nakajima testi ile belirlenen ŞSE’ye göre güvenli bölgede kaldığı görülmektedir (Şekil 4.8’deki kare ve + işaretli veriler). Bu durum BŞD ölçüm bölgesinin yırtık bölgesinden değil, hasarsız taraflardan alınmasından dolayıdır. Şekil 4.8 incelendiğinde en yüksek BŞD değerlerinin Nakajima testi ile elde edilen ŞSE ile aynı değerlerde olduğu görülmektedir. Bu değerler yırtık bölgesinden ölçüm alınabilirse BŞD değerlerinin Nakajima testi ile elde edilmiş ŞSE’nin üzerinde olacağını ve elde edilen ŞSE’yi doğruladığını göstermektedir. Aynı zamanda BŞD değerleri hidrolik şişirme deneyi ile elde edilen ŞSE’nin de her zaman üzerinde kalmaktadır.



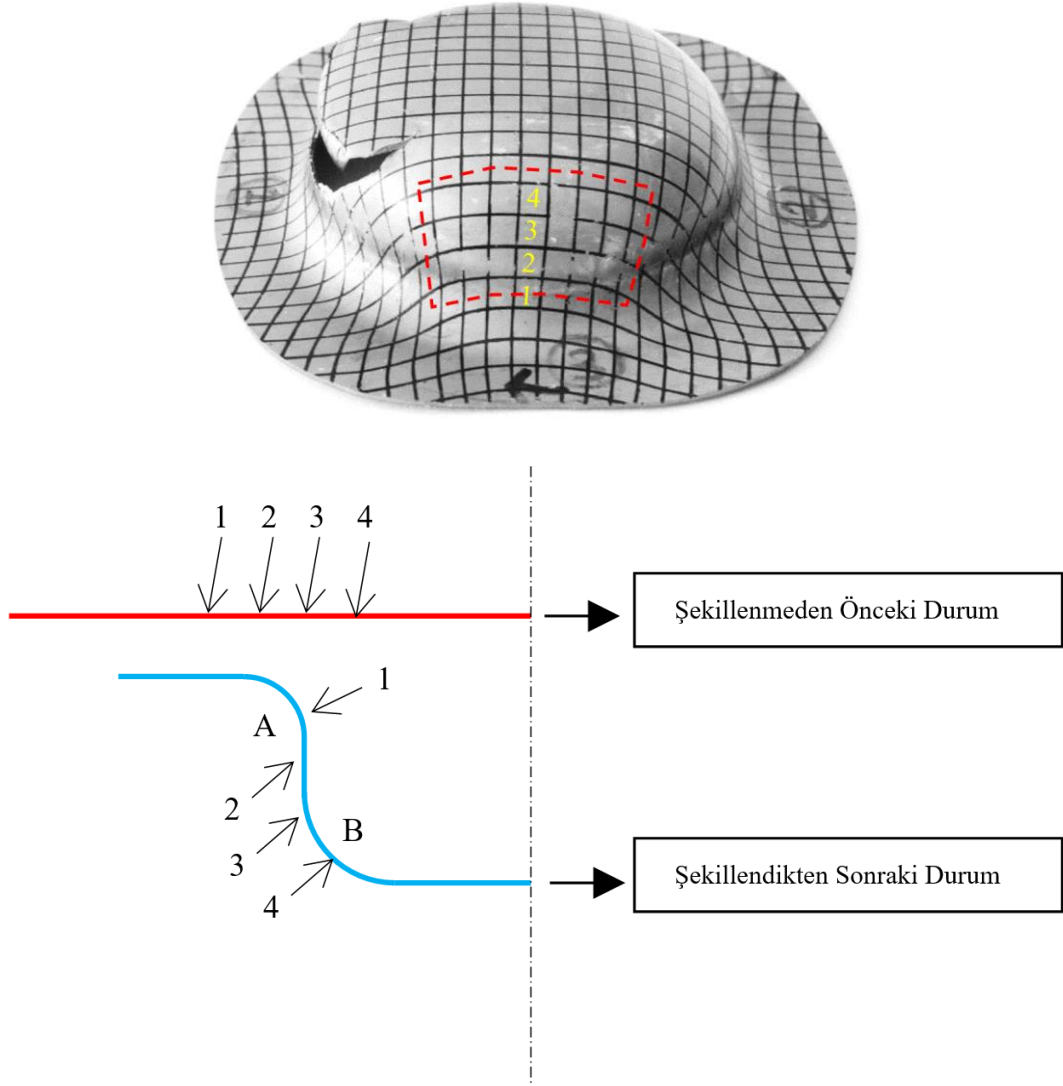
a) Radyus (3) bölgesi



b) Yırtık karşısı bölge

**Şekil 4.7.** DHŞ ile şekillendirilmiş numune

DHŞ ile şekillendirilen numunede ölçüm alınan bölgeler Şekil 4.8'de numaralandırılmış ve şekillenme işleminden önceki ve sonraki konumları şematik olarak gösterilmiştir. Numaralandırılmış gridlerin BŞD değerleri Şekil 4.9'da ŞSE üzerinde işaretlenmiştir. Numune ilkel çapı 72 mm, kalıp çapı 40 mm'dir. Her bir gridin uzunluğu 2.5 mm olacak şekilde gridleme işlemi yapılmıştır. Bu durum değerlendirildiğinde numunenin kalıp boşluğuna gelen kısımları 32 mm çapındaki bölgedir.



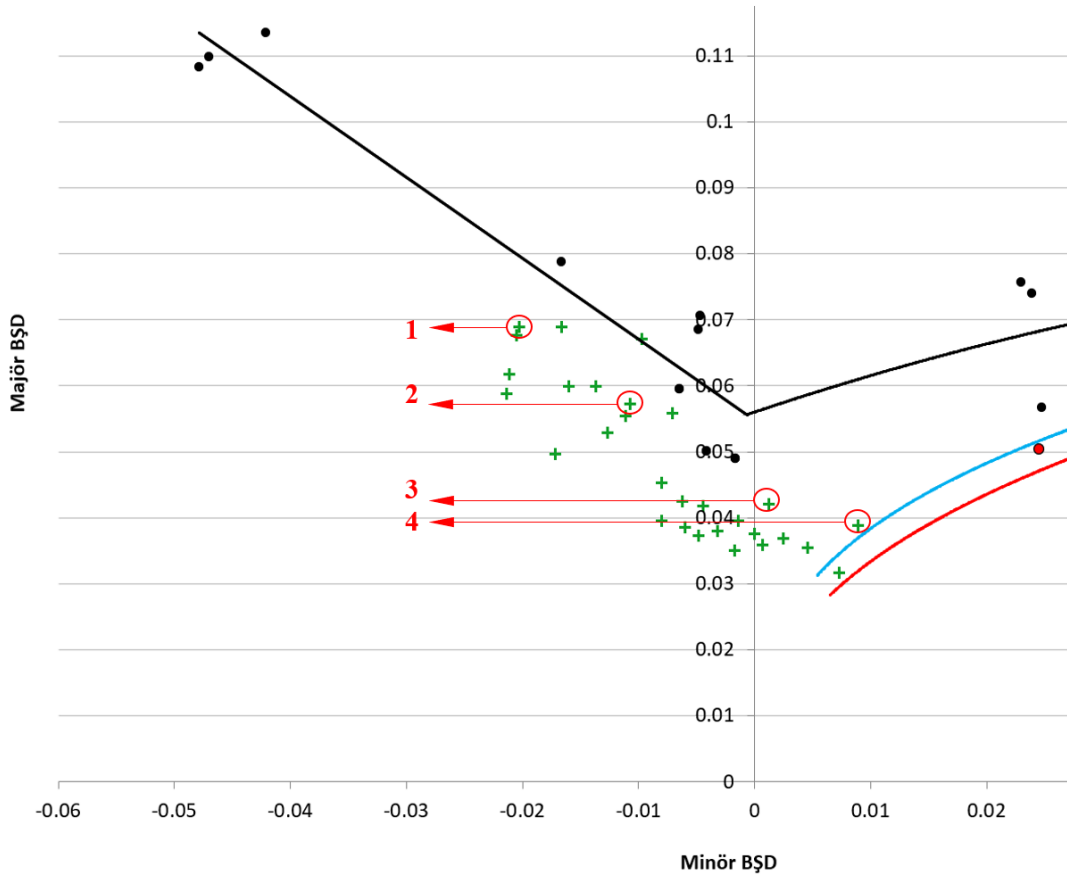
**Şekil 4.8.** DHŞ ile şekillendirilmiş numunenin üzerinde seçilen noktaların şekillenmeden önce ve sonraki konumları

1 numaralı grid incelendiğinde gridin şekillenmeden önce flanş bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu grid ilk olarak basma gerilmelerine maruz kalmakta, daha sonra daha sonra Şekil 4.8’de görüldüğü gibi A radyusu üzerinde eğilerek şekillenmektedir. Şekillenme esnasında numune kalıp içerisine doğru sürtünme etkileri de içererek çekme gerilmelerine de maruz kalmaktadır. Şekil 4.9 incelendiğinde 1 numaralı gridin derin tek eksenli çekme durumuna yakın olduğu görülmektedir.

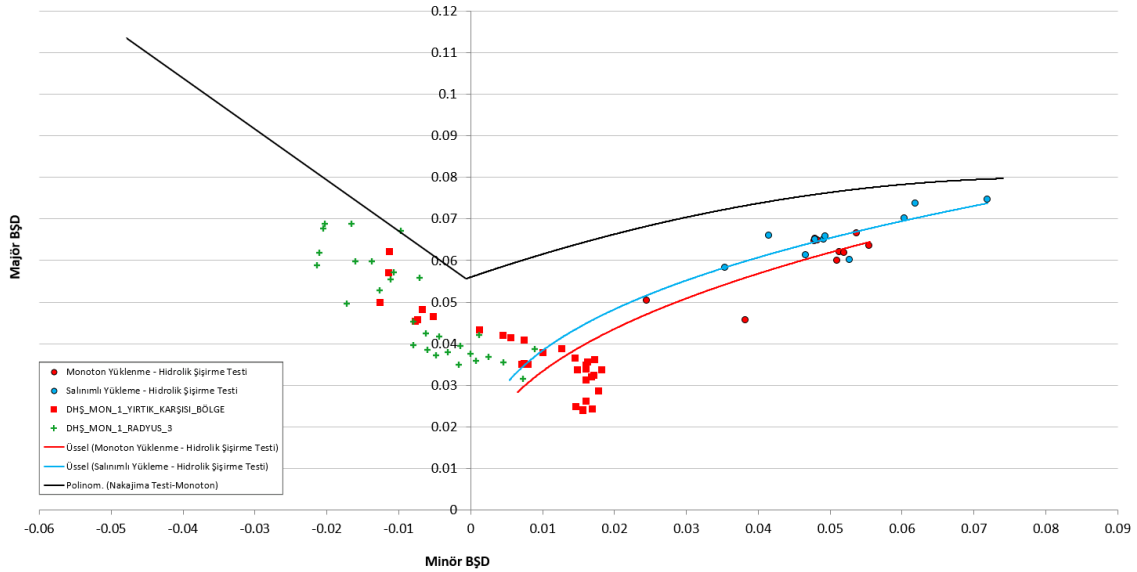
2 numaralı grid ise flanş bölgesinde kalmakta ve ilk olarak basma gerilmeleri altında şekillenmektedir. Ardından sürtünme ile kalıp içerisine doğru kayarak A radyusu üzerinde eğilerek ilerlemekte ve çekme gerilmeleri ile kalıp duvarına dayanarak şekillenmektedir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi 2 numaralı gridin tek eksenli çekme bölgesi dolaylarında olduğu görülmektedir.

3 numaralı grid de flanş bölgesinde kalmakta ve basma gerilmeleri altında kalarak şekillenmeye başlamaktadır. Ardından A radiusuna eğme ile temas ederek şekillenmektedir. Daha sonra kalıp duvarında sürtünerek kalıp içerisine doğru kaymaktadır. B radiusuna geldiği zaman serbest olarak gerdirmeye maruz kalmaktadır. Bu bölgedeki grid hem A radiusuna göre eğilmekte hem de B radiusuna geldiğinde, A radiusuna ters yönde gerdirilerek şekillenmektedir. Şekil 4.9 incelendiğinde 3 numaralı gridin düzlem birim şekil değiştirme ( $\epsilon_2=0$ ) bölgesinde kaldığı görülmektedir. Bu grid diğer gridlere göre daha fazla deformasyon çeşidine maruz kalmaktadır. Bu nedenle DHŞ numunelerindeki yırtılmalar da 2 ve 3 numaralı gridlerin olduğu bölgelerde meydana gelmektedir. Sac metallerde hasarın genellikle düzlem BŞD bölgesinde olması da yırtık bölgesinin bu gridlerde olmasını doğrulamaktadır.

4 numaralı gridin konumu hesaplandığında, gridin kalıp boşluğuna denk geldiği görülmektedir. Bu grid serbest şekilde gerdirilerek şekillenmektedir. Ancak numune kalıp içerisinde doğru kayarak şekillendiğinden dolayı majör ve minör BŞD'ler birbirlerine eşit olmamaktadır. Şekil 4.9 incelendiğinde 4 numaralı gridin gerdirme bölgesinde olduğu görülmektedir.

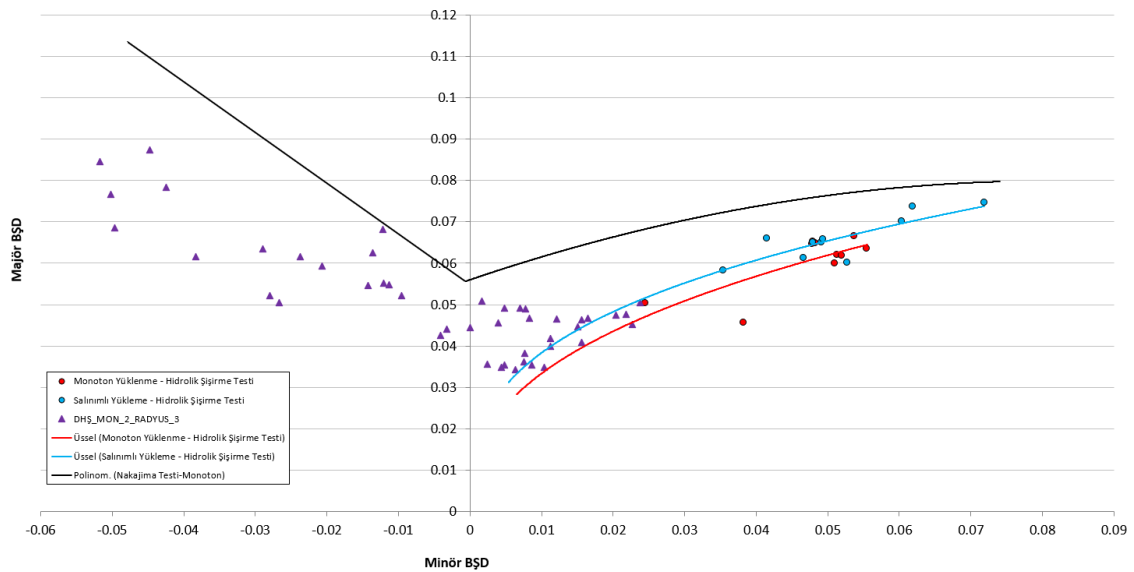


Şekil 4.9. DHŞ ile şekillendirilmiş numunedeki numaralandırılmış gridlerin BŞD değerleri



Şekil 4.10. DHŞ ile şekillendirilmiş numune BŞD ölçümleri

Tekrarlanabilirlik ve ölçüm doğruluğu açısından, ölçüm bölgesi daha geniş bir aralıkta tutulduğunda, Şekil 4.11’de görüldüğü gibi, 2. tekrar numunelerde de yukarıdaki değerlendirmeler doğrulanmıştır. Bu numunede de yırtık bölgesi içeriye doğru eğildiğinden ölçümler yırtık bölgesinden değil, yırtığın yan bölgesinden alınmıştır. Bu BŞD değerlerinin şişirme deneyi ile belirlenmiş olan ŞSE seviyelerinin üzerine çıkmış olması; sürtünmesiz olarak şekillendirilen şişirme deneyi ile oluşturulan ŞSE’nin, derin çekme ve DHŞ gibi sürtünme etkilerini içeren prosesleri temsil etmediği görülmüştür.



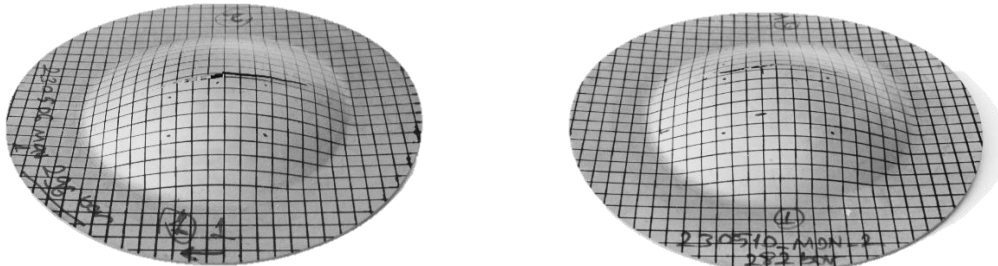
Şekil 4.11. DHŞ ile şekillendirilmiş 2.tekarar numune BŞD’leri (Yırtık karşısı bölge)



### 4.3.2. Şişirme ile küresel kubbe imalatı

Hidrolik şişirme deneyi ile oluşturulan ŞSE'nin serbest şişme ile sürtünmesiz olarak şekillendiği dikkate alınarak, 40 mm çapa sahip dairesel kalıpla gerdirme yapılmıştır. Monoton ve salınımlı yüklemeye küresel kubbeler üretilmiş ve elde edilen BŞD değerleri hem tekrarlı numuneler hem de monoton/salınımlı yükleme durumundaki BŞD'ler için yorumlanmıştır. Ayrıca 40 mm çaplı numunelerde kenardan yırtılma gözlemlenmiştir. Bu durumun numuneye serigrafi yöntemi ile gridler oluşturulurken fırınlama sırasındaki sıcaklığın neden olabileceği düşünülmüştür. Bundan dolayı küresel kubbe imalatı için kullanılan 72 mm çaplı dairesel numunelere gridleme sırasında fırınlama şartları olan 250 °C sıcaklıkta 45 dk bekletilme işlemi gridler yapılmadan uygulanmıştır. Bu numuneler ile fırınlama yapılmayan numunelere küresel kubbe imalatında olduğu gibi hidrolik şişirme uygulanmıştır. Bu deneyler Ek-4'te verilmiştir.

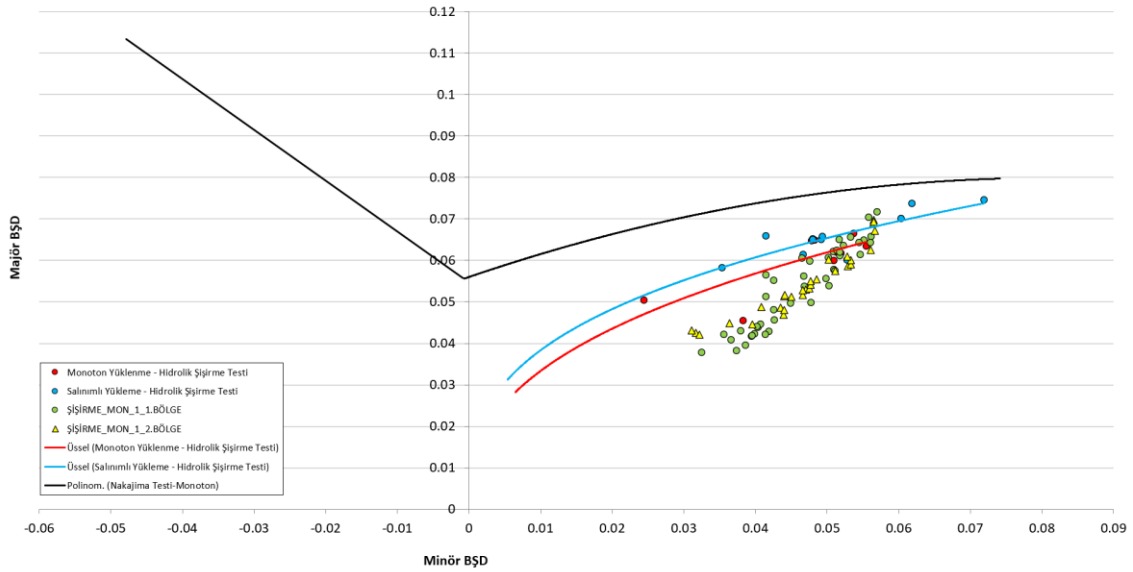
Monoton yüklemeye ile şekillendirilen iş parçaları iki tekrar olarak yapılmış ve Şekil 4.12'deki parçalar üretilmiştir. BŞD değerleri de Şekil 4.13 ve 4.14'te gösterilmiştir.



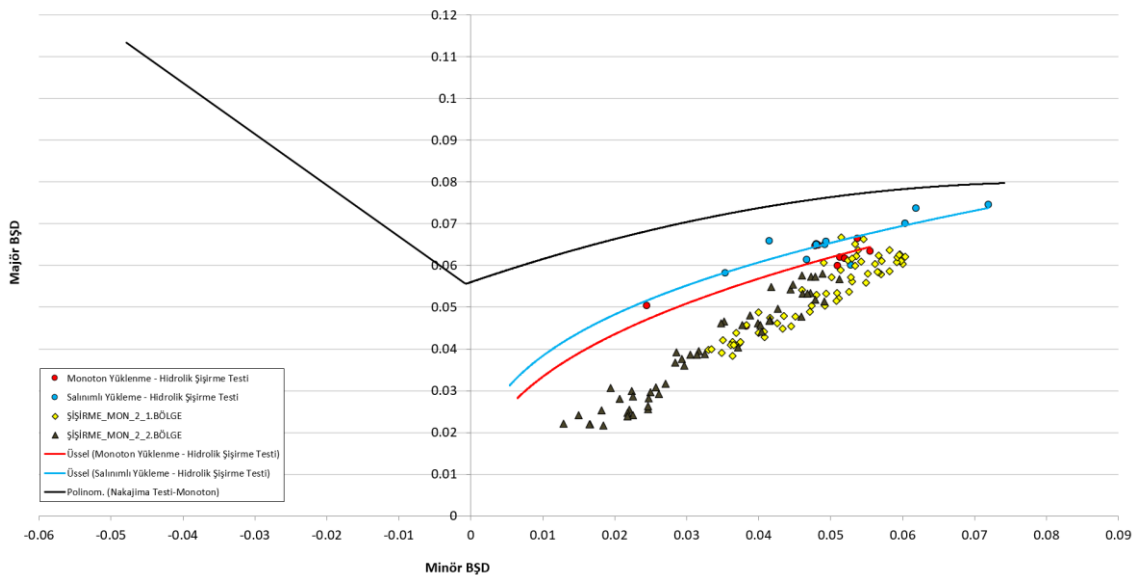
a)

b)

Şekil 4.12. a) Şişirme deneyi 1.tekrar. b) Şişirme deneyi 2.tekrar



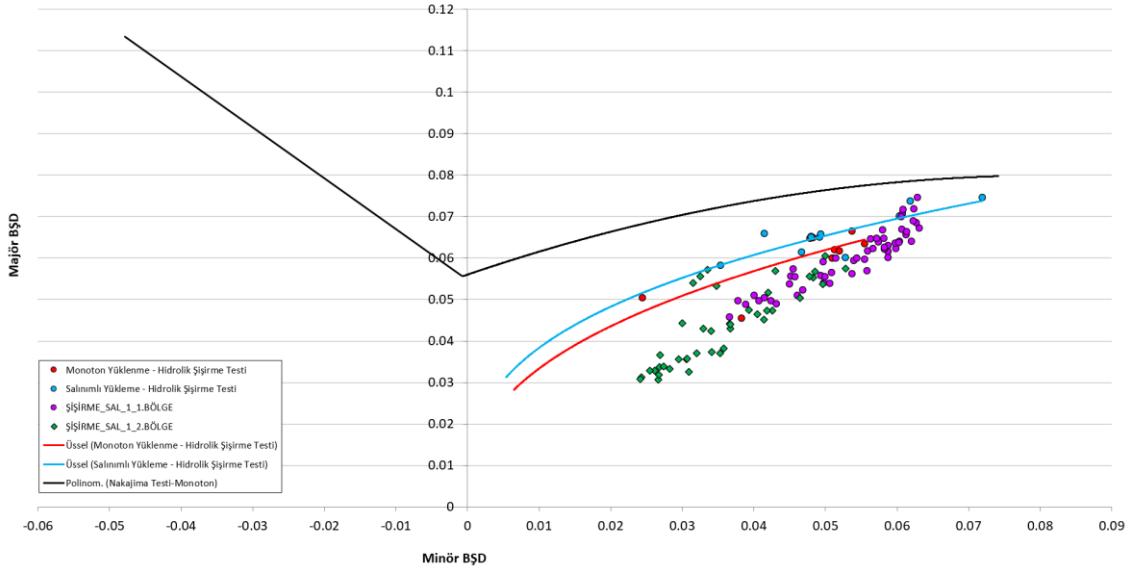
Şekil 4.13. Şişirme deneyi ile monoton şekillendirilmiş 1.tekrar numune BŞD ölçümleri



Şekil 4.14. Şişirme deneyi ile monoton şekillendirilmiş 2.tekrar numune BŞD ölçümleri

Şekil 4.13'te görülen yeşil dairelerin büyük kısmı ve Şekil 4.14'teki sarı karelerin üç tanesi dışındaki tüm BŞD'ler beklenildiği gibi monoton ŞSE'nin altında kalmışlardır. Aynı zamanda Nakajima testi ile belirlenen ŞSE'den de çok uzaktadırlar. Dolayısıyla şişirme deneyiyle belirlenen ŞSE'nin, sürtünme içermeyen şekillendirme proseslerini daha iyi temsil ettiği ortaya koyulmuştur.

Monoton ve salınlı yüklemenin arasındaki farkları görebilmek için şişirme deneyi salınlı yükleme koşullarında da yapılmıştır. Salınlı şekillendirmedeki BŞD ölçümleri 4.15'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.15.** Salınlı yükleme ile şekillendirilmiş küresel kubbe BŞD değerleri

Salınlı yükleme ile şekillendirilmiş parçanın hem majör ve hem de minör BŞD'leri, monoton duruma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla durum çalışmalarından da salınlı şekillendirmenin monoton yüklemeye göre şekillendirilebilirliği artırdığı sonucu teyit edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışma, Ti-6Al-4V malzemesinin oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. İki farklı yöntem olan Nakajima testi ve hidrolik şişirme deneyi kullanılarak monoton ve salınımlı yükleme durumları için üç farklı ŞSD elde edilmiş ve sonuçlar aşağıda maddelerde özetlenmiştir:

1. Nakajima testi ve hidrolik şişirme deney verileri karşılaştırıldığında, Nakajima testi ile elde edilen ŞSE'nin daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bu farkın sebebi, Nakajima testinde ıstampa ve sac arasındaki sürtünmenin en aza indirildiği düşünülse de hidrolik şişirme deneyindeki sıvı sürtünmesinden daha fazla olması ve ıstampayla sac arasındaki sürtünmenin, hasar anında bölgesel olarak yoğunlaşarak mikro çatlakların ilerleyişini geciktirerek malzemenin daha yüksek oranda şekil değiştirmesine neden olması ve bundan dolayı da BŞD değerlerini artırmasıdır.
2. Hidrolik şişirme deneylerinde, salınımlı yükleme ile elde edilen ŞSE monoton yüklemeye göre %8.08 oranında yukarı yönde ötelenmiştir. Bu bulgu, salınımlı yükleme yönteminin Ti-6Al-4V malzemesinin şekillendirilebilirliğini artırdığı anlamına gelmektedir. Buna ilaveten şekillendirme sırasında sınır minör BŞD değeri de sağa doğru artmıştır. Bu etki de dikkate alındığında, ŞSE'deki iyileşme %23.4 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle salınımlı yüklemenin şekillenebilirlikte önemli bir artış sağladığı sonucuna varılmıştır.
3. DHŞ ile şekillendirilen silindirik parçaların BŞD değerleri, Nakajima testi ile belirlenmiş olan ŞSE'nin altında kalmış ancak şişirme ile elde edilen ŞSE'nin üzerine çıkmıştır. Bu nedenle, sürtünme içeren şekillendirme proseslerinde Nakajima testiyle belirlenen ŞSE'nin kullanılması gerekir.
4. Buna karşın serbest şişirme ile şekillendirilen küresel kubbe iş parçalarının, Nakajima testi ile elde edilen ŞSE seviyesine ulaşmadan ve şişirme deneyi ile belirlenen ŞSE seviyelerinde hasara uğradığı görülmektedir. Bu durum,

sürtünme içermeyen şekillendirme proseslerinde şişirme deneyi ile belirlenen ŞSE'nin kullanılmasının gerektiği sonucunu doğurur.

Sonuç olarak, Ti-6Al-4V malzemesinin oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için Nakajima testi, monoton ve salınımlı hidrolik şişirme deneyinden elde edilen ŞSE'lerin her üçünün de kullanılması gerekir. Hangi ŞSE'nin ve/veya ŞSE'lerin kullanılacağı şekillendirme prosesine veya aşamalarına göre değişir. Salınımlı yükleme monoton yüklemeye göre şekillendirilebilirliği anlamlı ölçüde artırmaktadır. Bu bulgular Ti-6Al-4V malzemesinin endüstriyel uygulamalarda, şekillendirme işlemlerinin optimizasyonunda ve hasar tahmininde, kullanılmasında önemli bir rol oynar.

## 5.2. Öneriler

1. Salınımlı yükleme durumunda, Nakajima testiyle şekillendirilebilirliğin artırılabilceğini daha iyi belirlemek için geniş bir değişken yükleme aralığı kullanılabilir.
2. Malzeme karakterizasyonu yapılarak salınımlı şekillendirmenin içyapı ile ilişkisi ortaya koyulabilir.

## KAYNAKLAR

- Altan, T., & Tekkaya, A. E. (Eds.). (2012). *Sheet metal forming: fundamentals*. Asm International.
- Broomhead, P., Grieve, R. J., 1982, The Effect of Strain Rate on the Strain to Fracture of a Sheet Steel Under Biaxial Tensile Stress Conditions, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 104(2), 102-106.
- Dhal, A. K., Panda, A., Kumar, R. ve Sahoo, A. K., 2021, Different machining environments impact analysis for Ti-6Al-4V alloy (Grade 5) turning process: A scoping review, *Materials Today: Proceedings*, 44, 2342-7.
- Dilmeç, M., 2012, 2024-T4 alüminyum sacların şekillendirme sınır eğrilerinin kalınlığa göre değişimi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 12-34.
- Emilie, H. et al., 2008, Development of Forming Limit Diagrams of Aluminum and Magnesium Sheet Alloys at Elevated Temperatures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17 (3), 288-296.
- Grumbach, M.; Sanz, G.: Influence of various parameters on forming limit curves (in French), *Rev. de Metallurgie* 61 (1972),273-290.
- Hasek, V. (1978). Research and theoretical description concerning the influences on the FLDs. *Blech Rohre Profile*, 25, 213-220.
- Keeler, S.P. and Backofen, W.A., 1963, Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches, *Transactions of American Society for Metals*, 56, 25-48.
- Lamberts, S., 2005, Effect of EDT on Formability of Aluminum Automotive Sheet, NGTC (Novelis Global Technology Centre) Report.
- Lăzărescu, L., COMȘA, D. S., Nicodim, I., Ciobanu, I., & Banabic, D. 2012. "Characterization of plastic behaviour of sheet metals by hydraulic bulge test", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, 275-279.
- Lenzen, M., Merklein, M. 2018. "Improvement of numerical modelling considering plane strain material characterization with an elliptic hydraulic bulge test", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(1), 6.
- Li, F. Q., Mo, J. H., Li, J.J., Huang, L., Zhou, H. Y., 2013, Formability of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet in magnetic pulse bulging, *Materials and Design*, 52, 337-344.
- Loh-Mousavi, M., Mori, K., Hayashi, K., Maki, S., Bakhshi, M., 2007, 3-D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes, *In Key Engineering Materials*, 340, 353-358.
- Marciniak, Z., Hu, S.J., Duncan, J.L., 2002, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, London.

- Marciniak, Z., Kuczynski, K., 1967, Limit strains in the processes of stretch forming sheet metal, *In. J. Mech.*, 9, 609-620.
- Meuleman, D. J., Siles, J. L., & Zoldak, J. J. (1985). The Limiting Dome Height Test for Assessing the Formability of Sheet Steel. *SAE Transactions*, 94, 22–30.
- Mori, K., Patwari, A. U., Maki, S., 2003, Finite element simulation of hammering hydroforming of tubes, *Computational Fluid and Solid Mechanics*, 498-501.
- Mouritz, A. P., 2012, Introduction to aerospace materials. In: Introduction to Aerospace Materials, Eds, p. 1-14.
- Nghishiyeleke, Eliaser & Mashingaidze, Melvin & Ogunmokun, Adedayo. (2018). Formability characterization of aluminium AA6082-O sheet metal by uniaxial tension and Erichsen cupping tests. *International Journal of Engineering and Technology*. 7. 6768-6777. 10.14419/ijet.v7i4.23870.
- Öztürk, F. et al., 2009, Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability, The 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Turkey, June 18-21, 41-49.
- Öztürk, O., 2022, Salınlı Hidroşekillendirme Deneysel İncelenmesi ve Mikroyapısal Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 46-47.
- Paraianu, L. et al., 2005, Modeling of the Forming Limit Diagrams Using the Finite Element Method, The 8th International Conference of the European Scientific Association for Material Forming ESAFORM.
- Rees, D. W. A. 1995. “Plastic Flow in The Elliptical Bulge Test”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 37(4), 373-379.
- R. Hill, On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, pp. 19–30, 1952.
- Smith, P.E. and Lee, D., 1997, Determination of Forming Limit for Aluminum Alloys, IBEC 98, Detroit, SAE Publication-331, 2, 21-28.
- Stoughton, T.B. and Zhu, X., 2004, Review of Theoretical Models of the Strain-Based FLD and Their Relevance to the Stress-Based FLD, *International Journal of Plasticity*, 20, 1463–1486.
- Türköz, M., 2022, Salınlı sac hidroşekillendirme prosesiyle Ti-6Al-4V alaşımının şekillendirilebilirliğinin iyileştirilmesi ve mikroyapıyla ilişkilendirilmesi, *TÜBİTAK 219M489, Konya*, 103.
- Türköz, M., 2009. Al 2024 ve Al 5754 Alaşım Alüminyum Sacların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin Araştırılması, “Yüksek Lisans” tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 140, Konya.
- Yang, L. F., Yi, L. ve Guo, C., 2011, Influence of Pressure Amplitude on Formability in Pulsating Hydro-Bugling of AZ31B Magnesium Alloy Sheet, *Applied*

Mechanics and Materials, 128-129, 397-402.

Yang, L., Tang, D., He, Y., 2017, Describing tube formability during pulsating hydroforming using forming limit diagrams, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 52(4), 249-257.

Yao, W., Lang, L. H., Gao, T. J., & Zhang, Q. D. 2016. "Flow property of AA2B06 sheet using overlapping elliptical bulge test", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(8), 2179-2187.

Yong, X., Shi-Hong, Z., Ming, C., Hong-Wu, S., 2014, Formability improvement of austenitic stainless steel by pulsating hydroforming, *Journal of Engineering Manufacture*, 1-7.





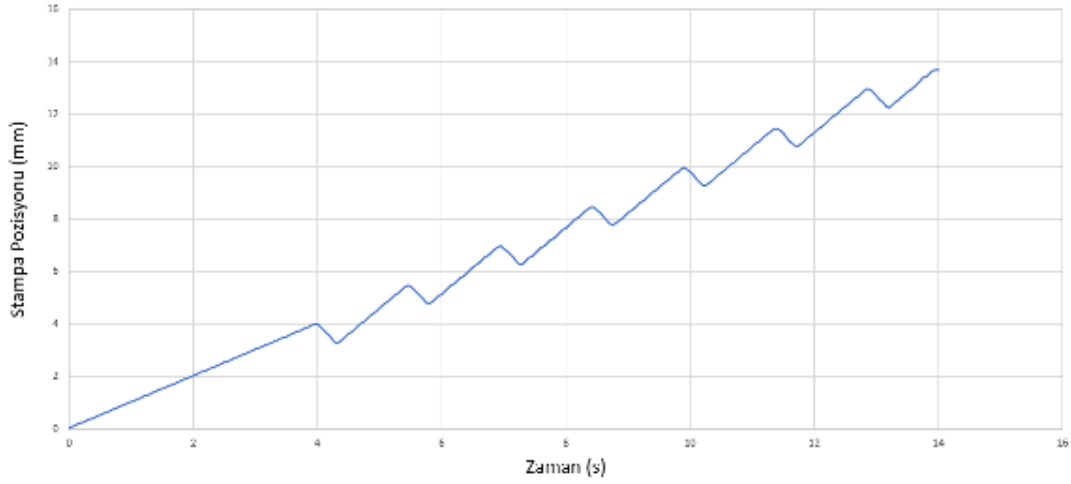
## EKLER

### EK-1 Nakajima Testi ile Değişken Yükleme Durumunda Yapılan Deneyler

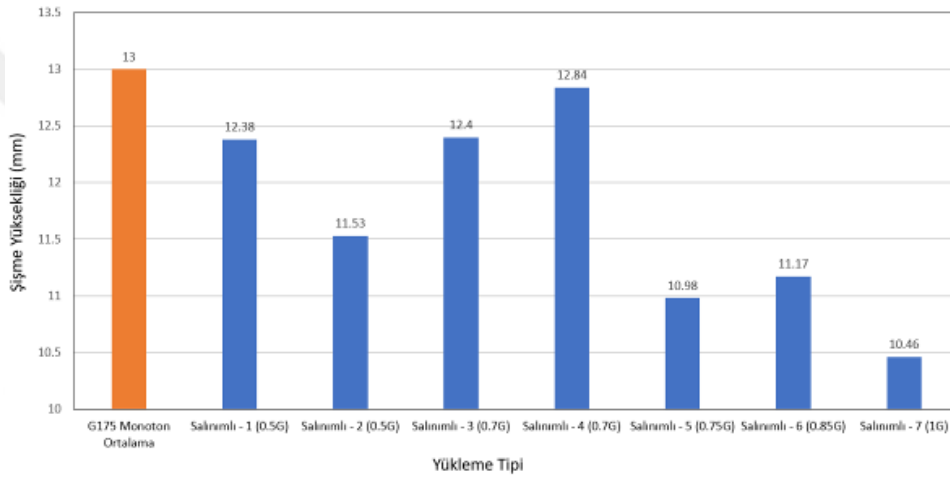
Nakajima testinde ıstampaya farklı salınım parametreleri uygulanarak G175 ve G75 numuneleri ile testler gerçekleştirilmiştir (Şekil Ek-1.1.). İstampaya 0.7 mm geri çekme uygulanarak yapılan Nakajima testi için girilen eğri Şekil Ek-1.2’de gösterilmiştir. G175 numunesi için ıstampaya 0.5, 0.7, 0.85 ve 1 mm geri çekme uygulanarak salınımlı yükleme uygulanmıştır. Elde edilen yükseklikler Şekil Ek-1.3’te gösterilmiştir. Farklı geri çekme miktarlarında şişme yüksekliğinde artış görülmemiştir. G75 numunesi için ıstampaya 0.7 ve 0.5 mm geri çekme uygulanarak salınımlı yükleme uygulanmıştır. Ancak şişme yüksekliklerinde tekrarlanabilir bir artış görülmemiştir. Elde edilen şişme yükseklikleri Şekil Ek-1.4’te gösterilmiştir.



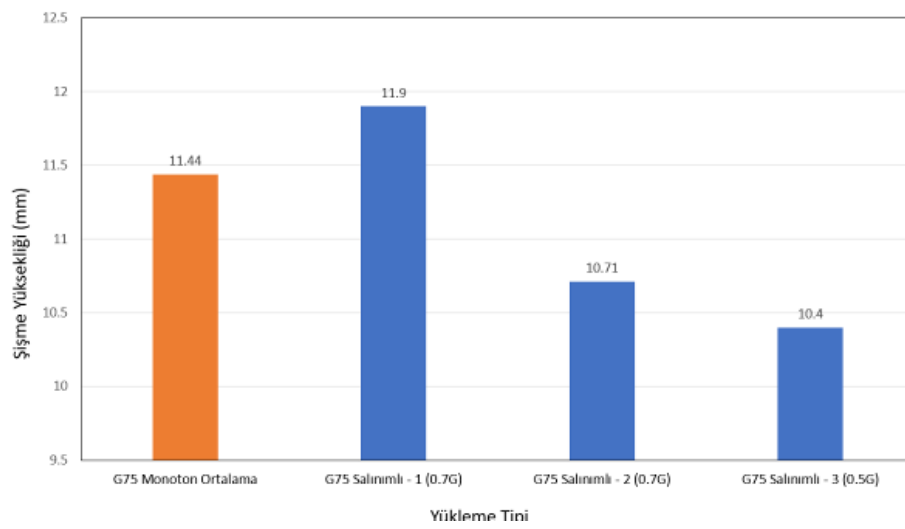
Şekil Ek-1.1. Farklı salınım parametreleri uygulanarak gerçekleştirilmiş Nakajima testleri



**Şekil Ek-1.2.** Nakajima testi için 0.7mm geri çekme olarak stampaya uygulanmış eğri

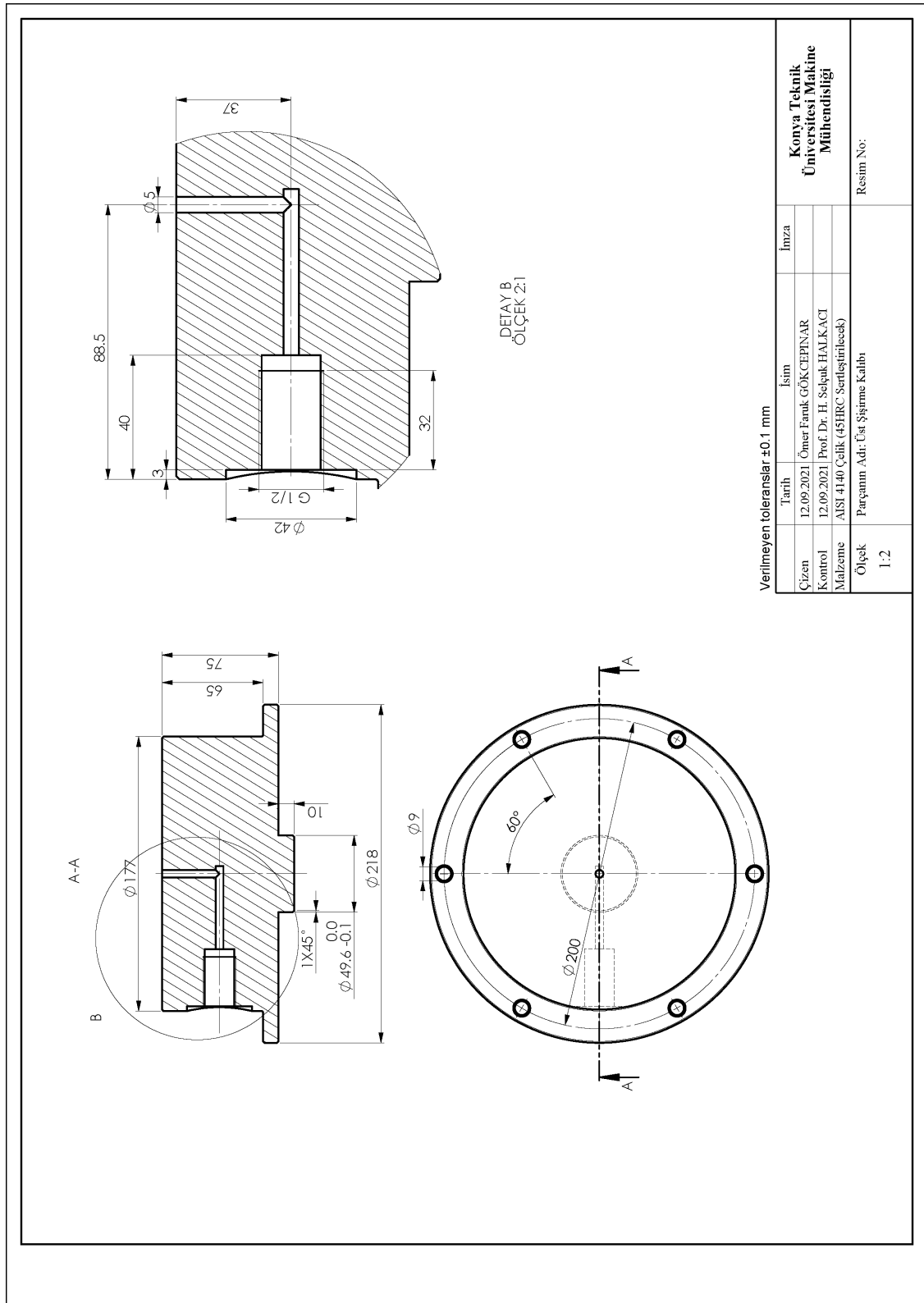


**Şekil Ek-1.3.** G175 numunesi için farklı geri çekme miktarları uygulanarak elde edilmiş olan şişme yükseklikleri

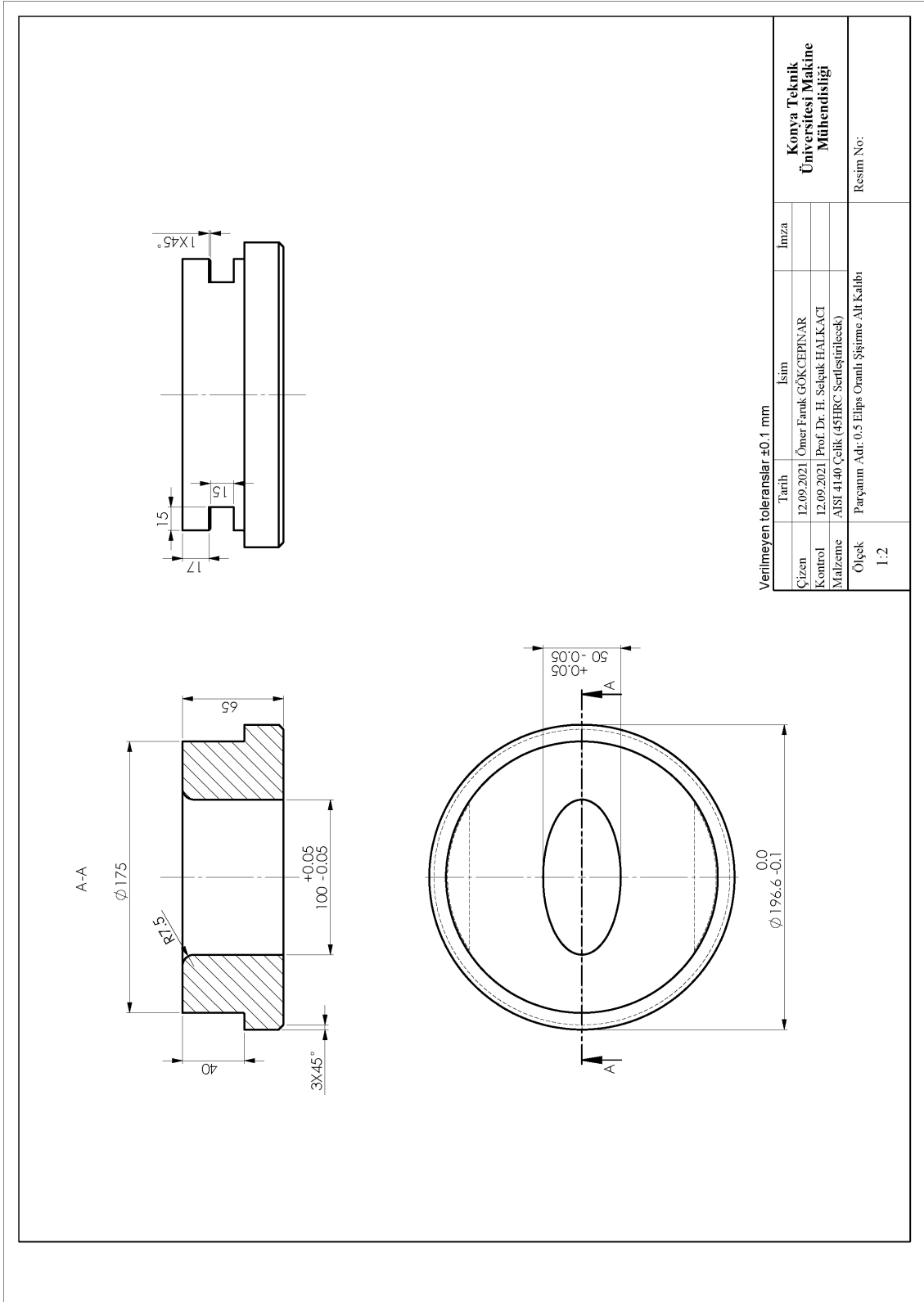


**Şekil Ek-1.4.** G75 numunesinin farklı geri çekme miktarlarındaki şişme yükseklikleri

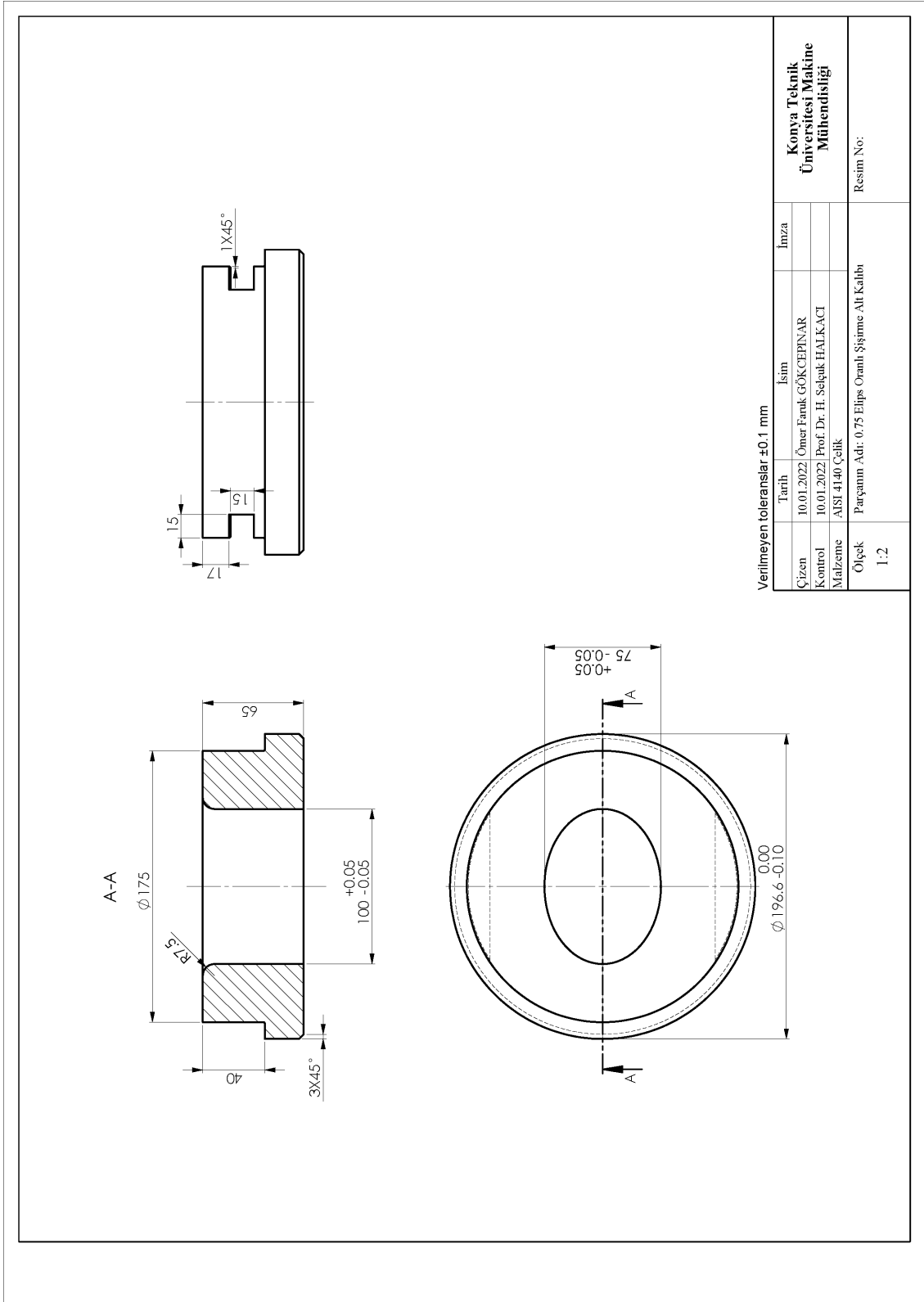
## EK-2 Tasarılan Elips Kalıpların İmalat Resimleri



Şekil Ek-2.1. Üst şişirme kalıbı imalat resmi



Şekil Ek-2.2. 0.5 elips oranlı alt kalıp



Şekil Ek-2.3. 0.75 elips oranlı alt kalıp

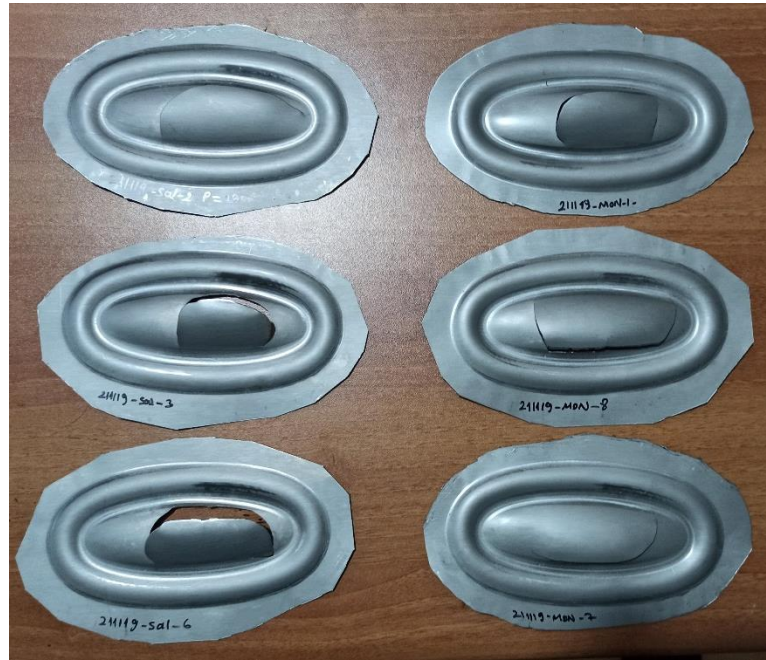
### EK-3 BŞD<sub>0</sub> Noktasını Belirlemek İçin Yapılan Çalışmalar

BŞD<sub>0</sub> noktasını hidrolik şişirme deneyi ile belirlemek için elips oranı küçük kalıp kullanmak gerekmektedir. Bunun sebebi BŞD<sub>0</sub> noktasının, minör BŞD değerinin sıfıra en yakın olduğu nokta olmasıdır. Bundan dolayı ilk olarak, analizlerde belirlenen kalıp parametreleri kullanılarak 0.25 oranlı elips kalıplar imal edilmiştir (Şekil Ek-3.1.).



Şekil Ek-3.1. 0.25 Elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı

0.25 oranlı elips kalıplarla yapılan deneylerde başarılı şekilde şekillenme sağlanamamış ve numuneler kalıp radyusundan yırtılmıştır (Şekil Ek-3.2.).



Şekil Ek-3.2. 0.25 Elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı ile yapılan deneyler

Numunelerde radyus bölgesindeki yırtılmaların kilitleme çubuğundan kaynaklandığı düşünülerek kilitleme çubuğu kalıptan kaldırılmış ve deneyler tekrar yapılmıştır (Şekil Ek-3.4.). Bu şekilde yapılan deneylerde Şekil Ek-3.4.'te görüldüğü gibi yırtılma bölgesi değişmiş ancak merkezden yırtılma sağlanamadığı için sınır BŞD'ler hesaplanmamıştır.



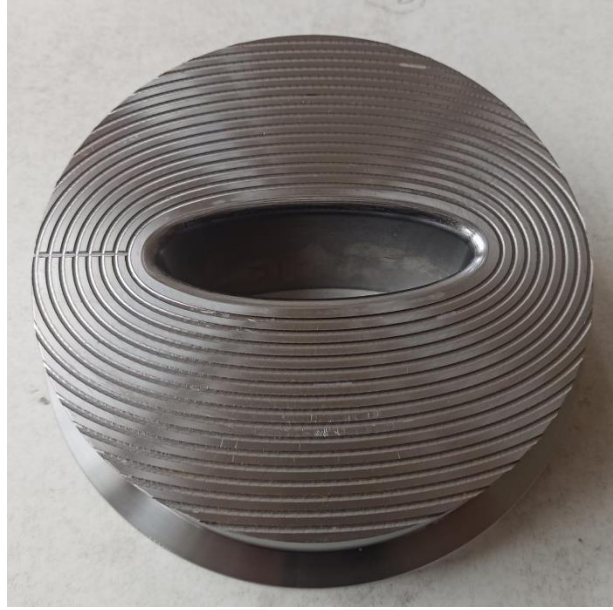
Şekil Ek-3.3. 0.25 Elips oranlı hidrolik şişirme kalıbının kilitleme çubuğunun kaldırılması



Şekil Ek-3.4. Kilitleme çubuğu kaldırıldıktan sonra yapılan deneyler

0.25 elips oranlı kalıpla merkezden yırtılma sağlanamadığı için elips oranı 0.3 olacak şekilde yeni bir kalıp imal edilmiştir. Kalıp yüzeyine numunelerin kaymadan şekillenebilmesi için ince kanallar açılmıştır (Şekil Ek-3.5.).





**Şekil Ek-3.5.** 0.3 elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı

Bu kalıpla yapılan deneylerde kilitleme çubuğu olmadığı halde numuneler şekillenme sırasında kaymadan yırtılabilmiştir. Ancak merkez bölgeden yırtılma oluşmamıştır (Şekil Ek-3.6.).



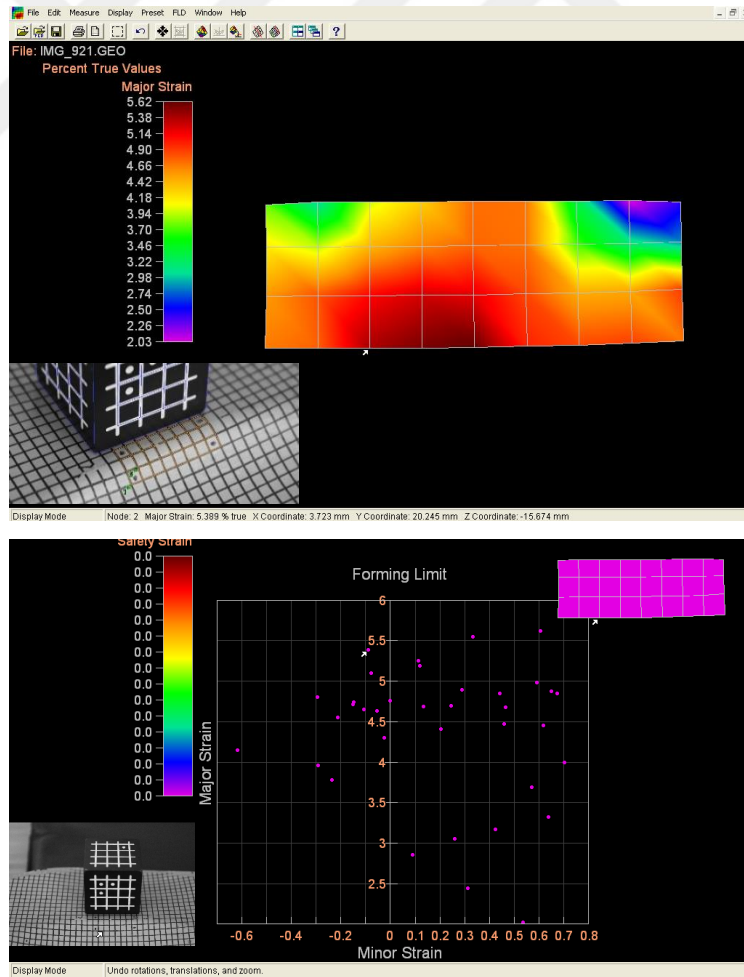
**Şekil Ek-3.6.** 0.3 elips oranlı hidrolik şişirme kalıbı ile yapılan deneyler

Numuneler elipsin uzun kenarından yırtılmaktadır. Radyus bölgesindeki yırtılmanın nedenini araştırmak için numune yırtılma basıncından çok az önce şekillendirme durdurulmuş ve bu bölgelerin BŞD değerleri ölçülmüştür (Şekil Ek-3.7).



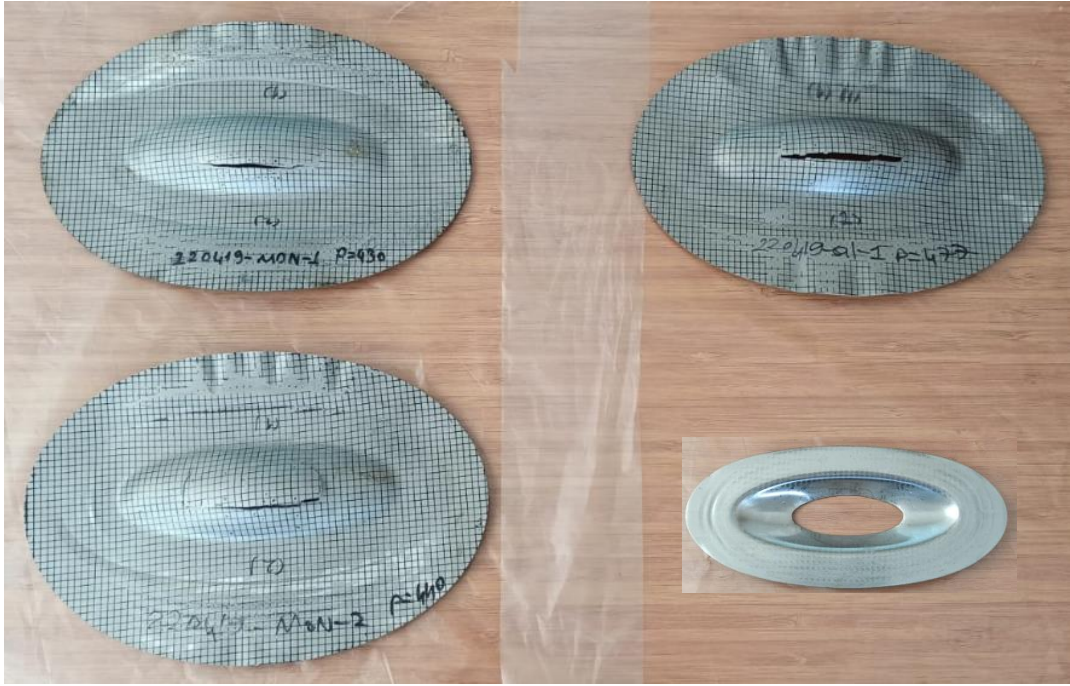
Şekil Ek-3.7. Yırtılmamış numuneden ölçüm alınan bölge

Yırtılacak olan bölgedeki minör BŞD'ler neredeyse sifıra yakınken, majör BŞD'ler 0.055 seviyelerinde olmaktadır. Ölçüm sonuçları numunelerdeki radyusta oluşan BŞD değerlerinin Nakajima testi ile elde edilen ŞSE'deki BŞD<sub>0</sub> değerlerinde yırtıldığını göstermiştir. Dolayısıyla numunedeki hasar bölgesi sürtünme etkilerine maruz kalmakta ve serbest şişirme prosesini temsil etmemektedir (Şekil Ek-3.8.).



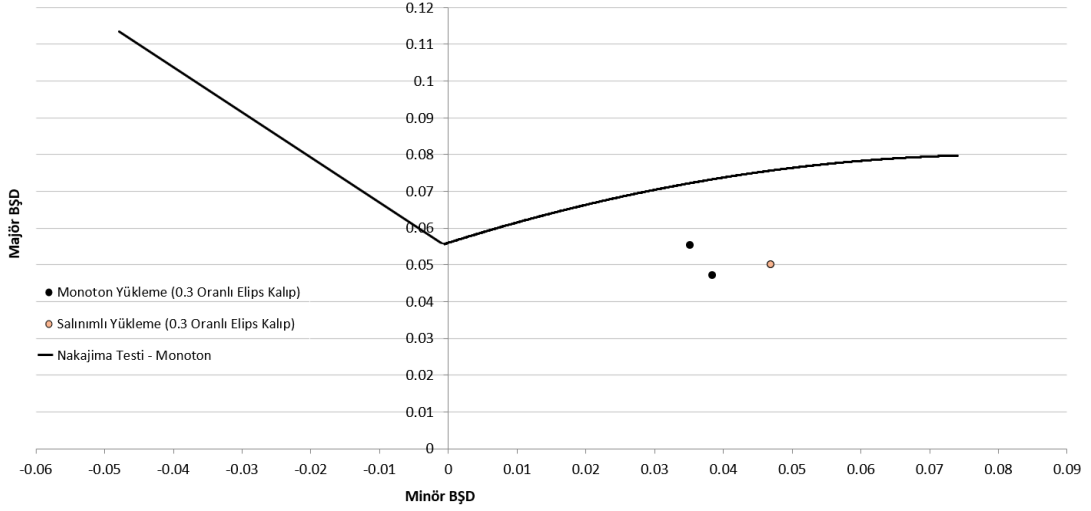
Şekil Ek-3.8. Radyus bölgesindeki BŞD değerleri

0.3 Elips oranlı kalıpta merkezden yırtılmayı sağlayabilmek için  $t=1\text{mm}$  paslanmaz çelik kestirilmiştir. Paslanmaz çeliğin üzerine numune yerleştirilerek aynı anda şekillendirilmiş ve numune ortadan yırtılmaya zorlanmıştır. Bu şekilde yapılan deneylerde numuneler merkezden yırtılmış ancak şekillenme sırasında kalıp içerisinde kaymıştır (Şekil Ek-3.9.). Deneylere devam edildiğinde ara sacdan dolayı numuneler kayarak şekillenmiş ayrıca kalıp arasından sızdırma sorunu oluşmuştur. Sızdırmayı engellemek için numune üzerine kauçuk kesilmiştir. Kauçuk hareketli tabla arasında sıkıştırarak sızdırmazlığı sağlasa da numune ile kalıp arasında sürtünmeyi azaltmış ve numunelerin kalıp içerisine daha fazla kaymasına sebep olmuştur.



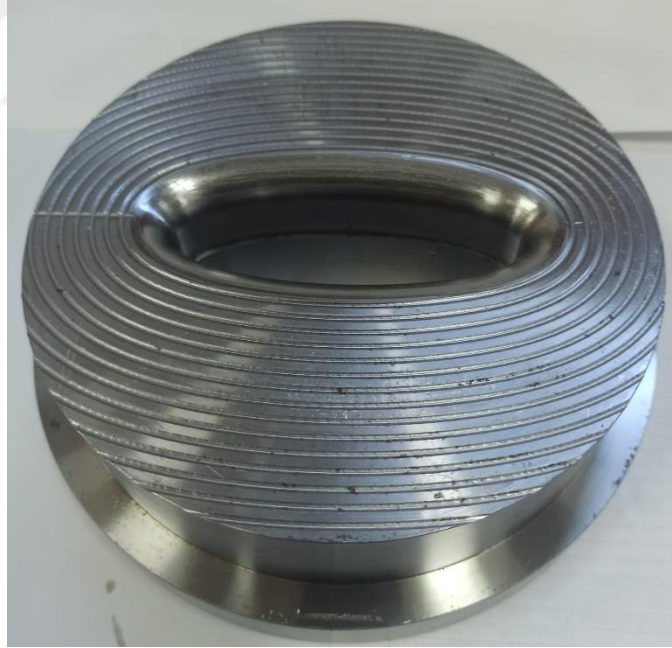
Şekil Ek-3.9. Ara sac kullanılarak yapılan deneyler

Elips oranı 0.3 olan kalıpla yapılan deneylerde standartlara uygun olarak merkez bölgeden yırtılan 3 adet deney numunesinin BŞD dağılımı Şekil Ek-3.10'da ŞSD üzerinde gösterilmiştir. Numuneler, merkezden hasara uğramış ancak şekillenme esnasında kalıp içerisine kaymıştır. ŞSD'den de görüldüğü gibi kayarak şekillenen numunelerin sınır BŞD değerleri minör BŞD boyunca ötelenmiş ve istenilen bölgeden elde edilememiştir.



Şekil Ek-3.10. 0.3 Elips oranlı kalıpta yapılan deneylerin BŞD dağılımları

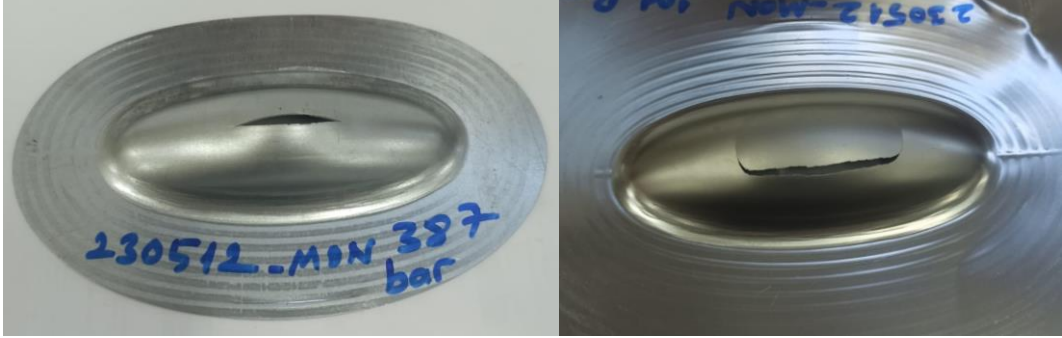
0.3 oranlı elips kalıbın radyusları, analiz yapılarak sacın yırtılmayacağı emniyetli bir değer olan 7.5 mm olarak belirlenmişti. Ancak radyus bölgesinden yırtılma engellenememiştir. Bu durumun kalıp radyusundan olabileceği düşünülerek radyus değeri 12.5 mm olarak revize edilmiştir (Şekil Ek-3.11.).



Şekil Ek-3.11. Radyusu 12.5 mm olarak revize edilen şişirme kalıbı

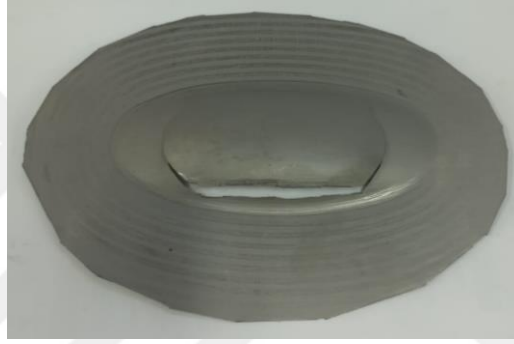
Kalıp radyusu yenilenen elips kalıpla deneyler yapılmış ancak numuneler radyus bölgesinden yırtılmaya devam etmiştir. Durumun kalıpla ilgili olup olmadığını araştırmak için farklı saclarla deneyler yapılmıştır. Paslanmaz çelik ve DP600 çeliği merkezden yırtılmıştır. Ancak Ti-6Al-4V malzeme merkezden yırtılmamıştır. Bu durum radyus

bölgesinden olan yırtılmanın malzeme ile ilgili olduğunu göstermektedir. Sünek malzemelerin merkezden yırtılması sağlanırken gevrek malzemelerin bu kalıpla şekillendirmeye uygun olmadığı anlaşılmıştır (Şekil Ek-3.12.).



a) DP600

b) Paslanmaz çelik



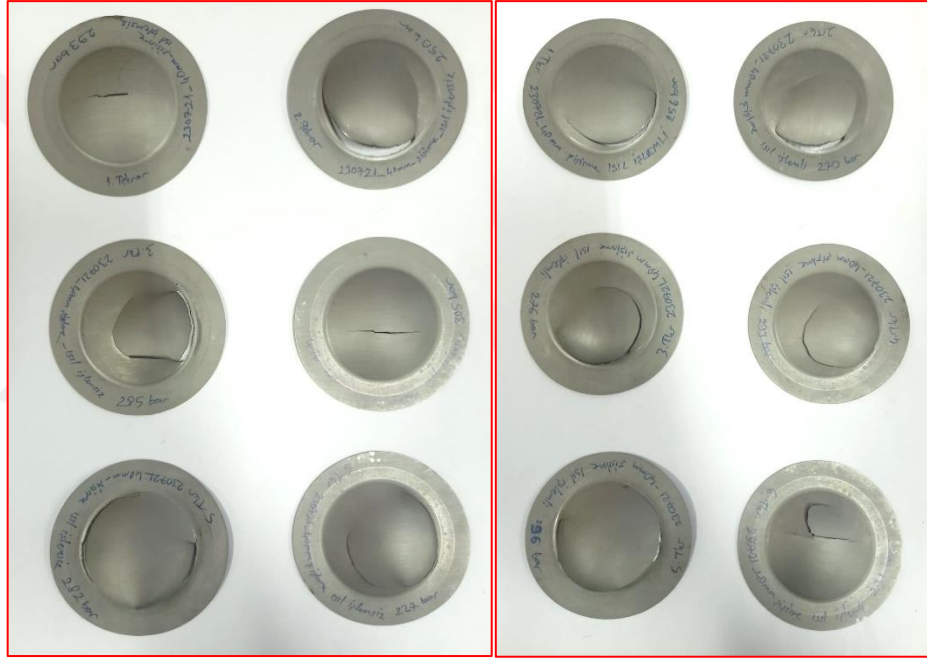
c) Ti-6Al-4V

Şekil Ek-3.12. Şişirme kalıbı ile farklı malzemelerin şekillendirilmesi



#### EK-4 Gridleme İşleminin Malzemenin Şekillenebilirliğine Etkisi

40 mm çaplı numunelerde küresel kubbeler imal edilirken kalıp radyusundan yırtılmalar gözlemlenmiştir. Bu durumun numuneye serigrafi yöntemi ile gridler oluşturulurken fırınlama sırasındaki sıcaklığın neden olabileceği düşünülmüştür. Bundan dolayı küresel kubbe imalatı için kullanılan 72 mm çaplı dairesel numunelere gridleme sırasında fırınlama şartları olan 250 °C sıcaklıkta 45 dk bekletilme işlemi gridler yapılmadan uygulanmıştır. Bu numuneler ile fırınlama yapılmayan numunelere küresel kubbe imalatında olduğu gibi hidrolik şişirme uygulanmıştır. Yapılan deneyler Şekil Ek-4.1’de gösterilmiştir.



a) Fırınlanmamış numuneler

b) 250°C’de 45dk fırınlanmış numuneler

Şekil Ek-4.1. Fırınlanmamış ve fırınlanmış numuneler ile yapılan deneyler

Fırınlanmamış numunelerde 6 tekrar olarak yapılan deneylerde 2 adet numune ortadan yırtılmıştır. 250°C’de 45 dk fırınlanmış numunelerde ise 6 adet deneyden 1 tanesi ortadan yırtılmıştır. Yırtılma basınçlarının ortalaması fırınlanmamış numunelerde 273 Bar, fırınlanmış numunelerde 280 Bar olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde kenardan yırtılma durumunun numunelerin gridlenmesi sırasında uygulanan ısı işleminden kaynaklanmadığı görülmüştür. Kenar bölgeden olan yırtılmanın kalıp radyusunun küçük olması veya malzemedeki kararsızlıklardan kaynaklanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.